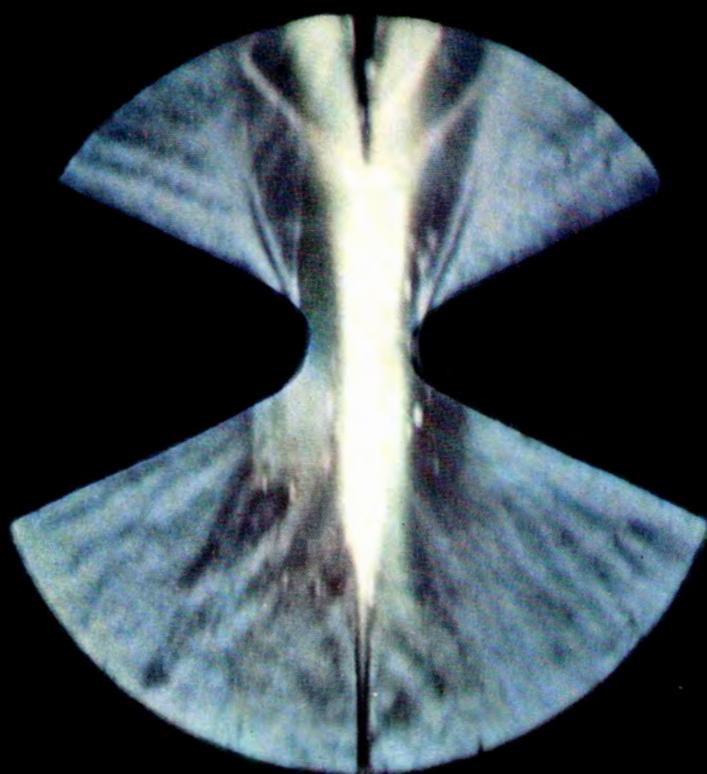


MITSUBISHI DENKI

三菱電機

研究所創立 25 周年記念特集

気流中のアーチ



臨時増刊

5
VOL.35 1961

計数形電子計算機 MELCOM-LD1

本機は当社研究所で研究試作した全トランジスタ化計数形電子計算機で、演算の高速化、入出力方式、インデックス方式などに多くの新しい試みがなされ、国産機としては注目すべき機能を有している。

なお本機を基本とした商品化は目下無線機製作所で進んでいる。

主要性能

演算制御方式：

直列内部2進数式

記憶装置：

遅延線形磁気ドラム (4046 語)

命令形式：

変形2アドレス方式

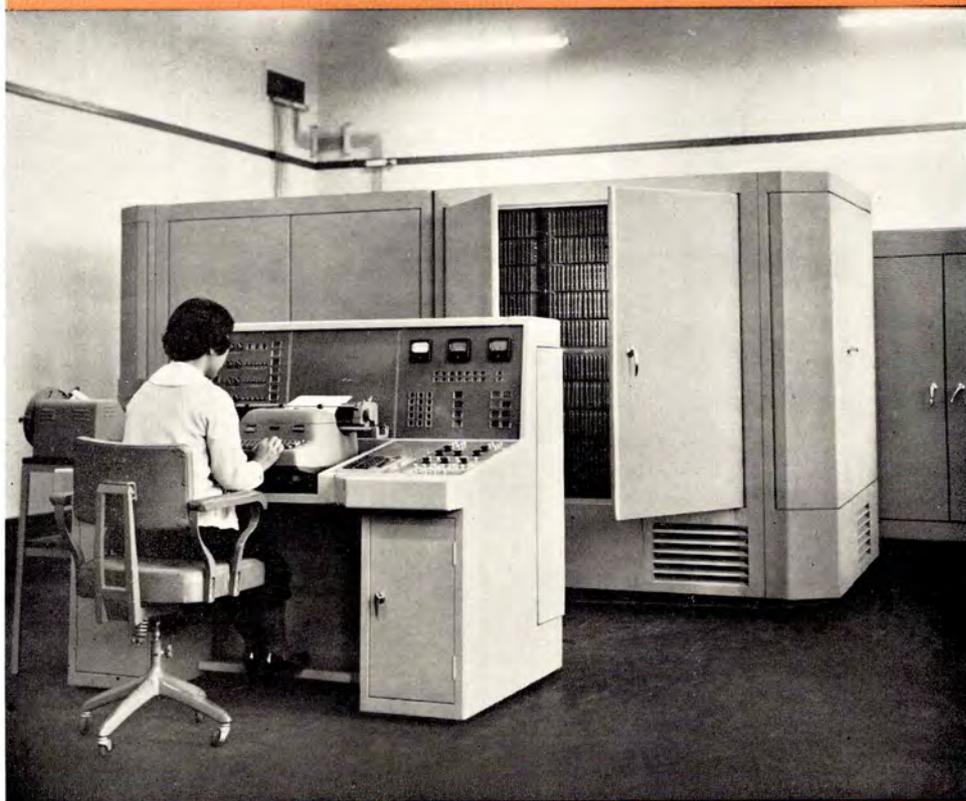
インデックス・レジスタ4個

語構成：

1語33ビット (数値語は倍長精度可能)

演算速度：

	固定小数点	浮動小数点
加減算	0.165 ms	0.66 ms
乗算	0.66 ms	0.66 ms
除算	2.15 ms	1.65 ms



固体用二重収レン質量分析器 (MS-115形)

本器は京大に納入したMattauch形二重収レン質量分析器の2号器で、主要寸法は1号器と変わらないが実用上の見地から全面的に設計が変更されてはるかに小形コンパクトで使いやすいものとなった。

分解可能範囲

質量数 M/e 1~580

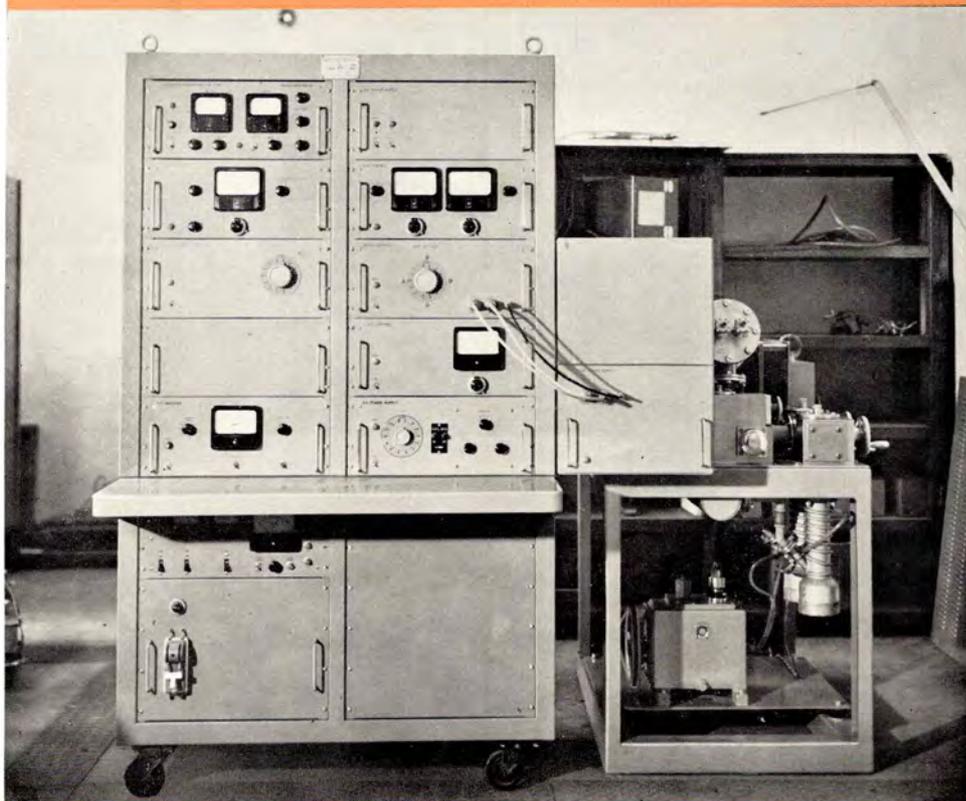
分解能

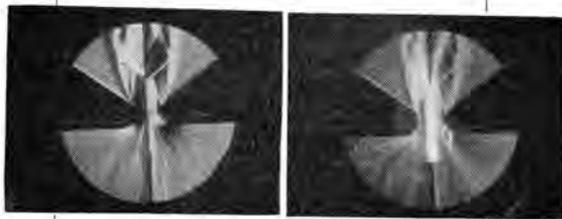
500~1,000

(スリット幅により異なる)

感度

1 ppm のケタまでの不純物は容易に分析可能





表紙説明

空気シヤ断器やガスシヤ断器のシヤ断現象の研究においてノズル部分の気流のシュリーレン法による研究はよく行なわれるが、とくに実際に問題となるアーク発生時の記録は新しい試みである。表紙は二次元のノズルモデルを用いて気流中に発弧せしめた際のシュリーレン写真である。アークを発生しない場合(上写真左)と発生している場合(上写真右)との比較から、アークと気流との相互作用が詳細に究明される。

三菱電機

昭和36年 第35巻 第5号 臨時増刊

研究所創立25周年記念特集

目次

巻頭言	常務取締役 山口良哉	2
研究所の過去、現在および将来	取締役技師長 大野才三	3
研究所の概況	研究所所長 石黒克己	4
水銀整流器の逆弧と責務	阿部久康・山口峯男	26
シヤ断器の残留電流とアーク動特性	潮 恒郎・伊藤利朗・宮本紀男	31
航空機用 VHF 無指向性埋込形 アンテナ	喜連川隆・武市吉博・水沢丕雄・平岡敏也・太田堯久	38
パラメトリック増幅器の広帯域化	喜連川隆・白幡 潔	44
超高温プラズマ研究の現況	河合 正・杉本盛行・近藤博通	48
中性子スペクトロメータ	国富信彦・浜口由和・藤原 智・宮下恭一・茂木 充・大野栄一	55
磁気増幅器の制御機構	浜岡文夫・山崎英蔵	60
自動最適化制御装置	福永圭之助	68
赤外線ガス分析計	安東 滋・西岡忠臣	74
計数形電子計算機 MELCOM-LD 1		
豊田準三・中塚正三郎・吉江高明・前田良雄・首藤 勝・壺井芳昭・菅 忠義・関本彰次・魚田勝臣		80
数値計算の誤差	馬場準一・林 重雄	88
高出力シリコン・トランジスタ	吉松誠一・山本隆一・土佐雅宜	94
CdS の光起電力効果	伊吹順章・小宮啓義	99
電子衝撃陰極の特性	岡田武夫・橋本 勉	103
巻胴の強度	前田祐雄・藤原 智・土方明躬	108
冷媒液中のエナメル線の耐摩耗性	白井万次郎・森田義男	113
酸化物被覆陰極用ニッケル金属組織とグリッドエミッション	立原芳彦・秦 卓也・花田武明	116
磁器と金属の封着	神崎 遼・柳瀬正人	121
液状陰イオン交換体の分析への応用	石橋 勝・今村 孝・小巻 仁	126
方向性 50% Ni-Fe 合金の再結晶	山森末男・野口英男・政木淑人・中島陽三	132
金属黒鉛質ブラシの特性とその摩耗損傷	山森末男・森田義男	137
《最近における当社の社外講演一覧》		145
《最近登録された当社の特許および実用新案》		43, 67, 131, 145

《表紙》

2. 質量分析器；電子計算機 MELCOM-LD 1
3. 研究所全景；北伊丹分室
4. 中性子スペクトロメータ、制御盤

巻 頭 言

常務取締役 山 口 良 哉

当社の研究部門が、それ自体として独立したのは、昭和10年9月であって、それから25年の歳月を経過したわけである。ここに“研究所特集号”を編さんして、研究所の最近の業績の一端を披露し、大方のご批判を仰ぐはこびとなったことは、まことに時宜を得た試みと思う。

企業にとって、研究開発の必要なことはいまさら申すまでもないことである。とくに最近のように目まぐるしいほどの変ぼうを遂げつつある技術革新の時代に、研究開発活動のない企業の状態を考えると、りつ然たらざるをえない次第であって、研究開発こそが企業の将来の繁栄を左右するものであるといっても過言ではないのである。

ここにいう研究開発とは、基礎研究、応用研究、開発研究に分類されるあらゆる段階の研究活動を総称する基本的知識の探求から新製品の開発までの研究活動であって、企業内の研究活動である限り各段階の間には一連の相関関係があるのが普通である。当社の研究組織は、実質的には、本社研究所、事業部の研究部門、製作所の開発部門の3段階にわけられるものであるが、本社研究所は基礎研究に、事業部、製作所の研究開発部門は応用、開発研究に重点を置くことは当然の成り行きである。しかしながら、この間には密接な関連があることは当然であって、製作所からの要求が実を結んで立派な基礎研究の成果をあげたり、または研究所の基礎研究の成果を製品に応用して見事な製品開発ができたりするのである。研究所と製作所との緊密な連絡の必要が痛感されるゆえんである。

基礎研究については、これは主として研究所が担当する分野であるが、この種の研究については、しばしば“青天井”と呼ばれ、“統制を加えてはならない”とされている。しかしながら、企業に付属する研究機関に関する限

りこれらの研究の成果は企業の方針に添い、企業の利益を生むものでなければならない。この意味で、研究機関が会社の根本方針や考え方について十分知らされ、了解しているということは、十分に統制された他の部門におけるよりも、よりいっそう大切なことであるといえる。

企業の方針を十分にわきまえて、企業の要請する技術開発の方向を敏感に察知しうる優秀な技術者をして、自由にその能力を発揮せしめるよう今後とも努力してゆきたいと思う。

総合的な大規模な基礎研究は、莫大な人材と経費とを必要とするため、大企業でなければ遂行しえない程度のものになりつつある。それは、いまや大企業のみが有する特権であり、大企業のみが果たしうる責務であるとさえいわれている。しかしながら、企業内においては年々増大してゆく研究費の支出をいかに正当化するかという点が最大の関心事として残る。経営者は、研究所に対して研究所への

投資が正当であるとの判定に裏付けとなるだけの説明を求めたくなるのは当然のことであり、研究所としても、そのへんの心組は常に持ち続けるべきところであろう。ここに研究開発の管理の問題と研究成果の評価の問題が表面化してくるわけであって、これらは今後の問題点として取り上げてゆきたい。

研究所の過去25年の歩みは決して平たんなものではなかったように、今後の歩みも決して安易なものではないはずである。しかしながら、技術の進歩の度合が急激になった今日、企業における研究開発の必要性は日とともに増大しつつあることにかんがみ、何にもましてわれわれは活発にして広範な基礎研究のプログラムを遂行せねばならぬことを肝に銘じておきたい。



研究所の過去、現在および将来

取締役技師長 大野才三

当研究所が生産工場から独立して、本社所属の機関となつてから4半世紀を経過した。この間、戦争という大嵐にさらされて、研究所本来の使命からは縁遠い仕事に追われたり、戦後の再建に会社とともに苦難の道を歩んだ時期もあったが、20年前に当伊丹地区に移転するとき将来の研究用地として予定された敷地1万数千坪が全部使いつくされて、北伊丹製作所の構内に分室を建設するまでになった現在の姿は、まず順調な成育振りということができよう。

設立当初は、せいぜい生産工場の試作開発の補助的役割を演じるに過ぎなかった。成長するにしたがい漸次独立の開発能力をもってきたのも自然であるが、その後続く研究の種子のようなものが、設立後数年の間にすでに芽を出して、その後長い間の研究所の活動に大きい影響を与えていることは注目に値する。これは人間の性格形成に幼年期の環境が重大な役割を演じるといわれているのにもよく似ている。

さらに長ずるにおよんで、研究所はその広い技術視野と総合能力の故に、開発の方向についての識見においても、また推進力においても、もっとも有力な存在となり、今日においては会社の技術的発展の主要原動力となっている。これは内外の工業研究機関のたどった道と軌を一にするものであろう。

さらに、技術革新といわれるほど技術の進歩が急速度を加え、また総合的な技術能力が不可欠となるにつれて、企業の競争力を維持する上に研究所の責務はますます重くなり、専門化が進むにつれて所要技術者の数は急激に増加してきている。両々相まって研究所の規模の急速な拡大が要望されているのが、今日の状態であろう。各所で既存研究所の飛躍的拡張と、加えて新設研究所の発足が伝えられるのはこの間の事情を物語っているものといえよう。

さて、将来はどうなるか。企業の規模、そして研究所の能力が増大してくるにしたがい、企業自身がいままで

もっぱら大学や官公立の研究所にゆだねられていた基礎研究の分野に踏みこんで、より有効な開発の素材からの探究を心がけるのも自然であろうし、また、一昔前であれば国家予算でもなければできなかったような大規模な総合研究にも、触手をのばすようになることも、自然の成り行きであろう。そして海外技術の模倣や導入によるのでなしに、これらの研究成果の上に企業自身の将来の繁栄を托そうとするのが正統的な企業のあり方と考えられるようになるであろう。

こういった種類の研究開発は、模倣や導入によるのにくらべて、もちろん初めから長期を要することを覚悟しなければならぬし、また、企業的な意味での成功の確率も必ずしも高くないと考えなければならぬ性質のものであろう。一方、企業の必要とする研究開発には、もっと急を要する、短期間に成果を確保しなければ研究自体の意義を失うようなものも多々あること

は、すでに今日の現実であるし、将来もさらに増大してくることは想像に難くない。

一言にしていえば、研究はその領域を広げ、深さを増してゆく一方で、止まるところを知らぬ。他方、単一な研究機関が適正規模をこえて巨大化することは、管理上の問題だけでなく、あまりに性格の違った研究、したがって技術者に要求される心構えが違った研究を包含することは、得るところよりも失うところが多いということも考えられるであろう。このようにして、研究機関は総合単一研究所から、専門化された複数研究所への道を進むことになるであろう。これは企業の要求する研究の性格とその規模に応じて、あるいは、材料研究所であり、生産技術研究所であり、あるいはまた、固体物理研究所であるかも知れない。

しかし、いずれの場合にもこれらの研究に一貫して必要なものは、常に謙虚な科学者の心と、たくましい技術者の意欲であることを忘れてはならない。





研究所の概況

研究所所長 石黒克己

Outlook of Research Laboratory

Katsumi ISHIGURO

The Mitsubishi Research Laboratory has made a steady progress since its establishment at Wadanomisaki, Kobe in September, 1935, attaining the 25th anniversary last fall. In the meantime, a part of the achievements were made public in a commemoration number of the Mitsubishi Denki issued in celebration of the 20th year. The change of activity with the times and salient subjects of study since then are now taken up for the edition of the 25th memorial number. A thousand of emotions crowd on our mind in looking back upon the past.

The present facilities are divided into nine: Electrical Engineering Dept., Electronics Dept., Physics Dept., -I, -II, -III, Organic Chemistry Dept., Inorganic Chemistry Dept., Material Engineering Dept., Mechanical Engineering Dept. In addition, there are auxiliary Departments such as General Affairs Dept., Manufacturing Dept., and an Insulation Varnish Shop which has transferred to Itami Works recently. With a personnel of about 900, it occupies a floor space of 28,300 square meters, in which painstaking efforts are being made day and night to search into unknown in the development of technology. The present establishment is now being strengthened with a new annex just completed. Further a plan is on foot to build a central laboratory in a new conception.

1. まえがき

当社の研究所は、別表の年譜に示すとおり、昭和10年9月、神戸市和田岬の一画に誕生以来、順調な成長をかさね、昨秋をもって満25周年を迎えた。本誌は、5年前に研究所創立20周年記念号を発刊して、当時における研究成果の一端を披瀝したのであるが、以後の研究活動の推移や、研究成果の一端をとりまとめて、ここに25周年記念号を発刊するにあたり、まことに感あつたなるものがある。

当研究所は、現在、電気第一、電気第二、物理第一、物理第二、物理第三、化学第一、化学第二、材料、機械の9研究室と、事務、技術、工作などの補助部門および今春、伊丹製作所の所轄となったが当社の全需要量をまかなう絶縁塗料製造部門があり、総員約900名、延床面積約28,300平方メートルの研究室において、日夜明日への新技術の探究開拓に専心しており、当社全生産部門の力強いバック・ボーンの役割を果たしつつある。さらに、今春には北伊丹製作所に隣接して新設備をほどこした分室が完成したのをはじめ、新構想のもとに、中央研究所(仮称)の建設を計画之中である。

本欄では、項を追って現在当所で手がけている多岐多様な研究内容の一端を概説して、大方のご批判をおおぎたいと思います。

2. 大電力ならびに高電圧機器

2.1 機器の絶縁構成研究

定格電圧の増大につれて、機器の絶縁構成に関しては、多くの問題点があるが、コロナの発生とコロナによる絶縁

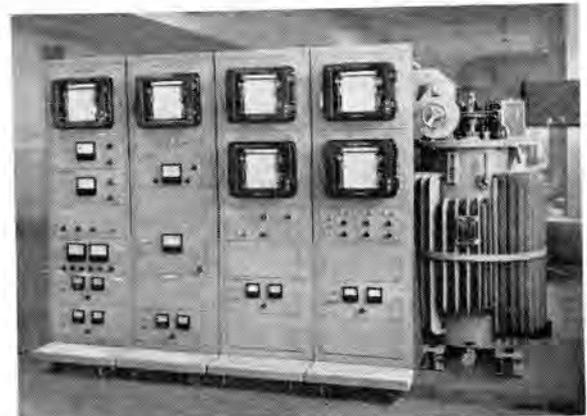


図1. 発電機絶縁の機能試験用各種自動記録装置
Fig. 1 Recording equipments of various characteristics for functional evaluation test on insulation of generator.

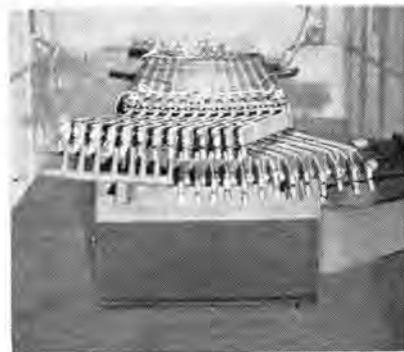


図2. 実物大の水車発電機コアモデル
Fig. 2 Full-size core model of water-wheel-generator.

物の損傷に関する問題や、高電圧における沿面閃絡などの放電現象に関する問題はとくに重要である。

当所では、これらに関する基礎実験を行なっており、コロナに関してはすでに標準試験法を決めて、各種の絶縁物の耐コロナ性に関する研究を進めている。また、気中



図 3. コロナ測定装置と衝撃電圧測定装置
Fig. 3 Measuring equipment of corona and surge.

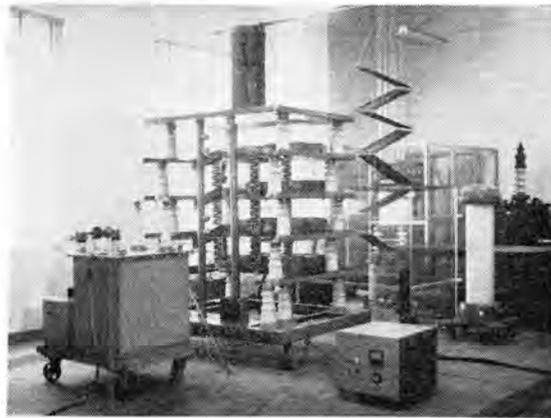


図 4. 可搬式小形衝撃電圧発生器
Fig. 4 Portable impulse generator.

および油中の放電現象に関する基礎特性を求めめるための準備も進めている。

実用機器の絶縁破壊現象や、絶縁物の劣化現象の究明には、実用に近い条件でのモデル実験によらなければならないことが多く、タービン発電機および水車発電機の実物大模擬スロットを用いた機能試験設備を作り、ヒート・サイクルのくり返しや、コロナによる絶縁物の機械的および電気的劣化の様相をはあくするようにしている。この装置はヒート・サイクルのコントロールをはじめ、膨脹収縮によるコイル導体の偏位、 $\tan \delta$ やコロナ発生量などの電気的特性の記録などを、すべて自動的に行なうようになっている。

2.2 シャ断現象の研究

シャ断器、開閉器、ヒューズ、避雷器などの開発と改良とを主たる目標として、高電圧大電流のアークシャ断現象の研究を広範囲に行なっている。設備の主体は、小形の短絡発電機とコンデンサ・バンクであるが、最近では独特の等価試験装置を完成した。

基礎的なシャ断現象としては、とくに各種シャ断装置の電流零点近傍のアーク動特性の研究に主力をそそいできたが、そのほかアーク現象の全般にわたっての基礎的な研究も行なっており、理論的な追究とともに斬新な測定装置や試験装置を開発して、多くの成果をあげている。

各種のモデルによる開発研究も活発に行なっており、

研究所の概況・石黒

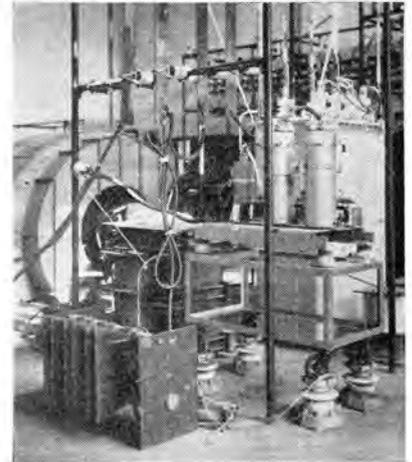


図 5. 短絡発電機と等価試験装置
Fig. 5 Short circuit generator and equivalent test equipment for circuit breakers.

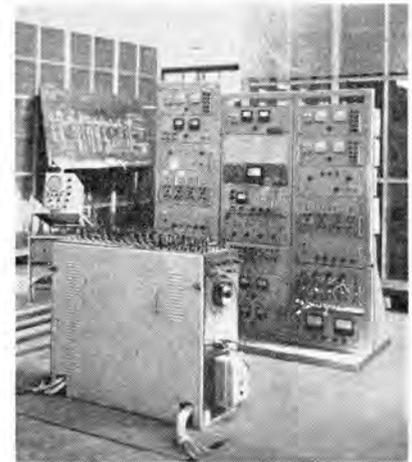


図 6. シャ断現象研究のための制御装置
Fig. 6 Control devices for researches of extinction phenomena.

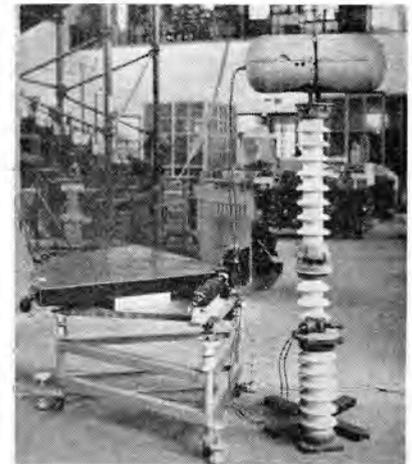


図 7. 高速流カメラと圧力測定装置
Fig. 7 Continuous camera and dynamic pressure measuring device.

SF₆ シャ断器や真空シャ断器などの新しい開閉装置の研究も進められているが、たとえば、ガスシャ断器ノズルの気流の研究のためのシュリーレン装置ならびにマッハ干渉計装置も完備されて、三次元ならびに二次元のモデルを併用した研究を進めている。

開閉装置の適用に関しても、電力系統の再起電圧や短絡電流についての研究において、つぎつぎに見るべき成果をあげている。

2.3 電力変換器に関する研究

水銀整流器関係については、直流送電および大電力周波数変換器を対象とする高圧水銀整流器の開発研究を重

点的に取りあげ、この研究に対しては、逆弧等価試験装置および プラズモ・グラフ 装置がそれぞれ実効をあげている。また、核融合研究用として瞬時数十万アンペアを目標とする スイッチ・イグナイトロンの開発も進めている。

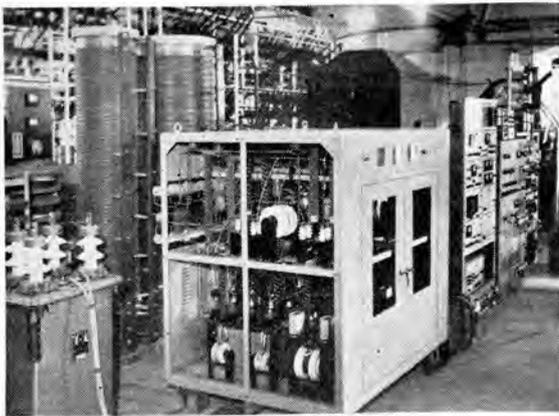


図 8. 整流器等価試験装置

Fig. 8 Equivalent test equipment of mercury arc rectifiers.



図 9. プラズモ・グラフ
Fig. 9 Plasmograph.

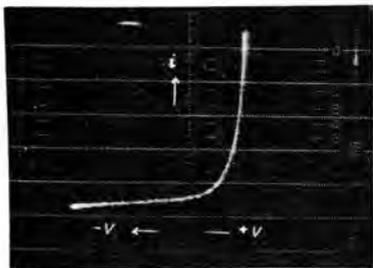


図 10. 探極特性の測定例
Fig. 10 Typical oscillogram of the probe characteristics curve.

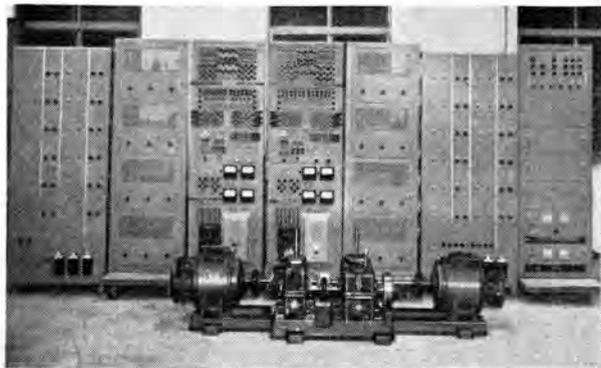


図 11. 電動機モデル・プラント
Fig. 11 M-G model plant.

半導体整流器では、整流体の電流、電圧耐量、破壊機構の研究のほか、最近では制御極付シリコン整流器の応用研究が進み、その制御保護方式や直並列接続法について多くの成果を取め、また、応用としてモータ制御、インバータなどの開発も行なっている。

このほか、整流器による電動機制御の研究設備としてモデル整流器と電動機を組み合わせた電動機モデル・プラントが完成し、ミルモータを始め、電動機速度制御の研究に偉力を加えた。

2.4 避雷器の研究

最近における避雷器の進歩はいちじるしく、現在の避雷器は 10 年前のそれに比較して、保護水準が約 30% 程度低くなるとともに、大きい衝撃電流および長時間継続サージに対してもよく責務を果たし、保護能力がいちじるしく向上している。



図 12. 直流用避雷器
Fig. 12 DC arresters.

避雷器の進歩は、特性要素とよばれる抵抗体の改良と、放電ギャップ装置の性能の向上によるもので、前者は SiC の半導体的研究によってその原理を明らかにするとともに、粉体の成型研究および抵抗体内部の電位および電流分布の研究を行なった結果、衝撃電流 100 kA、長時間継続サージ 2 ms、500 A に十分耐えるものが生産できるようになった。

後者は磁気消弧方式の採用によって格段に性能が向上しており、当所では、永久磁石による放射状磁界を利用した放電ギャップを研究し、シャ断能力の強大な交流、直流用放電ギャップを開発して実用に供した。写真に示したものはこの放電ギャップと特性要素を用いた直流用避雷器である。

以上の結果、待望久しいいわゆる 2E 避雷器（放電開始電圧および制限電圧が線路電圧の 2 倍）の出現も目前に迫っているといえよう。

3. 通信ならびに高周波応用機器

3.1 アンテナの研究

マイクロ波アンテナは、超高帯域伝送用アンテナの性能向上のための理論および実験研究を行ない、その成果は、4Gc パスレングス・レンズ・アンテナ、4Gc 直線偏波および円偏波パラボラ、6Gc 左右両旋共用円偏波パラボラ、11Gc 水平



図 13. 6Gc 左右両旋共用円偏波 パラボラ・アンテナ
Fig. 13 6Gc dual feed parabola antenna.

垂直両偏波共用パラボラ、見通し外通信用大口径パラボラ・アンテナ、ホーン・リフレクタ・アンテナなどの設計の基礎をなしている。

特殊アンテナは、電波望遠鏡用、衛星通信用および超遠距離レーダ用などの大口径高利得アンテナ、小口径高利得アンテナとしての誘電体棒および擬似誘電体棒アンテナ、軽量高利得風船アンテナ、Cosecant Square ビーム・レーダ・アンテナ、ビーム電子走査

アンテナ、ドップラ・ナビゲータ用双対ビーム・アンテナならびに電波逆採用広帯域アンテナなどの研究を行なっている。

同軸給電アンテナは、HF、VHF および UHF 帯のテイルキャップ・アンテナならびに 2 者併設方式、環状スロット・アンテナ、VOR 用空洞アンテナなど、航空機用埋込み形アンテナおよびブレード・アンテナの研究を行なっていて、その成果は国産最初のジェット練習機の UHF 通信用テイルキャップ・アンテナ、ヘリコプタ用ブレード・アンテナ、国鉄ビジネス特急公衆電話用環状スロット・アンテナなどに現われている。

3.2 超高周波伝送路の研究

導波管伝送路は、マイクロ波アンテナおよびその給電導波管路の性能向上のため、移相器、1/4 波長板、ハイブリッド回路、偏波分波器などの広帯域化の研究を行なっている。また、ストリップ線路、誘導帯伝送路、イメージ線路および表面波線路などの研究も行なっている。

特殊伝送路の研究としては、アンテナ反射鏡に用いる種類の形状の網目の金網の電波反射透過の研究ならびにラ

研究所の概況・石黒

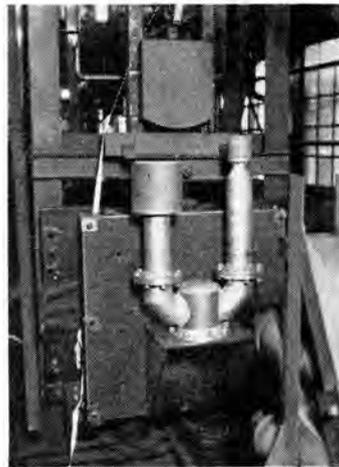


図 14. 2.5~5Gc および 5~10Gc 逆採用誘電体帽付超広帯域無指向性アンテナ
Fig. 14 Broad-band omnidirectional dielectric antennas for 2.5~5Gc and for 5~10Gc.



図 15. 国産中形輸送機 YS-11 の VHF 通信用テールキャップ・アンテナおよびブレード・アンテナならびに VOR 用空洞アンテナの放射指向特性の測定

Fig. 15 Measurement of radiation patterns of the tailcap antenna and the blade antenna for VHF communication and the E-fed cavity antenna for VOR being developed for YS-11 transport now under preproduction in this country.

図 16. 11Gc 帯直交直線偏波分離回路

Fig. 16 11Gc polarization selector for dual linearly polarization waves.

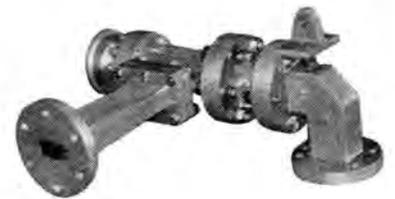


図 17. ジェット機機首の 9Gc サンドイッチ構造ラドーム

Fig. 17 9Gc-band sandwich type nose radome for jet plane.



ドームおよび電波吸収壁の研究を行なっている。世田谷製作所で製作した金網入り誘電体ラドーム、探索レーダ・サンドイッチ・ラドーム、ジェット機機首ラドームなどは、いずれも国産最初のもので、この研究の成果である。

3.3 マイクロ波フェライト伝送路の研究

単向管、サーキュレータおよびフェライト移相器の性能改善のため、動作原理の基礎研究と実用化研究とを行なうとともに、マイクロ波フェライト試作研究を大船製作所と協力して行なっている。その研究成果として、日本電信電話公社、東名阪マイクロ波中継線に納入した 4Gc 偏波面回転形単向管、6Gc 電界変位形単向管ならびに各種レーダ用パラメータ増幅器の単向管およびサーキュレータがある。

3.4 超高周波帯磁性固体電子回路の研究

パラメータ増幅器の雑音指数の改善および帯域幅の増大

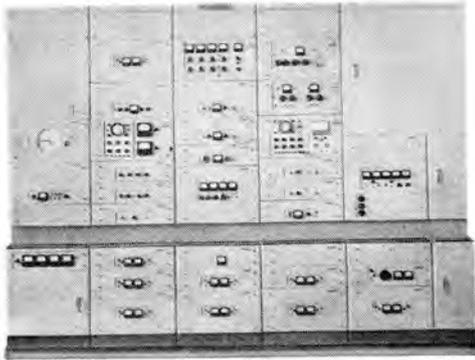


図 18. 電波研へ納入した1号マイクロ波標準装置
(アンモニア吸収形原子時計)

Fig. 18 The first microwave frequency standard instrument supplied to Radio Research Laboratories, Ministry of Postal Service. (Atomic clock controlled by microwave absorption lines of ammonia)

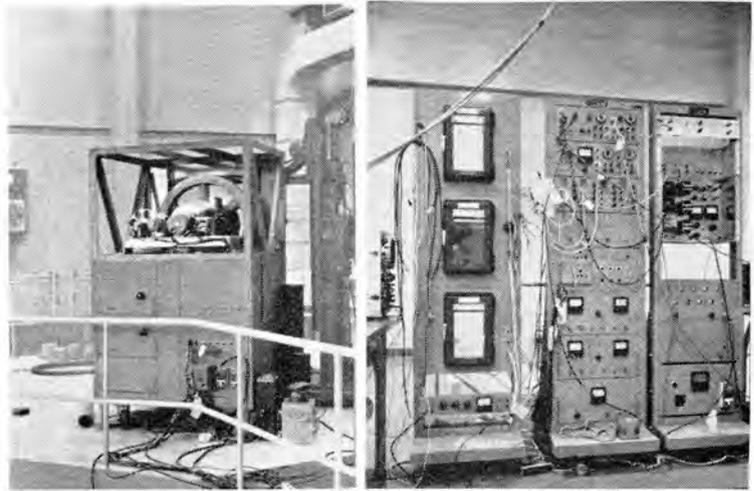


図 22. パイル・オシレータ (日本原子力研究所に昭和33年2月納入)
Fig. 22 Pile oscillator.

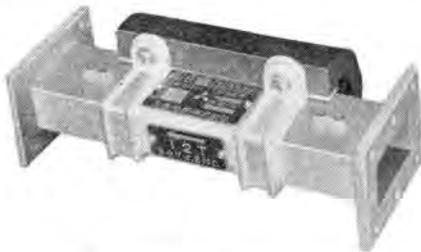


図 19. 6 Gc 電界変位形単向管
Fig. 19 6 Gc field displacement isolator.



図 20. パラメータ増幅器
Fig. 20 Wide band low noise parametric amplifier.



図 21. 飛行時間法中性子エネルギー分析装置. 右側が Time to pulse height converter, 左側が10チャンネルパルス波高分析器. (昭和33年8月阪大工学部納入)
Fig. 21 Neutron time-of-flight spectrometer.

のために、理論および実験研究を行なっている。また、雑音指数測定法およびパラメータ増幅器用ダイオード測定法の研究を行なうとともに、可変容量ダイオードの試作研究を所内各部門協力して行ない、東京大学生産技術研究所の追尾レーダ用、名古屋気象台の気象レーダ用および防衛庁技術研究所の遠距離レーダ用ダイオード・パラメータ増幅器を完成した。

4. 原子力機器

原子力関係の研究のうち、原子炉本体および核燃料などに関しては、昭和33年4月、三菱原子力工業株式会社が発足以来、主力活動は同社に移ったが、種々の付属機器の研究開発および実験については、引きつづき当所において活発に推進されている。

4.1 原子核実験装置

原子核実験用として小形中性子発生装置 (120 kV, D-T 反応利用) を設計し、製作を進めており、さらに将

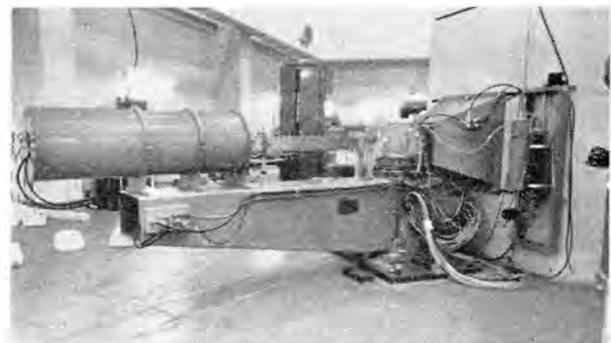


図 23. 中性子モノクロメータ本体
Fig. 23 Neutron monochrometer.
(昭和33年11月完成、日本原子力研究所 JRR-1 原子炉に据付けられた。)

来の高エネルギー加速器の粒子投入器としての500 kV 横形コック・クロフト形プロトン加速器も開発中である。

荷電粒子検出用電磁石装置 (京大)、飛行時間法による中性子エネルギー測定装置 (阪大) などの製作もすでに終わった。

4.2 計測制御その他の機器

(1) 原子炉制御機器 実験炉および動力炉用の核

計装機器および電子回路の研究開発を行なっている。同時に原子炉プラントの制御方式、安全方式に関するシステム・エンジニアリングについては、社内外の共同研究会などにも加わって研究を進めており、原子炉制御装置を試作し原子炉シミュレータと組み合わせ、主として実験用原子炉の計測制御の基礎実験機器の試験を行なった。

(2) キャンド・モータ・ポンプ 昭和31年、原子力平和利用補助金の交付をうけて、高温高圧水循環用のキャンド・モータ・ポンプの研究に着手し、昭和32年、わが国最初の試



図 24. 15kW キャンド・モータ・ポンプ試作1号機
Fig. 24 Canned motor pump.

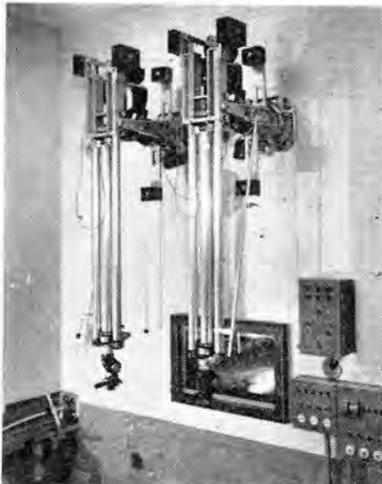


図 25. 横方向旋回付 MA-P20 形 マスタ・スレイブ・マニプレータ
Fig. 25 Lateral rotation MA-P20 master slave manipulator.
(大阪府立放射線中央研究所に据付けられた)



図 26. MA-E2 形 電気式 マスタ・スレイブ・マニプレータ
Fig. 26 Electric master slave manipulator.

作1号機を開発した。現在キャンド・モータ・ポンプの生産は長崎製作所に移管され、原子力発電あるいは火力発電用にその将来が期待されている。

(3) マニプレータ 昭和31年から研究を開始し、数百キュリーから数万キュリーをあつかえる機械式マニプレータ MA-M 形、MA-P 形を完成し、大学や研究所に納入したほか、電気式マニプレータとして MA-E 形試作機を完成した。

4.3 超高温プラズマの研究

核融合反応の直接発電への利用を目指して各国で超高温プラズマの研究がさかんに行なわれている。

直接発電という遠大な目標に対しては、プラズマの性質の徹底的な基礎研究と、プラズマ発生のための技術的基礎——大電力発生、高真空やそのほか精密計測の技術——の飛躍的な発展が必要である。プラズマの性質をよく知るといことは核融合研究のために必要であるばかりでなく、プラズマや電磁流体现象の新しい応用や放電機器の内部現象の解明に貢献する。当所の研究はこのような基礎現象をはあくする意図にもとづいて行なわれている。

ガラス製ドーナツ状放電管(断面径120φ、平均直径600φ)を有する鉄心約1.5tの環状放電装置(原子力利用委託研究費による)を完成し、これを用いてプラズマ発

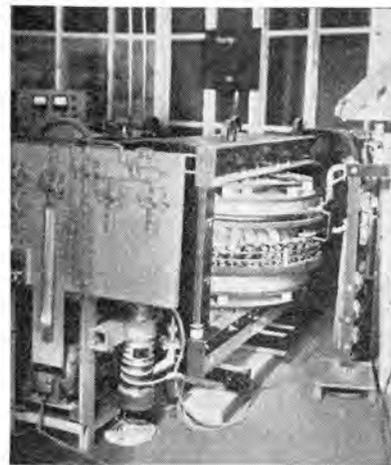


図 27-1. 環状放電装置
Fig. 27-1 Toroidal discharge device.



図 27-2. 高温プラズマ発生用高周波発振器 (2-20 Mc, 100 kW)
Fig. 27-2 High frequency, high power oscillator for ultra high temperature plasma research (2-20 Mc, 100 kW.)

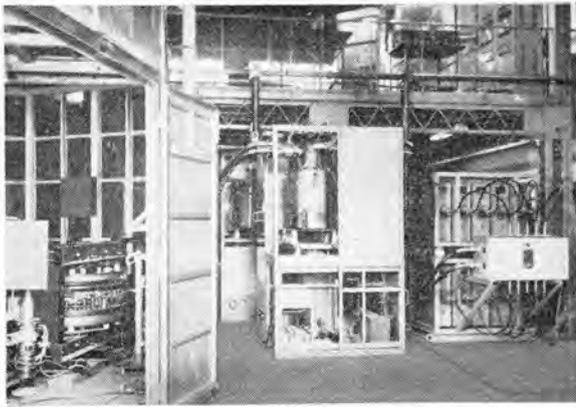


図 27-3. 超高温 プラズマ 実験室の状況

左: 環状放電装置
中央: 大電流 スイッチングイグナイトロン および点弧制御装置
右: 無誘導 コンデンサ

Fig. 27-3 General view of ultra-high temperature plasma laboratory.

Left: Troidal discharge device.
Middle: High current switching ignitrons and firing control device.
Right: Non-inductive capacitor band.

生実験を行なっている。この装置は一次 コイル から電力をつぎこんで、プラズマのジュール加熱を行なうと同時に、放電管が絶縁物製であるので、この回りに巻きつけられた銅板 コイル に高周波、大電流 インプルス、直流電流を一斉につぎこんでプラズマ安定化、閉じこめ、加熱を行なうことができるのが特色である。また、電源設備として 100 kJ 無誘導 コンデンサ、100 kW 高周波発振器、スイッチング用イグナイトロンなど国内でも屈指の規模の特色ある装置群を有している。

4.4 放射線応用の研究

(1) 計数器 GM 計数管, BF₃ 計数管の開発研究を進めてその性能の向上をはかり、さらに シンチレーション・カウンタ・ヘッドも開発をほぼ終わった。

原子炉用中性子電離箱(非補償形, 補償形, 核分裂形)各種も試作し、それらの特性を試験中である。

GM 計数装置, 高圧安定化電源, 計数率計, 前置増幅器, 比例増幅器は開発を終わり、神戸製作所で生産にはいった。引き続き シングル・チャンネル 波高分析器, ガンマ・スペクトロメータを開発中である。



図 28. GM カウンタヘッド (ND-1121 形)
Fig. 28 GM counter head (Type ND-1121).

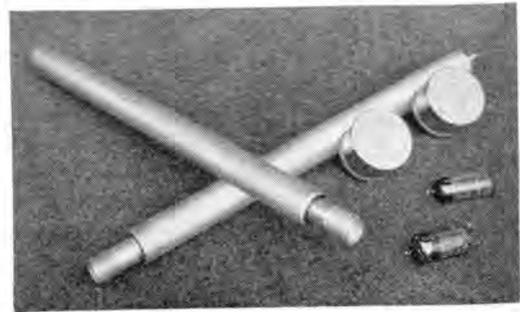


図 29. BF₃ 計数管 (ND-8122)
Fig. 29 BF₃ counter (Type ND-8122).



図 30. GM 管用 10 進計数装置 (ND-5126 形)
Fig. 30 Decade scaler for GM counter (Type ND-5126).

(2) 中形 ベータトロン 昭和 28 年に完成した グレック 形 ベータトロンは、エネルギー 15~20 MeV、ビーム強度数 r/hm が得られ、電子ビームの取り出しにも成功した。その後、稼動実験をつづけてきたが、なおいっそうの性能向上を目的として改造計画中である。

(3) パン・テ・グラーフ 形加速装置 昭和 30 年から研究を始めた パン・テ・グラーフ 形加速装置は、翌年、通商産業省の応用研究補助金を交付され、昭和 32 年 10 月に 2 MeV の電子加速用の装置を完成した。

その後、日本放射線高分子研究協会東京研究所からの受注品と当研究所用としての VE-3 形電子加速用装置を製作し、昭和 35 年 2 月に完成、2.8 MeV、300 μA の電子流を得ることができ高分子材料の研究に役立っている。

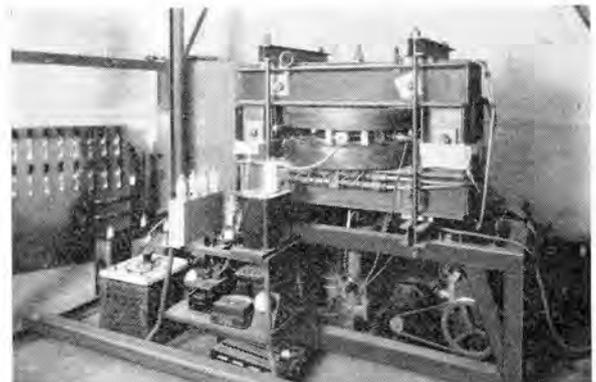


図 31. 改造前の中形 ベータトロン
Fig. 31 20 MeV flux forced betatron.



図 32-1. 高電圧発生部
Fig. 32-1 High voltage generator system.



図 32-2. 走査部
Fig. 32-2 Scanning system.

図 32. VC-3 形 パン・デ・グラーフ 形加速器
Fig. 32. Van de graaff type accelerator (Type VC-3).

名古屋工業試験所から受注した VC-3 形は、電子・イオン切換え可能な装置で、世界でも最初の試作品であり、その成果が注目されていた。昭和 34 年末から現地調整を開始し、幾多の難問題を解決して、昭和 35 年 8 月にプロトン・ビームのエネルギーが 3.0 MeV をこえ、その電流も最高 100 μ A に達し、電子線のほうは 2.0 MeV をはるかにこえているが、なお、3.0 MeV の壁を乗り越えるため努力している。他方、世田谷製作所と共同で、これまでの絶縁ベルトにくらべ機械的特性のとくにすぐれたものを開発した。

(4) 加速器用イオン源 これまでに VC-3 形パン・デ・グラーフ用として RF イオン源の特性を研究してきたが、タングステン形パン・デ・グラーフ用として、負イオン源を研究した。これは RF イオン源からとりだしたプロトン・ビームを水素ガスターゲット中で電荷交換を行なわせ、負イオンを作る方法であるが、わが国では最初の実験で、約 2 μ A の H⁻ イオン・ビームを得た。

(5) コバルト 60 照射装置 各種実験に使用されるコバルト 60 照射装置として、線源引上方式、押上方式、回転方式などの各種形状のものを開発し、製品としても納入している。

(6) アトミックランプ ラジオアイソトープ Kr-85, H-3 を用いたアトミックランプの試作研究も一応の成果をおさめている。

5. 応用計測ならびに制御機器

5.1 自動制御機器の研究

制御用増幅器としての磁気増幅器の研究には大きな力を注いでおり、その動作特性の本質におよぶ究明がなされ、設計上有効な理論が明らかとなり、新しい高性能回路が考案研究されている。

また、高周波磁器増幅器の研究も行ない、これを用いた演算増幅器も開発している。

そのほか、磁心とトランジスタを組み合わせた応用も新しい分野としてとりあげ、パルス計数器や高周波電源を始めとして各種の応用研究を行なっている。

プロセス制御装置の分野も大きくとりあげ、とくに半導体生成炉の温度制御装置の実用化研究は、当社の半導体生産に役立っているが、検出部、制御部など種々の方式を鋭意研究している。

サーボ関係でも、とくにトランジスタと磁気増幅器を用いた方式による高出力高性能のものを目標として研究

開発を行ない、各方面に応用されている。また、サーボアライザによるサーボ機構の測定解析も進めている。

そのほか、無接点継電器の研究も行ない、磁気増幅器の応用に引き続いてトランジスタを用いた NOR によるものを実用化し、また、磁心との組み合わせによる方式も種々研究している。



図 33. NOR シミュレータ
Fig. 33 NOR simulator.

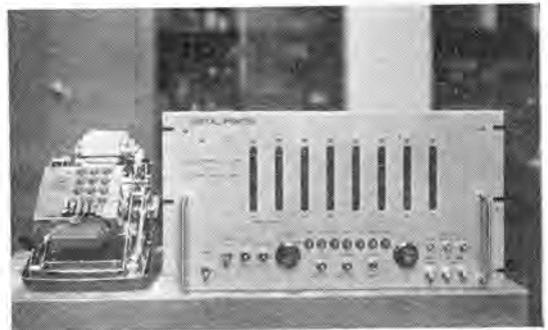


図 34. 中性子スペクトロメータ制御計数印字部(全トランジスタ化)
Fig. 34 Control and digital printing unit in neutron spectrometer (all transistorized).

放射線計測への電子回路の応用としては、原子力研究所へ納入した中性子スペクトロメータなどの制御、計数印字部の全トランジスタ化を完成した。これはプリアンプ・カウンタ、メイン・カウンタとも 6 ケタをもつ 2 チャンネルの 10 進スケールシステムで、計数値を自動的に 0.8 sec で印字記録することができる。さらに上記装置全体の一連の自動測定のための操作制御回路をも含んでいる。

また、全トランジスタによるマルチチャンネルのパルス・ハイト・アライザも目下研究試作中である。

一方、航研技術研究所納め超音速風洞電機品に対するモジュールテストには、制御方式の解析および速度検出装置の試験を担当した。試験結果は回転速度精度 0.01% 以上で安定に運転され、この方式をもととし設計製作が行なわれ、昭和 35 年に製品が納入された。

昭和 33 年度通産省補助金の交付により工作機の数値

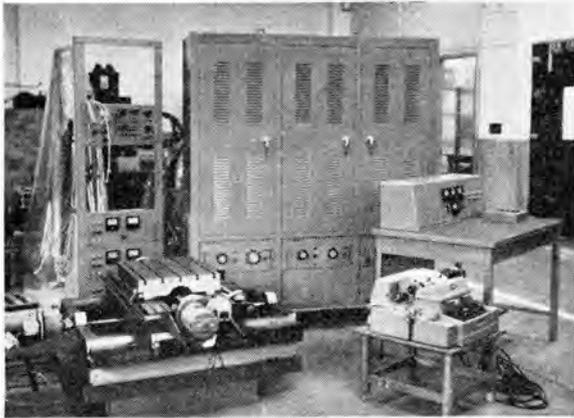


図 35. 工作機の数値制御
Fig. 35 Numerical control of machine (tools).

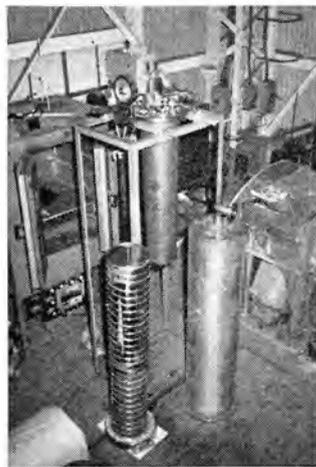


図 36. 仮組立中のヘリウム
液化機本体
Fig. 36 Main part of
helium liquefier being
temporarily assembled.



図 37. 吸収式調湿機第 1 号試作機
Fig. 37 Absorption dehumidifier, first trial apparatus.



図 38. 風速計校正設備
Fig. 38 Caribration equipment of anemometers.



図 39. 自動温度補償形サーミスタ風速計
Fig. 39 Automatic temperature-compensated
thermistor anemometer.

制御指令装置および指令テープ作成プログラムが完成し、工作機の改良と Nultrax 方式の導入によって実用運転にはいるべく準備されている。

5.2 熱流体応用研究

(1) ヘリウム液化装置 極低温における物性の研究、低温用測定器や機器の開発などに役立つ目的で、ヘリウム液化装置を試作している。これは連続循環形で、予備冷却なしで約 2l/h、予備冷却つきで約 4l/h の液化能率のもので、2 段の膨脹機関、一つのジュール・トムソン弁およびこれを接続する向流熱交換器群からなっている。

(2) 吸収式調湿機 塩化リチウム水溶液による空気中の湿度を連続的に調節する吸収式調湿機の試作 1 号機の性能は、処理空気量 10 m³/min、除湿能力 9 kg/h である。この種の調湿機は、湿度調整がたやすく、温度と湿度とを別個に調節できること、増湿の目的にも使用できること、処理空気量が多く、維持費が安いことなどの特長をもっている。

(3) 風速計の開発 2 年前開発完了したサーミスタ風速計は、小形軽量で取り扱いもたやすいので、各方面で好評を得ているが、現在は、自動温度補償形サーミスタ風速計および気流の乱れを測定する熱線形乱れ測定器を開発中である。

(4) エア・カーテン 試験装置 エア・カーテンの応用がようやく普及しかけているが、当所ではこれに関連して、エア・カーテンのシヤ断性能を明らかにし、突風、気圧変動の異常条件に対する適応性を調査し、最適設計基準を確立するための模擬試験装置を新設し、種々の基礎データを取りつつある。



図 40. エア・カーテン 試験装置
Fig. 40 Experimental apparatus of the air curtain.

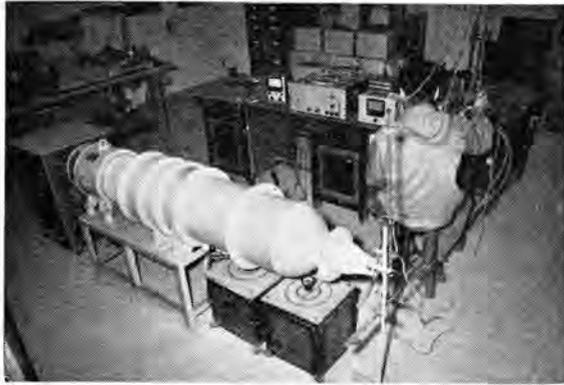


図 41, Eifel 風調
Fig. 41 Eifel type wind tunnel.

(5) 試験用風洞および衝撃波管装置 流体輸送に関連をもつ研究に必要な、つぎの試験用および校正用風洞を設備してある。

形	口径 (mmφ)	風速 (m/sec)	送風機出力 (HP)
アイフェル	300	0~40	2
ゲッチンゲン	500	0~50	15
ゲッチンゲン (亜音速用)	100 (角)	0~300	60
ゲッチンゲン (計器校正用)	80 (角)	0~60	1

なお、超音速範囲の気流をつくり、種々の実験に供する目的で衝撃波管装置を設計しつつあるが、これを用いればマッハ数約 20 までの気流を作ることができる。

5.3 応用物理計測の研究

物理的測定技術を工業計測器の分野に応用するための研究を行っており、各種プロセス用計測器、成分計、指示計、記録計などの研究開発をすすめている。

(1) 赤外線ガス分析計 化学工場や実験室におけるプロセス制御、保安監視への応用を目的とした高感度、高選択性の赤外ガス分析計を研究開発した。その検出方式には光学的零位法を利用しているので、光源や検知器、その他の条件が変動しても直接影響を受けず、精度および信頼度が高い。また、国産では初めての2成分式分析計も完成した。

(2) 自動平衡形計器 電位差計あるいはブリッジ方式による自動平衡形計器として、トランジスタ回路を使った指示計および記録計を完成した。また、XY記録計も開発している。

このほか応用光学実験の部門では、各種材料の反射、透過、拡散などの光学的特性測定、色彩の測定および紫外部から赤外部にかけての分光測定装置の開発、実験を行なっている。

(3) 自動空気圧制御



図 42, 2成分用赤外線ガス分析計
Fig. 42 Two component type infrared gas analyzer.

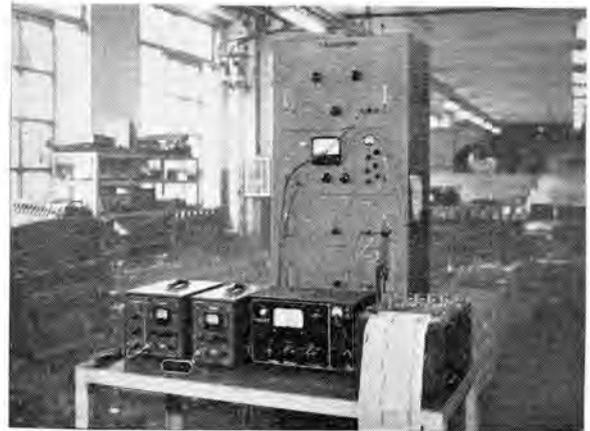


図 43, 自動空気圧制御装置 (鉄道技術研究所納め)
Fig. 43 Automatic air pressure control apparatus.

装置 0~4.5 kg/cm² の比較的大きな圧力範囲を、駆動入力小さな電磁弁を用いて、振幅および周波数可変の正弦波パターンに自動的に追従する空気圧制御装置を伊丹製作所と共同で開発製作し、鉄道技術研究所に納入した。

(4) 直動形検出器 数値制御工作機のテーブル位置検出や、そのほか長い測定長を高精度、無接触で検出し、各種の自動制御機器に用いる目的で、特殊の電磁形原理を用いた検出器および自動平衡形電子回路を並用した直動形検出器を製作した。この検出器は測定長 660 mm、精度 1μ の高精度のものである。

(5) 衝撃用加速度計 0~8,000 g におよぶ大衝撃加速度の瞬時波形を記録する装置を製作した。大衝撃加速度に関しては不明の点が多く、研究および規格化の上に貢献することが期待される。

(6) 電気式重量計関係 電磁形変換器、電子管式自動平衡指示、機械的印字装置を組み合わせた重量指示、印字記録装置を製作して、高炉用、装炭車用、その他に3年以上使用されて好成績を取っている。

全交流平衡形積算器を用いたコンパ・スケールは、アンローダ用として、また、抵抗線ヒズミ計応用ロードセルと自動平衡指示計を組み合わせた電子管式クレーン・スケールも実用されている。

(7) 核磁気共鳴吸収装置 核磁気共鳴吸収 (N. M. R.) 法を用いて磁界の精密測定を行なった。鈹油 (Aplyon C) に含まれる水素の核を共鳴させ、150~1,500 G の範囲を 10⁻⁵ 以上の精度で測定できる。

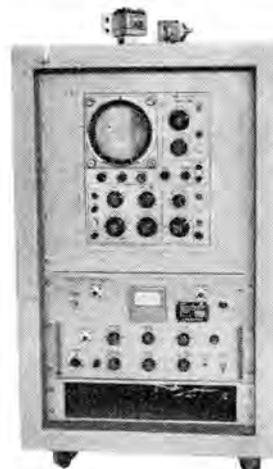


図 44, 衝撃用加速度計 (防衛庁技術研究所納め)
Fig. 44 Shock accelerate recording device.

(8) 直流安定電源 全トランジスタ化した直流安定電源は、チョップ増幅器およびGrawinの直流増幅回路を用い、付加装置なしに 5×10^{-5} 以上の安定度を得るものができた。

(9) 質量分析器 固体用二重取レン質量分析器の1号機はさきに京都大学へ納入したが、さらに性能向上をはかった2号機を自家用として製作した。一方、超高真空用質量分析計は、 10^{-9} mmHgの真空度で微量気体の分析を可能ならしめたが、二次電子増倍管を取り付けることにより、 10^{-12} mmHgの分圧の気体が検出(イオン流 1×10^{-18} A)できることを確めた。

5.4 振動および騒音の研究

各種電気機器の振動、騒音に関する研究、およびそれらの測定装置、特殊用途の釣合試験機の研究開発などを



図 45. 超高真空用質量分析計 (MS-415 形)
Fig. 45 Low background mass spectrometer (Type MS-415).

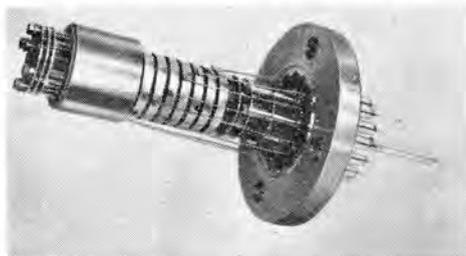


図 46. 二次電子増倍管
Fig 46 Electron multiplier



図 47. 電子磁気共鳴装置
Fig. 47 Electron para-magnetic resonance spectrometer (EPR-spectrometer).



図 48. 電離真空計
Fig. 48 Ionization vacuum gauge (Type IG-305).



図 49. 速動真空バルブ
Fig. 49 Quick operating vacuum valve (Type QV-50).

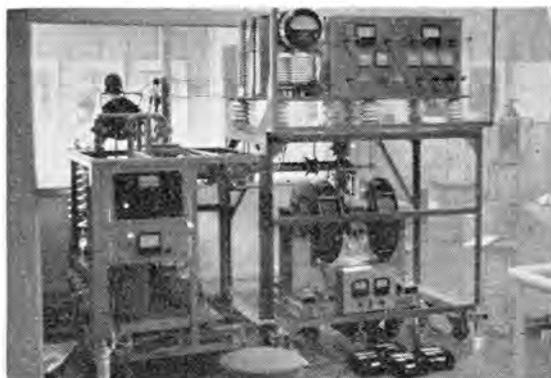


図 50. 原子力研究所納め、イオン源試験装置
Fig. 50 Testing apparatus for Ion source.

行なっている。たわみ軸の振動および釣合修正には多くの問題があるが、軸の振動およびたわみ量などから解明につとめている。そのほか、電動機、扇風機、クリーナ、電気冷蔵庫などの振動、騒音の軽減について研究を行なっている。

5.5 真空技術の研究

油拡散ポンプに関する研究を進め、高性能のポンプ・シリーズを完成した。水銀拡散ポンプは、昭和32年、156 mm口径の大形のをわが国においてはじめて完成し、バン・デ・グラフ加速器の排気に用いて良い成績をおさめている。

超高真空技術は、イオン・ポンプの開発、構成部品の選択、測定技術の確立に多大の成果を収め、別項記載の超高真空用質量分析計を完成した。

真空計測では、電離真空計、サーミスタ真空計などの使いやすい真空計を開発した。

5.6 真空技術の応用

粒子加速装置に関してはバン・デ・グラフ加速器の排気系、自動制御系を完成し、コック・クロフトなどの排気系なら

びに大電流イオン源の研究を行ないつつあり、10 mA のイオン電流を 600 keV に加速できる見通しを得た。一方、原子力研究所向け LINAC 用 エクステンション・チューブ系ならびにイオン源試験装置を完成した。

6. 電気計算機

6.1 相似形電子計算機

無線機製作所における精密形アナログ計算機の開発に先立って、当所でその基礎研究に着手、線形要素はもちろん、とくに非線形要素としての関数乗算器および関数発生器の研究につとめた。関数乗算器は時分割方式のもので、U, X, Y, Z の入力に対して、UX, UY, UZ なる 3 出力を同時に出すもので、精度 0.5% を有している。関数発生器は折線近似方式であるが、折点間を時分割による直線補間を行なっている。したがって、折点を設定するだけで関数設定のできる利点がある。

また、電力系用の電力経済配分計算装置の研究を進め、6 発電所、6 融通点の規模のもの装置を完成している。精度はデジタル計算機による計算結果と比較して 0.8 以内である。

6.2 計数形電子計算機

昭和 32 年度通産省補助金の交付を受けて、磁気円筒記憶装置を完成したが、さらに、これを遅延線形に発展させ、これを主記憶装置とする全トランジスタ化デジタル計算機 MELCOM-LD1 を研究試作した。(表紙裏参照) この計算機は記憶容量 4,000 語、クロック約 200 kc の直列形 2 進計算機であるが、演算速度の向上に各種の工夫



図 51. 時分割による直線補間を行なった関数発生器
Fig. 51 Function generator using time division interpolation.

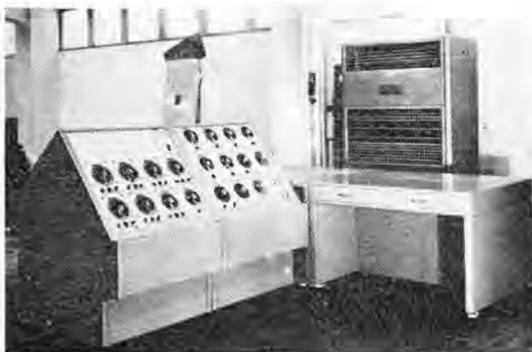


図 52. 電力経済配分計算装置
Fig. 52 Economic load dispatcher.



図 53. 昭和 32 年度通産省補助金による磁気円筒記憶装置
Fig. 53 Magnetic drum memory.



図 54. MELCOM-LD1 に用いられた遅延線形磁気ドラム
Fig. 54 Delay line type magnetic drum used in MELCOM-LD1.

が行なわれており、これをもととして無線機製作所において MELCOM-1101 が商品化された。

磁心記憶装置については、大船製作所と共同して磁心の開発にも努力中である。

電子計算機はプログラム・システムの完備によって始めてその真価を発揮できる。当所で試作した MELCOM-LD1 についてもプログラム・システムの具体化が進められている。機械の機能を十分に活用し、また、保守を行なうには機械用語とほぼ 1 対 1 の対応をもつ用語が必要であり、このために DPL と呼ぶシステムを準備している。さらに、融通性に富みかつプログラム作成が容易なものとして MAMA システムがあり、このシステムでは命令とデータの最適配置を自動的に行なうとともに、シボル化した用語を用いている。数値計算を対象とした場合は、数式による表現をそのまま用いることができる Fortran 形式の MUSE システムを準備するとともに、プログラムの訂正変更を容易に手早く行なえる Inter Preter 形式の ASIA システムを準備している。

6.3 計算機の応用

各研究室の研究に必要な計算および各所からの依頼計算が増大して、その内容も計数規模が大きく、計算量も多くなり、計算過程も複雑で、要求される精度も高くなってきた。その結果、アナログ計算機、交流計算機や卓上計算機では行き詰まるようになり、各部門から電子計算機の設置が要望され、昭和 32 年 2 月に Bendix G-15 形小形電子計算機を設置した。その後、計算規模の増大に対処するために Flexowriter 磁気テープ補助記憶装置(容量 30 万語)、および AN-1 付加装置(7 単位コードを媒介とし、他の装置と情報を交換する装置)を整備している。本機は設置以来、電力系統、原子炉、通信、高周波応用機器、自動制御、材料力学関係、制御計測などきわめて多方面にわたる技術計算、設計計算、数値解析に応用

された。問題の理論的裏付け、あるいは数値による検討、数値解析の方法、新しいルーチンの作成プログラミングに対する理解と演習などの副産物とともに各方面の研究開発に寄与するものがあった。

6.4 系統制御に関する研究

電力系統に対して、Flicker 防止方式の研究、短絡電

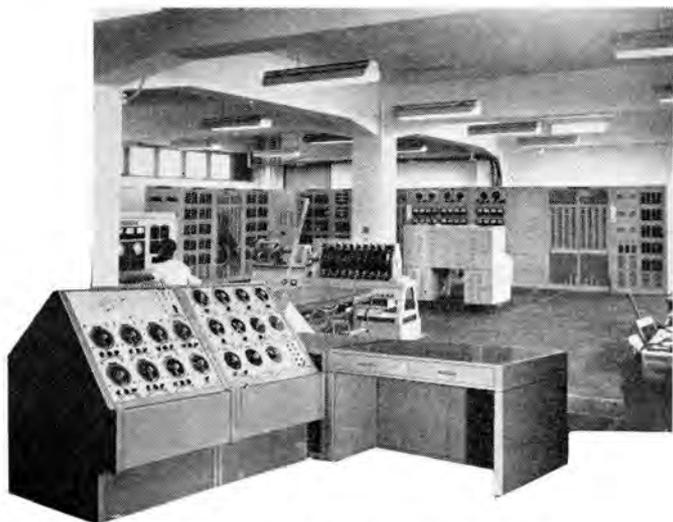


図 55. 交流計算盤と電力経済配分計算機

Fig. 55 AC calculating board and the computing device for economic load dispatching of electric power (in front). Various analysis, such as those related to power system and automation system, etc., are conducted. Electronic analog computer are also installed in this room.

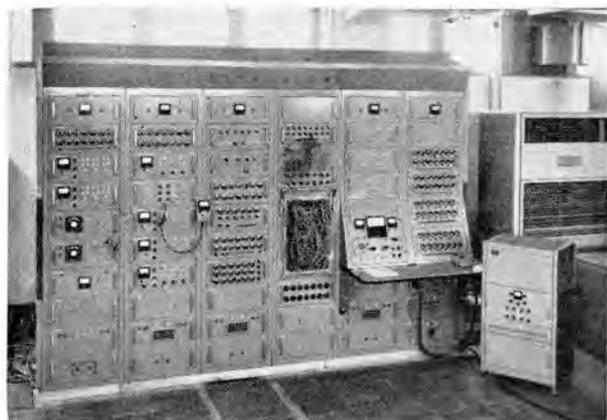


図 56. MELCOM-LD-EA-7101 精密低速形アナログ計算機
Fig. 56 Precision low speed electronic analog computer.

図 57. 交流計算盤に付加して、避雷器の動作責務を研究する避雷器模擬装置
Fig. 57 Arrester analog.



流算出法の研究、界磁喪失現象の研究などすべての分野で系統制御方式の研究を進め、さらに、計数形計算機を利用して解析する場合の数値計算の誤差問題にも検討を進めている。

自動制御系統の設計上必要な飽和、むだ時間、伝達関数などの研究を進め、高精度サーボ乗算器、Swing Calculator などの設計試作に貢献している。

系統計算機制御につき各種の理論的研究を進め、OPCON 方式による Schering Bridge を開発した。



図 58. OPCON 方式による Schering bridge.
Fig. 58 Optimizing controller.

7. 電子管ならびに固体電子装置

7.1 トランジスタ開発研究の経過

昭和 29 年末に、始めて PNP 合金接合形 トランジスタ の試作に成功し、昭和 30 年 5 月から増加試作を開始し、また同年 9 月には合金形高周波 トランジスタを 試作した。

トランジスタ、ダイオード 整流体の量産方式の確立も所期の成果を得たので、33 年 11 月から本格的半導体製品工場の計画に着手し、北伊丹製作所の誕生を見た。その後、高周波用のゲルマニウム・メサ・トランジスタ、コレクタ耐圧 100~400 V、コレクタ損失 100 W のシリコン・パワー・トランジスタ、広範囲の周波数で使用できるシリコン・メサ・トランジスタ、合金拡散形 トランジスタ が続いて研究され、一部はすでに生産にはいつている。他方、GeI₂ の蒸着成生法など基礎技術の研究を進めている。

7.2 モレクトロニクス

のこぎり波発振器、OR 回路、Phase Shift Oscillator Semiconductor Counter、LCR タック回路などの研究を行ない、回路素子をそのまま小形化したものでなく、さらに高度に機能化したものへと研究を進めつつある。

7.3 シリコン・ダイオード



図 59. 左: コバルト封止形ゲルマニウム・ダイオード、右: マイクロ波用シリコン・ダイオード
Fig. 59 Left: Kovar to glass sealed germanium diode. Right: Silicon diode for micro wave use.



図 60. 超小形ゲルマニウム・ダイオード
Fig. 60 Germanium miniature diode.

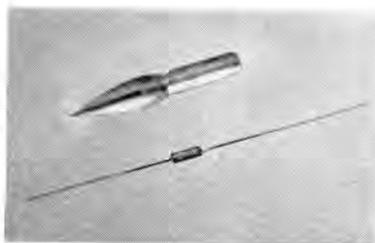


図 61. 超小形 シリコン・ダイオード
Fig. 61 Silicon miniature diode.



図 62. ゲルマニウム 電力用整流素子
左: 風冷式 MSF-200 形
中: 水冷式 MS-200 形
右: 水冷式 MS-400 形

Fig. 62 Germanium rectifying cells for power use.
Left: Air cooled MSF-200 cell.
Center: Water cooled MS-200 cell.
Right: Water cooled MS-400 cell.

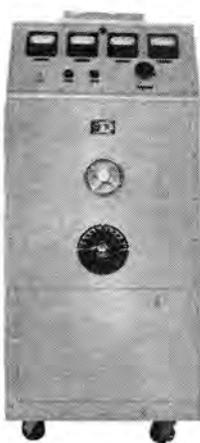


図 63. 阪大納めゲルマニウム整流器
Fig. 63 Germanium rectifier.



図 64. シリコン 整流素子
Fig. 64 Silicon rectifying cell for power use.

図 65. TV 用シリコン 整流素子
Fig. 65 Silicon power diode for TV use.

ゲルマニウム・ダイオードに代わる超小形シリコン・ダイオードは昭和34年12月に試作が完成し、100 A, 400 V の電力用シリコン整流素子の試作は、昭和33年10月に完成し、200 A 級の SR-200 の試作がつづいて昭和34年5月に完成し、国産品では当時最大容量を有するものであった。34年末には合金時の温度、サイクルに改善を加えることによって、逆耐電圧が1,000 V をこえるものが実現した。

7.4 シリコン制御整流素子

PNPN 接合を用いた制御極付整流素子は、昭和35年7月に試作品を完成した。二重拡散法によるもので、50~70 A の電流容量を有し、逆耐圧 500 V である。

研究所の概況・石黒



図 66. シリコン 制御極付整流素子
Fig. 66 Silicon controlled rectifier.



図 67. パラメトリック増幅器用シリコン可変容量ダイオード
Fig. 67 Silicon variable capacitor for parametric amplifier.

7.5 パラメトリック増幅器用ダイオード

シリコン PN 接合を用いた可変容量ダイオードは、とくにマイクロ波におけるパラメトリック増幅器用としての重要な用途をもっているもので、目下素子の試作をすすめている。

7.6 放射線検出用ダイオード

阪大、名大、大阪市大、神大と共同で放射線検出用ダイオードの研究を行ない、P 形高抵抗の結晶 (1,000 Ωcm) を用いた最初の試作品を35年12月に完成した。

7.7 光導電物質の研究

Sb₂S₃, ZnS, CdS について主として単結晶を製作する技術の開発と、単結晶の物理的諸性質を研究し、ピチコン、CdS セル、電界発光板などを開発する基礎をきずいた。とくに CdS については、単結晶の成長機構の考察、赤外線によるクエンチング、破壊の状況、各種不純物を導入した際における半導体的性質の相違の検討、電界発光、不純物拡散、転位との関連、PN 接合の形成、光起電力など各種の面からその物性的性質を攻究した。さらに X 線、β 線、γ 線に対しても、照射によって導電度の増すことを確かめ、放射線測定用半導体素子として High Dose の場合重用されるものであることがわかった。

多結晶 CdS に対しても光導電性質を吟味し、一部は CdS セルとし、焼結 CdS および蒸着 CdS 膜の研究は目下進行途上であり、蒸着による CdS 光起電力の検討とともに鋭意攻究中である。

そのほか、アンスラセンなどの有機半導体の光導電、電界発光、光増感の実験など一部実施中である。

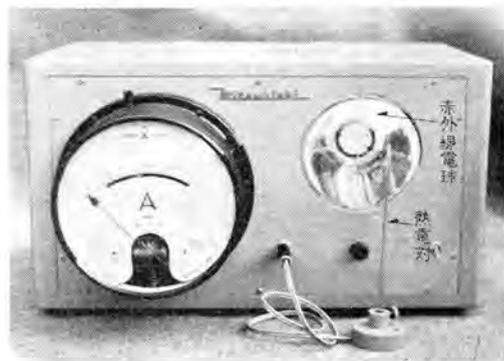


図 68. 自動温度調節装置
Fig. 68 Automatic temperature controller use of CdS cell.



図 69. 光導電セル
Fig. 69 Photo conductive cell.

7.8 光導電セル

小形 CdS 単結晶光導電セルの研究開発を行ない、各種の CdS セルの試作を完成してホトリレー、顕微鏡用照度計、写真黒化度の測定、透過配光率の測定、計数装置、自動重量選別器、自動温度制御装置、テレビ画像面の自動輝度調節装置、炭坑用ガス検出器にそれぞれ用いられ、焼結形のものもテレビ用、自動トビウ用や、街灯の自動点滅器用に使用されている。

7.9 電界発光

電界発光の基礎研究を推進するため、ZnS の単結晶を作り、その注入形電界発光の研究を行なったのを始め、粉末電界発光体による真性電界発光板の試作などを行なっている。

7.10 電子写真の研究

光導電性半導体と静電吸着現象を組み合わせた電子写

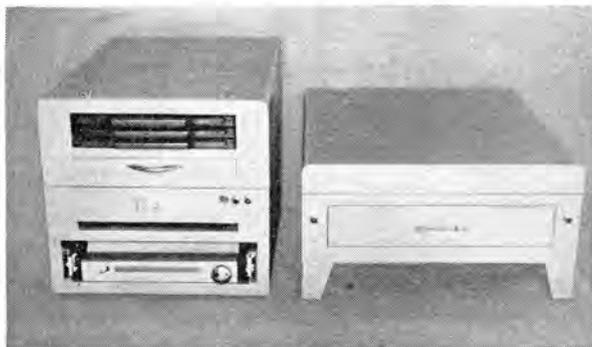


図 70. エレクトロファックス式静電複写装置 (本体およびヒューザ)
Fig. 70 Electrofax type electrostatic copying apparatus, model UNIFAX.

真法は、昭和 34 年 4 月、三菱製紙株式会社と共同でエレクトロファックス装置として試作機 UNIFAX を発表した。

また、ゼログラフィの研究開発も進めているが、35 年 9 月、電子写真方式による高速度記録への応用を目的として、ゼログラフィ・プロセスを連続的、自動的に行ないうる静電記録装置を試作し、一応所期の成果をおさめた。

7.11 熱遅延リレー管

限時リレーとしてパイマタル板を利用した MT 形ならびに GT 形の真空管の小形遅延リレーを開発した。

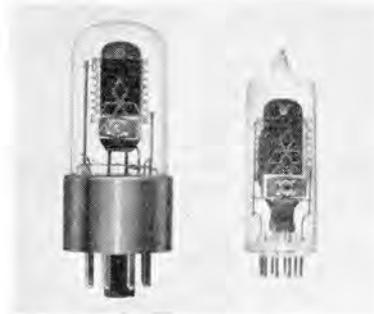


図 71. 熱遅延リレー管
Fig. 71 Thermal relay tube.

7.12 ビジコン形撮像管

RCA6198 形のビジコン形撮像管試作に引き続き、最近では均一光電面形の 7038 形の試作を進めている。

7.13 光電子増倍管

数年前から、光電管の試作開発を行なってきたが、その技術を応用して光電子増倍管を開発した。

7.14 カラー TV 用受像管

昭和 33 年度から試作研究を始め、現在 21CYP22 (21 丸形) と 430AB22 (17 角形) の試作を終わり、当社のカラー TV セットに使用されている。

7.15 電力管の研究

溶接器用イグナイトロンの、ガラス製イグナイトロンに代わる鉄そう密封形イグナイトロンの開発が行なわれ、整流放電管、グリッド制御放電管は、水銀封入の放電管につづいてクセノン入りが開発され、大形の鉄そうサイクロンも開発して、溶接器、インバータ、モータ制御などに使用されている。

工業用送信管も出力 100 W から 100 kW までの間に各種管種が開発された。

VHF 帯発振管は 300 Mc で 500 W の出力を出すことを目標としたセラミック管 WF-403 の開発が進められ、600 Mc 帯で連続出力 5 kW を出す大電力進行波管が大阪大学と共同で開発されつつある。

極超短波管として、周波数帯 5,300 ± 40 Mc, 出力 300 kW のマグネロンおよび周波数 6,725 ± 150 Mc の間で周波数を可変できるマグネロンで、出力は 100 W のものを



図 72. ビジコン (小形撮像管 6198A ビジコン)
Fig. 72 6198A Vidicon camera tube.



図 73. 7G14A サイクロン
Fig. 73 Thyatron 7G14A.



図 74. 強制風冷送信管 (7T36R)
Fig. 74 Transmitting Triode 7T36R.



図 75. 大電力進行波管の内部構造
Fig. 75 Interior construction of high power travelling-wave tube



図 76. MX-502 形 マグネトロン
Fig. 76 Type MX-502 Magnetron.



図 77. TW-801 形 8,000 Mc 帯進行波管
Fig. 77 Type TW-801, 8,000 Mc band, travelling-wave tube.



図 78. TW-302 形 S-バンド 2kW 進行波管
Fig. 78 Type TW-302, S-band, 2kW travelling-wave tube.

開発した。後者は時分割多重通信機の送信管として使用できるように設計されており、岡山-高松間の国鉄の通信回線の送信管として現用されている。

また、6,700 Mc 帯および 8,000 Mc 帯多重通信機の送信管として使用できる パッケージ 形進行波管 TW-701, TW-801 の開発は完了し、また Linear Accelerator などに使用される S バンド 大電力 クライストロン の前段増幅管および発振管として使用できる飽和出力 2kW の S バンド・パルス 動作進行波管 TW-301 も日本で初めての製作に成功した。

7.16 ホール発電機

半導体工学の進歩により、ホール起電力の大きい物質が製作されるようになり、磁束計、電力計、計算機素子など非常に多くの応用分野が期待され、それぞれの目的に応じた ホール 発電素子の開発ならびに応用面の研究を進めている。

8. 機械装置

8.1 材料および構造物の強度

各種疲労試験材によって、銅材やその他の金属材料の疲労試験を行ない、材料および構造物の疲労強度について研究を行なっている。また、比較的くり返し数が少なく、かなりの塑性変形を伴うような状態のくり返し破壊についても、各種の低速疲労試験材を設計し、実体との関連を求めようとしている。

プラスチック材料を構造用材料として用いる場合、その強度が重要な問題となるが、とくに時間依存性のある性質の研究を進めている。

研究所の概況・石黒

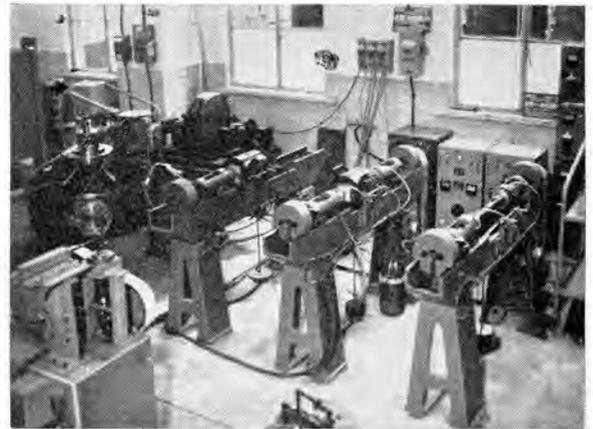


図 79. 回転曲げ疲労試験機(常温および高温)、定ひずみ曲げ試験機および回転円板のくり返し運転・停止による疲労試験機
Fig. 79 Rotary bending fatigue testing machine, (Room temperature and high temperature) cantilever bending fatigue testing machine and fatigue testing machine of high speed rotating disk.



図 80. プラスチック・クレージング試験機(恒温そうつき)
Fig. 80 Craze testing machine of plastics.

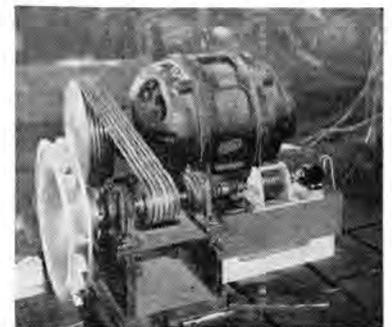


図 81. 電車電動機ファン回転応力測定
Fig. 81 Working stress measurement of fan of railway motor.

構造物の強度については、抵抗線ヒズミ計を主体とし、光弾性などを応用して各種構造物の応力解析を行なっている。

8.2 放電加工の研究

電源方式および電極材料の研究とともに、基礎研究として放電加工機構の研究を行なっている。現在の放電加工速度は硬質材料にたいしては実用上さしつかえないが、機械加工速度にくらべておそいので、その向上のために電源方式の研究に力を入れている。

8.3 放電加工機

昭和 28 年から研究を開始し、中形放電加工機として

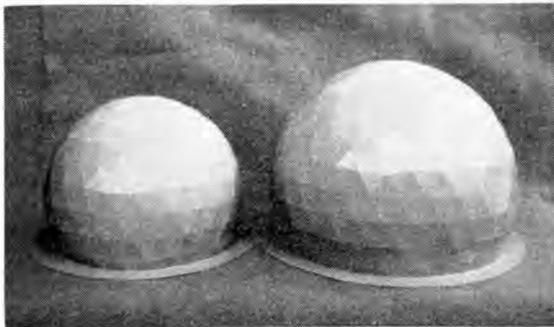


図 82. 地上硬質大形ラドーム形状設計模型
Fig. 82 Scale model of large rigid radome.

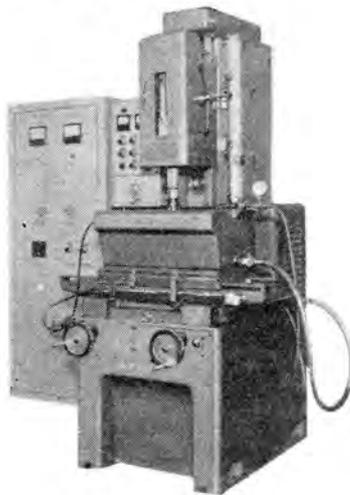


図 83. DIAX 放電加工機
Fig. 83 Electrical discharge machine "DIAX".

は、DIAX 放電加工機を開発し、三菱造船株式会社と当社と共同生産しているが、その精密加工性能を落さずに、小形簡素化した小形放電加工機を試作した。これらの電源部は高周波を重畳したコンデンサ方式で、精密加工性能を持ち、機械部はとくに Stick Slip を除去し、自動制御の容易な構造になっている。

8.4 塑性加工の研究

ホットグリッドならびにクサビ絞り法などによる材料の成形加工性の検討、流体圧、ゴム圧などを利用する絞り加工法の実験などを行ない、塑性加工の基礎研究を行なっている。

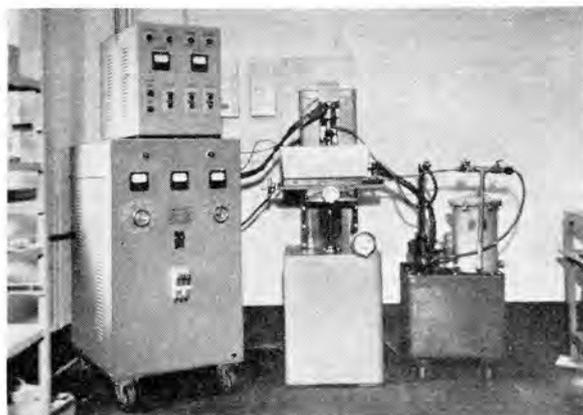


図 84. 試作小形放電加工機
Fig. 84 Junior type electrical discharge machine.



図 85. クサビ絞り試験および油圧絞り装置
Fig. 85 Wedge-draw testing and hydraulic draw instrument.

9. 電気および電子装置用材料

9.1 半導体材料の研究

(1) ゲルマニウム・デンドライト ゲルマニウム・デンドライト(リホソ状結晶)は、半導体工業の最近の最大のトピック・ニュースの一つであったが、当所においてもその製作に成功し、これを用いたトランジスタ・ダイオードの試作も行なった。

(2) 電子冷凍 ビスマス・テルライド系にアンチモンおよびセレンを適当に配合して、Z (Figure of merit) が 3.5 程度の冷却素子を完成し、静岡製作所と共同で、電子冷蔵庫の試作を行なった。

(3) その他の金属間化合物 熱電交換用の鉛-テルライドの試作を行ない、かなり特性のよいものを得た。

9.2 カラー受像管用感光性結合剤の研究

カラー受像管ケイ光面は、ケイ光体とポリビニールアルコール水溶液を混合したものから感光性スラリーを作る。この感



図 86. シリコン単結晶引上装置
Fig. 86 Silicon crystal pulling machine.

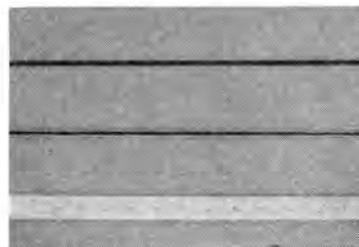


図 87. ゲルマニウム・デンドライト
Fig. 87 Germanium dendritic crystals.

光性結合剤中に微量の鉄その他の遷移元素が混入すると、紫外光体の変色が起こり、正確な色彩像の再現は不可能となる。また、PVAの重合度およびケン化度は、感光度、溶液の安定性、スラリーの塗着性などの作業性の良否に密接に影響する。

9.3 プリント配線の研究

当所はプリント配線に関する研究をいち早くとりあげ、とくに耐熱耐候性、電気特性、機械特性の良好なエポキシ・ガラス・プリント基板の開発を行ない、わが国において最初のこれらプリント基板の製造を行なうことができた。

9.4 合成樹脂絶縁材料の研究

合成樹脂絶縁材料の応用はますます拡大しており、新材料も続々と出てきている。一方、機器絶縁に対する電氣的その他の要求も年々きびしさを増してきている。当所はこれらの要求に答え、機器の性能を向上させるため、新材料の試験開発と応用方法を研究している。

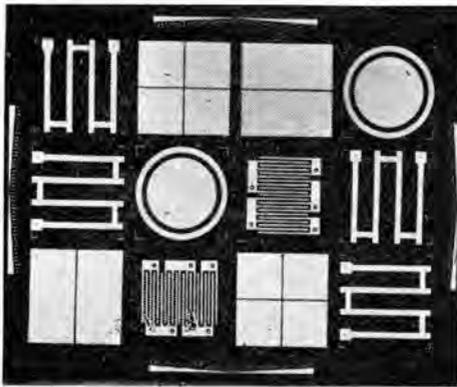


図 88. 試験用テストパターンをエッチングした実例
Fig. 88 Test pattern etched on copper foiled glass-epoxy resin printed plate.

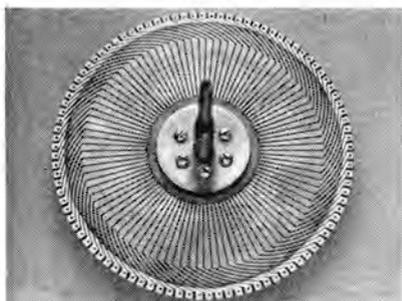


図 89. プリントッド・モータの電機子
Fig. 89 Armature of printed motor.

不飽和ポリエステル系樹脂としては、小形コイル類絶縁用のもの、大形発電機コイル絶縁用のものなど一連のダイレージョンを開発し、大形発電機の性能を一段と向上させることができた。さらに、近來はエポキシ樹脂が電氣的、機械的、熱的その他の諸性質のすぐれている点から、各種コイル、モータ、トランスなどの要求に対し適合するよう組成の研究と加工方法の開発を行なっている。なお、これら合成樹脂絶縁材料の研究にあたっては応用とともに基礎的研究をするために着々測定装置類を充実させ、今後の進歩に備えている。

研究所の概況・石黒

9.5 絶縁紙の研究

変圧器を過負荷運転したい場合があるが、これをおさえるものの一つは絶縁紙の熱劣化防止である。絶縁紙をAmine類で処理すると、この熱劣化を防止できるといわれ、各種のAmineの絶縁紙の熱劣化防止と油その他への影響の検討を行なっている。

9.6 冷凍機材料の研究

密閉形冷凍機の冷媒にはR12、R22のほか各種のフロン類が使用されるようになり、しかもその絶縁材料に対する作用は、冷媒の種類により異なる。また、これに用いられる絶縁材料もきわめて多いので、これに対する各種冷媒の作用の広範な研究を行なっている。

9.7 非直線抵抗

いわゆるVaristorと称されるもので、電気回路の保護装置および制御装置に多量に使用されるようになった。当所で開発したものは、炭化ケイ素を基体としたものであって、非直線係数4以上で、電流耐量大なるものの製作に成功し、半導体整流器の保護装置のほか、継電器回路の保護装置として実用化すべく努めるとともに、自動電圧調整器に応用して好結果を得ている。

9.8 ヒシレックス

いわゆるMycalex相当品であるこの成形品は、耐熱

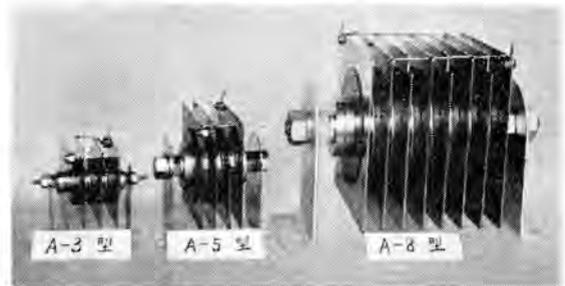


図 90. VA形バリスタ
Fig. 90 VA type varistor.

絶縁物および高周波絶縁物としてすぐれているばかりでなく、強固な絶縁継手および密封端子として優秀な性能を有しているもので、原子力機器、冷凍機および電車電動機用などのものを開発し、実用に供しているが、原価低減と特性改善の目的で注入成形法を研究し、一般製品に応用すべく努めている。また、500°Cに耐えるものが要求されているので鋭意開発中である。

9.9 ヒシオーム

特殊磁器の内部に抵抗素子を生成させ、外周部は気密な磁器絶縁物にしたいわゆるソリッド抵抗で、小形で安定な抵抗器を提供する目的で開発したものである。材料および製造方法を研究し、JIS C 6406のF特性およびMILL規格をも満足するものが得られるようになったが、工業的製造設備を自動化する計画が進んでいる。

9.10 耐熱性の導電ゴム

シリコン・ゴムは、カーボン・ブラックを配合して加硫することがいままでも不可能であったが、ビニル・シリコン生ゴムに重合触媒としてジターシアル・ブチル・ペルオキドなどを用いて、

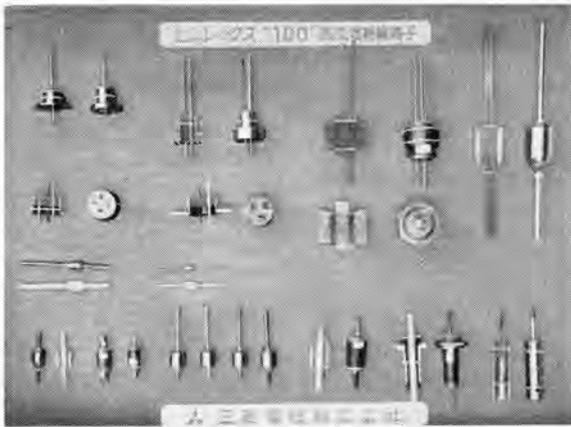


図 91. ヒシレックス 気密絶縁端子
Fig. 91 Air tight insulating terminal with Hishilex.

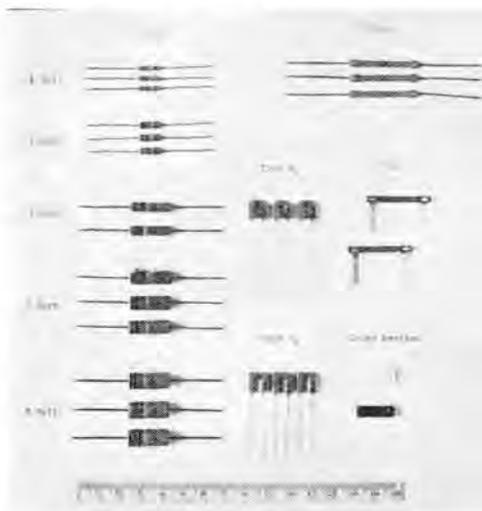


図 92. ヒシオーム・ソリッド 抵抗器
Fig. 92 Hishi-Ohm solid resistor.

カーボン・ブラック 配合のものも加硫できるようになった。それにより、従来のゴムでは不可能であった高温での使用を可能ならしめ、耐熱性の必要な導電性パッキンや測定用電極ばかりでなく、ゴム弾性を有する発熱抵抗体として $10^6 \Omega \text{cm}$ 程度まで任意の抵抗のものが作り得られる。

9.11 磁器材料の研究

電力用シリコン整流体用のセラミック・シールを開発を行ない、シリコン整流体の外装をすべてセラミック・シールに代え、性能を向上した。一方、セラミック・シール小形送信管を開発するとともに高圧イグナイトロン用セラミック・シールの試作に成功した。

チタン酸バリウムにイットリウムおよびランタンを添加したもので正温度特性サーミスタを試作した。

9.12 接点材料の研究

大電流用 Ag 系接点を対象とし、Ag-CdO および Ag-W 接点について、その傷損、溶着などの現象を研究した。Ag-CdO 接点においては CdO の、Ag-W 接点においては Ag の飛散消失にその傷損が特長づけられることや、継電器の開閉時のアーク発生におよぼす CdO の役割を明らかにした。それらに関して、CdO の粒度と

その分布および含有量などと傷損量との関係を明らかにした。

9.13 電機用ブラシの研究

整流性の良好なブラシを開発するため、製造研究を行ってきた。また、この研究の一環として、種々のカーボン・ブラシについて顕微鏡的構造を比較検討し、その物理特性および耐摩耗性などを左右するおもな原因を確かめることができた。

また、スリップ・リングに用いる金属黒鉛質ブラシの材質選択の手がかりを得るため、種々のリングと組み合わせてしゅう動摩耗実験を行ない、ブラシだけでなく、相手リングの摩耗についても検討し、ブラシの銅含有率および銅粉組織の相違と摩耗量との関係を研究した。

9.14 絶縁材料の熱劣化の研究

種々の絶縁材料および絶縁組織の耐熱寿命の評価試験を行ってきた。その一つとして、各種の合成樹脂皮膜エナメル線の熱劣化による物理的な欠陥の発生状態を観察して、いかなる状態にもとついてその寿命が示されるかを調査している。ワニス処理なしのより合せ試片はいずれのエナメル線もより合せ接触部に触着を生じ、その触着部周辺に亀裂を発生することが認められた。ワニス処理を行なったより合せ試片の劣化状態は、主として表面ワニス、およびエナメル皮膜に亀裂を発生するもの、内部エナメル皮膜自身に発ぼうを生じるもの、あるいは軟化変形するものに区別された。これらの状態が寿命終点となる電圧破壊のおもな原因の一つと考えられ、その対策も検討している。

9.15 磁性材料の研究

(1) 方向性 50% Ni-Fe 磁性合金 (ハイパロイ-O) の製造研究 ハイパロイ-O の磁気特性と関係があるものとして二次再結晶について研究を行ない、二次再結晶発生の様相が変化する原因を究明した。

また、ハイパロイ-O の磁気特性を害することなくその固有抵抗を高くすることを研究し、従来品より約 60% 固有抵抗の高いものを完成し、400 c/s 以上の回路に用いてすぐれた性能を発揮する鉄心を完成した。

(2) マイクロ波単向管用フェライト・コアの製造研究 製造上の基礎となる粉末冶金的な研究を行ない、4,000 Mc 回転形をはじめ各種単向管用フェライト・コアについて、その焼結組織の X 線的、および電子顕微鏡的調査と、電磁気的性質との関連を検討した。一般に $3 \sim 4 \mu$ の大きさまで成長したスピネル構造の結晶粒の特性が良好なことを明らかにし、高性能で高歩留りで製造する方法を完成した。

(3) 磁気測定装置の研究 磁気材料の研究にぜひ必要な測定装置のうち、交流磁気特性直視装置を研究試作し、大いに使用してきたが、さらに、精密交流記録磁束計およびケイ素鋼帯磁気特性自動記録装置を研究試作した。前者は、現在もっとも高精度と考えられる電子管式ペクトル・メータ方式を採用したもので、総合誤差 1% 程

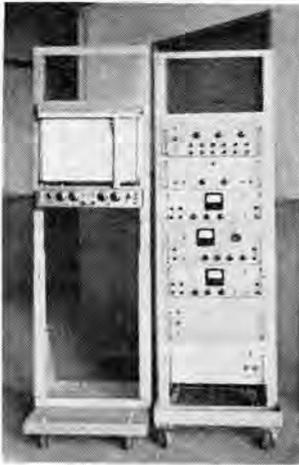


図 93. 精密交流記録磁束計
Fig. 93 Precision AC re-
cording fluxmeter.



図 94. ケイ素鋼帯磁気特性自動記
録装置
Fig. 94 Magnetic characteristic
recorder for Si steel strip.

度で、20 c/s から数千 c/s までの交流磁化特性を自記でき、磁気材料の開発研究や電気機器の開発設計などに直接必要な交流磁気特性の精密測定に、後者は、ケイ素鋼帯の磁気特性をその全長にわたって非連続的に自記する装置である。

9.16 特殊ガラス

シュリンク・ガラスは、酸処理工程の改良、および特殊用の着色法の完成などにより、量産ならびに新製品に対する態勢がととのい、紫外線透過ガラスは製造工程の改良により、品質の向上が行なわれた。

9.17 管球材料の研究

酸化物陰極用基体 ニッケルにつき、基礎的および製造技術的研究を行ない、活性度の増大および長寿命化に成功した。酸化汚染度簡易検査法は世界真空会議に発表した。

一方、マグネトロン、水銀灯用に L 形、含浸形、ポケット形の新形陰極の開発を行なった。

また、カルシウム・イオン・パワァ法により、きわめて微細な酸化物陰極用 カーボネイトを作成することに成功した。

ケイ光放電灯用としてのカルシウム・ハロりん酸塩素系の新ケイ光体の開発を行なって、テラックス・ケイ光ランプの品質向上に貢献し、ケイ光水銀灯用としては、銀白色水銀灯用ケイ光体（ストロンチウム・マグネシウム・アルミニウム・りん酸塩）を開発した。

10. 一般材料

10.1 分析法の研究

液状 イオン 交換体の分析への応用の研究を行なっており、鉄-ジルコニウム合金のジルコニウム、アルミニウム合金中の亜鉛などの分析に応用して好結果を得た。

また、溶剤抽出法を陰極用 ニッケル 中の微量成分の分析に用い、分析操作を迅速化した。

10.2 ジルコニウム合金の研究

研究所の概況・石黒

原子炉材料としての使用のために、とくに高温における強度と耐酸化性を兼備した Zr 合金を開発することを目的として研究し、高温酸化に関して生成酸化膜の特長と耐酸化性との関係についての基礎研究から、酸化膜を緻密にして耐酸化性の改良に寄与する添加元素を求め、ついで、このような添加元素を高温強度にすぐれているといわれる Zr-Nb, Zr-Al 合金に添加して、それらの酸化膜の改良を検討した。

なお、ジルコニウム中のハフニウムの分離について、溶剤抽出法およびイオン交換樹脂法につき、Hf-181 を用いて研究を行ない、分離条件を決定した。

10.3 耐熱銅合金の研究

近時、機器設計上から温度上昇に対しても、高強度を維持しうる銅合金が要求せられ、しかも安価であることが望まれている。この目的のために、Cu-Be, Cu-Zr, Cu-Ti, Cu-Ni の各系合金について研究を行なってきた。

また計測用 パネ 材料の高温または放射線下におけるパネ特性が問題となってきた。そのために銅合金 パネ 材料の高温 パネ 限界値と高温硬さを測定した。

10.4 ステンレス鋼のロウ付の研究

溶接およびロウ付の研究の一つとして、原子炉の開発に重要な問題であるステンレス鋼のロウ付を取り上げた。ロウ材としては 6 種の Ni 系合金を選び、18-8 ステンレス鋼をロウ付したときのロウ付部の拡散現象を顕微鏡組織的に調べ、あわせてその耐食性を比較検討した。

Ni 系合金に添加した Si, B などは、ロウ付時に母材ステンレス鋼に優先的に拡散し、ロウ付時間を十分長くすると、ロウ合金層は共晶組織から固溶組織に変化して耐食性がよくなるが、B のように母材に拡散して析出物を生じる場合は、母材拡散層の耐食性が悪くなることが明らかになった。

10.5 ギヤ潤滑油の研究

各種機械の摩擦部の中でも、とくに大きな動力を伝達する過酷な条件下におかれるギヤの材料、工作精度に関する検討を行なうとともに、活性の強い硫黄、塩素、りん、鉛石鹸などを含有した各種潤滑油の油膜強さならびに摩擦特性を 4 球式試験機を用いた場合と実物との両面から調査している。さらに油の酸化が潤滑性能に与える影響などは実験に逢着する問題として解明に努力している。

11. 電気絶縁塗料の生産

当社の各製作所で使用されている電気絶縁塗料は、最近伊丹製作所の所轄となったが、すべて当研究所の塗料工場で製造していた。電気機械の設計工作面からの要求が最近は多種多様にわたるため、絶縁塗料の品種もそれぞれの特性により多数になってきた。

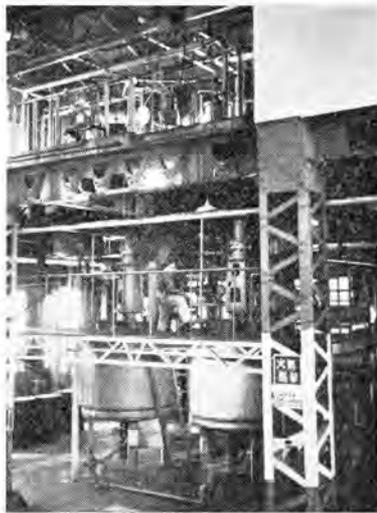


図 95. 間接加熱式合成樹脂塗料製造装置
Fig. 95 Indirect heating synthetic resin varnish kettle.

コイル 含浸 ワニス は合成樹脂と変性油を主成分とする。とくに、耐熱性の良いサーモセット・ワニスの需要が多い。高圧 コイル 用不飽和 ポリエステル 無溶剤 ワニス—ダイラジッ



図 96. ポリエステル 樹脂系 ダイアミックス 成形品
Fig. 96 Polyester resin type "DIAMIX" molds.

が使用されているが、エポキシ樹脂も硬化剤の開発により、真空含浸が可能になったので、上記 ポリエステル 形 ワニスに代わり生産が拡大されつつある。

11.1 成形材料

ポリエステル系の成形材料—ダイアミックスは、絶縁材料として優秀な性能を持つため、自動車用電装品その他の部品用として、増加する需要に依っている。

年 譜

昭和 10 年 9 月 (1935)

社内全体の研究機関として、神戸製作所構内に本店研究課が誕生した。課長には、堀元夫参事が就任。総勢 20 名。鉄骨スレート葺、延 2,300 m² の建物が実験室にあてられた。

昭和 15 年 3 月 (1940)

本店研究部と改称。部長には引続き堀参事が就任。

昭和 16 年 6 月 (1941)

尼崎市南清水の現在地に移転を開始した。当初の実験室は、木造平屋および 2 階建の 4 棟と煉瓦造 1 棟、延 7,000 m² であった。

(12 月 8 日、第二次大戦勃発)

昭和 17 年 7 月 (1942)

移転完了。

電気・物理・化学第一・化学第二・無線第一・無線第二・試作の 7 課が組織された。

昭和 18 年 10 月 (1943)

事務課が新設され、神戸製作所内にあった特許課が移管されて部内は 9 課となった。

昭和 19 年 3 月 (1944)

研究所と改称。独立場所になった。初代所長に引続き堀参事が就任。

4 月

鉄筋コンクリート 3 階建、延 5,890 m² の本館が完成した。

この年に装備された主要な実験設備は、

磁気材料試験装置

水銀整流器試験設備

2,000 kV 衝撃電圧発生装置

100,000 A 衝撃電流発生装置

2,000 kVA ショ断試験装置

断熱材料研究用としての特許試験装置

などがある。

昭和 20 年 4 月 (1945)

大阪市南区巖谷中之町に既損鉄筋建物を利用し 3 階建、延 1,100 m² の真空管工場を設置、長堀工場と称した。

(8 月 15 日終戦)

昭和 21 年 1 月 (1946)

伊丹製作所の無線機部が移管され、無線技術課、無線工作課が新設された。

4 月

無線第一課と無線第二課とを統合して無線研究課と改称。この年に班制度、引続き係制度が設けられた。

昭和 22 年 2 月 (1947)

所長・堀元夫取締役が常務取締役に就任。

2 代目所長に名古屋製作所副所長・若山高根参事が就任。

3 月

無線技術課と無線工作課が伊丹製作所に移管された。

昭和 24 年 5 月 (1949)

研究所長堀工場を研究所長堀分室と改称。

12 月

長堀分室を閉鎖した。

昭和 26 年 8 月 (1951)

研究室制度が設けられるとともに新しい職制が敷かれた。

総務部（事務課、整備課）
特許部（出願課、調査課）
電気第一研究室
電気第二研究室
物理研究室
化学第一研究室
化学第二研究室
材料研究室
工務課

昭和28年7月（1953）

120 m² のペーパロン 実験室が完成した。

9月

電気第二研究室員の全員が無線機製作所の設立に先行して、伊丹製作所無線機部に転出した。

10月

無線機製作所が設立され、転出した研究員は無線機本務、研究所兼務となった。

昭和29年2月（1954）

特許部が本社直轄となり、転出した。

4月

物理研究室室長・大野才三参事が副長に就任。

5月

所長・若山高根取締役逝去。

6月

3代目所長に伊丹製作所所長・弘田実禧取締役が研究所所長兼務に就任。

7月

新ウニス工場および新ウニス倉庫（計 820 m²）が完成した。

8月

弘田所長が常務取締役に就任。

4代目所長に副長・大野才三参事が就任。

物理研究室が物理第一研究室、物理第二研究室に分割された。

12月

塗料課が誕生した。

昭和30年3月（1955）

電気計算機室（340 m²）が増築され

電子管式アナログ計算機

交流計算盤

などが設置された。

この年には、電子顕微鏡、ゼッチンゲン形風洞などが設置された。

昭和31年4月（1956）

総務部に経理課が新設された。

6月

560 m² のトロンジスタ 試作工場が完成した。

10月

天皇、皇后両陛下下行幸啓の光栄に浴した。

昭和32年5月（1957）

電気第二研究室員の無線機製作所本務が解かれ実質上の再発足となった。

10月

TV 画像管と高圧ケイ光水銀灯の生産が人員とともに無線機製作所に移管された。

昭和33年4月（1958）

三菱原子力工業株式会社設立に伴い、十数名の人員が転出した。

6月

新トロンジスタ 試作工場、延 590 m² の増築が完成した。

7月

工務課新工場（延 1,370 m²）が完成した。

8月

新放射線実験室 470 m² が完成した。

10月

放射性材料実験室 180 m² が完成した。

この年にはベンディックス 電子計算機が設置された。

昭和34年1月（1959）

機械研究室が新設された。

3月

プラズマ 実験室（200 m²）が完成した。

8月

トロンジスタの生産工場として北伊丹工場が設立された。

9月

新放射線実験室の第2期工事（200 m²）が完成した。

昭和35年7月（1960）

化学第一研究室室長・石黒克己参事が副所長に就任。

8月

本館増築工事（2,240 m²）が完成した。

12月

大野所長が取締役技師長に就任。

5代目所長に石黒克己参事が就任。

昭和36年2月（1961）

計測実験室（延約 2,000 m²）が完成した。

塗料課の設備人員のすべてが伊丹製作所に移管された。

物理第三研究室が新設された。

3月

工務課試作工場の増築工事（延約 1,300 m²）が完成した。

4月

試作部が設立され従来の工務課は工務課試作課に分割された。

現研究室に主任研究員制度が新設された。

5月

研究所北伊丹分室鉄筋コンクリート造3階建（延約 3,250 m²）が完成した。

水銀整流器の逆弧と責務

研究所 阿部久康*・山口峯男*

Back-fire Probability and Duty of Mercury Rectifiers

Research Laboratory Hisayasu ABE・Mineo YAMAGUCHI

Mercury rectifiers have advantages of very large voltage and overload capacity with almost negligible back-fire as a result of recent study. The back-fire, though not at all nil, will never lead to the damage of the rectifier direct. There is a case of experiment in which a score of back-fire has brought about no appreciable deterioration in the characteristics. The back-fire, however, is one of serious troubles with the rectifier. This report deals with the back-fire probability of mercury rectifier, which is to be represented by Poisson's Equation $P = \mu^n e^{-\mu} / n!$ for the change of duty determined by external circuits. Analysis of the equivalent test result and physical meaning of μ and n based on this analysis are important subject of discussion, which clarifies the relation between back-fire mechanism and performance.

1. ま え が き

水銀整流器は電圧ならびに過負荷耐量がいちじるしく大きい利点があり、また最近の研究により逆弧はほとんど無視できる程度に改善された。現在の状況では逆弧の発生は絶無ではないが、逆弧そのものが整流器破損の直接原因となることはほとんどなく、ある試験例では数十回以上の逆弧に対して整流器自体に顕著な特性劣化がないことが示されている。これは水銀整流器が半導体整流器にくらべある面ではきわめて高い信頼性を有することを証明している。

したがって水銀整流器は今後、直流送電、高圧大電力周波数変換器などの高圧領域、ならびに電圧制御を必要とする大容量電動機制御用として、その特長を生かした独特の応用分野に進出が予想される。このような用途では必然的に従来より過酷な責務で運転しなければならないので、十分な安定度を確保するには、性能の改善策、とくに逆弧現象に関する広汎かつ徹底的な基礎研究が必要である。

当社ではさきにわが国最初の整流器等価試験装置を完成し、これを使用して製品の性能判定、運転条件の改善策の研究に貴重な実績を取めたが⁽¹⁾、これと並行して逆弧機構に関する研究を行ない、整流器の基礎設計に対して多くの有力な資料が得られつつある。

本文では、この研究の一環として、等価試験の測定例から、運転条件および陽極材質と逆弧の関係について考察し、逆弧機構ならびに整流器の性能評価について興味ある結果が得られたので、ここにその概要を報告し、関係各位のご批判に供したいと思う。

2. 等価試験法による逆弧率曲線

整流器の逆弧は大部分が陽極電流の転流終了後、いわ

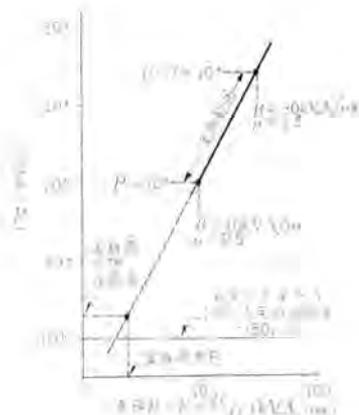


図 2.1 逆弧率曲線
Fig. 2.1 Back-fire probability curve.

ゆる飛躍逆電圧域で発生し、この領域の逆弧は陽極近傍の残留イオン密度と飛躍逆電圧 E に関係する。通常の陽極電流転流波形および等価試験において適当な回路条件下では、残留イオン密度は電流零点直前の電流変化率 di/dt に比例するから、逆弧発生率は di/dt と E の積の関数として表わすことができる。

等価試験回路では試験回路の定数変更により発生逆弧率を任意に制御できるが、それらの結果は回路責務 $B = di/dt \times E$ に対する逆弧率曲線として表わされ、図 2.1 のような関係に整理される。横軸は通常回路責務で表わすが、 di/dt (E , 一定) あるいは E (di/dt , 一定) のいずれを変数としてもさしつかえない。図 2.1 のカーブは責務 B の大きな範囲で逆弧率が測定され、実負荷中の予想逆弧ひん度はカーブを下方に外そうし、実負荷時の回路責務に相当する点の逆弧率として推定することができる。1 年 1 回の点までカーブの全コースを推定し、かつ相当の精度を期待するには少なくとも 1 回 / 1 時間 程度の逆弧率まで測定点を求めておく必要がある。これらのカーブを延長して整流器責務の残りの範囲の逆弧率を求める外そう法としては、統計上よく知られた Poisson の式

$$P = \mu^n e^{-\mu} / n! \dots \dots \dots (2.1)$$

を適用できる。ここに P は平均が μ であるとき n なる値をとる量の確率を示すものである。

この公式の適用に関して Kingdon, Lawton 氏ら⁽²⁾ は逆弧の統計的分布の原因が通電中の陽極前面におけるプラズマ中のイオン密度の統計的変動によるものであり、陽極前面の ΔA なる面積に dt 時間中に平均 μ 個のイオンが射突するとき、 n 個以上のイオンが射突すると必ず逆弧するという仮定に立脚している。あるいは Wasserrab 氏⁽³⁾ により陽極表面に平均 μ 個の電子放射が行なわれている場合、 n 個の電子が放射すると逆弧を生ずるという解釈もある。

陽極に突入するイオンの平均数 μ は責務 $B = di/dt \times E$ に比例すると考えられるから、図 2.1 で横軸の $di/dt \times E$ による μ の相対的变化と、これに対応する逆弧率 P の変化から μ と n の関係を求めることができる。

図 2.2 は Poisson の方程式の計算図表であり、Bendix G-15 計算機により $n=35$ の範囲まで数値計算を行なった結果をまとめたものである。

実測カーブを上記 Poisson 式にあてはめ、 n を決定する一例を図 2.1 について説明しよう。測定例では B が $10 \text{ kV} \cdot \text{A} / \mu\text{s}$ から $30 \text{ kV} \cdot \text{A} / \mu\text{s}$ まで 3 倍責務が増加することにより、逆弧率は 10^{-8} より 7×10^{-4} まで変化する。 μ は B の変化に対応するから測定カーブに適合する n は μ が同じ 3 倍の変化で P が同じ 10^{-8} より 7×10^{-4} まで変化するカーブを図 2.2 の曲線群から探し出せばよい。このようなカーブは図 2.2 において、 $n=7$ として見出される。

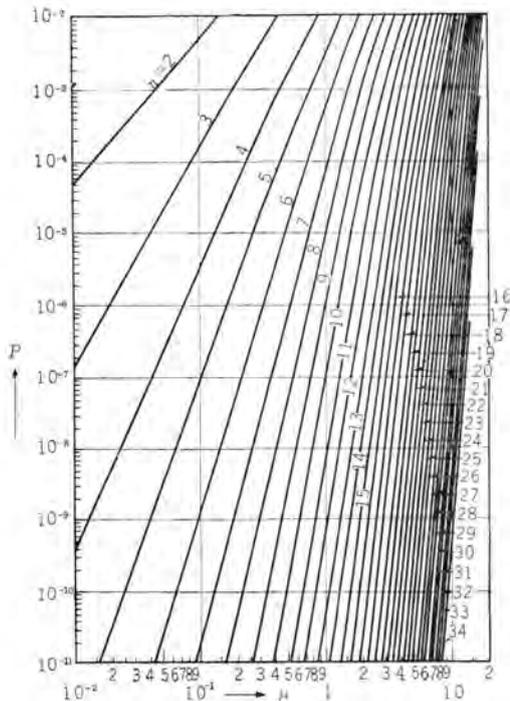


図 2.2 Poisson の方程式の計算図表

Fig. 2.2 Poisson's equation expressed graphically.

上記のように決定された n と μ は、整流器の性能および性能の表現に何かある重要な関係を意味するようである。以下本文では、この μ および n のもつ物理的意義と整流器の逆弧ならびに性能に対する関係について考察することとする。

3. 等価試験による n の実測例

等価試験回路、試験方法についてはすでに報告⁽¹⁾済みであるから、本文では割愛する。

図 3.1 および図 3.2 は $2,000 \text{ kW}$ 、 $1,500 \text{ V}$ 級 (6 タンク) の試験用液冷密封形 イグナイトロンの等価試験結果である。

図 3.1 は陽極電流 350 A ($2,000 \text{ kW}$ 定格として約 150% 負荷) において器そう温度をパラメータとした責務と逆弧確率の関係を示すものであり、同一条件でもカーブに若干の相違があるが、これは陽極電流が厳密に一定ではなく $350 \text{ A} \pm 10 \text{ A}$ 程度の変動があったためで、この電流値による影響の補正を行なえばさらに良好な一致を見出すことができる。責務 B に対する逆弧率変化は測定点の分散がほとんどなくきわめて整然たる関係が得られ、数次の改造の結果、等価試験装置の精度が向上したことを立証している。図 3.2 は器そう温度を一定とし、陽極電流をパラメータとした責務と逆弧率の関係を示すものである。

図 3.1 および図 3.2 中の n は 2 章の方法により求めた Poisson 式の n の値を示すものであり、これらの曲線群から次の関係が得られる。

(1) 図 3.1 より器そう温度 $30 \sim 55.5^\circ \text{C}$ の範囲にお

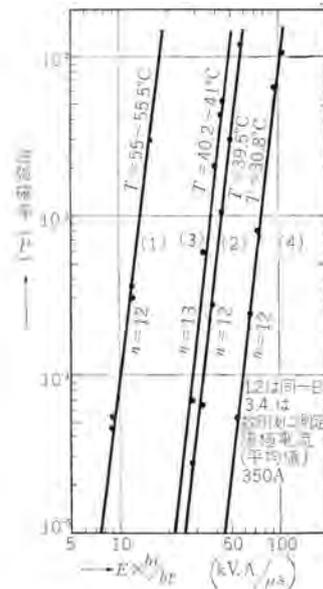


図 3.1 器そう温度と逆弧率の関係
Fig. 3.1 Relation between cylinder temperature and back-fire probability.

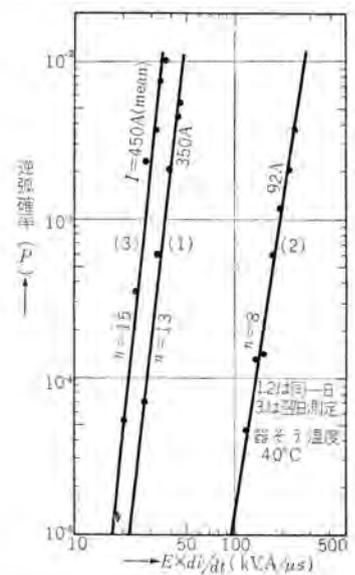


図 3.2 陽極電流と逆弧率の関係
Fig. 3.2 Relation between anode current and back-fire probability.

いて、 n は温度に無関係にほとんど一定である。($n=12 \sim 13$)

(2) 図 3.2 より陽極電流とともに n が増加する傾向が認められる。

上記の関係は逆弧機構を考察するうえに重要な基礎となるものであり、後述のように patch 理論で説明される逆弧機構とよく実験結果の傾向が一致する。

4. 逆弧に対する Patch 理論

逆弧の発生機構についてはまだ完全に説明できるような定説はないが、Kingdon, Lawton 氏らによる古典的な patch 理論に従えば、陽極表面上に過敏点があり、陽極が負電位になるとその近傍の残留イオンが過敏点に集中して正に荷電し、これらの過敏点の電位が、陽極に対する冷電子放射に十分な値になると逆弧にいたるものと解釈される。

このような過敏点は絶縁性微粒子であり、石英、アルミナ、シリコウムなど、通常整流器 ヲク 内に使用されている絶縁構成物の微小細片、あるいは陽極 グラファイト 中に固有に存在する SiO_2 、その地熱化成、電流化成中に生成する酸化物によって生ずることが予想される。

表 3.1 は上述の patch 理論の概念を示すため、陽極表面上に種々な大きさ (一辺 a cm の立方体) の微粒子を仮定し、逆弧に必要な局部電界 (10^6 V/cm) を生ずるため必要な、微粒子上面の集積イオン数 n を計算したものである。陽極前面のイオン密度は十分な根拠はないが、 1.1×10^{12} /cm² とし、それが一様に陽極表面に流入するものと仮定する。

等価試験結果による逆弧率曲線が Poisson 式によく適合しカーブの傾斜を示す n が陽極表面上 ΔA を打つイオン数を表わすものとすれば、逆弧の原因となる微小面積は n の各場合について表 3.1 の $\Delta A = a^2$ であることが予想される。表 3.1 より

(1) ΔA が小なるほど、わずかのイオン流入により電界放射に十分な値に達する。(微小 patch の放電エネルギーは小さく、これが逆弧の原因となることについては二三の反論がある¹⁴⁾⁽¹⁵⁾)

(2) 通電化成の進歩により逆弧率曲線より得られる n の値は大きくなるが、これは通電化成とともに逆弧に敏感な patch が小さいものから順次飛散し、化成の終期

表 3.1

a	C	E	Q	n	N
0.5×10^{-6}	8.8×10^{-10}	0.5	4.4×10^{-20}	0.275	1.1×10^{12}
1.0×10^{-6}	1.77×10^{-19}	1.0	1.77×10^{-19}	1.1	n
2.5×10^{-6}	4.4×10^{-19}	2.5	1.1×10^{-18}	6.9	n
5.0×10^{-6}	8.8×10^{-19}	5.0	4.4×10^{-18}	27.5	n
10×10^{-6}	1.77×10^{-18}	10	1.77×10^{-17}	110	n
50×10^{-6}	8.85×10^{-18}	50	4.43×10^{-16}	2,770	n

上表中:

- a : (cm) patch の一辺の長さ
- C : (F) patch 上下面間の capacity $C = \epsilon a^2 / 4\pi \times 9 \times 10^{11}$ ただし $\epsilon \approx 2$
- E : (V) 10^6 V/cm の電界を作るに必要な patch 上下面間の電圧
- Q : (C) $Q = CE$
- n : 所要の Q を得るための集積イオン数 $n = Q/q$ ただし $q = 1.602 \times 10^{-19}$ (イオンの電荷)
- N : 断面 a^2 の patch に n 個のイオンが流入するよう空間のイオン密度 $N = n/a^2$

においてある値以上の patch が残るものとの解釈がなりたつ。(もちろん化成の初期では陽極面からの局所的なガス放出が有力な逆弧原因であることは否定できない)

実際には ΔA なる patch に集積するイオン数は統計的に変動しており、たまたま n 個以上になれば逆弧が発生する。したがって逆弧確率 P は ΔA 上に n 個以上のイオン流入に対して $P = \sum_{n} P(n)$ で与えられる。しかし n のやや小さい値に対してこの級数の第 1 項以下はほとんど無視できるから、正確に n 個入射することにより逆弧を生ずると考えてさしつかえない。すなわち

$$P = \sum_{n} P(n) \approx P_n = \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}$$

ここに μ は patch に流入する平均イオン数、 P_n はたまたま n になる確率である。

上述の patch 理論に従えば、 n は陽極材質とその表面状態によってのみ影響される係数であり、整流器の構造、運転条件に影響されない性質のものでなければならない。

2. 章で得られた実験結果は次の 2 点において patch 理論の合理性を証明できるようである。

(a) n が器そう温度に無関係である。

後述のようにある構造の放電空間では、陽極電流消滅後の残留イオン密度は器そう温度と陽極電流平均値に関係する。図 3.1 において器そう温度が $30 \sim 55.5^\circ\text{C}$ の範囲で一定であることは、 n が陽極前面のイオン状態に影響されない陽極固有の係数であることを意味する。

(b) 陽極電流とともに n が増加する。

陽極表面上の patch は等価的に CR の並列回路として表わすことができる。電流増加により陽極温度は上昇するが、patch は負の温度係数を有するからその抵抗は小さくなる。したがって時間 Δt の間に必要な電界を作るためには、より多くのイオン流入、すなわち n が大きくなるとしてこの傾向が説明できる。

5. n および μ と整流器責務の関係

前章において等価試験の実験結果が patch 理論とよく一致することを説明した。

Wasserrab 氏による n の解釈は上述の見解と異なっており、 n は整流器の設計、材料の質および処理のような不変の要素と、負荷電流、温度、逆電圧しゅん度など可変の要素を含む整流器の性能評価の指標と考え、これを整流器の品質度 (Valve quality) と定義した。すなわちあらゆる形の整流器において、品質度 n の等しい整流器は許容責務が一定であるとして n と責務の関係を求め、さらに変動負荷時の過負荷耐量の関係を導いている。

しかし前述のように逆弧機構が patch 理論に従うならば n は陽極によってのみ決まる係数であり、整流器の性能評価に対しては構造および運転条件で決まる別の要素を導入しなければならない。

筆者は新しく係数 K を設定し、これと n の二つの係

数を使用して整流器の性能を評価することを試みた。まず逆弧の原因として次の素因を考える。

(1) 陽極自体に基づく素因

- a. 材質 (製法, メーカー, 材料)
- b. 処理方法 (真空処理, 通電化成その他)
- c. 表面状態 (凹凸, 異物の付着)
- d. 陽極温度

上記 a~d を総合した陽極自体に基づく特性係数を n で表わす。

(2) 陽極以外の素因

- a. タンクの形状 (内部構造, 蒸気流の処理)
- b. 陽極-格子系の配置, 寸法
- c. 器そう温度
- d. 陽極電流
- e. 飛躍逆電圧しゅん度

上記の構造および運転条件を表わす係数を K とし, 次の関係を考慮する

$$\mu = KB \dots\dots\dots (5.1)$$

μ : patch に流入する平均 イオン 数

$B = di/dt \times E$: 外部回路で決まる責務 (kV.A/ μ s)

したがって K は責務と流入 イオン 平均数との比例定数であり, 構造, 運転条件によって変化する量である。

整流器の設計ならびに特性改善策の研究に対しては, 性能に対する n と K の比重, また, 予想される各種条件下においてこれらの係数がどのように変化し, かつ, 制御される量であるかを知る必要がある。

5.1 n および K と性能の関係

式 (2.1) および (5.1) より

$$P = \frac{(KB)^n}{n!} e^{-KB} \dots\dots\dots (5.2)$$

の関係が得られ, ある逆弧率に対して B をパラメータとした n と K の関係を導くことができる。

図 5.1 は整流器の許容逆弧率 1×10^{-10} (50 c/s において, 6 タンクあたり 1 年間約 1 回の逆弧発生率) に対する n と K の関係であり, たとえば $n=10$ の陽極特性係数を有し, 構造および運転条件による係数が $K=10^{-1}$ であれば, $B=5$ kV.A/ μ s の責務において 6 タンクあたり

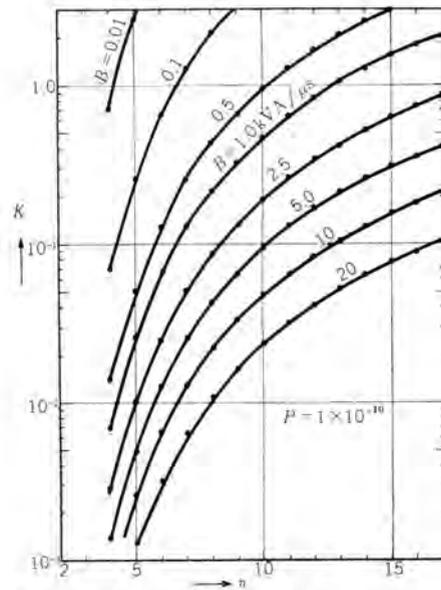


図 5.1 責務 B をパラメータとした n と K の関係
Fig. 5.1 Relation between n and K with the circuit-duty B as parameters.

年間 1 回の逆弧を生ずることを示している。

図 5.1 から整流器の性能に対する n と K の影響について次の関係が得られる。

(1) K が一定 (構造, 負荷電流, 器そう温度が一定) で陽極条件だけ変化した場合

たとえば $K=10^{-1}$ で n を 4→17 まで向上させると, 許容逆弧率 $P=1 \times 10^{-10}$ において B は 0.05→20 kV.A/ μ s まで約 400 倍耐量が増加する。

(2) 陽極条件が一定で K を変化する場合

たとえば $n=7$ で K を 2.5→ 6.5×10^{-3} まで変えると, (1) と同じ耐量の増加が期待される。

すなわち, 同じ性能の増加に対し n ではわずか $17/4=4.25$ 倍の向上でよいが, K では 385 倍の改善が必要であり, この数字は陽極の材質, 処理が性能にきわめて重要な影響を有することを示している。

5.2 n および K の実測例

5.1 において n および K の概念を示したが, これら

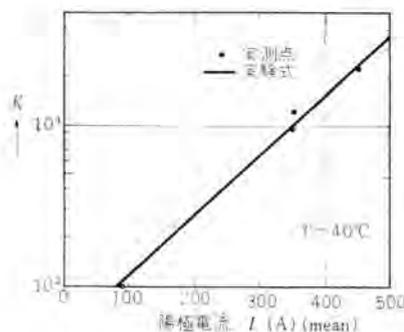


図 5.2 陽極電流と K の関係
Fig. 5.2 Relation between anode current and K .

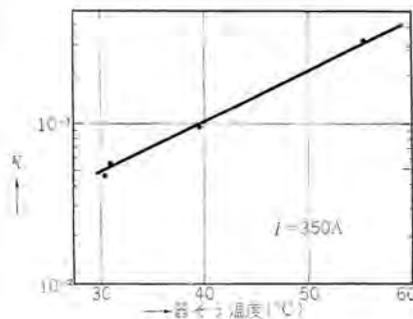


図 5.3 器そう温度と K の関係
Fig. 5.3 Relation between cylinder temperature and K .

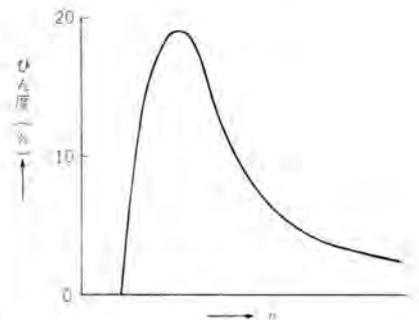


図 5.4 n の分布曲線
Fig. 5.4 Distribution curve of n .

の値が製品の固有差および運転条件によりどの程度影響されるかを示すこととする。

図5.2は図3.2より陽極電流と K の関係を求めたものであり、たとえば 100 A より 450 A (200% 負荷) まで増加すれば、 K は $10^{-2} \rightarrow 2.2 \times 10^{-1}$ まで約 22 倍の増加となる。

図5.3は同様に図3.1より器そう温度と K の関係を示すもので、 $30 \rightarrow 55.5^\circ\text{C}$ の温度変化により K は約 6.5 倍の増加となる。

上記 K の 22 倍および 6.5 倍の変化は、図5.1よりたとえば $n=7$ において責務 20 倍および 6.5 倍の変化に相当するであろう。一方、この責務の同じ変化は n の制御によれば、わずか 2.3 倍 ($n=6 \rightarrow 14$, $K=10^{-1}$) ならびに 1.55 倍 ($n=5.5 \rightarrow 8.5$, $K=10^{-1}$) によって達成することができる。

一方、陽極特性係数 n は上述のように整流器の性能に重要な影響を与えるが、実際には製品によってかなり変化があり、固有差の原因となることが認められる。図5.4は当社伊丹製作所の等価試験装置による測定例で、2,000 kW、1,500 V 密封形 イグナイトロンの 10 数台について得られた n の分布曲線を示すものである。このような傾向はどの形式のイグナイトロンにも見受けられるが、その後、陽極処理および化成方法の改善により、特性向上に対する有力な資料を得ることができた。

6. 性能の表現

5. 章において逆弧率は n および責務 B だけではなく、電流および蒸気圧の関数であることを説明した。図6.1は図5.2と図5.3より得られた K と電流、蒸気圧および図3.2から求めた n と電流の関数を示すものであり、これと図5.1からある構造の整流器について、すべてのパラメータを含む定常状態の運転許容責務の推定が可能となる。たとえば任意の電流、温度として 200 A、 50°C の

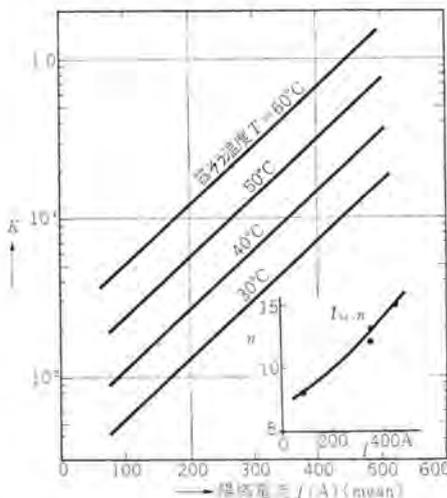


図 6.1 器そう温度をパラメータとした陽極電流と K の関係
Fig. 6.1 Relation between anode current and K with the cylinder temperature as parameters.

場合を考える。図6.1より $n=9.8$, $K=5.8 \times 10^{-2}$ であるから、図5.1より、6 ヶ月年間 1 回の許容逆弧率に対してイグナイトロンの限界責務は $7.5 \text{ kV}\cdot\text{A}/\mu\text{s}$ であることが知られる。ある形式の代表的 ヶ月について図6.1のような関係を正確に求めておけば、その形式に属する一群の整流器では、 K の関係はあまり変わらないので、1本の逆弧率曲線(たとえば図3.1)から求めた n により各電流、温度に対する許容責務のたいの傾向をはあくすることができる。

7. む す び

前述の実験結果および考察の要点は下記のごとくである。

(1) 逆弧機構に対する patch 理論の妥当性を証明する実験結果が得られた。

(2) 整流器の性能に対するすべての要素が n に含まれるという従来の n の解釈、およびこれを根拠とした整流器容量の考え方は適当でないことが示された。

(3) n および新しく定義した K の二つの独立したパラメータにより、整流器の性能を評価する方法を提案した。ここに n は陽極材質、処理、表面状態および陽極温度で決まる陽極特性係数であり、 K は ヶ月の構造、冷却方法、電流、逆電圧しゅん度で決まる量である。

(4) 性能に対して n は K より支配的な影響を有する。

逆弧に影響する要素はきわめて多く、かつ相互に複雑な関係を有するため現象の解析はきわめて困難である。

本文ではその要素のうち陽極特性ならびに電流、器そう温度について逆弧および性能の関係を考察した。 ヶ月の形状および格子の寸法、配置など構造要素については係数 K に含め、ある程度理論的取り扱いも可能であるが、実際には多くの実験結果から帰納的に関係を解析することが近道である。

このような問題に対して等価試験はきわめて有力な研究手段として体力を発揮している。今後、各種構造、形式の整流器について系統的にデータを集積することにより、逆弧現象ならびに性能の定量的はあくが可能となり、今後予想される過酷な運転責務に対し、整流器の信頼度を格段に向上させることが期待される。

欄筆にあたり、当所電気第一研究室、安藤室長のご指導ならびに種々助言をいただいた伊丹製作所関係各位に深く謝意を表するとともに、実験の遂行に尽力された当所電気第一研究室、高島博氏に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 阿部・山口・池田・塚本：水銀整流器の等価試験「三菱電機」34, No. 2, 68 (昭 35).
- (2) K. H. Kingdon & E. J. Lawton: G. E. Rev. 42, No. 11, 474 (1939).
- (3) T. Wasserrab: B. B. Rev. 42, 133 (1955).
- (4) J. E. White: J. App. Phys. 13, 265 (1942).
- (5) G. H. Fett: J. App. Phys. 12, 436 (1941).

シャ断器の残留電流とアーク動特性

研究所 潮 恒郎*・伊藤利朗*・宮本紀男*

Post-Arc Current and Arc Dynamics of Circuit Breakers

Research Laboratory Tsunero USHIO・Toshio ITO・Toshio MIYAMOTO

Arc dynamics of circuit breakers—particularly in the neighbourhood of a current-zero point play a vital part in the breaker operation. About various interrupted arcs, experimental as well as theoretical studies have been extensively carried on, and physical laws lying in the bottom of phenomena have gradually come clear with practicability of theoretical estimate and control of transients in a complicated discharge space. This report accounts for relationship of various arcs with well-known post-arc current through the reference to data of various arcs in laying stress on the importance of dynamic characteristic.

1. ま え が き

絶縁耐力の回復と再起電圧の競争というシャ断アークに関するもっとも素朴な観察に対して、いわゆる残留電流の存在によって示されるエネルギー平衡領域の存在が注目されたのは非常に古いことであった。このエネルギー平衡過程を含むアークの電流零点近傍における動特性を持つ本質的な重要性が切実に理解されるようになったのはごく最近のことであるが、とくに過酷な再起電圧条件、たとえばゼロメートル故障のような場合、アーク慣性が小さいと信じられていた空気シャ断器などでも、零点前後のエネルギー平衡過程がシャ断成否に支配的であることは、いまや周知となってきた。

シャ断器や開閉装置の設計開発の定量化のためには、とくにこの零点近傍のアーク動特性の究明は重要な出発点であり、当所においてもすでに10年近くこの問題の研究が行なわれてきたが、その初期における研究は当所20周年特集の本誌にも報告したところである⁽¹⁾。その後実験的ならびに理論的な研究は引き続き行なわれ、比較的アーク慣性の大きいシャ断器の残留電流の測定にはじまったわれわれの研究は、精密な測定装置の整備開発とともに、各種のアークについての零点近傍1ないし数マイクロ秒の領域におけるアーク空間の物理的法則性の究明に向けられ、各種のデータが集積され、複雑な放電空間の過渡現象を理論的に予測制御することの可能性が漸次実現されるにいたった^{(2)~(10)}。とくにガス吹付シャ断器のように、人為的に制御されたアークに対しては、その理論的なアプローチと実験的な結果とはかなり満足すべき一致を示し、たとえば空気シャ断器における臨界条件付近の複雑な残留電流や、アーク振動波形に関しての実測と計算との定量的な一致はむしろ驚くべきものがある。従来「残留電流」という概念でばく然とはあくされていたシャ断アークの特性的な一面は零点近傍の動特性の一般的な考察に包含され、しかもそれを支配するいくつかのシャ断アークに固有のパラメータ、すなわち、時定数、エネルギー損率、アーク収縮率などの諸性質によって代表されることと

なる。電気回路における回路定数と同様の意義を持つこれらのパラメータは、しかしながら、すべてのシャ断アークに対してまだ回路定数のように自由に使う段階ではないし、またこれらのパラメータを定量的に正確に計算するためには、なお物理的な基礎研究を多く必要としている。

以下この報告には、最近の研究結果の一部を概括的に述べて参考に供し、アーク動特性のシャ断器における重要性を強調したいと思う。

2. アーク動特性の一般的説明

2.1 いわゆる「残留電流」

多くの研究者によって注目されたいわゆる「残留電流」は、それがシャ断現象の究明の重要な手がかりであることは認められたが、そのシャ断性能との直接の関連性についてはいろいろな疑問が投げられてきた。残留電流だけに注目する場合、それがシャ断アークの種類によっていちじるしく様相を異にするだけでなく、同一のシャ断器においても条件によって非常に相違を示すのが通常であって、これに関して暗中模索の時代がかなり続いたことは事実である。残留電流がアークの有する動特性と、外部回路の特性との結合された結果として生ずるものであるために、低圧の磁気シャ断器や並切形の油シャ断器で容易に観測された残留電流も、空気シャ断器などでは、ゼロメートル故障にみられるような特殊な回路においてだけ初めて明瞭に測定されるにいたったわけである。しかしながら残留電流の有無にかかわらず、零点近傍の現象の精密な測定結果の示すところは程度の差こそあれ明白なアーク慣性の存在であって、シャ断の成否、すなわち、アーク空間の再成長と消滅との分かれるかぎをこのアーク慣性が少なくとも一つは握っていることが明らかである。一見複雑な様相を呈する残留電流の消長がかなり単純にモデル化されたこの慣性効果によって氷解することは、後述の空気シャ断器の場合について例示するが、少なくとも定性的には他のシャ断器に関してもまったく同様であって、かかる理解に基づいて、はじめて残留電流

の観測はシヤ断器性能に関する正しい評価を与えるものである。

この点に関連して、とくに強調しなければならないことはいわゆる回路過酷度の問題である。残留電流の存在する場合に回路過酷度を単に再起電圧の上昇率や、電圧波形だけによって代表させることが不十分であることは常識となっているが、同じことは残留電流の有無にかかわらずあらゆる場合にいえることであって、たとえばサージピークをもつて代表される回路のエネルギー供給能力は電流零点の前後を通じてシヤ断アークの消長を支配する重要な特性である。将来の大容量シヤ断器の等価試験などの実施にあたってもっとも心すべきことからの一つである。

2.2 損失とアーク時定数

アーク空間の動特性は、外部回路に対してはアーク抵抗あるいはコンダクタンスの動特性という形で干渉するものであって、偏微分方程式の形で示される導電率 σ の空間分布によって決定される。熱電離あるいはその再結合に要する時間が、常識的に知られるようにシヤ断現象の時間的スケールにくらべてはるかに短い($\sim 10^{-8}$ s)限りにおいて、 σ はエンタルピーあるいは圧力の関数として熱力学的状態量とみなすことができる。しかし、シヤ断アークにおけるような高温状態の電極を持つ高压気中のプラズマでは、空間電荷の存在が許されず、電気的中性を保持することは明らかである。要するにマクスウェル分布にしたがう電離平衡にある中性空間と考えられる。

そこで、電気的入力に対してアークの動特性を決定するものは、純熱力学的に求められる空間のエンタルピーならびに熱エネルギー損失率であり、支配する法則は状態方程式によって関係づけられる三つの基本法則、すなわち、エネルギー、質量ならびに運動量保存の法則に帰着する。

アーク空間における熱エネルギー損失としてとくに重要なものは次の二つによって代表される。すなわち、

(1) 等エントロピ的冷却

これは熱エネルギーの運動エネルギーへの変換によるエンタルピーの減少であって、単位体積あたり、

$$-q \cdot \text{grad } p \dots\dots\dots (2.1)$$

q : 粒子の流速
 p : 圧力

で与えられる。

(2) 伝熱損

これは粒子間エネルギー交換と拡散によって生ずる熱流で単位面積あたり、

$$-\kappa \cdot \text{grad } T \dots\dots\dots (2.2)$$

κ : 等価的な熱伝導率
 T : 温度

で示される。

静止ガス中のアークや磁気シヤ断器に対しては(2)は重要な役割を果たすと考えられるが、消弧室などによって制御されたアークに対しては(1)が支配的である場合

が多い。この二つの損失の割合はシヤ断器に対してかなり重要な意味を持つと考えられる。このほかにももちろんふく射損 $S(T)$ があるが、電流零点の近傍に対してはあまり大きな影響がない。

強く制御されたアークにおいては、アーク領域の周辺における以上の損失の結果として、内部の状態量の変化と関係なくアーク空間が見かけ上変形を起こすような場合がある。このような場合には、損失を熱力学的取り扱いから、外部的に与えられる幾何学的変形に肩代わりさせて考えることが可能である。のちに示す空気シヤ断器のアーク収縮力や、磁気シヤ断器の磁気駆動によるアーク変形などはその例である。たとえば、アーク断面積の変化率 α が与えられる場合には、この効果は断面積 S に対する幾何学的条件として、

$$dS/dt + \alpha S = 0 \dots\dots\dots (2.3)$$

によって与えられる。

アークの静特性は以上のような熱損失率によって定まるが、動特性はさらにこの損失率と系のエンタルピーとの関係によって定まる。ここにいわゆる時定数という概念が生ずるが、いうまでもなく不均一なアーク空間の各部においては異なった時定数の値が対応する。一般に空間導電率 σ についての時定数は次のように表現される。

$$\theta^{-1} = \frac{-1}{\sigma(T, p)} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \left\{ q \cdot \text{grad } p + \frac{\text{div}(\kappa \cdot \text{grad } T)}{\rho \cdot dh/dT} \right\} \dots (2.4)$$

ここに

ρ : ガス密度
 h : エンタルピー

導電率についての時定数に関係する重要な量は、その温度における定圧比熱 $C_p = dh/dT$ の値である。 C_p は一般に温度の関数で、ガスの特性に応じてその解離ならびに電離に対応して大きな山ができる。アークの高温領域では電離が十分進行しており C_p の値も非常に大きい。低温領域あるいは電流零点の極近傍においても、電離度は低下するが、分子解離はなお十分行なわれているので、静的な C_p はかなり大きい。しかし通常の気体において解離原子の再結合(三体衝突を介して行なわれる)に要する反応時間は、考察する動特性の時間的なスケールよりも少なくとも $1 \sim 2$ ケタ上(10^{-8} s程度)であると推定される十分な根拠がある⁽¹⁾ので、零点近傍の動特性に対しては多くの場合アーク空間は単原子状態に「凍結」されており、 C_p の値は低くなっていると考えるのが妥当である。

2.3 弧心と外炎

一般にアークは空間的に不均一な状態量の分布をして外部気体に連続するが、これをいくつかの均一の領域に分割されたカナル模型で考察すれば、十分よい近似を与える場合が多い。多くのシヤ断アークに対して弧心、外炎ならびに高温気体という三つの領域を仮定するのが妥当であるというのが筆者らの提唱するところである。かかるカナル模型の単位長に対しては、前述の熱力学的考

察はきわめて簡単となり、そのおのおのの領域について断面積 S 、単位容積あたりの蓄積熱量差 H 、電気的入力 e^2/R の間に、

$$e^2/R = HdS/dt + SdH/dt + \alpha HS + NS \dots\dots(2.5)$$

なるエネルギー平衡関係がある。ここで N は前述の空間損失率であり、 αS は前述のアークの幾何学的変形を示し、 $(\alpha H + N)$ が単位体積あたりの全損失である。

弧心と外炎とに関しては、別の報告にも詳しく述べてあるので⁽³⁾⁽⁴⁾、詳細は省略するが、弧心は温度 15,000°K 程度の十分電離された定圧比熱の大きい領域で、蓄積熱量の変化は H の変化によらず、おもに断面積の変化で与えられると考えられるので、式(2.5)の第2項は省略され、かつ H は一定とみなされて、アークの動特性式として容易に式(2.6)が得られる。

$$(1/R)(dR/dt) = (\alpha + N/H_0) \{1 - e^2\sigma / (\alpha H_0 + N)\} \dots\dots\dots(2.6)$$

また、外炎は平均温度 7,000~8,000°K と推定される領域で、かなり電離度が低く、かつその温度による変化が大きく、等価的には「凍結」によって定圧比熱もかなり低いと推定されるので、式(2.5)の第1項、第3項は省略され、動特性式としては近似的に、

$$(1/R)(dR/dt) = \theta^{-1}(1 - ei/NS) \dots\dots\dots(2.7)$$

が与えられる。

問題の電流零点近傍では、多くの場合、温度はかなり低下して弧心と称すべき領域は消滅しているので、アーク動特性はおもに外炎の特性式(2.7)によって定まり、式中の S は式(2.3)にしたがって強制的に与えられると考えることができる。

3. 静止気体中のアークに関する最近の研究

もっとも基礎的であると考えられる各種の静止気体中のアークの動特性に関しては、アークが制御されないためにむしろその物理的な考察はむずかしい。アークよりの損失はおもに $-\kappa \cdot \text{grad } T$ によって考えられるが、必然的に高温アークによって誘起される対流、うず、あるいは電極よりのアークジェットの影響は予測困難ではあるが、非常に大きいものと推定される。しかしガスの解離電離に伴う諸性質が明らかである場合、簡単な軸対称円柱模型を仮定し、 $-\kappa \cdot \text{grad } T$ の損失を考慮して静的ならびに動的なアーク内の温度あるいは導電率分布を計算することができる。図3.1はこのようにして空気中における静的アークの温度分布を計数形計算機により求めた結果の一例であるが、明瞭に前述の弧心の存在を確認でき、経験的な観測結果ともよく一致している。ほかの多原子気体についても定性的に同様であって、中心温度の低下に伴って弧心は消滅する。この静的アークの弧心は解離に伴う κ の山によって生ずるもので、Ar, He などの単原子気体では普通の温度で弧心は生じにくいことも計算上明らかとなる。

アークの動特性に関して最近行なわれた実験としては、静止気体中の対向電極間に第三電極を用いてアークを発生させ、その電流零点近傍の特性を精密に測定した例がある。この場合、電源は充電された大容量のコンデンサ

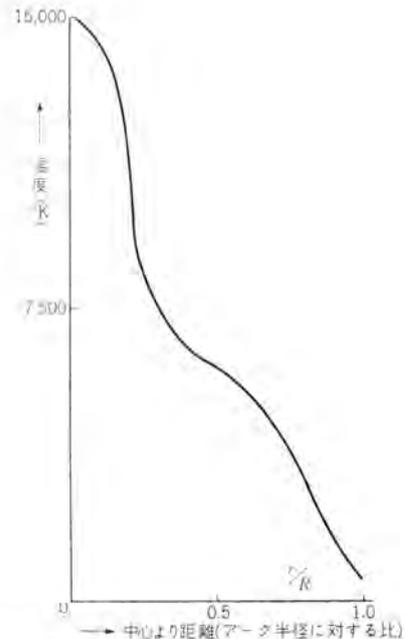


図 3.1 空気中静止アークの温度分布の一例 (計数形計算機による計算)

Fig. 3.1 Temperature distribution in static arc in the air

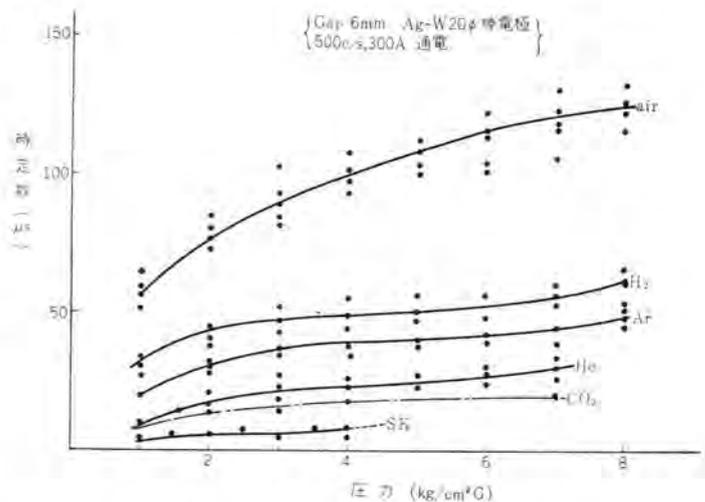


図 3.2 各種気体中アーク時定数-圧力特性

Fig. 3.2 Time constant versus pressure in various gases.

クを用いた共振回路である。測定装置に関しては別に報告しているので省略するが、おもに零点近傍の電流の減少波形からアークに固有の時定数を求めることが行なわれた。

図3.2は各種の気体について圧力による時定数の変化を示している。電極距離は 6 mm、電流は 300 A について行なわれたものである。すべての気体について圧力とともに時定数の増加がみられるが、これは零点近傍にお

いて伝熱損の大きいアークであることを裏書きしている。電気的負性気体、とくに SF_6 の時定数の顕著に小さいことが示される。

図 3.3 は極間距離による時定数の相違で、一般に極間距離の増大とともに時定数は大きくなる傾向にあるが、とくにそれが窒素において顕著である。

図 3.4 には電流による時定数の変化が示されている。試料としては十分ではないが、実験された範囲内では電流による時定数の変化は顕著でない。

最後に、静止気体中では多くのガスについて時定数がかなり大きく、しかも損失が大きくないので、再点弧にいたらないで減衰するいわゆる残留電流を認めることはかなりむずかしい。しかし、 SF_6 については明瞭な残留電流が認められる場合がある。図 3.5 はその一例である。

4. 空気シャ断器のアークに関する最近の研究

空気シャ断器のアークは、人為的に制御されたアークの代表的なものの一つである。したがってその動特性はかなりよい近似で理論的に推定することができる。

零点近傍のアークに対しては損失としては、空気流によって与えられる $-q \cdot \text{grad } p$ とアーク断面の変形 αS を考慮すればよいが、細いアークであるから、事実上一次元的考察が可能である。Saha の電離平衡と単原子状態への「凍結」を仮定すれば、式 (2.7)、式 (2.4) の時定数 θ から、極間コンタクトスについての時定数が、

$$\theta^{-1} = \frac{E_i}{2kT} \frac{2}{5} \left[\frac{q dp}{p dx} \right]_{\text{mesn}} \dots \dots \dots (4.1)$$

で近似される。ここに E_i は気体の電離ポテンシャル、平均は上流電極より、下流の衝撃波発生の近傍までがとられる。

式 (4.1) は θ が貯気そうの圧力によっては変化しないが、ノズルの形状寸法と配置によって変わりうることを示している。図 4.1 は小形モデルシャ断器についての形状

の異なる 2 種のノズルの時定数と貯気そう圧力の関係を示す実験結果であるが、上述の推論を明らかに裏書きする。

式 (4.1) の q はプラズマ部分の流速で、その温度を仮定すれば理論的に推定されるが、光学的な測定から得ら

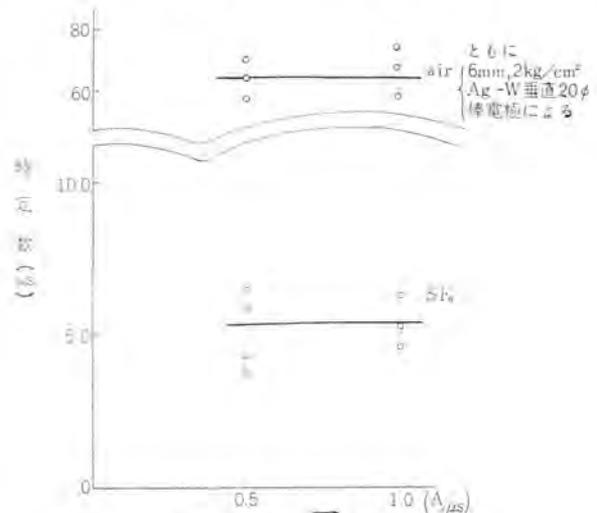


図 3.4 電流傾斜と時定数

Fig. 3.4 Time constant versus rate of change of current.

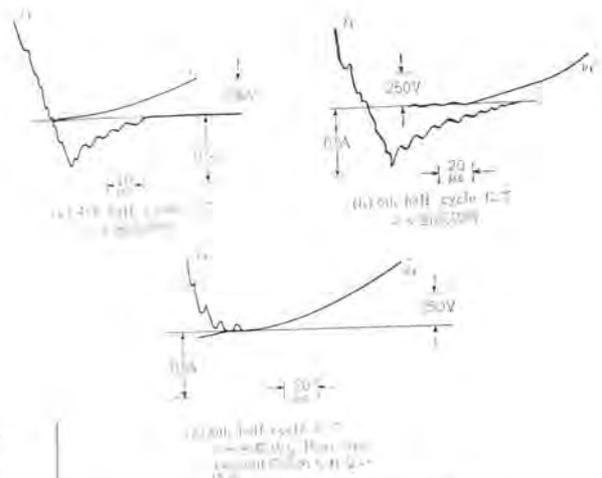


図 3.5 SF_6 中残留電流の例 (0.5 kg/cm²g, Ag-W チョウ)

Fig. 3.5 Post-arc current in SF_6 gas.

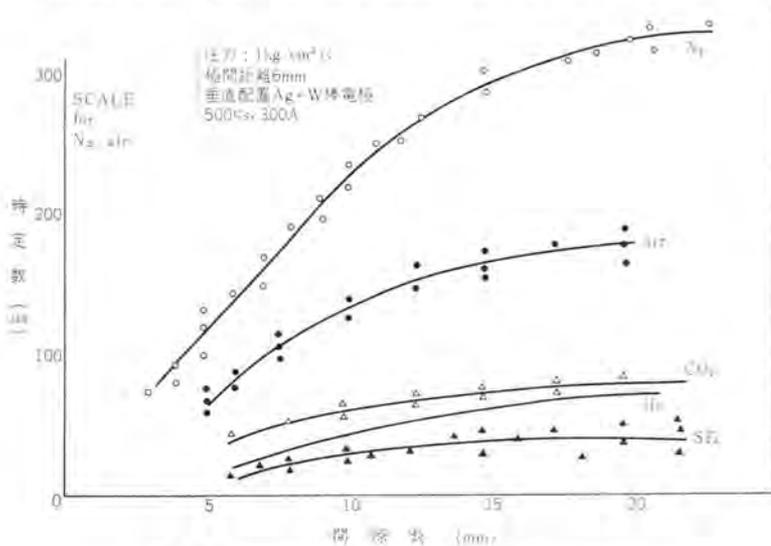


図 3.3 各種静止気体中アーク時定数-極間距離特性

Fig. 3.3 Time constant versus contact separation in various gases.

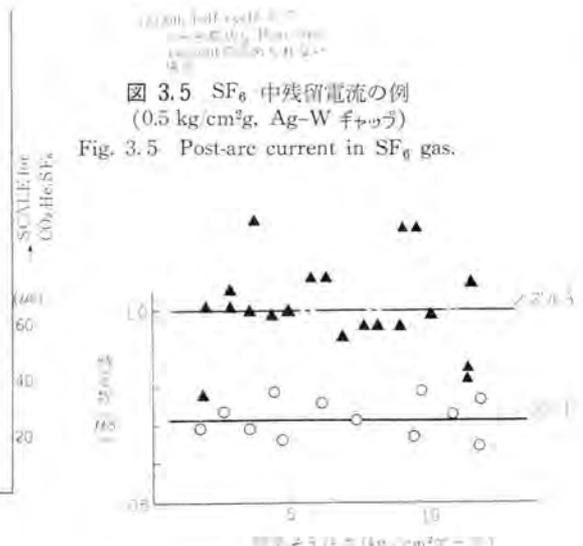


図 4.1 貯気そう圧力と時定数

Fig. 4.1 Time constant versus tank pressure.

れる値とよく一致し、だいたい 2×10^5 cm/s の程度である。これを用いて $[(q/p)(dp/dx)]_{\text{mean}}$ は実際のノズル寸法から容易に計算される。各種のノズルに関してこれを求め、実測された $\bar{\theta}$ の値をプロットすると図 4.2 のようになるが、理論曲線(実線)との一致は非常によい。

アーク断面の変形 αS は、気流によるしぼり込み作用であるから、

$$\alpha = \frac{1}{S} \frac{\partial(\rho q)}{\partial x} \dots \dots \dots (4.2)$$

ρ, q は気流の密度および速度

で与えられる。

零点近傍の動特性は外炎によって支配されるので、式(2.6)から与えられる初期条件のもとに、式(2.7)だけを考慮すればよい。式(2.6)は弧心消滅時のアーク電圧 V_a とアーク断面積 S_0 を与える。

シヤ断器極間のコンダクタンス g に対する動特性式はかくして、

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \bar{\theta}^{-1} \left(\frac{v^2 g}{NS_0 e^{-\alpha t}} - 1 \right) \dots \dots \dots (4.3)$$

で与えられる。ただし、 $\bar{N}, \bar{\alpha}$ はそれぞれ $[-q(dp/dx)]_{\text{mean}}$ および $[\alpha]_{\text{mean}}$ を表す。 v はアーク電圧である。初期条件は、

$$\left. \begin{aligned} dv/dt &= 0 \\ v &= -V_a \\ i &= -NS_0/V_a \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4.4)$$

となるが、これを外部回路の方程式と組み合わせれば、零点近傍の過渡現象を記述できる。

図 4.3 には、二三のモデルシヤ断器について行なわれた零点近傍の電流電圧波形の実測結果と、上記の計算結果(アナログならびに計数形計算機による)との比較を示している。単純な残留電流の流れる場合や電流の継続する場合はもちろんのこと、臨界付近に現われるきわめて特異な残留電流の波形 [図 4.3 (b)] なども十分な精度で近似されている。さらに特殊な回路の条件に応じて電流の零点前や零点後に生ずるアーク振動の波形も測定と計算とがよく一致している。このアーク振動はアーク抵抗と並列容量とが、

$$\frac{1}{CR} = \omega = \bar{\theta}^{-1} \dots \dots \dots (4.5)$$

の関係になって $\omega/2\pi$ なる周波数で発生するものであるが、とくに零点前に生ずる振動は断面積 S の収縮に伴って振幅を減衰する特異な波形となる。測定と計算との満足すべき一致は、以上の動特性式の正しさを立証するとともに、アーク振動の測定から、アーク時定数 $\bar{\theta}$ の推定の可能性を示している。かように零点近傍の様相はきわめて多岐にわたり、同一のシヤ断器でも回路条件でいちじるしく異なるが、比較的簡単な動特性式(4.3)が現象を明解に説明する。

かくして空気シヤ断器については、実験的理論的に推定しうる四つのパラメータ、 $\bar{\theta}, \bar{\alpha}, NS_0$ および V_a によ

て零点近傍の動特性がほとんど満足すべき程度に記述できることが確認された。

この動特性によってエネルギー不平衡からシヤ断不能となる場合の条件は、シヤ断器としての特性上もっとも重要である。外部回路を瞬時回復電圧 E_n 、再起電圧固有周波数 f_n なる単一周波数回路とし、シヤ断電流の実効値を I 、電力周波数を ω_0 とすれば、式(4.3)から計算

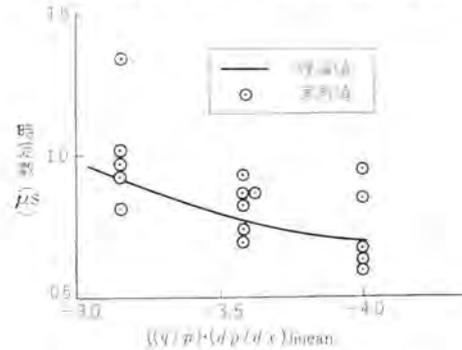


図 4.2 時定数と $[(q/p) \cdot (dp/dx)]_{\text{mean}}$ の関係
Fig. 4.2 Time constant measured and calculated.

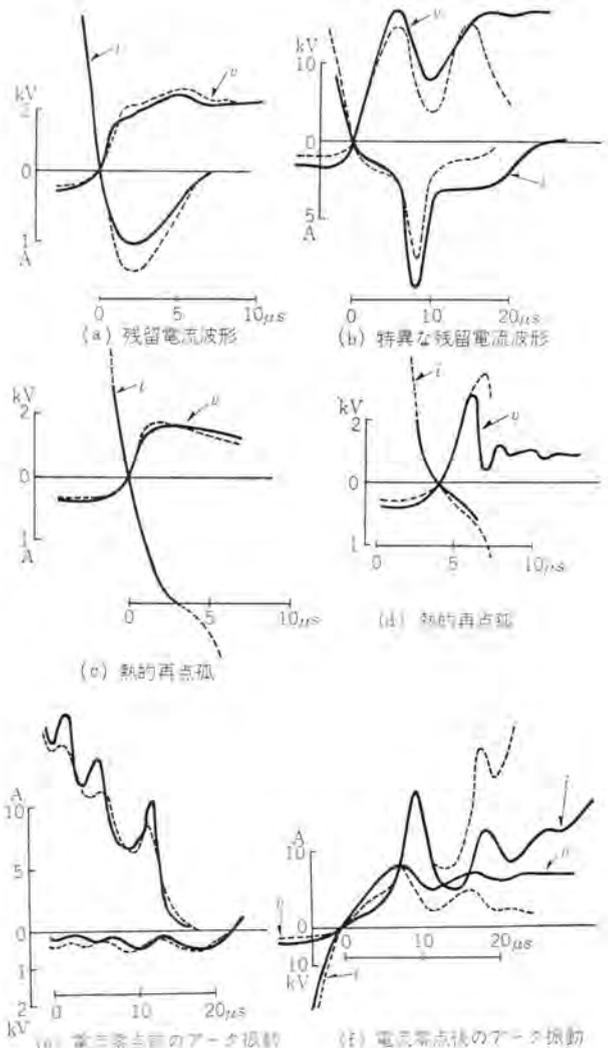


図 4.3 空気シヤ断器の零点近傍の現象の実測結果と計算結果との比較(実線は実測、点線は計算波形)
Fig. 4.3 Transients around current zero in air blast circuit breakers.

されるシャ断限界は図4.4に示すように一般化して与えられる。これはシャ断電流に対して限界再起電圧周波数が垂下特性を示すという周知の経験的事実をアーク動特性から明らかに裏書きしたものである。

最近、問題となっているキロメートル故障に対する空気シャ断器の動作を、以上の動特性の観点から考察することは興味あることである。キロメートル故障では線路のサージインピーダンスが与えられた条件では、シャ断電流、往復反射の周波数ならびに高周波分回復電圧の間には一定の関係がある。したがって短絡電流対周波数の図上でこの関係を考慮して、系統の特性とシャ断器の特性との比較を行なうことができる。図4.5は84kV級の2点切空気シャ断器についてキロメートル故障に対する特性を論じた図の一例である。図においてシャ断点1点あたりの特性パラメータは図の下に表示される。たとえば、特性aのシャ断器については母線短絡容量10kAの電気所ではA点からB点にわたって危険範囲のあることを示している。特性曲線の左側に近接した領域は顕著な残留電流の流れる領域である。

図4.5のような考察から得られる重要な結論は、キロメートル故障に対してのシャ断器動特性の支配的な役割が明らかにされたことであって、キロメートル故障の危険範囲は電気所からある程度へだたった所に有限の区間存在すること、シャ断器の θ が減少し、あるいは NS_0 が増加すればキロメートル故障に対して強くなるが、母線短絡容量の増大とともに、条件はいちじるしく過酷となることなどが認められる。とくに84kV級についていえば、実用スケールのシャ断器で大容量母線のキロメートル故障を処理するには、相当の困難があるこ

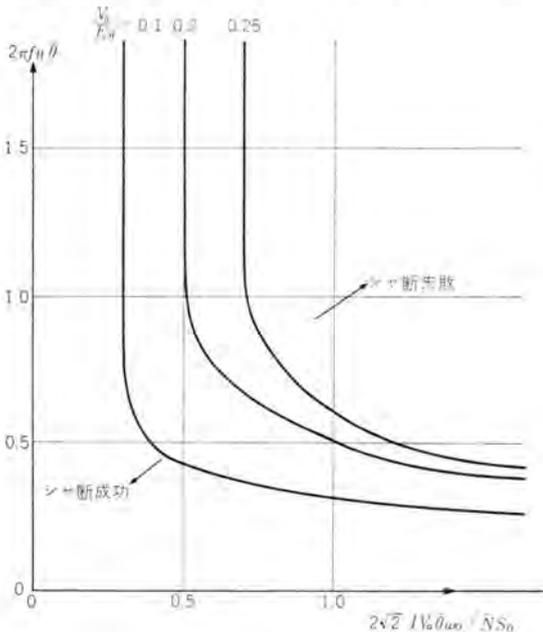


図 4.4 シャ断器のシャ断限界
Fig. 4.4 Thermal breakdown limit of circuit breakers.

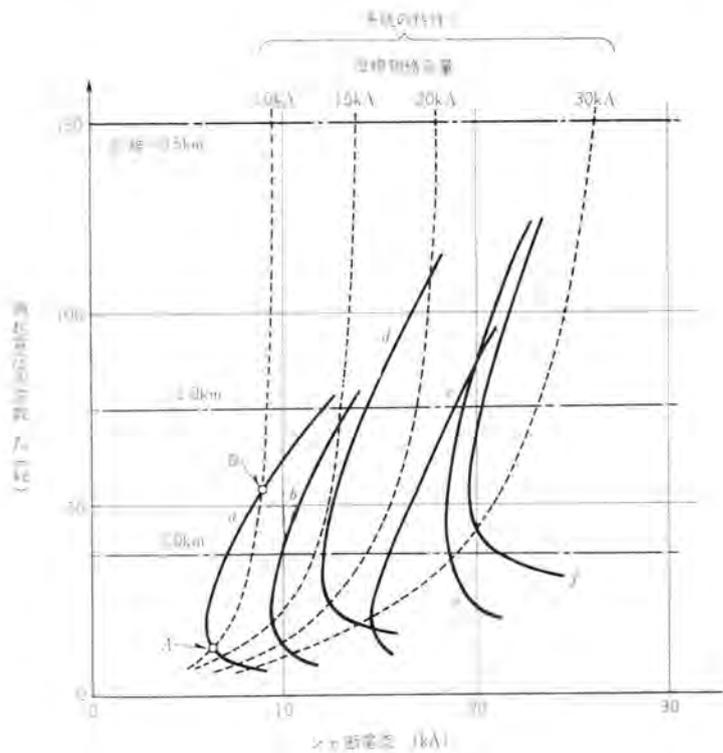
とが示される。

同時に重要なことは、線路のサージインピーダンスの役割であって、製品性能の検証のさいに、試験回路のサージインピーダンスの一致は十分に確認しなければならない。なおまた、実際の線路を試験に供する場合にも1km以下の短線路では多くの場合無意味であることに注意すべきである。

5. その他のシャ断器のアークに関する最近の研究

もっとも残留電流の多い低圧の磁気シャ断器のアークに関する研究はすでに報告しているが⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁸⁾、伝熱冷却によって動特性の定まるアークの代表的なものである。その時定数は数十マイクロ秒に達し、しかも損失の大きい(40ないし数百キロワット)ことが特長であって、大きな残留電流を流してもシャ断に成功する。

これに次いでアーク慣性の大きいのは並切形の油入シャ断器である。3.3kV級の小容量のOCBについて最近



曲 線	シャ断点の特性			
	θ	NS_0	$\theta \bar{\alpha}$	V_a
a	5 μ s	50 kW	0.05	2 kV
b	$\bar{\alpha}$	100	0.05	2
c	5	200	0.05	2
d	2.5	50	0.05	2
e	2.5	100	0.05	2
f	1.5	50	0.05	2

図 4.5 84kV 空気シャ断器のキロメートル故障に対する動作
Fig. 4.5 Breakdown limit of 84kV breakers in the case of kilometer fault.

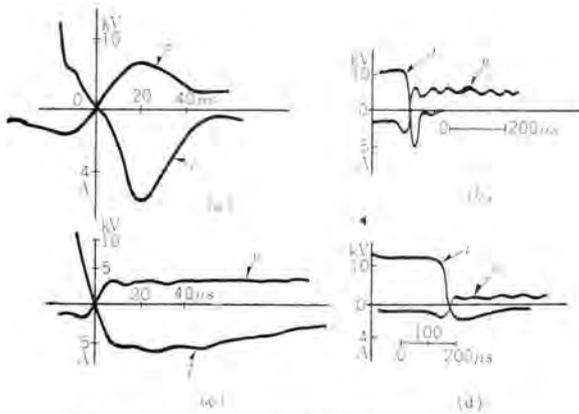


図 5.1 並切形油入シヤ断器の残留電流 [(a)と(b)、(c)と(d)はそれぞれ同一条件での測定結果である]
Fig. 5.1 Post-arc current in a plain break OCB.

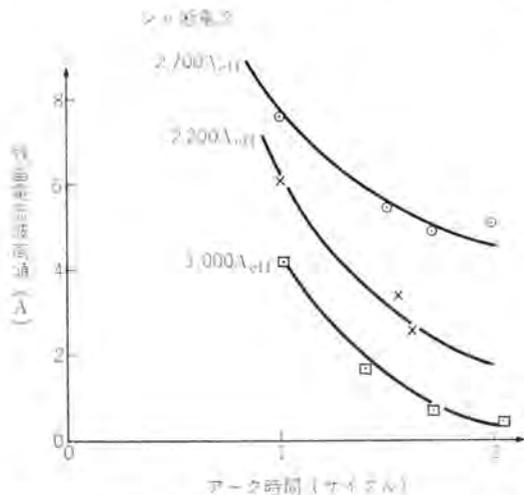


図 5.2 並切形油入シヤ断器のアーカ時間、シヤ断電流と残留電流波高値との関係
Fig. 5.2 Post-arc current and arcing time of a plain break OCB.

実測された例では、アーカ時定数は $10 \sim 15 \mu\text{s}$ であり、残留電流の継続時間が長く、 $100 \mu\text{s}$ に達するものもある。残留電流の波形の代表的なものを図 5.1 に示す。なお、並切形のシヤ断器ではシヤ断電流の増加とともに、残留電流の波高値が増加する傾向にあり、かつアーカ時間とともに減少する特性が見られる⁽⁶⁾。図 5.2 はその一例である。これもまた伝熱損の大きいアーカの一例である。

もっとも興味あるのは消弧室を有する油入シヤ断器の場合である。油入シヤ断器はその形式のいかんによらずアーカ慣性が大きく、またしたがって残留電流も多いと信じられていたが、最近の測定結果は明らかにこれを否定した。アーカ自身の発生するガスの吹付効果によって、 $-q \cdot \text{grad } p$ の冷却が支配的であるが、ガスの主体が水素であることから、これは十分に想像されるところであった。最近開発された試作品についての一例では、アーカ時定数は $1 \mu\text{s}$ 以下で、同様な定格の空気シヤ断器に比較してもはるかに小さく、したがってまた残留電流も非常に流れにくいことが明らかとなった。

図 5.3 には零点近傍における電圧電流波形の一例を示シヤ断器の残留電流とアーカ動特性・潮・伊藤・宮本

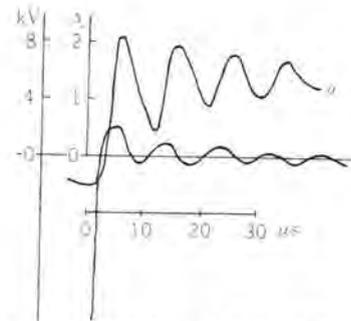


図 5.3 消弧室付油入シヤ断器の零点近傍の波形
Fig. 5.3 Transients around current zero in a OCB with interrupting chamber.

す。容量性電流はかなり重ね合わされるが、残留電流はほとんどない。巧妙に設計された消弧室を持つ油入シヤ断器は零点近傍におけるアーカ慣性がいちじるしく小さく、したがってまた、そのゆえにこそゼロメートル故障に対して非常に強いことがうなずかれる。

不幸にして、油入シヤ断器の動特性に対しては、まだ定量的推論を十分に行ないうる段階でなく、今後の研究を必要としているが、現在のところ、動特性に関連したシヤ断性能に関するがぎり、優秀な油入シヤ断器はもっとも理想的なシヤ断器の一つである。

6. むすび

シヤ断器のアーカ動特性に関連した最近の研究成果の一部を簡単に報告した。シヤ断性能に対しては、この動特性が非常に重要である点を述べて、いわゆる「残留電流」「アーカ時定数」などの関連を説明し、理論的ならびに実験的に興味あることがらを示した。

従来、大容量の短絡試験設備を用いた経験的手段によらざるをえなかったシヤ断器の開発設計は、将来次第に物理的推論に基づいた定量的設計へ移行してゆくことが期待され、現状でも、ある種のシヤ断器については、かなりの程度に理論的推論が信頼できるようになったと考えられる。しかしながら、なお現象の根底にある物理的現象には未知の問題がさん積しており、今後の研究にまつところが非常に多く、いっそうの努力を続けたいと考えている。終りに、研究に対して物心両面の援助を賜わった伊丹製作所、技術部ならびに工作部の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- (1) 潮：「三菱電機」30, No. 2, pp. 11~15 (昭 31).
- (2) 潮：昭 29, 関西支部連大 290.
- (3) 潮・伊藤：昭 31, 連大 324.
- (4) 潮・伊藤：昭 34, 関西支部連大 92.
- (5) 伊藤：電学誌 79, pp. 571~577 (昭 34).
- (6) 伊藤：昭 34, 連大 421.
- (7) 潮・伊藤・八代・大倉：「三菱電機」34, No. 8, pp. 47~56 (昭 35).
- (8) 伊藤：「三菱電機」34, No. 10 pp. 109~122 (昭 34).
- (9) 潮・伊藤：電学誌 80, pp. 92~99 (昭 35).
- (10) 潮・伊藤：電学誌 81, pp. 440~449 (昭 36).
- (11) M. H. Bloom & Others: J of Aero/Space Sci, pp. 821~840 (1960)

(その他の外国文献はすべて上記文献中に記載あり)

航空機用 VHF 無指向性埋込み形アンテナ

研 究 所 喜連川隆*・武市吉博**・水沢丕雄**
無線機製作所 平岡敏也***・太田堯久***

Very-High-Frequency Omnidirectional Flush Antennas for Aircraft

Research Laboratory Takashi KITSUREGAWA・Yoshihiro TAKEICHI・Motoo MIZUSAWA
Electronics Works Toshiya HIRAOKA・Takahisa OTA

There are a number of types of VHF aircraft antenna in current use mounted on the outer body of aeroplanes. However, they are gradually superseded by flush and semiflush antennas. Herein is given a report on those new antennas developed with success and particularly for use with the medium sized transport YS-11 which is now in the course of home production. The subject of the study is how to obtain improved flush antennas having omnidirectional coverage of vertically polarized or horizontally polarized radiation in the very-high-frequency band with a tail-cap antenna, an annular slot antenna and an E-fed cavity antenna.

1. ま え が き

航空機用 VHF アンテナとしては、従来垂直ユニポール形、水平ダイポール形、水平ループ形などのアンテナを機体外部に取り付ける形式が主として用いられてきたが、航空機の高速化に伴い、最近ではこれらに代わる種々の埋込み形アンテナが研究され、実用されている。埋込み形アンテナは、航空機の空気力学的外形を少しも変えないように、放射器を機体表面内に埋込むか、あるいは機体そのものを放射体として働かせるための励振装置を機体表面内に設けたものであって、電波の波長と機体の寸法との相対的關係によって種々の方式が可能である¹⁾。

約 100 Mc 以上の、航空機の VHF 帯の通信あるいは航行方式に用いられる電波の波長は、普通の航空機の主翼や胴体の長さにくらべてかなり短く、機体の一部が共振を起こす。したがってこの周波数帯においては、機体の適当な部分を利用して放射体を構成し、これをうまく励振することによって、効率の良い埋込み形アンテナを実現することが原理的には可能である。

この周波数帯の通信あるいは航行方式に必要な埋込み形アンテナにおいて、電気的に問題となるのはインピーダンス特性よりもむしろ放射指向特性であって、水平面内無指向性埋込み形アンテナにはとくに問題が多い。すなわちこの周波数帯で必要な指向性埋込み形アンテナは、比較的簡単な単方向指向性をもつものでよく、その指向特性は航空機体の影響をあまり大きく受けないが、水平面内無指向性埋込み形アンテナの場合には、その指向特性が機体全体の影響を大きく受けるので、機体の外形を変えずに構造上のきびしい制限のもとに、良好な指向特性を得ることはむずかしい問題である。

今回昭和 35 年度通商産業省鉱工業技術試験研究補助金により、日本航空機製造株式会社のご協力のもとに、

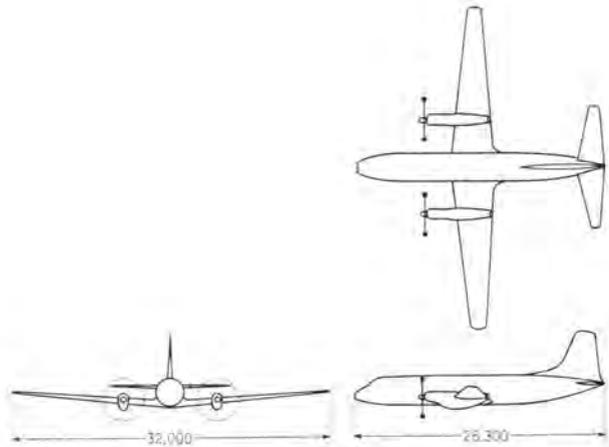


図 1.1 中形輸送機 YS-11

Fig. 1.1 YS-11 transport.

国産中形輸送機 YS-11 (図 1.1) の各種埋込み形および準埋込み形アンテナの研究を行なったが、これらのうちとくに VHF 通信用垂直偏波水平面内無指向性埋込み形アンテナとして、垂直尾翼を利用するテールキャップ・アンテナ (Tail-cap antenna) および胴体に設ける環状スロット・アンテナ (Annular slot antenna) の研究を、また VHF オムニレンジ (VHF omni-range, VOR) 用水平偏波水平面内無指向性埋込み形アンテナとして垂直尾翼に設ける空洞アンテナ (Cavity antenna) の研究を行なった。

以下においては、VHF 帯でいかにして良好な航空機用水平面内無指向性アンテナを埋込み形として実現するかの問題について論じるとともに、この問題を中形輸送機につき研究した結果を主として述べる。

2. 垂直偏波水平面内無指向性埋込み形アンテナ

航空機の VHF 通信には垂直偏波水平面内無指向性アンテナが必要である。その放射指向特性は、いま図 2.1

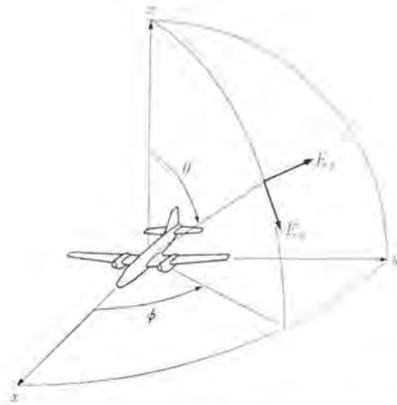


図 2.1 航空機に固定した座標系と、これによって表わした放射電界成分

Fig. 2.1 Coordinate system fixed to aircraft and radiation field components.

のように航空機に固定した座標系を設定し、放射電界の θ 方向成分を E_θ 、 ϕ 方向成分を E_ϕ で表わすとき、所要偏波成分 E_θ 放射が水平面の上下約 30 度の角度範囲内に集中し、かつ水平面内無指向性であって、一方、不要直交偏波成分 E_ϕ 放射はできるだけ小さいことが望ましい。

垂直偏波水平面内無指向性は垂直ユニポール・アンテナ、垂直ダイポール・アンテナ、あるいはこれらに等価な水平環状スロット・アンテナによって容易に得ることができるから、機体の一部を利用してこれらのアンテナを構成すれば、垂直偏波水平面内無指向性アンテナを埋込み形として実現することができる。

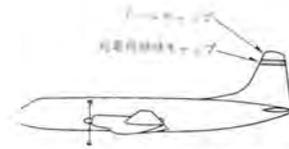
この埋込み形アンテナを得る一つの方法は、機体の垂直構造物、すなわち垂直尾翼を放射体として励振することである。原理的に可能な垂直尾翼励振方法についてはすでに述べた⁽¹⁾が、これらのうちもっとも有効な方法は、垂直尾翼上端を絶縁してこれに給電し垂直尾翼を励振する方法であって、この方式のものがテールキャップ・アンテナと称されている。もう一つの方法は、胴体などの上面あるいは下面に環状のスロット、すなわち細げきを設けて給電励振する方法である。

これらの方法によって、一応垂直偏波水平面内無指向性を期待することができるわけであるが、実際は放射体として利用する部分の機体形状の複雑さ、および機体他部分による電波の反射、シャハイなどの影響のために、理想的な放射指向特性を得ることがむずかしい。

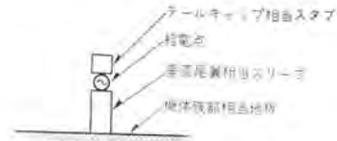
2.1 テールキャップ・アンテナ

VHF 帯のテールキャップ・アンテナは、航空機の垂直尾翼に図 2.2(a) のような絶縁キャップを設けて垂直尾翼上端を他部分から絶縁し、これに給電して垂直尾翼を垂直偏波放射体として働かせるものであって、原理的には図 2.2(b) のようなスリーブ・スタブ・アンテナ (Sleeve stub antenna) と考えることができる。

中形輸送機用 VHF テールキャップ・アンテナとしては、すでに昭和 33 年度通商産業省鉱工業技術試験研究により、



(a) 垂直尾翼上端絶縁による機体の励振



(b) 等価的なスリーブ・スタブ・アンテナ

図 2.2 VHF テールキャップ・アンテナ原理図

Fig. 2.2 Illustration of a very-high-frequency tail-cap antenna.

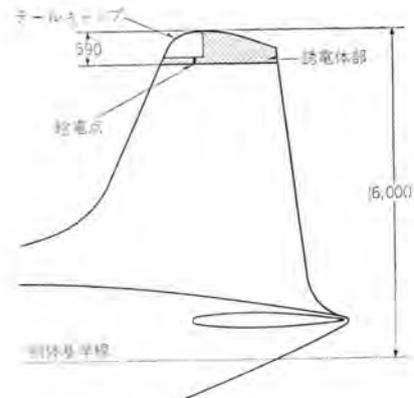


図 2.3 中形輸送機 YS-11 用 VHF テールキャップ・アンテナ
Fig. 2.3 The very-high-frequency tail-cap antenna for YS-11 transport.



図 2.4 中形輸送機 YS-11 用 VHF 無指向性埋込み形アンテナ放射指向特性の 1/20 縮尺模型による測定
Fig. 2.4 Measurement of radiation patterns of very-high-frequency omnidirectional flush antennas for YS-11 transport by means of one-twentieth scale-model.

良好な性能のものを実用化しうる結論を得た⁽²⁾が、その後機体の設計形状寸法に多少の変更が加えられ、アンテナに対する構造上の必要条件も具体化したので、今回は図 2.3 のような形式のものにつき研究を行なった。垂直尾翼を上から測って 590 mm のところで切り、テールキャップを形成する被絶縁部分を垂直尾翼上端前縁部に設けてある。絶縁キャップおよび被絶縁部分の寸法は、富士重工

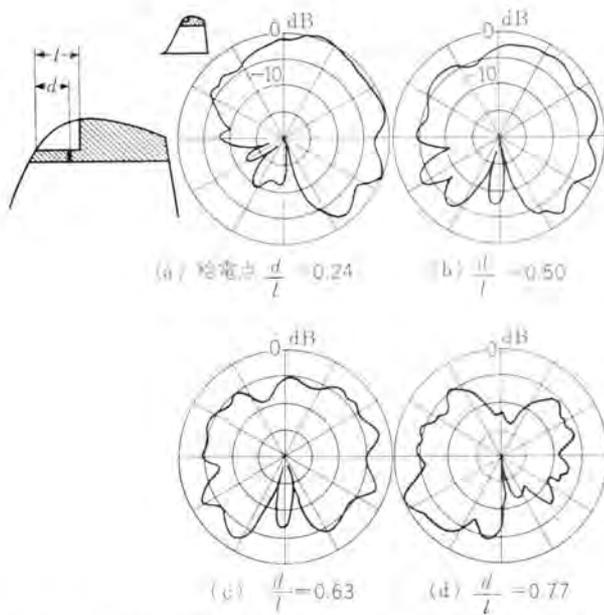


図 2.5 中形輸送機 YS-11 用 VHF テールキャップ・アンテナの給電点を変えたときの縦断垂直面内放射指向特性の変化
垂直尾翼だけの場合の測定結果 (131 Mc)

Fig. 2.5 Variation of the fore-and-aft plane radiation patterns of the very-high-frequency tail-cap antenna for YS-11 transport in case of the feed point location changed.

Results measured with the vertical fin only. (131 Mc)

業株式会社の委託による国産最初のジェット機用 UHF テールキャップ・アンテナの研究の結果⁽³⁾に基づいたものである。放射指向特性の測定は図 2.4 のように中形輸送機の $1/20$ の縮尺模型により、このアンテナの所要周波数範囲 118~144 Mc に対応する模型系周波数 2,360~2,880 Mc において行なった。

このような形式のアンテナの放射機構を、機体のうち給電点近傍の電圧電流分布に大きい影響を与える主放射領域からの放射と、他部分による反射回折とに分けて考察し、より良い放射指向特性を得るために、まず胴体から取りはずした垂直尾翼だけの場合の指向特性を測定した。図 2.5 はその測定結果の一例であって、中心周波数 131 Mc における垂直尾翼の縦断垂直面内の指向特性を示してあり、このアンテナの一次放射パターンとでもいうべきものである。そしてこの図から、給電点の移動により、前方および後方放射の大きさの割合を任意に変え得、また不要な上方放射を抑制しうる事がわかる。

今回の中形輸送機用としては給電点を、図 2.5 において上方放射が最小である $d/l=0.77$ に選定してある。この場合の機体全体についての測定結果を図 2.6 に示してある。図において、上段は航空機の水平面内の、中段は縦断垂直面内の、そして下段は横断垂直面内の、指向特性を示したものであって、最低周波数 118 Mc、中

心周波数 131 Mc、および最高周波数 144 Mc の各周波数における 3 面中の最大利得を 0 dB として描いてある。図からわかるように、周波数 118~144 Mc にわたって、航空機の側方および後方 E_θ 放射はほぼ理想的に行なわれ、水平面内における E_θ 、すなわち垂直偏波成分に対する利得変化は ± 5 dB 程度以下であり、不要水平偏波成分 E_ϕ 放射はかなりよく抑制されている。

給電点が $d/l=0.77$ の場合には、図 2.5 および図 2.6 からわかるように、後方放射が前方放射に比べてやや少ない欠点がある。一般に テールキャップを垂直尾翼前縁部に設ける形式においては、上方放射が最小になる給電点と、前方放射と後方放射とが同程度の大きさになる給電点とは一致しないが、今回の研究により、絶縁キャップにくふうを施せば、これら二つの最適位置をほぼ一致させることが明らかになった。図 2.7 はその結果であって、図 2.6 と比べて、給電点は同じであるが、前方放射に対する後方放射の大きさの割合は増大して、垂直偏波に対する水平面内利得変化は ± 4 dB 程度となり、より良い無指向性になっている。

図 2.6 および図 2.7 では、航空機の前方およびその斜上方向に鋭な放射ローブが存在するというこの種のアンテナ共通の欠点が未解決である。この鋭なローブは図 2.5 (d) に見られる垂直尾翼前方斜下向きの大い

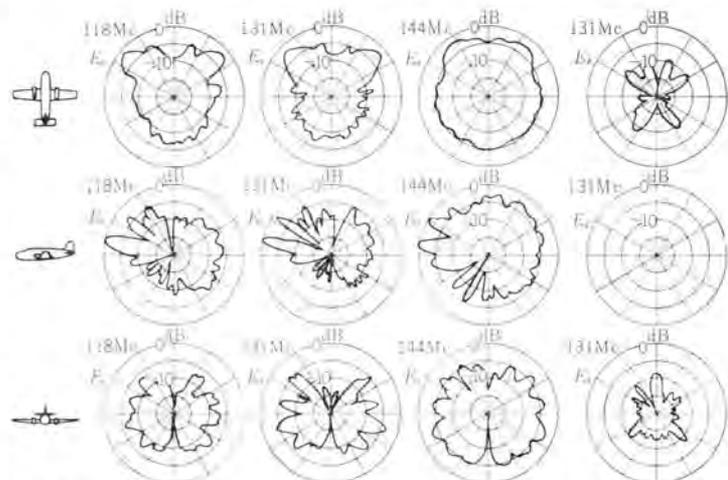


図 2.6 中形輸送機 YS-11 用 VHF テールキャップ・アンテナ放射指向特性測定結果

給電点: $\frac{d}{l}=0.77$

Fig. 2.6 Measured radiation patterns of the very-high-frequency tail-cap antenna for YS-11 transport.

Location of feed point: $\frac{d}{l}=0.77$



図 2.7 中形輸送機 YS-11 用 VHF テールキャップ・アンテナ放射指向特性改善結果 (131 Mc)

Fig. 2.7 Improved radiation patterns of the very-high-frequency tail-cap antenna for YS-11 transport. (131 Mc)

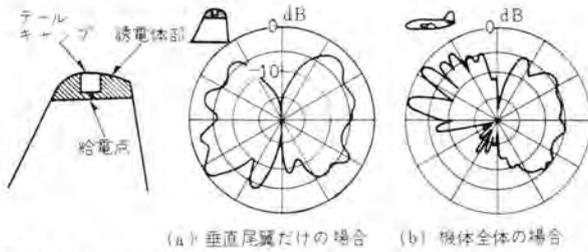


図 2.8 中形輸送機 YS-11 の垂直尾翼上端中央部に テールキャップを設けたときの縦断垂直面内放射指向特性 (131Mc)
 Fig. 2.8 Fore-and-aft plane radiation patterns of the tail-cap antenna, the isolated portion of which is located in the middle of the top of the vertical fin of YS-11 transport. (131 Mc)

うの胴体などによる反射波と垂直尾翼からの直接波との干渉によるものである。前方斜下向きローブの存在は垂直尾翼前縁に強い下向き進行波電流が流れることを意味する。そこでこの電流を小さくする一方法としてテールキャップを垂直尾翼上端前縁部から中央部へ移せば、テールキャップと垂直尾翼前縁との電気的結合が弱くなるから、鋭な干渉ローブをかなり抑制できるはずである。図 2.8 はこのような考えのもとにテールキャップを垂直尾翼上端中央部へ設けたときの指向特性測定結果であって、図 2.6 あるいは図 2.7 と比べて、中心周波数 131 Mc における干渉ローブの切込みが 10 dB 近くも減じていることがわかる。

以上のようにして、良好な放射指向特性をもつ中形輸送機用 VHF テールキャップ・アンテナを得ることができた。なお一般的な特性改善法についてはまた別の機会にくわしく述べることにしたい。

2.2 環状スロット・アンテナ

環状スロット・アンテナは、図 2.9 のように導電地板に環状のスロット、すなわち細げきを設けてこれに給電し放射させるもので、環状スロットを最低次モードで励振すれば、放射素子が地板から少しも突出していないにもかかわらず、普通のユニポール・アンテナと同様の放射指向特性を得ることができる特長がある。この指向特性の類似は、無限地板の場合については理論的に明らかであるところであるが、地板がかなり小さい場合でも、両アンテナの指

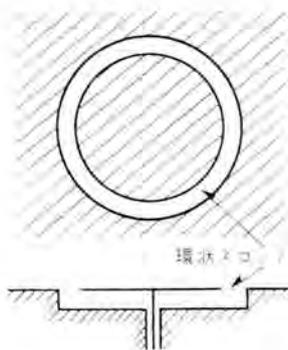


図 2.9 環状スロット・アンテナ
 Fig. 2.9 An annular slot antenna.

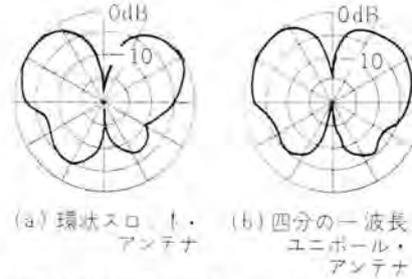


図 2.10 有限地板の場合の環状スロット・アンテナとユニポール・アンテナとの放射指向特性測定結果の比較の一例⁽⁴⁾
 地板直径=0.9 波長
 Fig. 2.10 Comparison of typical measured radiation patterns of an annular slot antenna and a unipole antenna in case of finite ground plane.⁽⁴⁾
 Diameter of ground plane=0.9 wavelength.

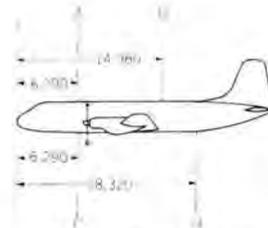


図 2.11 中形輸送機 YS-11 の胴体における八分の一波長ユニポール・アンテナ取付位置
 Fig. 2.11 Location of a one-eighth-wavelength unipole antenna on the fuselage of YS-11 transport.

向特性は、たとえば図 2.10⁽⁴⁾ のようにきわめてよく似ている。すなわち環状スロット・アンテナは、従来胴体の上面あるいは下面に取り付けて用いられてきたユニポール・アンテナに直接代わる埋込み形アンテナとして有用なものである。

環状スロット・アンテナを航空機の胴体に設けて、垂直偏波水平面内無指向性埋込み形アンテナとして働かせようとする場合には、アンテナ設置位置選定が重要な問題となる。無限円筒にユニポール・アンテナを取り付けたときの放射指向特性については、すでに明らかにされており⁽⁵⁾、

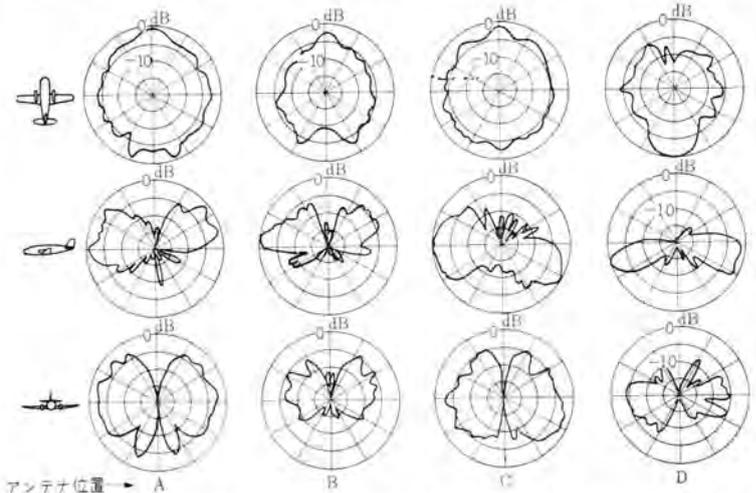


図 2.12 中形輸送機 YS-11 の胴体に八分の一波長ユニポール・アンテナを取り付けたときの放射指向特性測定結果の一例 (131 Mc, E_{θ})
 Fig. 2.12 Typical measured radiation patterns of a one-eighth-wavelength unipole antenna mounted on the fuselage of YS-11 transport. (131 Mc, E_{θ})

これから航空機の胴体に環状スロットを設けたときの指向特性をある程度推定できるわけであるが、実際の機体の形状は複雑であるから、実験によらなければ完全なアンテナ設置位置選定ができない。

設置位置の問題を研究するために、中形輸送機の胴体に八分の一波長ユニポール・アンテナを図2.11のように取り付けたときの放射指向特性を、前掲図2.4のように機体全体の $1/50$ 縮尺模型により測定した結果の一例を示したのが図2.12である。図から、八分の一波長ユニポール・アンテナを、したがって環状スロット・アンテナを、A、B、CあるいはDのどの位置に置いても、良好な水平面内無指向性が得られることがわかるが、とくに良いのは胴体前部の上面あるいは下面に設置した場合であって、C点に設置した場合には垂直偏波に対する水平面内利得変化は131 Mcにおいて ± 2 dB程度というきわめて良い特性が得られる。

3. 水平偏波水平面内無指向性埋込み形アンテナ

航空機の航行方式の一つであるVHFオムニレンジには、水平偏波水平面内無指向性埋込み形アンテナが必要である。その放射指向特性は、前掲図2.1のように放射電界成分を E_θ および E_ϕ で表わすとき、所要水平偏波成分 E_ϕ 放射が水平方向によく集中し、かつ水平面内無指向性であって、一方不要直交偏波成分 E_θ 放射はできるだけ小さいことが望ましい。

水平偏波水平面内無指向性は、水平ループ・アンテナあるいはこれに等価な垂直スロット・アンテナによって容易に得ることができる。したがって航空機の水平偏波水平面内無指向性埋込み形アンテナを得るには、機体の一部を利用してこれらのアンテナを構成すればよい。

航空機の胴体あるいは主翼などの水平構造物にアンテナを設けると、周囲の機体構造物の悪影響を大きく受けるので、良好な放射指向特性を期待しがたい。そこで現在よく行なわれているのは、垂直尾翼を利用して埋込み形アンテナを実現する方法である。

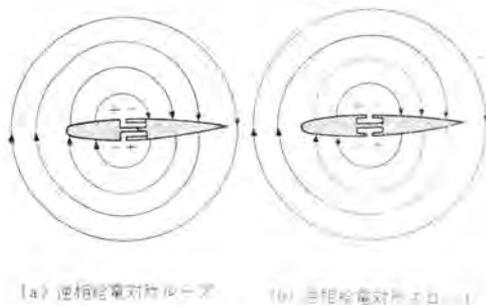


図 3.1 垂直尾翼の両側に対称に設けた水平ループあるいは垂直スロットに逆相給電することによる水平偏波水平面内無指向性放射

Fig. 3.1 Horizontally polarized omnidirectional radiation from an antiphase pair of horizontal loops or vertical slots mounted symmetrically on the each side of vertical fin.

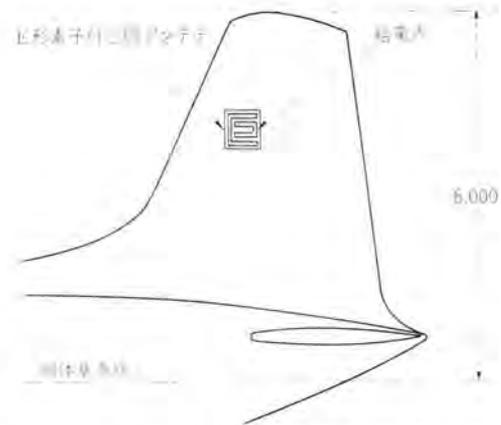


図 3.2 中形輸送機 YS-11 用 VHF E 形素子付空洞アンテナ
Fig. 3.2 The very-high-frequency E-fed cavity antenna for YS-11 transport.

すなわち、垂直尾翼を利用して水平偏波水平面内無指向性を得るには、図3.1のように垂直尾翼の両側に対称構造の水平ループ・アンテナを埋込むか、あるいは水平電気ループに等価な垂直磁気ダイポールすなわち垂直スロットを対称に設け、この一對のループあるいはスロットに逆相給電を行なえばよい⁽⁶⁾。現在インピーダンス特性をも含めてもっとも良いとされているのは、垂直尾翼の両側に一對の対称空洞を設け、それらの開口部にそれぞれE形の導体板を取り付けた E-fed cavity antenna である⁽⁶⁾。

図3.2は中形輸送機のVHFオムニレンジおよびローカライズ用の水平偏波水平面内無指向性埋込み形アンテナとして研究したE形素子付空洞アンテナである。空洞としては、従来垂直尾翼両側に別々のものが設けられてきたようであるが、両側の空洞へ完全平衡給電を行なう場合には、両空洞を隔てる壁はまったく不用であるから、今回のアンテナの空洞には隔壁を設けていない。すなわち垂直尾翼にあけた約 $570\text{ mm} \times 640\text{ mm}$ の角穴の両開口にE形素子を取り付け、両素子に平衡不平衡変成器を介して同軸ケーブルをつないでいる。

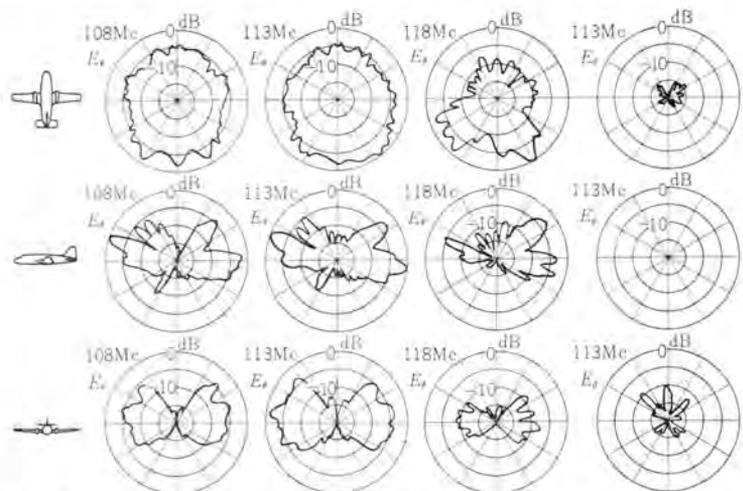


図 3.3 中形輸送機 YS-11 用 VHF E 形素子付空洞アンテナ放射指向特性測定結果

Fig. 3.3 Measured radiation patterns of the very-high-frequency E-fed cavity antenna for YS-11 transport.

このアンテナの放射指向特性を、前掲図2.4のように機体全体の $1/30$ 縮尺模型により、所要周波数範囲の最低周波数108 Mc, 中心周波数113 Mc, および最高周波数118 Mcの各周波数に対応する模型系周波数で測定した結果を示したのが図3.3である。図からわかるように、周波数108~118 Mcにわたって、水平偏波成分 E_{ϕ} 放射は水平方向によく集中し、不要直交偏波成分 E_{θ} 放射はきわめて小さい。水平偏波に対する水平面内利得変化は最低および中心周波数においては ± 4 dB程度で良好な特性であるが、最高周波数において劣化している。しかしこの劣化は、E形素子の向きを逆にするにより完全に防ぎ得、全周波数範囲にわたって水平偏波に対する水平面内利得変化を ± 5 dB程度以下にすることができるという結果を得ている。図3.2に示してあるE形素子の向きは、それにつながる同軸ケーブルの中形輸送機垂直尾翼内配線のつごうで決まったものである。

4. む す び

VHF帯において、理想的な放射指向特性をもつ航空機用水平面内無指向性アンテナを埋込み形として実現することは、放射体を構成する航空機体部分の形状の複雑なこと、放射に及ぼす機体他部分の影響の大きいことなどのために非常に困難な問題である。

国産中形輸送機YS-11用VHF無指向性埋込み形アンテナとしては、テールキャップ・アンテナ、環状スロット・アンテナ、およびE形素子付空洞アンテナの3種とも良好な放

射指向特性を得ることができたが、なお研究を要する点も多い。各アンテナについての研究結果の詳細はまた他の機会に報告することにした。

今回の中形輸送機用アンテナの研究は、昭和35年度通商産業省鉱工業技術試験研究補助金により、日本航空機製造株式会社のご協力のもとに行なったものであって、関係各位に深く謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 喜連川隆・武市吉博：航空機用埋込み形アンテナ，電気通信学会航空電子機器研究専門委員会資料（昭35-2）。喜連川隆・武市吉博：高速航空機用埋込み形アンテナとその諸問題，「三菱電機」34，pp. 898~908（昭35-7）。
- (2) 喜連川隆・武市吉博：航空機用HFおよびVHFテールキャップアンテナ，昭和35年電気四学会連合大会講演論文集，1162（昭35-7）。喜連川隆・平岡敏也・松村長延・武市吉博：航空機用HFおよびVHFテールキャップアンテナ，「三菱電機」34，pp. 1385~1390（昭35-11）。
- (3) 喜連川隆・武市吉博：航空機用テールキャップアンテナ，昭和33年電気四学会連合大会講演論文集，848（昭33-5），および電気通信学会アンテナ研究専門委員会資料（昭33-7）。喜連川隆・黒田忠光・武市吉博：航空機用テールキャップアンテナ，「三菱電機」32，pp. 771~775（昭33-7）。
- (4) 喜連川隆・武市吉博・水沢丕雄：列車無線用環状スロットアンテナ，昭和35年電気四学会連合大会講演論文集，1157（昭35-7）。
- (5) P.S. Carter: Antenna Arrays Around Cylinders, Proc. IRE, 31, pp. 671~693 (Dec., 1943).
- (6) J. V. N. Granger and J. T. Bolljahn: Aircraft Antennas, Proc. IRE, 43, pp. 533~550 (May, 1955).

最近登録された当社の特許および実用新案

区 別	名 称	特許または登録日	特許または登録番号	発 明 考 案 者	関係場所
特 許	電気車制御装置	35-12-26	269448	北川和人・木村 亮	伊 丹
"	洗たく機	35-12-15	268985	武井久夫・服部信道	日本建鉄
"	内燃機関点火装置	36- 1-13	270291	三木隆雄	姫 路
"	送電線保護継電方式	36- 1-13	270304	北浦孝一	神 戸
"	ベルト起電機付粒子加速器の電源装置	36- 1-13	270394	三木隆雄・今村 元 高部俊夫	研 究 所
"	洗たく機	36- 1-13	270361	東 邦 弘・武井久夫 服部信道	日本建鉄
新 案	冷蔵庫	35-12- 1	524627	木下忠男	静 岡
"	冷蔵庫の箱体	35-12- 1	524628	木下忠男	静 岡
"	冷蔵庫の蒸発器	35-12- 1	524630	木下忠男	静 岡
"	冷蔵庫のたな	35-12- 1	524633	木下忠男	静 岡
"	冷蔵庫用肉皿	35-12- 1	524634	木下忠男	静 岡
"	埋込形キイ光灯器	35-12- 1	524635	鈴木 実・山木源一郎	大 船

パラメトリック増幅器の広帯域化

研究所 喜連川 隆*・白 幡 潔**

Broad Band Parametric Amplifiers

Research Laboratory Takashi KITSUREGAWA · Kiyoshi SHIRAHATA

For the purpose of improving the noise figure of the receiver system of the long range radar, a cavity type diode parametric amplifier has been developed, its signal frequency being 1,300 Mc, idler frequency 9,375 Mc and pumping frequency 10,675 Mc. The merits available from the new development are small size, very broad bandwidth, easy adjustment of frequency and capability for use as an up-converter for the ordinary X band radar system. A representative bandwidth is 10 Mc with a gain of 20 dB, and under the condition of broad banding, 34 Mc is obtained with 17 dB. The noise figure of the amplifier measured by NG method is 2.7 dB and that of the case used as the up-converter is 1.8 dB.

1. ま え が き

ダイオードを用いた空胴形パラメトリック増幅器は、構造が比較的簡単で雑音特性のすぐれていることから、マイクロ波受信機の前置増幅器として広く用いられるさう勢にあるが、実用的見地からみると、一般には増幅帯域幅が十分でなく、また調整がかなりめんどうだという欠陥があった。このたび試作開発したパラメトリック増幅器は、信号周波数が 1,300 Mc, アイドラ周波数は 9,375 Mc で、その特長は小形であるうえ調整法が簡単で、帯域幅が広いこと、および通常の X パンドレータ受信機を利用するアップコンバータとしても用いうることであり、調整によって増幅特性を単峰特性から双峰特性にして、帯域幅を利得 17 dB で 34 Mc にすることができた。

本文ではまずパラメトリック増幅器の理論的考察を行なつて、帯域幅の広帯域化の方向をさぐり、ついで構造上の問題について本質的に調整容易な方法を述べ、最後に試作機についての実験結果を示している。

2. 理 論

周波数 f_p で周期的に変化する容量に、周波数 f_1 の電流しか流れない回路と、 f_2 の電流しか流れない回路との二つの回路が接続してあれば、容量の端子電圧 $V_1(f_1)$, $V_2(f_2)$ と、容量を流れる電流 $I_1(f_1)$, $I_2(f_2)$ との間には式 (2.1) の関係が成立する⁽¹⁾。

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & j\omega_1 \frac{C}{2} \\ -j\omega_2 \frac{C}{2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2^* \end{pmatrix} \dots\dots (2.1)$$

ここに $C=c_0+c$, c は容量の変化分, $f_p=f_1+f_2$ で、また * は共役を示す。 c は実際には PN 接合ダイオードの非直線容量を適当な逆バイアス電圧のもとに周波数 f_p の励振電力(ポンプ電力)で励振して発生させる。

ダイオードを用いた空胴形パラメトリック増幅器の等価回路

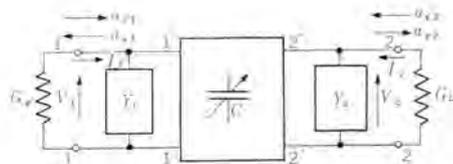


図 2.1 パラメトリック増幅器の等価回路

Fig. 2.1 Equivalent circuit of the parametric amplifier.

は図 2.1 で示すことができる。 Y_1 は f_1 の共振回路, Y_2 は f_2 の共振回路であり、 Y_1 と Y_2 とは容量 C 、すなわち式 (2.1) の変換関係を示す 4 端子網回路で結合されている。 G_0 は Y_1 に接続された基準化した信号源のコンダクタンス, G_L は Y_2 に接続された基準化負荷コンダクタンスである。

パラメトリック増幅器の電力利得 G は、 f_1 を信号周波数とするならば、図 2.1 の端子 1-1' における入射電力 $|a_{11}|^2$ に対する反射電力 $|a_{r1}|^2$ の比で与えられる。図 2.1 の等価回路について計算を進めるならば式 (2.2) を得る。 f_2 はアイドラ周波数である。

$$G = \frac{|a_{r1}|^2}{|a_{11}|^2} = \frac{(G_0 - Y_1)(G_L + Y_2^*) + \frac{\omega_1 \omega_2 C^2}{4}}{(G_0 + Y_1)(G_L + Y_2^*) - \frac{\omega_1 \omega_2 C^2}{4}} \dots\dots (2.2)$$

利得の十分大なる状態では、式 (2.2) の分母は零にきわめて近いから、式 (2.2) は式 (2.3) のように簡単になる。

$$G = \frac{2(G_L + Y_2^*)G_0}{(G_0 + Y_1)(G_L + Y_2^*) - \frac{\omega_1 \omega_2 C^2}{4}} \dots\dots (2.3)$$

もし Y_1, Y_2 が図 2.2 に示す単純な共振回路であれば、

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= G_0 \left(g_1 + j2 \frac{Q_{e1}}{f_{01}} \Delta f \right) \\ Y_2 &= G_L \left(g_2 - j2 \frac{Q_{e2}}{f_{02}} \Delta f \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2.4)$$

で表わせる。最大利得 G_{max} は式 (2.3) に式 (2.4) を代入して、 $\Delta f=0$ とおいて得られる。

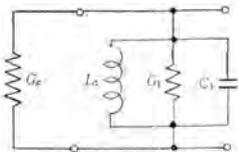


図 2.2 Y_1 の等価回路
Fig. 2.2 Equivalent circuit of Y_1 .

$$G_{\max} = \left\{ \frac{2(1+g_2)G_\theta G_L}{(1+g_1)(1+g_2)G_\theta G_L - \frac{\omega_1 \omega_2 C^2}{4}} \right\}^2 \quad (2.5)$$

帯域幅 B は利得が最大利得より 3 dB 減の周波数幅とすれば、

$$B = \frac{(1+g_1)(1+g_2)G_\theta G_L - \frac{\omega_1 \omega_2 C^2}{4}}{\left\{ \frac{Q_{e1}}{f_{01}}(1+g_2) + \frac{Q_{e2}}{f_{02}}(1+g_1) \right\} G_\theta G_L} \quad (2.6)$$

である。したがって $\sqrt{G_{\max}} \cdot B$ 積を求めれば、

$$\sqrt{G_{\max}} \cdot B = \frac{1}{1+g_1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2}} \quad (2.7)$$

となる。ここに g_1 および g_2 は各共振回路のそれぞれの無負荷 Q に対する外部 $Q_{e1,2}$ の比である。この場合無負荷 Q はダイオードを装着した状態での Q で、ダイオードの各周波数での損失は、 G_1 および G_2 に含めて考える。また B_1 および B_2 は各共振器のポンプ電力が印加されていない状態での帯域幅である。

利得一定のまま帯域幅を広げるには、式 (2.7) から B_1 および B_2 を大きくすればよいが、これは結局 G_θ および G_L を増大することになり、式 (2.5) から C^2 すなわち容量変化分 c の増大が必要で、ポンプ電力を増さなければならぬ。

広帯域化のためにポンプ電力を増さなければならないという結論が出るのは、 Y_1 および Y_2 を式 (2.4) のように仮定したためである。しかしながら実際には Y_1 および Y_2 は式 (2.6) で与えられる帯域幅より広い周波数範囲にわたって

$$\frac{\partial Y_1}{\partial f_1} = \frac{\partial Y_2}{\partial f_2} = 0 \quad (2.8)$$

とすることもできる。式 (2.3) に帰って考えてみると、 $\frac{\omega_1 \omega_2 C^2}{4}$ なる項は周波数の関数ではあるが、その変化率は、一般には Y_1 および Y_2 に比べて非常に小さいから定数とおくことができる。したがって、

$$\frac{\partial G}{\partial f_1} = 0 \quad (2.9)$$

とおいてその条件を求めれば、

$$Y_2^{*'} \left\{ (G_\theta + Y_1)(G_L + Y_2^{*'}) - \frac{\omega_1 \omega_2 C^2}{4} \right\} - (G_L + Y_2^{*'}) \{ Y_1' (G_L + Y_2^{*'}) + Y_2^{*'} (G_\theta + Y_1) \} = 0$$

$$\text{すなわち } -(G_L + Y_2^{*'})^2 Y_1' = \frac{\omega_1 \omega_2 C^2}{4} Y_2^{*'} \quad (2.10)$$

であるから、式 (2.8) が成立すれば G_θ , G_L の大きさにかかわらず、式 (2.9) が成立、すなわち広帯域にすることができる。式 (2.8) を表現するには Y_1 , Y_2 を多重空洞にするか、または適当なサセリクスをそり入ることなどにより可能である。

図 2.1 の等価回路について雑音指数を求めれば、利得の十分大きいとき式 (2.11) で表わされる。

$$F = (1+g_1) \left(1 + \frac{f_1}{f_2} \right) \quad (2.11)$$

3. 構造⁽²⁾

2 章ではポンプ回路について触れなかったが、ダイオードにポンプ電力を有効に印加するにはポンプ回路に整合装置が必要である。したがってダイオードには f_p , f_1 および f_2 の三つの共振回路が結合することになるから、各共振回路の調整が非常に困難になることが予想される。これを避けるためには、各周波数の調整が独立に行なえるような共振モードをとるか、導波管のシャ断特性を利用するか、または通過フィルタ、阻止フィルタを用いるとかの考慮が必要になってくる。しかし周波数は前述のように選ばれているので、実際上他に影響なく、それぞれ独立に調整の行なえる構造は実現が困難である。そこで次善の策として、高い周波数の調整が低い周波数に影響を与えないようにした。信号共振器は同軸空洞、アイドラ共振器は、Xバンド導波管で H_{10n} モード、またポンプ回路はアイドラ共振器と共通なので、その調整は f_p の帯域通過フィルタを通して行なう。

図 3.1 に原理的な構造図を示す。 f_1 の同軸共振モードによる電界は、導波管部ではダイオードのごく近傍に限られ、 f_2 空洞の共振周波数調整用ショートプランジ S_2 の近傍には存在しない。また f_2 のインピーダンス整合装置 S_3 の近傍には f_p の B. P. F. の存在によって f_1, f_2 の電界はないものとみることができ。しかし、逆に同軸共振器には f_2 および f_p がはいる込み S_1 の影響を受け、ポンプ回路の整合 (Z_p) はまた S_2 によっても影響を受ける。すなわち

$$Z_p = f(S_1, S_2, S_3)$$

$$f_1' = f(S_1, S_2)$$

$$f_2' = f(S_1)$$

$$f_1', f_2': \text{各空洞の共振周波数}$$

であるから、 $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3$ の順序で調整を行なえば、原理的に再調整の必要はない。

信号空洞と外部回路との結合はループ結合にしたが、 Q_{e1} を 15 程度にするループは相当大きなものとなり、空洞内にうまく装てんすることは困難である。したがって

図 3.1 に示すように同軸共振器の心線に直接接続した。アイドラ空洞と外部回路との結合は、空洞の E 面にあ

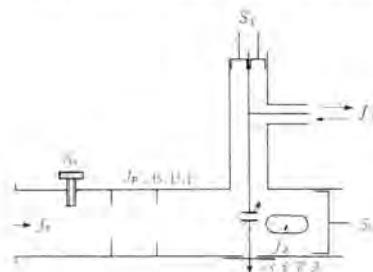


図 3.1 構造の原理図
Fig. 3.1 Principle of structure.

図 3.2 試作機
の外観

Fig. 3.2
External aspect
of the trial
amplifier.



けた窓によって行なう。窓の位置はアイドラ電界の強い場所を選ぶが、ポンプ電力も漏れるから窓の先に f_2 のB.P.F.をつける必要がある。

また設計にあたっては次の点についても考慮を払った。すなわち、同軸共振器の実効軸長が f_p および f_2 について $\frac{\lambda}{4}(2n+1)$ なる長さになっていると、導波管とダイオードとは結合しなくなるから、 $n\lambda/2$ に近くなるように設計する。逆にダイオードと f_p のB.P.F.との間の実効長は f_p および f_2 について $\frac{\lambda}{4}(2n+1)$ に近く選ぶ。これらの n は小さいほうが望ましい。

以上の方針のもとに設計した試作パラメトリック増幅器の外観を図3.2に示す。

4. 実験結果

使用したダイオードはMA-460E、サーキュレータは、順方向そう入損失0.35dB、逆方向漏れは ± 25 Mcで -19 dB以下のものである。

4.1 受動回路的特性

式(2.7)に示されている B_1 および B_2 すなわち信号およびアイドラ空胴のポンプ電力を加えてないときの帯域幅を、ループおよび開口の大きさを調節してまず100Mcに調整した。ダイオードのバイアス電圧はほぼ -1 Vである。

次に両空胴共振器とダイオードとの結合の目安として、ダイオードのバイアス電圧の変化に対する共振周波数の推移を測定した。バイアス電圧が $0 \sim -5$ Vの変化で、

信号空胴 $\Delta f = 160$ Mc

アイドラ空胴 $\Delta f = 70$ Mc

の変化であった。信号空胴共振器については同軸共振器の開放端にダイオードが装着されているから、ダイオードと

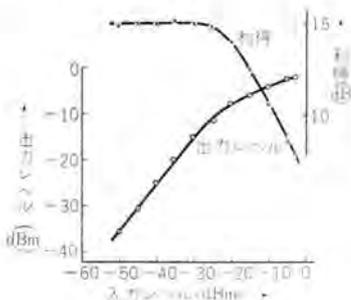


図 4.2 利得の飽和特性
Fig. 4.2 Gain saturation characteristics.

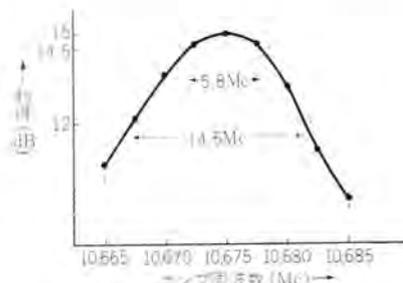


図 4.3 ポンプ周波数の変化による利得の変動
Fig. 4.3 Gain change due to the shift of pumping frequency.

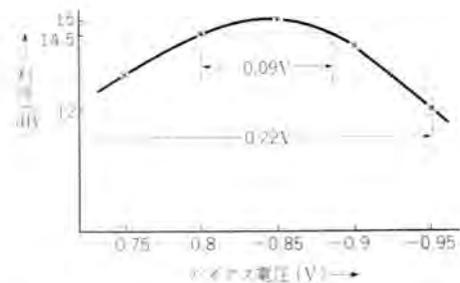


図 4.4 バイアス電圧の変化による利得の変動
Fig. 4.4 Gain change due to the shift of bias voltage.

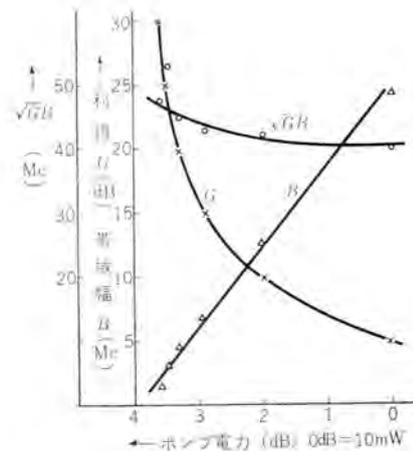


図 4.1 利得および帯域幅のポンプ電力特性
Fig. 4.1 Gain and bandwidth vs pumping power characteristics.

空胴との結合という点からは最適位置であろう。アイドラ空胴共振器については必ずしも最適結合の位置にあるわけではないので、調整によって Δf の値はさらに大きくなしうるものと考えられる。

4.2 増幅特性

ポンプ電力を変化したときの利得、帯域幅および $\sqrt{G} \cdot B$ 積特性を図4.1に示す。出力レベルは常に -30 dBm一定に保っている。

4.3 利得の飽和特性

利得15dBのときについての測定結果を図4.2に示す。3dBの利得低下は入力 -13 dBmのときに起きている。

4.4 ポンプ周波数による利得の変動

利得15dBのときの結果を図4.3に示す。ポンプ周波数の利得に与える影響はかなり顕著であるが、これはポンプ回路の Q が高いためであって、設計いかんによってさらに改善できる見通しがある。

4.5 バイアス電圧の変化による利得の変動

利得15dBのときの結果を図4.4に示す。バイアス電圧の利得変動に与える影響は実用上ほとんど問題のない程度である。

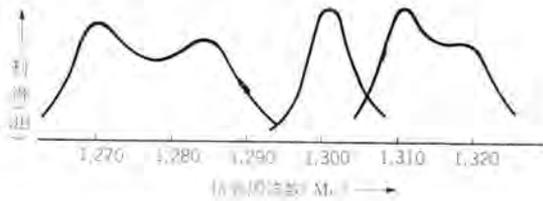


図 5.1 信号空洞共振器の離調による増幅特性の双峰化
Fig. 5.1 Double peak gain characteristics by detuning the signal resonator.

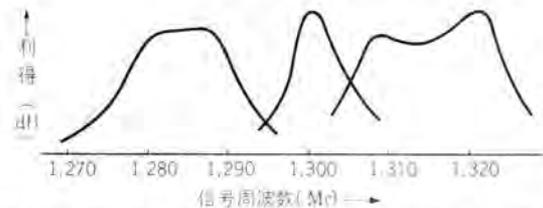


図 5.2 アイドラ空洞共振器の離調による増幅特性の双峰化
Fig. 5.2 Double peak gain characteristics by detuning the idler resonator.

4.6 雑音指数

NG 法で測定して、増幅器本体の雑音指数は 2.7 dB であった。またアップコンバータとしては 1.8 dB の値を得た。

5. 増幅帯域幅の広帯域化⁽³⁾

通常のレーダ受信機の IF の帯域幅は 0.5~5 Mc 程度のものであるから、前置増幅器として用いるパラメトリック増幅器も一応 0.5~5 Mc の帯域幅があればよいように考えられるが、受信周波数 (= マグネトロン の共振周波数) が ± 3 Mc 程度揺動するのを見込まなければならぬ。パラメトリック増幅器の増幅中心周波数に AFC がかけられればよいが、これは非常に困難な問題であるから、パラメトリック増幅器の帯域幅は、IF の帯域幅と周波数の揺動とをカバーする広さにしておくことが必要となる。

5.1 双峰特性

増幅帯域幅の広帯域化を目的として、信号回路に適当なサセプタンスをそう入し、共振周波数が一つで、1,300 Mc であった共振特性に細工を加えて、1,300 Mc の主共振周波数 f_1' のほかに、ほぼ 1,300 Mc ± 40 Mc の 2 周波数にも軽い副共振点を作った。このような状態で、まずポンプ周波数およびアイドラ空洞の共振周波数を一定に保ったまま、信号空洞の共振周波数 f_1' を 1,300 Mc の信号周波数の前後に変化させた。 f_1' を 1,260 Mc にしたところ、ほぼ 1,280 Mc を中心に双峰性の非常に広い増幅領域が現われ、また f_1' が 1,340 Mc では、ほぼ 1,320 Mc を中心に前者とほとんど同じ形状の非常に広い増幅領域ができた。この関係を図 5.1 に示す。利得はいずれの場

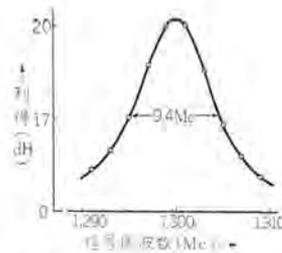


図 5.3 単峰増幅特性
Fig. 5.3 Single peak gain characteristics.

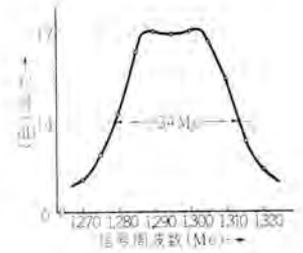


図 5.4 双峰増幅特性
Fig. 5.4 Double peaking of the gain characteristics.

合も最大 15 dB である。

次にポンプ周波数および信号空洞の共振周波数を一定に保ったまま、アイドラ空洞の共振周波数 f_2' を 9,375 Mc のアイドラ周波数の前後に変化させた。 f_2' を 9,400 Mc とした場合は、ほぼ 1,285 Mc を中心に、また f_2' を 9,350 Mc とした場合は、ほぼ 1,315 Mc を中心に前 2 者とほとんど同一形状の非常に広い増幅領域が現われた。この関係を図 5.2 に示す。

5.2 広帯域化特性

各空洞が図 2.2 のように単一共振回路である場合に、帯域幅を広げるには各空洞の $Q_{c1,2}$ を下げる必要がある。図 5.3 がそのような回路状態のまま、ループならびに開口の大きさを変え、 $\sqrt{G_{\max}} \cdot B$ 積、100 Mc を目標にした実験結果であって、この場合の所要ポンプ電力は 50 mW であった。図 5.4 は上述の広帯域化の結果に、さらに節 5.1 で述べた方法で広帯域化を行ない、その中心周波数をほぼ 1,300 Mc に調整した増幅特性である。利得 17 dB で帯域幅 34 Mc $\sqrt{G_{\max}} \cdot B$ 積 240 Mc という特性は、この種の増幅器としてはいまままでにないものである。所要ポンプ電力は 100 mW であった。

6. 検 討

式 (2.8) の条件では $Y_1' \doteq Y_2'^* \doteq 0$ であったが節 5.1 および 5.2 で実験したのは Y_1' だけについてであって、 $Y_2'^*$ のほうは式 (2.4) のままであるが、広帯域化の効果は顕著である。完全には $Y_2'^*$ も平坦化を行なうか、あるいは Y_1' と $Y_2'^*$ の比が式 (2.10) に示されるように Y_1, Y_2 を選び得れば、さらに広帯域化が期待できる。

参 考 文 献

- (1) H.E. Rowe: Some general properties of nonlinear elements II.—Small signal theory, Proc IRE 46, 850 (1958).
- (2) 喜連川・有田・白幡: 1.3 Gc パラメータ増幅器, 昭 35 年 連大予稿 1203.
- (3) 喜連川・有田・白幡: 空洞形パラメトリック増幅器の広帯域化, 昭 35 年 全大予稿 172.

超高温プラズマ研究の現況

研究所 河合 正*・杉本盛行*・近藤博通*

Present State of Research on Ultra-High Temperature Plasma in Mitsubishi Laboratory

Research Laboratory Tadashi KAWAI・Moriyuki SUGIMOTO・Hiromichi KONDO

In Mitsubishi laboratory are research devices of ultra-high temperature plasma. Of them a toroidal discharge apparatus is in such a construction as to permit various experiments involving ohmic heating, stabilization by reversed stabilizing field and compression heating by strong field. Through a heavy current test of switching ignitrons of power supply circuit, current carrying capabilities have been confirmed with them, and high power circuit technique with which the foregoing experiments are to be conducted have been established. In connection with them, plasma instabilities have been completely observed by means of a streak photograph, thus valuable results being made available on the behavior of plasma.

1. ま え が き

1955年ジュネーブでの会議の席上 Bhabha 氏が核融合反応による発電の将来を予言したところから、超高温プラズマの研究は急速な発展を開始した。Zeta, Stellarator, Pyrotron, DCX, Ogra などの数々の装置についての実験結果や、プラズマの物理についてのさまざまな理論的貢献が続々と発表され、その急激な発展は輝かしい未来が間近にあるというような印象を人々に与えるほどのはなばなしさを持っていた。

しかしながら、現在世界各国のほとんどすべての装置で、理論上予見されていたような、あるいは装置固有の複雑なプラズマ不安定現象が、次々と確認されはじめている。また、これらの装置のプラズマ損も予想以上に大きく、その正体も正確につかめてはいない。このため、理論的解析や測定の対象となりやすいような、しかもできるだけ「静かな」プラズマを作って基礎的な研究を行なうことの必要性がわが国でも力説されている。

超高温プラズマ研究の困難さは、閉じこめや加熱の方式についてのこのようなゆき悩みにあるばかりでなく、この研究をささえる基礎技術の上にも見られる。たとえば、注入電力以上の発生エネルギーを期待できる条件として、重水素および三重水素の等量混合ガスを完全電離してイオン密度 10^{16} cc、温度 3×10^8 K の状態を約 1 秒間保つ必要があるとすると、このときのプラズマ圧力は実に 800 気圧に達する。天体における重力場のような強力な武器を持たない地上の装置で、この荒れ狂うプラズマを器壁から離して閉じこめるためには、最小限 150 kG——おそらく実際にはこの数倍以上——の磁界を必要とする。この磁界がすべての放電管外のコイルから供給されなければならない場合、このコイルの素線には通常の導電材料の

応力限界をはるかにこえるような強磁圧が加わることは避けられない。このことは、超高温プラズマ研究においていかに強大な高度の技術的手段が要求されるかという単なる一例にしかすぎないのであって、現在運転中または建設中の装置だけをとりあげても、50 kG の磁界を発生するコイルとその電源としての 200 MW の直流発電器群、最高 45 kV、4.3 kA の高圧大電流回路に直列にそう入され、この大電流を一定値に保つ大容量送信管群、電圧 30 kV、短絡出力 3,360 kA、内部インダクタンス（スイッチの分を含む）5 μ H のコンデンサバンク、数百ミリアンペア、数十万ボルトのイオン源および加速器、到達真空度 5×10^{-10} mmHg の放電管などの使用例をたちどころにあげることができる。また、今後さしあたっての要項事項の中から、たとえば 10^{14} /cc 以上の電子密度の測定用として波長 3 mm 以下のマイクロ波計測器、磁界発生用スイッチとして数十万アンペア、数ミリ秒の通電に耐えるイグナイトロンなどの例をいくつも数え上げることができる。これらの技術的要求は単に電気機器、真空機器の範囲だけでなく、光学や分光学などの範囲にもおよんでおり、これらの技術的限界がプラズマ研究の進展をはばんでいる例も数多く見受けられる。

上記の諸困難にもかかわらず超高温プラズマ研究は黙々と前進を続けている。その歩みには、一時のとどろくような足どりはもはや見られないが、それだけに着実に難路をふみしめているといえる。各種のめぼしいアイデアはほとんどすべて実施され尽したような印象さえもないが、それは多分現在のわれわれがプラズマについてあまりにも無智であるためか、あるいは固定観念にとらわれすぎているために生じる錯覚なのであろう。確かに、現在のプラズマ研究では準静的な閉じこめの問題を追求するのに精いっぱいであって、「荒々しい」本性をもつ

プラズマを制御しようとするようなダイナミックな方法には考えがおよんでいないとはいえる。また、いままでの実験は、特筆すべき成果の数々をあげたけれども、プラズマの温度を上げることに急なあまりそこにかくされた貴重な事実を見落しているおそれも多分にある。独創や新発見の契機が一見古い事物の中に隠されていないとは何人も断言できないであろう。プラズマ研究はまだ始まったばかりの学問なのである。

ことにプラズマ物性の新しい応用という立場に立つとき、また放電に関係のある現用機器の研究との関連において考えるとき、超高温プラズマ発生の上から忌避される電子逃走、荷電分離、その他もろもろの不安定現象やふく射損などにかえって利用価値を発見できるし、あるいは超高温プラズマ研究では単なる過渡段階として関心の外にある数万～数十万度程度の低温プラズマ状態がむしろ追求の主対象となるのである。このような立場からの追求は、超高温プラズマ発生基礎としても多くの貢献をもたらすことであろう。

また、超高温プラズマ研究に必要な諸技術はおもに電機製造業界の分野に属するものであって、この発展を図ることはこの研究に対してわれわれ業界に課せられた重要な課題である。技術は常にその限界を克服し前進を続けなければならない。これは技術に内在する発展の法則でもある。

このような観点から、当研究所では昭和33年、昭和34年度原子力平和利用委託研究費をうけた三菱原子力株式会社と協力して、環状プラズマおよびその発生に伴う技術上の諸問題の研究に着手し、まず放電装置および電源、制御機器の製作を行なってわが国屈指の研究設備を完成するかたわら、イグナイトロンによる独得の大電力注入方式についてその技術的基礎を固め、現在絶縁物製放電管の特色を生かした環状放電の諸実験を着実に実施中である。以下、簡単に現況を報告する。

2. 実験設備

研究設備ことに実験モデルは絶えず成長変遷を続けてゆかなければならないものであるから、いたずらに装置の大きさを誇るよりも、アイデアの進歩に対し実験の進行が追従できる速さを重視する必要がある。また、まえがきて述べたような観点から、計測手段の充実とそれによる現象の忠実な解明は今後とくに望まれることである。このような見地に基づき、われわれは実験モデル——環状放電装置——の規模を基礎実験用として鉄心1.5t程度の手ごろな大きさにとどめ、電源および制御装置には今後の進展に対して十分な能力をもたせるとともに、すべての装置に実験方式の推移に対応できるような融通性を与えることを心がけた。また一方、計測手段の充実にも努めており、放電装置の構造も計測に便であることにまず主眼をおいた。

2.1 小形環状放電装置

超高温プラズマ研究の現況・河合・杉本・近藤



図 2.1 環状放電装置
Fig. 2.1 Toroidal discharge apparatus.

放電電流数万アンペア、持続時間数百マイクロ秒、プラズマ温度数十万～百万度を目標とした比較的小形の装置であるが、放電管が絶縁物製であって、この管壁に巻きつけられたコイル（以下管壁コイル）と、鉄心に巻かれた一次コイルに、それぞれ各種の電圧を加えることにより後述のようにさまざまな方式の基礎実験ができる点が特色となっている。構造の概要は図2.1で明らかだと思われるので諸元だけをあげることにする。

放電管 ガラス（当社製705）製ドーナツ管。

断面外径126φ、管壁厚み3、曲率半径300。管内を排気後ガスを詰め、その中で放電を行なわせる。製作にあたっては焼なましを入念に行なったので、放電時の機械的、熱的ショックによく耐えている。

鉄心 Z-13鋼板を使用した高さ920、幅620、積み厚250、窓580×320、重量690kgのもの二つを横むきにつき合せて配列してあり、上部継鉄をはずし図のように一次コイルと放電管をはめこむようになっている。鉄心を二つ割にしたのは、放電管をレストラック状に変更する場合などに備えてのことである。

一次コイル 60mm²被覆線11ターンのコイル6個からなり、おのおのを適宜に接続できる。2組に分けおのおのをマイカタ筒に収め放電管の上下に配列してある。漏れリアクタンス低減のためには放電管の壁面に密接してコイルを巻くことが望ましいが、分解、組み立て、管壁コイルの接続変更、観測などの便を重視して上記構造をさしあたって採用した。

管壁コイル 図2.2にこの組立状況を示す。厚板コイル（図のW₂）各1ターンは、厚さ4、幅50～26、曲率

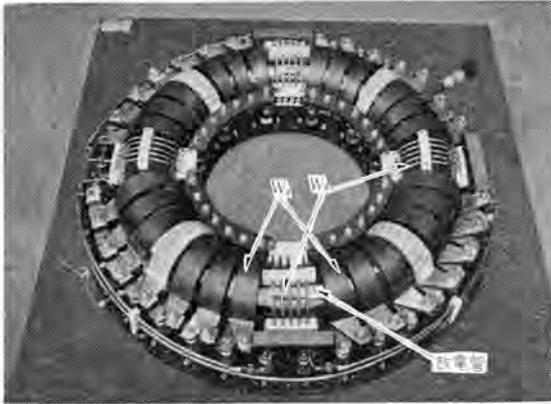


図 2.2 放電管およびコイル W_2, W_3
Fig. 2.2 Discharge tube and coil W_2, W_3 .

半径 62 に曲げた銅板製半輪 2 個からなり、放電管の外側の周辺でおのおのが適宜接続される。現在このコイルは直列に接続され、安定磁界用の直流電流 2.5 kVA、閉じこめないし圧縮磁界用のコンデンサ放電電流（最高 70 kA）が印加されている。銅管コイル（図の W_3 ）は断面径 6φ、曲率半径 62 であって現在 3 Mc、数アンペアの高周波電流を加えている。

上記の 3 コイル には相互干渉を防ぐよう特殊な配慮を払ったので実験中この干渉に悩まされたことはない。

2.2 主回路の方式と機器

(1) 実験回路

図 2.3 に現在実施中の実験回路を示す。便宜上点線の部分を除いて簡単に説明する。発振器 H. F. から W_2 に高周波電流を流し、無電極放電によって放電管のガスを予備電離しておき、一次コイル W_1 にイグナイトロン V_1 を通して電源コンデンサ C_1 の電圧を印加すると、変圧器と同様な機構で短絡二次コイルに相当する放電管の管軸方向に大電流が流れる。この放電によって生じたプラズマは、自己の電流がつくる回りの磁界 B_0 によって圧縮され管壁から離れる。これがいわゆる自己ピンチと呼ばれる閉じこめの方式である。この際プラズマは、軸方向の電界による加速で得られた荷電粒子の一方運動エネルギーが粒子相互間の衝突によってたえず熱運動エネルギーに変換される過程によって加熱される。この加熱は通常 Ohmic heating または Joule heating と呼ばれる。この放電にさきだって発電機 G_1 から W_2 に直流電流を流し、軸方向に安定磁界 B_z を作っておけば、プラズマの収縮に伴ってこれも圧縮され、プラズマの「くびれ」の不安定性

(Kink instability) を防ぐ作用をする。 B_z のこのような圧縮は、運動する導電体を横切って磁束が外に出ようとするうず電流が生じてこれを防げるという大ざっぱな説明で理解できよう。くびれの不安定現象は、プラズマがたとえばソーゼン状にくびれた際、細い断面の回りの自己磁界 B_0 したがってその磁圧が大きくなってプラズマをますます強く締めつけるような機構によるものであるが、プラズマ内に押しこめられた B_z は締めつけられるほどその磁圧を増してこれに反抗するのである。 V_2 は Clamping ignitron または Crowbar ignitron と呼ばれ、 C_1 の電圧 v_1 が V_1 を経由した放電によって減少し、負値に達したときに動作してコイル W_1 を短絡、以後 V_1 にかわってコイル電流を引き受け、これを長時間持続させる役割を果たす。プラズマには変圧器の理によってこのコイル電流とはほぼ同一波形の大電流が流れる。 W_1 には正極性の電圧しかかからないので、鉄心の飽和を防ぐためにバイパスコイル W_0 にあらかじめ逆極性の電流を流して鉄心の磁束をリセットしておかなければならない。

以上は Zeta⁽¹⁾ など採用されている方式であるが、プラズマの安定度を向上させるために、 B_z を包みこんで収縮したプラズマの外に B_z とは逆向きの軸方向安定磁界を作ることが提唱されている⁽²⁾。この反転安定磁界方式の実施例はまだ報告されていないが、われわれの装置ではガラス製放電管を使用しているため、この実施は比較的簡単である。このためには、 C_2 の電荷を V_3 を経て放電し V_4 でクランプすることによりコイル W_3 に Step function 状の電流 i_0 を、発電機からの直流電流 i_0 とは逆向きに供給すればよい。プラズマの導電率が非常に大きくなっていれば、 i_0 によって作られる磁界のプラズマへのしみこみはいちじるしく妨げられるから、プラズマ表面を境としてその内外に逆向きの軸方向磁界が形成されるのである。実際には粒子の拡散、逸走があり、プラズマの導電率もそれほど大きくないから、このような配位はそれほど長くは続かないが、逆にこの i_0 の波形からプラズマの導電率を推定することもできる⁽³⁾。

また、この実験装置では、後に述べるように非常に大きな値の i_0 を流せるので、これによって生じた強磁界でプラズマを圧縮加熱することもできる。環状放電管でのこのような圧縮加熱は、磁路が曲がっているという欠点はあるが、Ohmic heating で高温のプラズマをあらかじめ作った後に行なえるという利点もあり、いまだ実施例のない方式でもあるので重要な研究項目の一つである。この磁界の上昇速度が大きい場合には、Ohmic heating にさきだって高温プラズマを作ることのできる。また、この強磁界は、上昇速度がおそい場合でも、 V_4 によるクランプによって比較的長い時間一定値に保たれるから、その後の Ohmic heating によって発生した荷電粒子をすべてその磁力線の方向に巻き付けてしまうような閉

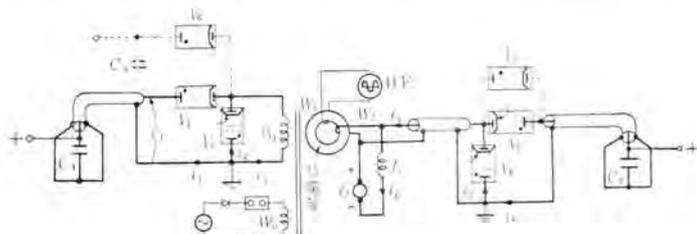


図 2.3 実験主回路
Fig. 2.3 Power circuit of toroidal discharge experiment.

じこめ用磁界として用いることもできる。このように、上記の諸実験をすべて同一の主回路方式によって実施できるという点はこの実験装置のきわだった特色となっているものである。ただし、上記のうち最後の二つの場合にはとくに放電装置 コイル 形状の改造を必要とする。

(2) 機器

この実験装置は、直線放電装置のように上昇率のきわめて大きい放電を行なわせるものではないが、圧縮加熱を行なう必要や、また クラッピング に伴う回路振動⁽⁴⁾を防ぐ必要上、電源 インダクタンス を極力低減しなければならない。現在、すでに $0.3 \mu\text{H}$ 程度のインダクタンスが問題となっているが、実験の進行につれこの低減の要求はますます厳しくなるものと思われる。このため主回路の配線には住友電工製同軸形電力ケーブルを用い、また電源コンデンサやイグナイトロンのインダクタンス低減にもとくに注意をはらった。その他、すべての機器に当面の実験に対して十分な能力を持たせるよう配慮したことはすでに述べたとおりである。このうちおもな機器だけを次にあげる。

電源コンデンサ(当社伊丹製作所製): 出力を直接同軸ケーブルでとり出す構造となっており、また内部構造にも無誘導化の配慮がはらわれている。1バンクあたり $400/200 \mu\text{F}$, $15.8/31.6 \text{ kV}$, 25 kJ で現在 150 kJ が設置されている。

イグナイトロン〔伊丹製作所製標準製品 GU-31A (二重格子、密封形、管径 300)〕: 陰極リードのとりつけ方に留意することによりインダクタンスは $0.2 \sim 0.3 \mu\text{H}$ となっている。

これらの機器の概況は図 2.4 に示されているが、これはわが国でも屈指の規模を持っている。

高周波発振器 (2-6/6-20 Mc, 最高 100 kW 連続): この能力は稀薄ガスの高度の予備電離などに対して十分発揮される。

安定磁界電源: 現在 25 kW , 2.5 kW の直流発電機を使用しているが、コイル W_2 の巻数変更に備えて最大短絡出力 25 kA のイグナイトロン整流装置を準備中である。

2.3 実験制御の方式と機器

(1) イグナイトロン制御装置

上記の実験方式を円滑に遂行するためには、イグナイトロンの正確な制御が第一の必要条件である。主回路結線を自由に変更できるためには、イグナイトロンの陰極を大地に対して高い電位におけるようにしておかなければならないから、制御信号をなんらかの形で絶縁して陰極電位に伝送しなければならない。また制御の遅れを少なくするために制御信号はできるだけ急しゅんな

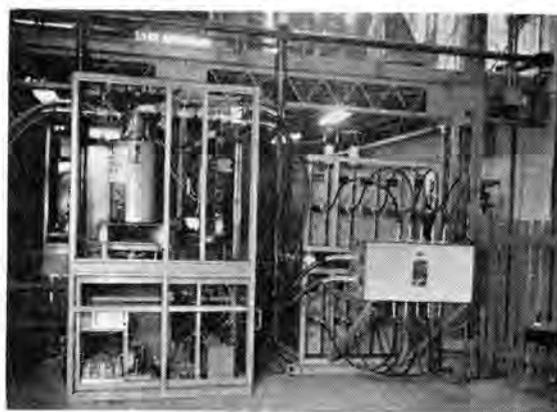


図 2.4 無誘導コンデンサおよびイグナイトロン
Fig. 2.4 Non-inductive capacitors and switching ignitrons.

波形をもっていなければならない。しかし時間的経過の予測できないような主回路現象にイグナイトロンを応動させようとする場合には、励弧極で陰極輝点をかなり長い間維持しながら待機しているような制御方式をとることが望ましい。われわれの使用している装置はこれらのすべての条件を考慮した特殊な設計に基づいており、プラズマ実験やイグナイトロン大電流試験に非常に役立っている。図 2.5 にこの回路の概要を示す。この装置のうち、励弧装置および格子バイアスは陰極電位におかれ、点弧子および格子は大地電位にある点弧および格子制御装置によりパルス変圧器 T_1 , T_2 を通して付勢される。これらの変圧器は、耐圧 30 kV DC (連続)、イグナイタを $5 \mu\text{s}$ 、格子を $1 \mu\text{s}$ 程度の遅れで点弧させられる幅 $200 \mu\text{s}$ のパルスを伝送する特殊変圧器である。大地電位にある上記 2 装置は、制御室からの指令パルスにしたがって動作する。

励弧装置は、点弧子点弧後 3 ms の間陰極輝点を維持できるようになっている。

(2) タイマ

当社無線機製作所製であって、 $1 \mu\text{s}$ から数分にわたる複雑な実験プログラムを遂行することができ、シーケンスの変更や操作もきわめて簡単に行なえるようになっている。図 2.6 はその使用中の状況を示すもので、上半部が

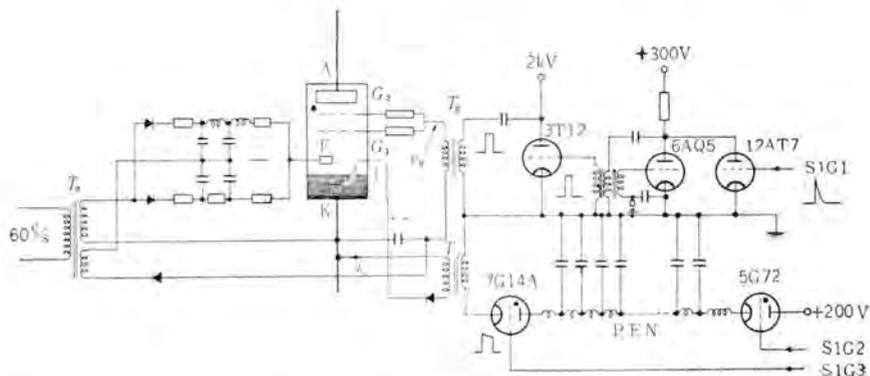


図 2.5 イグナイトロン制御回路
Fig. 2.5 Control circuit of ignitron.

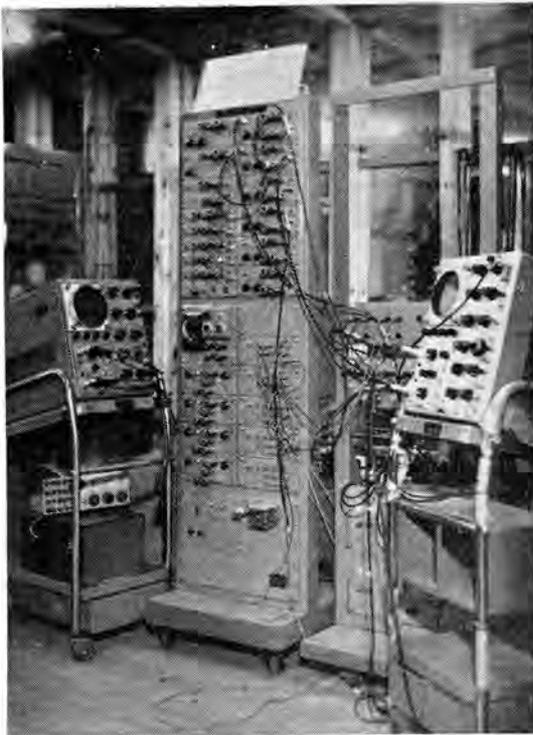


図 2.6 実験制御用 タイマ および シンクロスコープ
Fig. 2.6 Control timer and synchrosopes.

$1\ \mu\text{s} \sim 20\ \text{ms}$ を制御する真空管 タイマ、下半部がそれ以上の長い時間を制御する サイクロリレー式 タイマ となっている。早い タイマ の出力は立上がり時間が数百 ミリマイクロ秒の微分パルスで、これが階上の制御室より階下のイグナイトロンに送られ、大電流放電を所望のシーケンスにしたがって生起させる。微弱な信号を大電流高電圧装置の近傍で発生、増幅、伝送する際にありがちなトラブルを防止するため、シールドや伝送方式には格別の注意をはらっているので、制御系の誤動作は全然なく、現在実験の円滑な進行に非常に役立っている。

2.4 計測器

電氣的現象の看視、測定、記録は、中2階の制御測定室におかれたシンクロスコープ4台によって行なわれている。このうち2台は現象の同時測定のためとくに試作した3要素形のもので、今後はプラズマのスペクトル強度の時間的变化の測定に用いる予定である。装置の調整や動作の看視にはメモリスコープが活用されており、早い現象の精密測定には帯域 $30\ \text{Mc}$ のシンクロスコープが用いられている。

高圧の測定には、抵抗容量分圧器および無誘導抵抗器、また大電流の測定には同軸形分流器、高周波高圧の測定には整流形波高値計が用いられている。これらはすべて現在の実験目的に適するよう特別に設計製作されたものである。

上記の測定装置はとくに早い現象を問題にしないかぎり十分な精度を持っているが、大電流放電回路や大容量発振器からの誘導障害を防ぐために、測定器や測定線のシールドだけでなく、これら主回路機器の配線やシールドな

どにも格別の配慮をはらった。たとえば放電装置の管壁コイル配置には高周波がコイル W_2 に出ないように電磁的静電的な中和方法をとっており、また大電流回路の同軸ケーブルによる配線はその磁界が周囲に出ない点でも非常に好ましい形となっている。このため実験初期のトラブルは現在ほとんど完全に解消されている。

なお、軸方向プラズマ電流の測定にはロコウスキーコイルと Miller integrator の組み合わせが用いられ、光学的測定器として掃引速度 $1\ \mu\text{s}/\text{mm}$ の流しカメラ、分光測定には既存の水晶分光器が使用されている。

このほか、プラズマ姿態の全ぼうを観測するために $25,000\ \text{コマ}/\text{秒}$ のコマ取りカメラ、電子密度の測定のために $50\ \text{kMc}$ のマイクロ波計測器を準備中であるが、分光関係の測定器の充実や磁気探針の開発などは今後の重要な課題である。

3. 実験の成果

上記の機器の大半は、この実験のためとくに開発されたものであるので、筆者らはこれらすべての設計、製作、調整、据付に全面的ないし部分的に関与した。現在すべての機器は整備を終え、実験はようやく軌道にのりつつあるが、その成果は今年後半に一応とりまとめ本誌上で詳細に報告する予定であるので、ここでは予備実験段階で得られた成果をとりあげて報告することとする。

3.1 電力注入上の技術的問題

われわれの実験の成否は、スイッチングを中心とした電力回路技術のいかんにかかっているといてもよいが、動作電圧最高値 $3\ \text{kV}$ 、電流波高値 $1\ \text{kA}$ 以内で用いられている通常の形式のイグナイトロンをたとえば $15 \sim 30\ \text{kV}$ 、 $50\ \text{kA}$ のスイッチングに使用することに対して当初から確信があったわけではない。海外でのイグナイトロンの試験報告⁽³⁾はかなり詳細に問題点を明らかにしているが、なお残された問題も多く、とくにこの装置では二重格子つきのものを用いる関係上通電時のアーク電圧異常上昇などの新しい問題点が生ずることも懸念された。そこで筆者らは管径 450 の GZ-45 を用いて波高値 $60\ \text{kA}$ 、持続時間 $1\ \text{ms}$ のクラッピング試験⁽⁴⁾を行なった結果、好ましい見通しを得ることができたので、その後 GU-31A を正式に採用し、以後今日にいたるまで引き続き実験に

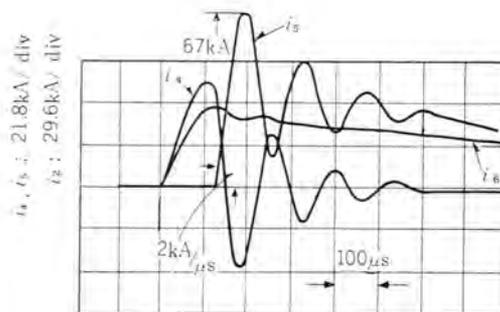


図 3.1 イグナイトロンの大電流クラッピング試験のオシロ
Fig. 3.1 Oscillogram of heavy current clamping test.

使用している。この間の使用経験と試験結果の詳細は後日にゆずることとして、ここでは1枚の典型的なオシロ(図3.1)を引用して概略の説明を加えよう。これは図2.3中のコイル W_2 に付属する V_3 , V_4 , C_2 の回路現象を示すもので、クラッピングに伴う振動を防止するための減衰抵抗は故意にとりさってある。このため、両イグナイトロンの電流にはいちじるしい振動が見られるが、コイル電流にはこの場合それほど振動は生じていない。 V_3 , V_4 , C_2 にとってこの振動は実際使用上決して好ましいものではないが、 V_4 の電流の波高値は67 kA、初期上昇率は2 kA/ μ s、持続時間は4 msに達し、大電流試験として記録的な数値となっている。この際、イグナイトロンは器そう温度5°C程度でウォーミングアップなしに突発的に放電させられ、数日間にわたってひん繁にこの試験がくり返えされた。また、この際のイグナイトロンの制御には、点弧子電流消滅後数 μ sの励磁極アークで陰極輝点を維持しつつ格子を付勢する方式が採用された。このような試験から、従来、非常に小さいと見られていたイグナイトロン電流上昇率許容値は実際には非常に大きく、通電直前の補助アークの電流値に左右されないこと、二重格子つきのもので懸念されていたような異常アーク電圧は見られないことなどがわかった。パルス放電の際イグナイトロン端子電圧はその大部分がイグナイトロン固有インダクタンスによる電圧降下によって占められている。異常アーク電圧が出ない原因としては電極からのガス放出や通電期間の短いことなどが考えられるが、この点については今後の究明をまたなければ確定的なことはいえない。また通電時に陰極輝点の器壁への転移が生じるかどうかは器壁電位の測定によっても判然としていない。この転移が大電流通電による損耗の最大原因となっていることは各所より報告されているが、器壁に水銀滴が付着している場合には、転移の確率や被害の程度が変わってくると思われるので、問題は複雑である。また、このオシログラムの場合 V_3 には逆方向にも電流が流れているが、これは電流減少率が通常の使用法の千倍程度になっているため整流性まで期待できないことを示すものである。ただし、このように大きな逆電流を再々にわたって流しても動作に支障をきたしたことは一度もなく、この影響はかなり長期間の運転で徐々に出てくるような性質のものと思われる。この試験後も引き続きこれに似た状態でプラズマ実験に使用しているが、現在まで故障は生じていない。

以上のように、既存の形式のイグナイトロンがこのような大電流放電に耐えて異常なく運転を続けているということは、単にイグナイトロンだけでなく水銀整流器一般の過負荷耐量について新しい認識をもたらしたものといてよい。ことに現在の使用状況が海外の例にくらべて相当過酷であることは特筆に値する。問題は寿命であって、この確認にはかなりの日月を要するものと思われる。

以上によってイグナイトロンの耐量に対する信頼も生まれ、また、かたわらイグナイトロンを非常に少ない遅れで正

確に制御することや、主回路のインダクタンスの低減などについて多くの努力が行なわれた結果、クラッピング方式を駆使して各種の実験を意のままに行なうことがここにはじめて可能となった。

3.2 プラズマ発生実験

まえがきで述べたように、この装置の実験目的の中には、現在すでに知られている事象についても自身の眼でこれを見、これをあとろるかぎり定量化し、さらにこのような基礎段階の中からずもれた新しい事実を探し出すことがはいつている。たとえば、現在のこの装置では高周波コイル W_3 をそう入したため、コイル W_2 の作る磁界の均一が失われプラズマの不安定を生じやすくなっていることは直観されるけれども、この際の「くびれ」がどのように成長しどのように加熱電力を消費するかは予見できない。また、金属製放電管壁がプラズマの「うねり」を防ぐことは十分認識されているけれども、この装置の場合厚い銅板製コイル W_2 がどの程度この代用となるかは全然推定できない。前者の問題の解明は、高温の達成を急ぐあまり十分かえりみられなかった現象の実態をみられ、そこに重要な示唆を見出せるであろうという点で価値があり、また後者の問題は反転安定磁界方式のような新しい方式にとってぜひ解明しておきたいことである。

また、とくに稀薄なガスの場合、高温プラズマはおろか弱電離プラズマの発生すら困難となってくるので、予備電離の問題も重要視されなければならない。これは高温プラズマの物理の対象ではないが、その発生工学の問題として、またこれ以外にも応用価値の大きいテーマとして真剣にとり上げる必要がある。

そのほか、海外の金属製環状放電管を用いた装置の流し写真で認められる「Bar」と呼ばれる現象がこの装置の場合起こるかなどわれわれがみずから確かめなければならない問題は数多く横たわっている。このような諸問題の例として予備実験結果の段階で得られた結果を引用して少しく説明を加えよう。

高周波予備電離 コイル W_3 に3 Mc、数 μ sの予備電離を通ずることによって管内いっばいに広がった弱電離プラズマを作ることができる。ただし、ガスの種類によって異なるようであるが、だいたい 10^{-4} mmHg以下のガス圧では電離は困難となる。それ以上のガス圧の場合、一次コイルへの電圧印加によって2 V/cm程度の軸方向電界が加われば数万 μ sの環状放電にまで進展する程度の電離状態にはなっている。電離度をさらに高めることは今後の課題である。

Ohmic heating この方式は、比較的簡単に高温のプラズマが作り出せるという点で確かにすぐれている。しかし、鉄心の飽和のため一次コイルに電圧を印加できる時間に限度があり、またこのコイルの漏れリアクタンスのためプラズマ電流の上昇が妨げられるから、プラズマ加熱には電気機械的立場からも限度があることになる。ピッチに

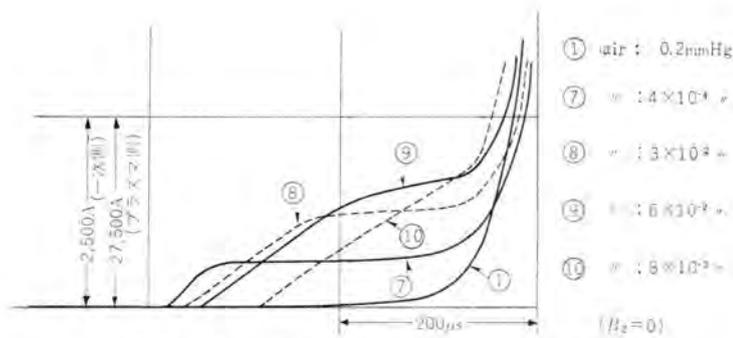


図 3.2 オーム加熱時の一次 コイル 電流 i_1 の波形
Fig. 3.2 Ohmic heating primary current i_1 .

コイル W_3 の近辺の管壁にプラズマが付き当たることがすでに判明している。これらは理論的にも当然予想されることであるが、この写真は鮮明なイメージを与える珍しい記録としてはなほ興味深い。なおコイル W_3 は電流を流さない場合でもプラズマ安定化にかなり寄与していることもわかってきている。このほか圧縮加熱の実験結果など予備実験の段階でも報告すべき事項は多いがここでは割愛する。

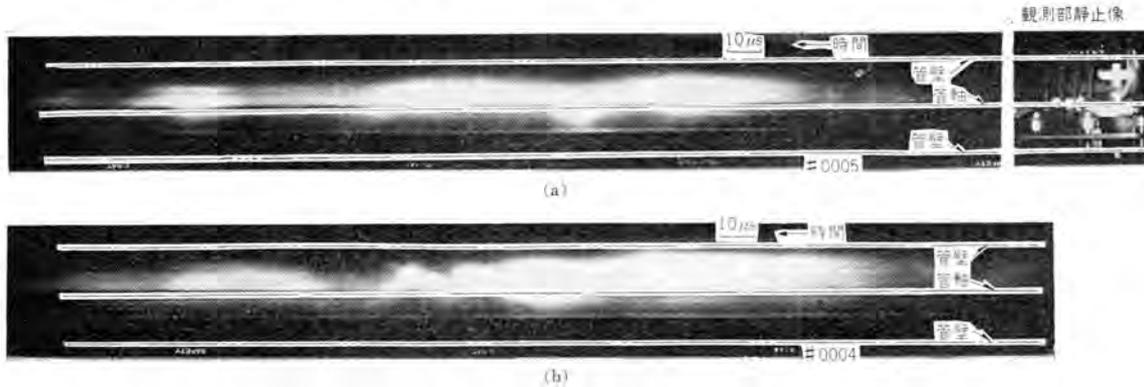


図 3.3 Ohmic heating の際のプラズマの流し写真
Fig. 3.3 Streak photograph of ohmic heating.

よる収縮や加熱による温度上昇まで考慮に入れてこの問題を理論的に論ずることもできるが、プラズマ損などの正確な評価がむずかしいので、ここでは実験結果を例としてとり上げよう。

図 3.2 は、この際の一次コイルの電流波形を示すもので、①の場合だけは放電管に電流が流れていないが、それ以外の場合は気圧によってプラズマ電流の波形はいろいろと変わり 6×10^{-2} mmHg の近辺がもっとも電流が大きい。しかし全般にプラズマ抵抗は予想以上に大きく、したがって電源コンデンサ電圧は鉄心飽和により励磁電流が急増するまではあまり下がらない。このため、電流の上昇速度はこの場合おもに一次コイル漏れリアクタンスとプラズマ抵抗の比によって定まっている。ただしガス圧の高い場合の通電初期にみられる遅れは現在のところ十分な説明がついていない。これらの考察の詳細は後報にゆずるとして図 3.3 (a) にこの際のプラズマの流し写真を示す。これは右端の静止像 (コイル W_3 の巻かれている放電管部分) の中央部の発光状況を $1 \mu\text{s}/\text{mm}$ の走査速度でフィルム上に写し出したもので管軸より下部で光が薄いのはコイル端子が撮影部の障害となっているためであるが、典型的なくびれの不安定現象が明瞭に見られる。同図 (b) は安定磁界 B_2 をかけた場合で B_2 が内部磁界を発生するためプラズマは太くなっている。この W_3 の巻かれている部分では磁界が相当乱れているため B_2 の安定化効果は十分とはいえない。この写真は垂直方向の動揺を示すものであるが、水平方向の動揺はもっと激しく

4. む す び

設備は完成の域に達し、技術的基礎も固まり、実験は着実に進行しつつある。すでにスイッチの問題、プラズマの不安定現象などについて興味ある結果が得られているけれども、今後はプラズマに対する理解が急激に深まることが期待できる。新しいアイデアもこのステップバイステップの実験から十分に汲み取ることができよう。

もちろん技術の面でも今後なすべきことは多い。ことに測定技術、電力回路技術、またはそれに要する機器の開発の面でわれわれはもっと努力を続けなければならない。

最後に、この研究に多大の支持を与えていただいている当所安藤室長、三菱原子力工業株式会社今村分室長をはじめ関係各位と、実験に協力していただいている飛田、細道両君に篤く感謝の意を表してむすびとする。

参 考 文 献

- (1) たとえば, G. N. Harding, et al.: 2nd Geneva Conf. p./1519.
- (2) M. Rosenbluth: 2nd Geneva Conf. p./347. B. R. Suydan: ibid, p./354.
- (3) 河合・近藤: 電学誌 80, pp. 722~726 (昭 35).
- (4) 河合・近藤・杉本: 昭 35 連大 No. 145.
- (5) B. Cummings: Tr. I. R. E. on Nucl. Sci. 23 (Sept. 1959)
R. A. Fitch: I. E. E. Convent. on Thermonucl. Process. No. 2947 (Apr. 1959)

中性子スペクトロメータ

日本原子力研究所
研 究 所

国 富 信 彦 ・ 浜 口 由 和
薮 原 智* ・ 宮 下 恭 一**
茂 木 充*** ・ 大 野 栄 一****

Neutron Spectrometer

Japan Atomic Energy Research Institute

Nobuhiko KUNITOMI • Yoshikazu HAMAGUCHI

Research Laboratory

Satoru HAGIHARA • Kyōichi MIYASHITA

Mitsuru MOGI • Eiichi OHNO

A description is given of an instrument for neutron diffraction measurements. In June 1960, this spectrometer was installed at JRR-2 reactor which had high neutron flux density (2×10^{14} n/cm²/sec. at the core centre). It is designed for use with polycrystalline samples and has three interchangeable Soller type collimators (5, 15, 30 min. angle). Neutron wave length is continuously variable by means of the rotatable monochromator. Polarized neutron beam is also obtainable. Furthermore, some accessories—large electromagnets and liquid helium cryostat—are attached to it. Some devices located in the high radiation dose rate field are remotely adjustable from the control desk.

1. ま え が き

中性子 スペクトロメータは原子炉から得られる中性子ビームを利用する物理実験装置である。昭和 35 年 6 月に日本原子力研究所第 2 号原子炉に据付を完了した。

この装置は物理学の中でもおもに物性論方面に使用されるもので、原子炉から得られる強い熱中性子ビームを単結晶の干渉散乱を利用して単色化し、この単色中性子を試料に照射し、その散乱の模様から試料原子の配列状況を調べるものである。

同様の研究は従来 X 線、電子線を用いて行なわれてき、このためのスペクトロメータは市販されているが、中性子スペクトロメータはこれにくらべて次のような重要な特長をもっている。

X 線、電子線では試料のごく表面に近い部分しかわからないが、中性子では内部の配列までわかる。また散乱が原子核との間で起こるため、原子番号の小さい H のような原子でもその位置を知ることができるし、原子番号の近い Fe, Mn のような異種原子でもはっきり区別できる場合もある。さらに重要な特長は、中性子は磁気モーメントをもちこれが試料原子の核外電子の磁気モーメントと作用し、その強さが原子核との散乱と同程度であるために、磁性体研究に威力を発揮する。

このような中性子回折の研究が本格的に行なわれるようになったのは最近 10 数年のことであり、比較的古くから広く行なわれている X 線回折と事情を異にする。X 線の場合は必要な強度の X 線を発生させることもこれを取扱うことも容易であり、机上にのせられる程度の装置で済むが、これに反して、中性子回折の場合は、今日世界の最大級の原子炉をもってしても、検出器に到達する



図 2.1 中性子スペクトロメータの全景

Fig. 2.1 General view of neutron spectrometer.

強度の点では X 線におよばないほどであり、中性子と物質との相互作用の弱さから大きな装置と重いシャヘイを必要とする。そしてこのことは装置としての観点から見たときにも X 線の場合とまったく異なった困難や問題点を生ずる。

2. 装置の概要

この装置は主として粉末固体試料用に設計され、原子炉から熱中性子を引き出す部分、これを単色化する部分、試料に照射して散乱の角度分布を調べる部分に分れる。これらは図 2.1 に示すように JRR-2 原子炉壁に密接して炉室内に据付けられ、別に設置された測定制御装置によって操作される。

装置の概要を図 2.2 に示す。原子炉炉心反射材中にそう入された中性子実験孔内にはコリメータをおき、方向のそろった熱中性子ビームをモノクロメータに導く。モノクロメータの主体は大きな単結晶である。中性子は規則正しく配

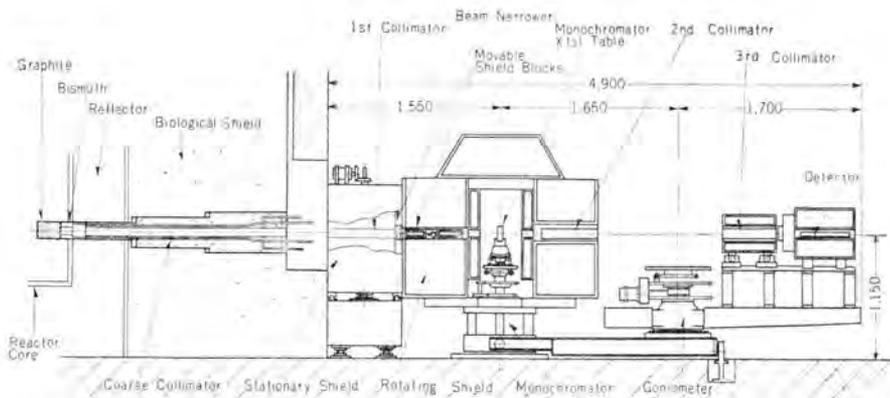


図 2.2 中性子 スペクトロメータ 断面図

Fig. 2.2 Schematic drawing of neutron spectrometer.

列した結晶面で弾性散乱をうけ、特定の波長の中性子が定められた方向に強め合って干渉散乱されてくる。散乱に関与する結晶面間隔 d 、干渉散乱する中性子波長 λ 、ならびに散乱角 θ はよく知られたブラッグの法則

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

n : 散乱の次数 (1, 2, 3, ……)

で結ばれる⁽¹⁾⁽²⁾。このことはさきに JRR-1 に据付けられた中性子 モノクロメータ⁽³⁾と同様である。

波長は θ や d を変化させることにより任意に選べるが、通常熱中性子 ビーム 強度の最大あるいはこれから少し短波長側を選ばれ 1\AA 程度である。

特定波長の単色中性子 ビーム は次に ゴニオメータ の中心におかれた試料に照射される。ゴニオメータ は試料中心を軸として水平面内に回転し、回転 アーム 上に中性子検出器をそなえている。試料にあたって散乱された中性子強度の角度分布を回転 アーム を回転させることにより測定し、回折像を得る。

この装置は中性子 スペクトロメータ として数々の特長をもっている。すなわち原子炉は 10 MW の高出力であり、これから高分解能の高密度 ビーム を得て粉末試料の回折を行なわせる。また モノクロメータ の角度は可変になっている。こういった目的のために モノクロメータ 周囲の生体シヤヘイはきわめて大形大重量のものになるが、これをモノクロメータアーム 角度を可変にする必要から生ずる空間的 重量的制約のもとにもっとも効率よくシヤヘイするために努力をこらした。また重いシヤヘイの中にそう入されたファインコリメータ を電氣的に可換式にして使用目的に応じて分解能を選べるようにした。また装置、原子炉ともに大きいから、すべての部分の制御や調節は電氣的に行なえるようにして実験の能率の向上を図った。磁性体研究の目的から当然要求される偏極中性子も得られるようになっている。その他 クライオスタット、強磁界用電磁石も付属させた。

3. 機械装置

この装置は前章に述べたように角度の精度で分の単位が要求される精密な装置であり、放射線のシヤヘイのため

に重量の大きなシヤヘイ材を積んで移動するので、機械的設計にあたってはこの点に種々の考慮がはらわれた。モノクロメータ、ゴニオメータ とおのおのの装置の中性子 ビーム 中心を $\pm 0.5\text{mm}$ 以内におさめるために、炉室内の基礎定板上に据付けられた機械構造はすべて弾性変形を考慮して設計され、使用した材料は十分な安定化処理を施し、長期間の使用にたいしても変形のないよう十分注意をはらった。

3.1 コースコリメータと水シヤヘイ装置

コースコリメータ は実験孔 プラグ の中心に穴をあけて、 $5 \times 5\text{cm}$ の中性子 ビーム を取り出すためのもので、ビームの水平方向には 30 分の広がりをもつよう先端にいくにつれて扇形に開かれている。プラグ 全体はアルミ 合金製の円筒で直径は 3 段に変化し、先端部は 15 cm、後部は 30 cm、全長 230 cm で、コースコリメータ の穴の外は全部比重 4 の ポロン 入り鉄 パンチコクリート で充てんされている。プラグの先端には減速材規格のグラファイト 20 cm を厚さ 2 mm のアルミニウム でおおったものと、99.999% の ビスマスブロック 15 cm が炉心 タンク 内まで突出しており、これによって γ 線のシヤヘイと同時に熱中性子を効率よく引き出せるようになっている。コースコリメータ は 2 mm のアルミ 板で箱に作られており、装置を停止するときは内部に水を満たして、原子炉からの放射線の漏れを少なくするようになっている。水の排水注入は電磁弁の操作で行なわれる。

3.2 ファインコリメータとビームナロー

ファインコリメータ はガドミウムメッキ をほどこした薄い鋼板を平行にならべたもので、全長 50 cm、窓面積 $5 \times 5\text{cm}$ 、外形 $9 \times 9\text{cm}$ であり、分解角は 5 分、15 分、30 分の 3 種類がある。その構造は 5μ のガドミウムメッキした 0.06 mm の薄鋼板を 0.55 mm のアルミニウム 板のスペーサを 1~6 枚ずつはさんで積み重ね、両側に 20 mm のアルミニウム 合金板をあてがい、炭素鋼の ボルト 20 本で -60°C の液



図 3.1 中性子 スペクトロメータ の機械装置

Fig. 3.1 Mechanical construction of neutron spectrometer.

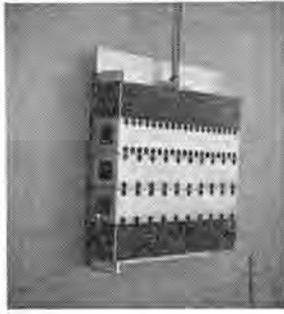


図 3.2 ファインコリメータ
Fig. 3.2 Fine collimator.

体中で組立てたものである。これは鋼とアルミニウムの膨張係数の差を利用して、常温で薄いストリップを平行に張る作用を与えるためのものである。

ビームノアは熱中性子ビームの断面積を限定するために、厚さ1mmのガドミウム板とポロカーバイト50%を含んだアクリル樹脂板10mmを重ねて、シヤハイ材としてその中に5cm, 4cm, 3cm, 2cm, 1cmの5種の角穴を設けてある。

固定シールド内には上記のファインコリメータ3種とシヤハイプラグ2種を1組として図3.2のような形状で組み入れ、ビームノアとともに電動機で上下して5個の穴を交換される。また、コリメータとビームノアは一体として2方向の平行移動と3方向の回転を微調整して、ビーム方向をそろえられるようになっている。

3.3 モノクロメータ

モノクロメータは単結晶をのせるテーブル、回転シールドを乗せる中心ポストと、ゴニオメータをのせて回転するアームとからできている。中心ポストは鋳鉄で作られ、テーパーラベリングで約7tの回転シールドをささえ、結晶台はアームの回転と正確に $\theta:2\theta$ で連動する。また、結晶台だけを単独に電動で回転させることもできる。アームは中心ポストと床面にすえられた円形レール上の両端でささえられる鋼板製のハリで、上にゴニオメータをのせ、さらに電磁石やクライオスタットなど約2.5tをのせても十分剛性のあるよう設計されている。モノクロメータのアームはレールの上を車輪で移動し、 -30 度から 90 度まで角度を変えられるので、種々の単結晶について波長の範囲を広く変化させることができる。またアームの移動は可逆電動機により電動で行なわれ、その角度は中心ポストにのせられた回転シールド基部の目盛板で、1分まで読み取ることができる。

モノクロメータテーブルにのせられる結晶台は、大きなシヤハイ体の中に埋められるため、微調整はすべて電動で遠隔

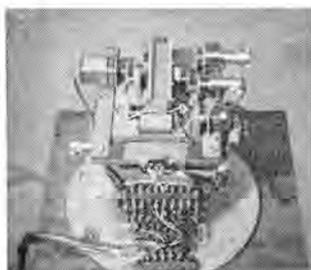


図 3.3 モノクロメータ結晶台
Fig. 3.3 Crystal table of monochromator.

操作可能とした図3.3のようなもので、左右に ± 15 度まで傾き、また前後左右に ± 10 mmの移動ができる。

3.4 ゴニオメータ

ゴニオメータは中心ポストに測定試料をのせるテーブルがあり、ポストから回転アームを張り出して、その上にシヤハイされた第3コリメータと検出器をのせて正確に連動する。中心部は十分な安定化処理を行なったアルミ合金製の鋳物で、アームはアルミ合金板のハリで作られ、軽量で、かつ十分な剛性を持つように設計されている。ゴニオメータテーブルは直径60cmで大形の電磁石やクライオスタットをのせても十分な剛性をもっており、連動と別に電動で正確に回転し、微調整も行なえる。アームとテーブルの回転は目盛板によって1分の精度まで読み取れる。駆動装置は出力10Wのサーボモータを約60万分1のに減速して行なわれる。最終段ウォームギヤは56cm直径のアーム・ブロンズ製でピッチ誤差 20μ に精密加工されており、角度の精度は電動機主軸の回転数で ± 1 分の精度で表示される。ゴニオメータ全体はモノクロメータ上に据付けられ、前後に ± 10 cmの移動を手動で行なえる。



図 3.4 移動シールドブロック
Fig. 3.4 Movable shield blocks.

3.5 シールド

原子炉シヤハイ壁に密着して約2tの固定シールドがあり、中に第1コリメータと第1ビームノアを持っている。このシールドは比重3.5の重コンクリートで原子炉からの放射線の漏れをシヤハイする。回転シールドはモノクロメータ結晶台をかこんでモノクロメータ中心ポストにのっており、原子炉から直接のビームをシヤハイするために直径1.8m、高さ1mの大きなダックの中に種々のシヤハイ材をつめてある。ダックの中心のケーブは直径40cm、深さ70cmあり、大形の単結晶やポロライザを入れるに十分な大きさで、そのまわりに10cm厚さのポロパラヒンの円筒、さらに外側に鉛15cm、ハードボード40cm、鋼板5cmのシヤハイ材をおいて、 γ 線と中性子をシヤハイしてある。中性子ビームの入口はモノクロメータの角度の変化につれて移動するが、図3.4に示すように、前記回転シールドに仕込まれ電動で移動するシールドプラグによって、いつもビームの方向に開口されるようになっている。

4. 測定制御系

4.1 測定系の概要

ゴニオメータ回転アーム上に備えられた中性子検出器により、中性子強度分布を測定しこれを記録するとともに、機械部を遠隔で操作する。またこの測定記録を定められ

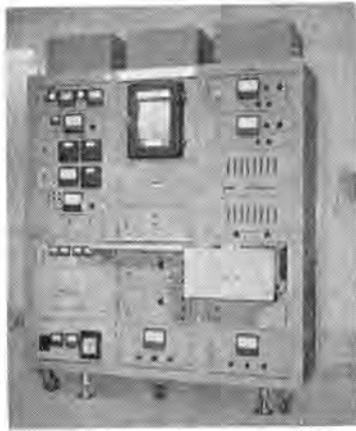


図 4.1 測定制御装置

Fig. 4.1 Measurement and control equipment.

た手順によって連続自動で行なわせる装置を含んでいる。装置の外観およびブロックダイアグラムを図 4.1、図 4.2 に示す。

定められた手順とは次のようなものである。ゴニオメータームがある定められた角度位置にあるものとしよう。起動信号でまず主測定系、モニタ系両系の計数装置ゲートを同時に開く。

モニタ系には試料に入射する中性子数に比例する信号がはいるから、モニタ系計数値をある一定数にプリセットしておく、プリセット値に達するまでの時間の主測定系の計数値は、原子炉出力の変動のいかんにかかわらず試料に入射する中性子数で基準化されたものになる。さてモニタ系がプリセット値に達すると主測定系ともゲートが閉じられ、このときの主測定値が指示されると同時にデータ番号とともに印字される。次にゴニオメータームが移動を始める。移動の角度はやはりレジスタで計数され、ある定められた値に達すると停止させられる。ここで再び第 2 回の測定にはいる。これは手動停止を行なうか、安全限界に到達するまでくり返される。またこのくり返しの途中では 10 回に 1 回の割合で主測定用 BF_3 計数管の直前のシャッタを閉じ、バックグラウンドの測定も行なわれる。

4.2 中性子測定系

試料により散乱をうけた中性子を計数する主測定系と、試料に入射する中性子強度を監視するモニタ系とに

分れている。それぞれは BF_3 計数管、前置増幅器、比例増幅器、高圧安定化電源、計数率計、記録計、計数装置各 1 組からなりつつ、

主測定系用 BF_3 計数管は前方長軸方向の入射中性子に対してとくに効率をよくし、また他方向からのバックグラウンドの影響を少なくするよう寸法、電極構造、シヤハイ方法をくふうしたもので、濃縮 BF_3 ガス 65 cmHg を充てん、直径 50 mm、全長 300 mm のもの三菱 ND-8124-E である。一方モニタ系用検出器としては、核分裂計数管が入手できなかったため、同じく BF_3 計数管を用いたが、直径 25 mm、全長 300 mm (三菱 ND-8122) のものに BF_3 ガスとアルゴン の混合物を充てんして計数効率の低下を図った。

前置増幅器 (三菱 ND-1222)、比例増幅器 (三菱 ND-1443)、計数率計 (三菱 ND-1712A)、高圧安定化電源 (三菱 ND-1552) などは標準品を用いたが、他の原子炉付属機器からのサージ混入を防ぐために若干の改良を施した。図 4.2 に示すように、中性子信号は 2 系統とも計数記録装置にはいるが、これと並列に計数率計にも入れ、2 点式記録計により自記させている。これは補助系統である。

4.3 計数記録装置

計数装置はトランジスタ化された 2 チャンネル形で主測定系にはいる計数をモニタ系の計数値でプリセットする。プリセットの値は 100~1,000,000 の範囲を選べる。

計数に用いられる 10 進計数ユニットは正負 0.2 μs 以上の信号に应答し、3 μs 以上の分解能をもっている。

主測定系の 10 進 6 ケタの計数値は 2 ケタの測定番号とともに指示されると同時に、各ケタからの 2 進出力が走査されながら 10 進に変換され、直列入力形プリンタによって印字される。指示された測定値は定められた表示時間後リセットされ、これと同時にゴニオメータの駆動信号が送り出される。

またこのときゴニオメータの移動角はセルシナーポシステムに組み込まれた角度パルス発生器でパルス化され、ゴニオームの送り角度 0.3 分につき 1 パルスの割合で計数される。このプリセット値により 3 分~30 分の角度送りのステップが定められており、プリセット値に達すればゴニオメータ停止信号を送り出す。また 10 回に 1 回バックグラウンドの測定を行なわせることもできる。

その他ゴニオメータを駆動しない反復測定や、内蔵の発振器による定時間測定も可能になっている。

これらの各機能を果たすための起動入出力および測定順序などの制御回路いっさいを含み、約 40 個のプリント配線パッケージにまとめている。トランジスタ約 380 個、ダイオード約 200 個、リレー約 30 個を使用しているが、消費電力はプリンタを除き 65 W にすぎない。

4.4 アーム駆動機構とサーボ機構

ゴニオメータの駆動は、遅速 2 段に速度制御を施されたサーボモータで行なわれる。またセルシナーポを用いてゴニ

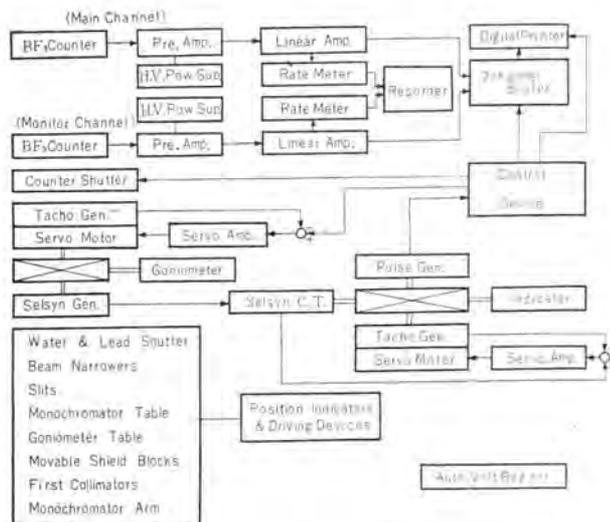


図 4.2 測定制御系のブロックダイアグラム

Fig. 4.2 Block diagram of measurement and control circuit.

オモータ本体の駆動軸とまったく同じ動きを測定制御装置の中で実現させ、この動きによってゴニオメータ角度の指示器と自動測定の際に必要な角度パルス発生器を動作させている。

これらの関係は図4.2に示されている。図のようにゴニオメータ本体に歯車で結合されたセルシッ 発振器がゴニオメータ角度の検出器となり、これと角度指示器に歯車で結合されたセルシッ 変圧器との間に角度差があればそれに応じた誤差電圧を生じ、これが角度指示サーボアンプで増幅されてサーボモータを回転させ、本体と同一の角度になった位置で停止する。マイクロジェネレータ出力は系の安定度を向上させるために用いられる。

角度指示サーボモータとしては本体アームの最高送り速度と角度表示器の負荷トルクと考慮して最大出力10Wのものを用いた。このモータの制御入力は最大35VAほど必要となるので、ここでは自己飽和形磁気増幅器2個によるラジカル回路のサーボアンプを用いた。

4.5 遠隔調整機構

測定の準備や各部の位置調節はガンマ線や中性子線下で行なわれるし、また重いシヤハイ体中におかれている部分も多いのですべて遠隔とし、測定制御装置の所で中性子計数を監視しながら行なえるようにした。図4.2にそれらの種類を示す。位置指示にはセルシッモータまたはポテンシオメータを用いた。

5. 付属装置

5.1 ビームキャッチャと移動シールド

ビームキャッチャは、モノクロメータから漏れて出てくる中性子や γ 線ビームをつかまえて外に漏らせないために使用するもので、直径60cm、長さ1mでボロン入りパラヒン30cm、鉛20cmのシヤハイ材が入れられている。そのほかに実験装置の近くから散乱された中性子線によるバックグラウンドの増加をさけるために、ハードボード厚さ10cm、1m×1mのついたて形の移動シールド10台を備えている。

5.2 ポーライザ

はじめに述べたように中性子の磁気モーメントを利用して磁性を調べることは、中性子回折の主要な目的の一つである。このためには試料に照射する単色中性子の磁気モーメントをそろえてやったほうがつごうがよい。ポーライザはこのためのもので、永久磁石とその磁極片の間にはさまれ飽和まで磁化された、強磁性体結晶とからなっていて、モノクロメータ単結晶の位置におかれる。

5.3 マグネットとクライオスタット

試料に強磁界をかけるための電磁石で、試料の位置に15,000 Oeの磁界を作り、かつ中性子ビームの入射や、散乱のじゃまにならないようにくふうしたものである。

クライオスタットは試料を液体ヘリウム温度にまで冷却するデュワーびんで、液体ヘリウムタンクの外側を液体窒素タンクでおおい、伝導と輻射による液体ヘリウムの消耗を少なくするよう考慮されている。

6. む す び

据付にあたってはトランジット、水準器を用いてできるだけ精度を高めるよう調整をほどこした結果、ビーム中心線に対して上下方向に ± 0.5 mm、左右方向に ± 0.2 mm以内の精度で機械装置全体を調整できた。モノクロメータとゴニオメータ中心は精密軸受を用いたため、回転による偏心も0.02~0.005 mm以下の値であり、自動送りの角度精度も ± 1 分以下に押えられ、ゴニオメータアームのバックラッシュは2分以下となった。この結果は測定に必要な高い分解能を得るに十分な精度である。

実際の運転の場合は48時間以上の連続無人の運転になることが予想され、その期間自動測定操作には1回の誤動作も許されないので、組立後最大50時間におよぶ連続運転テストを延500時間行なった。原子炉はまだ運転されていないため、中性子源としてはRa+Be源とPo+Be源を使用した。

中性子測定系の動作状態はこのように一定強度の中性子を入射させた場合の計数値の分布から推定した。自動測定の誤動作はデータ番号と送り角度を比較することで検査した。原子炉が始動すれば中性子ビームを使用して再度全装置の調整を行なう予定である。

この装置はJRR-2原子炉に付属する物理実験装置として最初に完成したものであり、原子炉が10,000 kWの高出力で運転を開始すれば世界でも最大級の中性子強度を有するスペクトロメータになるものと期待されている。

終わりに、シヤハイ計算にあたってご協力いただいた三菱原子力工業(株)研究所の小倉、豊田両技師に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) G.E. Bacon: Neutron Diffraction (1955).
- (2) D.J. Hughes: Pile Neutron Research (1953).
- (3) 大野・藤原・宮下・茂木・大野: 中性子モノクロメータ「三菱電機」, 33, No. 7 (昭34).
- (4) Sailor, Foote, Landon & Wood; Rev. Sci. Instrum., 27, 26 (1956).

磁気増幅器の制御機構

研究所 浜岡 文夫*・山崎 英蔵*

Control Mechanism of Magnetic Amplifiers

Research Laboratory Fumio HAMAOKA・Eizo YAMAZAKI

The magnetic core in the magnetic amplifier circuit has a very complicated behavior, changing with operating conditions such as control voltage wave forms and relative control circuit impedances. This brings about difference between theoretical results and experimental results on the conventional circuit. The writers state in this article that, as a result of analysis of conventional magnetic amplifier circuits by the use of half cycle average equations, the flux control characteristic is expressed as a function of the ratio of control circuit impedance to equivalent core resistance. The relation between control magnetization curve of the core and flux control characteristics is given in it through the study of the variation of flux resetting quantities when control circuit condition is changed. This relation will lead to easy and accurate calculation of the control characteristic of magnetic amplifiers. In the end, the operation of high performance magnetic amplifier circuit developed is explained briefly.

1. まえがき

磁気増幅器の磁束制御機構が次第に解明され、鉄心特性と磁気増幅器制御特性に関する多くの研究が発表されているが、鉄心動特性は非線形であり、解析結果と実測結果の間に大きい差異を生じている。

最近、鉄心の非線形を数式的に表現しようとの試みが行なわれているが⁽¹⁾⁽²⁾、まだ不十分であり、また非線形を考慮した図式解法も報告されているが⁽³⁾、繁雑なので実用的には不便である。

この論文では、磁気増幅器の動作が電源の半周期単位で行なわれることより半周期方程式にて解析した結果、鉄心の磁束制御量は一般に制御回路抵抗と鉄心等価抵抗の比の関数で与えられることを明らかにした。実用的には鉄心等価抵抗の表示が問題であるが、制御回路条件による磁束制御量を検討した結果、鉄心の制御磁化特性と磁束制御量の関係を見出すことができたので、それらの関係についても述べた。

サーボ用、計測用増幅器に電圧増幅度の高い回路が要求されているので、終節では著者らが開発した高性能磁気増幅器回路について、その概要を説明した。

2. 磁気増幅器の動作解析

2.1 信号伝達

磁気増幅器の鉄心は電圧 ⇄ 磁束の変換器であり、制御電圧の伝達経路は図 2.1 で示される。すなわちリセット半周期では制御電圧 E_c が鉄心の磁束を制御し、 E_c は磁束制御量 $\Delta\phi_r$ に変換される。次のゲート半周期には $\Delta\phi_r$ が電圧 E_g' に変換され、電源電圧 V_a と E_g' の差 E_o が負荷に供給される。

このように磁気増幅器の信号変換はすべて電源の半周期を単位として行なわれるから、解析は半周期平均値を用いて行なうと便利である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。



図 2.1 磁気増幅器の信号変換
Fig. 2.1 Signal transformation of mag. amp.

2.2 半波形回路の磁束制御特性

磁気増幅器の制御特性は磁束制御量により決まるから、まず制御電圧と磁束制御量の関係、すなわち磁束制御特性について述べる。

図 2.2 に示す半波形回路の制御回路方程式は式 (2.1) で表わされる。

$$e_c = i_c R_c + N_c d\phi_r / dt \dots \dots \dots (2.1)$$

いまリセット半周期間の磁束制御量を $\Delta\phi_r$ とすれば、式 (2.1) の半周期平均値方程式は

$$E_c = I_c R_c + 2f N_c \Delta\phi_r \dots \dots \dots (2.2)$$

式 (2.2) より

$$E_c / I_c = R_c + 2f N_c \Delta\phi_r / I_c \dots \dots \dots (2.3)$$

式 (2.3) は、リセット半周期間の制御回路インピーダンスを表示しており

$$2f N_c \Delta\phi_r / I_c = R_0 \dots \dots \dots (2.4)$$

とおくと、リセット半周期間の制御回路の等価回路は式 (2.3) および式 (2.4) から図 2.3 で示される。これより制御電流 I_c が流れ、磁束制御量が $\Delta\phi_r$ なる時の鉄心は R_0 なる等価抵抗に置き換えられる⁽⁶⁾。

鉄心等価抵抗の一般的表現として巻線 1 巻あたりの等価抵抗 r_0 は

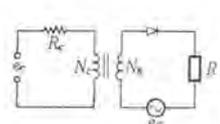


図 2.2 半波形回路
Fig. 2.2 Half wave mag. amp.

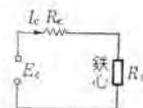


図 2.3 半波形の等価回路
Fig. 2.3 Equivalent circuit of half wave mag. amp.

$$r_0 = 2f \Delta\phi_r / AT_c \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

すなわち 1 巻あたりの鉄心吸収電圧に対する励磁 AT_c の比で与えられる。

したがって半波形回路における鉄心の磁束制御量は図 2.3 および式 (2.5) より

$$2f N_c \Delta\phi_r = \frac{N_c^2 r_0}{R_c + N_c^2 r_0} E_c \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

いま $R_c / N_c^2 r_0 = \gamma \quad \dots\dots\dots(2.7)$

また $2f \Delta\phi_r = E_{r0}$, $N_c E_{r0} = E_r \quad \dots\dots\dots(2.8)$

とおけば、式 (2.6) は

$$E_r = \left[\frac{1}{1+\gamma} \right] E_c \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

となる。したがって半波形回路の磁束制御量は、鉄心等価抵抗を用いて算出することができる。

2.3 全波形回路の磁束制御特性

全波形回路の代表的な回路例は図 2.4 のように図 2.2 に示した半波形回路を 2 個組み合わせさせたものである。しかし半波形回路とは大きい相違がある。それは半波形回路の磁束制御は制御電圧 e_c だけによって行なわれたが、全波形回路では鉄心 I, II の相互干渉によりゲート時の鉄心誘起電圧が E_c に加わり、磁束を制御することである。

いま鉄心 I がゲート期間、鉄心 II がリセット期間である第 n 半周期について考えると、制御回路の基本方程式は

$$e_c = N_c d\phi_I/dt + N_c d\phi_{II}/dt + i_c R_c \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

となる。上式を半周期平均値方程式で示すと、

$$E_c(n) = -E_g(n) + E_r(n) + I_c(n) R_c \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

となり、これは図 2.5 の等価回路で表示できる。制御回路電流が $I_c(n)$ で鉄心 II の吸収電圧が $E_r(n)$ であることより、第 n 半周期間の鉄心等価抵抗 $R_0(n)$ を、

$$R_0(n) = E_r(n) / I_c(n) \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

とすれば、図 2.5 および式 (2.12) より、リセット半周期間の鉄心吸収電圧 $E_r(n)$ は次式になる。

$$E_r(n) = \frac{R_0(n)}{R_c + R_0(n)} [E_c(n) + E_g(n)] \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

ここで、 $R_c / R_0(n) = \gamma(n) \quad \dots\dots\dots(2.14)$

であるから、

$$E_r(n) = \frac{1}{1+\gamma(n)} [E_c(n) + E_g(n)] \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

式 (2.15) は全波形回路の磁束制御量に関する基本方程式である。次に式 (2.15) より全波形の定常特性と過渡特性を求めよう。

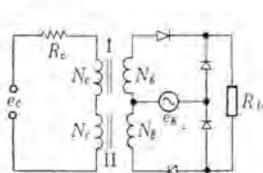


図 2.4 全波形回路
Fig. 2.4 Full wave mag. amp.

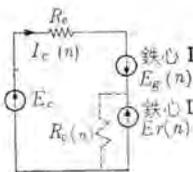


図 2.5 全波形の等価回路
Fig. 2.5 Equivalent circuit of full wave mag. amp.

定常特性: 鉄心の残留磁束を無視した場合、定常状態で $E_r(n) = E_g(n)$ であるから、定常状態の鉄心吸収電圧 E_r は式 (2.15) より、

$$E_r = E_g / \gamma \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

となる。したがって全波形の制御回路における電圧増幅度 K_{nc} は次式となる。

$$K_{nc} = 1/\gamma \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

過渡特性: 第 $(n-1)$ 半周期間の磁束制御量を $\Delta\phi_r$ ($n-1$)、第 n 半周期間の磁束ゲート量を $\Delta\phi_g(n)$ とすれば、いかなる半周期でも両者は等しいから、

$$\left. \begin{aligned} \Delta\phi_g(n) &= \Delta\phi_r(n-1) \\ \therefore E_g(n) &= E_r(n-1) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

いますべての半周期で γ が一定である (実際には磁束制御量により若干変化するが) と仮定すれば、式 (2.15) および式 (2.18) より、

$$E_r(n) - \frac{E_r(n-1)}{1+\gamma} = \frac{1}{1+\gamma} \cdot E_c$$

$E_r(n)$ と $E_r(n-1)$ の関係が一階線形差分方程式を満足するから¹⁷⁾、

$$\Delta E_r(n) + \left(\frac{\gamma}{1+\gamma} \right) E_r(n) = \frac{1}{1+\gamma} E_c \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

となる。式 (2.19) を時間関数に変換して、

$$\frac{1}{2f} \frac{dE_r}{dt} + \left(\frac{\gamma}{1+\gamma} \right) E_r = \frac{1}{1+\gamma} E_c \quad \dots\dots\dots(2.20)$$

$1/2f = \tau$, $\gamma/(1+\gamma) = \alpha$ とおき、式 (2.20) をラプラス変換すれば

$$E_r(S) = \frac{1}{\gamma(1+(\tau/\alpha)S)} E_c \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

したがって 63% 応答時間 T_τ は、

$$T_\tau = \frac{\tau}{\alpha} = \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \frac{1}{2f} \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

式 (2.22) に式 (2.17) の関係を代入し、

$$T_\tau = (1 + K_{nc}) / 2f \quad \dots\dots\dots(2.22)'$$

となる。すなわち全波形の応答時間は K_{nc} に比例して増大する。

2.4 磁気増幅器の出力特性

2.1 節および 2.2 節で磁気増幅器の制御電圧と磁束制御量の関係について述べたが、次に磁束制御量と出力電流の関係について簡単に述べよう。

ゲート回路の整流器逆方向抵抗は無限大、正方向特性はコキ電圧 E_R と等価抵抗 R_{ref} で表わされるものとする。また鉄心の残留磁束を 1 巻あたりの電圧に換算して E_{r0} 、ゲート巻線抵抗の総和を R_W 、負荷抵抗を R_L とする。しかるときゲート回路の抵抗の総和 R_T は

$$R_T = R_W + nR_{ref} + R_L \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

ただし n は整流器の直列枚数

いまゲート電圧の半周期平均値を V_g 、磁束制御量を $\Delta\phi_r$ とすれば、出力電流 I_L は式 (2.24) となる。

$$I_L = [V_g - nE_R - N_g(E_{r0} + E_r)] / R_L \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

磁束のリセットとゲートの間には半周期の時間遅れがあるから、半波形および全波形のブロック線図は式 (2.9)、

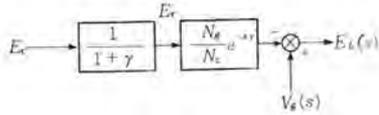


図 2.6 半波形のブロック線図
Fig. 2.6 Block diagram of half wave mag. amp.

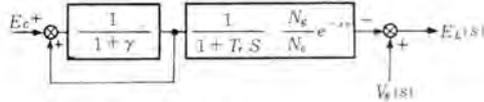


図 2.7 全波形のブロック線図
Fig. 2.7 Block diagram of full wave mag. amp.

式 (2.21), 式 (2.24) より図 2.6, 図 2.7 で示される。

3. 制御磁化特性と半波形の磁束制御特性

3.1 制御磁化特性

前節の解析結果より明らかなように、磁気増幅器の制御特性は γ の関数であり、動作時の鉄心等価抵抗があくされていれば、制御特性は容易に算出できるのであるが、鉄心の磁化特性は磁束制御条件によって異なり、また決定的な測定法がないのが現状である。しかし鉄心の磁束制御に関する多くの研究の結果⁽⁸⁾、制御磁化特性 (CMC と呼ばれている) が磁気増幅器制御特性に密接な関係があることが明らかになっている。

制御磁化特性 (以下 CMC と呼ぶ) の原理および動作については、すでに多くの文献で紹介されているが⁽⁹⁾、つきにその動作、原理について簡単に説明し、鉄心等価抵抗との関係について述べよう。

CMC は直流定電流リセット法⁽⁸⁾の一種であるが、図 3.1 に示すようにその制御回路を継続しない回路である。リセット回路電流のピーク値 I_{op} を大きくし、

$$N_p I_{op} - N_s I_c \cong N_p I_{op} \quad (3.1)$$

なら、上式の左辺が若干変動して図 3.2 の a 点が多少変化しても、鉄心の飽和特性のため磁束の変化は非常に少ない。交流電源の負の半周期では、制御電流 I_c だけにより磁束が正の飽和値から変化する。制御回路には鉄心等価抵抗に比し数 10 倍から 100 倍のインピーダンスを直列にそうし、電流 I_c を一定に保つ。

いまある半周期にリセット巻線に交流半波電圧が加えられると、その印加電圧が鉄心飽和電圧に比し十分高い場合、始めの部分では鉄心が飽和せずリセット電流を押えているが、飽和後は電源と同一波形の電流が流れる。この始めの部分で三角波状の磁束変化電圧を生じ、飽和後は消失する。三角波状の電圧は前半周期間の磁束制御量に対応するものである。チョップにより磁束上昇時の磁束変化電圧を検出巻線 N_v でとり出し、検出電圧 E_v を読むと、

$$E_v = 2f N_v \Delta\phi \quad (3.2)$$

ただし $\Delta\phi = \int_0^{T/2} (d\phi/dt) dt$

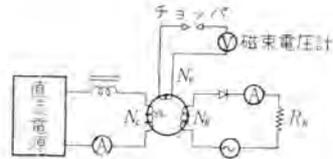


図 3.1 制御磁化特性測定回路
Fig. 3.1 Measuring circuit of control magnetization curve.

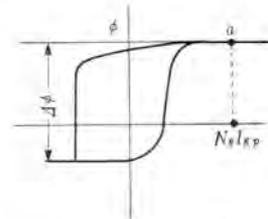


図 3.2 鉄心動特性

Fig. 3.2 Dynamic hysteresis loop of magnetic core.

であるから、コイル 1 巻あたりの電圧 E_{v0} は、

$$E_{v0} = 2f \Delta\phi \quad (3.3)$$

となる。CMC は E_{v0} の 1 周期平均値と制御アンペア回数 $N_c I_c$ の関係である。

ここに述べた CMC は角形鉄心の場合、DC 形リセット特性と制御特性の大部分で一致しているから⁽⁸⁾、CMC は直流リセットの場合の磁束制御量に対する 1 巻あたりの鉄心等価抵抗を示す曲線と考えられる。

3.2 半波形の磁束制御特性

半波形で直流電圧が制御電圧である場合の磁束制御量は、CMC が任意の磁束制御量に対する 1 巻あたりの鉄心等価抵抗を示す曲線であると考えられるから、CMC と式 (2.9) を用いて算出することができる。

図 3.3 に示す CMC を持つ鉄心で、磁束制御量が $\Delta\phi_{r1}$ なるときの制御に必要なアンペア回数は磁心吸収電圧が $2f \Delta\phi_{r1} + E_{v0} = E_{v1}$ なるときの励磁アンペア回数、すなわち AT_1 であるから、このときの鉄心等価抵抗 r_{01} は

$$r_{01} = 2f \Delta\phi_{r1} / AT_1 \quad (3.4)$$

である。磁束制御量が $\Delta\phi_{r2}$, $\Delta\phi_{r3}$... なるときの鉄心等価抵抗 r_{02} , r_{03} ... は、式 (3.4) と同様にして得られる。これら鉄心等価抵抗を N_c 巻線数あたりに換算し、制御回路抵抗 R_c との比 γ を求め式 (2.9) に代入することにより、任意の磁束制御量に対する所要入力電圧 E_c が算出できる。

図 3.4 は図 3.5 に示す CMC を持つハイポイ-O 鉄心 ($35 \times 25 \times 10$) mm で、 $N_c = 400$ T, $R_c = 1$ k Ω , 500 Ω ,

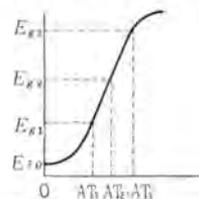


図 3.3 制御磁化特性

Fig. 3.3 Control magnetization curve.

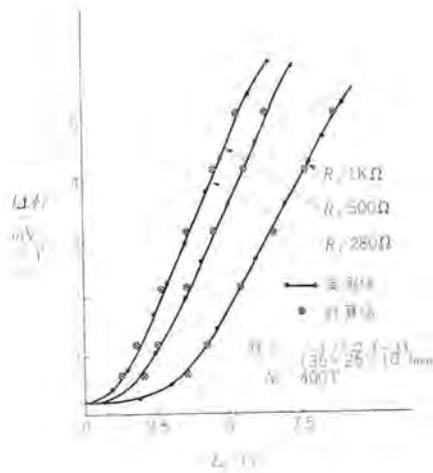


図 3.4 磁束制御特性
Fig. 3.4 Flux control characteristics.

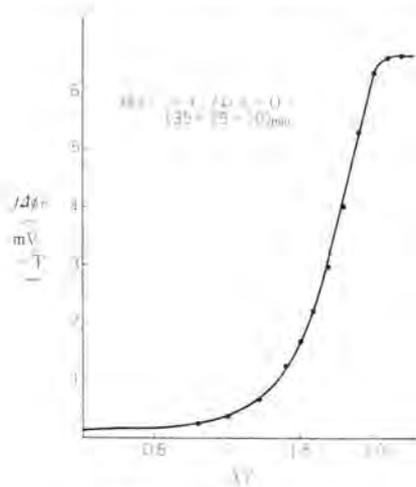


図 3.5 制御磁化特性
Fig. 3.5 Control magnetization curve.

280 Ω のそれぞれの場合について、磁束制御量の実測結果と計算結果を比較したもので、両者は非常によく合致している。

4. 全波形の制御特性

4.1 制御回路条件による制御特性の変化

鉄心の磁束変化速度と励磁電流の関係は、制御電圧波形、制御回路条件により異なり、その関係は複雑である。しかし、角形鉄心の場合、半波形回路の磁束制御は直流だけによる制御であり、制御回路条件による磁化電流の変化は半周期平均値としてはほとんどなく、したがって動作時の鉄心等価抵抗は CMC より算出できた。

全波形回路では、入力電圧が直流であっても鉄心相互作用により制御波形は正弦波電圧、あるいはその一部が

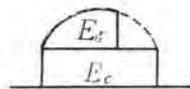


図 4.1 全波形の制御電圧
Fig. 4.1 Control voltage wave form of full wave mag. amp.

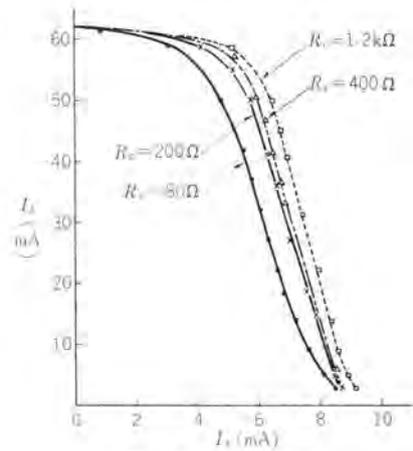


図 4.2 制御特性
Fig. 4.2 Output characteristics.

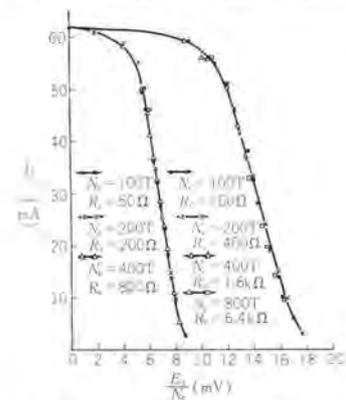


図 4.3 γ 一定のときの制御特性
Fig. 4.3 Output characteristics constant γ .

重ね合わされた図 4.1 のような波形となる。したがって鉄心動特性は直流リセットの場合と異なり、磁束制御量は制御回路条件により変化する。図 4.2 はハイパロイ-O 鉄心 (35×25×10) mm を使い、制御回路抵抗 R_c を変化したときの制御特性の変化を示したものである。

全波形回路の鉄心吸収電圧 E_r は、すでに解析したように、定常状態では

$$E_r = E_c / \gamma \quad (4.1)$$

で与えられ、 γ の関数である。一方、定常状態では磁束制御量と磁束ゲート量は同量であるから、この γ は E_c と正帰還電圧 E_0 の比を示している。 R_c の大きさにより磁束制御量が変わるのは正帰還電圧の影響であり、その影響の多少は γ により決定されるものと思われる。

図 4.3 は制御巻線数が、 N_{c1} , N_{c2} , …… に対して γ が一定になるように制御回路抵抗 R_c を変化させた場合の制御特性で、その結果は非常によく合致している。このことより、制御回路条件は E_c が直流の場合には γ により表示できる。 γ の定義に式 (2.7) で制御回路抵抗に対する鉄心等価抵抗の比として与えたのであるが、これを入力電圧 E_0 に対する正帰還電圧の比と考えると、半波形の電流制御特性と全波形で $\gamma = \infty$ すなわち拘束磁化条件の電流制御特性が合致し、CMC と同一曲線になる⁽⁸⁾のは、いずれも正帰還電圧の影響がないためである

ことが了解される。

以上のように、 γ は制御回路条件を示しているから、以下この γ を拘束係数と呼ぶことにする。

4.2 拘束係数と制御特性

全波形の制御特性は図 4.2 より明らかなように γ の値により変化する。したがって全波形では CMC が鉄心等価抵抗を示す曲線とはいえない。しかし $\gamma = \infty$ の場合には CMC と一致するから、 γ と制御特性の関係が明らかになれば、CMC を用いて全波形の制御特性を算出することができる。図 4.4 で、任意の γ のときの制御特性を \overline{PQ} とし、リセット時の鉄心吸収電圧が E_r なるときの \overline{PQ} 上の励磁電流を I_c' とする。また CMC 上の励磁電流を I_c とする。

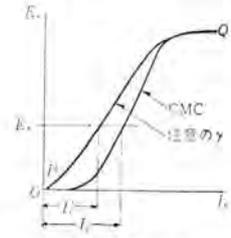


図 4.4 制御磁化特性
Fig. 4.4 Control magnetization curves.

しかるとき CMC 上の鉄心等価抵抗 r_0 は

$$r_0 = E_r / I_c \dots\dots\dots (4.2)$$
 \overline{PQ} 上の等価抵抗 r_0' は、

$$r_0' = E_r / I_c' \dots\dots\dots (4.3)$$
 となる。いま R_0/N_c と r_0, r_0' の比を γ, γ' とし、

$$\gamma' / \gamma = \lambda \dots\dots\dots (4.4)$$
 とおくと、 λ は式 (4.2)、(4.

3) および (4.4) より、

$$\lambda = \gamma_0 / \gamma_0' = I_c' / I_c \dots\dots\dots (4.5)$$

すなわち、 λ は同一磁束制御量のときの CMC 上の鉄心等価抵抗に対する動作時の鉄心等価抵抗の比であり、それは γ を変えた磁束制御特性の励磁電流の変化より求めることができる。

図 4.5 は CMC が図 4.6 の 50% 鉄-ニッケル合金ハイパロイ-O 鉄心 (48×32×15) mm を用い、商用電源をゲート電源とした場合の磁束制御特性であり、これより CMC で与えられる γ に対する λ を求めたのが図 4.7 である。

図 4.5 の磁束制御量の測定には、整流器のコンミュテーションを除くためにゲート回路の帰還用整流器に機械的整流器

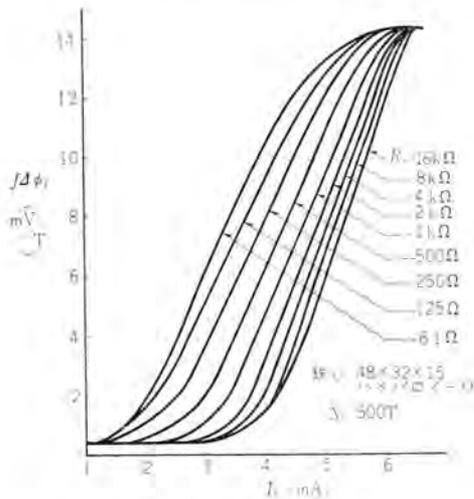


図 4.5 磁束制御特性
Fig. 4.5 Flux control characteristics.

(バイラレータ) を使用した。

図 4.7 より明らかなように、全波形回路の拘束磁化条件は磁束制御量により異なり、25% 制御の場合には約 $\gamma = 10$ であるが、75% 制御の場合には $\gamma = 3 \sim 4$ でほとんど拘束磁化条件を満足する。

γ - λ の関係は寸法の異なる鉄心を用いた場合にも磁束制御量の直線部ではほとんど変化なかった。このように試料に無関係にはほぼ一定であるのは非常に興味深い。以上の関係より任意の鉄心を用いた場合の鉄心動特性は

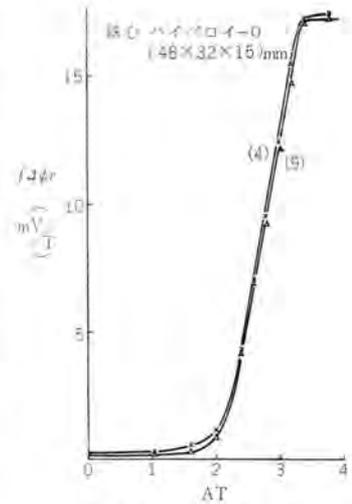


図 4.6 制御磁化特性
Fig. 4.6 Control magnetization curves.

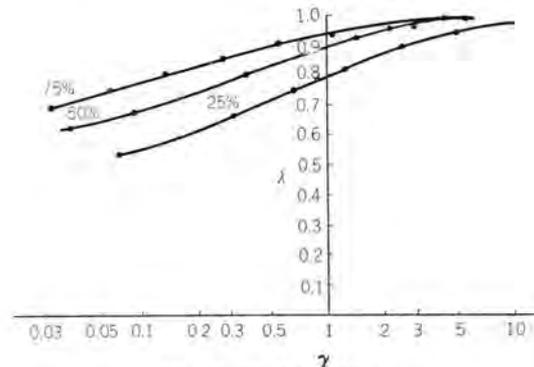


図 4.7 拘束係数の変化
Fig. 4.7 Variation of constrain coefficient.

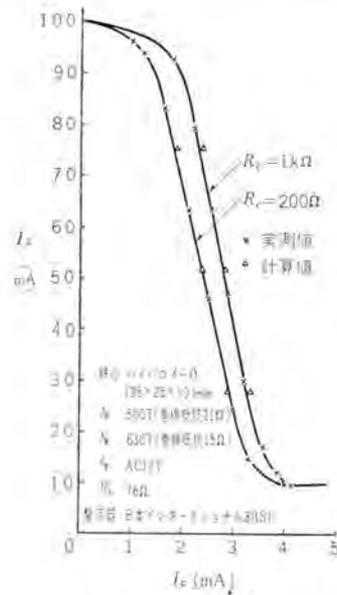


図 4.8 制御特性
Fig. 4.8 Output characteristics

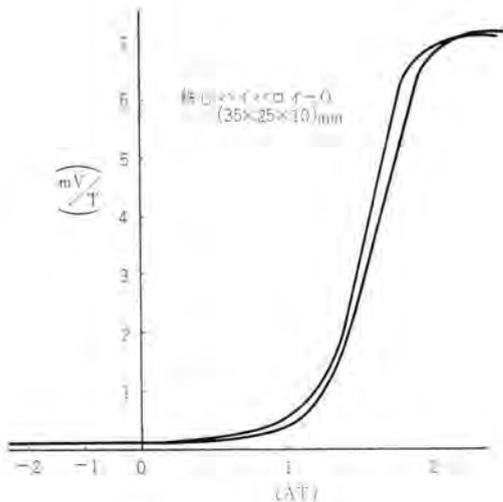


図 4.9 制御磁化特性
Fig. 4.9 Control magnetization curves.

CMC と図 4.7 より求められる。また全波形の磁束制御量が $\Delta\phi_r$ の所要入力電圧 E_c は、式 (2.16) より

$$E_c = 2fN_c \Delta\phi_r \cdot \gamma = \lambda \gamma E_o \quad (4.6)$$

これらの結果より、全波形の磁束制御特性は CMC を基礎として求められるから、その制御特性は式 (2.24) を用いて容易に算出できる。図 4.8 は CMC が図 4.9 のハイポイ-O 鉄心 (35×25×10) mm について実測結果と計算結果を比較したものであり、両者は非常によく合致している。

以上、磁気増幅器の制御特性について解析し、制御回路条件による磁束制御量を検討し、CMC と磁気増幅器制御特性の関係を実験結果により結びつけた。この結果より、精度よく制御特性を算出することができた。

5. 高利得磁気増幅器

2 節の解析の結果、磁気増幅器の電圧増幅度 K_{vo} は、拘束係数 γ と巻線比 N_o/N_c により決定されることが明らかになった。制御回路抵抗 R_c は巻線抵抗以下にすることはできず、また鉄心等価抵抗は有限値であるから K_{vo} には限度がある。近年サーボ用、計測用に高利得磁気増幅器回路方式の研究が盛んであるが、次に著者らが開発した二、三の回路方式について、それらの概要を説明しよう

5.1 電圧帰還形磁気増幅器⁽¹⁰⁾

全波形回路は正帰還増幅器であり、何らかの方法により正帰還量を増大させれば、いっそう電圧増幅度が増すことは明らかである。図 5.1 はこのことを実現した一回路例で、ゲート期間にある鉄心 I の誘起電圧を巻線 N_p で検出し、リセット期間にある鉄心 II へ巻線 N_f を通して帰還したものである。次にその動作を簡単に解析しよう。

制御回路の基本方程式は 2 節の解析と同様にして、

$$E_r(n) - E_o(n) + I_c(n)R_c = E_c(n) \quad (5.1)$$

帰還回路においては、

磁気増幅器の制御機構・浜岡・山崎

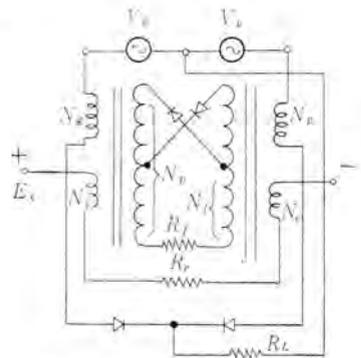


図 5.1 電圧帰還形磁気増幅器
Fig. 5.1 Full wave mag. amp. with internal voltage feedback circuit.

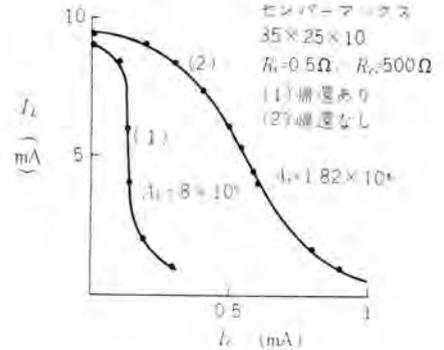


図 5.2 制御特性
Fig. 5.2 Output characteristics

$$I_f(n) = \{ (N_p/N_c) E_o(n) - (N_f/N_c) E_r(n) \} / R_f \quad (5.2)$$

$$\text{いま } I_c(n)N_c + I_f(n)N_f = AT(n) \quad (5.3)$$

とすると、鉄心等価抵抗 R_0 は、

$$R_0 = N_c E_r(n) / AT(n) \quad (5.4)$$

となる。 $E_o(n) = E_r(n-1)$ であるから、式 (5.1) ~ 式 (5.4) の関係より、

$$\Delta E_r(n) + \left[1 - \frac{1 + N_f N_p R_c / N_c^2 R_f}{1 + \gamma + (N_f^2 R_c / N_c^2 R_f)} \right] \frac{E_c}{1 + \gamma + (N_f^2 R_c / N_c^2 R_f)} \quad (5.5)$$

したがって、定常状態における E_r は、

$$E_r = \frac{E_c}{\gamma - \frac{(N_p - N_f) N_f R_c}{N_c^2 R_f}} \quad (5.6)$$

で与えられる。式 (5.6) より制御回路の電圧増幅度

$$K_{vc} \text{ は、 } K_{vc} = 1 \left[\gamma - \frac{(N_p - N_f) N_f R_c}{N_c^2 R_f} \right] \quad (5.7)$$

式 (5.7) の分母の第 1 項は普通の全波形回路の項であり、第 2 項は帰還回路を付加したために生じた項である。

以上の解析結果より明らかなように、この方式は電圧増幅度は非常に大きくなる。しかも鉄心誘起電圧を内部帰還する方式であるから安定度がよいため、外部帰還形に比し多量な正帰還を施すことができる。図 5.2 はこの

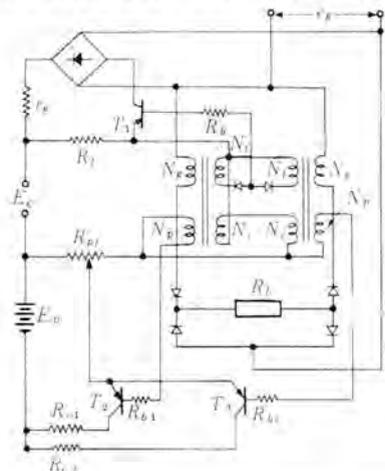


図 5.3 速応性高利得磁気増幅器
Fig. 5.3 Quick response, high gain mag. amp.

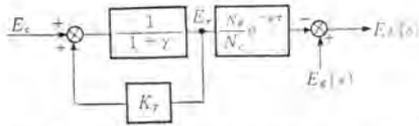


図 5.4 速応性高利得磁気増幅器のブロック線図
Fig. 5.4 Block diagram of quick response, high gain mag. amp.

回路の制御特性と一般の全波形回路の特性を比較したもので、電圧増幅度は一般の回路の数十倍に容易にできる。

5.2 速応性高利得回路⁽¹¹⁾

全波形磁気増幅器の応答時間は式 (2.22)' に示すように、電圧増幅度が高いほどおそくなる。これはゲート時の正帰還効果によるものであるから、ゲート時の正帰還電圧を打ち消せば速応性になる。正帰還電圧のない場合には、半波形回路と等価になり、電圧増幅度が低下するが、付加した外部正帰還回路の動作が以後の磁束制御量に影響をおよぼさなければ、応答が早くかつ電圧増幅度の高い回路にできる。図 5.3 はトランジスタ T_1 によりゲート時の正帰還電圧を打ち消し、トランジスタ T_2 により磁束制御時の鉄心誘起電圧を増幅し、正帰還した回路で、そのブロック線図は図 5.4 で表わされ、電圧増幅度 K_{v0} は、

$$K_{v0} = [1/(1+\gamma-K_T)][N_g/N_c] \dots (5.7)$$

ただし K_T は正帰還回路の電圧増幅度となる。

したがって K_{v0} は K_T により十分大にできる。

5.3 速応性自己平衡形回路⁽¹²⁾

磁気増幅器の速応性と高増幅度を同時に満足させるために、トランジスタ前置磁気増幅器回路が多く発表されているが、トランジスタ定数の変化は直接鉄心の磁束制御量に影響を与えるから、安定度において十分とはいえない。ここに述べる方式は、入力電圧の増幅機構に自己平衡性を有するから、その増幅特性が鉄心およびトランジスタの特性に直接影響されず、したがって動作がきわめて安定である。図 5.5 は全波形回路の一例である。トランジスタ T_2 、 T_3 は e_g と同相の電源により駆動される同期開閉器であり、その位相は鉄心 I がゲートのとき T_2 が非導通で、 T_3 が導通、鉄心 II がゲートのときには T_3 が非導通で T_2 が導通するように選んである。

いま鉄心 I のゲート期間に入力電圧 E_r により T_1 のベースに電流 I_b が流れた場合を考えると、この I_b は T_1 により増幅され、鉄心 II の磁束を制御する。鉄心に巻かれた負帰還巻線 N_f に誘起した $N_f d\phi_f/dt$ なる電圧が、ベース電流 I_b の流れるのを妨げる方向に働くように N_f の極性を合わせておけば、この誘起電圧は入力電圧と平衡するようにベース電流 I_b を増減する。

したがってベース回路の平均値方程式は、

$$E_c = (R_b + r_b)I_b + (N_f/N_c)E_r + V_{be} \dots (5.8)$$

$$\therefore I_b = \frac{E_c - V_{be} - (N_f/N_c)E_r}{R_b + r_b} \dots (5.9)$$

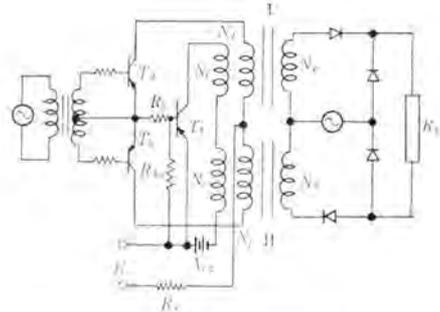


図 5.5 自己平衡形回路
Fig. 5.5 Self balancing type mag. amp.

ただし、 r_b : トランジスタのベース抵抗、 V_{be} : ベース-エミッタ電圧。

$$\text{また } E_r = I_c R_0 = \beta I_b R_0 \dots (5.10)$$

$$\therefore E_r = \frac{E_c - V_{be}}{\frac{R_b + r_b}{\beta R_0} + \frac{N_f}{N_c}} \dots (5.11)$$

したがって、ブロック線図は図 5.6 となり、電圧増幅度 K_{v0} は、

$$K_{v0} = \frac{N_g}{N_c \left(\frac{R_b + r_b}{\beta R_0} \right) + N_f} \dots (5.12)$$

もし $N_c(R_b + r_b)/\beta R_0 \ll N_f$ ならば

$$K_{v0} \cong N_g/N_f \dots (5.13)$$

すなわち、 K_{v0} は β および鉄心特性の影響をほとんど受けず、単に巻線だけで定まる。

トランジスタ定数で温度により変化するおもなものは β 、 I_{c0} および V_{be} である。 β の変化の影響は式 (5.12) で明らかであるから、以下 I_{c0} と V_{be} の変化の磁束制御量におよぼす影響について簡単に述べよう。

エミッタ接地の場合のコレクタ電流 I_c は、一般に

$$I_c = (\beta + 1)I_{c0} + \beta I_b \dots (5.14)$$

である。ベース回路電圧一定の場合の I_{c0} の影響は図 5.6 のブロック線図より、

$$E_r \left(1 + \frac{N_f}{N_c} \frac{\beta}{R_b + r_b} \right) = (1 + \beta)I_{c0} R_0 \dots (5.15)$$

であるから E_r を I_{c0} について微分し、安定率 S を求めると、

$$S = \frac{\partial E_r}{\partial I_{c0}} = \frac{(1 + \beta)R_0}{1 + \frac{N_f}{N_c} \frac{\beta R_0}{R_b + r_b}} \text{ (V/A)} \dots (5.16)$$

自己平衡形にしない場合の安定率 S' は式 (5.16) で N_f

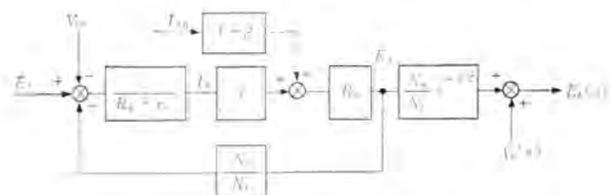


図 5.6 自己平衡形のブロック線図
Fig. 5.6 Block diagram of self balancing type mag. amp.

=0 とおき、 $S'=(1+\beta)R_0$ であるから改善率 ξ は

$$\xi = \frac{S'}{S} = 1 + \frac{N_f \beta R_0}{N_c R_b + r_b} \dots\dots\dots (5.17)$$

であり、自己平衡形にすることにより大幅に改善できる。

このように I_{c0} に対しては特別に温度補償の必要はない。 V_{be} は図 5.6 のブロック線図より明らかなように、入力電圧の変化と等価であるが、その温度補償はダイオードの電流-電圧特性を用いて容易にできる。

6. む す び

磁気増幅器の動作解析の結果、磁束制御特性は一般に拘束係数の関数として表わせることが明らかになった。拘束係数は制御回路抵抗と鉄心等価抵抗の比であり、実用的には鉄心等価抵抗の表現が問題であるが、制御回路条件による磁束制御量の変化と CMC の関係が実験的に関係づけられたから、磁気増幅器の制御特性は CMC より容易に算出することができた。この方法は図式解法のように繁雑でないから、磁気増幅器の設計に用いると便利であろう。

また終節で述べた高利得回路は、いずれも電圧増幅度を高くできるから、サーボ用、計測用の増幅器に応用できることと思う。

終わりにご指導をいただいた東北大学菊地正教授、実験に協力を惜しまなかった赤松昌彦君に深く感謝します。

参 考 文 献

- (1) H. H. Woodson: A. I. E. E. Trans. paper, No. 59-1058.
- (2) S. Frankenthal: A. I. E. E. Trans. paper, No. 59-1046.
- (3) 村上・菊地: 電学誌, 78, 841 (昭 33-10).
- (4) R. M. Hubbard: Comm. & Elect. (Nov. 1957).
- (5) 穴山: 自動制御連合講演会, 243 (昭 34).
- (6) 菊地: 半波形磁気増幅器の研究, p. 52.
- (7) P. R. Johannessen: Comm. & Elect. 74, p. 700 (1955).
- (8) たとえば村上・菊地: 電学誌, 78, 836 (昭 33-5).
- (9) たとえば菊地: エレクトロニクス, 5, 8 (昭 35-8).
- (10) 浜岡・山崎・赤松: 自動制御連合講演会, 203 (昭 35).
- (11) 浜岡・山崎: 電気四学会連大, 750 (昭 35).
- (12) 浜岡・山崎: 電気四学会連大, 687 (昭 36).

最近登録された当社の実用新案

区 別	名 称	特許または 登録日	特許または 登録番号	発 明 考 案 者	関係場所
新 案	洗たく機給水装置	35-12-9	525313	武井久夫・服部信道	日本建鉄
"	空気調和装置	35-12-9	525314	河合照男	静 岡
"	磁気除鉄器	35-12-9	525394	河合 登・高島秀二 柳下儀兵衛	大 船
"	光天井ワッパ	35-12-14	525891	船田淳三	大 船
"	回路シ+断器	36-1-23	527953	兼本成則	名古屋・福山
"	電気車非常制動装置	36-1-24	528050	待鳥 正	伊 丹
"	軸受給油装置	36-1-24	528051	岩本心一	姫 路
"	高能率送電自動制御装置	36-1-24	528052	尾畑喜行・梅名茂男	神 戸
"	高能率送電自動制御装置	36-1-24	528053	尾畑喜行・梅名茂男	神 戸
"	減速立テ軸電機の注油装置	36-1-24	528054	高松茂利	福 岡
"	電磁制動機のスライダ調整装置	36-1-24	528055	中西清馬	長 崎
"	電気暖房機	36-1-24	528056	鈴木 洵・永都清太郎	菱電機器
"	電気車の制御装置	36-1-24	528057	北川和人	伊 丹
"	電気弁制御信号伝送装置	36-1-24	528058	阿部久康・河合 正 己斐健三郎・奥村義一	研究所・伊丹
"	電動プーリ端フタ取付装置	36-1-24	528059	高松茂利	福 岡
"	内燃機関自動進角装置	36-1-24	528060	黒岩利明・荒川利弘	姫 路
"	内燃機関用着火断続装置	36-1-24	528061	柏木義民	姫 路
"	タイムスイッチの調整装置	36-1-24	528062	神本明輝	福山・和歌山

自動最適化制御装置

研究所 福永圭之介*

An Optimizing Controller

Research Laboratory Keinosuke FUKUNAGA

Herein is dealt with a design of logical circuit for optimizing control equipment to be attached to a system bringing it to the optimum state through automatic control by means of two or more variables. A method used by the writer depends largely on the Steepest Descent Method often adapted for programming digital computers to find the optimum point. Two major improvements, however, have been made to it so as to meet strong requirements of making the logical circuits simpler. One is a use of a discrete quantity instead of continuous one: the other is a utilization of the past information to determine the direction to the next step. The equipment is built with a principle to make automatic balance of an impedance bridge.

1. ま え が き

近来適応制御の一つの分野として、最適化制御（または極値制御）がプロセスを始めとする分野に適応され始めようとしている。最適化制御というのは、ある Criterion の値、たとえばプロセスにおける効率とか利益率とかいった値を最大（または最小）にするような制御系であって、これに類する制御はプロセスに限らず、ラジオにおける周調、レンズの焦点調節、インピーダンス、ブリッジの調整などいろいろとその例をみることができる。

最適化制御を従来の自動制御の観点から眺めると、これは Criterion の独立変数に対する微係数を 0 にするような制御であるが、ただ多くの場合 Criterion の微係数を直接検出することができないので、周囲の点との比較からこれを見出す方法が取られる。一般に試行法と呼ばれている方法がこれである。他方、現在の入出力からプロセスの数学的モデルを決定し、これを最適な数学的モデルに持ちきたすにはどのようにすればよいかを計算機で求めてそれにしたがってプロセスを制御するモデル法がある。

最適化制御を行なうにあたって当面するもう一つの問題は多くの場合 Criterion の値が多くの変数の関数形をなし、しかもそれらの影響が独立でないことである。多変数を調整する問題はまた Operations Research や、計数形計算機を用いて機器の最適設計を行なう問題とも関連が深い。

このような新しい制御分野の発展にかんがみ、筆者の研究室でも試行法を使用した多変数の自動最適化装置の試行を行なったので報告する。

2. 最急降下法

多変数を調節してある Criterion の値を最大または最

小に保つような制御を従来の 1 変数、0 誤差を目的とする自動制御と同様に連続的に行なおうとすると次のようになる。いま調節すべき多くの変数を x_1, x_2, \dots, x_n とし、最大または最小に保たれるべき Criterion の値を $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ とすると多変数の最適化制御は、 $\partial f/\partial x_1, \partial f/\partial x_2, \dots, \partial f/\partial x_n$ をすべて 0 に保つような多変数の 0 誤差制御に置き換えられることになり、図 2.1 のような構成図で書き表わせる。図 2.1 の制御回路は x_1 と $\partial f/\partial x_1$

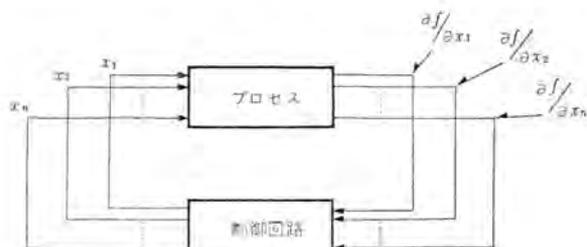


図 2.1 n 変数の最適化制御の構成図

Fig. 2.1 Schematic diagram of optimizing control with n variables.

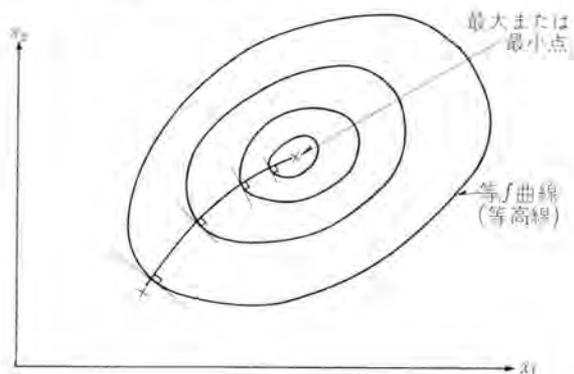
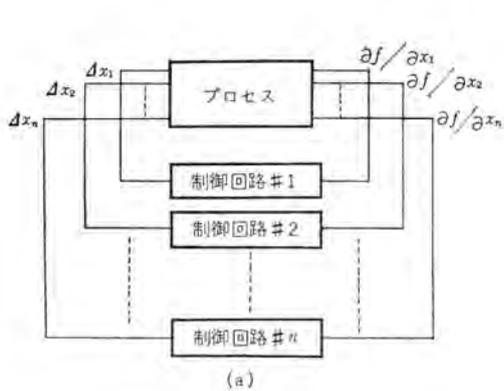


図 2.2 2 変数の場合の最急降下法による経路

Fig. 2.2 Process by the Steepest Decent Method with 2 variables.



制御回路 #1, 2, …, n はすべて同一特性, 同一利得

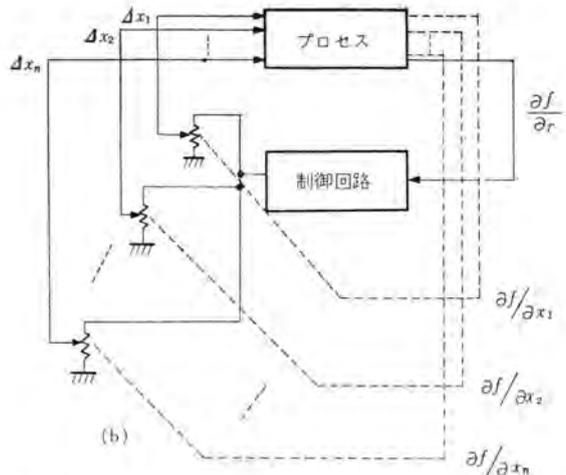


図 2.3 最急降下法を用いた n 変数最適化制御の構成図

Fig. 2.3 Schematic diagram of n variable optimizing control by the use of Steepest Decent method.

の関係を与えることになるが、この関係としては最急降下法が用いられる。最急降下法は図 2.2 にも見られるように常に n 次元空間の等 f 曲面に直角方向に進路を取って最適点に向かうもので、n 次元空間上の任意の点における取るべき方向は次のようにして求められる。

すなわち $f(x_1 + \Delta x_1, \dots, x_n + \Delta x_n)$ を Taylor 展開すると、

$$f(x + \Delta x_1, \dots, x_n + \Delta x_n) = f(x_1, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i + 0^{(2)} \dots \dots (2.1)$$

したがって、

$$\Delta r = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_n^2} \dots \dots (2.2)$$

を一定にするという条件の下に式 (2.1) の右辺第 2 項を最大にするための条件は、

$$\frac{\partial f / \partial x_1}{\Delta x_1} = \frac{\partial f / \partial x_2}{\Delta x_2} = \dots = \frac{\partial f / \partial x_n}{\Delta x_n} \dots \dots (2.3)$$

すなわち最急降下法によると図 2.1 の制御回路は図 2.3 (a) のようにそれぞれ $\partial f / \partial x_i$ で x_i を独立に制御し、n 個の同一特性、同一利得を持った制御回路をもうけるか、もしくは図 2.3 (b) に示したように誤差信号としては、

$$\frac{\partial f}{\partial r} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2} \dots \dots (2.4)$$

に相当するものを用い、1 個の制御回路だけを使用し、制御回路の出力は $\partial f / \partial x_1$ に比例した倍率器を通して x_1 に供給されるかのいずれかとなる。

以上の論議は原則的には、このような連続な制御系を想定することができるということを述べたにすぎないが、現存する試行法による多変数最適化装置のほとんどはこの原理から出発し、実際に実現できる形に変形されているにすぎない。連続制御方式がそのまま利用できない理由は、 $\partial f / \partial x_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) が連続的に測定できないため、このために制御は Discrete なものになり、また $\partial f / \partial x_i$ の測定は x_i を少し変えてみてそのときの f の変化 Δf から

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \frac{\Delta f}{\Delta x_i} = \frac{1}{\Delta x_i} \left\{ f(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \right\} \dots \dots (2.5)$$

で求める方式が取られる。この場合一つの点で $\partial f / \partial x_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) を測定するには n 回の試行が必要である。

また x_i を変えてから次に再び x_i を変えるまでのサンプル時間は現在のところ、そのプロセスの応動時間より十分長く取られていて論議が段階的な定常状態に対してだけ行なわれるので、図 2.1 の制御系の安定の問題は考慮の必要がない。サンプル時間の短縮化に伴うこの種の自動制御系の動特性の問題は将来の問題点として残されている。

$\partial f / \partial x_i$ の測定に 1 回ごとに n 回の試行が必要であるということはかなり問題で、そのため、できるだけこの試行の数を減じ、しかもできるだけ等 f 曲面に直角な方向を保とうとする試みが行なわれている。図 2.4 はその一例であって、A 点で一度 $\partial f / \partial x_i$ の測定が行なわれれば、そののちは $\Delta f / \Delta r$ の符号が反転する B 点まで $\partial f / \partial x_i$ の測定を行なわないで直進し、 $\Delta f / \Delta r$ の符号が反転する B 点で改めて $\partial f / \partial x_i$ の測定を行なうといったぐあいである。

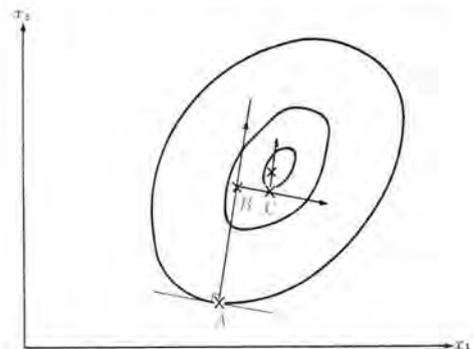


図 2.4 最急降下法変形の一例

Fig. 2.4 Example of modification of Steepest Decent Method.

ある。この場合直進中の制御は1変数の場合と同様で、**図2.3(b)**において倍率器の設定を固定して $\partial f/\partial r$ を0にするように制御を行えばよい。

最後にここで多変数の最適化制御という機能のうち二つの異なった面があることに着目したい。その一つは大きな外乱がはいつてきたときとか、最初にスタートするときのようにかなり離れた所にある最大または最小点を捜し求める制御の方法である。インピーダンス、フリッジの自動調整のように一度平衡電圧の最小点を求めてしまえば目的を達するものにもこの制御方法は応用される。ほかの一つは外乱が小さい場合で、最大または最小点がわずかにドリフトするのに常に追従する制御の方式である。一般的にいって一つに適した制御の方法は、ほかにも適しているとはいいいにくく、別々の立場にたって研究されるべきであると考えられる。たとえば**図2.4**に示した最急降下法の変形は最大または最小点が離れている場合には試行の数を減じうるが、小さいドリフトの追従には必ずしも有効ではない。

3. 自動最適化装置に使用された試行法

前章では一般的に最急降下法が**図2.1**の制御回路の構成に使用できることについて述べてきたが、本章では実際の最適化装置を簡単にすることに主眼を置いて最急降下法を改良した1方法について述べる。筆者らの試作した自動最適化装置はこの方法を使用している。

最急降下法において改良された点は次の2点である。

- (1) 変数 x_1, x_2, \dots, x_n を Discrete 化する。
- (2) 次の試行に過去の経路の情報を利用する。

以下これら二つの改良点を中心に改良された多変数の最適化制御の方法について論じる。

3.1 変数の Discrete 化

最急降下法においては、各変数の変化分 Δx_i の取るべき比が式(2.3)で与えられた。したがって、 Δx_i の比を求めるには $\partial f/\partial x_i$ を式(2.5)のようにして求めることが要求され、このため装置として演算回路が必要である。それに対して変数の変化分の大きさを固定して、これが連続的に変わりえないようにすれば以下に述べるように演算回路は単なる比較器に置き換えられる。すなわち Δx_i を固定すれば空間上の任意の1点 (x_1, x_2, \dots, x_n) から出発した場合に次に取りうる試行点は、

$$(x_1 + \delta_1 |\Delta x_1|, x_2 + \delta_2 |\Delta x_2|, \dots, x_n + \delta_n |\Delta x_n|) \\ \delta_i = -1, 0, 1, \dots \quad (3.1)$$

ただし、すべての δ_i が0になる場合は除く、の $3^n - 1$ 個の周囲の点になる。これらの点のうち式(2.1)の右辺第2項を最大にするような点に対応する δ_i は

$$\left. \begin{array}{l} \partial f/\partial x_i > 0 \text{ ならば } \delta_i |\Delta x_i| > 0 \\ \partial f/\partial x_i < 0 \text{ ならば } \delta_i |\Delta x_i| < 0 \end{array} \right\} \dots \quad (3.2)$$

で求められる。すなわち $\partial f/\partial x_i$ の大きさは初めから与えられているから式(2.3)、(2.5)の演算は式(3.2)の比較に置き換えることができる。

式(3.1)、(3.2)はまた Discrete 化された最急降下法を用いる場合にはすべての変数を同時に変えることにし、その符号だけを $\partial f/\partial x_i$ の符号から決定すればよいことを示している。このすべての変数を変えるような試行を今後われわれは複合試行と呼ぶ。それに反し一つの変数だけを変え、他を固定した試行をその変数の単独試行と呼ぶ。単独試行は $\partial f/\partial x_i$ の符号の測定に用いられる。

1点を取り巻く全周をこのようにいくつかの $(3^n - 1)$ Discrete な点で置き換えることによって取られた経路は必ずしも等 f 曲面に直角にならないが、これはかなりあるいは近似で十分である。

3.2 過去の経路の情報の利用

変数を Discrete 化することにより演算装置は比較器に置き換えられ、また最大または最小の点には複合試行をくり返すことによって到達できることについて述べたが、なお一つの点で次の複合試行を行なうに先だって Δx_i の符号決定のために n 回の単独試行を必要とすることには変わりがない。しかし1点ごとに n 回の試行を行なわなくても、過去の試行の結果を利用すれば試行の数を減らすことができるのではないかということが考えられる。**図2.4**に示した方法はこの一例であって、一度 $\partial f/\partial x_i$ の符号の測定を無視して直進する。本文で述べる方法は $\partial f/\partial x_i$ の符号の測定を一度に行なわないで、過去の経路の情報を生かしながら $\partial f/\partial x_i$ のうち一つずつの測定、すなわち単独試行を適宜複合試行の間に組み入れてゆくものである。その詳細は次のような四つの段階に分けて説明する。

なお今後われわれが成功、失敗と呼ぶのは空間上の一つの点から出発して隣接する点に試行が行なわれたとき、その点の f の値が前の点の f の値よりも大きいとき(最大点を求めている場合)これを成功と呼び、小さいときを失敗と呼ぶ。

(1) 最初の試行

一番最初の試行ではわれわれは等 f 曲面についても情報を持ち合わせていないので、どの方向に進んでもその成功する確率は同じで $1/2$ である。したがって出発点を A 点 $(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$ とした場合、最初の試行点としては、 Δx_i の符号をすべて正にした複合試行を行ない B 点 $(x_{10} + \Delta x_1, x_{20} + \Delta x_2, \dots, x_{n0} + \Delta x_n)$ を取るものと約束する。もし $A \rightarrow B$ の複合試行が失敗であった場合には B 点を最初の出発点と考え、 Δx_i の符号をすべて負にして $B \rightarrow A$ の複合試行を最初の試行と考える。この試行は必ず成功である。

(2) 成功が続いて行った場合

$A \rightarrow B$ の複合試行が成功であって、以下、成功が続いて起こる場合について2変数の場合を例にとって説明する。**図3.1**はその説明図である。

$A \rightarrow B$ が成功すると B が新しい出発点となって、次は x_1 だけを Δx_1 増した C 点に試行が進められ、 $B \rightarrow C$ の単独試行で $\partial f/\partial x_1$ の符号が測定される。もしその試行

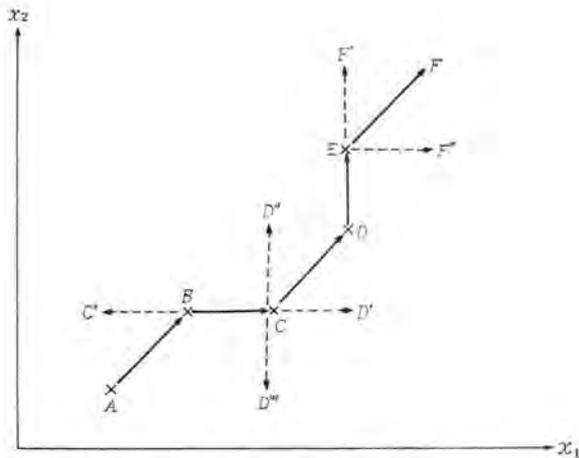


図 3.1 成功が続いた場合の試行の取り方

Fig. 3.1 Method of making trial run when success is continued.

が成功の場合には再び B 点にもどることなく、C 点が新しい出発点となり、次の試行が続けられる。B→C' が用いられないで B→C が用いられた理由は A→B の複合試行が成功であったことから B→C のほうが B→C' よりも成功の確率が高いと考えられたからである。B→C の単独試行が成功であるということは、等 f 曲面がその急激に変化しないという仮定の下にその付近一帯の $\partial f / \partial x_1$ の符号が正であることを示している。したがって C→D' の成功の確率が高い。他方、C→D'' も A→B が成功であったという事実から C→D'' よりも成功の確率が高いと考えられるので、次の複合試行は事前の $\partial f / \partial x_1$ の符号を測定するための単独試行 C→D', C→D'' をいっさいはぶいて C→D と行なわれる。C→D が成功であれば次には x_2 に関する単独試行 D→E が行なわれ、この付近一帯の $\partial f / \partial x_2$ の符号の測定が行なわれる。D→E が D→E' の代わりに行なわれる理由は x_1 に関する単独試行の場合と同様である。次の複合試行は E→F', E→F'' の単独試行を行なうことなく E→F と行なわれる。

以上 2 変数の場合について説明したが、多変数の場合も全く同様に論議でき、表 3.1 に示したように複合試行と単独試行を交互に組み合わせて試行が行なわれ、 $2n$ 回の試行で一つのサイクルを形成し、これをくり返す。しかもこの間 $\partial f / \partial x_i$ の符号の測定のために立ち止まることなく、 $\partial f / \partial x_i$ の符号を測定しながら同時に最大または最小点に向かって進んでいく。

(3) 失敗が起った場合

成功が続いている間は Δx_i の符号は正しく選ばれているのであるからその状態を持続すればよい。しかし試行が失敗に終わった場合には、 Δx_i の符号のどれかが好ましくないのであるから、その符号を修正する必要がある。種々の等 f 曲面に対する実験の結果、だいたい次のような方法で Δx_i の符号を修正すればよいとの結論を得た。

(a) P→Q の x_i に関する単独試行が失敗の場合は、出発点を P にもどし、 Δx_i の符号だけを反転して試行を続行する。

表 3.1 変えられるべき変数の選び方

周期中の番号 (P カウンタ)	変えられるべき変数
0	$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$
1	Δx_1
2	$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$
3	Δx_2
4	$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$
⋮	
$2n-2$	$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$
$2n-1$	Δx_n

(b) P→Q の複合試行が失敗した場合には、 x_i をすでに一度でも単独試行が行なわれたものと、出発以来まだ一度も単独試行が行なわれていないものの二つに分けて、単独試行がまだ行なわれていない x_i の変化分 Δx_i の符号だけを反転し、出発点を再び P にもどして試行を続行する。

(a) の単独試行が失敗した場合、その変数の変化分の符号を反転することは当然ながら、(b) の複合試行の場合の失敗に対しては次のような意味が含まれている。すなわち複合試行の成功、失敗は必ずしもその付近一帯でのすべての x_i に関する単独試行の成功、失敗を意味しない。そのうちすでに一度でも単独試行が行なわれたことがある変数に関しては成功であったものはもちろん、失敗であったものも変化分の符号の反転がすでに行なわれているので、複合試行の失敗はこれらの変数の変化分の符号に起因していないと考えられる。したがってまだ単独試行が一度も行なわれていない変数の変化分の符号だけが反転されることになる。“(1) 最初の試行” で述べた反転もすべての変数の単独試行前に行なった複合試行の失敗であるところから、ここで述べた符号反転の方法に包括される。

図 3.2 は 2 変数について、等 f 曲面の周囲から出発した試行が本文に述べた方法にしたがって方向を訂正して

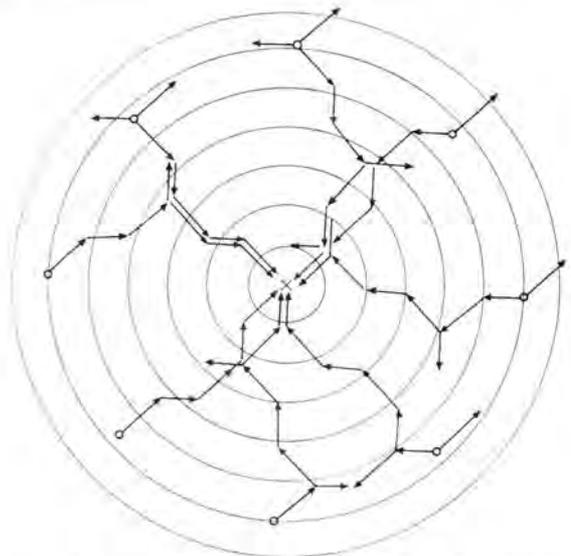


図 3.2 本文で述べた方法の指向性 (2 変数の場合)

Fig. 3.2 Directivity of method described in this paper

いく過程を示している。

(4) 最大または最小点付近での試行

以上の論議はすべてある試行が成功の場合、次に同一方向の試行を行なっても成功の確率が高い場合についてのものである。しかし試行が進んで最大または最小点付近に到達し、 Δx_i の大きさが等 f 曲面の半径と同程度になると、いままで述べてきた経路の取り方をしても失敗を重ねるようになる。この場合は式(2.1)の右辺第2項が0に近づいたことを意味するから、式(2.1)の右辺第3項 $0^{(2)}$ を吟味、すなわち $\partial^2 f / \partial x_i \cdot \partial x_j$ を測定してその点の付近の等 f 曲面の形を決定すべきである。しかし、実際に $\partial^2 f / \partial x_i \cdot \partial x_j$ を測定してその情報から等 f 曲面の形を判断する論理回路はかなり複雑なものになるおそれがあるので、本文で述べる方法ではこれらの点をScanする方法をとった。

“(3) 失敗が起こった場合”の符号反転の方法をそのまま適用してみると、すべての変数に関する正側、負側の単独試行を含む $4n$ の周囲の点を次々に試行し、すべてが失敗の場合は再び元に戻って同一の $4n$ の点を同じようにScanすることになる。図3.3にも示したように2変数の場合は、 $4 \times 2 = 8$ とこのScanは周囲のすべての点を含むことになるが、表3.2にも示したように一般に $n \geq 3$ の場合にはすべての周囲の点 $3^n - 1$ 個の中から $4n$ 個の点だけが選ばれて試行されることになる。

このようにして連続して $4n$ 回の失敗が起こった場合には、求める最大または最小点が Δx_i の大きさの範囲内に存在すると考えられるので、さらに精密に最大または最小の点を求めたいときには、ここで Δx_i の大きさを $\Delta x_i/c$ ($c > 1$)を縮めてさらに同様の試行を続ければよい。 Δx_i の大きさをこれ以上小さくする必要がないときに

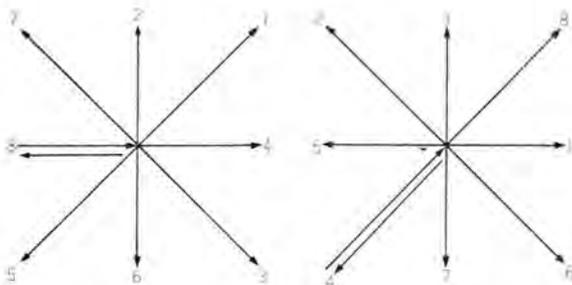


図 3.3 最大または最小点付近における試行 (2 変数の場合)
Fig. 3.3 Trial run around the maximum or the minimum point (in case of variables).

表 3.2 連続に失敗が起こった場合の試行

P カウンタ	変数の変化 (2 変数)	
0	Δx_1	Δx_2
1	Δx_1	Δx_2
2	$-\Delta x_1$	Δx_2
3	Δx_1	Δx_2
0	$-\Delta x_1$	$-\Delta x_2$
1	$-\Delta x_1$	$-\Delta x_2$
2	Δx_1	$-\Delta x_2$
3	Δx_1	$-\Delta x_2$

は $4n$ 回続けて失敗が起こっても引き続いて同じ試行をくり返させるようにすればドリフトが起こった場合でも、ドリフトが起こってから以後の $4n$ 回の試行のうちどこかで最大または最小点のずれを検出して、ただちに追従を開始することになる。

以上、多変数の最適化装置を簡単にすることを目標に最急降下法を改良した制御の方法について述べた。この方法は図3.2にも見られるように等 f 曲面に直角な方向を捜すのにすぐれた性質を持っており、また同一論理回路でかなり離れた最大または最小点を捜す動作と、ドリフトに敏感に追従する動作の両方にかかなりの適応性を持っている。もちろん、これをもって最良の方法とは断言できないが、簡単な多変数の最適化装置として使用できると考えられる。最後にこの方法を用いた場合のいくつかの気付いた点について述べると以下のごとくである。

(1) この種の制御でもっとも警戒しなければならない点は、最大または最小でない点を最大または最小点と見誤ることである。 x_i の軸方向だけの試行では、等 f 曲面の稜線で見誤りがしばしば起こることが知られているが、その意味で、本文で述べる方法はさらに細かく空間を分けて試行が行なわれるので、この種の見誤りが少ない。本文の方法で見誤りが起こる機会は、等 f 曲面の各 x_i 軸方向の等価半径の比が Δx_i の比といちじるしく異なり、等価的に x_i 軸方向だけの試行しか行なっていないような状態になったときに起こる。したがって、 Δx_i の比の選び方は本文の方法ではもっとも大切でプロセスの静特性のだいたいをはあくして決定されるべきである。

(2) Δx_i の比は問題になるが、 Δx_i の大きさそのものの選定は、本質的な重要性を持たず、ただこれが適当に取られていれば多少能率よく試行が行なわれるにすぎない。 Δx_i の大きさは等 f 曲面に応じて変わってくるが、試作された装置では10進法を使用し、まず問題になる x_i の全領域を1/10して Δx_i を選び、以下変化幅の切り換えが起こるたびに $\Delta x_i/10$ が新しい Δx_i として採用された。

(3) 試行法全般にわたる欠陥として極点が二つ以上 Δx_i によって決定され、極点における f の値の大小にはよらない。

(4) x_i の間たとえば $g(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0$ などの制限条件が付加される場合には、 f の値のいかんにかかわらず x_i が上の条件からはずれたときに失敗の信号を

P カウンタ	変数の変化 (3 変数)		
0	Δx_1	Δx_2	Δx_3
1	Δx_1	Δx_2	Δx_3
2	$-\Delta x_1$	Δx_2	Δx_3
3	Δx_1	Δx_2	Δx_3
4	$-\Delta x_1$	$-\Delta x_2$	Δx_3
5	Δx_1	$-\Delta x_2$	Δx_3
6	$-\Delta x_1$	$-\Delta x_2$	$-\Delta x_3$
7	Δx_1	$-\Delta x_2$	$-\Delta x_3$
8	$-\Delta x_1$	Δx_2	$-\Delta x_3$
9	Δx_1	Δx_2	$-\Delta x_3$

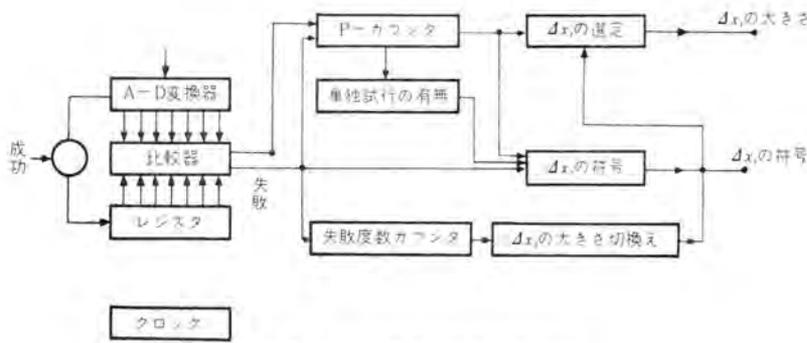


図 4.1 自動最適化装置の構成図

Fig. 4.1 Schematic diagram of optimizing equipment.

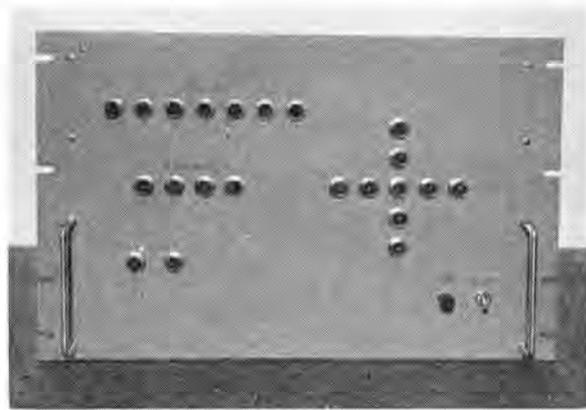


図 4.2 自動最適化装置論理回路

Fig. 4.2 Theoretical circuit of optimizing control equipment.

発するようにすれば、この条件を満足する範囲内での最大または最小点が求められる。

(5) $\Delta x_i/c$ で最大または最小な点を求めている際、 P 回 ($P > c$) 続いて成功が起こるような場合には大きなドリフトが起こったと考えられるので、変化幅を再び Δx_i にもどして最大また最小点を求めるのが効果的である。

4. 自動最適化装置の概要

前章に述べた方法により試作された自動最適化装置の概要につき述べる。

図 4.1 はこの装置の構成図を示している。図のレジスタには空間上の 1 点における f の値が貯えられ、新しい次の点が試みられるとその点の f の値が A-D 変換器を通してデジタル信号に変換され、レジスタの値と比較される。新しい点の f の値がレジスタの値よりも大きい (最大点を求めている場合) とときは成功、小さいときは失敗の信号が比較器から出され、成功のときには新しい f の値がレジスタに移される。P カウンタは表 3.1 に示したように変えるべき x_i を指令するカウンタで、成功、失敗にかかわらず一つの試行が行なわれるたびにカウンタ・アップされる。P カウンタはサイクル・カウンタになっていてカウンタがいっぱいになると、再び 0 にもどって同様の動作をくり返す。単独試行の有無は最初の周期における P カウンタの状態から知ることができる。失敗が起こった場合は Δx_i の符号が P カウンタの状態、単独試行の有無に制御されて反転する。失敗回数カウンタは連続して起こる失敗の数を数え、これが $4n$ に達すると Δx_i の大きさの切り換



図 4.3 自動最適化装置を用いたインピーダンス・ブリッジの自動調整

Fig. 4.3 Automatic adjustment of impedance bridge by the use of optimizing control equipment.

えを指令する。全体はクロックによって制御される。

図 4.2 はこの論理回路の写真を、また図 4.3 はこの論理回路を、インピーダンス・ブリッジの自動調整に使用した場合の写真を示している。

5. む す び

以上多変数最適化制御について考察し、最急降下法を

(1) 変数の変化分を Discrete 化する。

(2) 単独試行を複合試行の間にはさんで、進行しながら $\text{off} \Delta x_i$ の符号の測定を行なう。

の二つの点で改良を行なえば、非常に簡単な装置で多変数最適化装置を実現できることについて述べた。

しかし本文に述べた方法は最急降下法の一つの変形であって、このほかいろいろな形でこの問題を取り扱うことができるはずである。とくに、変数が多くなった場合の最大または最小点付近での論理判断の仕方についてはいっそうの研究が期待される。

最後にこの研究を指導、かつ有益なる助言をいただいた電気第一研究室の安藤安二、馬場準一両博士ならびに自動最適化装置の試作に参加し、協力いただいた真鍋舜治、森本英男、林重雄、芝滝寿安の諸氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 福永、芝滝。自動最適化について、アソコム研究会資料、No. 26-2 (昭 34-10)
- (2) 福永、芝滝。自動最適化の一方式、電学誌 80, 1447 (昭 35-10)
- (3) D.A. Burt & R.I. Van Niel: Optimizing Control Systems for the Process Industries, Westinghouse Engineer, 19, No. 2 (1959)
- (4) S.H. Brooks: A Discussion of Random Methods for Seeking Maxima, Operations Research 6, No. 2 (1958)
- (5) G.E.P. Box & K.B. Wilson: On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, Journal of Royal Statistical Society Series B, 13 (1960)
- (6) 平井、浅居、北嶋: 論理回路を用いるポツス最適化制御、制御工学 4, No. 4 (昭 35)
- (7) 藤井: 試行実験による最適化制御の研究; 自動制御研究会資料 第 118 号 (昭 35-3)
- (8) 北森: 目標値の自動最適化制御系, 第 3 回自動制御連合講演会論文 135 (昭 35)

赤外線ガス分析計

研究所 安東 滋*・西岡 忠臣*

Infrared Gas Analyzer

Research Laboratory Shigeru ANDO・Tadaomi NISHIOKA

An infrared gas analyzer, a device for continuous analysis of gas concentration, is chiefly applicable to the process control in chemical industry. Recently Mitsubishi has developed two types of infrared gas analyzers; one is such a highly sensitive one to operate in a concentration range lower than 500 ppm, and the other is capable of measuring two components alternatively. The writers make a report on the construction and performance of these two models. With the highly sensitive infrared gas analyzer, it is feasible to detect 1 ppm concentration change in the case of CO_2 . The two component type infrared gas analyzer, on the other hand, operates to indicate alternately each of concentration in the same specimen in every several minutes.

1. ま え が き

連続式のガス濃度計の一種である赤外線ガス分析計について、500 ppm以下の希薄濃度の濃度測定に適する高感度形と、2成分の交互測定ができる2成分形の2種を開発したのでそれについて報告する。

赤外線ガス分析計は、ガスの赤外吸収を利用して濃度を連続的に時間遅れなく測定する計器で、化学工業の製造工程において成分濃度を連続測定して原料供給量を自動調節するなどの、いわゆるプロセス制御になくてはならない計器になりつつある。化学工場の自動化が進むにつれて、ますます高感度の成分計が少しでも低いコストで要求される。一方、化学工業の計測面においては、いまだに成分計が弱点として残されており、温度、圧力の測定のような普遍的なよい方法が少ない。たとえばルザット分析装置は昔からよく用いられているが、目的成分によって試薬を選ばなければならず、連続測定も不可能である。連続測定可能な分析方法としては、電磁濃度法、密度法、熱伝導度法、音響法、導電度法などがあるがガスの種類、濃度範囲に応じて適当な方法を選ばなければならず、多成分中の1成分を測定することはむずかしい。多成分の分析にはガス・クロマトグラフ法がよく用いられるようになってきたが、連続測定ができない。

次に赤外線ガス分析計の原理、特長について述べる。

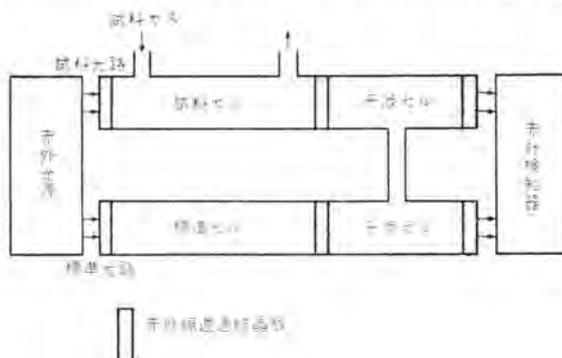


図 1.1 赤外線ガス分析計の原理図

Fig. 1.1 Principle of infrared gas analyzer.

分子の振動、回転に起因する光の吸収スペクトルは赤外領域にもっとも多く集中しており、分子構造の差異はもとより構造異性体、同位元素による差などのわずかの相違もはっきりと吸収波長の相違として表われる。 H_2 , O_2 , N_2 , Ne , Ar , Xe などの単体ガスは吸収スペクトルが赤外領域にないが、それ以外の CO_2 , CO , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , HCN , N_2O などのほとんど全部のガスは、赤外波長1~10 μ の範囲にそれぞれの分子に個有の赤外吸収スペクトルを示す。赤外線光路にそのようなガスを流せば、その濃度の大小は特定波長の赤外線の強弱となるから、それを赤外検知器で検知すればガスの濃度を知らう。図1.1に示すように、赤外線ガス分析計は赤熱ニクロム線のような赤外光源、赤外検知器およびこの両者を結ぶ2本の光路、すなわち標準光路と試料光路の各部からなる。標準セルには赤外吸収のない N_2 などのガスを満たし、試料セルに赤外吸収ガスを含んだ試料ガスを流通させる。赤外検知器は、測定しようとするガスの吸収波長だけに感度があり、両光路の赤外線の強さの差を検出するものである。したがって試料ガス中の被測定ガスの濃度変化だけが、赤外検知器の出力として表われる。

赤外吸収スペクトルはある程度の幅をもち、他種のガスのものと一部重なる場合があり、試料ガス中に被測定ガス以外にこのようなガスが存在すると、その濃度変化が見掛け上被測定ガスの濃度変化として指示される。このような現象を干渉と呼ぶが、その場合、干渉セルにそのガスを100%満たし干渉吸収帯を飽和させて干渉を防ぐ。ただし被測定ガスの濃度よりも干渉ガスの濃度変化のほうがいちじるしく大きい場合は、干渉を防ぐことは困難になる。

各吸収セルは内面をよく研磨して赤外線の反射をよくした金メッキ黄銅、ステンレスなどの金属パイプと赤外線を透過する結晶板の窓からなり、窓の材料としては吸湿性が少なく機械的に丈夫なものが選ばれる。被測定ガス、干渉ガスの吸収スペクトルを考慮して使用波長範囲を決め、1~6 μ では LiF 、1~8 μ では CaF_2 、1~12 μ では AsS_3 などが使用される。

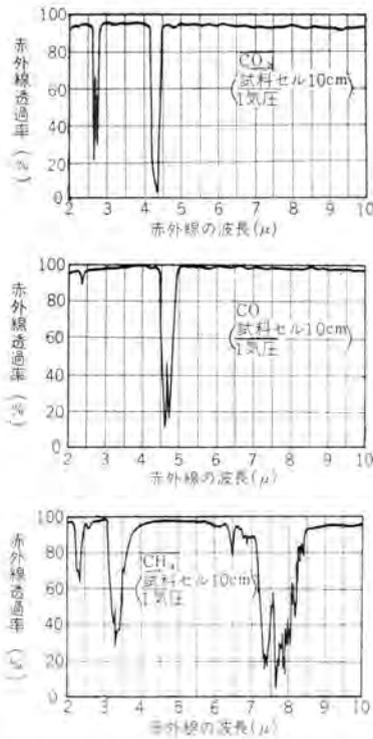


図 1.2 CO₂, CO, CH₄ の赤外吸収スペクトル

Fig. 1.2 Infrared absorption spectra of CO₂, CO, CH₄.

以上のような構成，原理から当然考えられる赤外線ガス分析計の特長は，次のようなものである。

- (1) 測定ガスに対する選択性が高い。したがって多成分中の1成分の測定が可能になる。
- (2) 連続的，瞬間的測定が可能で，ガス濃度変化の自動記録，危険ガスの濃度監視，濃度の自動調節など活用の道がひろい。
- (3) 濃度範囲が自由に変えられる。試料セルの長さを適当に選ぶと0~100 ppm ぐらいから0~100%まで可能である。
- (4) 希薄濃度で感度が高い。CO₂の場合0~0.1%をフルスケールとして，精度フルスケールの±1%で測定することは容易である。

図 1.2 に赤外分光器で測定された赤外スペクトルの実例を示す。このようなスペクトルはほとんど全部のガスについて測定されており，文献(1),(2)などにかなりよく収録されている。ある混合ガスの中の1成分を測定したい場合，測定成分の赤外スペクトルのほかに共存成分で赤外吸収のあるものがあれば，その赤外スペクトルも調べなければならない。それによって分析に使用するスペクトルと干渉するスペクトルが明らかとなり，適当な結晶板の選択によってなるべく干渉スペクトルの付近をカットするようにする。ただしこの際注意すべきことは，赤外分光器の分解能は限られているので，見掛け上干渉するよう見えてもそれほどでないことがあり，逆の場合も起る。図 1.2 の各ガスのスペクトルと，後の表 4.1 の干渉率とは一見矛盾するよう見える関係が多い。たとえば CO₂ と CH₄ とは図 1.2 によれば全く干渉しないように見える

が，表 4.1 によると干渉がある。したがって干渉の有無は実験によって確かめたほうが安全である。

2. 赤外検知器

赤外線ガス分析計に用いられる赤外検知器は Luft 形がもっとも適しているように思われる。われわれはかつて高感度の赤外線ガス分析計を作るためにスペクトロ・フォン検知器を用い，希薄濃度でかなりの高感度を得た⁽³⁾⁽⁴⁾。またこの分析計は断続周波数が高いために非常に速い応答を示した。Luft 形検知器を用いた分析計は希薄濃度での感度はややすぐれ，応答はかなり遅い。またコストの点ではスペクトロ・フォン検知器のものよりやや安価になる。試料セルの中のガスが入れかわる時間は数10秒から1分ぐらいかかること，化学工場における実際の濃度変化がそれほど早くないことを考えると，結局われわれは Luft 形の検知器を採用することが有利になるものと考ええる。

Luft 形検知器とは図 2.1 のようなもので，差圧形と単一セル形の2種がある。いずれも内部に被測定ガスを満たし，赤外線が入射するとその吸収波長のものだけを吸収して温度，圧力が増し，それをコンデンサ・マイクロホンで検出する。したがって波長選択性があり，吸収波長以外の赤外線には感度を示さない。赤外線ガス分析計が選択性が高いのもこのためである。

一般の検知器と同じように，Luft 形検知器でもゼロ点移動の影響を打ち消すために，入射赤外線を一定の周波数で断続する。またマイクロホン振動板でさかいされる2部分の圧力の変動の影響を打ち消すために，わずかな漏れをつけておく。差圧形の場合には，試料光路と標準光路の両赤外線を同時に断続する。したがって両赤外線に強さの差がなければ周期的容量変化（便宜上これを出力と呼ぶ）はなく，差があると断続周波数の出力が現われ，強弱関係が逆転すると出力の位相も反転する。単一セル形の場合には，両赤外線を交互に入射するように断続する。やはり断続周波数の出力が現われ，強弱関係による位相反転も同様である。

Luft 形検知器の時定数 τ は比較的大きく，数秒にも達

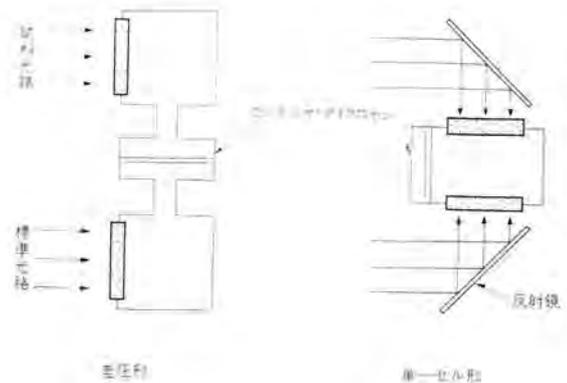


図 2.1 Luft 形赤外検知器

Fig. 2.1 Luft-type infrared detector.

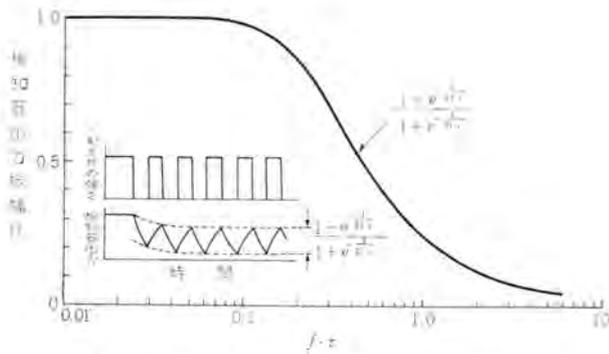


図 2.2 積 $f \cdot \tau$ と検知器出力の振幅の関係

Fig. 2.2 Relation between product $f \cdot \tau$ and amplitude of detector output voltage.

する程度であるので、断続周波数 f をあまり大きくできない。時定数 τ の検知器に周波数 f で断続された赤外線が入射すると、定常状態の振幅は図 2.2 に示すように $(1 - e^{-1/(f \cdot \tau)}) / (1 + e^{-1/(f \cdot \tau)})$ に比例する。この振幅比と積 $f \cdot \tau$ の関係は図のようになり、無限に遅く断続した場合の振幅を 1 とすると、たとえば $\tau = 1$ 秒、 $f = 1$ c/s の場合、振幅は 0.24 と小さくなる。われわれの実験した各内容積約 40 cc の差形および単一セル形の検知器の時定数は、いずれも 1.0 秒であった (CO_2 の場合)。他の研究者の報告にも、だいたい同様の数値が示されている⁽⁹⁾。一方、断続周波数は実際上数サイクルが限度で、それ以下では電子回路による増幅が困難となる。図 2.2 で明らかなように積 $f \cdot \tau$ をできるだけ小さくして出力振幅を大きくしたいが、結局われわれは $f = 2$ c/s を選んだ。 $f \cdot \tau = 2$ の付近では、検知器出力波形は図 2.3 (A) のような三角波になる。

先に述べた微小漏れの調整も割合にやっかいな問題で、これが大きくなると図 2.3 (B) のように波形が変わり振幅が小さくなっていく。極端に大きくすると波形は方形波に近づき、振幅は 0 に近くなる。漏れが小さすぎると圧力の平衡がとれにくくなって不安定となる。

検知器にとってさらに重要なことは、検知器が感度を有する波長の幅の問題である。図 1.2 のような赤外スペクトルは細いスペクトル線の集りであるが、これは濃度が大きくなると透過率が下がるだけでなくスペクトル線の幅も広がってくる。これはガスの分子間の衝突、特に赤外吸収ガス分子同志の衝突に起因する圧力ひろがり (Pressure

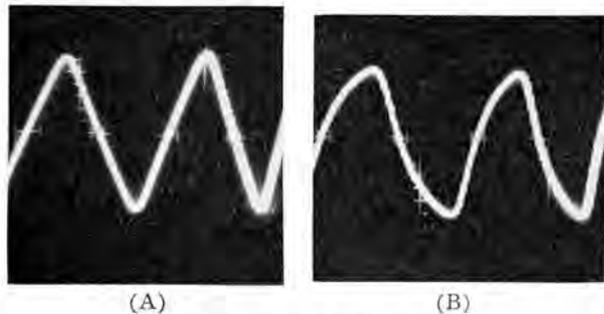


図 2.3 Luft 検知器の出力波形

Fig. 2.3 Output waveform of Luft-type detector.

broadening) と呼ばれる効果である。したがって試料ガスのスペクトル線の幅と検知器のほうの吸収線の測とをできるだけ近くすることが望ましい。このことは 500 ppm 以下の希薄濃度測定するときには特に必要である。すなわち、希薄濃度で分析計の感度を上げるためには、検知器内の赤外吸収ガスの濃度、共存単体ガスの種類などを適当に選ばなければならない。この条件を、測定しようとするガスについて見出すことがもっとも重要な問題である。また検知器に最適濃度に充てんしたあと、1 年以上もその濃度が変化しないことが当然要求される。検知器の材質、処理方法などに適当な考慮がなされていないと、測定ガスを 100% 満たした普通の検知器でも濃度が変化し、分析計校正値の狂いとして現われてくる。

3. 構 成

図 3.1 に高感度赤外線ガス分析計の構成を示す。赤外光源は 700~800°C のコイル状赤熱ニクロム線を使用しており、消費電力は 20~30 W である。光源セルは赤外放射エネルギーを効率よく利用するため、焦点(光源をおく)共通で反対方向に開口している回転二次曲面鏡を用いている(特許出願中)。光源セルを出た 2 本の赤外光束は、図のような形のチョップで同時に 2 c/s で断続される。各吸収セルは内面をよく研磨した材質 SUS27 のパイプで、窓は LiF 単結晶板である。試料セル、標準セルの長さは各 400 mm とした。赤外検知器のコンデンサ・マイクロホン容量変化を電気信号にかえるには、7 Mc の LC 発振器を用いた。もし両光束に強さの差があると LC 発振器は 2 c/s の図 2.3 のような信号を出し、これを増幅、同期整流後サーボ増幅器に加える。両光束いずれが強いかによって 2 c/s 信号は位相を反転し、サーボ増幅器はサーボモータを正転逆転させる。光学クサビは一種の光量調節器で、サーボモータの正転逆転に対応して標準光束の検知器にはいる量を強めたり弱めたりする。タコメータはラックとフォト・トランジスタの組み合わせで、チョップの回転によって 2 c/s の方形波を出し、これが同期整流器で 2 c/s 信号の位相弁別をするときの基準信号となる。以上により、位相関係を適当に調節しておけば、光学クサビは試料光束

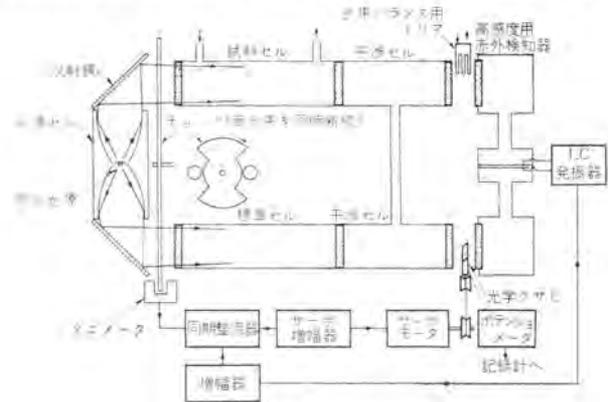


図 3.1 高感度赤外線ガス分析計の構成図

Fig. 3.1 Composition of high sensitive infrared gas analyzer.

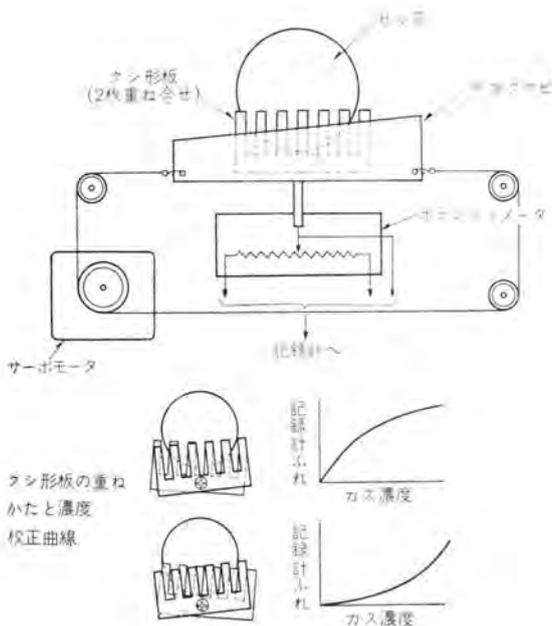


図 3.2 光学クサビの構造

Fig. 3.2 Construction of optical wedge.

の強さ、すなわち測定ガスの濃度変化に自動調節し、その変位量をポテンシオメータで検出すれば濃度の指示記録が可能になる。

光学クサビ付近の構造は図3.2のようなもので、図のように、クシ形板を2枚重ね、その重ね方で校正曲線を自由に变化できる方式のものである（実用新案出願中）。試料セルの長さをも、測定ガスの濃度を c とすると、試料セルを透過した測定ガス吸収帯の赤外線強度は $\sum_{i=1}^n k_i e^{-k_i c d}$ に比例する。ただし k_i, k_i' は各吸収線についての定数である。また光学クサビ、吸収セル窓などの形などによっても、濃度と光学クサビの変位量は比例関係にならない。図3.2のような2枚のクシ形板を用いると、何回か実際の校正とクシ形板の修正をくり返して、校正曲線を直線に近づけることができる。

図3.3に2成分用赤外線ガス分析計の構成を示す。1成分用との差異は、検知器を光束に対し2個直列に配置したところにある。検知器だけが2個で他の部分は共通であるので、マイマと信号切換器により数分おきに交互に

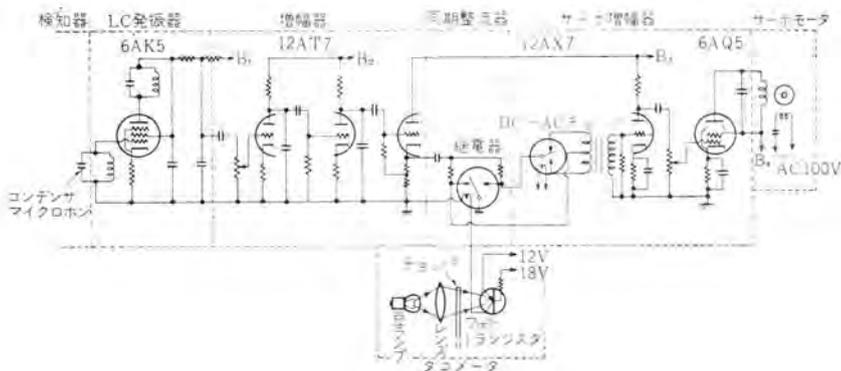


図 3.4 高感度赤外線ガス分析計回路図

Fig. 3.4 Circuit diagram of high sensitive infrared gas analyzer.

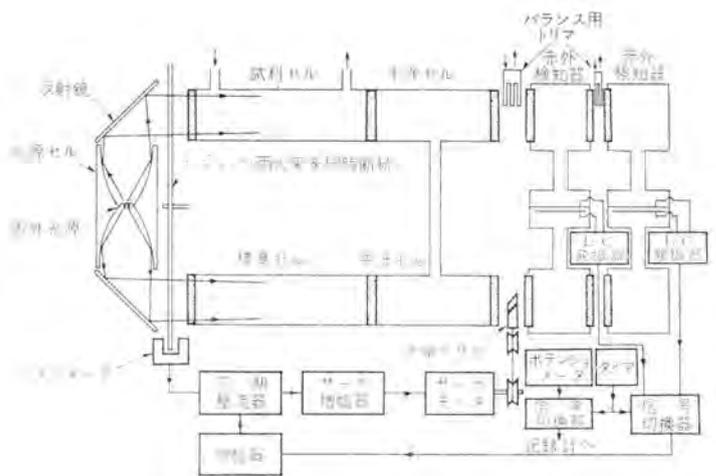


図 3.3 2成分用赤外線ガス分析計の構成図

Fig. 3.3 Composition of two component type infrared gas analyzer.

両成分に切り換える。また記録の際にはポテンシオメータと記録計の変位間の倍率も同時に切り換える。試料セル、光学クサビが共通なので両成分のフルスケールの間にはやはり制約ができ、濃度範囲があまりかけはなれると不可能になる。その制約を緩和する意味で倍率の切り換えは必要となる。

図3.4に、高感度赤外線ガス分析計の回路図を示した。2成分用の場合は信号切り換えの継電器が追加される程度で、ほとんど変わりはない。また普通の感度の分析のときには利得が過大となるので、真空管12A T7を12A U7にかえるなど適宜調節する。

図3.5は2成分用赤外線ガス分析計の外観、図3.6はその内部構造を示す、分析計のケースは気密構造になっており、内部の空気の N_2 置換なども可能である。またケース内部はサーモスタット、ファン、ヒータによって必要な温度に恒温化して使用する。恒温化は試料ガスの分析を一定温度で行なう必要からも要求されるが、高感度検知器が温度変動によって指示に乱れを生ずることからも必要である。



図 3.5 2成分用赤外線ガス分析計の外観（高さ75 cm、幅35 cm、奥行50 cm）

Fig. 3.5 Outside view of two component type infrared gas analyzer (75 cm height, 35 cm width, 50 cm depth).

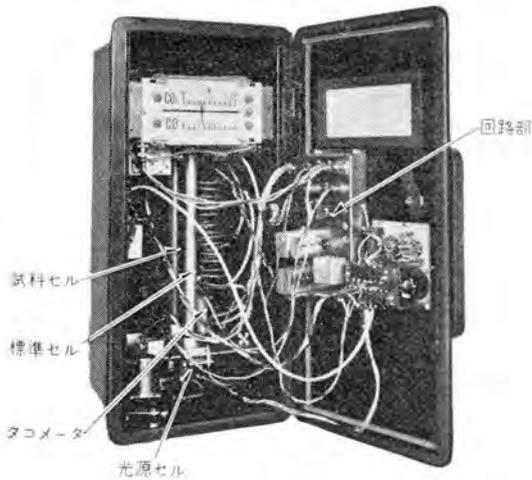


図 3.6 2成分用赤外線ガス分析計の内部

Fig. 3.6 Inner view of two component type infrared gas analyzer.

4. 性能

赤外線ガス分析計の校正、性能試験は、濃度が0.5%以上の場合はガスだめの中で混合して作ったガスを用いて行なうことができるが、0.1%以下ではこの方法では全く不可能になる。容器の表面のガス吸着による濃度変化と同程度になるからである。われわれは次のような方法を用いた。まずよく真空熱処理したポンベにN₂中測定ガス100~1,000 ppmの混合ガスを100~150気圧ぐらいに充てんする。次にこの濃度を化学分析、質量分析、検知管など、できれば二三の方法を併用して正確に決定する。この混合ガスと高純度N₂とを用いて図4.1のように校正を行なう。オリフス流量計はシリコン・オイルを用い、途中の導管はテフロン管、塩化ビニル管などを用いる。ゴム管はガスの拡散があるので使用できない。

この方法を用いて高感度赤外線ガス分析計の性能試験を行なった結果を図4.2~4.4に示した。また2成分用赤外線ガス分析計の試験も、便宜上同じような希薄濃度で行なった。したがってこの場合も検知器は同じ高感度検知器である。その結果を図4.5に示した。

先にも述べたとおり、CO₂、CO、CH₄の3成分の間でも全く赤外スペクトルの重なっていないように見える組み合わせがあるが、実験してみるとやはり弱い干渉を示す。このなかには検知器充てんガスまたは校正用混合ガス中の不純物ガスによるものもあるかもしれないが、やはり赤外スペクトルの重なり、すなわち干渉によるものが大部分であろう。そのことは使用したガスの質量分析計による分析結果から

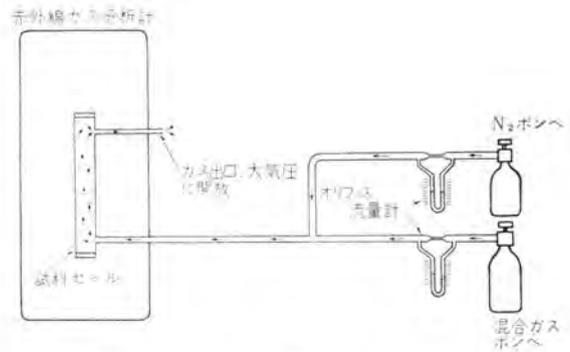
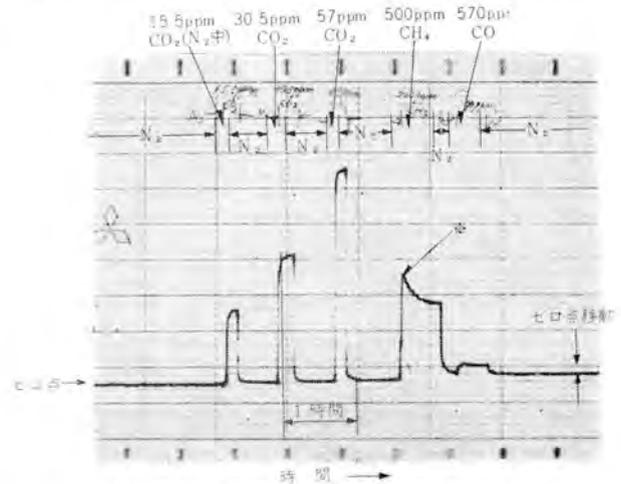


図 4.1 高感度赤外線ガス分析計の校正

Fig. 4.1 Calibration of high sensitive infrared gas analyzer.



※：減圧弁交換直後のため或るCO₂の放出と思われる。

図 4.2 高感度赤外線ガス分析計による記録結果(CO₂の場合)

Fig. 4.2 Recorded chart of high sensitive infrared gas analyzer (in the case of CO₂).

も推定できる。高感度検知器を使用した場合の各ガス相互の干渉の度合を、干渉率なるもので表わすと表4.1のようになる。AガスのBガスに対する干渉率とはBガスの分析計にAとBの同一濃度を入れた場合の指示値の比である。表4.1の結果は干渉セルを用いない場合であって、両ガスの濃度変化が同程度なら、適当な干渉セルを用いることによりほとんど干渉をなくすることができる。

2成分用の場合、1成分のフルスケールを決めると他の1

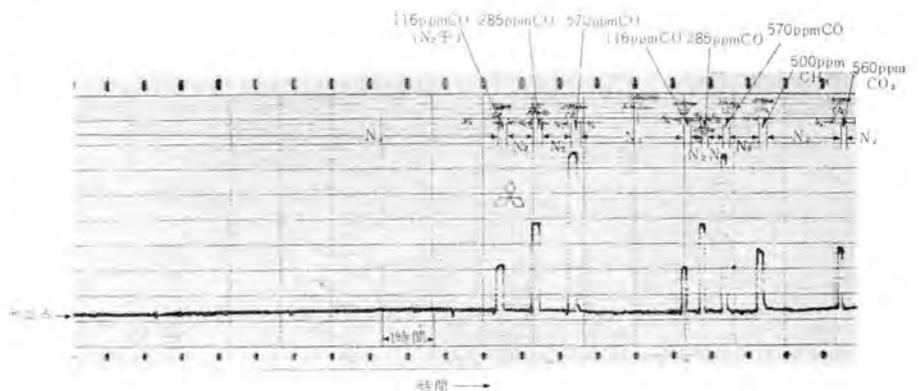


図 4.3 高感度赤外線ガス分析計による記録結果(COの場合)

Fig. 4.3 Recorded chart of high sensitive infrared gas analyzer (in the case of CO).

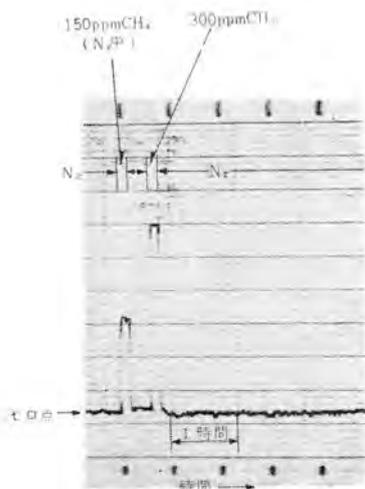


図 4.4 高感度赤外線ガス分析計による記録結果 (CH₄の場合)
Fig. 4.4 Recorded chart of high sensitive infrared gas analyzer (in the case of CH₄).

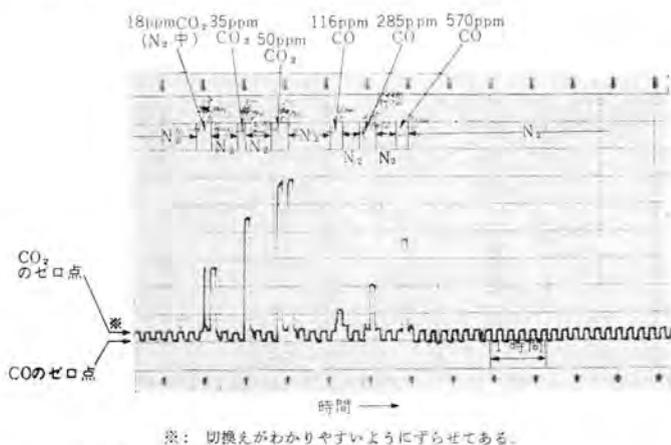


図 4.5 高感度赤外線ガス分析計による記録結果 (CO, CO₂の場合)
Fig. 4.5 Recorded chart of high sensitive infrared gas analyzer (in the case of CO and CO₂).

表 4.1 高感度赤外線ガス分析計における干渉セルを用いない場合の CO₂, CO, CH₄ 相互の干渉率 (%)

	CO ₂	CO	CH ₄
CO ₂ 分析計に対して	100	0.3~0.4	3~5
CO 分析計に対して	20~30*	100	30~40
CH ₄ 分析計に対して	~50*	~1	100

* 不純物 CO₂ による影響が含まれているかもしれない。

表 4.2 2成分用赤外線ガス分析計のフルスケールの可能な範囲の一例

	他の一成分の可能なフルスケール範囲(%)		
	CO ₂	CO	CH ₄
CO ₂ フルスケール 0.01% に対して	—	0.05~3	0.03~1
CO フルスケール 0.05% に対して	0.005~0.15	—	0.015~0.5
CH ₄ フルスケール 0.03% に対して	0.01~0.3	0.05~3	—

成分のフルスケールに制約を生じることは先きに述べたが、CO₂, CO, CH₄ の実験で表 4.2 の結果を得た。

5. む す び

100 ppm 以下の希薄濃度において、充分感度と信頼性のある赤外線ガス分析計は多年の懸案となっている。われわれの得た性能は、CO₂ の場合 1 ppm の濃度差を検知できる程度で一応満足できるが、CO, CH₄ については感度が充分でない。信頼性については連続1ヶ月以上の運転でなら故障も起らず、感度変化もないことが確かめられたが、今後さらに長時間の連続試験を続ける計画である。

稿を終えるにあたって、赤外線ガス分析計の開発を促進し、たえず適切な助言を与えて下さった大野技師長、菅野物一室長、八島研究員、いろいろご協力をいただいた工務課八木主任、石橋、太田両研究員、この形になるまでの段階での協力者村西技師の各位に負うところが多いことを書きそえて謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) R. Bowling Barnes: Infrared Spectroscopy, Reinhold Publishing Corporation (1944), N. Y., U. S. A.
- (2) Raymond H. Pierson: Catalog of Infrared Spectra for Qualitative Analysis of Gases, Anal. Chem. 28, 8, 1218 (1956).
- (3) 安東滋・村西有三: 稀薄濃度測定用赤外線ガス分析計, 「計測」9, 9, 536 (昭 34).
- (4) 安東滋・村西有三・太田基義・石橋勝: うろてス制御用高感度赤外線ガス分析計, 三菱電機 33, 7, 834 (昭 34).
- (5) 森一夫: 赤外線分析計の検出器についての基本的考察, 科学研究所報告 36, 6, 385 (昭 30).

計数形電子計算機 MELCOM-LD1

豊田 準三*・中塚正三郎**・吉江高明**
 前田良雄**・首藤 勝**・壺井芳昭**
 菅 忠義**・関本彰次**・魚田勝臣**

研究所

Digital Computer MELCOM-LD1

Junzo TOYODA・Shozaburo NAKATSUKA・Takaaki YOSHIE
 Research Laboratory Yoshio MAEDA・Masaru SUDO・Yoshiaki TSUBOI
 Tadayoshi KAN・Shōji SEKIMOTO・Katsuomi UOTA

Electronic digital computer MELCOM-LD1, developed at Mitsubishi research laboratory as fully transistorized unit and now under program tests, employs a delay line type magnetic drum as the main memory and operates in a serial binary fashion. Along with the speeding up of operation, much contrivance has been worked on them to have a feature of an input and output, index register system. Making use of the advantages of this computer, a number of system programs have been worked out; one of them has a symbolic operation code, closely corresponding to the machine language, while the others are a compiling system to be programmed by the FORTRAN language and an interpretive system using a symbolic code and a floating address.

1. ま え が き^{(1)~(3)}

表題の電子計算機は、当社無線機製作所で商品化進捗中の MELCOM-1101 のパイロット・モデルとしての研究試作機であり、現在研究所で各種のプログラム・テストが行なわれている。昭和 32 年度通産省補助金により、当社研究所で完成した磁気円筒記憶装置を遅延線方式に発展させたものを主記憶装置に用い、全トランジスタ化された内部 2 進数方式による直列電子計算機で、この種の電子計算機としては国産最初のものである。

遅延線方式の利点として、磁気円筒の記憶部が演算用のレジスタに使用できて使用部品数の軽減可能なこと、群演算が容易に可能であることなどがあげられるが、本機ではこのほかに乗除算と加減算とを並行的に進行させられる制御方式を用いて総合演算を向上させている。

付加装置 FLORA を併用することにより、浮動小数点演算、2 進 ↔ 10 進数変換、探表操作などの高級演算の高速処理が可能であり、4 台まで採用できる各種の入出力装置をも総合すると、相当大規模のデータ処理能力を有した計算機組織となるものである。

2. MELCOM-LD1 の概要

本機はアドレス可能な記憶容量が 4,046 語の遅延線形磁気円筒を主記憶装置に用いた内部 2 進数の直列電子計算機である。アドレス方式は変形 2 アドレス方式で、4 個の B レジスタでインデックシングが可能である。

プログラミング・システムとしては、機械用語をアルファベット形式で直接駆使できる D. P. L. System, FORTRAN 用語でプログラム可能なコンパイラ MUSE System, のほかにシボリックな相対単アドレス形式のインタープレータ ASIA

System などが用意されている。

主入出力および手動制御には、自動タイプライタおよび紙テープ装置を用いているが、磁気テープ装置、カード装置、さらに付加装置 FLORA を併用すると大規模なデータ処理装置となる。

2.1 構成

この計算機（以下 LD-1 と略称）の全体の構成は図 2.1 に示した。制御卓、本体および電源により最小規模の基本的構成が行なわれ、制御卓にある自動タイプライタおよび紙テープ装置により 4,046 語のインデックス付き変形

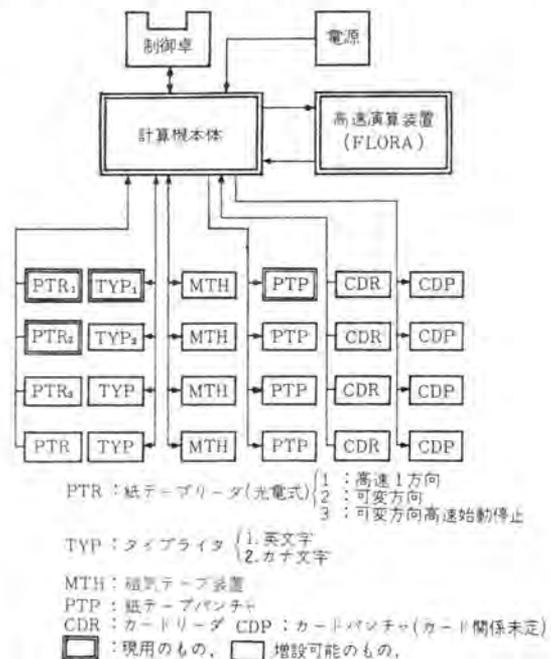


図 2.1 MELCOM-LD1 の構成

Fig. 2.1 Construction of MELCOM-LD1.

2アドレス電子計算機としての単独機能が發揮できる。

本体には乗除算と加減算とを並行的に進行させる制御方式が採用され、シフト・プログラミングに便利な「辞書引き」操作も可能となっており、総合演算速度は格段に改善されているが、浮動小数点演算、10進 \leftrightarrow 2進数変換、探表操作はサブルーチンとしてプログラム処理を行なうことになっている。これらの高級演算の高速処理を行なうのが付加装置 FLORA の機能であり、本体を中心に各種の入出力付加装置とともに計算機組織を構成し、大規模なデータ処理に対処できるという構成上の融通性が確保されている。

2.2 主記憶装置⁽⁴⁾

前述のように遅延線方式のものであり、書込みヘッド、読出しヘッドをそれぞれ専用に設け、消去用磁石も装備されている点が通常のものとは異なっている。円筒の回転にしたがって書込み-読出し-消磁がくり返される。ある情報を記憶しつづける場合は、読出された情報をそのまま書込むのであり、循環記憶という点では原理的に超音波遅延線とまったく同じである。書込みから読出しまでが遅延時間に相当し、ヘッドの間隔を適宜に採用して、各種の記憶容量とアクセス・タイムの循環記憶ラインが作られる。

本機では一般記憶用としての100語長のもの40本と、4語長、2語長、1語長のものが数本用意されており、これらは全部アドレス可能のものであるが、このほかアドレス不可能で内部的動作だけを行なうもの、余備となるものなど数本あるが、詳細は表2.1に示した。

2ワード長、1ワード長のものには、短アクセス記憶だけでなく、演算レジスタとして使用しているものがあり、このため使用部品数はいちじるしく軽減されている。

これらとは別に、クロック信号を発生させるため全周に恒久的に書込みが行なわれたクロック・トラックがあり、これは消磁は受けない。これよりの信号で計算機全体のタイミングが制御される。

2.3 演算方式^{(1)(5)~(9)}

遅延線方式で内部2進数ということは、直列演算方式であることを意味し、したがって乗除算速度は比較的小さい。この種の演算は加減算などとは別の制御部で支配することにより両者並行して進行させ、総合演算を向上させるという方式を用いている。また入出力動作も別個の制御部を設け、四則演算の進行中に並行して動作可能

である。FLORAは前述のような高級演算を高速処理するための付加装置であるが、浮動小数点演算を主対象としている。このために数個のシフト・レジスタおよび多数の全加算器が用意され、直並列動作で本体の循環記憶ラインや演算機構と協調するように構成されている。(表2.2参照)

演算動作内容にはきわめて興味深いものがあるが、詳細は既発表の文献(1)~(3)を参照されたい。

2.4 数値と命令形式

単位語は33ビットであり、数値は倍長の取り扱いができる。倍長の場合は10進数16ケタの精度で対処できる。

命令形式は図2.2に示したような変形2アドレス方式である。SおよびDが59以下のものが基本的なもので、

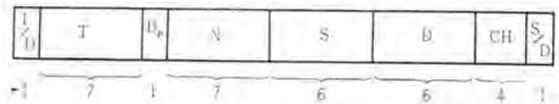


図 2.2 機械用語の構造

Fig. 2.2 Internal form of machine command.

この場合は「SラインのTワード目の情報にCH部で指定する演算を施した後、これをDラインのTワード目に記憶し、次の命令はNワード時に読みとれ」という意味を有している。S、Dが60以上の場合はそれぞれ特殊命令を構成するが、詳細は表3.1を参照されたい。

2.5 入出力方式⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

別文献との重複を避けて要点だけを記述する。

(1) ALGOLの導入を考慮した数字、文字および記号を採用したこと。

(2) 入出力動作に数種のモードを設け、入力情報の占める記憶場所の節約を考慮したこと。

以上がくふうの要点である。モードとしては、A、C、N、Fの4種が用意してある。A (Alpha Numeric) モードでは文字、数字、記号はすべて8ビットで取り扱われる。C (Combined) モードでは文字、記号が8ビット、数字が4ビットで取り扱われる。N (Numeric)、F (Fixed Point) モードでは数字のみを取り扱い、いずれも4ビットのヘキサ・デシマル数としての取り扱いを受ける。両者はほとんど同一であるが、後者ではピリオドを固定小数点に取り扱うためのくふうが施されている。

表 2.1 磁気ドラムのライン配分

	1ラインあたりの記憶語数	全ライン数	記憶語数	総記憶容量	プログラムで指定できるライン		演算に用いるライン		制御に用いるライン数	入出力に用いるライン数	制御ライン数	アクセスタイム(最大)
					数	ライン番号	数	ライン番号				
遅延線形式記憶	1語	8ライン	8語	4,888語	0		2	56, 57	2	1	0	0 μ sec
	2語	8語	16語		2	48, 49	4	52, 53, 54, 58	0	1	1	165 μ
	4語	16語	64語		8	40~47	0		0	2	6	495 μ
	100語	48語	4,800語		40	0~39	0		1	1	6	16,335 msec
永久記憶	108語	4語			0		0		2	0	2	—

表 2.2 主要演算所要時間

演算	所要時間	
	本体のみ (ms)	FLORA共用 (ms)
固定小数点	加減算	0.16
	乗算	10
	除算	10
浮動小数点	加減算	約 16.5*
	乗算	約 16.5*
	除算	約 16.5*

* プログラムによる演算

各モードを使いわけることにより、いろいろな形式の入出力に応じられるわけであり、記憶場所の利用効率としても格段に改善されている。

2.6 インデックス・レジスタ方式⁽¹⁰⁾

いわゆる Pseudo Index 方式を採用している。各個の命令語には インデックス・ビット は設けず、直後の命令を モディファイ する命令を別に用意してある。後述の外部機械用語 D. P. L. では、インデックス 部の付加された命令形式となっている。この外部用語でプログラムすると、モディファイ する命令と、される命令とが自動的に対をなして、内部機械用語によるプログラムが編集されるようになっている。モディファイ する命令は読み取り時間だけで経過し、次のモディファイ される命令の読み取りに際してモディファイ の動作が行なわれるので、読み取りのための1ワード時だけが余分に必要となる時間である。インデックス・レジスタとして、T 部または N 部と同じ長さの7ビットのシフト・レジスタが4個用意されている。

3. プログラミング・システム^{(10)~(16)}

LD-1 では図 3.1 のようなプログラミング・システムとなっている。

機械用語は機械内部で実際に電子回路を動作させる2進数的パターンの T, N, S, D, CH などの部から構成され、内容については、2.4 節に記述したとおりである。機械の調整、保守に際しては機械用語の形式と意味に精通する必要があるが、プログラムを通じて機械を使うだけの立場では便利さに欠けた点が多い。

機械用語とほぼ1対1の対応を持ち、より使いやすいように考慮されたのが D. P. L. System で、以下に述べるプログラム・システムの作成などに用いるものである。以上2種の用語は機械の内部知識が前提となっているので、Maker's Language と称される。

多くのユーザにとっては計算をさせて、その結果に関心がある場合が大部分で、プログラムが機械機能をいかに有効に活用しているかということに関心が少ない。そのようなユーザに、必要とされる機械知識を極力少なくして、プログラムしやすく、誤りを少なくする目的で作られたのが User's Language である。

User's Language には、Compiler 形式のもの、Interpreter 形式のものがある。前者は特定の User's Language で書かれたプログラム (Source Program) を入力とし、これを翻訳編集して直接機械に入れられる形 (機械用語) のプログラム (Object Program) を出力として出す方式である。User's Language が、使いやすい形に選べること、Object Program の計算時間が早いことなどの利点の反面、翻訳編集に手間がいること、ある種の問題にはプログラムが非常な制約をうけることなどの欠点もある。

Interpreter 形式のものは、その用語で作られたプログラム (Source Program) をシステム自身が翻訳しながら計算を実行してゆく方式である。個々の演算には必ず機械による翻訳が伴うので、速度はあまり期待できない反面に編集の手間は少ない。また機械による翻訳のしやすさから、用語の形式が Compiler ほど自由に選べないという欠点もある。しかしユーザにとっては、Interpreter が機械にはいつている状態では機械は常にその用語で動作するので、計算進行状況の監視や、デバグが容易である。機械の規模、計算の規模がある程度以下の場合、きわめて便利な方式である。

以下 D. P. L., MAMA, ASIA, MUSE につき概略記述する。LUSE (Logical Use) は論理演算用の Compiler であるが、まだ具体化されていない。

3.1 D. P. L. System

Direct Programming Language System の意であり、次の三つの要求を満足するように考慮されている。

- (1) 命令が記憶しやすく、連想しやすいこと。
- (2) 融通性があること。すなわち一つの命令で可能な動作を十分に詳細に指定できること。
- (3) 機械用語のもつ機能をすべて生かせること。

第一の要求をみたすために、命令の Operation Code を Symbolize した。第二の要求をみたすために命令を基本的部分と補助的部分とで構成し、補助的部分にインデックス動作やブロックとして扱う語数を指定するようにした。D. P. L. 用語は前述のようにいろいろなシステム・プログラムの作成に用いるので、第三の要求とともにプログラミングの容易さも要求される。そこで命令形としては後述する MAMA 用語のような単アドレス形で、番地も Symbolize されていることが望ましいが、機械用語の特殊な機能を生かすために2アドレス形のほとんど絶対番地指定に近いものとした。また D. P. L. 用語は保守や調整にも用いられるので、このようにしておけば機械用語との対応があまりくずれないので便利であろう。

さらに Operation Code の長さを可変にし、また不必要な0をタイプしなくても済むようにするに Separator を用いた。またプログラムのタイプライタ(あるいはフレックソライタ)による準備に便利のように Symbol などすべて下段キー(小文字)を使用することにした。

このような主旨に基づいた D. P. L. の命令形式を図

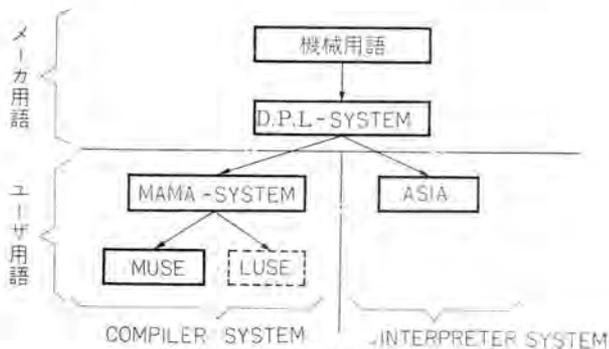


図 3.1 MELCOM-LD1 のプログラム・システム
Fig. 3.1 Program systems of MELCOM-LD1.

3.2 に示した. オペレーションを指定する部分が, 3~4 個の英文字のもの, 2 個の数字を伴うものがある. 後者の数字は情報のあて先 (D<59 の機械用語における D 部に相当したもの) を示している. *ww* なる数字は ブロック命令では処理するデータの数 (1~99, U0), シフト関係の命令ではシフトケタ数, 入出力命令では装置番号数を示すようになっていて, *i*, *ww* は指定しない場合は書く必要はない.

(例 1) , *add x / 1258 64*

1258 番地の内容を, 加算レジスタ *x* に加え, 次は 64 番地の命令に移れ.

(例 2) 4, *rmt / 35*

#4 の磁気テープを読み取り, 次は 35 番地命令に移れ.

D. P. L. の基本命令は約 150 種あるが, その代表的なものを表 3.1 に示した.

D. P. L. System は D. P. L. で書かれたプログラム (タイプインまたはフレックライタで作ったテープを読みこませる) を入力とし, 直接機械用語プログラムに変換 (テープとして取ることも可能) するものである.

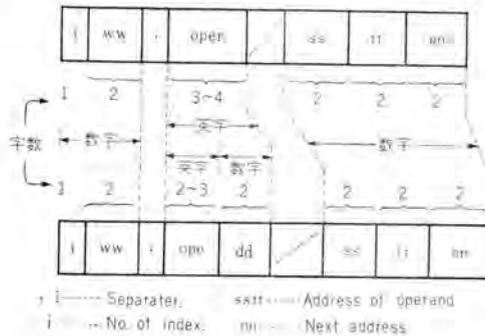


図 3.2 D. P. L. の命令形

Fig. 3.2 Form of D. P. L. command.

もちろん System として各種の数値変換, Format の指定を容易にする機能, Debugging を容易にする機能, Loading Routine を作る機能なども有している.

また D. P. L. System の機能そのものに対する命令 (Instruction) も用意されプログラミングには便利になっている.

たとえば倍長精度の計算をする場合には *dp.* と書き, 単精度計算にもどる場合には *sp.* と指定すればよい.

3.2 MAMA System

Mitsubishi Automatic Minimum Access-System の意である. Compiler 系統のプログラム方式の母体となるもので, MAMA 用語で書かれた Source Program を機械用語に翻訳編集するとともに絶対番地の配置を最適化するものである.

この用語形式は図 3.3 に示すようにシボリックな浮動番地方式である. したがってプログラミングに際しては計算順序だけに注意してデータや命令の絶対位置を考慮する必要はない, 機械内部機構として次の命令位置を指定

できるので, データと命令位置の相対位置を最適化して待時間を最小にするように MAMA System が構成されている.

たとえば図 3.4 (左) のような配置の場合には, 第一の命令の読み取り → データの読み取り → 演算の実行, の全対は 6ワード時で処理できる. 同様の演算でも図 3.4 (右) のような場合には 203ワード時 (ドラム 1 回転は 100ワード時に相当) も要することになっている.

MAMA ではこの配置が最小になるように Sequator の理論に基づいて計算を行ない, 命令とデータとを最適な位置に置いている⁽¹²⁾.

MAMA 用語の決定に際しての基本的条件は次のようである.

- (1) 命令を記憶しやすいこと.
- (2) 一般のプログラミングにあたって必要十分と思われる命令を機械用語から選定すること.
- (3) 計算機の機能を十分に生かすこと.
- (4) プログラミングが容易なこと.
- (5) プログラミングに際して必要な計算機に関する知識ができるだけ少なくてすむこと.

これらの条件は互いに相反するものを含んでいるが, 適当と思われる形式として図 3.3 のものが決定された.

図 3.3 で S/D の欄はその命令を倍精度として扱うときにだけ D と書く.

LCTIÖN は命令のおかれる位置でシボリックな番地が書ける. 連続して行なう場合には何も書かなくてよい. 一般には一区切りの計算の入口に適当な名を付けておく



図 3.3 用語とプログラム例

Fig. 3.3 Form of MAMA command and sample program.

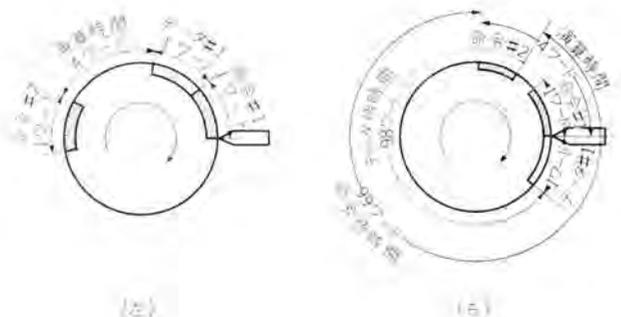


図 3.4 命令の実行順序

Fig. 3.4 Command sequence.

ことになる。またとくに絶対番地（数字）を指定したいときはその数字（4 数字）を書く。

I は インデックス・レジスタ の番号で 1~4 の数字で、ADDRESS 部を Modify する。

WW は D. P. L. と同様である。OPER は Operation Code で第 1 文字が F のときは浮動小数点演算を表わし、D. P. L. と異なり英大文字を使う。

MAMA の基本命令の総数は約 80 種であるが、ひとつの命令に対し機械用語の命令数個が合成されて行なわれる複合命令を多数有している。

ADDRESS には命令で扱うデータの名称を書く。書式は LCTIÖN と同様である。また Branch Command のときはテストした結果によって（たとえば BNG ならテスト結果が負か正かによって）行先が異なるから、NEXT-LO にも行先の命令の LCTIÖN を書く。Branch 以外の命令では行先を書く必要はなく命令は書いた順に行なわれる。

MAMA system にはこれらの命令のほかに Specification Statement, 各種の Instruction および組込みのサブルーチン（10 進 2 進数変換, 入出力, 種々の関数など）をもっているのでプログラミングが容易である。

3.3 ASIA System

Automatic Symbolic Interpreter by Autopoint Number System の意で前述の Interpreter 形式のもので、シンボリックな相対番地方式の単アドレス用語が機械に通用するように作られたシステムである。

このシステムで使用される数値は、自動的に 2^{24} でスケールされた中央固定小数点の数値として取り扱われる。外部的には 10^{-12} ~ 10^7 ~ 10^{12} の範囲の数値が取り扱えるわけであり、ほとんどの技術計算に十分な精度で対処できる。この範囲をまれに越えることがあっても単位の取り扱いにより処理は容易である。固定小数点方式であるので群演算も機械用語の場合と同様に処理可能という利点がある。

アドレス方式は 9 個のインデックス・レジスタによるインデックシングが可能で、*a* および *t* で指定できる 2 種の累算レジスタがある。また別に *u*~*z* の 6 文字で示されるレジスタがあり、おのおのに 0~3 のサフィックスを付けることが可能で、合計 24 個の相対番地のベースをこれらのレジスタの内容によりシンボリックに指定できることになっている。ベースを除いた番地部は、機械の絶対番地と対応しているため、プログラムの改訂や、ASIA 用語で書かれた他のプログラムの一部分として流用するに際してきわめて便利である。

命令の内容については表 3.2 を参照されたい。ASIA 命令は 24 個の無アドレス命令と 50 個の有アドレス命令とからなり、このほかに *u*~*z* のレジスタ内容を指定する手動用命令がある。合計 80 個の命令により機械を自動的に、手動的にも駆使できる。手動演算の場合には個々の演算を単独に卓上計算機を使用するような形式

で遂行することも可能であり、大きな計算遂行過程における臨機応変の計算対処などが容易である。またサブルーチン命令 (*sbrc*) により、機械用語で書かれたプログラム（たとえば *log*, *exp*, *sin*）と接続可能であり、使用者側の便と、機械内部機構の双方を生かした応用範囲の広いプログラム・システムである。演算遂行に際しては翻訳時間が絶えず付加されるので、DPL システムにくらべては計算時間が長くかかるが、プログラミング時間を切りつめ、手軽に計算したいという用途にはきわめて有用なシステムである。

3.4 MUSE System

MUSE System とは Mathematical Use System の略である。

一般の数値計算に関するプログラムを作成するときには、機械の動作に関する知識をほとんど不要とし、また数式の表現をそのまま用いることのできるプログラム方式が各種考えられている。たとえば I. B. M. 社の Fortran, X tran, Univac 社の MATH-MATIC, Burroughs 社などの ALGOL（世界共通用語として国際的に承認されており各社で Compiler が作成されている。）などが代表的なものである。

MELCOM-LD1 用として当初は Algol '60 を採用する方針で入出力に必要な Symbol も用意されているが、社内における FORTRAN 人口の増加などを考慮して、709-FORTRAN Language を MUSE 用語として採用することにした。もちろん 709 と MELCOM は質的にも量的にもいちじるしく異なっているため、709-FORTRAN の全機能（Compiler は 5~6 万語から成るといわれている）をそのまま MUSE で採用することはできない。

そこで用語としては同様の機能を有するが、その Capacity に制限を設けることにした。また入出力命令は相当異なっている。

また一部にはこの計算機の特長を生かすような FORTRAN に含まれていない Statement を持っている。

MUSE 用語には次のような Statement がある。

- (1) Arithmetic Formula
- (2) Control Statement
- (3) Subprogram Statement
- (4) Input Output Statement
- (5) Specification Statement

MUSE 用語によるプログラミングの形式は図 3.5 に示すようである。

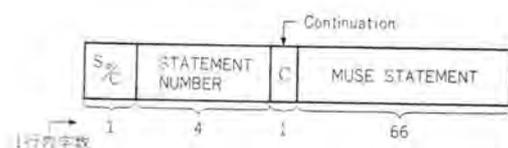


図 3.5 MUSE のプログラミング形式
Fig. 3.5 MUSE programming form.

第1列の Sp/C は Specification or Comment の意味であり、この列に C と書いてあるときはその行はそのプログラムの名前であり、Compile はされない。Sp としては現在 I, D, M の3種の符号が考えられている。

すなわち I とかくとその行の Statement は複素数を扱うものとし、D と書くとき倍精度計算として Compile される。M と書いてあるときはそれは MAMA 用語であることを意味する。

すなわち MUSE System は FORTRAN 類似の Statement 形式によるプログラム (Source Program) を MAMA 用語によるプログラムに変換するものである。この出力プログラムを MAMA System に入れるとさらに完全にミニマムアクセスされた機械用語によるプログラムが作られ計算にはいれることになる。

4. む す び

以上プログラム・テスト中の MELCOM-LD1 の概要を記述した。

論理構成はいずれも遅延線形磁気ドラム方式の特長を十分に生かしたもので、プログラム・システムの整備とあいまって相当大規模なデータ処理に対処できる。

また本機の論理要素、記憶方式はすべて一般的に応用可能であり、一般のデジタル機器に役だつことを期待するとともに、これらの研究成果、プログラム・システムに与えられつつある考え方は、さらに高性能の計算機の開発に寄与することが大きいことを念じたい。

終わりにこの研究試作にご協力いただいた無線機製作所の各位、研究所工務課の各位に厚く謝意を表す。

表 3.1 機械用語と D. P. L. 用語

命 令 内 容	機 械 用 語	D. P. L. 用 語
(S, T) を D, T へコピー	(u) T N S D 0 (-)	(i) (rw), cop dd / ss tt nn.
(S, T) を符号を変えて D, T へコピー	(u) T N S D 1 (-)	(i) (rw), cch dd / ss tt nn.
(S, T) → D, T+1 (1ワード遅延)	T N S D u -	(i) , cvz dd / ss tt nn.
(S, T) → D, T+2 (2ワード遅延)	u T N S D v	(i) rw , cvz dd / ss tt nn.
(ワイルド S) をワイルド D へ選択コピー	u T N S D w	(i) rw , soc dd / ss tt nn.
同上 (コピーした個数 → AC2)	u T N S D w'	(i) rw , sec dd / ss tt nn.
固定小数点数を変換してコピー (単長数 → 倍長数)	u T N S D x	(i) rw , crs dd / ss tt nn.
同上 (倍長数 → 単長数)	u T N S D x =	(i) rw , cxd dd / ss tt nn.
浮動小数点数を変換してコピー (単長数 → 倍長数)	u T N S D y	(i) rw , cos dd / ss tt nn.
同上 (倍長数 → 単長数)	u T N S D y -	(i) rw , cod dd / ss tt nn.
D, T をクリヤ	(w) T N 00 D z (-)	(i) (rw), ter dd / tt nn.
エキストラクトコピー (40・41) → D, T	(u) T N 62 D 0 (-)	(i) (rw), et 41 / dd tt nn.
同上 (40・41) → D, T	(u) T N 62 D 1 (-)	(i) (rw), ef 41 / dd tt nn.
同上 (40・41+40・AC1) → D, T	(u) T N 62 D 70 (-)	(i) (rw), es 1 / dd tt nn.
同上 (40・41+40・AC3) → D, T	(u) T N 62 D x (-)	(i) (rw), es 2 / dd tt nn.
同上 (02・PN) → ID; (02・PN) → PN	(u) T N 62 D y (-)	(i) (rw), es 3 / dd tt nn.
等エキストラクト命令 16 種		
クリヤして (S, T) の絶対値を加算	T N S A 2 (-)	(i) , acm @ / ss tt nn.
(S, T) の絶対値を加算	(u) T N S A 3 (-)	(i) (rw), aab @ / ss tt nn.
クリヤして (S, T) を加算	T N S A 4 (-)	(i) , acl @ / ss tt nn.
累算器の内容を D, T へ記憶	T N A D 4 (-)	(i) (rw), acl dd / @ tt nn.
(S, T) を加算	(u) T N S A 5 (-)	(i) (rw), add @ / ss tt nn.
クリヤして (S, T) の絶対値を減算	T N S A 6 (-)	(i) , tms @ / ss tt nn.
(S, T) の絶対値を減算	(u) T N S A 7 (-)	(i) (rw), sbm @ / ss tt nn.
クリヤして (S, T) を減算	T N S A 8 (-)	(i) , scl @ / ss tt nn.
(S, T) を減算	(u) T N S A 9 (-)	(i) (rw), sub @ / ss tt nn.
(ID) × (MQ) を PN へ加算 (PN クリヤ後)	B N 60 0 1	(i) bb , mpy / nn.
(ID) × (MQ) を PN へ加算 (PN クリヤせず)	B N 60 0 3	(i) bb , mpya / nn.
(PN) ÷ (ID) を MQ へ残す	B N 60 0 2 (-)	(i) bb , div / nn.
(MQ) を B ケタだけ左ケタ移動	B N 60 0 4	(i) bb , shl / nn.
(ID) を B ケタだけ右ケタ移動	B N 60 0 5	(i) bb , shr / nn.
(MQ) を左へ、(ID) を右へ B ケタだけケタ移動	B N 60 0 6	(i) bb , shd / nn.
(MQ) をノルマライズ	B N 60 0 7	(i) bb , norm / nn.
(I) で次の命令の D 部をコディファイ	0 N 60 10 u	f , imd / nn.
” S 部 ”	0 N 60 11 u	i , ims / nn.
” N 部 ”	0 N 60 12 u	i , imn / nn.
” T 部 ”	0 N 60 13 u	i , imt / nn.
(I) を P だけ増加せよ	0 N 60 1P 10 -	f , incp / nn.
(I レジスタの内容 + P) < Q? のテスト	Q N 60 1P 10	i Q , incp / nn.
AC1 の T 部を I レジスタに移す	0 N 60 10 x	f , ist / nn.
(I) を AC1 の T 部へクリヤ加算	0 N 60 10 y	i , icla / nn.
(I) を AC1 の T 部へ加算	0 N 60 11 y	i , iadd / nn.
(I) を AC1 の T 部より減算	0 N 60 12 y	i , isub / nn.
(I) を Q とする	Q N 60 10 z	i Q , iset / nn.

命 令 内 容	機 械 用 語	D. P. L. 用 語
T をマークし C, N の命令にとぶ	T N C 60 0	(i) jmp tt / c nn.
ライン C のマークされたワード T の命令にとぶ	T N C 60 1	jret / c.
無条件に C, N の命令にとぶ	T N C 60 2	junc / c nn.
(S, T) を AC1 に入れたその命令を実行する	T N S 60 4	jump / ss tt nn.
(S, T) を AC1 に加算し、その結果を実行する	T N S 60 5	jax / ss tt nn.
ベルを鳴らす	u L1 N 00 60 x	ring / nn.
計算を停止する	T N 00 60 z	halt / nn.
(40・41)≠0? のテスト, =0 なら N, ≠0 なら N+1 にとぶ	(u) T N 00 61 0 (-)	(i) (wvw), bt 41 / tt nn.
(40・41)≠0? のテスト, # #	(u) T N 00 61 1 (-)	(i) (wvw), bf 41 / tt nn.
(48・AC1)≠0? のテスト, # #	(u) T N 00 61 6 (-)	(i) (wvw), bt x / tt nn.
(48・AC1)≠0? のテスト, # #	(u) T N 00 61 7 (-)	(i) (wvw), bf x / tt nn.
(40・AC3)≠0? のテスト, # #	(u) T N 00 61 8 (-)	(i) (wvw), bt z / tt nn.
(40・AC3)≠0? のテスト, # #	(u) T N 00 61 9 (-)	(i) (wvw), bf z / tt nn.
(S, T)≦0? のテスト, =0 なら N, >0 なら N+1, <0 なら N+2	T N 00 61 u (-)	(i) bif / ss tt nn.
オーバーフローのテスト	T N 00 61 v	bov / tt nn.
入出力動作完了のテスト	T N 00 61 x	wait / tt nn.
(S, T)<0? のテスト, ≧0 なら N, <0 なら N+1 にとぶ	(u) T N 00 61 y (-)	(i) (wvw), bng / ss tt nn.
(S, T)≠0? のテスト, =0 なら N, ≠0 なら N+1 にとぶ	(u) T N 00 61 z (-)	(i) (wvw), bnz / ss tt nn.
M 番のテープパンチャでファイルコードをパンチする	L2 N 61 M0 1	m0 mfp / nn.
M 番の磁気テープにライン 39 を書く	L2 N 61 M0 2	m0 wmt / nn.
M 番の磁気テープにファイルコードを書く	L2 N 61 M0 3	m0 mfmt / nn.
M 番のテープリーダー上のストップコードを順方向に捜す	L3 N 61 MK 4	mk dfsp / nn.
# ファイルコード #	L2 N 61 MK 5	mk dffp / nn.
M 番の磁気テープのファイルコードを順方向に捜す	L2 N 61 MK 7	mk dffm / nn.
(AC1) を M 番のタイプライターでタイプアウトする	L2 N 61 M1 8	m0 typ x / nn.
(AC2) #	L2 N 61 M2 8	m0 typ y / nn.
(AC3) #	L2 N 61 M3 8	m0 typ z / nn.
(L39) #	L2 N 61 M0 9 (-)	m0 typ 39 / nn.
(L39) を M 番のテープパンチャでパンチする	L2 N 61 M0 u (-)	m0 ppt(s) / nn.
M 番のタイプライターのインプットにする	L2 N 61 M0 w	m0 gate / nn.
M 番の磁気テープを読み込む	L2 N 61 M0 x	m0 rmt / nn.
M 番の紙テープを読み込む	L2 N 61 M0 y	m0 rpt / nn.
入出力動作を停止する (計算にはいる)	L2 N 63 00 0	go / nn.
N モード入力 (数字入力) にセットする	L1 N 63 00 6	for n / nn.
A モード入力 (アルファベット入力) #	L1 N 63 00 7	for a / nn.
C モード入力 (コマンド入力) #	L1 N 63 00 8	for c / nn.
F モード入力にセットする	L1 N 63 00 9	for f / nn.
S ラインの最大の固定小数点を ER に、そのワードを AC2 に入れる	u L N S 62 1 (-)	(i) wvw max / ss nn.
37 と S ラインの対応する固定小数点数を群加算し 38 ラインに入れる	u L N S 62 3 (-)	(i) wvw addg / ss nn.
AC2 の 10 進数を 2 進数に変換し ER に入れる	u L N 00 62 4 (-)	(i) wvw dtb / nn.
AC2 の 2 進数を 10 進数に変換し ER に入れる	u L N 00 62 5 (-)	(i) wvw btd / nn.
S ラインの固定小数点のうち ER より大きい最初の数を ER に、番地を AC2 に入れる	u L N S 62 7 (-)	(i) wvw lrg / ss nn.
S ラインの数のうち ER と一致するもののワードを AC2 に残す	u L N S 62 8 (-)	(i) wvw leqw / ss nn.
S ラインの数のうち ER と一致するものを捜し、それに対応する 38 ラインの数を AC2 に入れる	u L N S 62 9 (-)	(i) wvw leq / ss nn.
S ラインの固定小数点のいずれも AC2 を群乗算しライン 38 に入れる	u L N S 62 w (-)	(i) wvw cgs / ss nn.
(S, T)×(AC2) を AC2 に入れる (高速固定小数点乗算) (連乗)	(u) T N S 62 x (-)	(i) (wvw), mpyf / ss tt nn.
(ER)÷(S, T) を ER に入れる (高速固定小数点除算)	T N S 62 z (-)	(i) divf / ss tt nn.
S ラインの最大の浮動小数点数を ER に、そのワードを AC2 に入れる	u L N S 63 1 (-)	(i) wvw fmax / ss nn.
37 と S ラインの対応する浮動小数点数を群加算し 38 ラインに入れる	u L N S 63 3 (-)	(i) wvw fadg / ss tt nn.
(ER)+(S, T) を ER に入れる (浮動小数点加算)	(u) T N S 63 5 (-)	(i) (wvw), fad / ss tt nn.
(ER)-(S, T) # (# 減算)	(u) T N S 63 9 (-)	(i) (wvw), fsb / ss tt nn.
(ER)×(S, T) # (# 乗算)	(u) T N S 63 x (-)	(i) (wvw), fmp / ss tt nn.
(ER)÷(S, T) # (# 除算)	T N S 63 z (-)	(i) (wvw), fdiv / ss tt nn.

T: ワードタイム
L: 相対ワード時
N: 次の命令のワード位置
S: 情報源のライン番号
D: 情報送り先のライン番号
C: コマンドライン番号
M: 入出力装置番号
K: ブロック数 (テープ)
u: ブロック命令サフィックス
I: インデックスレジスタの番号
B: ビット数
-: 情報度指定

u: ワードタイム
ss: 情報源のライン番号あるいはニックネーム
dd: 情報送り先のライン番号あるいはニックネーム
nn: 次の命令のワード位置
c: コマンドライン番号
wvw: ブロック数 (ワード数)
m: 入出力装置番号
k: ブロック数 (テープ)
i: インデックス番号 (wvw または tt をモディファイする)
bb: ビット数
m: AC1, AC2, AC3 のニックネーム x, y, z および ID, PN, MQ のニックネーム i, p, m
/, /: セパレータ

表 3.2 ASIA System の 命 令

(1) 数字のない無番地命令			
halt ()			自動計算を中止して手動操作に移れ
bell ()			ベルを1回ならせ
typl ()			最後に実施した命令の Loc. をタイプせよ
rtna ()			a マークのある直後の Loc. 命令にとべ
rtnb ()			b マークのある直後の Loc. の命令にとべ
(2) レジスタ内容の操作命令			
rsn-to ()			レジスタ内容を rsn とせよ
rsn-ao ()		a	" " " "
rsn-bn ()			番号の b レジスタ内容を rsn とせよ
rsn-dn ()		b	d " " "
rsn-cn ()		"	c " " "
rsn-bn ()		a	b レジスタ内容を # 番 b レジスタに移せ
rsn-dn ()		"	" " d " "
rsn-cn ()		"	" " c " "
rsn-an ()			# 番 b レジスタ内容を a レジスタに移せ
rsn-dn ()		d	" " " "
rsn-cn ()		c	" " " "
(3) 特殊数値指定の無番地命令			
rsn-etc ()			rsn 個の tab 動作と、# 個のキリジレタンのタイプ/リフト操作を行なえ
rsn-etc ()			rsn-etc () をタイプアウトせよ
(4) 番地指定のある命令			
anin ()		rsn1(rs2)	rsn1 と rs2 と引続く #1 個の番地へ c モードでタイプインせよ
ancr ()		" ()	" 番地と引続く #1 個の番地の内容をタイプアウトしてキリジレタン
sbrt ()		" ()	" 番地から始まるサブルーチンへ移行せよ
list ()		" ()	" 番地から #1 で指定された自動リステイングを開始せよ
ib<c ()		" ()	(#b) に (#d) を加算して結果が (#c) より小なれば rsn1(rs2) へとべ
db>c ()		" ()	" から " を減算して " より大なれば " "
auto ()		" ()	rsn1(rs2) 番地から自動計算を開始せよ
jump ()		" ()	無条件に rsn1(rs2) へとべ
jt=0 ()		" ()	(t) が零でなければ rsn1(rs2) 番地へとべ
ja=0 ()		" ()	(a) " " " "
jt<0 ()		" ()	(t) が負であれば " "
ja<0 ()		" ()	(a) " " " "
jovf ()		" ()	オーバーフローしておれば " "
jsa ^e ()		" ()	スイッチが断であれば " "
jmka ()		" ()	Loc. に "a" マークして "
jmkb ()		" ()	Loc. に "b" マークして "
*clr ()		rsn1(rs2)	rsn1(rs2) をクリアせよ
pntr ()		" ()	" を紙テープへパンチアウトせよ
cntr ()		rsn1(rs2)	rsn1(rs2) 番地のコマンドをタイプしてキリジレタン動作せよ
cmtr ()		" ()	" をタイプしてタブ動作せよ
fscr ()		" ()	" の FX 数をタイプしてキリジレタン動作せよ
fsrb ()		" ()	" をタイプしてタブ動作せよ
hscr ()		" ()	" の HX 数をタイプしてキリジレタン動作せよ
hrtr ()		" ()	" をタイプしてタブ動作せよ
bpon ()		" ()	" のコマンドにブレークポイントを付加せよ
bpof ()		" ()	" " の " を取り去れ
emin ()		" ()	" へコマンドをタイプインせよ
evin ()		" ()	" へ FX 数 "
hvin ()		" ()	" へ HX 数 "
(5) 算術演算命令			
cad ()		a(rs1)rs2	rs1 と rs2 を加算
add ()		" ()	加算
aba ()		" ()	絶対値加算
csb ()		" ()	クリヤ減算
sbt ()		" ()	減算
sba ()		" ()	絶対値減算
caba ()		" ()	クリヤ絶対値加算
csba ()		" ()	クリヤ絶対値減算
mlt ()		" ()	(α) との乗算
str ()		" ()	(α) より記憶
div ()		a(rs1)rs2	(a) を除算
rnd ()		" ()	(α) で "
a*t+ ()		" ()	級数計算
a*t- ()		" ()	交差級数計算
*add ()		" ()	群加算
*aba ()		" ()	群絶対値加算
*sbt ()		" ()	群減算
*sba ()		" ()	群絶対値減算
mean ()		" ()	平均値
sqrt ()		" ()	平方根

(註)
 {a} : a, その他の内容
 #1 : 10 位の 10 進数
 #2 : 1 位の " "
 α0 : α-2
 rs : 0-3 (α0 のサブアクセス)
 rs : インデックス番地
 a : a または t
 () : タブ動作
 / : a, t を指定しない

(注) アドレスの例 32u25...u3 番の k レジスタでモディファイされた 32u2 番地 (u)=16 ならば 絶対番地は 1832 番地である。

参 考 文 献

(1) 豊田・中塚・吉江, ほか: 計数形電子計算機の特異演算高速化方式, 「三菱電機」34, No. 11, p. 13 (昭 35).

(2) 豊田・中塚・吉江・首藤: 遅延線方式による演算高速化, 昭和 35 年情報処理学会全国大会予稿 (昭 35-11).

(3) 豊田: 電子計算機の機能と総合演算の高速化, 情報処理学会関西講演会資料 (昭 35-10).

(4) 前田: 磁気円筒記憶装置, 「三菱電機」, 34, No. 12, p. 80 (昭 35).

(5) 穂坂: 遅延線を用いるラック演算について, 情報処理学会誌 1, 99 (昭 35-9).

(6) 中塚・壺井: 計数形電子計算機 MELCOM-LD1 の論理要素, 「三菱電機」34, No. 12, p. 71 (昭 35).

(7) 豊田・吉江・首藤: 2 進電子計算機における数変換の一手法, 昭和 36 年電気四学会連合大会講演論文集 (昭 36-4).

(8) 吉江・首藤・菅: 2 進電子計算機における浮動小数点演算の一手法, 昭和 36 年電気四学会連合大会講演論文集 (昭 36-4).

(9) 吉江・首藤・魚田: 2 進電子計算機における直並列論理回路による高速乗除算の一手法, 昭和 36 年電気四学会連合大会講演論文集 (昭 36-4).

(10) 中塚・前田・壺井: MELCOM-LD1 のインテックス方式とアウトラット方式, 昭和 35 年度情報処理学会全国大会予稿 (昭 35-11).

(11) 中塚・前田・小林: MELCOM-LD1 のインラット方式, 昭和 36 年電気四学会連合大会講演論文集 (昭 36-4).

(12) 菅: Theory of Sequator and its Application to Programming, 昭和 35 年度春季数学学会予稿 (昭 35).

(13) 菅・関本・魚田: 広義の Minimum Access 法による自動プログラム MUSE について, 昭和 35 年度情報処理学会全国大会予稿 (昭 35-11).

(14) 菅・関本・魚田: MUSE について, 数理学総合研究第 4 班シンポジウム予稿 (昭 36-1).

(15) 菅・関本・魚田: MUSE について, 関西プログラミング研究会資料 (昭 35-11).

(16) 豊田・吉江・菅: MELCOM-LD1 の PROGRAM SYSTEM, 関西プログラミング研究会資料 (昭 35-11).

数 値 計 算 の 誤 差

研 究 所 馬 場 準 一*・林 重 雄*

Evaluation of Errors due to Numerical Calculations

Research Laboratory Jun-ichi BABA・Shigeo HAYASHI

Herein are discussed errors in numerical solutions of ordinary differential equations often coming out on engineering problems. An important problem in this case is how to select the time interval Δt as a step of the calculation. Though Runge-Kutta method suggest that the error is in the order of $(\Delta t)^5$, this helps little in an actual solution. From the practical viewpoint it is essential to know the distortion of solution in commercial calculations of related differential equations. The writers, realizing this solution becoming a solution of a constant difference equation, employ z transformation to study the distortion and show what value is to be selected as a step Δt in the calculation to analyze the problem. In this paper, however, the transaction error only is discussed without referring to the round off error.

1. ま え が き

過渡現象の関与してくる工学上の種々の問題の解析には、微分方程式の数値解法が必要となってくる。その場合に、計算の1ステップの時間間隔 Δt をどのように選定すればよいかということは、常に問題となるところである。応用数学の書物には、たとえば Runge-Kutta 法によるときは、計算誤差は $(\Delta t)^5$ のオーダーであるというような記述をみるが、これでは、実際の問題を解くときの誤差がどの程度であるかを推測することはむずかしい。

誤差を正しく評価するためには、問題を記述する微分方程式について、数値計算による解の変わり(時定数、周波数の変化)を知ることが必要である。

筆者らは、数値計算による解は、定差方程式の解となることに注目し、 z 変換を用いて数値計算による解の変わりを調べ、問題の解析において、計算のステップ Δt としてどのような値を選定すべきかを示した。

2. 線形連立常微分方程式の形式

一般に線形連立常微分方程式では、1階以上の微係数を

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i, \quad \frac{d^2x_i}{dt^2} = \frac{du_i}{dt} = v_i, \quad \frac{d^3x_i}{dt^3} = \frac{dv_i}{dt} = w_i, \dots$$

とおくことによって、

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} + \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j &= b_i \quad (i=1 \sim n) \\ t=0 \text{ で } x_i &= x_{i0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.1)$$

あるいは行列の形式で

$$\left. \begin{aligned} \frac{d[x]}{dt} + [A][x] &= [B] \\ t=0 \text{ で } [x] &= [x_0] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2.2)$$

と表わすことができる。系は線形であるから、重ね合せの理がなり立つ。したがって b_i が定数の場合について論じておけば十分である。

これをラプラス変換して

$$s[x] + [A][x] = [B]/s + [x_0] \dots\dots\dots(2.3)$$

のように書くことができる。

3. 数値計算法

ここでは、数値計算法として

(i) Euler 法

$$\frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t} \dots\dots\dots(3.1)$$

で近似するもの。

(ii) Modified Euler 法

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right)}{dt} &\rightarrow \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t} \\ x\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) &\rightarrow \frac{1}{2}[x(t+\Delta t) + x(t)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.2)$$

で近似するもの。

(iii) Runge-Kutta 法

後述のように4個の階差 $\Delta^I x_i, \Delta^II x_i, \Delta^III x_i, \Delta^IV x_i$ の加重平均をとって Δx を求めるもの

$$\Delta x_i = \frac{1}{6}(\Delta^I x_i + 2\Delta^II x_i + 2\Delta^III x_i + \Delta^IV x_i) \dots\dots\dots(3.3)$$

を示す。

4. 線形連立常微分方程式の記号解

2章の式(2.2)で示した線形連立常微分方程式は、記号的⁽¹⁾⁽²⁾に解けて、

$$x = [A]^{-1}\{[I] - e^{-[A]t}\} \{[B] - [A][x_0]\} + [x_0] \dots\dots\dots(4.1)$$

[I]: 単位行列

$$e^{-[A]t} = [I] - [A]t + \frac{[A]^2}{2!}t^2 - \frac{[A]^3}{3!}t^3 + \dots\dots\dots(4.2)$$

ここで、 $e^{-[A]t}$ を Sylvester の定理を用いて展開すると、

$$e^{-[A]t} = \sum_{r=1}^m e^{-\alpha_r t} [K(\alpha_r)] \dots\dots\dots(4.3)$$

α_r は [A] の特有用根であって、これは一般には複素数で

ある.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_r &= a_r + jb_r \\ \det\{\alpha_r[I] - [A]\} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4.4)$$

$$[K(\alpha_r)] = \prod_{s \neq r}^{s=1, \dots, n} \frac{\alpha_s[I] - [A]}{\alpha_s - \alpha_r} \dots\dots\dots(4.5)$$

ただし, $\alpha_r (r=1, 2, \dots, n)$ はすべて異なるものとする.

これを式(4.1)に代入して

$$\begin{aligned} [x] &= [A]^{-1}[B] - \sum_{r=1}^n [A]^{-1} \left\{ \prod_{s \neq r}^{s=1, \dots, n} \frac{\alpha_s[I] - [A]}{\alpha_s - \alpha_r} \right\} \\ &\quad \times \{[B] - [A][x_0]\} e^{-\alpha_r t} \\ &= [\alpha] + \sum_{i=1}^n [\beta_i] e^{-a_i t} (\cos b_i t - j \sin b_i t) \dots\dots\dots(4.6) \end{aligned}$$

あるいは式(4.6)をラプラス変換して

$$\left. \begin{aligned} [x(s)] &= \frac{[\alpha]}{s} + \sum_{i=1}^n \frac{[\beta_i]}{s + a_i + jb_i} \\ \text{ただし} \\ [\alpha] &= [A]^{-1}[B] \\ [\beta_i] &= -[A]^{-1} \prod_{s \neq r}^{s=1, \dots, n} \frac{\alpha_s[I] - [A]}{\alpha_s - \alpha_r} \{[B] - [A][x_0]\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4.7)$$

5. Euler 法

Euler 法で解くときは

$$\{x_i(t+\Delta t) - x_i(t)\} / \Delta t + \sum a_{ij} x_j(t) = b_i \dots\dots\dots(5.1)$$

あるいは行列の形式で

$$\{[x(t+\Delta t)] - [x(t)]\} / \Delta t + [A][x(t)] = [B] \dots\dots\dots(5.2)$$

$[x]$ の初期値が $[x_0]$ であることに注目して, z 変換すれば, 式(5.2)は

$$\frac{(z-1)[x(z)]}{\Delta t} + [A][x(z)] = [B] \frac{z}{z-1} + \frac{z}{\Delta t} [x_0] \dots\dots\dots(5.3)$$

ここで, $\frac{z-1}{\Delta t} = p$ とおけば

$$p[x] + [A][x] = \frac{z}{\Delta t} \left\{ \frac{[B]}{p} + [x_0] \right\} \dots\dots\dots(5.4)$$

式(5.4)と式(2.3)を対比すれば, 式(5.4)は式(2.3)において $[B]$, $[x_0]$ をそれぞれ $z/\Delta t$ 倍したものに等しいから, 式(5.4)の解は, 式(4.7)を参照して記号的に下記のようになる.

$$[x] = \frac{z}{\Delta t} \frac{[\alpha]}{p} + \sum_{i=1}^n \frac{[\beta_i]}{p + a_i + jb_i} \dots\dots\dots(5.5)$$

$p = \frac{z-1}{\Delta t}$ を代入して

$$[x(z)] = [\alpha] \frac{z}{z-1} + \sum_{i=1}^n \frac{[\beta_i]z}{z - (1 - a_i \Delta t - jb_i \Delta t)} \dots\dots\dots(5.6)$$

ここで, 付録(1)を参照して, 時間領域に変換すれば,

$$[x(t)] = [\alpha] + \sum_{i=1}^n [\beta_i] e^{-a_i t} (\cos b_i t - j \sin b_i t) \dots\dots\dots(5.7)$$

式(5.7)と式(4.6)を対比してみると, Euler法によって,

$$\left. \begin{aligned} a_i &\rightarrow a_i' \\ b_i &\rightarrow b_i' \end{aligned} \right\} \text{と変わいしていることがわかる.}$$

6. Modified Euler 法

Modified Euler 法で解くときには,

$$\{x_i(t+\Delta t) - x_i(t)\} / \Delta t + \frac{1}{2} \sum a_{ij} \{x_i(t+\Delta t) + x_i(t)\} = b_i \dots\dots\dots(6.1)$$

あるいは

$$\begin{aligned} \{[x(t+\Delta t)] - [x(t)]\} / \Delta t + \frac{1}{2} [A] \{[x(t+\Delta t)] + [x(t)]\} \\ = [B] \dots\dots\dots(6.2) \end{aligned}$$

$[x]$ の初期値が $[x_0]$ であることに留意して, z 変換すれば, 式(6.2)は

$$\begin{aligned} \frac{(z-1)}{\Delta t} [x] + \frac{(z+1)}{2} [A][x] \\ = [B] \frac{z}{z-1} + \frac{z}{\Delta t} [x_0] + \frac{1}{2} z [A][x_0] \dots\dots\dots(6.3) \end{aligned}$$

両辺に $\frac{2}{z+1}$ を乗じ, 整理すれば

$$\begin{aligned} \frac{2(z-1)}{\Delta t(z+1)} [x] + [A][x] \\ = \frac{2z}{\Delta t(z+1)} \left\{ \frac{[B]}{2(z-1)} [x_0] \right\} \\ - \frac{z}{z+1} \{[B] - [A][x_0]\} \dots\dots\dots(6.4) \end{aligned}$$

ここで, $\frac{2(z-1)}{\Delta t(z+1)} = p$ とおけば,

$$\begin{aligned} p[x] + [A][x] \\ = \frac{2z}{\Delta t(z+1)} \left\{ \frac{[B]}{p} + [x_0] \right\} \\ - \frac{z}{z+1} \frac{2(z-1)}{\Delta t(z+1)} \frac{[B] - [A][x_0]}{p} \dots\dots\dots(6.5) \end{aligned}$$

この式の記号解は

$$p[x_1] + [A][x_1] = \frac{2z}{\Delta t(z+1)} \left\{ \frac{[B]}{p} + [x_0] \right\} \dots\dots\dots(6.6)$$

$$p[x_2][A][x_2] = -\frac{z-1}{z+1} \frac{2z}{\Delta t(z+1)} \frac{[B] - [A][x_0]}{p} \dots\dots\dots(6.7)$$

なる2式の解を重ね合わせたものである.

すなわち

$$[x] = [x_1] + [x_2] \dots\dots\dots(6.8)$$

式(6.6)に対する解は, 式(2.3)と対比することによって, 式(4.7)を参照して,

$$[x_1] = \frac{2z}{(\Delta t)(z+1)} \left\{ \frac{[\alpha]}{p} + \sum_{i=1}^n \frac{[\beta_i]}{p + a_i + jb_i} \right\} \dots\dots\dots(6.9)$$

$p = \frac{2(z-1)}{\Delta t(z+1)}$ を代入して

$$\begin{aligned} [x_1(z)] &= [\alpha] \frac{z}{z-1} \\ &\quad + \sum_{i=1}^n \frac{[\beta_i]z}{\left(1 + \frac{a_i + jb_i}{2} \Delta t\right) z - \left(1 - \frac{a_i + jb_i}{2} \Delta t\right)} \dots\dots\dots(6.10) \end{aligned}$$

式(6.7)に対する解は, これを式(6.6)と対比して,

$$[B] \rightarrow [B] - [A][x_0]$$

$$[x_0] \rightarrow 0$$

$$\frac{2z}{\Delta t(z+1)} \rightarrow -\frac{z-1}{z+1} \frac{2z}{\Delta t(z+1)}$$

となっただけであることに注目すれば,

$$[x_2] = -\frac{z-1}{z+1} \frac{2z}{\Delta t(z+1)} \left[\frac{[\alpha] - [x_0]}{p} + \sum_{i=1}^n \frac{[\beta_i]}{p + a_i + jb_i} \right] \dots\dots\dots(6.11)$$

となる。 $p = \frac{2(z-1)}{\Delta t(z+1)}$ を代入して

$$[x_2(z)] = -\frac{z}{z+1} \left[\{[\alpha] - [x_0]\} + \sum_{i=1}^n \frac{[\beta_i] \cdot [z-1]}{\left(1 + \frac{a_i + j b_i}{2} \Delta t\right) z - \left(1 - \frac{a_i + j b_i}{2} \Delta t\right)} \right] \quad (6.12)$$

かくて式 (6.10), (6.12) より

$$[x] = [x_1] + [x_2] \\ = [\alpha] \frac{z}{z-1} + \sum_{i=1}^n \frac{[\beta_i] z}{z - \left(1 - \frac{a_i + j b_i}{2} \Delta t\right)} - \frac{z}{z+1} \left\{ [\alpha] - [x_0] + \sum_{i=1}^n [\beta_i] \right\} \quad (6.13)$$

しかるに式 (4.6) にて、 $t=0$ とすれば

$$[x_0] = [\alpha] + \sum_{i=1}^n [\beta_i] \quad (6.14)$$

であるから、式 (6.13) の $\frac{z}{z+1}$ の係数は 0 となる。したがって

$$[x(z)] = [\alpha] \frac{z}{z-1} + \sum_{i=1}^n \frac{[\beta_i] z}{z - \left(1 - \frac{a_i + j b_i}{2} \Delta t\right)} \quad (6.15)$$

ここで付録 (1) を参照して時間領域に変換すれば、

$$[x(t)] = [\alpha] + \sum_{i=1}^n [\beta_i] e^{-a_i t} (\cos b_i t - j \sin b_i t) \quad (6.16)$$

式 (6.16) と式 (4.6) とを対比してみると、Modified Euler 法によって、

$$\left. \begin{array}{l} a_i \rightarrow a'_i \\ b_i \rightarrow b'_i \end{array} \right\} \text{と変わいしていることがわかる。}$$

7. Runge-Kutta 法

Δx_i をうるための 4 つの階差は次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta^1 x_i &= (b_i - \sum_j a_{ij} x_j) \Delta t \\ \Delta^2 x_i &= \left[b_i - \sum_j a_{ij} \left(x_j + \frac{\Delta^1 x_j}{2} \right) \right] \Delta t \\ \Delta^3 x_i &= \left[b_i - \sum_j a_{ij} \left(x_j + \frac{\Delta^2 x_j}{2} \right) \right] \Delta t \\ \Delta^4 x_i &= \left[b_i - \sum_j a_{ij} \left(x_j + \Delta^3 x_j \right) \right] \Delta t \\ \therefore \Delta x_i &= \frac{1}{6} (\Delta^1 x_i + 2\Delta^2 x_i + 2\Delta^3 x_i + \Delta^4 x_i) \\ &= \left\{ b_i (\Delta t) - \frac{1}{2} (\sum_j a_{ij} b_j) (\Delta t)^2 \right. \\ &\quad + \frac{1}{6} (\sum_j \sum_k a_{ij} a_{jk} b_k) (\Delta t)^3 \\ &\quad - \frac{1}{24} (\sum_j \sum_k \sum_l a_{ij} a_{jk} a_{kl} b_l) (\Delta t)^4 \left. \right\} \\ &\quad - \left\{ (\sum_j a_{ij} x_j) \Delta t - \frac{1}{2} (\sum_j \sum_k a_{ij} a_{jk} x_k) (\Delta t)^2 \right. \\ &\quad + \frac{1}{6} (\sum_j \sum_k \sum_l a_{ij} a_{jk} a_{kl} x_l) (\Delta t)^3 \\ &\quad \left. - \frac{1}{24} (\sum_j \sum_k \sum_l \sum_m a_{ij} a_{jk} a_{kl} a_{lm} x_m) (\Delta t)^4 \right\} \quad (7.1) \end{aligned}$$

これを行列の形式で表わして

$$[\Delta x] = [K][B] - [K][A][x] \quad (7.2)$$

$$[K] = (\Delta t)[I] - \frac{1}{2}[A](\Delta t)^2 \\ + \frac{1}{6}[A]^2 \Delta t^3 - \frac{1}{24}[A]^3 (\Delta t)^4 \quad (7.3)$$

$[I]$: 単位行列

ここで $[x]$ の初期値が $[x_0]$ であることに留意して z 変換を施せば

$$(z-1)[x] = [K][B] \frac{z}{z-1} - [K][A][x] + z[x_0] \quad (7.4)$$

ここで、 $z-1=p$ とおけば

$$p(x) + [K][A][x] = z \left\{ \frac{[K][B]}{p} + [x_0] \right\} \quad (7.5)$$

これを式 (2.3) と対比すれば

$$s \rightarrow p \\ \left. \begin{array}{l} [A] \rightarrow [K][A] \\ [B] \rightarrow [K][B] \\ [x_0] \rightarrow [x_0] z \end{array} \right\} \text{と対応せしめることにより}$$

式 (4.6) を参照して

$$[x] = \{[K][A]\}^{-1} [K][B] \frac{z}{p} \\ - z \sum_{r=1}^n [K][A]^{-1} \left\{ \prod_{s=r}^{s=1-n} \frac{\alpha_s [I] - [K][A]}{\alpha'_s - \alpha'_r} \right\} \\ \times \{[K][A] - [K][A][x_0]\} \frac{1}{p + \alpha'_r} \quad (7.6)$$

ここで、 α'_r は $[K][A]$ の特有根で

$$\det \{ \alpha'_r [I] - [K][A] \} = 0 \quad (7.7)$$

付録 (2), (3) に示すように

$$\alpha'_r = (\Delta t) \alpha_r - \frac{(\Delta t)^2}{2} \alpha_r^2 + \frac{(\Delta t)^3}{6} \alpha_r^3 - \frac{(\Delta t)^4}{24} \alpha_r^4 \quad (7.8)$$

$$\prod_{s=r}^{s=1-n} \frac{\alpha_s [I] - [K][A]}{\alpha'_s - \alpha'_r} = \prod_{s=r}^{s=1-n} \frac{\alpha_s [I] - [A]}{\alpha_s - \alpha_r} \quad (7.9)$$

また式 (7.3) よりみるように、 $[K]$ は $[A]$ の整多項式であるから $[K]$ と $[A]$ とは可換である。したがって式 (7.6) は下記のようなになる。

$$[x] = [A]^{-1} [B] \frac{z}{p} - z \sum_{r=1}^n [A]^{-1} \prod_{s=r}^{s=1-n} \frac{\alpha_s [I] - [A]}{\alpha_s - \alpha_r} \\ \times \{[B] - [A][x_0]\} \frac{1}{p + \alpha'_r} \quad (7.10)$$

$p=z-1$ を代入して

$$[x(z)] = [\alpha] \frac{z}{z-1} + \sum_{i=1}^n \frac{[\beta_i] z}{z - (1 - \alpha'_i)} \quad (7.11)$$

ここで、付録 (1) を参照して、時間領域に変換すれば、

$$[x(t)] = [\alpha] + \sum_{i=1}^n [\beta_i] e^{-\alpha'_i t} (\cos b'_i t - j \sin b'_i t) \quad (7.12)$$

式 (7.12) と式 (4.6) とを対比してみると Runge-Kutta 法によって、

$$\left. \begin{array}{l} a_i \rightarrow a'_i \\ b_i \rightarrow b'_i \end{array} \right\} \text{と変わいしていることがわかる。}$$

8. 誤差を所定の大きさ以下に おさえるための分割数

この問題を一般的に議論することはむずかしい。次に簡単な方程式について検討を加え、一般的な問題はその結果より推定することにする。

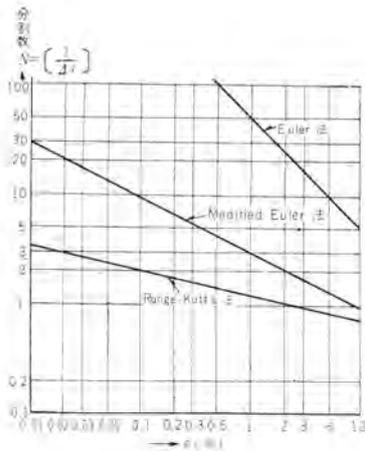


図 8.1 $\frac{dx}{dt} + x = 1.0$ の数値計算誤差

Fig. 8.1 Relations between errors (ϵ) and numbers of divisions (N)

$$\frac{dx}{dt} + x = 1.0$$

(1) $\frac{dx}{dt} + \frac{x}{T} = 0$ を Modified Euler 法で解くときに必要な分割数。

式 (付 1.13) より

$$\text{時定数の誤差 } \epsilon = \frac{1}{12} \left(\frac{\Delta t}{T} \right)^2$$

誤差を $\epsilon\%$ 以下におさえるために必要な分割数は

$$\Delta t \leq \sqrt{\frac{12\epsilon}{100}} T$$

ゆえに、

$$N = \frac{T}{\Delta t} \geq \frac{10}{\sqrt{12\epsilon}} \approx \frac{2.88}{\sqrt{\epsilon}}$$

$T=1$ のときの関係を図 8.1 に示す。

(2) $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$ を Modified Euler 法で解くときに必要な分割数。

式 (付 1.14) より

$$\text{発散率 } \alpha = 0$$

$$\text{周波数誤差 } \epsilon = \frac{1}{12} (\omega \Delta t)^2$$

周波数誤差を $\epsilon\%$ 以下におさえるために必要な分割数は

$$\Delta t \leq \sqrt{\frac{12\epsilon}{100}} \times \frac{1}{\omega}$$

ゆえに

$$N_f = \frac{2\pi}{\omega \Delta t} \geq 2\pi \sqrt{\frac{10}{12\epsilon}} \approx \frac{18.2}{\sqrt{\epsilon}}$$

$\omega=1$ のときの関係を図 8.2 に示す。

(3) $\frac{dx}{dt} + \frac{x}{T} = 0$ を Runge-Kutta 法で解くときに必要な分割数

式 (付 1.6) より

$$\text{時定数の誤差 } \epsilon = \frac{1}{120} \left(\frac{\Delta t}{T} \right)^4 \exp\left(\frac{\Delta t}{T}\right)$$

誤差を $\epsilon\%$ 以下におさえるために必要な分割数は、

$$\Delta t \exp\left(\frac{\Delta t}{4T}\right) \leq \sqrt[4]{\frac{120\epsilon}{100}} T$$

数値計算の誤差・馬場・林

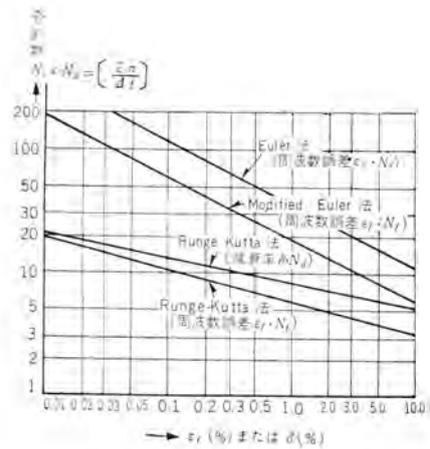


図 8.2 $\frac{d^2x}{dt^2} + x = 0$ の数値計算誤差

Fig. 8.2 Relations between errors (ϵ) and numbers of divisions (N)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + x = 0$$

$$N \exp\left(-\frac{1}{4N}\right) \geq \sqrt[4]{\frac{100}{120\epsilon}} \approx \frac{0.96}{\sqrt[4]{\epsilon}}, \quad N = \frac{T}{\Delta t}$$

$T=1$ のときの関係を図 8.1 に示す。

(4) $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$ を Runge-Kutta 法で解くときに必要な分割数。

式 (付 1.8) より

$$\text{減衰率 } \delta = \frac{\pi}{72} (\omega \Delta t)^2$$

$$\text{周波数誤差 } \epsilon = \frac{(\omega \Delta t)^4}{120}$$

減衰率を $\delta\%$ 以下におさえるために必要な分割数は

$$\Delta t \leq \sqrt[5]{\frac{72\delta}{100\pi}} \times \frac{1}{\omega}$$

ゆえに

$$N_d = \frac{2\pi}{\omega \Delta t} \geq \sqrt[5]{\frac{100\pi}{72\delta}} \times 2\pi = \sqrt[5]{\frac{100\pi}{72\delta}} \times 2\pi \approx 8.4 \sqrt[5]{\frac{1}{\delta}}$$

周波数誤差を $\epsilon\%$ 以下におさえるために必要な分割数は、

$$\Delta t \leq \sqrt[4]{\frac{120\epsilon}{100}} \times \frac{1}{\omega}$$

ゆえに

$$N_f = \frac{2\pi}{\omega \Delta t} \geq \frac{2\pi}{\sqrt[4]{1.2\epsilon}} = \frac{2\pi}{\sqrt[4]{1.2\epsilon}} \approx \frac{6}{\sqrt[4]{\epsilon}}$$

$\omega=1$ のときの δ , N_d および ϵ , N_f の関係を図 8.2 に示す。

9. む す び

定数係数線形常微分方程式の解の特性は、時定数および振動の周波数によって定まることに着目し、数値計算の誤差により、これらの量が変わいする程度を明らかに

表 9.1 時定数または周波数誤差を 1% 以下に取るために必要な時間間隔 (Δt)

数値計算法	Δt
Modified Euler 法	系の最小時定数の 1/5 または最小振動周期の 1/20 のいずれか小さい方
Runge-Kutta 法	系の最小時定数の 1/2 または最小振動周期の 1/10 のいずれか小さい方

した。この結果より実際に数値計算を行う場合に必要なきさみの大きさを決定することができる。

工学上の問題では、計算誤差を1%ぐらにとれば十分な場合が多い。これに対して適切な分割数は表9.1に示すとおりである。

なお、この論文においては、打ち切り誤差 (Truncation error) のみについて論じ、まるめ誤差 (Round off error)

付

(1) z 領域より時間領域への変換 (Runge-Kutta 法の場合について)

$X(z) = \frac{z}{z - (1 - \alpha_r')}$ を時間領域に変換したときどのようなようになるかを調べてみる。

式(7.8)よりみるように、 $\alpha_r = a_i + jb_i$ とすれば

$$1 - \alpha_r' = \sum_{n=0}^4 (-1)^n \frac{(a_i + jb_i)^n (\Delta t)^n}{n!} \dots\dots\dots (付 1.1)$$

$$e^{-(a_i + jb_i)\Delta t} = 1 - \alpha_r' \dots\dots\dots (付 1.2)$$

で a_i' , b_i' を定義すれば

$$X(z) = \frac{z}{z - e^{-(a_i' + jb_i')\Delta t}} \dots\dots\dots (付 1.3)$$

したがって、

$$X(t) = e^{-(a_i' + jb_i')\Delta t} \dots\dots\dots (付 1.4)$$

(a) $a_i \neq 0, b_i = 0$ の場合

$$e^{-(a_i + jb_i)\Delta t} = \sum_{n=0}^4 (-1)^n \frac{a_i^n (\Delta t)^n}{n!} \approx e^{-(a_i \Delta t) + \frac{(a_i \Delta t)^5}{120}}$$

$$\therefore a_i' \approx -\frac{1}{\Delta t} \ln \left[e^{-(a_i \Delta t) + \frac{(a_i \Delta t)^5}{120}} \right] \approx a_i \left(1 - \frac{(a_i \Delta t)^4}{120} e^{a_i \Delta t} \right)$$

$$b_i' = 0$$

a_i は時定数 T_i の逆数であるから、時定数について調べると

$$T_i' = \frac{1}{a_i'} = \frac{1}{a_i \left\{ 1 - \frac{(a_i \Delta t)^4}{120} e^{a_i \Delta t} \right\}} \approx T_i \left[1 + \frac{1}{120} \left(\frac{\Delta t}{T_i} \right)^4 e^{a_i \Delta t} \right] \dots\dots\dots (付 1.5)$$

したがって、時定数の誤差は

$$\varepsilon = \frac{1}{120} \left(\frac{\Delta t}{T_i} \right)^4 e^{a_i \Delta t} \dots\dots\dots (付 1.6)$$

(b) $a_i = 0, b_i \neq 0$ の場合

$$e^{-(a_i + jb_i)\Delta t} = \sum_{n=0}^4 (-1)^n \frac{(jb_i)^n (\Delta t)^n}{n!} \approx e^{-jb_i \Delta t} + \frac{(jb_i \Delta t)^5}{120} - \frac{(jb_i \Delta t)^6}{720}$$

$$= e^{-jb_i \Delta t} \left[1 + \left\{ \frac{(jb_i \Delta t)^5}{120} - \frac{(jb_i \Delta t)^6}{720} \right\} e^{jb_i \Delta t} \right]$$

$$\approx e^{-jb_i \Delta t} \left[1 + \frac{(jb_i \Delta t)^5}{120} + \frac{(jb_i \Delta t)^6}{144} \right]$$

$$\approx e^{-jb_i \Delta t} \exp \left\{ \frac{(jb_i \Delta t)^5}{120} + \frac{(jb_i \Delta t)^6}{144} \right\}$$

$$\approx \exp \left\{ -jb_i \Delta t \left(1 - \frac{(b_i \Delta t)^4}{120} - j \frac{(b_i \Delta t)^5}{144} \right) \right\}$$

については言及していない。

参考文献

- (1) 林 重憲: 演算子法と過渡現象, 国民科学社 (1948)
- (2) Edwin F. Beckenbach: Modern Mathematics for the Engineer, McGraw Hill Co. (1956), pp. 307~345. L. A. Pipes: Matrices in Engineering.
- (3) 自動制御技術 3: 日本自動制御協会編 (1960) p. 59~p. 74. 近藤文治: 自動制御の基礎理論 (サンプリング制御)

録

$$\therefore a_i' = \frac{b_i (b_i \Delta t)^5}{144}$$

$$b_i' = b_i \left[1 - \frac{(b_i \Delta t)^4}{120} \right] \dots\dots\dots (付 1.7)$$

このときは正解が $e^{-\beta t}$ であるのが、減衰正弦振動 $e^{-\frac{(b_i \Delta t)^4}{144} b_i t} e^{-\beta t} \left[1 - \frac{(b_i \Delta t)^4}{120} \right]^t$ となる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} &1 \text{ サイクル 当りの減衰率 } \delta = 1 - e^{-\frac{(b_i \Delta t)^5}{72} \pi} \\ &\text{周波数誤差 } \varepsilon = \frac{(b_i \Delta t)^4}{120} \end{aligned} \right\} (付 1.8)$$

β の数値のついでで計算は省略するが、Euler 法, Modified Euler 法の誤差も同様にして評価できる。

Euler 法

$$a_i' + jb_i' = -\frac{1}{\Delta t} \ln (1 - a_i \Delta t - jb_i \Delta t) \dots\dots\dots (付 1.9)$$

(a) $a_i \neq 0, b_i = 0$

$$\text{時定数の誤差 } \varepsilon = \frac{\Delta t}{2T_i} \dots\dots\dots (付 1.10)$$

(b) $a_i = 0, b_i \neq 0$

$$\left. \begin{aligned} &1 \text{ サイクル 当りの発散率 } \alpha = e^{\pi(b_i \Delta t)^{-1}} \\ &\text{周波数誤差 } \varepsilon = \frac{1}{3} (b_i \Delta t)^2 \end{aligned} \right\} (付 1.11)$$

Modified Euler 法

$$a_i' + jb_i' = -\frac{1}{\Delta t} \ln \left(\frac{1 - \frac{a_i + jb_i}{2} \Delta t}{1 + \frac{a_i + jb_i}{2} \Delta t} \right) \dots\dots\dots (付 1.12)$$

(a) $a_i \neq 0, b_i = 0$

$$\text{時定数の誤差 } \varepsilon = \frac{1}{12} \left(\frac{\Delta t}{T_i} \right)^2 \dots\dots\dots (付 1.13)$$

(b) $a_i = 0, b_i \neq 0$

$$\left. \begin{aligned} &\text{発散率 } \alpha = 0 \\ &\text{周波数誤差 } \varepsilon = \frac{1}{12} (b_i \Delta t)^2 \end{aligned} \right\} (付 1.14)$$

(2) $\alpha_r' = (\Delta t) \alpha_r - \frac{(\Delta t)^2}{2!} \alpha_r^2 + \frac{(\Delta t)^3}{3!} \alpha_r^3 - \frac{(\Delta t)^4}{4!} \alpha_r^4$ の証明

α_r は $[A]$ の特有根であり、 α_r' は $[KA]$ の特有根である。式(7.3)によって、

$$[KA] = (\Delta t)[A] - \frac{(\Delta t)^2}{2!} [A]^2 + \frac{1}{3!} (\Delta t)^3 [A]^3 - \frac{(\Delta t)^4}{4!} [A]^4$$

行列の特有根に関する Frobenius の定理によれば、 $[A]$ の特有根を α とすれば、行列 $[A]$ の多項式 $P[A]$ の特有根は $P(\alpha)$ であるから、 $[KA]$ の特有根は

$$\alpha_r' = (\Delta t) \alpha_r - \frac{(\Delta t)^2}{2!} \alpha_r^2 + \frac{(\Delta t)^3}{3!} \alpha_r^3 - \frac{(\Delta t)^4}{4!} \alpha_r^4$$

となる。

$$(3) \prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \frac{\alpha_s'[I] - [KA]}{\alpha_s' - \alpha_r'} = \prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \frac{\alpha_s[I] - [A]}{\alpha_s - \alpha_r} \text{ の証明}$$

$$\begin{aligned} & \prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \frac{\alpha_s'[I] - [K][A]}{\alpha_s' - \alpha_r'} \\ &= \prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \frac{\left\{ (\Delta t)\alpha_s - \frac{(\Delta t)^2\alpha_s^2}{2!} + \frac{(\Delta t)^3\alpha_s^3}{3!} - \frac{(\Delta t)^4\alpha_s^4}{4!} \right\} [I]}{\left\{ (\Delta t)\alpha_s - \frac{(\Delta t)^2\alpha_s^2}{2!} + \frac{(\Delta t)^3\alpha_s^3}{3!} - \frac{(\Delta t)^4\alpha_s^4}{4!} \right\}} \\ & \quad * \frac{\left\{ (\Delta t)[A] - \frac{(\Delta t)^2[A]^2}{2!} + \frac{(\Delta t)^3[A]^3}{3!} - \frac{(\Delta t)^4[A]^4}{4!} \right\}}{\left\{ (\Delta t)\alpha_r - \frac{(\Delta t)^2\alpha_r^2}{2!} + \frac{(\Delta t)^3\alpha_r^3}{3!} - \frac{(\Delta t)^4\alpha_r^4}{4!} \right\}} \end{aligned}$$

$$= \left\{ \prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \frac{\alpha_s[I] - [A]}{\alpha_s - \alpha_r} [\delta_s] \right\}$$

$$\begin{aligned} [\delta_s] &= \frac{[I] - \frac{1}{2}(\alpha_s[I] + [A])(\Delta t)}{1 - \frac{1}{2}(\alpha_s + \alpha_r)(\Delta t)} * \\ & \quad + \frac{\frac{1}{6}(\alpha_s^2[I] + \alpha_s[A] + [A]^2)(\Delta t)^2}{\frac{1}{6}(\alpha_s^2 + \alpha_s\alpha_r + \alpha_r^2)(\Delta t)^2} ** \\ & \quad - \frac{\frac{1}{24}(\alpha_s^3[I] + \alpha_s^2[A] + \alpha_s[A]^2 + [A]^3)(\Delta t)^3}{\frac{1}{24}(\alpha_s^3 + \alpha_s^2\alpha_r + \alpha_s\alpha_r^2 + \alpha_r^3)(\Delta t)^3} *** \end{aligned}$$

ここで、一般に、 $\frac{[A]}{a} = \frac{[A] - a[I]}{a} + [I]$ なる関係を利用して、 $[\delta_r]$ を書き換えると

$$[\delta_s] = \frac{\frac{1}{2}(\alpha_r[I] - [A])(\Delta t)}{1 - \frac{1}{2}(\alpha_s + \alpha_r)(\Delta t)} *$$

$$\begin{aligned} & - \frac{\frac{1}{6}(\alpha_r^2[I] + \alpha_r\alpha_r[I] - \alpha_s[A] - [A]^2)}{\frac{1}{6}(\alpha_s^2 + \alpha_s\alpha_r + \alpha_r^2)(\Delta t)^2} ** \\ & \quad + \frac{\frac{1}{24}(\alpha_r^3[I] + \alpha_s\alpha_r^2[I] + \alpha_s^2\alpha_r[I])}{\frac{1}{24}(\alpha_s^3 + \alpha_s^2\alpha_r + \alpha_s\alpha_r^2)} *** \\ & \quad - \frac{\frac{1}{24}(\alpha_s^3[A] - \alpha_s[A]^2 - [A]^3)}{\alpha_r^3(\Delta t)^3} + [I] \end{aligned}$$

したがって

$$[\delta_s] = (\alpha_r[I] - [A])F_s(A) + [I]$$

$F_s(A)$ は、 $[A]$ に関する有限次数の多項式となること
がわかる。したがって、

$$\begin{aligned} & \prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \frac{\alpha_s'[I] - [KA]}{\alpha_s' - \alpha_r'} \\ &= \prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \left[\frac{\alpha_s[I] - [A]}{\alpha_s - \alpha_r} \{ (\alpha_r[I] - [A])F_s(A) + [I] \} \right] \\ &= \left[\prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \frac{F_s(A)}{\alpha_s - \alpha_r} \right] \left[\prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \{ \alpha_s[I] - [A] \} \right] \\ & \quad + \prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \frac{\alpha_s[I] - [A]}{\alpha_s - \alpha_r} \end{aligned}$$

ここで、 α_r は $[A]$ の特有根であるから、Cayley-Hamilton の定理によって、

$$(\alpha_1[I] - [A])(\alpha_2[I] - [A]) \cdots (\alpha_n[I] - [A]) = 0 \quad (r \text{ も含む})$$

$$\therefore \prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \frac{\alpha_s'[I] - [KA]}{\alpha_s' - \alpha_r'} = \prod_{s=r}^{s=1, \dots, n} \frac{\alpha_s[I] - [A]}{\alpha_s - \alpha_r}$$

高出カシリコン・トランジスタ

研究所 吉松 誠一*・山本 隆一*・土佐 雅宜*

High Power Silicon Transistors

Research Laboratory Seiich YOSHIMATSU・Ryuich YAMAMOTO・Masanori TOSA

Demands for high performance and high power transistors are on the increase nowadays. To cope with the situation, development of Si transistors is under way at various quarters. On the part of Mitsubishi, study on them has been made for some time, reaching a stage where the company is on the threshold of producing diffusion base type Si transistors comparing favorably with those of foreign made. This new development has excellent characteristics such as collector inverse voltage of 200 V with small interrupting current, collector saturation resistance of 1.5 ohms, interruption frequency of 5 Mc and thermal resistance of 1°C/W. They will display their ability when adapted for machinery and other industrial purposes. Their application to DC amplifiers, DC-DC converters, inverters, choppers, voltage or current regulators is considered promising, too.

1. ま え が き

Ge トランジスタが出現するや長足の進歩でエレクトロニクスの分野に大きな地歩を占めるようになり、わが国においても主としてラジオ用として急速に生産量が増大し今日にいたっているが、現状では性能上今後の開発に待つべきところが大きく、より高出力、高周波へと開発が進められてきた。しかし Ge トランジスタでは材料面から考えて、高出力で高周波といった両者を兼備した性能を持たせることは不可能である。したがって Ge の後を追って Si 材料の開発が急速に進められてきた。Si トランジスタの大きな特長は Ge より高温で動作すること、逆方向電流が少ないために直流増幅、スイッチ用として有利なことである。このような利点とは逆に製作技術の面では Si は融点が高く、かつ化学的に活性で素材の精製が困難であり、製品としてまとめ上げるときには適当な P-N 接合用および電極用合金材料が見当たらずオーム接触がむずかしいなど、Ge とは異なった新しい問題点を含んでおり、それらの根本的な開発が必要とされていた。しかし今後トランジスタが工業用、機器用の回路素子としてますます広い分野に使用されるようになればなるほど、「高性能のトランジスタ」という要求に合ったものとして Si トランジスタが大きな役割をはたすものと期待される。

表 1.1 に外国で商品化されている代表的な高出力 Si トランジスタの一覧表をかかげた。製法として大きな主流をなす技術としては合金形と拡散形に大

別される。合金形の代表ともいべき Westinghouse 電機会社の 2N1015 は円環状電極構造で、大電力の使用に耐えるようベース、エミッタ円環電極と交互に並べ、ペレット自身も円形で、シール前の表面処理が便利のように接合面はすべて同一表面にできるように構成されている。

これに対し拡散形は一般にペレットは長方形で、電極構造はダグク形またはクシ形を採用し、電流量を大きくするためベース、エミッタを交互に組み合わせた構造である。拡散形の代表ともいべき Pacific Semiconductors 社の三重拡散形 PT900 はクシ形構造である。表中にみられるように、合金形ではコレクタ飽和抵抗 (R_s) は一般に小さく、拡散形では大きい値を示しているが、電極配置、接合の作り方に適当な設計をほどこせば、どちらの形においてもこの値は小さくすることが可能である。高出力トランジスタとして重要な用途であるスイッチ用に使用する場合には、コレクタ飽和抵抗が小さいほど on 状態で

表 1.1 代表的な高出力トランジスタの一覧表

形名	構造	社名	V_{CEmax} (V)	I_{Cmax} (A)	β_{min}	$R_s max$ (Ω)	f_{α} (Mc)	$R_{\theta A max}$ (°C/W)	T_j (°C)
2N389	NPN-D	TEC/TII	60	2	12	5.0	8	2.1	200
2N424	NPN-D	THC/TH	80	2	12	10.0	6	2.1	200
ST400	NPN-D	TEC	60	5	15	2.5	6	2.5	200
2N1208	NPN-D	TEC	60	5	15	1.5	12	0.5	200
2N1212	NPN-D	TEC	60	5	12	2.5	2	0.5	200
2N1016C	NPN-F	WEC	150	5	10	0.5	0.3	0.7	150
2N1015C	NPN-F	WEC	150	5	10	0.75	0.3	0.7	150
2N1488	NPN-D	RCA	100	6	10	2.0	1	2.5	175
2N1490	NPN-D	RCA	100	6	10	0.67	1	2.5	175
PT900	NPN-D	PSI	80	15	10	0.2	50	1.0	150
PT901	NPN-D	PSI	140	15	10	0.2	50	1.0	150
WX-115V	NPN-F	WEC	200	30	10	0.2		0.5	150
WX-115W	NPN-F	WEC	150	30	10	0.2		0.5	150
WX-115X	NPN-F	WEC	100	30	10	0.2		0.5	150

V_{CE} : コレクタエミッタ電圧 I_{Cmax} : 最大定格電流 R_{smax} : コレクタ飽和抵抗 β : 電流増幅率 f_{α} : 応答周波数 $R_{\theta A}$: 熱抵抗 T_j : 接合部温度 F: Fused D: Diffused

WEC: Westinghouse Electric Corp., TEC: Transistron Electric Corp., RCA: Radio Corp. of America, TII: Teras Instrument Inc., PSI: Pacific Semicond. Inc.

の損失が少なく、使用電流が大きくとれる。シヤ断周波数の点からいえば拡散形のほうが大面積で一様なベース幅の制御が容易であり、高周波のもの製作にも有利であって、高出力としても望ましい特性を持っている。

以上のような現状のもとに当社においても、より高出力、高性能であることに重点をおいて、拡散ベース形高出力 Si トランジスタの開発に成功したので結果を報告する。

2. 設計方針

高出力トランジスタを設計する場合に問題となるのは、コレクタ耐圧 (V_{ce0})、コレクタ飽和抵抗 (R_s)、電流増幅率 (h_{FE})、シヤ断周波数 (f_{cb})、スイッチング時間 (t_r, t_f)、熱抵抗 (θ)、最大許容電流 (I_{cmax}) などであるが、とくに高出力トランジスタとして考慮すべき点を二三検討してみよう。

2.1 電流増幅率

ベース接地電流増幅率 (α) は広く知られているように、エミッタ注入率 (γ)、ベース到達率 (β)、コレクタ増幅率 (α^*) の 3 現象に分けて考えられるが、高密度の注入が起こる高出力トランジスタでは、注入のレベルによって γ が変わると同時に再結合速度、ベース抵抗および加速電界に影響を与え複雑な変化を示す。

γ については Moll, Ross 氏ら⁽¹⁾ によって示されたベース、エミッタ接合面が階段状の簡単なモデルによると、P-N-P のものについて

$$\gamma = \frac{R}{R + \frac{1}{q\mu_p(L_n P_0)}} \dots\dots\dots(2.1)$$

である。 R 、 μ_p 、 L_n 、 P_0 はそれぞれベースのシート抵抗、正孔の移動度、電子の拡散距離、エミッタ中のアクセプタ不純物濃度を表わし、 q は電子の電荷である。したがって式 (2.1) 分母第 2 項を簡単に考えると、エミッタ領域中で電子の拡散距離だけの薄板を考えたときのシート抵抗になる。 γ を大きくするためには、この値を小さく、すなわち P_0 を大きくすれば γ は 1 に近づく。しかし注入キャリア密度が大きくなってベース層内でベース電極方向に流れる電流が無視できなくなると、Webster 氏⁽²⁾ によって述べられたように、ベース、バイアス効果によってエミッタ全面で一様な注入が起こらず、実効的に注入率 γ が悪くなる。これは Emeis 氏⁽³⁾ によって定義されたエミッタ実効面積 A_{eff} が小さくなる結果である。したがって高注入のときでも A_{eff} はなるべく変化しないようなベース層および電極配置を設計することが高出力トランジスタとして必要である。ベース到達率 β については α のふるまいを決定する大きな因子ではないが、合金形にくらべ拡散形のほうが処理温度が一般に高いので、寿命時間が短くなり β は小さい。

以上のように、不純物濃度分布によって注入効率の良否が決まり、エミッタ電流の注入レベルによる直流電流増

幅率 α の変化が「ベース・バイアス効果」や、注入キャリアに対応してできる近似平衡状態による「加速電界」の効果や、ベース領域の「伝導度変調」の効果によって起こることなどを考慮して、不純物分布、電極配置の設計を適当に行なうことによって、電流増幅率が大きく、かつ最大許容電流が必要な範囲において大きくなるようにすべきであろう。

2.2 コレクタ飽和抵抗

トランジスタをスイッチに使用する場合には、“on” および “off” 状態でトランジスタの内部消費電力が小さいことが望ましいのは当然であるが、Si トランジスタは逆方向電流が少ないので、“off” 状態での消費電力は小さい。しかし “on” 状態での消費電力はコレクタ飽和抵抗 R_s によって制限を受け、スイッチング用の良否の判定の基準として評価される。Rudenberg 氏⁽⁴⁾ によるとコレクタ飽和電圧 (V_{ce}) は

$$V_{ce} = (V_{JE} - V_{JD}) + R_E I_B + R_C \frac{\beta}{\beta + 1} (I_B + I_C) \dots(2.2)$$

と表わされる。同一の I_B 、 I_C に対してはエミッタ抵抗 R_E 、コレクタ抵抗 R_C によってコレクタ飽和電圧の大小が決まる。合金形のもは一般に R_E 、 R_C が小さいのにくらべ、拡散ベース形では R_C がかなり大きな値になり V_{ce} が大きく、すなわち飽和抵抗 R_s が大きくなる。Bell 研究所における実験⁽⁵⁾ によっても、式 (2.2) は電流値の小さいところで実測値とよく一致するが、高電流になると 2.1 で述べたように、ベース・バイアス効果によってエミッタ全面から一様な注入が起こらず、これがコレクタ側に到着したときにも群電流となって実効的にコレクタ抵抗 R_C を大きくする。したがってコレクタ飽和抵抗を下げるためには、

(i) エミッタ領域を面積に対して周辺部を長く、かつベース電極との間隔を狭くする。

これはベース・バイアス効果によるエミッタ注入率の不均一性を少なくし、 R_s 以外の特性の向上にも役立つことはすでに 2.1 でも述べた。

(ii) コレクタ基体抵抗を下げる。

拡散ベース形では基体自身の固有抵抗を下げたのでは耐圧が悪くなるので、レットの厚さを薄くするか、強度の点で不可能な場合には N-P-N-N⁺ の構造にし、コレクタ側の N は薄く N⁺ を厚くする。

以上は構造上から見た問題点であるが、トランジスタの性能上からは Moll 氏⁽⁶⁾ によって示されたように、反転電流増幅率 (α_I) を 1 に近づけることによって R_s を下げることができる。

2.3 スwitching時間

トランジスタのスイッチ時間は、その使用回路や外部回路によって大幅に異なるので、そのトランジスタのスイッチ時間における性能指数を何に求めるかが問題である。実際問題としても十分一般的な値を求めることは不可能であるが、コレクタ容量 (C_c)、エミッタ遷移容量 (C_T)、シヤ断周波

表 3.1 TJ101 の絶対最大定格

コレクタ・ベース電圧	V_{CB0} (V)	200 max
コレクタ・エミッタ電圧	V_{CE0} (V)	80 max
ベース短絡	V_{CES} (V)	200 max
ベース・エミッタ短絡	V_{EES} (V)	15 max
エミッタ・ベース電圧	V_{EB0} (V)	15 max
コレクタ電流	I_C (A)	5 max
コレクタ損失	P_C (W)	125 max
フランジ温度 25°C	T_J (°C)	150 max
接合部温度		

表 3.2 TJ101 の特性範囲

記号・単位	最小	平均	最大	測定条件
コレクタ・エミッタ断電流	I_{CO} (mA)		10	$V_{CB}=200V$, エミッタ開放
エミッタ・コレクタ断電流	I_{EA} (mA)		1	$V_{EB}=10V$, コレクタ開放
コレクタ・エミッタ電圧・ベース開放	V_{CEO} (V)		80	$I_C=50mA$
直流電流増幅率	h_{FE}	10		$V_{CE}=10V, I_C=1.0A$
直流飽和抵抗	R_S (Ω)	0.5	1.5 2.5	$I_C=1.0A, I_B=200mA$
ベース・エミッタ電圧	V_{BE} (V)		2.5	$V_{CE}=10V, I_C=1.0A$
シャ断周波数	f_{ab} (Mc)		5	$V_{CB}=3V, I_C=300mA$
熱抵抗	θ (°C/W)		1.0	総合マウンティング・フレンジ間

数 (f_{ac}) によっておおむね制限をうける。したがって詳細な設計をほどこすことはむづかしく、基本的な方針としては、

- (i) シャ断周波数 (f_{ac}) を高くすること。
- (ii) コレクタ出力容量 C_C を小さくすること。
- (iii) キャリア蓄積時間を短くすること。

などが考えられ、積極的にスイッチ特性を向上させるためにはベース幅を狭く、コレクタ接合部での不純物濃度を配を小さく、ベース層での少数荷電担体の寿命時間を短くするために故意に金などの不純物を拡散させたりする。しかし他の諸特性とのかね合いを考える必要がある。

3. 実験結果

3.1 構造

当社の Si トランジスタ TJ101 は拡散ベース形 NPN 構造である。拡散形といっても、試料の片面から二重拡散して作る拡散ベース形と、試料の両側から1回の拡散で作る拡散接合形に分類できる。後者は均一な特性のものを製作するのに精密な治具、機械器具が必要であるが、前者はベース幅の制御など特性に影響する製作上の問題点で、機械的精度に左右されることが比較的少ない。したがって一般には拡散ベース形が多く市販されている。

拡散現象は Fick の法則としてよく知られているようにある点の不純物濃度を N_x とすると、一次元では

$$\frac{\partial N_x}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N_x}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

で表わされる。ここで D は拡散定数である。固体表面からの拡散という境界条件を入れて式 (3.1) を解くと

$$\frac{N_x}{N_s} = \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

が求まる。固体内部での不純物濃度 N_x は

- (i) 表面濃度に影響を与える不純物の供給の仕方およびふんい気。

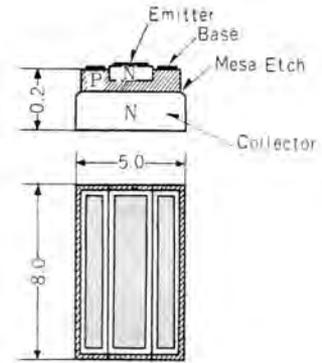


図 3.1 接合面構造
Fig. 3.1 Junction structure of TJ101.

- (ii) 拡散定数 D を決定する拡散温度。
- (iii) 拡散時間 t 。

によって決まり、これらの条件を正確に再現性よく制御すると、容易に大面積の逆方向電流の少ない接合面を作ることができる。

このような拡散機構により、拡散ベース形 NPN Si トランジスタを製作する⁽⁷⁾場合には、まず N 形の基体に P 形の不純物を気相拡散させ、次いで P 形より表面濃度の高い N 形の不純物を拡散させる。表面から x の距離の N 形不純物濃度 $N(x)$ は式 (3.2) を用い次式のようにになる。

$$N(x) = N_B + N_{NS} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}}\right) - N_{PS} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_2 t_2}}\right) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

N 形基体不純物濃度 N_B , P 形不純物表面濃度 N_{PS} , N 形不純物表面濃度 N_{NS} の値がわかれば、 $N(x)=0$ として各エミッタ、コレクタ接合面の深さが判定できる。この方法が二重拡散法である。当社の Si トランジスタ TJ101 は P 形不純物としてガリウムを、N 形不純物としてリンを用い、表面濃度を正確に制御して再現性のよい接合面にするため、ガリウム拡散工程を2回行なって NPN 接合面構造をつくり、ニッケルをエミッタ、ベース電極のオーミック接触とし、メサ・エッチ、マウント、洗浄、防湿を経て、シーリングする。これらの一連の工程は製作技術の面からも比較的容易であり、歩どまりも良好で、同様の工程により中出力から超高出力トランジスタの製作を行なうことができる利点がある。素子の寸法を図 3.1 に示す。

3.2 諸特性

図 3.2~図 3.5 に TJ101 の静特性を示す。各グラフはトランジスタ曲線直視装置によりラウン管上に単一掃引によって描かせ、写真撮影により測定したもので、接合部温度は周囲温度に比べ安定したものであると思われる。

図 3.2 はエミッタ接地のコレクタ出力特性、図 3.3 は入力特性で、コレクタ開放時とコレクタ・ベース間に逆方向電圧 1.5V を加えたときの特性を示している。図 3.4 は入力電圧に対する出力電流、図 3.5 は入力電流に対する出力電流の相互特性を表わしているが、図 3.6 に見られるように、出力電流に対する h_{FE} は電流の広い範囲にわたって直線性が良好であり、直流増幅に使用した場合に

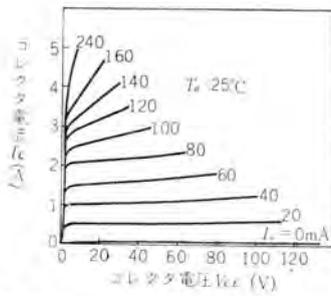


図 3.2 エミッタ接地 コレクタ 出力特性 ($V_{CE}-I_C$)
Fig. 3.2 Typical collector characteristics of type TJ101.

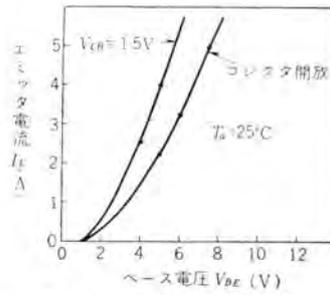


図 3.3 入力特性 ($V_{BE}-I_E$)
Fig. 3.3 Typical input characteristics of type TJ101.

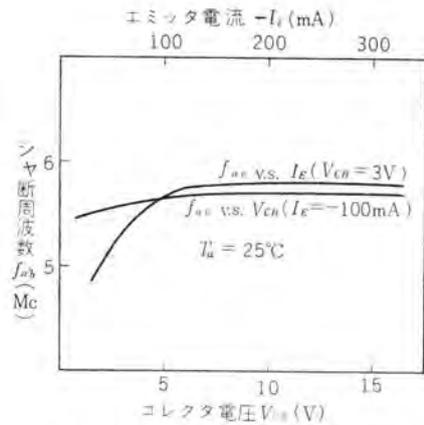


図 3.8 シヤ断周波数 ($f_{ob}-V_{CE}$ or I_E)
Fig. 3.8 Cut-off frequency variation (Base-grounded).

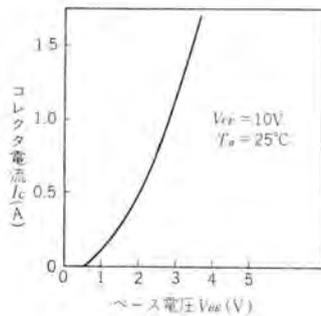


図 3.4 相互特性 ($V_{BE}-I_C$)
Fig. 3.4 Typical mutual characteristics of type TJ101.

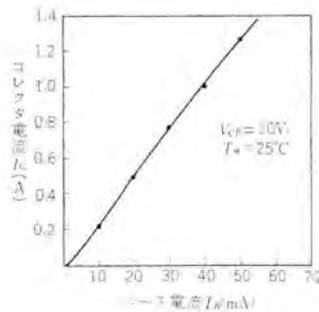


図 3.5 相互特性 (I_B-I_C)
Fig. 3.5 Typical mutual characteristics of type TJ101.

はほぼ 3.5A まで使用可能であって、同じ形の Si トランジスタにくらべそんな色なくむしろ上回った特長を持っている。コレクタシヤ断電流の一特性を図 3.7 に掲げたが、 V_{CES} は 50V 付近まで数十マイクロアンペアの値で、それ以上では漏れ分が増して 200V において 6mA 程度の値を示している。ただし、試作工程でこの値が 50mA をこえるものは僅少で、ほとんどが 10mA 以下であり、 $10\mu A$ のものも得られている。したがって工程管理を十分行なえば 200V におけるシヤ断電流は十分小さいものにすることができる。シヤ断周波数については、コレクタ電流、エミッタ電圧に対する変化を図 3.8 に示したが、この値は 100kc のレベルに対して 3dB 下がる点として求めたものである。2.2 で述べたように、Si トランジスタの広い応用範囲を占めるスイッチング素子として使用する場合はコレクタ飽和抵抗の代表的なものを図 3.9 に示した。

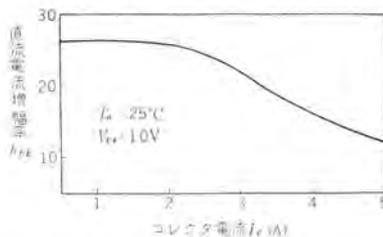


図 3.6 電流増幅率 (I_C-h_{FE})
Fig. 3.6 DC current transfer ratio as a function of collector current for TJ101.

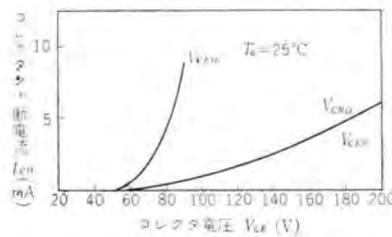


図 3.7 コレクタシヤ断電流 ($I_{C0}-V_{CE}$)
Fig. 3.7 Collector cut-off current as a function of collector voltage for TJ101.

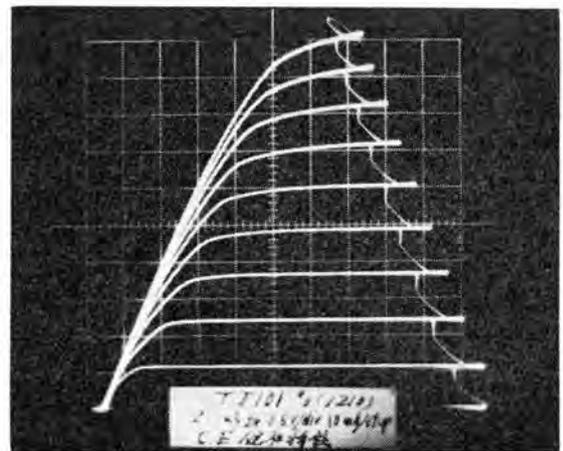


図 3.9 コレクタ 出力飽和特性
縦軸 200 mA/div
横軸 0.5 V/div
10 mA/step

Fig. 3.9 Collector output saturation-voltage curve.

この例では $R_s=1.2\Omega$ であるが、製品の範囲はほとんどが 0.5Ω から 2.5Ω 程度の間にはいり、同形の海外のトランジスタにくらべてすぐれたものであるといえよう。

図 3.10 に当社トランジスタ TJ101 の外装を示したが、熱抵抗は外装の構造により比較的大きく変わるものであり、外装の設計には十分注意をはらった。接合部—マウンティングフラジ間の熱抵抗値は精密な測定によると $1^\circ C/W$



図 3.10 外観
Fig. 3.10 Photograph showing the appearance of TJ101.

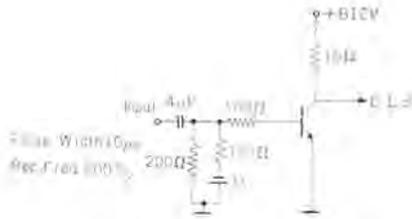


図 3.11 スイッチ 時間測定回路
Fig. 3.11 Circuit for measurement of switching time.

である。ただし実際の使用にあたってシャーシ取付方法、大きさ、冷却効果などを十分考察すべきで、周囲温度に対する接合部温度の総熱抵抗は $1^{\circ}\text{C}/\text{W}$ より大きな値になる。たとえば $200 \times 200 \times 1\text{mm}$ アルミニウム放熱板に絶縁片をはさみず取付け、 $200 \times 500 \times 500\text{mm}$ の紙箱の前後上辺に小空気穴を数多く設け、その穴の合計面積が各辺面積の 10% 程度にしたものの内部において、放熱板を垂直に立てた状態で、箱外温度 25°C に対する接合部温度までの熱抵抗を測定した結果によると $5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ の値であった。紙箱により外部と内部はある程度遮断されているので、自由空気に対する場合に比べ、比較的大きい値を示している。したがってこのときの許容損失は 25W であり、最大定格に比べればかなり小さい値である。したがって実際使用する条件は上記条件と同等な場合が多く、回路設計には使用条件を十分考慮する必要があるが、この程度の値が妥当と思われる。

方形波パルスに対する応答については図 3.11 の測定回路で図 3.12 のような測定結果を得た。

4. む す び

以上特性の一端について述べたが、最近需要の高まりつつある Si トランジスタに対し、海外の相当品に比べならそん色なく、Si としての特長を十分に生かして、高逆耐圧、小逆方向電流、コレクタ飽和抵抗が比較的小さいというすぐれた特性のものが得られた。しかし Ge に比べ飽和抵抗という点では一步をゆずれなければならぬが、その他の特性で Ge ではまねのできない長所があ

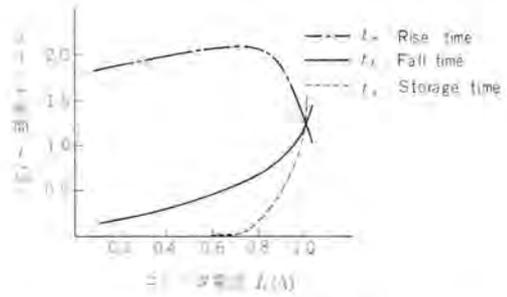


図 3.12 スイッチ 時間 ($A-I_c$)
Fig. 3.12 Variation of Switching time with collector current.

り、今後通信機器用、工業用として、直流増幅、出力増幅、DC-DC コンバータ、インバータ、チョッパ、電圧または電流調整器などに使用されて、十分その威力を発揮するものと思われる。

参 考 文 献

- (1) J.L. Moll & I.M. Ross: The Dependence of Transistor Parameters on the Distribution of Base Layer Resistivity, Proc. IRE, 44 Jan. (1956)
- (2) W.M. Webster: On the Variation of Junction Transistor Current Amplification Factor with Emitter Current, Proc. IRE, 42, June (1954)
- (3) R. Emeis, A. Herlet & E. Spence: The Effective Emitter Area of Power Transistor, Proc. IRE, 46, June (1958)
- (4) H.G. Rudenberg: On the Effect of Base Resistance and Collector-to-Base Overlap on the Saturation Voltages of Power Transistor, Proc. IRE, 46, June (1958)
- (5) J.F. Aschner, C.A. Bittmann, W.F.J. Hare & J.J. Kleimeck: A Silicon Medium Power Transistor for High-Speed Switching Application.
- (6) J.J. Ebers & J.L. Moll: Large Signal Behavior of Junction Transistor, Proc. IRE, 42 Dec. (1954)
- (7) Charles. A. Lee: A High-Frequency Diffused Base Germanium Transistor, B.S.T.J., 35, Jan. (1956)
- (8) Chaang Huang: A Physical Theory of Junction Transistor in the Collector-Voltage-Saturation Region, IRE Trans. ED-6, April (1959)

CdS の 光 起 電 力 効 果

研 究 所 伊 吹 順 章*・小 宮 啓 義*

Photovoltaic Effect of CdS

Research Laboratory Sumiaki IBUKI・Hiroyoshi KOMIYA

Photovoltaic effect of CdS is noteworthy of its comparatively higher efficiency at high temperature. In this paper the writers report their experimental results of this photovoltaic effect referred to, giving an account of consideration on anomalous phenomena such as inverse photo-voltage and temperature effect. As one of electrodes of the photovoltaic cell, Cu or Ag was used vacuum evaporated on it for blocking contact as it was, or made to diffuse into CdS by heat treatment so as to form P-N junction. Another electrode was In evaporated layer used for ohmic contact. One example of photo e. m. f. thus made available was open circuit voltage of 0.3 V and short circuit current of 1 mA/cm² when subjected to direct sun shines.

1. ま え が き

最近太陽エネルギーを直接電気エネルギーに変換する太陽電池が将来の動力源として注目され、Siにおける発展に刺激されて効率の上昇、温度特性の向上などの見地から InP, GaAs, AlSb などについての研究が進み、低価格化の研究の途上において CdTe, ZnS などの超高光起電力が発見された。かかるものうち CdS は高温での効率がよいこと、特殊な分光感度を示すことなどの理由のため注目され、報告も散見されるようになったがまだ起電力を生ずる原因に判然としない個所もある。

この機会にわれわれの研究室で行なった光起電力に関する実験を述べ種々の議論をしてみたい。

2. 光起電力効果

元来、光起電力効果とは半導体の Built-in Potential Barrier の内部またはその近傍の領域を光照射したときに電圧を生ずる現象をいい、Si のように半導体中に P-N 接合を作ってその部分を光照射して起電力を得る方法、Se セルのように半導体上に適当な金属を透明に Deposit することによって金属-半導体間に生ずる Barrier を使う方法が考えられている。

CdS の光起電力効果についても P-N 接合による光起電力と解される現象が見られるので、まず P-N 接合照射の際の光起電力の取り扱いについてながめたい。Cummerrow 氏らが理論式を与えているが、それによると N 領域中の正孔、P 領域中の電子の数を適当な境界条件のもとに求め、Diffusion による全電流 I を計算すると

$$I = eg_0L - I_0[\exp(eV/kT) - 1] \quad (2.1)$$

ここに、 g_0 : 接合部で正孔-電子対の生成する割合、 L : 光の吸収係数、拡散距離などに関する係数、 I_0 : 逆飽和電流

であり、これを V に関して解けば、光起電力 V は

$$V = \frac{kT}{e} \log \left(1 + \frac{eg_0L - I}{I_0} \right) \quad (2.2)$$

したがって

$$P = IV = I \frac{kT}{e} \log \left(1 + \frac{eg_0L - I}{I_0} \right) \quad (2.3)$$

となる。 $dp/dI=0$ より最大電力に対する電流 I_m 、電圧 V_m が求められるから、最大電力 P_m は

$$P_m = I_m V_m = \frac{I_0 \left(1 + \frac{eg_0L}{I_0} \right) e V_m / kT}{I + e V_m / kT} V_m \quad (2.4)$$

となる。つぎに Open Circuit Voltage V_0 は式(2.2)より

$$V_0 = \frac{kT}{e} \log \left(1 + \frac{eg_0L}{I_0} \right) \quad (2.5)$$

Short Circuit Current I_s は式(2.1)より

$$I_s = eg_0L \quad (2.6)$$

と表わせる。このように P-N 接合照射の場合、電流は入射光量に比例し、電圧は低照度で光量に比例し高照度で飽和することがわかる。

温度特性をながめると、 V_0 は I_0 に関連するので温度の上昇につれて V_0 が直線的に減少するが、 I_s は L にだけ依存するのでやはり温度の上昇につれて減少はするが、 V_0 にくらべればほとんど温度に影響されない。

Se についても同様なことがいえるが、外部負荷抵抗に依存することが多く、大きい疲労特性が観察されている。 I_s は照度に比例するけれど、 V_0 は照射強度が 10,000 lx に近づかなければ飽和しない。

3. 実験結果

まず最初に Ag は CdS と図 3.1 に示すような整流性の接着をするから、昇華再結晶法で作った単結晶 CdS の一端に常温で Ag の蒸着を行ない、他端は In をつけて光起電力が得られるかどうか調べてみた。Ag の蒸着部を照射すると、図 3.2 に示すように Ag 極が (+) のかなり高い光起電力が見られ、その分光感度は 5,150 Å の

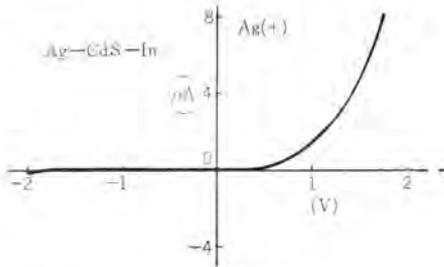


図 3.1 整流特性

Fig. 3.1 Rectification characteristic.

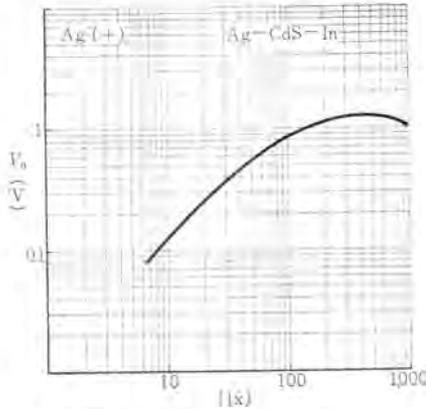


図 3.2 照度-光起電力特性

Fig. 3.2 Illuminating intensity—photo e. m. f. characteristic.

みに最大感度をもつ。しかしこのような操作で光起電力は一般に得がたく、最高起電力に達するのに数十秒という長い時間を要し、さらに照射を続けると起電力は逆に次第に減少して数分で約 80% の安定値に達するという疲労現象も見られ、また経年変化も大きく安定したものを得るのは困難であった。

つぎに Cu を用いて P-N 接合を作ることを試みた。

昇華再結晶で CdS を作れば通常 Cd 過剰の N 形のものができるが、さらに III 族のメタルを導入してやるといっそう N 形になり、I 族のメタルを入れると P 形に変わるといわれている⁽¹⁾。それで昇華再結晶時に In を導入した CdS 結晶の一端に常温で Cu を蒸着し、600°C で数分熱処理することによって Cu の蒸着膜の近傍を P 形に変え、その中間に P-N 接合を作り他端の In 極との間に Cu 極が(+)になる光起電力を得ようとした。一例を図 3.3 に示す。この図を見ると P-N 接合による光起電力の式 (2.5)(2.6) によく合っている。しかも光照射、切断の際の光起電力の時定数は 1 ms よりも少なく前述のような疲労現象も見られない。また図 3.4 に示すような整流性も観測される。他の一例を図 3.5、図 3.6 に示す。この場合は低照度では大きい起電力が見られないが、直接太陽光に照射すると $V_0=0.25$ V、 $I_s=4 \mu\text{A}$ (図に示す大きさに対して) 程度、さらにレンズで集光して Cu と CdS との境界部を照射してやると $V_0=0.5$ V、 I_s は $200 \mu\text{A}$ にも達するのが認められた。

つぎにややおもしろい性質を示す一例を図 3.7 に示す。この図でわかるように高照度で I_s がねてくること V_0 があまり大きくないこと、さらに奇妙なことは低照度で逆起電力が生じ逆電流が流れることである。これは図 3.8 に示すように光のスポットで光起電面を照射するときにもやはり観測される。この現象は In 濃度が多いとき Cu 蒸着後熱処理して初めて認められるもので、Cu を蒸着しただけ、または両端に In を付けた CdS: In 結晶を Locally に照射しただけでは見られない⁽²⁾。しかも図 3.9 のように I_s の温度特性が同様に変則で、高温になると起電力の減衰が激しく、さらに 80°C ぐらいにもなれば起電力の方向がやはり逆転するといったことが発見された。この原因についてはのちに少し攻究するが判然とは

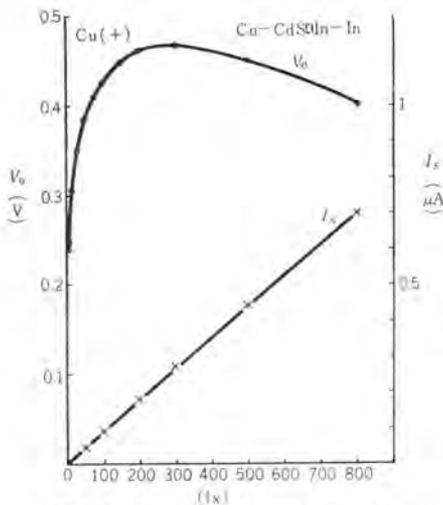


図 3.3 照度-光電流、光起電力特性

Fig. 3.3 Illuminating intensity—photoelectric current, photo e. m. f. characteristic.

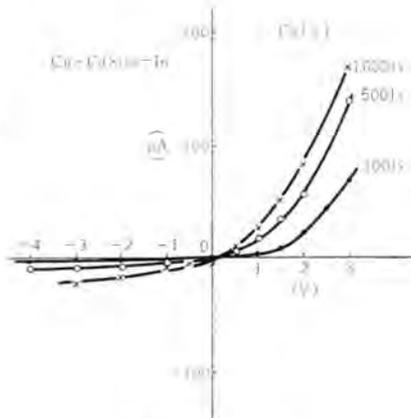


図 3.4 光整流性

Fig. 3.4 Photo rectifying property.

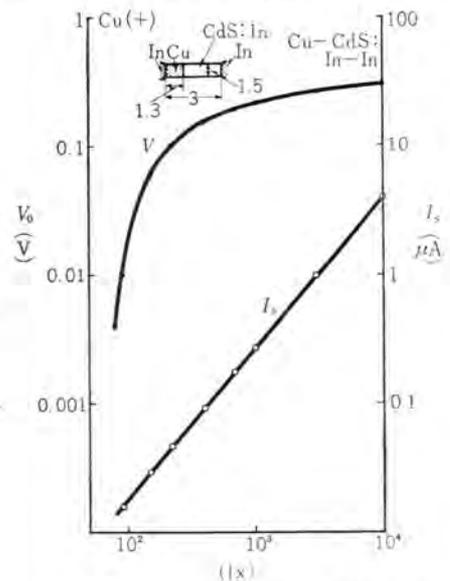


図 3.5 照度-光電流、光起電力特性

Fig. 3.5 Illuminating intensity—photoelectric current, photo e. m. f. characteristic.

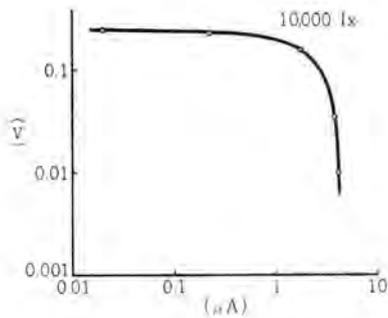


図 3.6 光起電力-
光電流特性
Fig. 3.6 Photo e.m.
f. — photoelectric
current character-
istic.

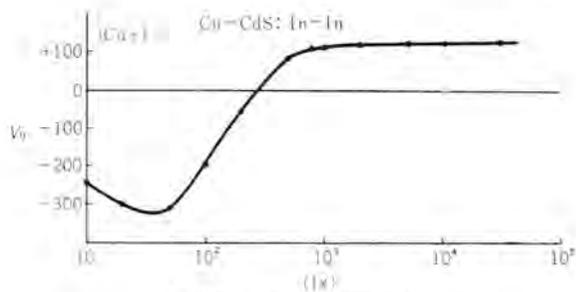


図 3.7 照度-光起電力特性
Fig. 3.7 Illuminating intensity—photo e.m. f.
characteristic.

しない。

最後の実験に使用した CdS: In は固有抵抗約 0.1Ω cm, 両端に In 極を付けたものではきれいな Ohmic Contact を示し, 抵抗の温度特性は図 3.9 に示すようにほとんどフラットであり, 光導電性を示さないといったようなものである。

最後に図 3.10 に示すように固有抵抗が暗中で $10^7 \Omega$ cm 程度の結晶にサンドイッチ 状に Cu, Au を蒸着して極とし, そのうち Au を半透明にして, これを通して光を照射するように構成した光起電力セルについての実験の一端を述べる。まず予想に反して光起電力は Au 側が

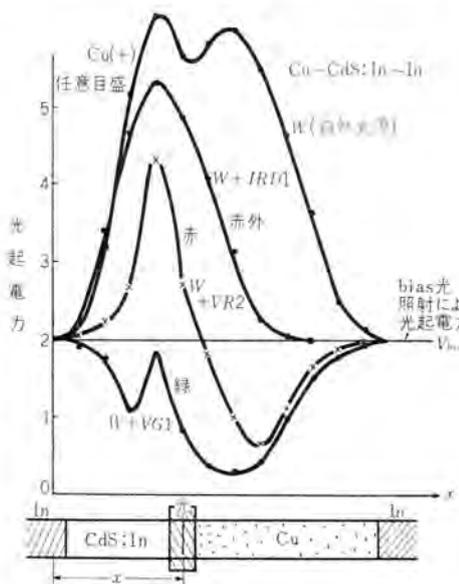


図 3.8 局部照射による光起電力の増減
Fig. 3.8 Changes of photoelectric current by
local lighting.

CdS の光起電力効果・伊吹・小宮

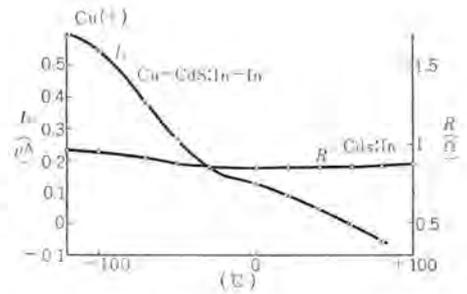


図 3.9 温度特性
Fig. 3.9
Temperature
characteristic.

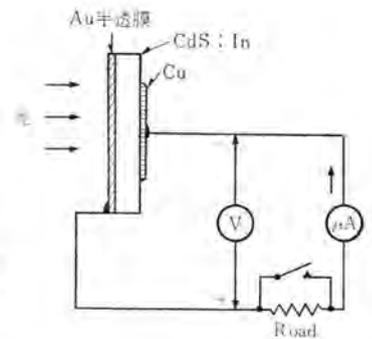


図 3.10 Au-CdS: In-
Cu セルの構造
Fig. 3.10 Construction
of Au-CdS: In-Cu cell.

0.5 V 程度正となり, 10^4 lx の強度で約 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の I_s が認められた。光の照射シャ断時の追従は 1 ms 以内で Ag の場合にくらべてはるかに早いけれど, Ag のときと同様数分で着く電流の疲労が観測された。この疲労および光追従の時定数は照射強度の関数で, 照射光が強いと時定数は早い疲労の度合および着くまでの時間は長くなる。もちろん光照射中止後 10 min 程度放置すれば疲労前の初期値にもどる。照度特性は図 3.11 に示すように二つの曲線からなると思われるし, I_s は照度と比例関係にはないようである。したがって温度特性も平坦ではなく 10°C 近辺から急激に I_s が減少する。分光感度は $5,100 \text{ \AA}$ に山があり, $5,800 \text{ \AA}$ にも Sub Peak

があるが照射光は金ばくを通すから $7,500 \text{ \AA}$ 以上にはほとんど感度がない。交流 60 c/s を印加して整流性を調べてみると, Au が (+) のときが順方向の非常にきれいな整流特性がみられる。しかし図 3.8 と同様の極構成にして光のスポットで操作すれば, 図 3.12 のように Cu の近傍を照射したときに Cu が (+), Au の近傍を照射したときに Au が (+) となる現象も興味ある結果である。

以上光起電力の分光感度を図 3.13 にまとめておく。

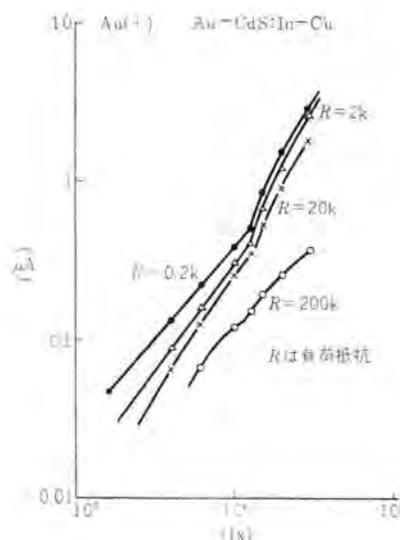


図 3.11 照度-電流特性
Fig. 3.11 Illuminating intensity—current
characteristic.

4. 議 論

前章にいままで得られた光

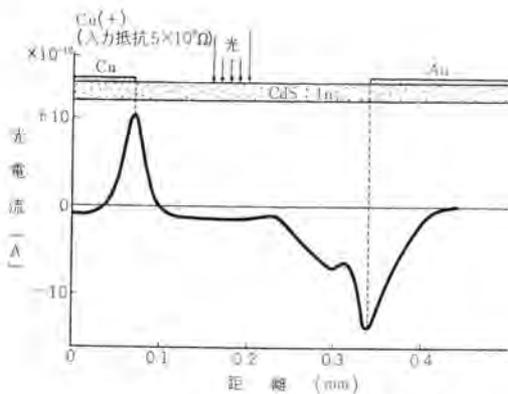


図 3.12 局部照射による光起電流

Fig. 3.12 Photoelectric current due to local lighting.

起電力効果の概略について述べたが、一般にかかる方法では光起電力セルは作りにくい。その原因の一つは Ag, Cu, Au とも CdS 結晶のうちの拡散係数が 500°C で $1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度と非常に大きくてはいいやすいこと、したがってちょっとした欠陥や転位などがあればそこを通過して接合部を短絡し、金属と N 形部分とが直接接触し、このような部分が多くなればきれいな P-N 接合をしなくなる。また一度結晶中に侵入した Cu が冷却時に表面や転位線にそって析出し、それが接合を破壊することもある。そのほか Ag, Cu の部分とリードとの接続法、結晶の表面などにも原因があるときがあると思われる。しかもこれらの諸因はできたセルの寿命を短縮する原因とも考えられるものである。

つぎに高抵抗の結晶を用いた際、高照度で V_0 が減少する原因としては、高照度によるシャット状内部インピーダンスの減少、Barrier の形の変化、逆向きの起電力の増加といったことが考えられるうち、内部インピーダンスの減少がもっとも考えやすい。疲労やおそい時定数の原因は空間電荷およびその変動と思われる。

しかし上述の光起電力効果が P-N 接合によるものであるか否かはなお議論の余地がある。Cu については一応 P 形の部分ができるといわれており、観察された結果が P-N 接合による光起電力と解釈してよいものも多いが⁽¹⁾、Cuメッキだけで光起電力が得られるという報告もあり⁽²⁾、その際は Cu より CdS の結晶内部へ光電子放射が行なわれるといわれている文献もある。また単なる金属と CdS との接合部にできる Blocking Layer の光電効果による光起電力と考えてさほどふつこうをきたすこともないし、熱処理で起電力が減少することさえある。Ag の場合など分光感度より見ればかような接触ではないかとも想像される、また Cu-Au の場合 Au が (+) になる理由は判然としない。しかし図 3.12 より見れば Williams 氏の光電子放射説でも説明できないことはない。しかし In を多量に含んだ場合に低照度での Cu

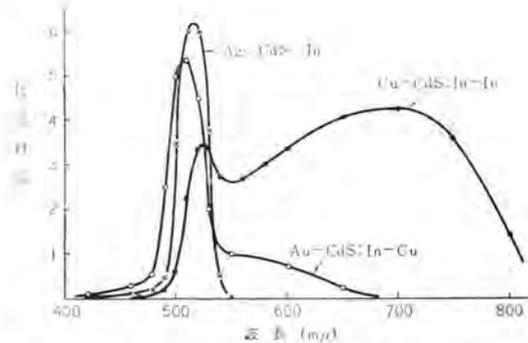


図 3.13 光起電力の分光感度

Fig. 3.13 Spectral sensitivity of photo e. m. f.

(-) の起電力がなぜ起こるかについてはさらに検討を要するが、一つの解釈として CdS: In 部を照射したときに低照度時は生じた自由電子が In 不純物帯を經由して CdS: Cu 部に拡散して、たとえば Cu イオンに捕えられ、CdS: In 部は Positive Charge のほうが多くなって正電圧になるが、高照度になると Hole Trap がうずまって、Hole が Electron より多く Cu 部へ拡散して Cu が正に起電するといった機構でも考えなければならぬであろう。高温で起電力が逆転するのは電子の移動がよくなるとも考えなければならぬ。このように光起電力発生の原因は複雑なので判然とつかむことができなかったが、今後ゆっくり研究したいと考えている。

5. む す び

CdS はすぐれた光導電性をもつ物質として注目されているが、本文に述べたように P-N 接合などの光整流性を示す部分を作ってやれば可視光に対して光起電力が得られ、現在太陽光に対して $V_0 = 0.3 \text{ V}$, $I_s = 1 \text{ mA/cm}^2$ 程度が観測された。素材 CdS および P-N 接合の製作法を改良してやれば今後さらに効率は上昇する見込みで⁽⁴⁾、光導電体の場合には是非とも必要な電源が光起電力セルの場合には不要となり、種々のホトリレイへの応用がさらに増大することになる。

このような問題を物性的に見ても P 形の CdS の諸特性、光起電性の原因の探究など今後の進展が期待されるし、われわれも別の機会に詳しくこの点に論及したい所存である。末筆ながら種々ご指導ご助力いただいた本技管山下博典氏、当所森利雄氏、野島賢治氏に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) J. Woods & J. A. Champion: J. Elect. Cont. 7, 243 (1960).
- (2) H. Kallmann et al.: Phys. Rev. 117, 1482 (1960).
- (3) R. Williams & R. H. Bube: J. A. P. 31, 968 (1960).
- (4) J. J. Wysocki & P. Rappaport: J. A. P. 31, 571 (1960).

電子衝撃陰極の特性

研究所 岡田武夫*・橋本勉*

Characteristics of Cathodes with Electron Bombardment

Research Laboratory Takeo OKADA · Tsutomu HASHIMOTO

Tantalum cathodes heated by electron bombardment are used for electron guns of high power tubes such as klystrons and traveling wave tubes. However, to have these electron guns display prescribed characteristics, it needs uniform thermionic emission current from the cathode. To this end it calls for a uniform temperature distribution all over the cathode surface. In this report are given experimental results on the temperature distribution referred to and relevant considerations. On conclusion is drawn that provision of a sub-cathode structure with an optimum bias inserted to the sub-cathode structure so as to attain uniform bombardment is good for obtaining required temperature distribution though the cathode is not very thick.

1. ま え が き

連続大出力のクライストロン進行波管の電子銃や、電子ビームによる溶解、溶接などの装置の電子銃に使用する陰極としては、普通の酸化物陰極のほかに、焼結陰極、含浸陰極またはマトリクス陰極などや、タングステンまたはトリウムタングステンなどの陰極が考えられる。前者は十分なエミッションを得るまでの活成化操作がはげざつであり、またイオン衝撃により陰極の劣化が促進されるので、つねに高真空にこれを保持しなくてはならないという不便さがある。

また後者は適当な陰極形状を保たせるための絞り加工が困難であるという欠点がある。

一方のタantalを陰極として用いる場合は、絞り加工も容易であり、適当なエミッションを取りうる必要な高温まで安定で、かつ陰極を大気中にさらしても、使用時の真空度が良好であれば十分動作するという長所があるので、上記の用途としては好適である。

この種の電子銃が規定の特性を示すためには、陰極から均一な熱電子放出電流を得ることが必要であり、そのためには陰極全面にわたって均一な温度分布を示すことが要求される。

今回試作した電子銃について、陰極を衝撃する電子密度を場所的に変えた場合の温度分布を写真測光により測定した結果、薄い陰極においては衝撃電子密度と陰極温度とがほぼ比例しており、衝撃電子密度を均一にすると、陰極温度は薄い陰極においてもほぼ均一に保たれることがわかった。

2. タ ン タ ル

タantalの物理的性質を表2.1に示す。

また、これをある温度に上昇するための入力と、その温度における熱電子放出密度とをタantalの線と板とについて実験した結果を表2.2に示す。比較のために発表値も並記する。

3. 陰 極 構 造

今回試作した電子銃の陰極の全放出電流は2Aの子

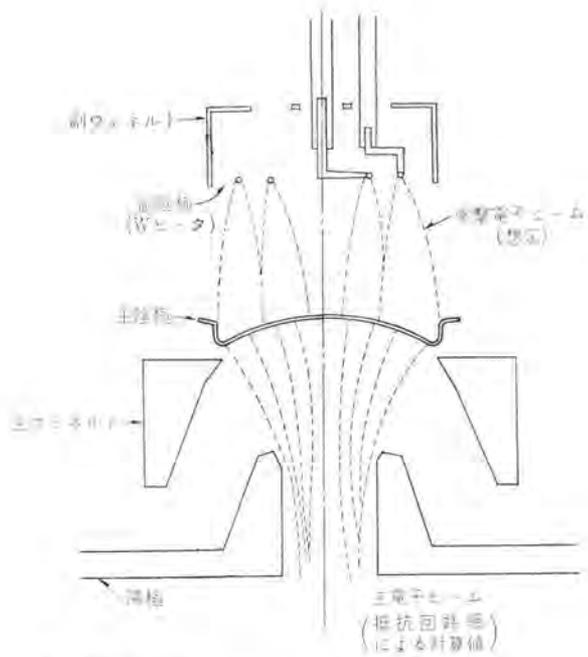
表 2.1 タantalの物理定数^{(1)~(3)}

原子番号	73
原子量	180.95
結晶	体心立方
格子定数 (Å)	3.3026 ± 0.0003
融点 (°C)	2,999.6 ± 50
比熱 (cal/g deg)	0.036 at 1,000°C
比重 (g/cc)	16.6 at 20°C
最高使用温度	2,200°C
蒸気圧 (mmHg)	1,727°C; 1,957; 2,087; 2,237; 2,397; 2,587; 2,820°C 10 ⁻¹⁰ ; 10 ⁻⁸ ; 10 ⁻⁷ ; 10 ⁻⁶ ; 10 ⁻⁵ ; 10 ⁻⁴ ; 10 ⁻³
熱膨張係数 (cm/cm/°C)	0~100°C; 20~1,500°C 65 × 10 ⁻⁷ ; 80 × 10 ⁻⁷
熱伝導度 (cal/cm/°C/s)	20~100°C; 1,430°C; 1,830°C 0.13; 0.174; 0.193
電気抵抗 (μΩ/cm)	18°C; 1,000°C; 1,830°C 12.4; 54; 80
熱ふく射率 (λ=0.665 μ)	930°C; 1,730°C 0.45; 0.418
熱電子放出仕事関数 (eV)	4.1
表面電子放出	1,273; 1,500; 2,000; 2,585 OK 1 × 10 ⁻⁵ ; 4.7 × 10 ⁻³ ; 19.5 × 10 ⁻³ ; 3,000; mA/cm ²
熱電子放出	6 mA/W at 2,200°C

表 2.2

T (°K)	P (mmHg)	J (W/cm ²)		i (A/cm ²)	
		実測値	発表値	実測値	発表値
2,000	10 ⁻¹⁰	30	21.63	8 × 10 ⁻³	19 × 10 ⁻³
2,100	10 ⁻⁹	40	27.11	30 × 10 ⁻³	60 × 10 ⁻³
2,200	9 × 10 ⁻⁹	50	34.18	130 × 10 ⁻³	250 × 10 ⁻³
2,300	8 × 10 ⁻⁸	60	42.23	250 × 10 ⁻³	400 × 10 ⁻³
2,400	2 × 10 ⁻⁷	75	51.27	—	800 × 10 ⁻³
2,500	9 × 10 ⁻⁷	—	62.38	—	1.5
2,600	3 × 10 ⁻⁶	—	73.37	—	3

* 物理第二研究室



主電子銃の設計目標値
 加速電圧：10 kV、ビーム電流：2 A
 陰極電流密度：200 mA/cm²
 パービアンス：2×10⁻⁶ A/V^{3/2}
 最小ビーム半径：5.2 mm
 抵抗回路網による主ビームパービアンスの計算値：1.76×10⁻⁶ A/V^{3/2}

図 3.1 電子銃の構成
 Fig. 3.1 Constitution of electron gun.

定であるから、電流密度は 200 mA/cm²、陰極の面積は 10 cm² の設計であり、このため陰極温度としては 2,250°K から 2,300°K の範囲に陰極全面を保つことを目標とした。今回試作した電子銃は図 3.1 に示すような構造で、この場合主陰極から放出される熱損失としては熱ふく射の分は表 2.2 から約 1,300 W であり、また熱伝導の分は現在の陰極支持棒の形状から約 100 W であり、合計として、1,400 W 程度になるから、これだけの入力でも主陰極を電子衝撃する必要がある。

今回の電子銃では衝撃ビームのパービアンスは約 6×10⁻⁶ (A/V^{3/2}) であり、主陰極に 1,500 W まで入力を与えるためには、電圧は 2,300 V、電流は 650 mA になるので、空間電荷領域で使用するためにはタングステン副陰極のイミッションは 700 mA 以上を要求される。

副陰極に使用したタングステン線の直径は 0.9 mm で実効的な長さは約 15 cm であるから、表面積は約 5 cm² となる。この表面積から 700 mA 以上のイミッションをとるためには単位面積あたり約 100 mA 以上のイミッション密度が必要であるから、タングステン線の温度は 2,400°K 以上に保つことになり、タングステン線に流す電流としては 38 A 以上流す必要がある。

主陰極面の温度を均一にするためには、タングステン陰極の厚みを増すことと、加熱用電子ビームが主陰極を均一に衝撃するように図 3.1 に示す副陰極、副ウエレットを適当に設計することの二つの方法が考えられる。前者の方法は熱的な点から厚さに限度があると同時に、機械的また

は価格上の点からも厚さが制限されるから実際には後者の方法をも併用して、最適の陰極を設計することが必要である。

6 章の近似計算によると、温度分布が衝撃電子ビームの密度で決められて陰極の厚みを増しても改善されない領域と、厚みが増せば均一度が改善される領域との境界の厚みは、現在試作した陰極については約 0.3 mm になる。

今回試作した電子銃について 0.5 mm の厚さのタングステン陰極を使用し、スパイラル状に巻いたタングステンフィラメントの副陰極より電子衝撃により加熱した場合、フィラメントの形状にはほぼ比例して陰極面に温度差が生じたので、これを改善するためにフィラメントの巻き方を円対称とし、これも簡単な電子銃構造とし、ウェレットを設け、これに適切な電位を与えることにより、衝撃電子密度を一様にして陰極の厚さが薄くても、必要とする温度分布が与えられる構造を採用した。

その際の副陰極、副ウエレットの構造を図 4.1 (a), (b) に示す。

4. 測定方法

図 4.1 に示すような陰極構造において副ウエレット電位を変化させて、加熱電子ビーム密度を場所的に不均一にした場合の陰極の温度分布を、写真測光により実測し、副ウエレット電位と温度分布との関係を求めた。陰極面の写真はガラスバルブを通して上部より測定した。写真機はアサヒペンタックスを使用し、タングステン陰極の温度が 1,500～2,000°K の範囲でもっとも温度に鋭敏な条件を種々実測の結果から求めると、フィルムの種類としてはネオパン F で、

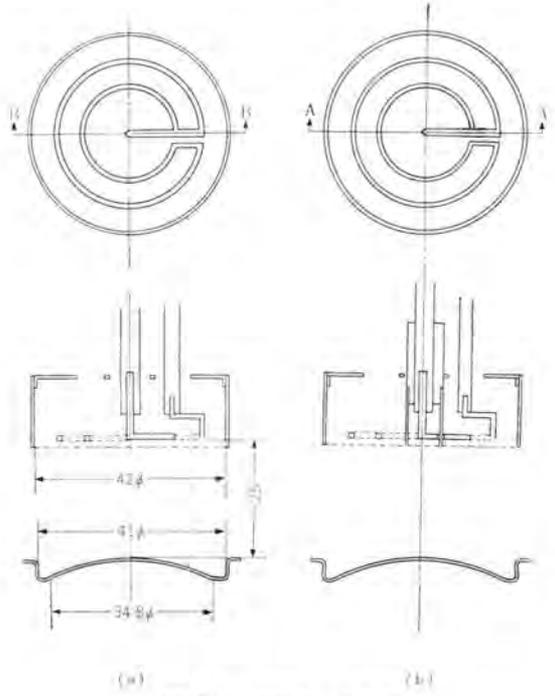


図 4.1 副陰極と主陰極
 Fig. 4.1 Sub-cathode and main cathode.

フィルタは使用せず、光量は $t \frac{1}{F^2} = \frac{1}{500 \cdot 11^2}$ の場合が最適であった。

この条件で撮影したフィルム感光度をマイクロフォトメータで記録して、温度とマイクロフォトメータの指度との関係をグラフに示すと、図4.2のようになる。すなわち、1,500°K以下ではフィルムのバックグラウンドでおおわれ、2,000°K以上では飽和を示すが、この範囲ではほぼ直線的な指示を

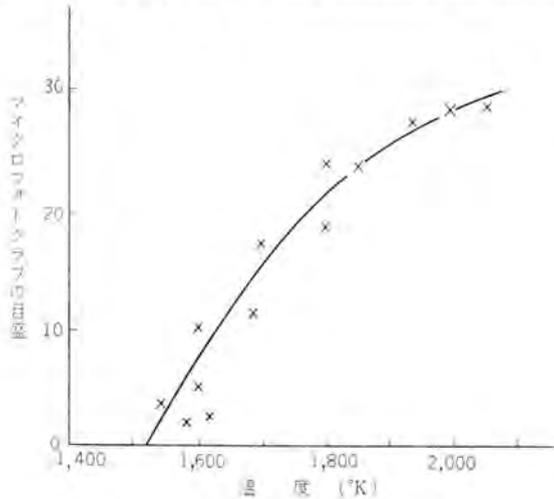


図 4.2 マイクロフォトグラフと温度の校正表

Fig. 4.2 Calibrations of microphotograph with temperature.

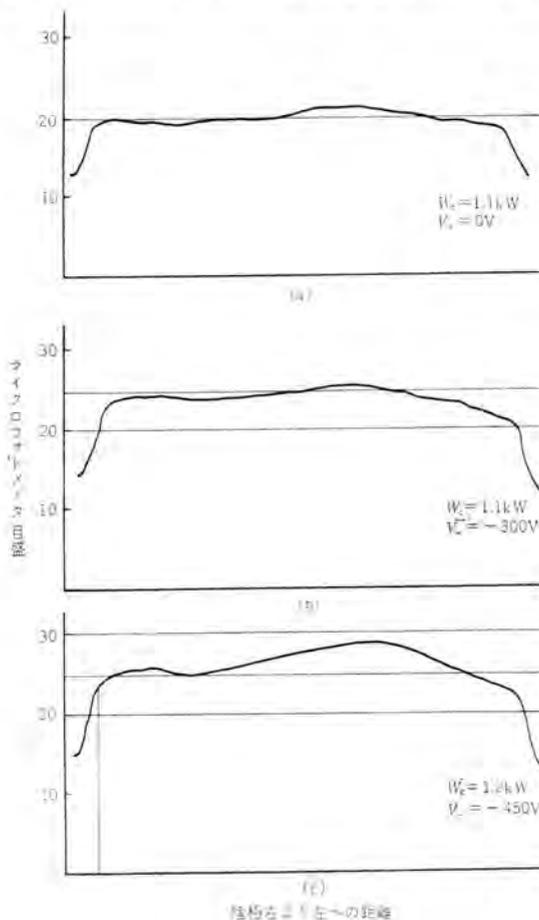


図 5.1

Fig. 5.1

する。この結果、写真測光により、温度分布は 1,500~2,000°K の範囲では約 20°K の精度で判別できることがわかった。

5. 実験結果

まず図4.1(a)のような構造の陰極で外部副ウエネルトの電位を副陰極電位と同電位にした場合、衝撃電子流密度は中央部分が大きいので、この部分に高温部分が残る [図5.3(a)], 副ウエネルト電位を次第に負にしてゆくと衝撃電子が中央部分に集中されてゆくの、さらにこの部分が明るくなる [図5.3(b)].

このときの温度分布のマイクロフォトメータによるトレースの例を、副ウエネルト電位零、-300 V、-450 V の場合について図5.1に示す。-450 V においては中央部分にくらべて約 200°K 高くなっている。

次に図4.1(b)のように中央部分にシヤヘ円筒をそう入した場合には、この部分の衝撃電子密度は小さくなるので低温部分が残る [図5.3(c)]. このときの温度分布のトレースの例を副ウエネルト電位が零、-300 V、-450 V の場合について図5.2に示す。

副ウエネルト電位が次第に負になるにしたがって、中央部分の衝撃電子密度は増加してゆくから、温度分布も改善され -300 V から -450 V の範囲では中央部分に面

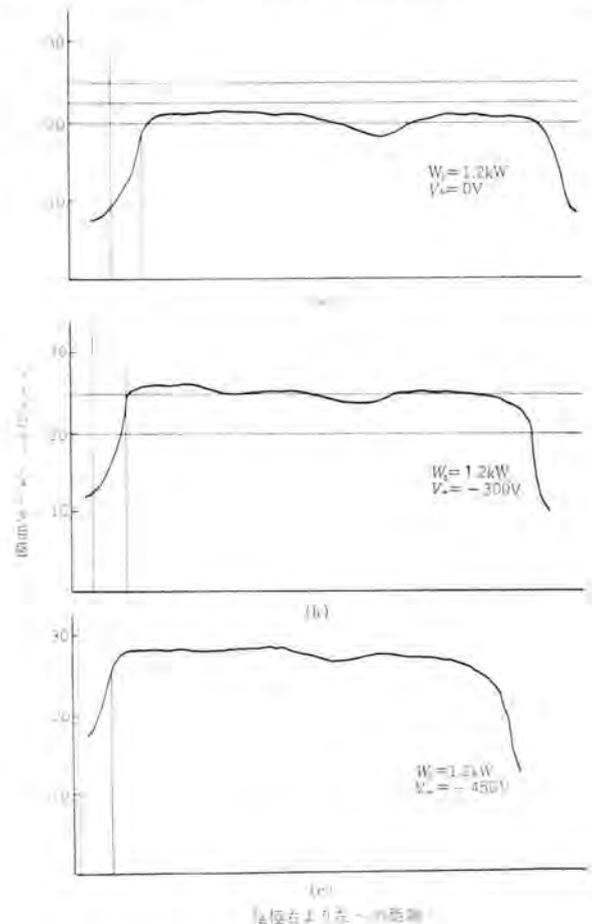
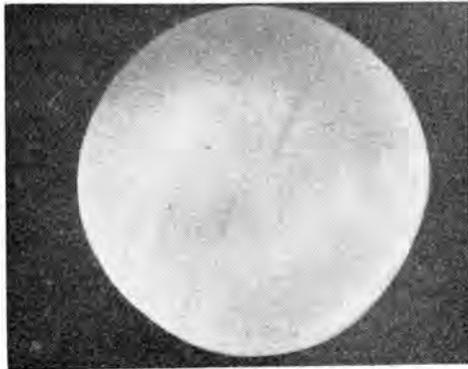
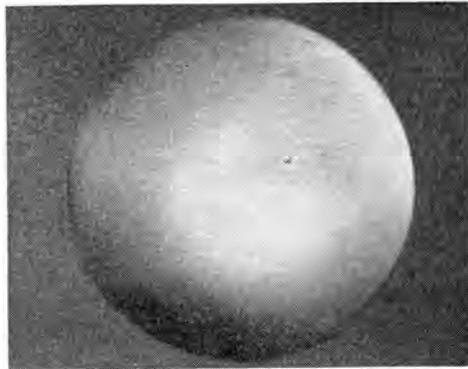


図 5.2

Fig. 5.2



(a) 図 4・1 (a), $V_a=0V$, $W_c=1.1kW$ [図 5・1 (a) 参照]



(b) 図 4・1 (a), $V_a=-450V$ [図 5・1 (c) 参照]



(c) 図 4・1 (b), $V_a=0V$ [図 5・2 (a) 参照]



(d) 図 4・1 (b), $V_a=-450V$ [図 5・2 (c) 参照]

図 5.3 主陰極の写真

Fig. 5.3 Photograph of main cathode.

積にして約4%の低温部分が生じるが、他の部分はほぼ均一に保たれる [図 5.3 (d)].

結論として陰極の板厚が薄いときには、その温度がほぼ衝撃電子密度に比例すること、および陰極構造を適当にし副ウェネットに適当な電位を与えることにより、薄い陰極の場合でもほぼ均一な温度分布が得られるといえる。

6. 電子衝撃を受けている 金属円板上の温度分布

前章で見たように、主陰極であるタングステン板上での温度は均一でない。このような高い温度では、タングステン板を支持している数本の細い棒を通る熱伝導は、温度分布にほとんど寄与しないと考えられるから、その不均一性は衝撃電子ビームの電流密度の不均一性に帰せられる。

大電力進行波などにこの種の陰極系を用いるとき、その主陰極は飽和に近い電流密度で設計されるのがつねである。温度分布が不均一であると、陽極を通過するビームの電流値が減るばかりでなく、ビームの Lamina 性が失われることによって、長い距離の間ビームを集束することがむずかしくなる。

陰極面の温度を均一にするためには (i) 衝撃ビームが主陰極を衝撃するときの電流密度が、陰極全面で均一になるように、副陰極、副ウェネットを適当に設計する。 (ii) タングステン板の厚みを増す。ことが考えられる。

この効果を見るためには、最終的には温度分布を実測する必要がある。このときにも、(i) タングステン板の厚みは

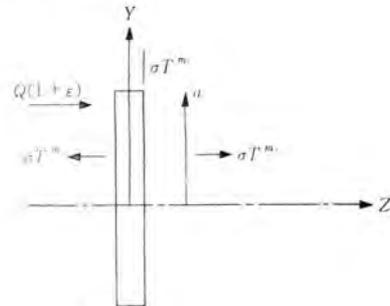


図 6.1

Fig. 6.1

どのくらいが必要か、(ii) 衝撃ビームの均一度はどのくらいが必要か、(iii) 測定時の温度が動作温度と一致しないときは、どのような尺度が必要かをあらかじめ知る必要がある。

これについてだいたいの目安を知るために近似計算を行なった。用いたモデルは図 6.1 に示すように半径 a 、厚さ d の円板に左から $Q(1+\epsilon)$ cal/cm² の熱量がはいり、全表面から σT^m (cal/cm²) の熱を失う。

次に、衝撃ビームは表面だけに熱を与えて、内部にはいらないと仮定する。 $d \ll a$, $\epsilon=0$ とすると、温度 T は一定値 T_0 になる。

$$T(r, z) = T_0 \{1 + u(r, z)\} \dots \dots \dots (6.1)$$

とおくと、 $\epsilon \ll 1$ のとき $u \ll 1$ である。 u は円板内部で $\nabla^2 u = 0$ $\dots \dots \dots (6.2)$

を満足する。ただし熱伝導率は位置に無関係と仮定している。式 (6.2) の境界条件としては、 $\partial u / \partial n$ を与えれば

解の唯一性が保証される。境界条件は

$$\frac{\partial u}{\partial z} = Xu - Y - 2Y\varepsilon \quad (z = -d, 0 \leq r \leq a, \text{面 I}) \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -Xu - Y \quad (z = d, 0 \leq r \leq a, \text{面 II}) \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = -Xu - Y \quad (-d \leq z \leq d, r = a, \text{面 III}) \quad (6.5)$$

$$Y = \frac{Q}{2KT_0}, \quad X = mY \quad (6.6)$$

ただし K は熱伝導率 ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

u は $\nabla^2 u = 0$ を満たすから温度に対する尺度は境界条件によって決まる。式 (6.3)~(6.6) を見ると、温度に対しては Y ではないっているが、もし

$$Xu \ll Y \quad (6.7)$$

ならば、 u の温度に対する尺度は Y ではないことになる。実験について測定された値⁽²⁾を用いると 2,000 K 付近では

$$m = 4.8, \quad K \propto T^{0.67}, \quad Y = 7 \times 10^{-3} \left(\frac{T}{2,000} \right)^{0.67} \quad (6.8)$$

式 (6.8) を用いると式 (6.7) の条件は、次の式 (6.9) になる。

$$u \ll 0.2 \quad (6.9)$$

式 (6.2) を境界条件式 (6.3)~(6.5) の下で解くことは、かなりめんどうな計算になる。ここでは回転対称なモデルを考える。このとき式 (6.2) の解は次のべき級数で表わせる⁽⁵⁾。

$$u = B_0 + B_1 z + B_2 z^2 + B_3 z^3 + B_4 z^4 + B_5 z^5 + \dots - \frac{r^2}{2} (B_2 + 3B_3 z + 6B_4 z^2 + 10B_5 z^3 + \dots) + \frac{3}{8} r^4 (B_4 + 5B_5 z + \dots) + \dots \quad (6.10)$$

いま 6 個の B で u を近似することにし、境界条件としては数学的には多小問題があっても計算が容易で、また物理的にも意味の明らかな次の近似境界条件を課す。

$$\int_0^a \left(\frac{\partial u}{\partial z} - Xu + Y \right)_{z=-d} r dr = 0 \quad (6.11)$$

$$\int_0^a \left(\frac{\partial u}{\partial z} + Xu + Y \right)_{z=d} r dr = 0 \quad (6.12)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial r} + Xu + Y \right)_{z=0, r=a} = 0 \quad (6.13)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} - Xu + Y + 2Y\varepsilon \right)_{z=-d, r=0} = 0 \quad (6.14)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} + Xu + Y \right)_{z=d, r=0} = 0 \quad (6.15)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} - Xu + Y + 2Y\varepsilon \right)_{z=-d, r=a} = 0 \quad (6.16)$$

$$\int_0^a \varepsilon r dr = 0 \quad (6.17)$$

実際問題では $d/a \ll 1$ と見られる。また実験に対して $T_0 < 2,300 \text{ K}$ ならば $X < 0.05$ であるから a をあま

り大きくとらない限り $Xa \ll 1$ と見られる。 $d/a, Xa$ の高次項を無視すると、未定係数は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= -\frac{1}{J} \frac{Y X a}{4} \varepsilon_1 \\ B_1 a &= -Y a (1 + \varepsilon_1) \\ B_2 a^2 &= -\frac{Y a}{J} \left[3D \left(1 - \frac{X a}{24D} \right) + \varepsilon_1 \left(\frac{3}{2} + 3D + \frac{X a}{4} \right) \right] \\ B_3 a^3 &= \frac{(X)^2 Y a}{24 J} - \frac{8}{3} Y a \varepsilon_2 + 12 \frac{Y a}{J} \left(D + \frac{5}{72} a \right) \varepsilon_1 \\ B_4 a^4 &= -\frac{Y a}{J} \left[-\frac{1}{4} a + \varepsilon_1 \left(1 + 2D + \frac{X a}{4} \right) \right] \\ B_5 a^5 &= \frac{(X a)^2 Y a}{20 J} - \frac{16}{5} Y a \varepsilon_2 + \frac{48}{5} \frac{1}{J} Y a \varepsilon_1 \left(1 + \frac{X a}{16D} \right) J \\ J &= -3D \left(1 + \frac{1}{12} \frac{X a}{D} \right) \\ D &= d/a \\ \varepsilon_1 &= (\varepsilon)_{r=0} \\ \varepsilon_2 &= (\varepsilon)_{r=a} \end{aligned} \right\} \dots (6.18)$$

式 (6.18) で見るように、 $xa \ll 12D$ のときと $Xa \gg 12D$ のときと傾向が異なる。

$Xa \gg 12D$ のときは板が十分薄いときで、温度分布は板の厚みに関係なく、衝撃 ビーム の密度分布そのものに一致する。逆に $Xa \ll 12D$ のときは板が十分厚いときで円板内部の熱伝導によって、衝撃を受けている面と反対側の面上の温度分布は、均一化する。

この二つの領域の境界は式 (6.18) からおよそ

$$Xa = 12D \quad (6.19)$$

で与えられる。したがって実際問題としては、実験板の厚みは式 (6.19) で与えられるものよりも大きくとるほうが温度分布の点から安全である。

この電子銃は大電力進行波管の電子銃として設計されたものであり、今回の実験に際して種々ご指導、ご協力をいただいた、大阪大学菅田教授、寺田助教授、真助手、大阪府大金田助教授および、当研究所物理第二研究室八十田室長、戸田研究員、建石技師に心からの謝辞を表す。

参考文献

- (1) 深川：真空管材料 (オーム社)
- (2) W. H. Kohl: Material and Techniques for Electron Tubes. (1960)
- (3) W. Espe: Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik (1960)
- (4) 菅田, 寺田, 真: 電子衝撃を受けている金属円板上の温度分布, 輻研第 2, 3, 4 部会資料.
- (5) たとえば菅田: 理論物理学新講座 15 巻, P. 16 (昭 29 年) 弘文堂

巻 胴 の 強 度

研 究 所 前田祐雄*・薮原 智**・土方明躬**

Strength of Hoisting Drums

Research Laboratory Sachio MAEDA・Satoru HAGIWARA・Akemi HIJIKATA

When a hoisting drum is being wound with wire rope on it at a certain tension, it will undergo strain. The relation of this strain with the tension of the rope has been calculated based on an empirical formula, which, however, is not fully acknowledged reliable. To give light on the matter, a model hoisting drum having a size about one tenth of the actual set was built for experiment. As a result of analysis with an assumption of the drum being a cylindrical shell and subjected to deformation at every turn of the rope, it has been confirmed that theoretical calculations are in accord with test values. The rigidity of the cylindrical shell and the wire rope is also taken into account in this analysis. Another experiment has been made to observe the course until plastic deformation is produced under load.

1. ま え が き

炭坑用巻上機などのように、巻胴に鋼索をある張力で巻き込んでいくとき、巻胴に生ずる応力と鋼索の張力との関係を、従来は張力を一様な分布圧力に置き換えて、巻胴の応力を求めていた。

しかし、巻胴のようにその直径に対して、板厚が薄いときは、巻胴が変形するために、鋼索を順次巻いていくとき、それによる圧力は、従来の円筒にかかる張力を一様な圧力に置き換える式では十分ではない。これにかわる理論式により、さらに厳密に解析した結果は、巻胴模型による実験値とよく一致した。

また、鋼索を巻胴に幾段も巻き込んでいくときは、従来は一定の係数を用いて圧力を修正していたが、炭坑における巻上機巻胴の実測結果などから、この修正係数は適当でなく、また、理論的な根拠もはっきりしなかったため、多段巻きの場合についても、巻胴模型による実験を行ない、鋼索張力と巻胴応力について理論的にも解析を行なって、ほぼ満足される結果を得た。

2. 鋼索を1段巻くときの巻胴応力

巻胴に鋼索が一様な張力 T で密接して巻き込まれるとき、巻胴長さが他の諸元にくらべ十分大きいときは、これを一様な分布圧力 p に置き換えて次式で表わすことができる。

$$p = T/Rd \text{ (kg/mm}^2\text{)} \dots\dots\dots(2.1)$$

p : 分布圧力 (kg/mm²), T : 鋼索張力 (kg),
 R : 円筒半径 (mm), d : 鋼索直径 (mm)

また、円筒の半径方向の変形 ξ は

$$\xi = RT/Etd \text{ (mm)} \dots\dots\dots(2.2)$$

E : ヤング率 (kg/mm²), t : 円筒の板厚 (mm)

で表わされる。

この式は、円筒に一樣にかかる張力を圧力に置き換えたものであるが、実際に巻胴に鋼索を順次巻き込んでいくときは、後から巻いた鋼索の張力による円筒の変形のため、先に巻いた鋼索の張力に影響がおよぶもので、式(2.1)の関係は成立しない。

この問題を次のように考える。無限長円筒に張力 T の鋼索を1本巻き付けたとき、円筒の半径方向のたわみ w と単位長さあたりの圧力 P_0 の関係は次式で示される。

$$w = \frac{P_0}{8\beta^3 D} \varphi(\beta x) \dots\dots\dots(2.3)$$

w : 半径方向変位 (mm)

P_0 : 円筒上の単位長さあたりの圧縮力 (kg/mm)

$$P_0 = \frac{T}{R + \frac{t}{2}}$$

D : 板の曲げ剛性 (kg/mm), $D = Et^3/12(1-\nu^2)$

ν : ポアソン比

β : 円筒係数 (mm⁻¹), $\beta^4 = \frac{3(1-\nu^2)}{R^2 t^2}$

$$\varphi(\beta x) = e^{-\beta x} (\sin \beta x + \cos \beta x)$$

図2.1において、いま鋼索を $w = -n$ の位置に1回巻いたときの $x=0$ の点のたわみを W_{-n} とすると

$$w_{-n} = \frac{P_0}{8\beta^3 D} \varphi(\beta, -n) \dots\dots\dots(2.4)$$

で表わされ、次に鋼索を $-n$ から n まで巻いたときの $x=0$ の点のたわみを ξ' とすると、 ξ' は次式で求まる。

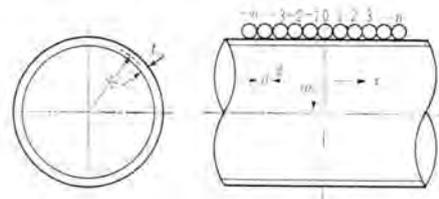


図 2.1 鋼索を巻かれた巻胴の坐標

Fig. 2.1 Diagram of a rope wound drum.

$$\xi' = \sum_{x=0}^n w = \frac{P_0}{8\beta^3 D} \left\{ \varphi(0) + 2 \sum_{x=1}^n \varphi(\beta x) \right\} \\ = \frac{P_0}{8\beta^3 D} \left\{ 1 + 2 \sum_{x=1}^n \varphi(\beta x) \right\} \quad \dots (2.5)$$

ここに n の値は $\varphi(\beta n)$ が零に近づくまで考える。

一度巻かれた鋼索が鋼索と円筒との摩擦力などにより固定され、円筒が半径方向に変形しても鋼索が円周方向に移動しないものと仮定する。いま、 $x=0$ の点に鋼索が 1 本 P_0 の圧縮力で巻いてあるとする。次に、鋼索を P_0 の圧縮力で 1, 2, …, n と巻いていくとすると、 $x=0$ の点は、1~ n までの鋼索による圧縮力のために ξ'' だけ変形する。この ξ'' は式 (2.3) から次のようになる。

$$\xi'' = \sum_{n=1}^n w = \frac{P_0}{8\beta^3 D} \sum_{n=1}^n \varphi(\beta x) \quad \dots (2.6)$$

この ξ'' だけ P_0 の圧縮力で巻いてある $x=0$ の点の鋼索は縮められることになり、このために P_0 は P' に変化する。

鋼索を張力 T で巻き付けたときの鋼索の伸び η は

$$\eta = \frac{T}{E_R A} \left(R + \frac{t}{2} + \frac{d}{2} \right) \quad \dots (2.7)$$

η : 巻いた鋼索の半径方向伸び (mm)

A : 鋼索断面積 (mm²)

E_R : 鋼索の見かけのヤング率 1×10^4 (kg/mm²)

で求め、張力と圧縮力は前式より一次の関係であるから、鋼索の半径方向の伸びの減少は圧力の減少に比例し、圧縮力 P_0 で巻いた鋼索が、後から巻いた鋼索による円筒の変化のためにゆるんだのちの圧縮力 P' は次式で求まる。

$$P' = P_0 \frac{\eta - \xi''}{\eta} \quad \dots (2.8)$$

ゆえに円筒の真の変形 ξ_0 は式 (2.5)、式 (2.8) より

$$\xi_0 = \frac{P_0 (\eta - \xi'')}{\eta} \frac{1}{8\beta^3 D} \left\{ 1 + 2 \sum_{x=1}^n \varphi(\beta x) \right\} \quad \dots (2.9)$$

で求まる。

したがって、鋼索を 1 段巻いたときの円周方向の応力 σ_1 は式 (2.10) で示される。

$$\sigma_1 = \xi_0 E / R \quad \dots (2.10)$$

後述の実験値との比較のために式 (2.2) で示した円筒の変形による鋼索のゆるみを考えに入れられない場合の円筒の半径方向の変形 ξ と、上述の ξ_0 との比をたわみ減少率 k としておく。

$$k = \xi_0 / \xi \quad \dots (2.11)$$

したがって、初めに述べた鋼索張力を一様な分布圧力に置き換えた場合にくらべて真の圧力 p' は kp と考えられることになる。

3. 鋼索を多段巻きするときの巻胴応力

2 段目以上の鋼索を巻くとき 1 段巻きのときにくらべ次のような点が異なっている。巻胴の上に巻かれた鋼索は引張力をうけており、ちょうど焼バメされた円筒のように剛性が增加している。また、鋼索は縦方向引張りについてはより合わせのために、見かけのヤング率が鋼材

巻胴の強度・前田・藤原・土方

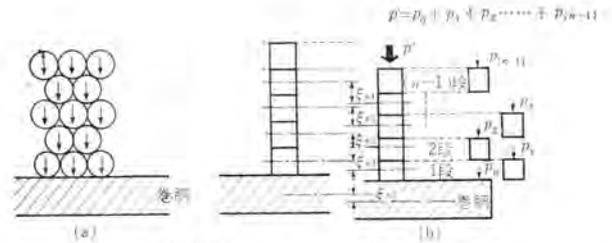


図 3.1 巻胴にかかる圧力と変形

Fig. 3.1 Diagram showing pressure and displacement acting in rope wound drum.

の約半分の大きさを示すが、横方向に押しつけると、より合わせた部分がたいらになろうとして変形する。この見かけのヤング率が非常に小さく縦方向にくらべ、約 1/1,000 の値となり、上から何段も鋼索を巻くと下の鋼索はたいらになってつぶれてきて、半径方向に大きな変位をすることになる。

2 段以上巻くときの鋼索張力 T がおよぼす分布圧力としては、2 章に述べたように円筒殻として、巻胴が次々と変形していくとして求めた p' を考えればよい。 n 段を巻いたときの p' による巻胴の応力を次のようにして求めた。図 3.1 (a) に示すように鋼索は円形の断面をしているが、これを図 3.1 (b) のような断面が長方形で、縦方向と横方向のヤング率がそれぞれ E_R, E_R' の帯と考える。 n 層目の鋼索による分布圧力 p' は巻胴の円筒と、これら 1 段、2 段…… $n-1$ 段の鋼索のおのおのに生ずる内部応力に相当する未知な外圧 p_0, p_1, \dots, p_{n-1} の和とつりあっている。また、この圧力のために円筒は圧縮応力を生じ半径方向に $\xi_{n,0}$ だけ変位する。1 層目の鋼索も同様 $\xi_{n,1}$ 、 $n-1$ 段目は $\xi_{n,n-1}$ だけ変位する。また、鋼索はそれぞれ自分の上に加えられた圧力のために横方向に変形し、その中心線は半径方向に変位しているが、重ね合わせの部分で離れないでいると考えられる。以上の仮定にしたがってつり合方程式を求める。

$$\xi_{n,0} = \frac{p_0 R^2}{E t_0}$$

$$\xi_{n,1} = \frac{p_1 R^2}{E_R t}$$

$$\xi_{n,n-1} = \frac{p_{n-1} R^2}{E_R t}$$

$$\xi_{n,1} = \xi_{n,0} + \frac{p_1 d}{E_R' 2}$$

$$\xi_{n,2} = \xi_{n,0} + \frac{p_1 d}{E_R' 2} + \frac{p_2 d}{E_R' 2}$$

$$\vdots$$

$$\xi_{n,n-1} = \xi_{n,0} + \frac{\sum_{n=1}^{n-1} p_n d}{E_R' 2} + \frac{p_{n-1} d}{E_R' 2}$$

$$p = p_0 + p_1 + p_2 + \dots + p_{n-1}$$

t_0 : 円筒の板厚 (mm)

t : 鋼索の相当板厚 (mm)

E_R : 鋼索の縦方向見かけのヤング率 (kg/mm²)

E_R' : 鋼索の横方向見かけのヤング率 (kg/mm²)

以上の $2n$ 個の連立方程式を解くことにより、 n 層目の鋼索を巻いたときの円筒に生ずる変形量 $\xi_{n,0}$ を求める

ことができる。

したがって n 段目を巻いたときの円筒の最初からの全変形量 ξ_n は次式で求まる。

$$\xi_n = \xi_{1,0} + \xi_{2,0} + \xi_{3,0} + \dots + \xi_{n,0}$$

n 段巻いたときの円筒の応力 σ_n は次式となる。

$$\sigma_n = E \frac{\xi_n}{R}$$

一般に、1 段巻いたときの巻胴の圧縮力または変形量と、 n 段巻いたときの巻胴の圧縮力または変形量との比を巻胴係数と呼び、 n 段巻いたときの応力計算の便をはかっている。この巻胴係数を次式のようにとることができる。

$$K = \frac{\xi_{1,0} + \xi_{2,0} + \xi_{3,0} + \dots + \xi_{n,0}}{\xi_{1,0}}$$

Waters および江川、種田の諸氏の多段巻きの理論におけるこの巻胴係数の K に相当する値は式 (2.2) で述べた ξ に相当する値がとられているが、これらの値と関連づけるために 1 段巻きのときの真の変形量に対する比をとった。

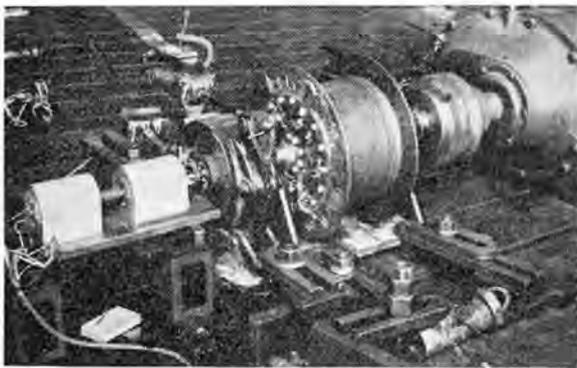
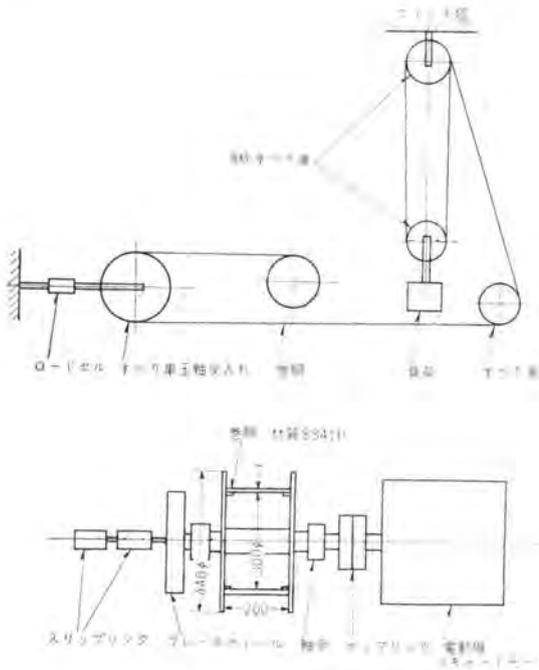


図 4.1 巻胴模型試験装置

Fig. 4.1 Apparatus of model test of hoisting drum.

4. 模型試験および炭坑巻上機による実測結果

4.1 模型試験

試験は模型巻胴に一定張力の鋼索を巻きつけて行ない、巻胴の内面の応力を測定し、前述の理論値と比較検討した。

試験装置は図 4.1 に示してある。巻胴模型の寸法は、内径 300 mm、幅 200 mm で板厚は 12, 8, 4 mm の 3 種類について行なった。使用した鋼索は 5 mm ϕ 、7 \times 6 形、約 250 m で、高さ約 30 m のウインチ塔を 15 往復させて、スベリ車をつけ、重量 1~3 t をつり下げた。鋼索の張力は玉軸受入りの終段プーリでストレングージを用いたロードセルで測定した。巻胴の応力はストレングージを巻胴内面に貼布し、スリッパリングを通して、運転中の巻胴に生ずるヒズミを測定した。

(a) 1 段巻きのとき

1 段だけ鋼索を巻き込んだときの鋼索張力と巻胴応力との関係を k として次式で求めた。

$$k = \frac{-E\epsilon_t}{T/dt}$$

ϵ_t : 巻胴中央の円周方向ヒズミ量

この k の値は、式 (2.1) の板厚の変形によるたわみ減少率と同じものである。

測定は板厚が 12, 8, 4 mm について行なったが、12 mm のときは巻胴が理論上の無限長とみなせる円筒の長さを式 (2.9) より求めると、200 mm で巻胴模型の長さが 200 mm であるので、巻胴両端部のフランジの剛性が影響したために、実測値にも軸力が表われ、 k の値は得られなかった。板厚が 8, 4 mm のときの k の実測値と、式 (2.1) より求めた理論値は、表 4.1 に示すようになりによく一致している。

表 4.1 1 段巻きの圧力減少率 k

板厚	測定値 (12~20 回の平均)	理論値
8 mm	0.938 標準偏差 0.019	0.945
4 mm	0.892 標準偏差 0.029	0.880

(b) 多段巻きのとき

鋼索を巻き込んでいくときの巻胴中央の点 A のヒズミと鋼索位置の関係を図 4.2 に示した。図から明らかなように A 点のヒズミに与える影響は、A 点に近い鋼索ほど大で、遠ざかるにしたがい小さくなっており、ある点より遠く離れた点にかかった圧縮力は影響をおよぼさない。前述の考え方とよく一致している。

鋼索がいく段にも巻かれるにしたがい、ヒズミがどのように変化していくかが、図より明らかである。

板厚が 12, 8, 4 mm のときの代表的な測定ヒズミを表 4.2 に示してある。 ϵ_t , ϵ_a はおのおの円周、軸方向のヒズミであり、単位は 10^{-3} 、符号は円周方向は負、軸方向は正である。軸方向応力のない場合には ϵ_a/ϵ_t がポアソン比 0.28~0.3 になるべきであるが、表のように 12 mm の場合は、切線方向の約 12% の軸方向応力が生じてい

表 4.2 模型試験における巻胴のヒズミ変化

段 ヒズミ	t=12 mm			8 mm			4 mm		
	$-\epsilon t \times 10^6$	$\epsilon a \times 10^6$	$\epsilon a / \epsilon t$	$-\epsilon t \times 10^6$	$\epsilon a \times 10^6$	$\epsilon a / \epsilon t$	$-\epsilon t \times 10^6$	$\epsilon a \times 10^6$	$\epsilon a / \epsilon t$
1	220	85	0.395	290	90	0.310	285	80	0.288
2	410	145	0.354	530	160	0.300	505	145	0.288
3	530	195	0.368	700	205	0.293	665	190	0.285
4	620	235	0.372	830	245	0.295	775	225	0.290
5	700	265	0.380	920	275	0.299	860	250	0.290
6							915	275	0.301
5							815		
4	540			760			715		
3	440			610			605		
2	330			460			465		
1	190			270			275		

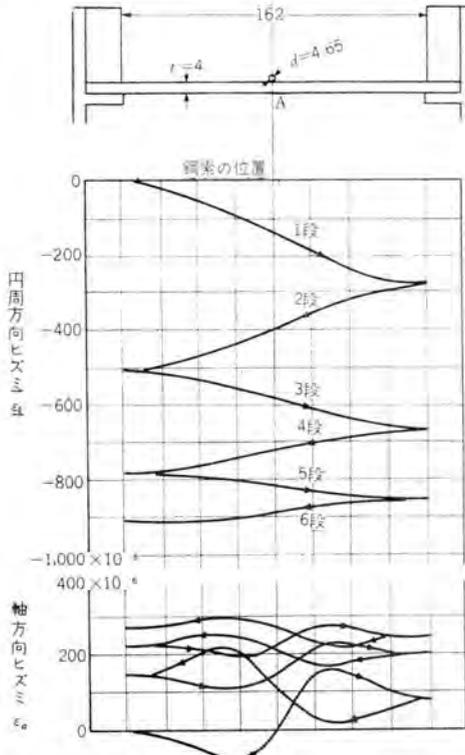


図 4.2 A 点のヒズミに影響する鋼索の位置の関係

Fig. 4.2 Strain change of drum shell when rope is wound.

る。8, 4 mm の場合にはまったくなくなっている。

巻胴係数 K の実測値を次式により求めて、図 4.3~図 4.5 に示す。

$$K = \frac{n \text{ 段巻いたときの切線方向ヒズミ}}{1 \text{ 段巻いたときの切線方向ヒズミ}}$$

8, 4 mm の場合の理論値を図 4.4, 図 4.5 に併記したが、実測値とはほぼ一致している。

実験に用いた鋼索の縦方向見かけのヤング率は新しいときはより合わせのために $7 \times 10^8 \text{ kg/mm}^2$ であったが、数回引張荷重を与えたあとは $1 \times 10^8 \text{ kg/mm}^2$ に落ちつき、理論値の計算には $1 \times 10^8 \text{ kg/mm}^2$ を用いた。横方向見かけのヤング率 E_R' は 7×6 形における測定結果は 14 kg/mm^2 であったので、この値を採用した。

Waters 氏の E_R' の値は 6.3 kg/mm^2 であったので、 E_R' にこの値をとって板厚 4 mm の場合の図 4.5 に併記した。実験結果は二つの理論値の間になっており鋼索の

巻胴の強度・前田・菰原・土方

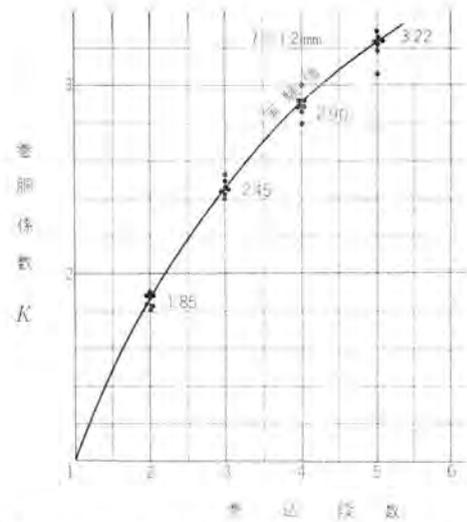


図 4.3 模型実験による巻胴係数 (板厚 12 mm)

Fig. 4.3 Factor of layers of a rope wound drum.

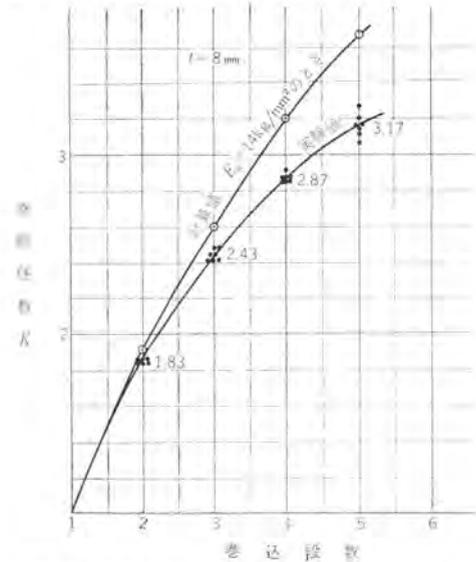


図 4.4 模型実験による巻胴係数 板厚 (8 mm)

Fig. 4.4 Factor of layers of a rope wound drum.

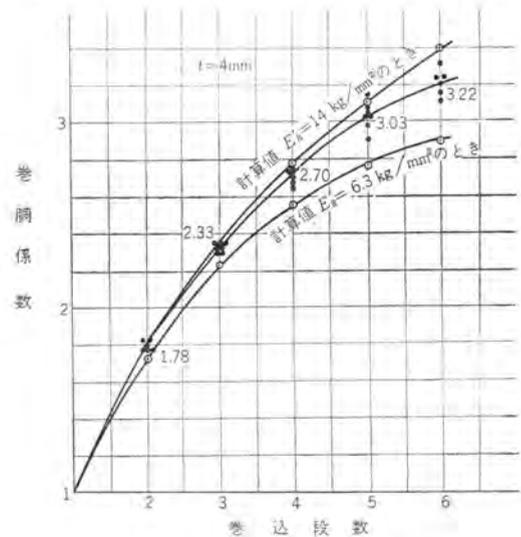


図 4.5 模型実験による巻胴係数 板厚 4 (mm)

Fig. 4.5 Factor of layers of a rope wound drum.

横方向ヤング率 E_R' の値の小なるほど巻胴係数は小さくなることわかる。

また表 4.2 において巻きもどしのときのほうがヒズミが速くもどっていることは興味あることである。

(c) 巻胴の破壊試験

前記諸測定完了後、鋼板の降伏点を超過するような張力の鋼索を巻き込み、巻胴の塑性ヒズミの進行状態を調べた。

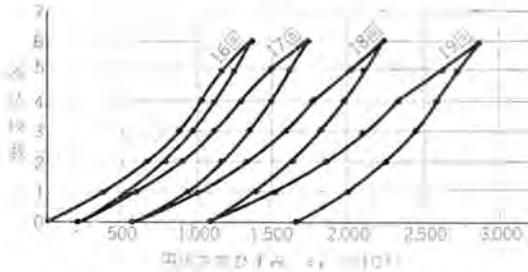


図 4.6 過負荷試験による永久ヒズミの発生状況

Fig. 4.6 Plastic deformation of drum shell under over load test.

巻き込み段数と円周方向ヒズミとの関係の過程は、図 4.6 に示すように塑性変形にはいったと思われる後半の巻き込み数でヒズミの増加はいちじるしいことがわかる。この場合もどりは正常にもどり、永久変形が残る。しかし、1回の巻き込み行程で、それほど大きな変形は与えられない。それは初めに巻き込んだ鋼索の張力がゆるんでいくために、ある程度以上永久変形すると、荷重が減少して平衡状態にもどるからである。このようにして 50 回の過負荷試験の結果、約 1% の永久変形を与えた。巻胴は一度の過負荷では、それほど大きな変形は与えないが、くり返せば進行していくことが確かめられた。

4.2 炭坑巻上機による実測試験

(1) 三菱鉱業 高島鉱業所における実測結果

巻上機にて定箱の荷を引き上げる際の巻胴各部の応力変化を ストレンゲージ を用いて、スリッパリングを通して測定した。巻上機では普通、地巻と称して初めに 1 段前後巻いてあるが、測定は地巻のある場合と、ない場合について測定した。

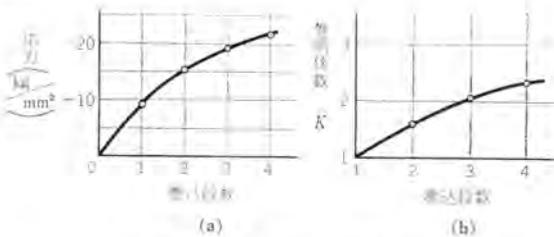


図 4.7 巻胴応力の実測値

Fig. 4.7 Measured stress of hoisting drum for coal mine.

測定巻上機は 225 kW 複胴巻上機、定箱、11 箱、16.9 t で鋼索直径 30 mm である。

測定応力の一例を図 4.7 (a) に示し、図 (b) にはこれより求めた巻胴係数を示してある。

(2) 三菱鉱業 古賀山鉱業所における実測結果

測定した巻上機は 450 kW 複胴巻上機で定箱、11 箱約 33 t のものについて (1) と同様負荷運転中の巻胴応

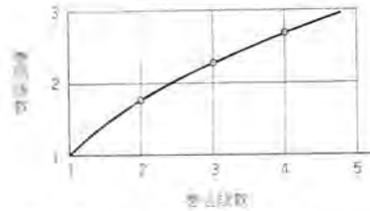


図 4.8 実物巻上機の巻胴係数

Fig. 4.8 Factor of layers of hoisting drum for coal mine.

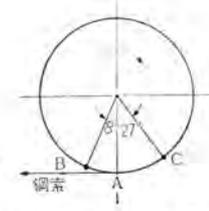


図 4.9 鋼索による応力の作用範囲

Fig. 4.9 Affected zone of rope tension.

力を測定した。

巻胴中央部における測定値より、巻胴係数を求めた結果を図 4.8 に示してある。

また、この測定では鋼板の 1 点におよぼす円周方向のヒズミの変化を鋼索を解きながら調べた。その結果は、図 4.9 において A 点に ストレンゲージ があるとすれば、B 点が真下にくるとき A 点の応力が変化し始め、C 点が真下にくるまで、その変化は止まった。この結果より 1 点のヒズミ変化に与える円周方向の範囲は、せまいものと考えられ、ある程度の張力のゆるみでは円周方向の移動がないと考えた理論式の仮定が正しいことが認められる。

5. む す び

巻胴の設計において従来用いられていた Waters 氏の巻胴係数は、巻段数が 4 以上の場合には巻段数に関係なく、一定の値をとり 2.15 とされていた。しかしながら、実物巻上機巻胴における実測結果や巻胴模型による試験結果から、この値は設計上危険側にあることが確かめられた。

巻胴係数は巻段数が増加するにしたがい、増加の割合は徐々に減少するけれども、普通巻上機の巻段数 4~6 段程度では一定値とはならない。

鋼索の変形、巻胴の変形を考慮した 2, 3 章に述べた理論値はこれらの実測結果とほぼ一致した。この理論式によれば、巻胴係数は鋼索の横方向圧縮荷重による変形の影響が大で、実験結果によれば鋼索の横方向の見かけのヤング率が直径によって異なり、この値の大きいほど巻胴係数は大きくなる。したがって実際の巻上機については鋼索のこのような性質を十分調べて、本文に述べたような計算を行えば十分精度ある巻胴の強度が求められる。

終わりに巻上機応力測定にあたり、種々ご協力をいただいた三菱鉱業 高島、古賀山鉱業所、当社長崎製作所の各位、ならびに模型実験を計画実施した長崎製作所熊本技師に厚く感謝します。

参 考 文 献

- (1) E.O. Waters: Rational design of hoisting drums, ASME Trans. 42, 463 (1921).
- (2) 江川・種田: ロ-ラの多層巻きにより巻胴が受ける外圧, 日本機械学会誌 60, No. 463, p. 798 (昭 32-8).
- (3) S. Timoshenko: Theory of Plates and Shells.
- (4) 熊本・菟原: 巻胴に生ずる応力と ロ-ラの張力, 岡山臨時大会講演会前刷 4 部, 49. (昭 31-11)

冷媒液中のエナメル線の耐摩耗性

研究所 白井万次郎*・森田義男**

Abrasion Resistance of Enameled Wire in Liquid Refrigerant

Research Laboratory Manjiro SHIRAI • Yoshio MORITA

Abrasion resistance tests have been conducted in the past only in the air. In the case of hermetically sealed refrigerator motors, however, the enameled wire is used in a mixed liquid of refrigerant and oil. To simulate operation in actual conditions as much as possible, abrasion tests in this mixed liquid have been made on the wire with an apparatus specially set up. The results have revealed that the wire having high abrasion resistance in the air withstand well even in the liquid. In general the abrasion resistance is found higher in the liquid than in the air. This is considered that, though the enamel coating may be softened by the refrigerant, the lubricating action of the liquid offsets this weak point. If examined with a variety of liquids, the wire withstands best in oil, and the next in solution R12, in solution R22 being the last.

1. ま え が き

密閉形冷凍機用電動機に使用されるエナメル線はマグネット線として要求される諸性質のほかに耐冷媒性が要求される。とくに冷媒としてR22を使用する場合はR22がR12より溶解力が強いためにエナメル線皮膜の耐冷媒性が問題とされる。筆者はさきに冷媒、油、それらの混合液がエナメル線の電気的性質におよぼす影響について報告した⁽¹⁾。しかし冷凍機用電動機の事故は直接にエナメル線の電気的性質の低下によるよりも、エナメル線皮膜が冷媒により軟化し、機械的損傷を受けることから生ずるといわれている⁽²⁾。今回は冷媒がエナメル線の機械的性質におよぼす影響について試験したところを報告する。

2. 試験装置

まず冷凍機使用中の振動によるエナメル線の摩擦による損傷が考えられる。JIS C 3203 (ホルマル線) 規定の摩耗試験は空気中における試験であるが、実際の密閉形冷凍機の電動機は冷媒・油混合液中に浸漬している。これらの液中の摩耗性についてはこれまで報告したものがない。エナメル線をこれらの液中に浸漬したのちに取り出して空気中で摩耗試験を行なったのでは

冷媒はすみやかに蒸発してしまつてその影響をみる事ができない。よつて冷媒液中でエナメル線の摩耗試験が行なえるような試験機を作り、各種の合成樹脂を用いたエナメル線の摩耗試験を行なつた。

冷媒は一般に室温で高い蒸気圧をもつから、耐圧容器中で摩耗試験を行なう必要がある。よつて図2.1に示すような試験機を作つた。耐圧容器中にピアノ線を張り、これと直交して図のように試料のエナメル線を張る。試料の一端には500gのオモリをつける。他端は電動機の軸の中心よりはずれた所にある留め具に結ぶ。電動機は耐圧容器の外にあつて容器を貫く軸はゴムによつてシールされる。電動機の回転によつて試料エナメル線はピアノ線上を上下に動き摩擦される。摩擦によつてエナメル線皮膜が破れた場合はエナメル心線よりピアノ線に電流が流れ、警報を発するようになってゐる。電動機が動き始めてから警報を発するまでの時間を計る。これより摩擦回数を

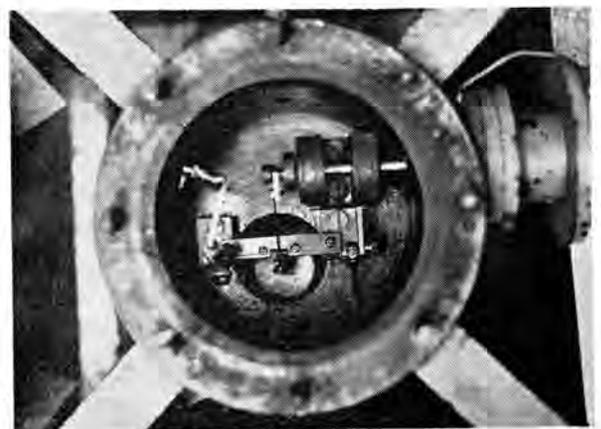
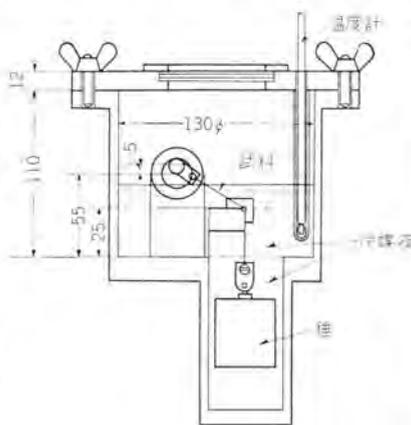


図 2.1 冷媒液中のエナメル線の摩耗試験機

Fig. 2.1 New abrasion tester of enamelled wire in liquid refrigerant.

冷求めることができる。

試料を浸漬する冷媒、油およびその混合液はあらかじめ冷媒を冷却、液化して作っておき、試料とピアノ線の接触部以上に入れておく。試験はすべて 0°C で行なった。耐圧容器は試験中外側から氷水で冷却して 0°C に保った。

この試験機で注目すべき点はピアノ線との接触部で試料のエナメル線が屈曲されていることである。この点は電線が直線のままで摩擦される JIS 試験法と条件を異にする。またオモリが軽い場合は試料が浮き上がるおそれがあり、試験はすべて 500g のオモリで行なった。図 2.1 の写真はこの試験機のフタをあけて上から内部を示したものである。

3. 試料および浸漬条件

試料に用いたエナメル線は冷凍機用のエナメル線で、ホルマル線、レクトン線、ナイロンエボン線、レクトンエボン線を含み、油性エナメル線は含まれていない。太さは約 0.9 mm のものについて試験した。一つの試験に試料は 3 個を用いて平均した。

浸漬条件は空气中、油中（冷凍機油 #150）、R12 液、R22 液、油 ⊕ R12 液、油 ⊕ R22 液中で、混合液の割合は容量で油 4 に対し冷媒 1 である。比較のため JIS 法による空气中の摩擦試験も同じ試料について行なった。

4. 実験結果

実験結果は表 4.1 に示す。新試験機による実験結果はかなりのバラツキがあったが、JIS 法の場合にもかなりバラツキがあり、その程度は同じくらいである。また試料間あるいは浸漬液間で平均値にかなりの差があるので、新試験機によっても試料間の優劣をみる事ができた。

JIS 法と新試験機による結果を比較してみると、図 4.1 に示すようにほぼ比例関係がなりたつ。全体の平均値と原点を結ぶ線よりかなりはずれているのは、#6 と #8 である。これは新試験機では試料エナメル線が屈曲されているので、その影響をうける試料と思われる。

各浸漬液間の平均的な値を図 4.2 に示す。エナメル線の耐摩耗性は空气中より液体中のほうがよくなる。油中がもっともよく、R12、R22 の順になる。これはこれらの液体中でエナメル線皮膜が軟化するとしても、液体は潤滑剤として働き、摩擦を減少することによるものであろう。冷媒に油が混合すると、さらに耐摩耗性がよくなるが、R22 を含んだものは R12 を含んだものよりわるい。これは冷媒液だけの場合と傾向が同じであるから、R22 のほうが平均してエナメル線皮膜を軟化するといえよう。試料間では #1、#4、#7 が平均としてはよく、これは JIS

表 4.1 冷媒液中のエナメル線の摩耗試験

試料 No.	JIS 法	新 試 験 機						平均
	空気	空気	油	R12	R22	油 ⊕ R12	油 ⊕ R22	
1	34	340	1,927	2,075	546	1,683	1,541	1,352
2	9	82	414	129	85	147	118	163
3	11	83	180	131	65	241	116	136
4	29	309	4,117	1,120	316	4,815	432	1,852
5	12	156	313	329	1,280	1,901	1,407	896
6	25	150	646	1,116	194	1,626	853	764
7	31	353	1,200	1,430	515	2,043	2,171	1,294
8	7	15	42	181	67	1,206	188	284
平均	20	186	1,105	814	389	1,708	853	843

摩擦回数 1 回秒、冷媒・油混合割合 1:4 (Vol)、温度 0°C (JIS 法室温)、オモリ 500g、油 冷凍機油 #150

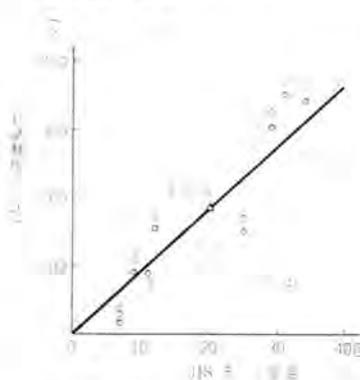


図 4.1 JIS 法と新試験機の比較

Fig. 4.1 Comparison of abrasion tester in JIS method and new tester.

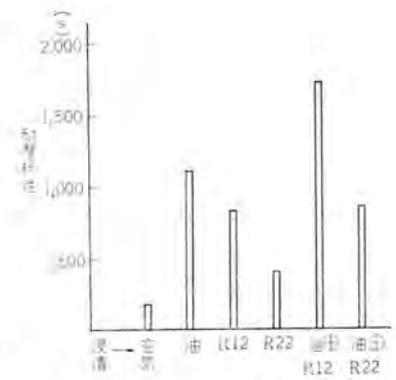


図 4.2 新試験機によるエナメル線の耐摩耗性浸漬液間の比較

Fig. 4.2 Comparison of abrasion resistance of enamelled wire in various liquid refrigerant by new tester.

法においてもよい結果を得ている。この点 JIS 法によって選択されたエナメル線は冷媒液や油中でも耐摩耗性がよいといえよう。

しかし、以上は各浸漬間を平均してみた場合であって、表 4.1 を詳細に検討してみると、各浸漬液において空气中の耐摩耗性に比べてとくにすぐれている試料が見出される。たとえば新試験機による油中と空气中の耐摩耗性を各試料について比較してみると、油中における耐摩耗性は #4 がとくにすぐれていることがわかる。同様に R12 液中では #1 と #6 がよく、これに油が混合されると #4 がよい。しかるに R22 になると #5 が他に比べてきわだってよく、これに油が加わると #5 のほか、#7 がよい結果を得ている。

5. 発泡試験と抽出試験

エナメル線の耐冷媒性の試験として普通よく行なわれる試験に発泡試験 (Oven blister test) と冷媒液による抽出試験がある。これらの試験も行なったので、ここに付け加えておく。発泡試験は R22 について次のように行なった。

試料のエナメル線約 30 cm をオーブン中で 150°C で 4 h

加熱する。出してから室温で冷し、冷凍機油と、R22 液の混合液 (1:1 Vol) を入れた耐圧容器中に入れる。これを 40°C で 16 h 保つ。その後できるだけ早く R22 を放出し試料を出す。ただちに 120°C のオーブン中に 5 min 入れる。耐圧容器を開いてから試料を入れるまでの時間を 1 min 以内で行なう。オーブンから試料を出しナフサで洗う。絶縁皮膜に発泡があるかどうかを点検する。

実験結果は図 5.1 の写真に示す。発泡試験前後のエンメル線の外観を示してある。この結果をみると発泡のまったく見られなかったのは #4 だけである。#7 のごときは顕著にふくれあがり、おそらく他の性質がすぐれているとしても、この試験だけで問題とされるであろう。

R22 用エンメル線の試験として冷媒抽出試験も多く行なわれている。よって冷媒抽出試験を次のように行なった。

約 0.6 g の絶縁皮膜をもつ電線をコイル状に巻き、150°C のオーブン中に 15 min 乾燥し秤量する。これをあらかじめ秤量した試験管に入れる。これに冷却液化した冷媒液を入れオートクレーブ中に入れる。オートクレーブにはさらに冷媒ガスを約 10 気圧まで入れる。これを 100°C に 24 h 加熱する。その後これを室温まで冷却したのち、冷媒をガス状でオートクレーブから静かに放出してから、試料を取り出し、クロロホルムで 4 回洗浄する。洗液はもとの試験管にもどす。このクロロホルムを蒸発させてから試験管を 150°C で 15 min 乾燥のち、秤量する。この試験管の増量をもってエンメル線皮膜からの抽出量とし、皮膜の重量に対する百分率で表わす。皮膜の重量を求めるには電線の絶縁皮膜を焼いて電線から除く。すべての皮膜が燃えて除かれたのち、銅が均一に赤いうちに試料をメタノールに浸漬する。銅線は還元銅となる。これを 15 min 空気中で冷して秤量し、絶縁皮膜の重量を求める。(抽出量を求めるのに冷媒液に浸漬のち、試料電線を 150°C で 15 min 乾燥して秤量し、電線の重量減より求めることが普通行なわれる。筆者の経験ではこの方法によると電線皮膜に溶解している冷媒が完全に蒸発せず、かつ冷媒への抽出量は普通小さいから、かえって電線の重量が増すことが多い。乾燥時間を長くしても電線はなかなか恒量とならない。よって試験管のほうの重量増加を抽出量として求めた。前者の方法よりこのほうが再現性のよい結果が得られた)

この試験は皮膜重量を 0.6 g にとろうとすると、試料電線の長さは約 4 m を要し、しかも抽出量がばらつくからくり返しを必要とする。このためかなり多量の試料が必要となり、試料の少ない場合には行ないがたい。

よって量が十分あった数種の試料につき行なった試験結果を表 5.1 に示す。トリクレンによる抽出量と比較してある。トリクレンによる抽出条件は 90°C、2 h である。このように室温で液体である他の溶剤による抽出試験で冷媒による抽出量を評価しようと試みるのは普通よく行な

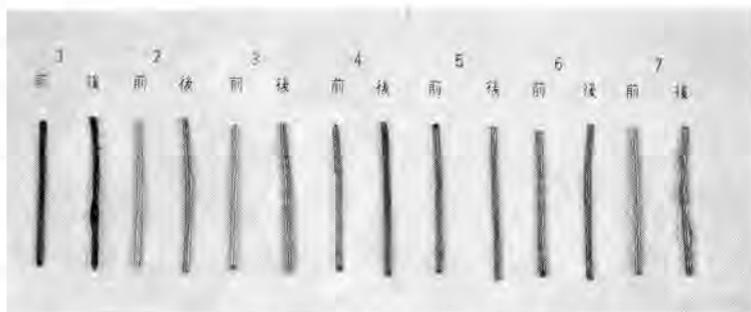


図 5.1 エンメル線の発泡試験結果

Fig. 5.1 Result of the oven blister test of enamelled wire.

表 5.1 エンメル線の冷媒抽出

試料	A	B	C	D
R12 液	0.156%	0.067	0.302	0.557
R22 液	0.194	0.158	0.107	0.508
トリクレン	0.083	0.294	0.070	1.543

抽出温度-時間 R12, R22 100°C 24 h
トリクレン 90°C 2 h

われるところであるが、この結果にみるように実際の冷媒で抽出した場合とかならずしも平行しない。最近、使用される冷媒の種類はかなり多く、その溶解力は種類によって異なっており、すべての冷媒の抽出量を他の一つの溶剤の抽出量から評価することは困難である。筆者は実際に使用する冷媒で試験してみるのがもっともよいと考える。

6. む す び

冷凍機用電動機の事故は直接にマグネットワイヤの電気的性質の低下によるよりも、エンメル線皮膜が冷媒により軟化し、機械的損傷をうけることから生じるといわれている。これには冷媒液中の耐摩耗性が問題になると考えたが、かかる実験はこれまで報告されていない。よって新しい試験機を作り、冷媒液中のエンメル線の摩耗試験を行なった。この試験機による実験結果をみると、冷媒液あるいは冷媒・油混合液中のエンメル線の耐摩耗性は冷媒液がエンメル線皮膜を軟化すると考えられるが、一方、液体が潤滑作用を呈するので空气中より耐摩耗性がよくなる。一般に空气中の耐摩耗性のよい電線はこれらの液中でもよいといえる。平均して油中がもっともよく、次に R12 液、R22 液の順である。またエンメル線の耐冷媒性の試験として普通よく行なわれる発泡試験、冷媒抽出試験もあわせて行ない、これらの試験につき気づいた点を述べた。これらの試験およびさきに報告した電気的試験により、エンメル線の冷媒液中の挙動をほぼ評価しうると考えるが、エンメル線は耐冷媒性以外に一般に要求される諸性質がある。これらの試験結果あるいは工場における作業性を考慮して適当なエンメル線を選ぶべきである。

終わりにこの実験に対し緊密な協力をいただいた当社冷凍機担当の各製作所関係者諸氏ならび研究所坂田技師に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 白井, 原, 平林: 「三菱電機」 34, p. 671 (昭 35)
- (2) B. J. Eiseman: Ref. Eng. p. 61 (1955)

酸化物被覆陰極用ニッケル金属組織とグリッドエミッション

研究所 立原芳彦*・秦卓也**・花田武明***

Grid Emission and Crystal Structure of Core Nickel for Oxide Coated Cathode

Research Laboratory Yoshihiko TACHIHARA・Takuya HATA・Takeaki HANADA

In the production of receiving tubes having barium oxide coated cathode, the quality of grid wire materials, their surface condition, grid wire temperature, and the condition of exhausting process have a great bearing on the grid emission. Besides these factors, the crystal structure of base nickel is found to effect the emission. Free barium, produced by chemical reaction between barium oxide coating and core nickel, diffuses to be absorbed into crystal grain boundaries of base nickel. The more the free barium atoms diffuse into it, or the more nickel grain boundaries exist in the surface, the lower the grid emission becomes. This is the conclusion of the writers' experiments.

1. ま え が き

酸化バリウム被覆熱陰極に用いる基体ニッケルは、管球の種類によって要求される電子放出の活性化速度、低蒸発性、傍熱ヒータ線との絶縁性、低格子電子放出、低境界層抵抗などの諸特性に応じて、含有合金化させる還元性元素の種類と、その組み合わせおよび量を異にした“Active”ないしは“Passive”ニッケルを使いわけるのである。表1.1はASTMの、表1.2はJISのそれぞれの陰極用基体ニッケル組成規格を示す。もっとも理想的なものは上記諸特性のすべてを高度に満足するものであ

るが、それに近いものとして普通には中間の“Normal”ニッケルが広く使われている。格子電子放出についてはその高低に影響する因子が陰極以外の諸材料とくに格子線の品質、その表面状況、格子線温度、および管球排気作業条件にあることが多いとされていた。われわれはNormalニッケルにおいて格子電子放出に対して基体ニッケルの金属組織もその高低の因子として影響することを認めたのでここに報告する。

2. 試 料

6SN7GT 双三極管にカルシウム13%入りのトリプルカーボネイト被覆の外径1.14mm、長さ27mmのニッケルスリーウ傍熱陰極を組み込み、基体ニッケル地金18種類を5組に分け、1種類あたり10本の真空管を製作し、3,000~4,000hの寿命試験を行なった。

3. 測 定

3.1 管球の電気的特性

エミッション、陽極電流、相互コンダクタンス、グリッドエミッションを3,000~4,000hまで測定した。

3.2 化学分析

電気的特性測定後の管球を破壊し、中の陰極ニッケルスリーウを取り出し、1:4酢酸溶液で2回洗い、表面のトリプルカーボネイトを溶解除去し、水洗後、スリーウを試験管に移し、水10ccを加え超音波洗浄器で30min洗浄することによって、寿命試験中にスリーウニッケルの金属組織粒界中へ拡散している遊離バリウムを抽出させる。抽出が終わればマイクロピレットを用いてドーナツ液状ユニバーサルBTを指示薬として0.001Mol/l EDTA溶液でマグネシウム、バリウム、ストロンチウムの含量を滴定する。また超音波抽出

表 1.1 酸化物被覆陰極用基体ニッケル組成 ASTM (F23957T 1957-12)

種類	Grade	Cu	Fe	Mn	C	Mg	Si	Ti	W	Ni+Co
Active	3	<0.20	<0.20	<0.20	<0.08	—	0.15 ~0.25	—	—	>99.00
	4	<0.04	<0.10	0.02 ~0.10	<0.08	<0.01	0.15 ~0.25	<0.02	—	>99.25
	6	<0.04	<0.05	<0.02	<0.08	<0.01	0.15 ~0.25	<0.02	—	>99.25
	7	<0.20	<0.20	<0.20	<0.10	0.01 ~0.10	0.02 ~0.06	<0.02	3.5 ~4.5	>94.50
	10	<0.15	<0.20	<0.30	<0.10	—	<0.10	—	—	>99.00
	11	<0.20	<0.20	<0.20	<0.08	0.01 ~0.10	0.01 ~0.05	—	—	>99.10
Passive	21	<0.04	<0.05	<0.02	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01	—	>99.50
	22	<0.04	<0.05	<0.02	<0.05	<0.01	<0.02	<0.01	—	>99.50

表 1.2 電子管陰極用継目なしニッケル管 JIS (H4502-1959)

種類	買別	化学成分 (%)									
		Ni+Co	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	C	S	Ti	W
電子管陰極用ニッケル板 1種	A	>99.2	0.05 ~0.25	—	<0.10	<0.20	<0.20	<0.10	<0.008	—	—
	B	>99.2	0.05 ~0.25	0.01 ~0.15	<0.10	<0.20	<0.20	<0.10	<0.008	—	—
2種	>99.2	0.01 ~0.05	0.01 ~0.10	<0.10	<0.20	<0.20	<0.10	<0.008	—	—	
3種	<99.7	<0.02	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.008	<0.01	—	
4種	>4.50	0.02 ~0.06	0.01 ~0.10	<0.20	<0.20	<0.20	<0.10	<0.008	<0.02	3.50 ~4.50	

液の一部で分光分析を行なった。

3.3 金属結晶粒度

カーボネイト被覆直前および4,000 h 寿命試験ののち超音波抽出したニッケルスリーブの横断面の金属結晶粒度を顕微鏡で観察した。

4. 測定結果

4.1 グリッドエミッション

グリッドエミッションの測定結果を表4.1に示す。この値は試験番号7/2, 7/21, 7/27では真空管10球の陰極20

表 4.1 グリッドエミッション (I_c) 値* (μA)

試験番号	0 h	17 h	64 h	227 h	395 h	779 h	994 h	1,490 h	1,952 h	2,432 h	2,944 h	3,112 h	3,397 h	3,901 h	I_c 平均値 ①	①より算出した積算値 (μAh)
7/2-A	0.386	0.034	0.038	0.073	0.073	0.202	0.191	0.252	0.124	0.077	0.074	0.115	0.178	0.079	0.136	530
7/2-B	1.758	0.025	0.078	0.484	0.629	0.615	0.727	0.081	0.351	0.639	0.505	0.771	0.591	0.266	0.537	2,090
7/2-C	1.260	0.024	0.097	0.523	1.814	1.107	1.581	0.165	0.231	0.517	0.888	0.739	1.453	0.276	0.762	2,970
	0 h	40 h	65 h	245 h	885 h											
7/21-A	1.419	0.398	0.444	0.090	0.067										0.485	428
7/21-B	1.030	0.230	0.241	0.043	0.041										0.317	280
7/21-C	0.599	0.208	0.308	0.042	0.047										0.255	226
	0 h	19 h	91 h	187 h	354 h	522 h	712 h	903 h	1,128 h	1,581 h	1,981 h	2,477 h	3,002 h	3,457 h		
7/27-A	0.979	0.121	0.071	0.128	0.126	0.091	0.075	0.065	0.072	0.057	0.051	0.068	0.6112	0.047	0.183	632
7/27-B	1.574	0.034	0.025	0.051	0.080	0.084	0.069	0.055	0.064	0.039	0.013	0.051	0.083	0.041	0.169	582
7/27-C	0.991	0.065	0.026	0.064	0.083	0.085	0.075	0.084	0.058	0.025	0.039	0.080	0.080	0.020	0.123	424
7/27-D	0.773	0.069	0.030	0.056	0.076	0.079	0.071	0.058	0.057	0.030	0.025	0.042	0.0108	0.042	0.108	374
7/27-E	0.326	0.025	0.027	0.058	0.074	0.073	0.663	0.037	0.033	0.035	0.022	0.037	0.152	0.050	0.074	254
	0 h	20 h	92 h	139 h	477 h	638 h	1,028 h	1,459 h	1,891 h	2,279 h	2,780 h	3,458 h				
8/3-A	0.061	0.05	0.055	0.028	0.158	0.117	0.068	0.157	0.041	0.073	0.087	0.009			0.075	260
8/3-B	0.850	0.044	0.053	0.036	0.118	0.069	0.110	0.437	0.245	0.167	0.098	0.005			0.185	612
8/3-C	0.638	0.079	0.062	0.043	0.095	0.066	0.099	0.152	0.201	0.175	0.057	0.010			0.139	482
8/3-D	0.0618	0.036	0.052	0.029	0.129	0.105	0.093	0.512	0.224	1.82	0.055	0.004			0.260	900
8/3-E	0.334	0.041	0.047	0.029	0.120	0.144	0.108	0.180	0.048	0.078	0.066	0.003			0.100	344
	0 h	67 h	185 h	488 h	615 h	775 h	902 h	1,166 h	1,574 h	2,062 h	2,515 h	3,019 h				
8/10-A	0.118	0.067	0.076	0.083	0.121	0.065	0.06	0.346	0.174	0.175	0.415	0.166			0.155	469
8/10-B	0.634	0.069	0.075	0.083	0.124	0.064	0.129	0.559	0.263	0.158	0.641	0.713			0.293	883
8/10-C	1.156	0.081	0.099	0.109	0.142	0.093	0.094	0.726	0.407	0.268	0.490	0.164			0.361	1,090
8/10-D	1.371	0.062	0.081	0.136	0.308	0.148	0.094	0.499	0.294	0.390	0.479	0.289			0.346	1,042
8/10-E	0.501	0.073	0.073	0.070	0.18	0.222	0.141	1.069	0.223	0.494	1.307	0.253			0.384	1,160

* 6SN7, 10球 (7/2, 7/21, 7/27), 5球 (8/3, 8/10) の陰極 20本, 10本の平均値

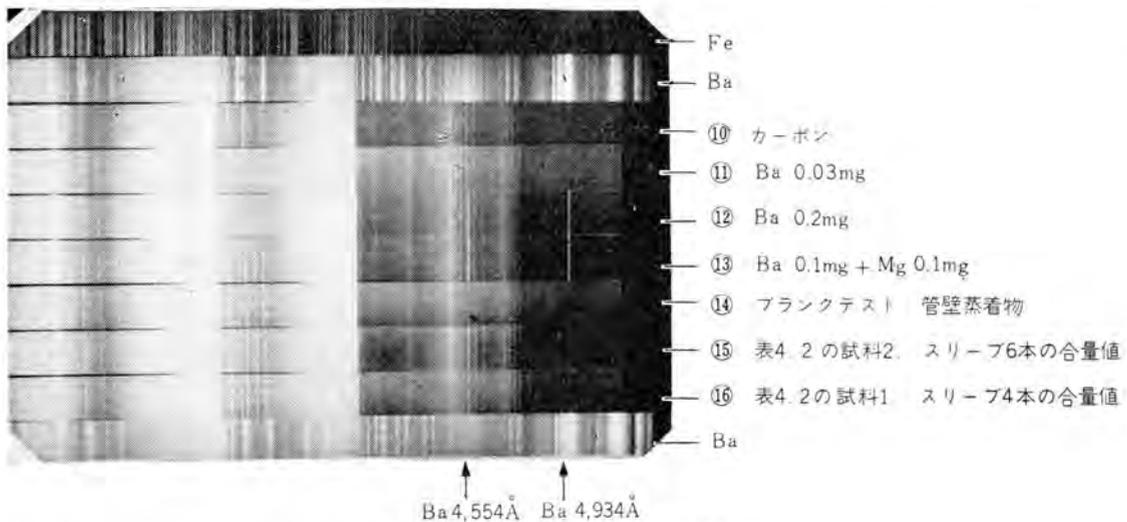


図 4.1 超音波抽出液の分光分析写真
Fig. 4.1 Spectrograph of ultrasonic extracted samples.

表 4.2 超音波抽出液の分光分析

分析元素	試料-1 (life test 500 h $E_p=on$) スリーブ地金 MN-6 スリーブ6本の含量値	試料-2 (life test 500 h $E_p=off$) スリーブ地金 MN-6 スリーブ6本の含量値
Ba	⑬ 0.1 mg > ⑫ 0.2 mg	⑩ 0.03 mg < ⑪ 0.2 mg
Mg	⑬ 0.1 mg > ⑫	+ < ⑩ 0.1 mg
Sr	⑬ ±	⑩ ±
Ni	⑬ +	⑩ +
Si	+ <	+ <

±: 微量 +: 極微量~微量 ±: 極微量
<: 以上 >: 以下 ⑩: []内認めず
⑩: 炭素粉末 200 mg に Ba 0.03 mg 吸着
⑪: " " Ba 0.2 mg " "
⑬: 炭素粉末 200 mg に Ba 0.1 mg と Mg 0.1 mg 吸着
⑩, ⑪, ⑬ は模型的に作った試料である。

本の, 8/3, 8/10 は真空管5球の陰極10本のそれぞれの平均値である。

4.2 化学分析

まず超音波抽出液の分光分析の結果を図4.1と、表4.2に示す。分光分析に際しては2~3球の超音波抽出液を合わせて高純度分光分析用炭素電極の粉末200mg中に加え、抽出液を蒸発乾固し、抽出元素を炭素粉末に吸着させ、それを分析試料とした。

この分光分析から500h以上寿命試験を行なったものはその基体ニッケルスリーブの結晶粒界中へ遊離バリウムが粒

界腐食によるかまたは電気分解により拡散し、吸蔵されていることを確認した。また、その中にはマグネシウムも混入しているが、スペクトル分析の結果である表 4.2 よりわかるように、マグネシウム量はきわめて微量である。これは基体ニッケルからの遊離であり、ドーライトと EDTA によるバリウム定量に際してはこのマグネシウムは無視した。また、この拡散吸蔵バリウムがニッケルスリーブ表面とニッケル組織内とにどのような割合で吸蔵されているかを知るために次の試験を行なった。すなわち被覆層物質をくり返し稀酢酸で溶解除去したスリーブを、1.5% H₂O₂ を含ん

表 4.3 500 h 寿命試験後のスリーブよりの溶出

陰極地金インゴット No.	粒度	バリウム* (mg)	
		E _p =off	E _p =on
MN-4	大	0.026	0.044
MN-5	大	0.009	0.041
MN-6	小	0.051	0.068
MS-1	小	0.030	0.036

* スリーブ2本の含量値

だ 1NHNO₃ に浸漬し、スリーブ表面の中間膜 (境界層) を溶解除去し、これを上述と同様に、超音波で洗浄し、中間膜よりさらに内部に拡散している吸蔵バリウムを抽出した。その一部をスペクトル分析を行なった結果、やはりバリウムが検出された。そして EDTA で定量の結果、スリーブ全体に拡散吸蔵されているバリウム量の約 80% が中間膜に、残り約 20% が中間膜よりさらに内部に、すなわちニッケル組織中に吸蔵されていることがわかった。次に陽極電圧をかけた正規の寿命試験 (E_p=on) とヒータ電圧だけ印加 (E_p=off) の寿命試験を 500 h まで行ない、陽極電圧印加の有無による拡散バリウム量の差を調べた。その結果は表 4.3 に示すように陽極電圧が印加されていると、陰極基体ニッケル中に吸蔵されているバリウムは印加されていないときよりはるかに多い。

次に寿命試験 3,000~4,000 h 行なったスリーブの超音波抽出液の分析結果を表 4.4 に示す。

これによればスリーブ被覆表面積 1 cm² あたり遊離バリウムが最大 40 μg、最少 6.7 μg、平均 22.7 μg 吸蔵され

表 4.4 ライフテスト後の結晶粒界中からの遊離バリウムの溶出

試験 No.	地金	フラット(時間)	バリウム定量値* (mg)										定量平均値 (mg)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
7/2-A	MN-3-2	3,901	0.056	0.058	0.058	0.056	0.064	0.062	0.055	0.061	0.056	0.049	0.057
7/2-B	M-93	3,901	(0.010)	0.009	0.006	0.008	0.019	0.010	0.009	0.009	—	0.010	0.010
7/2-C	M-94	3,901	0.009	0.008	0.010	0.010	(0.007)	0.010	0.010	0.015	—	0.008	0.009
7/21-A	S-708351	885	(0.035)	0.035	0.033	0.036	0.014	—	0.016	0.017	0.013	0.010	0.023
7/21-B	S-710264	885	0.025	0.021	0.026	0.043	0.032	0.025	(0.032)	0.025	0.030	0.045	0.030
7/21-C	S-330703	885	0.060	0.060	(0.059)	0.063	0.062	—	0.063	0.054	0.060	—	0.060
7/27-A	MN-3-2	3,457	—	0.079	0.076	(0.087)	0.079	0.082	0.074	0.083	0.076	0.076	0.079
7/27-B	M-89	3,457	—	0.040	0.039	0.040	0.041	0.039	0.040	(0.068)	0.041	0.043	0.043
7/27-C	M-90	3,457	0.053	0.045	0.047	0.047	0.044	0.048	0.045	0.050	(0.042)	0.045	0.047
7/27-D	M-91	3,457	0.041	0.038	0.036	(0.031)	0.036	0.040	0.039	0.038	0.039	0.038	0.038
7/27-E	M-92	3,457	0.034	0.039	0.037	0.041	0.038	0.033	0.040	(0.030)	0.032	0.038	0.036
8/3-A	MN-3-2	3,458	(0.085)	0.056	0.061	0.068	0.079	—	—	—	—	—	0.070
8/3-B	S-46	3,458	0.039	0.036	0.032	0.043	(0.049)	—	—	—	—	—	0.040
8/3-C	S-47	3,458	0.054	0.032	0.039	—	(0.049)	—	—	—	—	—	0.044
8/3-D	S-48	3,458	0.037	(0.012)	0.065	0.026	0.020	—	—	—	—	—	0.032
8/3-E	S-49	3,458	0.024	(0.023)	0.039	0.021	0.029	—	—	—	—	—	0.027
8/10-A	MN-3-2	3,019	0.072	0.040	0.075	0.069	(0.041)	—	—	—	—	—	0.059
8/10-B	S-50	3,019	0.012	0.009	0.008	0.010	(0.019)	—	—	—	—	—	0.011
8/10-C	S-51	3,019	0.013	0.003	0.005	0.010	(0.014)	—	—	—	—	—	0.009
8/10-D	S-52	3,019	0.017	0.012	0.010	0.012	(0.010)	—	—	—	—	—	0.012
8/10-E	S-53	3,019	0.014	0.006	0.010	0.008	(0.010)	—	—	—	—	—	0.010

*: この値はスリーブ2本の含量値 (): 図 4.5 に引用する

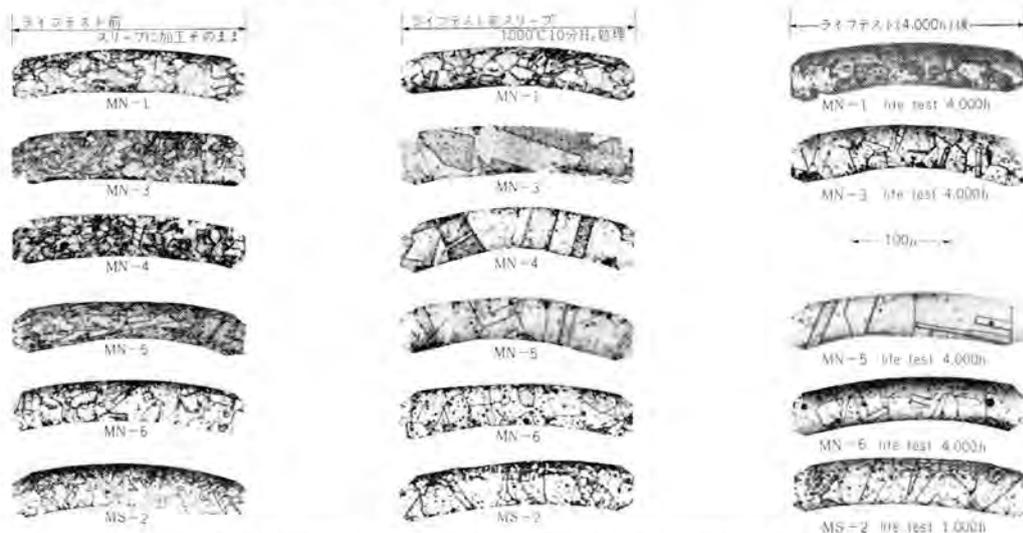


図 4.2 6SN7 用 ニッケルスリーブ 横断面組織の寿命試験による変化

Fig. 4.2 Variation of the cross-section of 6SN7 nickel sleeves in life test.

に逆比例であり、格子電子放出の多いものはそのスリーウニッケル中に拡散している遊離バリウムは少ない。

5. 考 察

寿命試験後の陰極基体ニッケル中に拡散吸蔵されているバリウム、金属結晶粒度、格子電子放出などの関連性から次のように推論できる。

(1) 500~4,000 h 寿命試験を行なったものは、そのニッケルスリーウの結晶粒界中に遊離バリウムが拡散し吸蔵されている。

(2) この吸蔵遊離バリウムは、陰極被覆物質とニッケル基体金属との境界面のニッケル金属結晶粒界数に比例して増加する。

(3) 寿命試験中に陽極電圧を印加していない場合より印加しているほうが吸蔵遊離バリウムが多い。

(4) この吸蔵遊離バリウムは格子電子放出と密接な関係にあり、吸蔵されている遊離バリウムが多ければその真空管の格子電子放出は少ない。

(5) また上述の関係からも必然的に格子電子放出と陰極基体ニッケル金属結晶粒界数は逆比例の関係にある。

これらのことを具体的に説明すれば、金属組織が細く、結晶粒界数の多いニッケルを基体金属とした酸化物被覆陰極をもつ三極管では、格子電子放出が小さくしかも寿命試験後に被覆陰極物質を稀酢酸溶解除去したニッケルスリーウの超音波洗浄によって溶出してくるバリウム量と格子電子放出は逆比例することから考えて、ニッケル基体と被覆酸化バリウムとの反応により、寿命試験中に絶えず生成する遊離バリウム原子が陽陰極間の電界により被覆酸化バリウムとニッケルとの境界にイオンとして保持され、その濃度はニッケル金属結晶粒界の多少によって影響されると考えられる。すなわちニッケル粒界が多ければ粒界内に遊離バリウム原子が拡散吸蔵され境界における濃度が減じ、酸化バリウム被覆層最表面へのバリウムイオンの拡散速度が低下し、したがって格子への蒸着も少なくなり、格子電極表面の電子放出活性度は増大しないので格子電子放出が少なくなると考えられる。このことを模型的に表わしたのが図5.1である。そしてこのようなニッケル結晶粒度は寿命試験中に成長増大するものではあるが、ニッケル地金塊よりニッケルスリーウへの加工製作条件が一定である限り、その成長増大の程度はNormalニッケル中の酸素を含めこの添加元素の比率によるものである。また今回の試験において、試験番号7/27だけ格子電子放出とバリウム、バリウムと結晶粒界との関係は他の試験番号のものとは逆の傾向を表わしている。これは多分基体ニッケル中の還元性不純物組成の影響を受けているものと考え、各地金の化学分析値を調べた。これによれば試験番号7/27について

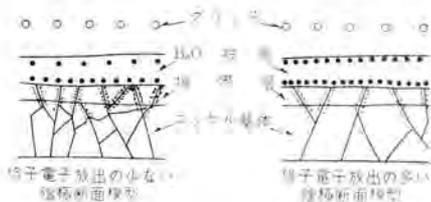


図 5.1 ライフテスト中の陰極ニッケルの断面模型
Fig. 5.1 Expecting figure of the cross-section of cathode in the course of life test.

他の試験番号(7/2, 8/3, 8/10)と比較して目立った点はアルミニウム、コバルトが多くばらついている。これらのことより察すれば、7/27の異常は基体ニッケルにアルミニウム含量が多くなれば被覆酸化バリウムとアルミニウムとの反応により生成した酸化アルミニウム、またはバリウムアルミネートは基体ニッケル表面をさげ目のない薄膜となって一様におおる性質⁽²⁾があり、そのため基体ニッケルと被覆酸化バリウムとの間に連続的な中間境界層を形成し、この層内に遊離バリウムは保持され、基体ニッケル粒界中へは拡散せず、稀酢酸での溶解時にすでに溶出してしまっているため超音波水洗時には溶出してこないのであり、粒界が多いほど遊離バリウムを保持しうる連続的なアルミナまたはバリウムアルミネート層がニッケル表面に厚く生成しているものと考えられる。しかし7/27以外の試料ではマグネシウムが7/27と同様多いが生成した酸化マグネシウムは粒状結晶となってニッケル表面の結晶粒界に多く、粒上に少なく点在する性質⁽²⁾があり、連続的な中間層を生成しないため、その割れ目からニッケルのほうへ遊離バリウムが拡散しうるのであろう。またコバルト量が多ければ結晶粒度が小さくなる性質があるようで、このことが7/27の試料のニッケル断面組織に現われているが、このように粒界が多くなってもニッケル中に拡散するバリウムが少なくなるという異常現象は、アルミニウムが多すぎるためと考えられるが、アルミニウムと同様な連続的な中間層膜を作るシリコンも格子電子放出の防止のためにはニッケル中にあまり多く添加してはならない。したがって炭素、コバルトは結晶粒度を小さくし、アルミニウム、シリコンは連続的な中間層を作り格子電子放出の原因となり、マグネシウムはこの連続的な中間層を破壊するそれぞれの性質から察して、ASTM, JISなどの規格内でしかもこの3者間で電子放出の大きい、格子電子放出の小さくなるべき一定の不純物添加比率が存在するものと考えられる。

6. む す び

ここではニッケルスリーウの金属結晶粒界中へ拡散している遊離バリウムを定量し、この遊離バリウムは真空管の格子電子放出と密接な関連性があることを確かめ、その機構について考察を行なった。また、あるロットについては異常傾向があらわれ、これが基体ニッケルに含まれている還元性不純物組成の異常特にアルミニウムの過剰によるものであることを推論した。終りに分光分析にご協力をいただいた島津製作所、ならびに試料および種々の測定結果を提供していただいた吉本参事に厚くお礼申し上げる次第である。なお、この研究は昭和35年7月25日電気四学会連合大会にて発表した。そのとき、同時に発表された電気通信研究所野明、今井、柴田氏らによる「EPMA微小部分X線分析による酸化物陰極中間層の研究」によっても当方と同様にバリウムが基体ニッケル結晶粒界中へ拡散していることが証明された。

参 考 文 献

- (1) 秦, 前田, 都甲: 研究報告 第573号(昭33-9-1).
- (2) W. Allison & H. Samelson: J. appl. phys. 30, 1419(1959).
- (3) 立原, 秦, 花田: 研究報告 第751号(昭35-5-21).

磁器と金属の封着

研究所 神崎 邇*・柳瀬 正人**

Ceramic-to-Metal Sealing

Research Laboratory Chikashi KANZAKI・Masato YANASE

To use ceramics for electron-tube envelopes was originated in Germany some thirty years ago. The concept was taken up in the U. S. A. later, developing into application to various electronic apparatus through active study. The ceramics has many advantages over the glass as tube envelopes such as better mechanical strength, smaller dielectric loss, at high frequency, higher operating temperature and so forth. The most outstanding feature with this ceramics adaptation is success in ceramics-to-metal sealing by a sintered metal powder method and active alloy method. Mitsubishi has made improvement on these methods and applied them to the manufacture of silicon power rectifiers and small transmitting tubes.

1. ま え が き

電子管の外周として磁器を用いる試みは、古く1930年代にドイツにおいて始まり、第二次大戦中に実用化された⁽¹⁾⁽²⁾。

終戦後ドイツの技術がアメリカに移入され、活発な研究が行なわれて現在では種々の電子機器に応用されている⁽³⁾。わが国でもこの方面の研究は盛んになりつつある^{(4)~(6)}。

電子管外周として古くからガラスが用いられているが、それに代わって磁器が用いられるようになったのは、材料特性として機械的強度がすぐれていること、熱衝撃に強いこと、高周波における誘電体損の少ないこと、使用可能温度が高いことなどがその理由であり、製作技術として必要な磁器と金属との封着法が完成されたことや、設計面でも新しい構想が導入されたことによるものである。

磁器と金属の封着方法としては次の6種類がおもなものである。

- a. 圧着拡散法 (Press diffusion seal)⁽⁷⁾
- b. ろう着法 (Solder seal)⁽⁸⁾
- c. 粉末金属焼結法 (テレフンゲン法) (Sintered metal powder seal)⁽⁹⁾
- d. 活性金属法 (Active alloy seal)⁽¹⁰⁾
- e. 粉末階段法 (Graded-powder seal)⁽¹¹⁾
- f. 電気メッキ法 (Electron formed seal)⁽¹²⁾

a. と b. の方法はアメリカで開発されたものであり、c. と d. はドイツに始まりアメリカで発達したもので、歴史は古い。e. と f. は最近アメリカで開発されたもので、特に f. の電気メッキ法は新しく、発展の可能性が多いといわれている。

当社においても、電子管、整流体などの外周に応用する目的で、磁器と金属の封着法を研究し、実用性の高い粉末金属焼結法と活性金属性を主として行ない、小形送

信管、シリコン整流体に実用している。

2. 封着方法

磁器と金属の封着方法は、前節にも述べたようになりに多くの方法が研究され開発された。その方法の中にはあまり実用的でないものもあり、また開発途中のものもある。実用化されている二三の方法について簡単に述べる。

2.1 粉末金属焼結法

一名 テレフンゲン法ともいわれ広く実用化されている。その一般的な方法はモリブデンの微粉末の懸濁液を磁器の封着部に薄く塗布し、水素、または水素と窒素の混合気体中で約 1,300°C 以上の温度で焼結して、磁器にモリブデンを溶着させる方法であって、溶着効果をなおいっそう良好にするため、モリブデン粉末に適量のマンガ、ニオブ、鉄などの粉末を混合することが行なわれている。

磁器の表面に生成されたモリブデン、あるいはモリブデン・マンガなどの金属膜にニッケル粉末の焼付、またはニッケルメッキを施したのち、適当なろう材を用いて金属を封着する。

2.2 活性金属法

チタニウム、ジルコニウムは酸素と結合力が大きく、また他の金属や亜酸化物と固溶体を作る性質があるので、適当な条件のもとでは磁器を構成している酸化物を還元して亜酸化物とし、また自身も酸化されて固溶体となり磁器と強く結合する。このような作用を利用して磁器の表面に金属膜を作る方法を活性金属法といっている。

この活性金属封着法にはチタニウム、あるいはジルコニウムの水素化合物 (TiH₂, ZrH₂) を用いるハイドライド (Hydride) 法とチタニウム、あるいはジルコニウムの金属を用いる活性合金 (Active alloy) 法とがある。

金属を用いる方法は磁器と磁器、または磁器と金属の間にチタニウム、またはジルコニウムをはさんで 900°C 以上

の温度に加熱して封着を行なう。ふんい気は高真空、あるいは純度の高い水素、アルゴン、ヘリウムなどを用いる。

チタニウム、あるいはジルコニウムの純度と、ふんい気に用いたガスの純度が封着の良否を決定するので十分注意することが必要である。

ハイドライド法はチタニウム、あるいはジルコニウムの水素化合物の粉末の懸濁液をグラシ塗り、または吹付けによって磁器の表面に薄く一様に塗布し、チタニウム、あるいはジルコニウムの合金化の温度を低くするために、銀、銅、ニッケル、または鉛のような低融点金属を塗布層と金属の間にはさんで組み立て、真空中または水素などのふんい気で900°C以上の温度で加熱する。

封着機構は、約900°Cに加熱を行なうとまず水素化合物は分解し、磁器の上に純粋のチタニウム、あるいはジルコニウムが生成し、それから銀その他の低融点金属とともに封着金属と合金を作り、次にそれらが磁器組織中に拡散して真空気密の封着ができる。

活性合金法は、チタニウムまたはジルコニウムのような活性金属を心金とし、その上に銀と銅の共融合金で被覆したいわゆるCored Wire形⁽¹³⁾か、またはチタニウム、あるいはジルコニウムの薄いワッシャと、銀と銅の共融合金を組み合わせ、磁器と封着金属の間にサンドウィッチ状にはさんで真空中で封着させる方法である。この封着法によったものは封着力が強いので、引張強度の大きいアルミナ磁器に限られるようである。

3. 材 料

3.1 磁 器

金属との封着に用いられる磁器の具備すべき特性はいくつかあるが、次のような性質をもつことが要求される。

- 気密性であること。
- 熱衝撃抵抗が強いこと。
- 機械的強度が大であること。
- 電気的特性がよいこと。
- 軟化温度が高いこと。
- 製作が容易であること。
- 特性が加工中に変化しないこと。

このような特性をほとんど満足させるものは高アルミナ磁器であって、そのすぐれている点を二三の他の磁器と比較してみよう。

(1) 熱衝撃抵抗

磁器と金属との封着のいろいろの工程において、かなり急速な加熱を行なうため、これらの熱衝撃に耐えることが要求される。

一般にステアタイト、フォルステライト磁器は熱衝撃に弱く、ジルコニウム、アルミナ磁器は強い。また熱伝導度の良好なものは、熱衝撃に対しても良好なことからアルミナ磁器はベリリヤ磁器に次いですぐれている。また機械的強度の大きいことはアルミナ磁器のもっとも大きな特徴の一つであって、曲げ強度および機械的衝撃強度は、ステアタイト磁

器の約2倍の値をもつ。

(2) 電気的特性

磁器が外囲として用いられる原因の一つにガラスにくらべ誘電体損がきわめて小さいことであり、またその温度係数も小さい。特に最近のように高周波で用いられる電子管は周波数も高く、動作温度も高いのでこの点が特に重要視される。アルミナ磁器はフォルステライト、ジルコニウム磁器よりも劣るが、使用目的を制限されるほどの値ではない。図3.1にアルミナ磁器の特性を示した。

(3) 軟化温度、その他

高アルミナ磁器の軟化温度の高いことは周知のことであり、1,400°C以上の温度で焼結操作を行なう金属粉末焼結法においても安心して使用できる。

他の磁器よりも高価であるが、磁器を使用した外囲は電子管全体の価から考えて、その占める割合はわずかである場合が多いので、種々のすぐれた特性からアルミナ磁器を選ぶことは当然である。また長時間の加熱による機械的、化学的、電気的の特性の変化はきわめて少ない。

表3.1にアルミナ磁器とともに他の二三の磁器の特性を示した。

3.2 封着用金属

封着に用いる金属はその熱膨張係数ができるだけ磁器と等しいものが望ましい。磁器と膨張係数の差のある金属を使用するときには、常に磁器に圧縮力が加わるよう

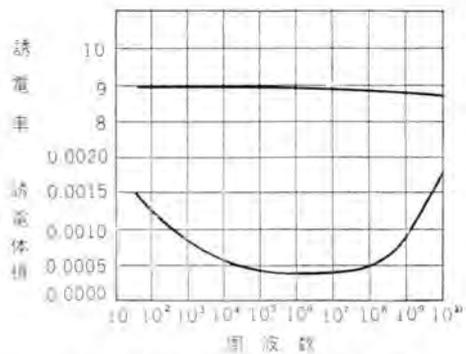


図 3.1 アルミナ磁器の誘電特性⁽¹⁴⁾

Fig. 3.1 Dielectric constant and loss tangent of alumina bodies.⁽¹⁴⁾

表 3.1 各種セラミックの特性⁽¹⁴⁾

磁 器	ステアタイト	フォルステライト	ジルコニウム	アルミナ
比重	2.7	2.8	3.1	3.5
気孔率 (%)	0~0.01	0~0.02	0~0.02	0~0.01
引張強度 (psi)	8,500	10,000	10,000~15,000	18,000
圧縮強度 (psi)	80,000	85,000	80,000~150,000	175,000
破壊強度 (psi)	20,000	20,000	23,000	40,000
硬 度 (モース)	7.5	7.5	8.0	9.0
熱伝導 (c. g. s.)	0.006	0.008	0.008	0.02
熱膨張 (×10 ⁻⁶ (20-100°C))	6.4	9.0	3.2	5.6
係 数 (20-700°C)	8.3	10.0	4.5	7.2
熱衝撃抵抗	—	—	良	良
軟化点 (°C)	1,400	1,440	1,450	1,800
安全温度 (°C)	1,100	1,100	1,000~1,300	1,600
誘電率 (V/mil)	240	240	250	240
誘電率 (I. M. C.)	6.2	6.3	7.2	8
誘電体損 (I. M. C.)	0.0013	0.004	0.0009	0.001~0.003

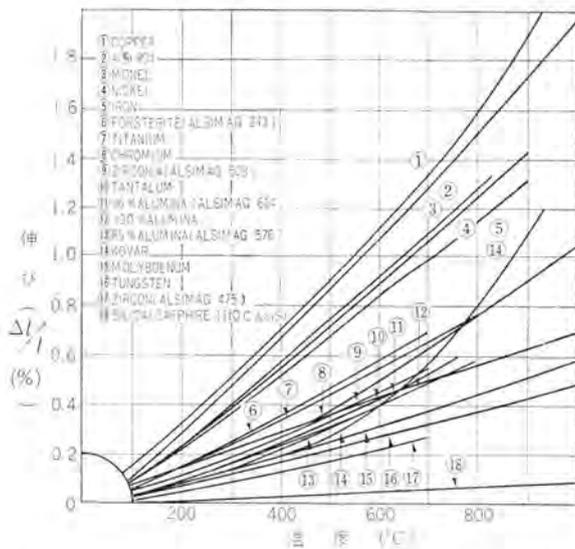


図 3.2 磁器と金属の封着に用いられる金属、合金および磁器の膨張特性⁽¹⁰⁾
 Fig. 3.2 Expansion characteristics of metal, alloy, and ceramics for the evaluation of ceramic-to-metal seals.⁽¹⁰⁾

な封着方法を選ぶようにする。

アルミナ磁器にコバルトが一般に用いられるが、封着方法を考慮すれば鉄を使用することもできる。

封着用金属は機械的強度を減じない程度に薄くして用いたほうが磁器に加わる圧縮力を減少させるのに効果がある。図 3.2 にセラミックシールに用いられる磁器と金属および合金の熱膨張特性を示した。

4. 磁器封着の試作

封着方法は金属粉末焼結法と活性金属法について行なったが、ここでは金属粉末焼結法について試作を行なった結果を述べる。

アルミナ磁器を用いたときは、モリブデンにマンガンを添加することが溶着効果を良好とした。アルミナ磁器のアルミナ含有量が 100% に近づくほど溶着温度が高くなり、アルミナ粒子間にモリブデン・マンガンの溶着も悪く封着力も弱くなる。

4.1 使用磁器

使用したアルミナ磁器の特性は表 4.1 に、その電子顕微鏡写真を図 4.1 に示した。

アルミナの含有量が多いほど機械的強度は大きい、90% アルミナでもその機械的強度はそれほど低下しない。かえって溶着温度を低くした場合でもモリブデン・マンガンの溶着は良好である。

4.2 モリブデン粉末

表 4.1 使用アルミナ磁器の特性

Al ₂ O ₃ (%)	比重	気孔率	硬 度	曲げ強度 (kg/mm ²)
90	3.5	0	9	29
熱膨張係数 (20~600°C)		安全温度 (°C)		誘電率 (I. M. C.)
7.7×10 ⁻⁶		1,550		8.8

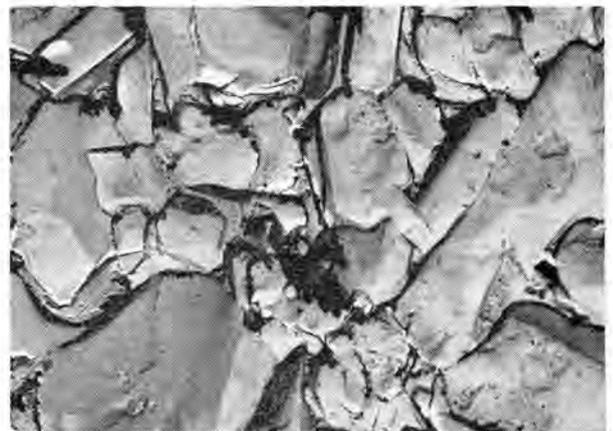


図 4.1 使用アルミナ磁器の電子顕微鏡写真 (×6,000×1/2)
 Fig. 4.1 Electron microscopic photograph of alumina body for sealing. (×6,000×1/2)

溶着金属として用いるモリブデン粉末は、できるだけ純度が高く粒子の小さいものがよい。使用したモリブデンの純度と粒子の大きさは表 4.2 に示した。

表 4.2 使用モリブデン粉末の特性

MO (%)	不揮発残渣 (%)	Fe (%)	平均粒径 (μ)
99.95	0.010	0.003	1~2

モリブデンの純度と粒子の大きさは、磁器への溶着に影響を与える。あまり粒子が大きいと焼結が悪く、磁器の粒子との結びつきも弱い。また金属の溶着面も粗面となり、後の封着においても封着力を弱くする結果となる。1~2 μ 程度の大きさが適当であった。

4.3 モリブデン・マンガ粉末の塗布

モリブデン・マンガ粉末の懸濁液を磁器表面に塗布する方法は、はけのようなもので塗布するか、吹付法、または浸漬法のいずれかが用いられている。

塗布層の厚さが磁器と金属との封着力に影響する。塗布層が薄過ぎると、ろう付けのときにろうが磁器面まで拡散して封着力を弱めることが多く、また厚過ぎるとかえって封着力が弱くなるか、封着力が弱くならなくても気密性が不良となることが多い。塗布層の厚さは 20~50 μ の間で塗布を行なったが、この厚さの範囲では封着力に大した差異はなかった。吹付法で塗布することが塗布層の一様性、塗布速度から考えてよいようである。

4.4 金属層の溶着

磁器表面に金属粉末を塗布した後、還元ふんい気中で磁器に溶着させる。金属と封着後の封着強度と、気密度の良否は、この溶着のふんい気と温度に大きく影響される。

溶着の温度は使用磁器によって異なり、ステアタイト、フォルステライト磁器などは低く、アルミナ磁器は一般にそれよりも高い。われわれの使用したアルミナ磁器では、1,450°C で 30 min の溶着を行なって完全な金属層が得られた。アルミナ含有量の多い磁器では、これよりも高い温度で溶着を行なっても必ずしも封着強度が大きくなるということではなく、磁器に適当量の活性成分、たとえば シリカ・マグネ

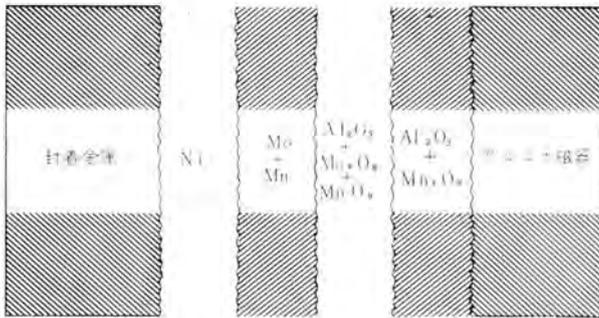


図 4.2 金属粉末焼結法の封着構造

Fig. 4.2 Structure of sealed part in "Metal Powder Method."

シヤなどの存在することが、モリブデンと磁器の溶着がさらによくなるようである。その封着部の構造を図4.2に、切断面の顕微鏡写真を図4.3に示した。また活性合金法の切断面も図4.4に示した。

図4.2に示した構造からも、磁器と金属の溶着は単に磁器表面に金属フィルムが付着しているというだけでなく、アルミナの一部と酸化された一部のモリブデン・マンガがスラッジのような形で結びついて、その上に酸化されないモリブデン・マンガの金属膜ができていると考えられる。このためにも溶着のときのふんい気を制御することが重要であって、市販の窒素中に含まれる0.4~1%の酸素も考慮して、窒素70%と水素30%の混合気体中で溶着を行なうときは、モリブデン・マンガの金属粉末を適当に酸化させて磁器と強固に結びついた金属膜が得られた。また、ふんい気その他を同一にして溶着温度を変えると封着強度も変化する。溶着時間の変化の影響は封着力を左右するほど顕著ではなかった。この結果を図4.5に示した。

1,450°Cにおける溶着と1,500°Cにおける溶着とに封着力の差がほとんどない。1,500°Cのときのほうは磁器組織中にモリブデン・マンガの溶着層は深くなるため、引張り強度試験では封着面より少し下の部分で磁器の破壊することが多かった。

4.5 金属とのろう付け

封着金属とのろう付けを行なうときのろうの流れをよくするために、溶着金属層の上にニッケルメッキを行なう

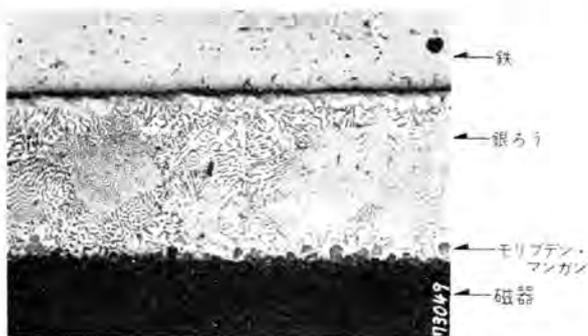


図 4.3 金属粉末焼結法の封着部切断面

Fig. 4.3 Cross section of sealed part by "Sintered Metal Powder Method".

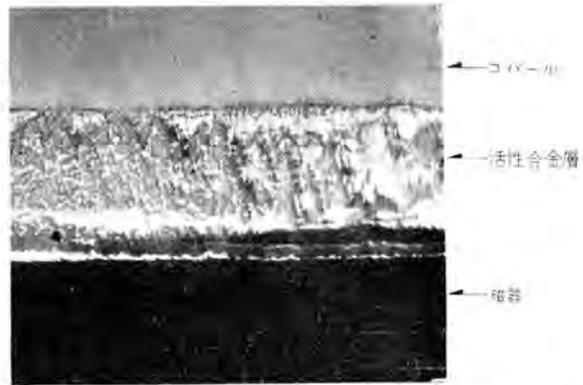


図 4.4 活性合金法の封着部切断面 (×100×2.3)

Fig. 4.4 Cross section of sealed part by "Active Alloy Method" (×100×2.3)

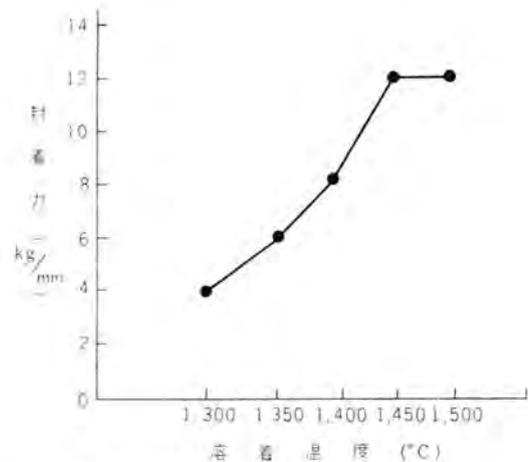


図 4.5 溶着温度による封着力の変化

Fig. 4.5 Comparison of sealing strength by sintering temperatures.

が、メッキ層が厚過ぎると封着強度を弱めることとなるので、8~10μ程度にとどめるようにした。

ろうは銀72%、銅28%の銀ろうを用い、水素ふんい気中で温度は800°C近辺とし、保持時間は10~20minとした。溶融ろうが磁器表面のモリブデン層中に適度に拡散させるための温度と時間が、封着金属と磁器の封着力および気密保持に重要なことである。あまり金属層中に深くろうが拡散しすぎると封着力は急速に弱くなるので、ろうと溶着層の相互拡散を調節する温度と時間を決めるようにした。

5. セラミックシールの実用例

電力用半導体整流体の外装と、磁器小形送信管を図5.1および図5.2にそれぞれ示した。

整流体の封着構造は封着金属に鉄を用い、磁器を外周から封着して磁器に圧縮力のかかるようにした。小形送信管は磁器の絶縁距離を考慮して端面封着とし、封着金属はコパルを用いた。外周封着のときに特に重要なことは、磁器と封着金属とのチャップであって、それが不適當であると気密性不良の原因となることが多い。

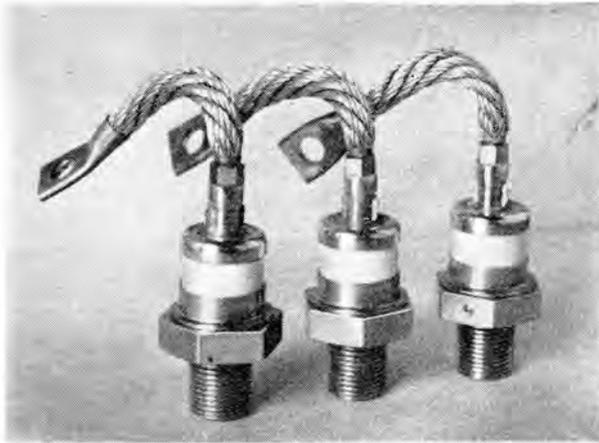


図 5.1 磁器封着を用いたシリコン整流体

Fig. 5.1 Silicon power rectifier cell with Ceramic-to-Metal sealing.

6. む す び

以上当社で行なっている磁器封着の方法および応用について述べた。今後の課題としては、大形磁器封着の開発、新封着法の研究ならびに封着機構の詳細な解明などがある。終りにご指導を賜った立原化学第二研究室長に謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) M. J. Cross: New Vacuum Tube Techniques of the Telefunken Röhren-Werke, Berlin, Office of Military Government for Germany (U. S.) Field Information Agency, Technical Final Report No. 560 (1945).
- (2) H. Vatter: Ceramic-to-Metal Brazes, Glas-und Hochvakuum Technik, 1, 79 (1952).
- (3) D. E. P. Jenkins: Ceramic-to-Metal sealing, its development and use in to American valve industry, Electronic Eng., 27, 290 (1955-6)
- (4) 池沢茂・外: 電気通信学会全国大会シンポジウム(昭31).
- (5) 三田繁・外: 東芝レビュー, 13, 217 (昭33).
- (6) 中田九州男・外: 日立評論, 別冊34号, 79 (昭35).
- (7) J. O. McNally: Status Report on the Ceramic Receiving Tube Development, Proceedings of the 1958 Electronic Components Conference, Los Angeles,

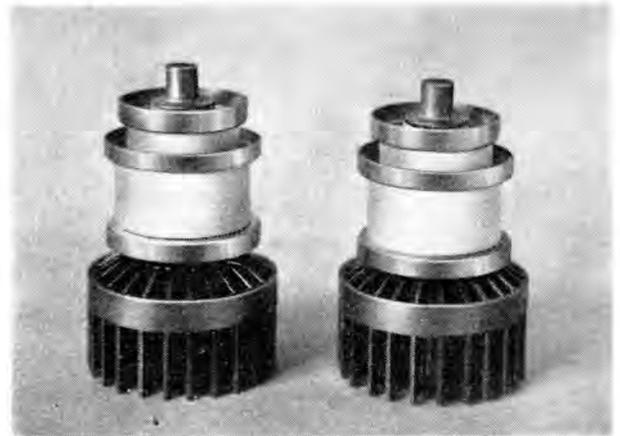


図 5.2 磁器封着を用いた小形送信管

Fig. 5.2 Transmitting tube with Ceramic-to-Metal sealing.

April 22 (1958). Engineering Publishers, New York, N. Y., p. 168~185.

- (8) R. J. Bondley: Metal-Ceramic brazed seals, Electronics, 20, 97 (1947-7).
- (9) H. Vatter: On the History of Ceramic-to-Metal sealing techniques, Vakuun-Technik, 4, 180 (1956-2).
- (10) C. S. Pearsall: New brazing methods for Joining non-metallic materials to metals, Material & Methods, 30, 61 (1949(7)).
- (11) American Lava Corporation, Chattanooga, Tennessee; Final Report, Contract AF33 (600)-27329 (1956-12): Ceramic-to-Metal seals by Pressed Powder Techniques, by H. C. Dunegan.
- (12) M. D. Hare, R. F. Keller & H. A. Meneses: Electro-Formed Ceramic-to-Metal seal for Vacuum tubes, Fourth National Conference on Tube Techniques, Sept. 10-12, 1958, New York; New York University Press, New York 1959, p. 25~28.
- (13) A. D. Pincus: Ceramic Age, March 1954, p. 16.
- (14) John F. Schuck, Jr. & F. J. Hynes: Alumina bodies for Ceramic-to-Metal seals, Ceramic Industry 65, 84 (1956).
- (15) D. G. Burnside: R. C. A. Review 15, 53 (1954).
- (16) Walter. H. Kohl: Materials and Techniques for Electron tubes p. 511, Reinhold, N. Y. (1960).

液状陰イオン交換体の分析への応用

研究所 石橋 勝*・今村 孝*・小巻 仁*

Application of Liquid Anion Exchanger to Chemical Analysis

Research Laboratory Masaru ISHIBASHI・Takashi IMAMURA・Hitoshi KOMAKI

Amberlite LA-1, a liquid anion exchanger, is a secondary amine, having a number of advantages over an ordinary anion exchanger. It is of a liquid form, which derives such features of (1) feasibility of continuous operation, (2) a fast rate of exchange and (3) ease of stripping for reuse. These talking points are extremely valuable when it is utilized for chemical analysis. The writers have employed this amberlite LA-1 in several experiments and have made a report herein with a firm belief that this new analysis is quite promising in the adaptation to industry.

1. ま え が き

1948年にイギリスの研究者によってアミン塩が陰イオン交換樹脂に類似の性質を有することが発見されて以来、アメリカのオクリッジ国立研究所でアミンの合成およびその性質について組織的な研究がなされた。

高分子量アミンをもちいたイオン交換抽出の研究はMoore氏ら^{(1)~(3)}が報告している以外に、最近名古屋工大の中川氏^{(4)~(6)}がAmberlite LA-1を使用して塩酸酸性下における各元素のイオン交換抽出に関する一連の基礎研究を行なっている。この結果Kraus氏ら^{(10)~(11)}の研究とかなり類似する点を指摘しているの、一般の陰イオン交換樹脂が分析分野に利用されていると同様に使用できるのではないかと考えて二三の実験を行なった。

現在市販されている代表的な液状陰イオン交換体としては、第2級アミンのAmberlite LA-1, LA-2である。その他第3級アミンのトリペンジルアミン⁽¹²⁾やトリ-n-オクチルアミンも使用されはじめている⁽¹³⁾。

筆者らは高分子アミンの一つであるAmberlite LA-1を使用して、その性質の詳細な検討や鉄鋼材料および非鉄合金中の鉄の抽出分離、定量の目的で鉄だけについて基礎実験を行なった。また基礎実験の結果に基づいてFe-Zr中のZrの定量、アルミ合金中の亜鉛の定量を行なったところ非常に精度よく、しかも簡便に定量することができた。

2. 基礎実験

鉄のイオン交換抽出に関する報文は中川氏⁽⁶⁾のものがあるが、独自の立場から種々の条件下における鉄の抽出実験を行なった。

2.1 Amberlite LA-1 について

市販の第2級アミン、N-ドデシルトリアルキルメチルアミン (Amberlite LA-1)は、分子量351程度でコハク色の粘濁性の

液体であり少しアミン臭をもっている。これは遊離塩基の形で溶液として使用され、窒素原子に結合する二つの高度に枝わかれした脂肪族からなりたっている。多くの有機溶媒にすぐれた溶解性を持ち、水にはほとんど不溶(1N-H₂SO₄に15~20 ppm程度)である。

2.2 試薬

(1) 試薬

アミン溶液: Amberlite LA-1を水洗し、水溶性の不純物を除去した溶液

有機溶媒: アミンの希釈剤としての溶媒はケロソル、n-ヘキサソル、n-ヘプタソル、トルエン、キシレン、ベンゼン、四塩化炭素、MIBKの試薬1級または特級品。

鉄(III)標準溶液: 試薬特級硫酸第2鉄アモンを用いて10mg Fe/ml, 30mg Fe/mlの溶液を調製し、KMnO₄法でFe量を求めた。

鉄(II)標準溶液: 試薬特級硫酸第1鉄アモンを用いて10mg Fe/mlの溶液を調製して、KMnO₄法でFe量を求めた。

2.3 実験方法

実験には特殊な場合を除き、有機相(アミン+溶媒)20ml: 水相20mlすなわち相比を1:1の状態にして、100ml分液漏斗を用いた。鉄(III)は1回の使用量20~300mgの範囲で使用した。

鉄のイオン交換抽出について次の事項を検討した。

- Amberlite LA-1の濃度変化による塩酸の抽出について
- Amberlite LA-1の濃度および希釈剤の選定
- 鉄抽出時の酸濃度の影響
- 鉄添加量、相比を変化させた場合の抽出について
- 鉄(II)の抽出
- 温度の影響、振とう時間について

2.4 実験結果および考察

- Amberlite LA-1の濃度変化による塩酸の抽出

について

100 ml 分液漏斗に Amberlite LA-1 を各種溶媒で希釈した溶液を 20 ml と 1N-HCl (F=1.00 20 ml) を加え、1 min 振とうする。水相をとりだし、1N-NaOH で中和滴定して、この結果より有機相中に抽出された塩酸量を求めた。

表 2.1 Amberlite LA-1 の濃度変化による有機相への塩酸抽出量

アミン濃度 (%)	2.5%	5.0%	7.5%	10.0%	12.5%
四塩化炭素	56.30	86.56	126.18	165.80	199.98
MIBK*	58.40	87.42	128.26	153.30	197.72
ベンゾール	43.80	80.30	122.84	152.24	188.76
キシレン	45.80	78.20	119.92	153.30	191.88
トルエン	44.84	85.50	118.88	156.42	195.0
n-ヘプタン	46.92	75.08	115.76	151.20	185.62
n-ヘキサン	43.80	76.12	115.76	150.16	187.70
クロシン	60.40	85.92	127.22	156.40	197.72

*: メチルイソブチルケトン

注: 表中の数字は HCl としての mg 量である。

表 2.1 中の MIBK, キシレン, n-ヘプタン, クロシン をピックアップして、計算による塩酸抽出量と対応させてグラフを描けば次のようになる。

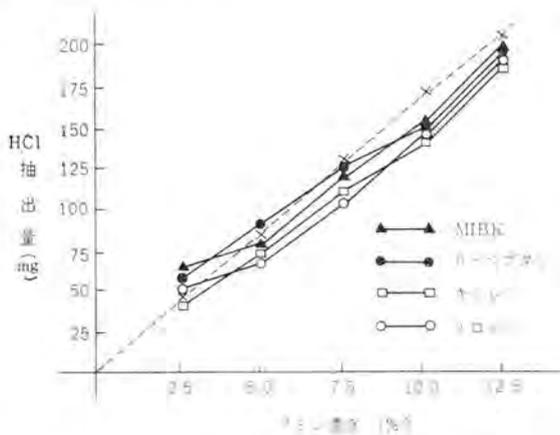


図 2.1 各種溶媒を使用した場合の HCl の抽出量

Fig. 2.1 Effect of solvents on the extraction of HCl.

この図 2.1 から容易に知られるように、アミンの遊離塩基形の塩酸の抽出率は平均して 90% 前後である。

一般にアミン濃度が低くなるにつれて塩酸の抽出率は 100% に近くなる傾向がある。

(2) Amberlite LA-1 の濃度および希釈剤の選定

有機相は各種溶媒でアミンを希釈して 20 ml 分取し、1N-HCl で HCl 形とする。水相は鉄(III) 99.62 mg を含む 6N-HCl 酸性として、両者を 1min 振とうし、2 相に分離後、水相中の鉄を塩化第 1 スズで還元後 KMnO_4 で滴定し、有機相中に抽出された鉄量を求めた。

表 2.2 から知られるようにアミン濃度の増加にしたがって鉄(III)の抽出率は増加し、99.62 mg の鉄(III)では 12.5 容量% 近くでほとんど完全に抽出される。アミン濃度は 10~15 容量% 程度が適当である。アミンの希釈剤としては炭化水素系のどの有機溶媒を使用してもよい。

液状陰イオン交換体の分析への応用・石橋・今村・小巻

表 2.2 Amberlite LA-1 の濃度変化による Fe(III) の抽出率

添加 Fe(III) (mg)	アミン濃度 (%)	クロシン	ベンゾール	キシレン	トルエン
		抽出率(%)	抽出率(%)	抽出率(%)	抽出率(%)
99.62	2.5	38.57	47.36	33.95	46.53
"	5.0	72.07	77.36	66.05	78.42
"	7.5	90.81	90.57	93.05	91.54
"	10.0	97.25	97.31	100.00	98.38
"	12.5	99.15	99.44	99.72	99.94
"	15.0	100.00	99.83	99.72	100.00
"	20.0	99.77	99.83	100.00	99.10

(3) 鉄(III) 抽出時の酸濃度の影響

鉄(III) 50.87 mg を抽出するのに、塩酸濃度は 5N 以上で定量的に抽出されるが、それ以下の濃度では不完全である。また溶媒の種類により鉄(III)の抽出にいちじるしい差異は認められず、鉄(III)は広い濃度範囲で定量的に抽出される。

表 2.3 塩酸濃度を変化させた場合の抽出率

添加 Fe(III) 量 (mg)	塩酸濃度 (N)	クロシン	ベンゾール	キシレン	トルエン
		抽出率(%)	抽出率(%)	抽出率(%)	抽出率(%)
50.87	0.1	3.62	1.75	3.07	3.97
"	1.2	25.36	46.55	24.69	24.69
"	2.05	66.08	78.59	53.45	53.45
"	3.15	90.23	91.66	77.28	77.28
"	4.07	98.68	99.01	94.95	94.95
"	5.18	99.57	100	100	100
"	6.07	100	100	99.87	99.87
"	7.15	100	100	100	100
"	8.10	100	98.91	99.67	99.67
"	9.0	100	99.45	100	100

注: 抽出に使用したアミン濃度は 12.5 vol% 溶液である。

(4) 鉄添加量、相比を変化させた場合の抽出について

アミンの 12.5 容量% クロシン 溶液 20 ml の鉄(III)飽和交換抽出量は約 100 mg 強である。表 2.4 から知られるように鉄(III)が約 200 mg を境にして、鉄(III)の増量にしたがって抽出量は減少する傾向にある。

表 2.4 鉄添加量を変化させた場合の Fe(III) の抽出量

溶媒	添加 Fe(III) (mg)	50.87	99.61	150.75	202.01	250.3	301.5
		有機相中の Fe(III) mg	50.87	98.77	115.57	116.69	107.6
クロシン	抽出率	100	99.15	76.66	57.76	43.01	32.72

注: 抽出条件 有機相 12.5 vol%, アミン溶液 20 ml

水相 6N-HCl 20 ml 振とう時間=1 min

相比の検討に使用した鉄(III)は 301.54 mg であり、有機相: 水相を (20 ml : 20 ml), (40 ml : 20 ml), (60 ml : 20 ml) とし、分割抽出の場合は (20 ml : 20 ml) の状態で有機相だけ新しく 20 ml 単位で取り換えて抽出を行なった。一般に有機相を増量するよりも分割して抽出するほうが効果がある。

(5) 鉄(II) の抽出

鉄(II)は鉄(III)に比較してあまり抽出されないといわれているが、鉄(II)が鉄(III)中に混入した場合、他元素との分離がむずかしくなることも考えられるので、鉄

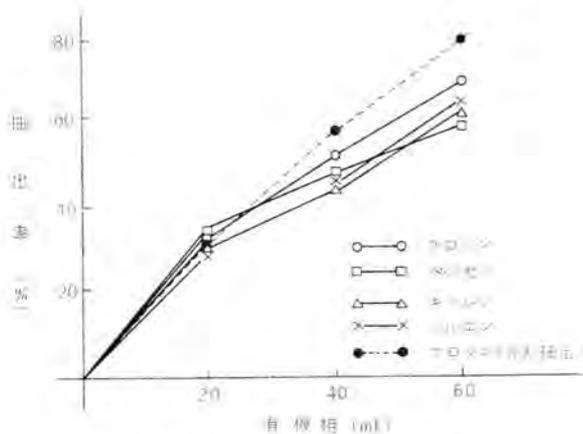


図 2.2 相比を変化させた場合の抽出

Fig. 2.2 Effect of phase ratio on the extraction.

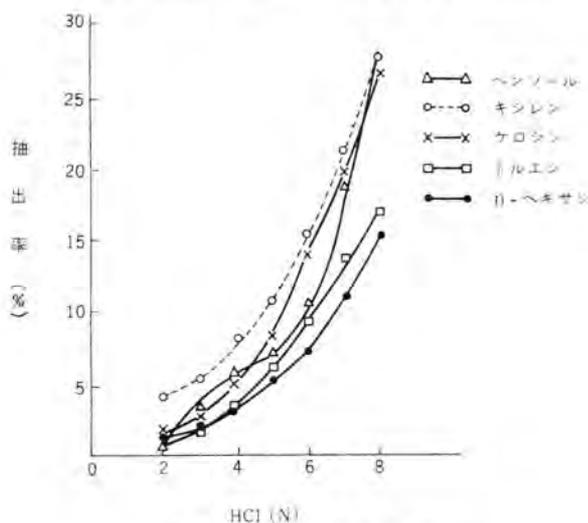


図 2.3 Fe(II) の抽出曲線

Fig. 2.3 Extraction curve of Fe(II)

(II) の抽出実験を行なった。

鉄(II)の抽出は非常に悪く、8N-HCl 酸性で最高はベンゾールの 28.45% であった。塩酸酸性下において抽出しない他元素と鉄との分離には、鉄(II)の存在は避けなければならない。

(6) 温度の影響、振とう時間について

鉄(III)は 10~50°C の範囲では抽出率にはあまり変化はないが、温度が高くなるにしたがい抽出率は悪くなる傾向がある。

振とう時間は 30s 程度でほとんど抽出は完全に行なわれるが、この実験ではすべて 1min 振とうした。

以上の実験結果を総括すれば、

- 溶媒の種類により抽出にいちじるしい差異はみとめられない。
- アミン濃度は 10~15% 程度が適当である。
- 塩酸濃度は鉄(III) 50mg 程度では 5N 以上であれば完全に抽出される。しかし鉄(III) が少なければ塩酸濃度は低くしても 100% 抽出される。鉄(III) が多量の場合は相比を分割して抽出すればよい。
- 鉄(II) の抽出は悪いので、鉄の分離または定量

を目的とする場合はすべて鉄(III)にする必要がある。

鉄のイオン交換抽出に関する基礎研究の結果を参考にして、Fe-Zr 中の Zr の定量やアルミ合金中の亜鉛の定量に応用して好結果を得た。

3. 応用例

3.1 ジルコニウムと鉄の分離定量

容量法 (EDTA 法) でジルコニウムを定量しようとする場合、いずれも鉄が妨害するからあらかじめ分離する必要がある。

筆者らはこの鉄の分離として液状陰イオン交換体 (Amberlite LA 1) を使用して鉄とジルコニウムを分離し、分離後のジルコニウムを EDTA 法で容量分析する検討を行なった。ジルコニウムと鉄の分離にさいしては、鉄の分離の最適条件である Amberlite LA-1 の 12.5 容量% ケロシン溶液を使用し、塩酸および硫酸の濃度変化によるジルコニウムと鉄の抽出量の変化、ジルコニウム量に対する鉄共存量の影響、およびジルコニウムの EDTA 滴定における酸の影響などの検討を行なった。有機相に抽出された鉄は水または 0.2~0.5N 硝酸溶液で逆抽出し、KMnO₄ および EDTA で滴定し鉄量を求めることができる。

(1) 分析操作

試料溶液の一定量を取り、12N 塩酸 10ml を加え液量を 20ml とする。100ml 分液漏斗に移し入れ、Amberlite LA-1 の 12.5 容量% ケロシン溶液 20ml を加え、1min 振とう後両相が分離するまで 2~3min 静置する。水相を 200ml ビーカーに移し水で 50ml に希釈後アンモニア水を用いて pH を 1 程度にする。ジルコニウムの定量は次の EDTA による逆滴定法で分析する。

a. 硝酸ビスマスによる逆滴定⁽¹³⁾

準備した試料溶液に酒石酸アンモン (10%) 10ml と EDTA 標準溶液 (0.05 M) 10ml を加え、1:1 アンモニア水と塩酸で pH=1.5 に調整し加熱する。冷却後、溶液を pH=2 に再調整し、チオ尿素を指示薬とし、硝酸ビスマス標準溶液で過剰の EDTA を逆滴定する。

b. 硫酸銅による逆滴定⁽¹⁴⁾

準備した試料溶液に a. と同様に酒石酸アンモン (10%) 10ml を加え、EDTA 標準溶液 (0.01 M) 15ml を加え、酢酸アンモン溶液 (30%) および酢酸で pH=1.5 に調整し加熱する。冷却後 pH を 3 に再調整し、PAN を指示薬として過剰の EDTA を硫酸銅標準溶液 (0.01 M) で逆滴定する。

この定量のさいには硫酸、過塩素酸などは定量値に影響を与えない。

(2) 実験

a. 鉄(III)とジルコニウムの抽出率

鉄(III)を抽出する場合、50mg 程度の鉄(III)は塩酸 5N 以上においてほとんど 100% 抽出される。この同一条件でジルコニウムの行動がどのようになるかが問題となるので、水相中にジルコニウムを 100mg 加え、塩酸の濃度変

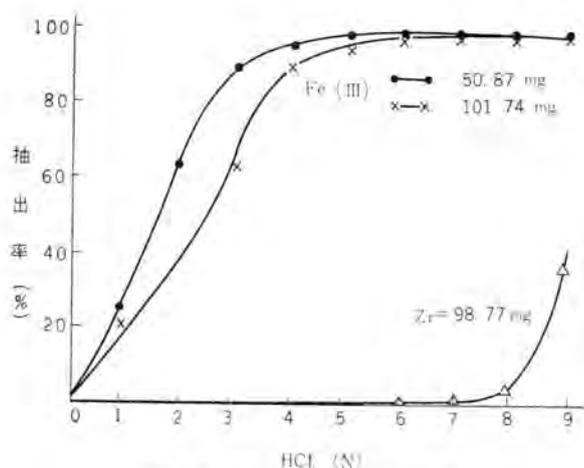


図 3.1 Fe(III) と Zr の抽出率

Fig. 3.1 Extracted ratio of Fe(III) and Zr.

化によってどの程度ジルコニウムが抽出されるかを検討した。その結果を図 3.1 に示す。ジルコニウムは塩酸濃度が 7N 以上で抽出される傾向が現われ 8N にて 1.6%, 9N で 38% 程度有機相に抽出される。このことからジルコニウムと鉄は 6N~7N において完全に分離される可能性があることを知った。またジルコニウム量の変化によっても水相中に残存する量は 20~200 mg 程度においては有機相に抽出されず、完全に水相中に残る。

b. 酸の種類による影響

一般にジルコニウム-鉄は普通の酸には溶解しにくい金属であり、したがってその溶解には弗酸+硫酸、塩酸+弗化アンモンで分解した後、過塩素酸を加えて白煙処理するか、または硫酸アンモン+硫酸などによる溶解法がよい。この酸溶解過程において遊離の形のままで残存すると考えられる硫酸、過塩素酸やその他硝酸などが共存したとき鉄(III)およびジルコニウムの抽出にどのように影響するかを検討した。その結果ジルコニウムは硫酸、硝酸過塩素酸などの影響はうけず 6N-塩酸性下においては有機相に抽出されない。

表 3.1 酸濃度変化による Fe(III) の抽出率

添加硫酸量 36N (ml)	Fe(III) の抽出率 (%)	添 加 過塩素酸量 60% (ml)	Fe(III) の抽出率 (%)	添加硝酸量 14N (ml)	Fe(III) の抽出率
1	100	1	99.4	1	99.4
2	100	2	98.6	2	99.2
3	99.8	3	97.6	3	98.8
4	99.2	4	98.7	4	98.7

注: 添加 Fe 量 49.4 mg.

同様な検討を鉄(III)についても行なったがその結果を表 3.1 に記す。その結果、硫酸濃度はあまり影響をうけないが過塩素酸(60%), 硝酸(14N)は 20 ml 中に 1 ml 程度存在すれば鉄(III)の抽出を妨害する。

c. 妨害元素の影響

文献⁽¹³⁾によれば EDTA 法により妨害する元素はほとんどなく As(III), Hg⁺, Mo(VI) などが妨害する。この場合 As(III) は液状陰イオン交換体に抽出されるので

液状陰イオン交換体の分析への応用・石橋・今村・小巻

響はない。これらの元素を多量含む場合は、MIBK と液状陰イオン交換体の混合溶液によって影響を除くことができるので、検討は行なわなかった。

(3) 分析結果

ジルコニウムの標準溶液(オキシ塩化ジルコニウム使用)と鉄の標準溶液(硫酸第 2 鉄アンモン使用)の一定量を取り、前記の分析操作にしたがい分析した結果を表 3.2、3.3 に記す。鉄は 1 回の抽出操作で完全に分離され、ジルコニウムは精度よく分析できる。

表 3.2 硝酸ピスマスによる分析値

	添加 Fe 量 (mg)	添加 Zn 量 (mg)	硝酸ピスマス 0.0447M (ml)	検出 Zr 量 (mg)	誤 差 (mg)
1	24.7	29.4	4.04	29.4	±0.0
2*	24.7	"	4.04	29.4	±0.0
3	49.4	"	4.06	29.3	+0.1
4*	49.4	"	4.05	29.3	+0.1

* 硫酸 1 ml 添加。

表 3.3 硫酸銅による分析値

	添加 Fe 量 (mg)	添加 Zr (mg)	硫酸銅 0.01 M (ml)	検出 Zr 量 (mg)	誤 差 (mg)
1	49.4	9.86	4.19	9.88	+0.02
2*	"	9.86	4.20	9.89	+0.02
3	"	4.93	2.06	4.96	+0.03
4*	"	4.93	2.08	4.94	+0.01

* 硫酸 1 ml 添加。

以上の結果のようにジルコニウム-鉄中のジルコニウムは Amberlite LA-1 を使用して能率よく分離でき、分離後のジルコニウムを EDTA による逆滴定にて迅速に定量できる。

3.2 アルミ合金中の亜鉛の定量

アルミ合金中の亜鉛を定量するのに JIS 法⁽¹⁵⁾は非常に分析時間が長くなるので、迅速分析法として液状陰イオン交換体を取り上げた。液状陰イオン交換体すなわち高分子量アミンは陰イオン交換樹脂と類似の性質を有することが知られているので、陰イオン交換樹脂法のかわりに使用することができれば分析時間は短くて済み、精度よく分析できるのではないかと考え、種々の実験検討をしたところ、ほぼ満足すべき定量法を確立した。

(1) 分析操作

試料 0.3 g (Zn=1.5% 程度) を秤取して時計皿でおおい、塩酸(1:1) 10 ml を加えて溶解したのち、(不溶解物があれば過酸化水素を添加)加熱蒸発してほとんど乾涸させる。放冷後、塩酸 4 ml と少量の水で傾斜洗浄して、100 ml 分液漏斗に移し入れて、全量を 20 ml にする。HCl 形にした液状陰イオン交換体(15 容量% ケロシン溶液)を 20 ml 加えて、1 min 振とうする。(2 回くり返す) 2 相に分かれると水相をとり出し、2N-HCl を 20 ml 加え、30 s 振とう後、水相をすて、0.2N-硝酸 20 ml でストリッピングを 2 回行ない、溶液を加熱後 NH₄OH-NH₄Cl 緩衝液を加えて沈殿を生成させ、ろ過後 5% 青酸カリ溶液を 5 ml 加え液状ユニバーサル BT 指示薬を少量添加し、4% ホルマリン溶液 10 ml を加えてから EDTA

標準溶液で滴定する。

0.01 M EDTA 溶液 1 ml = 0.6538 mg Zn

(2) 実験

a. Amberlite LA-1 + 溶媒の亜鉛抽出について

Moore氏⁽¹⁾ は高分子量 アミン である Tribenzylamine (TBA) および Methyldioctylamine (MDOA) を用いて、亜鉛とコバルトの分離実験を行なっているが、この報文によると、溶媒により亜鉛の抽出率は変わる可能性があるため Amberlite LA-1 の希釈剤として種々の溶媒を使用して抽出実験を行なった。亜鉛の抽出にはどの溶媒を使用してもよいことがわかったので、価格の面を考慮して Amberlite LA-1 の希釈剤としてケロシンを用いた。相分離の迅速性を問題にする場合はキシレン、n-ヘキサン、ペンゼンを使用すればよい。

表 3.4 Amberlite LA-1 を各種溶媒に溶かしたときの抽出

Amberlite LA-1 濃度	溶 媒	添加Zn (mg)	5%		10%		15%	
			有機相 (mg)	抽出率 (%)	有機相 (mg)	抽出率 (%)	有機相 (mg)	抽出率 (%)
	ケロシン	9.94	7.91	79.6	9.22	92.76	9.61	96.78
	n-ヘキサシ	9.94	7.91	79.6	9.15	92.10	9.68	97.36
	キシレン	9.94	7.98	80.25	9.02	90.78	9.61	96.78
	ペンゼン	9.94	8.04	80.92	9.22	92.76	9.61	96.78
	トルエン	9.94	8.04	80.92	9.22	92.76	9.58	97.37
	シクロヘキサ	9.94	7.85	78.94	9.19	92.43	9.61	96.78
	n-ヘプタン	9.94	7.91	79.60	9.19	92.43	9.58	96.37

b. 塩酸濃度を变化させた場合の亜鉛の抽出

Amberlite LA-1 をケロシンに溶かして15容量%にしたものを用いて水相中の塩酸濃度を变化させた場合に、亜鉛の抽出量がどのように变化するかについて調べた結果は図3.2のとおりである。塩酸濃度の2N および3Nにおいて、亜鉛の最高抽出率は96.68% (Zn=9.94 mg), 96.29% (Zn=24.85 mg), 93.01% (Zn=49.69 mg)を示す。

液状陰イオン交換体を使用して亜鉛を抽出する場合、水相中の塩酸濃度を2N~3Nの範囲にすればよいが、亜鉛を100%抽出するためには抽出回数を2回ないし3回くり返すために塩酸濃度は1N~6Nにいたる広範囲での抽出が可能である。

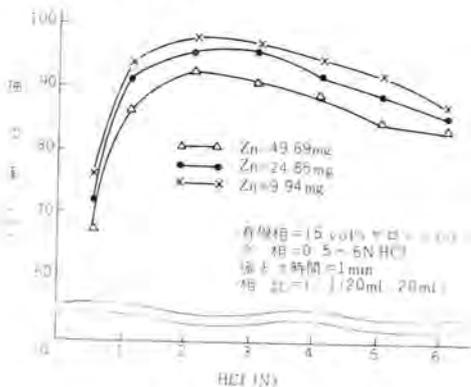


図 3.2 塩酸濃度を变化させた場合の亜鉛抽出
Fig. 3.2 Effect of HCl concentration on the extraction of Zn.

c. 硫酸、硝酸、過酸化水素混入時の抽出

アルミ合金の溶解に塩酸を使用する以外に、硫酸、硝酸および過酸化水素などを使用することがある。塩酸以外のこれらの酸が混入した場合、亜鉛の抽出に影響を与えるならば除去方法を考える必要があるため、検討したところ硝酸の影響がいちじるしかった。

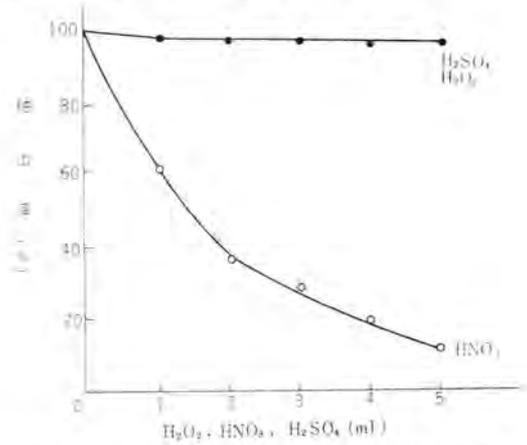


図 3.3 硫酸、硝酸、過酸化水素を添加したときの抽出
Fig. 3.3 Effect of H₂SO₄, HNO₃ and H₂O₂

亜鉛を抽出する場合は硝酸の混入を避けなければならない。試料を溶解するのに硝酸を使用しない方法によるか、蒸発乾燥により除去するかである。

d. 液温の変化による亜鉛の抽出

水浴中で各温度にして抽出した。抽出率は液温が高くなるにつれて低下するが、一般に抽出時の温度は20~30°C程度であるのでそれほど問題にすることはない。また60°C前後で抽出を行なう場合でも抽出を2~3回すれば100%抽出することができる。

e. アルミ合金中の各元素の影響

アルミ合金としてはNBS-86c試料にした。試料約0.3g秤取したときの各元素量を算出し、その算出量を基準にして亜鉛の抽出にどの程度影響するかについて検討した。この実験は有機相=15容量%ケロシン溶液20ml、水相=2N塩酸溶液20ml(亜鉛4.83mgに各種元素を添加)を100ml分液漏斗に入れて1min振とう後、水相を除き、0.2N硝酸20mlで2回ストリップングして、EDTA滴定法で亜鉛を定量した。この場合、亜鉛と同時に抽出される元素のマスキングは考慮していない。

アルミ合金中の亜鉛定量に際して影響を与える元素は鉄、銅、微量のアルミであった。鉄、アルミは水酸化物と

表 3.5 合成試料の分析結果

実験回数	水相 (ml)	有機相 (ml)	Zn 回収量 (mg)
1	20	20×2	4.87
2	20	20×2	4.87
3	20	20×2	4.68
4	20	20×2	4.87
5	20	20×2	4.78

注: 合成試料成分 Cu 20 mg, Mn 0.1 mg, Ni 0.1 mg, Cr 0.1 mg, Fe 3 mg, Pb 0.1 mg, Zn 4.83 mg, Al 300 mg

表 3.6 Al 合金の分析結果

JIS 容量法	本 法
4.40 %	4.42 %
4.40 %	4.42 %
	4.40 %

して、銅は青酸カリで影響を除くことができた。

(3) 分析例

合成試料およびアルミ合金について分析した。本法はかなり精度よく分析できて、JIS法と比較してもそんな色のないことを知った。

4. む す び

以上のように液状陰イオン交換体を使用して、鉄とジルコニウム分離やアルミ合金中の亜鉛の分離定量に好結果を得たが、分析分野への応用は液状陰イオン交換体が市販されてからまだ月日が浅いので、今後の研究に待たねばならない。

塩酸性溶液から MIBK によって抽出される金属は多くあり、同一条件下で液状陰イオン交換体と MIBK を抽出に併用すれば、かなり広範囲に金属の分離に利用

されるものと考えられる。工場分析には迅速性を必要とするところから、これらの溶媒抽出法との併用は今後大いに発展するものと思われる。

参 考 文 献

- (1) H.A. Mahlman, G.E. Leddicotte & F.L. Moore; Anal. Chem. 26, 1939 (1954).
- (2) J. Y. Ellenberg, G. W. Leddicotte & F. L. Moore: Anal. Chem. 26, 1045 (1954).
- (3) F. L. Moore: Anal. Chem. 30, 908 (1958).
- (4) 中川元吉: 日本化学雑誌 81, 444 (昭 35).
- (5) 中川元吉: 日本化学雑誌 81, 446 (昭 35).
- (6) 中川元吉: 日本化学雑誌 81, 747 (昭 35).
- (7) 中川元吉: 日本化学雑誌 81, 750 (昭 35).
- (8) 中川元吉: 日本化学雑誌 81, 1255 (昭 35).
- (9) 中川元吉: 日本化学雑誌 81, 1258 (昭 35).
- (10) G. E. Moore & K. A. Kraus: J. Ame. Chem. Soc. 72, 5792 (1950).
- (11) K. A. Kraus & G. E. Moore: J. Ame. Chem. Soc. 75, 1460 (1953).
- (12) 中川元吉: 第 9 年会 分析化学予稿 (昭 35).
- (13) S. P. Jams & J. Marlene: Anal. Chem. 27, 1653 (1955).
- (14) 若松茂雄: 分析化学 17, 578 (昭 33).
- (15) JIS H 1311.

最近登録された当社の実用新案

区 別	名 称	特許または登録日	特許または登録番号	発 明 考 案 者	関係場所
新 案	机形制御盤	36-1-24	528063	松本 潔・久保博和	神 戸
"	着火断続装置	36-1-24	528064	大森俊郎	姫 路
"	反射形ケイ光灯用ソケット	36-1-24	528065	橋本武彦・吉成武彦	大 船
"	シト断器接触部	36-1-24	528066	渡辺睦夫	神 戸
"	半導体整流素子	36-1-24	528067	加藤又彦	伊 丹
"	コンサベータ付変圧器	36-1-24	528068	谷中頼朝	伊 丹
"	警報装置付電気洗たく機	36-1-25	528360	加藤義明	{ 福 山 日 本 建 鉄 戸
"	照光模擬母線	36-1-25	528361	立石俊夫	神 戸
"	キューピクル配電盤の電気機器抽出装置	36-1-25	528362	天藤憲二	神 戸
"	扉の錠止装置	36-1-25	528363	木下忠男・駒形栄一	静 岡
"	防爆形容器	36-1-25	528364	上原利夫	福 岡
"	交流電気車の給電装置	36-1-26	528536	木村久男	本 社
"	直流電動機の制御装置	36-1-26	528537	吉田太郎	名 古 屋
"	制御器蓋体開閉装置	36-1-26	528538	平野琢磨	福 岡
"	電気車の電気制動装置	36-1-26	528539	北川和人	伊 丹
"	摘子装置	36-1-26	528540	高橋福重	無 線 機
"	巻鉄心	36-1-26	528541	山田三郎	名 古 屋
"	立軸電機の軸受装置	36-1-26	528542	三浦 宏	神 戸
"	油入電気機器	36-1-26	528543	白井万次郎・大杉 肇	研究所・伊丹

方向性 50% Ni-Fe 合金の再結晶

研究所 山森末男*・野口英男**
政木淑人***・中島陽三****

On the Recrystallization of Oriented 50% Ni-Fe Alloys

Research Laboratory Suelo YAMAMORI・Hideo NOGUCHI
Yosito MASAKI・Yōzō NAKAZIMA

Under a considerably high annealing temperature 50% Ni-Fe alloy turns different from what attained in the similar treatment at an ordinary high temperature, deteriorating the excellent rectangular hysteresis loop characteristic otherwise obtainable. To inquire into the matter, researches have been made on the recrystallization of oriented 50% Ni-Fe alloy from the viewpoint of effect of gas impurities and annealing atmosphere. As an impurity in the alloy, oxygen was considered particularly influential, but no decisive result has been available. However, it has been revealed that, as an annealing atmosphere, existence of adequate amount of oxygen is more effectual to refrain the occurrence of secondary recrystallization up to high temperature than mere high vacuum or pure hydrogen.

1. ま え が き

50% Ni-Fe 合金は、強度の冷間圧延（約 98%）を受けたのち高温で焼なましされると、再結晶して立方体集合組織 (100) [001] となり、すぐれた角形ヒステリシス特性を示す。しかしながら、焼なましの温度がかなり高くなると（たとえば 1,100°C 以上）、これと別個の方位を持つ粗大結晶粒が急激に発達して、結晶配列方向の違った組織に変化し、角形特性の劣化を招くようないわゆる二次再結晶の発生をみるのである。この二次再結晶の発生が抑制され、より高温において立方体組織の配列のまま焼なましされるならば、焼なましふんい気として使用する水素による合金の純化はより進行し、また、高温焼なましにより合金内のひずみもいっそう少なくなることが期待できるので、より優秀な角形特性材料を得る可能性がある。

従来、50% Ni-Fe 合金については、このような二次再結晶の発生に関して、冷間圧延度の影響、あるいは焼なまし時の加熱および冷却速度の影響、さらに合金の純度などとの関係から検討し報告されたものをかなり多く見受け⁽¹⁾、われわれも合金の純度との関連としてはとくに酸素の影響があることを指摘してきた⁽²⁾。

今回は二次再結晶の発生について、一次再結晶組織からの変化を観察調査し、試料中にすでに混入している不純物、あるいは焼なましふんい気の影響としての酸素の役割について検討した結果について報告する。

2. 試料および実験方法

試料としては当社世田谷製作所において「ハイロイ-O」⁽³⁾として製造されている 50% Ni-Fe 合金のうちから種々

の試片を選んだ。圧延率の影響を調べた試料、および圧延素材焼なましふんい気の影響を調べた試料以外は、巻鉄心製造工程中の仕上圧延率 98%、厚さ 0.1 mm の加工材を用いた。各試料の分析値は実験結果の項で報告する。

試料はエチルアルコールおよびトリクロルエチレンを用い洗浄した後、水素気流中あるいは種々真空度の真空中において焼なましした。加熱速度は徐熱と記した場合は 300°C/h 程度であり、急熱と記した場合はそれぞれ所定の温度に 30 s 以内で達している。温度誤差は ±10°C 以内である。水素は工業用ポンプ水素を、白金アスベスト、濃硫酸および苛性カリを用い精製したのち使用した。

組織の調査は X 線回折像（ラウエ法）、ミクロ組織およびマクロ組織により行なった。また、巻鉄心を作り直流記録磁束計により直流磁気特性を測定した。

3. 実験結果

3.1 圧延率および焼なまし温度と一次再結晶組織の関係

(1) X 線回折試験の結果

圧延率と一次再結晶開始温度の関係、あるいは圧延率、焼なまし温度および焼なまし時間と一次再結晶組織における立方体集合組織 (100) [001] の集合の程度との関係などについて X 線回折像により調査した結果をまとめ、表 3.1 に示す。

表からわかるように、98% 以下では圧延率が大きいほど、また 800°C 以下では焼なましが高温において行なわれるほど、立方体組織 (100) [001] の発生がより明らかに認められる。このことはすでに多くの研究者達により報告されているとおりで⁽¹⁾。

表 3.1 X線回折像による一次再結晶組織の調査結果

圧延率 (%)	焼なまし温度および時間 (水素中急熱急冷)									
	520°C		550°C		600°C		700°C		800°C	
	30 min	1 h	2 h	30 min	1 h	1 h	30 min	30 min		
70	再結晶を認めず			再結晶開始		再結晶組織の配列にはっきりした方向性は認められない				
85				再結晶開始		再結晶組織にきわめて弱く(100) [001] の方向性が認められる				
90	再結晶開始		きわめて弱い (100) [001] の方向性を持つ再結晶組織となる			(100) [001] がやや明瞭	(100) [001] が比較的明瞭			
95	再結晶開始					(100) [001] が比較的明瞭	(100) [001] がきわめて明瞭			
98	再結晶開始					(100) [001] がきわめて明瞭				

(2) 焼なまし温度と顕微鏡組織の関係

以上の X 線回折による調査に対応した変化が顕微鏡組織においても認められる。図 3.1 (a), (b), (c) は圧延率 95% の試料を 600°C, 700°C および 800°C において各 30 min 焼なましした組織である。写真で黒くみえる結晶粒が立方体方位からはずれた方位を持つ結晶粒（以下単に異方位結晶粒と呼ぶ）であるが、焼なまし温度が高温になるにしたがいその数は減少している。

ここで図 3.1 (a) からは異方位結晶粒が加工組織の中に最初に再結晶粒として現われるかのような印象を受ける。しかし X 線回折像により最初に認められた再結晶粒の方位は、よく知られているように (100) [001] であった。(図 3.2 参照) この点をさらに検討するために、600°C において 5 時間焼なましした試料の顕微鏡組織を倍率をあげて観察すると、図 3.3 のように再結晶せずに加工組織のまま残されていると思われていた領域に、より大きな結晶粒の粒界がかすかに認められる。すなわち、隣りあった結晶粒の方位の違いがごくわずかな場合には、その粒界は刻食を受けにくいという性質のために、立方体

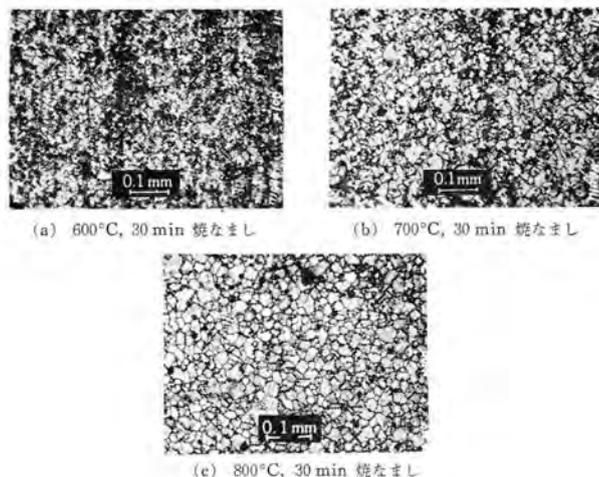


図 3.1 焼なまし温度と一次再結晶組織の関係 (95% 圧延後、水素中急熱焼なまし HCl 水溶液電解刻食)

Fig. 3.1 Microstructures of primary recrystallized 50% Ni-Fe alloy, annealed at 600°C, 700°C and 800°C respectively for 30 minutes in H₂ after 95% reduction.

方向性 50% Ni-Fe 合金の再結晶・山森・野口・政木・中島

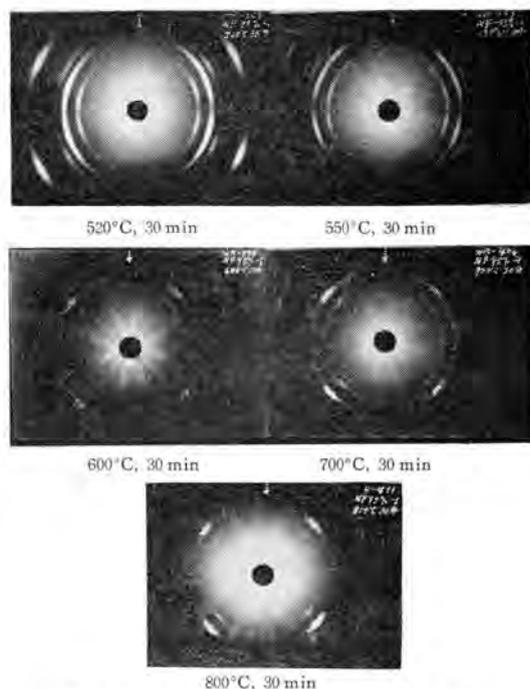


図 3.2 焼なましによる X 線回折像の変化

Fig. 3.2 X-ray patterns of 50% Ni-Fe alloy, annealed at 520°C, 550°C, 600°C, 700°C and 800°C respectively for 30 minutes in H₂ after 95% reduction.

方位同士の間結晶粒界が観察されず、加工地の中に異方位結晶粒だけが発生したように認められたのである。

また、図 3.3 (c) にみられるように異方位粒の多くは双晶であり、その粒度も立方体方位結晶粒より小さい。ここでは、異方位粒がすべて立方体方位粒の加工地中における結晶成長にともなう双晶として発生したものか、あるいは、立方体方位粒以外に異方位粒も加工組織から再結晶粒として発生するのかなどのたちいった議論は避け、単に圧延率が十分に大きい場合には、再結晶初期において大部分の異方位結晶粒は立方体方位結晶粒にくら

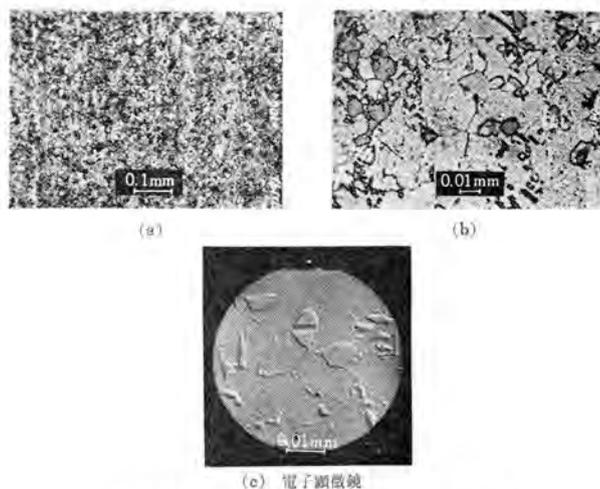


図 3.3 一次再結晶初期段階の顕微鏡組織

(95% 圧延後、水素中 600°C, 5 h 急熱焼なまし HCl 水溶液電解刻食)

Fig. 3.3 Microstructures of primary recrystallized 50% Ni-Fe alloy, annealed at 600°C for 5 hours in H₂ after 95% reduction.

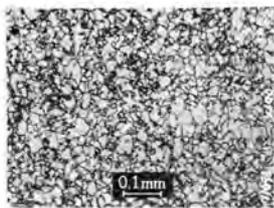


図 3.4 一次再結晶の完了

(図 3.3 の試料をさらに 900°C, 30 min 焼なまし HCl 水溶液電解刻食)

Fig. 3.4 Microstructure of primary recrystallized 50% Ni-Fe alloy, annealed previously at 600°C for 5 hours and followed at 900°C for 30 minutes after 95% reduction.

べて粒度が小さいことを指摘するにとどめる。

顕微鏡組織の観察から、X 線回折像に認められた圧延率の大きい試料における高温長時間焼なましにもなる (100) [001] 成分の強化は、粒度の小さな異方位結晶粒が周囲の粒度の大きな立方体方位 (100) [001] 結晶粒の成長に食われて減少して行くためであることがわかる。

こうして、かなりヒズミの少なくなった粒度が同程度の立方体方位粒が並びあった状態に達すると、一次再結晶組織における結晶成長は停止する。〔図 3.4 および 図 3.5 (d) 参照〕

(3) 圧延率と顕微鏡組織の関係

これに対し、圧延率が低く、X 線回折像でわかるように、種々の方位の再結晶粒が共存する組織では、粒界エネルギーを駆動力とする結晶成長が続き、結晶粒は図 3.5 (a) のようにしだいに成長する⁽⁴⁾。

以上の立方体方位結晶粒と異方位結晶粒との関係が二次再結晶をひき起こすものと考えられている。すなわち、小さな異方位粒は周囲の (100) [001] 粒に食われ消滅したが、大きな異方位粒が存在すればこれは逆に周囲の (100) [001] 粒を食って成長するであろう⁽⁵⁾。しかもその際、同方位の結晶粒の間の粒界が移動しにくいために、ある一定の結晶粒度のままにとどまっている (100) [001] 集合組織の中にあるは、いったん大きくなり始めた異

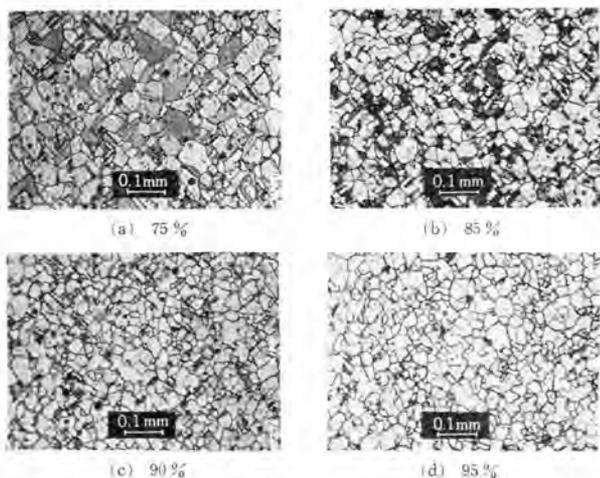
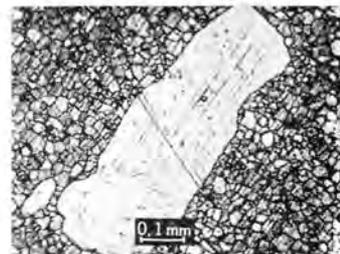


図 3.5 圧延率と焼なまし組織の関係

(各 % 圧延後、水素中 900°C, 5 h 急熱焼なまし HCl 水溶液電解刻食)

Fig. 3.5 Microstructures of recrystallized 50% Ni-Fe alloy, annealed at 900°C for 5 hours. The reduction rates of the each specimen is respectively 75, 85, 90 and 95%.

図 3.6 一次晶中で発達し始めた二次晶



(塩化第二鉄アルコール溶液刻食)

Fig. 3.6 Growing coarse grain in the primary recrystallized structure.

方位粒は加速度的に成長するであろう (図 3.6 参照)。しかし、ある潜伏期間の後、いったん発達し始めると急速に成長する二次晶の発生段階を実際に顕微鏡組織の中でとらえることは困難である。(この合金にくらべて二次晶の成長がゆるやかな Fe-Si 合金では観察されている⁽⁶⁾)

3.2 不純物の一次再結晶組織への影響

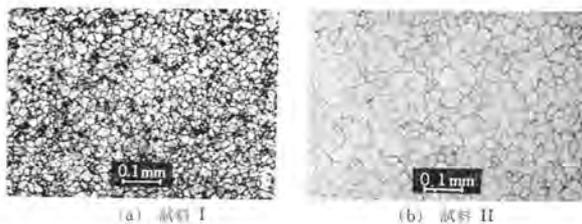
(1) 鋳塊純度の影響

試料中の不純物は粒界移動に対する障害となるので、一般に高純度の試料ほど結晶粒度が大きくなりやすいことはよく知られているとおりである⁽⁴⁾。この合金の一次再結晶組織においてもこの関係を見ることことができる。図 3.7 にはそれぞれ大気中および真空中において溶解した試料を、同一条件で処理した場合の一次再結晶組織を示す。真空中溶解試料は大気中溶解試料にくらべて結晶粒度が大きい。

(2) 圧延素材焼なましふんい気の影響

また図 3.8 は、同一の鋳塊を母材とするが、圧延素材をつくる際に一方は通常の間焼なましにより、一方は水素中高温長時間焼なましによる純化をはかったものである。この処理によって除かれる不純物は主として酸素と炭素であると考えられるが、その結果、一次晶の粒度が大きくなっていることがわかる。

これに対し、圧延素材の焼なましを酸素を含んだ不純な分解アンモニアふんい気中において焼なましした試料では、図 3.9 に示したように一次再結晶組織として結晶粒

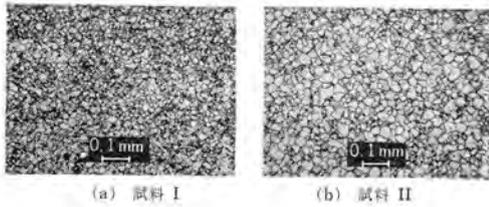


(a) 試料 I (b) 試料 II

試料	Si	Mn	C	P	Al	溶解法
試料 I (%)	0.13	0.43	0.023	0.003	—	大気中溶解
試料 II (%)	0.017	0.13	0.13	0.007	0.005	真空中溶解

図 3.7 鋳塊純度の相違による一次再結晶組織の比較 (98% 圧延後、水素中 1,000°C, 1 h 徐熱焼なまし HCl 水溶液電解刻食)

Fig. 3.7 Primary recrystallized structure of the air-melted specimen and that of the vacuum-melted specimen, annealed at 1,000°C for one hour in H₂ after 98% reduction.



試料	Si	Mn	C	P	溶解法	磁気特性 (98%圧延状態)				
						μ_0	μ_e	H_{10} (Oe)	H_{c15} (Oe)	ρ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
試料 I (%)	0.06	0.49	0.019	0.005	大気中 溶解	74	518	29.2	11.3	44.24
試料 II (%)	0.04	0.48	0.012	0.005		76	620	23.4	9.7	44.13

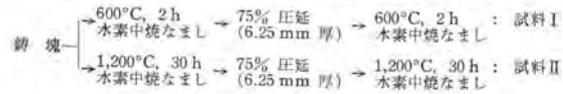


図 3.8 高温水素中焼なましによる圧延素材純化の影響
(98% 圧延後, 水素中 1,075°C, 30 min 徐熱焼なまし)

Fig. 3.8 Effect of purification by high temperature annealing in H_2 before final rolling.

度が小さいほかにそろいのよくない (100) [001] 集合組織が得られる。

(3) 仕上焼なましふんい気の影響

酸素の影響は仕上焼なましふんい気の中にも認められる。すなわち図 3.10 は同一の試料を低真空中 ($5 \mu\text{Hg}$) および水素中において、それぞれ 1,100°C, 1 h 焼なまししたものであるが、低真空中焼なまし試料にくらべ水素中焼なまし試料の一次晶粒度は大きい⁽⁷⁾。

3.3 不純物の二次再結晶抑制効果

(1) 合金中の不純物

われわれはさきに、同一組成で含有不純物量がほとんど等しい別々のインゴットから作られたものでも磁性に大きな差がある場合があり、その理由については明確ではないが、おそらく C および O_2 など不純物の含まれている状態 (磁性をはなはだしく害するような状態とそうでない状態) が異なったためではないかと報告した⁽³⁾。その後も同じ条件で真空溶解し加工され、含有不純物量がほとんど等しいもので、純水素中仕上焼なましにおけ

る二次再結晶発生温度に大きな差を生ずることをしばしば経験している。

これは他の原因もあるかも知れないが、溶解時に脱酸剤を適量と思われる量よりやや多く入れたもの、あるいは限界量を入れたもので脱酸作用がうまく行なわれたと考えられるものでは二次再結晶の発生が高温まで抑制され、限界量より少なく入れたものでは低温で二次再結晶が発生する事実からみて、残存した不純物、とくに O_2 の全量よりもその含まれている状態 (この状態については未確認) が二次再結晶の発生温度を左右する一つの大きな因子であろうと考えられる。

(2) 仕上焼なましふんい気

また、仕上焼なましふんい気は表 3.2 のように二次再結晶開始温度にも影響する。すなわち、試料により受ける影響の程度は異なるが、一次再結晶粒の結晶成長が進まなかったふんい気では、一般に二次再結晶も起こりにくく、真空度が低下するほど二次再結晶開始温度は上昇する。

この際、水素中焼なましによりいったん二次晶が発生した試料を、低真空のふんい気に変えて焼なましを続けても図 3.11 に示すように二次晶の成長は続かない。

また、いったん低真空中において高温焼なましした試料はさらに水素中焼なましを加え純化しても二次晶が発生しない。[角形ヒステリシス特性はほとんど失われず、保磁力が低下している (表 3.3 参照)]

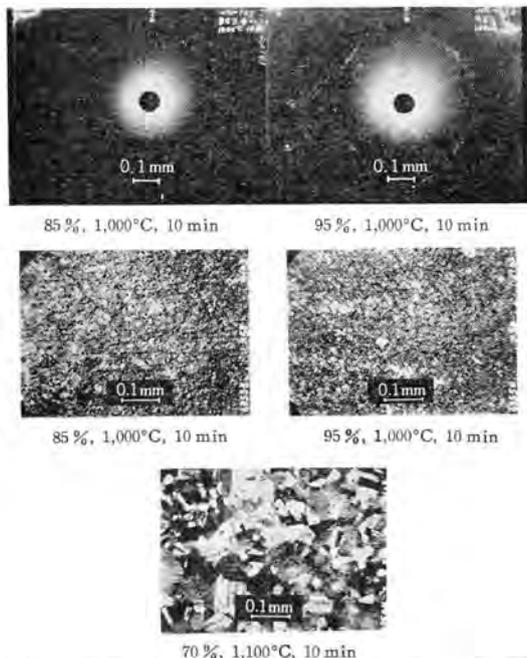
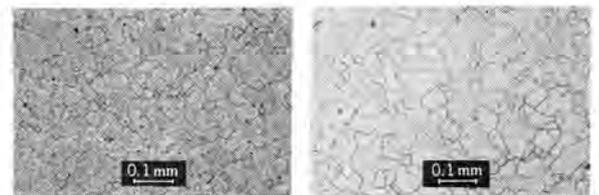


図 3.9 不純な分解 アンモニア 中において焼なましした圧延素材の仕上圧延および焼なまし後の一次再結晶組織
Fig. 3.9 Primary recrystallized structures of the rolled and annealed billet which is annealed in the impure cracked ammonia.

方向性 50% Ni-Fe 合金の再結晶・山森・野口・政木・中島



(a) 低真空中焼なまし ($5 \mu\text{Hg}$)

(b) 水素中焼なまし

焼なまし前の試料純度 (%)

溶解法	Si	Mn	C	P
真空溶解	0.024	0.28	0.020	0.001

図 3.10 仕上焼なましふんい気の違いによる一次再結晶組織の比較

(98% 圧延後, 1,100°C, 1 h 徐熱焼なまし HCl 水溶液電解食 $\times 100 \times 1/2$)

Fig. 3.10 Effect of the final annealing atmospheres for the primary recrystallized structures.

表 3.2 仕上げ焼なましふんい気の二次再結晶開始温度への影響

焼なましふんい気		試料 I	試料 II	試料 III
水	素	950°C	1,100°C	1,100°C
真 空	0.3 μHg	1,050°C	1,150°C	1,150°C
	5 μHg	1,200°C 以上	1,200°C 以上	1,150°C
	1 mmHg	1,200°C 以上	1,200°C 以上	1,200°C 以上
不 純 物 %	Si	0.008	0.009	0.13
	Mn	0.01	0.04	0.43
	C	0.013	0.010	0.023
	P	0.003	0.004	0.003

(注) 950~1,200°C の間の 50°C おきの各温度において 1h (除熱) 焼なましの結果。

4. む す び

以上 50% Ni-Fe 合金の再結晶組織について検討した結果をまとめると次のとおりである。

(1) 98% までの圧延率では、圧延率が大きいほど、また 800°C までの焼なまし温度では焼なまし温度の高いほど、立方体組織が明らかに現われ、圧延率の高いものでは異方位結晶粒の多くは双晶であり、立方体方位粒よりも小さく、より高温の焼なましによって立方体方位粒の成長に食われ、処理可能な焼なまし温度・時間の限界における状態では同程度の大きさの立方体方位粒だけに

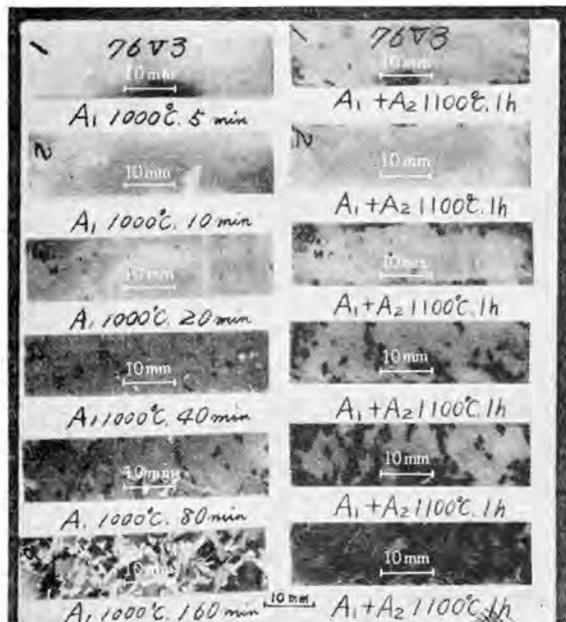


図 3.11 二次晶の成長におよぼす焼なましふんい気の影響
(塩化第二鉄酸性水溶液刻食)
試料: 表 3.2, 試料 I
A₁: 水素中徐熱焼なまし
A₂: 低真空中徐熱焼なまし (5 μHg)

Fig. 3.11 Effect of the annealing atmospheres for the crystal growth of the secondary recrystallized grains.

表 3.3 仕上げ焼なましふんい気の磁気特性への影響

試料	熱処理	磁気特性					
		B _{0.2} (kG)	B _{0.3} (kG)	B ₂ (kG)	Br ₂ (kG)	Hc ₂ (Oe)	Br ₂ / B ₂ (%)
試料 I (表 3.2, 試料 I)	水素中 950°C, 1h	7.5	13.1	14.6	14.1	0.23	96.6
	水素中 1,000°C, 1h	9.3	10.7	13.3	11.2	0.13	83.8
	真空中 1,100°C, 1h	9.4	12.9	14.8	14.2	0.18	95.8
	真空中 1,200°C, 1h および 水素中 1,150°C, 5h	11.6	12.9	15.3	13.8	0.10	90.3
	水素中 1,025°C, 1h	8.9	12.9	14.6	13.5	0.20	92.4
試料 II (図 3.9, 試料)	真空中 1,200°C, 1h	7.2	10.5	14.2	13.2	0.20	92.4
	真空中 1,200°C, 1h および 水素中 1,100°C, 1h	12.8	13.7	14.9	13.9	0.13	92.6
	水素中 1,175°C, 1h	13.0	13.5	15.0	13.2	0.10	87.9
	真空中 1,200°C, 1h および 真空中 1,200°C, 1h および 水素中 1,150°C, 5h	10.7	13.3	14.9	13.7	0.17	92.2
試料 III (図 3.7, 試料 II)	真空中 1,200°C, 1h および 水素中 1,150°C, 5h	11.6	13.3	14.8	14.2	0.11	95.5

真空度: 5 μHg

巻鉄心寸法: 0.1×5, 外径 20 φ, 内径 18 φ

(この寸法の巻鉄心では同一材料でも大形のものにくらべてやや劣った特性が得られる)

ほとんどなって、一次再結晶組織における結晶成長は停止する。この一次再結晶粒は、合金の純度、焼なましふんい気の純度が高いほど大きい。

(2) 上記の限界をこえて高温あるいは長時間焼なましがなされると、一定粒度のままにとどまっている立方体集合組織中において、急速に異方位結晶粒が発達し、いわゆる二次再結晶が発生する。この二次再結晶を発生させる因子は明確でないが、この実験においては、合金が酸素により汚染されると思われるふんい気、低真空度の真空中において仕上げ焼なましされると、一次晶の結晶成長が遅れるとともに二次再結晶開始温度も高められることを確認した。また、いったん低真空中において高温焼なましされた合金は、その後水素中焼なましにより純化されても二次再結晶を起さない。このことから、高温低真空ふんい気における焼なましの間に二次晶発達の原因となるものが減少することが考えられる。

参 考 文 献

- (1) G. W. Rathenau & J. F. H. Custers: Philips. Res. Rep., 4, 241 (1949).
- (2) 山森・ほか: 「三菱電機」33, No. 12, (昭 34).
- (3) C. S. Barrett: Structure of Metals (1952).
- (4) J. E. Burke & D. Turnbull: Progress in Metal Physics 3, (1952).
- (5) C. G. Dunn: Acta Metallurgica 2, 386 (1954).
- (6) J. L. Walter & C. G. Dunn: Trans. Met. Soc. AIME 218, 914 (1960).
- (7) D. L. Wood: J. of Metals 9, 406 (1957).

金属黒鉛質ブラシの特性とその摩耗傷損

研究所 山森末男*・森田義男**

Properties of Metallic Graphite Brushes and Their Characteristics of Wear in Sliding Contact

Research Laboratory Suelo YAMAMORI・Yoshio MORITA

Current collecting devices in combination of brushes and slip rings are indispensable to electric rotating machines. However, complaints on them remain unceasing in spite of much consideration to the selection of their materials. This is according to the writers' opinion due to one sided study on the wear of brushes alone, with little given to the effect from slip rings. In this report, on various metallic graphite brushes of different contents of copper, their physical properties and micro-structures were examined. Furthermore, their characteristics of wear have been compared on another in sliding contact with a bronze ring. From the considerations relating to these results, particular mention has been made on the shapes and the distributing manners of copper in the brushes.

1. ま え が き

電気回転機にはブラシとスリップリングとの組合せによる集電装置が用いられている。これらのブラシあるいはスリップリングに対しては種々の材質のものが検討され、その選択組合せに対して考慮が払われているが、それにもかかわらずブラシの摩耗、リングしゅう動面のアレあるいは凹摩耗などによる苦情は跡を断たない。

従来、このようなブラシとリングの組合せによる通電しゅう動摩耗に関しては、主としてブラシ材の摩耗に重点を置き多くの研究が行なわれてきた。たとえば、電氣的極性および電流密度の相違による影響、あるいは湿度、水分、油の影響その他酸素、水素などの影響など、ブラシの摩耗に対して検討した報告を数多く見受けることができる⁽¹⁾。

しかしながら、これらの報告には次のような不備の見出されるものが多い。すなわち、リングと組合せた通電しゅう動摩耗を研究の対象としているにもかかわらず、ブラシの摩耗だけを単独に切り離してとりあげ、リングに対する考察を軽視していたことである。本質的にはリング摩耗とともにブラシ摩耗を総括して検討されなければならないのであるが、これが怠られていたわけである。また、電氣的極性の区別をブラシの摩耗に対して調査した実験においても、前述のようにリングとの相互作用としての見解を欠くために、リング自体の極性に対してはなんら考慮せずに、その同一しゅう動面上に両極ブラシを配置するなど、直流における摩耗の実験としては不十分な条件の報告が多いようである。

したがって、このようにして求められたブラシの摩耗量がブラシ材質自体の特長に依存して示されたものか、あるいはリングの影響が加わって複雑化され自体の特長

はおおい隠されたまま示されたものかの見分けが明確でなかった。さらに電氣的極性の相違による摩耗の一般的な関係を見出しにくかったことも当然であると思う。

すでにわれわれは上記の点に留意し、ブラシとリングの種々組合せについてその通電摩耗を、電氣的極性による相違および両者の相互作用に重点を置いて検討し⁽²⁾、材質の相違に応じた摩耗量の差異は、ブラシおよびリングのいずれにおいても(+)極において認めやすく、(-)極においては比較的に見出しがたい一般傾向があること、したがって材質による相違はそれが(+)極である場合に検討するほうがよいことを指摘した⁽³⁾。

この研究においては、種々の金属黒鉛質ブラシの材料の特長、すなわち、Cu%による相違、Cuの混在様式の相違、さらに一般物理特性の相違などについて調査し、これらの結果を上述の一般傾向に基づいて(+)極において示される摩耗傷損量と対比して検討してみた。

2. 試 料

実験に用いたブラシは次の5種類に分けられる。

- (1) 外国N社製ブラシ……Cu%約60, 65, 75, 85
- (2) 国内A社製ブラシ……Cu%約72, 79
- (3) 国内B社製ブラシ
B₁……Cu%約73…スマツ銅粉使用
B₂……Cu%約75…電解銅粉使用
- (4) Sブラシ……Cu%約60, 70, 80, 90
……………鍍銅黒鉛粉使用
- (5) 天然黒鉛質ブラシ

以上のように金属黒鉛質ブラシを主体としたが、(1)および(2)はわが国でよく使用される代表的なものから選んだ。(3)はスマツ銅粉と電解銅粉をそれぞれ使用し、熱圧法で製作されたもの。(4)は鍍銅黒鉛粉を冷圧焼成

* 材料研究室室長 ** 材料研究室主任研究員

表 3.1 通電しゅう動の実験条件

リング材質	BC3 リング, 270φ×25mm
ブラシ寸法	8.1×12.5×40, mm
ブラシ圧	150 g/cm ² なるべく一定にする
電流	直流
周速	21 m/s (回転数 1,500 rpm)
ブラシ両裕度	約 0.05~0.1mm
リング偏心	0.02mm 以下
初めのリング面あらし	中心線平均あらし 0.3~0.4μ 以下, グラインダにて研摩後, 海水ベーク No. 800 で仕上げる
すり合わせ	無電流で十分すり合わせた後実験を開始する

表 4.1 各種金属黒鉛質ブラシの分析結果

ブラシ種別	呼称銅 %	定量分析結果		
		銅 %	Pb %	黒鉛
N 社製	85	84.71	0.03	残
	75	74.95	0.03	〃
	65	64.91	0.01	〃
	60	59.92	0.01	〃
A 社製	79	78.50	0.01	〃
	72	82.33	0.01	〃
B 社製 B ₁	73	73.39	0.01	〃
	B ₂	75	74.89	0.01
S	90	88.12	1.59	〃
	80	79.79	0.84	〃
	70	69.24	1.03	〃
	60	59.33	0.78	〃

備考 Sn, Zn, Si, B のほか Fe, Al, Mg, Ca などの微量成分がみとめられた

したもので銅 % の影響を検討する目的でとくに製作した。(5) は銅を含有しない場合として比較検討のため採用した。

3. 実験方法

以上の種々ブラシの一般特性の相違を、まず、成分、ついで一般的物理特性、すなわち見かけ比重値、固有抵抗値、抗折力、弾性率および硬度を、さらに顕微鏡組織、こわれやすさなどの調査より比較した。これらの実験方法の詳細は必要のつと説明することにした。

また、このようにして一般特性を調査したブラシを青銅リングと組合せて通電摩擦試験をした。その際の実験条件はすでに述べた場合と同一であるが、簡単に表 3.1 に再録して置く。なおこの試験においてはブラシを (+) 極としてブラシの摩耗傷損量および表面アレについて測定した。

4. 実験結果

4.1 種々の金属黒鉛質ブラシの一般特性の比較

(1) 成分分析結果

表 4.1 に分析結果を示す。Pb は N 社、A 社および B 社のいずれのブラシにおいても微量にしか認め得なかったが、試作ブラシにはその量は約 1% である。なお同種類に属するブラシに対しては銅 % の大略値をもって、試料名の区別としたことを付記しておく。

(2) 一般物理特性

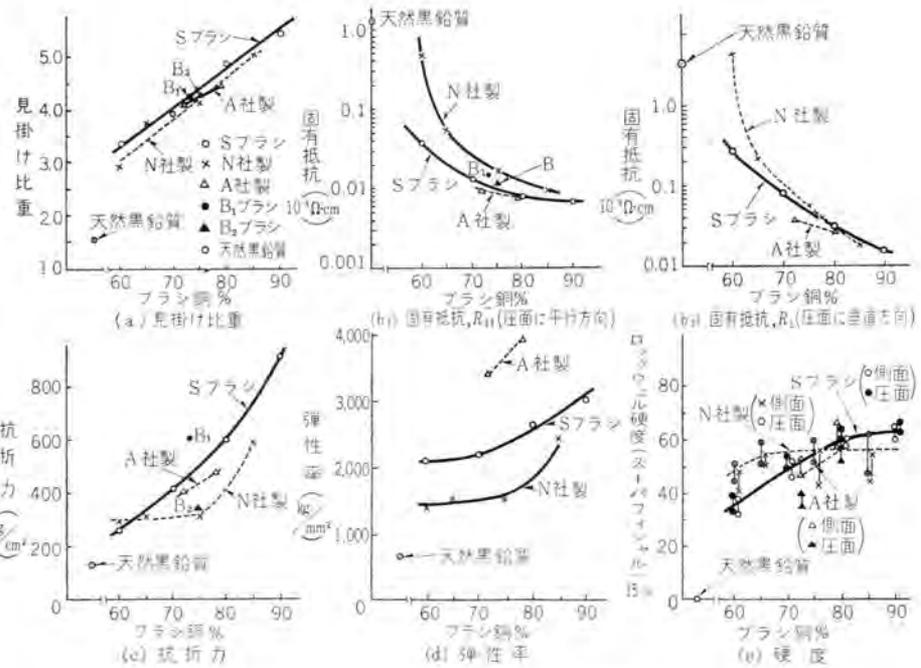


図 4.1 各種ブラシの銅の % と物理的性質

Fig. 4.1 Physical properties vs. copper % of various brushes.

- (a) Apparent densities.
- (b₁) Specific resistance in direction parallel to the pressed surface.
- (b₂) Specific resistance in direction perpendicular to the pressed surface.
- (c) Bending strengths.
- (d) Elastic modulus.
- (e) Hardness.

試験法はすべて学振法⁽⁴⁾に準拠した。使用した試片数はいずれも 5 個ずつとし、試片寸法として面積 10×60 mm² 厚さ 10 mm のものを用いた。しかし硬度に関しては、一般に用いられる ショア 硬度をやめてロックウェル硬度計 (スーパーフィナル形) を使用した。なお、すべて測定値は便利のため、一応銅 % との関係において比較することにする。

a. 見かけ比重値

図 4.1 (a) に示すように銅 % に比例して増大し、ブラシの種類を異にしても Cu % が同一であれば相違が認めがたい。

b. 固有抵抗値

各種ブラシの固有抵抗値は図 4.1 の (b₁) および (b₂) に示したように、ブラシの圧面に平行および垂直のいずれの方向においても銅 % が大になると対数的に顕著に減少する傾向があり、しかも種別によりその関係曲線は相互に異なっている。一般に圧面に垂直方向の固有抵抗値が平行方向よりも大きく、また種別による相違も銅 % が 80 以上においては認めがたくなる。

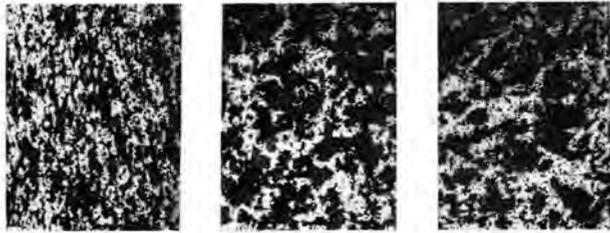
c. 抗折力

いずれのブラシも銅 % が増すと抗折力は大となる傾向を図 4.1 の (c) に示す。約 60% の組成のものには種別による相違を認めがたいが、より銅 % が多くなるとその区別も明らかとなる。

* 圧面に垂直方向の固有抵抗の測定にはとくに厚さ 20~30 mm の試片を製作しこれを用いた。



(a) 60% (side face) (b) 65% (side face) (c) 75% (side face)



(d) 85% (side face) (e) 75% (pressed surface) (f) 85% (pressed surface)

図 4.2 N 社製 ブラシの顕微鏡組織 ($\times 100 \times 3/7$)

Fig. 2 Micro-structures of N-Brushes ($\times 100 \times 3/7$)

d. 弾性率

図 4.1 の (d) に弾性率測定の結果を示す。ブラシの種類による相違が顕著である。

e. 硬度

図 4.1 の (c) に硬度と銅 % との関係を示した。銅 % が増すと硬度が大となる傾向のものと、銅 % の増減に対してほとんど無関係のもの 2 種あることがわかる。

以上述べたように見かけ比重を除いては、一般物理特性は銅 % が同一であってもブラシの種類ごとに相違した数値を与えていることがわかる。

(3) 顕微鏡組織

a. N 社製 ブラシ



(a) 72% (side face) (b) 79% (side face) (c) 72% (pressed surface)

図 4.3 A 社製 ブラシの顕微鏡組織 ($\times 100 \times 3/7$)

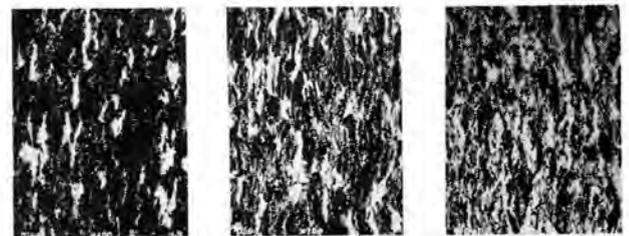
Fig. 4.3 Micro-structures of A-Brushes ($\times 100 \times 3/7$)



(a) B₁-Brush 73% (side face) (b) B₂-Brush 75% (side face) (c) B₁-Brush 73% (pressed surface)

図 4.4 B 社製 ブラシの顕微鏡組織 ($\times 100 \times 3/7$)

Fig. 4.4 Micro-structures of B-Brushes ($\times 100 \times 3/7$)



(a) 60% (side face) (b) 70% (side face) (c) 80% (side face)



(d) 90% (side face) (e) 60% (pressed surface) (f) 80% (pressed surface)

図 4.5 S ブラシの顕微鏡組織 ($\times 100 \times 3/7$)

Fig. 4.5 Micro-structures of S-Brushes ($\times 100 \times 3/7$)

図 4.2 の (a), (b), (c) および (d) に Cu % が 60, 65, 75 および 85 の 4 種の顕微鏡組織をいずれもその側面において示した。Cu % の少ない ブラシほど銅組織は肉薄であり、しかも黒鉛に囲繞され銅相互のつながりに乏しいのが特長である。同図の (e) および (f) には 75% および 85% 銅の 2 種のブラシの圧面組織を比較のため示しておいた。

b. A 社製 ブラシ

図 4.3 の (a) および (b) に銅 % 72 および 79 の顕微鏡組織 (側面) を示す。銅粉は N 社製にくらべて厚くしかも大きい形状を示すのが特長であり、銅粉同志のつながりもかなり良好であると見てさしつかえない。同図の (c) には 72% 試料の圧面の組織を示した。

c. B 社製 ブラシ

スタンプ銅粉 73% を使用して作られたブラシを図 4.4 (a) に示す。銅組織は層状につながっており繊細である。同図 (b) には電解銅粉を 75% 使用して作られたものを示すが、これは A 社製ブラシと圧面組織もまた、きわめて類似している。同図 (c) にはスタンプ銅粉によるブラシの圧面を示した。

d. S ブラシ

銅 % 60, 70, 80 および 90 の 4 種の顕微鏡組織 (側面) を図 4.5 (a), (b), (c) および (d) に示す。鍍銅黒鉛粉末を使用した特長として銅 % の少ない ブラシほど、薄い銅膜で包まれた黒鉛粒からなっており、とくに繊細であるが、所々に比較的大きな銅組織を示していることがわかる。しかし層状をなして銅のつながりは良好である。

同図の (e) および (f) に圧面を示した。

以上のように顕微鏡組織はその種類により銅粉の形状、大きさ、さらにそのつながりにおいてそれぞれ相違しており、これらが一般物理特性に差を与えたものであるこ

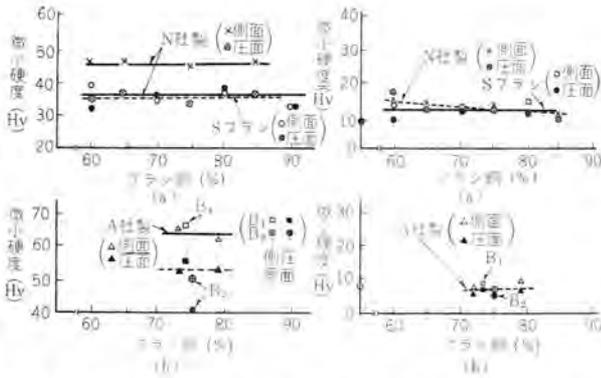


図 4.6 各種ブラシの銅組織微小硬度(マイクロピッカース 5g)
Fig. 4.6 Micro-hardness of copper in brushes.

図 4.7 各種ブラシの黒鉛組織微小硬度(マイクロピッカース 5g)
Fig. 4.7 Micro-hardness of graphite in brushes.

とは容易に想像できる。

(4) 顕微鏡組織に示される微小硬度

顕微鏡組織に認められる銅組織または黒鉛組織について、その微小硬度を測定した。さきに述べたロックウェル硬度がブラシの組織全般にわたる硬度で示されたのに対し、銅と黒鉛とを区別して調査した点が相違する。微小硬度計としてはライト顕微鏡付属の装置を用い、その測定に際しては銅および黒鉛の面積に対して圧痕を十分小さくするため、荷重は 5g を採用した。

まず銅組織の微小硬度を図 4.6 に示す。図の (a) は S および N 社製ブラシ、(b) は A 社および B 社製ブラシの場合である。いずれのブラシにおいても銅%の変化は銅の硬度に相違を与えないといえるが、それぞれの種類別には差があることがわかる。一般には側面の銅の硬度値が圧面よりも大である結果が示された。

図 4.7 には各種ブラシの黒鉛組織の平均微小硬度を示す。(a) は S および N 社製ブラシ、(b) は A 社および B 社製ブラシの場合である。各種ブラシともに銅%による相違を比較的に示さないようであり、また圧面と側面とによるその差もほとんど認められなかった。

銅組織の微小硬度のブラシの種類による相違については、使用した銅粉の形状、大きさが当然影響したとも思われるが、黒鉛の場合には些少の差があるようでもあり、あるいはその原料自体の相違に問題があるのかも知れない。

(5) 破断および破壊の特長

つぎにリングとの通電しゅう動の際に、直接、関連があると思われるこわれやすさについて検討してみる。

a. 衝撃破断面の特

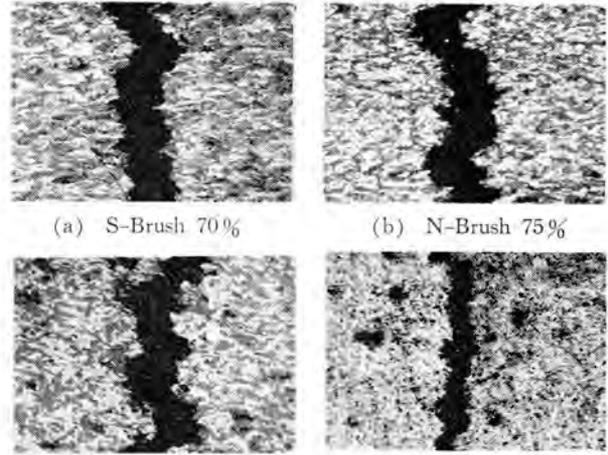


図 4.8 衝撃破断面の組織 (×70×1/2)
Fig. 4.8 Micro-structures shown in ruptures of brushes. (×70×1/2)

長

まずブラシに衝撃的に荷重を加えてブラシを破断させ、破断面の特長を比較した。方法は抗折力試片と同じ寸法のものに圧面に垂直方向に抗折力の約 10 倍の荷重 (250~500 kg) をアムスラー試験機によって急激に加えることによる。図 4.8 にはその側面の顕微鏡写真をブラシの種類ごとに約 70% 銅を選んで比較した。すなわち、破断面は銅組織によって主として特長づけられた凹凸を示し、とくに不均一に分布する粗大晶に影響されていることがわかる。天然黒鉛質ブラシも比較のために示しておいたが凹凸の度はもっとも少ない。

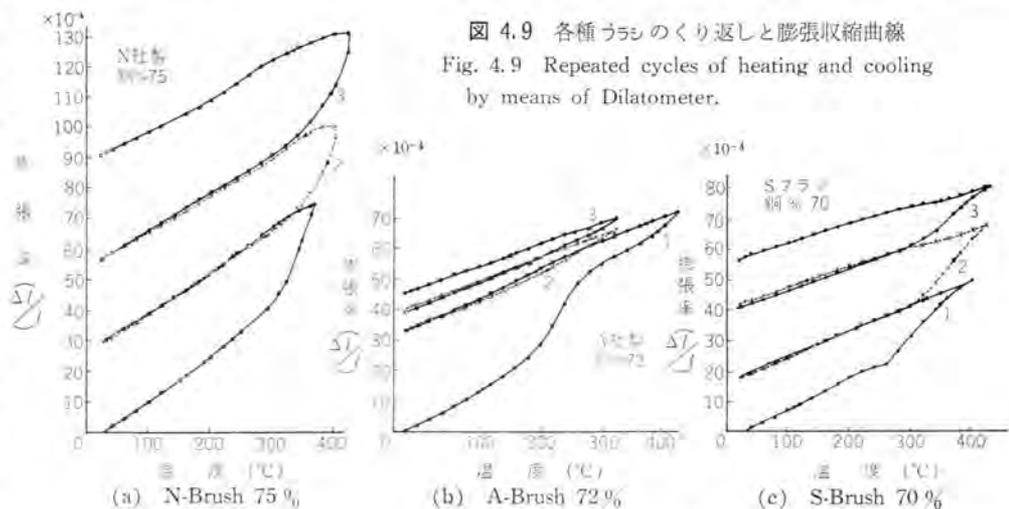
b. くり返し膨張収縮による破壊の特長

熱膨張収縮のくり返し試験を本田式示差熱膨張計を用いて実施した。試片は径 4mm で、ブラシ材の長さ方向に平行の 100mm 長の丸棒である。

各種ブラシの膨張曲線はいずれも類似の傾向を示し、80~180°C の間ではほぼ温度に比例して膨張する。Cu% によって相違するが、ブラシの種類によってはほとんど差異が認めがたい。しかしながらより高温にまで加熱されると、いずれのブラシも 220~300°C において異常膨張

図 4.9 各種ブラシのくり返しと膨張収縮曲線

Fig. 4.9 Repeated cycles of heating and cooling by means of Dilatometer.





(a) N-Brush 75% (b) A-Brush 72% (c) S-Brush 70%
(一部に黒鉛の脱落を示す)

図 4.10 くり返し膨張収縮後の顕微鏡組織 ($\times 200 \times 3/7$)
Fig. 4.10 Micro-structures after repeated cycles of heating and cooling. ($\times 200 \times 3/7$)

が起り、しかも冷却時には加熱時と同じ割合をもって収縮し、したがって室温にまで冷却された際には旧形に復せず、膨大したままとなることが認められた。いまこの関係をブラシの種類ごとに比較する。

まず銅 % 75 の N 社製ブラシについて図 4.9 (a) に示す。約 300°C で異常膨張し、さらに 2 回、3 回のくり返しを行なうと、室温における残留膨張は大きくなる。

同図 (b) は銅 % 72 の A 社製ブラシの場合を示す。約 220°C より異常膨張を始めるが 2 回、3 回のくり返しの際にはあらわれ方が僅少で、したがって N 社製ブラシの場合のような大きな膨張残留は認められない。

同図 (c) は銅 % 70 の S 社製ブラシの場合を示す。異常膨張の開始温度が約 260°C であることを除いては N 社製ブラシとほとんど同様の挙動をする。しかし N 社製ブラシよりも膨張残留の度が少ない。

上記くり返し熱膨張収縮を受けた試片の顕微鏡写真を図 4.10 (a), (b) および (c) に示す。この写真から、くり返し実験を経たものは実験前のものにくらべてキレツ様間げきを新たに加えていることに気がつく。概して、比較的大きな銅粒の周辺に多く認められ、薄い銅片のまわりには見出しがたい傾向がある。

要するに、異常膨張は銅組織と黒鉛組織との間にキレツ様間げきを作ることによるものであり、両者の結合が離れにくいものほど、異常膨張を開始する温度が高く、また、そのような場合ほど、数回のくり返し実験後においてもなお、キレツ発生が終結しがたく残留膨張を大にすることを示した。

以上、こわれやすさの検討として衝撃破断面の特長とくり返し膨張収縮による破壊の特長とを見たが、いずれにしても形状の大きな厚みのある銅をまじえたブラシほど、黒鉛と銅とが離れやすい傾向があり、また破面も黒鉛の脱落が容易となるようである。

(6) 総括

以上のべたように、各種ブラシについて一般物理特性と顕微鏡組織とを一応調査したわけであるが、ここでは種別ごとに相違した一般物理特性が、顕微鏡組織によって示されたブラシ材料の構成状態、なかんずく、銅組織の特長とどのように対応していたかを論ずることとする。

銅組織の形状の相違は、その大きさとながりに認められる。まずつながりが良好であればあるほど、固有抵抗値は小になり、さらに抗折力、弾性率および硬度は大になるもので、この関係は銅 % の増加とともにその度を増大することは当然の傾向である。前述の各種ブラシのうち A 社製、B 社製および S 社は N 社製ブラシよりも銅のつながりがよく、同時に固有抵抗値が小さいことが比較されたが、これらはまた、抗折力および弾性率においても N 社製ブラシとくらべてより大きい数値を示していることが納得される。また、つながりの良好な S 社は銅 % の増大とともに硬度を増加するが、これに反して N 社製ブラシにおいてはこのような傾向が認められないことが区別される。

つぎに、銅粉の形状による影響を述べる。使用した銅粉の大小に応じてブラシの銅組織も、また、大小の相違が認められるものであるが、とくに黒鉛質に銅メッキした原料を使用したような場合にはその銅組織は緻密である。一般に、このような銅粉の形状の影響は加圧成形の結果として銅組織の配列の相違をブラシの圧面方向と側面方向とに与える。この例は前掲の顕微鏡組織に比較して示したとおりであり、銅粉が平板状として大であるほど、その平板面を圧面に平行に配列しやすい。したがって、圧面垂直方向には銅組織のつながりが悪くなり、同時にそのような方向の固有抵抗値が大となる。N 社製ブラシは S 社製あるいはその他とくらべて圧面および側面方向の固有抵抗の差が小さかったが、これは使用した銅粉の形状が S 社製などにくらべて方向性を持たさない肉厚の微粒のためであったことがわかる。

さらに銅粉の形状は抗折力、弾性率さらに硬度 (ロックウェル) にも影響を与える。B 社製ブラシの例に見るように、B₁ ブラシに使用したスキャット銅粉は薄い平板状のものであるため、B₂ ブラシに使用した粗粒の電解銅粉のつながりよりも緊密であり、この結果として B₁ ブラシにより大きな抗折力を与えたものと思う。また、弾性率において A 社製ブラシがとくに大であったのは、銅組織のつながりの良好であることに加えて、そのつながり自体が比較的に変形しがたい太さをもっていることによるものと思う。

ブラシに示される銅粉の微小硬度は、銅自体の純度が本来大差がないので、銅 % によってもさらに種別によっても差異がないものと思われたが、測定の結果では種別により差異があることが認められた。しかし種別による微小硬度が銅組織のもっとも薄い S 社製に小で、粗粒のものに大であること、さらに一般に圧面が小で側面に大であることより測定部の銅層の厚さに依存して示されたものようであり、その意味で粗粒ほど硬いといつてよさそうである。

以上、一般物理特性は銅組織に対応して説明されるとわかりやすいことをのべたが、金属黒鉛質ブラシとしての価値判断を導くことは困難である。したがって、一応

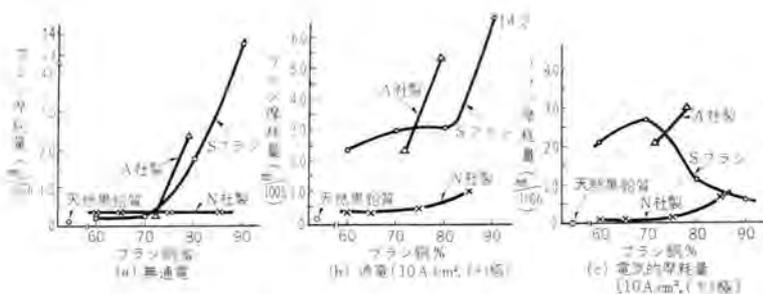


図 4.11 各種ブラシの摩耗量と銅 %

Fig. 4.11 The wear rates vrs. copper % of various brushes.

(a) The case of no current. (b) The case of current density of 10 A/cm² [polarity (+)] (c) The increase of wear rate by passing current, [10 A/cm², polarity (+)]

こわれ方あるいはこわれやすさという点の吟味をしたわけであるが、衝撃破断においてもさらに熱膨張収縮のくり返しにおいても、銅組織は粗であるところれやすいが繊細であるほどこわれにくい傾向があること、さらに黒鉛組織は銅組織が粗であるブラシにとくにはがれやすいことも認められた。

4.2 種々の金属黒鉛質ブラシの摩耗傷損量の比較

種々のブラシ材料の摩耗傷損量の比較を、一応ブラシを (+)極とした場合において行なう方針としたことはすでに述べたとおりである。すなわち、その場合にブラシはより顕著にその材質の相違を現わすからである。以下前述の各種ブラシを青銅リングと組合せて (+)極とした場合の摩耗傷損量について述べる。実験条件はすでに表 3.1 に示したとおりである。

(1) ブラシの銅 % と摩耗傷損量との関係

まずブラシの銅 % の影響を検討した。

a. 無通電しゅう動の場合

図 4.11 (a)は無通電時の摩耗量を銅 % との関係として示したものである。図にはN社製、A社製およびSブラシの結果を天然黒鉛質ブラシと比較して示しておいた。一般に無通電時における金属黒鉛質ブラシは銅 % が約 70 以下の場合には摩耗量が少なく、ブラシの種類による区別も認めがたく、しかも天然黒鉛質ブラシとはほぼ同等であるが、銅 % がそれ以上になると種別による摩耗量の相違が見出しやすくなるようである。すなわち、SブラシとA社製ブラシは類似の傾向をとり、銅 % 80 あるいはそれ以上の場合には摩耗量が急増しているが、N社製ブラシは銅 % が大になってもその増大は認められない。

b. 通電しゅう動の場合

(i) 10 A/cm² における通電しゅう動時の比較

図 4.11 (b) に電流密度 10 A/cm² において通電しゅう動を行なった場合の種々ブラシの摩耗量を銅 % との関係として示して置いた。通電時の摩耗量は無通電時にくらべるとより大きいことがわかる。しかし天然黒鉛質ブラシとN社製ブラシの銅 % 70 以下のものとは、通電による摩耗量の増加がほとんど示されないことが注視された。

(ii) 電氣的摩耗量

通電の影響だけを摩耗量に対して考えるために、通電の際の摩耗量から無通電の際の摩耗量を差引いたものをもって表わすことにきめ、これを電氣的摩耗量と呼ぶことにした。無通電時の機械的摩耗と区別したいからである。いま、このような電氣的摩耗量と銅 % との関係をさきの 10 A/cm² の電流密度の際の通電摩耗の結果から求めると、図 4.11 (c) のようになる。すなわち電氣的摩耗量として S ブラシは、銅 % 70 において極大値を示し、それより銅 % が大となっても、また小となっても減少する傾向がある。しかし N 社製および A 社製ブラシにはいずれもそのような特別な銅 % は認められない。いずれにしても電氣的摩耗量は A 社製ブラシと 70 % 銅以下の組成の S ブラシに多く、N 社製ブラシは天然黒鉛質ブラシとともに僅少であることがわかる。

(iii) 電流密度の影響

各種ブラシについて 5 A/cm² ないし 20 A/cm² の範囲で電流密度の影響を求めると図 4.12 に示したようになる。いずれのブラシもその組成が銅 % 約 70 のものについて比較したが、そのうち A 社製ブラシがとくに電流密度の増加とともに摩耗量を大にすることが認められる。

(2) ブラシしゅう動面のアレとリングの摩耗傷損

しゅう動摩耗試験に用いた前述の種々ブラシについて第 1 報⁽²⁾と同様の方法でしゅう動面のアレかたを測定した。通電の場合には無通電の場合とくらべてアレはやや大になる傾向があるが、電流密度が相違してもとくに差は見られなかった。いずれにしても、アレはリングとの相互作用によって起こされるものであり、ブラシが主体となって示すような材料に独自な結果であるとも思われないので掲載を省略することにした。通電しゅう動後のブラシしゅう動面を顕微鏡的に調査すると、S ブラシと A 社製ブラシはともに一樣な細かい条痕が示され、銅粉の現われ方が比較的によく、とくに 80 % 以上の S ブラシにおいては顕著であったが、N 社製ブラシにおいては条痕がはなはだしく、また一樣でない場合が多く、銅粉の現われ方はほかにくらべて少ないようであった。

つぎにブラシとしゅう動する相手リングの摩耗を簡単に述べると、ブラシの種類に応じその相違があるが、同一種類のブラシによるときは、その銅 % による相違の影響を

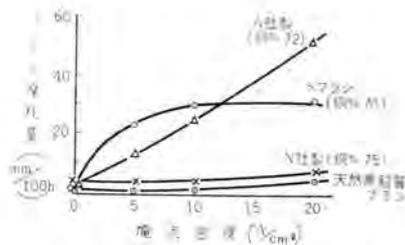


図 4.12 各種ブラシの摩耗量と電流密度

Fig. 4.12 The wear rates of various brushes in the case of different current densities.

うけないようである。A社製およびSラシが微量のリング摩耗しか与えなかったのに対し、N社製ラシは比較的に摩耗を大にしたこと、また、一般に通電の場合よりも無通電の場合にリング摩耗量が大きいようであることが認められた。なおA社製ラシを使用した際には、他のラシと違ってリング面にとくに黒鉛の付着の多かったことが注視された。

(3) 総括および考察

以上の各種のラシの摩耗傷損量に関する比較結果を整理し考察してみる。

無通電しゅう動の場合の金属黒鉛質ラシの摩耗特長から述べる。まず金属黒鉛質ラシは銅をどの程度に含有すると天然黒鉛質ラシと異なった摩耗特長を持つようになるかをみることにする。実験の結果では銅70%以下の金属黒鉛質ラシは本質的に相違はあるが、単に摩耗量より比較するならば、それらの種別に関せず天然黒鉛質ラシと大差のないものであることがわかる。すなわち、70%以下の銅量ならば混在しても天然黒鉛質ラシの摩耗の特長を変えるような影響を持ちにくいわけである。しかしそれ以上の銅の量になると、初めて相違が示され、銅が関係した結果として摩耗量がきわめて大になる場合が認められた。80%銅以上の組成を持つA社製およびSラシがその例である。しかしながらその程度の銅の量があれば必ず相違を顕著にするとはいいえない。いぜん天然黒鉛質ラシなみの摩耗量しか示さないものがあり、その例はN社製ラシに見ることができた。すなわちN社製ラシにおいては、銅が増加しても銅の影響が黒鉛の効果によって打ち消されていたとしか考えられない。したがって摩耗量は銅の%のみによっては左右されず、むしろ黒鉛とどのような状態で混在しているか、その仕方によるということが推定される。

つぎに通電しゅう動すると、前述とはかなり相違した関係が認められる。天然黒鉛質類似の銅%の少ないラシも通電のために異なった摩耗特性、すなわち銅%が少なくとも銅が関係して摩耗量のはなはだしい増大を示すようになる。A社製およびSラシの銅70%以下の組成のものはきわめて摩耗量の増大を見せたのであるが、これからして、また、直ちに、通電すると金属黒鉛質ラシはすべて天然黒鉛質ラシとの相違として銅の効果を発揮すると考えることはできない。N社製ラシはいぜん天然黒鉛質ラシの摩耗特性に近似し一応摩耗がふえたとみられる85%銅の組成においても、なおその摩耗量は比較的に小であったからである。したがって、金属黒鉛質ラシが通電時に摩耗量を増加することの説明として、単に無通電時には黒鉛によっておおいかくされていたしゅう動面の銅が、通電時には顔を出して摩耗に影響を与えるからであるだけでなくはかたづけにくいようである。この検討は一応、後まわしにするが、いずれにしてもN社製ラシはA社製およびSラシとくらべて材質的な相違を根本的に持っているものであることが推定さ

れる。

さらに通電時の変化としてSラシの摩耗特性に特殊性が見られた。すなわち、Sラシは通電時には銅80%以上の組成のものでは銅が多いものほど、いわゆる電氣的摩耗量の増加の割合が少なくなる結果を示していたので、これに対して考察してみる。銅80%以上のSラシは、もともと無通電時にも銅が摩耗に影響して、銅%の多いラシほど、摩耗量が大きであったことを知っている。要するに銅がリングと接触することが多い特長のラシであり、したがって、とくに通電に際して新たに銅が接触する必要がないくらいであると思われる。そのため銅%の多いラシほど、通電による銅の接触部の増加割合が少なく、摩耗量を増大する割合も、また小になったものと思う。また、通電接触部が多くなると、通電に伴う電氣的な傷損を分散させ、その影響を薄めることも考えられるので、これもこの関係を導くのに一役買ったものと思う。

なおA社製ラシは通電すると、70%および80%の銅組成のいずれも無通電時よりもはるかに増大した摩耗量を示し、その際80%銅のものにより大であることが認められた。これは、いま述べたSラシの場合と比較して異なった関係である。すなわち、すでに無通電時に銅の接触が多い80%組成のラシが、ほとんど摩耗が認められなかった70%組成のものよりも、通電により、より多くの割合で銅の接触部を増加すると考えることになるので、これは無理のようである。これに対しては、銅の接触に伴うこわれやすさの検討、あるいはまた、一般物理特性との対比など、さらに吟味が必要であると思う。

要するに金属黒鉛質ラシの無通電および通電時の摩耗傷損は、リングと直接接触する銅部分の存在に負うものようであり、しゅう動面において黒鉛あるいは銅のいずれがより多く効果を発揮するかのラシ材質の特長によって左右され、銅の量は第二義的のものようである。したがって、ラシのしゅう動面に示される黒鉛および銅の組織との関連に基づいて検討が進められなければならないことがわかる。

なお通電時の電流密度の影響について述べると、まず天然黒鉛質ラシでは、20 A/cm²までの範囲内の相違ではほとんど影響はないといってもよい程度であった。金属黒鉛質ラシにおいては、電流密度が大となると摩耗量も大となったので、前述と同様に、銅の接触部の増加によることもあわせ考えてさしつかえないようであった。

さらに上述のラシが相手のリングに与えた摩耗量としては、いずれにしても僅少であったが、N社製ラシと組合せられた際、他よりも大であることが認められた。ラシはすべて銅%あるいは種別のいかんを問わず、ほとんど一方的にラシだけ摩耗傷損しているのも、その中でも比較的こわれにくいラシがリングの摩耗をやや大にしたものと思われた。

5. ブラシの材料的特長と摩耗傷損との関係

各種ブラシの摩耗の試験結果を、さきに検討した顕微鏡組織および一般物理特性さらにこわれやすさの材質的特長と関連させ検討考察してみる。

5.1 顕微鏡組織と摩耗傷損

無通電および通電のいずれのしゅう動時においても、摩耗傷損はブラシしゅう動面の銅が直接リング面と接触することに起因するとの見解をすでに述べてきた。したがって、ブラシのしゅう動面に見られる銅と黒鉛の混合組織の種々の特長が、その摩耗傷損と対応されて検討の中心となることは当然である。

まず無通電時に黒鉛の潤滑効果が顕著で、天然黒鉛質ブラシと類似の僅少の摩耗量を示した銅70%以下の種類金属黒鉛質ブラシについて、その顕微鏡組織を黒鉛の潤滑性能の比較の見地から一覽してみる。すなわちN社製ブラシは、銅組織が微細でしかも均一の形状であること、およびこれらの銅組織は十分に黒鉛組織によりとりまかれていることよりして、もっとも黒鉛の性能を発揮しやすい組織であると判断され、これに反してA社製ブラシは全般的に銅組織が粗大であるため、性能的には不利のように見受けられた。所々に粗大粒を持つが大部分は繊細な銅組織からなるSブラシは、前二者の中間に位すると見てよいようであった。いずれにしてもこれらのブラシは、無通電時にはきわめて摩耗量が小で相互にはほとんど差がないにもかかわらず、その組織にはかなりの相違を認めることができる。

銅%80以上の組成において銅%増加の特長を比較すると、A社製ブラシは銅組織につながりが多くなるため、その形状がやや大になっていること、またSブラシは70%以下の組成の場合に僅少個所に見られた銅の粗大晶がその数を増加していること、これに反してN社製ブラシは銅%85の組成においても、なお低%の際に見られた均一な微細粒の特長を持していることがわかる。黒鉛の%が少なくなっているため、当然、潤滑性能は劣るわけであるが、無通電時にはN社製ブラシが天然黒鉛質なみの摩耗を示し、他のブラシが銅の接触によるいちじるしい摩耗の増大を見たのは、上記の比較からも想像できることである。すなわち摩耗増大の要因として、銅組織の形状が大であることがあげられると思う。

つぎに通電しゅう動した場合の関係にふれよう。無通電時にはきわめて摩耗の少なかった前述の銅70%以下のSおよびA社製ブラシが、通電時には銅による効果が顕著となり摩耗量を増大したことは、前述の顕微鏡組織の説明において黒鉛の潤滑効果に不利と考えられた銅組織の粗大に帰因するとしか思われぬ。すなわち、通電に際しては、まずこのような粗大組織の部分に通電部を生ずる機会が多い。いったん通電接触部となると、しゅう動に際してはリング摩耗の項において指摘したように、リングにはほとんど影響を与えず接触部自体が破壊されて摩耗するわけであるが、その際接触部となる銅が粗

大であるほど摩耗に大きな影響を与えることは当然であろう。微粒のみよりなるN社製ブラシにおいては、通電接触部も微小であり、直ちに破壊されて他と交代するために摩耗量の増大をもたらさなかったものと考えられ、銅85%の組成においてもなお通電時の摩耗量が他にくらべて微量であったのは、この関係を示したものと解される。

5.2 こわれやすさと摩耗傷損

金属黒鉛質ブラシの摩耗傷損は、通電および無通電のいずれの場合においてもリングに対する銅の接触部に起こり、大きい銅組織の接触部ほど大きいブラシ摩耗を与えるとの見解を述べてきたが、ブラシ自体においても同様に、銅組織が大きいほどこわれやすい性質を示していた。すなわち、くり返し膨張収縮試験に示したように、粗大な銅組織ほどその周囲の黒鉛組織との間にキレツを生じやすく、粗大粒のみよりなるブラシにおいてはとくに黒鉛の脱落も認めうるほどであった。これに反して銅の微粒あるいは繊細組織の場合には、黒鉛組織との境界にはキレツを生じがたく、こわれにくいことが認められた。さきに述べたA社製ブラシが通電時にとくに顕著に摩耗したことも、それが粗大粒の銅組織であることと関連して説明しうるものと思う。

5.3 固有抵抗値およびその他物理特性との関連

金属黒鉛質ブラシは、天然黒鉛質ブラシと相違してその低固有抵抗値および高熱伝導性に特色がある。そのためには銅組織のつながりをもっとも必要とする。銅のつながりとそれが示す一般物理特性との関係についてはすでに詳述したので、ここでは省略することにした。

6. む す び

金属黒鉛質ブラシについて、その材質の種類による特長と、スリップリングと組合せてしゅう動した場合の摩耗特長とを調査してみた。とくにしゅう動試験に際しては、従来の基礎実験結果に基づき、ブラシを極とする通電試験を採用し、すなわちブラシがその摩耗量に材質による特長を示しやすい条件において実施した。すべて巨視的な観点よりの考察に終始したが、一応、金属黒鉛質ブラシの検討されるべき中心点は、そのしゅう動面に示される銅組織の形状、あるいは大きさにあることを指摘した。適当な銅組織のつながりと相まって考慮すべき要点であると思う。

終わりに臨み、終始ご懇篤なご指導を賜った大阪大学松川達雄教授に感謝の意を表わし、あわせて終始熱心に協力された当所米沢技師および下田技手にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) たとえば V. P. Hessler: E. E., 54, pp. 1050~1054 (1935); E. E., 56, pp. 94~100 (1936). R. M. Baker & G. E. Hewitt: E. J., 33, pp. 287~289 (1936). E. E. 34, pp. 123~128 (1937).
- (2) 森田・米沢: 『三菱電機』, 32, No. 6 pp. 49~69(昭33).
- (3) S. Yamamori & Y. Morita: Mitsubishi Denki Lab. Reports 1, No. 1, Jan., pp. 91~109 (1960).
- (4) 本野: 日本学振, 電機用刷子の研究 (II) p. 3 (昭19).

最近における当社の社外講演一覧

講演年月日	主催および開催場所	題 名	講 演 者	所属場所
36-2-1	大阪府包装展	重量物包装	堀 直 昌	本 社
36-2-4	電子機械工業会・電子技術特別研究委員会	地上大形 Radome	有田不二男	研究所
36-2-7	尼崎ロータリクラブ	最近の電子工学と問題点	馬 場 文 夫	無線機
36-2-8	東京都中小企業会	飛しょう体制御	小田達太郎	無線機
36-2-10	核融合懇談会	高温プラズマにおける電氣的測定	河 合 正	研究所
36-2-9,10	東北電力	屋外照明—屋外照明の各項目、道路、商店街、アーケード、橋梁、高架トンネル、運動場などの照明、街路灯工事—	小堀富次雄	本 社
36-2-9,11	規格協会	QC 部課長コースで講義	前田幸夫	本 社
36-2-11	電子加工懇話会	単発放電痕生成機構	斎藤長男	研究所
36-2-9,14,16	関西経営管理協会	作業標準化と工程管理講座	奈川敏雄	本 社
36-2-13	全日本産業安全連合会労働省	工場照明 (第5回産業安全幹部職員養成講習会)	小堀富次雄	本 社
36-2-13~17	福岡市町村会館	品質管理と標準化セミナー	久田義八	福 岡
36-2-14	大阪市経済局商工課	標準時間設定について	奈川敏雄	本 社
36-2-13,14	日刊工業新聞名古屋支社	電気式空気清浄装置の問題点	斎藤 寛	神 戸
36-2-16	中部自動制御研究会	エレベータの自動制御	宮城 晃	名古屋
36-2-17	放射線計器工業会	OP ゴム磁石について	網島芳和	大 船
36-2-18	真空協会	サーボコントロールによる酸化物陰極の排気	小坂橋正康	研究所
36-2-18	通信学会	Vapor Growth Ge について	大久保利美	研究所
36-2-18	真空協会	超高真空用金ガセットについて	甲斐潤二郎	研究所
36-2-20	日刊工業新聞社	治具設計上の諸問題について	粕谷一郎	伊 丹
36-2-21	大阪生産性本部	包装合理化の方向	堀 直 昌	本 社
36-2-21	指示計器工業会	OP ゴム磁石 について	網島芳和	大 船

最近登録された当社の特許および実用新案

区 別	名 称	特許または登録日	特許または登録番号	発 明・考 案 者	関係場所
特 許	積算電力計の負荷特性補償装置	36-1-30	270963	黒川憲造	福 山
"	軸方向空隔誘導電動機の盤状回転	36-1-30	271077	拓植 恵	中 津 川
"	内燃機関点火装置	36-1-30	271089	三木隆雄	姫 路
"	内燃機関点火装置	36-1-30	271090	三木隆雄	姫 路
"	定電圧調整装置	36-1-30	271121	片井正男	姫 路
"	超音波探傷子	36-2-6	271546	馬場文夫	無 線 機
"	電気弁点弧装置	36-2-14	271647	細野 勇	伊 丹
"	電気弁点弧装置	36-2-14	271651	細野 勇	伊 丹
"	シヤ断器の空気吹付消弧装置	36-2-14	271665	岩垂邦昭・渡辺睦夫	神 戸
"	高速度シヤ断器	36-2-14	271666	岩垂邦昭・渡辺睦夫	神 戸
"	開閉器の消弧装置	36-2-14	271667	小橋和雄・亀山三平	伊 丹
"	冷蔵庫温度調節器	36-2-14	271648	木下忠男	静 岡
"	冷蔵庫温度調節器	36-2-14	271649	木下忠男	静 岡
"	ジェットエンジン点火装置	36-2-28	272195	三木隆雄	姫 路
"	距離継電器の脱調鎖錠装置	36-3-13	272293	尾畑喜行	神 戸
"	継電装置	36-3-13	272302	北浦孝一	神 戸
"	移動ファン の駆動装置	36-3-13	272317	瀬原田三郎・三矢周夫	名 古 屋
"	非可逆性偏波面回転装置	36-3-13	272635	喜連川 隆・立川清兵衛	無 線 機
"	広帯域アンテナ	36-3-13	272644	喜連川 隆	無 線 機
"	マイクロ波用無指向性円偏波アンテナ	36-3-13	272645	喜連川 隆	無 線 機
"	円偏波放射器	36-3-22	272667	渡辺 優・若田和明	無 線 機
新 案	印字装置のカーボンテラ巻取方向自動変換装置	36-2-6	529271	高部俊夫・中田省三	研 究 所
"	接続端子	36-2-6	529272	高松茂利	福 岡
"	通風機のベーン装置	36-2-6	529273	橋本幸雄	長 崎
"	機器の据付脚	36-2-16	529612	河合照男・木ノ内達夫	静 岡

本社 営業所 研究所 製作所 工場 所在地

本社	東京都千代田区丸の内2丁目3番地(東京ビル内) (電) 和田倉 (201) 大代表 1611
本社商品事業部	東京都千代田区丸の内2丁目20番地(三菱商事ビル内) (電) 東京 (211) 代表 2511・2531
本社施設部	東京都千代田区丸の内1丁目8番地(仲27号館) (電) 東京 (211) 代表 1261・1271・1281
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2丁目20番地 (三菱商事ビル3階) (電) 東京(211) 代表 2511
大阪営業所	大阪市北区堂島北町8番地1(電)大阪(312)代表1231
名古屋営業所	名古屋市中区広小路通り2の4(電)本局(23)代表6231
福岡営業所	福岡市天神町58番地(天神ビル内) (電) 福岡 (75) 代表 6231
札幌営業所	札幌市大通り西1丁目13番地 (電) 札幌 (3) 代表 9151
仙台営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル内) (電) 仙台 (2) 代表 6101
富山営業所	富山市安住町23番地2(電)富山(2)0151
広島営業所	広島市八丁堀63番地(昭和ビル内)(電)中(2)2211
高松営業所	高松市寿町1丁目4番地(第一生命ビル内) (電) 高松 (2) 代表 5021(ビル) 4416(直通)
小倉出張所	小倉市京町10丁目281番地(電)小倉(5)8234
静岡出張所	静岡市七間町9番地10(電)静岡(2)2595(3)2962
金沢駐在員	金沢市田丸町55番地1(電)金沢(3)6213
岡山駐在員	岡山市内山下30番地(佐々木ビル)(電)岡山(3)2948
研究所	兵庫県尼崎市南清水字中野80番地(電)大阪(48)8021
神戸研究所	神奈川県鎌倉市大船782番地(電)大船代表3131
神戸製作所	神戸市兵庫区和田崎町3丁目(電)兵庫(6)代表5041
伊丹製作所	兵庫県尼崎市南清水字中野80番地(電)大阪(48)8021
長崎製作所	長崎市平戸小屋町122番地(電)長崎(3)代表3101
無線機製作所	兵庫県尼崎市南清水字中野80番地(電)大阪(48)8021
名古屋製作所	名古屋市中区矢田町18丁目1番地(電)名古屋(73)1531
静岡製作所	静岡市小島110番地(電)静岡(3)0141~0145
中津川製作所	岐阜県中津川市駒場(電)中津川2121~8
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地(電)和歌山(3)代表1275
福岡製作所	福岡市今宿青木690番地(電)福岡(82)代表1568
福山製作所	福山市沖野上町6丁目709番地(電)福山代表2800
姫路製作所	姫路市千代田町840番地(電)姫路代表6900
大船製作所	神奈川県鎌倉市大船800番地(電)大船代表2121
世田谷製作所	東京都世田谷区池尻町437(電)東京(414)代表8111
郡山製作所	福島県郡山市字境橋町1番地(電)郡山1220~1223
北伊丹製作所	伊丹市大鹿字主ヶ池1番地(電)伊丹大代表5131
無線機製作所	東京都世田谷区池尻町305(電)東京(414)代表8111
東京工場	東京都世田谷区池尻町305(電)東京(414)代表8111
札幌修理工場	札幌市北二条東12丁目98番地(電)札幌(2)3976

次号予定

三菱電機 Vol. 35 No. 6

航空研究所納め選音速風洞用電機設備特筆

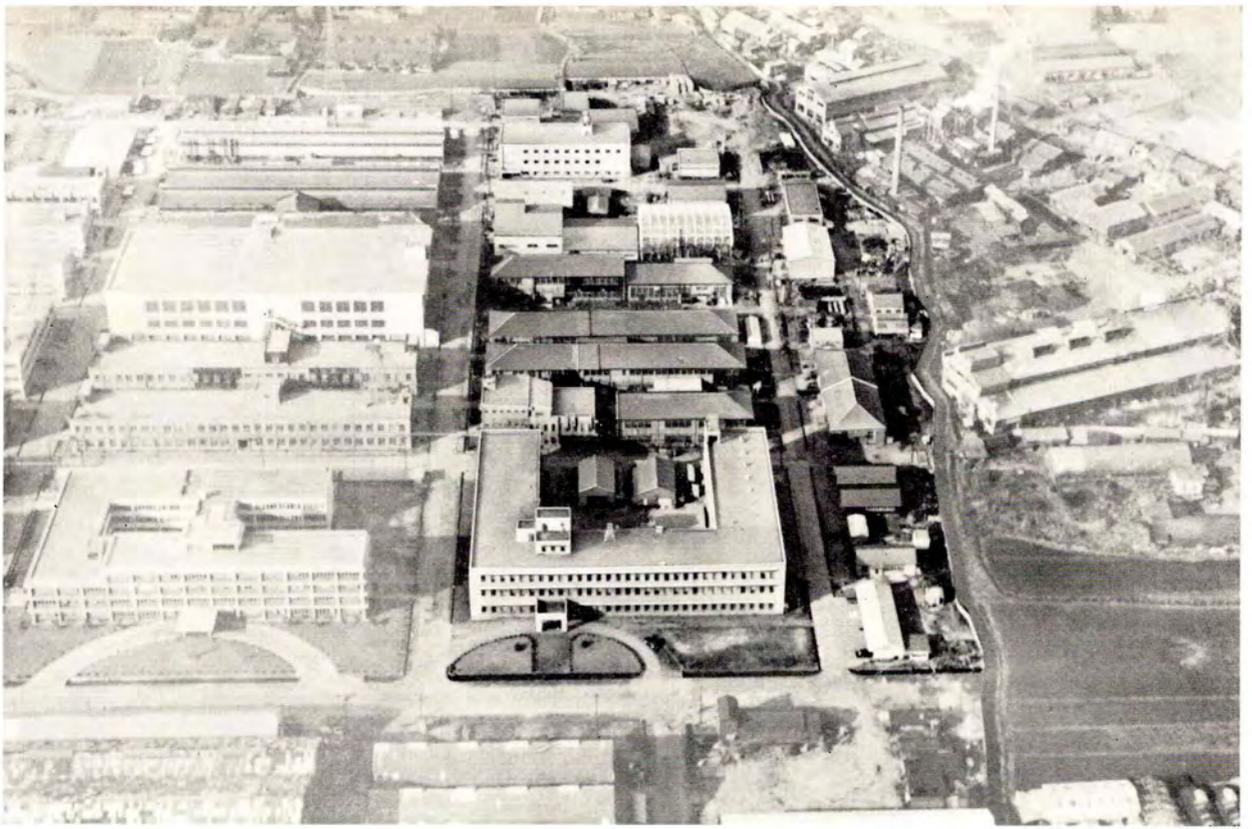
- 選音速風洞の概要
 - 選音速風洞主送風機用電動機設備
 - 主送風機用 18,000 kW 誘導電動機および付帯設備
 - 主送風機用 4,500 kW 直流電動機
 - 電源用イグナイトロンアーク変換装置
 - 電動機回転速度精密検出装置
 - 風洞電動設備用制御装置
-
- 10,000 kVA 自動タービン発電機
 - 275 kV 260 MVA 主変圧機および負荷時タワリ切換直列変圧器
 - 抵抗式高圧負荷時タワリ切換装置
 - 東京電力京浜変電所納め配電盤
 - 電子線加速用パンデ・グラフ形加速器(VE-3形)
 - ブロック図から直接コールド化するプログラム方式
 - サイバックによるダイジェスタ制御
 - スパーミラー(ジェット機用ライクタフライズ盤)(2)
 - MELCOM 精密低速度形アナログコンピュータ(3)
 - 技術解説: 将来の電力源(1)
火力発電シリーズ続編(2)
発電用ガスタービン

雑誌「三菱電機」編集委員会

委員長	吉村 誠 一郎	常任委員	宗 村 平
常任委員	浅井 徳 次郎	委員	山 田 栄 一
委員	荒井 深 二	委員	片 岡 高 俊
委員	安藤 安 二	委員	榎 本 崎 善
委員	小川 清 一	委員	榎 本 崎 野
委員	小堀 富 次郎	委員	関 野 祐 雄
委員	高井 得 一郎	委員	前 田 祐 彦
委員	中野 光 雄	委員	米 野 俊 八
委員	馬場 文 夫	幹 事	井 上 八 郎
委員	船 橋 正 信		(以上 50 音順)

昭和36年6月3日印刷 昭和36年6月5日発行
「禁無断転載」 定価 1部 金100円(送料別)

編集兼発行人
東京都千代田区丸の内2丁目3番地 吉村 誠 一郎
印刷所
東京都新宿区市谷加賀町1丁目 大日本印刷株式会社
印刷者
東京都新宿区市谷加賀町1丁目 高 橋 武 夫
発行所
三菱電機株式会社内「三菱電機」編集部
電話 和田倉 (201) 1611
発売元
東京都千代田区神田錦町3の1 株式会社オーム社書店
電話 (291) 0915・0916 振替東京 20018

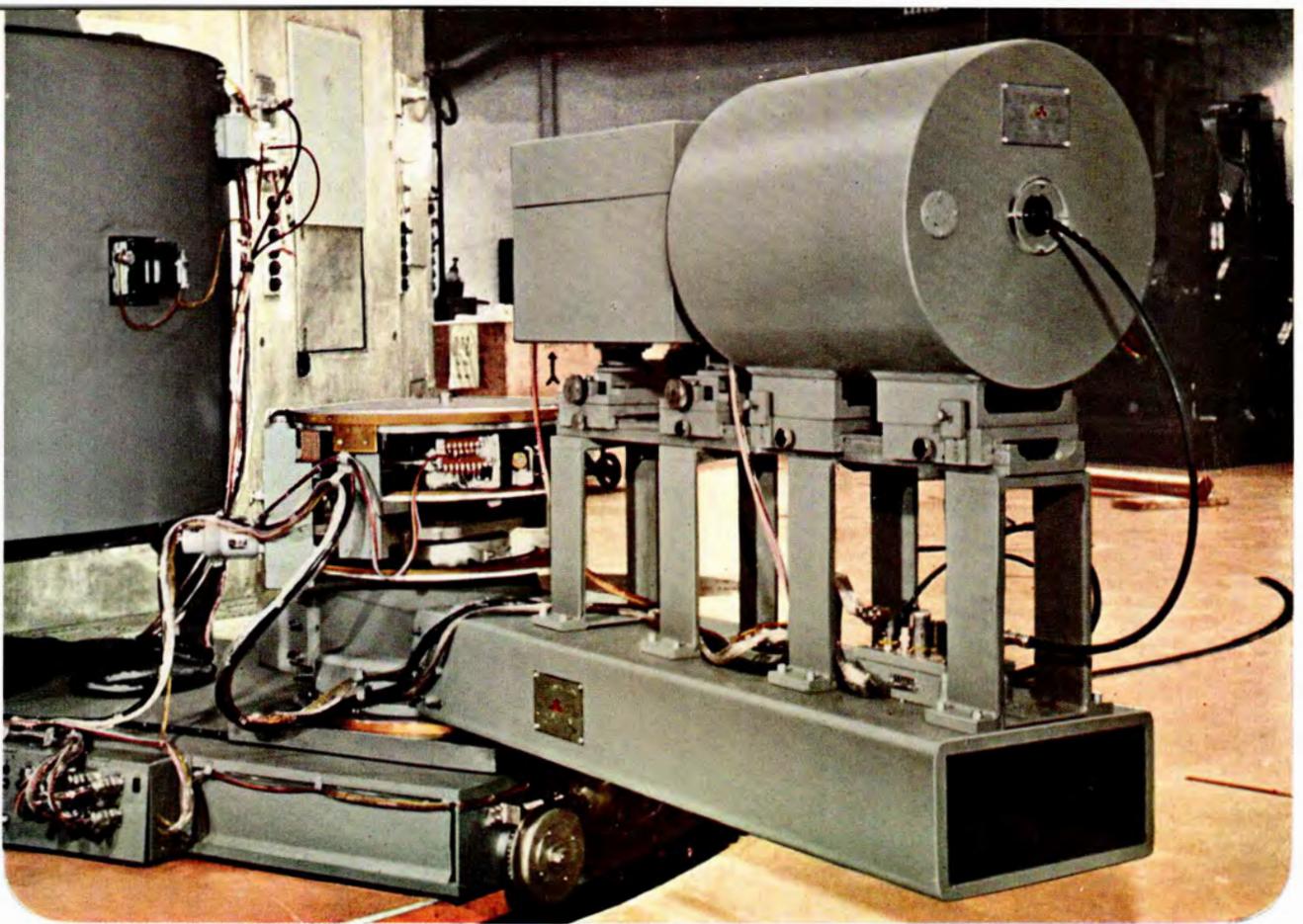


研究所全景

研究所は、同一構内に強電機器の伊丹製作所、電子機器の無線機製作所、本社技術管理部、特許部分室などを擁し、当社の一大技術センターとなっております。この地区の北方約5km、半導体の北伊丹製作所に隣接して今春研究所北伊丹分室が新設され、研究所拡充計画の力強い第一歩を踏み出しました。

北伊丹分室





日本原子力研究所のJRR-2 原子炉に据付けられた

* 中性子スペクトロメータ

一粉末資料の中性子回折実験用として製作され、高い分解能をもち低温装置と大形電磁石を使用できる。

* 中性子スペクトロメータ制御盤

おもな仕様

モノクロメータ 角度可変	-10° ~ +90°
中性子ビーム断面積	5 × 5 cm
ビーム・ナロー 2カ所	5, 4, 3, 2, 1 cm × cm
ファイン・コレメータ 分解角度 (3カ所)	5, 15', 30' 交換可能
ゴニオメータ 自動送り角度	3', 6', 12', 30' 可変
ゴニオメータ 角度精度	±1'

