

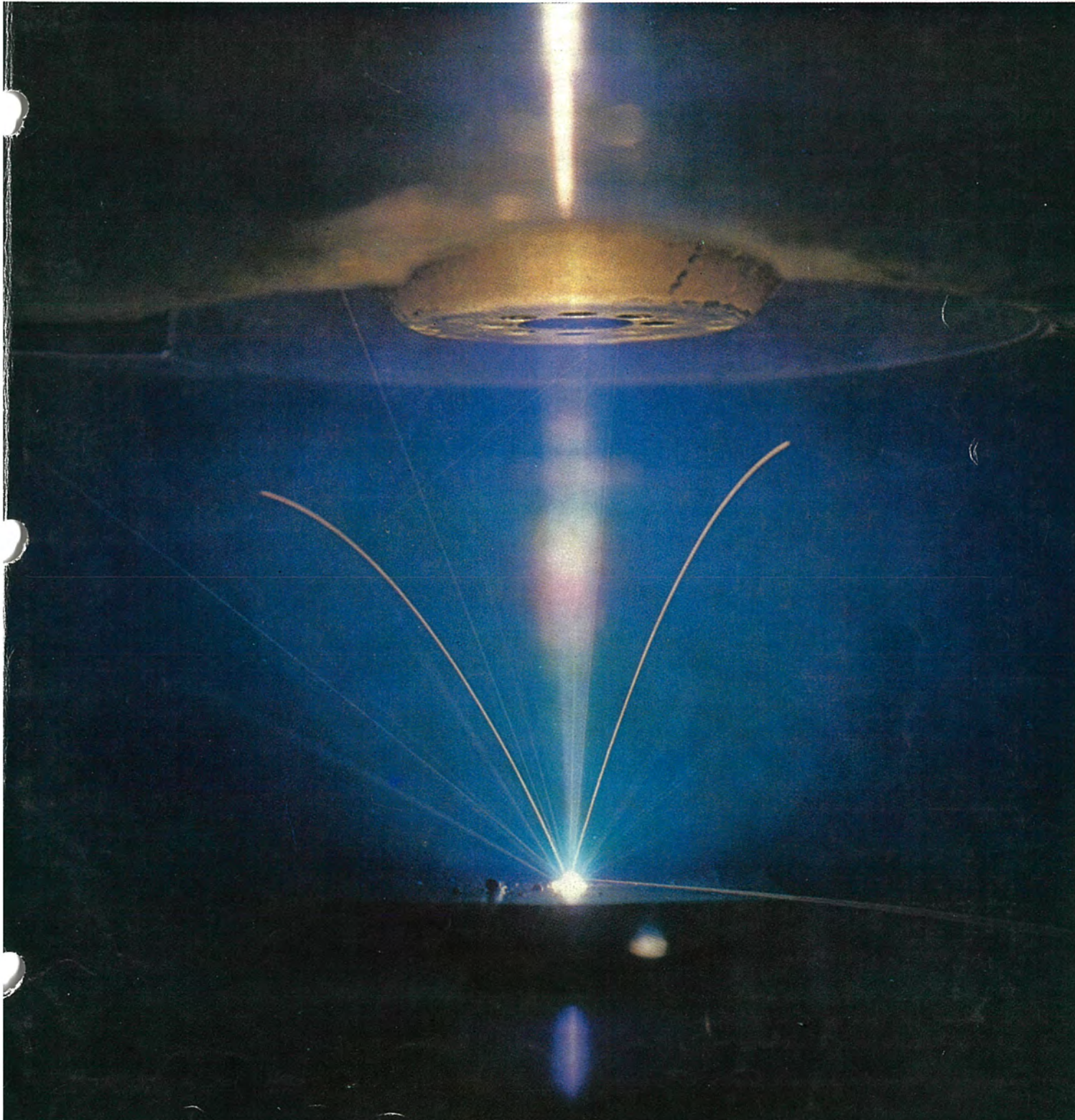
MITSUBISHI DENKI GIHO 三菱電機技報

Vol.42 December 1968

研究特集

12

プラズマ電子ビーム溶接





研究特集

目次

《特集論文》

ZnSe 結晶中の希土類イオンの分光学的研究	伊吹順章・小宮啓義・中田正矩・増井博光	1535
ポリイミドの物理的性質	柴山恭一・田中啓郎	1544
Ni-Zn-Co 系 VHF フェライト	荒居 徹・井戸猛夫・山田幸慶	1549
リテニングリング用 18 Mn-5 Cr 鋼の低サイクル疲れ特性	松木健次・阪部喜代三・塚田尚史・村上 晃・和田文夫	1558
サイリスタ高圧変換器の研究	大野栄一・光岡 宏・木村好男	1567
超高圧用マイクロ波変流器 (μ 波 CT)	斎藤成文・大野 豊・喜連川 隆・中原昭次郎・立川清兵衛	1573
リニアモータの基本特性	大野栄一・岸本 健	1581
プラズマ電子ビーム溶接	後藤正之・上山善司・安永政司	1589
半導体レーザ装置	中原昭次郎・長能宗彦	1596
絶縁体薄膜の膜厚と屈折率の非破壊測定法	中山光雄	1600
ヒステリシス ロータを用いた小形ブラシレス直流電動機	藤井 学・吉川英之	1607
腐食におよぼす電流の影響	山本利雄・松岡宏昌・川岡靖子	1612
レーザ光散乱による微粒子の粒子測定	田畑則一・森 貢	1618

《普通論文》

30 cm 半径セクタ形二重集束ベータ線スペクトロメータ	秋葉稔光・小浜太郎・上田孝寿・磯貝文彦・長田大三郎・島 幸弘・岸森真通	1627
レーン探傷器 FD-420 形	河野勝美・佐藤春治	1636
YAC 用レーダスピードメータ	東 昭・遊佐 滉・阿部寿夫・中村泰而	1642

《技術講座》

アナログ計算機のプログラミング(1) ——常微分方程式の解法——	井塚秀弥・佐藤 毅・米谷光雄	1647
----------------------------------	----------------	------

《ニュース・フラッシュ》

井戸径 10 インチ用 75kW 2P 水中モートル完成・立形誘導周波数変換機の開発・わが国最初のミシン針定位停止装置付きクラッチモートル発売	1654
---	------

《総目次》

1656

《表紙》

プラズマ電子ビーム溶接

写真はプラズマ電子ビームによる鋼板の溶接状況で、中央青白く光っている部分は溶接室のアルゴンガスが電離してできたプラズマである。

従来、電子ビーム溶接はすぐれた特長をもちながら、 5×10^{-5} Torr という高真空が必要で、そのために工業的な利用が困難とされていた。しかし、プラズマ電子ビーム溶接は、電子ビーム溶接の特長を失わず、しかも 5×10^{-2} Torr 程度の低真空での使用が可能であるため、工業的に利用できる新しい電子ビーム溶接法である。

中央上部にノズル状に見えるのは、電子レンズで、きりの歯状に集束した電子ビームが鋼板に照射されている様子がよくわかる。溶接部分からは火花が飛び散っているが、このとき照射電子が溶接個所で反射し、放射状に飛び散っている。溶接室内には 10^{-1} Torr 程度のアルゴンガスが存在するので、電子はこれを電離し、プラズマができる。





SPECIAL EDITION OF RESEARCH AND DEVELOPMENT

CONTENTS

SPECIALLY COLLECTED PAPERS

Spectroscopic Studies of Rare Earth Ions in ZnSe Crystals.....	S. Ibuki • H. Komiya • M. Nakada • H. Masui...	1535
Physical Properties of Polyimide.....	K. Shibayama • T. Tanaka...	1544
Improvement in Ni-Zn-Co Type VHF Ferrites.....	T. Arai • T. Ido • Y. Yamada...	1549
Low-Cycle Fatigue Behavior of 18 Mn-5 Cr Steel used for Retaining Rings	K. Matsuki • K. Sakabe • H. Tsukada • A. Murakami • F. Wada...	1558
Development of High Voltage Thyristor Converters.....	E. Ohno • H. Mitsuoka • Y. Kimura...	1567
Microwave Current Transformers for EHV Power Transmission Lines	S. Saito • Y. Ohno • T. Kitsuregawa • S. Nakahara • S. Tachikawa...	1573
Basic Characteristics of Linear Motors.....	E. Ohno • T. Kishimoto...	1581
Plasma Electron Beam Welding.....	M. Goto • Y. Ueyama • S. Yasunaga...	1589
Semiconductor Laser Equipment.....	S. Nakahara • M. Nagano...	1596
Nondestructive Measurement of Thickness and Refractive Index of Insulating Films.....	M. Nakayama...	1600
Small Brushless DC Motor with Hysteresis Rotor.....	M. Fujii • H. Yoshikawa...	1607
Corrosion under the Influence of Electric Current.....	T. Yamamoto • H. Matsuoka • Y. Kawaoka...	1612
Size Determination of Fine Particles Measurement by Laser Beam Scattering and Their Application	N. Tabata • M. Mori...	1618

TECHNICAL PAPERS

30 cm Radius Sector Type Double-Focusing Beta Ray Spectrometer	T. Akiba • T. Ohama • K. Ueda • H. Isogai • D. Nagata • Y. Shima • M. Kishimori...	1627
Ultrasonic Flaw Detectors for Testing Rails, Type FD-420.....	K. Koono • H. Satoo...	1636
Radar Speed Meter for YAC.....	A. Higashi • A. Yusa • T. Abe • T. Nakamura...	1642

TECHNICAL LECTURE

Programming of Analog Computer (1).....	S. Izuka • T. Sato • M. Yonetani...	1647
---	-------------------------------------	------

NEWS FLASH.....	1654
-----------------	------

GENERAL CONTENTS.....	1659
-----------------------	------

COVER :

Welding with a Plasma Electron Beam

The photograph shows a steel plate being welded with a plasma electron beam. A portion shining pale blue in the center is plasma produced by ionizing collisions of electrons with argon gas atoms in a welding chamber.

The electron beam welding has been regarded as hardly applicable to industrial processes in spite of its excellent features, for it needs high vacuum such as 5×10^{-5} Torr. However, the plasma electron beam welding is a new process that can be utilized in industry, because it is workable with vacuum to the extent of 5×10^{-2} Torr without losing the features of the electron beam welding.


That looks like a nozzle figure in the center is an electron beam focusing lens. It is clearly seen the electron beam is focused to a shape like the point of a gimlet by the electron beam focusing lens, and irradiated to the steel plate. Sparks are also seen flying off at the welded part, and irradiated electrons are reflected at the point to scatter radially. There are argon gas atoms of about 10^{-1} Torr in the welding chamber; they are ionized by these reflected electrons and the plasma is produced.

UDC 546.65:548.312:543.42

ZnSe 結晶中の希土類イオンの分光学的研究

伊吹順章・小宮啓義・中田正矩・増井博光

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1535~1543

ZnSe 結晶中に導入された希土類イオン (E_{2+} , T_{3+} , E_{2+}) の状態を光学的吸収、発光スペクトル、それらのゼーマン効果並びに ESR を観測して調べた。結晶中の希土類イオンはcodopants や不純物または格子欠陥と密接に結びついた中心をつくり、(E_{2+} , Cu), (T_{3+} , Cu), (T_{3+} , Li) の組で希土類イオンの強い発光が見出された。あとの二つにおける発光中心は同じもので T_{3+} は立方対称の結晶場中に存在する。得られたスペクトルにもっともよく合うように結晶場のパラメータが決定された。ZnSe 中の E_{2+} イオンの ESR より、 E_{2+} イオンは立方対称の結晶場中  にあり、その角度変化よりスピンハミルトニアンのパラメータが求められ、また、結晶中に積層欠陥が存在することが判明した。

UDC 621.314.63:621.314.5

サイリスタ高圧変換器の研究

大野栄一・光岡 宏・木村好男

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1567~1572

直流送電など大電力の変換、制御を対象としたサイリスタ高圧変換器開発の重要性は徐々に高まってきつつある。このためには、100個以上の素子を直列接続するための特殊技術の開発が急務となる。当社ではこれらの技術的な問題点を解決するために、各種の基礎研究をもとに、実規模に近い直列数 (120 S) のモデルを完成した。これにより多数直列接続と高圧点弧方式に対する基礎技術を確立すると同時に今後さらに実用化への歩みを進めている。

UDC 678.83:541.67/.68

ポリイミドの物理的性質

柴山恭一・田中誉郎

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1544~1548

耐熱性高分子として知られている芳香族ポリイミドは、耐熱性に加え衝撃強度や強じんさのような強度性質にすぐれており、工業的に広く使用されている。ポリイミドフィルムは、広い温度範囲にわたって高い弾性率を有しながら、非常に強じんである。ポリイミドのすぐれた強度性質に関連すると考えられる低温の分子運動を明らかにすることを目的として、イミド化の異なるポリビロメリットイミド系列について、力学的、誘電的、NMR および熱的測定を行なった。ポリイミドには、低温域にかなりの分子運動の存在が認められ、これは線状高分子と同程度の局所的熱運動であると考えられ、高い強じんさは、このような運動に原因しているものと考えられる。

UDC 621.314.224:621.3.029.6

超高圧用マイクロ波変流器 (μ 波CT)

斉藤成文・大野 豊・喜連川隆・中原昭次郎・立川清兵衛

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1573~1580

500kV 級の超高圧送電線に用いる変流器として、エレクトロニクス化された無導体変流器が各方面で研究されつつある。本文にのべるマイクロ波フェライト変流器もその一種で、Xバンドの電波を用いフェライトのファラディ効果を利用したもので、高圧側には能動性素子を持たず、発振器・受信機・演算部はすべて地上側におかれており、高信頼化をはかったのが特長である。本文ではまず、各種の無導体変流器を分類、比較して、問題点・長短を記して、それらのうちでこのマイクロ波フェライト変流器の占める位置を明らかにした。つぎに、この変流器の動作原理を記し、最後に試作機の構造・性能を述べている。試作機の入出力特性はきわめて満足すべきものである。

UDC 538.548

Ni-Zn-Co系 VHFフェライト

荒居 徹・井戸猛夫・山田幸慶

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1549~1557

六方晶系フェライトの結晶構造に関する解析を手がかりとして、Ni-Zn-Co 系 VHFフェライトの周波数特性を改善するために、これにフェロックスブレナを少量添加してその効果を調べた。この添加により自然共鳴周波数が上昇し μ は減少するが Q 値は保存される。したがってブレナフェライトの添加は Ni-Zn-Co 系 VHFフェライトの特性改善の手段として非常に有力である。結晶組織を詳しく観察してみたが第2相の析出は認められなかった。したがって添加されたブレナはスピネルマトリックス中に完全に固溶しているものと結論される。

UDC 621.313.13

リニアモータの基本特性

大野栄一・岸本 健

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1581~1588

最近超高速鉄道の駆動用をはじめとして他の分野においてもリニアモータが注目されて、各所で研究が行なわれている。この論文ではこのようなリニアモータの原理、形式について概説するとともに、誘導機形リニアモータの基本特性についての検討を行なった結果を述べる。

すなわちリニアモータの一般的特性を論じた後、若干の仮定に基づいて無限長のモデルに対する電磁界方程式を解き、二次導体の種類、空けき (隙)、空けきのずれなどに対する基本特性を求めた。

UDC 539.43:539.389

リチーニングリング用 18Mn-5Cr 鋼の低サイクル疲れ特性

阪部喜代三・塚田尚史・村上 晃・和田文夫・松本健次

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1558~1566

タービン発電機や大形の2極誘導電動機では、回転子のコイル端部を保持するのに円筒状のリチーニングリングが用いられるが、その特性上高強度と非磁性が要求される。近年機器の起動・停止は次第にその度数を増す傾向にあるから、リチーニングリング材の低サイクル疲れ強度について十分なデータを得ておく必要がある。そのため、最も広く使用されている加工硬化形の 18Mn-5Cr 鋼について、両張り定ひずみの低サイクル疲れ試験を実施し、加工率との関連において低サイクル疲れ特性を調べた。その結果、ひずみ繰返し中の軟化・硬化の挙動、疲れ寿命などに ついて、基礎的な知見を得た。

UDC 539.12.0418:621.791.57

プラズマ電子ビーム溶接

後藤正之・上山善司・安永政司

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1589~1595

電子ビームが、真空冶金の分野ですぐれた熱源として広い用途があることは周知のことである。特に電子ビーム溶接技術は、最近航空機工業、自動車工業、電機工業などで、部品工作技術として普及してきた。しかし従来の電子ビーム発生源は、タングステンを高温に加熱した熱陰極であるため、 10^{-4} Torr 以上の高真空を必要とし、寿命が短いために保守が容易でない。

本文では、電子ビームを工業分野の熱源として活用するために、新しい電子ビーム源として開発したプラズマ電子銃を紹介し、その特性と、プラズマ電子ビームによって溶接した異 種金属継手の各種試験結果について報告する。

UDC 621.315.592 : 621.391.6 : 621.373.8

半導体レーザ装置

中原昭次郎・長能宗彦

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1596~1599

半導体レーザは次第に実用品として使用されるようになってきた。実用化のためにレーザ素子に要求される性能と素子の現況についてわれわれが使用しているGaAs接合レーザを中心にその概略を述べ、得られた特性の検討および測定結果とそれらの素子を用いて作られた応用装置の一端を紹介する。あわせて、その他の興味ある応用製品の可能性についてもふれる。



UDC 621.315.5,6 : 535.51 : 539.23


絶縁体薄膜の膜厚と屈折率の非破壊測定法

中山光雄

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1600~1606

半導体素子の製造に使われる絶縁体薄膜の膜厚・屈折率の非破壊測定法として、偏光解析法とVAMFO法を採り上げた。

偏光解析法については、多層膜の偏光解析法を検討し、その結果をシリコン上のシリコン酸化膜とシリコン窒化膜よりなる二層膜の各層膜厚の非破壊測定法に応用した。また、低温成長シリコン・ステイン酸化膜の偏光解析法による測定結果が、二層膜モデルで説明できることを示した。これによって、多層膜の偏光解析法が膜の構造解析にも有効な手段となりうるということがわかった。

VAMFO法については、装置の改良とホトレジスト膜での測定結果を示す。



UDC 621.313.323 : 621.314.214.57

ヒステリシス・ロータを用いた小形ブラシレス直流電動機

藤井 学・吉川英文

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1607~1611

ブラシレス直流電動機の研究が開始されて、すでに、10数年が経過し、その間、種々の方式が発表されてきている。しかし、現状では、なお、コスト面での制約により、その応用範囲も狭く、無刷子・高速回転可能・制御特性良好などの、ブラシレス直流電動機が独自に持つ特長を十分に生かし得るもののみに応用が限定されている。


本文は、この点に留意し開発した、自動車用バッテリーなどの比較的低電圧の直流電源で駆動され、回転ムラのきわめて少なく、小形・軽量・高出力の、ヒステリシスロータを用いたブラシレス直流電動機の概要を紹介し、あわせて、それに関連した、2~3の項目について検討を加えたものである。

UDC 620.193 : 621.3.02

腐食におよぼす電流の影響

山本利雄・松岡宏昌・川岡靖子

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1612~1617



最近、電気機器の冷却に水を用いることが多くなり、使用材料の腐食に関心がよせられている。本研究は銅およびステンレス鋼の電流影響下での腐食に関するもので、これは電気機器の水冷において最も注目される課題であろう。実験は大形セラブル・フラスコを用い、純水中で板状試料について行なった。おもな結果は次のとおりである。ステンレス鋼は交流の影響はほとんど受けず、実際上は腐食が起らないと考えてよい。直流では陽極側が多少腐食される。銅は直流でももちろん交流でも50あるいは60Hzではさうとう腐食されるが、周波数の上昇にしたがい腐食は減少し、ある周波数以上では交流の影響はなくなる。

UDC 535.120.6 : 535.12.03

レーザ光散乱による微粒子の粒子径測定とその応用

田畑則一・森 貢

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1618~1623

除じん(塵)装置の集じん効率測定法として現在行なわれている方法には問題点があり、理想的なものとして単分散粒子(粒子径均一)と光散乱濃度計を使った方法の特長を説明した。その場合に最も重要な問題であるエーロゾルの粒子径測定の一方法として、レーザ光散乱分布よりサブミクロン粒子の粒子径と粒子径分布を求める方法について詳述した。この方法は理論散乱光分布図と実測分布図との比較から粒子径とその分布を決めるもので、レーザ光の特性により測定が精密で容易になる。LaMer発生器より発生したDOP粒子についての測定例も示した。またDOP粒子を用いた集じん効率測定法を静電フィルタの基礎研究に適用した例を示し、有用性を説明した。


UDC 539.124

30cm半径セクタ形二重集束ベータ線スペクトロメータ

秋葉稔光・小浜太郎・上田孝寿・磯貝文彦・長田大郎・島 幸弘・岸森真通

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1627~1635

名古屋大学に設置したこの装置は、4MeVまでのベータ線を分析できる。 β - γ 角度相関の測定も含めて自動計数装置で計数できる。

製作後、入射部漏えい(洩)磁界と半径方向磁界の分布を補正してセクタ約205°、線源部自由空間長33cmで二重集束が実現でき、2mm×20mmのCs¹³⁷の線源を用いて最大明るさ1.0%、最良分解能0.27%が得られた。この結果はsharp-cut-off近似を用いた設計性能よりもわずかに劣る。しかし、直線で近似した漏えい磁界内の電子軌道解析方法を求めて、補正した磁界に適用し二重集束点が約205°最大透過率が1.1%と実測値にはほぼ一致する結果を得た。

β - γ 同時計数ではCo⁶⁰の線源で分解時間0.6μsが得られた。



UDC 534.8-8 : 625.17

レール探傷器 FD-420形

河野勝美・佐藤春治

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1636~1641

最近、特に、車輛の高速化や交通量は急増加の傾向を示しており、鉄道保線は非常に重要な業務として注目をあびている。ここに保線業務のうちでもっとも重要なレールの内部欠陥を測定するレール探傷器の原理・構造・主要性能・探傷例・各部の特性について説明する。

このレール探傷器は振動数2Meの超音波パルスをレール内部へ投入して欠陥からの反射波を得てブラウン管へ表示し、レール内部の欠陥を発見するものである。超音波を送受波する探触子は垂直と斜角を併用しているため、レール表面から底部までも探傷可能になり、さらにレール継目等の周囲以外に溶接部も探傷可能となっている。

UDC 621.396.969 : 625.1

YAC用レーダスピードメータ

東 昭・遊佐 滉・阿部寿夫・中村泰而

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1642~1646

レーダスピードメータは、マイクロ波のドップラ効果を利用した速度検出装置で、移動体の速度を、高精度で連続測定できることからその応用範囲は広い。

YAC(Yard Automatic Control)用レーダスピードメータは、自動化操車場で散転貨車の速度制御を行なうための速度検出器として使用されるものである。当社は日本国有鉄道技術研究所と実用化試験を重ねてきたが、このたび自動化モデルヤードとしての郡山操車場に本装置の納入が完了したので、そのシステムの概要、設計上の問題点、装置の概要、試験結果について述べる。



UDC 681.142A

アナログ計算機のプログラミング (1)

— 常微分方程式の解法 —

井塚秀弥・佐藤 毅・米谷光雄

三菱電機技報 Vol.42・No.12・P1647~1652

アナログ計算機のプログラミングについて標準的な手法を3回にわけて解説する。

(1)ではアナログ計算機の概要を述べ、最も基本的な応用例である各種の線形、非線形常微分方程式の解法について具体的な例を多く示しながら解説する。

各要素の機能、標準的な使い方、スケール変換などをおりこみ、初めてアナログ計算機を扱う人でも、任意の非線形常微分方程式を独力で解析できる程度まで述べてある。



ZnSe 結晶中の希土類イオンの分光学的研究

伊吹 順章*・小宮 啓義**・中田 正矩**・増井 博光**

Spectroscopic Studies of Rare Earth Ions in ZnSe Crystals

Central Research Labroatory Sumiaki IBUKI・Hiroyoshi KOMIYA
Masanori NAKADA・Hiromitsu MASUI

The electronic properties of rare earth ions (Er^{3+} , Tm^{3+} and Eu^{2+}) doped into ZnSe crystals have been studied by observing their optical absorption, luminescent spectra, their Zeeman effect and ESR. The rare earth ions in the crystal form some kinds of centers close coupled with codopants or impurities or lattice defects, and they have emitted strong luminescence of the rare earth ions in the set group of (Er^{3+} , Cu), (Tm^{3+} , Cu) and (Tm^{3+} , Li). The electronic structures of the latter two sets are the same, and Tm^{3+} exists in a crystal field of cubical symmetry. Parameters of the crystal field have been determined to suit best to the spectra thus obtained. From the ESR results of Eu^{2+} ions in ZnSe, it has been made clear that Eu^{2+} ions exist in the crystal field of cubical symmetry, and from their angle dependence parameter of Spin-Hamiltonian have been made available. Also it has been found that some stacking faults exist in the crystal.

1. ま え が き

最近半導体レーザの研究がすすみ、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ や GaP , $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ のような赤色部に発光する素子の出現、市販をみるに至った。しかしながらさらに波長の短い領域、とくに青色部では効率のよい電場発光材料がいまだに見つかっていない。

この打開策として禁制帯幅が広い II-VI 族化合物の利用が考えられる。しかし種々の II-VI 族化合物においてはその比抵抗をさげ、発光強度を上昇するために制御しなければならない因子、たとえば格子欠陥の電子構造と発光強度との関連といったものの解析が不十分である。その理由は一般に II-VI 族化合物結晶は化合物を形づくる元素のどちらかが不足して、その格子欠陥が多数存在し、それが導入された不純物と多種類の複合欠陥を作り、それらの同定をするよい方法が見つからないからであった。

そこでわれわれは II-VI 族化合物中の典型的な物質である ZnSe 結晶に希土類イオン（以下 RE と書く）を導入し、その RE を中心として格子欠陥や他の不純物との結合によってできる複合構造とけい（蛍）光の関連を明らかにしようと考えた。その理由は ZnSe は比較的低温で結晶を作ることが可能であり、抵抗値の制御も他の II-VI 族化合物とくらべてむずかしくないし、RE のまわりの電子構造はその鋭い光学スペクトル、ESR スペクトルなどを解析することによって推定されるという特色があるからである。

しかしながら当初は ZnSe 結晶中に RE を導入することはきわめて困難であったが、Li や Cu, P などの codopant とともに導入すると、比較的多量の RE を導入することが可能になり、これらの結晶を用いて RE の吸収スペクトル、発光スペクトルおよびそれらのゼーマン効果、ESR を観察した。これらの実験結果の解析により、複合中心の電子構造およびけい光との関連について数々の興味ある結論を導くことができた。以下それらの詳細について述べる。

2. ZnSe : RE 結晶の製作

ZnSe の結晶製法については、文献(1)に詳細に述べてあるので、ここでは本論文で取扱う ZnSe : RE 結晶の製法と、その化

学的性質について簡単にまとめておく。

ZnSe : RE の結晶は、高圧炉を用いてブリッジマン法により製作した。結晶成長の条件は、最高温度 $1,570\sim 1,600^\circ\text{C}$ 、ルツボ下降速度 $5\sim 10\text{ mm/h}$ 、加圧はアルゴンガスで 100 kg/cm^2 程度である。RE および codopant は、それらの塩化物を ZnSe の粉末に混合して、あらかじめ焼成することによりドーピングしている。codopant が P(磷)の場合には、一度 RE をドーピングした粉末を赤りんとともに封管中で再焼成して用いる。

このようにして製作した結晶の不純物分析を行なうと、RE と Cu は添加量の $1/2\sim 2$ 倍程度の分布を示すが、Li と P は蒸気圧が高いために、焼成および結晶成長段階で失われ、添加量の $1/10$ 以下の濃度となる。表 2.1 は用いた試料の標準的なものについて、その不純物分析の結果を示したものである。

これらの不純物は、分析で得た量全部がいわゆる dilute に溶解しているのではなく、そのうちの相当量が析出していると考えられる。しかし現在のところ、析出したものと溶解したものを定量的に分離する手段がないので、イオン結晶中の RE の吸収強度等と比較することにより、ここで用いた試料中に溶解している +3 価 RE イオンの濃度は、 0.01 mol \% またはそれ以下と推定される。

また Eu^{2+} の場合には吸収強度による比較はできないが、電荷補償が不要であることと、結晶の顕微鏡観察の結果等から考えて、すくなくとも 0.1 mol \% まではほぼ全量溶解しているものと思われる。

表 2.1 ZnSe : RE, X 結晶の不純物分析結果の例 (単位 mol \%)
Typical concentrations of rare-earths and codopants in ZnSe : RE, X crystals (mole %).

結 晶 番 号	RE	X	
# 96 Er	0.3		
# 97 Tm	0.3		
# 101 Eu	0.1		
# 102 Er-P	0.2	P	0.05
# 171 Er-Cu	0.05	Cu	0.02
# 91 Tm-Li	0.001	Li	0.03
# 170 Tm-Cu	0.01	Cu	0.01

これらの溶解した RE イオンは、単純に Zn を置換したもののほかに codopant や native defect と結合して、種々の RE 中心を構成している。この各種 RE 中心の濃度は熱力学的な平衡状態によって決定されるが、それを左右する要素が多いため、ある一種類の RE 中心の濃度を制御するのは容易でない場合が多い。

ZnSe の結晶形は通常 zinc blende 型で、(110) 面にへき開が起こりやすい。したがって試料の軸方向はほとんどの場合いくつかの (110) へき開面を基準にして決定している。またこのへき開の起こりやすさとへき開面の平面度は、結晶の良否を判定する一つの目安であるが、RE のみを多量にドーピングしたときと P をドーピングしたときはへき開性が悪くなり、これらが結晶成長を阻害することがわかる。

3. 光学的性質

ZnSe : RE, X (X は codopant を表わす) のうち、本章で扱うのは、RE として Tm^{3+} と Er^{3+} 、X として Li, Cu, P である。結晶場によるシュタルク分裂と RE^{3+} の発光強度は X によって変化するが、これらのうち強い発光を示すのは、Tm-Li 系 (ZnSe : Tm, Li を意味する。以下同じ)、Tm-Cu 系および Er-Cu 系の 3 種である。本章ではこれらの吸収および発光スペクトルについて述べるが、その前に参考のために Tm^{3+} と Er^{3+} の $4f$ 準位の模様を図 3.1 に示しておく⁽²⁾。

ZnSe の吸収端は 4.2°K で約 4,400 Å ($\sim 23,000 \text{ cm}^{-1}$) にあるため、図 3.1 の準位のうち $23,000 \text{ cm}^{-1}$ 以下のものだけが観測可能である。この図に書かれている準位の記号等、RE の $4f$ 準位の一般的事項については、付録を参照していただきたい。

3.1 実験

吸収および発光スペクトルの測定に用いた分光器は、Bausch & Lomb 社製の dual grating spectrograph である。この分光器は分散が 4 Å/mm と 8 Å/mm の 2 枚のグレイティングを有し、幅 50μ のスリットを用いたとき 0.2 Å の分解能が得られる。乾板は Kodak 社の type 103 aF ($4,000 \text{ Å} \sim 7,000 \text{ Å}$) と type 1 N ($6,000 \text{ Å} \sim 9,000 \text{ Å}$) を使用し、波長決定には Ne 又は Ar の発輝線を用いた。

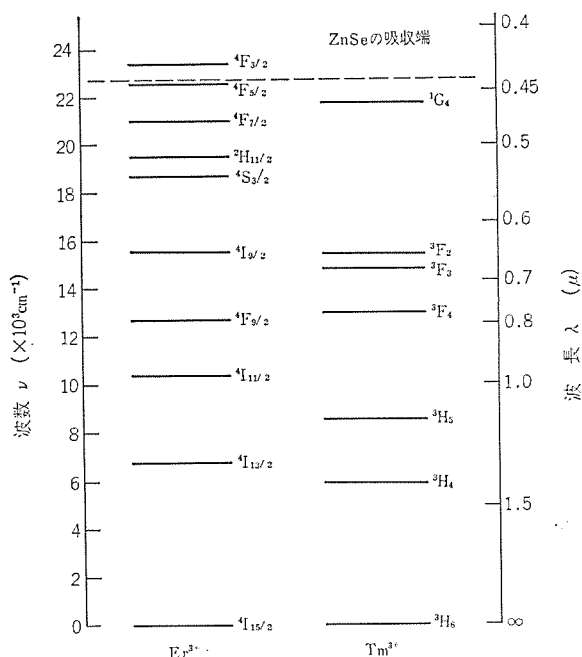


図 3.1 Tm^{3+} と Er^{3+} の $4f$ 準位⁽²⁾
The $4f$ energy levels of Tm^{3+} and Er^{3+} ions.

光源として使ったのは、吸収測定用がタングステンランプ、発光測定用の励起用が 2 kW の Xe ランプであるが、Xe ランプには透過域 $3,000 \text{ Å} \sim 4,000 \text{ Å}$ の紫外フィルタをかけて、励起光を取出した。したがって励起波長は ZnSe の吸収端より短いところにあり、すべて母体励起を行なっている。この母体励起を通しての RE^{3+} の励起機構については、文献を参照していただきたい⁽³⁾。

試料は 2 章に述べた結晶を厚さ $1 \sim 5 \text{ mm}$ にへき開または切出して用いているが、切出した試料を研磨して用いる際には、研磨後 NaOH の溶液でエッチしている。これは研磨により荒れた表面層が、発光強度を著しく減少させることがあるからである。これらの試料の低温測定は、温度を連続的に変化させる場合を除き、液体窒素または液体ヘリウムに試料を浸して行なった。測定した波長範囲は、ZnSe の吸収端 $4,400 \text{ Å}$ から、乾板の長波長限界約 $8,900 \text{ Å}$ までである。

3.2 Er^{3+} のスペクトル

3.2.1 Codopant による吸収スペクトルの変化

Er^{3+} を codopant と同時に ZnSe にドーピングすると、codopant によって Er^{3+} の吸収スペクトルが変化する⁽⁴⁾。これは Er^{3+} の周囲のイオン配置が変化して結晶場の様子が変わり、シュタルク分裂に変化を起こすからである。したがってこれらのシュタルク分裂の模様を知ることにより Er^{3+} のまわりのイオン配置がわかり、さらに発光の様子と比べることにより、どのような状況の時に強い発光を示すかという知識が得られる。

Er^{3+} の吸収のうちもっとも大きな強度を示すのは、 $4\text{I}_{15/2} \rightarrow 2\text{H}_{11/2}$ 遷移に対応するものである。そこでこの吸収を例にとって、そのスペクトルが codopant によってどのように変化するかを示したのが図 3.2 である。この図で (a) は Er 系の、(b) は Er-Cu 系の、(c) は Er-P 系の 4.2°K での吸収スペクトルである。これからわかるように (b) では Er-Cu 系特有のスペクトルと矢印で示した Er 系の吸収線が共存しており、(c) では Er-P 系特有のスペクトルのみが表われている。もちろん試料によっては、Er-P 系でも特有のスペクトルと Er 系の吸収線が共存しているものもある。

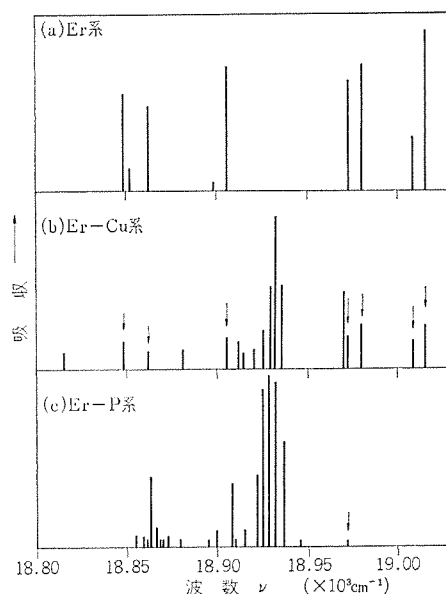


図 3.2 Er^{3+} の $4\text{I}_{15/2} \rightarrow 2\text{H}_{11/2}$ 遷移に対応する吸収スペクトルの codopant による変化 (4.2°K)
Absorption spectra corresponding to $4\text{I}_{15/2} \rightarrow 2\text{H}_{11/2}$ transitions of Er^{3+} in ZnSe crystals at 4.2°K .

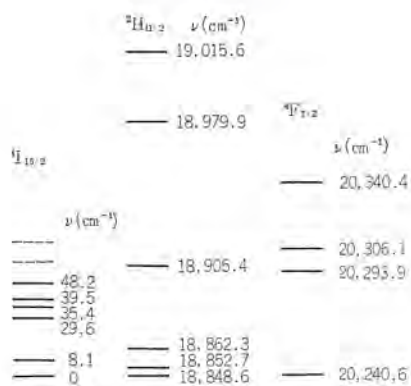


図 3.3 ZnSe : Er における Er^{3+} のシュタルク準位
Stark levels of Er^{3+} in ZnSe : Er.

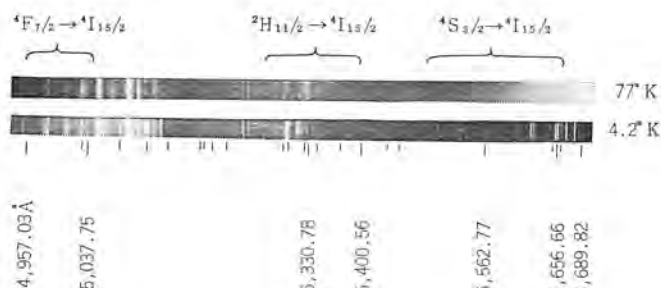


図 3.4 ZnSe : Er, Cu における Er^{3+} の発光スペクトル
Luminescence spectra of Er^{3+} in ZnSe : Er, Cu.

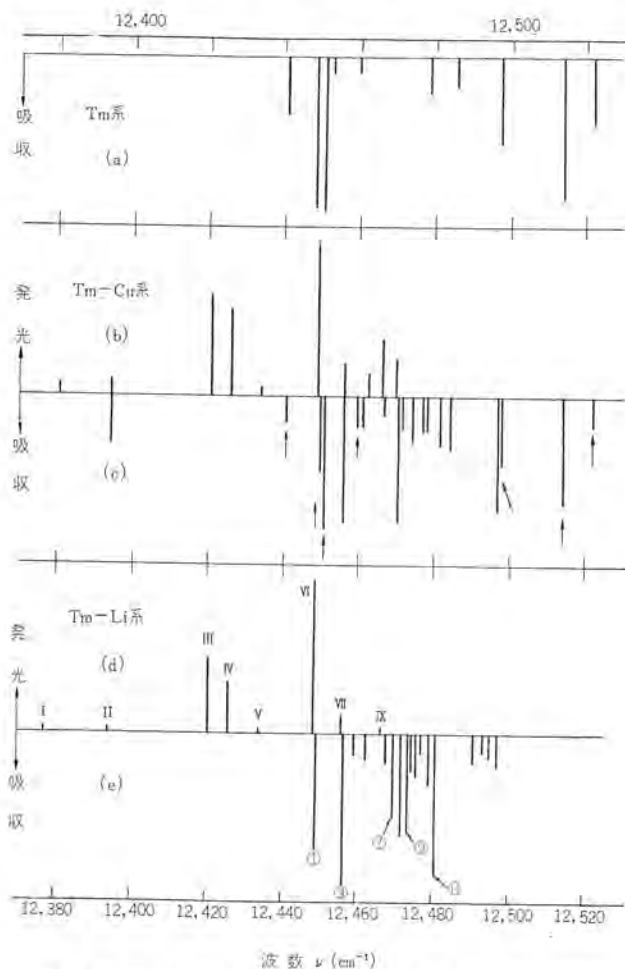


図 3.5 Tm^{3+} の ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ 遷移に対応する吸収および発光
スペクトルの codopant による変化 (4.2°K)
Luminescence and absorption spectra corresponding to ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$
transition of Tm^{3+} in ZnSe crystals at 4.2°K.

Er 系の吸収線は 4.2°K でも幅が 3~6 cm^{-1} あり、77°K でもほとんど広がらないのに対して、Er-Cu 系および Er-P 系特有の線は 4.2°K では 1 cm^{-1} 以下で非常に狭いが、77°K では Er-Cu 系特有の線が 5~10 cm^{-1} の幅となり、また Er-P 系特有の吸収線は 10 cm^{-1} 以上に広がる。

3.2.2 Er 系でのシュタルク準位

吸収や発光線の波数は、その遷移に関係する二つの準位の間のエネルギー差を示している。したがって一つの J -多重項の分裂の様子を知るには、遷移の片側が同一の準位である 1 組の吸収(または発光)線を選び出すことが必要である。結晶中では基底 J -多重項 ${}^4\text{I}_{15/2}$ も当然シュタルク分裂をしており、そのシュタルク準位は測定温度でのボルツマン分布に従った population を持っている。そこで測定温度を下げていくと、ボルツマン分布の変化に伴い、 ${}^4\text{I}_{15/2}$ の最低準位からの遷移に対応する吸収線の強度は増加し、逆に励起準位 (${}^4\text{I}_{15/2}$ 中の) からの遷移に対応する吸収線の強度は減少する。

図 3.3 は Er 系において ${}^4\text{I}_{15/2}$ から ${}^2\text{H}_{11/2}$ および ${}^4\text{F}_{7/2}$ への遷移に対応する吸収線を、77°K と 4.2°K の間の温度変化をもとに整理して得た、三つの J -多重項のシュタルク準位のエネルギーを示している。この図でわかるように ${}^4\text{I}_{15/2}$ の第一励起準位は 8.1 cm^{-1} にあり、4.2°K でこの準位に存在する確率は最低準位に対して約 1/16 となり、したがって 4.2°K では励起準位からの遷移に対応する吸収線はほとんど観測できなくなる。一方 77°K では 48.2 cm^{-1} にある第 5 励起準位の存在確率が最低準位に対して約 0.4 となり、 ${}^4\text{I}_{15/2}$ のシュタルク準位のうち、ここまですべて観測可能であった。

3.2.3 Er-Cu 系の発光スペクトル

Er-Cu 系は黄緑色の強い発光を示し、これは 4,900 Å~5,700 Å に分布する Er^{3+} の三つのグループの線状発光から成っている。この三つのグループに対応する遷移は短波長側から、 ${}^4\text{F}_{7/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 、 ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 、 ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ で、最後のものがもっとも強い。この他に 6,700 Å に ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ と、8,600 Å に ${}^4\text{F}_{7/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 遷移に対応すると思われる弱い発光線群がある。

図 3.4 は黄緑色発光の 4.2°K と 77°K における分光写真である。この写真の発光線の中で写真の下に線を入れて示してあるものは、波長標準に用いた Ne の発輝線である。この写真でわかるように、 Er^{3+} の発光線は 77°K では全体に弱くなるとともに、幅が 10 cm^{-1} 程度に広がっている。なお 4.2°K で ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ の長波長側に現われる比較的幅の広い構造は、vibronic spectra ではないかと考えられる。

3.3 Tm^{3+} のスペクトル

3.3.1 Codopant によるスペクトルの変化

Tm^{3+} の場合も、その結晶場スペクトルが codopant によって変化する様子は Er^{3+} の場合と同様である。 Tm^{3+} の吸収と発光のうちもっとも大きな強度を示すのは ${}^3\text{F}_4 \leftarrow {}^3\text{H}_6$ 遷移 (~8,000 Å) に対応するものである。このスペクトルを例にとりて、4.2°K での codopant による変化の模様を示したのが図 3.5 である。この図で (a) は Tm 系の吸収スペクトル、(b)(c) は Tm-Cu 系の、また (d) (e) は Tm-Li 系の発光および吸収スペクトルである。

これら三つの系の発光強度の絶対値を比較すると、Tm 系 : Tm-Cu 系 : Tm-Li 系が 1 : 100 : 700 の程度で、Tm 系の発光強度は非常に小さいので省略した。ただし Tm 系の発光スペクトルが他の二つの系のものと完全に異なっていることは、吸収スペクトルの場合と同様である。(c) の矢印は Tm-Cu 系でも Tm 系の吸収線がまじっ

ていることを示している。この図で Tm-Cu 系と Tm-Li 系を比較すると、吸収、発光共にほとんど一致していることがわかる (Tm-Cu 系における Tm 系の吸収線を除く)。このことは、両系でまったく同じ形の Tm^{3+} 中心がいくつかできており、かつそれらの中心の Tm^{3+} にかかる結晶場がほとんど等しいことを意味している。

各スペクトルの線幅は Tm 系が 4.2°K で $2 \sim 6 \text{ cm}^{-1}$ で、 77°K では 10 cm^{-1} 程度に広がる。一方 Tm-Cu 系と Tm-Li 系に特有な線は 4.2°K で 1 cm^{-1} 、またはそれ以下と狭いが、温度を上げると Tm-Cu 系の線幅が 77°K で 10 cm^{-1} 程度に広がるのに対して、Tm-Li 系の線幅は 15°K 付近ですでに 10 cm^{-1} を越し、線幅の温度変化が著しい。

3.3.2 Tm-Li 系の吸収スペクトルの熱処理による変化

前節で述べたように結晶場分裂の様子を知るには、まず最低準位からの遷移に対応する吸収線を選び出すことが必要であるが、これらの吸収線の数等から中心が 2 種以上あると考えられるときには、さらに同一の中心に属する吸収線を選び出すことが必要となる。そのための手段として、試料の熱処理による各吸収線の相対的な強度変化を見る方法がある。

図 3.6 (a) は図 3.5 (e) を写したものであるが、(b) は同じ試料を Se ふん囲気中 900°C で熱処理した後の吸収スペクトルを示す。この図で各吸収線の強度は、吸収線③を 100 として normalize してある。また実際には (b) の試料には Tm 系の吸収線が共存しているが、見やすくするために除いてある。この図からわかるように、すくなくとも①、③、⑦の 3 本の吸収線は (a) と (b) でほぼ同じ強度を持ち、これらが同一の中心 (A 中心と呼ぶ) に属していることを示している。また同様に⑨、⑪も別の二つの中心に属するものと思われる。

3.4 実験結果の検討と考察

3.4.1 Er^{3+} について

Er 系の吸収スペクトルについては、3.2.2 項に述べたように 1 種類の中心しか含まれておらず、さらに $^2\text{H}_{11/2}$ と $^4\text{F}_{7/2}$ の全シュタルク準位および $^4\text{I}_{15/2}$ の五つのシュタルク準位がわかっている。 J が半整数の場合にはいかに対称性の低い結晶場中でも 2 重縮退が残り (ク

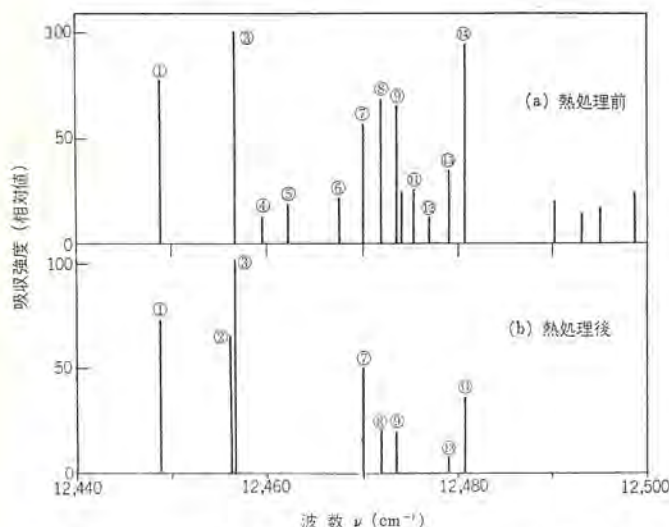


図 3.6 Tm-Li 系における Tm^{3+} の $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 遷移に対応する吸収スペクトル (4.2°K) の熱処理による変化
Change of absorption spectrum (4.2°K) corresponding to $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ transitions of Tm^{3+} in ZnSe : Tm, Li due to heat treatment.

ラース 2 重項)、したがって結晶場で分裂したときの準位の数は最大 $(2J+1)/2$ である。

ZnSe の結晶形は zinc blende 形であるので、 Er^{3+} が単純に Zn を置換したときには、 Er^{3+} にかかる結晶場は立方対称 (T_d) となる。対称性が T_d のときには分裂準位の数は $^2\text{H}_{11/2}$ が 4、 $^4\text{F}_{7/2}$ が 3 となるべきであるが、実験では図 3.3 からわかるように、それぞれ最大数の 6 と 4 になっており、 Er^{3+} が立方対称より低い対称性の結晶場を受けていることを示している。すなわちここで得られた結論は、ZnSe 中で光学吸収の観測が可能な程度に高濃度で存在する Er^{3+} は、必ず何らかの不純物または格子欠陥と結びついているということである。

Er-Cu 系および Er-P 系のスペクトルは非常に複雑で、現在まだ結論を得る段階に達していないが、Er-Cu 系の強い発光に関連して、Tm-Cu 系および Tm-Li 系も含めてわれわれが得た結果と他の文献とを総合すると、発光に関する一つのモデルが得られる⁽⁴⁾。

すなわち、 RE^{3+} と codopant が結合して pair 発光中心を作り、その pair 発光中心の発光帯とその RE^{3+} の吸収線群とが重なるとき、pair 発光中心から RE^{3+} の $4f$ 準位へエネルギーが共鳴伝達で移動して、 RE^{3+} の強い発光が起こる。このモデルによれば強い RE^{3+} の発光を示す RE と codopant の組合わせをさがす方法は、 Gd^{3+} (Gd^{3+} は $32,000 \text{ cm}^{-1}$ まで吸収がなく、したがって pair 発光中心のエネルギーが Gd^{3+} の $4f$ 準位に移動しないため、pair 発光中心の発光帯を観測することができる) と codopant をドーピングし、その pair 発光中心の発光帯をしらべ、その発光帯と重なる吸収線群を持つ RE とその codopant を組合わせることである。

3.4.2 Tm^{3+} について

Tm 系においては Er 系と異なり、すくなくとも 2 種類の中心が観測にかかる。これは RE のみをドーピングしたとき、Tm のほうが Er より溶解度が大きいことに起因しているのであろう。

Tm-Cu 系および Tm-Li 系では、3.3 節に述べたように、両者でほとんど同じスペクトルを持ち、かつ図 3.6 の①、③、⑦の吸収線は同一の中心 (A 中心) に属することが判明した。また 4 章で述べるように、このうち①、③の線が低磁場で 3 本に分裂し、 $^3\text{H}_6$ の最低準位がすくなくとも 3 重に縮退していることがわかった。このことから、A 中心は立方対称の結晶場を持っていることが推定される。

そこでこの A 中心の $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 遷移に対応する吸収および発光スペクトルにもっともよく合うように、付録に述べる方法を用いて、パラメータ $A_4^0 \langle r^4 \rangle$ と $A_6^0 \langle r^6 \rangle$ を計算した。ただしこの際 β , γ は Wong-Richman の計算値を用い⁽⁶⁾、また $n_n=1$ および $\langle r^n \rangle$ が J -多重項によって変化しないという仮定をおいた。その結果得た値は次のとおりである。

$$A_4^0 \langle r^4 \rangle = 15.08 \text{ cm}^{-1} \quad A_6^0 \langle r^6 \rangle = -2.49 \text{ cm}^{-1}$$

3.4.3 中心のモデルその他について

前項で述べたように A 中心についてはその対称性とパラメータの値がわかったので、この中心の構造について検討を試みてみた。

ZnSe 中に Tm^{3+} と Li または Cu (通常 +1 価) が存在するとき、何種類かの立方対称を持つイオン配置が考えられる。これらのモデルに対して点電荷近似で A_4^0 と A_6^0 を計算し、Freeman-Watson の $\langle r^4 \rangle$, $\langle r^6 \rangle$ の計算値を用いて⁽⁷⁾、前項で得られた $A_4^0 \langle r^4 \rangle$ と $A_6^0 \langle r^6 \rangle$ の実験値と比較した。しかしながら、 $A_6^0 \langle r^6 \rangle$ に対してはいくつかのモデルで近い値が得られるが、 $A_4^0 \langle r^4 \rangle$ に対しては一つのモ

ルを除いて、 $+100\text{ cm}^{-1}$ 以上の値か負の値しか与えない。

比較的实验値に近い値を与える唯一のモデルは、 RE^{3+} がZnに囲まれた格子間位置にはいり、 RE^{3+} をとりまく4個の Zn^{2+} とこれと等距離にある格子間位置にはいった4個の -1 価イオンとで作られる中心で、 RE^{3+} との間のクーロン力のために Zn^{2+} がやや RE^{3+} から遠ざかり、 -1 価イオンがやや近づくというものである。しかしこのモデルでは用いたcodopantが直接には寄与していないことになり、次に述べる事柄からもかなり疑問があるので、一つの可能性と考えておいたほうがよさそうである。

吸収線や発光線の幅の温度変化については、3.2, 3.3節で触れておいたが、これをcodopantに注目してながめると、Cu, P, Liの順で温度上昇に際しての幅の広がりが激しくなる。すなわちcodopantイオンの質量が軽い程温度上昇に際しての幅の広がりが激しくなる傾向がある。このことは、ある温度で一定の熱振動数分布を持ち、かつその運動エネルギーが変わらないと考えれば、質量が軽いものほど振幅が大きく、したがってそのイオンが RE^{3+} に及ぼす電場のゆれが大きくなり、線幅が広くなるとして解釈することができる。この解釈によると、RE-X系特有のスペクトルを与える中心は、REとcodopantが密接に結合した中心であるということになる。

4. ゼーマン効果

4.1 実験装置

ゼーマン効果の測定に十分な幅のせまいスペクトル線は、 4.2°K 以下でのみ得られたので、測定はすべて試料を液体ヘリウムに直接に浸して行なわれた。高磁場はコンデンサC(1,030 μF)にたくわえられた電荷をパルスコイルLを通して、瞬間的に放電させることによって得られた。CとLで定められた周期で正弦的に流れる電流が最大値に達したとき、その周期にくらべて十分短い時間だけつくXeフラッシュランプを点灯し、それを光源として吸収スペクトルを測定すると、その最大値に比例した磁場における吸収線のゼーマン効果を観測することができる。この測定法のブロックダイアグラムを図4.1に示す。磁場の校正にはg値のよくわかっているルビーの単結晶を用いた。低磁場での測定には超電導コイルと光源としてタングステンランプを使用した。

発光線のゼーマン効果は励起光源、超電導コイル内の試料、分光器を直線的に配置し、試料の背面より励起光をあてて前面よりでる発光線を観測した。他の詳細は3章と同じである。

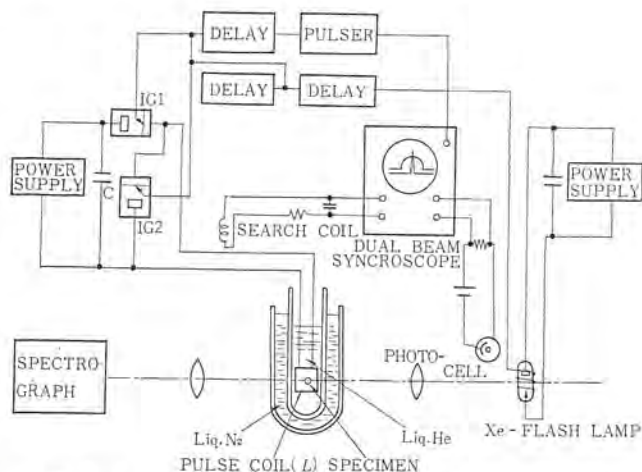


図 4.1 高磁場ゼーマン効果の実験装置のブロックダイアグラム
Block diagram of the experiment of Zeeman effect under high magnetic field.

円偏光特性を測定するためにポラロイド社製の円偏光板 HNCP-37 を使用し、磁場を反転させて左回りと右回りの両方の円偏光を得た。

4.2 実験結果並びに検討

4.2.1 ZnSe : Tm, Li

ZnSe : Tm, Li の $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ の遷移に対応する吸収線と発光線の $H \parallel \langle 110 \rangle$ のときのゼーマン効果を図4.2と図4.3に示す。入射光の方向は磁場と平行で、光の電場ベクトルは磁場と垂直である。A中心に属する吸収線①, ③, ⑦の分裂の大きさは磁場に対して直線的に変化する。これに反しB中心に属する吸収線⑨と⑬はこの直線性からずれている。

スペクトル線の強度は二つのものの積に比例している。その一つはその遷移に対応する遷移確率で、他の一つは遷移の始状態のイオンのpopulationである。前者は二つの状態を与えればきまるもので、遷移をする二つの状態のどちらが始状態かということには関係しない。したがって同じ状態間の吸収と発光ではその大きさは等しくなる。イオンはボルツマン分布にしたがっていろいろの状態に分布しているので、後者は温度と始状態の付近のエネルギー準位に強く依存する。

図4.2(b)の発光線VIは図4.2(a)の吸収線①より少し長波長側にあらわれ、ゼーマン分裂の磁場依存性はまったく同じであるので、発光VIと吸収①は同じ状態間の互いに逆の遷移と考えてよい。図4.2(b)からわかるように発光線VIのゼーマン成分の相対的強度は磁場によって変化しないので、この遷移に対する遷移確率の磁場依存性はない(このゼーマン成分に対応する遷移の始状態のpopulationの磁場変化はないとしてよい)。

ところが吸収線①では、長波長側の2本のゼーマン成分は磁場が増えるとともにその強度が減少していく。それゆえ、これはゼーマン分裂した準位のpopulationが磁場とともに変化していることであり、この吸収線①に対応する遷移の始状態(すなわち最低準位)が三重

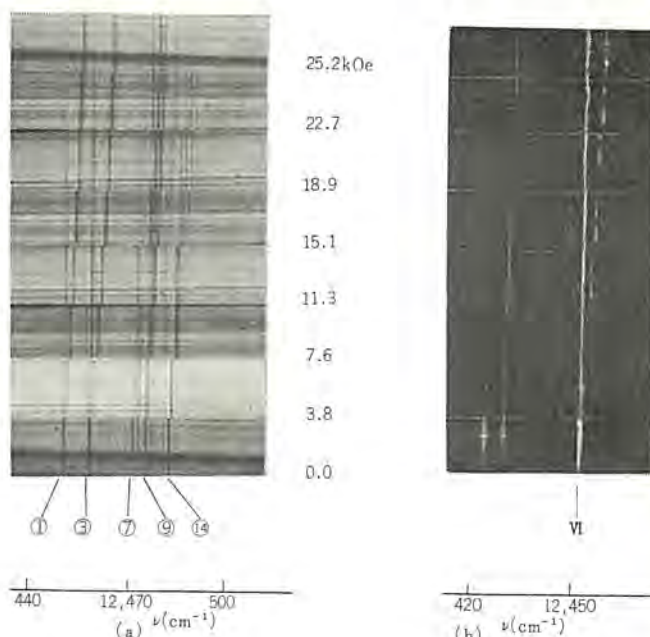


図 4.2 ZnSe : Tm, Li における Tm^{3+} の $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 遷移に対応する吸収線(a)と発光線(b)のゼーマン効果
 $H \parallel \langle 110 \rangle$, 4.2°K , σ -polarization.

Zeeman patterns of the absorption lines (a) and the luminescence lines (b) corresponding to $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ transitions of Tm^{3+} in ZnSe : Tm, Li when $H \parallel \langle 110 \rangle$ at 4.2°K with σ -polarization.

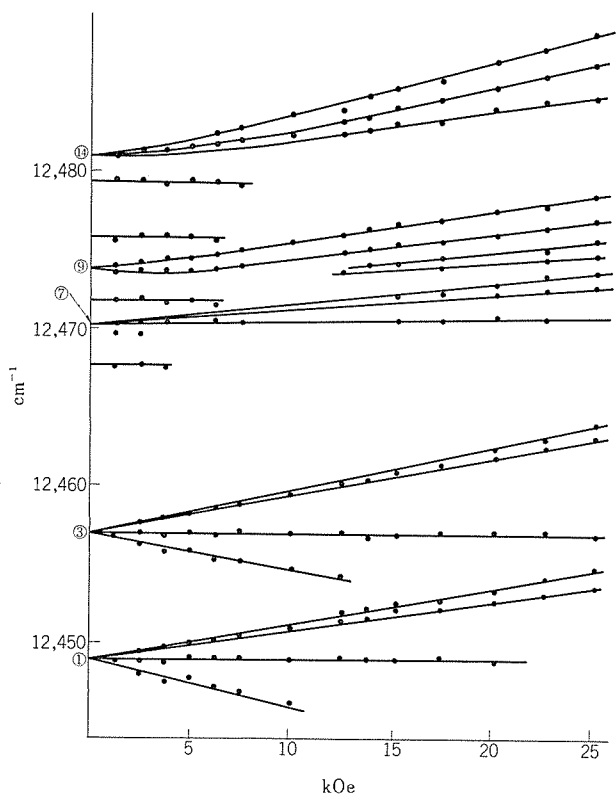


図 4.3 ZnSe : Tm, Li における Tm^{3+} の $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 遷移に対応する吸収線のゼーマン分裂。 $H \parallel \langle 110 \rangle$, 4.2°K , σ -polarization.

Zeeman splittings of the absorption lines corresponding to $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ transitions of Tm^{3+} in ZnSe : Tm, Li when $H \parallel \langle 110 \rangle$ at 4.2°K with σ -polarization.

に縮退していると考えればよい。 1.6°K においては長波長側の 2 本のゼーマン成分の強度の減少は 4.2°K のときにくらべて著しくなるが、これは上記の考えが正しいことを示している。

結晶中では Tm^{3+} の準位の縮退度は高だか 3 重で、これは結晶場が立方対称のときにのみあらわれる。したがって前章でも述べたように A 中心は立方対称をもったものであることがわかる。

吸収線①と③の最短波長のゼーマン成分は、おのおの大きい磁場で 2 本にわかれていたが、これは零磁場で励起準位が数重に縮退しているか、または 5 章で述べるように積層欠陥のために磁場をかけたとき二つの等価でない site が生ずることによると考えられる。

図 4.3 からわかるように吸収線①の磁場に対する分裂の大きさは上下に非対称である。吸収線③についても同様である。この非対称性は遷移に関係している準位にゼーマン項 $(\beta(L+2S) \cdot H)$, β は Bohr magneton) によって他の準位が混じり合うことを考慮することで説明できるであろう。

B 中心に属する吸収線⑬の 3 本のゼーマン成分の相対的強度は、①や③のように磁場や温度に依存していない。したがってこの中心の最低準位は一重であることが結論される。図 4.3 で示されているように、吸収線⑩と⑭の分裂の仕方は磁場に対して直線的でない。これはやはりゼーマン項による準位間の混じり合いを考えるとによって説明されるだろう。

$H \parallel \langle 110 \rangle$ のときには右回り (σ_+) と左回り (σ_-) の円偏光に対して同じゼーマンスペクトルを得たが、 $H \parallel \langle 111 \rangle$ のときにはちがったスペクトルが観測された。とくに吸収線③の一つのゼーマン成分は右回りの円偏光では強い吸収強度をもっているが、左回りの円偏光では 17 kOe 以上の磁場でその場所に強い発光線があらわれる。この原

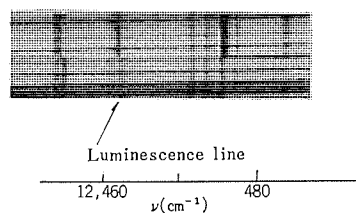


図 4.4 ZnSe : Tm, Li における Tm^{3+} の $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 遷移に対応する吸収線の $H \parallel \langle 111 \rangle$ のときの右回りと左回りの円偏光によるゼーマン効果のちがい

Difference between Zeeman patterns with circular polarizations of the absorption lines corresponding to $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ transitions of Tm^{3+} in ZnSe : Tm, Li when $H \parallel \langle 111 \rangle$.

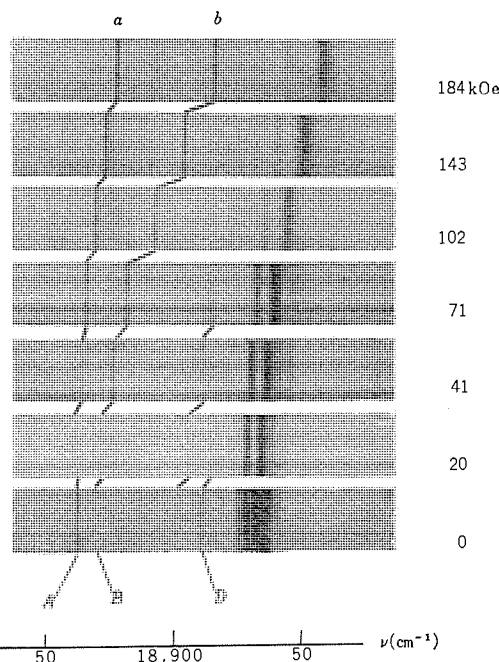


図 4.5 ZnSe : Er, P における Er^{3+} の $^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^2\text{H}_{11/2}$ 遷移に対応する吸収線のゼーマン効果。 $H \parallel \langle 110 \rangle$, 4.2°K , σ -polarization

Zeeman patterns of the absorption lines corresponding to $^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^2\text{H}_{11/2}$ transitions of Er^{3+} in ZnSe : Er, P when $H \parallel \langle 110 \rangle$ at 4.2°K with σ -polarization.

因についてはよくわかっていない。

4.2.2 ZnSe : Er, P⁽⁸⁾

Er^{3+} の基底 J -多重項 $^4\text{I}_{15/2}$ から $^2\text{H}_{11/2}$ への遷移に対応する吸収線は $5,300 \text{ \AA}$ 付近に数多くあらわれる。これらはいろいろの Er^{3+} の中心に付随しており、大変複雑なゼーマン効果を示す。すなわち磁場に対して直線的でない分裂や shift を示し、あるものは磁場による population の変化だけでなく、遷移確率も磁場に依存していると考えなくてはならない強度変化を示す。たとえば図 4.5 で示されているように、吸収線 B は零磁場では非常に弱いが、磁場が増えるのにもなってその一つのゼーマン成分 b の強度は大きくなる。吸収線 D はこの逆の様子を示す。これは遷移確率の小さな (大きな) 吸収がゼーマン項による準位間のお互いの混り合いによって、大きな (小さな) 遷移確率を持つようになると考えられる。このような磁場依存性遷移は $\text{CaF}_2 : \text{Sm}^{2+}$ でも観測されている⁽⁹⁾。

5. 電子スピン共鳴

結晶中の不対電子をもったイオン、とくに遷移金属として知られる鉄族イオンや希土類イオンは電子スピン共鳴 (Electron Spin Resonance=ESR) の重要な対象となる。磁場の中におかれたこれら遷

移金属イオンのエネルギー準位はゼーマンエネルギーによって分裂する。

ESR において注目するのはとくに基底状態の分裂であり、この間隔は数 kOe の磁場でマイクロ波エネルギーの領域となる。マイクロ波吸収線の解析から結晶場の大きさ、対称性、 g 値、超微細相互作用等の情報を得ることができる。ESR は基底状態の中での観測であるので、励起状態への吸収に比べて、高い精度で基底状態の知識が得られる。

5.1 実験

使用した ESR 装置はマイクロ波周波数 10 GHz および 34 GHz の反射形装置で、いずれも高周波磁場変調によって信号を検出している。測定は室温、77°K および 4.2°K の 3 種類の温度でおこなった。マイクロ波空洞共振器は双方とも長方形で、TE102 モードのものである。

5.2 ZnSe : Eu²⁺ の ESR

室温で観測した ZnSe : Eu²⁺ の signal は線幅が広く、各超微細構造線の分離が十分生じていない。しかし 77°K 以下の温度では線幅は非常に狭くなって、各超微細構造線が完全に分裂する。

$H \parallel \langle 001 \rangle$, 77°K で、10 GHz のマイクロ波装置によって測定したスペクトルを図 5.1 に示す。34 GHz, 77°K の測定では、10 GHz の場合とまったく同じスペクトルが見られるが、これは ZnSe 中の Eu²⁺ イオンの零磁場分離に比べて、ゼーマンエネルギーはるかに大きくなるためと思われる。Eu²⁺ イオンは 4f 軌道に 7 個の電子があり、基底状態は $^8S_{7/2}$ で表わされる。

図 5.1 で中央にある強度の大きい一群の線は 12 本からなり、これはスピン角運動量の Z 成分である M の $\frac{1}{2} \leftrightarrow -\frac{1}{2}$ 間の遷移に相当するスペクトルである。この 12 本の線は約 50 % づつ存在する ¹⁵¹Eu と ¹⁵³Eu の核スピン I による超微細構造線である。両アイソトープとも $I=5/2$ であって、両核スピンによる超微細構造線はそれぞれ 6 本づつ ($2I+1=6$)、計 12 本となる。

この線群の両側 (横軸は磁場) に出ている signal は $M=\pm\frac{3}{2} \leftrightarrow \pm\frac{5}{2}$, $M=\pm\frac{5}{2} \leftrightarrow \pm\frac{7}{2}$ に対応した微細構造線であるが、 $M=\pm\frac{3}{2} \leftrightarrow \pm\frac{5}{2}$ の遷移に相当する線は結晶場の強度が小さく十分分離していない。結局のところ、まづ結晶場と磁場によって、 $\Delta M=\pm 1$ の遷移に対応した 7 本の微細構造線が現われ、次に核スピン I との相互作用によっておのおのの微細構造線がさらに 12 本づつの超微細構造線に分かれるわけである。

(110) 面内で磁場の方向を変化させた場合の角度変化は図 5.2 のようになる。おのおのの点の一つの超微細構造線群の中心をプロットしたものである。以下に述べるように、これらの角度変化を解析することによって、Eu²⁺ イオンが立方対称な結晶場の中に存在すると考えられる。立方対称の結晶場の中におかれた Eu²⁺ イオンのスピン・ハミルトニアンは式 (5.1) で書かれる。

$$\mathcal{H} = g\beta H \cdot S + B_4^0(O_4^0 + 5O_4^4) + B_6^0(O_6^0 - 21O_6^4) + {}^{151}\text{AI} \cdot S + {}^{153}\text{AI} \cdot S \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 g は splitting factor, β は Bohr magneton, A は超微細相互作用の結合定数、 I は核スピンのオペレータである。式 (5.1) の表わす意味は付録に詳しい。Eu²⁺ イオン ($S=7/2$) の $\Delta M=\pm 1$ に対応した許容遷移は、一次近似で式 (5.2) のように表わされる。

$$\begin{aligned} M=7/2 \leftrightarrow 5/2 & \quad h\nu = g\beta H + 20pb_4 + 6qb_6 \\ M=5/2 \leftrightarrow 3/2 & \quad h\nu = g\beta H - 10pb_4 - 14qb_6 \\ M=3/2 \leftrightarrow 1/2 & \quad h\nu = g\beta H - 12pb_4 + 14qb_6 \\ M=1/2 \leftrightarrow -1/2 & \quad h\nu = g\beta H \end{aligned} \dots\dots\dots (5.2)$$

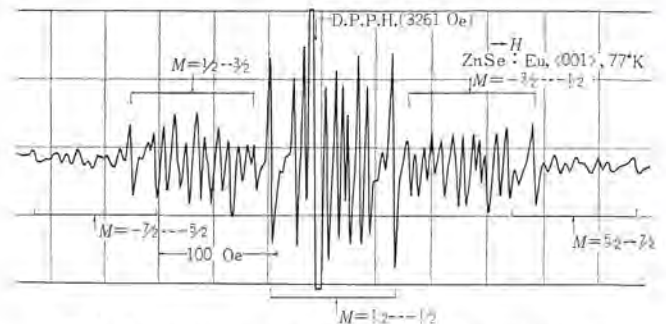


図 5.1 $H \langle 001 \rangle$ のとき、周波数 9,132 MHz で測定した ZnSe 中 Eu²⁺ イオンの ESR スペクトル
ESR spectrum of Eu²⁺ ion in ZnSe with $H \langle 001 \rangle$ at 9,132 MHz.

表 5.1 ¹⁵¹Eu と ¹⁵³Eu 原子核の性質
Properties of ¹⁵¹Eu and ¹⁵³Eu nuclei.

	核スピン I	核磁気能率 μ_N	Natural abundance
¹⁵¹ Eu	5/2	3.4	47.8 %
¹⁵³ Eu	5/2	1.5	52.2 %

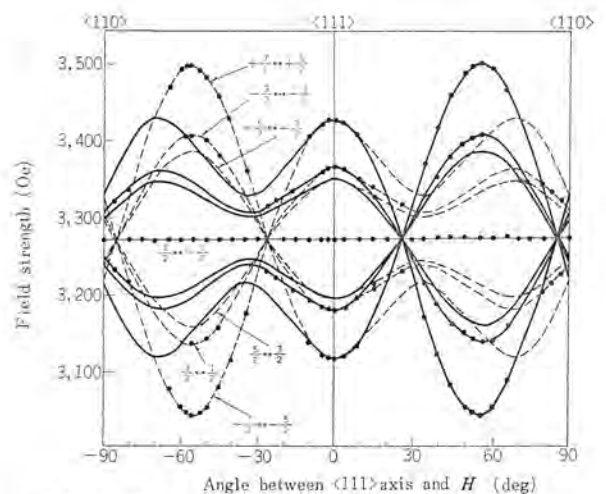


図 5.2 ZnSe : Eu²⁺ の ESR signal の (110) 面内での角度変化
Angular variation of ESR signals of ZnSe : Eu²⁺ in (110) plane.

$$\begin{aligned} M=-\frac{1}{2} \leftrightarrow -\frac{3}{2} & \quad h\nu = g\beta H + 12pb_4 - 14qb_6 \\ M=-3/2 \leftrightarrow -5/2 & \quad h\nu = g\beta H + 10pb_4 + 14qb_6 \\ M=-5/2 \leftrightarrow -7/2 & \quad h\nu = g\beta H - 20pb_4 - 6qb_6 \end{aligned}$$

ただし超微細相互作用による分裂は除いてあり、 $B_4^0 = (1/60)b_4$, $B_6^0 = (1/1260)b_6$ とおいた。 p, q は下の式で表わされ、(l, m, n) は磁場 H の立方対称軸に関する方向余弦である。

$$\begin{aligned} p &= 1 - 5(l^2m^2 + m^2n^2 + n^2l^2) \\ q &= 21/2 \{ 11l^2m^2n^2 - (l^2m^2 + m^2n^2 + n^2l^2) \} \end{aligned} \dots\dots\dots (5.3)$$

図 5.2 の実測点を結ぶ実線および破線は、実測による角度変化に合うように定めた理論曲線であって、これに用いた b_4, b_6, g, A の値は表 5.2 に CdTe の値⁽¹⁰⁾ とともに示す。図 5.2 から明らかなように Eu²⁺ イオンには磁場をかけたとき等価でない二つの site がある。解りやすくするために、図 5.2 では等価でない二つの site に対応した角度変化を分離して一方は実線、他方は破線で表わされて

表 5.2 77°K における ZnSe および CdTe 中の Eu^{2+} イオンのスピンハミルトニアンパラメータ (g 以外の単位は 10^{-4}cm^{-1})

Parameters of spin Hamiltonian for Eu^{2+} ions in ZnSe and CdTe at 77°K (All values except g are in units of 10^{-4}cm^{-1}).

	g	b_4	b_6	$A^{151}\text{A}$	$A^{153}\text{A}$
ZnSe	1.993 ± 0.001	-9.87 ± 0.15	0.28 ± 0.25	-21.8 ± 0.2	-9.8 ± 0.1
CdTe	1.9917 ± 0.0007	-7.66 ± 0.10	-0.12 ± 0.14	-23.19 ± 0.15	-10.25 ± 0.10

いる。

この二つの等価でない Eu^{2+} イオンの角度変化は 3 回対称軸 $\langle 111 \rangle$ に関して対称であるから、結局のところ $\langle 111 \rangle$ 軸について互いに 180° だけ Eu^{2+} イオンの回りの結晶場が回転していることになる。これは zinc blende 形の結晶が成長してゆく過程で $\langle 111 \rangle$ 軸のまわりに 180° つまり 60° ($\langle 111 \rangle$ 軸は 120° 対称であるから) だけ回転して成長した層が存在することが考えられ、結晶中に積層欠陥のあることを示している。

5.3 考 察

表 5.2 に示したスピンハミルトニアンパラメータ b_4, b_6, A の符号は次の方法で決定した。 b_4, b_6 の符号は $\langle 001 \rangle$ 方向に磁場をかけたとき 4.2°K で、両翼に出る $\pm 7/2 \leftrightarrow \pm 5/2$ に相当した微細構造線の相対強度の違いから決めた。 4.2°K では低磁場側に出る微細構造の強度が大きい。したがって、この低磁場側のスペクトルのほうがより低いエネルギー準位にあるから、これは $M = -7/2 \leftrightarrow -5/2$ に相当し、式 (5.2) から b_4 が負であることがわかる。 b_6 は角度変化の解析から b_4 と異なった符号になり、正である。

A の符号は、一つの超微細構造群の中では相対強度の変化がまったくないため b_4 と同じ方法で求めることはできない。超微細相互作用はおもに $4f$ 電子による s 電子のスピン分極から生ずるのであるから、結晶の違いによって多少異なった値をとるとしても、異なった符号をとることはないと考えられる。また混じり合った $^8\text{P}_{7/2}$ 状態による寄与もあろうが、これはきわめて小さい。故に他の結晶中の Eu^{2+} イオンの A の符号を参照して負であるとした。

前述のとおり角度変化の観測から磁場に対して二つの等価でない Eu^{2+} イオンが存在することが判明した。この ZnSe 単結晶を粉状にしたものは X 線解析によると zinc blende 構造であるが、積層欠陥によって始めの zinc blende 層に対して 60° 回転 ($\langle 111 \rangle$ 軸回りに) して成長した結晶層も共存すると考えられる。

立方対称電場による基底状態 $^8\text{S}_{7/2}$ の零磁場分離については、Baker ら⁽¹¹⁾によって求められており、 $\text{CaF}_2 : \text{Eu}^{2+}$ では図 5.3 のように表わされる。実験より求めた b_4, b_6 の値から、その分離エネルギーは $\Gamma_0 - \Gamma_7 = 318.08 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$, $\Gamma_8 - \Gamma_7 = 128.52 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$ となる。それぞれのエネルギー準位は下から $\Gamma_7, \Gamma_8, \Gamma_0$ の順となる。CdTe の b_4, b_6, g の値との比較から ZnSe 中においては CdTe の場合と同様、陽イオン Zn site に Eu^{2+} イオンが単純に置換されていると考えられる。

g 値の、自由電子の値からのずれは基底状態 $^8\text{S}_{7/2}$ への第一励起状態 $^6\text{P}_{7/2}$ の混ざりによって生じている。この g -shift から $^8\text{S}_{7/2} \leftrightarrow ^6\text{P}_{7/2}$ 間のエネルギー差 ($E_P - E_S$) を求めることができる。 g 値は、

$$g = (1 - \alpha^2)g(^8\text{S}_{7/2}) + \alpha^2g(^6\text{P}_{7/2}) \dots\dots\dots (5.3)$$

ただし $\alpha = (14)^{1/2} \cdot \lambda / (E_P - E_S)$

であって、ここで λ はスピン軌道相互作用の係数である。測定値よ

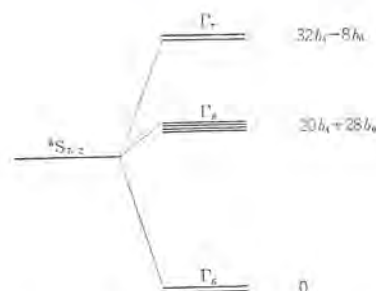


図 5.3 立方対称場の中の $^8\text{S}_{7/2}$ 準位の零磁場分離
Zero field splitting of $^8\text{S}_{7/2}$ level in cubic crystal field.

り $E_P - E_S$ を求めると、 $E_P - E_S \approx 32,000 \text{cm}^{-1}$ となる。この値は他の結晶中の Eu の値ともよく一致している。

6. む す び

ZnSe : Er, X (X=P or Cu) 系において、 Er^{3+} の発光線の強度は電荷補償として入れた codopant X によって著しく変化し、 $X=\text{Cu}$ のときにもっとも強い。吸収スペクトルも同様で、これは RE が codopant と密接に結びついた複合中心を作っていることを示している。codopant X を入れない場合でも Er^{3+} は立方対称よりも低い対称性の結晶場中にあり、何らかの不純物または格子欠陥と結合した中心を作っている。また ZnSe : Er, P では non-linear なゼーマン効果と磁場依存性遷移が観測された。

ZnSe : Tm, X (X=Li or Cu) 系では Tm^{3+} に対して同じ対称性とほとんど同じ大きさの結晶場をもつ中心 (A 中心) が存在し、この中心にある Tm^{3+} は強い発光を示す。この中心はゼーマン効果により立方対称をもつことがわかり、実験で得られたスペクトルにもっともよく合うように定められた立方対称場のパラメータ $A_4^0 \langle r^4 \rangle$ と $A_6^0 \langle r^6 \rangle$ は、おおよそ 15.08cm^{-1} と -2.49cm^{-1} である。この中心の吸収線と発光線は上下非対称のゼーマン分裂を示すが、ゼーマン項による準位間の mixing を考えることで説明できるだろう。

ZnSe : Eu の Eu^{2+} の ESR の測定から Eu^{2+} は立方対称をもった中心を作っていることがわかり、下記のパラメータの値が決定された。またこの値を使って initial splitting の大きさを計算した。

$$g = 1.993 \pm 0.001, \quad b_4 = -(9.87 \pm 0.15) \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}, \quad b_6 = (0.28 \pm 0.25) \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}, \quad A^{151} = -(21.8 \pm 0.2) \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}, \quad A^{153} = -(9.8 \pm 0.1) \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$$

ESR の角度変化より本論文で使った結晶 (ブリッジマン法で製作された) には積層欠陥があることがわかった。

以上、この研究によって得られた ZnSe 結晶中の RE の分光学的実験およびその解析の結果を述べたが、今後 RE 中心の形とその中の RE の電子状態とをより一層明確にするため、さらに精密な実験、解析を行なう考えである。またこれと同時に発光の時間分解スペクトルの測定等を行ない、上に述べた実験、解析から得られるであろう RE 中心の複合構造と合わせて、RE の発光機構、エネルギー伝達の機構を解明し、効率よく RE の発光を取出すための条件を追求したい。

参 考 文 献

- (1) 木村, 小宮, 伊吹 : 三菱電機技報 41, 1461 (昭 42)
- (2) G. H. Dieke : Advances in Quantum Electronics, Edited by J. R. Singer (1961) p.170
- (3) W. W. Anderson : Phys. Rev. 136, A 556 (1964)

- (4) H. Komiya : J. Phys. Soc. Japan 23, 666 (1967)
 (5) J. D. Kingsley : Bull. Am. Phys. Soc. 10, 332 (1965)
 H. Komiya : J. Phys. Soc. Japan 24, 216 (1968)
 (6) E. Y. Wong and I. Richman : J. Chem. Phys. 34, 1182 (1961)
 (7) A. J. Freeman and R. E. Watson : Phys. Rev. 127, 2058 (1962)
 (8) H. Masui, H. Komiya and S. Ibuki : J. Phys. Soc. Japan

24, 651 (1968)

- (9) M. H. Crozier : Phys. Rev. Letters 13, 394 (1964)
 (10) R. S. Title : Phys. Rev. 133, A 198 (1964)
 (11) J. M. Baker et al : Proc. Roy. Soc. (London) A 247, 141 (1958)
 (12) K. W. H. Stevens : Proc. Phys. Soc. (London) A 65, 209 (1952)

付 録

(1) RE の $4f$ 準位

RE 原子は core の外側に $(4f^m)(5s^2)(5p^6)(5d^k)(6s^2)$ なる電子配置を持ち、 k は 0 または 1 である。RE²⁺ ではこのうちの $(6s^2)$ がなくなり、RE³⁺ で $(5d^1)$ または $(4f^m)$ のうちの 1 個を失う。その結果電子配置は $(4f^n)(5s^2)(5p^6)$ となり、 n は Eu²⁺ が 7, Er³⁺ が 11, Tm³⁺ が 12 である。 f 電子は 14 個で閉殻を作るが、RE ではこれが不完全殻となっているために、 $4f$ 電子系全体での全軌道角運動量 L と全スピン S は 0 にならず、量子数 (L, S) で表わされる何種類かの状態が可能になる。

これらの状態は $4f$ 電子相互間のクーロン相互作用の大きさが異なるために互いに違ったエネルギーを持つが、この準位を ^{2S+1}L で表わし、 L の部分には $L=0, 1, 2, \dots$ に応じて S, P, D, \dots という記号を用いる。これらの準位はスピン軌道相互作用により、さらに全角運動量 J (J は L と S のベクトル和の絶対値、すなわち $J=1L+S1$ である) で記述される準位に分裂するが、これを J -多重項とよび $^{2S+1}L_J$ なる記号で表わす。

このスピン軌道相互作用のエネルギーが大きくなって、クーロン相互作用のエネルギーと同程度になると、 J は保存されるが L, S は保存されなくなり、 J が同じで L, S の異なる状態が互いにまじり合うようになる。このような場合を intermediate coupling とよんでいるが、RE の $4f$ 電子系もこの状態にある。したがってたとえば $^2H_{11/2}$ という記号で書かれていても、実際には $J=11/2$ であるが L, S は純粋に $^2H(L=5, S=1/2)$ ではない。

J -多重項は量子数 (J, J_z) で記述される $2J+1$ 個の状態が縮退したものになっており、これに外部電場や外部磁場がかかるとさらに分裂する。前者をシュタルク効果、後者をゼーマン効果とよんでいる。結晶場分裂はこのシュタルク効果の一種であるが、一般には結晶場の対称性のために縮退が完全にとけない。そこでこれに磁場をかけると、結晶場では縮退していた準位がさらに分裂する。本論文での RE イオンのゼーマン効果 (ESR も含めて) というのは、現象的にはだいたいこのようなものだと考えてもらえばよい。

RE の $4f$ 電子は前述のように $(5s^2)(5p^6)$ 閉殻の内側にあり、外部からシールドされているため、結晶中にはいっても自由イオンに近い状態を保っている。したがってその準位はシャープで、その間の遷移による吸収や発光はするどい線状となる (幅 $\sim 1\text{ cm}^{-1}$ またはそれ以下)。また本来これらの遷移は $4f$ 準位内のものであるから禁

制であるが、種々の理由によって $4f$ 以外の状態がわずかにまじっており、振動子強度にして 10^{-5} 程度の遷移確率を持つ。

(2) J -多重項の結晶場分裂

結晶場による J -多重項の分裂は、結晶電場がその J -多重項状態にある $4f$ 電子系に及ぼす、クーロンポテンシャルエネルギーを計算することによって得られる。 $4f$ 電子系にかかる結晶電場の形は、RE のまわりの電荷配置の対称性によって決定されるので、その結晶電場が $4f$ 電子系に及ぼすクーロンポテンシャルエネルギー、すなわち結晶場ハミルトニアンも、RE のまわりの電荷配置の対称性によって、ある決まった形に書くことができる。

立方対称における結晶場ハミルトニアン \mathcal{H}_c は、4 回軸を Z 軸にとると、operator equivalent method⁽¹²⁾ (結晶場ハミルトニアンの一つの計算法) を用いて次のように書くことができる。

$$\mathcal{H}_c = B_4^0(O_4^0 + 5 \cdot O_4^4) + B_6^0(O_6^0 - 21 \cdot O_6^4) \dots \dots \dots (\text{付 1})$$

ここで B_4^0, B_6^0 は結晶場パラメーター、また O_n^m は operator equivalent とよばれ J と J_z を用いて表わすことができる。また結晶場パラメーター B_n^m は次式のようになる。

$$B_n^m = \eta_n \theta_n A_n^m \langle r^n \rangle \dots \dots \dots (\text{付 2})$$

ここで η_n は $(5s^2), (5p^6)$ 閉殻等による外部電場に対する shielding factor である。また θ_n は通常 $n=2, 4, 6$ に対して α, β, γ なる記号で書かれ、 J -多重項によって変化する A_n^m は RE のまわりの電荷分布が決まれば計算できるパラメーター、 $\langle r^n \rangle$ は f 電子の軌道半径 r の n 乗の平均値を表わす。

磁場がかかると、電子系の磁気能率 $(-\beta(L+2S))$, β は Bohr magneton) とその磁場との相互作用により

$$\beta(L+2S) \cdot H \dots \dots \dots (\text{付 3})$$

の項が式(付 1)にあらたにつけ加わる。この式のことをゼーマン項とよぶ。ESR では普通、最低 J -多重項だけを問題にする。RE では最低多重項については Russel-Saunders 結合がよい近似で、このときゼーマン項は

$$g\beta H \cdot J \dots \dots \dots (\text{付 4})$$

とかける。ここで g は g -値とよばれる。Eu²⁺ では最低 J -多重項は $^8S_{7/2}$ で $L=0$ のため、 $J=S$ となり、式(付 3)は

$$g\beta H \cdot S$$

となる。また核スピンとの超微細相互作用のため $AI \cdot S$ の項がさらにつけ加わる。

ポリイミドの物理的性質

柴山 恭一*・田中 誉郎**

Physical Properties of Polyimide

Central Research Laboratory Kyoichi SHIBAYAMA・Takao TANAKA

Aromatic polyimide is known as a heat resistant polymer and now widely used for industrial purposes because of its excellent strength against impact or its toughness as well as the heat resistance. A polyimide film is very tough with high elastic modulus over a wide range of temperature. The objective of the article is to make clear of molecular motions at low temperatures which would associate with the excellent strength properties of polyimide. Mechanical, dielectric, NMR and thermal measurements were carried out with a series of polypyromellitimide films having different degrees of imide ring formation. A substantial molecular motion in polyimide was found taking place at low temperatures. This is supposed to be due to the local mode motion similar to that found in linear polymeres, and correlated with the high toughness of polyimide.

1. ま え が き

イミド環を主鎖にもつポリイミドは耐熱性高分子材料として注目され、マグネットワイヤ被覆およびフィルム材料としてはすでにかんりの規模で使用されている。耐熱性、電気的性質および機械的強度など各種の点で釣合いがとれており、使用実績の高いポリイミドとして、マグネットワイヤ用のMLおよびフィルム材料のKaptonがある。これらは、ピロメリット酸ジ無水物と第一ジアミンの付加によってできるポリアミド酸を加熱することによって作られるポリピロメリットイミド形ポリイミドとされている。その繰返し単位の構造は、図1.1に示すように環状の剛直な分子鎖からなっており、通常の線状高分子に存在する主鎖セグメントのミクロブラウン運動(ガラス転移)のような大規模な運動は、大きな障害を受けていると考えられる。

Tobolskyらは、ねじれ振子により $-100\sim+500^{\circ}\text{C}$ の温度範囲における力学的性質を測定し、この温度域で弾性率はほとんど温度に依存せず、明らかな転移をまったく示さないことを報告している⁽¹⁾。これはTatumらの研究と一致している⁽²⁾。しかしこれらのポリイミドフィルムが室温で高い弾性率を有しながら、一方非常に強じんであることから考えて何らかの緩和機構が室温以下で存在することが期待される。

Ikedaは、ねじれ振子によりピロメリット形ポリイミドの1c/sにおける動的力学性質を調べ、 -80°C に緩和過程が存在することを見出した⁽³⁾。Bernierらは、動的力学性質の測定から -43°C に損失ピークの存在を示した⁽⁴⁾。しかしこのような高分子の分子運動に関する知見は少なく、これらの研究においては、緩和過程の原因となる分子運動機構について、まだ十分な結論が得られていない。

この研究では、ポリイミドに存在する分子運動の機構を明らかにし、そのすぐれた特性の発現する原因を追求することを目的として、イ

ミド化の異なる一連のポリピロメリットイミドフィルムについて、力学的性質・誘電的性質・核磁気共鳴(NMR)の線幅および熱的性質の測定を行なった。またポリイミドを高温高圧水蒸気の下で長時間処理した試料についても実験した。

2. 実 験

2.1 試 料

ポリアミド酸は、ジメチルアセトアミド(DMA)溶液中でピロメリット酸ジ無水物と芳香族ジアミンの重縮合反応から作った。ポリアミド酸のフィルムは、室温で30時間真空中(10^{-1} mmHg)に置きDMAを取り除いて作った。イミド化の異なる系列として、ポリアミド酸フィルム(No. 1)を異なった温度で、異なった時間加熱して得たフィルムを用いた。すなわち 150°C で60分(No. 2)、 160°C で70分(No. 3)、300分(No. 4)および555分(No. 5)、および 250°C で6時間(No. 6)である。またポリイミドフィルム(No. 6)をガラス管に封入し、 150°C 飽和蒸気圧下で137時間(No. 7)処理した後 200°C で2時間乾燥させた試料も作製した。試料はすべて乾燥剤を入れたデシケータ中に保存した。用いた試料をまとめて表2.1に示す。

2.2 粘弾性の測定

試料No. 1~7に対する複素弾性率 E' (貯蔵弾性率)および E'' (損失弾性率)を直読式粘弾性スペクトロメータにより周波数138 c/s、 $-120\sim+300^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で測定した。No. 1~5についてはイミド化の進行による試料の変化が起こらない程度の温度まで測定した。

2.3 誘電性質の測定

試料No. 6および7に対する誘電損失 ϵ'' の測定は、変成器ブリッ

表 2.1 測定に用いた試料
Samples used for measurements.

試 料 No.	処 理 温 度 と 時 間
1	ポ リ ア ミ ド 酸
2	150°C 60 分
3	160°C 70 分
4	160°C 300 分
5	160°C 555 分
6	250°C 360 分
7	150°C 137 時間 (水蒸気処理)

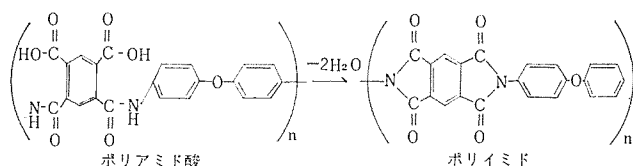


図 1.1 イミド環形成反応
Imidizing formation reaction.

じ法により周波数 30c/s~100 kc, -160~+180°C の温度範囲において、低温では乾燥窒素ガス雰囲気中、高温では空気中で行なった。電極およびガードリングは銀粉塗料を用いた。

2.4 NMR 吸収線の線幅の測定

通常の広幅装置により磁場強度 4000 ガウス, 17 Mc の共鳴周波数で Pound Watkins 形検出器を使って -196°C から 200°C の温度範囲で試料 No. 6 について測定を行ない、記録計上に得られた微分吸収曲線から極大間の線幅 (ΔH_{P-P}) を求めた。

2.5 熱解析の測定

DSC-1 差動熱量計 (Perkin Elmer 製) により試料 No. 1 および 6 について、190°K から 660°K までの熱図を得た。昇温速度は 20°C/分を用いた。

DSC では、標準および試料ホルダの温度を同一に保つために必要なそれぞれに供給される熱量の差を読みとる。測定の範囲で一次転移または化学変化を含まないとすれば、指示値は式 (2.1) で与えられる。

$$\gamma = \frac{dQ_s}{dt} + \frac{dQ_2}{dt} - \frac{dQ_1}{dt} \quad (2.1)$$

ここに Q_s : 試料に加えらる熱量

Q_1 : 標準ホルダに加えらる熱量

Q_2 : 試料ホルダに加えらる熱量

試料の比熱を C_p とし単位重量の試料を用いるとすれば、

$$Q_s = C_p \cdot dT$$

であり、等速昇温条件

$$dT = \theta \cdot dt$$

のもとでは、式 (2.2) のように書きかえられる。

$$\gamma = \theta \cdot C_p + K(T) \quad (2.2)$$

ここに

$$K(T) : \frac{dQ_s}{dt} - \frac{dQ_1}{dt}$$

$K(T)$ は、実際には 0 となるような較正を、測定の全温度域について行なうためには、複雑な操作を必要とする⁽⁵⁾。したがって $K(T)$ と試料のガラス状態における比熱の温度依存の両者を含めたものを基線としてとることになる。熱図から読みとられる基線からのずれ $\Delta\gamma$ は、ガラス転移の前後における比熱の差 ΔC_p と比例関係にあると考えられる。

$$\Delta\gamma = \theta \cdot \Delta C_p \quad (2.3)$$

2.6 赤外吸収スペクトル

各試料フィルムを全反射法により 600~5000 cm^{-1} の波長域で測定した。

2.7 密度の測定

4 塩化炭素とベンゼンを用いて、浮沈法によって試料 No. 1, 6 および 7 の密度を求めた。

2.8 X 線による測定

通常の X 線回折装置により電圧 30 kV, 電流 7.5 mA, 1°/分の角速度で、試料 No. 6 および 7 について回折強度曲線を得た。

3. 結 果

試料 No. 1~7 に対する E' , E'' -温度曲線を図 3.1 に示す。 E'' -温度曲線において、試料 No. 7 は、-55°C に吸収極大を示す。これ以上には 300°C までに大きな変化は見られない (図 3.2)。試料 No. 1 は、-40°C と 8°C に吸収極大を示し、焼付け温度の上昇お

よび加熱時間にともなって 8°C の吸収がなくなり、-40°C の吸収は、高温側がけずられながら試料 No. 5 の吸収へ近づく傾向が見られる。試料 No. 6 と 7 では -40°C の吸収はさらに小さくなる。

図 3.3 は、試料 No. 6 の NMR 吸収線幅 ΔH_{P-P} の温度変化曲線で、-110°C~-70°C に狭化が認められる。未乾燥試料では、-70°C 付近から図 3.4 のような狭幅成分が現われるが、乾燥試料でまったく消失することから、この狭幅成分は試料に吸着した水分子によるものであることがわかる。

試料 No. 6 および 7 の誘電損失 ϵ'' の周波数分散曲線を図 3.5 に、図 3.5 から求めた 100 c/s の温度分散曲線を図 3.6 に示す。図 3.5, 図 3.6 から明らかなように、No. 6 は 100 c/s で -65°C, No. 7 は 100 c/s で -55°C 付近に ϵ'' の吸収極大を持ち、高温水蒸気処理することにより (No. 7), その高さは大きく減少している。図 3.5 の吸収極大の周波数 f_m を測定温度 (°K) の逆数 $1/T$ に対してプロットすると、図 3.7 の直線関係が得られる。 f_m と温度 T (°K) は、つぎの関係で表わされる。

$$f_m = A \exp \frac{\Delta H}{RT} \quad (3.1)$$

ここに A : 定数

ΔH : 活性化エネルギー

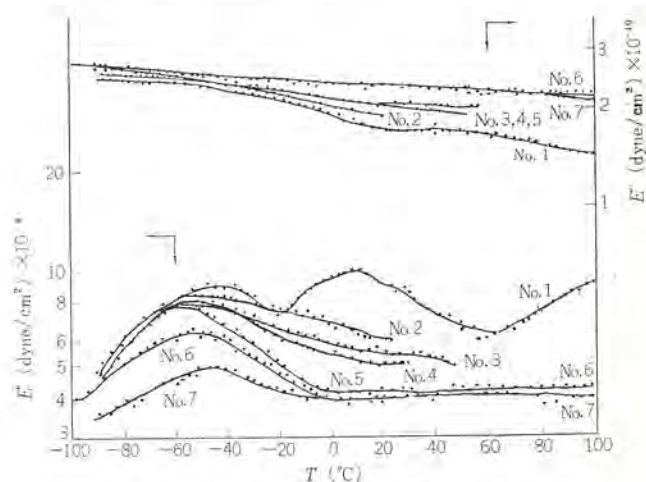


図 3.1 試料 No. 1~6 に対する複素弾性率, E' および E'' の温度分散曲線
Complex Young's moduli, E' and E'' , vs. temperature curves for samples No. 1 to No. 6.

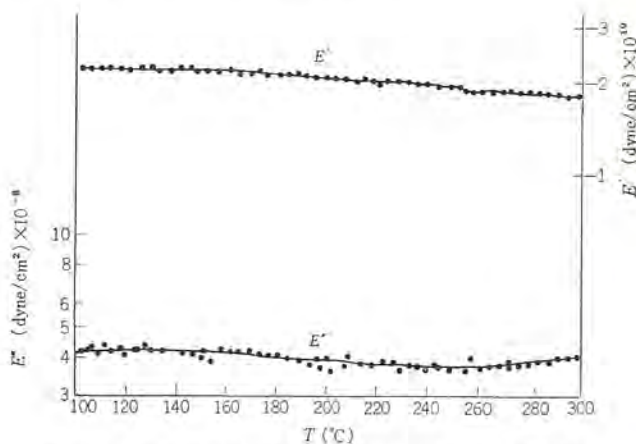


図 3.2 試料 6 の高温における複素弾性率, E' および E'' の温度分散曲線
Complex Young's moduli, E' and E'' , vs. temperature curves for sample No. 6 at high temperature region.

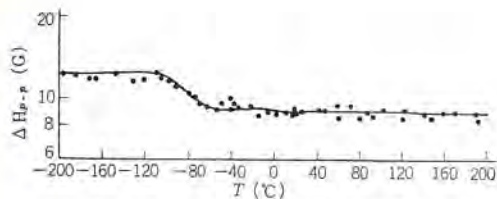


図 3.3 試料 No. 6 に対する NMR 線幅の温度変化曲線

Temperature variation of NMR line width for sample No. 6.

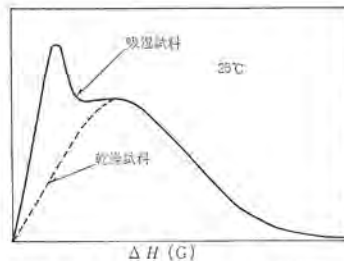


図 3.4 試料 No. 6 の NMR 微分吸収曲線

One half of derivative of NMR absorption line of sample No. 6.

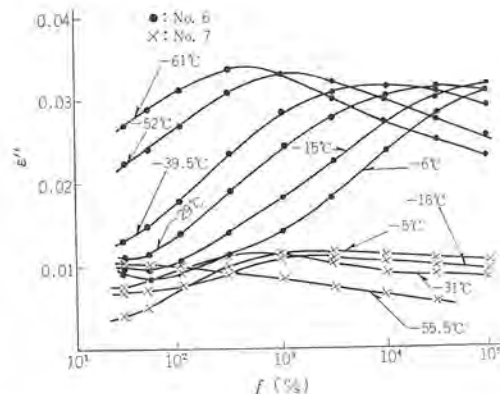


図 3.5 試料 No. 6 および No. 7 に対する誘電損失 ϵ'' の周波数分散曲線

Dielectric losses ϵ'' vs. frequency curves for sample's No. 6 and No. 7.

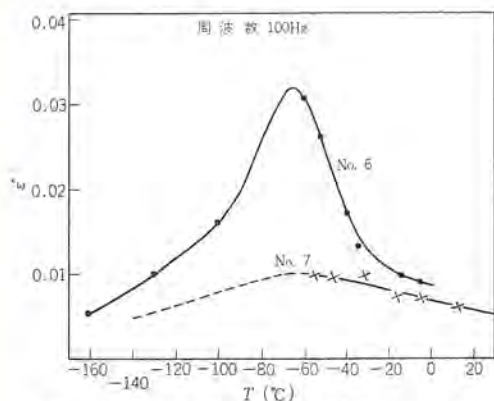


図 3.6 試料 No. 6 および No. 7 に対する誘電損失 ϵ'' の温度分散曲線

Dielectric losses ϵ'' vs. temperature curves for samples No. 6 and No. 7.

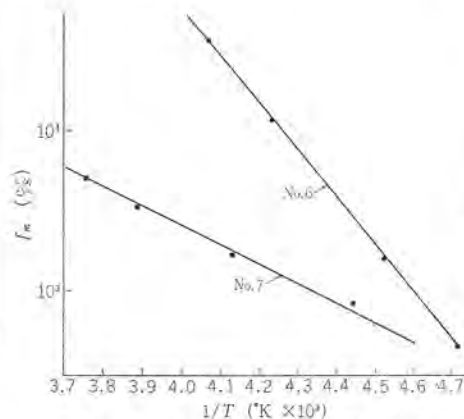


図 3.7 試料 No. 6 および No. 7 に対する $\log f_m - 1/T$ プロット
Log $f_m - 1/T$ plots for samples No. 6 and No. 7.

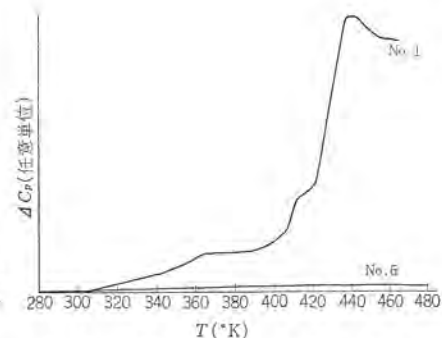


図 3.8 試料 No. 1 および No. 6 の DSC 熱図

DSC thermograms of samples No. 1 and No. 6.

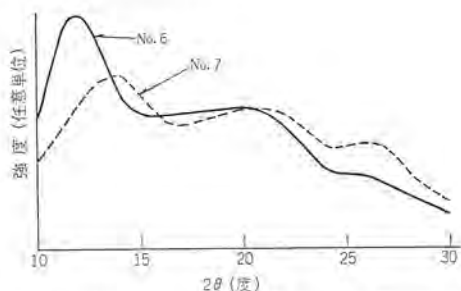


図 3.9 試料 No. 6 および No. 7 に対する X 線回折強度曲線

X-ray diffraction curves for samples No. 6 and No. 7.

R : 気体定数

式 (3.1) から, $\log f_m$ を $1/T$ に対してプロットし, 得られた直線の傾斜から見かけの活性化エネルギー ΔH が求められる。図 3.7 の直線の傾斜から求めた低温吸収機構の見かけの活性化エネルギーは, 試料 No. 6 で 13.38 kcal/mol, 試料 No. 7 で 5.02 kcal/mol となる。図 3.7 から求めた 1 kc における吸収極大の位置は, 試料 No. 6 で -55.5°C , 試料 No. 7 で -43°C である。

試料 No. 1 および 6 に対する DSC の熱図を図 3.8 に示す。No. 1 は 430°K にピークを示し, 基線のずれは 300°K 付近に起こる。No. 6 では基線のずれおよび吸熱ピークともまったく消失し, 540°K までに何の変化も認められず, 熱分解ピークへつながる。

図 3.9 に, 試料 No. 6 および 7 に対する X 線回折強度曲線を示す。No. 6 に見られる 12° 付近のピークは, 高温水蒸気処理 (No. 7)

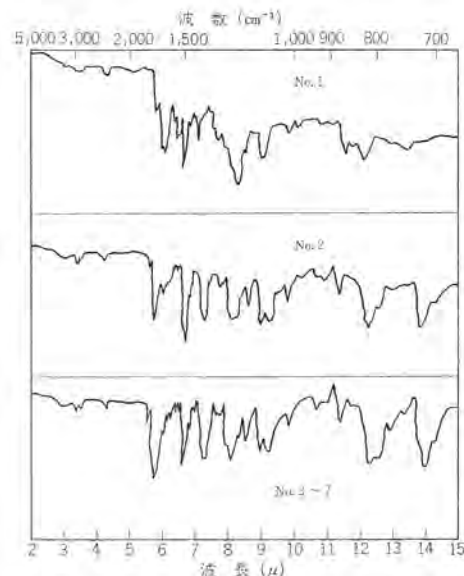


図 3.10 試料 No. 1~7 の赤外吸収スペクトル

Infrared spectra of samples No. 1 to No. 7.

することにより高さが減じ, 高角度側へ移動する。

試料 No. 1~7 に対する赤外吸収スペクトルを図 3.10 に示す。No. 1 と 6 のスペクトルはジフェニルエーテルジアミンを用いたポリビロリットアミド酸とポリビロリットイミドの典型的な形を示している。No. 2 のスペクトルは, イミド結合の -CO の伸縮振動による吸収が少し小さく現

表 3.1 試料 No. 1, No. 6 および No. 7 の物理的性質
Physical properties of samples No. 1, No. 6, and No. 7.

試料 No.	粘弾性 ピーク °C	誘電性 ピーク °C, 1 kc	NMR 狭化温 度, °C	ΔH kcal/ mol	DSC		密度, 30°C g/cc	赤外ス ペクト ル	X 線
					T_m °K	T_g °K			
1	-40.8	—	—	—	390	292	1.291	異	—
6	-55	-55.5	-110~ -70	13.38	なし	なし	1.420	同	異
7	-47	-43	—	5.02	—	—	1.428	同	異

われる。No. 3~5 のスペクトルは、No. 6 のスペクトルと変わらず、差違は認められない。高温高圧水蒸気処理しても (No. 7), スペクトルは No. 6 のものとまったく同じである。

密度は No. 1 が一番小さく、No. 7 は No. 6 より大きい値を示す。

以上の結果を表 3.1 にまとめる。

4. 考 察

一般に、高分子物質には 3 種類の分子運動が存在する。高温側からガラス-ゴム転移にもとづく主分散、側鎖の回転にもとづく副分散および主鎖の局所的熱運動にもとづく Local Mode 分散である。このほかに、結晶性高分子では、結晶の融解と Disordering にもとづく結晶分散が存在する。

ガラス転移は、低温のガラス状態で、熱的に準安定な局所的平衡配置の近傍の振動運動のみを行なっている高分子鎖が、局所的平衡配置のポテンシャルエネルギーより大きい熱エネルギー kT を得て、一つの局所平衡配置から隣りの局所平衡配置へとつぎつぎに移動することによって発現するもので、図 1.1 のような主鎖の繰返し単位を持つポリイミドでは、局所平衡配置間のポテンシャル障壁は非常に大きく、それをこえるに必要な熱エネルギーを与えられる温度域は、かなり高温であると予想される。

試料 No. 6 の E'' -温度曲線において、300°C までに -55°C の吸収極大以外に大きな変化が見られず、 E' は 10^{10} dyne/cm² 以上の値を持ち大きな減少を示さないこと、NMR 線幅 (ΔH_{P-P}) が、-70°C から 200°C まで変わらないこと、および DSC の熱図に、なんの変化も認められず、分解のピークへつながることから、図 1.1 の形のポリイミドには、一般の線状高分子に見られるガラス転移のような主鎖全体の大きな運動は、熱分解温度以下には存在しないと考えられる。

Bernier ら⁽⁴⁾は、ポリイミドの動的力学性質の測定から、402°C に明瞭な損失ピークを示した。それに対応して弾性率の減少が見られ、この緩和は、無水セグメントを含む大規模な主鎖運動によるとしている。しかしこの温度域で、試料は熱分解により破壊されることを報告しており、損失は一方的な増加を示し極大が見られないこと、さらに弾性率の減少は、非常に小さくゆるやかであることから、損失の立上りは、熱分解によるものか、あるいは主鎖のセグメント運動を含んでいるとしても、同時に起こる熱分解による所が大きいと考えられる。

図 3.3 から、-90°C 付近に NMR 線幅の狭化が認められ、この温度域で何らかの運動が存在することを示している。図 3.1 の -55°C (138 c/s) の E'' 吸収、図 3.5 および 3.6 の -55.5°C (1 kc) の ϵ'' の吸収は、その温度位置から見て、NMR 線幅の狭化と同じ機構の分子運動にもとづくものと考えられる。この機構の活性化エネルギー (ΔH) 13.38 kcal/mol. は、通常の線状高分子に存在する主鎖の局所的熱運動にもとづく分散の活性化エネルギーと同程度であり (10

~20 kcal/mol.)⁽⁶⁾、線状高分子におけるこの種の運動と同じぐらいの規模の運動であると考えられる。

Bernier らは、試料を乾燥すると、低温の損失ピーク (-43°C) は大きく減少すること、吸湿試料の方が、低温における弾性率が高いことから、分子鎖と水素結合を形成する吸湿水分子によるとしている⁽⁴⁾。しかし室温におけるポリイミドの最大吸湿量は、3.0% にすぎず⁽⁷⁾ (Bernier らの場合 1.3%)、さらにわれわれの力学的および誘電的測定において、十分乾燥した試料で明瞭な E'' -ピーク (-55°C) および ϵ'' -ピーク (-55.5°C) が見られること、NMR の測定において、吸湿水分子の運動は、主鎖の広幅成分とは別に狭幅成分として現われ (図 3.4)、狭幅成分の全く現われない乾燥試料で、広幅成分の狭化が、低温で認められることから、ポリイミドに存在する低温緩和は、吸湿水分子そのものではなくて、直接的には主鎖の運動に起因すると考えられる。その運動が吸湿によって影響されることは当然考えられる。

低温緩和の原因を追求するために、試料 No. 1~6 までポリイミド化の異なる系列について調べた結果が図 3.1 である。ポリイミド酸は、高温で加熱すると図 1.1 の硬化機構によってポリイミドに変換する。焼付け温度が 150°C をこえると、急激にイミド化が進行することが知られている⁽⁸⁾。160°C で 70 分以上加熱した試料の赤外吸収スペクトルが、試料 No. 6 のものと差がないことから、これらの試料は、化学的にはポリイミドに近いものであると思われるが、少量のカルボキシル基の残存が試料の物理的性質に大きな影響を与えることが期待される。

一方 150°C で 60 分加熱した試料は、その赤外吸収スペクトルから、かなりのポリイミド酸鎖を含んでいると考えられる。図 3.1 の試料 No. 1 に見られる E'' の吸収の中 8°C 付近に極大をもつ吸収は、イミド化が進むと消失しすそを残すだけになることから、ポリイミド酸鎖に特有のものであり、したがってカルボキシル基の運動に関連すると考えられる。DMA 溶液からつくられたポリイミド酸のカルボキシル基は、1 分子の DMA が塩の形で結合している⁽⁸⁾ので、全体としてかなりの大きさの側鎖となっており、ここで観察された程度の吸収は、十分起こり得る。図 3.1 において、-55°C の E'' の吸収の高温側が、試料 No. 2~6 までその高さを減じているのは、イミド化の進行によるカルボキシル基の減少にもとづくと考えられる。

図 3.8 の DSC 熱図において、試料 No. 1 の 430°K ピークの発生原因について、現在のところ明らかでない。ポリイミド酸における結晶相の融解もしくはポリイミド酸鎖の環化反応 (イミド化) によるものと考えられる。300°K 付近からの基線のずれは、通常の線状高分子に見られるガラス転移にもとづく比熱の変化と同じ傾向を示している⁽⁹⁾。式 (2.3) から明らかなように、基線のずれの変化は、比熱の変化と比例関係にある。ポリイミド酸の結果について、式 (2.3) からこの転移による比熱の変化 ΔC_p を求めると、0.216 cal/g · °C となり、通常の線状高分子のガラス転移点上下における比熱の差とオーダにおいて一致する⁽¹⁰⁾。以上のことから、試料 No. 1 にはガラス転移もしくはそれに類似した分子鎖セグメントの運動が存在すると考えられる。試料 No. 1 の粘弾性質を 200°C まで測定すると、160°C 以上でイミド化の進行により弾性率は徐々に増加するが、60°C 付近から貯蔵弾性率 E' はかなり急激に減少することから見て、図 3.1 のポリイミド酸の E'' -温度曲線に見られる 60°C 付近からの立上りは、ガラス転移もしくはそれに類似したセグメント運動によって発現する分散につながるものと考えられる。

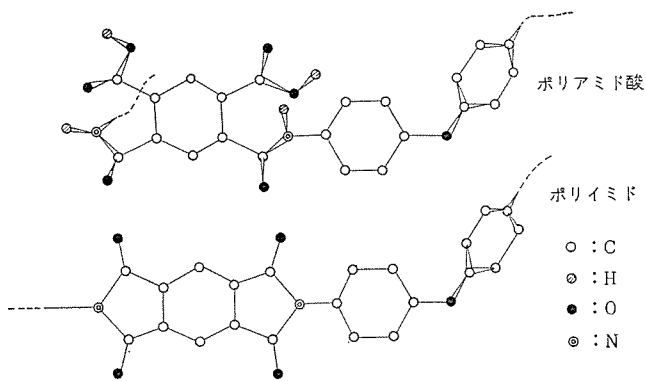


図 4.1 ポリアミド酸とポリイミドの繰返し単位の構造
Structures of repeat units for polyamic acid and polyimide.

ポリアミド酸とポリイミド分子鎖の繰返し単位の構造は、図 4.1 のようになる。ポリアミド酸では、エーテル結合 ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$) とアミド結合 ($\text{C}-\text{C}(=\text{O})-\text{N}-\text{C}$) の 2 種類の回転可能な結合を主鎖に含む

ので、高温ではガラス転移相当のセグメント運動が可能であろう。最も低温側の分散は、試料 No. 1 と 6 であまり変わらない。250°C で 6 時間加熱した No. 6 は、完全なポリイミドであると考えられる。カルボキシル基の回転がとまると考えられる -20°C 以下では、その回転障害のためアミド結合の回転振動も大きな束縛を受け、ポリアミド酸とポリイミドの分子鎖に存在する運動は、どちらの場合もエーテル結合の回転振動による所が大きいと考えられる。イミド化の進行と共に高温側の 2 個の分散は、順次禁止され最低温の分散のみがのこると考えられる。

試料 No. 7 では力学的吸収が No. 6 よりさらに減少する。高温高圧水蒸気の下で、No. 6 を長時間処理しても赤外吸収スペクトルに全く差がないこと、X線回折強度曲線に差が見られることから、両者は化学的には変わらず物理的な差が存在すると考えられる。両者の密度を比べると、表 3.1 から明らかなように、No. 7 の方が大きく、このような条件の下で処理することにより分子鎖の充てん状態が密になったことを推定させる。-55°C にある E'' の吸収、-55.5°C にある ϵ'' の吸収が No. 6 のものに比べて小さくなっていることも上の推定を支持する。また図 3.7 から求めた No. 7 の活

性化エネルギーが、No. 6 の場合の 1/3 程度に減少していることから、このような処理を行なうことにより、未処理試料に存在する分子運動は、分子鎖の充てん状態がより密になって、分子間力と立体障害が増大し、大きく束縛されさらに局所的な運動に制限されると考えられる。No. 6 に比べ No. 7 は非常にもろくなることから考えて、ポリピロメリットイミドフィルムが示す機械的特性すなわち低温における強じんさは、ここで考察したような分子鎖の運動から発現するものと考えられる。

5. む す び

環状高分子であるポリイミドに存在する分子運動を明らかにし、そのすぐれた機械的特性の発現する原因を追求することを目的として、ポリアミド酸から得られるイミド化の異なる系列について、力学的性質・誘電的性質・核磁気共鳴および熱的性質の測定を行なった。また高温高圧水蒸気の下で長時間処理したポリイミド試料についても実験した。その結果、ポリイミドには低温域にかなりの分子運動の存在が認められ、これは線状高分子と同程度の局所的熱運動であると考えられ、機械的特性すなわち低温で示す強じんさは、このような運動に原因しているものと考えられる。

(昭和 43-10-8 受付)

参 考 文 献

- (1) S. L. Cooper, A. D. Mair, A. V. Tobolsky : Textile Res. J., 35, 1110 (1965)
- (2) W. E. Tatum, et al : Minutes 5th Conf. Elec. Insulation Conf., Sept. 19, p. 1, (1963)
- (3) R. M. Ikeda : Polymer Letters, 4, 353 (1966)
- (4) G. A. Bernier, D. E. Kline : J. Appl. Polymer Sci., 12, 593 (1968)
- (5) B. Wunderlich : J. Phys. Chem., 69, 2078 (1965)
- (6) K. Okano, et al : Solid State Phys., 14, 425 (1963)
- (7) J. F. Hencock, C. E. Berr : Soc. Plastics Engrs. Trans., 5-2, 105 (1965)
- (8) J. A. Kreuz, et al : J. Polymer Sci., A-1, 4, 2607 (1966)
- (9) 岡野 : 理研報告, 40, 273 (昭 39)
- (10) B. Wunderlich : J. Phys. Chem., 64, 1052 (1960)

Ni-Zn-Co 系 VHF フェライト

荒居 徹*・井戸 猛夫*・山田 幸慶*

Improvement in Ni-Zn-Co type VHF Ferrites

Sagami Works Tohru ARAI・Takeo IDO・Yukiyoshi YAMADA

A study has been made on the effect of ferrox-plana ferrite addition to Ni-Zn-Co type VHF ferrites in respect to their high frequency characteristics and other properties. In making the study, a packing diagram for crystal structures of hexagonal ferrites was recalled as a clue. The addition is found to increase natural resonant frequencies and to decrease μ' s of Ni-Zn-Co ferrites, whereas their μ'' Q values are retained fairly well. This shows the addition to be a very powerful device in improving the characteristics of the ferrites. A thorough observation has been made on the microscopic textures of the ferrites with electron microscopic photographs taken of the second stage replicas of fractured surfaces. It is concluded that the added plana-ferrites seem to be absorbed completely into the host spinel structure to make a single phase.

1. ま え が き

Ni-Zn-Co 系のフェライトは、VHF 帯用のフェライトとして有力な材料であって最近まで多くの研究がなされているが、実用的にはどちらかと言えば 100 MHz 以下の材料に重点が置かれてきた。本報告においてはこの種のフェライトの使用限界周波数を伸ばす目的で、これに自然共鳴周波数の高いフェロックスプレーナを少量添加してみた結果について述べる。プレーナの添加は、ちょっと考えると二相のフェライトを作ってしまうような乱暴な思いつきに見えるが、結晶構造に対する考察からはむしろ単一相になるほうが自然である。

実際、あとで示す結晶組織写真にも第二相らしいものはほとんど出ていない。特性の点から見るとプレーナを添加したとき初透磁率 μ' は減少するが損失が非常に少なくなる。この減少が実は自然共鳴周波数の上昇にもとづくものであることがわかったため、プレーナの添加という方法が、VHF フェライトの設計上きわめて有力な手段であることが結論された。以下においては、まず VHF フェライトの概念につき従来よく知られていることを簡単にふりかえったのち、プレーナを添加されたフェライトに起こるいろいろな現象に関する実験結果を述べ、プレーナ添加という方法の位置づけを行なってみたい。

2. VHF フェライトの概観

2.1 自然共鳴の壁⁽¹⁾

VHF 帯用のフェライトとして古くから知られているものに Ni-Zn フェライトがあり、主としてフィリップス社の研究者達により早くから調べられている⁽²⁾。いわゆる「Snoek の限界線」を示す彼らの実験データはあまりにも著名であるが、その結果を整理すると「Ni/Zn 比が大きいくほど μ' が小さくなり、 μ'' のピークの位置、すなわち自然共鳴周波数 f_r が高くなる。 f_r 以上の周波数では μ' に分散が起こるが、それ以下の周波数ではほぼ一定の μ' を持つ」ということにつく。ここで μ' , μ'' はそれぞれ複素透磁率の実数部分と虚数部分を表わす。Ni-Zn フェライトの場合、Ni/Zn 比を大きくすると M_s (飽和磁化)→小、 H^A (結晶異方性磁界)→大となることに着目すると、初透磁率に関して成りたつ式

$$\mu_0 - 1 = (8\pi/3) M_s / H^A \quad (2.1)$$

から μ' に関する事実は説明できる。ただしこの式では μ_0 が磁化回転成分のみに由来し、磁壁の運動を無視できるものと仮定している。他方、自然共鳴周波数については、これを磁気モーメントの異方性磁界中における才差周波数であると考えれば

$$2\pi f_r = \gamma H^A \quad (2.2)$$

により H^A に比例して高くなることが了解される。式(2.1)と(2.2)から

$$f_r (\mu_0 - 1) = 23.5 M_s \quad (2.3)$$

$$f_r : \text{MHz}, M_s : \text{ガウス}$$

という VHF フェライトにおける最も重要な関係式が得られる。考えているフェライトがスピネルのような立方晶系フェライトであるかぎり、この式の示す自然共鳴の壁を破ることができないわけである。

ところが六方晶系のフェライトを考えると若干事情が変わってくる。この場合、異方性磁界には C 軸からのずれに対して働く H_ϕ^A と C 面内のずれに関して働く H_θ^A との 2 種類があるから式(2.1)に対応して

$$\mu_0 - 1 = \frac{4\pi}{3} M_s \left(\frac{1}{H_\theta^A} + \frac{1}{H_\phi^A} \right) \quad (2.4)$$

となり、また式(2.2)に対応して

$$2\pi f_r = \gamma \sqrt{H_\theta^A \cdot H_\phi^A} \quad (2.5)$$

となる。 H_θ^A は異方性定数 K_1 , K_2 に対応する量で $\sim 10^4$ Oe ぐらいの値であり、 H_ϕ^A は K_3 に対応する量で $\sim 10^2$ Oe ぐらいの値である。したがって f_r は 1,000 MHz のオーダーとなり、スピネルの場合より一けた高い。他方 μ_0 は H_θ^A と H_ϕ^A のうちの小さいほう、すなわち H_ϕ^A で定まるから、スピネルの場合のように f_r が大きくなっても μ' がむやみに小さくなることはない。フェロックスプレーナとして知られるこの種のフェライトは、原理的にはこのようにすぐれているのであるが、その割に応用が伸び悩んでいるのは、 $\tan \delta$ が意外に悪く、 μ' が物足りないというような欠点のほかに、温度特性が悪いという不満が大きいと思われる。

商品の VHF フェライトとしては、たとえば Ni フェライトを主成分として、Li フェライト、Mn フェライト、Mg フェライトその他を含む複雑な多成分フェライトが各種用いられている。これらのフェライトは μ が低く Q がむやみに高いこと、および温度係数に神経を費やしてい

る点の特長である。しかし、学問的にはむしろ Ni-Zn 系のものが主流を占め、いわゆる「鉄過剰の Ni-Zn-Co フェライト」系と呼ばれるものがごく最近まで広く研究されている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

これはこのフェライトの考え方が、「Ni-Zn フェライトに Co フェライトを添加すると異方性が消え、鉄過剰にすると磁歪が消える」というような方法論めいた要因を備えているほか、 Co^{2+} イオンによる誘導磁気異方性の問題、その磁壁共鳴への影響、16d 位置に生ずる正イオンの空孔の問題などのように、豊かな研究材料の鉱脈である点が研究者を引きつけてやまないからであろう。実用的にも原料の NiO が若干高価であるという欠点は持つが、三上らも述べているように慎重な熱処理をすれば 100 MHz までは十分使える材料が得られる。

2.2 VHF フェライトの複素透磁率

実際に Ni-Zn-Co 系のフェライトを作ってみると、CoO を添加したときに μ' はむしろ若干減少し、異方性磁界が消えているという強い印象は受けにくい。特性の向上は逆に Q の著しい改善という形で現われてくる。このことは Co^{2+} イオンの役割が本質的にはもう少しちがったものであることを物語っている。Co イオンを添加した Ni-Zn フェライトの特性において最も特長なことは、自然共鳴の吸収線がシャープになることであり、吸収線の位置自体が著しく移動するという効果はむしろ少ない。

このことから Co イオンが式 (2.1) に対する基本的な仮定、すなわち μ' に対して磁壁移動からの寄与がないという状況をイデアルに作り出す役目をしていることが推察され、「 Co^{2+} イオンによる磁壁の固着化」という現在の通念が生み出されたわけである。このように VFH フェライトの場合、周波数特性を伸ばすために磁壁の運動を極力抑さなければならないことが、 μ' の大きさを宿命的に制限してしまうのである。

磁壁の固着化ということが具体的にはどのように行なわれているのかを想像するうえで一つのかぎとなる事実、磁化と複素透磁率との関係である。この種のフェライトは一般に Hc がかなり大きいために磁化が残りやすく、このため図 2.1 に示すように磁化すると μ' が数十パーセント（場合により 2～3 倍）大きくなって Q は 1～2 けたも落ちてしまう。この特性劣化は交流消磁をしても 70% ぐら

しか回復できず、完全に元に戻すにはキュリー点以上から熱処理をやり直すしかない。

したがって、この種の VHF フェライトにおける複素透磁率が、キュリー点以上から徐冷した場合にのみ形成されるような微妙な磁区構造に深く依存していることは明らかである。この磁区構造はおそらく磁壁が空間的に複雑にはりめぐらされているために、磁壁同志がおたがいにけん制し合って簡単に動けないようなパターンであると思われる。そして各磁壁をその位置に固着化するためのピン役目をしているのが Co^{2+} イオンであろう。外部からある程度以上の磁界をかけたとき、この複雑な磁区模様は簡単に整理統合されて比較的単純なものになってしまう。

LAU らの説明によれば、これは 90° 磁壁が減って 180° 磁壁が増えたことに対応する⁽⁴⁾。逆に磁界を取り除いたときに元の磁区模様に戻るには、 Co^{2+} イオンが逆の意味で障害となるだろう。そして新たに生じた磁壁は初めのものにくらべてずっと動きやすくなり⁽³⁾、これが μ' に対する磁壁移動の成分を加えるために μ' が増えてかつ μ'' も激増する、という事態を招くものと見られる。なお焼結温度が高すぎて粒粗大を来した場合には、 μ' と μ'' に同様の現象が見られるが、この場合にも通常言われる粒子の形状異方性の減少ということだけでなく、磁区の単純化にもとづく磁壁移動成分の増大という描像をもっと強調してよいと考えている。

3. フェロックス プレーナの結晶構造

3.1 パッキングダイアグラム

ここであとの議論の便宜のためフェロックス プレーナの結晶構造につき若干述べておきたい。ちゅう（稠）密構造の六方晶系 Ba フェライトの結晶構造は、一般に R, S, T (R^* , S^* , T^*) と名付けられる基礎ブロックの積み重ねとして理解されている。表 3.1 はこれらの基礎ブロックの内容であるが、この表において Me は Ba 以外の陽イオンを示し、表中の Me の価数は電荷数を明らかにするために付した便宜上の値である。

図 3.1 はこれらの基礎ブロックを積み重ねる規則を与えるパッキングダイアグラム⁽⁷⁾であって、図中では R, S, T のおのおのに対しその鏡像も含めると各 6 通りの記号が使われている。これらは物理的には同じものであるが群論的な意味で異なり、その詳細は表 3.2 に与えた飯田の格子記号を用いたパッキング表を見れば明らかであろう。これらのブロックはいずれもかごめ格子の所で切断してあるので、つなぎ合わせる際に接合面のかごめ格子の位相が一致し、かつ酸素層の積み重ねがちゅう密になるように気を付ければ、たとえば S_1 の上に S_3 を、 S_3 の上に R_6^* を、というように順次積み重ねることができる。

図 3.1 はどのブロックの上にどのブロックを接合できるかということ、矢印で示して見やすくまとめたものにすぎない。図からは直接明らかではないが T ブロックは、 $\cdots \rightarrow T_1 \rightarrow T_1 \rightarrow T_1 \cdots$ というように

表 3.1 Ba 系六方晶フェライトの基礎ブロック
Elementary blocks of hexagonal Barium ferrites.

	C 軸の長さ (Å)	化 学 組 成	Me を 3 個に数えたときの O^{2-} の過不足	O^{2-} 層数
S	4.8	$2(\text{Me}^{2+}\text{O} \cdot \text{Me}_2^{3+}\text{O}_3)$	$3\text{Me}_2^{3+}\text{O}_3 - \text{O}^{2-}$	2
R	6.8	$\text{BaO} \cdot \text{Me}_2^{4+}\text{O}_4 \cdot 2\text{Me}_2^{3+}\text{O}_3$	$\text{BaO} \cdot 3\text{Me}_2^{3+}\text{O}_3 + \text{O}^{2-}$	3
T	9.7~10.1	$2\text{BaO} \cdot 4\text{Me}_2^{3+}\text{O}_3$	(過不足なし)	4

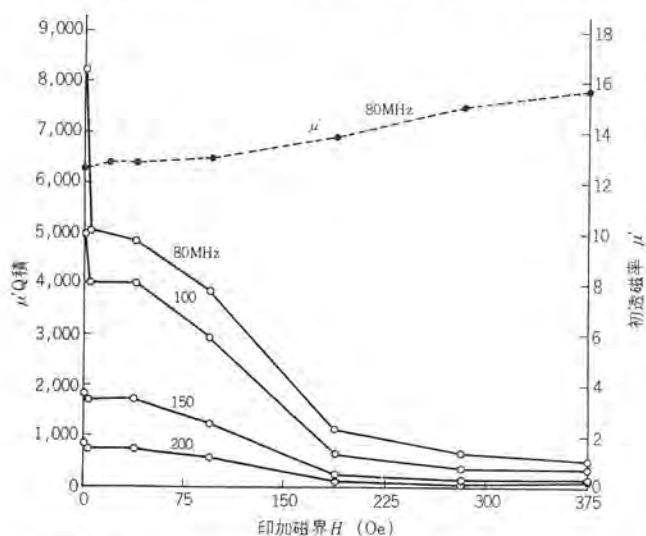


図 2.1 磁化による $\mu'Q$ 積の変化、試料はプレーナフェライトを添加した Ni-Zn-Co 系フェライト
Effect of magnetizing field on the $\mu'Q$ product values of a Ni-Zn-Co ferrite.

表 3.2 (1)(2)(3) 飯田の格子記号により表わされた基礎ブロックの構造
Structures of elementary blocks as expressed in terms of Iida's lattice notations.

(1) S ブロック

S ₁		S ₂		S ₃	
O ²⁻	Me	O ²⁻	Me	O ²⁻	Me
C	B-TB ⁴ TB ⁴ TA ⁴ TC ⁴ C-TC ⁴	A	C-TC ⁴ TC ⁴ TB ⁴ TA ⁴ A-TA ⁴	B	A-TA ⁴ TA ⁴ TC ⁴ TB ⁴ B-TB ⁴

(a)

(b)

(c)

S ₁ [*]		S ₂ [*]		S ₃ [*]	
O ²⁻	Me	O ²⁻	Me	O ²⁻	Me
B	C-TC ⁴ TC ⁴ TA ⁴ TB ⁴ B-TB ⁴	C	A-TA ⁴ TA ⁴ TB ⁴ TC ⁴ C-TC ⁴	A	B-TB ⁴ TB ⁴ TC ⁴ TA ⁴ A-TA ⁴

(d)

(e)

(f)

(2) R ブロック

R _A			R _B			R _C		
O ²⁻	Ba ²⁺	Me	O ²⁻	Ba ²⁺	Me	O ²⁻	Ba ²⁺	Me
A		C-TC ⁴ TC ⁴ TA ⁴ TC ⁴ C-TC ⁴	B		A-TA ⁴ TA ⁴ TB ⁴ TA ⁴ A-TA ⁴	C		B-TB ⁴ TB ⁴ TC ⁴ TB ⁴ B-TB ⁴

(a)

(b)

(c)

R _A [*]			R _B [*]			R _C [*]		
O ²⁻	Ba ²⁺	Me	O ²⁻	Ba ²⁺	Me	O ²⁻	Ba ²⁺	Me
A		B-TB ⁴ TB ⁴ TA ⁴ TB ⁴ B-TB ⁴	B		C-TC ⁴ TC ⁴ TB ⁴ TC ⁴ C-TC ⁴	C		A-TA ⁴ TA ⁴ TC ⁴ TA ⁴ A-TA ⁴

(d)

(e)

(f)

(3) T ブロック

T ₁			T ₂			T ₃		
O ²⁻	Ba ²⁺	Me	O ²⁻	Ba ²⁺	Me	O ²⁻	Ba ²⁺	Me
B		A-TA ⁴ TA ⁴ TB ⁴ TA ⁴ TC ⁴ A-TA ⁴	C		B-TB ⁴ TB ⁴ TC ⁴ TB ⁴ TA ⁴ B-TB ⁴	A		C-TC ⁴ TC ⁴ TA ⁴ TC ⁴ TB ⁴ C-TC ⁴

(a)

(b)

(c)

T ₁ [*]			T ₂ [*]			T ₃ [*]		
O ²⁻	Ba ²⁺	Me	O ²⁻	Ba ²⁺	Me	O ²⁻	Ba ²⁺	Me
C		A-TA ⁴ TA ⁴ TC ⁴ TA ⁴ TB ⁴ A-TA ⁴	A		B-TB ⁴ TB ⁴ TA ⁴ TB ⁴ TC ⁴ B-TB ⁴	B		C-TC ⁴ TC ⁴ TB ⁴ TC ⁴ TA ⁴ C-TC ⁴

(d)

(e)

(f)

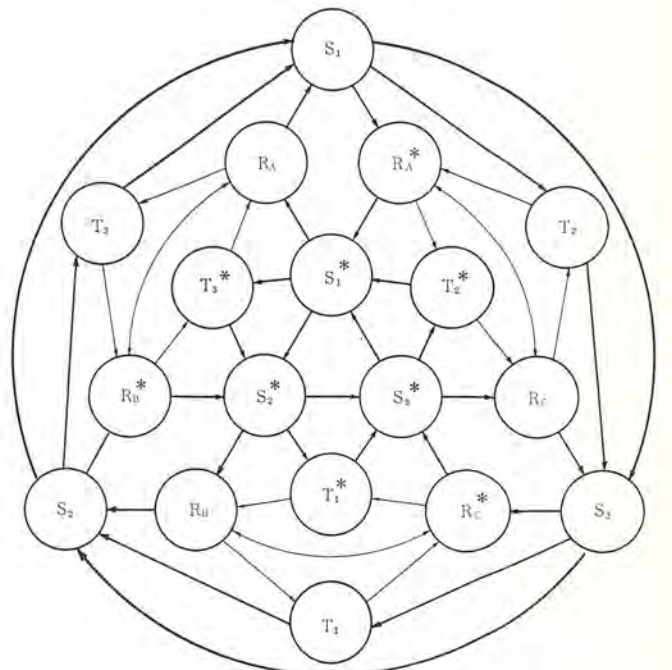


図 3.1 六方晶系フェライトのパッキングダイアグラム
A packing diagram for hexagonal ferrites. By using the diagram one can easily find crystal structure of any hexagonal ferrite in terms of elementary blocks R, S, T, and their mirror images.

$$((4.8+6.8+4.8+6.8) \times 2 + 4.8) \times 3 \sim 153.6$$

となる。

図 3.1 において最外(内)部の経路

$$\cdots \rightarrow S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow \cdots$$

$$\cdots \rightarrow S_1^* \rightarrow S_3^* \rightarrow S_2^* \rightarrow S_1^* \rightarrow S_3^* \rightarrow \cdots$$

はスピネルの結晶構造に対応しており、これらをスピネルサイクルと名付ける。スピネルサイクルの存在は六方晶系のフェライトとスピネル系フェライ

同じものを積み重ねることが許される。既知、未知を問わず R, S, T (およびその鏡像) で書ける六方晶系のフェライトは、この図の中に原理的にすべて含まれている。なお、この図に含まれている基礎ブロックは、位相まで考えると全然重複していないので、矢印をたどりながら出発点にまで戻ってこない単位胞は完結しない。

3.2 いろいろな六方晶系フェライトと長週期プレーナの仮説

表 3.3 は普通良く知られている六方晶系のフェライトであるが、このほかにも (TS)_nT⁽⁸⁾, (RS)_nS⁽⁸⁾, (RSTS)₃(TS)_n⁽⁹⁾ などをはじめ、J. A. Kohn と D. W. Eckart により発見された

$$M_2Yn^{(10)}, M_4Yn^{(11)}, RSTSR(S)(TS)n^{(12)}, M(Y)nMYm^{(13)}$$

というようないろいろな系列が報告されており、これらの正確なパッキングは図 3.1 を用いて直ちに確かめることができる。たとえば (RS)₄S は

$$(RS)_4S \rightarrow ((RSR^*S^*)_2S^*)_3$$

というのが正確な書き方であって、C 軸の長さは

表 3.3 良く知られた六方晶系 フェライト
Various well-known hexagonal ferrites.

化 学 式	記 号	構 成	C軸の長さ(Å)
BaFe ₁₂ O ₁₉	M	RSR*S*	23.2
Me ₂ Fe ₄ O ₈	S	S	
Ba ₂ Me ₂ Fe ₁₂ O ₂₂	Y	(TS) ₃	3×14.5
Ba ₂ Me ₂ Fe ₁₆ O ₂₇	MS(W)	RS ₂ R*S ₂ *	32.8
Ba ₂ Me ₂ Fe ₂₀ O ₄₆	M ₂ S(X)	(RSR*S ₂ *) ₃	3×28.0
Ba ₃ Me ₃ Fe ₂₄ O ₄₁	MY(Z)	RSTSR*S*T*S*	52.3
Ba ₄ Me ₄ Fe ₃₆ O ₆₀	M ₂ Y	(RSR*S*T*S*) ₃	38.1×3

トとが結晶学的にきわめて近いし間柄にあることを示しており、事実ほとんどの六方晶系 フェライトはa軸の長さがほぼ等しく、約0.88 Åであって、この値はスピネルの格子定数と

$$5.88 \times \sqrt{2} = 8.32 \sim a_{\text{spinel}}$$

なる関係で結ばれ、バリウム層を含むRやTが、[1,1,1]軸を垂直に立てたスピネル層と無理なく接合することを示している。

したがって、従来知られている表3.3のようなプレーナフェライトのほかに、バリウム層の週期がずっと長く、したがってスピネル含有量の大きいプレーナが存在することを予想してもそれほどおかしくないと思われる。この種のプレーナを以下においては仮りに「長週期プレーナ」と呼ぶことにしよう。図3.1を用いて長週期プレーナとしてたとえば

.....(RS)・nS・(R*S*)・mS*.....

.....(RSR*S*)・nS*・(RSR*S*)・mS*.....

.....T・nS・T・mS*.....

などのように、ほとんど無限に多くの種類を考えることができる。

フェロックスプレーナ中に少量のスピネルを固溶すると、すぐれた高周波特性を有する材料が見いだされることがあるが⁽¹⁴⁾、これらの中に長週期プレーナが部分的に存在する可能性は十分にある。X線回折等で確認したデータは報告されていないけれども、Baフェライトの結晶構造の持つ多様性を考え合わせると長週期プレーナが一定のきまった週期を持たないことも想像され、もしこれが事実であればX線回折で確認できなくても不思議ではない。

長週期プレーナはもしそれが存在するものであればMsを大きくすることができそうで、したがってμ'の比較的大きいVHFフェライトが得られる可能性がある。

4. プレーナを添加した Ni-Zn-Co 系フェライト

4.1 研究の手がかり

μQ積の高いVHFフェライトの用途は、現在のところまだそれほど多くない。FMラジオやテレビの中間周波トランス、アンテナ回路のマッチングトランス、あるいはフェライトアンテナ⁽¹⁵⁾などがそのおもなものである。このうち前二者については従来のフェライトで一応の製品がある。われわれのVHFフェライトの研究を直接刺激したのは、後のフェライトアンテナの考え方であった。

この応用に耐えるフェライトはたとえばテレビを考えると

(1) 約100~200 MHzの周波数帯域をカバーできること

(2) 利得の見地からできるだけμ'Q積を大きくすること

(3) 利得帯域幅積を大きくとり、かつ軽量化をはかるためμ'をできるだけ大きくすること

などの条件を満たす必要がある。(3)の条件を満たすためには、プレーナをあきらめてスピネルを伸ばす方針に徹せざるを得ないのであるが、100~200 MHzという周波数領域は、ちょうどNi-Zn系のス

ピネルフェライトのQが急激に低下する領域であって、このためいわずハイチャネル(4~12チャネル、171~217 MHz)側まで所要のμQ積を維持できるようなフェライトを開発することは容易ではない。

ここで前節に述べた長週期プレーナの仮説を一つの小さな手がかかりとして、当面の課題であるNi-Zn-Co系フェライトの特性改善のために、これにプレーナフェライトを少量添加した混合フェライトを作ってみたらどうか、というアイデアがごく自然に浮かび上ってくる。結果的に生ずるフェライトが若干2相に分離していても特性を著しくそこなわないかぎり、さしつかえないわけである。

このようにして得られるフェライトは、プレーナとしての性質が非常に希薄でほとんどスピネルに近いと考えられるが、アイデア的にはむしろ「超長週期プレーナ」とでも言うべきものである。あるいは図4.1に示すようにスピネルとプレーナが、単に部分的に接合されるだけで週期の概念が全然あてはまらなくても、プレーナ的な異方性を導入できさえすれば上に企図した目的は果されるわけである。

結論的に言うと、Ni-Zn-Co系のフェライトにプレーナフェライトを数重量パーセント添加して得られるフェライトは、添加量とともに自然共鳴周波数が上昇しμ'が低下する。このことは式(2.1)および式(2.2)のH'の上昇に対応していると考えられるから、少なくともある種の異方性磁界を導入することには成功したわけである。問題は観測される自然共鳴周波数f_{r obs}が式(2.3)で与えられる。

$$f_{r \text{ calc}} = 23.5 M_s / (\mu_0 - 1) \dots \dots \dots (4.1)$$

なる共鳴周波数より高いかどうかであるが、図4.3に見るように上記限界を越えるには至らなかったため、仮説の積極的な裏づけは今後持ちこされることになった。

プレーナの効用としては、このほかに粒子の微細化とか、粒径の均一化等の金属組織的な側面も考えられ、この点に関する考察は組織写真を参考にしながら4.2.5項において述べる。

4.2 おもな実験結果

4.2.1 試料の調整

試料の調整は、プレーナフェライトの粉末を標準的な方法であらかじめ作って、これをNi-Zn-Coフェライトの原料粉末に加えたという以外には従来知られている方法と大差ない。原料粉末は主として酸化物を用いた。焼結温度は1250°C前後が最適で、これはたとえば井上らの所説⁽⁶⁾と一致する。鉄過剰組成にはしていないので焼結後とくに熱処理する必要はなかった。このほか、ボールミルの適用方法その他に細かい注意が必要であるが詳細は割愛する。

本研究において試作された試料はかなりばら大な数にのぼるが、以下においてはいろいろな測定データが比較的良好にそろっている表4.1の系列の試料に関する実験結果につき主として述べる。基本組成はNi_{0.85}Zn_{0.15}Fe₂O₄であって、試料番号はCoフェライトとCo₂Yの添加量(wt%)を示している。

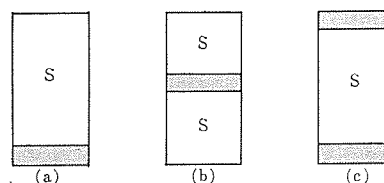


図 4.1 スピネルの微粒子にプレーナ層が接合した状況を示す模式図。周期の概念があてはまらない場合をしめす
A schematic drawing of spinel particles adjoined with planar-ferrite layers to which no idea of X-ray detectable periodicity is pertinent.

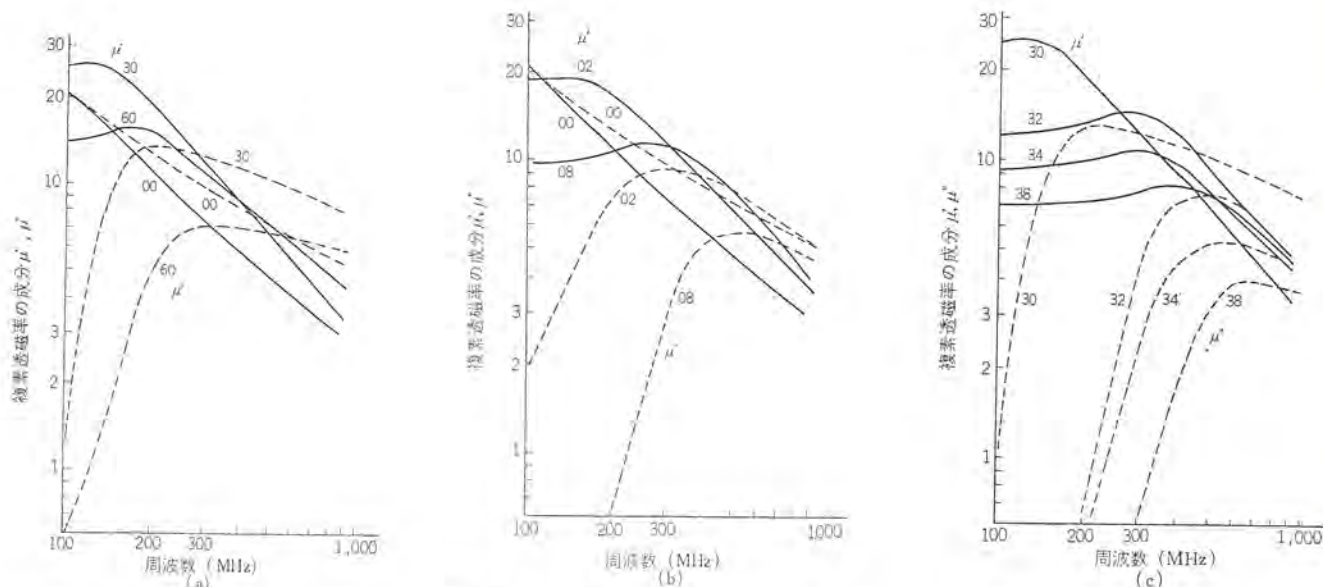


図 4.2 複素透磁率の周波数変化
Frequency dependence of complex permeabilities.

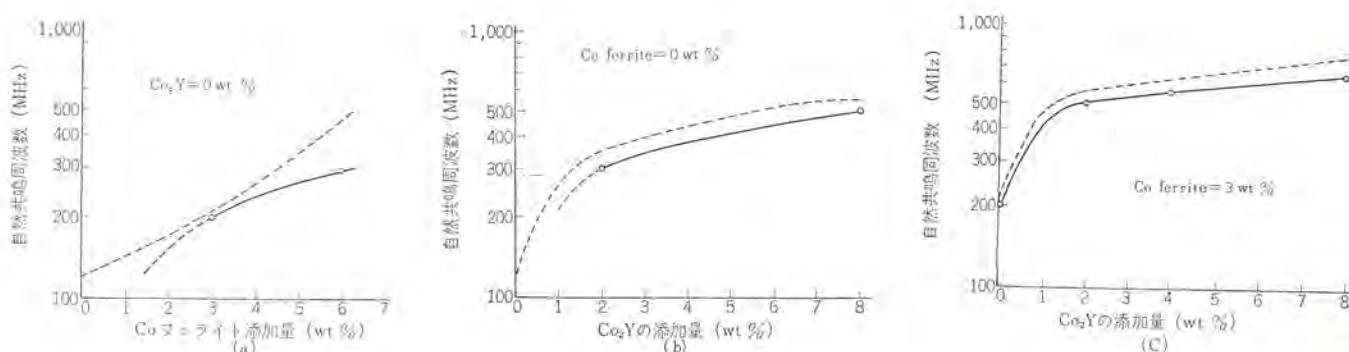


図 4.3 自然共鳴周波数の実測値と計算値の比較。点線は計算値を示す
Observed values of natural resonant frequency as compared with calculated values (dashed line).

4.2.2 複素透磁率

図 4.2 (a), (b) および (c) は Co フェライトと Co_2Y の添加により複素透過率の成分 μ' , μ'' の周波数特性がどのように変化するかを示す。この測定では 100 MHz 以下を調べていないので、試料 00 に対するピークは 100 MHz 以下にかくれている。図の (a) は Co フェライトだけを添加した場合、図の (b) は Co_2Y のみを添加した場合、また図の (c) は Co フェライトの添加量を 3 wt % に固定して Co_2Y の添加量を変えた場合をそれぞれ示している。測定は slotted line 法により行なわれたもので、寸法の関係で若干加工したのも熱処理をした試料を用いた。

図において実線で示したのが μ' 、点線で示したのが μ'' で、どの場合にも μ' , μ'' のピークは明らかに添加量を増したとき高周波側にずれ、 μ' の値が小さくなる。式 (4.1) を用いて自然共鳴周波数の実測値と計算値を比較した結果を図 4.3 (a), (b) および (c) にそれぞれ示した。ここで点線で示したのが計算値で、 μ_0 の値は後で示す 1 kHz の測定値を使った。図の (a) からわかるように Co フェライトだけの添加の場合には、3 wt % 付近で計算値に近づくだけでその上下いずれでも実測値の方が低い。

これに対しブレナを添加した試料は図の (b), (c) とともに理論値にほとんど近づいている。図 4.4 は短絡同軸空洞と Q メータを用

表 4.1 試料番号と添加量との関係
Symbols and corresponding quantities of added Co-ferrite and Co_2Y for specimens which have a common basic chemical composition $\text{Ni}_{0.85}\text{Zn}_{0.15}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

試料番号	添加量 (wt %)	
	Co Ferrite	Co_2Y
00	0	0
30	3	0
60	6	0
02	0	2
08	0	8
32	3	2
34	3	4

基本組成: $\text{Ni}_{0.85}\text{Zn}_{0.15}\text{Fe}_2\text{O}_4$

いて⁽¹⁸⁾ μ' と Q を測定した例であって、Co フェライトを 3 wt % に固定して Co_2Y の添加量を変えたときの様子を示している。図からわかるように Co_2Y を添加すると μ' は添加量とともに急激に低下するが、Q が逆に上昇し、結局 $\mu'Q$ 積としてはほとんどとどまるとどまる。 Co_2Y 以外にも多くのブレナフェライトを試みたが、Co 入りのブレナの場合にはほとんど同じような結果になった。なお鉄過剰にするともう少し Q が上昇する。

以上の結果から直ちに結論されることは、Ni-Zn-Co 系の VHF

フェライトにブレナフェライトを添加した場合

(1) 自然共鳴周波数が上がり μ' が低下する。

(2) μ' の低下と逆比例して Q が上昇する。

ということである。したがってたとえば μ' が高く自然共鳴周波数の低い Ni-Zn フェライトを素材にして、すぐれた特性の VHF フェライトを作り出すための手段として有力であって、従来知られてきた (イ) Ni/Zn 比 (ロ) Co の添加量 (ハ) 鉄過剰量、などを変える方法のほかに (ニ) 適当なブレナを選び (ホ) 適量添加する、というような新しいテクニックを付け加えたことになる。

4.2.3 飽和磁化、キュリー温度および格子定数

図 4.5 (a), (b) および (c) は添加量と飽和磁化 σ_s および

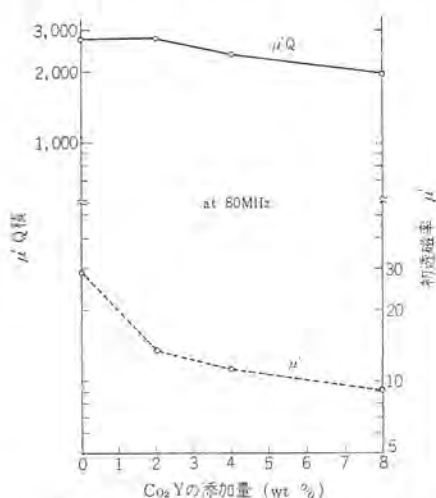
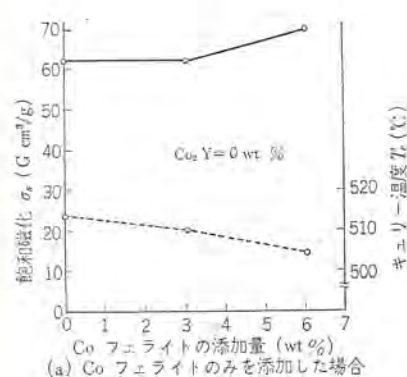
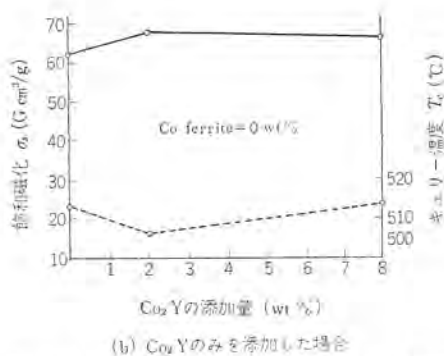


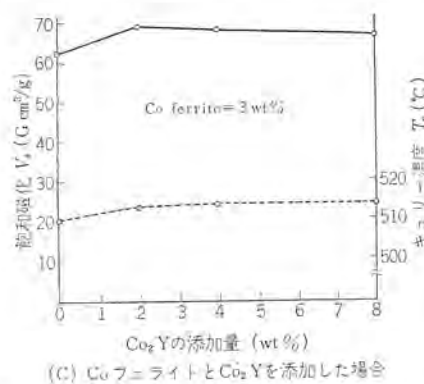
図 4.4 Co_2Y の添加が $\mu'Q$ 積に及ぼす影響
Effect of additions of Co_2Y on the $\mu'Q$ of a Ni-Zn-Co ferrite. It is noted that the addition decreases μ' drastically, while it does not change $\mu'Q$ essentially.



(a) Co フェライトのみを添加した場合



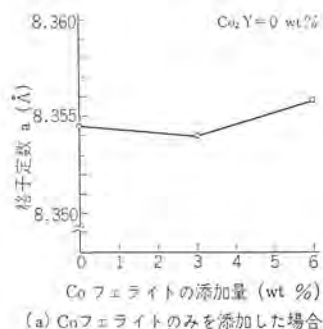
(b) Co_2Y のみを添加した場合



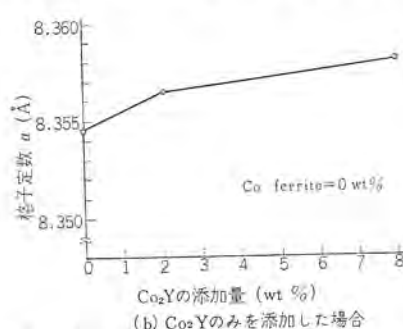
(c) Co フェライトと Co_2Y を添加した場合

図 4.5 添加による飽和磁化の変化

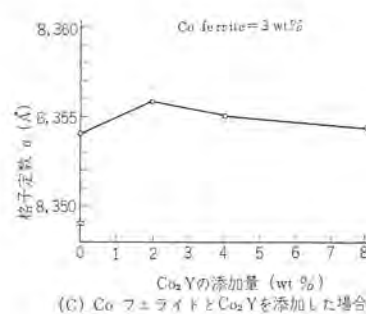
Change in saturation magnetization of Ni-Zn ferrite by small additions of Co-ferrite and Co_2Y .



(a) Co フェライトのみを添加した場合



(b) Co_2Y のみを添加した場合



(c) Co フェライトと Co_2Y を添加した場合

図 4.6 添加による格子定数の変化

Changes in lattice parameter of Ni-Zn ferrite by small additions of Co-ferrite and Co_2Y .

キュリー温度 T_c との関係である。図において実線は飽和磁化、点線はキュリー温度を示す。図 4.5 (a) は Co フェライトだけを添加した場合であるが、 σ_s は添加量とともに若干上昇し、 T_c は逆に低下する。 σ_s と T_c が逆に動く傾向は Co_2Y だけを添加した。図 4.5 (b) の場合にも見られる。これらのフェライトは組成に関係なく同じ温度で焼成しているため、焼きしまりの程度がすこしばらついている。

したがって上の結果は単に焼結の進行程度を反映しているものと思われる。これに対し Co フェライトと Co_2Y の両方を添加した同図 (c) の場合には、 T_c と σ_s が逆に動く現象は見られない。 σ_s の値は Co_2Y の添加量が 2 wt % 以下のところにピークを持ち、その後添加量を増すとともに漸減するようであるが、概して σ_s にも T_c にも大きな変化はなく、もとのスピネルフェライトと大差ない。

図 4.6 (a), (b) および (c) は添加量と格子定数 a との関係を示す。格子定数は (800), (731), (533) および (440) の回折線をディフラクトメータ法で観測し、それぞれの $K\alpha_1$ 線に対応する位置の $\sin^2 \theta$ を計算して最小自乗法により $\sin^2 \theta = 1$ のところにはずそうとして定めた。 $K\alpha_2$ 回折線に対応するデータは捨てた。実験結果を見ると、図 4.6 (a), (b) および (c) の格子定数 a が、それぞれ図 4.5 (a), (b) および (c) の飽和磁化 σ_s のデータと非常によく対応していることに気づく。 a が大きいほど σ_s が大きいということは、未反応鉄の存在を暗示するのかも知れないが、X 線データには酸化鉄は出ていない。

なお、ポールミル時間が不足するようときには、 $\text{Ba Fe}_2\text{O}_4$ の (212) 線が小さく出ることがある (岡崎の言う H 相⁽¹⁷⁾)。これは添加したブレナが反応の過程ではいったん分解して H 相にまで戻ること示しているのかも知れない。しかし、あとで示す組織写真からわかるように、第 2 相の存在は観察されないの、最終的には単一相

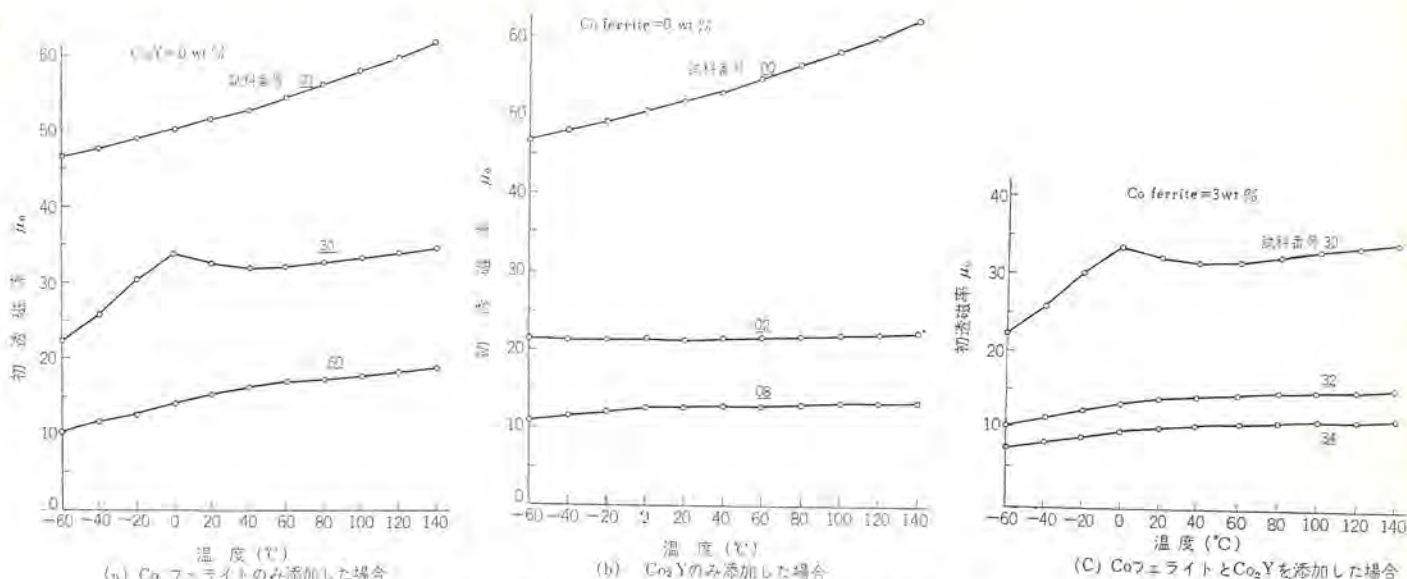


図 4.7 1 kHz で測定した初透磁率 μ_0 の温度特性
Temperature dependence of initial permeability μ_0 at 1 kHz.

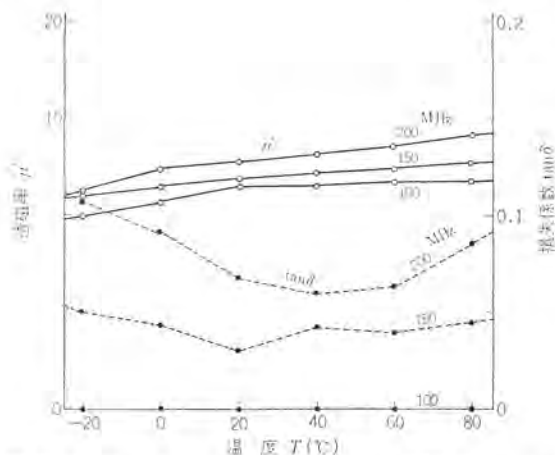


図 4.8 Slotted line 法により測定した VHF 帯における μ' および $\tan \delta$ の温度特性
Temperature dependence of μ' and $\tan \delta$ as measured by a slotted line method.

となる模様である。

4.2.4 温度特性

図 4.7 (a), (b) および (c) は、上と同じ試料の初透磁率 μ_0 を 1 kHz のブリッジを用いて -60~140°C の温度範囲で測定したものである。図 (a) の 00 は添加物がない場合であるが、 μ_0 は温度の上昇とともに増大しており常温付近では 50 程度の値を持っている。Co フェライトを 3 wt % 添加した 30 になると μ_0 が 30 前後に下り、しかも 0°C あたりに μ_0 の山が現われる。この山は異方性の符号が正負反転することが原因で生ずるものとされている⁽³⁾。 μ_0 の値が VHF 帯までほとんど変わらないことを考え合わせると、 μ_0 の低下は磁壁移動成分のほぼ完全な減殺にもとづくものと結論できる。

試料 60 の場合には、 μ_0 の山はもはやほとんど残っていない。これに対し Co_2Y のみを添加した図 (b) の場合にはこのような μ_0 の山はまったく現われない。たとえば 2 wt % 添加した試料 02 の場合を見ると、温度特性はきわめて平坦である。両方を添加した図 (c) の場合には μ_0 が低下し、温度特性も悪くなる。温度特性の見地だけからすれば Co フェライトを添加しないほうがよいのであるが、

VHF 領域の μQ 積を比較すると添加したもののほうが約 1 けた高くなる。

図 4.8 は slotted line 法により測定された VHF 領域における温度特性の一例である。測定に用いた試料は 32 と同じ組成であるがロットが異なる。図より判断すると、この付近の組成では常温付近で $\tan \delta$ が最少となる模様である。 μ' が温度の上昇とともに増大する傾向は 1 kHz の測定データともよく対応しており、また μ' が周波数とともに大きくなるのは共鳴が近づいていることを示している。

4.2.5 結晶組織

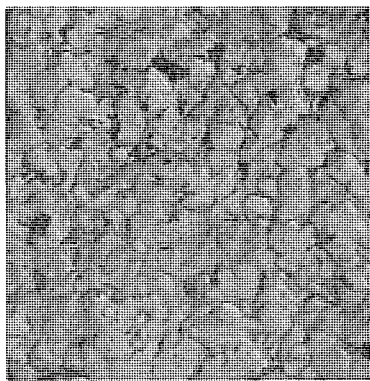
フェライトの結晶組織は粉末の調整条件により大きな影響を受ける⁽¹⁸⁾。以下においては焼結温度だけをパラメータとして比較することにし、1,250°C および 1,280°C で焼結した 2 系列の試料の組織を観察した。

一般に Ni-Zn 系のフェライトは、Mn-Zn 系や Cu-Zn 系その他のフェライトに比べて結晶粒界が腐食されにくいという特長があって、ことに 1,250°C というような低い焼成温度の場合にはエッチングできれいな組織を出すことはほとんど期待できない。そこで通常 1,300°C 以上で焼成してから組織観察するのであるが、われわれは 1,250°C でも試料をこわして破断面からレプリカをとり、電顕レプリカ観察をすれば結晶組織の様子が非常によく観察できることを見いだした。

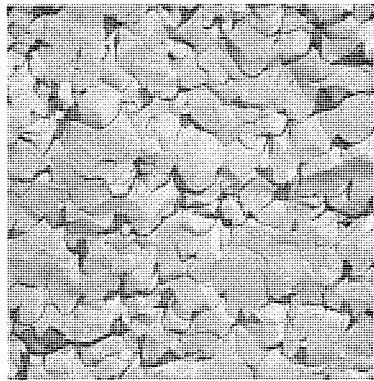
他方、1,280°C で焼成した試料に関しては表面を研磨してから濃硫酸としょう酸の混合加熱溶液で腐食すれば比較的容易に結晶粒界を出すことができ、こうして得られる組織写真を破断面のレプリカ写真と比較すると非常によく対応していることが知られる。

図 4.9 (a), (b) および (c) は、試料 00 の組成に対する組織写真であって (a) は 1,250°C 焼結試料の破断面、(b) は 1,280°C 焼結試料の破断面、(c) はその研磨面を示す。1,250°C では粒成長があまり進行していないが、1,280°C になると数 μ にまで成長している。

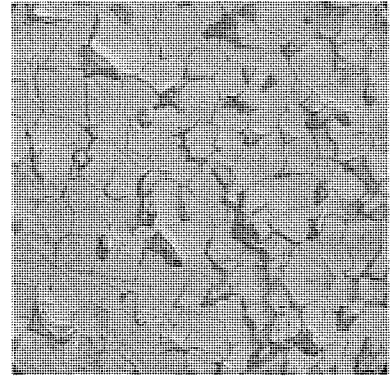
図 4.10 は試料 30 の組織であるが、図において (c) だけは普通の金属顕微鏡写真であって (a), (b) の電顕写真による組織と良く対応している。(a) の組織を前図の (a) と比較すると Co フェライトの添加により若干結晶粒の成長が促進されたことがわかる。



(a) 1,250°C 3時間焼結, 破断面
($\times 1,500$)

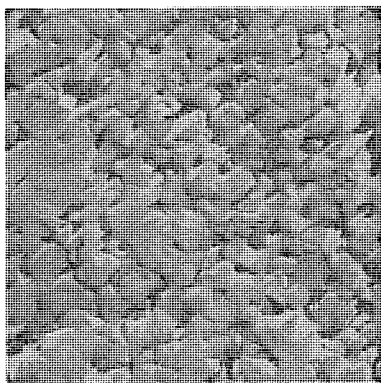


(b) 1,280°C 3時間焼結, 破断面
($\times 1,500$)

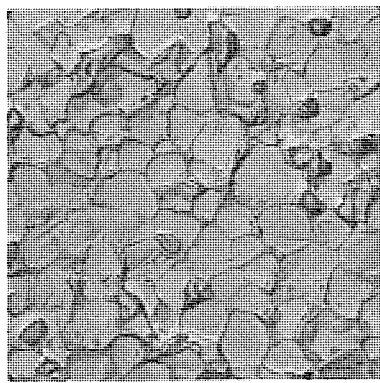


(c) 1,280°C 3時間焼結, 研摩後腐食
($\times 1,500$)

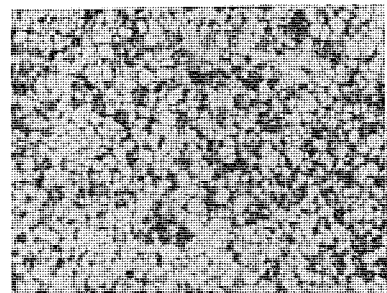
図 4.9 2 段レプリカ法電子顕微鏡観察による Ni-Zn フェライト 00 の組織
Electronmicroscopic structure of Ni-Zn ferrite 00 from a 2nd stage replica.



(a) 1,250°C 3時間焼結, 破断面
($\times 1,500$) 2 段レプリカ法電子顕微鏡写真

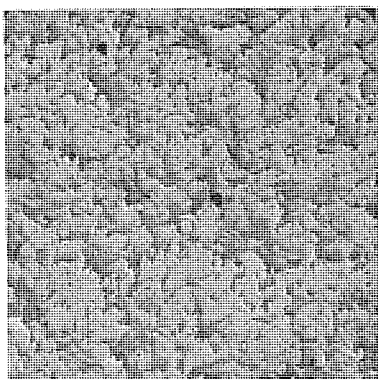


(b) 1,280°C 3時間焼結, 研摩後腐食
($\times 1,500$) 2 段レプリカ法電子顕微鏡写真

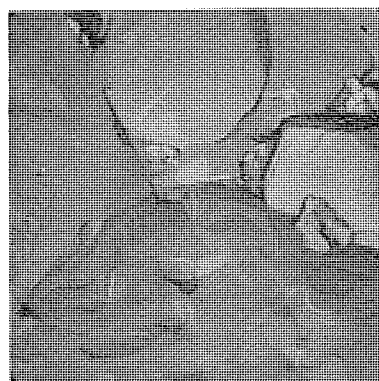


(c) 1,250°C 3時間焼結, 研摩後腐食
($\times 400$)

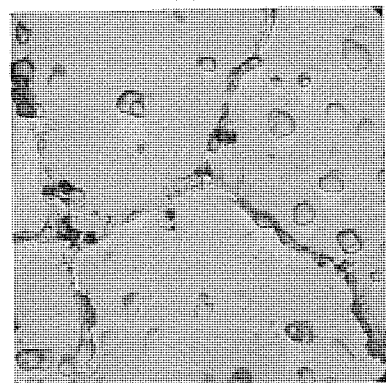
図 4.10 Ni-Zn フェライト 30 の顕微鏡写真
Microstructure of Ni-Zn ferrite 30.



(a) 1,250°C 3時間焼結, 破断面
($\times 1,500$)



(b) 1,280°C 3時間焼結, 破断面
($\times 1,500$)



(c) 1,280°C 3時間焼結, 研摩後腐食
($\times 1,500$)

図 4.11 2 段レプリカ法電子顕微鏡観察による Ni-Zn フェライト 02 の組織
Electronmicroscopic structure of Ni-Zn ferrite 02 from a 2nd stage replica.

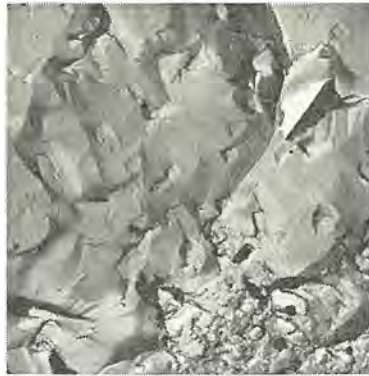
図 4.11 は Co_2Y を 2 wt % 添加した試料 02 のフェライトの組織である。1,280°C では結晶粒が急激に粗大化することが見られ、プレーナのはいらない試料の組織とはきわめて対照的である。巨大結晶のすき間には未併合の微結晶が少量介在しており、いわゆる structure をなす。これに対し 1,250°C 焼結の場合にはまだ非常に微細な結晶粒よりなっており、しかも凝集状態は非常に密である。このことか

らプレーナがかなりフラックス的な性格を備えていることがわかる。

図 4.12 は Co_2Y をさらに多量に添加した試料 38 の組織であるが、図 (a) に見るように 1,250°C ですでに結晶粒の併合粗大化の傾向がはじまっている以外は前図とよく似た特長を示す。図中の黒い部分はレプリカ作成のさいにフェライトがはく離して付着しているもので、不純物や第 2 相ではない。



(a) 1,250°C 3時間焼結, 破断面
($\times 1,500$)



(b) 1,280°C 3時間焼結, 破断面
($\times 1,500$)



(c) 1,280°C 3時間焼結, 研磨後腐食
($\times 1,500$)

図 4.12 2 段レプリカ法電子顕微鏡観察による Ni-Zn フェライト 38 の組織
Electronmicroscopic structure of Ni-Zn ferrite 38 from a 2nd stage replica.



図 4.13 2 段レプリカ法電子顕微鏡観察による Ni-Zn フェライト 32 の組織, 1250°C 3 時間焼結, 破断面 ($\times 1,500$)
Electronmicroscopic structure of Ni-Zn ferrite 32 from a 2nd stage replica. Fired at 1,250°C for 3 h, cracked surface.

図 4.13 は試料 32 のフェライトの組織で $\mu'Q$ が高く, 周波数特性の非常に良い場合の一例である。この図をたとえば図 4.11 (a) と比較してみると, 結晶粒子の成長がやや進んで密化していることがわかる。

なお以上の電顕写真では, ネガのレプリカにおいてクロムの陰影を約 30 度の方向からかけており, したがって写真中では谷の部分に対する影が明るく写っている。

Co_3Y 添加量の増大に伴ない, BuFe_2O_4 その他の第 2 相が析出する可能性を考えて詳しく組織観察を行なったが, 金属顕微鏡および電子顕微鏡レプリカ法の観察にかぎり第 2 相の存在は認められなかった。

5. む す び

Ni-Zn-Co 系の VHF フェライトの特性を向上させる目的でプレーナ系フェライトの添加を試みたところ, 微量の添加で自然共鳴周波数が上昇することがわかった。 μ' は低下するが $\mu'Q$ 積が保存されるので, この性質を利用して良好な特性の VHF フェライトの開発を行なうことができる。結晶組織の観察により, 添加されたプレーナがフラックス的な性格を備えていることが知られたが, 第 2 相は観察されなかった。

本研究の過程において, slotted line 法の測定および電顕写真撮影に関してご援助をいただきました各位に感謝いたします。

(昭和 43-10-8 受付)

参 考 文 献

- (1) J. Smit and H. P. J. Wijn : 「Ferrites」 1959 Eindhoven
- (2) H. P. J. Wijn et. al : Rev. Mod. Phys. 25, 91, (1953)
- (3) M. Mizushima : J. J. Apl. phys. 3, 82, (1964)
- (4) J. G. M. de Lau and A. L. Stuijts : Philips Res. Repts. 21, 104 (1966)
- (5) 三上, 田中 : 電通学会, 電子回路部品・材料研究会資料 CP M 67~24 (1967)
- (6) 最近の学会報告ではたとえば
杉原, 篠山, 井坂 : 電気四学会 No. 421 (昭 43-3)
井上, 平田 : 電気四学会 No. 430 (昭 43-3)
- (7) 荒居 : 物理学会 4a D 21 (昭 41-10)
- (8) J. A. Kohn and D. N. Eckart : J. Apl. Phys., 35, 967 (1964)
- (9) R. Savage and A. Tanber : J. Am. Ceram. Soc., 47, 13 (1964)
- (10) J. A. Kohn and D. W. Eckart : Am. Mineralogist 50, 1371 (1965)
- (11) J. A. Kohn and D. W. Eckart : Z. für Krist. 124, 69 (1967)
- (12) J. A. Kohn and D. W. Eckart : Z. für Krist. 119, 454 (1963)
- (13) J. A. Kohn and D. W. Eckart : J. Apl. Phys. 36, 1,171 (1965)
- (14) Philips 社日本特許 : 特許公報 昭 34-6778
- (15) Philips 社日本特許 : 特許公報 昭 34-20583
- (16) 荒居 : 三菱電機技報 41, 610 (昭 42)
- (17) 岡崎 : 粉体および粉末冶金 12, 93 (昭 40)
- (18) 山口 : 粉体および粉末冶金 12, 62 (昭 40)

リテンディングリング用 18Mn-5Cr 鋼の低サイクル疲れ特性

松本 健次*

阪部 喜代三⁺・塚田 尚史⁺村上 晃⁺⁺・和田 文夫⁺⁺Low-Cycle Fatigue Behavior of 18 Mn-5 Cr Steel
used for Retaining Rings

Kyoto University, Faculty of Engy. Kenji MATSUKI

The Japan Steel Works, Ltd. Kiyozô SAKABE・Hisashi TSUKADA

Mitsubishi Elec. Corp., Central Research Laboratory Akira MURAKAMI・Fumio WADA

For turbine generators and large two pole induction motors, cylindrical retaining rings are used to hold the coil ends of the rotors.

From the viewpoint of their characteristics, these rings are demanded to have high strength and non-magnetic character. Frequency of the start and stop with machines has been gradually increasing of late, which makes it necessary to have thorough knowledge on the low-cycle fatigue strength of retaining ring materials. Most widely used material 18 Mn-5 Cr steel strengthened by work hardening being taken up, a lowcycle fatigue test of alternating strain has been conducted on it in relation to the cold working rate. Much basic information has been thus obtained on the softening-hardening behavior and fatigue life during the strain cycling.

1. ま え が き

タービン発電機や大形の二極誘導電動機では、回転子のコイル端部が遠心力により拡大損傷するのを防ぐために、円筒状のリテンディングリングでコイルを拘束する方法が採用されている。このリテンディングリングは、コイルの端部の強大な遠心力をささえるとともに、リング自身の遠心力の作用を受けるから、回転子中もっとも高い応力を受け、したがって高強度の材料であることが要求される。同時に、漂遊負荷損減少のため非磁性であることが要求される。近年回転機の単機容量はますます増大の傾向にあるが、高強度で品質の安定した大形の非磁性材が得られるかいないかが、回転子軸材とともに単機容量を制約する重要な因子となっている。

この種大形のリテンディングリング用非磁性材を得るには、一般にオーステナイト鋼に冷間加工を加える方法と析出硬化を利用する方法があり、また非磁性鋼材としては、Mn-Cr系およびMn-Ni-Cr系がよく知られている。しかし、その耐力の均一性と不可避な内部欠陥や切欠きにたいする安全性、あるいは応力腐食に対する抵抗性などの点から、現在のところ18Mn-5Crオーステナイト鋼のリング材を冷間拡張したもののがすぐれていることが報告されている⁽¹⁾。ことにその国産が日本製鋼所で実施されるに及んで、本非磁性鋼は大形発電機のリテンディングリング材として最も広く使用されるに至っている。

この種リテンディングリングは、前述のような回転中の強大な遠心力に静的に耐えるのみならず、起動停止や運転上あるいは定期点検時の加速度により生ずる遠心力の繰返しに耐えねばならない。たとえば、もし起動停止が1日に1回あるとすれば、40年間に作用する繰返し数は約15,000回となる。近年機器の起動停止は次第にその度数を増す傾向にあるから、強度上の信頼性をより確実なものとするためにはリテンディングリング材の疲れ、とくに低サイクル疲れに対し十分の考慮を払う必要がある。

以上のような観点から、最も広く使用されている18Mn-5Cr鋼

につき基本特性としての一連の疲れ特性を把握することを意図した。本報告では一連の計画のうち最も基本となると考えられる両振り定ひずみサイクル下の疲れ特性について得られた結果を報告する。なお試験に際して、 $10 \sim 10^8$ サイクルの領域を日本製鋼所が、やや高い繰返し数の $10^2 \sim 10^4$ サイクル領域を三菱電機が分担して行なった。

2. 供 試 材

2.1 化学成分と熱処理ならびに冷間加工法

試験に供した18Mn-5Crオーステナイト鋼の化学成分を表2.1に示す。

素材は熱間鍛造した直径約28mm、長さ約450mmの丸棒で、熱間鍛造終了後水冷し、さらに水冷した丸棒に1,050°C、2時間の溶体化処理を加えた（以後この材料を軟質材と呼ぶ）。

実際のリテンディングリングでは、溶体化処理されたリング状の素材を特殊な工程によって内周から力を加え冷間加工させるが、基本的特性を調べる本試験では、一軸引張りによって冷間加工を加えることとした。実体ではその内周においては、たが張り応力と同時に半径方向応力が作用した2軸状態の冷間加工をうけるが、内周側は使用時除去されるから、一軸引張りの冷間加工が実体を代表すると考えて大きな誤りはないとの観点である。すなわち、軟質化した素材丸棒の外周を機械加工によって、長い平行部をもつ引張試験片状に仕上げた後引張試験機によって伸延し、その伸び率によって与えられる加工率が、20%ならびに40%となるように引張冷間加工した。なお一部の試験では後述のように疲れ試験片に仕上げた後、疲れ試験機によってこの操作を加えた。本報告でいう加工率は下式によって

表 2.1 化 学 成 分
Chemical composition.

単 位 %								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo
0.52	0.53	17.6	0.021	0.010	0.21	5.13	0.13	0.07

表 2.2 加工率とそのばらつき
Cold working rates.

試 料	加 工 率 %	
	平 均 値	標 準 偏 差
20 % 加工材	19.7	0.52
40 % 加工材	40.0	0.85



(a) 軟 質 材



(b) 20 % 加工材



(c) 40 % 加工材

図 2.1 供試材の顕微鏡組織 (5 %硝酸腐食, $\times 200$)
Microphotography of tested material ($\times 200$).

表 2.3 引 張 性 質
Tensile properties.

種 類	0.2 % 耐力 kg/mm ²	引 張 強 さ kg/mm ²	真破断応力 kg/mm ²	伸 び %	絞 り %	たて弾性係数 kg/mm ²
軟 質 材	37	93	200	71	55	1.95×10^4
20 % 加工材	75	108	198	50	48	1.90×10^4
40 % 加工材	108	128	201	27	39	1.83×10^4

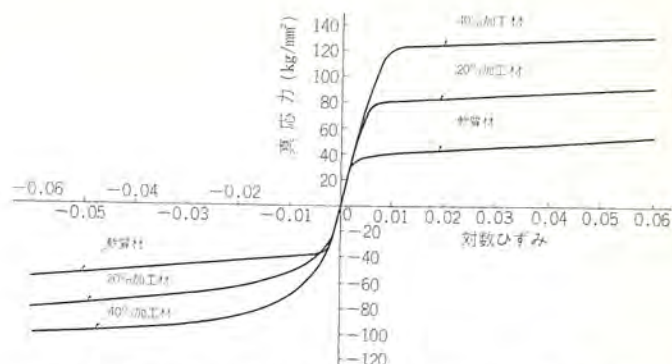


図 2.2 引張・圧縮試験における真応力-対数ひずみ線図
True stress-logarithmic strain curves.

与えられる値である。

$$\frac{l-l_0}{l_0} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに l_0 : 加工前の平行部長さ

l : 加工後の平行部長さ

なお、平行部が均等に加工を受けているかどうかを調べるために、平行部に 20 mm 間隔に標点を打刻し、加工後の伸びの変化を測定することによって、20 %および 40 %の加工率から ± 2 % (加工率として) 以上はずれたものは試験片製作から省いた。試験に供した引張加工材の全数について、各標点区間ごとに測定した加工率の平均値とその標準偏差は表 2.2 のとおりであった。

以上のようにして得られた軟質材と 20 %および 40 %加工材を試験に供した。これら 3 種の供試材の組織写真を図 2.1 に示す。

2.2 引張および圧縮性質

3 種の供試材の引張性質を表 2.3 に、また引張と圧縮にたいする応力-ひずみ線図を図 2.2 に示す。

図より明らかなように、軟質材は引張・圧縮ともその応力-ひずみ曲線は全く同様であり、十分軟質化されていることを示している。一方 20 %および 40 %加工材は圧縮側の耐力は引張側に対して低く、バウチング効果により引張側と圧縮側では全く異なった応力-ひずみ曲線となっている。また表 2.3 に示すように、引張たて弾性係数は加工率が増すにつれて減少する傾向にある。

3. 疲れ試験法

3.1 破断繰返し数が $10 \sim 10^3$ 領域の疲れ試験 (試験 A)

図 3.1 に試験片 A として示すように、試験片最小直径を 7 mm とし、圧縮時のご (挫) 屈を防ぐためと破断位置の真のひずみを制御するため、ゆるい曲率をもった砂時計形試験片を使用し、最小直径部のひずみ変化を一定の値に制御することによって繰返しひずみを与えた。

試験片の直径の変化の検出には非接着形抵抗線ひずみ計式の変位計 (新興通信製 UL 形変換器) を用いた。測定要領を図 3.2 に示す。なお本検出器は直径 0.1 mm の変化が $1,000 \times 10^{-6}$ のひずみとして検出される。試験機としては、複動シリンダ油圧式 ± 10 トン低サイクル疲れ試験機 (自家製) を使用した。

本試験では、試験片はすべて軟質材を用い、上記の直径ひずみ検出器によって直径ひずみを検出しつづまず最初引張りによって所定の冷間加工を与え、つぎにその加工率を原点として正負の直径変化を一定とする両振り定ひずみの繰返し試験を実施した。なお所定の冷間加工率は体積一定の仮定をもうけて付録 1 の式により、直径

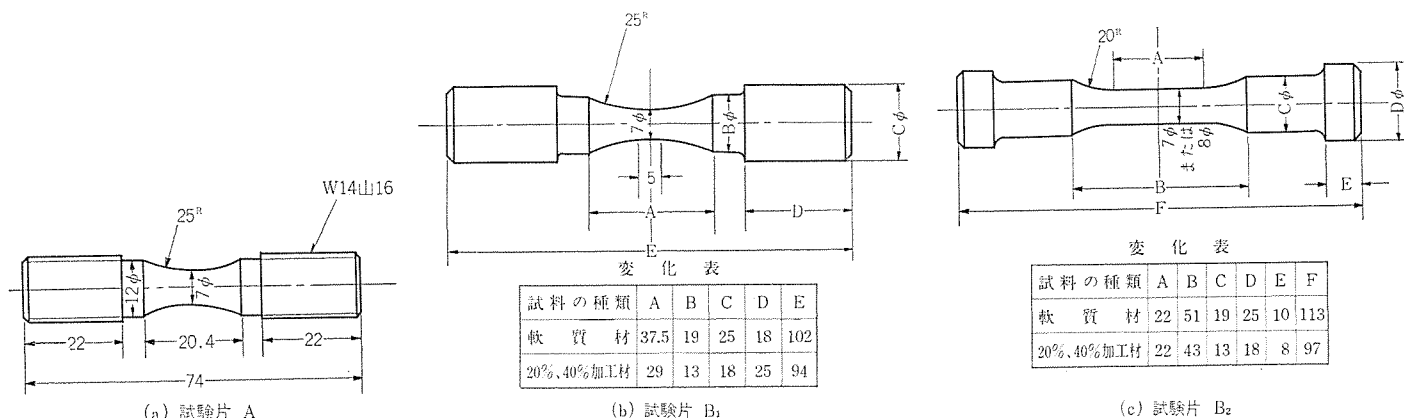


図 3.1 試験片 Test specimen.

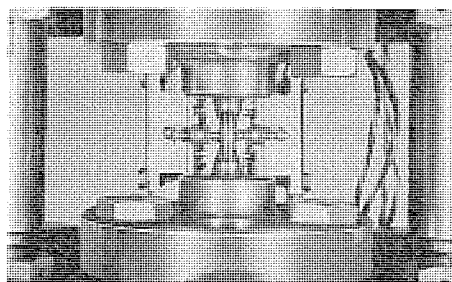
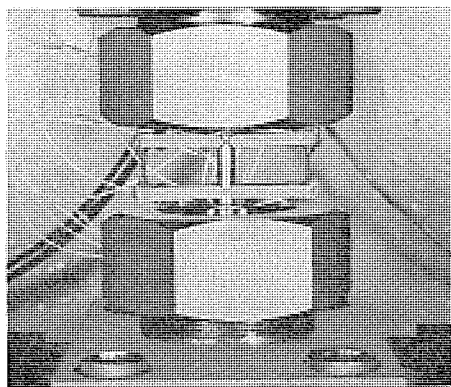
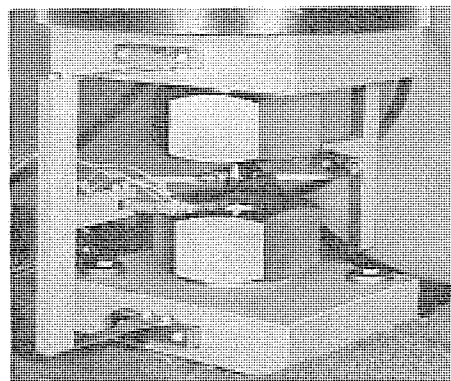


図 3.2 ひずみ測定状況 (試験 A)
View of strain measurement (test A).



(a) 軸方向変位の検出
図 3.3 ひずみ測定状況 (試験 B)



(b) 直径方向変位の検出
View of strain measurement (test B).

変化に換算した。

また試験片取付けホルダにはりつけた抵抗線ひずみ計によって荷重を検出し、疲れ試験中の荷重変化の状況を連続的に記録計に記録させた。繰返し速度は 2~5 cpm, ひずみ波形はほぼ三角形である。

3.2 破断繰返し数が $10^2 \sim 10^4$ 領域の疲れ試験 (試験 B)

与えるひずみ振幅が小さく破断繰返し数の大きい領域では、図 3.1 の平行部をもつ試験片 B_2 を使用し、図 3.3 (a) に示すように自家製の接着形抵抗線ひずみ計式の π 形変位計を用いて、平行部の軸方向のひずみを検出し制御する方法を採用した。しかしこの形式の試験片では、約 $\pm 1.5\%$ をこえるひずみ振幅を与えると、その圧縮過程でぎ屈したので、 $\pm 1.5\%$ 以上のひずみ振幅をささえる場合には平行部の短い試験片 B_1 (図 3.1) を用い、3.1 節の試験と同様直径の変化を検出しこれを制御する方法を採用した。検出器は接着形抵抗線ひずみ計式のもので、その取付け状況を図 3.3 (b) に示す。本試験では軟質材ならびに 2.1 節で述べたあらかじめ 20%, 40% に冷間加工した丸棒から上記試験片を切り出して試験に供した。

試験機は、低サイクル疲れ用に油圧駆動装置をもつ ± 6 トン 疲れ試験機 (Schenck 社製, PVQN 形) で、上記の変位計出力によって油圧回路を ON-OFF し、両振り定ひずみサイクルを加えた。ひずみ繰返し速度は 3~4 cpm, ひずみ波形は試験 A 同様ほぼ三角形で

ある。

また、ひずみ繰返し中の荷重の変化を、試験片と直列にそう入された抵抗線ひずみ形式のロードセルを用いて連続的に記録させると同時に、この荷重出力と変位検出器の出力を XY レコーダに適時接続し、荷重—変形曲線の変化の状況を追跡した。なお XY レコーダに接続し直すことによって定ひずみサイクルの制御状態が乱されることのないように、ひずみ検出器とロードセルには制御用と記録用の抵抗線ひずみ計素子を独立に具備させた。

3.3 直径方向ひずみの軸方向ひずみへの換算

試験 A および B_1 では直径方向ひずみで制御しているので、これを軸方向ひずみに換算するためつぎの式を用いた。

$$\Delta \varepsilon_T = 2 \Delta \varepsilon_T^d + (1 - 2\nu) \frac{\Delta \sigma}{E} \dots \dots \dots (3.1)$$

ここに $\Delta \varepsilon_T$: 軸方向の全ひずみ幅 (対数ひずみ)
 $\Delta \varepsilon_T^d$: 直径方向の全ひずみ幅 (対数ひずみ)
 $\Delta \sigma$: 真応力幅
 ν : ポアソン比

上記の式は塑性ひずみにたいして、体積一定の仮定と全ひずみ理論が適用できるとの仮定にもとづいている (付録 2 参照)。全ひずみ理論を使用することの誤差は別途検討を要する問題であるが、式 (3.1) は一般に用いられているようであり⁽²⁾、本報告では一応この関係式を用いて換算した。なお本報告では、応力はすべて真応力を、

ひずみはすべて対数ひずみを使用する。

4. 実験結果とその検討

4.1 ひずみ繰返し中の荷重変化

試験 B において XY レコーダに記録された荷重—変形曲線の例を図 4.1 に示す。各図の原点から始まる曲線は第 1 回目の負荷を示し、これは図 2.2 の引張りの応力—ひずみ線図の一部に相当する。各図から明らかなように、疲れ試験中の応力—ひずみ曲線は静的試験のそれと顕著に異なり、しかもひずみの繰返しとともに徐々に

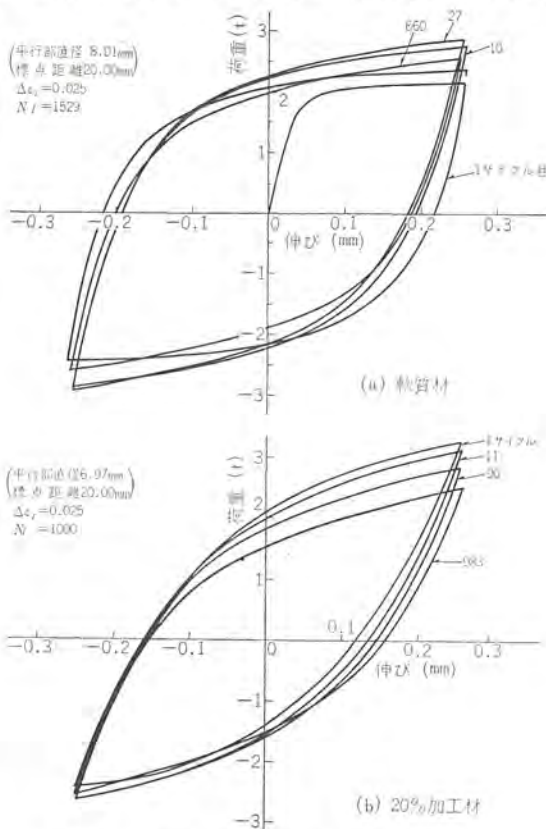
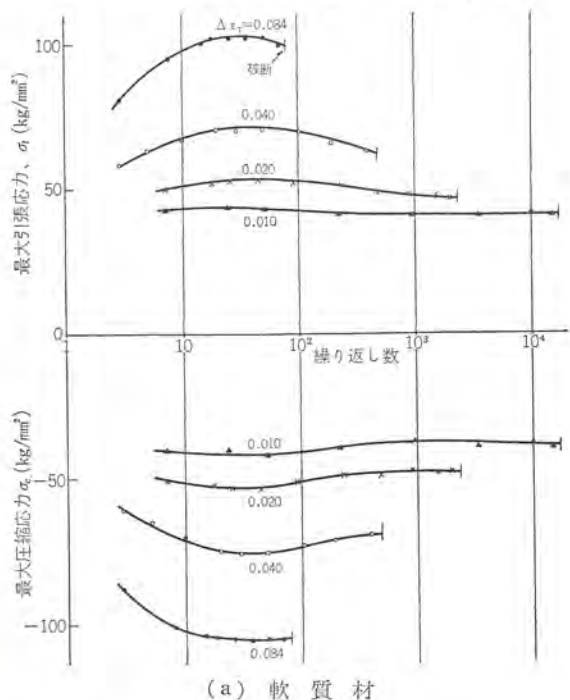


図 4.1 ひずみ繰返し中の荷重—変形図
Load-deformation diagram during strain cycling.



に変化する。図 4.2 はこのようにして測定された各ひずみサイクル中の最大引張応力 σ_t と、最大圧縮応力 σ_c のひずみ繰返しとともになう変化の状況を代表例で示したものである。20 % 加工材で $\Delta \varepsilon_r$ が小さい場合ならびに 40 % 加工材では最大引張応力はひずみの繰返しとともに単調に減少する傾向にある。一方その他の場合には軟質材で明確に見られる傾向に似ている。すなわち 20 サイクル前後まで速かに増加したのち、ひずみ繰返しとともに徐々に応力を減じて破断に至る。なお $\Delta \varepsilon_r$ が 1 % 前後以下になると、応力増減の

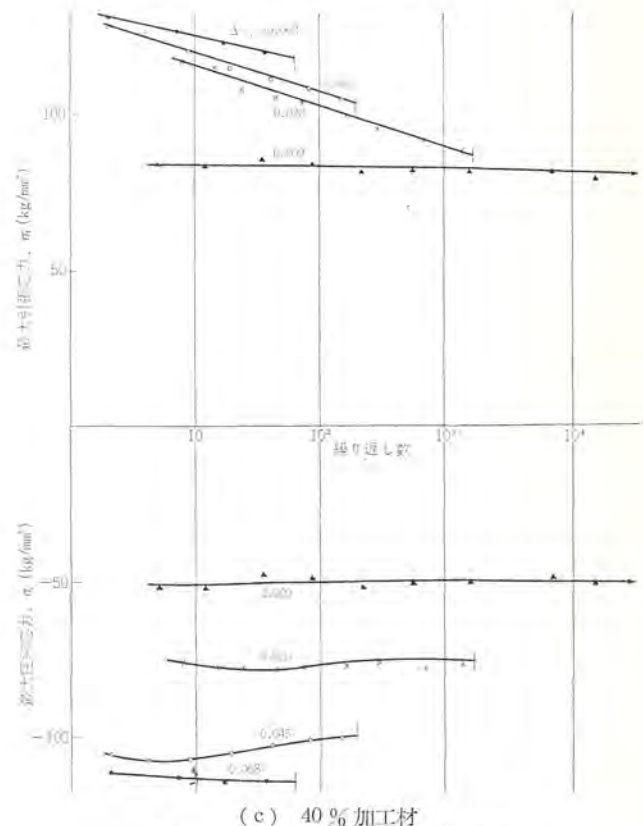
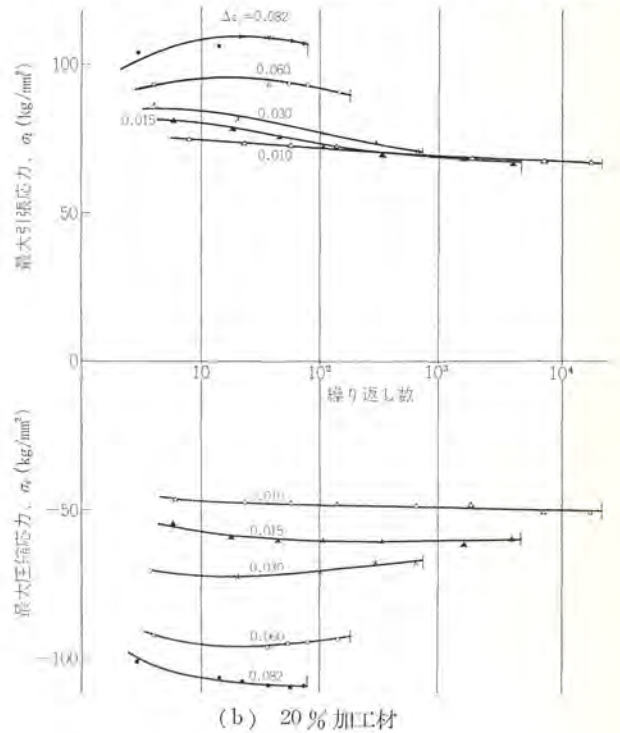


図 4.2 ひずみ繰返し中の応力変化
Stress change during strain cycling.

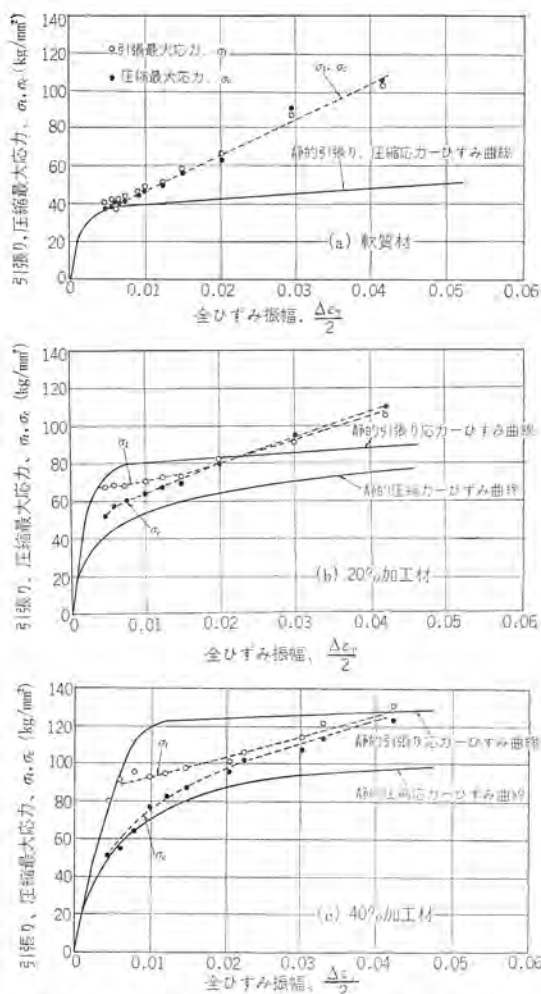


図 4.3 ひずみ振幅と1サイクル中の最大応力
Relation between strain amplitude and maximum stress in a cycle.

大きさはきわめてわずかである。

あるひずみ振幅のひずみ繰返しを与えた場合、上記のように試験片の応力は変化するが、そのひずみ振幅を代表する応力の値として、4.4節と付録3で述べるような観点から、破断繰返し数の0.37倍の繰返し数における応力値を採用し、ひずみ振幅との関係をプロットしたのが図4.3である。また同図には、図2.2の静的な応力-ひずみ曲線も併記した。同図より、つぎの事実が観察される。

(1) 軟質材では、与えたひずみ振幅にたいしてすべて $\sigma_t = \sigma_c$ であり、変形上の方向性はない。また静的な応力-ひずみ曲線を基準にとるとき、実験範囲の全域にわたって、ひずみ繰返しによって硬化している。

(2) 20%加工材と40%加工材は、与えたひずみ振幅が小さい場合には $\sigma_t > \sigma_c$ であるが、ひずみ振幅が大きくなるにつれて両者は接近しついに $\sigma_t = \sigma_c$ となる。すなわち、与えた繰返しひずみ振幅が小さいときには、引張塑性加工により引張側に強化された効果が残存しているが、ひずみ振幅が大きくなるとそのような変形上の方向性がなくなる。その限界ひずみ振幅は20%加工材で約2.5% (全ひずみ幅にすると約5%)、40%加工材で4%以上 (全ひずみ幅8%以上) である。

また、静的な応力-ひずみ曲線を基準にすると、引張側では限界ひずみ振幅以下では繰返し軟化であり、限界ひずみ振幅以上で

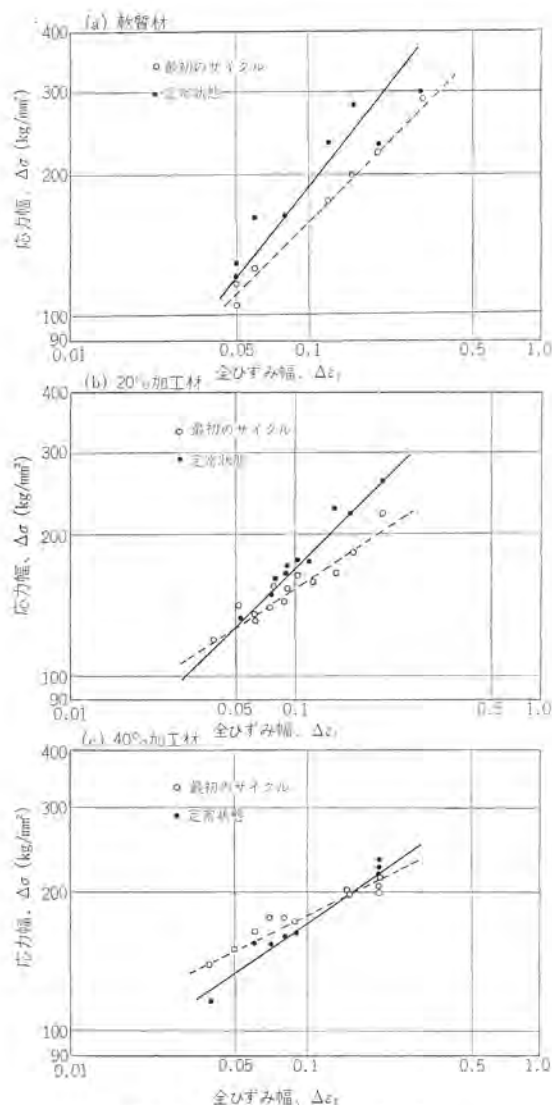


図 4.4 $\Delta\sigma$ と $\Delta\varepsilon_f$ の関係
Relation between $\Delta\sigma$ and $\Delta\varepsilon_f$.

は繰返し硬化である。一方圧縮側では軟質材同様全領域を通じて繰返し硬化である。

以上は試験Bにおける結果であるが、破断繰返し数が10サイクル前後の試験を含む試験Aについて、第1回目の繰返しにおける応力幅と荷重が安定した繰返し数における応力幅を、与えたひずみ幅にたいしてプロットしたのが図4.4である。すなわち、第1回目の繰返しにおける応力幅を基準にとって表現すると、軟質材はすべて繰返し硬化である。また20%および40%加工材はそれぞれひずみ幅が約5%および約15%以上では繰返し硬化であり、それ以下では繰返し軟化であるといえることができる。この結果は前記の限界点約5%および8%以上とよく対応している。すなわち、試験Bでの40%加工材の限界点8%以上は約15%と考えるのが妥当であろう。

4.2 疲れき(亀)裂発生寿命と破断寿命

破断寿命のほかに、疲れき裂の発生寿命が、その材料の疲れ強度を決定する。そこで、試験Aにおいて、試験中連続的に試験片表面を観察し、破断寿命とき裂発生寿命の関係を求めた。き裂発生寿命は、試験片表面に約1mmのき裂が発生するまでの繰返し数とした。図4.5は破断寿命 N_f とき裂発生寿命 N_c との関係を示しているが、両対数グラフ上で N_f と N_c は冷間加工率に関係なく1

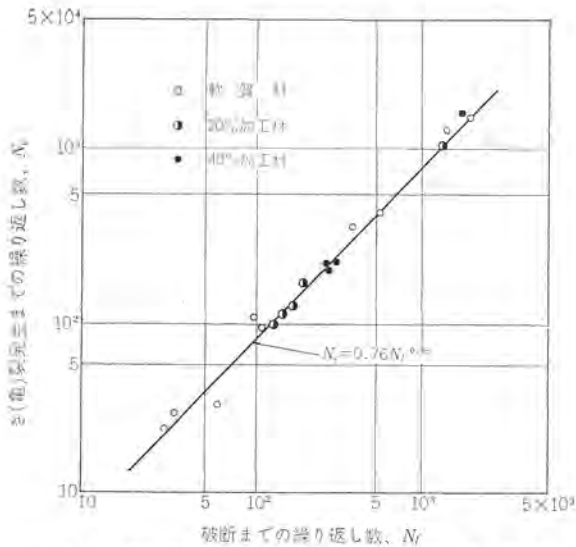


図 4.5 き裂発生繰り返し数と破断繰り返し数の関係
Relation between number of cycles of crack initiation and failure.

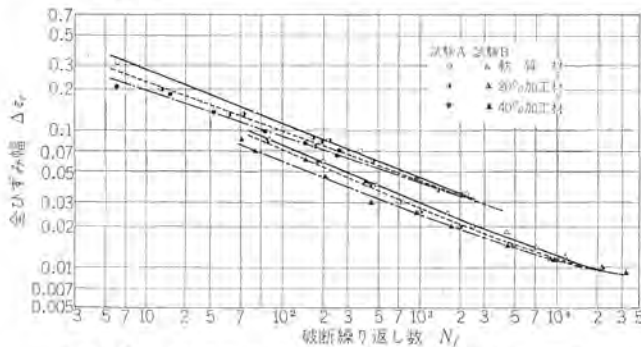


図 4.6 全ひずみ幅 $\Delta\epsilon_T$ と破断繰り返し数 N_f の関係
Relation between $\Delta\epsilon_T$ and N_f .

本の直線となる。すなわち図上に示した実験式より、き裂発生寿命は冷間加工率に関係なく破断寿命の約 76 % にあたる。これはき裂発生時には、冷間加工の有無に係わらず材質的にはほぼ同じ状態になっていることを示しているように思われる。

4.3 ひずみ幅と破断寿命の関係

図 4.6 に与えた全ひずみ幅と破断までの繰り返し数の関係を示す。試験 A と試験 B の間にはやや差があり、とくに長寿命側にその傾向が大きい。独立に行なわれた両試験は、絶対値の点でさらに追究すべき問題の存在していることを示している。

しかしながら、破断寿命の傾向や加工率の影響などについては、両者とも共通した事実を物語っている。すなわち、ひずみ幅の大きい短寿命の場合には引張冷間加工は疲れ寿命を減少させるが、ひずみ幅が小さく破断繰り返し数がふえるにつれて冷間加工の影響は少なくなり、 $N_f = 4 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ の領域では、軟質材と 2 種の加工材の寿命はほぼ等しい。

多くの材料について行なわれた低サイクル疲れ試験の $\Delta\epsilon_T - N_f$ 曲線を整理すると、材料によってその曲線はかなり異なるが、 $N_f = 10^3$ ないしは 10^4 ではその差は少なくなり、平均的な値をとると、 $(\Delta\epsilon_T)_{N_f=10^3} \approx 0.01$ 、 $(\Delta\epsilon_T)_{N_f=10^4} \approx 0.02$ となることが報ぜられている⁽³⁾。試験 B の結果では、加工率のいかに係わらず $N_f = 10^4$ におけるひずみ幅 $\Delta\epsilon_T$ は約 0.11 であり、上の経験的事実とよく一致している。本材料はまえがきで述べたように、 10^4 回前後の繰り返し寿命が問題となる場合に使用されることが多いから、 $(\Delta\epsilon_T)_{N_f=10^4} \approx 0.01$ という経験的法則は、本材料の場合も大ざっぱな寿命のめや

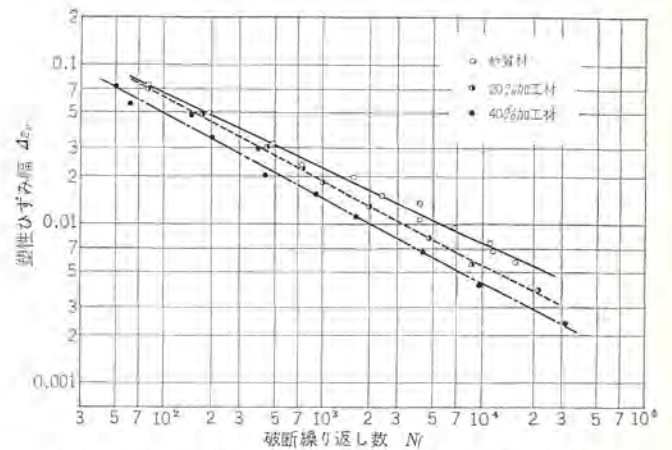


図 4.7 塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ と破断繰り返し数 N_f の関係
Relation between $\Delta\epsilon_p$ and N_f .

すとして有効であるといえることができる。

4.4 塑性ひずみ幅と破断寿命

低サイクル疲れにおいては、塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ と破断繰り返し数の間に

$$\Delta\epsilon_p N_f^\alpha = c \quad (4.1)$$

ここに α, c : 定数

の関係のあることが見出され⁽⁴⁾⁽⁵⁾、多くの研究者によって確かめられて、Manson-Coffin の式として広く認められている。また全ひずみ幅と塑性ひずみ幅の関係はつぎの式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_T &= \Delta\epsilon_p + \Delta\epsilon_e \\ &= \Delta\epsilon_p + \frac{\Delta\sigma}{E} \quad (4.2) \end{aligned}$$

ここに $\Delta\epsilon_e$: 弾性ひずみ幅

E : たて弾性係数

前記のように、全ひずみ幅 $\Delta\epsilon_T$ を一定とするひずみ繰り返しを与えると、ひずみ繰り返し中の応力幅 $\Delta\sigma$ は最初急速に、その後は緩慢に変化する。したがって式 (4.2) から求まる塑性ひずみ幅 $\Delta\epsilon_p$ もひずみ繰り返しに伴い変化する。そこで付録 3 に示すような観点から、破断繰り返し数の $0.37 (=1/2)$ 倍の繰り返し数における $\Delta\epsilon_p$ をもってある与えた $\Delta\epsilon_T$ に対応する $\Delta\epsilon_p$ として採用することとする。なお Manson は、ひずみ繰り返しにともなう軟化もしくは硬化は、ひずみ繰り返しの初期に起こるとして $\frac{1}{2} N_f$ における $\Delta\epsilon_p$ をとることを提案しているが⁽⁶⁾、本実験の場合には、 $0.37 N_f$ における $\Delta\epsilon_p$ と $\frac{1}{2} N_f$ における $\Delta\epsilon_p$ には実験誤差の範囲でほとんど差はなかった。

以上のようにして得られた $\Delta\epsilon_p$ と N_f との関係を試験 B の場合についてプロットしたのが図 4.7 である。両対数グラフ上でよい直線を示し、本材料にたいしても Manson-Coffin の式がよく成立している。最小自乗法により最適直線を求めると、つぎの関係式が得られた。

$$\begin{aligned} \text{軟質材:} & \quad \Delta\epsilon_p N_f^{0.47} = 0.59 \\ 20\% \text{加工材:} & \quad \Delta\epsilon_p N_f^{0.53} = 0.76 \\ 40\% \text{加工材:} & \quad \Delta\epsilon_p N_f^{0.53} = 0.58 \end{aligned} \quad (4.3)$$

式 (4.1) の定数 α は Coffin は材料の種類に無関係にほぼ 0.5 であることを提唱し⁽⁷⁾、Manson は材料によって異なるが 0.6 に近い値であると述べているが⁽³⁾、一般には 0.5 に近いが必ずしも 0.5 ではないと認識されているようである。本材料の場合も式 (4.3) に見られるように 0.5 に近い値である。また c については、Coffin は引

張試験より得られた材料の破断延性 ε_F を用いると、 $c=\varepsilon_F/2$ がよい近似を与えたとし、Martin は $c=\varepsilon_F/\sqrt{2}$ のほうがよい近似を与えている⁽⁸⁾。ここに ε_F は引張試験におけるしほりを ψ とすると、 $\varepsilon_F=ln[1/(1-\psi)]$ で与えられる量である。本材料の場合、軟質材のしほり ψ は 0.55 であるから $\varepsilon_F=0.80$ となる。したがって $\varepsilon_F/2=0.40$ 、 $\varepsilon_F/\sqrt{2}=0.56$ であり、式 (4.3) より c の値は $\varepsilon_F/\sqrt{2}$ に近い。

4.5 加工率の影響

図 4.7 より明らかなように、塑性ひずみ幅と破断寿命の関係においては、全ひずみ幅のそれと異なり試験範囲の全域にわたって冷間加工は疲れ寿命を減少させる。

本材料の冷間加工は引張塑性加工であるから、加工材のひずみ繰返し試験は図 4.8 に示すように、加工率に相当するひずみ ε_m を平均ひずみとする塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_P$ なる繰返し試験、あるいは $\varepsilon_m + \frac{\Delta\varepsilon_P}{2} = \varepsilon_{\max}$ を最大ひずみとする塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_P$ なるひずみ繰返し試験と考えることができる。

平均ひずみの影響にたいしては種々の仮説が提唱されているが、大略はこれらの仮説を一般化した形でつぎのように表わしている⁽⁹⁾。

Sachs-Weiss らの仮説：

$$N_f \Delta\varepsilon_P^a = \frac{2a}{4} (\varepsilon_F - \varepsilon_m) \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

Ohji らの仮説：

$$\left(N_f - \frac{1}{4}\right) \Delta\varepsilon_P^a = \frac{2a}{4} \left\{ \varepsilon_F^a - \left(\varepsilon_m + \frac{\Delta\varepsilon_P}{2}\right)^a \right\} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

菊川らの説：

$$\left(N_f - \frac{1}{2}\right) \Delta\varepsilon_P^a = \frac{2a}{4} \varepsilon_F^a - \frac{1}{2} \left(\varepsilon_m + \frac{\Delta\varepsilon_P}{2}\right)^a \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

Martin の説：

$$\left(N_f - \frac{1}{2}\right) \Delta\varepsilon_P^a = \frac{1}{2} \left\{ \varepsilon_F^a - \left(\varepsilon_m + \frac{\Delta\varepsilon_P}{2}\right)^a \right\} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

ここに ε_F は前記の引張試験から求める値ではなく、 $\varepsilon_m=0$ のひずみ繰返しによって得られた式 (4.1) の定数から求める値であって、式 (4.4)、(4.5)、(4.6) の場合には $\varepsilon_F = \frac{4}{2} \frac{1}{a} c$ 、式 (4.7) の場合には $\varepsilon_F = 2 \frac{1}{a} c$ である。

Ohji ら⁽¹⁰⁾は引張試験を $N_f=1/4$ 、 $\Delta\varepsilon_P=2\varepsilon_F$ の低サイクル疲れと解釈することによって、式 (4.1) を

$$N_f \Delta\varepsilon_P^a = \frac{2a}{4} \varepsilon_F^a \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

と書きかえ、1 ひずみサイクル当たりの疲れ損傷は $\Delta\varepsilon_P^a$ に比例し、

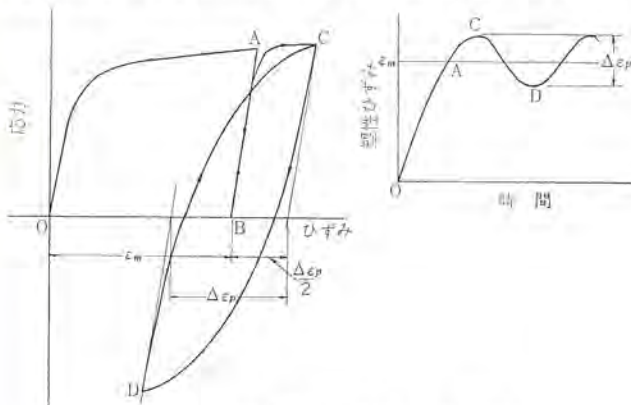


図 4.8 冷間加工とひずみ繰返し試験
Correlation of cold working and strain cycling.

表 4.1 冷間加工による疲れ寿命の低下割合
Rate of reduction of fatigue life by cold working.

塑性ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_P$	実験値	仮説			
		Sachs-Weiss 式 (4.4)	Ohji ら 式 (4.5)	菊川ら 式 (4.6)	Martin 式 (4.7)
$\frac{N_{f20}}{N_{f0}}$	0.005	0.51	0.96	0.96	0.96
	0.05	0.89	0.89	0.95	0.95
$\frac{N_{f40}}{N_{f20}}$	0.005	0.60	0.73	0.88	0.88
	0.05	0.60	0.69	0.87	0.87

注) N_{f0} 、 N_{f20} 、 N_{f40} ：軟質材、20%加工材、40%加工材の破断繰返し数

損傷が $\frac{2a}{4} \varepsilon_F$ に等しくなったときに破断するとの仮説のもとに、式 (4.5) を誘導している。その際、平均ひずみを加える過程は、繰返し $1/4$ サイクルで、ひずみ幅が $2\varepsilon_{\max}$ のひずみサイクルと考えているが、加工率に相当するひずみ ε_m を加える過程を、繰返し $1/4$ 、塑性ひずみ幅が $2\varepsilon_m$ の低サイクル疲れと解釈すれば、

$$\frac{1}{4} (2\varepsilon_m)^a + N_f \Delta\varepsilon_P^a = \frac{2a}{4} \varepsilon_F^a$$

となる。したがって、つぎの関係式をうる。

$$N_f \Delta\varepsilon_P^a = \frac{2a}{4} (\varepsilon_F^a - \varepsilon_m^a) \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

これらの仮説と実験値との適合性を調べるために、式 (4.3) の軟質材にたいする定数 $a=0.47$ ($a=2.128$)、 $c=0.59$ を用い、 ε_F を求めた後各式によって寿命の減少率を求めたのが表 4.1 である。同表には塑性ひずみ幅が 0.5% および 5% のときの軟質材の 20% 加工材にたいする破断寿命の比、および 40% 加工材の 20% 加工材にたいする破断寿命の比で示してある。式 (4.3) で与えられる実験値と比較すると、式 (4.5) ならびに式 (4.9) による推定値が全般的に比較的近い値を示している。

5. む す び

リティニグリング用非磁性鋼として重要な地位を占める 18 Mn-5 Cr 鋼につき、両振り定ひずみ疲れ試験を行ない、軟質材と引張冷間加工材の基本的な低サイクル疲れ特性を調べ、つぎの結果を得た。

(1) ひずみ繰返し中に軟質材は硬化する。一方引張冷間加工材は、ひずみ振幅が小さいときには繰返しによって引張側の最大応力が減少し、圧縮側の最大応力が増加するが、全体的には繰返し軟化となる。しかし、あるひずみ振幅以上になると、軟質材同様繰返し硬化となる。その境界となる全ひずみ幅は、20% 加工材の場合約 5%、40% 加工材の場合約 15% である。

(2) この限界点以下のひずみ繰返しでは、引張冷間加工による引張側の強化効果が疲れ破断に至るまで残存しているが、限界値以上のひずみ繰返しでは、引張側の強化硬化が失われ、軟質材にひずみ繰返しを加えた場合に似た荷重-変形挙動を示すようになる。

(3) 冷間加工率は、与えた全ひずみ幅 $\Delta\varepsilon_P$ が大きく、破断までの繰返し数 N_f が小さい領域では、明らかに影響を及ぼし、加工率が大きいほど破断寿命は短い。しかしながら、 $\Delta\varepsilon_P$ が小さくなるにつれてその影響は減少し、 N_f が $4 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ の領域では冷間加工の有無に関係なく破断寿命はほぼ等しくなり、 $(\Delta\varepsilon_P)_{N_f=10^4} \approx 0.01$ が加工率に関係なく大ざっぱなめやすとして使用できる。

(4) 一方塑性 ひずみ幅 $\Delta \varepsilon_p$ と破断までの繰返し数 N_f との間には

$$\text{軟質材: } \Delta \varepsilon_p N_f^{0.47} = 0.59$$

$$20\% \text{加工材: } \Delta \varepsilon_p N_f^{0.53} = 0.76$$

$$40\% \text{加工材: } \Delta \varepsilon_p N_f^{0.53} = 0.58$$

の関係式が成立し、破断繰返し数の大きい領域でも冷間加工率が大きいほど同じ $\Delta \varepsilon_p$ にたいする破断寿命が短い。

なおこのような $\Delta \varepsilon_p - N_f$ 関係に及ぼす加工率の影響を推定する方法としては、1 サイクル中の被害を $\Delta \varepsilon_p^a$ であるとし、冷間加工を加える過程を 1/4 サイクルとみなすことによって誘導された関係式が本材料の場合比較的良好な結果を与える。

(5) 約 1 mm のき裂発生寿命は、冷間加工率に関係なく破断寿命のほぼ 75 % である。

以上本材料の低サイクル疲れについて、加工率との関係においてその基本的な疲れ特性を調べたが、これを実際の機器設計に適用するには、リテニングリングの作用応力の観点から、片振り定応力繰返し疲れ強度との関連、さらに切欠きがある場合の切欠き底のひずみ繰返しの挙動などについて一層の検討が必要であらう。また独立に行なわれた試験 A と試験 B において、結果の絶対値にやや差が認められたことも、この種試験にありがちな機差のみに基づくもの

かどうかさらに検討を要する問題である。今後の問題点を記してむすびとしたい。

参 考 文 献

- (1) R. A. Bandry, G. D. Cooper : Trans. ASME, Ser. D, 87, 245 (1965)
- (2) T. Slot, R. H. Stentz : Experimental Mechanics, 8, No. 3, 107 (1968)
- (3) S. S. Manson : Experimental Mechanics, 5, No. 7, 193 (1965)
- (4) S. S. Manson : NACA, TN 2,933 (1953)
- (5) J. F. Travernelli, L. F. Coffin, Jr. : Trans. ASM, 51, 438 (1959)
- (6) S. S. Manson : Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue, (1966) MacGraw-Hill Book Co.
- (7) L. F. Coffin, Jr. : Trans. ASME, 76, 931 (1954)
- (8) D. E. Martin : Trans. ASME, Ser. D, 83, 565 (1961)
- (9) 大路 : 日本機械学会誌, 70, 36 (昭 42)
- (10) K. Ohji, W. R. Miller, J. Marin : Trans. ASME, Ser. D, 88, 801 (1966)

付録 1 冷間加工率の直径ひずみへの変換

本文式 (2.1) の冷間加工率 k の定義より

$$k = \frac{l - l_0}{l_0}$$

これを対数ひずみに直すと、

$$\ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + k)$$

体積一定の仮定より

$$\ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A} = 2 \ln \frac{d_0}{d}$$

ここに A_0, A : 加工前後の断面積, d_0, d : 加工前後の直径したがって

$$\left(\frac{d_0}{d}\right)^2 = (1 + k) \quad \text{.....(付 1.1)}$$

付録 2 たてひずみとよこひずみの関係

主応力を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, 主ひずみを $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, その塑性ひずみ成分を $\varepsilon_1^p, \varepsilon_2^p, \varepsilon_3^p$ とすれば、ひずみ増分理論より

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_1 &= \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right] \frac{d\varepsilon_p}{\sigma} + \frac{1}{E} \left[d\sigma_1 - \nu(d\sigma_2 + d\sigma_3) \right] \\ d\varepsilon_2 &= \left[\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_1) \right] \frac{d\varepsilon_p}{\sigma} + \frac{1}{E} \left[d\sigma_2 - \nu(d\sigma_3 + d\sigma_1) \right] \\ d\varepsilon_3 &= \left[\sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right] \frac{d\varepsilon_p}{\sigma} + \frac{1}{E} \left[d\sigma_3 - \nu(d\sigma_1 + d\sigma_2) \right] \end{aligned} \right\} \quad \text{.....(付 2.1)}$$

ここに

$$d\varepsilon_p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_2^p)^2 + (d\varepsilon_2^p - d\varepsilon_3^p)^2 + (d\varepsilon_3^p - d\varepsilon_1^p)^2}$$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

σ_1 方向の単純引張 (または圧縮) の場合には、 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ であり、 $d\varepsilon_1^p + d\varepsilon_2^p + d\varepsilon_3^p = 0$ なる体積一定の条件から式 (付 2.1) はつぎのようになる。

$$d\varepsilon_1 = \frac{|d\varepsilon_p|}{2} + \frac{d\sigma_1}{E}, \quad d\varepsilon_2 = d\varepsilon_3 = -\frac{|d\varepsilon_p|}{4} - \frac{\nu}{E} d\sigma_1$$

上式から $d\varepsilon_p^2$ を消去してつぎの関係をうる。

$$\begin{aligned} d\varepsilon_1 &= -2d\varepsilon_2 + \frac{d\sigma_1}{E}(1 - 2\nu) \\ &= 2|d\varepsilon_2| + \frac{d\sigma_1}{E}(1 - 2\nu) \quad \text{.....(付 2.2)} \end{aligned}$$

式 (2.2) を全ひずみ理論で扱えば

$$\varepsilon_1 = 2|\varepsilon_2| + \frac{\sigma_1}{E}(1 - 2\nu) \quad \text{.....(付 2.3)}$$

となり、本文の式 (3.1) をうる。

付録 3 塑性ひずみ幅の代表値の選定

ひずみ繰返し中に応力幅 $\Delta \sigma$ が増減すると、塑性ひずみ幅 $\Delta \varepsilon_p$ もそれに対応して減少あるいは増加する。一般にひずみ幅が変動する場合、その寿命は直線被害側になりによく従うとされており、大路らは 1 サイクル中の被害は $\Delta \varepsilon_p^a$ であるとして取扱っている⁽¹⁰⁾。いま、このような変動する $\Delta \varepsilon_p$ と同じ破断繰返し数で破断する塑性ひずみを $\Delta \varepsilon_{pe}$ とし、上記の被害則を適用すれば、つぎの関係式が成立する。

$$\int_{N=0}^{N=N_f} \Delta \varepsilon_p^a dN = \Delta \varepsilon_{pe}^a N_f \quad \text{.....(付 3.1)}$$

ここに N : 繰返し数

したがって $\Delta \varepsilon_p$ が変動する場合にその代表値としてつぎの式で求める $\Delta \varepsilon_{pe}$ を用いればよい。

$$\Delta \varepsilon_{pe} = \left[\frac{1}{N_f} \int_{N=0}^{N=N_f} \Delta \varepsilon_p^a dN \right]^{\frac{1}{a}} \quad \text{.....(付 3.2)}$$

本実験においては、 $\Delta \varepsilon_p$ はひずみ繰返しの初期にかなり急速に変化するが、その後の寿命の大部分を占める繰返しでは緩慢な変化であり、 $\Delta \varepsilon_p$ と繰返し数 N を両対数紙上にプロットするとほぼ直線であった。したがって、 $\Delta \varepsilon_p$ と N の関係をつぎの式で表わすことができる。

$$\Delta\varepsilon_p = \Delta\varepsilon_{po} N_f^m \dots\dots\dots (\text{付 3.3})$$

ここに $\Delta\varepsilon_{po, n}$: 定数

この関係式を式 (付 3.2) に代入して演算するとつぎの関係式を得る。

$$\frac{\Delta\varepsilon_{pe}}{\Delta\varepsilon_{pf}} = \left(\frac{1}{1+am} \right)^{\frac{1}{a}}$$

ここに $\Delta\varepsilon_{pf}$: 破断時の $\Delta\varepsilon_p$

さらに上式と式 (付 3.3) より

$$\frac{N_e}{N_f} = \left(\frac{1}{1+am} \right)^{\frac{1}{am}} \dots\dots\dots (\text{付 3.4})$$

ここに N_e : $\Delta\varepsilon_p$ が $\Delta\varepsilon_{pe}$ なる値を示す繰返し数

N_f : 破断繰返し数

となる。

各実験結果より m を求めると、 m は 0.004~0.03 の範囲にあった。また $a (=1/\alpha)$ は 2 に近い値であるから、 $am \ll 1$ である。したがって式 (付 3.4) は近似的につぎようになる。

$$\frac{N_e}{N_f} = \frac{1}{e} \left(1 + \frac{ak}{2} \right) \approx \frac{1}{e} \approx 0.37$$

$$e = 2.718, \dots\dots$$

すなわち、 $0.37 N_f$ の繰返し数にたいする $\Delta\varepsilon_p$ を変みとれば、それが代表するひずみ幅 $\Delta\varepsilon_{pe}$ となる。

サイリスタ高圧変換器の研究

大野 栄一*・光岡 宏*・木村 好男**

Development of High Voltage Thyristor Converters

Central Research Laboratory Eiichi OHNO・Hiroshi MITSUOKA・Yoshio KIMURA

Importance of developing thyristors is on the gradual increase with the object of applying them to the conversion and control of large electric power such as used for DC transmission.

This accompanies urgent need of developing special technique to connect more than one hundred elements in series. To achieve the purpose Mitsubishi has made basic study on the problems and completed a model set having 120 elements in series which is close to a practical unit to be put in use. This is a first successful step to the establishment of connecting a good many number of the elements in series and of fundamental technique for a high voltage firing system. It has paved the way to the practical operation of the device.

1. ま え が き

直流送電などの大電力変換制御には、従来高圧水銀整流器が用いられているが、近年電力用サイリスタの進歩は著しく、この分野にも

表 1.1 サイリスタと水銀バルブの比較
Comparison of thyristors with mercury valves.

項 目	サイリスタ	水銀バルブ
1. 安定性(信頼度)	本質的に逆弧を生じない	確率的に逆弧を生じる
2. コンパクト化	油浸構造により屋外設置が可能	空調を施したバルブホールを必要とし所要スペース大
3. 運転性能	スイッチング時間が短いため高効率運転が可能 高電圧(100 kV 以上)で損失大 熱容量が小さいため過負荷耐量小	スイッチング時間が長いめ力率改善装置が大形化する 低電圧(100 kV 以下)で損失大 過負荷時に逆弧が急増する
4. 冷 却	冷やすだけでよく、冷却装置が簡単	精密な温度制御装置を必要とし、冷却装置が複雑
5. 保 守	本質的に保守不要、長寿命運転可能	真空系を必要とし保守大、定期的にオーバーホールが必要、予備加熱時間を必要とする
6. 定 格	直列接続により任意(自由度大)	固定的、段階的(自由度小)

大きな変革をもたらす機運にある。

サイリスタは周知のように固体素子で、アーク現象を基礎とする水銀整流器と本質的に異なり、表 1.1 に示す多くの特長をもっている。一方、最大の問題点は、サイリスタ素子の耐圧が数 kV 以上は望めないために、これを数十～数百 kV を必要とする直流送電などに使用するには、100 個以上の素子を直列接続するための特殊技術の開発が急務となる。図 1.1 はこのことを考慮して、高圧変換器の開発に必要な事項をブロック的に示したものである。

この中とくにサイリスタ化に伴う問題点としては、

(a) 直列接続法 (b) 高圧点弧方式 (c) 組立構造がある。

以下、これらの点を中心とし、当社におけるサイリスタ高圧バルブの研究開発の現状を紹介する。

2. サイリスタ高圧バルブの基本問題

2.1 直列接続法

N 個の素子を直列接続すれば使用しうる電圧は、理想的には 1 個の素子の N 倍になるが、實際上適度にこの理想状態に近づけるためにはそれ相当の分圧、保護 (di/dt , dv/dt の抑制) を講じなければならない。この場合に問題となる事項とその原因を分類列举すれば表 2.1 のようになる。このうち ※印は組立構造に関連した分布容

表 2.1 直列接続時の問題事項とその原因

Some problems posed in series connection and their causes.

問 題 事 項	原 因
A 定常電圧に対する分圧 (順・逆) (静的阻止電圧)	リーカージ電流のばらつき
B 外来サージ電圧に対する分圧 (順・逆) (動的阻止電圧)	接合部静電容量のばらつき ※組立構造により決まる分布容量
C 転流回復電圧に対する分圧	残留蓄積キャリアのばらつき
D 点弧時の過渡過電圧抑制	ターンオン特性のばらつき 点弧パルスのばらつき
E 転流回復時の過渡過電圧抑制	残留蓄積キャリア 転流時の di/dt
F 点弧時 di/dt 直務の抑制	分圧用コンデンサの放電 ※分布容量の放電
G 順方向電圧上昇率の抑制	外来サージ電圧 他相転流 (六相グレース接続時)
H 過渡振動の抑制	分圧用コンデンサと直列リアクトルの共振

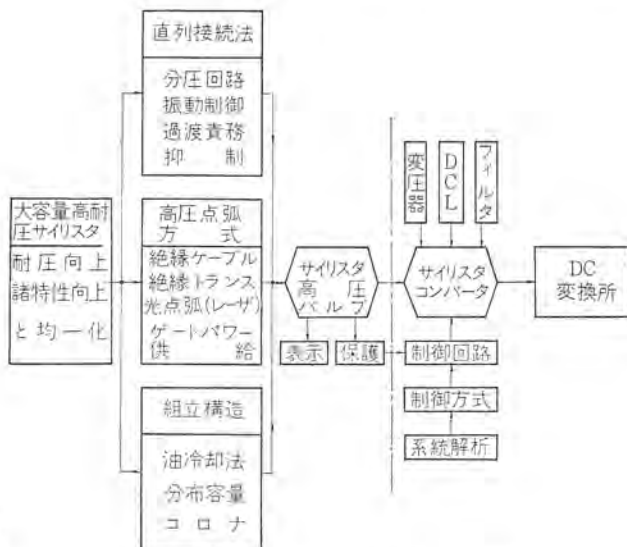


図 1.1 高圧サイリスタ変換器開発の過程
Schematic diagram for development of H. V. D. C. thyristor converter.

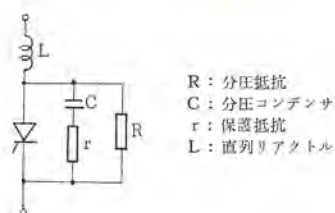


図 2.1 基本的な分圧回路
Basic voltage sharing circuit.

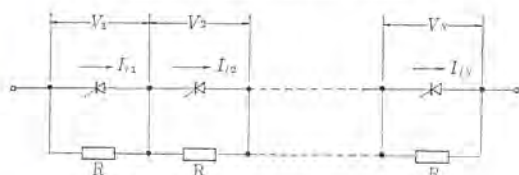


図 2.2 静的阻止電圧に対する分圧
R sharing for static voltage.

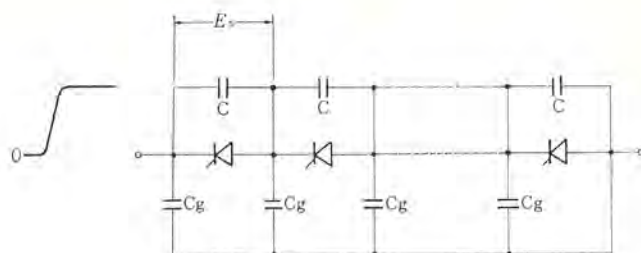


図 2.3 動的阻止電圧に対する分圧
C sharing for transient voltage.

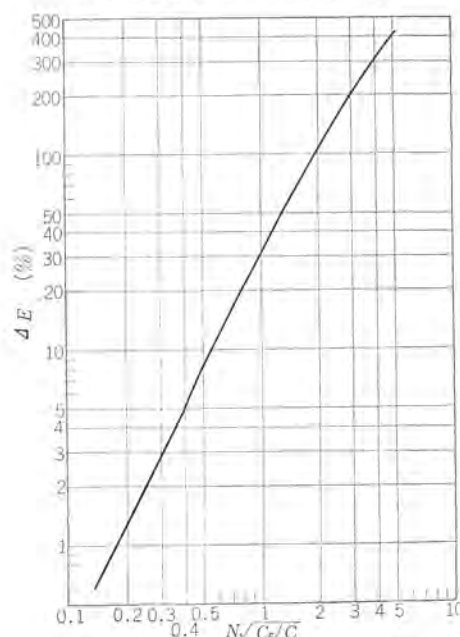


図 2.4 分布容量と分圧乱れの関係
Voltage disturbance due to stray capacitance.

$$\Delta E = N\sqrt{C_g/C} \coth(N\sqrt{C_g/C}) - 1 \quad (2.2)$$

となる。図 2.4 に不平衡分 ΔE と $N\sqrt{C_g/C}$ の関係を示す。これからわかるように、 ΔE が 50 % 以下では、これはほぼ直列数 N の 2 乗に比例する。したがって直列数が増加すれば、組立構造が重要な問題となる。

転流回復電圧の分圧に対して必要な並列コンデンサ C の容量は

$$C = \Delta Q / \Delta V_r \quad (2.3)$$

ここに ΔQ は残留蓄積キャリアのばらつき、 ΔV_r は許容不平衡電圧である。

(3) 直列リアクトル L

静的および動的な阻止電圧に対してはもちろんのこと、ターンオン、オフ過渡時といえども各素子の分相電圧が、定格電圧を越えることは許されない。これに対しては上述のように、分圧抵抗と分圧コンデンサで一応解決できるが、直列リアクトルをそう入することによりターンオン、オフ時の電流を抑制し、分圧効果をより効果的にすることができる。と同時に、これを適当に分割そう入することにより、分布容量の放電に起因した点弧時の di/dt 責務を抑制することができる。

図 2.5 に示すように、各分布容量 C_g に充電された電荷が点弧時に直列サイリスタを通じてほぼいっせいに放電するために、接地端（最下段）になるほど放電電流が増大する。いま分割そう入リアクトルがない場合、分布容量を最下段素子に等価換算した値 C_g は、

$$C_g = (1 + 2 + \dots + N)C_g \div N^2 \cdot C_g/2$$

となる。したがって、最下段素子の放電電流 i_g は、

量が原因で、直列数の増加とともにその存在が大きくなる。その他は主として使用素子諸特性のばらつきが原因し、直列数に直接関係なく分圧に影響を及ぼす。

直列接続に際して、これらすべての特性をそろえることは実際上不可能であり、そのばらつき範囲を考慮した上での強制分圧、保護方法が必要となる。

図 2.1 にこのための最も基本的な分圧回路を示す。これにより上記の諸問題を解決することが可能であり、以下その基本的な考え方について示す。

(1) 分圧抵抗 R

直列接続素子の順および逆方向リーク電流のばらつきが、静的阻止電圧に対する分圧を乱す。これを補償するために必要な並列抵抗 R は次のようになる。

図 2.2 において

$I_{11}, I_{12}, \dots, I_{1N}$ は各素子のリーク電流

V_1, V_2, \dots, V_N は各素子の分相電圧とし、

いま、 $I_{11} < I_{12} < \dots < I_{1N}$ 、 $I_{12} - I_{11} = \Delta I_1$ と仮定すれば

$$\frac{V_1}{R} + I_{11} = \frac{V_2}{R} + I_{12}$$

より、

$$R = \frac{\Delta V_1}{\Delta I_1} \quad (2.1)$$

ただし、 $\Delta V_1 = V_1 - V_2$

(2) 分圧コンデンサ C

表 2.1 の B, C, D, E, G の各項は各素子に並列コンデンサ C を接続することにより解決される。

動的阻止電圧の分圧に対しては、接合部静電容量のばらつきと組立構造により決まる分布容量の二つの原因があるが、多数個直列では後者が主因となる。これは変圧器における初期電位分布と同様、図 2.3 の等価回路で表わすことができる。ここに C_g は組立構造から決まる対地（ケース）分布容量で、通常の構造ではほぼ均等に分布する。

いま N 個直列の場合、最先端素子の分相電圧を E_N とすれば、各素子の分相電圧平均値を E として、

$$E_N = E \cdot N\sqrt{C_g/C} \coth(N\sqrt{C_g/C})$$

で表わされる。

したがってこの場合の不平衡分 $\Delta E = \left(\frac{E_N}{E} - 1 \right)$ は

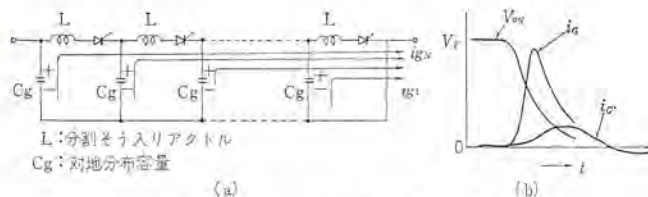


図 2.5 点弧時の分布容量放電電流
Discharge-current of stray capacitance.

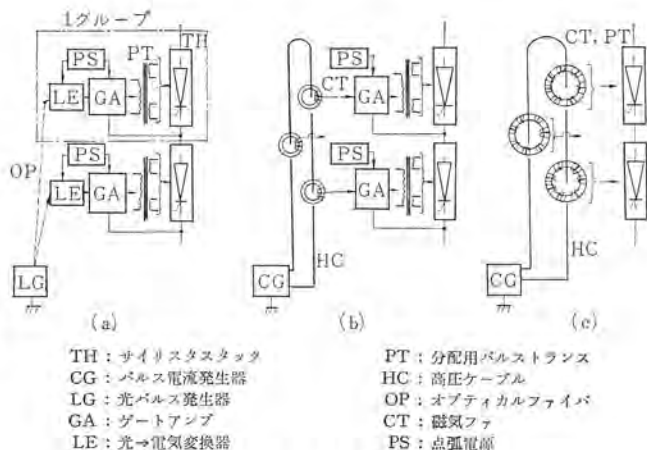


図 2.6 分割多段点弧方式
Multi-stage firing circuits.

$$i_g = C_g \cdot dv_{on}/dt = (N^2 \cdot C_g/2) \cdot dv_{on}/dt \dots \dots \dots (2.4)$$

すなわち、 i_g は直列数 N の二乗に比例して増加することになる。これを抑制するために、直列数が多くなれば適当にリアクトル（可飽和リアクトルでも可）を分割そう入し、分布容量との共振周波数を素子のターンオン特性 dv_{on}/dt より十分低くし、図 2.5 (b) の i_g' のようにこれを抑制する必要がある。

(4) 保護抵抗 r

分圧コンデンサには点弧時の放電電流を抑制し、それと同時に過渡振動を抑制するために直列抵抗が必要となるが、この値はコンデンサの分圧効果を阻害しない程度に制限しなければならない。

2.2 高圧点弧方式

従来、直列接続サイリスタの点弧には絶縁パルストランスが使われている。しかしこの方法で、高電位差にある 100 個以上の各サイリスタに対し絶縁し、かつ 1 ns 程度の速い立ち上がりをもつ点弧パルスと同時に与えることは、技術的および経済的観点から不可能である。したがって、絶縁パルスが容易に適用できる範囲内で、全直列数をいくつかのグループに分割し、これを多段化するための高圧点弧方式を開発する必要がある。これについて種々検討した結果、実用的な観点から、図 2.6 に示す三つの方式に集約された。

(a)の方式は地上装置で電気信号を光信号に変換し、これを光伝送系を通して各直列グループに導びき、ふたたび電気信号に変換するもので、高絶縁問題が一挙に解決できる。非常に速い光応答を得るために変換素子としては、レーザダイオードと光サイリスタとの組み合わせが、また光伝送系にはオプティカルファイバが最も実用性が高いと考えられる。

(b)の方式は、高絶縁を施したケーブル状一次導体に、二次巻線をもつリングコアを等間隔直線的に配置し、この一次導体に地上のパルス電流発生装置からパルス電流を供給するもので、高圧絶縁が比較的容易であるとともに良好な点弧特性が得られる。

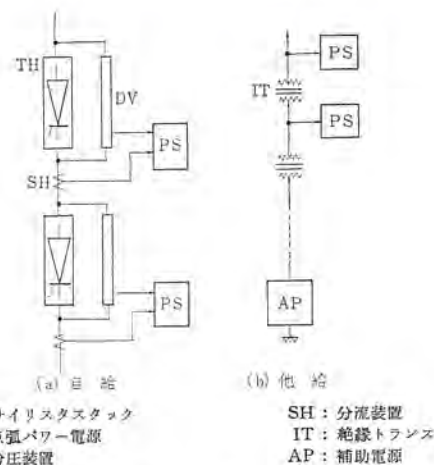


図 2.7 点弧パワーの供給方式
Power supply for pulse amplifier.

(c)の方式は、基本的な絶縁構成は(b)と同じであるが、各リングコアに所要の絶縁を施した複数個の二次巻線を設け、ゲートアンプを介することなく直接各素子をいっせいに点弧せしめるもので、最も簡単で信頼度の高い方式といえる。

上記三つのうち、(c)は構成上ゲートパルス幅に制限を受けるが、(a)および(b)では各高電位側ゲートアンプにて任意のパルス幅を得ることができる。このゲートアンプに必要なパワーを供給する方法の具体例を図 2.7 に示す。(a)の自給方法は、各グループの陽—陰極間の電圧または電流を利用するものであり、事故などによる短時間電圧降下を考慮し、小形バッテリーないしは大容量コンデンサを具備する必要がある。(b)の他給方法は、絶縁変圧器を介して地上の補助電源から点弧パワーを供給するもので、カスケード接続することで絶縁構成を簡略化することができる。

3. モデルの開発

3.1 開発過程

2 章で述べた基本的な検討結果は、各種モデルによる実験と並行して進められた。

その経過の概略を以下に示す。

- (1) CR 20 A-8 (400 V 20 A) 10 S-1 A, 分圧回路基礎試験用
- (2) CR 20 A-8 (400 V 20 A) 10 S-3 A, 三相半波零力率試験用—図 3.1
- (3) CR 20 A-8 (400 V 20 A) 20 S-1 A, 多段点弧回路試験用
- (4) CR 250 B-20 (1,000 V 250 A) 10 S-1 A, 大電力素子基礎試験用—図 3.2

- (5) CR 20 A-16 (800 V 20 A) 120 S-1 A, 実用規模直列数モデル
- 上記モデル(1)～(4)では、実験結果を基本的考察と対比しながら分圧回路設計の方針を明確にし、また(3)、(4)では、分割多段点弧方式の実用性を確認した。以上の結果をもとに、高圧サイリスタパルプの基礎技術を確認するために、(5)のモデルパルプを開発し各種の試験を実施した。これについて以下に詳述する。

3.2 120 S パルプの開発

3.2.1 パルプの構成

使用素子：CR 20 A-16 (800 V 20 A)

組立構成：10 S × 12 段 = 120 S

点弧方式：分割多段点弧方式（ケーブル方式、最上段のみ

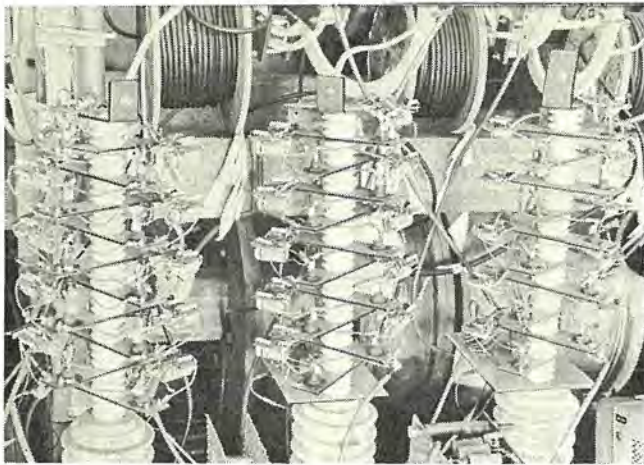
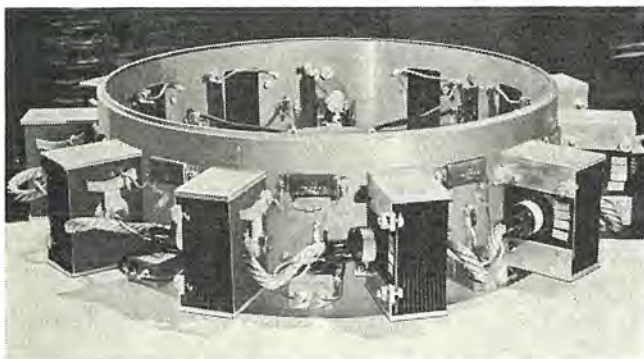


図 3.1 基礎実験用 モデル
Fundamental models.



使用素子：CR250 B-20 (1,000 V 250 A) 10 S
点弧方式：パルストランスによる独立点弧
冷却：強制風冷

図 3.2 大容量素子 モデル
Large capacity model.

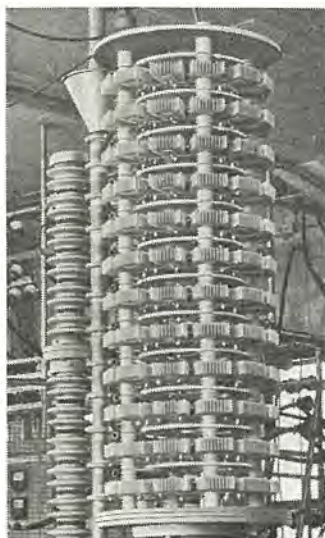


図 3.3 120 S バルブの外観
Exterior view of 120 S valve.

GaAs レーザダイオードによる光点弧)

冷却方式：自然空冷

分圧回路：R=100 k Ω , C=0.1 μ F, r=33 Ω

L=150 μ H/段

図 3.3 および図 3.4 に 120 S バルブの外観とその概略構成を示す。

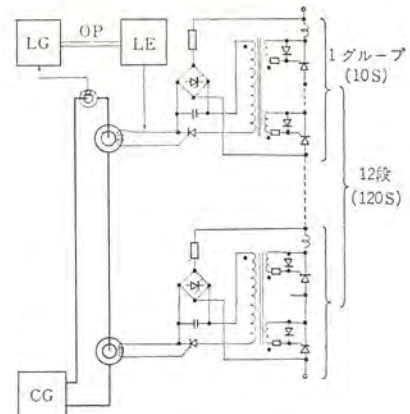
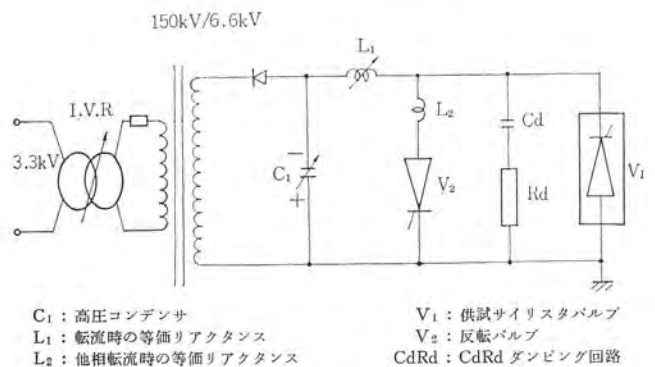
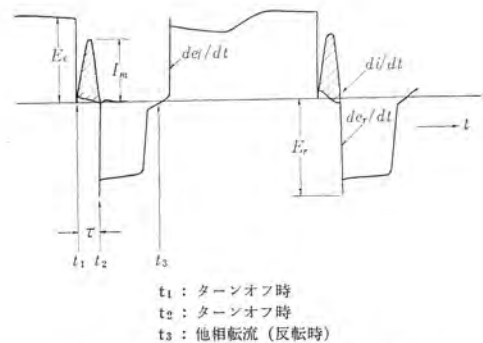


図 3.4 120 S バルブの点弧回路
Firing system for 120 S valve.



C₁ : 高圧コンデンサ
L₁ : 転流時の等価リアクタンス
L₂ : 他相転流時の等価リアクタンス
V₁ : 供試サイリスタバルブ
V₂ : 反転バルブ
CdRd : CdRd ダンピング回路

図 3.5 等価試験回路
Equivalent test circuit.



t₁ : ターンオフ時
t₂ : ターンオフ時
t₃ : 他相転流 (反転時)

図 3.6 供試バルブの電圧、電流
Voltage and current of test valve.

3.2.2 試験結果

これに用いた試験回路を図 3.5 に示す。これは高圧水銀バルブの等価試験回路としてよく知られているもので、高圧変換器として要求される各種過渡責務に対する試験が広範囲に行なえる。以下これによる 50 kV 等価試験の一例として、試験回路定数が

C₁=0.4 μ F, L₁=18 mH, L₂=3 mH, Cd=0.005 μ F, Rd=5 k Ω なる場合の結果を示す。

図 3.6 は供試バルブの電圧、電流波形であり、図 3.7 はその各部拡大波形である。これからわかるように、この試験時の各責務は次のようになる。

電流波高値 I_m=240 A, 通電幅 τ =270 μ s

転流時の電流変化率 di/dt=3 A/ μ s

ターンオン直前の順阻止電圧 E_c=50 kV

ターンオフ時の飛躍逆電圧 E_r=60 kV

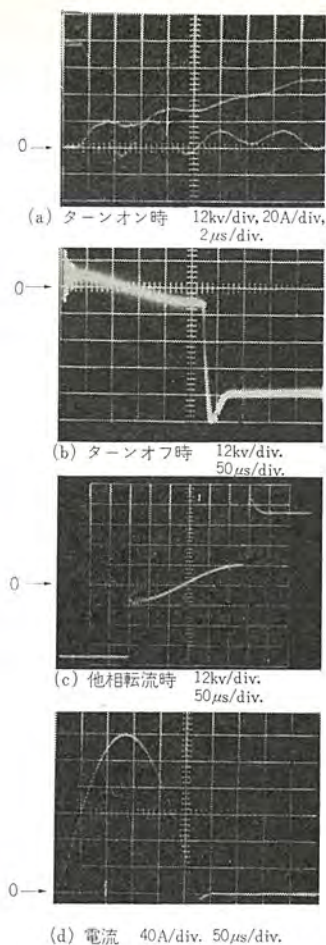


図 3.7 電圧, 電流拡大波形
Enlarged waveforms (Refer to Fig. 3.6).

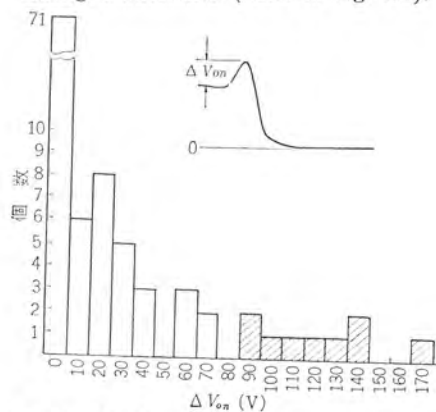


図 3.8 各素子のターンオン時のオーバーシュート電圧
Overshoot voltages of each thyristor at turning-on.

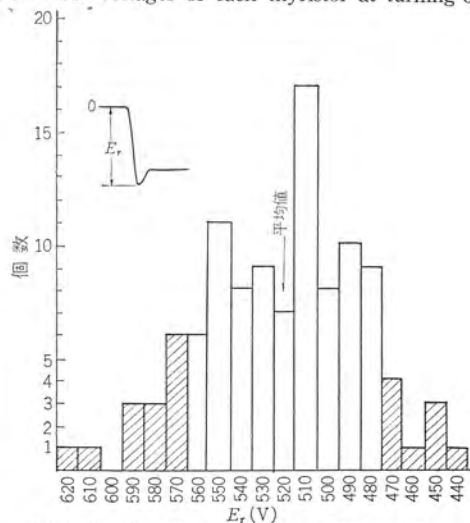


図 3.9 各素子のターンオン時の飛躍逆電圧
Reverse voltages of each thyristor at turning-off.

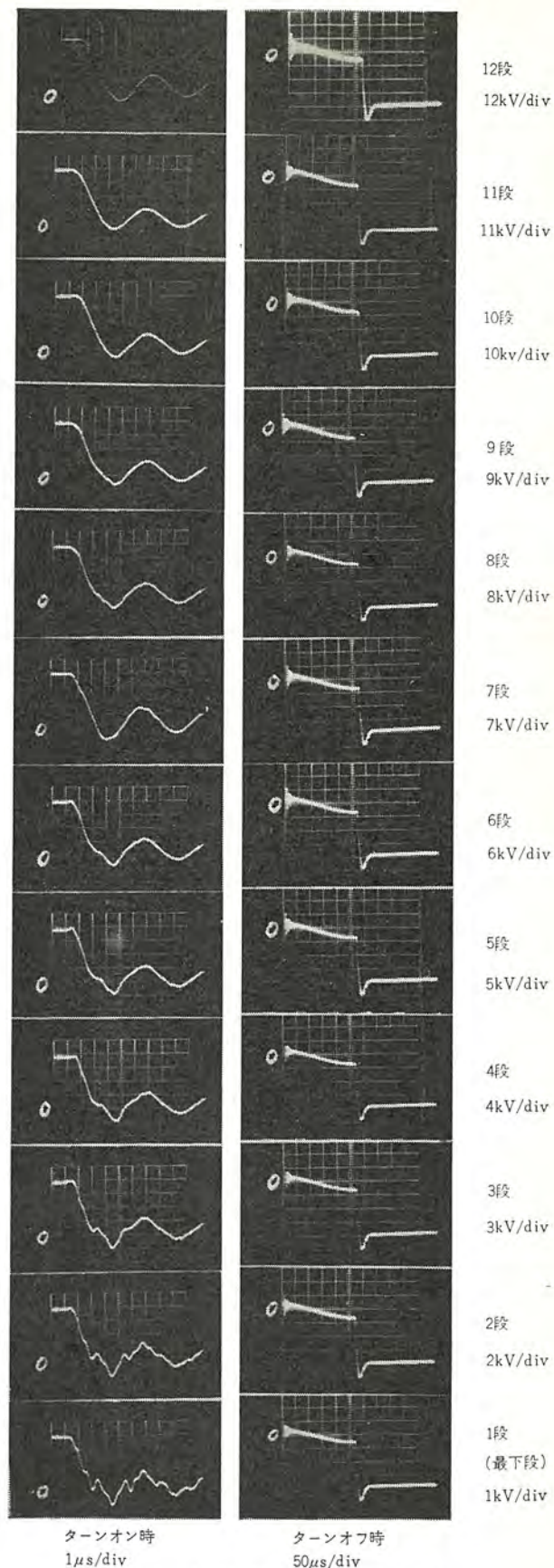


図 3.10 各段と対地間の電圧
Voltage distribution of each stage at turning-on and turning-off.

ターンオフ時の電圧上昇率 $de_r/dt = 5.4 \text{ kV}/\mu\text{s}$

他相転流時の順電圧上昇率 $de_f/dt = 4.0 \text{ kV}/\mu\text{s}$

このときのターンオン, ターンオフ時における各素子の過渡電圧分担を
図 3.8 および図 3.9 に示す。分圧回路設計時に素子諸特性ばらつ

きを 3σ とした。これによる危険率は正規分布を仮定すれば13.4%である。この図において、設計時の許容不平衡電圧80Vを越える素子数(図の斜線部分)は、120個中ターンオン時が9個、ターンオフ時が23個でそれぞれ8%、18%で、よい一致をみせている。

また各段の電圧分布は図3.10に示すように、ターンオン、ターンオフ過渡時にも非常によく分圧されており、対地分布容量(各段とも約50pF)による分圧乱れはほとんど認められない程度に補償されている。

上記の試験責務は使用素子容量からみれば、非常に過酷なものであり、とくに転流時の di/dt に関しては、50kV 50A 六相運転時の10倍強に相当するものである。このような過酷な責務のもとで通算600時間以上の試験を行なったが、その間素子破損は皆無であり、直列接続に対する信頼性の非常に高いことが確認された。

4. む す び

20A素子による120Sパルプの完成により、100個以上のサイリスタの直列接続に対して十分な確信を得ることができたので、これにもとづいて実用規模の大容量素子による高電圧変換装置の開発を計画している。

現在サイリスタ素子自体の電圧、電流の限界も発展途上にあり、年ごとに定格が伸びているが、最近の平形素子の出現により大容量素子の構造としては一応落ち着いたものと考えてよいであろう。図4.1はこの大容量平形サイリスタによる4Sスタックであり、図4.2はこれを用いて計画中の150kV 1,000Aの高圧パルプの概略図である。これは油タンク中に収容することにより屋外設置も可能となり、将来のDC変換所の新形となりうるものと思われる。

参 考 文 献

- (1) 阿部ほか：三菱電機技報，37，No. 7，865 (昭38)
- (2) 大野，光岡，木村：電学関西連大，No. 2-22 (昭41)
- (3) 光岡，木村：電学関西連大，No. 2-25 (昭41)
- (4) 光岡，木村：電学連大，N. 738 (昭42)
- (5) 光岡，木村：電学関西連大，No. 2a-1 (昭42)
- (6) 光岡，木村：電学連大，No. 647 (昭43)
- (7) 大野，光岡，木村：電学東京連大 (昭43，投稿中)
- (8) F. D. Kaiser：IEEE Spectrum，3，Nov. (1966)
- (9) C. G. Dewey, et al：IEEE Winter Power Meeting，Feb. (1967)
- (10) T. Gilsig，T. R. Specht：American Power Conference，

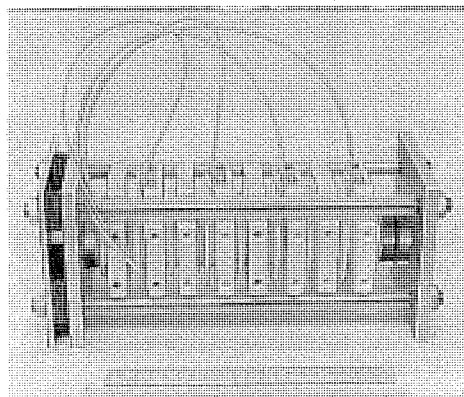


図 4.1 高圧大容量 サイリスタスタック
High voltage thyristor stack.

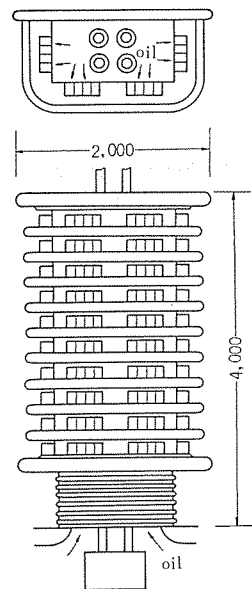


図 4.2 計画中の実規模高圧パルプ
Practical valve in contemplation.

- (April 1967)
- (11) T. P. Nowalk, et al：Proceedings of the IEEE，55，No. 8 (1967)
- (12) E. Anwander, J. Förster, J. Weber：ETZ-A，Bd. 89 (1968)
- (13) P. Mlynar, G. C. Seaborn：High-Voltage Silicon Rectifier Designers' Handbook, (1963)
Westinghouse Electric Corporation

超 高 圧 用 マ イ ク ロ 波 変 流 器 (μ 波 CT)

斎 藤 成 文*

大 野 豊**

喜 連 川 隆***

中 原 昭 次 郎*・立 川 清 兵 衛*

Microwave Current Transformers for EHV Power Transmission Lines

Institute of Industrial Science, University of Tokyo Shigebumi SAITO

Tokyo Electric Power Company, Inc. Yutaka OHNO

Mitsubishi Electric Corp., Central Research Lab. Takashi KITSUREGAWA

Mitsubishi Electric Corp., Kamakura Works Shyojiro NAKAHARA・Seibei TACHIKAWA

Wireless current transformers to be operated on the technology of electronics are now being studied in many quarters for current transformers for use on extra high voltage power transmission of 500 kV class. Microwave ferrite current transformers described in this article are one of the kinds. Making use of the Faraday's Effect of ferrite, they have no active elements on the energized part, while oscillators, receiving units and arithmetic units are set on the ground potential side so as to insure high degree of reliability as distinctive features. This article makes clear a prominent standing of the microwave ferrite current transformer by elucidating the merits and demerits of various wireless current transformers through classification and comparison. Then description is made on the principle of the apparatus, the construction and performance of a pilot model being touched upon in the last. The input-output characteristics of the pilot model is very satisfactory.

1. ま え が き

超高圧送電系統の実用化は多くの技術的問題を含んでいるが、このうちでも、短絡容量の増大と安定度から要求される事故時しゃ断の高速化、高信頼化ならびに系統制御の自動化にともなう情報検出の高忠実性がとくに重要なものの一つである。ここで、情報の検出源となる変成器（電流変成器および電圧変成器）に関しては、

(1) 直流分と大電流による飽和現象、内・外サージに対する応答など、波形ひずみの要因となる過渡特性の問題

(2) 超高圧化および塩じん(塵)害の汚損に起因する大形化と価格高騰化の問題

(3) サージ電圧の二次側への侵入の問題
などが、今後の重要課題である。

こうしたさう勢のもとに、電流変成器（以後変流器と称する）については、従来の巻線形 プッシング 変流器にとって替るべく、技術的基盤を全く異にした新形式の変流器の開発が各方面で行なわれつつある。この新形式の変流器はいずれも、無接触ないしは無導体化することによって絶縁上の問題と価格高騰化とを解決し、また、エレクトロニクスの導入によって忠実性の向上をはかっている。無導体変流器の種類・分類については2章で詳述するが、最初に登場したのは、UHF 帯電波を情報伝送媒体としたものであり⁽¹⁾、つぎは、米国 Allis-Chalmers 社の開発による光を情報伝送媒体としたものである⁽²⁾。これらの変流器は、高圧側の被測定電流変化を周波数変化に変換した後、これによって伝送媒体の電波または光を周波数変調して地上に送ると言うすぐれた着想のものである。しかし、高圧側に設置される電圧周波数変換器・変調器・発振(光)器およびこれらのための電源装置には、能動性素子を不可欠とするため、信頼性およ

び保守性の面での欠点はまぬがれ得ない。

従来の巻線形 プッシング 変流器は電磁誘導現象を利用した単純な原理にもとづいて、破損・故障の要因がきわめて少ないものである。また、変流器の設置場所は電氣的、温度的および機械的に非常に過酷な条件にある。この現実を考えると、上記の無導体変流器が保守の困難な高圧側にトランジスタ、ダイオードのような能動性素子が必要とすることは、将来巻線形 プッシング 変流器にとって替るうえに大きな障害になるであろうと予想される。

このような、従来方式のもつ欠陥を去除くべく、もっとも単純な構成として高圧側が受動性素子だけで構成された新方式の無導体変流器が、わが国独自の技術として登場した。その一つは、東京大学生産技術研究所・東京電力株式会社で研究開発し、その後、昭和41年2月より3月にかけて電力中央研究所の技術研究所で野外実験に成功したレーザ変流器である⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。他の一つは、本論文で記述するマイクロ波フェライト変流器であって、東京大学生産技術研究所・東京電力株式会社・電力中央研究所と緊密な技術連絡をもちつつ、三菱電機株式会社が主体となって研究開発をすすめているものである⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。これらは地上側に、レーザ発振器あるいはマイクロ波発振器を、高圧側には鉛ガラスあるいはフェライトのようなフェラーデー効果をもつ素子を設置し、地上側より送られたレーザビームあるいはマイクロ波ビームを上記素子中を通過させた後地上側に送り返す方式である。このとき素子は、被測定電流による磁界中にあるので、フェラーデー効果をうけ、地上側に送り返されるレーザ光あるいはマイクロ波は、電流変化に対応した偏波面変化を受けている。この偏波面変化を検出して電流の値を知るのが、これら変流器の原理である。

なお、変流器をその使用面からみれば、電力測定用、保護継電方式用および応答速度を主体にした特殊計測用、監視用などがあり、

* 東京大学(工博) ** 東京電力株式会社(工博) *** 三菱電機(株)中央研究所(工博)
* 三菱電機(株)鎌倉製作所(工博)

このうちで保護継電方式用がもっとも重要である。従来の巻線形パッシング変流器は保護継電器群を動作させるに十分な出力をもっているのに対して、マイクロ波フェライト変流器を含めたエレクトロニクス変流器の出力は非常に小さいが、地上側に増幅器を設置することによって従来の継電方式との接続は可能と考えられる。しかし、将来はこうした新形式の変流器の出力形態に適合した保護継電方式も考え出されるべきであろう。

本論文では、各種無導体変流器を種々の立場より分類し、それらのうちのマイクロ波フェライト変流器の位置を明らかにしたうえで、本変流器の原理、基礎的技術事項を論じ、最後に試作機の構成、動作および試験結果を記すこととする。

2. 無導体変流器の分類

現在、表 2.1 に示すように数種類の無導体変流器が現われており、今後も引続き新形式のものが登場する可能性がある。本章では、これら変流器を種々の観点から分類し、問題点および長短について記す。

2.1 無接触変流器と無導体変流器

本論文ではこれまでは記述の便宜上、無導体変流器なる表現を用いてきた。しかし厳密には、高圧側と地上側とを導体でない誘電体で結んだ狭義の無導体変流器と、両側を結ぶ何物も存在しない完全な無接触変流器とが考えられる。前述の Allis-Chalmers 社の変流器は光の伝送路として Optical Fiber を使用し、これを中空がいし内に収容しているので前者に属し、従来報告されている VHF 変流器、UHF 変流器、今回電力中央研究所で野外実験の行なわれた東京大学生産技術研究所方式のレーザ変流器、および本論文のマイクロ波フェライト変流器は、すべて自由空間伝送方式となっているので後者に属する。

レーザ光を含めた光あるいは電波を情報伝送媒体とした変流器において、その伝送路として Optical-Fiber あるいは誘電体線路を用いることは、伝送損失を低減しかつ安定した伝送が期待できるが、これら誘電体の沿面絶縁耐力、貫通絶縁耐力を考慮する必要がある。さらに、表面に雨雪が付着することによる伝送特性および沿面絶縁耐力の劣化を防ぐためには、従来とほぼ同様ながいし内に収容する必要が生ずる。したがって、超高圧化および塩じん害の汚損に起因する大形化、および価格高騰化の問題の解決策としての妙味は半減する。しかし、エレクトロニクス化による忠実性向上の効果はあるわけ

で、使用目的によっては十分有用なものである。

一方、自由空間伝送による無接触変流器はもちろがいしを必要とせず、絶縁の点ですぐれていることは論をまたない。しかし、前記の狭義の無導体変流器と比較して、伝送能率が低いこと、周囲構造物による影響を受けやすいこと、電波管理法に抵触するおそれのあることなどの問題がある。これらはいずれも放射系の指向性を鋭くすることによってかなり改善されるが、あまり鋭くすると、放射系の機械的振動および鳥・昆虫等の飛しょう物の存在に敏感に影響をうけることとなる。無接触変流器は、このような技術的問題を持っているが、絶縁性からくる利点より考えて無導体変流器の本命と考えられる。そして、このような影響を可及的に少なくするためには、単に放射系だけの問題としてでなく、被測定電流の検出法に関連してシステム全体の問題として考える必要がある。VHF 変流器および UHF 変流器が被測定電流変化を周波数変化に変換した後、電波を周波数変調する方式を採用しているのは、周波数が伝送路の状態により影響を受けない事実を考えれば、一応妥当であると言える。

2.2 情報伝送媒体による分類

情報伝送媒体としては現在、光波および電波が使用されている。光波によるものは、Allis-Chalmers 社のようにインコヒーレントな光を用いたものと、東京大学生産技術研究所方式のレーザ光を用いたものとに分けられる。また、電波によるものについては、VHF 帯および UHF 帯を利用したものは古くから知れており、本論文のマイクロ波フェライト変流器は SHF 帯電波を利用したものである。

光波は、小形の放射系で鋭い指向性をもたせうる点では自由空間伝送には適している。しかし、Allis-Chalmers 社方式のものは、外来光線が雑音として影響しやすいので、中空がいし内に収容した Optical Fiber の使用を余儀なくさせている。レーザ光は自由空間伝送方式できわめて高能率な伝送が可能であるのが特長であり、また、中空がいし内の空間を Optical Fiber なしで伝送させることもできる。

VHF 帯および UHF 帯電波は、光波における Optical Fiber、SHF 帯電波における誘電体線路に相当する伝送線路がないので、現在のところは自由空間伝送方式が用いられている。しかしこのような低い周波数帯では、限られた寸法で指向性の鋭い放射系を実現することが困難であるため自由空間伝送能率が低く、十分な S/N 比をうるため高出力の送信機が必要で、電波管理法上に問題があるし、また、システム相互間の干渉の問題がある。SHF 帯電波は誘電体線路によって良特性の伝送系が実現できるので、狭義の無導体変流器に使用できる。また、UHF 帯以下の電波に比べれば、鋭い指向性の放射系を実現できるので、自由空間伝送の無接触変流器にも使用しやすい。

以上の考察によれば、情報伝送媒体はその周波数が高いものほど有利で、SHF 帯電波よりもレーザ光波のほうがすぐれていると考えられる。しかし少なくとも現段階においては、マイクロ波帯用の発振器・検出器その他の構成部品の種類・性能・信頼性は、レーザ用のそれらに比べて進んでいることは確かである。したがって、実用化の容易さの点ではレーザ利用のものよりも、マイクロ波利用のものの方が有利とも考えられる。なお、本論文のマイクロ波フェライト変流器は、現在のところは X バンドを使用しているが、放射系がまだかなり大寸法であるので、将来は準ミリ波ないしミリ波帯を使用したものに移向すべきものと考えている。

表 2.1 無導体変流器の比較
Comparison of wireless CT's.

名 称	無導体、無接触の別	情報伝送媒体	検出方法	情報伝送媒体の変調法	能動、受動の別
VHF 変流器	無 接 触	VHF 帯電波	トロイダルコイルによる電磁結合	周波数変調	能動式
UHF 変流器	無 接 触	UHF 帯電波	トロイダルコイルによる電磁結合	周波数変調	能動式
マイクロ波フェライト変流器	無接触あるいは誘電体線路による無導体	SHF 帯電波	フェライトによるファラデー効果	偏波面回転	受動式
Allis Chalmers 社光変流器	Optical Fiber による無導体	光 波 (インコヒーレント)	トロイダルコイルによる電磁結合	周波数変調	能動式
東大生研方式レーザ変流器	無接触あるいはがいし内伝送の無導体	レーザ光	鉛ガラスによるファラデー効果	偏波面回転	受動式

2.3 電流検出法および変調法による分類

被測定電流の検出は、現在のところすべて電流による磁界を介して行なわれている。VHF 変流器、UHF 変流器および Allis-Chalmers 社光変流器はいずれも、トロイダルコイルを検出素子として線路電流変化を電圧変化に変換し、さらに電圧周波数変換器によって周波数変換した後、電波あるいは光波を周波数変調している。一方、東京大学生産技術研究所方式のレーザ変流器および本文のマイクロ波フェライト変流器では、ファラデー素子（レーザ光用としては鉛ガラス、マイクロ波用としてはフェライト）を磁界中におき、ファラデー効果により、電流変化をレーザ光あるいはマイクロ波の偏波面旋回角度変化に変換している。このほかに、磁界の検出方法としては、ホール効果・電界変位効果・共鳴吸収効果などが考えられるが、今のところ、これらを利用したものはあらわれていない。

今後登場するものは別として、トロイダルコイルによる電磁結合を利用したものと、ファラデー効果を利用したものとを比較するならば次のように言える。トロイダルコイルを使用したものは、鉄心の周波数特性により忠実性が劣ること、および、重畳直流成分が検出不能であること、などの点でファラデー効果を利用したものに及ばない。

つぎに、情報伝送媒体である光波あるいは電波にどのようにして信号をのせるかの変調方法について考察してみる。光波あるいは電波の周波数、振幅、位相および偏波面を信号で変調することが考えられるが、このうちで、伝送特性の影響をもっとも受けやすいのは、振幅変調であり、もっとも受けにくいのは周波数変調である。この点では、VHF 変流器、UHF 変流器および Allis-Chalmers 社の光変流器は合理的なシステムと考えてよい。

2.4 能動形と受動形

ここで述べる能動形とは高圧側にダイオード、トランジスタのような能動性素子を必要とするものを称し、受動形とは高圧側が受動性素子だけで構成されているものを称する。VHF 変流器、UHF 変流器および Allis-Chalmers 社の光変流器は、高圧側に電圧周波数変換器、変調器、発振(光)器および駆動用電源を必要とするので能動形である。一方、東京大学生産技術研究所方式のレーザ変流器および本論文のマイクロ波フェライト変流器は、高圧側は鉛ガラスあるいはフェライトのようなファラデー素子に簡単な放射系を組合わせただけで構成されているので受動形である。

従来の巻線形ブッシング変流器は、原理および構造が簡単であって、破損・故障の要因の少ない信頼性の高いものである。そして、変流器の設置場所は、電気的、温度的および機械的に非常に過酷な条件にあり、しかも高圧側は保守・点検がきわめて困難である。このような現実を考えるならば、将来巻線形ブッシング変流器にとって替るうえで、受動形は能動形に比べて数段まさっていると言える。

また、能動形変流器のもつ他の一つの短所は、高圧側に駆動用直流電源を必要とすることである。現在の能動形変流器では、トロイダルコイルを介して線路電流の一部を取り出し整流して直流電源としている。元来、変流器、とくに保護継電方式用の変流器は、被測定線路電流が大きく変化する事故時においてこそ確実な動作を要求されるものである。したがって、駆動用電源のエネルギーが被測定線路電流から供給されている現在の能動形変流器は、致命的欠陥をもつものであり、長寿命で安定な太陽電池に置き換えられるべきであろう。

3. マイクロ波フェライト変流器の原理、基礎的事項

3.1 原理

マイクロ波フェライト変流器の原理図を図 3.1 に示す。マイクロ波発振器よりのマイクロ波はサーキュレータ、偏分波器および円形導波管フィードを経て地上側アンテナより x 軸方向に偏波した直線偏波①として放射され、偏波方向はそのまま保持されて高圧側アンテナで受信され波②となる。波②はフェライト旋波子の装荷された円形導波管内を伝送して右端の短絡端に達して波③となるが、この場合、フェライト旋波子には被測定電流 I による磁界 H が印加されているのでファラデー効果により、波③の偏波方向は x 軸に対して $1/2\theta$ だけ旋回する。波③は短絡端にて完全反射され、再び、フェライト旋波子装荷円形導波管内を伝送し波④として高圧側アンテナより放射されるが、このとき、さらに $1/2\theta$ だけ偏波面が旋回するので、結局波④の偏波方向は x 軸に対して θ だけ旋回していることになる。波④は偏波方向がそのまま保持されて波⑤として低圧側アンテナで受信される。波⑤の振幅を E とした場合、その x 軸方向成分 A および y 軸方向成分 B はそれぞれ、

$$A = E \cdot \cos \theta \cdot \cos \omega_R t \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$B = E \cdot \sin \theta \cdot \cos \omega_R t \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ただし ω_R : マイクロ波の角周波数
であらわされるが、偏分波器の性質により、出力端子 I には成分 A が、また、出力端子 II には成分 B が独立に取出される。

したがって、フェライト旋波子の印加磁界対旋回角度特性が直線関係にあれば、各出力端子に出てくる信号は

$$A = E \cdot \cos \theta \cdot \cos \omega_R t = E \cos(KI) \cdot \cos \omega_R t \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$$B = E \cdot \sin \theta \cdot \cos \omega_R t = E \sin(KI) \cdot \cos \omega_R t \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ただし I : 被測定電流

K : 比例定数

であらわされる。これらの信号を検波し、その値より被測定電流 I の値を知るのがマイクロ波フェライト変流器の基本原理解である。

なお、図 2.1 は、自由空間伝送による場合を例にとって示したが、3.3 節に述べるように地上側と高圧側との間を誘電体線路で結んでもよい。

3.2 電流値対出力特性を直線にする法

前掲の式 (3.3) および (3.4) に示すように、 $\theta = KI$ と出力 A および B との間は直線関係でない。直線関係になくとも校正さえしておけばよいわけであるが、直線関係のほうが好ましいことは当然である。とくに、 $\theta = KI$ と出力 A および B との間に一対一対応の得ら

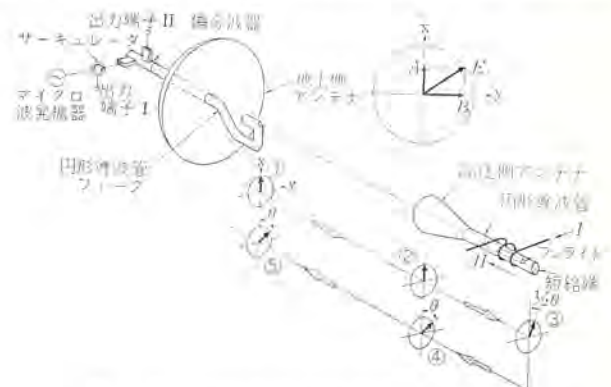


図 3.1 マイクロ波フェライト変流器の原理
Principle of microwave ferrite current transformer.

れるのは、直線検波の場合は θ の変化が 180 度以内、自乗検波の場合は 90 度以内に限定されるので、精度を高めかつ測定可能範囲を広くとるためには、比例定数 K の小さい Coarse 系（測定範囲内では一対一対応となる）と、 K の大きい Fine 系とを併用し、両者の相関をとることも必要で、このときは直線関係をもたすことが不可欠となる。

比較的簡単に、しかも確実に直線関係をもたせる一方法として案出したのは次の方法である。信号 A に対して信号 B の位相を $\pi/2$ だけ遅らせて両者を加え合わせた信号 S は

$$S = A + B \frac{\pi}{2} = E \sin(\omega_n t + \theta) \dots\dots\dots (3.5)$$

であらわされる。 θ をパラメータとして信号 S の波形を示したのが図 3.2(a) である。信号 S の瞬時値が負から正に移る時点で短パルスが発生させると図 3.2(b) の波形が得られる。また図 3.2(c) で示される基準信号

$$R = -E \sin \omega_n t \dots\dots\dots (3.6)$$

の瞬時値が負から正に移る時点で短パルスが発生させると図 3.2(d) の波形が得られる。ここで(d)の短パルスで ON となり、(b)の短パルスで OFF となるようなパルスをつくれれば図 3.2(e) の波形が得られる。(e) のパルス幅は $\theta = KI$ に比例しているの、この幅を測定して出力とすれば、電流値対出力は直線関係が得られる。実際には、マイクロ波帯でこのような方法を実現するのは困難であるので、適当な中間周波数に変換して後に行なう必要がある。

3.3 誘電体線路による伝送

マイクロ波フェライト変流器を狭義の無導体形にするためには、高圧側と地上側とを誘電体棒で結び、これにマイクロ波を伝送させる方法が考えられる。元来、誘電体線路は準ミリ波あるいはミリ波の低損失伝送線路として開発されたもので、波長に比べて十分細い誘電体棒を使ってマイクロ波エネルギーの大部分は周囲空間内を伝送させ、誘電体内部にはごくわずかしか伝送させないのが普通であった⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

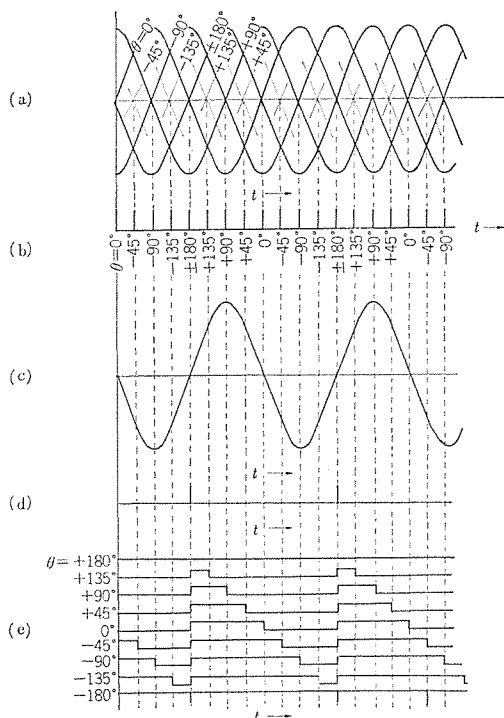


図 3.2 位相変化をパルス幅変化に変換する方法
Process of converting phase variation into pulse-width variation.

しかし、変流器の伝送線路として用いる場合には、損失を低減することよりも、むしろ、安定な伝送が実現できることのほうがたいせつである。すなわち、線路が多少曲っても、インピーダンスが変化したり、交差偏波が発生したり、放射が生じたりしないことがのぞましいし、周囲を保護用がいしで囲んでも伝送特性が影響されないことも必要である。

こうした目的に合致する誘電体線路を実現するためには、誘電体棒直径を十分太くして、マイクロ波エネルギーの大部分を線路の近傍空間にのみ集中させればよい。この考え方にもとづいて周波数 = 9,375 MHz（自由空間波長 = 3.2 cm）に対して直径 25 mm のテフロン棒を試用してみた。テフロン棒の比誘電率 $\epsilon = 2$ として、 HE_{11}^0 状態の電磁界分布を計算した結果は図 3.3 に示すとおりであって、軸より半径 25 mm 離れた点での電磁界は、軸上電磁界の -20 dB 以下となっている。実験の結果は、1 m 当たりの伝送損失が 0.5 dB 程度、交差偏波発生量 -40 dB 以下であった。また、長さ = 1,700 mm のものの一端を固定した状態で、円弧状に屈曲させ他端を 200 mm 程度変位させたときのインピーダンス、伝送損失および、交差偏波量は直線時と比べて大きな差は認められなかった。図 3.4 はこのテフロン棒誘電体線路を用いたマイクロ波フェライト変流器の実験セットを示したものである。

3.4 フレネル領域アンテナによる伝送

自由空間伝送による無接触方式のマイクロ波フェライト変流器を実現する場合のアンテナ系を普通の遠方領域の問題として取扱うと、その片道当たりの伝送効率 η は

$$\eta = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \cdot G_1 \cdot G_2 \dots\dots\dots (3.7)$$

d = アンテナ間距離

λ = 自由空間波長

G_1, G_2 = 送信および受信アンテナの利得

であらわされる。いま、500 kV の超々高圧系への使用を想定して、 $d = 10$ m とし、 $\lambda = 3.2$ cm、 $G_1 = G_2 = 15$ dB とすれば、

$$\eta = -42 \text{ dB}$$

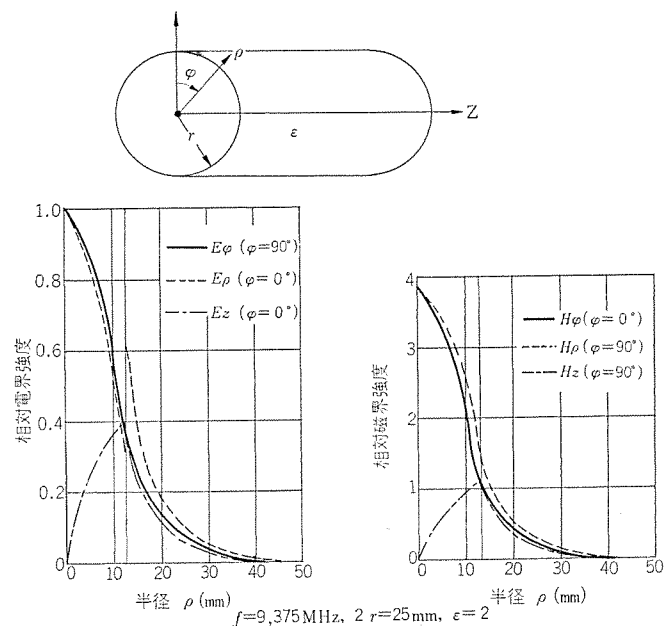


図 3.3 テフロン棒を用いた誘電体線路の HE_{11}^0 状態の電磁界分布（計算値）
Relative field distribution in tefflon-rod dielectric transmission line for HE_{11}^0 mode (calculated values).

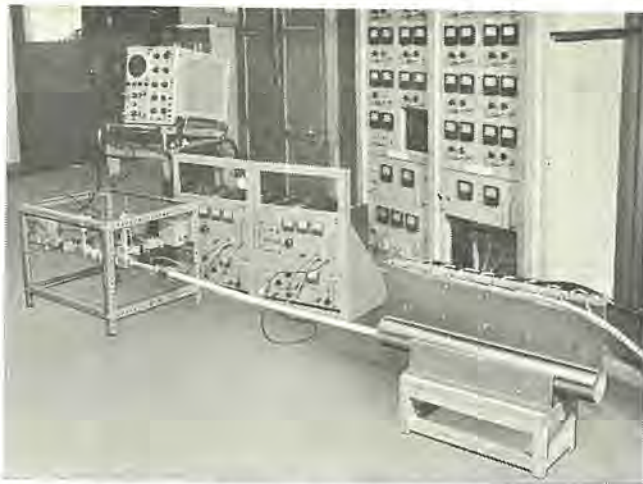
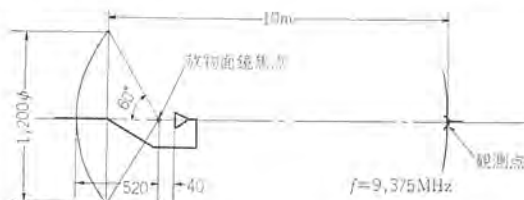


図 3.4 テフロン棒誘電体線路を用いたマイクロ波フェライト変流器の実験セット
Experimental set of microwave ferrite CT with teflon-rod dielectric transmission line.

表 3.1 1.2 m 離焦点回転放物面鏡アンテナのフレネル領域放射パターン
Fresnel-region radiation pattern of 1.2 m defocused parabolic mirror antenna.



項	目	-3 dB 幅 (度)	-10 dB 幅 (度)	第1側葉位置 (度)	第1側葉レベル (dB)
計算値	等振幅分布	0.80	1.28	1.87	-17.6
	(1-r ²) 振幅分布	0.97	1.67	2.50	-24.6
実測値	H 面	0.80	1.33	1.75	-16.5
	E 面	0.83	1.50	2.17	-24.3

と言う悪い値となる。さらに、このような小さいアンテナを使用すると、その指向性が広いため、周囲構造物による散乱波の影響を受けやすいばかりでなく、隣接変流器間相互の干渉も生ずる。

実際に変電所に設置する場合のことを考えると、高圧側アンテナは種々の制約のために小形の電磁ホーンにせざるを得ないが、地上側アンテナはある程度大きな反射鏡アンテナを使用することも許される。そしてこの場合は、フレネル領域アンテナの問題として取扱われるわけで、反射鏡開口面上の位相分布を適当にすることによって、その放射ビームを高圧側電磁ホーンの開口面に集中させることが可能で、伝送能率が高くなるばかりでなく、周囲構造物、隣接変流器の影響が小さい良好な伝送系が実現できる。

フレネル領域用反射鏡アンテナ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾としては、回転放物面鏡アンテナ⁽¹³⁾あるいは離焦点回転放物面鏡アンテナが考えられる。特性的には両者の間の差異はほとんどないが、前者は鏡面形状が決まれば最適伝ば(播)距離も決まってしまうのに対し、後者は一次放射器の離焦点距離を変化させることによって任意の最適伝ば距離が得られるので実用上すぐれている。開口直径=1,200 mm、焦点距離=520 mmの離焦点回転放物面鏡アンテナの周波数=9,375 MHzでの10 mの位置におけるフレネル領域放射パターンの計算値および実測値を表3.1に示す。また、この離焦点回転放物面鏡アンテナと、開口直径=190 mm、フレア長=410 mmの円すい電磁ホーンとを10 mの距離をおいて対

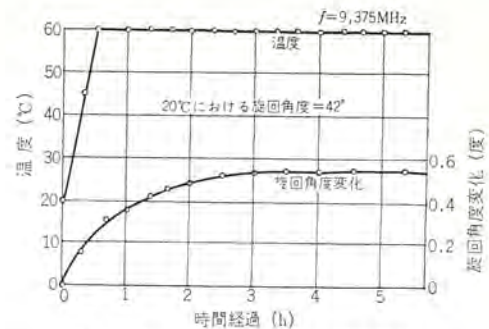


図 3.5 フェライト旋波子の温度特性
Temperature characteristics of ferrite rotator.

向したときの片道当たりの伝送能率実測値は -9.9 dB である。なお、このような系に対する伝送能率の計算法については別の機会に発表の予定であるが、計算値は -8.6 dB である。実測値と計算値との差は、反射鏡開口面上での振幅誤差、位相誤差、周辺よりのいつ(溢)み放射、一次放射器およびフィード導波管による散乱の影響と考えられる。

3.5 フェライト旋波子

マイクロ波フェライト変流器の性能はフェライト旋波子の特性に負うところがきわめて大きく、変流器の実用化の見通しは良特性のフェライト旋波子が得られるか否かによって定まると言っても過言ではない。変流器用のフェライト旋波子として具備すべき条件のおもなものは、

- (1) 印加磁界と旋回角度との間に直線関係があること。
- (2) ヒステシス現象のないこと。
- (3) 交差偏波が発生しないこと。
- (4) 旋回効率が周囲温度によって変化しないこと。

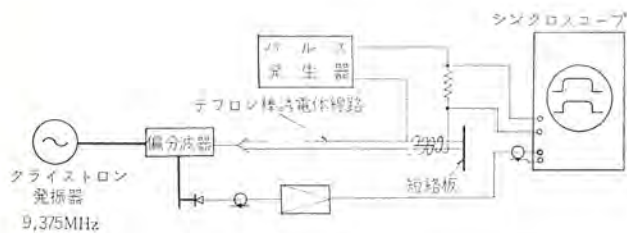
があげられるが、このうちでも(4)の温度特性がもっとも重要である。変流器の場合、フェライト旋波子の設置場所の温度条件は、従来の通信設備、レーダにおけるフェライト使用機器設置場所のそれと比較して、はるかに過酷である。この理由のもとに、変流器用フェライト旋波子の研究の焦点は、温度特性改善に向けられた。この結果、従来フェライトの温度特性に対して持たれていた固定概念を根底より改めるに足るほどの良特性のものが得られるに至り、マイクロ波フェライト変流器実用化の見通しがきわめて明るくなった。

フェライト旋波子の旋回角度は飽和磁化の大きさに依存する。通常フェライトでは温度とともに飽和磁化が減少し、旋回角度も減少する。良好な温度特性を得るためには使用温度範囲内で飽和磁化の変化の小さいものを使用すればよい。こうした旋波子として、YIGのイットリウムの一部をカドリウムで置換したガーネットについて検討を進めた。種々の成分比のものについて実験を行なった結果、図3.5に示すように、20°Cにおける旋回角度42度のとき、20°Cより60°Cまでの温度変化に対する旋回角度変化が0.6度以下と言う良好なものが得られた。

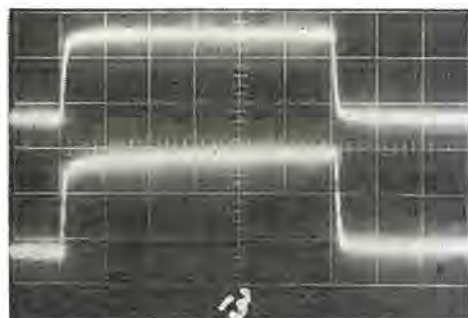
3.6 応答速度

マイクロ波フェライト変流器の特殊な使用方法としては、サージの忠実な検出、あるいは、せん(閃)絡進行波試験装置のような超高圧試験設備での電流波形の観測が考えられる。この場合は、フェライト旋波子の応答速度が非常に重要である。

フェライト自体の応答速度は nano-second のオーダーと考えられているが、これを旋波子とした場合の応答速度はその外装導波管表面を流れる渦電流で支配される。この渦電流の影響を受けないように、3.3節で述べた誘電体線路中にフェライトを装荷して、金属導波管を



(a) 測定回路



上側：被測定電流波形 0.5 A/div
下側：マイクロ波検出波形 0.5 V/div
横軸：1 μs/div

(b) 観測波形

図 3.6 テフロン棒誘電体線路に装荷したフェライト旋波子のパルス応答

Pulse response of ferrite rotator inserted in the teflon-rod dielectric transmission line.

全く使用しない構造のものについてパルス試験を行なった。実測波形の一例は図 3.6 に示すように、被測定電流波形とマイクロ波検出波形とは完全に一致している。

4. 試作機の構成、性能

前章に記した基礎的研究段階を経た後に試作機を製作した。試作機設計に当たっては、

(1) 変流器を使用面よりみれば電力計測用、保護継電方式用ならびに応答速度を主体にした特殊計測、監視用などがあるが、このうちで最も重要と考えられる保護継電系統用を対象とする。

(2) フレネル領域の自由空間伝送による無接触形とする。

(3) 応答速度よりも、測定精度・信頼性の向上を主眼とするため、データ処理は IC (集積回路) の使用しやすいデジタル方式を採用する。

の諸点を考慮した。試作機の構成ブロック図を図 4.1 に示す。

4.1 地上側、高圧側アンテナおよび旋波子

地上側アンテナとしては 3.4 節に記した開口直径=1,200 mm の離焦点回転放物面鏡アンテナを使用した。外観は図 4.2 に示すとおりで、マイクロ波系、受信機および演算部を収容する水密構造のきょう(簀)体の上に積載されていて、方向調整用の水平面内・垂直面内回転機構をもっている。フィードは円形導波管で、その屈曲部には角曲り導波管⁽¹⁵⁾が使用されているが、これらは直交二成分に対して整合されており、交差偏波発生量は -40 dB 以下である。

高圧側アンテナは開口直径=190 mm、フレア長=410 mm の円すい電磁ホーンでその開口周縁にはコナ防止のための丸味がつけられている。フェライト旋波子はテフロン収容筒にそう入したうえで内径 21.8 mm の金属円形導波管内に装てん(填)されているが、テフロン収容筒は旋回効率向上の役めをもっている。

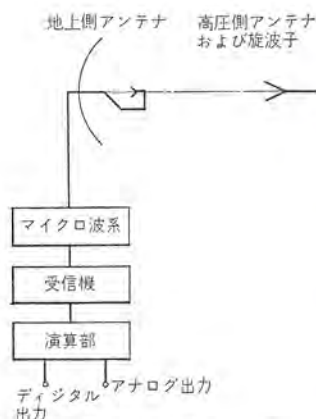


図 4.1 試作機のブロック図
Block diagram of pilot model.

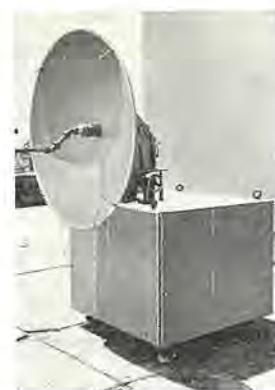


図 4.2 地上側アンテナ
Ground antenna.

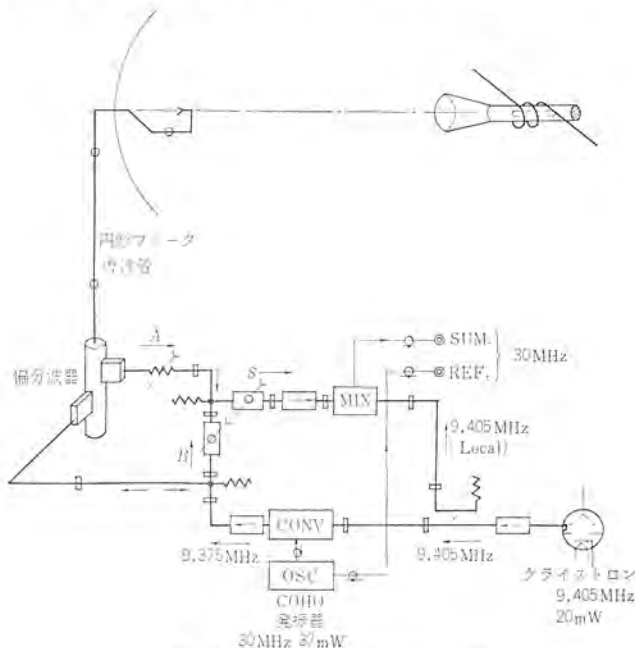


図 4.3 マイクロ波系のブロック図
Block diagram of microwave system.

4.2 マイクロ波系および受信機

マイクロ波系は 3.2 節および 3.3 節に記したように、受信波を互いに直交した A 成分と B 成分として別々に取り出した後、両者の和信号 S を作る機能をもっていなければならない。これを実現するためのマイクロ波系のブロック図を図 4.3 に示す。クライストロン発振器の 9,405 MHz 20 mW の出力は、COHO 発振器の 30 MHz 27 mW の出力とともにコンバータに加えられて 9,375 MHz 1 mW の送信波を作り、マジック T、偏分波器を経て円形フィード導波管に供給される。和信号 S はミキサーによって 30 MHz の第 1 中間周波数に変換されるが、上記のクライストロンはミキサーの第 1 局部発振器をも兼ねている。また、3.3 節に記した基準信号としては COHO 発振器出力を直接使用している。なお、使用したコンバータおよびミキサーの変換損失は約 12 dB である。

受信機の構成は図 4.4 に示すように、30 MHz の第 1 周波数段と 50 kHz 帯の第 2 周波数段からなっている。第 1 周波数段は -3 dB 幅が ± 1 MHz の帯域通過ろ波器のみであり、第 2 周波数段はミキサー、増幅器、振幅制限器およびシュミット回路で構成されていて、出力としてはく形波が得られる。第 2 局部発振器としては周波数 30.05 MHz、出力 -10 dBm、スプリアス -40 dBm 以下、安定度 ± 1

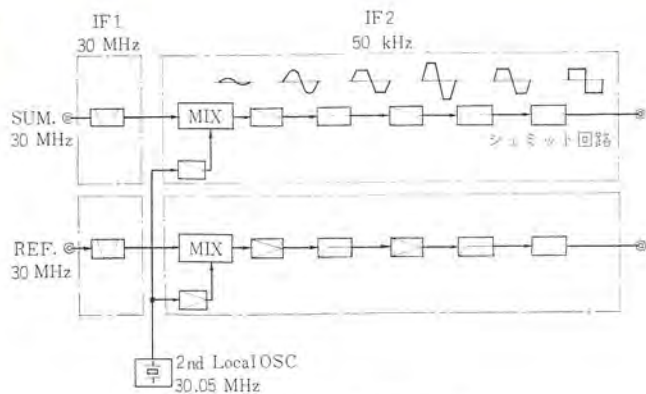


図 4.4 受信機のブロック図
Block diagram of receiving unit.

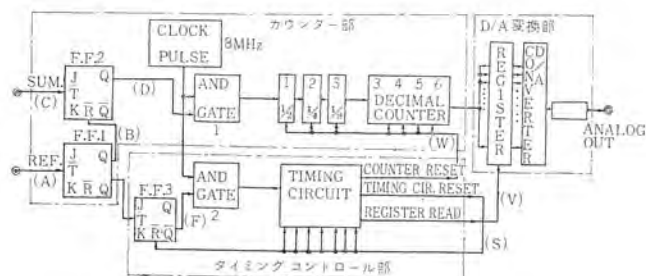


図 4.5 演算部のブロック図
Block diagram of arithmetic unit.

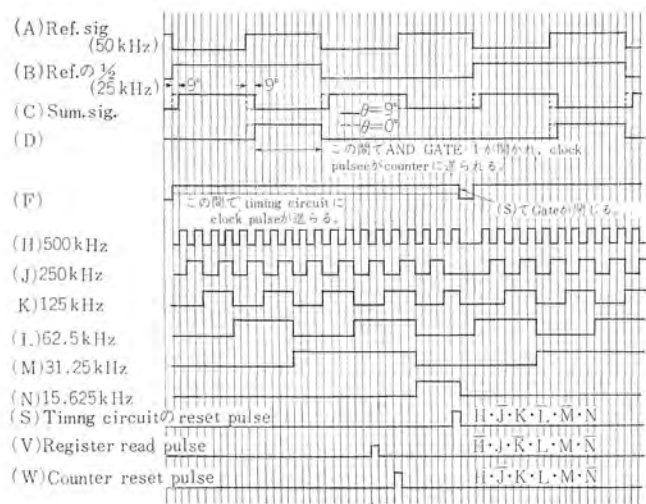


図 4.6 演算部のタイミングチャート
Timing chart of arithmetic unit.

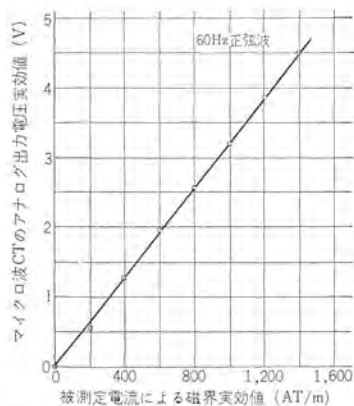
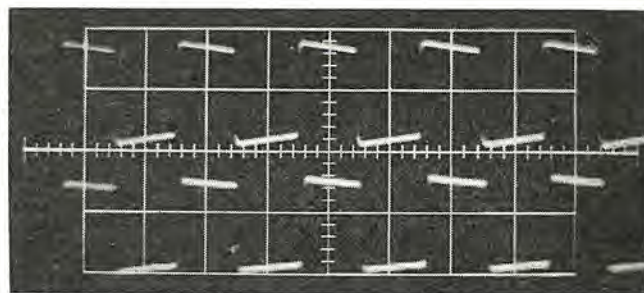
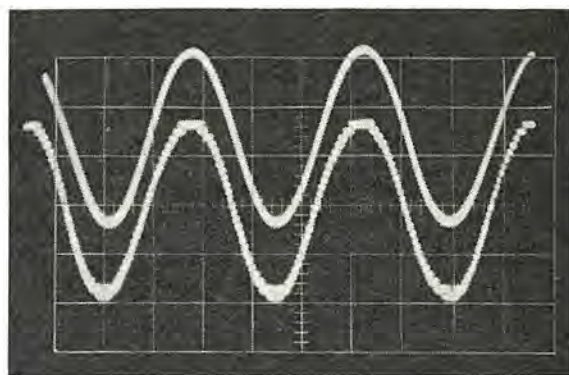


図 4.7 試作機の入出力特性
Input-output characteristic of pilot model.



上側：被測定電流波形
下側：変換器アナログ出力 (5 V/div)
横軸：0.5 ms/div

(a) 1 kHz 矩形波の波形



上側：被測定電流波形
下側：変換器アナログ出力 (2 V/div)
横軸：5 ms/div

(b) 60 Hz 正弦波の波形

図 4.8 試作機の観測波形
Observed waveforms of pilot model.

$\times 10^{-5}$ /day 以内の水晶発振器を用いている。受信機全体としては、 $-45 \sim -25$ dBm の入力レベルに対して 10 Vp-p 以上の出力が得られ、S/N 比は 40 dB 以上である。

4.3 演算部

演算部は前掲の図 3.2 (e) の偏波面旋回角度 θ に比例したパルス幅をデジタル的に読みとる部分で、その構成を図 4.5 に、また、タイミングチャートを図 4.6 に示す。演算部は、カウンタ部、タイミングコントロール部および D/A 変換部より成っている。カウンタ部は、受信機からの和信号と基準信号とによって、ゲート回路を ON, OFF して旋回角度 θ に比例したパルス幅をもつパルスを作り、このパルス幅を 8 MHz のクロックパルスによりデジタル的に読みとる部分である。タイミングコントロール部は、連続的に変化する現象を、ある特定の時間ごと、(この場合は 40 μ s ごと)の現象としてサンプリングするために、前の内容をご破算し、次の内容を読み取るようにカウンタ部のタイミングをコントロールする部分である。D/A 変換部は、カウンタ部で得られたデジタル量をアナログ量に変換する部分である。なお、演算部には、50 個のトランジスタ、94 個のデジタル IC が用いられている。

4.4 電流試験結果

完成した試作機の電流試験結果を図 4.7 および図 4.8 に示す。図 4.7 は 60 Hz の商用周波数での被測定電流による磁界実効値と、アナログ出力電圧実効値との関係を示したもので、非常によい直線性が得られている。図 4.8 は観測波形の例として、60 Hz 正弦波の場合および 1 kHz 矩形波の場合を示した。いずれもその波形再現性は満足すべきものである。

5. む す び

以上、まず各種の無導体変流器をいろいろの立場より分類・比較して問題点・長短を述べ、また、それらのうちでマイクロ波フェライト変流器の占める位置を明らかにした。次に、この変流器について行った基礎的研究事項のおもなものを記し、最後に試作機について、構造の概要と電流試験結果を記述した。

試作機の電流試験の結果は満足すべき結果が得られている。しかし、完全な実用機にするためには、高圧試験設備による長期の野外実験が不可欠であり、また、高圧側アンテナの取付方法、システムとしての信頼性向上対策、耐雑音対策、広い電流範囲を高精度で測定するための Coarse-Fine 系の採用など今後究明すべき事項が多く残っている。

将来果してどの種の無導体変流器が従来の巻線形プッシング変流器にとって替るかの予測はむづかしいが、2.4節で述べた受動形に属するものがもっとも魅力的なものと考えられよう。なお、エレクトロニクスを導入した無導体変流器を保護用として使用する場合、これにつながる保護継電方式そのものも、変流器の出力形態に適合したものに改められるのが至当と考えるが、一方では、現用の継電方式にも接続可能な出力形態を変流器側にもたせることも忘れるわけにはゆかない。

マイクロ波フェライト変流器を含めて、エレクトロニクスを利用した無導体変流器の実用化は、さらに大きな意義をもっているものと考えられる。それは、通信という情報の伝達手段、情報の計測、自動制御手段さらに電子計算機による情報処理手段として進歩してきたエレクトロニクスが、エネルギーの発生・伝送・変換手段として進歩し、今後ますます大規模化・複雑化してゆく電力システムにより深く進出するに当たって、こうした無導体変流器が一つのかけ橋としての役割をもつことである。

最後に、日ごろご討論いただいている東京大学生産技術研究所の浜崎襄教授、藤井陽一助教授および電力中央研究所の中村宏氏、竹下信也氏、その他関係各位に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) たとえば、大野、野村：昭和40年度電気四学会連合大会、1050
- (2) C. H. Moulton : Electronics, May, 17 (1965)
- (3) 斎藤、浜崎、藤井、横山、大野：昭和41年度電子通信学会全国大会、529
- (4) S. Saito, Y. Fujii, K. Yokoyama, J. Hamazaki, Y. Ohno : IEEE Trans., QE-2, 255 (1966)
- (5) 竹下、笹野：電力中央研究所 技術研究所報告, No. 67089 (昭43-3)
- (6) 斎藤、大野、喜連川、中原、立川：昭和41年度電子通信学会全国大会、373
- (7) 斎藤、大野、喜連川、中原、立川：昭和42年度電気四学会連合大会、1412
- (8) 斎藤、大野、喜連川、中原、立川、小畑：昭和43年度電子通信学会全国大会発表予定
- (9) S. A. Schelknoff : Electromagnetic Waves, 425 (1943), Van Nostrand Co., Inc.
- (10) C. H. Chandler : J. App. Phys., 20, 1188 (1949-12)
- (11) 竹下：信学誌, 47, 1479 (昭39-10)
- (12) 竹下：電力中央研究所技術研究所報告, No. 67066 (昭42-11)
- (13) 副島：信学誌, 48, 564 (昭40-4)
- (14) 別段、安達、虫明：昭和39年度電気四学会連合大会、1097
- (15) 喜連川、立川：昭和38年度電気四学会連合大会、1268

リニアモータの基本特性

大野 栄一*・岸 本 健*

Basic Characteristics of Linear Motors

Central Research Laboratory Eiichi OHNO・Takeshi KISHIMOTO

Recently linear motors have been in the limelight in various fields of engineering including the driving of super-high speed railways, bringing about their extensive studies. In this paper, the principle and types of the linear motors are outlined, and discussions are made on the basic characteristics of induction machine type linear motors.

After the general characteristics of linear motors are discussed, an electric field equations are solved for the infinite length model. The fundamental characteristics for several kind of the secondary conductors, air gaps and displacement of the reaction rail are obtained after the analysis.

1. ま え が き

電動機は電気エネルギーを機械エネルギーに効率よく変換するものとして広く用いられている。この電動機は対称性がよく、無限運動ができるという点でもばら回転機として発展して、今日に至っている。しかし実際の仕事としては直線運動がかなり存在し、回転運動をリンク機構等により直線運動に変えたり、電動機以外の空気や油圧などが用いられたりしている。このようなところでは直接電気エネルギーを直線運動に変換するほうが望ましい場合が多い。

リニアモータはこのような要求にこたえて生まれたもので、原理的には通常の回転形モータを軸を通る一平面で切り直線上に展開したもので、固定子と回転子との間に機械的な部分を用いずに直接直線運動を得るものである。したがって表 1.1 に示すように回転機同様に各種の形式が考えられる。たとえば回転形の無整流子電動機（サイリスタモータ）からサイリスタ式リニアモータ等も考えられる。しかし実際には誘導機の原理によるものが実用性があるため、種々の研究開発はもっぱらこの方式につき行なわれてきた。

リニアモータは上記のような機構部分がなく構造的にも簡単化できるが、一方では回転機のもつ対称性を欠くために端効果（Edge effect）や、固定子と回転子間の吸引力などリニアモータ特有のやっかいな問題を生じる。このために 19 世紀末からその原理、構造が明らかにされてきたにもかかわらず、本格的な実用化は今一步という状態にあった⁽²⁾。

しかし最近東海道新幹線にみるような高速鉄道が注目され、さらに 300~500 km/h に達するような超高速鉄道の開発が争われる時代になっている。このような超高速鉄道に対しては、車輪の粘着によらず、直接推力の得られるリニアモータが大きくとりあげられ、脚光を浴びるに至っている。その結果として他の用途についても関心が示され、各所で研究が行なわれている。

ここではこのようなリニアモータの原理、形式について概説すると

表 1.1 モータ形式によるリニアモータの種数
Classes of linear motors based on forms of motors.

	回 転 モ ー タ	リ ニ ア モ ー タ
誘 導 電 動 機	IM	LIM
同 期 電 動 機	SM	LSM
直 流 電 動 機	DCM	LDCM
(無整流子電動機)	CLM	LCLM

ともに、誘導機形のリニアモータの基本的特性につき検討を行なった結果を紹介する⁽⁶⁾。

2. リニアモータの原理と形式

2.1 回転モータとリニアモータの相違

リニアモータは駆動力を得るという原理からいえば回転形モータとまったく同じと考えられるが、構造的に下記のような違いが生じる。

(a) 固定子と回転子ともに端部が存在する。

(b) 回転機は空けき（隙）が円状に分布しているがリニアモータは直線状である。

そのためにリニアモータは遠心力による周辺速度の制限がなく、超高速に適し、小形軽量化できる半面リニアモータ特有の次のような問題点が生じる。

- (1) 磁気回路の非対称性に基づく励磁電流のアンバランス } Edge
- (2) 固定子の先端および、終端における過渡現象 } effect
- (3) 一次、二次間の吸引力
- (4) 空けき維持がむずかしく同一容量機では回転機より空けき大

これらはいずれも回転機にくらべて特性低下の方向に働くため、これらの現象を明確には握し、これらの影響を少なくするような設計法の確立がリニアモータの研究課題である。

2.2 リニアモータの形式

2.2.1 Short stator machine と Short rotor machine

固定子、回転子ともに端部が存在するため正常な運転を継続するため、これらのいずれか一方が他方に比べて十分長くなければならず、この点からリニアモータを次の二つに大別できる⁽¹⁾。

(a) Short stator machine

stator（一次側）が rotor（二次側）より短い。

(b) Short rotor machine

rotor（二次側）が stator（一次側）より短い。

図 2.1 に基本構造を示す。

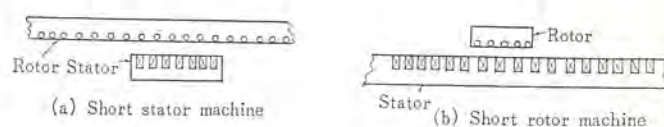


図 2.1 Short stator machine と Short rotor machine
Short stator machine and short rotor machine.

2.2.2 Sheet rotor と double sided motor

通常の誘導電動機の二次側は電流を流す導体部、磁束を通す鉄心の二つに分けて考えられる。Short stator の場合は鉄心部分は Stator と対向している部分のみ有効であるので、図 2.2 (a) のように他の部分を省き鉄心と並進するように一次側に固定すればよい。さらにこの鉄心にも巻線をほどこせば鉄心の利用率が増加する。このような過程を経た図 2.2 (b) の方式は両側方式 (double sided motor) と呼ばれる。この方式は二つの空けき間で吸引力が打消し合うため大きな利点となる。

さらに導体部分を導体板 (Sheet rotor) のみにすることにより励磁容量はふえるが、二次側はさらに簡単化される。Short rotor の場合も両側方式は考えられ、吸引力に関する上記特長はあるが、鉄心に関してはむしろ無効部分が增大することになる。車両用のように二次導体を地上に固定し、Stator 側の一次コイルを車上に乗せることになり、rotor と stator が転換されることもある。このときとくに二次側を reaction rail と呼んでいる。

2.3 リニアモータの制御方式

リニアモータの制御方式としては回転モータのそれと本質的にはなんらかわりはなく、大別して

- (a) 電圧制御
- (b) 周波数制御

がある。

電圧制御は図 2.3 に示すように一次電圧をサイリスタの位相制御により変えるもので、特性はよくないが簡単であり、小容量機に適する。周波数制御は図 2.4 に示すようにインバータまたはサイクロコン

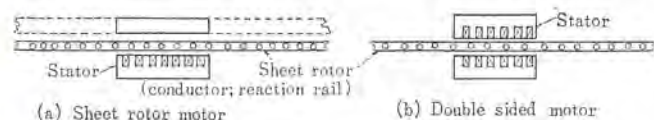


図 2.2 Sheet rotor と両側方式
Sheet rotor machine and double sided machine.

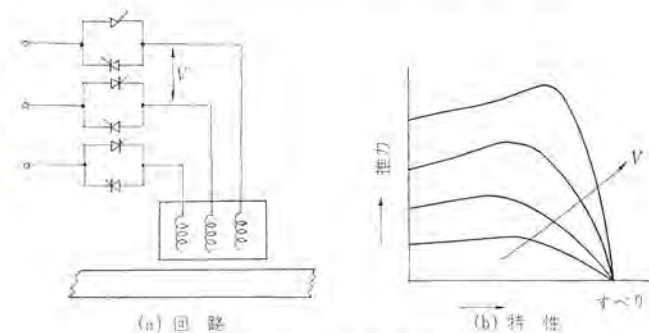


図 2.3 リニアモータの電圧制御
Voltage control of linear motor.

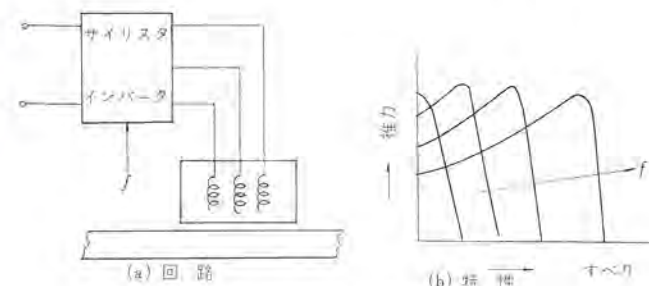


図 2.4 リニアモータの周波数制御
Frequency control of linear motor.

バータにより電源周波数を変化するもので常に効率のよい制御が行なわれ、大容量機に適したものと考えられる。

3. リニアモータの基本特性の検討

3.1 用途と特性

リニアモータは 2.1 節に示したような特有の現象のうち Edge effect に関する項を無視できる場合には基本的特性は回転形誘導機と同様と考えられ、リニアモータの特性を誘導機の等価回路などから検討することができる。そして図 3.1 に示すように超高速車両をはじめ、一般的用途のリニアモータの推力すべり特性は最大推力がすべり 0 に近い特性で、通常の動作点は図の太線の部分を用いることになる。すなわちリニアモータの極ピッチ τ 、電源周波数 f 、同期速度 v_n 、モータ速度 v 、すべり S とするとこれらの間には

$$\left. \begin{aligned} v_n &= 2\pi f \tau \\ S &= 1 - v/v_n \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

なる関係式が成立し、 $v \approx v_n$ のところを使用することになる。そして効率は近似的に $\eta = 1 - S$ で表わされるので効率は高い。

ところが低速用においては通常 $v < 1 \text{ m/s}$ が要求されることが多く、たとえば $f = 60 \text{ c/s}$ 、 $\tau = 0.05 \text{ m}$ としても $v_n = 6 \text{ m/s}$ となり S は 1 に近く効率は非常に悪くなる。

この場合式 (3.1) から τ 、 f をできるだけ小さくすることが考えられるが前者においては工作上およびインダクタンスの増大などで押えられ、後者については効率はよくなっても出力/重量が小さくなり必ずしも有効でない。このような低速用リニアモータの設計に関しては、すべり $S = 1$ 近くに常に最大推力が得られるようにすることが望ましく図 3.1 に示すような定推力特性となる。

このようにリニアモータは用途に応じた最適設計が望まれる⁽¹⁾。

さらにリニアモータは同一容量の回転機に比べて空けきが大きくなるので、励磁インダクタンスが回転機にくらべ小さくなり、推力対すべり特性、力率等にかなり影響を与える。Laithwaite はリニアモータの良さを表わすために Goodness factor として $G = X_m/R_2$ (X_m 、 R_2 はそれぞれ励磁インダクタンス および二次抵抗) を定義している⁽²⁾。

このような観点から以下において、リニアモータの Short stator machine と Short rotor machine との違い、また前者の推力特性が G などのパラメータによりどのように変化するか、またリニアモータの特性を左右する二次導体についての問題点を検討する。

さらに両側方式リニアモータについて解析し、二次導体、一次巻線の結線法による特性の違いを検討する。なおここでは Edge effect を無視したときの電気的基本特性を対象としており、Edge effect、吸引力等の問題はふれない。

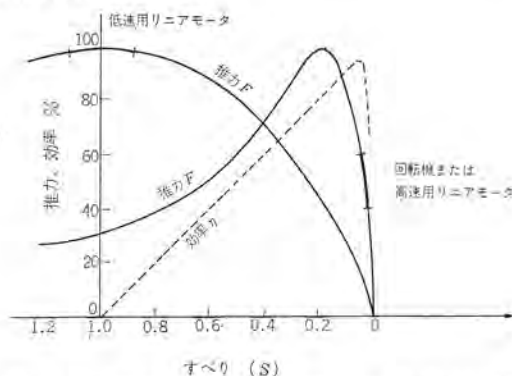


図 3.1 高速用リニアモータと低速用リニアモータとの特性
Characteristics of high speed and low speed linear motor.

3.2 Short Stator machine 特性

Short stator machine は Stator 全体が二次側と対向しているために Stator の利用率は非常によく Edge effect を無視すれば、基本特性は通常の誘導電動機とほぼ同一と見てよく、特性上からは最も実用的であると考えられる。

まず誘導機の等価回路を用いて基本特性を計算する。ただし簡単のために二次側は導体板を用いているので、二次漏えいインダクタンスは小さいと考えられ、これを無視し、さらに空けき磁束密度が割合低く、一方空けきが大であると考えられ、 R_m は m に比べて無視できるものとしよう。このような条件で図 3.1 の等価回路から特性基本式を計算する。簡単のために R_2 を基準にとり式 (3.1) のように基準化する。

$$\left. \begin{aligned} R_1/R_2 &= \sigma_1 \\ X_1/R_2 &= \sigma_2 \\ X_m/R_2 &= G \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

(ただし G は Goodness factors)

このようにすると諸特性のうち重要な一次電流および推力は次のように簡単な形に整理される。

一次電流

$$I_1 = \frac{V}{R_2} \times \sqrt{\frac{1+G^2S^2}{G^2(\sigma_1^2+\sigma_2^2)S^2+2\sigma_1G^2S+\sigma_1^2+(\sigma_2+G)^2}} \dots\dots\dots (3.3)$$

推 力

$$F = \frac{3V^2}{2\pi f_s R_2} \times \frac{G^2 S}{G^2(\sigma_1^2+\sigma_2^2)S^2+2\sigma_1G^2S+\sigma_1^2+(\sigma_2+G)^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

(ただし f_s : 電源周波数, τ は極ピッチ)

さらに最大推力 F_{max} およびそのときのすべり S_{fm} を求めると

$$F_{max} = \frac{3V^2}{2\pi f_s R_2} \times \frac{G}{2\sqrt{[\sigma_1^2+(\sigma_2+G)^2](\sigma_1^2+\sigma_2^2)+\sigma_1G}} \dots\dots\dots (3.5)$$

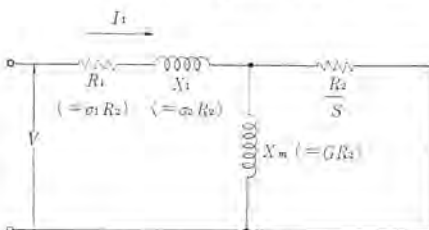


図 3.2 リニアモータの基本的等価回路
Basic equivalent circuit of linear motor.

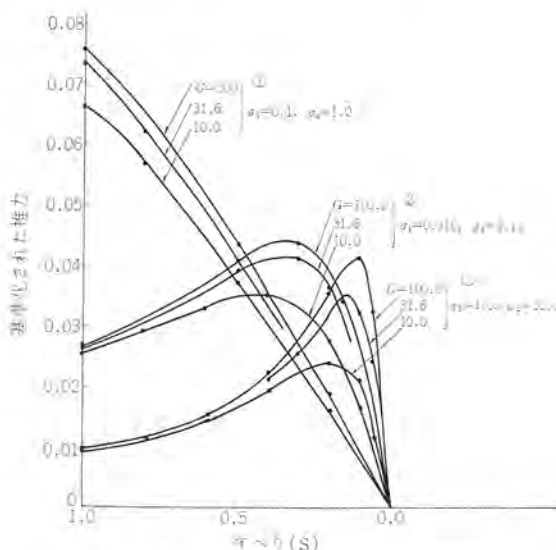


図 3.3 リニアモータの推力-すべり特性
Force vs. slip characteristics of linear motor.

$$S_{fm} = \frac{1}{G} \sqrt{\frac{\sigma_1^2+(\sigma_2+G)^2}{\sigma_1^2+\sigma_2^2}} \dots\dots\dots (3.6)$$

図 3.3 に一次巻線インピーダンスを $\sigma_1/\sigma_2=0.1$ に定め、しかも絶対値も一定とした場合につき、 R_2 および G をパラメータとするときの推力対すべりの関係を示す。縦座標は①を基準にし式 (3.3) の「 X 」符号以下の基準化した値を示す。②、③についてはそれぞれ R_2 が 3.16 倍、10 倍されたものに対する特性である。

この関係から次のことがいえる。

(1) 式 (3.6) から明らかなように最大推力を与えるすべり S_{fm} は σ_2 (通常 $\sigma_2 \gg \sigma_1$ と考えられる) により大きく変化し、 G の変化にはあまり影響を受けない。

(式 (3.6) で $\sigma_2 \gg \sigma_1$ $G \gg \sigma_2$ とすると近似的に $S_{fm} = \frac{1}{\sigma_2}$ となる)

(2) G は S_{fm} が小さいときの最大推力、 $S=0$ 近傍の推力対すべり特性のこう配に大きな影響を与える。

(式 (3.3) において $\sigma_2 \gg \sigma_1$ とすると $F_{max} = \frac{3V^2}{2\pi f_s R_2} \times \frac{G}{2(\sigma_2+G)\sigma_2}$
(式 (3.4) において $S \rightarrow 0$ $\sigma_2 \gg \sigma_1$ とすると $F = \frac{3V^2}{2\pi f_s R_2} \times \left(\frac{G}{\sigma_2+G}\right)^2 S$)

以上の検討から G , σ_1 , σ_2 の値と推力対すべり特性の関係の概要がわかったが、定格すべりを小さくするには G を大とするよりも σ_2 を大きく、したがって X_1 に比べて R_2 を小さくすることが必要である。逆に低速用リニアモータのように $S=1$ 付近で最大推力を得るためには σ_2 を小さくし $\sigma_2=1$ したがって $R_2=X_1$ 程度に選らばよいことが分かる。

3.3 Short rotor machine

Short rotor machine の一次側は常に rotor と対向しない部分があり、一次巻線の利用率は悪く、一次漏えいインピーダンスが非常に大きく、力率の悪い機械となる。この場合一次巻線の結線法、二次導体の種類によりかなり特性に差異を生じる。この点は文献 (2) に詳しく述べられているので概要を表 3.1 に示す。

なお設計上の問題点としては Edge effect をさけるために、二次側の長さは固定子の極ピッチの偶数倍の長さにする必要があろう。このようにすれば Short stator machine に比べて二次導体の端部における磁束変化が少ないため Edge effect は少ないことが予想され、通常の誘導機における等価回路により諸特性は十分評価できる。

3.4 二次導体

回転形モータの二次側は通常巻線形あるいはかご形が用いられている。リニアモータの場合も当然これらが用いられ、電気特性上最もすぐれたものであるが、リニアモータの場合は吸引力の問題、経済性の問題などからこれらも含めて次の材料が対象となる (3)。

	直列巻線		並列巻線	
	磁性二次導体	非磁性二次導体	磁性二次導体	非磁性二次導体
結線図 および ベクトル図				
磁束密度				
電圧、電流の関係	$V_m > V_s$	$V_m < V_s$	$I_m < I_s$	$I_m > I_s$
利用率	○	×	×	△

表 3.1 Short rotor machine の特性
Characteristics of short rotor machines.

- (1) 巻線形
- (2) かご形
- (3) 鉄板
- (4) 非鉄金属板
- (5) 鉄と非鉄金属のサンドイッチ板
- (6) 非鉄金属板に鉄棒を打込んだもの

これらのうち超高速鉄道用として現在もっとも関心が持たれている Short stator machine では、(4)～(6)あたりが最も実用的と思われる。このうち(6)はかご形を簡易化したものとしてすぐれた特性が期待される。

(1)、(2)、(6)における設計は通常の誘導機的设计書によってほぼ同様に設計できる。しかしながら(3)～(5)に示す導体板の場合は二次電流の流れる path が巻線形やかご形のように限定されていないために比較的設計がむずかしい。電気特性上とくに注意すべき点は、

- (1) 表皮効果の影響
- (2) 導体幅方向の End effect

等である。

以下ではこれらの影響を検討し、無視した場合に対する補正係数を求めることとする。

3.4.1 表皮効果

図 3.4 に示すような両側方式について表皮効果の影響につき考察しよう。

二次導体表面で y 方向磁束密度 B_0 (最大値) が与えられ、二次導体からみた磁束の角速度を ω_R とすると 1 極ピッチ、単位幅当たりの導体に作用する推力は次式のようになる⁽¹⁾。

$$F = \frac{\omega_R \tau^2}{2\pi\rho} B_0^2 \frac{\sin h(\alpha a)/a + \sin(\beta a)/\beta}{\cos h(\alpha a) + \cos(\beta a)} \quad (3.6)$$

$$\left(\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\left[\left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\pi}{\tau} \right)^4 + \left(\frac{\mu\omega_R}{\rho} \right)^2} \right] / 2} \\ \beta &= \sqrt{\left[- \left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\pi}{\tau} \right)^4 + \left(\frac{\mu\omega_R}{\rho} \right)^2} \right] / 2} \end{aligned} \right)$$

一方表皮効果を無視した場合の推力 F' は

$$F' = \frac{\omega_R \tau^2}{2\pi\rho} B_0^2 a \quad (3.7)$$

であるから導体幅 a に対する補正係数 $F/F' = Kg$ とおくと

$$Kg = \frac{\sin h(\alpha a)/(\alpha a) + \sin(\beta a)/(\beta a)}{\cos h(\alpha a) + \cos(\beta a)} \quad (3.8)$$

となる。導体幅は実際の寸法とみて $1/Kg$ を p の補正係数とみてもよい。ここで通常表皮深さの近似式として、しばしば用いられる $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega_R}}$ を用い、 a/δ に対する αa , βa , Kg の値を a/τ をパラメータとして図示すると図 3.4 のようになる。

この図から次のことがいえる。

- (1) αa , βa は a/τ が小さく a/δ が大きいときは共に a/δ とみなしてよい。
- (2) Kg は $a/\delta < 1$ ではほぼ一定。 a/τ が大きいと $a/\delta \rightarrow 0$ でも $Kg < 1$ である。 a/δ が 1 に比べて十分大きいと $Kg = \delta/a$ に漸近する。

δ は材質が決まると周波数 $f_R (= \frac{\omega_R}{2\pi})$ のみの関数となるので $(\delta \propto 1/\sqrt{f_R})$ 鉄, アルミ, 銅における δ - f_R 特性を図 3.5 に示した。Al, Cu 等は $f_R = 100$ c/s で $\delta = 1$ cm であるが F_e の場合は μ により異なるが 1 c/s でも考慮を必要とする。

3.4.2 幅方向の End effect

固定子幅および導体幅が極ピッチに比べて十分長い場合は、 R_2 の計算式において体積抵抗率をそのまま用いればよいが、極ピッチに比べて短い場合は導体内電流は長さ方向成分が目立ってきて、固定子表面での磁束密度が一定でも推力になる成分が減ってくる。これはあたかも体積抵抗率が増加したことになる。図 3.6 に示すように寸法をとり、固定子幅 L だけ正弦波状移動磁界が存在し、他は磁界がないとすれば体積抵抗率の増加率 k_p は次式で与えられる⁽¹⁾。

$$k_p = 1 / \left[1 - \frac{\tan h\left(\frac{P}{a}\right)}{\left(\frac{Pl}{a}\right)(1+\lambda)} \right] \quad (3.9)$$

ただし λ は導体の幅方向端部が開放であるか、零抵抗のエンドリングで短絡されているかで異なり次式で与えられる。

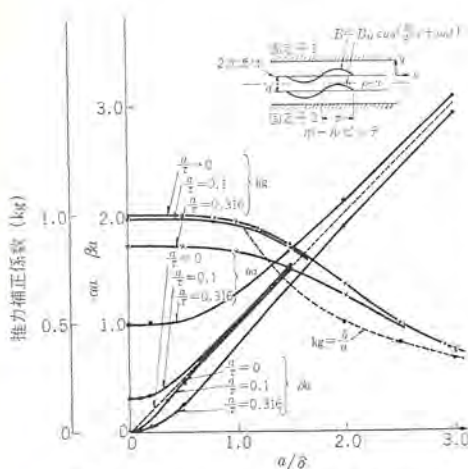


図 3.4 二次導体の表皮効果による推力補正係数

Compensating factor of force by skin effect in secondary conductor.

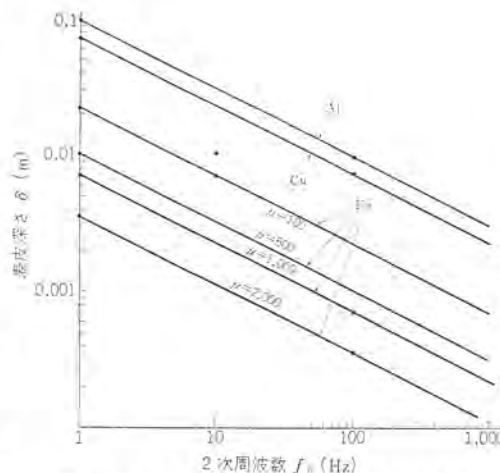


図 3.5 二次導体材料の周波数対表皮深さの関係

Frequency vs. skin depth characteristics of secondary conductor.

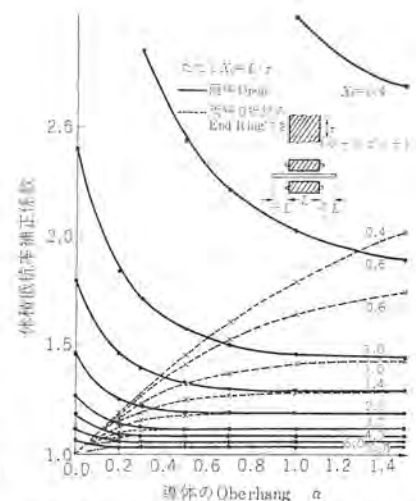


図 3.6 二次導体の End effect による体積抵抗率補正係数

Compensating factor of volume resistivity by end effect in secondary conductor.

$$\left. \begin{aligned} \text{端部開放: } \lambda &= \tan h\left(\frac{Pl}{a}\right) \cdot \tan h\left(\frac{\alpha Pl}{a}\right) \\ \text{エンドリング付: } \lambda &= \tan h(Pl/a) / \tan h(\alpha Pl/a) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.10)$$

図 3. 6 に L/τ をパラメータとし α に対する k_p の値を示す。

以上二次導体に関して、表皮効果、End effect に対する補正係数を求めたが温度の影響、磁性体の磁気飽和の影響等も十分考慮する必要があるのでここでは省略する。

4. 両側方式リニアモータの特性解析

前章でリニアモータの基本特性の検討を行ってきたが、実際のリニアモータにおいては二次導体として複合導体を用いられる場合などは特性は握がむずかしく、さらに両側方式においては、空けき(隙)が中心からはずれた場合の特性等の検討は非常に難解である。そのような観点から両側方式の特性解析のための計算プログラムを開発したので、解析法の概要と解析結果の一部を紹介する。

4.1 解析法

解析モデルとしては図 4. 1 に示すように厚さ a の導体 2 の両側に厚さ b の導体 1 を張り合わせたような複合二次導体を考え、座標を図のようにとり、両固定子中心軸が二次導体中心軸から d だけずれた一般的な場合を取扱う⁽⁷⁾。

x 方向、 z 方向の端効果は無視し、空隙部は領域 I~V に分け各部の透磁率、体積抵抗率を図のようになし、固定子 1, 2 は透磁率、体積抵抗率共に ∞ と仮定する。両固定子空けき面で電流分布を図のように正弦波状の電流シートで表わし、その最大値を与えると、各領域内で成立つ Maxwell の Field equation からベクトルポテンシャルが求まる。未定数は各領域間における境界条件から決定できる。解析法は二つの一次巻線が直列か並列かにより異なる(図 4. 2)。

直列結線の場合は鉄損を無視すれば常に $i_{s1}=i_{s2}(=i_s)$ で、 $I_{m1}=I_{m2}(=I_m)$ 、 $\varphi_s=0$ と考えてよいので、 I_m を与えてベクトルポテンシャルを計算し、このときの二つ巻線の誘起電圧 \dot{E}_1' , \dot{E}_2' 、相電流 \dot{I}_1' とすると $\dot{Z}_{R1}=\dot{E}_1'/\dot{I}_1'$ 、 $\dot{Z}_{R2}=\dot{E}_2'/\dot{I}_2'$ は I_m に関係なく一定で、 \dot{Z}_{R1} 、 \dot{Z}_{R2} は図 4. 3 (a) の通常の誘導機の等価回路における点線部のインピーダンスに相当する。したがって一次漏れインピーダンス X_1 、一次抵抗 R_1 を追加すると本解析による等価回路は図 4. 3 (b) のようになり、定格電圧 V (相電圧)に対する誘起電圧 \dot{E}_1 , \dot{E}_2 、相電流 \dot{I}_1 など等価回路から諸特性が計算できる。

一方 I_m を与えて計算したベクトルポテンシャルを $\dot{A}_j'(j=I \sim V, \text{以下同様})$ とすると、定格電圧に対するベクトルポテンシャル \dot{A}_j は換算係数として \dot{E}_1/\dot{I}_1 を用いると $\dot{A}_j=\dot{E}_1/\dot{I}_1 \cdot \dot{A}_j'$ として求まる。このベクトルポテンシャルから各領域における磁束密度、電流密度、推力、吸引力等が計算できる。

並列結線の場合は $d \neq 0$ のとき $I_{m1} \neq I_{m2}$ 、 $\varphi_s \neq 0$ となるので最初 I_{m1} のみ与えてこのときの誘起電圧 \dot{E}_1' , \dot{E}_2' 、相電流 \dot{I}_1' ($\dot{I}_2'=0$)、ベクトルポテンシャル \dot{A}_j' を計算し、次いで I_{m2} のみ与えて \dot{E}_1'' , \dot{E}_2'' 、 \dot{I}_2'' ($\dot{I}_1''=0$)、 \dot{A}_j'' を計算する。ここで

$$\dot{Z}_{11}=\frac{\dot{E}_1'}{\dot{I}_1'}, \dot{Z}_{12}=\frac{\dot{E}_1''}{\dot{I}_2''}, \dot{Z}_{21}=\frac{\dot{E}_2'}{\dot{I}_1'}, \dot{Z}_{22}=\frac{\dot{E}_2''}{\dot{I}_2''}$$

とすると \dot{Z}_{11} , \dot{Z}_{12} , \dot{Z}_{21} , \dot{Z}_{22} を四端子回路網における 4 定数として、図 4. 3 (c) に示すような等価回路が得られる。定格電圧 V を与えるとそのときの誘起電圧 \dot{E}_1 , \dot{E}_2 、相電流 \dot{I}_1 , \dot{I}_2 が求まる。そして

$$\dot{E}_1=\dot{Z}_{11}\dot{I}_1+\dot{Z}_{12}\dot{I}_2 \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\dot{E}_2=\dot{Z}_{21}\dot{I}_1+\dot{Z}_{22}\dot{I}_2 \dots\dots\dots (4.2)$$

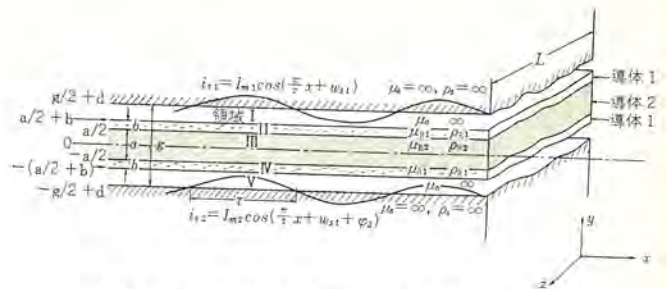


図 4. 1 両側方式リニアモータの解析モデル
Analytical model for double sided linear motor.

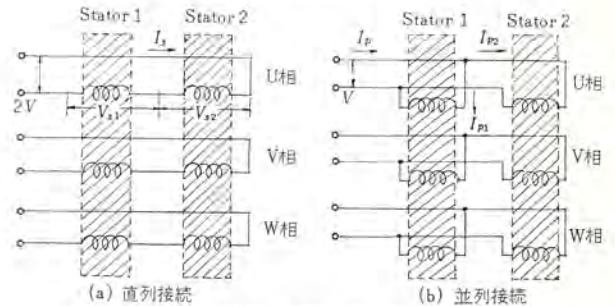
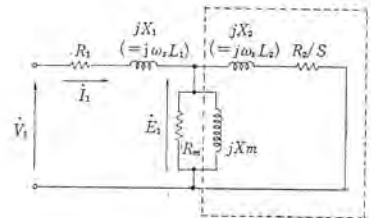
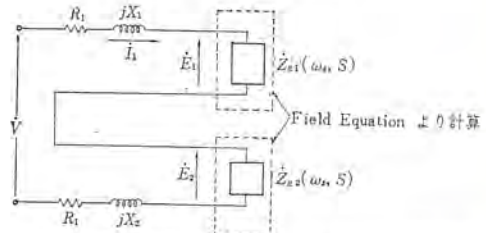


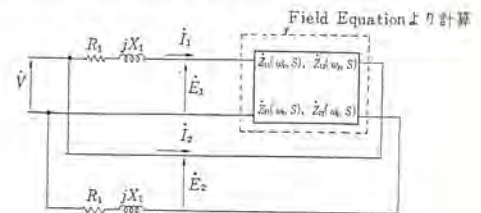
図 4. 2 一次巻線の直列接続と並列接続
Series connection and parallel connection of primary windings.



(a) 通常の誘導機の等価回路



(b) 本方式による両側方式直列接続リニアモータの等価回路



(c) 本方式による両側方式並列接続リニアモータの等価回路

図 4. 3 両側方式リニアモータの等価回路
Equivalent circuit of double sided linear motor.

なる関係がある。そして換算係数として $\dot{E}_1=\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_1'}$ 、 $\dot{E}_2=\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_2''}$ を用いれば、重畳の理により $\dot{A}_j=\dot{E}_1\dot{A}_j'+\dot{E}_2\dot{A}_j''$ として定格におけるベクトルポテンシャルが計算できる。

4.2 計算結果

4.2.1 定数

計算は

(1) 鉄板

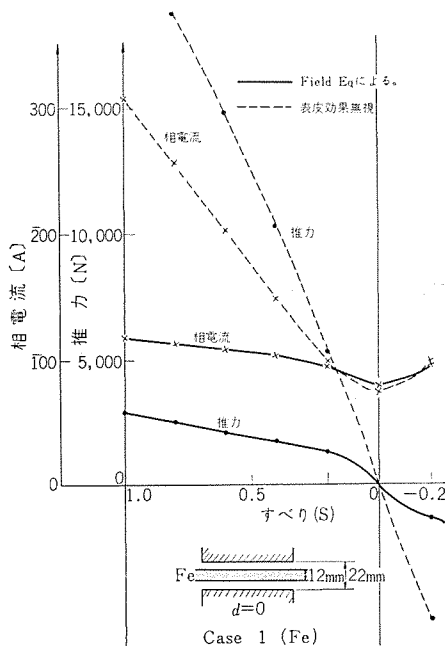


図 4.4 Case 1 の推力および電流特性 (鉄板)

Force and current characteristics of Case 1 (Fe plate).

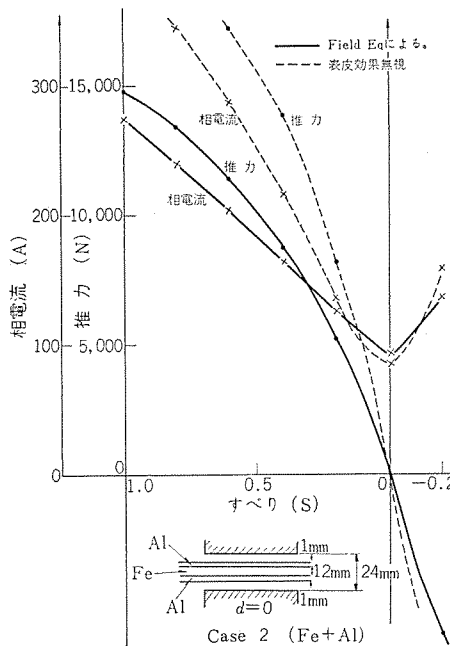


図 4.5 Case 2 の推力および電流特性 (鉄板とアルミ板の複合導体)

Force and current characteristics of Case 2 (composite secondary of Fe and Al plates).

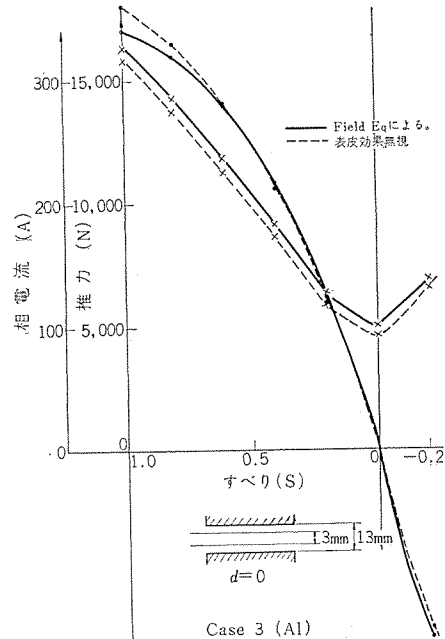


図 4.6 Case 3 の推力および電流特性 (アルミ板)

Force and current characteristics of Case 3 (Al plate).

表 4.1 計算に用いたリニアモータの諸定数

Constants of linear motors for calculation.

リニアモータの仕様

二次導体の材質寸法

形 式	両側方式
結 線	直列接続および並列接続
定 格 電 圧	片側コイル当り 450 V (端子電圧は直列接続 900 V, 並列接続 450 V)
周 波 数	$f=60$ c/s
極 数	$p=6$
極 間 隔	$\tau=0.125$ m
固 定 子 幅	$L=0.25$
巻数/毎相毎極	$tw=22.7$ (巻線係数を考慮)

ケース	材 質	$\mu R1$	$\mu R2$	$\rho R1$ $\mu\Omega\text{-cm}$	$\rho R2$ $\mu\Omega\text{-cm}$	g m	a m	b m	G	σ_1	σ_2
1	鉄 板	500.0	500.0	20.0	20.0	0.022	0.012 (0.004)	0 (0.004)	8.66	0.045	0.902
2	鉄板とアルミ板 のサンドイッチ	1.0	500.0	3.8	20.0	0.024	0.012	0.001	7.02	0.439	0.876
3	ア ル ミ 板	1.0	1.0	3.8	3.8	0.013	0.003 (0.001)	0 (0.001)	4.55	0.380	0.766

(ただし $d=0$ m, 0.002 m, 0.004 m の 3 種につき計算)

(2) アルミ板

(3) 鉄板の両側にアルミ板を張りつけたもの

の三つの case について行なった。このときの諸定数を表 4.1 に示す。材質、寸法は図 4.1 に示すとおりであり、鉄板あるいはアルミ板などの 1 枚板では $b=0$ と考えられるが、計算の便宜上 $b \neq 0$ とし、 $a+2b$ が実際の厚みを表わすようにインプットしている。() 内の値は計算のための数値を示す。

なお G , σ_1 , σ_2 は式 (3.2) に示した値で表皮効果を無視した値を基準にとっている。

4.2.2 推力—速度特性および電流—速度特性

図 4.4～図 4.6 はそれぞれ Case 1～Case 3 における $d=0$ 、並列接続の推力対すべりおよび一次相電流対すべりの関係を示す。実線は 4.1 節に示した方法による結果であり、点線は通常のパラメータ解析によるもので表皮効果を無視したものである。

これらの 3 Case とも σ_2 の値が小さいため、最大推力が 1 以上になり、すべり 1～0 の範囲ではすべりが小さくなるにつれて推力が漸減する特性となっており、これは 3.2 節に示した傾向と一致する。

二次導体がアルミの時は実線と点線がよく一致し、表皮効果を無視し、パラメータ解析により計算してもほとんど差のないことが分かる。一方、二次導体が鉄の場合は表皮効果が著しくすべり 1 では表

皮効果を無視した場合の 1/7 しかないことが分かる。この場合は図 3.4 において $a/\delta \approx 10$ と非常に大きく、空げき磁束密度が同じとした場合 $Kg \approx 1/10$ となることから明らかである。鉄とアルミのサンドイッチしたものは推力が大部分アルミにより得られているため、表皮効果があるにもかかわらず実線と点線とはあまり大きく違ってはいない。

4.2.3 空げき内磁束分布

次に空げき内の磁束分布を示すことにする。図 4.7 (a)～(f) は Case 1～Case 3 における空げき内磁束分布を示すもので、 $d=0$ mm および $d=4$ mm の二つの場合をあげる。 $d=4$ mm については一次巻線が直列の場合と並列の場合を示す。

二次導体が鉄板の場合は、 $d=0$ の時の磁束密度は $S=0$ では空げき内でほぼ一定であるが、 $S \neq 0$ では表皮効果のため鉄心中央に向うにつれて磁束密度は急激に低下し、 $S=1$ では中央部で表面の 2 %程度に低下する。 $d=4$ mm のときの磁束密度は巻線が並列接続か直列接続かによって様子がことなる。すなわち並列接続の場合は二つの一次側巻線の端子電圧が常に等しいため、二つの固定子表面の磁束分布は S のいかにかわらず 30 %以内の差しかない。

一方直列接続の場合は二つの固定子表面の磁束分布の差は非常に大きくとくに $S=0$ の場合に著しい。この場合両側で 6 : 1 になっており、両コイルの電圧分布の不均衡、磁束密度の高いほうの磁気

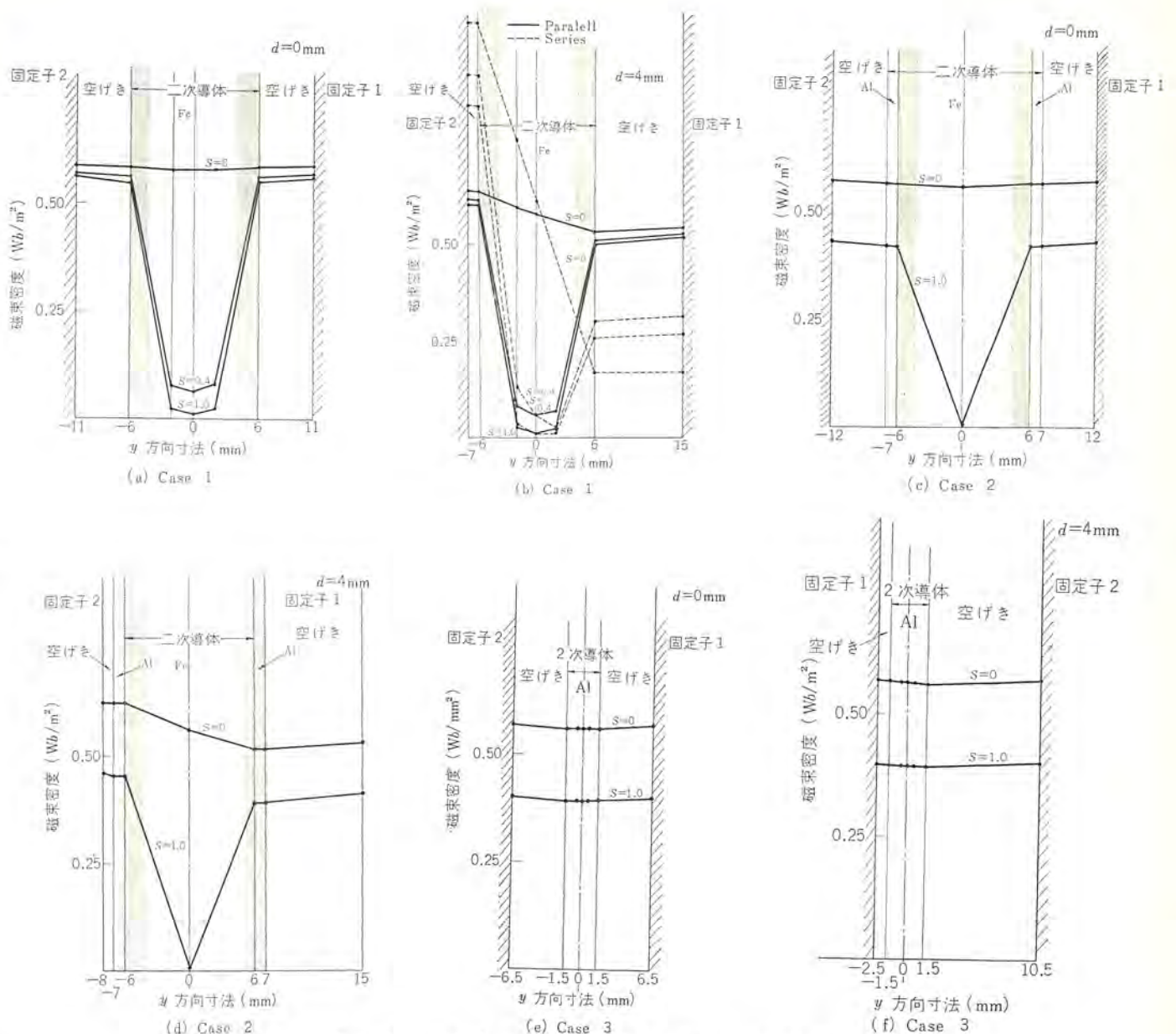


図 4.7 二次導体内および空けきにおける磁束分布
Flux distribution in the secondary conductor and air gap.

飽和などの問題が生じることが予想される。空けきのうち空気部分の磁束はコイルの結線法，中心部からのずれにかかわらず，ほとんど減衰はない。鉄心内では $S=0$ のときは直線的に変化し， $S \neq 0$ では $d=0$ と同様に中心部で急激に低下する。

鉄板とアルミ板のサンドイッチの場合もアルミ部分において磁束の減衰がないため，鉄板の場合とほとんど同じ傾向を示す。

アルミ板のときは結線法 S ， d にかかわらず空けき内の磁束の減衰は数%以下である。

以上示したように二次導体の種類，結線法一次と二次の中心軸のずれにより空けき内磁束密度分布が異なるため，二つの一次巻線の端子電圧，電流の不均衡が生じることが予想され，設計の際十分考慮しなければならない。

4.2.4 一次電圧と一次電流

図 4.8 に鉄板およびアルミ板について d の値による両巻線の電圧，電流変化，全電流の変化を示す。実線は並列接続の場合，点線は直列接続の場合を示す。電圧，電流の記号は図 4.2 に従う。

(a) 二次導体が鉄板の場合

二次導体が鉄板の場合で並列接続の時二つの一次巻線の電圧は当然電源電圧に等しいが，電流は d が増加するにつれて不平衡は著しく空けきが増加した側（この場合 Stator 1）の電流が増加する。 $S=0$ で $I_{p1}/I_{p2} \approx 7$ ， $S=1$ で $I_{p1}/I_{p2} \approx 2.5$ にもなり I_{p1} は全電流 I_p の 70~90% にもなりうるので巻線の電流を $d=0$ mm で設計した場合温度上昇が著しく損耗も考えられるので， d が変化した場合も考慮した設計が必要となる。しかしながら全電流 I_p は $d=4$ mm になっても 10% 以下の減少ですむ。

一方，直列接続の場合二つの巻線の電流は当然等しいが，二つの巻線にかかる電圧は， d が増加するにつれて不平衡が著しくなり，空けきが減少した側（この場合 Stator 2）にかかる電圧が著しく増加する。この場合すべし $S=0$ の場合が最も著しく， $d=4$ mm の場合 $V_{S1}/V_{S2} \approx 1/6$ にもなるので，設計の際は d が変化した場合にも巻線の耐圧に問題がないか，鉄心の磁気飽和が起こらないかを十分考慮しなければならない。この場合全電流 I_s の変化は並列接続の場合ほど少なくはないが， $S=1$ においては $d=4$ mm で 20% 以下の減少ですむ。

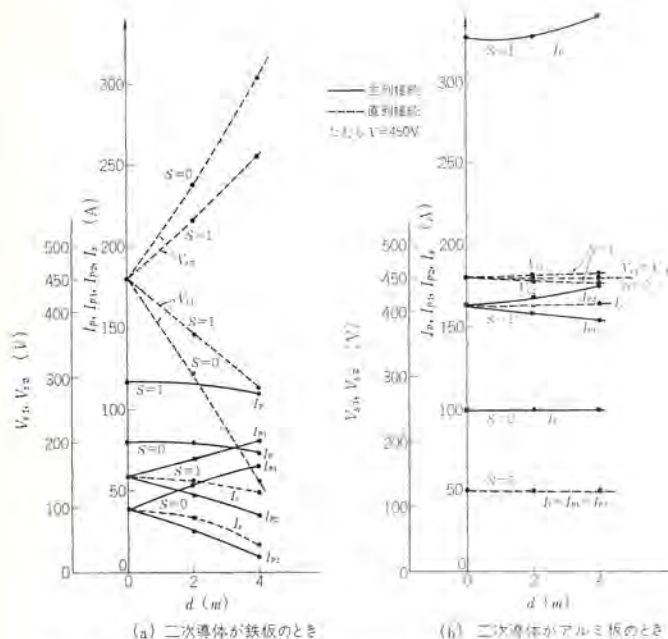


図 4.8 二次導体が固定子中心軸からずれたときの固定子巻線の電圧、電流の変化
Voltage and current characteristics with unequal air gaps.

このように d の変化に対して電流はあまり大きく変化ないので、ここではとくにふれないが、推力も一次巻線の結線法にかかわらず d の変化に対して実用上問題のない程度の減少にとどまっている。なおここではふれなかったが、鉄板とアルミ板の場合は図 4.7 に示した磁束分布からも明らかのように、鉄板の場合とほぼ同じ傾向となる。

(b) 二次導体がアルミ板の場合

二次導体がアルミ板の場合は全般的に見て、 d が変化しても電流、電圧の不平衡はほとんどなく、全電流も d の変化に対してほぼ一定と考えられる。

並列接続のときの d が増加した場合は $S=0$ の場合はまったく電流変化はなく $S \neq 0$ のときは鉄板の場合とは逆に I_{p2} が増加し、 I_{p1} は減少するが $S=1$, $d=4$ mm の場合でも $I_{p1}/I_{p2} \approx 0.9$ と実用上ほとんど問題はない。全電流 I_p も鉄板の場合と逆に d が増加するにつれて増加するが増加率はさらに少ない。

直列接続のときの電圧変化も鉄心の場合とは逆に V_{s1} が増加し、 V_{s2} が減少するが $d=0$ の場合でも $V_{s1}/V_{s2} \approx 0.3$ とほとんど変化しない。 I_s も $S=0$ のときは d に関係なく一定、 $S=1$ もごくわずかに増加する程度である。

このようにアルミ板の場合、変化は鉄板にくらべて非常に少ないが、変化が鉄板の場合とまったく逆になることは注目すべきである。なお以上述べてきたような基本特性を実証するために、当社長崎製



図 4.9 リニアモータの試験モデル
Experimental model of linear motor.

作所において図 4.9 に示すようなアルミリニアモータモデルを製作し、解析結果との照合を行なっているが、その詳細については別の機会に報告する予定である。

5. む す び

以上リニアモータの原理と形式、電気的特性の概要につき述べた。基本特性については用途と特性との関係、パラメータ変化による推力特性の変化、二次導体に関する問題を検討した。

ついで複合二次導体を有する両側方式の解析法を示した。そして二次導体が鉄板、アルミ板、鉄とアルミの複合板の場合の特性の違いについて述べた。そして最後に二次導体が両固定子の中心からずれた場合の特性変化を一次巻線が直列接続の場合と並列接続の場合について述べた。今後、実験による解析の確認結果とともに、端末効果をはじめとする高速時の特性についてもさらに詳細な検討を進める予定である。

参 考 文 献

- (1) E. R. Laithwaite : "Induction Machines for Special Purposes" book, 1966
- (2) D. S. Armstrong : "Application of the Linear Motor to Transport" Railway Gazette, Feb. 17, 1967
- (3) 宇佐美ほか訳 : 超高速鉄道用リニアモータの研究と実用性に関する最終報告、鉄研技術研究所速報 (昭 42-10)
- (4) R. L. Russell, K. H. Norsworthy : "Eddy Current and wall losses in screened-rotor induction motors" IEE Paper No. 2525 U, Apr. 1958, p. 163~p. 174
- (5) 大野、岸本 : "リニアモータの現状と将来" 電気評論 p. 47~. p. 53 (昭 43-4)
- (6) 山村、大野 : "サイリスタモータ式リニアモータ (1), (2)" 電気学会東京支部 (昭 42-10), 電気連大 (昭 43-4)
- (7) 大野、岸本 : "リニアモータの特性解析" 電気関係学会関西支部連大 (昭 43)

プラズマ電子ビーム溶接

後藤 正之*・上山 善司**・安永 政司**

Plasma Electron Beam Welding

Central Research Laboratory

Masayuki GOTÔ・Yoshiji UYAMA・Seiji YASUNAGA

It is well known that an electron beam has a wide scope of application as an excellent heat source in the field of vacuum metallurgy.

Technique of electron beam welding has spread especially in fabricating component parts in aircraft, automobile and electric machine industries. The source of the electron beam, however, has been a hot cathode of heated tungsten metal which needs high vacuum of above 10^{-4} Torr with a drawback of short life accompanying troubles in maintenance.

This article introduces a plasma electron beam gun developed as a new electron beam source for the purpose of working as a heat source of industrial application. A report is made on its characteristics and various test results of welding joints of different metal.

1. ま え が き

電子ビームを熱源として使用することは、約 50 年も以前から知られており、真空冶金の分野で溶接、溶解、蒸着、焼鈍など、広い利用面があることは周知のことである。

電子ビームを溶接に使用すると、

- (1) 熱源としてのエネルギー密度が高く、
 - (a) 深い溶け込みが得られる。
 - (b) 熱影響部が少ない。
 - (c) 溶接速度が速い。
 - (d) 開先、溶加物が不要。
 - (e) 異種金属の溶接が可能。
 - (f) W, Mo, Ta, Cu, Al 等の溶接が可能。

- (2) エネルギー密度の制御が容易である。

- (3) 溶接部の仕上りが清浄である。

などの特長があり、最近では電子ビーム溶接の特長を生かした応用が、航空機工業、自動車工業、電機工業などの部品工作技術として普及しはじめている。

しかし、従来の電子ビーム溶接機は、電子ビーム発生源として、タングステンを $2,500^{\circ}\text{K}$ 程度の高温に加熱した熱陰極を使用している関係で、熱陰極の焼損を防ぐために溶接作業室の真空度を 10^{-4} Torr 程度にする必要があり、また溶接時に溶接箇所から発生する不純ガスや金属蒸気が、電子ビームによりイオン化されて陰極側に逆流し、熱陰極を衝撃して陰極物質を壊散させるので、破損による熱陰極の寿命が短く、保守が容易でない。

われわれは、電子ビームを工業的に広く活用するために、新しい電子ビーム源として、

- (1) 5×10^{-2} Torr 程度の中真空で動作し、
- (2) 破損の可能性が少なく、寿命が長い

プラズマ電子銃を開発し、これを電子ビーム溶接機の電子ビーム発生源として使用する場合の実用性について試験している。本文では、プラズマ電子銃の原理と特性と、プラズマ電子銃からの電子ビーム（以下プラズマ電子ビーム Plasma Electron Beam）によって溶接した異種金属継手の各種試験結果について報告する。

2. プラズマ電子銃

2.1 構造のよび動作原理

図 2.1 は、連続定格 5.0 kW のプラズマ電子銃本体の構造を示し

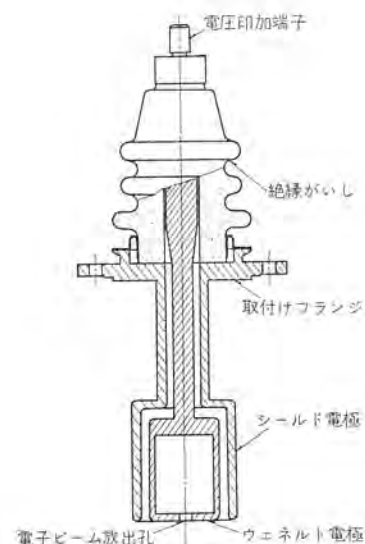


図 2.1 プラズマ電子銃本体の構造断面
Cross section of plasma electron beam gun.

ている。プラズマ電子ビーム本体は、ウェネルト電極と呼ばれる中空電極と、シールド電極とから成っていて、ウェネルト電極はその軸上に電子ビーム放出孔を持っている。この電子銃を電子銃室にそう（挿）入して、シールド電極を接地し、ウェネルト電極に負の高電圧を印加する。この状態で電子銃室のガス圧が 5×10^{-2} Torr 程度になるようにヘリウムガスを供給すると、プラズマ電子銃は動作状態になりプラズマ電子ビームが発生する。発生した電子ビームは、ウェネルト電極に印加した負の高電圧に相当するエネルギーにまで加速される。このとき得られる電子ビーム電流密度は、空洞内のプラズマ密度に比例し、電子銃室のヘリウムガス圧によって制御される。使用するガスの種類は、ヘリウムのほかに水素、窒素、アルゴンなどが考えられるが、ガスの種類によって電子銃の特性が異なる。

図 2.2 は、プラズマ電子銃の外観を示している。

プラズマ電子銃の動作原理は、ガス中の自続放電に対するパッシェン (Paschen) の法則の応用で、ガスふん（霧）囲気中でウェネルト電極に電圧を印加したときの電気力線のうち、パッシェンの法則によって自続放電の発生条件を満足する長い電気力線が放電する。プラズマ電子銃におけるシールド電極の役割りは、原理的に自続放電が生じる必要のない部分の電気力線を短かくすることである。

図 2.3 は、プラズマ電子銃の動作原理を示す図である。長い電気力線の自続放電で生じるヘリウムイオンが、ウェネルト電極の軸上にある

電子ビーム発生孔を通して空洞内に流入し、空洞内壁を高速イオンによって衝撃された電極壁面からは二次電子が放出され、これが空洞内のガスを電離してプラズマが発生し、ウェネルト電極の空洞内にプラズマが蓄積される。このプラズマが、プラズマ電子銃の電子ビーム発生源すなわち陰極である。

プラズマ電子銃の電子ビーム発生領域のようすを図2.4に示す。ウェネルト電極に印加した電圧による電界が、ウェネルト電極の電子ビーム放出孔から空洞内に浸入し、電子ビーム放出孔に面した空洞内プラズマ領域にプラズマシース (Plasma sheath) が形成され、その境界層が陰極面になっていると考えられる。この面を境にプラズマ領域とビーム領域とに区別すると、どちらの領域もイオンと電子が混在するが、

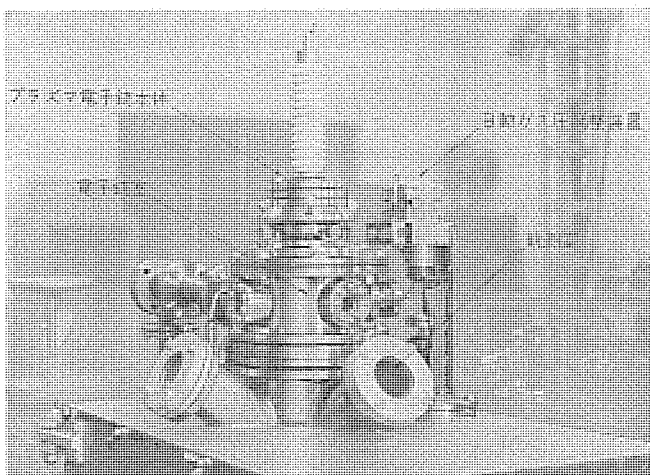


図 2.2 プラズマ電子銃の外観
Appearance of plasma electron beam gun.

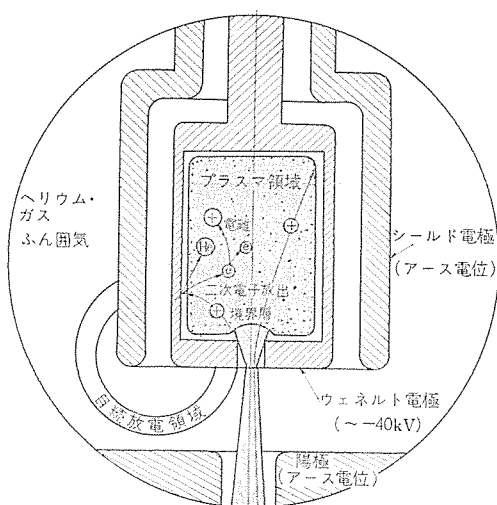


図 2.3 プラズマ電子銃の動作原理図
Diagram showing the principle of plasma electron beam gun.

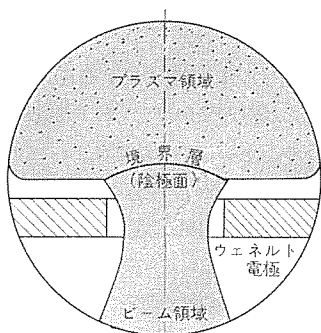


図 2.4 プラズマ電子銃のプラズマ陰極
Plasma cathode of the gun.

プラズマ領域のイオンと電子は主として熱運動をしているのに対して、ビーム領域のイオンと電子は、エネルギーが高く指向性のある運動をしている。

電子銃室のガス圧は、 5×10^{-2} Torr 程度であるから、電子ビームは軌道上のガスを電離し、ウェネルト電極空洞内へのイオンの供給源となる。したがってプラズマ電子銃が動作状態にあるときは、ウェネルト電極および陽極との間の長い電気力線の自統放電はプラズマ電子ビームを安定に保持するための補助的な役割りをしている。

2.2 熱陰極電子銃との比較

表 2.1 は、プラズマ電子銃と熱陰極電子銃の比較表である。

2.3 特性

2.3.1 出力

プラズマ電子ビームの軌道上のヘリウムガスは、電子ビームによって電離される。その結果発生するイオンは、陰極側に加速されてウェネルト電極に流入する。このイオン流は、プラズマ電子銃の動作原理において重要な役割りを果しているが、一方プラズマ電子銃の出力に比例するイオン流の電力のためにウェネルト電極が加熱され、熱伝導および熱放射による冷却と平衡するまでウェネルト電極の温度が上昇する。したがって使用しているウェネルト電極の材質の融点との関係で、プラズマ電子銃の出力が制限される。

プラズマ電子銃の電力に対するイオン流の電力比を β とすると、ウェネルト電極への熱入力と、熱伝導および熱放射による冷却との平衡状態においては、ウェネルト電極の温度は、式 (2.1) で与えられる。

$$\beta VI = CT_0 \left(1 - \frac{T}{T_0} \right) + RT_0^4 \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_0} \right)^4 \right\} \dots \dots \dots (2.1)$$

ここに

V : プラズマ電子銃の動作電圧

I : プラズマ電子銃の陰極電流

T_0 : ウェネルト電極の平衡温度

T : 電子銃室の温度

C : 熱伝導係数

表 2.1 プラズマ電子銃と熱陰極電子銃の比較
Comparison between plasma electron beam gun and hot cathode electron gun.

	プラズマ電子銃	熱陰極電子銃
陰 極	ヘリウム等、不活性ガスのプラズマ	2,500°K 程度の高温に加熱されたタングステン
陰極加熱法		加熱電流による直接加熱または、電子線衝撃による加熱
陰極部の構造	きわめて簡単な、中空円筒電極 (ウェネルト電極)	複雑で、陰極加熱用の電源を加速電圧分能線する
電子線発生法	電子銃室にガスを供給し、加速電圧を印加する	陰極を加熱し、加速電圧を印加する
電子電流の制御	電子銃室のガス圧を制御する	陰極の温度を制御する
電子銃室の真空度	$10^{-2} \sim 10^{-1}$ Torr	$10^{-5} \sim 10^{-4}$ Torr
電子銃室の個別排気	出力電子銃を安定化するために必要	電子銃室の真空度を保持するために必要
陰極の電子温度	~ 3 eV	~ 0.3 eV
陰極の寿命	ガスの供給を続ける限り、陰極寿命は半永久的だが、逆流するイオン衝撃によりウェネルト電極が変形する	逆流するイオンの後撃により熱陰極が破損し、また大気汚染により銃損する。寿命は短い
電子ビーム加速電圧	現在得られている最高電圧は、100 kV 程度で、原理的には限界はないようだが、40 kV 以上は技術的にむづかしい	原理的な限界はなく、多段加速なども用いられるが、陰極加熱電源の絶縁が問題
電子電流密度	陰極面電流密度 1 A/cm^2 以上	陰極部電流密度 1 A/cm^2 程度

R: 熱放射係数

図 2.5 は、熱放射のみの冷却で使用するプラズマ電子銃の出力とウェネルト電極の平衡温度との関係を実測した結果である。使用した電極材は SUS 27 である。Mo, Ta などを用いれば、プラズマ電子銃の出力を高めることができる。未使用の新しいウェネルト電極の表面は、鏡面仕上げをしてあるので熱放射係数は低く、0.25 程度であるが、長時間使用したウェネルト電極の表面は熱放射係数が高くなり、同じ電極温度で得られる電子ビーム出力は増加する。

プラズマ電子銃の電力効率率は、 $(1-\beta)$ で与えられ、使用するガスの種類、ウェネルト電極の材質および形状、電極配置、動作電圧、動作電流など多くの要因によって左右され、動作の安定な電子銃の電力効率率は、80 % 程度である。

図 2.6 は、現在までに報告されているプラズマ電子のウェネルト電極径と出力との関係を示し、これに SUS 27 のウェネルト電極を使用した熱放射冷却プラズマ電子銃の出力特性を重視させている。(①～⑧)

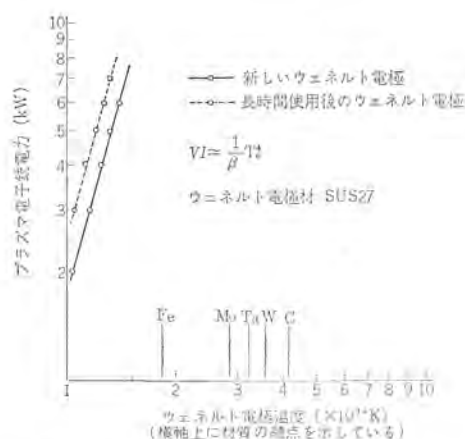


図 2.5 ウェネルト電極温度と出力の関係
Relation between temperature of Wehnelt electrode and output power.

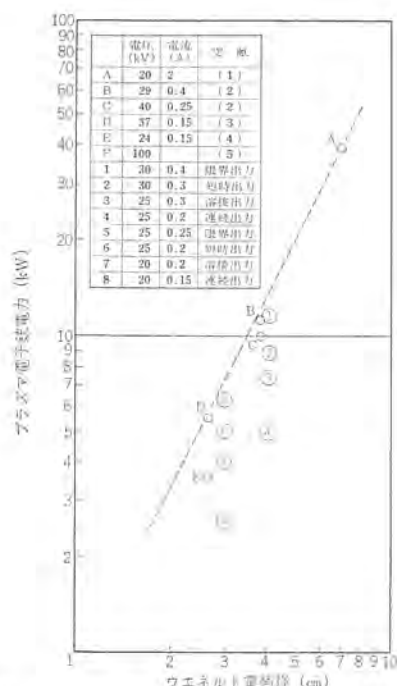


図 2.6 ウェネルト電極径と出力の関係
Relation between Wehnelt-diameter and output power.

2.3.2 ウェネルト電極の寿命

プラズマ電子銃の陰極は、ヘリウムガスのプラズマであるからガスの供給を続ける限り陰極の寿命は半永久的である。しかしウェネルト電極のビーム放出孔のまわりは、流入する高速イオンの衝撃によって徐々にその形状が変形し、プラズマ電子銃の特性が変わる。

図 2.7 は、熱放射冷却プラズマ電子銃のウェネルト電極温度が 1,000 °C になる出力で、100 時間使用した SUS 27 製ウェネルト電極のビーム放出孔付近を示している。鏡面仕上げしてあった電極面が、流入する高速イオン流のために浸食されているのがわかる。

図 2.8 は、ウェネルト電極の電子ビーム放出孔の電極肉厚と電子ビームの発生領域における発散角の関係を示している。図 2.8 から、ウェネルト電極のビーム放出孔付近が、流入する高速イオンによって浸食され電極の肉厚が変わると、電子ビームの発生条件が変わることがわかる。電子ビームの発散角の変化は、電磁集束レンズの焦点距離の設定を変えることによって修正できるが、この現象がプラズマ電子銃の寿命をきめる一つの要因になると言える。

2.3.3 プラズマ電子ビームの性質

プラズマ電子ビームの発生領域のガス圧は、 5×10^{-2} Torr 程度であるから、電子ビームがガス分子を励起し、電子ビームの軌道にそってガスの種類によって個々の波長での発光がみられ、ビームの最外殻軌道は肉眼または写真で観測することができる。図 2.9 は、写真によ



図 2.7 100 時間運転後のウェネルト電極
Example of wehnelt-electrode after 100 hrs operation.

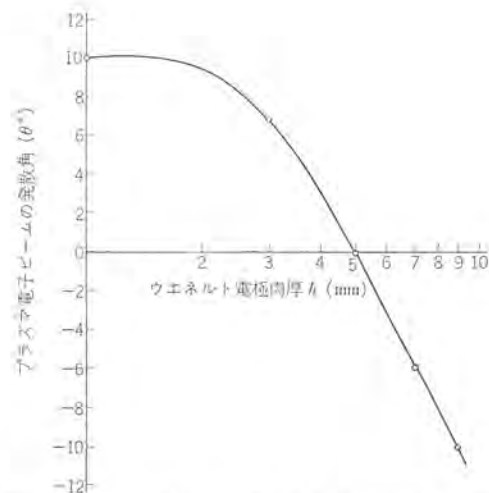


図 2.8 ウェネルト電極の浸食によるビーム発散角の変化
Beam divergence angle variation with erosion of Wehnelt electrode.



図 2.9 プラズマ電子ビームの最外殻軌道
Profile of plasma electron beam.

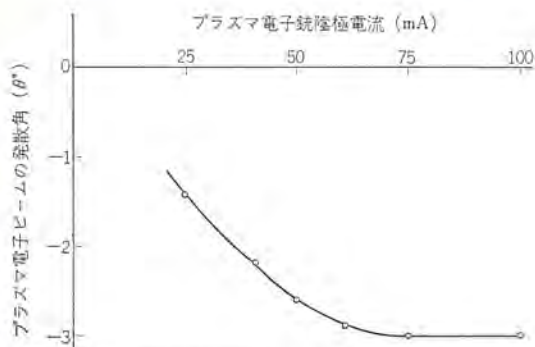


図 2.10 陰極電流密度によるビーム発散角の変化
Variation of beam divergence angle with cathode current density.

って観測された電子ビームの最外殻軌道を示している。この方法を用いれば、ウェネルト電極の形状、電極配置、プラズマ電子銃の動作電圧、陰極電流密度などによる電子ビーム最外殻軌道の発散角など電子ビーム発生初期条件となる量の測定をすることができる。図 2.10 は、この方法によって測定した陰極電流密度による電子ビーム最外殻軌道の発散角の変化のようすを示している。

高真空中での電子ビームの最外殻軌道の運動方程式は、Walsh⁽⁵⁾らによって式(2.2)で与えられている。

$$P \frac{d^3 R}{dZ^3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{dP}{dZ} \cdot \frac{dR}{dZ} + \frac{1}{4} \cdot \frac{d^2 P}{dZ^2} \cdot R = \frac{Q}{R^3} + \frac{F}{R^{1/2}} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに

$$R : r/r_0 \quad Z : z/r_0 \quad P : V/V_0$$

$$Q : E/(-2V_0 e m_e r_0^2)$$

$$F : (\sqrt{2/8\pi\epsilon}) (m_0/e)^{1/2} i_0 / (-V_0)^{3/2}$$

r_0 : ビームウェスト(ビーム径が極少の点)の半径

V_0 : ビームウェストでのビームエネルギー

E : ビームウェストでのビームエミッタンス

i_0 : ビームウェストでの電流密度

式(2.2)によれば、電子ビーム電流密度が増加すると、ビーム自身の空間電荷のために電子ビームは発散する。

図 2.10 によれば、プラズマ電子ビームは電流密度が高くなると集束することを示している。プラズマ電子ビームの電流密度は、電子銃室のガス圧で制御され、ガス圧の増加関数であるから、プラズマ電子ビームの電流密度が高いときは電子銃室のガス圧が高く、したがって電子ビームによって電離される確率が高くなり、正の空間電荷が優勢になる。その結果、電子ビームは集束作用を受ける。このようにプラズマ電子ビームの最外殻軌道の計算に式(2.2)を適用する場合、電流密度 i_0 に正の空間電荷を考慮した量を使用する必要があることがわかる。

2.3.4 電子ビーム電流の制御

プラズマ電子ビームの電流は、電子銃室のガス圧によって制御され、自動ガス調整装置に陰極電流値を帰還して自動制御している。プラズマ電子ビームを溶接に使用する場合、溶接箇所から発生する金属蒸気や不純ガスなどの外乱を受けながら電子ビーム出力を一定に保持する定値制御性と、電子ビーム出力を自動的に増減させる追値制御性が要求される。

(1) 定値制御

電子ビームを水冷した銅のコレクタに照射して、電子ビーム電流の安定度を測定すると、金属蒸気や不純ガスの発生はないから、加速電圧など電気系統の外乱に対する電子ビーム電流の安定度を得ること

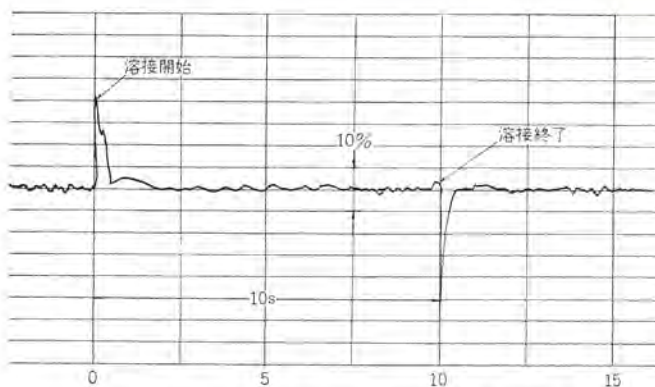


図 2.11 溶接中の電子ビーム電流の変動
Fluctuation of electron beam current during welding operation.



図 2.12 ビード終端部
Appearance of bead-termination.

ができる。測定の結果この状態での安定度が $1.5 \times 10^{-2}/h$ の電子銃を用いて、酸洗いたステンレス鋼(SUS 27)板につぎの条件でビードを走らせたときの電子ビーム電流の変化のようすを図 2.11 に示している。

- (1) 加速電圧 20 kV
- (2) 陰極電流 0.1 A
- (3) 走行速度 1 m/min

図 2.9 によれば、0.1%程度の安定度の電子ビームを用いて、酸洗いたステンレス鋼を溶接すると、溶接開始時と溶接終了時に電子ビーム電流が約 20%変動しているのがわかる。しかし溶接中は電子ビーム電流の変動はほとんどみられない。これは溶接中電子ビーム電流を一定に保持するために自動制御を使用しているから、溶接部の温度、ビード幅溶け込みなどの変動が少なく、溶接部から発生する金属蒸気や不純ガスが外乱になっていないことを意味し、溶接開始時および溶接終了時の発生ガス量の急変がプラズマ電子のビーム制御における問題点であることがわかる。

(2) 追値制御

電子ビームを溶接に使用する場合、回転体などの溶接終了時に電子ビーム電流を急激にシャ断すると、ビード終端部に深いクレタができる。スムーズなビード終端を得るためには、電子ビーム電流を徐々に減少させて溶接を終了する必要がある。

図 2.12 は、自動制御回路を用いて追値制御によってプラズマ電子ビームを徐々に減少させて溶接を終了したときに得たビードの終端部を示している。

2.3.5 プラズマ電子ビームによるビードの溶け込み

従来の熱陰極から得られる電子ビームによるビードの幅(w)と溶け込み深さ(p)の比は 3~10 以上になり、プラズマ電子ビームによる溶け込み比(p/d)はこれより低いとされている。

図 2.13 は、プラズマ電子ビームによるビードの例で、試料の材質は SUS 27 である。この結果によれば、ビードの溶け込み比は試料の

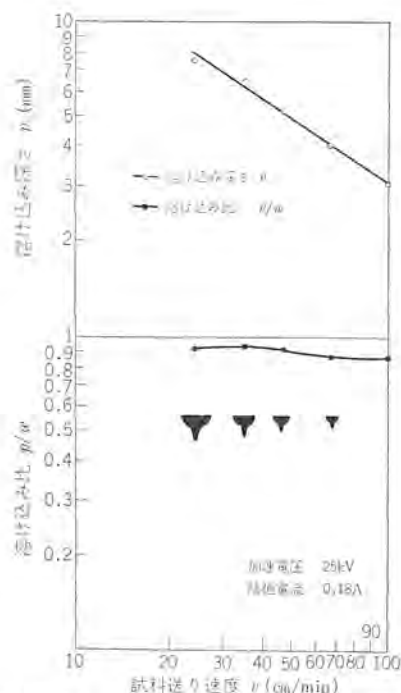


図 2.13 試料送り速度と溶け込みの関係
Variation of penetration with welding speed.

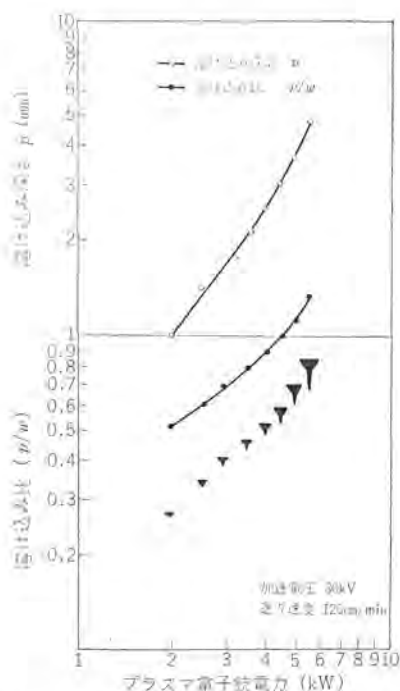


図 2.14 プラズマ電子銃電力と溶け込みの関係
Variation of penetration with output power of plasma electron beam gun.

送り速度にほとんど無関係で、試料の物理的性質と照射される電子ビームの電力密度によってきまると考えられる。

図 2.14 は、プラズマ電子銃電力と溶け込み比との関係を示している。電子銃電力の増加と共に溶け込みが急激に増大することがわかる。プラズマ電子銃の電力は陰極電流密度によって増減されているから、結局電子ビームの電力密度を増加させることが溶け込み比を増大させる手段となる。この試験に使用したプラズマ電子銃の電子ビーム放出孔の直径は 7.2 mm であるが、さらに小さい電子ビーム放出孔のウェネットを使用することによって、同じ電力における陰極電流

密度すなわち電力密度を高めることができ、したがってより大きい溶け込み比を得ることができる。

3. プラズマ電子ビームによる溶接

3.1 プラズマ電子ビーム溶接装置の構成と特長

図 3.1 は、プラズマ電子ビーム溶接装置の構成系統図である。プラズマ電子ビームを溶接に使用すると、従来の熱陰極電子銃を用いた電子ビーム溶接装置の特長をほとんど失なうことなく、さらにつぎのような特長を得ることができる。

- (1) 溶接作業室の真空度は、 10^{-2} Torr 程度の中真空である。
- (2) 真空排気装置はメカニカルブースタポンプを使用し、拡散ポンプを使用する必要がない。
- (3) 溶接作業室の排気時間が短い。
- (4) 電子銃の構造が簡単・堅固で、寿命が長く保守が容易である。
- (5) 電子ビームの集束状況が肉眼で観測でき、溶接条件の設定が容易である。

3.2 異種金属継手の溶接とその結果

開先、溶加物を用いることなく、異種金属の溶接が可能なのは、電子ビーム溶接の大きな特長の一つであるから、その一例として、SUH 33 と S 20 C を用いた異種金属継手の溶接を試み、溶接接合部の顕微鏡的組織検査と、機械的性質の試験として硬度分布試験・疲労試験・引張試験および衝撃試験を行なったので、その結果を紹介する。

3.2.1 溶接試験

(1) 継手の形状および寸法

図 3.2 は、溶接試験に用いた SUH 33 と S 20 C の異種金属継手の形状および寸法を示し、各種試験のための試験片採取方法を示している。試験片採取のために必要な溶け込み深さは 12 mm である。

(2) 溶接条件

図 3.2 に示す異種金属継手の溶接に用いた溶接条件はつぎのとおりである。

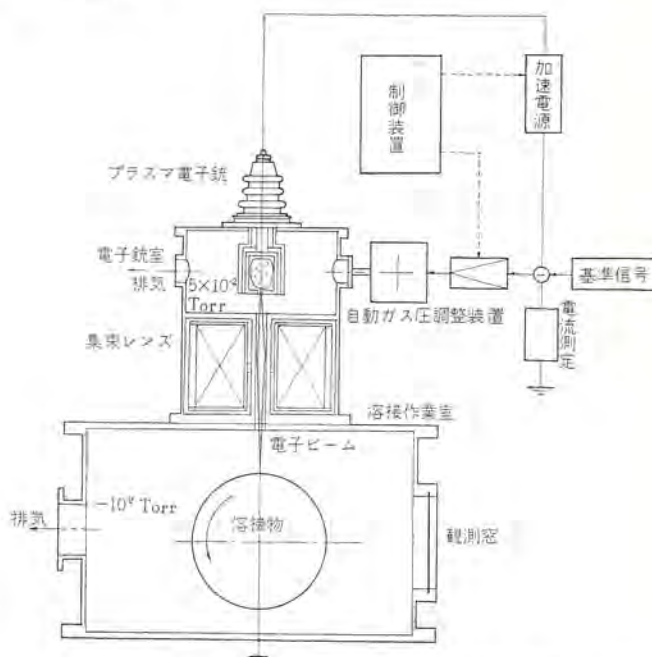


図 3.1 プラズマ電子ビーム溶接装置の構成系統
Schematic diagram of plasma electron beam welding apparatus.

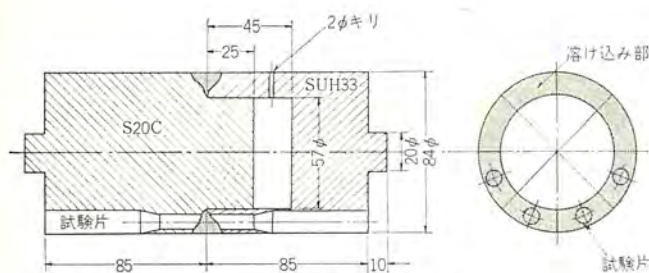


図 3.2 異種金属継手の形状
Shape of joint.



図 3.3 異種金属継手の溶接状況
Welding of joint.

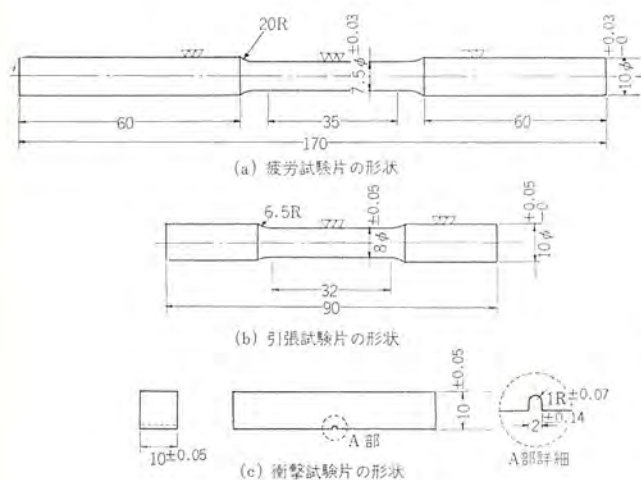


図 3.4 各種試験片の形状
Details of test pieces.

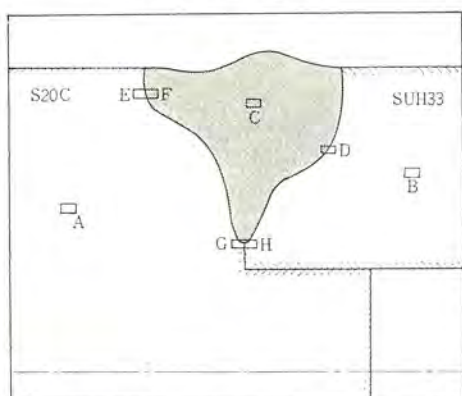


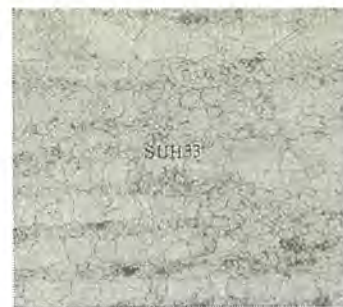
図 3.5 溶接部の断面と組織試験箇所
Cross section of welded area.

加速電圧	28 kV
陰極電流	0.32 A
溶接速度	100 mm/min
焦点距離	200 mm

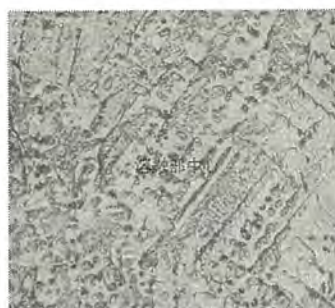
図 3.3 は、異種金属接手の溶接状況である。電子ビームは上方か



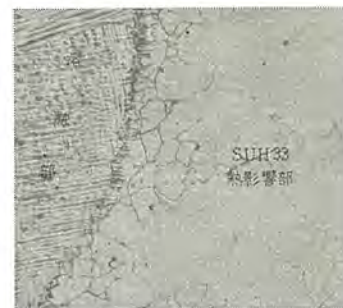
A



B



C



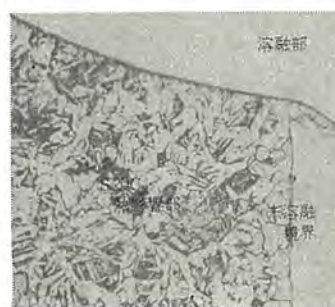
D



E



F



G



H

図 3.6 溶接部各所の顕微鏡組織写真 (×100)
Microstructure of welded area.

ら継手の接合部に照射され、中央の発光部が溶融点である。

(3) 試験片の採取

継手のプラズマ電子ビーム溶接完了後、熱処理をしない状態で各種試験に必要な試験片を採取した。各種試験片の形状および寸法を図 3.4 に示している。採取した試験片のうち、染色探傷および蛍光探傷により、肉眼的欠陥のあるものは除去した。

3.2.2 溶接部の組織検査

図 3.5 は、溶接を完了した SUH 33 と S 20 C の異種金属継手の断面で、溶け込みの図形と各部の検査箇所を示し、図 3.6 は、各個所の顕微鏡組織写真である。図 3.6 の A および B は、それぞれ熱影響を受けていない継手母材の組織で、A は S 20 C、B は SUH 33 である。C は溶融部中央の組織で、D は溶融部と SUH 33 の

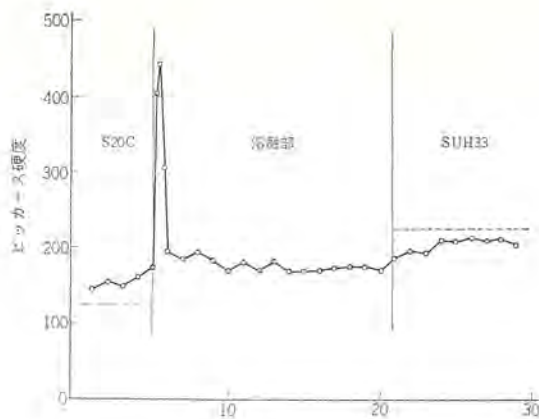


図 3.7 ビッカース硬度分布
Distribution of hardness.

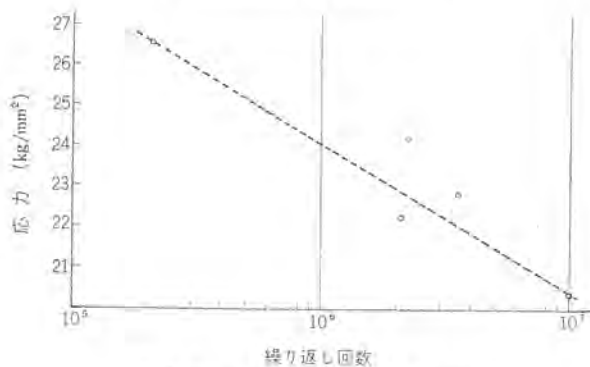


図 3.8 疲労試験結果の S-N 曲線
Fatigue S-N diagram.



図 3.9 引張り試験結果
Ruptured test pieces in tensile test.

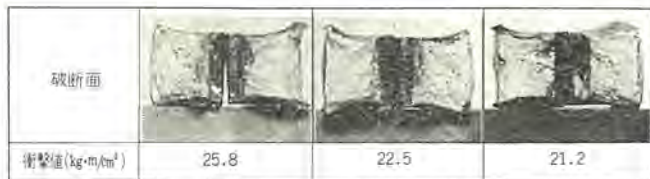


図 3.10 衝撃試験結果
Fractured test pieces in shock test.

熱影響部との境界付近の組織である。E および F は、S20C の熱影響部と溶融部との境界付近の組織である。E の腐食液は 5% Nital, F の腐食液は王水で、両写真に現われている境界は同じ個所である。G および F は、溶融個所底部の組織で、S20C の熱影響部、SUH33 の熱影響部、溶融部、未溶融境界を示している。G の腐食液は 5% Nital, F の腐食液は王水で、両写真に現われている未溶融境界は同じ個所である。これらの組織検査の結果、溶接部は健全な継手を与えていることがわかる。

3.2.3 溶接部の機械的強度試験

(1) 硬度分布検査

図 3.7 は、ビッカース硬度の分布測定結果である。溶融部と SUH

33 との境界層には硬さのピークはみられないが、溶融部と S20C との境界層の溶融金属側に異常に高いピークがみられる。しかしとくに切削性を害する程のものではない。

(2) 疲労試験

図 3.8 は、疲労試験の結果を示す S-N 曲線である。

試験機 クラウゼタイプ 高速回転曲げ疲労試験機

回転数 8,000~8,500 rpm

(3) 引張試験

図 3.9 は、引張り試験の結果を示している。写真の試片は、引張り試験完了後、溶融部を明瞭にするために 75°C HCl(+1) 中で 25 分間浸し(漬)腐食させている。破断はすべて継手母材の S20C で起っている。引張り試験の結果、溶融部もかなりの塑性変形能を有していることがわかった。

(4) 衝撃試験

図 3.10 は、衝撃試験の結果を示している。使用した試験機は、30 kg-m シャルピー 衝撃試験機である。試験の結果によれば、ぜい(脆)性破面にくらべて延性破面がかなり多く、溶融部の衝撃強度は、S20C の衝撃強度より高い値を示している。

以上の各種機械的強度の試験結果によれば、S20C と SUH33 による異種金属継手の溶接接合部は機械的にも満足すべき状態であった。

4. む す び

電子ビームを真空冶金分野で工業的に広く活用するために、新しい電子ビーム源として開発したプラズマ電子銃の原理および特性と、プラズマ電子銃の実用化試験の一環として実施した異種金属継手の溶接試験による溶接部の各種試験の結果を紹介した。プラズマ電子銃は開発されてから日が浅く、出力、電力効率、動作電圧、電流密度の限界や、ウェネルト電極の材質と寿命、プラズマ電子ビームの性質、電子ビーム軌道の初期条件、電子ビーム電流の制御性などの確認、ガスの種類による特性の相異、電極の形状および配置による特性の相異、ウェネルト電極の温度変化による特性の径時変化とその原因の確認など、試験すべき多くの問題が残っている。

しかし、プラズマ電子ビームによる異種金属継手の溶接部の各種試験の結果は、従来の電子ビーム溶接の結果と変わらないことを示し、プラズマ電子銃が、電子ビーム溶接機の電子ビーム源として実用できる見通しを得た。プラズマ電子ビーム溶接は、従来の電子ビーム溶接にくらべて、電子ビーム発生源である陰極部は大気汚染の影響を受けなから、高真空を必要とせず、陰極部の寿命が長いから、将来大物部品の量産工程に、清浄で確実な自動溶接法として、また高級部品や高級材料の補修および集埋めなどにも使用できよう。

最後にプラズマ電子銃の特性解明についてご指導を賜った大阪大学工学部・寺田正純教授、溶接試験および溶接結果の各種試験について、助言ならびに協力をいただいた中央研究所第三研究部および名古屋製作所製造管理部の関係諸氏に対し謝意を表わします。

参 考 文 献

- (1) L. H. Stuffer et. al : Electronics 35, 60 (1962)
- (2) K. L. Boring et. al : Proc. of Electron and Laser Beam Symposium 319 (1965)
- (3) C. M. Banas et. al : 9th Annual Symposium on Electron and Laser Beam Technology 42 (1967)
- (4) E. C. Muly et. al : First International Conf. on Electron and Ion Beam Science Technology 133 (1965)
- (5) T. R. Walsh : Plasma Physics 5, 17 (1962)

半 導 体 レーザ 装 置

中原 昭次郎*・長 能 宗 彦*

Semiconductor Laser Equipment

Kamakura Works Shojiro NAKAHARA・Munehiko NAGANO

Semiconductor laser have been gradually coming into practical use. Studies have been made on the performance of laser elements demanded for putting the equipment into practical operation and also on the present state of the elements. GaAs junction lasers in use by the Company are discussed as a center of the subject in this paper. Characteristics obtained with them are examined, and some applications are partially introduced. Reference to the possibility of their development into various field is also given.

1. ま え が き

半導体レーザは、1962年秋にアメリカで相次いで発表された GaAs 接合レーザの発振以来、数多くの研究が材料および応用について意欲的に進められている⁽¹⁾。レーザには半導体レーザのほか気体、固体および液体レーザがあり、すでに一般的によく知られている。その中にあって半導体レーザはあまり知られていないので、まず簡単に概略を紹介する。半導体レーザに使用される材料は III-V 族、II-VI 族化合物をはじめ単元素 (Te) におよんでおり、その発振波長も紫外 (3,240 Å) から遠赤外 (16 μ) にわたる各種が得られている。励起法には広く知られている p-n 接合ダイオードを作って電流励起を行なうほかに、電子ビームによる照射や光の照射による方法がある。

半導体レーザの特長は、発光の効率が高く、装置が小形で比較的大きな出力を得られることにある。接合レーザではとくに結晶の処理や素子製作の技術の進歩によって、動作特性、出力、寿命など実用に十分耐えるものが得られている。また、その発光機構や物理的性質も次第に明らかになりつつあり、素子の開発に伴って応用面もいろいろ開かれてきている⁽²⁾。代表的な応用面としては半導体レーザの特色が生かされた近距離でのレーザレーダ、簡易通信をあげることができるが、その他の方面にも逐次用いられるようになっていわれる。ここでは、半導体レーザのうちで最も代表的で実用性の高い GaAs 接合レーザの性質と応用例の 2, 3 について紹介する。

2. 半導体レーザの理論

半導体レーザは、半導体内における電子と正孔との再結合発光による誘導放出を利用している。発光エネルギー $h\nu$ は禁制帯のエネルギーギャップ E_g に近い値をとるが、電子準位構造が複雑で、それだけでは定まらず、同時にそれが半導体レーザの物理的性質を規定する大きな要因となっている。

レーザ発振の条件をみたすには発光効率が高いことが必要で、そのためにレーザの実現は音響量子を介せずに再結合を行なう直接遷移半導体に限られている。その場合、半導体のエネルギー帯構造とレーザ動作との関係については、半導体材料によって固有の問題があるので他の文献を参照願うこととして略すが、伝導帯および充満帯の準フェルミ準位を F_c , F_v とすると $h\nu < F_c - F_v$ の条件が一般に必要なことが導かれる。

半導体レーザの励起は、再結合する電子-正孔対を発生させることになるが、その方法は最初に述べた三つの方法が代表的である。

電子ビームおよび光を用いる方法は材料探しの研究用に主として用いられているのが現状で、それに対し、p-n 接合に順方向電流を流して少数キャリアを注入する最もよく知られた方法は、半導体レーザ独特の方法で、所要電圧が低く動作が簡単ならぬに効率が高く変調も容易にかけられる等の利点のほか、装置自身が小さいことも半導体レーザの特長をよく生かしている。表 2.1 に各種接合レーザを示す。表中丸印は当社でも発振に成功したレーザである。

さて、レーザの発振条件は発光による利得 g と半導体結晶自身が構成する共振器の損失 α とから、図 2.1 に示されるような長さ L の半導体レーザではその発振開始電流密度を J_t として次式で与えられる。

$$J_t = \frac{1}{\beta} \left(\alpha - \frac{L_n R}{L} \right) \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで、 β は利得 g と電流密度 J との関係を示す係数で、 $g = \beta J$ とおくことができる。 β については励起条件や結晶の製作および処理法によって大きく異なるものであるが、その詳細については、本誌⁽³⁾にすでに報告されているのでそれを参照願いたい。いずれにしても実用素子を得るうえで重要な要素である。

また、発振波長 λ は発振モードに関係し、共振器中の屈折率 n に

表 2.1 半 導 体 接 合 レーザ
p-n junction laser.

材 料 名	発 振 波 長 (温度)	備 考
○ Ga _{1-x} Al _x As	6,400 Å (77°K) 8,400 Å	300°K でも可 $0 \leq x \leq 0.39$
○ GaAs _{1-x} P _x	6,380 Å (77°K) 8,400 Å	300°K でも発振, CW 可 $0 \leq x < 0.5$
○ GaAs	8,450 Å (77°K) 9,000 Å	CW (200°K), 出力 CW 12 W (4.2°K)
○ InP	9,070 Å (77°K)	CW (20°K)
InP _x As _{1-x}	1.6 μ (77°K)	
In _x Ga _{1-x} As	1.77 μ 2.07 μ	磁場変調可
GaSb	1.60 μ	
InAs	3.15 μ (77°K)	CW (27°K), 磁場変調可
PbS	4.50 μ (10°K)	
InSb	5.20 μ (10°K)	CW (2°K), 磁場変調可
PbTe	6.50 μ (12°K)	
PbSe	8.50 μ (12°K)	
Pb _x Sn _{1-x} Se	10.20 μ (77°K)	$x=0.86 \sim 0.89$
Pb _x Sn _{1-x} Te	10.60 μ (77°K)	$x=0.81 \sim 0.86$

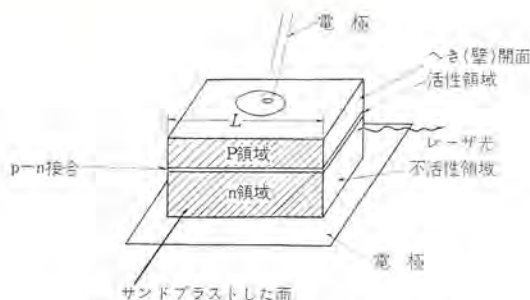


図 2.1 p-n 接合レーザの形状
Schematic drawing for a p-n junction laser.

よって自然数を $m(\geq 1)$ とすると $m\lambda = 2nL$, したがって、発振波長間隔 $\Delta\lambda$ は

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} = \frac{1}{2nL(1 - 2\ln n/2\lambda)} \quad (2.2)$$

で与えられる。動作温度や磁場あるいは圧力によっても波長は変化する。これは、エネルギーギャップなど電子帯構造や移動度あるいは屈折率が変化するためであって、その関係は、たとえば圧力 p の変化に対する波長の変化 $d\lambda/dp$ は次式で与えられる。

$$\frac{1}{\lambda} \left(\frac{d\lambda}{dp} \right) = \left\{ \frac{1}{L} \left(\frac{dL}{dp} \right) + \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right) \right\} \left\{ 1 - \frac{\lambda}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right) \right\}^{-1} \quad (2.3)$$

他の物理量の変化に対しても同様の式で表わされる。中でも影響の大きいのは温度であって、電子帯構造が変わり、波長の変化のほかに J_c の著しい変化がある。

3. 半導体レーザ装置

3.1 GaAs 接合レーザ

半導体レーザ装置にわれわれが用いているのは北伊丹製作所で製作された GaAs 接合レーザである。このレーザについて製法、性能を簡単に述べる。

製法には、拡散法と液相成長法とがあり、前者では n 形ウエハに Zn を拡散して p-n 接合を得、後者では p 形基板上へ n 形の結晶を成長させて得られるが、いずれの場合も得られた結晶に適当な熱処理をほどこすことによって良い特性を持ったレーザ素子になることが知られる。熱処理の効果はドーパされた不純物の再分布に関係しているといわれている。接合レーザの共振器を得る手段としては結晶のへき(壁)開面を利用しており、不要な面はサンドブラストしてフエリペロー形に構成している。その寸法は 0.3~1 mm (共振器長) × 0.1 mm (厚み) × 7.1~0.5 mm (幅) であって、その形状は図 2.1 に示すようなものである。この素子でこれまでに得られている発振開始電流密度の最小値は $L=1$ mm, 0.1 mm のときそれぞれ 3×10^3 A/cm², 1.0×10^3 A/cm² (77°K) および 2.5×10^4 A/cm², 4.5×10^4 A/cm² (300°K) である。装置に用いられるレーザ素子の特性の例を表 3.1 に示す。

半導体レーザでは残念ながら室温連続発振が得られていない。前に簡単に触れた半導体レーザの温度特性が主たる要因であって、現在その解決のための努力が行なわれている。連続発振の条件は、半導体レーザに流れる電流のために接合温度が上昇するが、その印加電流が接合温度における発振開始電流よりも小さいことでそれが直流電流について成立つことである。したがって素子中に発生する熱の放散が重要な問題点になるが、その条件の考察から連続発振可能なのは 200°K 程度とされる。また、得られる最大出力も同様な考察から導かれるが、本論文では省略する。

表 3.1 GaAs 接合レーザの特性
Characteristics of a GaAs p-n junction laser.

形 名	動作温度 (°K)	p-n 接合の積 (cm ²)	発振開始電 流 (A)	発振波長 (Å)	最大出力 (W)	ビーム角 (度)	最大ビー ク電流 (A)
ML-31 B	300	$1 \sim 5 \times 10^{-4}$	5~20	~9,000	>1	4~10	50
ML-66 B	77	$< 3 \times 10^{-4}$	<0.3	~8,500	~0.1	4~10	1

3.2 GaAs ザーレ特性

ここではレーザ装置として応用上考慮すべき点について、簡単な考察と測定例を述べる。

3.2.1 力出と時間応答性

接合レーザは時間応答性がよく、数十 n sec 程度の幅のパルス光を得るのは容易である。出力のピーク値も相当大きく、単一ダイオードで室温において 70 W を越えるものが報告されているし、77°K では 150 W が得られたといわれる。一方、多数のダイオードを一つのパッケージに組み込むことによって、室温で 50 W の製品の例のほかに、77°K で 380 W の報告がある。しかし、そのためにはいずれの場合も大電流高速パルス発生器が必要で、その開発が急がねばならない。また実用機のためにはある程度以上の繰返しも可能でなければならないが、われわれは、最大 40 A, パルス幅 60 n sec, 繰返し最大 10 kHz の簡易パルス発生器を試作、使用している。ただ、パルス繰返し周波数が高くなるとそのピーク値の若干の低下が見られるのは、熱的效果による当然の結果と考えられる。

また連続発振は応用上きわめて重要であるが、その動作温度は低く、通常は液体窒素温度にまで冷却しなくてはならず、その熱放散のための構造にも注意が払われねばならない⁽³⁾。

次に時間応答性であるが、一般には電子と正孔の再結合寿命時間で決まる。誘導放出状態では寿命時間の短縮効果によって非常に短くなり、たとえばパルス動作させた場合の立ち上がり時間は 0.1 n sec 以下で、駆動するための印加電流パルスや電気回路からほぼ定まってしまう。また、単一パルスを得るのに固定レーザのように Q スウィッチングを行なう必要もないし、気体レーザのようにアフターグローや立ち上りの遅れなどがない。ただ、ダイオードの製法によっては、電流印加から発光までに多少の遅れを伴うことがあるが、われわれのところでは用いているレーザ素子ではほとんどない。

以上からわかるように、周波数応答性がよいので、マイクロ波帯においても直接変調が可能であって、X バンドでの変調例が報告されているが、われわれもその変調特性を調べた結果、たとえば 2 GHz 帯における測定の一例を図 3.1 に示すように、変調感度もきわめて高く、かつ、dynamic range も 50 dB 以上とれるなど良好な特性を有することが明らかとなった。また、そのバイアス電流との関係から変調に最適なバイアス点があり、それらの特性はたとえば図 3.2 に示されるように、状態方程式を解いて得られた半導体レーザのマイクロ波帯における変調の共振に似た現象の裏付けを与えている。なお、この変調特性の研究から接合が一様に発光しない場合、変調度と関係のあることも明らかになった⁽⁴⁾。

3.2.2 発光パターンとスペクトル幅

p-n 接合レーザのビーム幅は、発光の開口の大きさに関係する。一般に活性領域の幅によって決まるのであるが、GaAs の場合は数 μ 程度であるため、接合に垂直な面内のビーム角は 20~30 度になる。接合面内のビーム角は発光が均一に行なわれておれば、接合の幅が 0.1 mm の場合理論どおり 1 度以下になるが、通常は 4~10 度程度

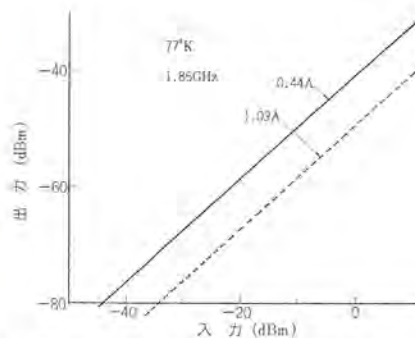


図 3.1 GaAs 接合レーザの変調特性 (1)
Modulation characteristics of a GaAs junction laser (1).

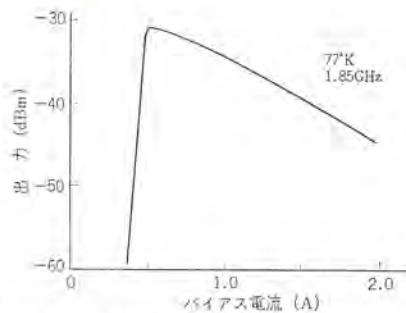


図 3.2 GaAs 接合レーザの変調特性 (2)
Modulation characteristics of a GaAs junction laser (2).

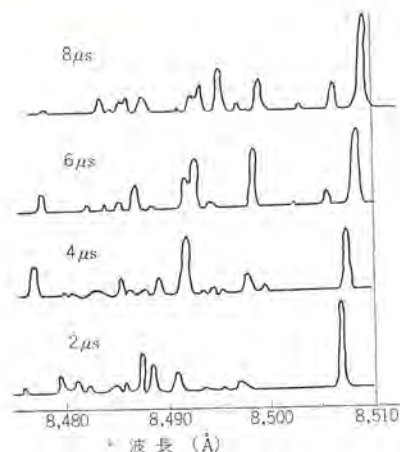


図 3.3 77°K におけるパルス電流励起のときの時間によるスペクトル変化の一例 (パルス幅 10 μs, 電流 1.6 A)

Example of time dependent spectral shift of a junction laser when excited by pulsed current at 77°K (pulse width 10 μs, current 1.6 A)

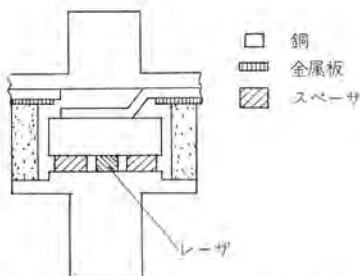


図 3.4 ピル形パッケージされた接合レーザの構造
Structure of a junction laser element in the pill package.



図 3.5 ピル形レーザ
Pill type lasers.

になり、10 度以上になることも珍らしくない。

その場合は、ニアフィールド、ファーフールドともに複雑な発光パターンを呈し、対称性を得ることが困難なばかりでなく、実用上も光学系との組合せで使用する際にも十分な考慮を払うことが必要である。ダイオードの製法のうち、とくに p 形部分の改善によって対称性のあるパターンを再現性よく得ることができるようになり、それによって単一モードの発振も可能になったといわれるが、この方面の研究も進められている。

スペクトル幅も発振モードに関して複雑であるが、詳しい測定結果によれば多モード発振のときでも、その一つ一つのスペクトル幅は 1 MHz 以下といわれる。ただし、パルス励起のときには発熱に起因するスペクトルの時間変化があり、測定値はもっと広がる。したがって全体としてはスペクトルが広くなり、コヒーレンスも悪くなっている。

図 3.3 は、われわれの用いているレーザ素子についての測定例の一つを示すものであるが、発熱に伴うスペクトルの変化やモードの移り変わりが生じていることを明確に示している。温度によるスペクトル変化 $d\lambda/dT$ は 77°K で 0.46 Å/deg で、これから逆に接合温度の上昇を測定できる。圧力の変化に対しても、2 章で述べたような変化があり、その大きさは 27 Å/kbar という報告があって、素子のパッケージおよび使用上で注意したほうがよいようである。

3.2.3 パッケージ

半導体レーザ素子自身は通常の半導体素子と同様にきわめて小さいので、実際に使う場合、電気回路への組込みと動作特性の向上のためにはどういったパッケージを行なうかが大変重要であることはいまでもない。パッケージの種類としては大別してトランジスタシステムにマウントする簡易形とピル形となる。われわれが用いているのは主とし

てピル形であって、その構造と外観とをそれぞれ図 3.4、3.5 に例示する。

このピル形は、連続発振可能なように熱放散に留意されており、またマイクロ波帯でも十分変調がかかるようマイクロ波回路に使用してもさしつかえない構造となっている。この副次効果として機械的に丈夫になり、光学的な collimation も容易になっている。図 3.5 の中の大きい素子は出力が大きくなるようになっているほか、より取扱いが容易となっている。

4. 半導体レーザ応用装置

われわれは半導体レーザの特性を調べるとともに、その応用装置を作ってその実用化を目指している。ここでは、一般的状況の紹介を行なうと同時に試作した装置について簡単に述べる。

レーザレーダはかなり早くから各方面で開発された分野であり、室温動作レーザを利用できることが大きな利点で、他のレーザ装置に比べて手軽であり、繰返しが高くとれるなどの特長を有する。しかしながら出力が小さいので短距離用、とくに 1 km 以内の距離測定に向いている。この応用方面としては、自動車衝突防止装置、航空機積載光レーダ、秘密レーダ、地図作成用装置などへの使用が考えられる。盲人用のレーザづえ(杖)は、出力は小さくても小形軽量で、取扱いが簡便であるという半導体レーザの特長をよくいかした特殊な応用例といえる。

図 4.1 は、われわれのところで試作した半導体レーザ応用装置の構成図である。この装置は、うえに述べたレーダとして使えるばかりでなく、適当な冷媒(たとえば液体窒素)で素子を冷却して連続発振を行なわせたり、これにマイクロ波変調を加えたりして動作特性を調べるとともに、次に述べる半導体レーザ通信への利用も考えら

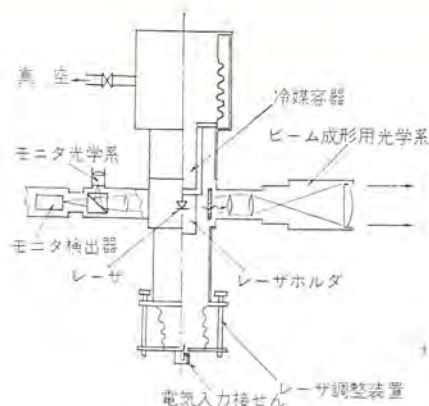


図 4.1 (a) 半導体レーザ装置送信部
(a) Transmitter of semiconductor laser apparatus.

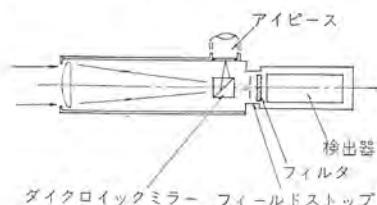


図 4.1 (b) 半導体レーザ装置受信部
(b) Receiver of semiconductor laser apparatus.



図 4.2 ビデオ帯域での直接光変調による画像伝送：
送信画像(右)と受信画像(左)
Picture transmission by direct modulation of light with
video band width: transmitted picture (right) and
received picture (left).



図 4.3 光多重通信装置送信部
Transmitter of the multiple signal light communication system.

れたはん用装置となっている。

短距離光通信パルス発振光はデータ伝送と音声信号伝送に用いられるが、連続発振ではマイクロ波を副搬送波とした広帯域通信ができる。半導体レーザを用いた 15 km 以内の短距離通信であればその見通しは明るい。ただし、高品質の通信のためには連続ないしは準連続動作が要求され、現在のところ室温動作では困難である。とくに、パ

ルス動作には高性能のパルス発生器の開発が要点となっている。われわれは、将来素子が連続発振を容易に行なえるようになったときに備えて、EL モードにおける動作であるが、半導体素子を用いた簡易光通信の実現のための条件や装置の検討を行なっている。

図 4.2 は、映像信号伝送を行なったときの送信画像および受信画像である。光検出器として光電子増倍管を用いているが、これは他のたとえば Si フォトダイオードなどの半導体光検出器に置換えるものである。伝送距離はわずか 14 m 程度までしか実験していないが、後述のように、もっと容易に数百 m 以上の伝送も可能であると考えられる。また、図 4.3 は短波の周波数帯域の副搬送波を 2 波使って、音声の多重伝送を行なうための装置のうちの送信装置の外観を示したものである。この装置を用いて伝送を行なった結果、音楽では高忠実度再生を行なうことができ、その実用性が確認された。伝送可能距離について簡単にふれることにする。

いま、光検出器の後段の増幅器への入力に所要信号対雑音比を S/N で表わし、素子からの出力光電力を P_d 、発光の広がり角を ϕ 、広がりによる仮想レンズの焦点距離を f 、素子の直径を d とし、ビーム成形用光学系の焦点距離を f' 、受信光学系の直径を D_r 、伝送損失を L 、信号の帯域幅と光信号の変調度をそれぞれ B 、 m とすれば、光検出器に流れる平均電流が I_{DC} のとき、伝送可能距離 R が、次式で与えられることは容易に導ける。

$$R = \frac{2f' \cdot D_r}{f} \cdot \left(\frac{f}{d} - \frac{1}{2} \cot \phi \right) \cdot \sqrt{\frac{P_d}{2(S/N) \cdot L} \cdot \frac{en}{h\nu} \cdot \frac{m}{eI_{DC} \cdot B}} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

式 (4.1) に、与えられた数値を代入すると、要求された伝送距離をみたすための各部分の所要特性を求めることができることは明らかであろう。

その他の応用装置、ならいなどの計測装置やレーザ CT などのレーザテレメータが作られており、無断進入警報装置を含めて自動化機器に光学系を採用する際に各種の応用面がある。また、狭い意味のオプトエレクトロニクス分野では、最終的には光計算機の実現を目指す光論理素子をはじめ、光結合アイソレータや光励起半導体スイッチ (LASS) も興味ある研究課題と考えられる。

5. む す び

以上、半導体レーザとその装置について性能、特長などの概況を述べた。素子の製作技術が進んでさらに良い性能をもった素子が安価に供給されることが今後の実用化の推進のために必要なことと思われるが、現段階ではなによりもまず、室温において連続発振すること、および素子の寿命などの信頼性が確立されることが急がねばならない。そのために研究すべき事柄は多いが、この方面で今後の発展を考えると、これは緊急の課題といわねばならないと考える。

参 考 文 献

- (1) たとえば、M. I. Nathan : Proc. IEEE, 54, 1,276 (1966)
- (2) 中原, 奥, 須崎, 長能 : 信学誌, 51, No. 4 (昭 43)
- (3) 奥, 須崎, 十河 : 三菱電機技報, 41, 1,469 (昭 42)
- (4) 中原, 長能 : 量子エレクトロニクス研究会資料 QE 67-12

絶縁体薄膜の膜厚と屈折率の非破壊測定法

中山 光雄*

Nondestructive Measurement of Thickness and Refractive Index of Insulating Films

Kitaitami Works Mitsuo NAKAYAMA

Ellipsometry and VAMFO are discussed for nondestructive measurement of the refractive index and thickness of insulating films used for the manufacture of semiconductor devices. In the analysis of the transparent multilayer film on an absorbing substrate, the ellipsometry was taken up. The process was then applied to the nondestructive measurement of each thickness of double layer films constructed from silicon nitride and silicon oxide on a silicon substrate. It was also applied to the structure determination of the silicon stain film, which was proved to be of double layers. The ellipsometry was found to be effective in the analysis of the multilayer structure. An improved VMFO apparatus and its application to the thickness measurement of photoresist films are dealt with.

1. ま え が き

最近の半導体工業における絶縁体薄膜の役割は、ますます大きくなってきている。これは、シリコン酸化膜を用いるプレーナ技術とホトレジスト膜を用いる写真製版技術の開発が、高性能トランジスタや集積回路の発展を促したことから容易に察せられる。

さらに、シリコン酸化膜は、単に製造の際の拡散マスクや素子の表面保護膜としてのみならず、その電気的特性を利用したMOS形素子の出現により、重要度をさらに増してきた。

ここでは、これら絶縁体薄膜の最も基礎的パラメータである膜厚と屈折率の非破壊測定法と、その応用について述べる。

半導体素子に使われている透明薄膜の最大厚さは、普通、数ミクロン(μ)までである。

特に数千オングストローム(\AA)以下の薄い膜の測定に対しては、偏光解析法が最も有効である。この方法は、非常に高感度で、単分子層の厚さに相当する膜の存在に対しても敏感であるという特長を持っているため、古くから表面膜の研究に利用されてきた。しかし、偏光解析器による測定値と膜厚・屈折率との関係が複雑なため、解析は近似式で行なわれ、測定範囲が限られていた。

しかし最近では電子計算機の使用による正確な理論式の数値計算が可能となって、この制約は取り除かれた。この例として、シリコン上の単層薄膜に対するR. J. Archerの仕事⁽¹⁾が、よく知られている。

これらの仕事は単層膜を仮定しているが、現実の膜は、しばしばさらに複雑な構造をとる場合がある。そこで、多層膜の偏光解析法を検討し、新しい絶縁体薄膜として注目されているシリコン酸化膜とシリコン窒化膜よりなる二層膜の各層膜厚の非破壊測定法に応用してみた。また、ジャンクション保護膜として、すぐれた特色を持つ低温成長シリコンステイン酸化膜の偏光解析法による測定結果が、二層構造で説明できることを示した。

数千 \AA 以上の厚い膜の膜厚の非破壊測定は、普通、光の膜による干渉を用いて測定するが、この干渉は、光の入射角度を変えても、光の波長を変えても観測できる。前者を利用する方法として、いわゆるVAMFO法⁽²⁾が、また後者については分光器法が知られてい

注) : Variable Angle Monochromatic Fringe Observation の略

る。

分光器法に比べて、VAMFO法⁽²⁾は装置が比較的簡単であるという特長がある。ここでは、一部自動化したVAMFO装置と、これをホトレジスト膜に応用した結果を示す。

2. 偏光解析法

2.1 原理

透明な薄膜でおおわれている不透明下地上での光の入射・反射の問題を扱う偏光解析法では、入射および反射単色光線を、入射面(反射面でも同じ)に平行に振動する電場ベクトルを持つ平面波(P 成分)と、入射面に垂直に振動する電場ベクトルを持つ平面波(S 成分)との二成分に分けて考える。この場合、もとの光は、 P 成分と S 成分のベクトル光の合成で表わされ、その軌跡は、一般にだ円となるのでだ円偏光と呼ばれている(図2.1)。

またこのだ円偏光の形状は、光の P 成分と S 成分との間の振幅比と位相差によって決まる。

一般に、光の P 成分と S 成分とでは反射の際の振幅反射率が異なるので、両成分の合成によって得られる入射光と反射光とでは偏光の状態が異なってくる。

光の電場ベクトル E は、振幅を $|E|$ 、位相を τ で表わすと、次のように書ける。

$$E = |E| \exp(i\tau) \dots\dots\dots (2.1)$$

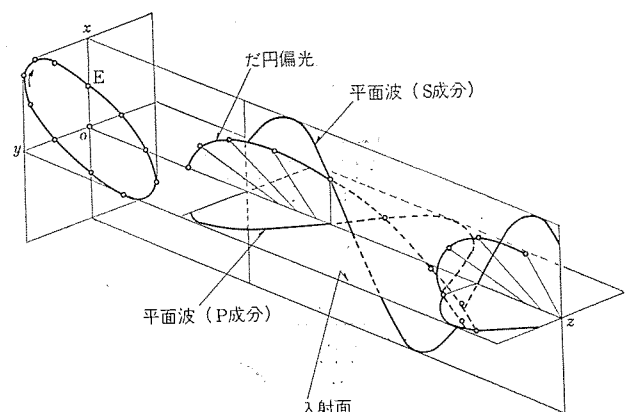


図2.1 だ円偏光の説明(土井⁽³⁾)
Schematic illustration of elliptically polarized light.

この電場ベクトルを用いると、反射の際の偏光状態の変化は、次のように定義できる。

$$\text{偏光状態の変化} = \frac{\left(\frac{E_P}{E_S}\right)_{REFL}}{\left(\frac{E_P}{E_S}\right)_{INC}} \quad (2.2)$$

式(2.2)に式(2.1)を入れ変形すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\left(\frac{E_P}{E_S}\right)_{REFL}}{\left(\frac{E_P}{E_S}\right)_{INC}} &= \frac{\left[\frac{|E_P|}{|E_S|} \exp\{i(\tau_P - \tau_S)\}\right]_{REFL}}{\left[\frac{|E_P|}{|E_S|} \exp\{i(\tau_P - \tau_S)\}\right]_{INC}} \\ &= \frac{\left(\frac{|E_P|}{|E_S|}\right)_{REFL}}{\left(\frac{|E_P|}{|E_S|}\right)_{INC}} \cdot \exp[i\{(\tau_P - \tau_S)_{REFL} - (\tau_P - \tau_S)_{INC}\}] \\ &= \tan(\Psi) \cdot \exp(i\Delta) \quad (2.3) \end{aligned}$$

このように、反射の際の偏光状態の変化は、 Δ (度)と Ψ (度)で表わされるが、この Δ を反射の際の位相差、 Ψ を振幅反射率比と呼ぶ。

この Δ , Ψ は、偏光解析器により測定することが可能である。

また光の P および S 成分の振幅反射率 R_P , R_S と、偏光状態の変化の定義式、式(2.2)の間の関係は、次のとおりである。

$$\begin{aligned} \frac{\left(\frac{E_P}{E_S}\right)_{REFL}}{\left(\frac{E_P}{E_S}\right)_{INC}} &= \frac{\left(\frac{E_{REFL}}{E_{INC}}\right)_P}{\left(\frac{E_{REFL}}{E_{INC}}\right)_S} \\ &= \frac{R_P}{R_S} \quad (2.4) \end{aligned}$$

したがって、偏光解析器測定値 Δ , Ψ と振幅反射率 R_P , R_S との間の関係は、式(2.3), (2.4)から次式で与えられる。

$$\frac{R_P}{R_S} = \tan(\Psi) \cdot \exp(i\Delta) \quad (2.5)$$

表面膜が、図2.2に示す多層構造で構成されている場合、光の P および S 成分に対して、各層内での繰返し多重反射を考慮すると、第 k 面での振幅反射率 $R_{k,0}(\nu)$ は、次式で与えられる⁽⁴⁾。

$$\begin{aligned} R_{k,0}(\nu) &= \frac{R_{k,k-1}(\nu) + R_{k-1,0}(\nu) \cdot \exp(-2i\delta_{k-1})}{1 + R_{k,k-1}(\nu) \cdot R_{k-1,0}(\nu) \cdot \exp(-2i\delta_{k-1})} \quad (2.6) \\ (\nu &= P, S) \\ (k &= 1, 2, 3, \dots) \end{aligned}$$

ただし、 δ_{k-1} は、波長 λ の光の第 $(k-1)$ 層内の光路程で、この層の屈折率を n_{k-1} 、膜厚を d_{k-1} 、屈折角を θ_{k-1} とすれば、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \delta_{k-1} &= \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) n_{k-1} \cdot d_{k-1} \cdot \cos \theta_{k-1} \quad (2.7) \\ (\text{ただし、} d_0 &= 0) \end{aligned}$$

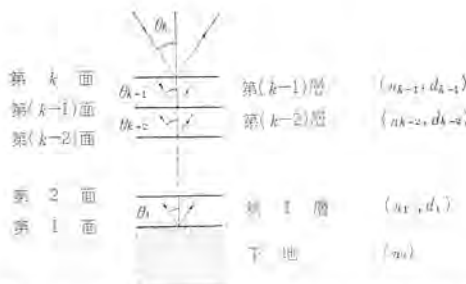


図2.2 多層膜における光の反射と屈折
Reflection and refraction of light in a multilayer film.

式(2.6)中の $R_{k,k-1}$ は界面 $(k-1)$ に関するフレネル係数であり、 P および S 成分に対して、おのおの次式で与えられる。

$$R_{k,k-1}(P) = \frac{n_{k-1} \cos \theta_k - n_k \cos \theta_{k-1}}{n_{k-1} \cos \theta_k + n_k \cos \theta_{k-1}} \quad (2.8)$$

$$R_{k,k-1}(S) = \frac{n_k \cos \theta_k - n_{k-1} \cos \theta_{k-1}}{n_k \cos \theta_k + n_{k-1} \cos \theta_{k-1}} \quad (2.9)$$

なお、スネルの法則を用いれば、第 k 面に関する屈折角 θ_{k-1} は、同じ k 面への入射角 θ_k を用いて、次式のごとく表わすることができる。

$$n_{k-1} \sin \theta_{k-1} = n_k \sin \theta_k \quad (2.10)$$

以上式(2.6)~(2.10)より、第 k 面での振幅反射率 $R_{k,0}(\nu)$ が、光の波長 λ と、第 k 面への入射角度 θ_k 、各層の屈折率 n_{k-1} 、膜厚 d_{k-1} で表わされることがわかる。

多層膜に対する偏光解析測定値 Δ , Ψ と各層の屈折率・膜厚との関係は、うえで求めた $R_{k,0}(\nu)$ を媒介とすると次式で表わされる。

$$\Delta = f_k(d_{k-1}, \dots, d_1, n_k, \dots, n_0, \lambda, \theta_k) \quad (2.11)$$

$$\Psi = g_k(d_{k-1}, \dots, d_1, n_k, \dots, n_0, \lambda, \theta_k) \quad (2.12)$$

今、大気中測定を考えると $n_k=1$ であり、測定光の波長 λ 、入射角 θ_k 、および下地の屈折率（複素屈折率） n_0 が与えられる場合、上式左辺の2個の測定値 Δ , Ψ に対して、右辺の未知数は、膜が透明の場合 $2(k-1)$ 個になる。したがって、少なくとも $2(k-2)$ 個は既知の値でなければならない。

2.2 単層膜

これは $k=2$ の場合で、膜が透明な場合（屈折率が実数）、未知数は d_1 , n_1 の2個であるため、測定値 Δ , Ψ から d_1 , n_1 とも決定できる。しかし、式(2.11)と(2.12)の複素数を含む連立方程式を解くことはたいへんなので、あらかじめ、 d_1 （または、 δ_1 ）、 n_1 に種々の値を与えて、それに対する Δ , Ψ を計算し、結果を図表化しておく。実際に Δ , Ψ から d_1 , n_1 を求める場合、この図表（ Δ - Ψ 図表）を利用する。

図2.3は、シリコン下地上の、透明均質単層膜の膜厚 d 、屈折率

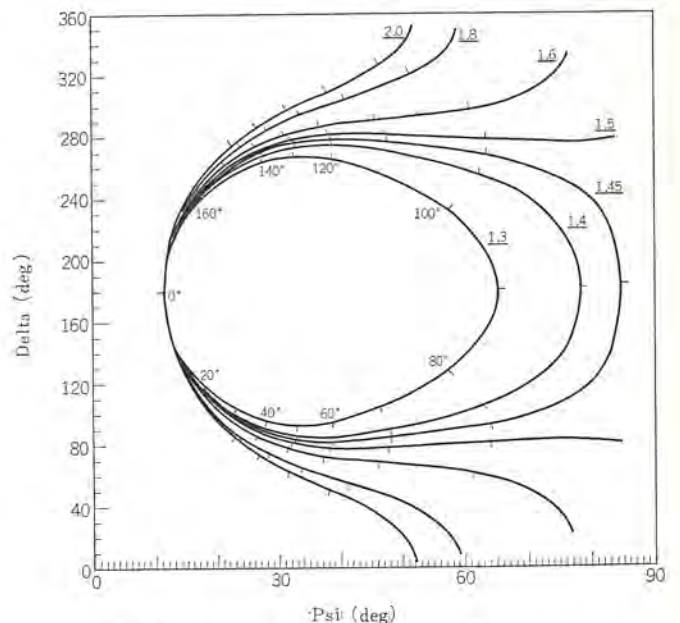


図2.3 透明単層膜の Δ - Ψ 図表（下地：シリコン）
 Δ - Ψ chart for transparent monolayer films on a silicon substrate.

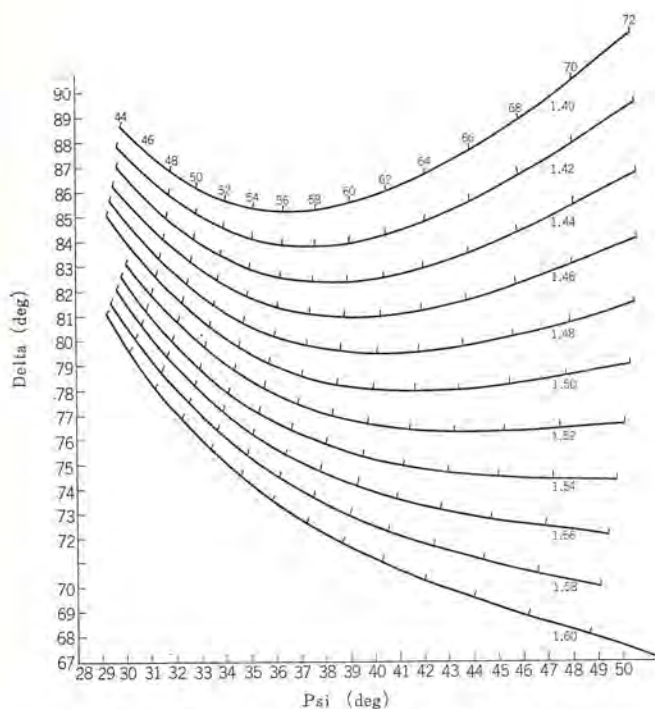


図 2.4 透明単層膜の Δ - Ψ 図表 (図 2.3 の一部)
 Δ - Ψ chart for transparent monolayer films on a silicon substrate (a part Fig. 2.3)

n 決定用の Δ - Ψ 図表である。膜厚 $d(\text{\AA})$ の代わりに、光路程 $\delta(0)$ を使用し、また種々の屈折率 n に対する曲線を示しているが、屈折率一定の 1 本の曲線に対しては、膜厚がふえると δ も $0 \sim 180^\circ$ まで増加する。 δ が 180° に相当する膜厚以上では、この曲線上の第何周期めであるかということを知らずに、膜厚を決めることはできない。偏光解析器の測定値 Δ, Ψ は、 0.1° 以上の精度を持っているのが普通であるため、図 2.3 よりも、実際には、もっと拡大した図表 (図 2.4) を用いて、膜厚 d 、屈折 n を高精度に読みとることができる。

なお、上図の作成に用いた諸数値は次のとおりである。

$$\lambda = 5,461 (\text{\AA})$$

$$\text{入射角 } \theta_s = 70.0 (\text{度})$$

$$\text{シリコンの屈折率 } n_0 = 4.050 - 0.028i$$

2.3 二層膜

これは $k=3$ の場合である。膜の各層が透明な場合、未知数は第一層の d_1, n_1 と第二層の d_2, n_2 の 4 個であるが、 Δ, Ψ の測定からは、この内の 2 個しか決定できない。そこで、実用的な見地から、各層の物質がわかっている場合、つまり第一層と第二層の屈折率 n_1, n_2 が既知の場合、各層の膜厚 d_1, d_2 を非破壊的に決める方法と、第一層の屈折率 n_1 と膜厚 d_1 がわかっていて第二層の n_2, d_2 を決める方法とを採り上げ検討してみた。

前者に対しては、下地シリコン上に成長させた、シリコン酸化膜+シリコン窒化膜の二層構造を用い⁽⁹⁾、後者に対してはシリコンステイン酸化膜⁽⁹⁾を用いて理論と実験の対応を調べた。

なお、測定に使用した偏光解析器の光学系を図 2.5 に示す。反射の際の位相差 Δ と振幅反射率比 Ψ の測定は検光器を通過する光量を極小にする消光法を用いた。

2.3.1 シリコン酸化膜+シリコン窒化膜

絶縁膜として知られているシリコン酸化膜とシリコン窒化膜とでは、シリコンに対する界面準位の数は、前者のほうが少ないので、電気的

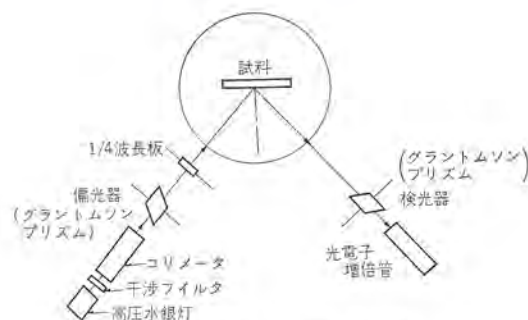
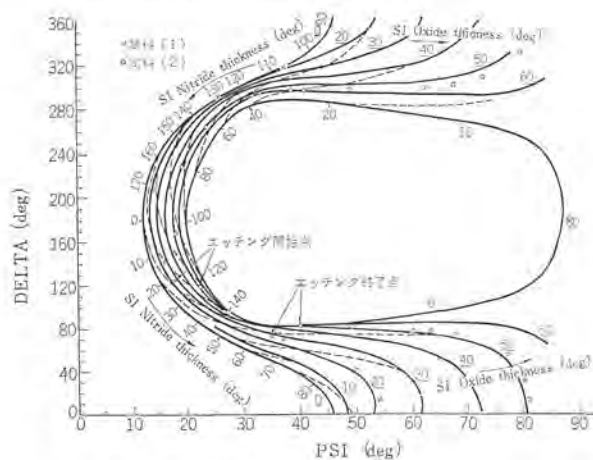


図 2.5 偏光解析器
 Schematic representation of the ellipsometer.



Substrate : Silicon
 1st layer : Silicon oxide ($n_1=1.45$)
 2nd layer : Silicon nitride ($n_2=2.00$)

図 2.6 透明二層膜の Δ - Ψ 図表
 Δ - Ψ chart for transparent double layer films.

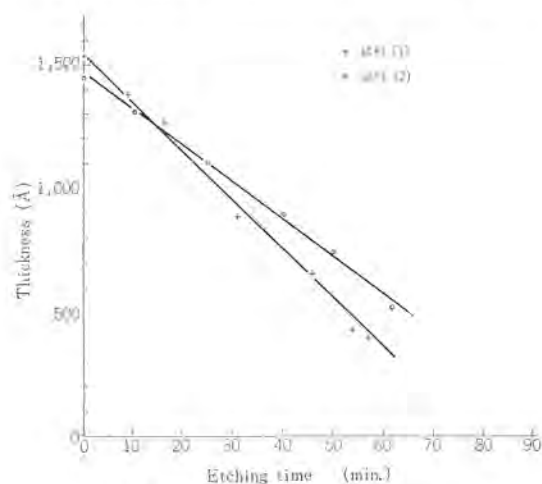


図 2.7 シリコン窒化膜のエッチング速度
 Etching rate for silicon nitride films.

特性の点ではシリコン酸化膜のほうがすぐれている。しかし、外部からのアルカリイオン等による膜の汚染に関しては、シリコン窒化膜のほうがすぐれているといえよう。そこで半導体素子の表面保護膜として、まずシリコン上にシリコン酸化膜をつけ、さらにその上をシリコン窒化膜でおおい両者の長を生かした二層膜を利用する試みが行なわれている。

この膜のように、第一・第二層の屈折率が既知で、その界面が明確な場合は、前述の理論の検討に最適と思われるし、また各層膜厚が非破壊的に測定できれば有益である。

実際、シリコンを下地として、第一層に屈折率 $n_1=1.45$ のシリコン

酸化膜、第二層に屈折率 $n_2=2.00$ のシリコン窒化膜がある場合の Δ , ψ を、膜厚の代わりに各層の光路程 δ_1 , δ_2 をそれぞれ変化させて計算してみると、図 2.6 に示す曲線群が得られた。

なお、使用した諸数値は次のとおり。

$$\begin{aligned}\lambda &= 5,461 \text{ (Å)} \\ \theta_0 &= 70.0 \text{ (度)} \\ n_0 &= 4.050 - 0.028i \\ n_1 &= 1.45 \\ n_2 &= 2.00\end{aligned}$$

この図に示した δ_1 の範囲は、 $0 \sim 80^\circ$ までである。さらに大きな δ_1 の値 (最大 180°) に対する曲線群は、 $\Delta \approx 180^\circ$ を軸にして、図 2.5 とほぼ線対称形をとる。したがって、測定できる第一層の最大厚さは、単層膜の場合に比べて半減する。

なお、第二層の δ_2 は $0 \sim 180^\circ$ までである。

各層の膜厚 d_1 , d_2 (Å) と、上記の光路程 δ_1 , δ_2 (度) との関係は次のとおりである。

$$\begin{aligned}d_1 &= 13.75 \times \delta_1 \dots\dots\dots (2.13) \\ d_2 &= 8.60 \times \delta_2 \dots\dots\dots (2.14)\end{aligned}$$

次に、実際の試料を用いて行なった実験の結果を示す。

試料の作成は、光学的に平坦なシリコンウェハー上に、熱酸化法によってシリコン酸化膜 ($n_1=1.45$) を作り、偏光解析器による膜厚測定とエッチングを繰り返して所要の厚さに調整した。

さらにこのうえに、熱分解法によるシリコン窒化膜 ($n_2=2.00 \pm 0.02$) を約 $1,500 \text{ Å}$ 積み上げた。(キャリアガスは H_2 ガスで、 SiH_4 ガスと NH_3 ガスを約 950°C で反応させて作成した。)

このようにして作成した二層膜試料で、偏光解析器による Δ , ψ 測定と、エッチング液によるシリコン窒化膜のステップエッチとを繰返して、その結果を図 2.6 に示す。

測定点は、いずれも、第一層のシリコン酸化膜厚一定の理論曲線上を変化している。また、この結果を用いて、図 2.7 に示すエッチング曲線が得られた。なお用いたエッチング液の組成は、(40% NH_4F : 50% HF = 10 : 3) である。シリコン窒化膜に対するエッチング速度として、試料(1)では $15(\text{Å}/\text{分})$ 、試料(2)では $20(\text{Å}/\text{分})$ という値を得た。なお、このエッチング速度の違いは、成長条件の変動によるものと思われる。

なお、

- 試料(1) : 第一層 (シリコン酸化膜) 膜厚 = $290(\text{Å})$
第二層 (シリコン窒化膜) 膜厚 = $1,530(\text{Å})$
下地 シリコン
- 試料(2) : 第一層 (シリコン酸化膜) 膜厚 = $740(\text{Å})$
第二層 (シリコン窒化膜) 膜厚 = $1,410(\text{Å})$
下地 シリコン

2.3.2 シリコンスティン酸化膜

高温熱酸化法によって得られたシリコン酸化膜は、シリコン表面をN形にするため、高耐圧素子のP-N接合保護膜として用いると、静特性の劣化、逆耐圧の低下を示し不適当である。これに対して、(HF- NO_2) 混合ガスにさらして作ったシリコンスティン膜 (Silicon stain film) を、低温で酸化したシリコンスティン酸化膜は、この種の表面保護膜としてはきわめてすぐれていることが知られている。しかしシリコンスティン酸化膜は、シリコン酸化膜に比べて、エッチング速度が非常に大きく、膜の構造についてはまたよく知られていない。そこで、シリコンスティン酸化膜の偏光解析器による Δ , ψ 測定と、ステップエッチ

とを繰返して得られた結果を反射電子線回折結果と対照させて膜の構造を調べた。

試料は、(111) 面のN形シリコン (比抵抗 $20 \Omega\text{-cm}$) を鏡面仕上げ後、数ミクロン (μ) 化学エッチし、直ちに O_2 ガスをキャリアガスとした (HF- NO_2) 混合ガス中で、数十秒スティン処理を行ない、その後、恒温そう (ふんい気は空気) の中で熱処理を行なった。

図 2.8 は、 225°C 24 時間熱処理して得られたシリコンスティン酸化膜の 0.1 Mol HF 溶液によるエッチングと、偏光解析器による測定を繰返して得られた結果である。

同じ図中に、単層膜の理論曲線も示してあるが、膜厚が薄いときは熱酸化シリコン酸化膜の屈折率 $n=1.45$ と同じ曲線上にあり、膜厚が増すにつれて、見かけ上低屈折率側にずれてくる。また、0.1 Mol HF 溶液によるエッチング速度は、熱酸化シリコン酸化膜では $0.1(\text{Å}/\text{秒})$ であり、このシリコンスティン酸化膜の第一層では $1(\text{Å}/\text{秒})$ 、第二層では数十 ($\text{Å}/\text{秒}$) 以上であった。

以上の事実から、シリコンスティン酸化膜は単層でなく、二層またはそれ以上の多層膜であると考えられる。

そこで、図 2.8 より、下地から約 $650(\text{Å})$ 付近までの測定点が

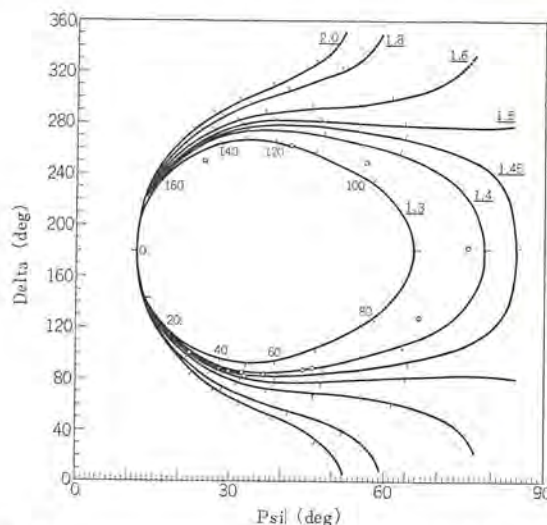


図 2.8 シリコンスティン酸化膜のステップエッチによる Δ , ψ の変化と単層膜の理論曲線との比較
Comparison between the observed values of Δ , ψ by step etching of silicon stain films and theoretical curves for monolayer films.

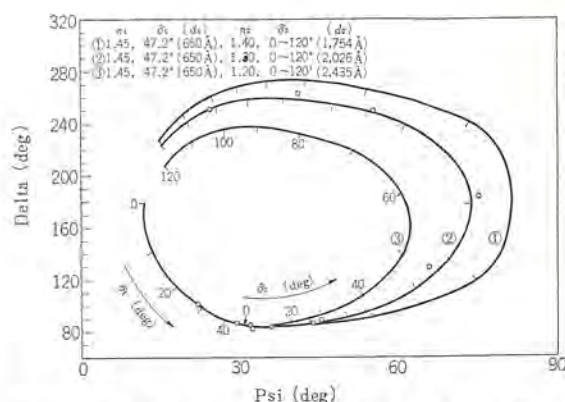


図 2.9 シリコンスティン酸化膜のステップエッチによる Δ , ψ の変化と二層膜の理論曲線との比較
Comparison between the observed values of Δ , ψ by step etching of silicon stain films and theoretical curves for double layer films.

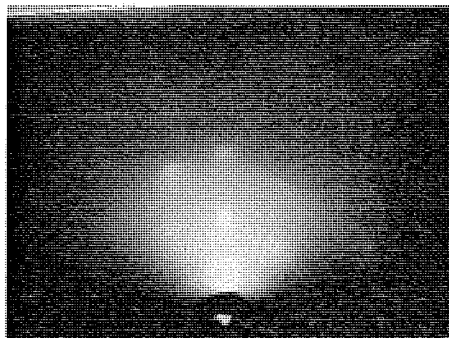


図 2. 10 シリコン ステイン 酸化膜表面の反射電子回折像
Reflective electron diffraction pattern of silicon stain film surface.

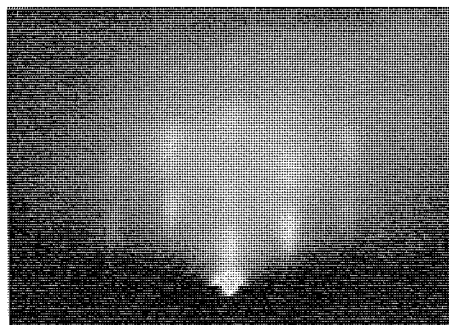


図 2. 11 シリコン ステイン 酸化膜の第二層の反射電子回折像
Reflective electron diffraction pattern of the 2nd layer of silicon stain film (225°C 24 h heat treated in air).

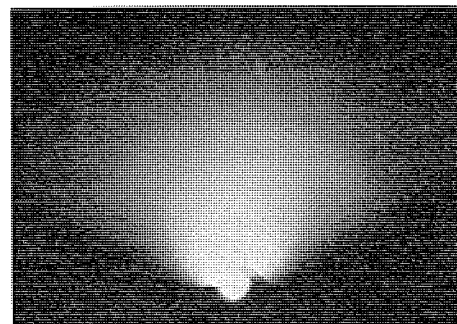


図 2. 12 シリコン ステイン 酸化膜の第一層の反射電子回折像
Reflective electron diffraction pattern of the 1st layer of silicon stain film (225°C 24 h heat treated in air).

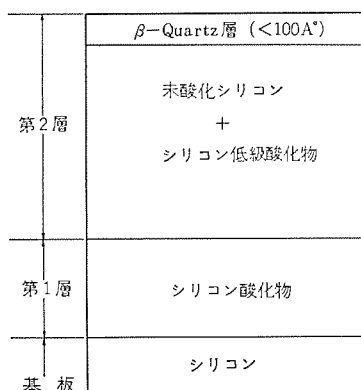


図 2. 13 シリコン ステイン 酸化膜の構造のモデル
Model of the structure of the silicon stain film.
(225°C 24 h heat treated in air).

単層膜に対する $n_1=1.45$ の曲線上にあることに着目して、これまでを第一層膜と考え、さらにそのうえに屈折率膜厚未知の第二層が存在すると仮定し、二層膜によるシリコン ステイン 膜の構造解析を試みた。

図 2. 9 に、次の条件のもとで計算した、二層膜の理論曲線を示す。

$$\begin{aligned}\lambda &= 5,461 \text{ (Å)} \\ \theta_3 &= 70.0 \text{ (度)} \\ n_0 &= 4.050 - 0.028i \text{ (シリコン)} \\ n_1 &= 1.45 \text{ (シリコン 酸化膜と同じ)} \\ d_1 &= 650 \text{ (Å)} \\ n_2 &= 1.20 \sim 1.45\end{aligned}$$

測定点がほぼ $n_2=1.30$ の曲線上にあることから、このシリコン ステイン 膜の第二層の屈折率が約 1.3 であると推定できる。

次に、以上の偏光解析法による測定結果をさらに確認するために反射電子線による観察を行なった。以下にその結果を示す。

試料はいずれも大気中で 225°C 24 時間加熱してある。

図 2. 10 は試料表面の反射電子回折像である。かなりのひずみの存在を示すシリコンの Broad spot と、 β -Quartz と思われる回折環がわずかに認められる。

図 2. 11 は先の偏光解析測定により第二層と考えられる部分の回折像であり、シリコンの Broad spot が見られるが、 β -Quartz を示す回折環はほとんど消失している。またこれと別に、透過電子線観察の結果、この部分がシリコンの低級酸化物と思われる非晶質物質

に囲まれた直径数百(Å)のかたまりで構成されていて、さらにこのかたまりは方位がそろった外径が数十(Å)程度の未酸化シリコン粒で構成されていることがわかった。これらがこの部分の異常に早いエッチング速度や低い屈折率の原因となっているものと思われる。

図 2. 12 は第一層と考えられる部分の反射電子回折像である。先きの場合と異なり、通常の熱酸化シリコン酸化膜で見られると同様な Amorphous pattern が認められる。また、シリコンの Broad spot は全く消失している。

以上の電子線観察による結果もこの膜が二層構造を形成していることを示しており、偏光解析法による結果と一致することがわかった。

図 2. 13 に、以上の観察結果から予想されるシリコン ステイン 酸化膜の構造図を示す。

赤外吸収の測定結果からも、熱処理前にはシリコン酸化膜の存在は認められないが、熱処理することにより下地近傍からシリコン酸化膜が生成することは、膜の生成機構上大変興味深い現象といえよう。

3. 厚膜の非破壊測定法

これまでに述べたとおり偏光解析法は、非破壊的で、高感度というすぐれた特長を持っているが、測定しうる最大の膜厚は、数千 Å までという制約があるため、1 μm もあるシリコン酸化膜やホトレジスト膜の厚さ測定には適しない。膜厚が数千 Å から数 μm までであるような透明絶縁体薄膜の膜厚および屈折率の非破壊測定法として、いわゆる VAMFO 法 (Variable Angle Monochromatic Fringe Observation 法の略) が知られている⁽²⁾。この方法は単色光の膜による干渉効果を利用しているが、同じ効果を利用する分光器法に比べて、屈折率が求まり、装置も比較的簡単であるという特長を持っている。しかし従来知られている VAMFO 法は裸眼測定のため、再現性・感度・容易さの点で問題があったので、モータ駆動ゴニオメータと光検出器を用いて装置を自動化した。これを用いて従来測定がむずかしかったホトレジストの膜厚測定を行なった結果を示す。

3. 1 測定原理

不透明下地にある屈折率 n 、膜厚 d の透明単層膜上に、上方から波長 λ の単色光を入射させた場合、光は膜表面での反射光と、膜と下地の境界面からの反射光に分かれる。

膜よりも、下地の屈折率が大きく、膜内での多重反射を無視すると、反射光による光の干渉は次式に従う。

$$N\lambda = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} \dots\dots\dots (3.1)$$

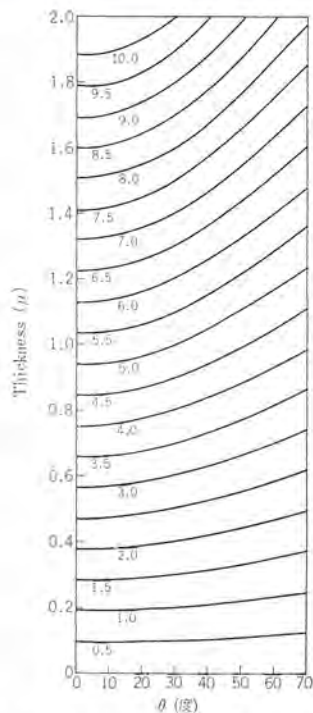


図 3.1 VAMFO 法で使う膜厚測定図表
Chart for the measurement of film thickness by VAMFO.

ただし、 N は干渉の次数で、 $N=1.0, 2.0, 3.0, \dots$ の場合、干渉光の明るさは極大となる。また、 $N=0.5, 1.5, 2.5, \dots$ の場合、干渉光の明るさは極小となる。

ここでは波長 λ を一定にし、入射角度を変えて、干渉光が極大または極小を示す角度を測定するが、式 (3.1) より屈折率 n の薄膜に対して膜厚 d が変わると、干渉角度 θ とその干渉の次数 N も変化することがわかる。そこであらかじめ、式 (3.1) に基づいて d, N, θ 間の関係を屈折率 n に対して計算し、図 3.1 のように図表化（曲線に付けた数字は干渉の次数 N を示す）しておく。この図表より逆に未知の膜厚 d は、干渉角度 θ の測定から求めることができる。なお、この図表は当社中央研究所にある電子計算機とプロッタを用いて作成した。

膜の屈折率 n は異なる波長 λ_1, λ_2 を用いて、干渉角度 θ_1, θ_2 とその干渉の次数 N_1, N_2 を測定すると、次式から波長 λ_1 に対する膜の屈折率 n_1 が求まる。

$$n_1 = \left[\frac{F \sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1}{F-1} \right]^{1/2} - \frac{F\delta}{F-1} \dots \dots \dots (3.2)$$

ただし $F = (N_1 \lambda_1 / N_2 \lambda_2)^2$

$$\delta = n_2 - n_1$$

なお、 δ は普通非常に小さいので無視でき、また膜が薄い場合の干渉の次数は $N_1 = N_2$ となる。

3.2 装置

装置の概略を図 3.2 に示す。図中で、光源を出た白色光をスリットとレンズを通して平行光線にして、試料上に入射させる。反射光はレンズ、干渉フィルター、スリットを通して光検知器上に集光させる。これらの光学系は、光源側がゴニオメータの固定腕上に置かれ、光検知器側は定速度で回転している腕上に置かれている。また試料部は検知器の回転速度のちょうど半分（半速）で回転するようになっている。{($\theta - 2\phi$) 回転 ゴニオメータ} 光検知器の出力は、ゴニオメータの回転に同期した時間送り記録計上に描かせる。記録紙上の波形の極大、極小点より干渉角度を読みとる。

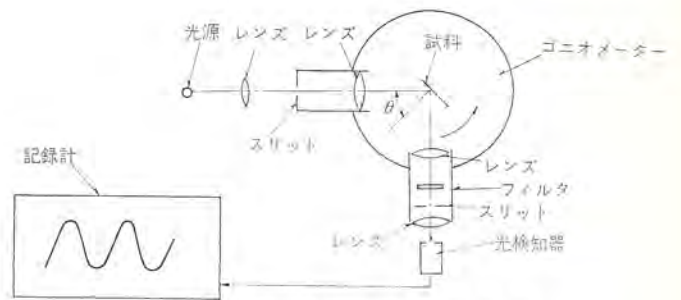


図 3.2 VAMFO 装置の概略図
Schematic representation of the VAMFO apparatus.



図 3.3 VAMFO 装置
VAMFO apparatus.

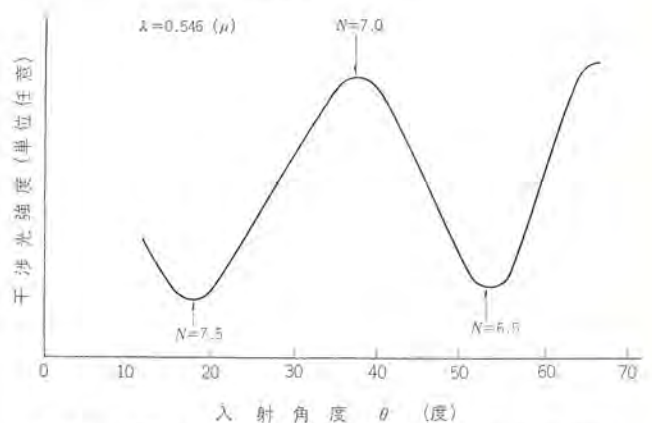


図 3.4 VAMFO 法によって観測されたシリコンウエハ上のシリコン酸化膜の干渉
Interference fringes of the silicon oxide film on a silicon wafer observed by VAMFO.

図 3.3 に装置の写真を示す。図 3.4 はシリコンウエハ上のシリコン酸化膜 ($n=1.45$) の干渉曲線である。測定に使用した波長は 0.546μ であり、膜厚として 1.35μ という値を得た。

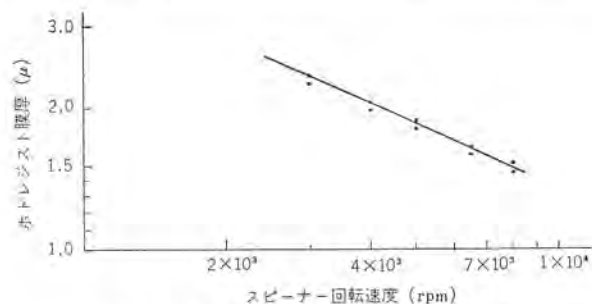
3.3 ホトレジスト膜への応用

トランジスタや集積回路の製造の際の写真製版工程に、耐酸性のある感光性樹脂（ホトレジスト）が用いられている。このホトレジストの膜厚は、レジストのピンホール密度および写真製版の精度（分解能）に影響を及ぼし、素子製造工程の歩どまりに大きな影響を与えるパラメータの一つとなっている。

ホトレジスト膜厚の測定に、従来からある繰返し干渉顕微鏡も使えるが、この方法は破壊測定であって、膜の一部分を除去しなければならない。この余計な処理工程のため、正確な膜厚が得られない場合もある。この点でこの非破壊測定法は非常に有効な手段といえる。

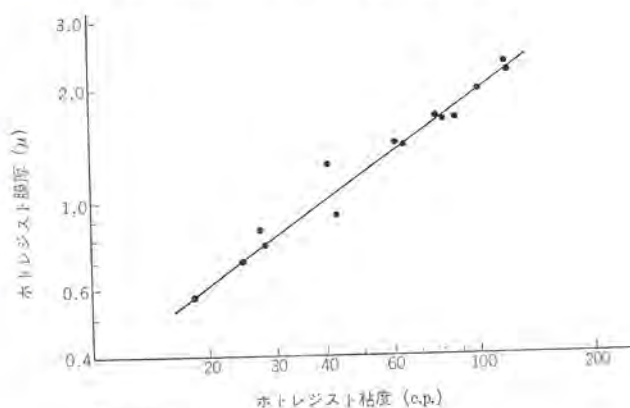
表 3.1 写真製版工程における KMER の膜厚変化
Variation of KMER thickness in the photographic process.

ホトレジスト工程	塗布後	プリベーク後	露光後	現像後	ポストベーク後	Al 蒸着後
膜 厚 (μ)	1.85	1.80	1.78	1.33	1.27	1.08



Photoresist : centrifuged KMER (82 c. p.)
exposed and not developed

図 3.5 ホトレジスト膜厚対スピナー回転速度
Photoresist thickness vs. spinning speed.



Photoresist : centrifuged KMER
exposed and not developed
Spinning speed : 5,000 rpm

図 3.6 ホトレジスト膜厚対粘度
Photoresist thickness vs. viscosity.

シリコンウエハ上のホトレジスト膜は、高速回転中のウエハ上にホトレジスト液を滴下し、遠心力を利用して、薄くてかつ一様な膜に仕上げられる。したがってこの膜厚は、スピナーの回転速度とホトレジストの粘度によって大きく左右される。

VAMFO 装置を用いてホトレジストとして広く使われている KMER の膜厚変化を調べたところ、上記工程を進むにつれて膜厚は順次変化し、特に現像工程後に大幅な減少が認められた(表 3.1)。これは露光の際、KMER に対する、酸素ガスの効果と考えられる⁽⁷⁾。したがって以下に示す KMER の膜厚は再現性を良くするため、全面露光後、現像処理を行わずに測定した。

図 3.5 に、塗布時の回転速度 $r(\text{rpm})$ と膜厚 $d(\mu)$ の関係を示す。これから次の実験式を得た。

$$d \propto r^{-0.45} \dots\dots\dots (3.3)$$

図 3.6 は塗布前の KMER の粘度 $\eta(\text{C} \cdot \text{P})$ と膜厚 $d(\mu)$ との関係でこれから次の実験式を得た。

$$d \propto \eta^{0.72} \dots\dots\dots (3.4)$$

4. む す び

半導体素子の製造に使われている絶縁体薄膜の膜厚・屈折率の非破壊測定法として、偏光解析法と VAMFO 法を採りあげた。

偏光解析法については、膜が多層構造をとる場合を検討したが、その応用例として、シリコン上のシリコン酸化膜とシリコン窒化膜よりなる二層膜の各層膜厚の非破壊測定法を示した。なお、決定できる最大膜厚には制限があることがわかった。

また、第二の応用例として、膜の構造が知られていなかった低温成長シリコンステイン酸化膜のステップエッチと偏光解析器による d, n の測定の繰返しによって得た結果から、この膜が二層構造よりなることを示したが、さらに電顕観察の結果によっても、これを確認することができた。なお、電顕観察によれば、下地近傍の第一層はシリコン酸化膜($n_1=1.45$)であり、またその上の第二層は外径数十 Å 程度の未酸化シリコンが、低級シリコン酸化物と思われる非晶質物質に取り囲まれた状態にあることがわかった。下地近傍から酸化が進行するという事実は、この膜の生成機構に興味ある現象と思われるが、はっきりした説明はわかっていない。

以上のことから、偏光解析法は単に単層膜の膜厚・屈折率の測定に対してのみならず、多層膜の構造解析にも有効な手段となりうることがわかった。

VAMFO 法については、従来から知られている装置を改良し、測定の容易さ、再現性、感度の点を向上させた。また、この装置を用いて、ホトレジスト工程における膜厚変化等を測定したところ、露光の際の酸素ガスの効果等を観測することができた。

参 考 文 献

- (1) R. J. Archer : J. Opt. Soc. Amer., 52, 970 (1962)
- (2) W. A. Pliskin and E. E. Conrad : IBM J. Res. Develop., 8, 43 (1964)
- (3) 土井 : 光学測定法, 工業物理学講座, 日刊工業(昭 31)
- (4) 石黒 : 光学, 171, 共立全書(昭 39)
- (5) 中山 : 第 29 回応物学会(昭 43-10)
- (6) 中山 : 第 14 回応物関係連合講演会 2A D 10 (昭 42-4)
- (7) L. E. Martinson : Proceedings of the 2nd Kodak Seminar on Microminiaturization (April, 1966)

ヒステリシス ロータを用いた小形ブラシレス直流電動機

藤井 学*・吉川 英之*

Small Brushless DC Motor With Hysteresis Rotor

Consumer Products Research Laboratory

Manabu FUJII・Hideyuki YOSHIKAWA

More than ten years have passed since the start of development in the field of Brushless DC Motor. Though various types have been made public in this line for these years, they have a considerable narrow range of application nowadays because of restriction in the aspect of high cost.

Therefore, they are only utilized within the limits of some application, in which we can fully make use of their features, such as no brush, high speed and good control characteristics.

This article introduces small-size, light-weight, high power output Brushless DC Motor with smoothly revolving, hysteresis type rotor, which is driven by a relatively low voltage DC supply, such as auto-batteries. This Brushless DC Motor has been developed with foregoing features in mind. Besides this introduction, a few related items are also discussed herein.

1. ま え が き

ブラシレス 直流電動機も、すでに、十有余年の歴史をもち、この間、種々の方式が発表・提唱されてきた。しかしながら、現状では、なお、価格面での制約を受け、応用範囲も狭く、従来のモータを駆逐して、全面的にそれに置き代わった例はなく、また、当分の状況が続くものと考えられる。ブラシレス 直流電動機の応用範囲の拡大のためには、トランジスタを始めとする各種半導体素子の性能向上・価格低下とともに、それに固有な無刷子・高速回転可能・制御特性良好などの特長を生かした、新規な需要・用途の開拓が必要であると考えられる。

この点にかんがみ、われわれは、バッテリーなどの比較的低電圧電源で運転され、回転むらのきわめて少ない、小形・軽量・高出力のブラシレス 直流電動機を、ヒステリシス ロータを用いて試作し、好結果を得たので、その概要を紹介する。

2. 一般的考察

ブラシレス 直流電動機の系統的な分類は、すでに、報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。われわれは、図 2.1 に示す、同期形・他励式を採用したが、この方式によれば、ブロック図により理解されるように、発振周波数制御による任意の同期回転数制御と、点線で示した帰還ループ付属によるロータ回転位相制御とが、それぞれ可能であるので、本試作モータを各種音響機器や VTR などに適用することが可能である。

前述の試作目標を実現するに際し、回路形式、ロータ形式、駆動波形、定電圧回路、および回転むらなどにつき詳細な検討を行なっているので、まず、これらの要因につき考察してみる。

2.1 基本回路の比較

出力 10 W クラスのブラシレス 直流電動機の基本回路の代表例を、図



図 2.1 試作モータのブロック図
Driving system of brushless DC motor.

2.2 に示す。これら 6 形式を、電源電圧 12 V、小形・軽量・高出力を条件として比較すると、その要因には、つぎの項目がある。

- (a) 電源分割用コンデンサ (C_0) (図 2.2 参照)
- (b) 進相用コンデンサ (C) (図 2.2 参照)
- (c) 方形波発振回路および電力増幅回路
- (d) モータ巻線利用率、モータ力率
- (e) 寸法・重量・出力・効率

これらの内、最も大きく影響するのは (a)、(b) であろう。電源分割用コンデンサ C_0 はモータ印加電圧波形に関係し、この容量不足は電圧波形のサグを大きくし、とくに、ヒステリシス ロータでは、トルクの減少を生じる。代表的な回路 (二) で、サグを 15% とするとき、その容量 C_0 は近似的に、次式で示される (モータ力率を 1 とする)⁽³⁾。

$$C_0 \approx (I_0 / 0.15 \cdot f \cdot E_0) \times 10^8 \dots \dots \dots (2.1)$$

ここに、 I_0 : 全電流 (A), f : 発振周波数, E_0 : 電源電圧 (V),

C_0 : 電源分割用コンデンサ容量 (μF)

出力 10 W クラスのモータでは、 $E_0 = 12 \text{ V}$ として、 $I_0 = 2.5 \text{ A}$ 程度が一般的である。 $f = 60 \text{ Hz}$ では、式 (2.1) より $C_0 = 23,000 (\mu\text{F})$

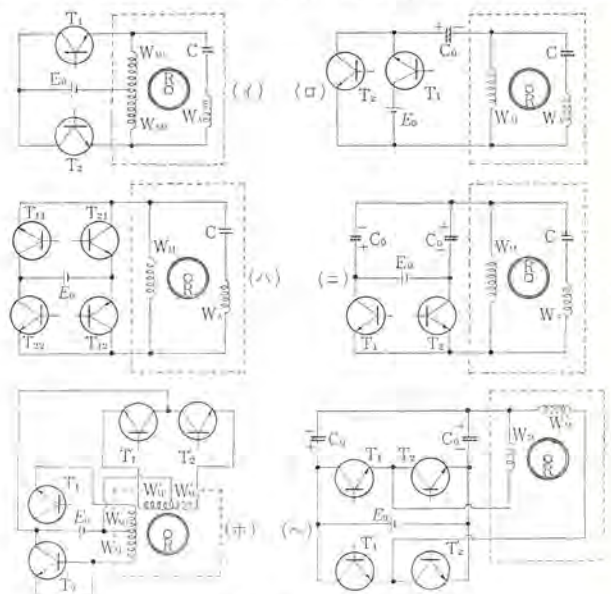


図 2.2 基本回路
Basic circuits.

と計算される。実際には、モータが遅れ力率負荷であるため、サグを15%に留めるのに、さらに大容量のコンデンサが必要である。この意味で、図2.2回路中、(ロ)、(ニ)、(へ)などは電源電圧、発振周波数が、ともに高い場合を除くと不適当である。

次に、移相コンデンサ容量 C につき考えてみる。周知のとおり、コンデンサに蓄積される静電エネルギーは、その容量に比例し、端子電圧の2乗に比例するので、モータ巻線変更の場合、次式により容量を変化させなければならない。

$$C_2 = C_1 \cdot V_1^2 / V_2^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに C_1 : 巻線変更前の容量, V_1 : 巻線変更前の電圧

C_2 : 巻線変更後の容量, V_2 : 巻線変更後の電圧

たとえば、100V用巻線で $2\mu\text{F}$ の容量を使用するモータは、6V用巻線で約 $555\mu\text{F}$ 、また、12V巻線で約 $140\mu\text{F}$ の、きわめて容量の大きな交流用のコンデンサが必要である。この点、図2.2の回路(イ)は補助巻線回路の電圧が、電源電圧の約2倍の電圧になるため、非常に有利である。同時にこの回路は電源分割用コンデンサ C_0 不要、トランジスタ T_1 、 T_2 スイッチング時の電源短絡の心配がないなどの利点もあわせ有するので、出力10Wクラスのブラシレス直流電動機の基本回路として最も適していると考えられる。

2.2 同期形ロータの比較

同期回転形ロータとして、つぎの3種類が一般に用いられている。

- (a) 永久磁石形
- (b) リラクタンス形
- (c) ヒステリシス形

これらは、それぞれ一長一短を有し、たとえば、(a)はダンピング良好、効率大などの長所をもつが、反面、起動より同期引入れまでの操作がむづかしく、ロータの回転位相検出による発振周波数制御方式か、あるいは簡単に、かご形ロータを併用する方式かのいずれかが必要とされるので、回路の複雑化、寸法の大形化を免れることができない。(b)は自起動可能、安価などの長所を有するが、起動トルクにおけるデッドポイントの存在、同期引入れトルクの負荷慣性モーメントへの大幅な依存性、さらに根本的に回転むら大、同期脱出時のハンチングなどの欠点をあらかじめ考慮しなければならない。

これらに比べ、(c)は価格の点で唯一の難点があるが、自起動可能、回転むら小、ヒステリシスリング材質の選定によるトルク特性の変更可能などの数多くの長所をもち、特に回転むらの小さいことが要求され、小形軽量にして高出力が必要とされる用途には、ヒステリシス形ロータが望ましい。この意味で、今後のヒステリシスリング材質の改良とともに、より一層のコストダウンが期待される場所である。

2.3 駆動電圧波形

モータ特性の観点からは、正弦波電圧駆動が良い。しかし、直流電圧を交流正弦波電圧に変換する場合、次の問題が生じる。

- (a) 正弦波発振器が必要である。
- (b) 電力増幅段トランジスタは活性領域動作のため、電力損失が大きい。また、方形波をフィルタにより波形整形する方式は、低周波のため大容量のL、Cが必要になる。
- これに反し、方形波電圧駆動は、
 - (a) 正弦波発振器に比べ、方形波発振器の製作は容易である。
 - (b) 電力増幅段トランジスタはスイッチング動作なので、電力損失が小さく、同時に、電源インピーダンスも低くできる。
 - (c) O・T・L方式(出力トランスレス)も可能で、回路の変換効率が良好である。

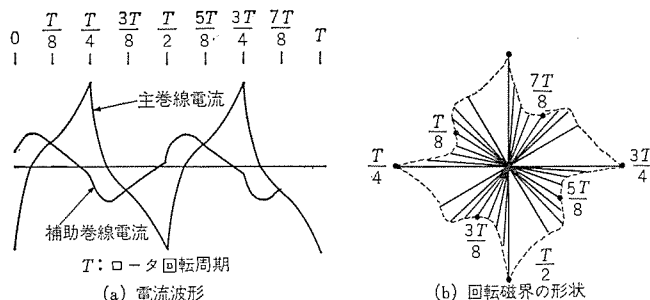


図2.3 方形波駆動の回転磁界形状
(a) 電流波形 (b) 回転磁界の形状
Rotating field map in case of rectangular wave drive.

表2.1 正弦波駆動と方形波駆動との特性比較
Comparison of torque characteristics between sine wave drive and rectangular wave drive.

(a) 電圧一定の場合

	電圧 VRMS	°C μF	温度上昇(無負荷時) °C	起動トルク g-cm	同期脱出トルク g-cm
正弦波 電圧駆動	100	2.1	17.1	590	390
	100	2.3	20.3	700	450
方形波 電圧駆動	100	2.1	14.5	500	340
	100	2.3	16.5	590	225

(b) 温度上昇一定の場合

	電圧 VRMS	°C μF	温度上昇(無負荷時) °C	起動トルク g-cm	同期脱出トルク g-cm
正弦波 電圧駆動	100	2.1	17.1	590	390
方形波 電圧駆動	105.5	2.1	17.1	570	365

などの利点があるが、同時に、つぎに示す欠点も考慮しなければならない。

- (a) 回転むらが大きく、モータのトルク特性を低下させる。
- (b) トランジスタにはピークパワーが加わり、また直流電流増幅率 h_{FE} の大きい素子が必要である。スイッチングノイズ対策も場合によって考慮しなければならない。
- (c) 移相コンデンサ容量の選定がむづかしい。

これらの欠点につき簡単に触れてみよう。図2.3(a)は、方形波電圧駆動の場合の、単相コンデンサ分相形モータの主巻線、補助巻線電流波形である。これらの電流が集中巻きされた二相巻線により作る回転磁界の形状は、作図的に図2.3(b)として求められる。回転磁界の大きさと、その角速度とは時間的に大きく変化し、回転むら増加の主原因となることが推察される。

方形波電圧駆動は正弦波電圧駆動に比べ、モータ力率を低下させるので、同一実効電圧の下ではトルク特性も低下する。表2.1(a)はその一例である。しかし、両者を正確に比較するには、モータ温度上昇値が同一の条件で行なわれるのが妥当であると考えられる。表2.1(b)はこの結果を示すが、やはり方形波駆動時のトルク特性が、正弦波駆動時に比べ、若干劣っている。

電力増幅段トランジスタのスイッチング時の電流は、図2.3(a)に示す主巻線電流のように、平均電流の数倍にも達するので、スイッチング速度の遅いトランジスタは、スイッチング時に大きなピークパワーを消費しなければならない。同時に、このピーク電流においても飽和動作を維持するため h_{FE} の大きい素子が必要である。電流が三角波に近く、しかも、ピーク電流が大きいので、電源インピーダンスの大きい場合、出力電圧にかなりのリップル電圧を含み、これが他回路のS/N比を下げることも予想される。

一般に、単相コンデンサ分相形ヒステリシス電動機では、起動トルクを

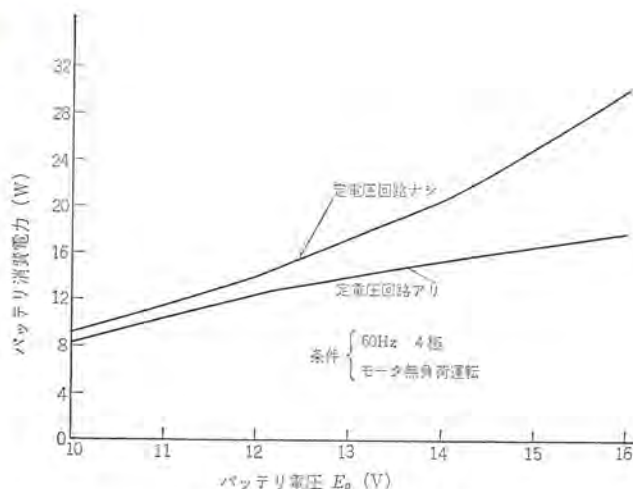


図 2.4 定電圧回路の効果
Effect of voltage regulator circuit.

最大にするコンデンサ容量が、同期脱出トルクを最大にするコンデンサ容量と異なっており、この差は方形波電圧駆動の方が大きいので、最適容量の決定は一段とむづかしくなる。

このような2～3の欠点があるが、小形軽量化のため、方形波駆動方式を採用せざるを得ない。

2.4 定電圧回路の効果

自動車用バッテリーを電源とすると、その電圧は11V～15V程度の範囲で変動するものと考えなければならない。この場合、モータ巻線を11Vで設計すると15V時には入力過大となり、逆に、15Vで設計すると11V時に出力不足をきたし、いずれも不都合を生じる。

モータ回路に直列に直列形定電圧回路を接続すると、この問題は解決され、さらに、消費電力の節約も可能なので一石二鳥の効果が期待できる。消費電力の減少量は次式で示される。

$$\frac{E_0^2}{R} - \frac{E_{0\min}^2}{R} = \frac{E_0(E_0 - E_{0\min})}{R} \dots\dots\dots (2.3)$$

ここに E_0 : 電源電圧 $E_{0\min}$: 電源電圧最小値
 R : モータの等価抵抗

上式より明らかなように、消費電力節約の効果は、 E_0 が最大の場合に得られる。また定電圧回路は、電源電圧に含まれるリップル電圧を吸収し、これに基づく回転むらの発生を抑制する作用もある。図2.4は、図2.2(イ)回路に直列形定電圧回路を付加した場合の実測結果であり、消費電力節約の効果が良く示されている。

3. ヒステリシスロータを用いたコンデンサ分相回路による試作例

以上の考察に基づき、コンデンサ分相回路とヒステリシスロータとにより、同期形、他励式ブラシレス直流電動機を試作した。

その試作方針は

- (a) 低電圧の直流電源で運転する。
- (b) 回転むらを極力小さくする。
- (c) 小形軽量にして高出力とする。
- (d) 消費電力の節約を計り、あわせて回路を簡素化する。

の4点である。今回試作した、ブラシレス直流電動機のユニークな点は、電気的には、定電圧回路と電力増幅回路とを一体化したことであり、また、機械的には、弾性カップリングをロータに内蔵させたことにある。

図3.1に試作機の外観を示す。



図 3.1 試作機の外観
Experimental model of brushless DC motor.

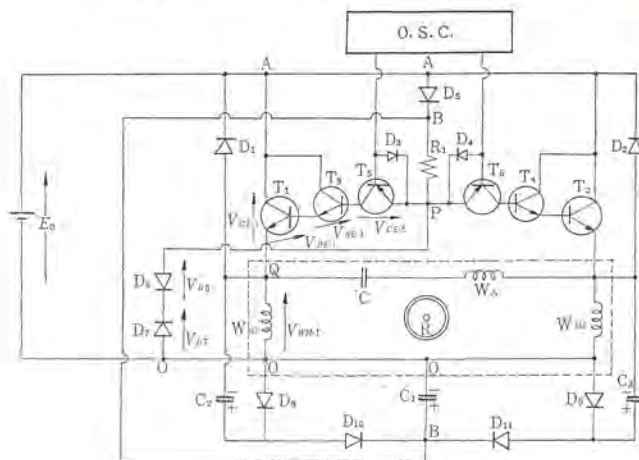


図 3.2 試作回路
Circuit of brushless DC motor.

3.1 試作回路

図3.2に試作回路(特許出願中)を示すが、これは図2.2(イ)回路を基本としている。モータはセンタタップ付主巻線 W_{M1} , W_{M2} , 進相コンデンサ C , 補助巻線 W_A , および、ヒステリシスロータ R とから構成される、単相コンデンサ分相形であり、主トランジスタ T_1 , T_2 のエミッタ負荷となっている。方形波発振器 O.S.C. の出力により、トランジスタ T_5 , T_6 が ON, OFF され、それに応じて、ダーリントン接続された T_1 , T_3 と T_2 , T_4 とが交互に ON, OFF し、モータに方形波交流電圧が印加されるのは従来の方式と同様であるが、本回路では、点 P, O 間に接続されたダイオード D_6 , ツェナーダイオード D_7 により定電圧特性を持つことになる。たとえば、トランジスタ T_1 , T_3 が ON のとき、O, P, Q, O の閉回路には図示の極性の各電圧を用いると次式が成立する。

$$(V_{D6} + V_{D7}) = (V_{WM1} + V_{BE1} + V_{BE3} + V_{CE5}) \dots\dots\dots (3.1)$$

一般的に、 $V_{D6} \approx V_{BE1}$, また、 $V_{BE3} + V_{CE5} \approx 1(V)$ と考えられるので、次式が導かれる。

$$V_{WM1} \approx V_{D7} - 1 \dots\dots\dots (3.2)$$

すなわち、モータの主巻線電圧 V_{WM1} は、ツェナーダイオード電圧 V_{D7} より約1V低い値に安定化されることになる。また、A, Q, O, A の閉回路で、図示の極性の各電圧間には、式(3.2)を用いると、式(3.3)が成立する。

$$V_{CE1} \approx (E_0 + 1) - V_{D7} \dots\dots\dots (3.3)$$

ここで、ツェナーダイオード電圧 V_{D7} は一定とみなせるので、電源電圧 E_0 の変化は、トランジスタ T_1 のコレクタ、エミッタ間電圧として吸収されることになる。トランジスタ T_2 においても、全く同様の作用が行なわれる。電源電圧 E_0 を変化したときの、 V_{CE1} 電圧波形の変化を図3.3に示している。

図3.3において、モータの無効電力が、ダイオード D_1 , D_2 を通じて

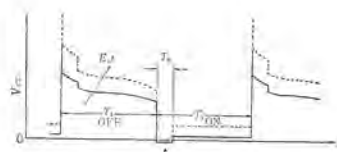


図 3.3 V_{CE} 波形
Collector to emitter voltage wave form.

電源に帰還される⁽⁴⁾期間 T_0 の間、電圧安定化の作用は行なわれないので、直列定電圧回路を別個に挿入する方式に比べ、多少定電圧特性は劣るが、期間 T_0 の占める割合は 20 % 以下であり、モータ負荷の場合、本回路の定電圧特性で十分である。

コンデンサ C_1 , C_2 , C_3 ダイオード D_8 , D_9 , D_{10} , D_{11} より成る回路は、主巻線 W_{M1} , W_{M2} に発生する方形波電圧を倍電圧整流するので、点 O.P 間電圧は通常電源電圧 E_0 の約 2 倍に近く、したがって、電源電圧 E_0 が減少したときも、トランジスタ T_1 , T_3 または、 T_2 , T_4 を十分に飽和させることができる。ダイオード D_8 は起動回路用で、通常は逆バイアスされ、OFF となる。

以上のように、電力増幅段自体で定電圧特性を有するので、定電圧回路用 パワー transistor 1 個が節約され、回路が簡略化されると同時に、電力損失も 2 個で分担するので、その選定が容易になる。もちろん、図 3.2 は、図 2.2 (イ) 回路を基本としているので、電源分割用 コンデンサ C_0 不要、進相コンデンサ C 容量小、などの利点も同時に持っている。

3.2 回転むら

回転むらの減少化は本モータの試作方針の一つであるが、従来、その測定法、理論的取扱などに関しては、ほとんど報告されていないようである。そこで以下、回転むらにつき簡単に説明を加えてみる。

同期電動機は、周知のとおり、極数と周波数とで規定される同期速度で回転するが、その一回転中を注目すると、絶えず瞬時速度は変化しており、最も影響の大きい固定子の極数に起因するものの変化の割合は、次式に示されるように電源周波数の 2 倍になる。

$$n \times P = 2 \cdot f \text{ (Hz)} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここに、 n : ロータ回転数 (rpm), P : 極数, f : 電源周波数 (Hz)

この 1 回転中の瞬時速度の変化に対し、回転むらを次式で定義するものとする。

$$\text{回転むら} = \{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) / \omega_0\} \times 100 (\% \text{ P-P}) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

ここに、 ω_0 : ロータ平均角速度 (rad/s), ω_{\max} : ロータ瞬時角速度の最大値 (rad/s), ω_{\min} : ロータ瞬時角速度の最小値 (rad/s)

従来の応用では、たいていの場合、単に同期回転で回転することとで足りていたが、最近の高級音響機器、VTR などへの応用では一歩進んで、回転むらが問題にされている。方形波駆動では、正弦波駆動に比べ、ロータに発生するトルク脈動も大きく、このため、回転むらも必然的に大きくなる。回転むらを低減するのに先立って、われわれは、その定量測定を行なった。図 3.4 は測定回路のブロック図を示す。本測定では、磁気テープにあらかじめ記録された一定周波数（一定波長）の信号が、モータのロータ軸に直結された回転ヘッドで検出され、外部にスリップリングを通じて取出されるが、この検出された信号は回転むらに比例した周波数変調を受けているので、増幅、整形後、FM 検波されると電圧変動の形で回転むらを示すことになる。この場合、回転むらの大きさ、形状とともに、そのステータ位置に対する相対関係も求められる。試作装置では、0.01 % 程度の測定が可能であったが、改良によりさらに高精度の測定も可能

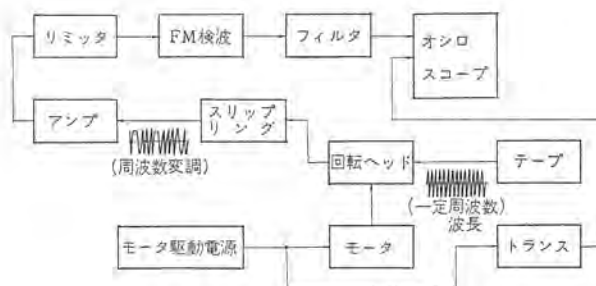


図 3.4 回転むら測定回路
Block diagram of speed fluctuation measurement circuit.



図 3.5 ロータ組立
Rotor assembly.

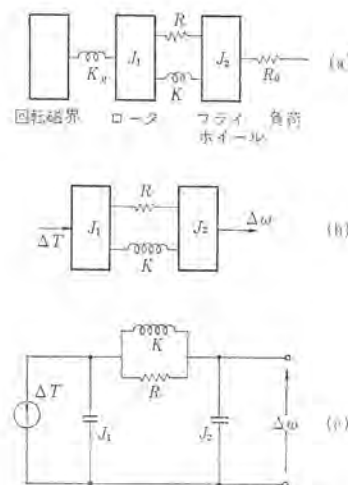


図 3.6 等価回路の誘導
Induction of equivalent circuit.

となろう。

つぎに、回転むら低減に対する方法を検討してみる。図 3.5 は試作機に用いた、ゴムカップリング内蔵形 ロータ（特許出願中）を示し、小形軽量、回転むら小などの特長をもつ。また、ラジアル方向のガタも特殊なスリーブベアリングにより防止されるので、振動騒音の減少化にも考慮がなされている。このロータのゴムカップリングによる回転むら低減化を等価回路により説明する。図 3.6 (a) は、ステータの回転磁界、それに磁氣的に結合されたロータ、ゴムカップリング外部に接続されるフライホイールおよび負荷などの間の機械的な接続を示している。図 3.6 (a) 回路において、各記号はつぎのとおりである。

- K_M : 回転磁界とロータとの間の等価コンプライアンス。
- K, R : ゴムカップリングのコンプライアンス、および回転制動係数。
- J_1, J_2 : ロータおよびフライホイール（負荷を含む）の慣性モーメント。
- R_0 : 負荷の回転制動係数。

回転むら成分のみを考えるため、さらに回路の簡略化を行なってみる。回転磁界とロータとの間は等価コンプライアンス K_M で結合されるが、ロータにおける回転むらはその慣性モーメントにより、相当小さな値になると想像される。それゆえ、ここでは、ロータとステータの作る回転磁界とを切り離して、単に、ロータにトルクリップ ΔT が加わると考えて良いことになる。また、負荷に消費されるトルクは、

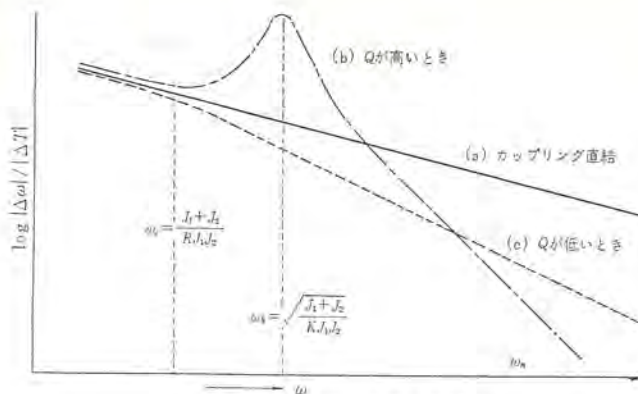


図 3.7 $|\Delta\omega/\Delta T|$ の周波数特性
Frequency characteristics of $|\Delta\omega/\Delta T|$.

負荷における回転むらがきわめて小さいこと。さらに、負荷における平均回転数が一定であることなどより、たとえトルクが回転数に比例するような負荷を考えたととしても、ここでは、一定のトルクを消費すると考えられる。すなわち、回転むらの考慮においては無視することができる。これらを考えあわせると図 3.6 (b) が得られ、これを等価電気回路で示すと図 3.6 (c) となる。図において、トルクリップル ΔT と回転むら $\Delta\omega$ との間の関係式は次式で示される。

$$\omega = \frac{\Delta T}{j\omega(J_1 + J_2) - \frac{\omega^2 J_1 J_2}{R + j\omega K}} \quad (3.6)$$

上式により、ゴムカップリングによる回転むら減少効果が推定できる。ここで、ゴムカップリングの Q を $Q = R/\omega K$ で定義している。この Q の値により次の三つの場合が考えられる。

(a) ゴムカップリングなしの場合、

$R=0$, すなわち、 $Q=0$ なので、式 (3.6) は変形され次式となる。

$$|\Delta\omega| = \Delta T/\omega(J_1 + J_2) \quad (3.7)$$

(b) ゴムカップリングの Q が高い場合、

$\omega K \ll R$ であるから次式が導かれる。

$$|\Delta\omega| = \Delta T/\omega(J_1 + J_2 - \omega^2 K J_1 J_2) \quad (3.8)$$

(c) ゴムカップリングの Q が小さい場合、

$\omega K \gg R$ であるから次式が導かれる。

$$|\Delta\omega| = \Delta T/\sqrt{\omega^2(J_1 + J_2)^2 + \omega^4 R^2 J_1^2 J_2^2} \quad (3.9)$$

これら三つの場合を図 3.7 に示している。図 3.7 では (b) の場合、共振角周波数 $\omega_K = \sqrt{(J_1 + J_2)/K J_1 J_2}$ を、また、(c) の場合、折点角周波数 $\omega_C = (J_1 + J_2)/R J_1 J_2$ を示したが、ゴムカップリングを用いた場合、特に大きな角周波数の回転むら成分に対し有効であることが理解される。

回転むらの原因となるトルクリップルは、前に述べたように、電源角周波数の 2 倍の角周波数、または、その高調波の角周波数をもつので、その点を考慮した、 ω_C または ω_K の選定が必要とされる。 ω_C および ω_K の値が低い程、回転むらの吸収効果は大きくなるが、 J_1, J_2 は重量、体積などでその上限が制限され、また K, R の値も伝達力などの点でその上限が制限されるため、 ω_C または ω_K を極端に下げることとはできない。また ω_C および ω_K の選定は、制御特性にも影響するので、ダンピングが問題とされる場合は特に注意すべきである。

ゴムカップリング内蔵形ロータの効果は、方形波駆動においても従来と同一の寸法、慣性モーメントで、通常ロータを用いた正弦波駆動の場合より回転むらを減少できることである。もちろん、正弦波駆動に用いれば、さらに回転むらを低減化できる。

表 3.1 主要特性
Principal characteristics.

	本試作品	従来品
回路形式	コンデンサ分相ヒステリシスロータ形 (図 2.2 (イ) 回路)	
モータ寸法 mm, 重量 kg	87 φ×59, 1.30	87 φ×82, 1.65
ステータ寸法 mm	44.6 φ×87 φ×20 t	44.6 φ×87 φ×28 t
ステータスロット数	16	
ロータ寸法 mm	44 φ×20	44 φ×28
弾性カップリング	あり	ない
巻線形式	4 極, 分布巻	
電圧波形, 周波数 Hz	方形波電圧 60	
進相コンデンサ μF	25	
電源電圧 V	DC 12	
起動トルク/電流 g-cm/A	100/2.05	105/1.75
同期脱出トルク/電流 g-cm/A	350/1.95	300/1.65
無負荷電流 A	1.50	1.25
パワートランジスタ形名	2SC-769×2	2SB-138×2
DC 12V 時入力 W	18	15
DC 16V 時入力 W	26	31
ロータ全慣性モーメント g-cm ²	1,745	1,880
回転むら % P-P	0.10	0.35
回転むら, 基本波, 周波数 Hz	120	

3.3 試作機の特性

本試作モータの特性を従来品の特性と比較して表 3.1 に示している。この結果によれば、モータ寸法において 28 % の小形化が、モータ重量において 21 % の低減化が、同期脱出トルクにおいて 17 % の増加が、さらに、回転むらでは 73 % の低減化 (ロータ全慣性モーメント同一とする) が、それぞれ達成されており、その他、消費電力の減少と回路の簡素化なども含めて、いずれも所期の目標を満足することができた。

4. む す び

コンデンサ分相回路とヒステリシスロータを用いて、同期形、他励式ブラシレス直流電動機を試作し、直流低電圧駆動、回転むら低減化、小形軽量高出力化、効率の向上と回路の簡易化などの所期の目標を達成することができた。本試作モータは、テープレコーダ、ステレオプレーヤ、VTR などの高級音響機器、あるいは、車載用の各種測定器用として十分な性能を有している。さらに、本モータに用いた、定電圧特性付電力増幅段と弾性カップリング内蔵ロータなどは、他の一般用途にも適用できるであろう。試作は、図 2.2 (イ) 回路方式で行なったが、条件次第では図 2.2 に示した他の回路方式を使用することも可能である。

ブラシレス直流電動機の需要は、これまでけん(喧)伝されてきたほかに、その伸びを示していないが、今後、モータリゼーションの進展に伴う直流電源使用機会の増加、トランジスタを始めとする各種半導体素子の特性改善とコストダウン、新しい素子の開発、モータ自体の改良に加え、漸次ではあるが、需要の増加が見込まれるので、将来の見通しは明るいものと予想される。

終りに、本モータの試作に当たりご協力いただいた各位に感謝する。
(昭和 43-10-9 受付)

参 考 文 献

- (1) 宮入ほか：電学誌, 84, No. 3, 11 (昭 39)
- (2) 田中：ナショナルテクニカルレポート, 11, No. 5, 359 (昭 40)
- (3) 田中ほか：電源回路の設計マニュアル, 367 (昭 41) 丸善
- (4) B. D. Bedford, R. G. Hoft: Principles of Inverter Circuits, 52 (1964) John Wiley & Sons, Inc.

腐食におよぼす電流の影響

山本 利雄*・松岡 宏昌**・川岡 靖子**

Corrosion Under the Influence of Electric Current

Central Research Laboratory Toshio YAMAMOTO・Hiromasa MATSUOKA・Yasuko KAWAOKA

Nowadays there are many cases where water is employed for the cooling of electric machines, and corrosion of materials in use has been drawing attention of circles. A study has been made on the corrosion of copper and stainless steel under the influence of electric current, which is a problem the most worthy of note about the cooling of the electric apparatus. Experiments were conducted with coupon type specimens in a large separable flask filled with pure water. The results have revealed the following facts : Stainless steel is almost immune from the influence of AC such that no corrosion is worried practically. With DC, however, anode sides undergo slight corrosion. In the case of copper, not only DC but AC (50 or 60 Hz) corrode the material. But with the increase of frequency the corrosion decreases, and above a certain frequency no influence of AC is observed.

1. ま え が き

最近、電気機器の冷却に水を用いることが多くなり、使用材料の水中での腐食に関心がよせられている。すでに著者らは腐食ループを使用した流動水中での研究結果を報告⁽¹⁾したが、本報告は腐食にたいする電流の影響に関するものである。これは電気機器を対象とする場合とくに検討しておく必要のある課題であろう。

この種の腐食の研究は古くは地中ケーブルの迷送電流による腐食に端を発し、鉛については C. E. Gilimberti⁽²⁾によって比較的詳細に行なわれている。さらに F. O. Water⁽³⁾は鋼材および銅について、また J. F. Williams⁽⁴⁾は銅、鋼、アルミニウムおよび鉛について比較実験を行なっている。

ところで電気機器の冷却において冷却水は腐食およびもれ電流をできるだけ少なくするために比較的純度の高い水が使用される。この観点から上記の文献をみると、これらは地中または電解質を比較的多量に含む水中での研究であり、本目的と合致しない。そこで著者らは電気機器において最もよく使用される銅およびステンレス鋼について、純水中における電流影響下での腐食挙動について研究を行なった。

2. 実験装置および方法

実験では大形のセパラブルフラスコを使用した。図 2.1 はその写真で、内部は十字の絶縁板で四つの室に分け、各室には 8 枚の試片からなる 1 組の試料をそう入した。8 枚の試片はホルダ中に平行に並び、向き合った試片間を電流が流れるように接続されている。電気系統図を模式的に図 2.2 に示す。一回の試験に 4 組電流密度をかえて試験ができる。実験は交流と直流について電流密度、期間、温度の影響を検討した。試料は銅板 (CuP 2-1/4 H) およびオーステナイト系ステンレス鋼で、各試片の大きさは 50×20×1 である。

とくに銅の場合は、周波数の影響を検討した。またステンレス鋼については、鋼種および表面処理をかえた実験も行なった。表面処理はバフ研磨、酸洗い、焼鈍、サンドペーパー研磨の四種でその詳細は次のとおりである。

バフ研磨 : 酸化クロムバフ研磨ののちアルカリ脱脂

酸洗い : バフ研磨ののち、塩酸、硝酸、酢酸混合液で酸洗い

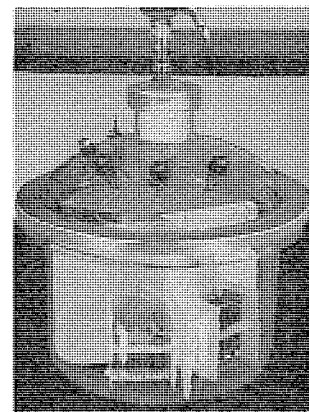


図 2.1 デシケーター形セパラブルフラスコ試験装置 (ホルダに試片をそう入して取りつけてある)

Desiccator type separable flask (with specimens inserted in holders).

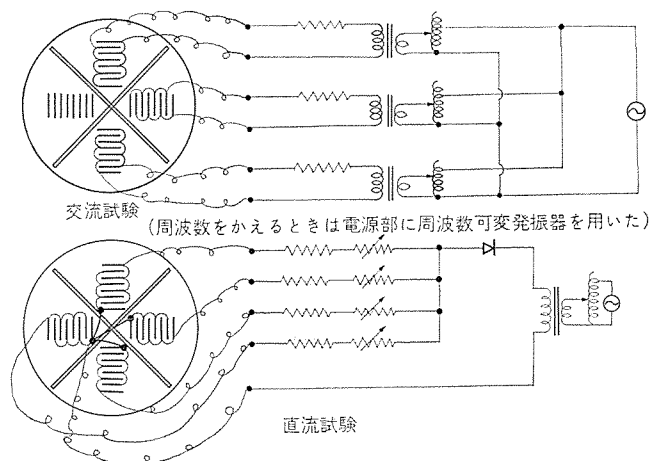


図 2.2 電気系統
Electrical circuit of corrosion test.

焼鈍 : バフ研磨ののち、1,100°C 水素炉で 30 分加熱、200°C に移して 1 時間半放置冷却

サンドペーパー研磨 : エメリー 180 番で研磨

実験にはイオン交換水 (約 1 MΩ-cm, 25°C) を用い、おもに大気開放、静止状態で行なったが、銅の直流試験では、腐食生成物により試片間が短絡される (4.3 節参照) ので、それを阻止するため、

水中に空気を吹き込んでかくはん(攪拌)した。またステンレス鋼の直流試験では、試片間は短絡されないが、水の電気分解によって生ずるガスを除去するために、セパラブルフラスコ内の気相中に空気を流し込んだ。

3. 実験結果

3.1 銅の交流(60 Hz) 流電腐食試験

一般に短期間(2日間ほど)では、赤紫の肉眼でみえる無数の微結晶が試片表面にみられ(図3.1参照)、それが期間がたつにしたがい黒色のみぞ模様(grooved feature)に変わった(図3.3参照)。

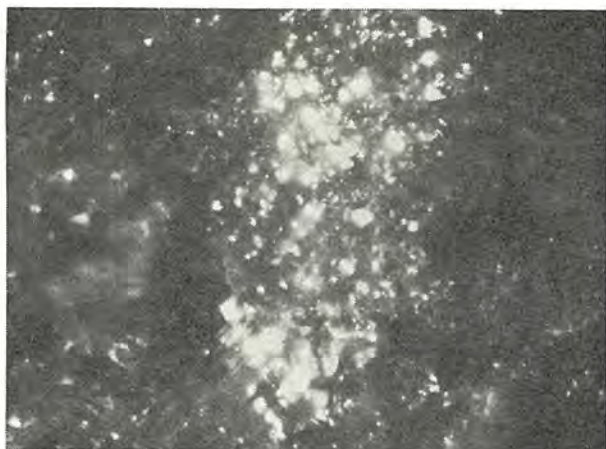


図 3.1 試片表面にできた微結晶 $\times 400$ (銅交流試験 85°C 2日間 2.86 mA/cm^2)

Corrosion products with many minute crystals on the surface of copper specimens $\times 400$ (AC test at 85°C for 2 days).



図 3.2 腐食試片表面のみぞ模様(1) (銅交流試験 55°C 2.86 mA/cm^2)

Grooved feature on the surface of copper specimens (1) (AC test 55°C 2.86 mA/cm^2).



図 3.3 腐食試片表面のみぞ模様(2) (銅交流試験 85°C 2.86 mA/cm^2)

Grooved feature on the surface of copper specimens (2) (AC test 85°C 2.86 mA/cm^2).



図 3.4 並立している腐食生成物 $\times 400$ (銅交流試験 55°C 15日間 1.43 mA/cm^2)
Corrosion products of 10μ high.
(AC test of copper 55°C 15 days 1.43 mA/cm^2).



図 3.5 激しく腐食を受けた試片断面 $\times 400$ (銅交流試験 55°C 15日間 2.86 mA/cm^2)
 $30\sim 50\mu$ corrosion depth with caves
(AC test of copper 55°C 15 days 2.86 mA/cm^2).

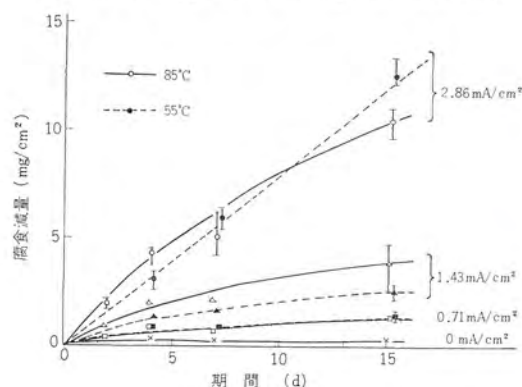


図 3.6 銅の交流腐食(1)
AC corrosion of copper (1).

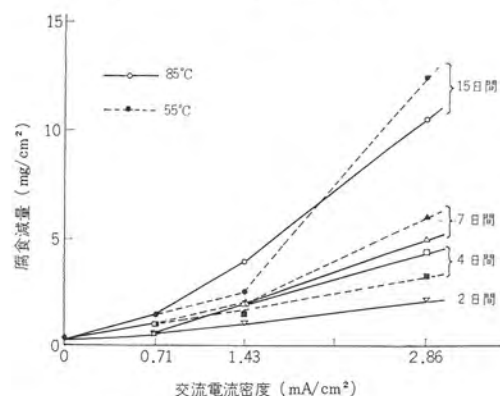


図 3.7 銅の交流腐食(2)
AC corrosion of copper (2).

低電流密度では、 $5 \sim 10 \mu$ の高さの腐食生成物が試片上にでき（図 3.4 参照）、高電流密度（ 2.86 mA/cm^2 ）では、 $30 \sim 50 \mu$ の浸食がみられた（図 3.5 参照）。

図 3.6 および図 3.7 に、それぞれ時間および電流密度の関数として腐食重量減の変化を示した。腐食速度は一般に時間の経過とともに減少する。しかし電流密度が高いほど時間に対する腐食の直線性が増加する。高い温度（ 85°C ）のほうが、腐食量が大むね多い。しかし 55°C 高電流密度（ 2.86 mA/cm^2 ）の腐食量は時間に比例しているため、7日目以後では 85°C より 55°C の腐食量が多い結果を示した（4.1 節参照）。

3.2 周波数の影響

交流試験はおもに 60 Hz で行なったが、周波数の影響をみる目的で、 500 Hz および $5,000 \text{ Hz}$ で 7 日間の試験を行なった。試料は銅（Cu P 2-1/4 H）を用いた。 500 Hz の試験では、高電流密度（ 2.86 mA/cm^2 ）で若干灰色のしま（縞）がみられ、 3μ 弱の腐食被膜がみら

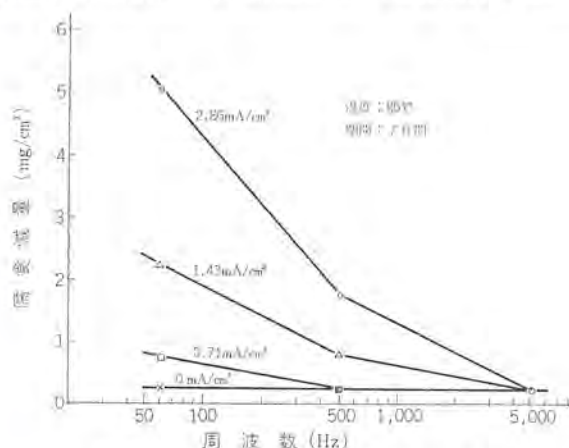


図 3.8 銅の腐食における周波数の影響

Influence of frequency and current density on corrosion of copper.

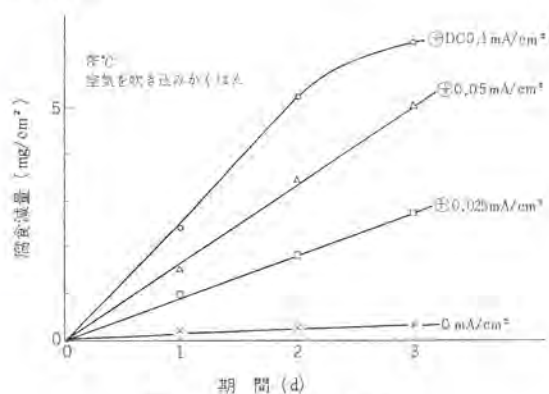


図 3.9 銅の直流腐食 (1)
Corrosion of copper by DC (1).

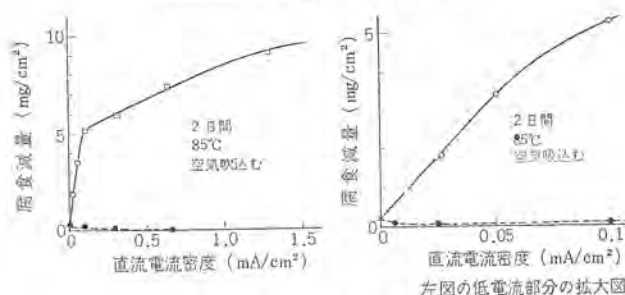


図 3.10 銅の直流腐食 (2)
Corrosion of copper by DC (2).

れた。 $5,000 \text{ Hz}$ では、電流を流してない試験と同じで、表面が黒色を呈したのみで、とくに腐食被膜は観察されなかった。

図 3.8 に腐食重量変化を示した。周波数の増加により腐食量は減少している。 500 Hz の腐食量は、 60 Hz の腐食量の約 $1/3$ であり、 $5,000 \text{ Hz}$ では電流の影響は全く認められない。なお電流密度の低い 0.71 mA/cm^2 では 500 Hz ですでに電流の影響が見られず、このことから腐食に影響を与えなくなる周波数は電流密度に依存し、低電流密度では、より低い周波数で腐食への影響がなくなると考えられる（4.2 節参照）。

3.3 銅の直流電流腐食試験

静止状態で直流電流を流すと、試片間に酸化銅と思われる黒色の腐食生成物がフィラメント状につながる（図 4.1 参照）。この現象が起こると電流はフィラメントにより短絡し、腐食に影響しなくなるので、空気を水中に吹き込み、かくはんによりフィラメントの生成を阻止しながら試験を行なった。期間は短かった（2 日以内）が、陽極側の試片は均一にかなり腐食した。陰極側の試片は、灰褐色の容易にぬぐいとれる程度の付着力の弱い腐食生成物が多量に付着したが、試片自体は陰極的に防食されていたためか、重量減少は生じなかった。図 3.9 および図 3.10 にそれぞれ腐食量と時間および腐食量と電流密度の関係を示した。陽極側の腐食は時間に比例して増加している。しかし 0.1 mA/cm^2 、3 日めは腐食の増加が少ない。これは、時間とともに水中に浮遊する腐食生成物の量が増加し、フィラメントが生成しやすくなり、試片間が部分的に短絡したためと思われる。図 3.10 から電流密度と腐食の関係をみると、 0.05 mA/cm^2 以下の低電流密度では、腐食は電流密度に比例して増加している。 0.1 mA/cm^2 以上で増加が少ないのは、電流密度範囲 $0.32 \sim 1.28 \text{ mA/cm}^2$ の試験では多量の腐食生成物が生ずるため、フィラメントの生成を十分に阻止しえなかったためと思われる。

3.4 ステンレス鋼の交流電流試験

SUS 27 についての試験結果を表 3.1 に示した。

ステンレス鋼は、銅にくらべきわめて少ないが、腐食生成物の付着や変色（淡い赤褐色）などから、わずかであるが交流の影響を受けることがわかる。

3.5 ステンレス鋼の直流電流腐食試験

陽極側の試片は、鮮明な褐色から黒紫色へとかわっていった。陰極側は、黒灰色で、そのうえに黄土色の付着物がみられた。電子線回析で陽極側の試片よりスピネル形酸化物が観察された。

腐食被膜を除去したのちの腐食重量変化を、図 3.11 および図 3.12 に示す。陰極側の付着物には除去されにくいものがあり、それは電流密度が高いほど増加している。陽極側の腐食傾向をみると、電流密度に対してほぼ比例した腐食減量を示した。期間に対しては、

表 3.1 SUS 27 の交流試験片の重量変化
Changes in weight of SUS 27 at AC test.

		0 mA/cm^2	0.72 mA/cm^2	1.43 mA/cm^2	2.86 mA/cm^2
7 日間	腐食被膜のまま (mg/20 cm ²)	0.0~0.2	0.1~0.3	-0.1~0.3	-0.2~0.6
	被膜除去後 (mg/20 cm ²)	-0.1~0.2(0.0)	0.1~-0.15(-0.03)	0.1~-0.4(-0.1)	-0.1~-0.5(-0.3)
31 日間	腐食被膜のまま (mg/20 cm ²)	-0.1~0.1	0.0~0.2	-0.1~0.3	0.0~0.3
	被膜除去後 (mg/20 cm ²)	-0.1~0.1	-0.1~0.1	-0.1~0.1	-0.1~0.0

6 枚の試片の重量増減の範囲を示した。試験前の試片と比較して、増量を正に、減量を負にとった。() 内は平均値を示す。

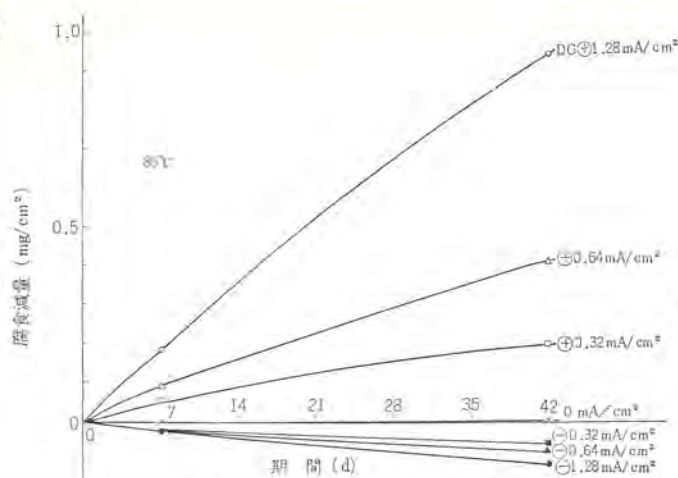


図 3.11 SUS 27 の直流腐食 (1)
Corrosion of SUS 27 by DC (1).

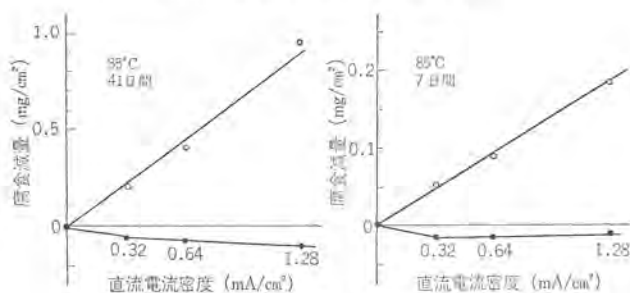


図 3.12 SUS 27 の直流腐食 (2)
Corrosion of SUS 27 by DC (2).

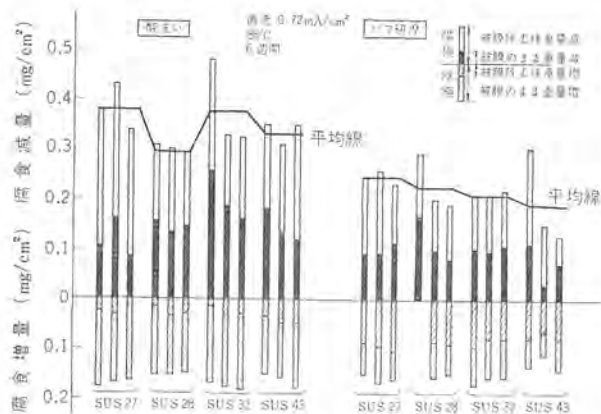


図 3.13 ステンレス鋼の種類による腐食量の差異 (直流試験)
Influence of kind of austenitic stainless steels on corrosion (DC test).

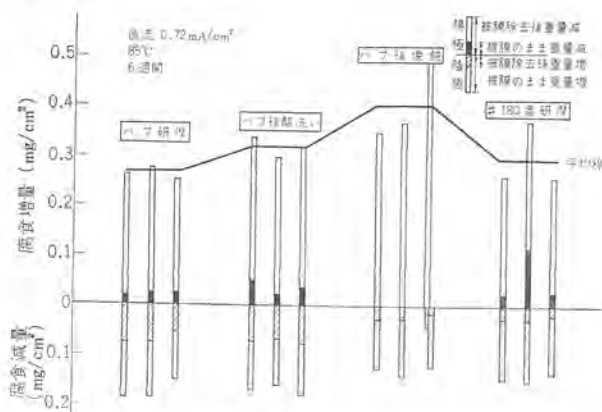


図 3.14 SUS 27 直流腐食におよぼす表面処理の影響
Effect of treatment on SUS 27 specimens at DC corrosion test.

多少てい減するが直線性が強い。

3.6 ステンレス鋼の鋼種の影響

実験結果を図 3.13 に示す。左側は酸洗い、右側はバフ研磨したものについての結果である。鋼種による差異は明りょうではないが、SUS 27 が他の鋼種より少し腐食量が多いように思われる。比較的腐食量が少なかったのは、酸洗いしたものでは SUS 28、バフ研磨したものでは SUS 43 であった。

3.7 ステンレス鋼の表面処理の影響

図 3.13 から表面処理の影響がうかがわれるが、あらためて表面処理の影響を検討した結果を図 3.14 に示す。表面処理として、バフ研磨・バフ研磨のち酸洗い・バフ研磨のち焼鈍・エメリー 180 番研磨を試片 (SUS 27) にほどこし、同一電流密度 (0.72 mA/cm^2) を流して 42 日間腐食試験を行なったものである。焼鈍したものは、そうでないものより粒子が数倍に粗大化していた。

陽極側の試片では、焼鈍したもののがもっとも腐食が多く、つづいて酸洗い、研磨紙、バフ研磨の順であった。陰極側の試片では、腐食被膜のままであればあまり差がないが、被膜除去後の変化をみると、バフ研磨および酸洗いのものが、焼鈍およびエメリー研磨のものより大きな値を示している。なお図 3.13 にみられる表面処理の影響と比較すると、よく一致していることがわかる。

4. 考 察

4.1 温度の影響

高電流密度 (2.86 mA/cm^2) における銅の腐食で、試片の表面に前記のように独特の腐食模様を生じた。これは、つぎのように説明できる。55°C の試験では、試験水より電導性の高い腐食生成物が試片上にわずかにあがって、その部分に電流が集中し、それがしだいに流れ落ちていくにしたがい、縦のしまやくじゃくの羽根模様腐食が進行したと考えられる。(図 3.2, 3.3 参照) また、85°C の場合は、できた腐食生成物の多くが水中に分散してしまい、腐食により局部的にくぼみを生じたところとそうでないところの境界に電流が集まりやすく、面的に腐食がひろがっていったと考えられる。55°C の試験の結果で、 2.86 mA/cm^2 だけ極端に時間にたいする腐食の直線性が良かったのは、平均としては 2.86 mA/cm^2 であるが、じっさいは腐食生成物もりあがった小部分に電流が集中しており、その部分では 2.86 mA/cm^2 よりも高い電流密度で腐食が進行していたためであると考えられる。

4.2 周波数の影響

電極電流は、化学反応に使われる電流 (Faraday current) と、電極面の電気二重層の容量を充電するに必要な電流 (Condenser current) からなる。交流の周期が充電時間にくらべて十分に長いときは、電極電流の大部分はファラデー電流として流れる。したがって腐食に関与する。しかし周波数が高くなり、交流の周期が短くなるにしたがい、電極電流中の充電電流のしめる割合が大きくなり、すなわちファラデー電流のしめる割合が減少し、それによって腐食反応への影響も減ってくると思われる。

4.3 フィラメント状腐食生成物

銅の直流試験では、試片電極間にフィラメント状の黒色腐食生成物ができて短絡した。図 4.1 にピーカテスト (2.25 mA/cm^2 , 試片間距離 1 cm, 室温, 100 分後) でフィラメント状の腐食生成物が両電極間に生じている写真を示す。流した電流の大部分はこのフィラメント状腐食生成物を通りぬけてしまうらしく、腐食の進行は停止した。これら

のフィラメント状腐食生成物は非常にくずれやすく、したがって静電気力によってつながっているものと思われる。水中の腐食生成物の浮遊量が多いほど、また試片電極間の電圧が高いほどフィラメント状になりやすい。

G. V. Browning⁽⁵⁾らによれば、Cu-Cu 間のフィラメントは酸化銅であると述べている。また Fe-Fe 極間にもフィラメントの生成を認めている。著者の行なった板状の電極を用いステンレス鋼の直流試験では、フィラメント状腐食生成物は形成されなかったが、ステンレス鋼線

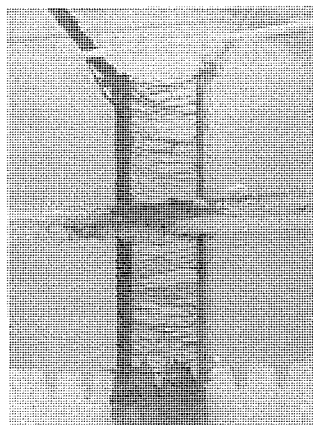
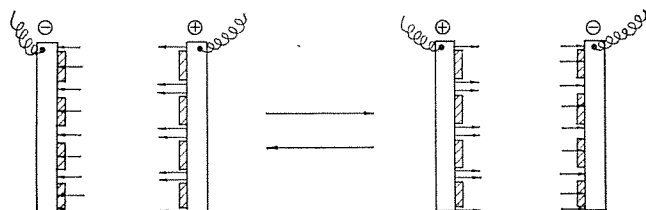


図 4.1 フィラメント状腐食生成物（銅直流ビーカテスト、左側は陰極側試片、右側は陽極側試片）
Filamentary corrosion products (Cu DC beaker test. The left side is cathode, the right side is anode).

表 4.1 電流効率 (%)
Current efficiency (%).

	期 間 (日)	0.71 mA/cm ² (%)	1.43 mA/cm ² (%)	2.86 mA/cm ² (%)
銅 交 流 55°C	4	5.9	4.2	4.4
	7	2.8	2.7	4.5
	15	2.1	1.9	4.5
銅 交 流 85°C	2	7.4	6.3	5.7
	4	6.2	5.5	5.9
	7	2.5	3.4	3.9
	15	2.3	2.9	3.8
	期 間 (日)	0.0125~0.05 mA/cm ² (%)		0.1 mA/cm ² (%)
銅 直 流 85°C	2	112~115		89
	期 間 (日)	0.32 mA/cm ² (%)	0.64 mA/cm ² (%)	1.28 mA/cm ² (%)
SUS 27 直 流 85°C	7	0.099	0.083	0.084
	41	0.058	0.063	0.072

なお、この値は2価のイオンとなると計算しているの、たとえば銅について1価のイオンになるとするとこの値の1/2になる。



- : 試料 (銅) Specimen (Copper)
- ▨ : 腐食生成物 (酸化銅) Corrosion product (Cu₂O)
- : 電流密度と電流の方向をあらわす (Current density and direction)

図 4.2 腐食試片上の電流分布（試片表面にできた腐食生成物の整流作用によって引き起こされる電流密度分布）
Current distribution by the rectification caused by corrosion products on the surface of the specimens.

2本の先端を接近させて電流を流した実験では、ゲル状の褐色腐食生成物が両極間に生ずるのがみられた。

4.4 電流効率

水をかいて金属間に電流を流すと、直流はもちろんのこと交流でも腐食に影響を与える。その理由は、電流が金属のイオン化に関与するからであり、その関与の度合として次式で定義する電流効率を用いるのが適当であろう。

$$\text{電流効率} = \frac{\text{腐食量を電氣量に換算した値}}{\text{通じた電氣量(交流では正の半サイクルのみ)}}$$

表 4.1 はこの定義にもとづいて実験結果を整理したものである。一般的傾向として、電流効率は時間の経過とともに低下する。この傾向は電流密度が小さいものほど大きい。また、電流効率は、試験期間の短い場合は電流密度の低いほうが大きい値を示し、試験期間が長い場合は電流密度の高いほうが大きい。これは、腐食量一時間曲線の直線性のよしあしに対応した傾向である。銅の腐食についての電流効率は、ステンレス鋼のそれにくらべ非常に大きい。とくに直流の場合は100%を越えている場合がある。この理由は、電流効率を2価のイオンが生ずるとして計算したが、実際は銅では1個のイオンも生ずるためであろう。

4.5 交流腐食の機構

交流が腐食に影響を与えることはよく知られているが、その原因として自己整流作用や交流中の直流成分などがあげられている。

これに対して J. F. Williams⁽⁴⁾は、電流波形の変化がなんらみられなかったことより、整流は起こってないとし、交流腐食は整流作用によるものではないと結論している。事実、著者がシンクロスコープにより波形を観察した結果でも、交流波形の変化はみられなかった。しかし波形に変化がなかったからといって整流作用がないと結論することはできない。著者は、次のような機構もありうると考える。図 4.2 に試片電極の状態を模式的に示した。一般に、亜酸化銅は試片に均一にはできない。したがって図示したように、電流の流れは腐食生成物（亜酸化銅）の整流作用によって乱される。そして、試片のある局部においては電流の出入に差が生じ、すなわち直流成分が含まれたことになり腐食に影響を与える。

もう一つの交流の腐食要因として、直流電解 (DC electrolysis) が考えられ、J. F. William は “attack occurring only the half of the cycle when the structure is unodic” とのべている。前述の交流腐食にたいする電流効率の定義はこの観点から行なったものである。これに関連し、著者はさらに次のような機構を考える、すなわち交流により金属の溶解や析出のくりかえしがおこるのであろうが、溶解した金属の一部は沖合にでてしまい析出に寄与しえなくなるであろうし、また析出した金属についても、それは素地の金属より活性であると考えられるから、それが溶存酸素などでただちに酸化をうけると考える。

5. む す び

純水中での銅およびステンレス鋼の流電腐食試験を行なった。交流および直流を流して、期間・電流密度・温度・周波数・銅種・前処理などの腐食への影響を検討した。おもな実験結果を図 5.1 にまとめた。また、主要な結論は次のとおりである。

(1) 交流 (60 Hz) 試験

銅の腐食は交流の影響を強く受け、電流密度が高いほど腐食がげしい。時間による腐食速度の変化については、腐食速度は一般に

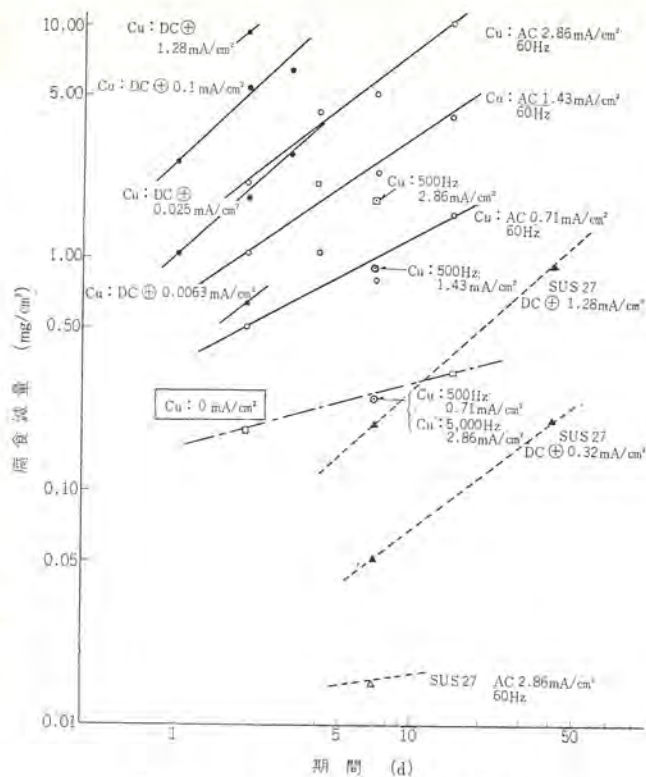


図 5.1 銅およびステンレス鋼の流電腐食
Corrosion of copper and stainless steel under the influence of electric current.

時間の経過とともに小さくなる。この傾向は低電流密度ほど大きく腐食量は時間とともに飽和する傾向を示す。逆に高電流密度ではこの傾向は小さく、電流密度が高いほど腐食は直線的に進行する。

ステンレス鋼は少し変色する程度で、腐食量はきわめて少なく、実用上は腐食しないと考えてよいであろう。

(2) 周波数の影響

周波数の増加とともに電流の腐食効果は減少し、5,000 Hz では電流の影響は認められなかった。なお腐食に影響を与えなくなる周波数は電流密度に依存し、低電流密度ではより低い周波数から腐食への影響がなくなる。

(3) 直流腐食試験

陽極側と陰極側で腐食の様子が異なる。銅では、フィラメント状の腐食生成物による短絡が起こらなければ、陽極側の試片は電流密度にも期間にも比例して非常に激しく腐食がすすむ。陰極側の試片は、腐食生成物が付着しているが、陰極的に防食されている。

ステンレス鋼では、銅のようなフィラメント状腐食生成物は生じない。陽極側の試片は、電流密度にほぼ比例した腐食減量を示すが銅にくらべ非常に少ない。陰極側には、少量の付着物が認められ、その一部はかなり強固に付着しているが腐食は認められなかった。

このほかに、ステンレス鋼の鋼種の相違および前処理の違いによる腐食量の差を検討したが、大きな違いは認められなかった。

本研究に際し、多くの示唆と協力をいただいた当社神戸製作所および中央研究所の関係の方々に厚く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 秦, 松岡, 川岡, 錦織: 三菱電機技報, 41, No. 12, 1,522 (昭 42)
- (2) C. E. Galimberti: Corrosion, 20, 150 (May, 1964)
- (3) F. O. Waters: Materials Protection, 1, No. 3, 26~32 (1962)
- (4) J. F. Williams: Materials Protection, 5, February, 52 (1966)
- (5) G. V. Browning, C. H. Holly, J. F. Quiylan: AIEE Transaction, 75, pt III, 791~794 (1958)

レーザ光散乱による微粒子の粒子測定

田 畑 則 一*・森 貢*

Size Determination of Fine Particles Measurement by Laser Beam Scattering and Their Application

Central Research Laboratory Norikazu TABATA・Mitsugu MORI

There are many questions for methods in current use as a collection efficiency measurement of air precipitators. An ideal one is that using monodispersed particles (uniform particle diameter) and a scattering photometer jointly. This article deals with its features. In this case discussion has been made in detail on a method to obtain a diameter of submicron particle by means of laser beam scattering as one of the most important problems to measure the particle diameter of aerosol. This method is to determine the diameter and its distribution of particles by comparing a theoretical scattering diagram with an actually measured one. In this the laser beam makes the measurement easy and precise by its characteristics. An example is given with DOP particles produced by a LaMer type generator. Also an example of applying the collection efficiency method using DOP particles to the basic study of electrostatic air filters is given with description of its usefulness.

1. ま え が き

エアフィルタや電気集じん器等除じん装置の性能試験には、粒子径のわかった微細なじんあい(塵埃)粒子が必要である。電気集じん器のような高性能な除じん装置の性能試験に必要なじんあいの粒子径としては1ミクロン以下のいわゆるサブミクロン粒子でなければならない。サブミクロン粒子というのは人体への影響が大きい点で環境衛生の面でも重要であり、また広くエロゾルサイエンスの分野で重要な粒子である。

現在除じん装置の試験じんあいとしてはエアフィルタ等、粗じんを除去対象にするものには、AFI粉じん(アリゾナの砂+カーボンブラック+コットンリント)やJIS 8種粉じん(関東ローム)を使い、集じん効率は重量法で測定されており、電気集じん器等微細じんを除去対象にするものは、大気中の浮遊じんを使い、集じん効率は汚染度法で測定されている⁽¹⁾。

筆者等は静電フィルタの開発に当り⁽²⁾、微細粉じんを対象にした集じん効率測定法を検討した結果、測定が容易であり、測定値の再現性が高く、また集じん効率何パーセントと称した場合に直感的イメージと一致することを条件とすると、可能な限り粒子径の均一な粒子群を標準じんあいとし、光散乱により粒子濃度を測定して集じん効率を求める方法が最良であるとの結論に達した。

この報告は集じん効率測定にサブミクロンの粒子径が均一な粒子を標準粒子として用いる意義を簡単に説明し、次いでHe-Neレーザ光の散乱による微粒子測定法と測定例について詳述し、最後に静電フィルタの集じん効率理論計算と実験との比較等への適用例を示して、その有利性を示した。

微粒子の粒子径測定に光散乱を用いる方法は従来より行なわれていたが、He-Neレーザ光の単波長、高エネルギー、好指向性、完全直線偏光という特長を利用することにより測定が非常に簡単にかつ正確に行なえるようになった。

2. 単分散粒子を使った集じん効率測定法

集じん効率は一般的に何パーセントと表示されるが、このパーセントとは何であろうか。除じん器入口側の空気中に含まれるじんあい量

と、出口側空気中に含まれるじんあい量の比が透過率であり、1より透過率を引いたものが集じん効率となるのはいうまでもないが、じんあい量の測定基準が問題である。たとえば粗じん用フィルタに適用される重量法ではじんあい量は重量で測定され、微細じんあい用除じん器に適用される汚染度法ではろ紙の汚染度で測定され、この汚染度の測定がろ紙の光反射で測定するものと、光透過で測定するものがあり、それぞれ条件により異なった値を示す。また空気中のじんあいを光散乱で測定する方法では光散乱量を基準にした集じん効率が求まることになる。

これらの測定法は同じ標準じんあい、たとえばAFI粉じん、あるいは同場所、同時点の大気じんを使って測定してもそれぞれ異なった値を示すうえに、じんあいまで異なると全く比較の方法がないのが現状である。しかしこれらの測定法の集じん効率もおのおの指標としての意味をもっている。

たとえば機械室の管理基準として重量法でじんあい量何mg以下とわかれば、外部空気のじんあい量を測定して、重量法で集じん効率何パーセント以上のフィルタを使えばよいというように利用できる。しかしこれも対象とするところのじんあいの種類・粒度分布が場所的・時間的に異なるので、統計的な意味しかもたない。大気じんを使用する汚染度法は最近都市の大気汚染が著しく、浮遊物の種類もバリエーションに富んでいるので、指標的な意味も大ききばらつきを含めて考えなければいけないであろう。

それでは除じん器個々の集じん性能とは何かというと、特定の粒子径の粒子に対する集じん効率を粒子濃度の比(したがって重量比にもなる)で示したものが妥当であろう。これは除じん器の入口および出口の空気中に含まれるじんあいを粒子径により区分して計数することによっても可能であるが、装置の関係より、標準粒子として均一な粒子径の粒子を発生させ、粒子濃度比を光散乱強度比で求める方が有利である。

粒子径を一定にすることによって集じん効率の意味が非常に明白になる。集じん効率何パーセントというときに一般の人は直感的に粒子径の均一なものを仮定しているのだから、じんあい量の比を重量比で求めるのか、体積比で求めるのか、光散乱強度比で求めるのかをいこうに気にとめないであろう。事実同質で均一粒子径の粒子で

は、粒子径の3乗に比例する量で測定しても、3乗に比例する量で測定してもすべて濃度比に等しくなるので問題はない。

かかる観点より筆者等は除じん器の研究開発に用いる集じん効率測定法として D. O. P. (dioctyle-phthalate) 粒子のできるだけ単分散 (粒子径均一) に近いものを発生させて標準粒子とし、散乱光強度比で濃度比を測定した。この方法は再現性がよく、測定が簡単で能率的である上に、わずかな性能差もよく検出できるので、研究開発用には必須の方法と思われる。

D. O. P. 粒子は LaMer 法で発生させ⁽⁴⁾、その粒子径と粒子径分散を測定するために、He-Ne レーザ光の散乱分布よりサブミクロン粒子の粒子径測定法を開発した。

3. レーザ光散乱による微粒子の粒子径測定

光散乱による粒子径測定に関する研究は古くから行なわれており、Owl 顕微鏡による Higher Order Tyndall Spectra 法 (HOTS 法)⁽⁴⁾ がよく知られている。この HOTS 法は白色光源を使い散乱光を肉眼で観測して相対的に赤色光が強く見えるバンドの現われる角度から粒子径を知るものである。この方法の欠点は、粒子径分布が非常に小さい場合にしか適用できないこと、測定に個人誤差ははいることである。

次に偏光法⁽⁴⁾といわれる測定法が最近使用されているが、これは散乱光測定面に平行な偏光と垂直な偏光の散乱光強度比を特定の散乱角で数点測定し、計算値との比較から粒子径を決定するものである。測定点の数をふやすことにより、粒子径に分布のある場合にも測定は可能であるが、測定がめんどうである。

ここで説明する方法は、ガスレーザの単波長、高エネルギー光源を用いて散乱角に対する散乱光強度を連続的に測定し、理論式より計算で求めた線図と比較して粒子径を決定するものである。

ガスレーザ光を散乱光測定的光源に使用する特長は、ガスレーザ光が単波長では最高のエネルギーをもつうえに、指向性がよいことと、直線偏光であることにより測定が精密、容易になることである。

集じん効率測定用の DOP 粒子について、単分散 (粒子径均一) の場合と対数正規分布をもつ多分散の場合の散乱光分布図を計算し、試作した LaMer 発生器より発生した DOP 粒子の粒子径と粒子径分布を測定した。測定原理と散乱光分布図の紹介を行ない、測定結果について述べる。

3.1 散乱光の理論計算

球形物体による平面波の散乱は古く Mie より理論的に解かれている⁽⁵⁾。しかし実際の計算は複雑であり、近年電子計算機の普及により種々の場合の計算結果が発表されてきた。

ここでも IBM 7090 により DOP 粒子による He-Ne レーザ光の散乱を散乱角 $2^\circ \sim 180^\circ$ の範囲について 2° 間隔で計算した。粒子は単分散の場合と対数正規分布をもつ場合についても計算した。以下、Mie 散乱式と対数正規分布について簡単にまとめ、数値計算法と計算結果について述べる。

3.1.1 Mie の散乱式

完全直線偏光単波長 (波長 λ) の入射光が半径 a 、屈折率 m の球形粒子により散乱される場合を考える。散乱角 θ は透過光方向より測定し、入射光線と散乱光測定点で作る平面を視平面と名づける。

I_{r0} : 視平面に垂直な偏光の入射光

I_r : 視平面に垂直な偏光の散乱光

I_{t0} : 視平面に平行な偏光の入射光

I_t : 視平面に平行な偏光の散乱光

$$\left. \begin{aligned} I_r &= |S_1(\theta)|^2 / k^2 r^2 \cdot I_{r0} \\ I_t &= |S_2(\theta)|^2 / k^2 r^2 \cdot I_{t0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで $S_1(\theta)$, $S_2(\theta)$ は Amplitude function と呼ばれる無次元の関数であり、 $|S(\theta)|^2 / k^2$ は単位入射光束に対して θ 方向の単位立体角内に散乱する散乱光束を意味する。 k は波数であり $2\pi/\lambda$ で与えられる。球形粒子に対する $S_1(\theta)$, $S_2(\theta)$ は Mie によって解かれ、たとえば Vande Hulst の "Light scattering by small particles" に詳述されている。

$$\left. \begin{aligned} S_1(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)/n(n+1) \\ &\quad \times \{a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)\} \\ S_2(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)/n(n+1) \\ &\quad \times \{b_n \pi_n(\cos \theta) + a_n \tau_n(\cos \theta)\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\left. \begin{aligned} k &= 2\pi/\lambda \\ x &= ka \\ y &= mx \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.3)$$

ただし、 a_n , b_n は x , y のみの関数で θ には無関係である。

$$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{\Psi_n'(y)\Psi_n(x) - m\Psi_n(y)\Psi_n'(x)}{\Psi_n'(y)\zeta_n(x) - m\Psi_n(y)\zeta_n'(x)} \\ b_n &= \frac{m\Psi_n'(y)\Psi_n(x) - \Psi_n(y)\Psi_n'(x)}{m\Psi_n'(y)\zeta_n(x) - \Psi_n(y)\zeta_n'(x)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.4)$$

ここで、 $\Psi_n(x)$, $\zeta_n(x)$ は Riccati-Bessel 関数である。

散乱光の絶対値ではなく、散乱光強度の角度分布にのみ着目する場合は $|S_1(\theta)|^2$, $|S_2(\theta)|^2$ を θ の関数として求めればよい。 I_1 , I_2 も無次元数である。

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= |S_1(\theta)|^2 \\ I_2 &= |S_2(\theta)|^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.5)$$

3.1.2 対数正規分布と多分散粒子による散乱

蒸発凝縮により発生する粒子の粒子径分布としては対数正規分布が適当である⁽⁶⁾。対数正規分布とは横軸 (粒子径座標) を対数尺とした座標上で正規分布曲線になる分布であり、密度関数は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} f(a)da &= \frac{1}{\log \epsilon \sigma_g \sqrt{2\pi a}} \\ &\quad \times \exp \left\{ -\frac{(\log \epsilon a - \log \epsilon a_g)^2}{-2 \log \epsilon \sigma_g^2} \right\} da \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.6)$$

ただし、 a_g は幾何平均半径、 σ_g は幾何標準偏差であり、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} a_g &= (a_1^{n_1} a_2^{n_2} a_3^{n_3} \dots a_m^{n_m})^{1/(n_1+n_2+n_3+\dots+n_m)} \\ \log \epsilon \sigma_g &= \left\{ \frac{\sum n_i (\log \epsilon a_i - \log \epsilon a_g)^2}{\sum n_i} \right\}^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.7)$$

完全単分散の場合は σ_g が 1.0 となる。図 3.1 に分布の例を示す。対数正規分布をもつ多分散粒子群により散乱される光を平均し、単一粒子からの散乱に換算すると 3.1.1 節と同じ記号を用いて次式となる。

$$\left. \begin{aligned} I_r &= I_{r0} \cdot I_1 / k^2 r^2 \\ I_t &= I_{t0} \cdot I_2 / k^2 r^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \int_0^\infty |S_1(\theta, a)|^2 f(a) da \\ I_2 &= \int_0^\infty |S_2(\theta, a)|^2 f(a) da \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.9)$$

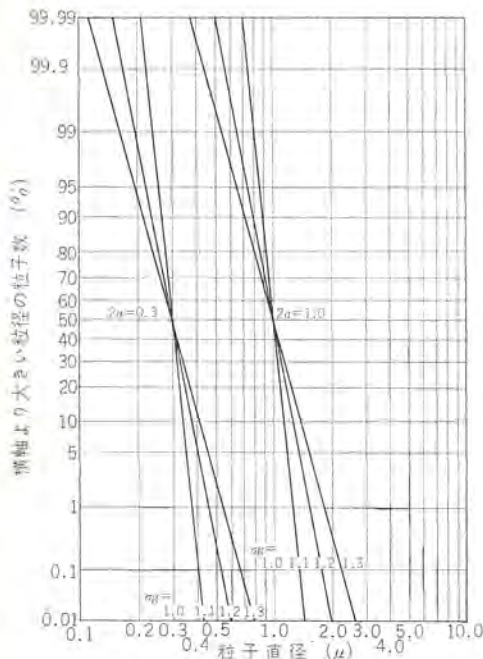


図 3.1 粒子径対数正規分布
Particle size distribution of logarithmic normal type.

表 3.1 粒子径対数正規分布
Particle size distribution of logarithmic normal type.

粒子半径分布範囲	代表粒子半径	分布 %
$\infty \sim a_g \times \sigma_g^{3.25}$	$a_g \times \sigma_g^{3.5}$	0.06
$a_g \times \sigma_g^{3.25} \sim a_g \times \sigma_g^{2.75}$	$a_g \times \sigma_g^{3.0}$	0.24
$a_g \times \sigma_g^{2.75} \sim a_g \times \sigma_g^{2.25}$	$a_g \times \sigma_g^{2.5}$	0.92
$a_g \times \sigma_g^{2.25} \sim a_g \times \sigma_g^{1.75}$	$a_g \times \sigma_g^{2.0}$	2.79
$a_g \times \sigma_g^{1.75} \sim a_g \times \sigma_g^{1.25}$	$a_g \times \sigma_g^{1.5}$	6.55
$a_g \times \sigma_g^{1.25} \sim a_g \times \sigma_g^{0.75}$	$a_g \times \sigma_g^{1.0}$	12.07
$a_g \times \sigma_g^{0.75} \sim a_g \times \sigma_g^{0.25}$	$a_g \times \sigma_g^{0.5}$	17.50
$a_g \times \sigma_g^{0.25} \sim a_g \times \sigma_g^{0.25}$	a_g	19.74
$a_g / \sigma_g^{0.25} \sim a_g / \sigma_g^{0.75}$	$a_g / \sigma_g^{0.5}$	17.50
$a_g / \sigma_g^{0.75} \sim a_g / \sigma_g^{1.25}$	$a_g / \sigma_g^{1.0}$	12.07
$a_g / \sigma_g^{1.25} \sim a_g / \sigma_g^{1.75}$	$a_g / \sigma_g^{1.5}$	6.55
$a_g / \sigma_g^{1.75} \sim a_g / \sigma_g^{2.25}$	$a_g / \sigma_g^{2.0}$	2.79
$a_g / \sigma_g^{2.25} \sim a_g / \sigma_g^{2.75}$	$a_g / \sigma_g^{2.5}$	0.92
$a_g / \sigma_g^{2.75} \sim a_g / \sigma_g^{3.25}$	$a_g / \sigma_g^{3.0}$	0.24
$a_g / \sigma_g^{3.25} \sim 0$	$a_g / \sigma_g^{3.5}$	0.06

なお、単分散、多分散の粒子群による散乱光を単一粒子が独立に存在する場合の散乱光の和として扱うが、いま、対象にしている蒸発凝縮法による粒子群は密度が最高 10^7 個/cm³ のオーダーであるから、サブミクロン径の粒子では粒子間距離が粒子径の数 10 倍以上になり、この仮定はじゅうぶん満足される⁽⁷⁾。

3.1.3 数値計算

数値計算を行なう場合に問題となる点は、 $S_1(\theta, a)$, $S_2(\theta, a)$ にあられる無限級数と、多分散の場合に I_1 , I_2 に含まれる粒子径についての積分である。

無限級数の必要項数は cut & try で求めたが、粒子径がサブミクロンの領域では収束が速く、数項から十数項でじゅうぶんな精度が得られた。

粒子径分布による積分項は対数正規分布の場合、表 3.1 のように局在して分布している場合に置きかえて近似した。

計算は IBM 7090 により、プログラムは粒子径と粒子の屈折率、光の波長をインプットすると散乱光角度分布がアウトプットされるように作った。

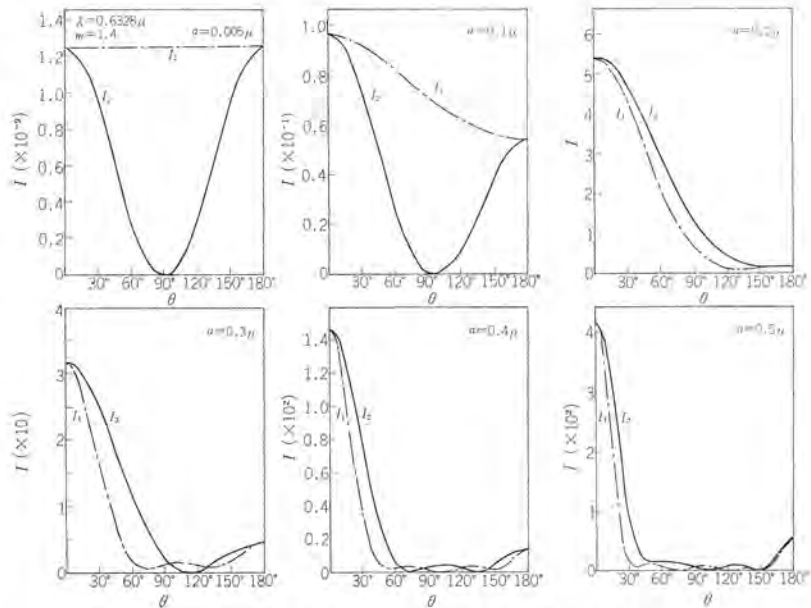


図 3.2 単分散粒子による散乱図 (理論計算)
Scattering diagram for monodispersed particles (theoretical).

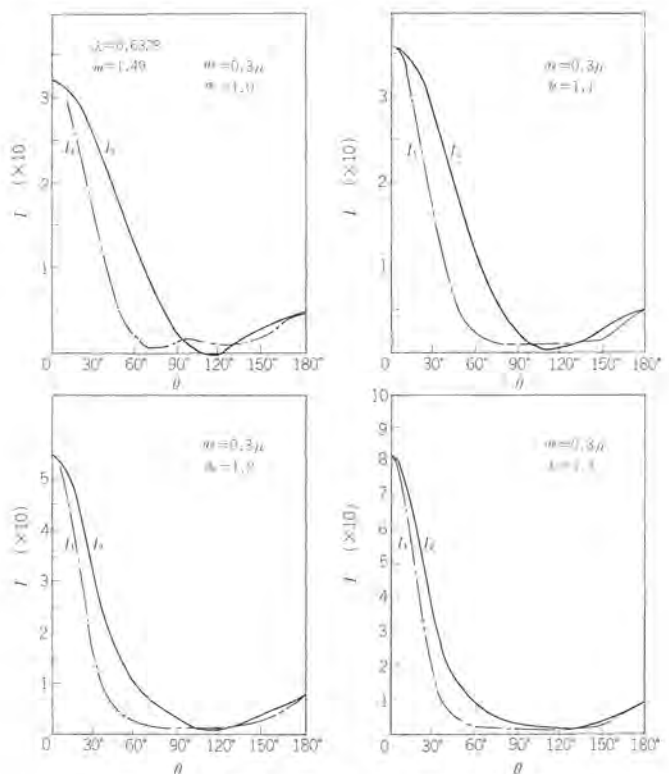


図 3.3 多分散粒子による散乱図 (理論計算)
Scattering diagram for polydispersed particles (theoretical).

3.1.4 計算結果

DOP 粒子による He-Ne レーザ光の散乱角度分布を計算した。DO P の屈折率は $m=1.49$ 、He-Ne レーザ光の波長は $\lambda=0.6328 \mu$ である。式 (3.3) から明らかなように、散乱式の独立変数は波数 k と粒子半径 a の積 $x=2\pi a/\lambda$ と屈折率 m であるが、以下に示す図表では波長を 0.6328μ に固定し、粒子半径を変数とした。

図 3.2 に単分散粒子の場合の例として、粒子半径が 0.005μ , 0.1μ , 0.2μ , 0.3μ , 0.4μ , 0.5μ の場合の散乱光分布図を示す。

また図 3.3 には多分散粒子の場合の例として、幾何平均粒子半径が 0.3μ で幾何標準偏差が 1.0, 1.1, 1.2, 1.3 の場合の散乱光分

布図を示す。

粒子径が光の波長に比べてじゅうぶん小さいときには Rayleigh 散乱と呼ばれ、散乱粒子が球形の場合には散乱光角度分布は次式で表わされるような対称形になる。

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 x^6 \\ I_2 &= \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 x^6 \cos^2 \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.10)$$

図 3.2 の粒子径 0.005μ の場合はこれに相当している。粒子径が 0.05μ 以下の粒子ではほとんどの形に近い。

粒子径が光の波長と同程度では前方（透過光の方向）散乱の粒子径による変化が激しいので、これを使って粒子径が決定できる。粒子径が $0.1 \sim 0.5 \mu$ がこの範囲に相当している。また、粒子半径が 0.4μ くらいより大きくなると散乱光に極大値が現われるので、その角度から粒子径を決めることも可能である。どの場合も I_1 と I_2 の両者を使うと情報が多くなり確実が期せる。

3.2 散乱光分布測定

3.2.1 測定装置と方法

光源としては波長 0.6328μ の He-Ne ガスレーザ、出力数 mW のものを用いた。発振波長の近傍の波長光は存在しないが、弱い青色光が存在したので 0.6328μ 干渉フィルタを通して 0.6328μ の単波長のみを取り出した。

散乱光測定装置の概略を図 3.4 に示す。試料の受光部は円筒を上下より間隔をおいて突き合わせ、下部より排気ポンプで排気し、

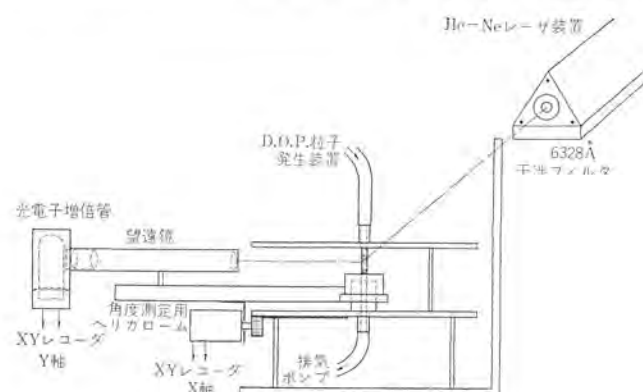


図 3.4 散乱光測定装置
Measuring apparatus for light scattering.

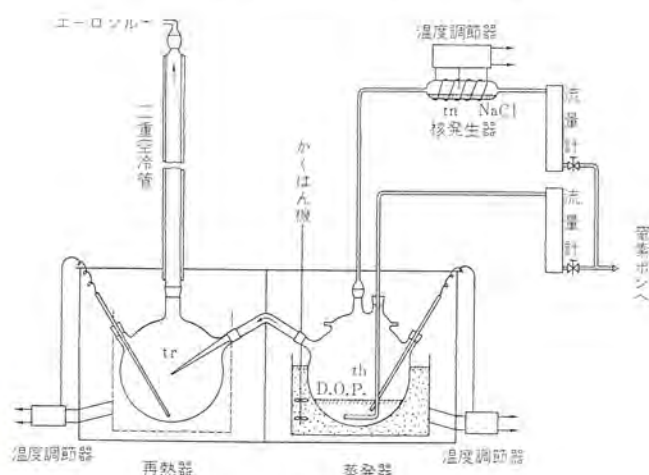


図 3.5 LaMer 式微小粒子発生器
LaMer type fine particle generator.

上部より DOP 粒子を含む エーロゾル を送る。円筒の存在しない部分も エーロゾル は円柱状になって流れ、その円柱にレーザ光を照射することにより、器壁からの散乱などに妨害されることなく散乱光強度を測定することができた。円柱の直径は約 6 mm、レーザ光は直径 4 mm の円形で円柱の中心を照射した。

散乱光は口径 26 mm の望遠鏡の焦点を無限遠に合わせ、散乱部より 130 mm の位置に対物レンズを置いて集光し、光電子増倍管 #7305 で測光した。

望遠鏡のついているアームはエーロゾル通過筒を中心として回転する。アームの位置の検出は、アームに固定した可変抵抗器を台板に沿ってスライドさせ、角度を電気抵抗に変換して行なう。

記録は XY レコーダを使用し、角度を X 軸に散乱光強度を Y 軸に入れる。アームを回転させることにより散乱光の角度分布が記録できる。

散乱光は弱いので測定に際しては光シールドに留意した。

この測定法により満足な測定精度がえられることを確かめている。

3.2.2 微粒子発生装置

粒子径の測定に使用した微粒子は、図 3.5 に示すような LaMer 発生器よりの DOP 粒子である。発生器の動作を簡単に説明すると、蒸発器内の DOP は液内を上昇する窒素とともに蒸発し、一方、核発生器を通ってきた NaCl 微細粒子（核）を含む窒素と混じって再熱器へ送られる。再熱器は蒸発器より 20°C 高温に保たれ、再熱器内では DOP 蒸気と核が一緒にされた後、徐々に二重空冷管に送られる。二重空冷管内では DOP 蒸気が徐冷され、核のまわりに凝縮して DOP の液体粒子が発生する。粒子の大きさは蒸発器、再熱器の温度と窒素ガスの流量で決まり、粒子径分布を均一にする（単分散にする）には蒸発器、再熱器の温度を定常にし、温度分布を一様にする必要と、二重空冷管内の流れを一様にする必要がある。

図 3.6 に試作した DOP 粒子発生装置の外観図を示す。蒸発器の温度は $100 \sim 140^\circ\text{C}$ で使用し、温度が高くなると粒子径は大きくなる。

3.2.3 測定結果

試作 LaMer 発生器より発生した粒子による散乱光強度分布を図 3.7～3.8 に示す。

図 3.7 と図 3.8 はともに蒸発器温度 115°C 、再熱器温度 135°C 、

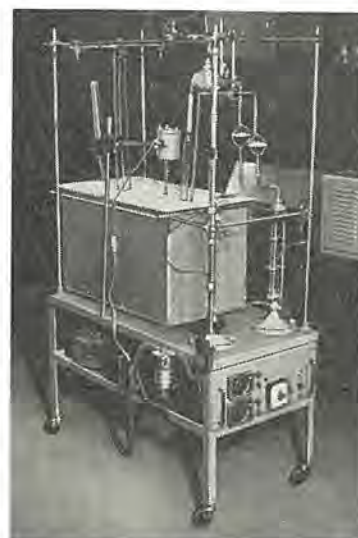


図 3.6 LaMer 式 DOP 粒子発生器
LaMer type DOP particle generator.

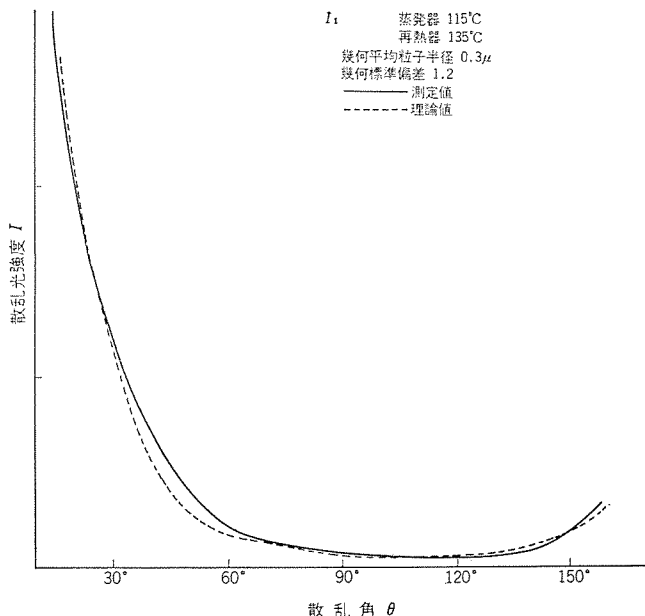


図 3.7 散乱光強度測定結果 (1)
Measuring result of scattered light intensity (1).

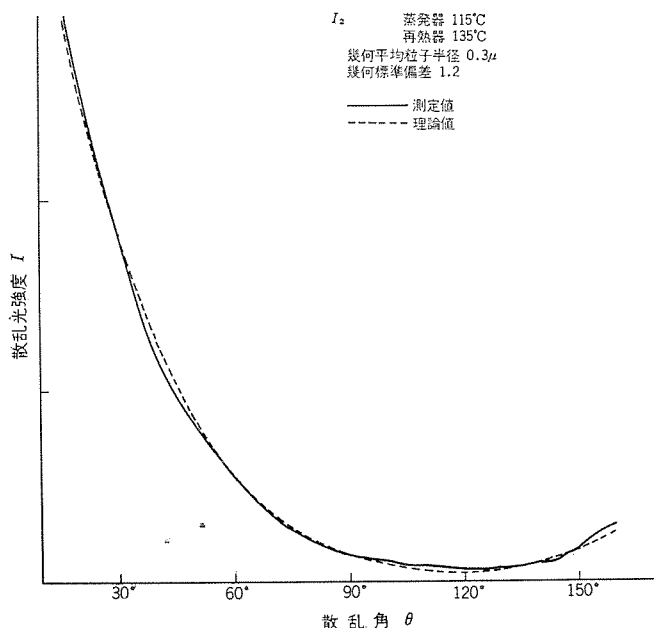


図 3.8 散乱光強度測定結果 (2)
Measuring result of scattered light intensity (2).

室素流量はおのおの 1 l/min, 核発生器 450°C の場合の I_1 , I_2 であり, 破線で示した曲線は幾何平均粒子半径が 0.3μ , 幾何標準偏差が 1.2 の対数正規分布形の分散をもつ粒子群についての理論計算結果である。 I_1 と I_2 もに相当よく一致しているのを, 平均半径, 分散ともに上の値とみなしてよいと思われる。なお, 測定値と計算値は散乱角 30° で一致させて形を比較しただけで, 粒子の全数を測定していないので絶対値の比較を行なうことはできなかった。

I_1 は視平面に垂直な偏光の入射光に対する視平面に垂直な偏光の散乱光を示すものであり, 球形粒子では入射光の偏光面に対して直角な偏光面をもつ散乱光成分が存在しないことが理論的にわかっているが, 実測の場合にも測光用の望遠鏡対物レンズの前に検光子を置き, 直角な偏光面をもつ散乱光が存在しないことを確認した。DOP のような液体粒子では球形とみなしうるのは当然のことであるかも知れない。

4. 静電フィルタ基礎試験への適用

単分散に近い DOP 粒子を使った集じん効率測定法の有効な適用例として, 静電フィルタの研究開発について述べる。研究開発時におけるモデルの集じん効率測定法としては, 測定値に統計的なばらつきがはいる余地が少なく, 再現性のよいこと, および集じん理論と実験との比較が容易であることが必要な条件とされる。既知の性質と粒子径をもつ粒子を標準粒子としている。ここで述べた方法は上の条件を満足している。なお単分散粒子を使う集じん効率測定法は化学工学の分野における繊維の集じん研究において広く使われている⁽⁸⁾。

4.1 静電フィルタの集じん理論と実験の比較

静電フィルタの集じん機構はイオン化部で荷重されたじんあい電界下に置かれた汙材内で, ろ材繊維に集中する電界によって繊維に付着集じんされるものである。このフィルタの集じん効率を次のように, 単独繊維の集じん断面比に分解し考察する。

いま気流と直角におかれた単独円柱繊維の集じん断面比を図 4.1 のとおり定義すると, フィルタの集じん効率は次式で与えられる。

$$\eta = 1 - \exp\{-2\beta\eta_s L / \pi r_f (1 - \beta)\} \quad (4.1)$$

ここで β はフィルタの充填率, L はフィルタ厚さ, r_f は繊維半径である。この式は繊維間の干渉効果を見逃した場合のフィルタの集じん効率 η と単独繊維の集じん断面比 η_s の関係を示すものである。

次に単独繊維の集じん断面比について考えると, いま平等電界中に置かれた単独繊維に, 荷電された質量 m , 半径 a の微粒子が近づく場合の運動は次の微分方程式によって示される。

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \frac{6\pi a \gamma}{c} (\vec{v} - \vec{u}) \quad (4.2)$$

ここで \vec{u} は気流速, γ は気体の粘性係数, c はカニガムの補正係数であり, \vec{F} は外力で, 静電フィルタでは繊維に集中する電界と粒子

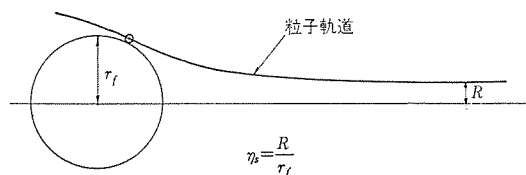


図 4.1 単独繊維の集じん断面比
Collection cross section of a single fiber.

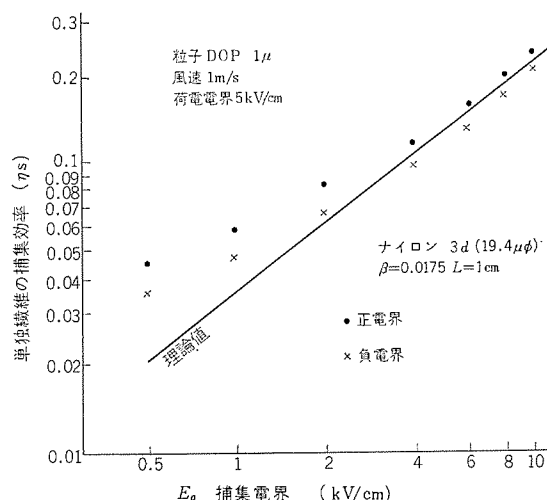


図 4.2 ナイロン(3d) 繊維の捕集効率
Collection efficiency of a nylon fiber.

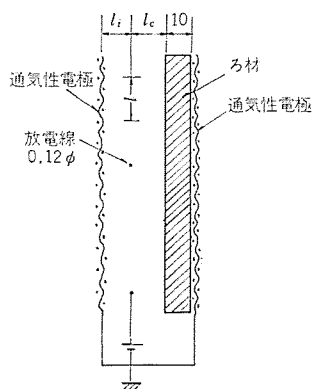


図 4.3 フィルタ構成
Filter construction.

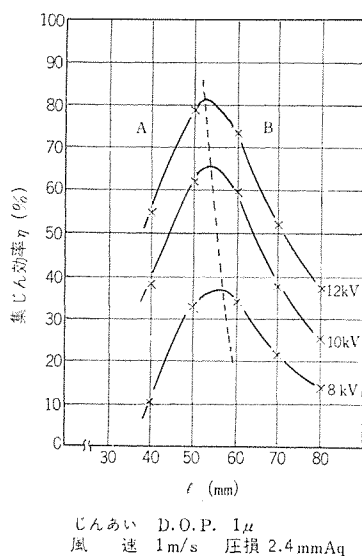


図 4.4 放電線間隔特性
Collection efficiency vs. discharge wire gap.

の電荷によるクーロン力がこれに相当する。

この式 (4.2) は気流速 u , カウロン力 \vec{F} が複雑な形をしているので解析的に解くことは不可能であるが、電子計算機を使い数値計算により粒子の軌道が求まり、 η_s を求めることができる。

図 4.2 は 1μ の DOP 粒子に対する 3 デニルナイロン 繊維よりなるフィルタの η_s を理論値と実験値と比較したものである。理論計算では η_s が捕集電界 E_0 の約 0.8 乗に比例するという特長的な結果が得られたが、実験値も高電界部では理論値と同様に電界 E_0 の約 0.8 乗に比例しているのがわかる。ここで使用した DOP 粒子は完全な単分散粒子ではなく分散をもつが、大部分は理論計算で仮定した粒子と同等とみなしてよく、理論と実験も直接比較することが可能である。

4.2 空調用静電フィルタの構造決定

空調用静電フィルタとしてのフィルタ構成を図 4.3 に示す。この方式のフィルタはイオン化部と集じん部が一体化しているので設計に留意しなければならない。図 4.3 の l_i と l_e を一定に保ち、 l を変化させた場合の集じん効率 η を印加電圧をパラメータとして図 4.4 に示す。破線はおおのの曲線の最高値を結んだもので、 l の最適値である。このように l の変化に対する集じん効率の変化が再現性よ

く、明瞭にあらわれるのも、粒子径の均一な粒子を使ったためであり、大気じん等を使った測定法ではばらつきと変化分の圧縮により非常にあいまいなものとなる。再現性がよいということは研究開発には最も重要な要素である。

なおこの空調用静電フィルタは開発が終り、生産販売を開始している。

5. む す び

除じん装置の集じん効率測定法として単分散粒子を標準粒子として、光散乱法で粒子濃度を測定する方法の利点を述べ、その際最も重要な粒子径の測定法として、レーザ光散乱による微粒子の粒子径測定について詳述した。またこの集じん効率測定法を静電フィルタの研究開発に適用した例を示した。要点を次に列記する。

(1) 単分散粒子（粒子径均一）を標準粒子とした集じん効率測定法は再現性がよく、ばらつきが少なく、集じん効率の標示が直感的イメージと一致する点ですぐれた方法であり、除じん装置の研究開発にはひつすのものと思われる。

(2) サブミクロン径の粒子に対する粒子径測定法として、He-Ne レーザ光の散乱光角度分布を測定して粒子径を決定する方法は、単分散粒子、多分散粒子（対数正規分布）の両方に適用でき有用な方法である。それはレーザ光の単波長高エネルギー性、直線偏光性、好指向性による。

(3) LaMer 形 DPO 粒子発生器を試作し、発生する粒子の粒子径と分散度を測定した。この DOP 粒子を静電フィルタの開発等、除じんの研究開発の際に標準粒子として使用し、集じん効率測定が容易に精度よく行なわれた。

除じん器の集じん効率測定法として現在行なわれている方法は必ずしも満足なものとはいわれず、ここで述べた単分散粒子を使った方法がやがては本命になるものと思われる。現在固体の単分散粒子発生法も多く研究されており、より完全で容易な単分散粒子の発生法も開発されるであろう。

終わりに、微粒子発生法、測定法について種々ご指導いただいた京都大学工学部化学工学教室 井伊谷鋼一教授に、またレーザ光散乱についてご指導いただいた大阪大学工学部電気工学科山中千代衛教授に感謝致します。

参 考 文 献

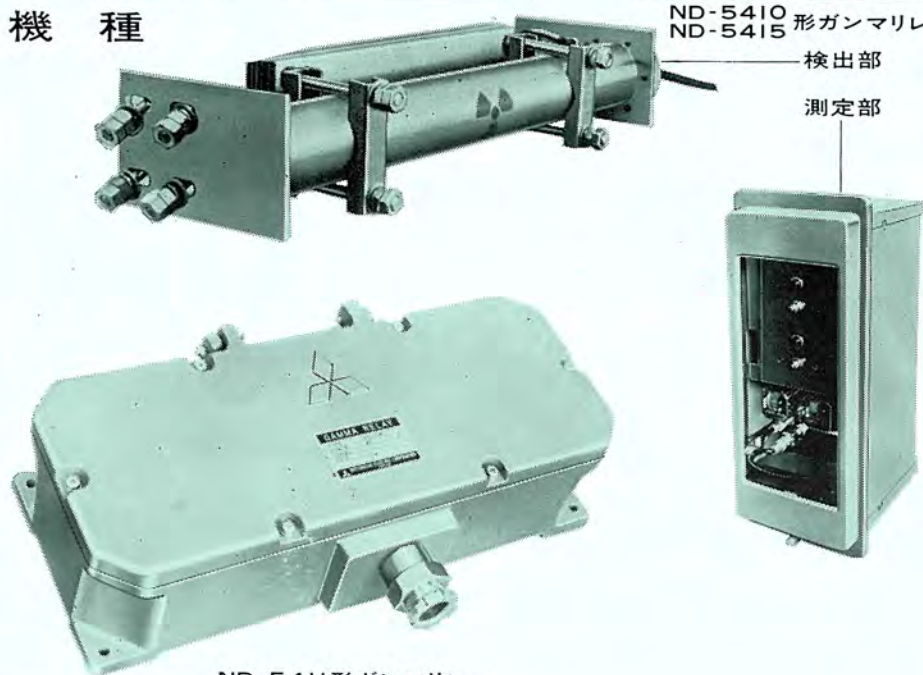
- (1) 今野：空気調和と冷凍 4, p.47 (昭 39)
- (2) 田畑, 森, 酒井, 平山：三菱電機技報 41, p.1190 (昭 42)
- (3) C. N. Davies : Aerosol Science, p.6(1966), Academic Press
- (4) C. N. Davies : Aerosol Science, p. 315 (1966), Academic Press
- (5) H. C. Van de Hulst : Light Scattering by Small Particles, p.114 (1957), John Wiley & Sons
- (6) P. A. White & S. E. Smith : High-Efficiency Air Filtration, p.19 (1964), Butterworth
- (7) H. C. Van de Hulst : Light Scattering by Small Particles, p.5 (1957), John Wiley & Sons
- (8) たとえば牧野, 井伊谷：化学工学 32, p.99 (昭 43)

最近登録された当社の特許

名 称	登 録 日	登 録 番 号	発 明 者	関 係 場 所
並行多回線送電線の環流電流消去用送電線模擬回路	42-12-11	506158	三 上 一 郎	神戸製作所
話中呼処理方式	42-12-11	506159	前田良雄・平沢茂一	中央研究所
励磁機の切換方式	42-12-11	506160	齋藤 豊・久松章三 長沢保明	神戸製作所
ゲージ巻上機着床位置自動調整装置	42-12-26	507355	木 内 修	長崎製作所
巻上機着床位置調整装置	42-12-26	507356	木 内 修	長崎製作所
搬送保護継電装置	42-12-26	507610	北浦孝一	神戸製作所
搬送保護継電装置	42-12-26	507611	北浦孝一	神戸製作所
再閉路装置	42-12-26	507612	北浦孝一	神戸製作所
遠隔操作送受信装置	42-12-26	507614	片山泰一・池上和生	通信機製作所
誘導電動機速度制御装置	42-12-26	507616	赤松昌彦	中央研究所
恒温冷蔵装置	42-12-26	507608	木下忠男	静岡製作所
記憶装置の磁心選択装置	42-12-26	507609	阪尾正義	鎌倉製作所
内燃機関用平均有効圧力測定装置	42-12-26	507613	多田智彦	鎌倉製作所
有機高誘電体	43- 1-16	508434	伊藤公男・小野 博	中央研究所
電気制動装置付電動機	43- 1-16	508437	森田 清・加藤道明	名古屋製作所
電気掃除機	43- 1-16	508435	河 合 登	群馬製作所
再閉路継電装置	43- 2- 5	510273	古谷昭雄	神戸製作所
限時距離継電装置	43- 2- 5	510274	三上一郎・亀川 勇	神戸製作所
限時距離継電装置	43- 2- 5	510275	三上一郎	神戸製作所
レーダ受信方式	43- 2- 5	510276	近藤輝夫	通信機製作所
電波方向探知方式	43- 2- 5	510277	渡 辺 優	通信機製作所
電磁制動装置	43- 2- 5	510278	村田俊哉・高橋利之	姫路製作所
直流電動機速度制御装置	43- 2- 5	510279	小原太郎・大藤孝雄	伊丹製作所
消弧板	43- 2- 5	510280	井上武男・白沢 宗	中央研究所
信号混触検出装置	43- 2- 5	510281	山崎英蔵	中央研究所
避雷器の切離装置	43- 2- 5	510282	岡田昌治・永井信夫 三住日出夫	伊丹製作所
洪水計算装置	43- 2- 7	508436	桑 田 博	鎌倉製作所
電動機制御装置	43- 2- 8	510490	細 野 勇	伊丹製作所
アドレス選択装置	43- 2- 8	510491	倉橋浩一郎	中央研究所
燐化物結晶の製造方法	43- 2- 8	510492	奥 泰二・八原俊彦	北伊丹製作所
超電導体装置	43- 4-15	515582	河 合 正・岩本雅民	中央研究所
自動車の駆動車輪固定確認装置	43- 4-15	515583	瀬原田三郎	稲沢製作所
電気掃除機	43- 4-15	515584	武井久夫・加藤 悟	群馬製作所
連結機の制御装置	43- 4-15	515638	浅野哲正	姫路製作所
ディーゼル電気車用発電装置	43- 4-16	518294	木 内 修	長崎製作所
インバータの制御装置	43- 4-19	516120	吉田太郎・篠原宇一 宮崎 治	名古屋製作所
インバータ装置	43- 4-19	516121	大野栄一・赤松昌彦	中央研究所
弁制御装置	43- 4-19	516122	木 内 修	長崎製作所
極値表示装置	43- 4-19	516123	桑 田 博	鎌倉製作所
反射係数測定器	43- 4-19	516124	喜連川 隆・白幡 潔	鎌倉製作所
プログラム信号発生装置	43- 5- 7	517502	山崎英蔵	中央研究所
電気分解用電極装置	43- 5- 9	517875	秦 卓也・松岡宏昌	中央研究所
多入力位相関係検出装置	43- 5- 9	517876	古谷昭雄	神戸製作所
電磁開閉器	43- 5- 9	517877	有木智美・吉田太郎	名古屋製作所
水冷装置	43- 5- 9	517878	秦 卓也・松岡宏昌	中央研究所
扉付箱体	43- 5- 9	517879	岡野新也	神戸製作所
熱感応抵抗素子用ガラス状抵抗材料	43- 5- 9	517880	林 次郎・平野昌彦	中央研究所
2進化10進減算計数回路	43- 5- 9	517881	茂 木 充	北伊丹製作所
巻取機用電磁ブレーキの制御装置	43- 5- 9	517883	浅野哲正	姫路製作所
半導体装置の製法	43- 5- 9	517884	伊藤昭子・近藤明博 岩田泰昌	北伊丹製作所
無線電話通信装置	43- 5- 9	517885	井上 昭・中村信弘	通信機製作所
自動消磁回路	43- 5- 9	517886	植竹勝人・西谷芳久	京都製作所

非接触で検出 ON-OFF制御に レベル検出に 簡単に使用できます

機種



ND-5410 形ガンマリレー
ND-5415 形ガンマリレー

検出部
測定部

ND-5411 形ガンマリレー

ND 5411 形

検出部 } 一体
測定部 }

S --- ガンマ線源 --- D --- ON-OFF 信号
ガンマリレー

ND 5410 形

検出部 1 台
測定部 1 台

S --- D --- 検出部
ケーブル ON-OFF 信号
M --- 測定部

ND 5415 形

検出部 2 台
測定部 1 台

S --- D --- 検出部
ケーブル ON-OFF 信号
M --- 測定部
検出部

用途

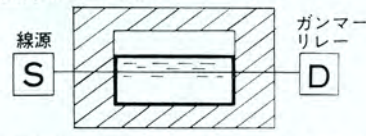
- タンクレベル、サイロレベル検出
- コンベア上の製品や材料の検出、計数
- 液体、粉体、粒体などのレベル検出

特長

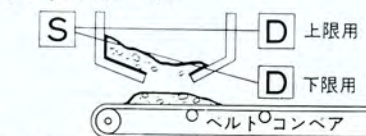
- 高温、高圧腐蝕物体などを非接触で測定できます。
- 塵埃の多い悪環境の所で使用できます。
- 非接触で可動部分なく信頼性が高い。
- 回路はすべてシリコンランジスタおよびICを使用しています。
- コンパクトで放射線に対する安全を十分考慮しています。

使用法

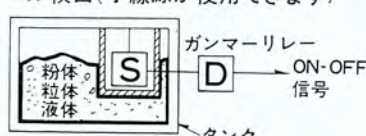
● 壁厚が厚いばあい




● ホッパーのレベル



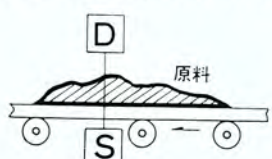
● レベル検出 (小線源が使用できます)



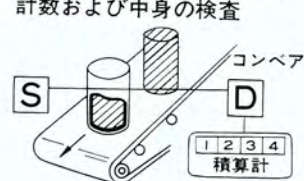
● パイプおよびシュート内原料のつまり検出



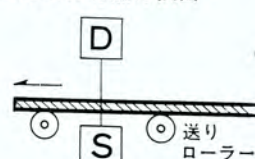
● コンベア上の原料材料の有無



● コンベア上の製品の個数の計数および中身の検査



● 板などの有無の検出



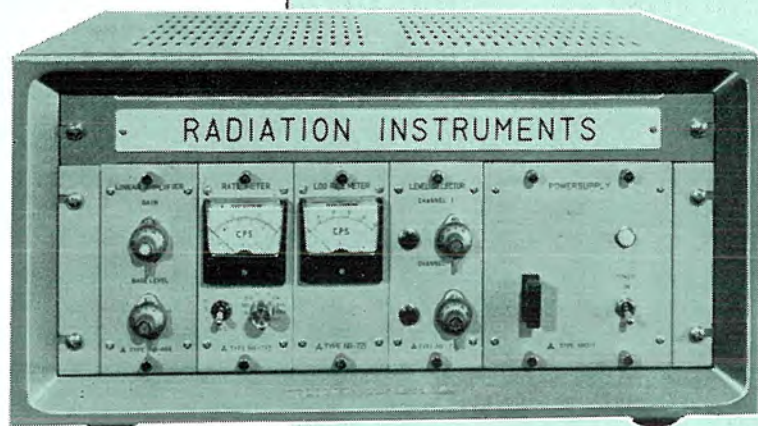
三菱ガンマリレー

● お問合せは……三菱電機株式会社電力部 / 東京都千代田区丸の内2の12 ☎100 / 三菱電機ビル / 東京03<212>6111 大代表
またはもよりの各営業所へ / 大阪06<312>1231 / 名古屋052<561>5311 / 福岡092<75>6231 / 札幌0122<26>9111 / 仙台0222<21>1211 /
富山0764<31>8211 / 広島0822<47>5111 / 高松0878<51>0001 / 新潟0252<45>2151

今日もあなたと共に

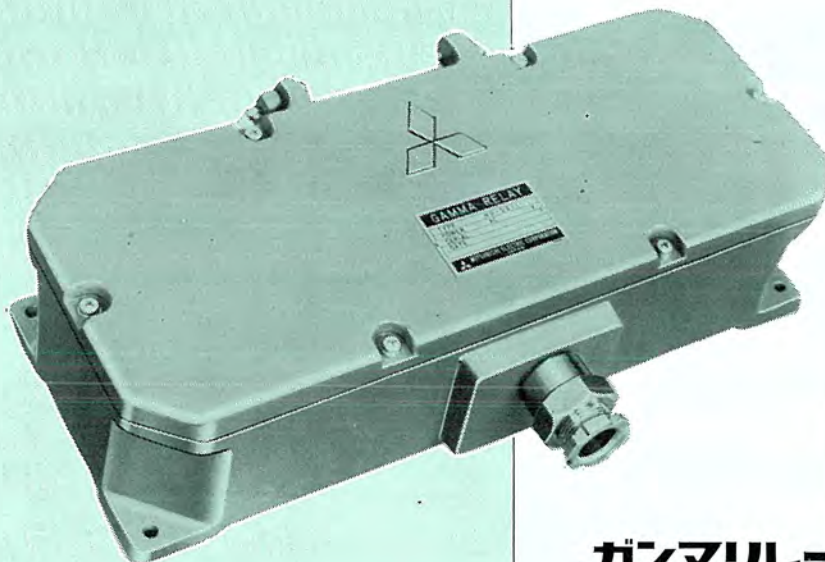


汎用の放射線測定器をはじめ 各種の放射線モニタ、工業応用機器を供給しております



放射線測定器

- 前置増幅器
- 比例増幅器
- 線形計数率計
- 対数計数率計
- レベルセレクト
- スケーラ
- 波高分析器
- 高压安定化電源
- 低压安定化電源
- BF₃ 計数管
- シンチレーション検出器
- GM検出器
- 大線量計
- 放射線モニタ
- ガンマリレー
- レベル計
- 中性子水分計
- 重油カロリーメータ
- いおうメータ
- 密度計
- 原子炉計装機器



ガンマリレー

特長

汎用放射線測定器は、各種のものがプラグイン式でユニット化されています。ユニットの組合せにより種々の装置に応用できます。これらの機器は中性子回折装置の測定器として米国へも輸出されています。

回路はすべてシリコントランジスタ化され、また一部IC化していますので、環境に強く信頼性も一段と向上しています。

三菱放射線計測装置

今日もあなたと共に



●お問合せは……三菱電機株式会社電力部/東京都千代田区丸の内2の12番100/三菱電機ビル/東京03<212>6111大代表
またはもよりの各営業所へ/大阪06<312>1231/名古屋052<561>5311/福岡092<75>6231/札幌0122<26>9111/仙台0222<21>1211
富山0764<31>8211/広島0822<47>5111/高松0878<51>0001/新潟0252<45>2151

30 cm 半径セクタ形二重集束ベータ線スペクトロメータ

秋葉 稔光*・小浜 太郎*

上田 孝寿*・磯貝 文彦*

長田大三郎**・島 幸 弘**・岸森 真通**

30 cm Radius Sector Type Double-Focusing Beta Ray Spectrometer

Central Research Laboratory Toshimitsu AKIBA・Taro OHAMA

Kôjyu UEDA・Humihiko ISOGAI

Kôbe Works

Daizaburô NAGATA・Yukihiro SHIMA・Masamichi KISHIMORI

A spectrometer installed in Nagoya University is capable of analyzing β -rays up to 4 MeV. Including the measurement of β - γ angular correlation, it is able to count number of events with an automatic counter. After the manufacture, a fringing field at the incident section and distribution of a magnetic field in a radial direction were compensated, and, with a sector of 205° and a free space length of 33 cm at the source of β -rays, double focusing was realized. By the use of a source of β -rays of $2\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ Cs^{137} , the maximum luminosity of 1.0 % and the best resolution of 0.27 % were obtained. This result is slightly inferior to the specification designed by the use of sharp cut-off approximation. However, an electron orbit analysis in a fringing field approximated by a straight line was obtained and applied to a corrected field; then a double focused point of about 205° and the maximum transmission factor of 1.1 % were obtained to show results almost identical with measured values. In β - γ coincidence, resolving time of $0.6\text{ }\mu\text{s}$ was made available with a source of rays of Co^{60} .

1. ま え が き

この装置は名古屋大学工学部原子核工学科に納入し、 $2\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ の Cs^{137} 線状の線源、 $32\text{ mm}\phi$ のアントラセン検出器を用いて最大透過率および最小 FWHM 値としておのおの 1.0 %, 0.27 % を得たのでここに報告する。

原子核分光学の最近の傾向は、高分解能で明るく、 β - γ および e - e などの角度相関の測定に適した装置を求めようになっている。この要求に合う高分解能で明るい装置としては、 $\pi/\sqrt{2}$ 二重集束形が最も適しており、空心形と鉄心形の両方の形がある⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしどちらも装置全体が大規模になり、高価になる。したがって、経済面が優先する場合には高分解能ではないが、明るくしかも角度相関の測定に適したセクタ形二重集束ベータ線スペクトロメータが採用される。このため経済的であることが、この装置の特長である。

鉄心形は磁界分布にあいまいな点があるため、それに対して余裕を見込まねばならない。この種の装置の経済性はこの余裕の見込み方にある。

磁界分布のあいまいな点としては

(1) 磁極端効果

(2) 磁化の仕方

の 2 種類に分けられる。高分解能よりも透過度をねらったこの装置の特長から (2) によるあいまいさは考えなくてもよい。(1) については次の二つがある。

(a) 線源と検出器が磁界の外にあるこの種の装置では、必ずベータ線の入射側には漏えい (洩) 磁界が伴う。この漏えい磁界内のベータ線の運動を正確に評価する方法が提出されていない。実際の磁界を測定し、その測定値を利用して計算機で数値解をうる方法は行なわれている⁽⁶⁾。この報告では、漏えい磁界でのベータ線の運動を

解析的近似解を用いて考察している。

漏えい磁界での電子の運動の評価のあいまいさは、線源・検出スリットおよび検出器などの設定位置にあいまいさをもたらす。このことはそれぞれの設定位置に補正のための余裕を要求し、過度の補正しろを持たせることも生じる。

(b) 理想的な磁界分布を与える磁極面は、動径方向に無限に広い幅を持たねばならないが、用いる磁極の幅は有限であり、磁極端に近づくにつれて磁界分布が乱れてくる。必要な磁界幅 (ダイミックスレンジといわれる) 内に理想磁界に近い分布を作るには、ダイミックスレンジの数倍の磁極幅 (磁極の開き角の大きさに依存する) があれば達せられる。

このような有限磁極幅からくる影響を除くには、種々の設計方法が考えられる。たとえば磁極幅に十分な余裕を持たせる方法、あるいはできるだけ狭い幅の磁極を用い、磁界分布の乱れの補正は、付加磁極シムかあるいは励磁コイルの形状・配置とコイルの組合せを用いて行なう方法などである⁽⁷⁾⁽⁸⁾。その良否の即断はできない。

この装置は回転半径を 30 cm に選び、有限磁極幅による磁界分布の乱れを補正する方法は磁極シムの形を選んだ。励磁コイルもきわめて簡単な構成をとり、電磁石は 1 対のコイルで励磁され、補助コイルはまったく使用していない。製作後は入口側の漏えい磁界の分布、主として動径方向分布の補正と磁極面の外周に簡単なシムを付けることの二点に重点を置き調整した。この結果、 $2\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ の Cs^{137} の線源を用いて最小 FWHM 値 0.27 %, 最大透過率 1.0 % をうることができた。アントラセン検出器の大きさは $32\text{ mm}\phi$ 、ルーサイトのライトパイプで光電子倍增管に導びかれている。

励磁電源は、最大容量が 30 V 50 A のトランジスタ方式直流安定化電源であり、15 A・30 A および 50 A の 3 レンジで切換え使用でき、各レンジともフルスケールの 20 %~100 % の範囲で、電流安定度は $1 \times 10^{-4}/\text{h}$ および $5 \times 10^{-4}/5\text{ h}$ である。計数装置と連動して最小掃

引幅が、各レンジ最大電流値の 1×10^{-4} 幅まで自動掃引および自動計数ができる。鉄心のヒステリシスにより、スペクトルのせん(尖)頭値がずれないように自動消磁電源も付いている。

計数装置は、GM およびシンチレーション計数装置、タイマ、プリンタおよび励磁電源を組み合わせて完全自動測定記録ができる構造になっており、角度相関の測定に際しては、ゴニオメータと組み合わせて $\beta-\gamma$ 同時計数測定も自動的に行なわれる。

2. 理論的考察

2.1 磁界と軌道

この報告で述べられるセクタ形二重集束ベータ線スペクトロメータは、図 3.1 に示したように自由空間(長さ L)と磁界形状が標準軌道平面上で、

$$H_z(r, 0) = H_z(r_0, 0) \cdot \left\{ 1 - \alpha \cdot \left(\frac{r-r_0}{r_0} \right) + \beta \cdot \left(\frac{r-r_0}{r_0} \right)^2 + \dots \right\} \dots (2.1)$$

で与えられるセクタ形の電磁石からなっている。ここでは円筒座標 (r, θ, z) を使用しており、標準軌道平面は $z=0$ の平面に選ばれ、標準軌道半径は r_0 で与えてある。 α および β は定数である。

二重集束形といわれるこの種の装置は、 r, z 両方向のベータ線振動の周期が同じになるようにすべて α は $1/2$ に選ばれている。装置の特長は β にあり、この装置は $\beta=1/4$ に選んだ。 $\pi\sqrt{2}$ 形の装置では β の値は $1/8$ か $3/8$ に選ばれる場合が多く、 $1/8$ のときには比較的大きな r 方向の発散角が許され、 $3/8$ のときには z 方向の発散角が大きくとれる。 $\beta=1/4$ は二者の中間形で式 (2.1) の磁界形状を与える磁極面が円すい面となるので、磁極面の加工の容易さから鉄心形ではしばしばこの値が使用されている。

磁極間の空間の磁界 (H_r, H_z) は、

$$H_z(r, z) = H_z(r_0, 0) \cdot \left\{ 1 - \alpha \cdot \left(\frac{r-r_0}{r_0} \right) + \beta \cdot \left(\frac{r-r_0}{r_0} \right)^2 + \left(\frac{\alpha}{2} - \beta \right) \cdot \left(\frac{z}{r_0} \right)^2 + \dots \right\} \dots (2.2)$$

$$H_r(r, z) = H_z(r_0, 0) \cdot \left\{ -\alpha \cdot \left(\frac{z}{r_0} \right) + 2\beta \cdot \left(\frac{r-r_0}{r_0} \right) \cdot \left(\frac{z}{r_0} \right) + \dots \right\} \dots (2.3)$$

で与えられる⁽⁹⁾。

この種の磁界内での軌道は、以前から多くの研究者により検討されている。図 2.1 の配置での軌道の式は、

$$r-r_0 = A \cdot x_0 + C_{10} \cdot \varphi + C_{20} \cdot \varphi^2 + C_{02} \cdot \psi^2 \dots (2.4)$$

$$z = B \cdot z_0 + D_{01} \cdot \psi + D_{11} \cdot \varphi \cdot \psi \dots (2.5)$$

に表示できる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。ここで $r-r_0$ 表示に $z_0 \cdot \varphi, z_0^2$ に比例する項は無視しており、 A, B, C_{ij}, D_{mn} は θ と L の関数であり、 φ および ψ は r および z 方向における物点での発散角である。 x_0, z_0 はそれぞれ r および z 方向の物点の半幅を表わしている。

$\alpha=1/2$ のときには $C_{10}=D_{01}$ になる。したがって $C_{10}=0$ になるように θ と L の値を選べば D_{01} もその値で零になり、式 (2.4)、(2.5) の両式から φ, ψ の一次の項は消えて二重集束が実現できる。

$C_{10} \equiv D_{01} \equiv 0$ を満たす L と θ は、

$$\tan^{-1}(L/\sqrt{2} \cdot r_0) + \theta/\sqrt{2} = \pi \dots (2.6)$$

の式により決められる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

式 (2.4) は運動量平衡 $p = -e r_0 \cdot H_z(r_0, 0)$ を満たす電子に対して成立し、運動量が Δp 異なった電子は式 (2.4) に、

$$W\gamma = F_1 \cdot \gamma + F_2 \cdot \gamma^2 + F_3 \cdot x_0\gamma + F_4 \cdot \varphi \cdot \gamma \dots (2.7)$$

で表わされる運動量分散幅 $W\gamma$ が付け加わる⁽¹¹⁾。ここで $\gamma \equiv \Delta p/p$ であり、 F_1, F_2, F_3 および F_4 は θ と L の関数である。したがって式 (2.4)、(2.5) および (2.7) の右辺の係数 $A, B, C_{ij}, D_{ij}, F_i$ の集束点 ($C_{10}^* = D_{01}^* = 0$) での値を * 印を付けて区別する。この装置は $\theta=200$ 度、 $r_0=30$ cm に選んだから式 (2.6) から L の値として 33.9 cm をうる。このとき $A^*, C_{20}^*, C_{02}^*, B^*, D_{11}^*, F_1^*$ および F_4^* の値はおおの $-0.782, -0.309 r_0, -0.806 r_0, -0.782, 1.61 r_0, 3.56 r_0$ および $2.69 r_0$ で与えられる。

2.2 分解能と透過率

分解能 $\gamma_f \times 100\%$ を実現するには、

$$2 \cdot |A^* \cdot x_0| + |C_{20}^*| \cdot \varphi^2 + |C_{02}^*| \cdot \psi^2 \leq |F_1| \cdot \gamma_f \dots (2.8)$$

の式で規定される領域内の初期値 x_0, φ, ψ に制限すればよいと考えられる。点線源 ($x_0=0$) の場合、式 (2.8) で表わされる初期値に対する透過率は分解能 γ_f の関数として与えられ、

$$T = (|F_1^*| \cdot \gamma_f / 4 \sqrt{|C_{20}^*| \cdot |C_{02}^*|}) \times 100\% \dots (2.9)$$

で表わされる。 $\theta=200$ 度、 $r_0=30$ cm の場合は、 $T \cong 170 \gamma_f \times 100\%$ となり、 $\gamma_f=0.01$ では $T \cong 1.7\%$ をうる。

ここで定義した透過率 T は、式 (2.8) で規定された初期条件で入射したすべてのベータ線が像点で、検出器により検知されたときの透過率であり、理想化したときの議論である。実際には磁極間隔および検出器の大きさなどの制限で透過率はもっと減少する。式 (2.4) と (2.5) の右辺の二次の項を無視すると、 C_{10} と D_{01} の最大値と磁極間隔との関係によって透過率が制限される。

$$A=B=\cos(\theta/\sqrt{2}) \dots (2.10)$$

$$C_{10}=D_{01}=(L/\sqrt{2}) \cdot \cos(\theta/\sqrt{2}) + \sqrt{2} r_0 \sin(\theta/\sqrt{2}) \dots (2.11)$$

から C_{10}, D_{01} の最大は $\theta = \sqrt{2} \tan^{-1}(2r_0/L)$ で起こり、最大値は $\sqrt{(L^2/2) + 2 \cdot r_0^2}$ である。最大値の大きさは、同じ r_0 のときには L が大きいほど大きくなる。 $L=33.9$ cm、 $r_0=30$ cm のときには θ, A および最大値はそれぞれ 86 度、0.49、49 cm をうる。

上記の最大振幅 $\sqrt{(L^2/2) + 2 \cdot r_0^2}$ 、 r_0 での磁極間隔 $2h$ および r 方向の有効磁極幅 $2W$ によって φ, ψ の領域が規定される。

透過率 T^* は簡単な計算から

$$T^* = \{2hW/\pi(L^2 + 4r_0^2)\} \times 100\% \dots (2.12)$$

で表わされる。ここで $2h$ は $r=r_0$ での磁極間隔、 W は r 方向の有効磁極の半幅で $r=r_0$ の両側に同じく W の幅があるとした。式 (2.12) から同じ h, W および r_0 に対しては L が小さいほど透過率 T^* は大きくなることわかる。

2.3 漏えい磁界での電子の運動

2.1 節と 2.2 節で用いた軌道方程式は、磁界の存在する領域と存在しない領域とを鋭く分離した場合、すなわちシャープカットオフ磁界近似を用いている。(以後この近似を SCOFF 近似と呼び、磁界境界を SCOFF と呼ぶ)。しかし実際にはこのように鋭い磁界境界は存在できなくて、図 2.1 の実線のように漏えい磁界のため長く尾を引いている。この漏えい磁界の形状を考慮して荷電粒子の軌道を求めると、SCOFF 近似で求めた軌道と次の 2 点で違ってくる⁽⁶⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

(1) 標準粒子軌道 (以後“光軌”と呼ぶ) の 0 次の変位が起こる。

(2) エッジ集束が弱くなることから集束点がずれる。

しかしエッジ集束作用は、磁界とう配 $\alpha=1/2$ を持つ二重集束形磁界の集束作用に対しては、平行磁界の集束作用におよぼすほど強い効力を持たない。二重集束形電磁石では、むしろ漏えい磁界内の磁

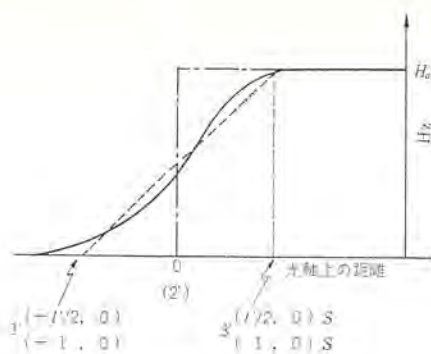


図 2.1 漏えい磁界
Fringe field.

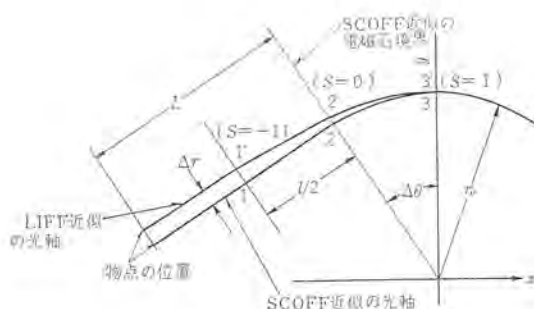


図 2.2 SCOFF, LIFF 両近似の光軸
Optic axes of SCOFF & LIFF approx.

界こう配の乱れに起因する集束作用の変化が問題になってくる。したがって上記(2)の代わりに

(2') 磁界こう配の乱れに起因する集束点のずれが生ずる。と置きかえて(1)と(2')について考慮する。

漏えい磁界内の荷電粒子の軌道については、H. A. Enge などによって検討がなされているが、いずれもかなり複雑で見通しが悪い(9)(12)(13)(14)。この報告で述べる直線近似法は、近似度は落ちるが簡明な点で特長で、装置の調整の際の磁界補正に対して有効である。直線近似法とは光軸に沿った漏えい磁界分布を直線で近似し、近似した漏えい磁界内における荷電粒子の運動を解析的に求める方法である。この直線近似法を LIFF 近似 (a linearly increased fringe field の意) と呼んで SCOFF 近似と区別する。

2.3.1 漏えい磁界の近似および LIFF 近似と SCOFF 近似の関連

LIFF 近似の光軸 (以下単に光軸と呼ぶ) に沿った漏えい磁界分布が図 2.1 の実線であったとする。鎖線はこの漏えい磁界を長方形近似した場合の磁界境界、すなわち光軸上の SCOFF であり、光軸上のこの点を原点にして漏えい磁界分布を次の直線で近似する。

$$H_z(\zeta) = \begin{cases} 0 & \zeta \leq -l/2 \\ (H_0/l)(\zeta + l/2) & -l/2 \leq \zeta \leq l/2 \\ H_0 \equiv H_z(r_0, 0) & l/2 \leq \zeta \end{cases} \quad (2.13)$$

ここで ζ は光軸上の位置の座標で荷電粒子の進行方向を $\zeta > 0$ にとる。この近似の特長は $\zeta = 0$ で $H_z(0) = H_0/2$ とおき、この点から光軸上で磁界が 0 になるまでの距離と、一定値 H_0 になるまでの距離が等しくなるような直線で漏えい磁界を近似したこと、および $\zeta = l/2$ での磁界の一定値を SCOFF 近似の光軸上の磁界 $H_z(r_0, 0)$ に等しくした点にある。すなわち $H_z(l/2) = H_z(r_0, 0)$ としたこと、この LIFF 近似と SCOFF 近似とを関係づける重要な点となる。

図 2.2 に示したように、点 1, 2, 3 を通る直線と円弧が SCOFF 近似の光軸で、点 1', 2', 3' を通る曲線が変位した光軸であるとする。

点 0 は SCOFF 近似の光軸の曲率中心であり、点 0 と点 2 を結ぶ直線が SCOFF 近似の磁界境界 (SCOFF) である。点 1 と 3 は SCOFF 近似の光軸上の磁界分布を、式 (2.13) と同じ形式で直線近似した場合の、磁界 0 の点 ($\zeta_1 = -l/2$) と磁界 $H_0 \equiv H_z(r_0, 0)$ の点 ($\zeta_2 = l/2$) である。点 1', 2', 3' は、光軸上の $\zeta_1' = -l/2$, $\zeta_2' = 0$, $\zeta_3' = l/2$ の点である。

一般には点 2 と 2', 点 3 と 3' は曲率中心 0 からの同一半径上にあるとはかぎらないし、1 と 1' も SCOFF に平行な同一直線上にあるとはかぎらないが、点 3' は SCOFF 近似の光軸上にあるとしたことから

$$\Delta\theta = \int_{\zeta_1'}^{\zeta_3'} d\zeta / \rho(\zeta) = (l + \varepsilon) / 2r_0 \quad (2.14)$$

の関係が成立する。ここで $\Delta\theta$ は光軸上を通る荷電粒子が漏えい磁界を通過したときに受ける偏向角で、 $(l + \varepsilon)$ は SCOFF 近似の光軸上で点 3' までの距離である。

未知な光軸上の磁界分布は、測定あるいは計算することができない。したがって光軸は一見求まらないように見えるが、次の方法で求めることができる。最初に SCOFF 近似の光軸上の漏えい磁界分布を求める光軸上の分布と仮定して光軸を求め、次にこの光軸上の分布を用いて次の光軸を求める。この過程を光軸の変位が収れん(斂)するまで繰り返せば正しい光軸が求まる。しかしこの報告では簡単にするために、SCOFF 近似の光軸上の漏えい磁界分布を光軸上の分布と仮定して、式 (2.13) で $l' = l$, 式 (2.14) の $\varepsilon = 0$ とおいた。すなわち図 2.2 の点 3 と 3' を同一点とし、光軸の変位による長さの差を無視して点 2 と 2' および点 1 と 1' が同一直線上にあるとした。

この最後の近似をやめ、光軸上の磁界分布を以下の解析に用いるかぎり、理論的にはより正しい方法が得られるが、これに関する詳しい報告は別の機会にゆずる。

2.3.2 光軸とその変位量

式 (2.13) で表わされる磁界内で運動量 $P = -e \cdot r_0 \cdot H_0$ の荷電粒子の軌道、すなわち光軸は

$$P = -e \cdot r_0 \cdot H_0 = -e \cdot \rho(\zeta) \cdot H_z(\zeta) \quad (2.15)$$

を満足する曲率半径の軌跡で、

$$\rho(\zeta) = l \cdot r_0 / (\zeta + l/2) \quad (2.16)$$

で表わされる。

ここで原点が SCOFF 近似の曲率中心 0、原点 0 と $\zeta = l/2$ で与えられる点 3' (点 3 と同一点) を通る直線を y 軸とする直交座標 (x, y) を用い、運動の可逆性から次に述べる式 (2.17) を初期条件として運動方程式を解くと、式 (2.16) の光軸の軌跡が求まる。この直交座標系で表示した光軸は、LIFF 近似の仮定から $\zeta = l/2$ で $x = 0$, $y = r_0$ で、

$$\begin{aligned} dx/d\zeta &= 2/l \\ dy/d\zeta &= 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

を満足しなければならない。

漏えい磁界 0 の点、すなわち光軸上 $\zeta = -l/2$ の点で光軸が SCOFF 近似の光軸から平行変位する変位量 Δr は、式 (2.14), (2.16) と上記の直交座標を用いて

$$\Delta r = |r_0 - x(1') \cdot \sin \Delta\theta - y(1') \cdot \cos \Delta\theta| \quad (2.18)$$

で与えられる。ここで $x(1')$, $y(1')$ は点 1' の直交座標で

$$\begin{aligned} x(1') &= l(-1 + 4.266a^2 - 4.34a^4) \\ y(1') &= l(r_0/l - 2.666a - 4.88a^3) \end{aligned} \quad (2.19)$$

である。ここで $l/8r_0 \equiv a$ とおいた。

2.3.3 漏えい磁界内での荷電粒子の軌道

この項では光軸上を運動する座標 (ζ, ξ, η) を用いて、種々の条件で入射した荷電粒子の軌道を記述する。 ζ は前述した光軸上の位置座標で、単位ベクトルは光軸の接線方向で粒子の進行方向を正にとる。 ξ は主法線方向の座標で曲率中心側を負とし、 η は陪法線方向の座標で z 軸の方向と一致し、 (ζ, ξ, η) が右手系を作る方向に $\eta > 0$ ($z > 0$) と選ぶ。

ζ - ξ 平面内の磁界が面に垂直な H_z 成分のみで、式(2.13)の $H_z(\zeta)$ を用いて

$$H_z(\zeta, \xi, 0) = H_z(\zeta) \cdot \{1 - \alpha \cdot \xi/\rho(\zeta)\} \dots\dots\dots (2.20)$$

で表わされると仮定すると、 $\text{rot } \vec{H} = 0$, $\text{div } \vec{H} = 0$ および磁界の対称性、反対称性から光軸を含む平面近傍の磁界 \vec{H} は式(2.20)と

$$H_\xi(\zeta, \xi, \eta) \equiv \eta \cdot \partial H_z / \partial \zeta \dots\dots\dots (2.21)$$

$$H_\eta(\zeta, \xi, \eta) \equiv \eta \cdot \partial H_z / \partial \xi \dots\dots\dots (2.22)$$

で与えられる⁽¹⁵⁾。

式(2.20)~(2.22)で表わされる磁界内での荷電粒子の軌道は、ベクトル振動の式、

$$d^2\xi/d\zeta^2 + \{(1-\alpha)/\rho^2(\zeta)\} \cdot \xi = 0 \dots\dots\dots (2.23)$$

$$d^2\eta/d\zeta^2 + \{\alpha/\rho^2(\zeta)\} \cdot \eta = 0 \dots\dots\dots (2.23')$$

で表わされる⁽¹⁰⁾⁽⁶⁾⁽¹⁵⁾。ここで $1 > \alpha > 0$ で、 $\rho(\zeta)$ は式(2.15)によって与えられる曲率半径である。式(2.23)の解は $\xi = 0$ で $\xi = \xi_0$, $d\xi/d\zeta \equiv \xi' = \xi'_0$ とおいて、

$$\xi = \xi_0 \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n} \cdot \xi^{2n} + \xi'_0 \sum_{n=0}^{\infty} b_{2n+1} \cdot \xi^{2n+1} \dots\dots\dots (2.24)$$

の形で与えられる。ただし $a_0 = b_1 = 1$ である。式(2.24)を式(2.23)に代入し a_{2n} , b_{2n+1} の一般的表示を求め、 $\zeta = -l/2$ と $\zeta = l/2$ との (ξ, ξ') の関係を求めると、 $c_r = (l/4r_0)^2 \cdot (1-\alpha)$ とおき、

$$\begin{bmatrix} \xi(l/2) \\ \xi'(l/2) \end{bmatrix} = M_f \begin{bmatrix} \xi(-l/2) \\ \xi'(-l/2) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$M_f \equiv \begin{bmatrix} 1 - (4/3)c_r + (5/14)c_r^2 & l \cdot \{1 - (4/5)c_r + (2/15)c_r^2\} \\ -(2c_r/3l) \cdot \{8 - (9/2)c_r\} & 1 - 4c_r + (3/7)c_r^2 \end{bmatrix}$$

が得られる。式(2.25)は a_0 , b_1 までとり、 c_r^2 まで残して計算した。

式(2.25)を用いると LIFF 近似の場合の物点~像点の関係が、

$$\begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix} = M \cdot M_f \cdot M_L \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ \varphi \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.26)$$

で与えられる。ここで $x \equiv r - r_0$, $d/r_0 d\theta \equiv 1$

$$M \equiv \begin{bmatrix} \cos \theta_r & r_0(1-\alpha)^{-1/2} \cdot \sin \theta_r \\ -r_0^{-1} \cdot (1-\alpha)^{1/2} \cdot \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix}$$

$$\theta_r = (\theta - l/2r_0)/(1-\alpha)^{1/2},$$

$$M_L \equiv \begin{bmatrix} 1 & L-l/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

であり、 L は式(2.6)で決定される SCOFF 近似での自由空間長である。 x_0 と x は物点と像点での ξ , φ と x' は物点と像点での発散である。 η 方向の変換は式(2.25), (2.26)の c_r と θ_r をそれぞれ $c_z = (l/4r_0)^2 \cdot \alpha$ と $\theta_z = (\theta - l/2r_0)/\alpha$ で置き換えた表示である。

式(2.25)の M_f に対応する SCOFF 近似での変換行列 M' は、

$$M' = \begin{bmatrix} 1 - 2c + (2/3)c^2 & l\{1 - (22/15) \cdot c + (2/3)c^2\} \\ -(8c/l)\{1 - (2/3)c\} & 1 - 6c + (22/5)c^2 \end{bmatrix} \dots\dots (2.27)$$

で与えられる。ここで c は前述の c_r および c_z のいずれかである。式(2.26)と(2.27)による集束点と透過率の違いについての考察は後章で述べる。

3. 装置の設計

3.1 電磁石の設計

電磁石の基本定数は表3.1に示されているように選んであり、その構成は全体構成とともに図3.1に示した。偏向角200度、標準軌道半径30cm、平均磁極間げき21cmに選んだのは次の理由による。

第1の要請は角度相間測定に便利な構成を持ち、オンラインスペクトロメータとしても利用できるよう、物点が電磁石の外に設定できなければならない。

第2の要請は式(2.12)で与えられるように、同じ立体角内の電子を通過させるには、自由空間が長いスペクトロメータほど磁極間げきを広くしなければならぬ。すなわち同じ磁極間げきでは偏向角が大きいほど(自由空間が短いほど)通過する電子は多い。

第3の要請は電磁石の外形は、できるかぎり小さくしたいことであり、第1・第2のおおのの要請が適当に満たされねばならない。標準軌道半径30cmは角度200度を選んだとき自由空間の長さが第1の要請を満足し、しかも電磁石自身が簡潔にまとまりうるという観点から決められた。標準軌道半径での磁極間げきが21cmのとき

表 3.1 スペクトロメータの基本定数
Fundamental parameters.

項 目	設 計 値	補 正 後 の 値
偏 向 角 (セクタ)	200 度	205 度
標 準 軌 道 半 径	30 cm	30 cm
自 由 空 間	34 cm	33 cm
磁 極 間 げ き	標準軌道半径上 21 cm	標準軌道半径上 21 cm
動径方向有効磁界幅	21 cm	23 cm
エネルギー分析範囲	4 MeV~50 keV	4 MeV~50 keV
最 良 分 解 能 (2 mm ² ×20 mm ²)	0.25 %	0.27 %
最 大 透 過 率 (2 mm ² ×20 mm ²)	1.1 %	1.0 %

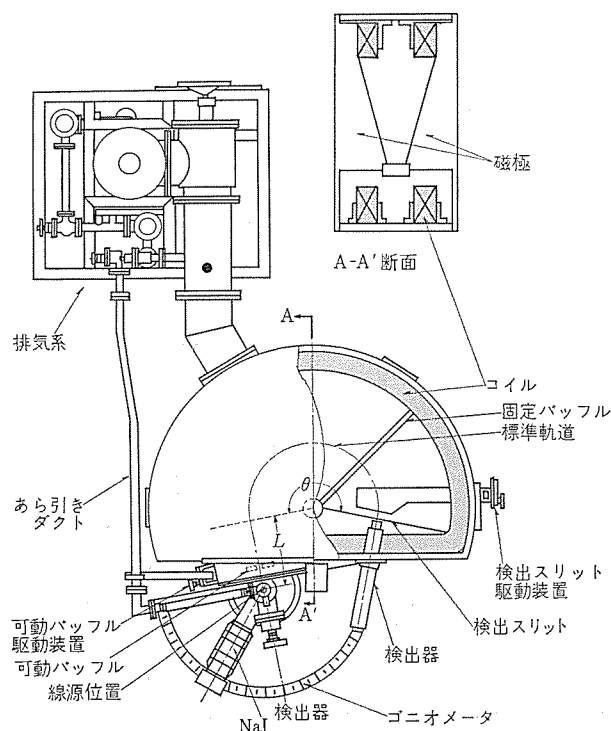


図 3.1 スペクトロメータ全体構成
Sectional view of the spectrometer.

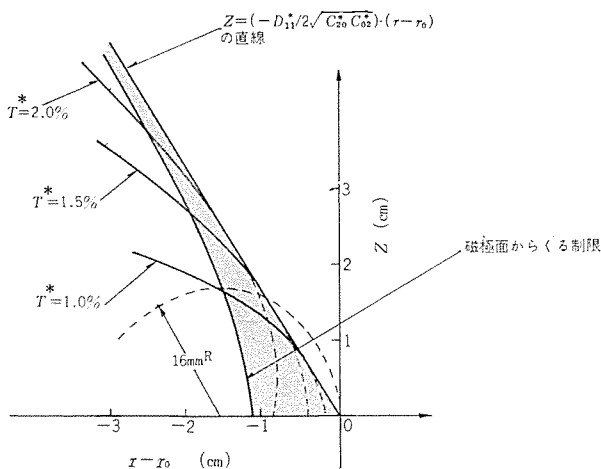


図 3.2 透過度とビームプロフィール
Transmission vs. profile.

の透過率は、式 (2.12) から

$$T^* = 0.14 W \% \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

となり、 $W = 7.1 \text{ cm}$, 10.65 cm , 14.2 cm とすると T^* はそれぞれ 1%, 1.5%, 2% をうる。

有効磁界の幅 W を増加させていったときのビームプロフィールの変化が図 3.2 に示してあり、同時に検出器の大きさ $32 \text{ mm}\phi$ も示してある。検出器との関係を調べると W として 10.65 cm ($T^* = 1.5\%$) 以上とっても意味がないことがわかる。それ以上、検出効率を増すには、像点での $r-r_0$ の方向の幅が増すように磁極間引きを増す方向に持ってゆくのがよいことがわかる。

プロフィール内の電子密度が一様であると考えた場合、検出器は 1.1% 強の電子を受けることができる。この図は点線源に関する考案であるが、線状の線源の場合にはいくぶん異なってくる。たとえば、 z_0 から出発した電子群は、近似的に $z=0$ から出発した電子群と同形のプロフィールを像点で $\sim 0.8 \cdot z_0$ 程度ずれて結ぶ。したがって、点線源のときに検出器に受けられていた電子群の一部が削減され、受けられていなかった電子群の一部が検出器に受け入れられるようになる。この交換の仕方が点線源と線状の線源の透過率の違いを決める。 z_0 にも依存するが、図 3.3 から推量するかぎりでは、この交換の仕方はほぼ等価である。

電磁石の側壁には線源箱・検出器・排気装置・スリットなどの取付穴をもうけ、真空箱内には 3 個の固定パッフルを取り付けている。コイルは電磁石側壁の内側上下に巻き、各コイルのアンペアターンは約 5,000 AT に選んである。

3.2 排気系

主真空箱は 1 台の 8 インチ油拡散ポンプ、8 インチバルブ、冷却トラップおよび 2 台の油回転ポンプを用いている。

主真空箱の真空を破らないで、線源の出入ができるようにロックバルブおよびあら(粗)引き配管が付いており、油回転ポンプをこの部分に用いて排気できる構成になっている。大気圧からのあら引きは、2 台の油回転ポンプと手動バルブを用いて行なっている。安全装置としては油拡散ポンプに断水警報リレーが付いており、規定量以下の水量のときはヒータ電源が切れるようになっている。

低真空ではサーミスタ真空計、高真空では電離真空計 IG-305 A がおのこの真空度を表わしている。電離真空計は、真空度劣化のときには自身のフィラメント電源を切る保護回路を内蔵している。停電の場合は回転ポンプの入口のバルブを自動的に閉じ、その後リークバルブ

が開いて油の逆流を防ぐ構成になっている。

3.3 電磁石励磁電源

励磁電源は、最大容量 30 V, 50 A トランジスタ方式定電流電源であり、最高励磁電流は 4 MeV のベータ線を分析することができる。励磁電流は標準抵抗を流れ、その電圧降下を標準電池と比較してチョップ増幅器と直結増幅器で増幅し、パワートランジスタで制御する方式である。

電流可変範囲は、

- 第 1 レンジ 2.5 A ~ 15 A (約 50 keV ~ 0.9 MeV)
- 第 2 レンジ 2.5 A ~ 30 A (約 50 keV ~ 2.0 MeV)
- 第 3 レンジ 2.5 A ~ 50 A (約 50 keV ~ 4.0 MeV)

であり、電流安定度は各レンジ、フルスケールの 20~100% の範囲で $1 \times 10^{-4}/\text{h}$ および $5 \times 10^{-4}/5 \text{ h}$ であった。

自動計数装置で設定されたプログラムにしたがい、自動的に電流走査ができ、またスイッチ切換えにより手動でも電流走査ができるようになっている。極性切換用ナイフスイッチを有しており、 β^- , β^+ の測定を切換えて行なうこともできる。消磁電源はシリコン制御整流素子を用いた正逆減衰電源から成り、2~3 系統のシーケンスを持ち、これにより 1 ガウス以下に消磁できた。消磁電源の出力定格は、励磁定格の 50%, すなわち約 15 V, 25 A である。

3.4 検出部

検出部は検出スリットおよび検出器から成っている。

検出スリットは、厚さ 8 mm のアルミニウム板を上下・左右方向に真空箱外より連続的に開閉でき、ストロークは全幅 0~40 mm、幅の読取り精度は 0.1 mm である。検出器は、ベータ線用 GM 計数管およびシンチレーション検出器両方取付け使用でき、シンチレータは、 $32 \text{ mm}\phi$ 厚さ 5 mm のアントラセン検出器を用いている。

3.5 線源部

線源箱は電磁石側壁に取り付け、線源はこの中の所定の位置に固定でき、主真空箱の真空を破らないで出し入れできる。線源箱と電磁石の間には可変パッフルが取り付けられており、入射電子の開き角を調整している。パッフルは、厚さ 8 mm のアルミニウム板を上下・左右に全幅 0~80 mm の範囲で開閉でき、かつ真空を破らずに操作でき、幅を 0.5 mm の精度で設定できる。

3.6 計数装置

計数装置は、ベータ線のスペクトル測定と、ベータガンマ同時計数による角度相関測定の二つの機能を備えており、おのこの測定について自動・手動の両測定ができる。

装置はプログラム盤 1 台、時間装置 1 台、2 チャンネル(プリセット)カウンタ 1 台、カウンタ 2 台、比例増幅器 2 台、波高分析器 1 台、高圧電源 2 台、デジタル電圧計 1 台、プリンタ 1 台からなり、その全体構成のブロックダイアグラムを図 3.3 に示した。

プログラム盤には自動・手動の選択ボタンがあり、手動の場合には、カウンタ・励磁電流・ゴニオメータの位置などの操作は完全に手動になる。自動の場合は、電流操作と角度相関測定の 2 種類について、前者のときには、プログラム盤上に設定された時間間隔・電流走査ステップにしたがって自動計数・自動電流走査が行なわれる。後者の選択のときには、プログラム盤の時間間隔の設定に応じて自動計数・ゴニオメータの移動ができるようになっている。

同時計数回路の性能については、図 3.4 に Co^{60} についての $\beta-\gamma$ 同時計数の様子を示した。ディレイラインが断続的であったので、不完全が目だつが分解時間は $1 \mu\text{s}$ 以下である。

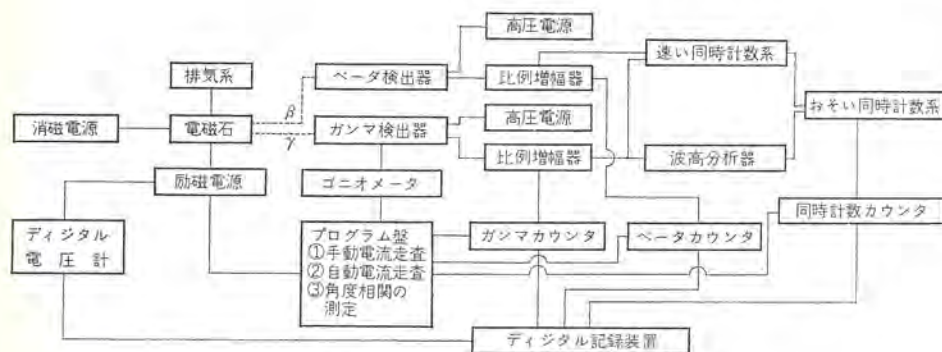


図 3.3 計数装置のブロックダイアグラム
Block diagram of counting system.

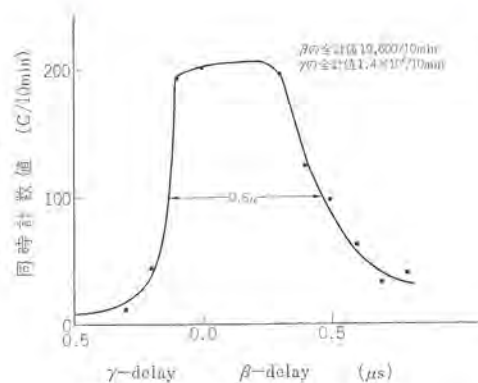


図 3.4 Co^{60} β - γ 同時計数
 Co^{60} β - γ coincidence.

4. 結 果

4.1 磁界分布

磁界分布の測定は、電磁石の入・出射側の漏えい磁界分布と、漏えい磁界から十分離れた電磁石内の動径方向の磁界分布（以後この分布を“電磁石内の磁界分布”と呼ぶ）の種類について行なったが、出射側漏えい磁界については効果が認められなかったので示していない。

電磁石内の磁界分布の測定結果を図 4.1 に示した。3.1 節での考察から、ダイアモックレンジ W は 10~11 cm 程度あれば、検出器 3.2 mmφ では W をこれ以上増しても意味がないことがわかっていてる。図 4.1 で、理想的な磁界形状と測定された分布との間の差異が顕著に現われはじめるのは、 r の大きいところでは $W \geq 11$ cm, r の

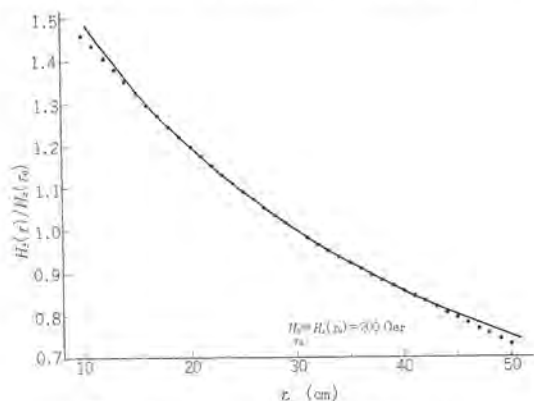


図 4.1 動径方向の磁界分布
Field distribution in radial direction.

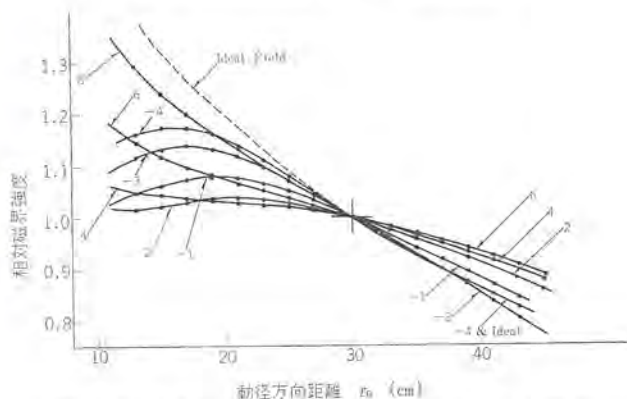


図 4.2 入射側動径方向磁界分布 (図 4.5 (a) の場合)
Field distribution in radial direction.

小さいところでは $W \geq 12$ cm のところからであり、大きな補正は要しないことがわかる。

入射側の漏えい磁界分布について測定した動径方向分布と、SCOFF 近似での光軸上の分布をそれぞれ図 4.2 と図 4.3 に示してある。

図 4.2 の動径方向分布の曲線に付けた数字は、図 4.4 で定義した動径方向を表わす。このときの磁極は図 4.5 (a) に示されている。動径方向の分布は、設計値の SCOFF 近似の磁界境界（この境界を以後 SCOFF と呼ぶ）から電磁石側についての測定結果である。

SCOFF が設計値に合うように磁極を補正して得た結果が図 4.3 であるが、まだ 10 mm 近く電磁石が大きくなる方向にずれている。

0 点は設計値の SCOFF であり、実際には鎖線部分が SCCFF になる。その導びき方は分布を図の点線で近似して求めた。SCOFF

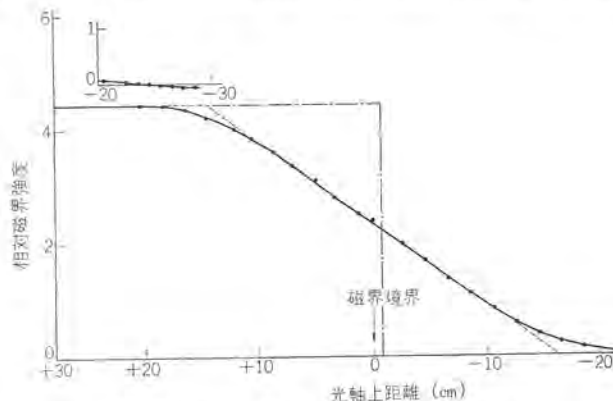


図 4.3 入射側の光軸上の磁界分布
Field distribution on optic axis (entrance side).

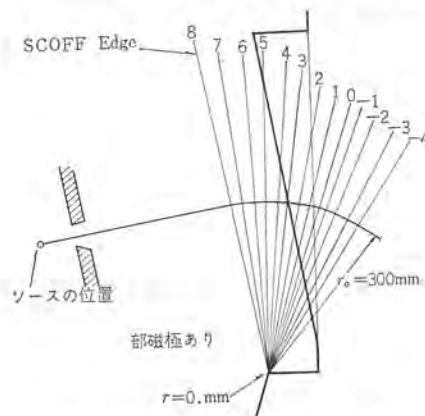


図 4.4 測定線の定義
Definition of number with scanning line.

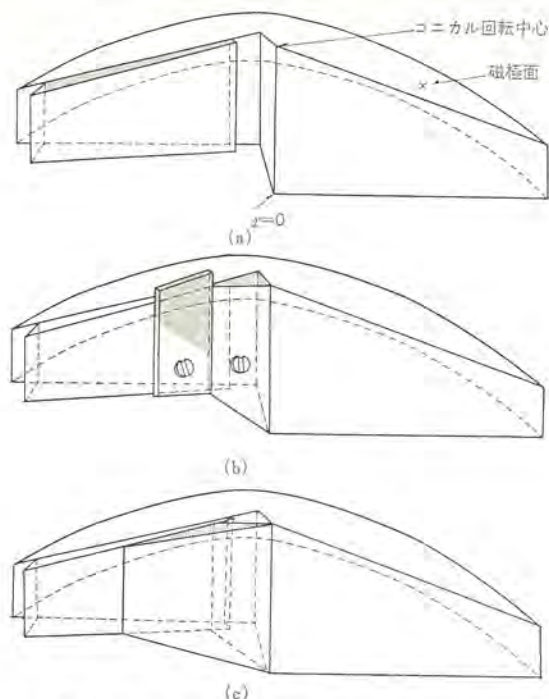


図 4.5 磁極改良の経過 (磁極片面)
Various corrections given to pole tip on entrance side.

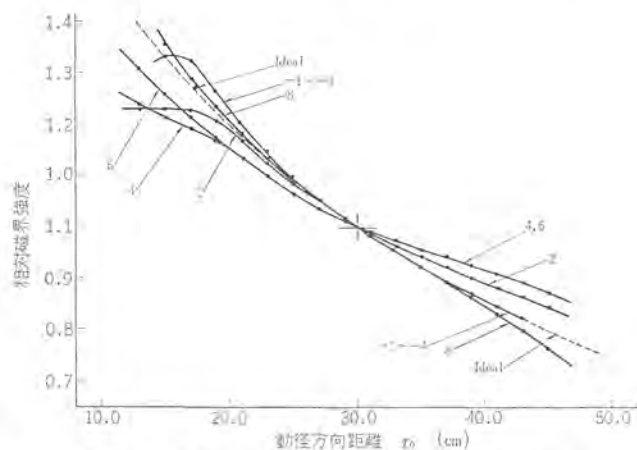


図 4.6 入射側動径方向磁界分布 (図 4.5 (b) の場合)
Field distribution in radial direction.

を合わせるのはこの程度でよいと考えて、後の磁極補正でも SCOFF の位置は 20 mm 以内のずれで合せるようにした。このずれからくる誤差は物点と像点の位置の調整で補正している。図 4.2 に見るように α_L の値は相当変化している。 α_L の値として、

$$\alpha_L \equiv (\partial H_z / \partial r) / \{ H_z(\zeta) / \rho(\zeta) \} \dots \dots \dots (4.1)$$

の一般的な定義を用い、図 4.2 での分布曲線 8, 6, 4, 2, -1, -3, -4 のおののについて、 α_L を概算すると 0.84, 0.36, 0.19, 0.19, 0.35, 0.42, 0.50 の値をうる。

一方、 α_L の平均値 $\bar{\alpha}_L$ を、磁界強度の重率を考慮して、

$$\bar{\alpha}_L \equiv \{ \sum_j H_z(\zeta_j) \cdot \alpha_L(\zeta_j) \} / \sum_j H(\zeta_j) \dots \dots \dots (4.2)$$

の形で定義する。ここで $H_z(\zeta_j)$ 、 $\alpha_L(\zeta_j)$ はおのの $\zeta = \zeta_j$ での SCOFF 近似の光軸上の磁界および α_L の値である。式 (4.2) に従い図 4.2 と図 4.3 を利用し、 $\bar{\alpha}_L$ を求めると約 0.4₀ の値をうる。

磁極端の形状をくふうし入射側の漏えい磁界の分布を変え、透過率および分解能への影響を調べた結果、磁端の形状が図 4.5 (b)

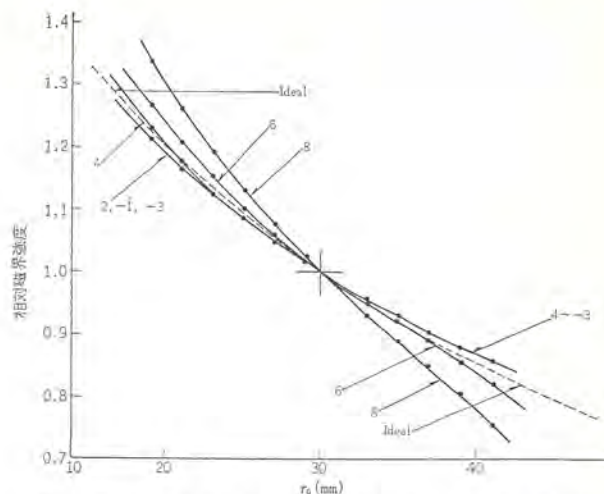


図 4.7 入射側動径方向磁界分布 (図 4.5 (c) の場合)
Field distribution in radial direction.

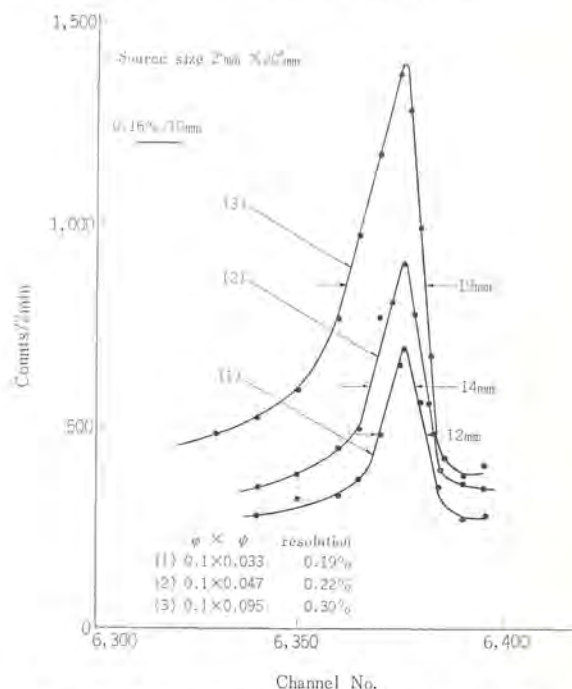


図 4.8 Cs^{137} の K 線内部転換電子スペクトル (補正前)
K-conversion spectrum of Cs^{137} .

と (c) の場合に著しい改見がみられた。図 4.5 (b) と (c) のおののの磁界分布は図 4.6 と図 4.7 に示した。おののの $\bar{\alpha}_L$ は約 0.5₂ と約 0.6₄ であった。

4.2 分解能および透過率

この実験で用いた線源は、 Cs^{137} で分解能測定用と透過率測定用の二つを作った。大きさはどちらも 2 mm² × 20 mm² であり、前者は約 8 μC であり、後者は 8.37 $\mu\text{C} \pm 4.9\%$ の線源である。8.37 $\mu\text{C} \pm 4.9\%$ の強度測定は次のようにして行なった。線源 A と B 2 種類を作り、線源 A は弱い線源で 4 π 計数管により絶対強度 I_A (cpm) を測定する。線源 B は透過率測定に用いる線源で、線源 A と 662 keV の γ 線の比較測定により強度比 i を求め、次式にしたがって線源 B の絶対強度 N_B (μC) を求めた。

$$N_B = \frac{i}{\left\{ 1 + \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right) \cdot P \right\} \times 3.7 \times 10^4} \cdot I_A \dots \dots \dots (4.1)$$

ここで α と P は、おのの 662 keV の γ 線の内部転換係数およ

び 1.17 MeV の β 線の分岐率で 0.098, 0.92 で与えられる。

4. 2. 1 補正のないとき (図 4. 5 (a) の磁極形状)

透過率と分解能 (FWHM 値) を測定した結果, 分解能 0.8 % のとき最大透過率 0.7 %, 最良分解能については図 4. 8 に示したように 0.19 % が得られた。図 4. 8 には ψ による分解能の変化も示した。

検出器の位置を変えて透過率の変化を測定し, 図 4. 9 の点線で示した。線源の位置 L は約 35 cm, 検出スリットは磁極端から約 40 mm 内側へはいったところである。図からわかるようにゆるやかな最大が 30 mm 程度内側へはいった位置に観測される。この最大が分解能最良点よりも後方にあるということは, 分解能最良点は二重集束点になっていないことを示している。

4. 1 節で述べたように, $\bar{\alpha}_L \approx 0.4_0$ になっていることからこのことは予想できる。すなわち, α の値が 0.5 よりも小さくなると r 方向の集束は設計値よりも早くなり, z 方向は後方にずれることが, ベータ管振動の理論から知られているからである。補正を加えて二重集束を実現すれば, 透過率はもっと増すことができると考えられる。次にこの補正について述べる。

4. 2. 2 図 4. 5 (b) の形の付加磁極による補正

入射側漏えい磁界分布を図 4. 6 の磁界分布に補正して, $\bar{\alpha}_L$ を 0.5 近辺に持ってくることを試みた。検出器の位置と透過率との間の関係について, 図 4. 9 に図 4. 5 (a) の場合と比較して示した。線源の位置による変化も同時に示してあり, L が小さくなるとせん (尖) 頭値が後方に移動する傾向が見られる。この傾向は式 (2. 6) の物点像点の関係から当然予期される。

$L=34$ cm に固定し, 検出器の位置と分解能および透過率の変化を調べた結果, 磁極端から約 25 mm のところで最良分解能 0.35 % および最大透過率 0.9 % をうることができ, 二重集束がほぼ実現されていることがわかった。透過率についてはかなりの利得があったが, 補正のないとき (図 4. 5 (a)) に比べて分解能はかなり悪い。

2. 3 節の考察を利用し, 磁界定数 α と集束点までの偏向角 θ の関係を求めると図 4. 10 の結果が得られる。図の α_L, α_I はおのの漏えい磁界および漏えい磁界から十分離れた電磁石内の磁界での α である。実線は LIFF 近似による変化, 点線は SCOFF 近似による変化を示している。 $\alpha_L \approx \alpha_I \approx 0.5$ と考えると図 4. 10 から集束点は約 205 度になる。5 度は $r_0=30$ cm とすると約 26 mm の弧長になり, 上記の 25 mm と誤差の範囲で一致している。

4. 2. 3 図 4. 5 (c) 形の補正

図 4. 5 (b) 形の補正はあまり局所的すぎると考えて一様に補正する形を考えた。透過率は 0.92 % とわずかに改良され, 分解能も 0.32 % とわずかに上がった。その後, 出射側漏えい磁界の動径方向および光軸上磁界補正を試みたが, 性能向上は認められなかった。

4. 2. 4 外周シム補正

内側シムの効果はわずかしき認められなかったけれども, 外周シムの効果は著しかった。このとき入射側の付加磁極は図 4. 5 (c) の形である。

L は約 33 cm, 検出器は磁極端から約 3 cm 外側の位置に置いたとき最大透過率 1.0 %, 最良分解能 0.27 % が得られた。アントラセン検出器と GM 検出器で測定した結果を図 4.11 に示した。図 4. 12 には, 外周シムを付けたときと付けないときのビームプロファイルの写真を示した。外周シムを付けた場合のプロファイルは, z 方向に大きくなり r 方向の幅はわずかに狭くなっている。これは r 方向の集束性が改良されていることを示している。

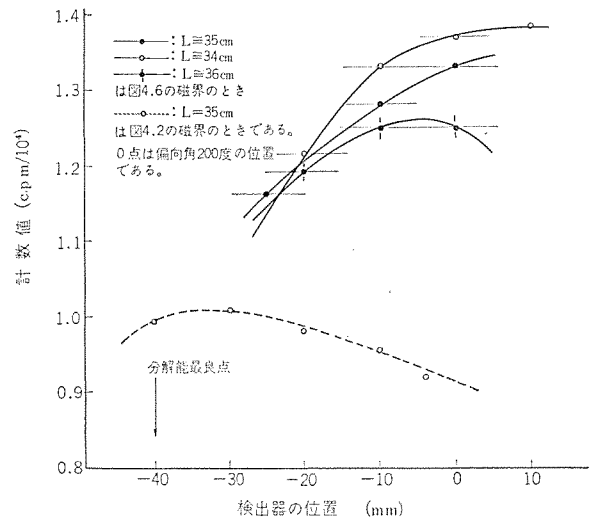


図 4. 9 検出器と線源の位置に対する計数値の変化
Transmission vs. detector and source position.

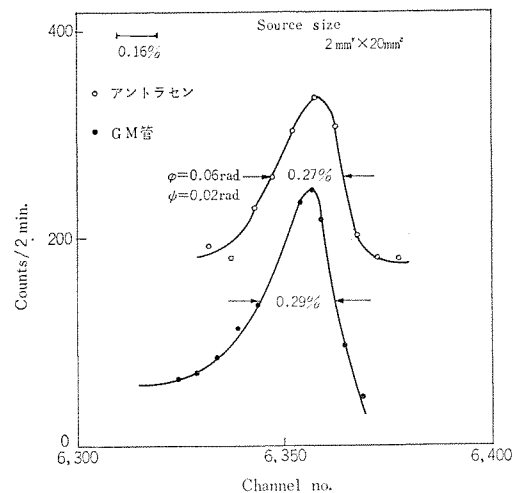


図 4. 10 Cs^{137} の K 線内部転換電子 スペクトル (補正後)
K-conversion spectrum of Cs^{137} .

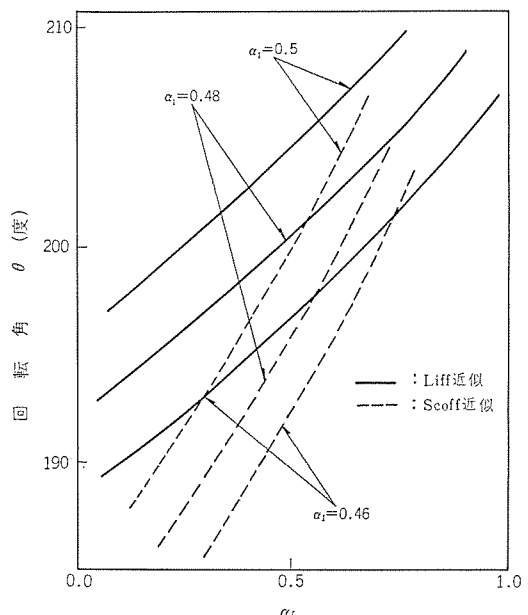
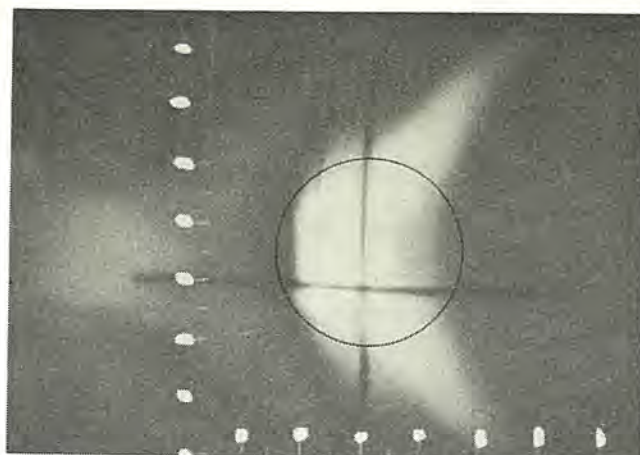
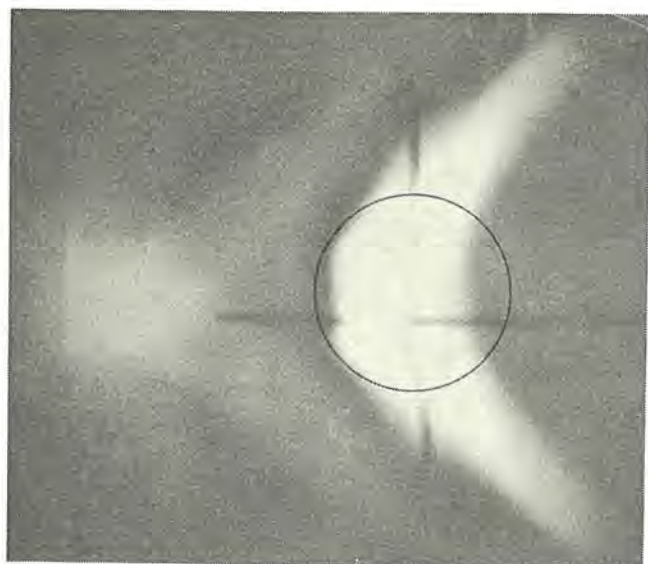


図 4. 11 点線源の集束点の α への依存性
Dependence of focussing point on α .



(a) シムなしのとき



(b) シムありのとき

図 4.12 フォイル (円は 32φ の検出器)
Beam profile.

図 3.3 に示されているように、プロフィルの z 方向の広がりを制限している直線、

$$z = -\{D_{11}^*/2\sqrt{C_{20}^* \cdot C_{02}^*}\} \cdot (r-r_0) \dots \dots \dots (4.2)$$

がかなり明確に観測できる。そのこう配は約 30 % 小さい。これから式 (4.2) の D_{11}^* , C_{20}^* , C_{02}^* は SCOFF 近似による値からずれていることが予想できる。

2.3 節の式 (2.26) を利用すると LIFF 近似での C_{10} , D_{01} の最大値、

$$\left[\left\{ A_{12} + \left(L - \frac{l}{2} \right) \cdot A_{11} \right\}^2 + r_0^2 \cdot (1-\alpha)^{-1} \cdot \left\{ A_{22} + \left(L - \frac{l}{2} \right) \cdot A_{21} \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

が求まる。ここで A_{ij} は M_f の i, j 要素である。

$r_0=30$ cm, $L=33$ cm, $\alpha=1/2$, $l=30$ cm を用いると LIFF 近似の $C_{10}=D_{01}$ の最大値は 57 cm となる。この値と式 (2.15) から透過率 T は、 $W=10.65$ cm のとき $T=1.1\%$ となり SCOFF 近似による計算値 1.5 % よりも小さくなる。この値は測定値 1.0 % に近い。変位と発散についての一次変換を与える式 (2.26) からは、集束点でのビームプロフィルについての情報は得られない。写真によれば r 方向

の幅が図 3.2 から予期される幅より広いが、写真に記入したアントラセン 検出器の大きさ 32 mmφ 内にある。

5. む す び

SCOFF 近似で製作したこの装置は、明るさが約 0.7 % で目標値 1.1 % の約 64 % であった。最良分解能は 0.19 % で目標値 0.2 % よりもわずかに良かったが、この状態では二重集束が実現されていなかった。その後 4.2.3 項に述べたように、付加磁極を用いて漏えい磁界分布の補正を行ない、さらに 4.2.4 項に述べた外周シムで、磁極内全域の半径方向磁界分布の補正を行なった。そのうえで、線源位置と検出器位置を変えて二重集束点を探し、線源部自由空間長 $L=33$ cm, 磁界セクタ角約 205° でほぼ二重集束が実現されていることを確認した。この条件で測定した最大明るさと最良分解能は、それぞれ 1.0 % と 0.27 % であった。

分解能以外の性能の違いは、漏えい磁界内の電子軌道を考慮した解析的計算で、比較的良好に説明できることが明らかになった。この装置の製作および調整について、多くのご指導とご援助をいただいた名古屋大学工学部原子核工学科の渡辺教授に深く感謝いたします。

なお、この装置の製作と調整は三菱中央研究所第一研究部の後藤主任研究員の指導のもとに行ない、研究所や神戸製作所の多くの人の協力を得て行なった。ここで名古屋営業所の担当者も含めてこれらの方々のご協力を感謝いたします。(昭和 43. 7. 29 受付)

参 考 文 献

- (1) N. Svartholm & K. Siegbahn : Arkiv. f. Math. Astr. Fys., A 33. No. 21 (1946)
- (2) A. Moussa & J. B. Bellecard : J. Phys. et Rad., 15, 85 A (1954)
- (3) A. A. Bartlett, R. A. Ristinen & R. P. Bird : Nucl. Instr. and Meth., 17, 188-224 (1962)
- (4) R. L. Graham, G. T. Ewan & J. S. Geiger : Nucl. Instr. and Meth., 9, 245 (1960)
- (5) 天道, 橋爪, 粟屋, 秋葉, 上田, 長田, 島, 朝日 : 三電技, 42, 2, (昭 43)
- (6) Harald. A. Enge : Rev. Sci. Instr. 35, 3 (1964)
- (7) M. Sakai, H. Ikegami & T. Tamazaki : Nucl. Instr. & Methods, 9, No. 2, 154 (1960)
- (8) 池上, 太組, 山本, 加沢, 橋本 : 日立評論 46, No. 4 (昭 39)
- (9) H. Ikegami : Rev. Sci. Instr. 29, 11, 943 (1958)
- (10) K. Siegbahn : Alpha-, Beta- & Gamma-Ray Spectroscopy, Vol. 1, (1966)
- (11) S. Penner : Rev. Sci. Instr. 32, 2 (1961)
- (12) 後藤, 秋葉, 入江, 上田 : 三電技, 42, 2 (昭 43)
- (13) H. Wollnik and H. Ewald : Nucl. Instr. & Meth., 36, 93 (1965)
- (14) H. Wollnik : Nucl. Instr. & Meth., 38, 56 (1965)
- (15) John F. Streib : H. E. P. L. Report No. 104 (1960)
- (16) D. W. Kerst and R. Serber : Phys. Rev. 60, 53 (1941)

レール探傷器, FD-420 形

河野 勝美*・佐藤 春治*

Ultrasonic Flaw Detectors for Testing Rails, Type FD-420

Kamakura Works

Katsumi KOONO・Haruzi SATOO

Recently there has been a trend of especial increase in the speed of cars as well as in the volume of traffic. To cope with the situation the maintenance of the railway equipment is drawing the attention of people concerned with the transportation industry as the most important factor. Of the maintenance work to measure the internal flaws of the rail stand out among others. The article describes the principle, construction, principal performance, examples of flaw detection and character of each part in regard to flaw detectors. The set is so devised as to project ultrasonic pulses of 2 Mc into the rail, to receive echoes from the flaws and have indications on a cathode-ray tube to discover the flaw. A probe to send and receive ultrasonic waves uses both straight and angle beam so that the detection of flaws is made possible from the top surface to the bottom of the rail. Furthermore it is also capable of detecting the flaws about the welded joints as well as the circumference of the bolt holes at the joints.

1. ま え が き

最近のように、車両の高速化や交通量が急増加の傾向になると、必然的にレールの疲労や折損の割合が多くなり、レールの検査や取換えがいっそう重要になってくる。今回、これらレール検査のうち、内部欠陥を見つけることを目的としたレール探傷器を製作したので、その概要を述べる。

レール探傷器としては、従来から超音波を使用したポータブルのクラックメータが多数各方面で使用されているが、継目穴下、底部、および溶接部の探傷が原理的に困難である。ここで説明するレール探傷器はクラックメータと同じく超音波を使用しているが、下記の方法を採用し測定範囲の拡充を計った。

(1) パルス反射式とした。

(2) レールに対して超音波を垂直だけでなく、斜め方向からも投入させた。

このレール探傷器は欠陥の絶対値的な測定器でなく相対的に欠陥を判定するものであり、高度な超音波技術や冶金学技術は省略し、本文ではレール探傷器の取扱いに必要な超音波の基本について説明する。

2. 探 傷 原 理

2. 1 一般の性質

2. 1. 1 探傷波形

図 2. 1 は、超音波探傷の原理を示す。図 2. 1 (a) のように探触子を被検査物表面へ接触させて電気的送信パルス(T)を印加すると、探触子の作用により超音波パルスに変換され、被検査物中へ投入される。この超音波パルスは被検査物中を進行し、途中で欠陥があると一部が反射され欠陥反射波(F)となり、残りの大部分はさらに進行し底面で全反射され、底面反射波(B)となる。この欠陥反射波(F)と底面反射波(B)の超音波パルスは、探触子の作用でそれぞれ電気的パルスに変換される。これをブラウン管に表示すると、図 2. 1 (b) のようになる。ここでFの位置Lは欠陥の位置に対応し、Fの高さHは欠陥の大きさに対応し欠陥を発見し得る。

2. 1. 2 波動の種類

超音波には図 2. 2 のように三つの性質をもった波動がある。こ

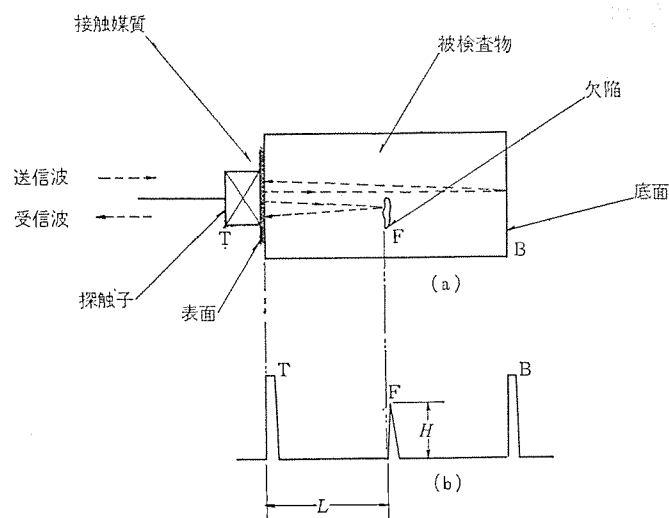


図 2. 1 超音波探傷の原理
Principle of ultrasonic flaw detection.

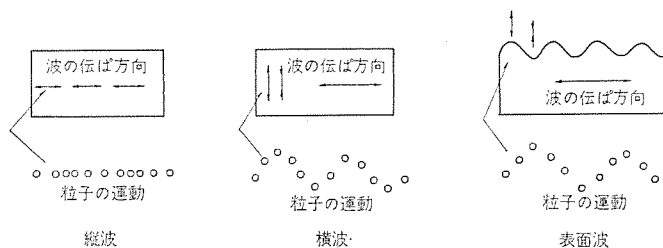


図 2. 2 波動の種類
Ultrasonic waveforms.

の装置では縦波と横波を使ってレール探傷を行なっている。

(1) 縦 波

縦波は粒子運動と波の伝ば(播)方向が同じであり、三つの波動のうちもっとも速い伝ば速度をもち、レール内は約 5,800 m/s で伝わる。固体と液体に存在し、垂直探触子で発生させることができる。

(2) 横 波

横波は固体だけに存在し、粒子の運動と直角の方向に波が伝わる性質がある。縦波を固体へ適当な角度で入射させると固体内には横波が発生するようになる。図 2. 3 は有機ガラスシュースを使って横波を発生させる方法で、入射角 i と屈折角 r は有機ガラスと鋼鉄との音

速比 V_D/V_S で決まり、式 (2.1) から計算できる。

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_D}{V_S} \quad (2.1)$$

表 2.1 の定数を式 (2.1) に入れて計算すると、横波は入射角 (i) 約 28 度から約 57 度の範囲で発生する。この装置は屈折角度 (V) 37 度と 70 度の横波を使用している。

(3) 表面波

固体と液体の表面を伝わる性質がある。粒子の運動方向は横波の場合と同じである。

2.1.3 振動子の指向性

振動子の直径を D とすると、指向性は式 (2.2) で示される。

$$\sin \theta_0 = 1.2 \frac{\lambda}{D} \quad (2.2)$$

ここに $\lambda = \frac{c}{f}$

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (\text{図 2.4 参照})$$

C : 超音波の伝ば速度 (m/s), 以下音速と略す

f : 周波数 (Mc)

D : 振動子の直径 (m)

式 (2.2) より、指向性を良くする (θ_0 を小さくする) には、周波数 f および振動子の直径 D を大きくすればよいことがわかる。

2.1.4 接触媒質

接触媒質とは探触子と被検査物間に塗布する物質であって、普通、水・マシン油・グリセリンなどが使用される。

接触媒質を使用しないと、探触子と被検査物間に空けき(隙)ができて超音波の伝達が悪くなるので、被検査物の表面状態および使用量に応じて使い分けている。この装置では使用量が多いことと車両のスリップの危険性を考えて、水を使用している。

2.2 超音波の反射と透過

2.2.1 垂直の反射と透過

被検査物の底面など十分広い平面に超音波が垂直に当たったときは、同一経路を逆方向に反射する。(図 2.5 参照)

音圧反射率 r_P は、式 (2.3) から計算できる。

$$r_P = \frac{P_r}{P_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.3)$$

音圧透過率 t_P は、式 (2.4) から計算できる。

$$t_P = \frac{P_t}{P_0} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.4)$$

ここに Z_1 : 媒質 1 の音響抵抗

Z_2 : 媒質 2 の音響抵抗

ρ_1, C_1 : 媒質 1 の密度, 音速

ρ_2, C_2 : 媒質 2 の密度, 音速

媒質 1 が鉄で媒質 2 が水のときは 93% 反射し、空気の場合は約 100% 反射する。表 2.1 に各物質の音速・音響抵抗・音圧・反射率を示す。

2.2.2 欠陥の反射率

欠陥の大きさは、図 2.1 に示すように欠陥反射波 (F) の高さ H に関係するが、欠陥の傾き・形状などにより H が異なるため簡単には決められない。ここでは探傷面に平行な欠陥からの反射について計算式を表 2.2 に示す。この反射率は受信部の直線性が良好な場合は H に比例し、一般に小さい欠陥の場合、反射率は欠陥の面積に比例する。欠陥の反射率とは、欠陥から反射される音圧と欠陥

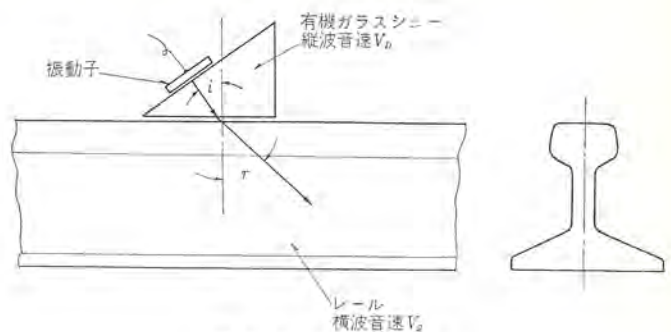


図 2.3 横波の発生
Generation of transverse wave.

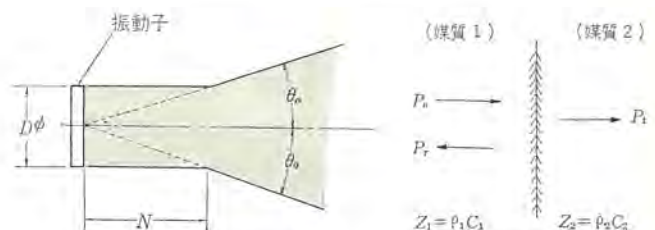


図 2.4 振動子の指向性
Directivity of transducer.

図 2.5 垂直方向の反射と透過
Reflection and transmission of sound at a normal incidence.

表 2.1 各種物質の音速・音響抵抗・反射率
Velocity, acoustic resistance and reflection-factor of various materials.

物 質	縦波速度 ($\times 10^3$) (m/s)	横波速度 ($\times 10^3$) (m/s)	音響抵抗 ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	音 圧 反 射 率 (%)					
				油	水	有機ガラス	ベークライト	アルミニウム	しんちゅう
鋼 鉄	5.88	3.31	45.3	94	93	86	85	45	7
しんちゅう	4.63	2.07	39.6	93	93	84	83	40	0
アルミニウム	6.35	3.13	17.1	86	85	67	65	0	—
ベークライト	2.59	—	3.6	48	43	4	0	—	—
有機ガラス	2.72	1.46	3.3	45	40	0	—	—	—
水	1.43	—	1.43	6	0	—	—	—	—
油	1.39	—	1.28	0	—	—	—	—	—

表 2.2 理想的な欠陥の反射率
Reflection factor of ideal flaw.

欠 陥 の 形 状	条 件	反射率の計算式
円形平面	$r \leq \frac{1}{2} \sqrt{\lambda x}$	$2 \sin \frac{\pi r^2}{\lambda x}$
長方形平面	$2a \leq 0.8 \sqrt{\lambda x}, 2b \leq 0.8 \sqrt{\lambda x}$	$\approx 22 \pi r^2 / (\lambda x)$
	$2a \geq 4 \sqrt{\lambda x}, 2b \geq 4 \sqrt{\lambda x}$	≈ 1
球形	$2\pi r > 0.7 \lambda$	$\approx r/x$
	$2\pi r < 0.7 \lambda$	$\approx 66 r^3 / (\lambda^2 x)$
円 柱	太長 $2 \sqrt{\frac{a(a+x)}{\lambda x}} \geq 0.8, \frac{2b}{\sqrt{\lambda x}} \geq 4$	$\approx \sqrt{a/(a+x)}$
	細長 $2 \sqrt{\frac{a(a+x)}{\lambda x}} \leq 0.8, \frac{2b}{\sqrt{\lambda x}} \geq 4$	$\approx 2a \sqrt{2/(\lambda x)}$
	太短 $2 \sqrt{\frac{a(a+x)}{\lambda x}} \leq 4, \frac{2b}{\sqrt{\lambda x}} \leq 4$	$\approx 2b \sqrt{2a/[(a+x)\lambda x]}$
	細短 $2 \sqrt{\frac{a(a+x)}{\lambda x}} \leq 0.8, \frac{2b}{\sqrt{\lambda x}} \leq 0.8$	$\approx 8ab/(\lambda x)$

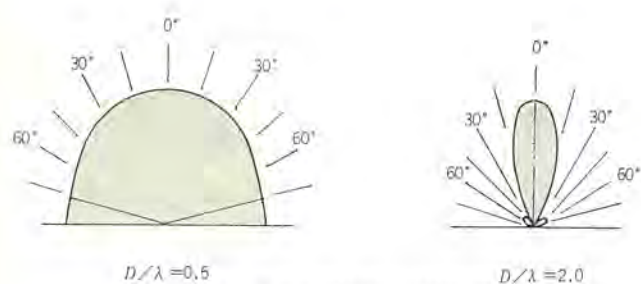


図 2.6 円形平面欠陥の反射特性
Reflection pattern for a disk shaped flaw.

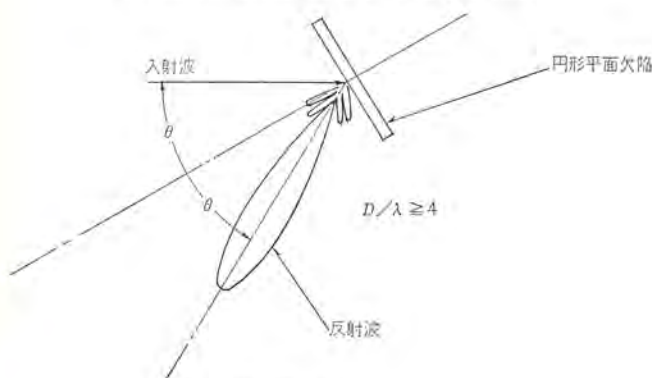


図 2.7 傾いた円板の反射特性
Reflection pattern for a inclined disk shaped flaw.

の代わりに無限に広い水平な完全反射面を考え、その面から反射される音圧との比である。

2.2.3 欠陥反射波の指向性

超音波が欠陥に垂直に当たっても斜めに当たっても言えることであるが、欠陥反射波の指向性は欠陥の大きさにより異なってくる。図 2.6 は、円形平面欠陥に超音波が垂直入射し、反射されときのエネルギー分布を欠陥の法線方向の大きさを 1 として示したものである。波長の 2 倍以上の直径をもつ欠陥は鋭い反射特性をもつことがわかる。直径が波長の 4 倍以上の円形平面欠陥に斜めに超音波が入射すると、図 2.7 のように反射波は入射角と等しい反射角をもつようになる。

3. 構造

図 3.1 に電気的系統図、図 3.2 にこの装置の外観を示す。

本体送信部で発生した送信パルスは、架台に取付けられた探触子に供給され、超音波パルスに変換される。逆にレール底面または欠陥などから反射した超音波パルスは、同じ探触子で電気的パルスに変換され、架台の切換器を経由して本体受信部で増幅検波してブラウン管に探傷波形を描かせている。

探触子はジニバル継手により架台に取付けられているので、レール表面と良好な接触が維持できるようになっている。架台はブラウン管面の所で、左右に ± 25 mm まで傾けても探傷にさしつかえない。この装置に使用する探触子はすべて分割形を使用している。分割形探触子とは、一つのケース内に送信と受信の振動子を組込んだもので、レール表面付近の欠陥が検出しやすい特長がある。現場的用途を考慮して耐振試験（振動数 16.7 c/s、複振幅 3 mm、30 分連続）を実施し、構造的・電気的に異状のないことを確認している。

探触子の接触面は摩耗試験の結果、100 km 以上使用しても十分耐えられることを確認している。

当社が構造的に特長とするところは次の点である。

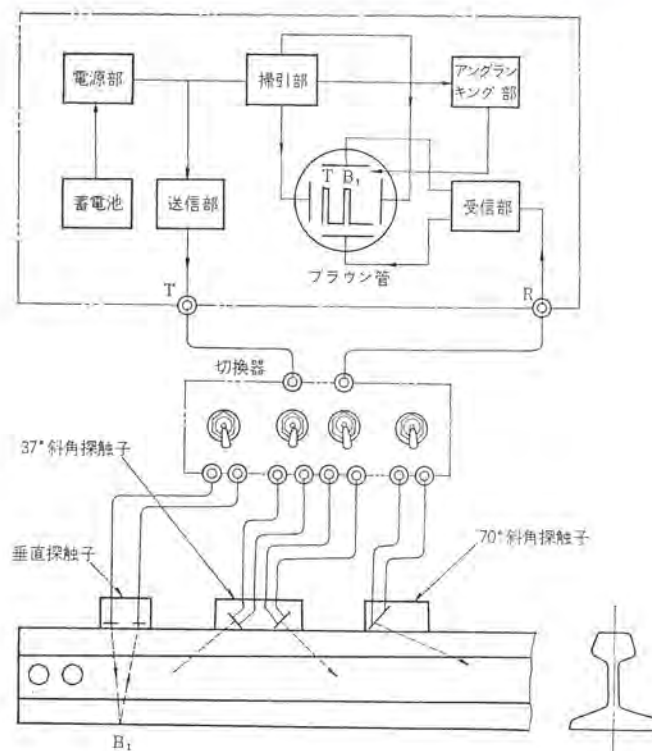


図 3.1 探傷器の電気系統
Block diagram of ultrasonic flaw detector.



図 3.2 探傷器の外観
Exterior view of ultrasonic flaw detector.

- (1) 探触子の上下取っ手および給水取っ手が大型で操作しやすい。
- (2) 本体の取付け・取りはずしが容易であり、しかも蓄電池の交換が容易である。
- (3) 水そう(槽)の口が広いので、水の補給が容易である。
- (4) 探触子とレール表面間のすき(隙)間に応じて接触媒質が供給されるので消費量が少なく、かつ安定に供給される。

次に当社が電気的に特長とする点は、蓄電池の端子電圧が変化しても手動電圧調整器を内蔵しているので、電源変化による感度変化がないことなどである。

4. 主要性能

- (1) 測定範囲： 鋼材 50 mm~1,000 mm
- (2) 検査周波数： 2 Mc
- (3) ブラウン管： 75 mm, ブラウン管前面には探傷波形を

- 拡大するためのレンズ(倍率は約2倍)を取付けている。
- (4) 表示方式: A スコープ DC 表示
 - (5) 探傷感度: レール内の欠陥 5 mm 以上が検出可能
 - (6) 使用電源: 12 V 蓄電池(充電可能)
 - (7) 連続使用時間: 4 時間以上(予備電池を含めると 8 時間以上)
 - (8) 近距離分解能: 鋼材表面から 20 mm の距離の直径 2 mm ϕ の平底穴を探傷できる。
 - (9) 遠距離分解能: 鋼材表面から 91 mm と 100 mm の距離からなる段の反射波を判別できる。
 - (10) 受信部の直線性: 鋼材表面から 150 mm の距離の直径 5.6 mm 平底穴からの反射波飽和値までの直線性は ± 1.5 dB 以内である。
 - (11) 周囲温度: 0°C \sim 40°C (本体の動作範囲は、-5°C \sim 40°C)
 - (12) 外形寸法: 約 400 mm 幅 \times 900 mm 高 \times 780 mm 長
 - (13) 重量: 約 28 kg (ただし、水は除く)
 - (14) 接触媒質: 水 (5 l \times 3=15 l)

5. 探傷法と結果

5.1 探傷法

探傷法には一般探傷と精密探傷がある。

一般探傷は本体を架台に取付けた状態でレール全般にわたって探傷する方法である。精密探傷は本体を架台からはずし、おもに継目ボルト穴付近を探傷する方法である。表 5.1 と図 5.1 に示すように、各探触子は欠陥に応じて使いわけ、レールの表面近くから底面まで探傷可能にしている。図 5.1 は図 2.7 の結果からわかるように θ をできるだけ 90° にするように選んでいる。

表 5.1 探触子の使い分け
Selection of probe.

使用探触子	レールの欠陥	備考
垂直探触子	頭部水平裂、腹部水平裂、水平方向の破断	縦波
37°探触子	腹部横裂き、継目ボルト穴の破断	横波
70°探触子	頭部横裂き	横波

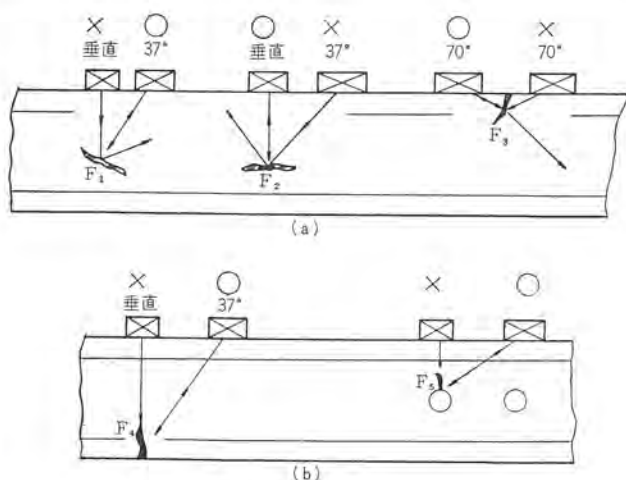


図 5.1 欠陥反射特性
Reflection pattern of flaw.

探傷にあたり次の点に注意しなければならない。

- (1) 架台はなるべく左右に振れないようにする。架台が左右に振れると、探触子の位置がずれてくるのでレール底部の反射波が出てくる。
- (2) 接触媒質用の水は多く使用する。探触子とレール表面間に水が充满しているとレール面のさびや偏摩耗などに対して、超音波の伝達が非常によくなる。また砂などは水により洗い流される。
- (3) 感度目盛は適当な調度にする。
- (4) 異形断面レールのうち、マンガン鋼の部分は超音波減衰が多いので探傷できない。

5.1.1 一般探傷法

レールの継目と継目の中間部は、全部の探触子を動作させて探傷する。レール中間部では継目ボルト穴に類するものが少ないので、探触子を全部動作させても探傷波形の判別が可能となる。もし欠陥反射波が現われた場合、切換器で探触子の出力を切っていく、どの探触子で検出しているかをしらべ、欠陥の位置と大きさなどを確認する。次に、継目穴付近は探触子を 1 個ずつ動作させて探傷する。これは探触子を 2 個以上動作させると、探傷波形の解釈が困難になるためである。

5.1.2 精密探傷法

精密探傷法は、継目穴付近・溶接部・その他、とくに精密探傷したい場合に実施する。接触媒質はマシン油またはグリセリンが適当である。

5.2 探傷結果

図 5.2 の標準レール(日本国有鉄道検査基準案による 50 kgN レールを使用)を測定した結果を図 5.3 に示す。

(1) 撮影条件

キヤノンカメラ 7 S, 絞り F4, シャッター速度 1/4 s, 距離 ∞

(2) 感度条件

- (a) 感度 A $\cdots\cdots$ 37° 探触子にて底面 1 回反射による継目ボルト穴反射波の高さをわずか出す。ただし切換器は 37° 前のみ「入」とする。
- (b) 感度 B $\cdots\cdots$ 37° 探触子にて標準傷 Pa の反射波高さを飽和値ぎりぎりにする。ただし切換器は 37° 前のみ「入」とする。
- (c) 感度 C $\cdots\cdots$ 37° 探触子にてボルト穴を直接検出したとき、レール腹部による遅れ反射波が出なくなる感度。

感度の高い順に並べると、A \rightarrow C \rightarrow B となる。

5.3 探傷結果の評価

5.3.1 欠陥の位置

ブラウン管透視目盛板の横軸目盛を読み取り、欠陥の位置を確認する。この装置は分割形探触子を使用している関係上、欠陥反射波の位置が欠陥の位置に、直接対応しないからあらかじめ標準レール(図 5.2 参照)で両者の対応をとっておくことよ。

5.3.2 欠陥の大きさ・方向性

欠陥の大きさについては、図 5.4 と図 5.5 のように 2 種類のグ

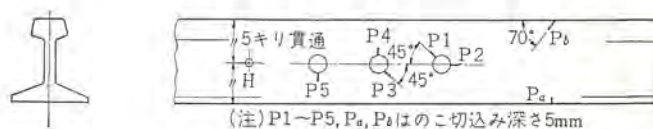


図 5.2 標準レール (50 N レール)
Standard rail.

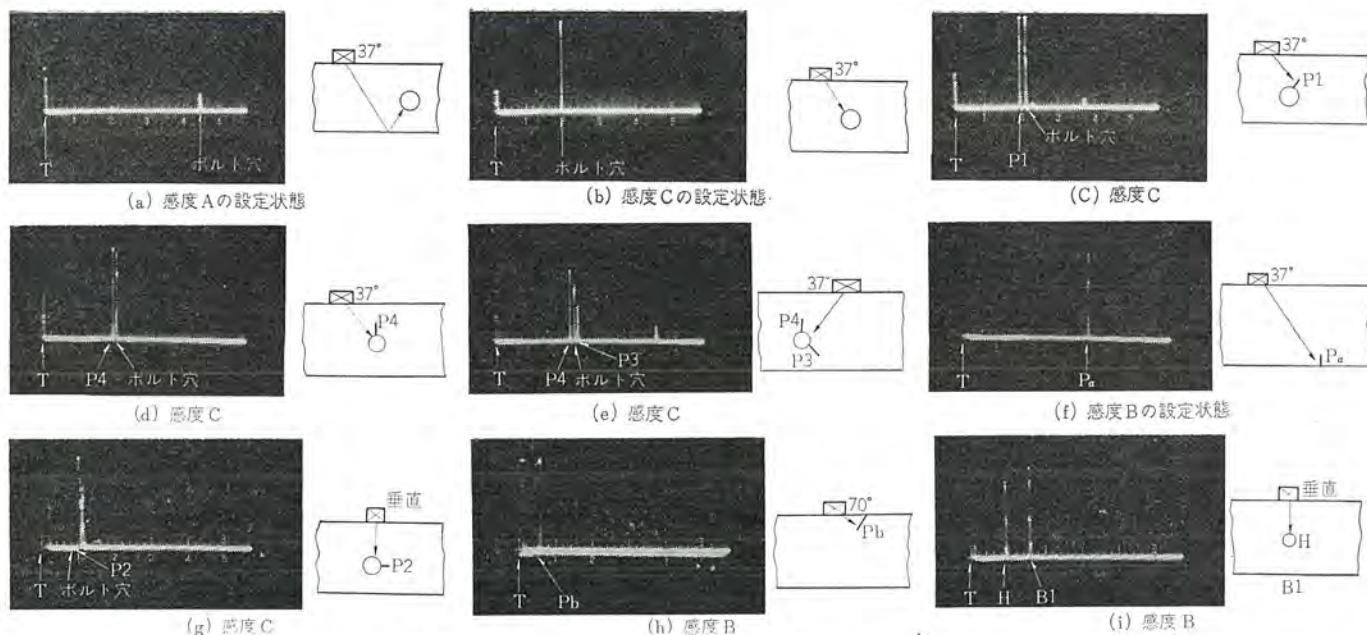


図 5.3 標準レールの探傷波形

Pattern of standard rails.

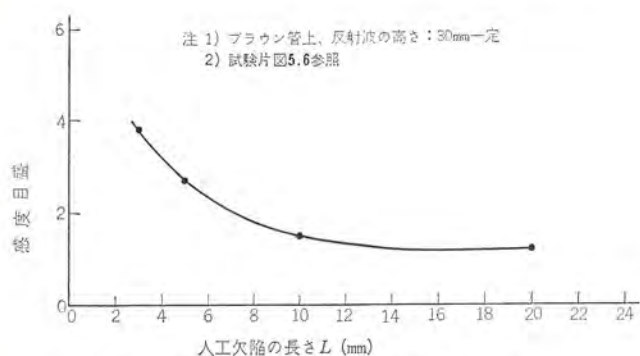


図 5.4(a) 70° 斜角探触子による評価 グラフ
Estimated graph by measuring with the 70° angle beam probe (tentative data).

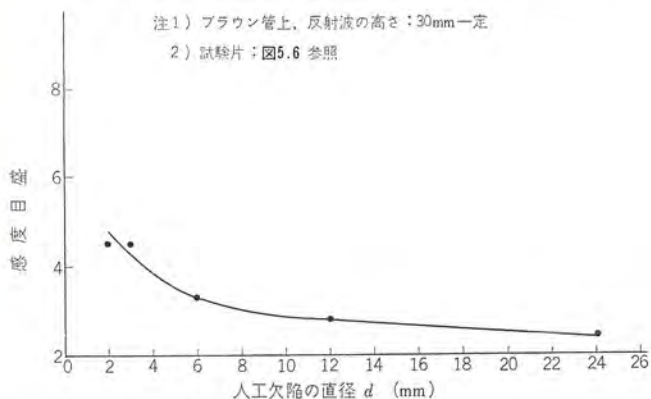


図 5.5(a) 垂直探触子による評価 グラフ
Estimated graph by measuring with the normal probe (tentative data).

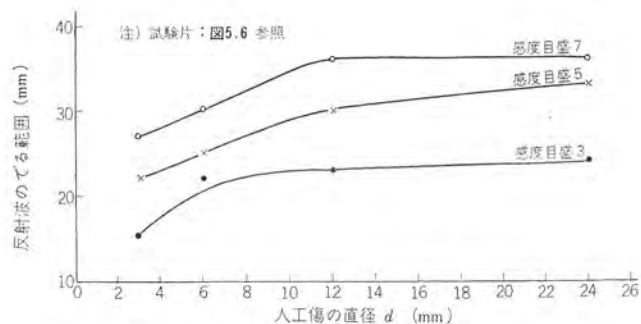


図 5.4(b) 垂直探触子による評価 グラフ
Estimated graph by measuring with the normal probe (tentative data).

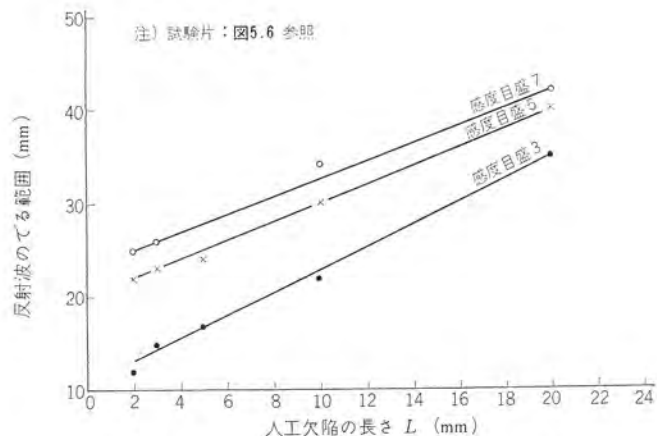


図 5.5(b) 70° 斜角探触子による評価 グラフ
Estimated graph by measuring with the 70° angle beam probe (tentative data).

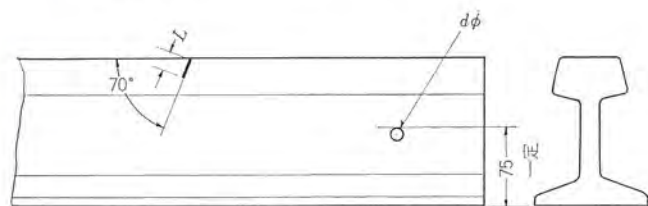


図 5.6 試験片レール (50 N レール)
Test piece (50 N rail).

グラフを測定しておき、両者を併用して評価する必要がある。欠陥の方向については、同一の欠陥で反射波が最も大きく得られる探触子のビームの方向を考え、そのビーム方向と直角の方向に欠陥の広がりがあると、目やすを付ける。

5.3.3 注意点

超音波探傷法は原理上、音響抵抗の変化を検出しているものであるから、感度を適当にすること、欠陥反射波をそのまま欠陥と判

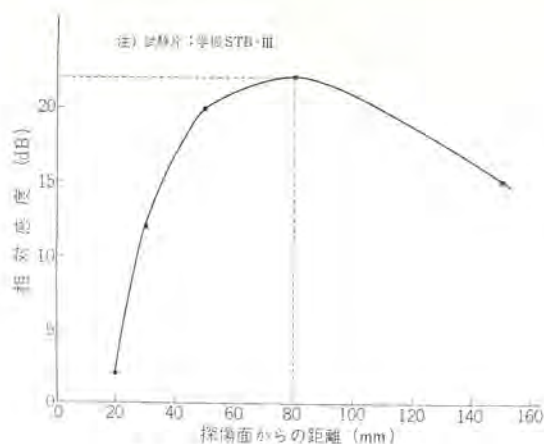


図 6.1 垂直探触子の感度特性
Sensitivity vs. depth below the surface.

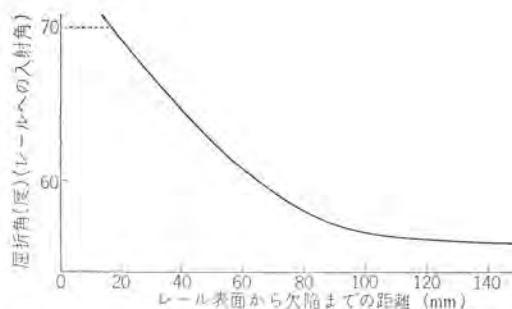


図 6.2 70° 探触子による探傷距離と屈折角の関係
Relation of detecting distance and angle of refraction
by measuring with the 70° angle beam probe.

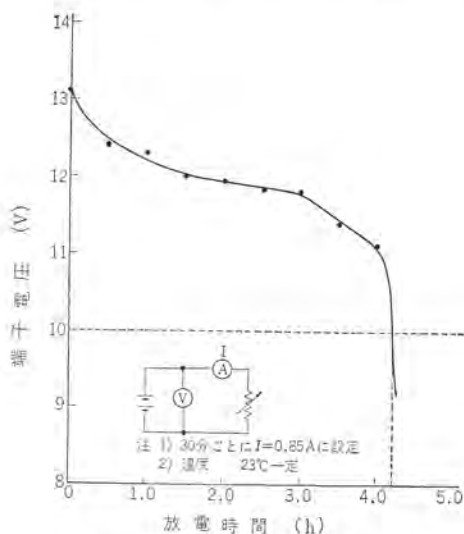


図 6.3 蓄電池の放電特性
Discharge characteristics of battery (tentative data).

定しないことがたいせつである。

感度を不要に上げていくと、音響抵抗の変化を検出している関係上、欠陥以外の材料組織や溶接熱影響部などにより反射される例がある。また被検査物の形状の注意点としては、レールの場合、あご部からの反射波やボルト穴付近を探傷していると側面反射波が見られることである。

6. 各部の特性

6.1 探触子の特性

6.1.1 垂直探触子の感度特性

図 6.1 に垂直探触子の距離対感度の特性を示す。感度が最大になる位置は、レール表面から約 80 mm 程度にある。

6.1.2 斜角 70° 探触子の角度

分割形探触子の場合、図 6.2 に示すようにレール表面からの距離により屈折角がかわっている。70° 探触子は約 20 mm のとき 70° を満足するように考慮を払っている。

6.2 蓄電池の特性

図 6.3 はこの装置の蓄電池の放電特性である。装置のほうでは蓄電池の端子電圧が 10 V になるまで使用可能になっているため、この例では約 4 時間 15 分使用可能となる。

この蓄電池は、密閉形鉛蓄電池のため、電解液の注入や補水は不要である。使用後は付属の充電器で必ず充電しなければならない。放電したまま長期間放置しておくと充電が困難となり使用不能になるおそれがある。充電時間は完全放電の場合 10～12 時間、定格の 1/2 程度の放電の場合約 8 時間である。使用せず保管または放置しておく場合も 1～2 カ月に 10 時間程度充電するのがよい。

寿命の点で、充電時の温度は 10°C 以上がよい。

7. む す び

車両の高速化や交通量の増加は年々めざましいものがあるが、保安上重要であるレールの内部欠陥探傷器については今一步の感があり、関係者より信頼性における装置の開発を待たれていたところである。本装置はこの要求にもとづき開発製作したもので、なにぶんにも価格的、場所的制限があり、取扱上不便な点もあると考えられるが、少しでも保線のお役に立つよう願う次第である。

おわりに終始ご指導いただいた日本国有鉄道の方々、ならびに装置の製作・実験にご協力いただいた当社関係者に厚くお礼を申し上げます。

(昭和 43-9-27 受付)

参 考 文 献

- (1) 日本学術振興会：超音波探傷法 (昭 39)
- (2) 高原：レール損傷と防止対策、新線路 (昭 42-11)

YAC 用レーダスピードメータ

東 昭*・遊 佐 滉*
阿部 寿夫**・中村 泰而

Radar Speed Meter for YAC

Japanese National Railways Akira HIGASHI・Akira YUSA
Mitsubishi Electric Corp., Kamakura Works Toshio ABE・Taiji NAKAMURA

A radar speed meter is speed measuring equipment utilizing the Doppler Effect of radio waves.

Being capable of continuous measurement of the speed on a moving body, it has very wide application. Of a number of applications, a radar speed meter for YAC (Yard Automatic Control) is used for a speed detector in speed control of fling cars at an automatic shunting yard. Mitsubishi has been putting this speed meter to a practicability test with the Japanese National Railways, Technical Research Institute. Now an apparatus has been completed and delivered to Koriyama Shunting Yard, a model yard of automatization. This article describes the outline of the system, problems in the design, the equipment and test results.

1. ま え が き

レーダスピードメータは、マイクロ波のドップラ効果を利用した速度検出装置で、移動体の速度が精度よく連続測定できることから各方面に広く使用されている。なかでも操車場の自動化にあたり、散転貨車の速度検出にレーダスピードメータの使用が考えられ、昭和33年2月、日本国有鉄道技術研究所に試作機が納入されて以来、技術的な検討、実験が続けられてきた。

その後日本国有鉄道では、昭和43年に完成すべく自動化モデルヤードとして郡山操車場の建設に着手し、現在までレーダスピードメータは計70台納入された。昭和43年5月より試使用が開始される予定であるが、ここにYAC (Yard Automatic Control) 用レーダスピードメータの概要を紹介する。

2. 操車場自動化とレーダスピードメータ

操車場に到着した貨物列車は、行先別に分解、各仕分線に散転され、新編成に組成されていく。この過程を全自動化するには、基本的には次の4項目に分けられる。

- (1) 押上機関車の速度制御
- (2) ポイントの自動切換
- (3) 貨車速度の自動制御
- (4) 情報処理の自動化

ハンパヤードでは、貨物列車をハンパ頂上まで押上げるため機関車を使用する。ハンパ頂上から散転された貨車を目的の仕分線に導入するためには、4段のポイントの自動切換が必要である。散転貨車がポイントを通って仕分線内で、適正速度で自動的に連結されるためには、貨車の速度制御を行なう必要がある。またこの分解組成の貨車の移動状況、すなわち貨車情報の処理を自動化する必要がある。

このうち、貨車速度の自動制御にあたって貨車速度の検出にレーダスピードメータが使用される。仕分線内には4段のカーリターダが設けられ、各リターダでは貨車は走行抵抗、走行距離などを考慮して目標地点で適正速度で自動連結するよう減速される。

このリターダは、レーダスピードメータの検出した進入速度に対して、貨車の走行条件を与えて計算機で計算された目標脱出速度になるまで貨車の速度を制御する。走行抵抗の誤差などから1台のカーリターダ

で制御できる範囲は100m前後であり、合計4段の制御が必要となる。このため各リターダについて個々に速度検出する必要があるので、レーダスピードメータはリターダの数だけ必要となり、郡山ヤードの場合最終計画では約100台となる。

貨車のリターダへの進入速度に対して、脱出速度の計算にはレーダスピードメータで与えられた進入速度のほかに、計算機に与えられる条件としては、貨車の軸重、風向風速、フルネス(仕分線の貨車のつまり具合)などがある。貨車の走行抵抗、進入速度より脱出速度を計算し、リターダの圧力ノッチを決定してリターダを駆動する。さらにレーダスピードメータにより脱出速度をモニタして、脱出速度まで貨車が減速されるとリターダを開放する。この一連の動作を各リターダで行ない、最終的には適正速度で自動連結する。

貨車扱量の大きいハンパヤードでは、現在貨車の速度制御は乗込み制動を行っており、この危険作業とヤード内の作業人員の削減は非常に大きな問題となっている。郡山モデルヤードの完成は、この意味で今後のヤード自動化に重大な影響をもつものである。

3. システムの検討

3.1 測定原理

この装置はYACシステムにおいて、リターダ内で連続的に貨車の速度を測定する速度センサーとして使用されるもので、速度の検出方法はマイクロ波によるドップラ効果を利用している。この装置の構成は軌条内に設置した高周波部、およびコントロールタワー内に設置した本体架よりなっている。

いま高周波部のアンテナよりふく射されたマイクロ波ビーム内に移動する貨車がいると、その貨車からの反射波は、ドップラ効果により移動速度に比例した周波数偏移を受ける。この反射波を、マジックTを介したミキサダイオードにより、送信波の一部と混合して偏移周波数を検出する。この偏移周波数は一般にドップラ周波数と呼ばれ、次式で表わされる。

$$f_d = 2vf \cdot \cos \theta / c$$

ここで f_d はドップラ周波数、 f は送信周波数、 c は電波の伝ば速度、 θ は投射角、 v は貨車の移動速度である。したがって検出されたドップラ周波数は速度に比例する。この装置ではアンテナの向きを貨車の移動方向に取るため、投射角 θ は0、すなわち $\cos \theta = 1$ で

ある。このようにして検出されたドップラー周波数は、高周波部および本体架で増幅し、長方形波に変換した後計算機へ送られ、実時間で処理される。

3.2 測定条件

レーダスピードメータの高周波部は、仕分線の軌条内に広範囲にわたり多量に設置されるため、種々の条件が要求される。以下重要な条件を上げる。

(1) 測定可能距離

速度検出を開始して、計算機で計算された制動エネルギーとリターダが蓄積準備する時間、およびリターダ内を通過しているときの貨車速度を監視することなどから、測定距離の最大値が制約される。この値は約35mである。

(2) 測定精度

システム上からレーダスピードメータの速度測定精度は高度の値を要求され、その精度は±1%以下である。

(3) 隣接線上の貨車の影響

貨車はハンプ頂上より次々と散転され、自動的にポイント切換されて各仕分線に分解されるが、先行貨車が隣接線上を走行中にも測定に影響を及ぼさないものでなければならない。

(4) 交流誘導雑音

ヤードが交流電化区間であることが多く、操車場付近の本線からの誘導雑音等が、軌条内の高周波部とコントロールタワー間の500m~1kmに及ぶ長い信号ケーブルに誘導される可能性があり、この対策が必要となる。

(5) 温度および振動

高周波部は軌条間に設置されるため、夏の炎天下および冬の酷寒のもとで十分動作するよう設計しなければならない。また、貨車の通過時の振動も問題となる。郡山操車場および大宮操車場にて軌条内の振動を測定したところ、0.7G~1.4Gの結果を得ている。したがって高周波部としては耐振性を1.5G以上、使用温度範囲を-20~+50℃以上に保証する必要がある。

3.3 貨車のレーダクロスセクション

レーダクロスセクション(有効反射断面積)とは目標反射物体の反射能力を表わす量で、一般に次のように定義される。

目標に入射する電波の単位面積あたりの電力を $S_0[W/m^2]$ 、目標からレーダに向かって反射される単位立体角あたりの電波の電力を $S_r[W]$ とすれば、クロスセクション σ は、

$$\sigma = 4\pi S_r / S_0$$

すなわち σ は目標反射物体を、全方向に均一に電波を反射する物体に置き換えたときの電波の入射する断面積を表わしている。

表 3.1 貨車のレーダクロスセクション
Radar cross section of cars.

貨 車 名	クロスセクション $\sigma(m^2)$
ワ ム	200
ワ ラ	150
ワ ヲ	340
オ ロ	34
ス ム	108
ト	108
ト キ	53
ツ ム	95
コ ト ラ	21
ト ラ、コ ト ラ (連)	78
リ ム、ホ キ (連)	53
トラ、ストラ、コトラ (連)	53
ワ ム、ワ ム (連)	35

(連) は連結車

実際の反射目標は複雑な面からできていて、これらの反射波は互いに干渉し、わずかな状態の変化でも等価なクロスセクションが大きく変化する。またYAC用レーダスピードメータでは大地、線路の影響も考慮せねばならず、実際に測定距離範囲を求め、レーダ方程式で逆算したもののほうがより有効的である。このようにして測定した各貨車のクロスセクションの一例を表3.1に示す。

3.4 信号レベルの検討

(1) 最少受信感度

ホモダイン検波に使用するミキサダイオードは、IF周波数が低周波数帯であるため、とくに雑音指数の良いものを選択する必要があり、Microwave Associates, Inc. 製 MA 4125 A を採用した。このダイオードの雑音指数はIF周波数10kcで、20dBの値を持っている。これよりダイオードのNoise Temperature t は

$$t = \{NF - L(Fif - 1)\} / L = 24.59 \dots\dots\dots (3.1)$$

NF: ダイオードの雑音指数

L: ダイオードの変換損失

Fif: IF段の雑音指数

Noise Temperature t は $1/f$ の関数であることは明らかにされており、ここで使用するIF周波数帯の低限(45c/s)においては約5450の値となる。IF増幅器初段におけるトランジスタの雑音指数を、信号源インピーダンスとの不整合を考慮して約12dBとすると総合雑音指数は

$$NF = L(Fif + t + 1) = 21,700 \dots\dots\dots (3.2)$$

したがって入力換算雑音電力は

$$P_N = NFKTB = -102.5 \text{ dB} \dots\dots\dots (3.3)$$

NF: 総合雑音指数

K: ボルツマン定数

T: 絶対温度

B: 周波数帯域幅

一般にランダム雑音のピーク値は、実験的に実効値電圧の4倍と言われており、これを用いるとピークの入力換算雑音電力は

$$P_{N \text{ peak}} = P_N + 12 \text{ dB} = -90.5 \text{ dB} \dots\dots\dots (3.4)$$

となる。増幅されたドップラー信号は、後段でシュミット回路により長方形波変換されるが、このシュミット回路の必要する S, N のピーク比は約15dBであることが実験的に求められており、したがってクリスタルミクサーの最少信号入力 P_s のピーク電力 $P_{s \text{ peak}}$ は

$$P_{s \text{ peak}} = P_{N \text{ peak}} + 15 \text{ dB} = -75.5 \text{ dB} \dots\dots\dots (3.5)$$

すなわち最少信号入力の実効電力 P_s は

$$P_s = P_{s \text{ peak}} - 8.04 \text{ dB} = -83.54 \text{ dB} \dots\dots\dots (3.6)$$

となる。レーダスピードメータでしばしば使用される送受切換用のマジックTは、アンテナよりクリスタルミクサーまで3dBの損失があり、これを含めてアンテナの最少信号入力 P_r が決定される。

$$P_r = P_s + 3 \text{ dB} = -80.54 \text{ dB} \dots\dots\dots (3.7)$$

すなわち最少受信感度は-80.54dBであるが、雨天の場合の雨によるマイクロ波散乱雑音、および増幅器への交流誘導雑音などを考慮して約18dBの安全度を取り、最少受信感度は-62dBと推定している。

(2) アンテナ利得

操車場における本装置は24時間連続運転であり、MTBFの向上の点からクライストロンVA-218は、定格の約1/2で使用し寿命を延ばすことを計っている。したがってアンテナ出力 P_t は約15mWに設定される。またビーム幅に対し目標反射物体が小さく、自由空間伝

ばの場合には Radar equation が成立し、受信信号電力 Pr は次式で表わされる。

$$Pr = PtG^2\sigma\lambda^2/(4\pi)^3R^4 \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

ここで Pt は送信電力、 G はアンテナ利得、 σ はクロスセクション λ は波長、 R はアンテナと目標反射物体との距離である。

YAC レーダスピードメータでは、クロスセクションを大地反射も含めて測定しており、また必要とする最大測定距離 35 m 付近での貨車は十分ビーム中におさまるので、この自由空間伝播の Radar equation が使用できる。必要とされる測定距離はリターダ出口まで約 35 m であり、予測されない何らかの影響を考慮して 40 m を測定距離とし、貨車のクロスセクションを最少の 10 m² に取り、また最少受信感度は前述のように -62 dBm とすると、アンテナ利得は式 (3.8) より

$$G = \sqrt{PtG^2\sigma\lambda^2/(4\pi)^3Pr} = 22 \text{ dB}$$

となる。

この装置では開口面 211.5 mm × 110.1 mm 長さ 450 mm の電磁ホーンにより約 22 dB を得ており、さらに大地反射の影響を極力なくするよう細工している。

3.5 交流誘導雑音

操車場内に設置されているレーダスピードメータに誘起される誘導雑音としては、静電誘導と電磁誘導によるものがある。前者に対してはシールドを完全に行なうことにより除去できるので、本項では後者について述べる。また起誘導雑音源としては交流電化区間で一番問題となるトロリー線電流のみを考える。

(1) 電磁誘導雑音電圧予測計算

トロリー線に平行な長さ l (km) の被誘導ケーブル (高周波部一本体架間接続ケーブル) に誘起される雑音電圧を V_N とすると、

$$V_N = -jW(M_T I_T - M_N I_N - M_R I_R) \cdot l \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

で与えられる。ただし I_T, I_N, I_R はトロリー線、負き電線、軌道の各電流、 M_T, M_N, M_R はトロリー線、負き電線、軌道と被誘導ケーブル間の各相互誘導係数である。式 (3.9) の第二項は吸上変圧器による誘導雑音電圧の軽減効果を示しているが、被誘導ケーブルと吸上変圧器の位置関係により I_N の値が異なるので、以下第二項を除去した場合について計算を行なう。すなわち

$$V_N = -jW(M_T I_T - M_R I_R) \cdot l \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

となる。

さらにトロリー線電流 I_T と軌道電流 I_R との間には

$$I_R = (1 - k_1) I_T \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

$$k_1 = 0.4 \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

となる関係がある。ただし k_1 は軌道の誘導軽減係数を表わし、大地導電率 10^{-12} CGSemu、周波数 50 c/s、複線としたときの値である。各誘導係数は $k \cdot x < 0.5$ の場合は次式に示す Carson-Pollaczek の式より求められる。

$$M = \left[2 \log_e \frac{2}{\sqrt{x^2 + (h_0 + h)^2}} + \frac{2\sqrt{2}}{3} k(h_0 + h) - 0.1544 - j \left\{ \frac{\pi}{2} - \frac{2\sqrt{2}}{3} k(h_0 + h) \right\} \right] \times 10^{-4} \text{ (H/km)} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

$$k = 2\pi\sqrt{2\alpha f} \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

ただし、 x (cm) は起誘導源と被誘導ケーブル間の水平距離、 h (cm) は起誘導源地上高、 h_0 (cm) は被誘導ケーブル地上高、 α (CGSemu) は大地導電率、 f (c/s) は起誘導源周波数である。

高周波部設置条件より、 $h_0 = 0$ 、 $\alpha = 10^{-12}$ CGSemu、 $f_0 = 50$ c/s、 $x = 10^3$ cm (トロリー線に最も近接した場合)、トロリー線の場合 $h = 570$

cm、軌道の場合 $h = 0$ であるから、式 (3.13)、(3.14) より各誘導係数は

$$M_{RQ} = (6.3 - j1.6) \times 10^{-4} \text{ (H/km)} \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

$$M_{TC} = (7 - j1.54) \times 10^{-4} \text{ (H/km)} \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

となる。したがってトロリー線電流として電車起動時 500 A、故障時 (トロリー線が軌道に短絡) 900 A、トロリー線と被誘導ケーブル間水平距離 10 m、ケーブル長 1 km (最大ケーブル長) とした場合の誘導雑音電圧 $|V_N|$ は式 (3.10) ~ (3.12)、(3.15)、(3.16) より

$$\text{電車起動時 (トロリー線電流 500 A 時)} |V_N| = 50 \text{ V}$$

$$\text{故障時 (トロリー線電流 900 A 時)} |V_N| = 90 \text{ V}$$

となる。ただしこの結果は、吸上変圧器、および多線条効果による誘導雑音軽減効果を考慮してないため、実際にはこれらの値の 1/10 以下になると推測される。

(2) 電磁誘導雑音対策と実測結果

前項で述べた予測計算結果の確認をするため、新幹線三島電気支所にて、平衡度 60 dB シャヘイ係数約 30 % の電磁シャヘイケーブルで実験を行なった結果、トロリー線電流 500 A、離隔距離 10 m とした場合、1 km のケーブルに誘起される誘導雑音電圧は 1.5 mV という値が得られ、3.5 節 (1) の予測値に被誘導ケーブルのシャヘイ層を考慮した値の 1/10 (約 3.5 mV) とほぼ等しい結果を得た。これらの結果より郡山操車場でも同一規格のケーブルを使用することに決定した。郡山操車場で列車通過時の誘導雑音電圧を測定した結果、静電、電磁誘導によるものは 3 mV 以内になることが確認された。

3.6 保守性

本装置は広い操車場に数多く散在し、機器の連続動作が要求されているため、保守性が重要な問題となる。本装置では使用部品の信頼度向上、故障時の故障個所の発見、修理の容易性、電源部の二重系などの対策がなされている。本項ではこれらについて記述する。

(1) クライストンの寿命対策

本装置に使用されている部品の中で、信頼度向上、保守費軽減等において最も問題になるのがクライストン 11 V 18 である。本装置では 11 V 18 をデイレイティングにより軽負荷にし、さらに周囲温度が 20°C 以上になると、フロアにより強制空冷を行なうことにより寿命を延ばす対策がなされている。このようにして使用されている 11 V 18 の有効寿命は、長時間連続使用実績データ不足 (約 5,000 時間で性能劣化は認められていない) であるが、比較的規格の似ている電電公社、国鉄の各通信用クライストンのデータから類推すると 15,000 時間以上と考えられる。

(2) 故障表示

本装置が故障した場合、容易に故障個所を発見し、すばやく故障修理 (またはユニット交換) に着手できるよう、各系統ごとに故障表示 (ランプ点灯、ブザーの駆動) されるようになっている。故障表示にはミキサダイオードまたはクライストンの故障、各系統ごとのヒューズ溶断、高周波部内部の温度上昇が 50°C 以上になった場合の警報 (すなわちクライストン空冷用フロアの故障)、電源部の故障の各表示がある。

(3) 電源部の二重系

郡山操車場レーダスピードメータの電源システムとしては、本電源 5 台 (1 台でレーダスピードメータ 20 台分の容量を持つ) に対して、予備電源 (本電源と同一形状性能) 1 台が設けられており、本電源故障時には、自動的に予備電源に切換えられ、YAC システム全体に重大な支障 (電源 1 台の故障によりレーダスピードメータ 20 台の機能が停止する) をきたさないように設計されている。

(4) その他

本装置の故障時における修理は、ユニット交換修理方式を採用しており、故障品を良品と容易に交換できるよう、装置のユニット化、ユニットの同一性能化、プラグイン化を考慮して設計されている。

4. 装置の概要

4.1 装置の構成

本装置はつぎの各部により構成されている。

高周波部	本体架の各計数部に対応した速度検出部
本体架	
警報表示部	高周波部 20 チャンネルの警報表示
計数部	各高周波部に対応し、20 チャンネル 実装可能
校正信号発生部	本体架ごとに 1 台
電源部 A	本体架ごとに 1 台
電源部 B	本体架ごとに 1 台
予備電源架	本体架 5 架に 1 架設置し切換え使用する
電源部 A	本体架の電源部 A と同じ
電源部 B	本体架の電源部 B と同じ
接続箱	高周波部と本体架間のケーブル中継

装置の系統を図 4.1 に示す。

4.2 高周波部

高周波部はアンテナに電磁ホーンを使用して、マイクロ波の送受を行ない、移動貨車の速度に比例したドップラ周波数を検出する。この信

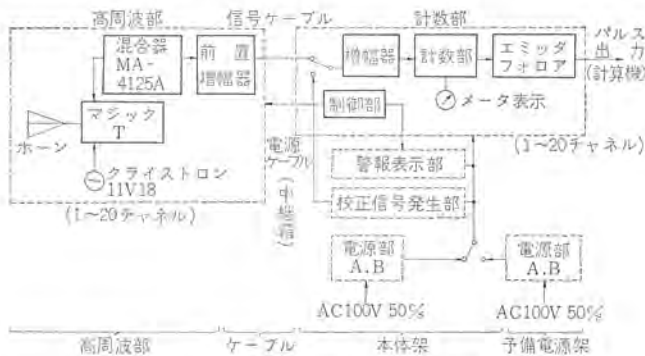


図 4.1 レーダスピードメータ系統図
Radar speed meter system diagram.



図 4.2 高周波部
H. F. part.

表 4.1 高周波部性能
Specification of H. F. part.

ア ン テ ナ	電 磁 ホ ー ン
アンテナビーム幅 (度)	E 面約 13.5 H 面約 10.5
アンテナ利得 (dB)	約 22
送信周波数 (Mc)	10525±25
送信出力 (mW)	約 15
クライストロン出力 (mW)	約 30 (11 V 18)
混 合 器	ダイオードミキサー (MA-4125 A)
前置増幅器周波数特性	35(c/s)~700(c/s) 以上 2.0(dB)
前置増幅利得 (dB)	約 60

号は増幅の後、ケーブルで本体架に伝送される。高周波部は制御すべきリターダの前方軌条間に設置される。高周波部の概略性能を表 4.1 に示す。

4.3 本体架

本体架は高周波部からの信号を増幅してパルス化し、計算機に送る計数部、高周波部を遠隔監視するための警報表示部、計数部の動作点検をするための校正信号発生部、高周波部、および計数部 20 チャンネル分に同時に供給可能な容量をもつ電源部とからなり、計算機室内に設置される。高周波部から計数部への信号の伝送には、とくに交流電化による誘導雑音の影響をさけるよう考慮されている。

計数部は信号の増幅以外に対応する高周波部を遠隔制御することができる。警報表示部は各高周波部の電源ヒューズ断、クリスタル電流の半減と温度上昇などの警報を表示することができる。電源部は、高周波部を含め本体架に実装される全装置 20 チャンネル分の各電圧を供給することができる安定化電源で、各系単独に動作を止める場合負荷変動を防ぐため電源内部で、疑似負荷が自動的にはいっている。本体架の概略性能を表 4.2 に示す。

4.4 予備電源架

予備電源架は本体架 5 架に対し、1 架配置され本体架の電源部が故障の際自動的にこの架に切換えられる。性能は本体架電源部と同一である。

図 4.3 本体架
Main Bay.



表 4.2 本体架性能
Specification of main bay.

警 報 表 示 部	クリスタル電流	設定値より半減でランプ、ブザー点灯
	ヒューズ溶断	計数部にある高周波部供給電圧ヒューズ断でランプ、ブザー点灯
	高周波部温度上昇	50(°C) 以上でランプ点灯
計 数 部	低周波増幅器周波数特性	35(c/s)~700(c/s) 以上 1.0(dB)
	低周波増幅器利得 (dB)	約 30
	制 御 部	高周波部電源接断、リベラ電圧調整
	メ ー タ 表 示	高周波部クリスタル電流と速度の切換表示
校 正 信 号 発 生 部	校正用信号周波数 (c/s)	350±1 (5 m/s)
	出力電圧 (Vrms)	約 0.7
電 源 部	電 圧, 電 流	+300 (V) 600 (mA)
		-270 (V) 50 (mA)
		+20 (V) 1 (A)
		+12 (V) 11 (A)
		+24 (V) 150 (mA)
	電圧変動率 (%)	0.3 以下 (+300 V, -270 V) 1.0 以下 (その他)
	リップル含有率 (%)	0.01 以下 (+300 V, -270 V) 0.1 以下 (その他)

表 4.3 レーダスピードメータ 総合性能
Specification of radar speed meter.

アンテナ出力 (mW)	約 15
受信方式	ホモダイナ検波
最少受信入力 (dBm)	-62 以下
最大測定可能距離 (m)	35 以上
速度測定範囲 (m/s)	0.5~10
測定精度 (%)	1 以下
パルス出力 (VPP)	10 以上
消費電力 (kVA)	3 以下 (1 本体架)
電源	AC 100(V)±10 (%) 50(c/s)
環境条件	高周波部 周囲温度(°C) -15~+50 湿度(%) 90 振動 20(c/s), 1(G), 上下 100,000(回)
	本体架 周囲温度(°C) +10~+35 湿度(%) 70

4.5 性能

レーダスピードメータの総合性能を表 4.3 に示す。

5. 試験結果

高周波部は軌道内に設置されているため、通常のアンテナ（電磁ホーン、チーズホーン等）の場合は、グラウンドクラッタ等の影響により貨車がアンテナ開口面付近を通過するとき波形割れがおこり、アンテナの角度調整がかなりめんどろである。本装置では種々検討の結果、等価的にイメージアンテナとみなされるアンテナにすることにより、出力波形を改善することができた。

さらに貨車が同一仕分線に連続散転される場合（先行貨車と後続貨車との距離が 20~30 m 以下の場合）に、被測定貨車（後続貨車）の床下部分を通して電波が先行車に当たり速度測定に異常をきたさないように、アンテナの角度は多少上向きに調整されている。交流誘導雑音に対しては 3.5 節で述べたように、平衡ケーブルの使用、大地アース等の対策がなされ装置の動作に影響を与えないようにすることができた。

以上のように種々の対策をほどこして現地調整を行ない、散転貨車の速度を種々の条件（各種の型式の貨車、連続散転、雨雪等の天候条件等）で測定した結果、YAC システムの速度測定装置として必要な機能を十分満足する結果が得られた。図 5.1 に代表的な貨車の速度測定データを示す。これらの波形は、本装置で検出した速度出力（繰返し周波数が貨車の速度に比例したパルス出力）を D-A 変換器（サンプリング時間 50 ms）に入れて直流出力に変換後、ペン書きレコーダに記録させた速度波形である。

縦軸が速度 (m/s/5 mm)、横軸が時間 (10 mm/s) であり、速度測定可能距離が容易にわかるよう横軸に高周波部から貨車後部までの距離値を記入してある。横軸で S とししてあるのは、本装置で検出した速度情報を、計算機が実際に取り入れて貨車の速度制御に必要な計算を開始するところを表わしている。速度波形が約 10~25 m の区間で減速しているのは、実際に本システムで速度制御を行なった場合の波形である。

6. むすび

貨車操車場の完全自動化は、現在その分解、組成の過程で行なっ

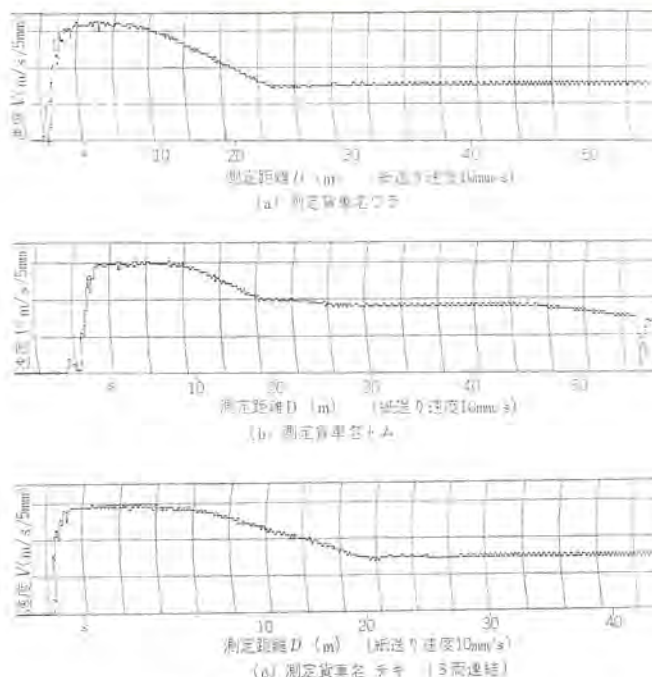


図 5.1 貨車速度測定波形
Output waveforms of the fling car speed.

ている乗込制動などの危険作業がなくなり、データ処理も自動化されるところから人員の削減はもとより、貨車扱量の増大により能率の向上が期待される。自動化モデルヤードとしての郡山操車場の完成はこの点で重要な意味をもつものである。

貨車速度制御用レーダスピードメータについては、その実用性は過去の実験により十分確かめられていたが、実際の操車場で多量に使用される場合、前述のように交流電化区間での誘導雑音の問題、電波あるいは他の端末機器との相互干渉の問題、サージ対策、環境条件に対して信号機として要求される信頼性、保守性など多くの問題があった。

これらは仙台客車操車場、新幹線三島支所での予備実験、大宮操車場での試験、郡山操車場での実用試験と確認を重ねた結果ほぼ解決され、現在郡山操車場の営業運転開始を目前にして順調に実動中である。

平面ヤードの自動化にあたっては削減できる人員も少なく、投資効果の点で金銭的に制約を受けるので、今後は現システムをできるだけ簡易化して平面ヤード用として利用できるよう検討する必要がある。終わりに本装置の試験にあたり、絶大ご協力をいただいた国鉄電気局信号課、鉄道技術研究所自動制御研究室、仙台電気工事局の各位に深謝するとともに製作、試験を担当された鎌倉製作所の各位に感謝する。

参考文献

- (1) MIT Series 1, Rader system engineering.
- (2) 東、遊佐、丸浜、田村、阿部、中村：ヤード用レーダスピードメータ、第3回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム、March (昭41)

技術講座

アナログ計算機のプログラミング (1)

—常微分方程式の解法—

井塚 秀弥*・佐藤 毅*・米谷 光雄*

1. アナログ計算機とは

アナログ計算機（以下アナコンという）は第2次大戦中に飛しょう体の軌道計算等より急速に発達し、戦後、自動制御の研究分野に応用され、ますますひろく用いられるようになった。そして当初、微分方程式の求根機として初期値問題を取扱ってきたものが、最近ではアナログ記憶、判断、反復演算が有機的に結びついた自動演算機能をもつようになり、デジタル計算機（以下ディジコンという）と同じようにフローチャートに従ってプログラムを考えれば境界値問題その他をも自動的に解析してくれるようになっている。

また、アナコンの精度・信頼度も向上してきており、使用分野はプロセス工業・化学・製鉄・原子力・電力・機械・自動車・航空機・土木建築・医学・経済と広範囲にわたっている。また、用途別に分類してみれば次のように大別できる。

- (1) 計算機（解析機）としての用途
- (2) 制御装置としての用途
- (3) シミュレータとしての用途
- (4) 計測装置としての用途

計算といえはすぐに不連続な数値計算、つまりデジタル形が思い浮かぶ。一方シミュレータなど連続量の計算に対しては、全く別の方式が可能であろう。この目的のためには電子式のアナコンが最も適しており、模擬すべき元の物理現象の多くが微分方程式形で与えられるために、機能的には積分・加算・乗算あるいは三角演算などが基本機能となっている。このためフィードバック制御系の解析・模擬には最も適しているものであり、また各種の微分方程式の解析にも威力を発揮する。とくに非線形特性をもったものに対しても、線形の場合と全く同じ手法が使え、厳密解が得られるため盛んに用いられるのである。

アナコンの特長は以上のことのほかに種々ある。これを知るため、ディジコンと対比してみよう。

アナコンは機械の中に積分器などの単能要素をもって、プログラムにより物理現象のまねをするためはん(汎)用となる。アナコンは本質的にシミュレータであるため、物理現象とアナコン演算回路との対応が一对一についている。このため演算回路の各出力はそれぞれ意味をもってチェックなどに便利であり、これらの時間に対する関係だけでなく相互間の関係もすぐに得られるというすぐれた特長をもっている。

またアナコンは各単能要素が並列動作をするため演算速度が非常に速く、ロケットなどのシミュレーションのための、いわゆる実時間演算が

可能であるばかりでなく、最近のアナコンでは、オフラインの解析機として用いた場合に、数多くのパラメータの組み合わせ演算が短時間のうちに解け、したがってデータ処理能力は使いようによってはディジコンよりはるかに高い。

しかし一方では次のような問題は不得意である。大規模な代数方程式、精度が高いことを要求される問題などである。

アナコンの精度は単体要素で0.01~0.05%で総合的には、問題の形、規模により異なり、0.2~5%程度となろう。もっともほとんどの技術データの精度が、せいぜい5%程度であるため工学上は十分であるといえる。当社の大形アナコンのMELCOM-EA-7250形外観例を図1.1に示す。



図 1.1 EA 7250 形 アナログ計算機

表 1.1 アナコン特長比較（ディジコンと対比して）

	アナコン	ディジコン
信 号	連続	不連続
性 質	相似性を利用（図形）	数値計算（数表）
演 算	積分を主とし加算、乗算など	加減算のみ
得意な問題	微分方程式	代数式（微分方程式などもすべて代数式に置きかえる）
機 能	単能要素をバッティングで使う	万 能
精 度	工学上は十分	非常にすぐれている
速 度	非常に速い（並列演算）	かなり速いものもある（本質的に直列演算）
データ処理	数多くの直観的な意味のあるデータが短時間に得られる	データ処理能力は低いデータは多くの場合直観的でなく意味があるか、ないかの判別が大変である
演 算 規 模	単能のため、要素数を越える問題は解析ができない	万能のため、計算時間を犠牲にすれば、かなり演算規模が大きなものでも解ける
価 格	相対的に安価	高 価

アナコンのディジコンに対する比較を一覧表にまとめてみると表 1.1 になる。

2. アナログ計算機の基本的な使い方

2.1 基本演算

アナコン内にある要素(単要素)の機能例から示そう。

(1) 加算(係数)器

任意入力(の係数倍)加(減)算を行なう。出力は符号が変わるつまり位相が 180° ずれる。

(2) (加算) 積分器

任意入力(の加算と同時に)積分を行なう。出力は符号が変わる。

(3) ポテンシオメータ

単一入力に対し、1 以下の任意係数倍を行なう。

(4) 乗除算器

任意の 2 入力に対し、積、商を得る。

(5) 関数発生器

単一入力に対し、その関数値を得る。

これらの要素があれば工学問題上の非常に大きな範囲をしめる各種の微分方程式その他が解ける。これら各要素は接続図(またはブロック図とも呼ばれる)で表わされる場合に、慣用的な記号が用いられる。表 2.1 にまとめてその機能と共に一覧表に示す。

たとえば x と y が仮りに与えられたとすると、次の z を求める演算は図 2.1 のようになる。

$$0.5x + xy + f(x) = z \quad (2.1)$$

y は x とは別の従属変数であってもよいし、実は $y = \dot{x}$ であってもよい。また z も実は \ddot{x} などであることが多い。

表 2.1 演算要素機能一覧

要素名	記号	演算式
加算係数器		$e_o = -(k_1 e_1 + k_2 e_2 + k_3 e_3)$
加算積分器		$e_o = -\frac{1}{s} (k_1 e_1 + k_2 e_2 + k_3 e_3) - E$ E : 初期値
正負変換器		$e_o = -e_1$
ポテンシオメータ		$e_o = a e_1 \quad (0 \leq a \leq 1)$
乗算器		$e_o = \frac{e_1 e_2}{E} \text{ (V)} \text{ または } \frac{e_1 e_2}{E} \text{ (pu)}$ E : フルスケール電圧
除算器		$e_o = \frac{E e_1}{e_2} \text{ (V)} \text{ または } \frac{e_1}{e_2} \text{ (pu)}$
関数発生器		$e_o = f(e_1)$
むだ時間発生器		$e_o(t) = e_1(t - \tau)$

2.2 微分方程式の解法

一般に常微分方程式は次の形で与えられる。

$$f\left(\frac{d^n x}{dx^n}, \frac{d^{n-1} y}{dx^{n-1}}, \dots, \frac{dy}{dx}, y, x\right) = 0 \quad (2.2)$$

とくに各係数が独立変数 x , 従属変数 y に対し独立で一定の式(2.3)形のは定係数線形微分方程式と呼ばれ、とくに $G(x) = 0$ のものは斉次であるという。

$$a_0 \frac{d^n y}{dx^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dx^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dx} + a_n y = G(x) \quad (2.3)$$

工学上の問題では独立変数が時間であることが非常に多い。この場合は、斉次方程式の解、つまり基本解が過渡解を表わし、特解が定常解にあたる。方程式の解の任意定数は、このように初期条件・境界条件より定まってしまう。

微分方程式をアナコンで解く際の接続の手順は次のようにする。まず最高次の項を左辺に、他をすべて右辺に移項し、原則として最高次の係数を 1 にする。つまり最高階について方程式を作る。

$$\frac{d^n x}{dt^n} = b_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + b_{n-1} \frac{dx}{dt} + b_n x + f(t) \quad (2.4)$$

左辺が得られたものと仮定し、積分器を必要数用いて、右辺の各項が得られる形にする。ついで、はじめの仮定が正しい。つまり方程式を満足するようにループを閉じる。ここで積分器、加算係数器の入出力の符号は反転するので、必要があれば正負変換器(加算器の入力が 1 個のもの)を用いる。また初期値は初期条件端子に接続する。図 2.2 はこのようすを示したものである。

簡単な例題を考えてみよう。サーボ系、機械振動系など、次の形で表わされるものは数多い。

$$\left. \begin{aligned} 2\ddot{x} + 0.8\dot{x} + 3x &= 0 \\ \dot{x}|_{t=0} &= 0 \quad x|_{t=0} = 0.7 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

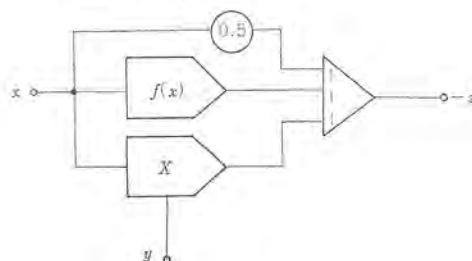


図 2.1 アナコン接続

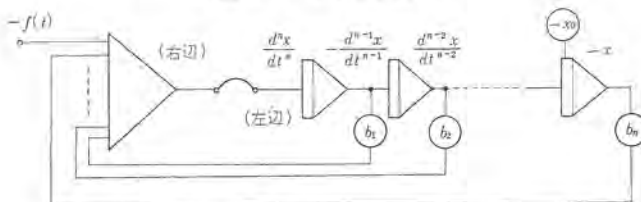


図 2.2 微分方程式のアナコン接続

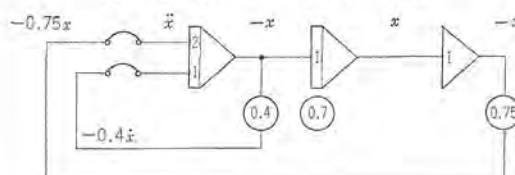


図 2.3 $\ddot{x} = 0.4\dot{x} - 1.5x$ 接続

まず \ddot{x} について整理する。

$$\ddot{x} = -0.4\dot{x} - 1.5x \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

このブロック図は図 2.3 となる。 \ddot{x} を得る必要がない場合は、このようなブロック図でもよい。

連立常微分方程式についても同じような手法で接続図が得られる。当然、未知従属変数の数と方程式の数とが同じでなければ一義的には解けない。また、スケール変換のことを別にすれば非線形常微分方程式についても取扱いはまったく同じでよいことが類推できる。

こうして接続図ができると、これに基づき、さきに述べた演算要素の入出力端子が集中しているパッチボード上に所要の結線を行なう。解波形の記録のための接続も忘れてはならない。チェックのために各要素番号を接続図に記入しておく。

パッチボード上の結線が終わればベイにはめ込み、ポテンシオメータ、関数発生器などの数値設定を行なう。

設定は演算制御盤で行ない、散定が終われば、要素の動作・接続チェック、続いて演算を演算制御盤で行なう。

解は連続波形としてオシロスコープ、ペン書オシログラフなどに記録される。

3. 常微分方程式の解法

3.1 スケール変換

アナコン演算に少しでもとりつきにくい部分があるとすれば、それはスケール変換であろう。しかしこれも一定の機械的な方法がある。

解こうとする物理現象は場合により、変位・温度・濃度・流量そのほか種々ある。独立変数も場合によっては距離のこともあろう。ところがアナコンではそれぞれ電圧と時間に置きかえねばならない。実際に注意する必要があるのは、単位ではなく数値、スケールである。これをアナコンの演算電圧またはフルスケールに換算することをスケール変換と呼んでいる。

また、もとの現象の独立変数がたとえば時間であっても、解析しようとする現象が周期のおそいものであったり、非常に速い電気振動であったりする。これらを適当な時間、解記録器上に描かせるために時間軸の変換が必要であり、これをタイムスケール変換と呼ぶ。

ペンシロに記録をする低速演算では、変換後の信号角周波数が 0.1 ~ 10 rad/sec 程度になるように選ぶのがよい。

さらに物理現象の最大値が推測できる場合にはこれをアナコンの最大値の 1 単位 (p. u) (または 100%) に対応させる。

元の変数を x , t , 変換後のそれを X , τ とすると、まず機械的に次のようにおく。

$$x = \alpha X \quad t = \beta \tau \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

これを元の方程式に代入し、最高階のものについて整理し、最高階の項の係数は 1 としておく。 α , β のことをスケールファクタ、タイムスケールファクタと呼んでおり、式 (3.1) からアナコンの波形から解を得る換算係数となっている。スケール変換、タイムスケール変換の適、不適は換算後の最高階について整理された式の、各係数がすべて大略 0.03 ~ 30 であれば 0.1 ~ 10 の範囲内にあるかどうかで判断できる。

換算係数を定めるには、まずともかくも原式に換算係数を代入し整理した後、各項が上記数値になるようにラウンド数を取り α , β を定める。実例を示そう。

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 7\frac{dx}{dt} + 350x = 0 \quad \frac{dx}{dt} = 50 \quad x_{t=0} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

この例では斉次のためスケールファクタは定まらないようにみえる。しかし、実は初期条件から定まるのである。

$$\frac{\alpha}{\beta^2} \cdot \frac{d^2X}{d\tau^2} + 7\frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{dX}{d\tau} + 350\alpha X = 0 \quad \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{dX}{d\tau} = 50 \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\frac{d^2X}{d\tau^2} = -7\beta \frac{dX}{d\tau} - 350\beta^2 X \quad \frac{dX}{d\tau} = \frac{50\beta}{\alpha} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

各係数が 0.1 ~ 10 になるため、まず $\beta = 0.1$ が定まる。またこれは減衰振動であるため初期値が最大値と考えてよい。これから $\alpha = 5$ と定まる。演算方程式は τ についての微分を \cdot で表わせば次のようになる。

$$\ddot{X} + 0.7\dot{X} + 3.5X = 0 \quad \dot{X}_{\tau=0} = 1 \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

非斉次の場合も同様である。外力が周期関数の場合にはタイムスケールファクタは系の固有振動数だけでなく外力の周期によっても決めねばならない。

なお、式 (3.3) の形のまま用いれば、各積分器の初期条件は β の値にかかわらず一定なので、 β を変更した際にも各積分器の倍率のみを同じ割合で変更するだけでよいことがわかる。

3.2 要素使用上の注意

(1) ポテンシオメータは可変抵抗であり、出力インピーダンスが高いため、後につながる要素の入力インピーダンスが無視できなくなる。いわゆる負荷効果が生じる。このため正確な設定値が必要ときにはダイヤル目盛で設定せず、負荷効果分だけ多く設定してやる必要がある。とくに関数乗除算器・関数発生器などの非線形要素の入力インピーダンスは低いため注意する必要がある。

(2) 非線形要素の演算精度はフルスケールに対し定義されており、入力値が小さくとも比例的に減少しないため、できる限り大きな入出力で演算することが望ましい。したがって原則として入力側にポテンシオメータがくくことはない。

また、スケール変換がフルスケールに対し行なわれる。たとえば $1 \text{ pu} \times 1 \text{ pu} = 1 \text{ pu}$ であることに注意しなければならない。

(3) 除算は商が 1 単位を越えてはいけないことから |分子| < 分母の制限は容易に想像できる。その他、除数・被除数が共に小さくなったときに相変わず大きな商であるため、小入力に対しては精度が悪くなる。その他本質的な動作制限のため、乗算よりは使用法に制限がある。

(4) アナコンは相似性を利用するため、物理系の意味が失なわれるような式の変形はいけませんが、演算要素数になるだけ少なくなるようなブロック図の変形は好ましい。また、これに関連し、連立常微分方程式の場合、各従属変数についての方程式中に、他の従属変数の最高階微分の項がないように処理しておく。

3.3 時間関数の発生

アナコンで問題を解析する際、非斉次式であれば、式 (2.4) のように独立変数の t のみの関数がある。これは線形要素のみで容易に発生できる場合も多く、 $f(x)$ と区別して時間関数発生と呼ばれる。

(1) $f(t) = k$

これはステップ入力といわれるもので、 $\pm 1 \text{ pu}$ の基準電圧とポテンシオメータを用いる。

(2) $f(t) = kt$

ラフ関数といわれるもので(1)に積分器を組合わせればよい。また、これと相似して $f(t) = kt^n$ はさらに積分器を連続接続して用いればよく、 $f(t) = \sum k_i t^i$ はそれらの和をとればよい。

(3) $f(t) = e^{-\alpha t}$ または $f(t) = e^{\alpha t}$

これは $\dot{f} = -\alpha f$ などを利用する。なお、 $e^{\alpha t}$ は時間と共に増大するから、初めに t がどれ位まで演算ができるかチェックし、それ以内9時間で演算を止めねばならない。これらの接続図は図3.1のとおりである。

(4) $f(t) = A \sin \omega t$ または $f(t) = A \cos \omega t$

これは非常に多く利用される関数である。次の微分方程式の解であることは代入してみればわかる。

$$\ddot{f} + \omega^2 f = 0 \quad (3.6)$$

この一般解は $f = A' \sin \omega t + B' \cos \omega t$ であり、 A', B' は初期条件から定まる。 $\dot{f}|_{t=0} = \omega A, f|_{t=0} = 0$ のとき $f = A \sin \omega t$ となり、 $\dot{f} = \omega A \cos \omega t$ となり $\cos \omega t$ も同時に得られる。図3.2に接続図を示す。

この他 $f(t) = t \cdot e^{-\alpha t}$ は次の微分方程式の解である。

$$\ddot{f} - 2\alpha \dot{f} - \alpha^2 f = 0 \quad (3.7)$$

このように $f(t)$ の形で与えられれば、微分方程式を導き、容易に発生させることができる。

この他にインパルス関数、正弦波半サイクル、三角波などの発生が利用のときもある。

(5) インパルス発生(高さ a , 幅 b のもの)

高さはポテンシオメータで制御し、幅は積分器と電圧比較器、リレーを組合わせて得られる。この回路はさらに種々応用できる。

(6) 三角波、く形波発生

これも各種の方法があるが、いわゆる帰還形リミッタを用いた電圧比較器を用いる方法が一般的である。図3.4はその回路である。

以上のことで線形微分方程式は十分に解ける。

3.4 関数の発生

一般には非線形微分方程式を解くためには従属変数に対する関数発生が必要となる。関数発生技術をうまく利用できるかどうかはとても重要なことである。

(1) 関数発生器

これも2種あり、ひとつは $\sin X$ などのようによくでてくるものに対しては、単に入力をつなげば出力が得られる専用の関数発生器と、設定を行なってどんな関数形でも得られる任意関数発生器がある。任意関数発生器は関数形を折線で近似するため、設定点をうまく選んで、どの点でもあまり誤差が生じないようにしなければならない。ただ、一般の関数発生器では折点の選び方、こう配に制限のある場合があるが割合便利である。

(2) 特殊関数発生器

飽和・不感帯・絶対値の発生は関数発生器を用いなくとも、ダイオードその他を組合わせて得られる。図3.5は代表的回路である。

(3) 微分方程式形の関数発生

時間関数発生でも微分方程式を解いて関数値を得る巧妙な方法があったが、関数発生でもこの考え方が採用でき、有効に利用できる。これは $y = f(x)$ を得たい場合、 \dot{x} が与えられ、 \dot{y} が計算できてアナコンで組めれば関数発生器を用いなくとも正確な関数発生ができる。

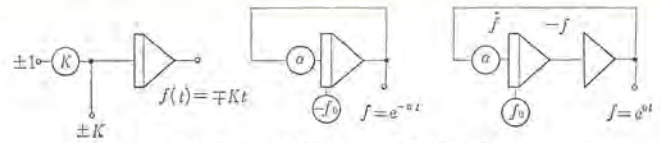


図 3.1 各種時間関数発生回路

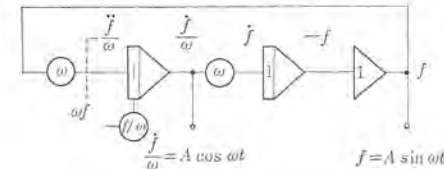


図 3.2 $\sin \omega t$, $\cos \omega t$ 発生回路

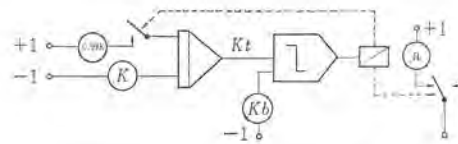


図 3.3 インパルス発生回路

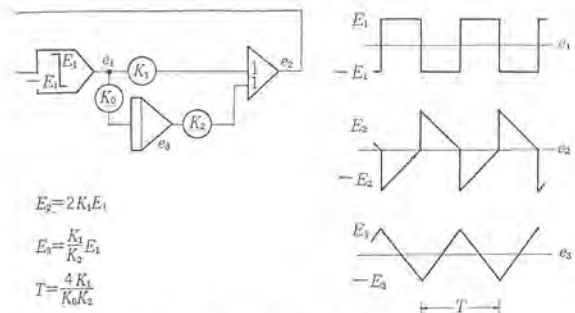


図 3.4 三角波・く形波発生回路

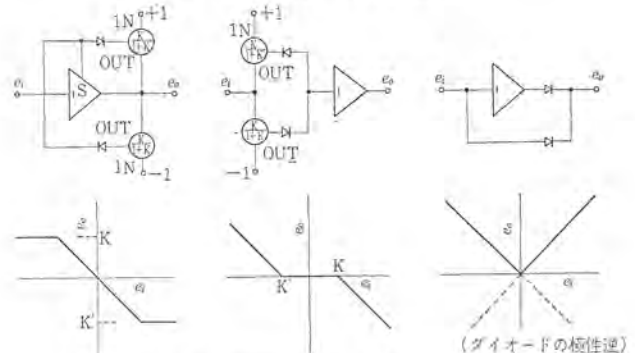


図 3.5 飽和、不感帯、絶対値回路

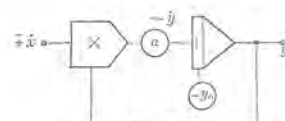


図 3.6 $y = e^{\pm \alpha x}$ 発生回路

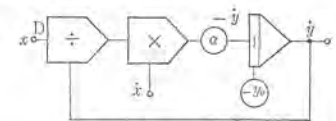


図 3.7 $y = x^\alpha$ 発生回路

る。つまり次の関係を使う。

$$y = \int_0^t \frac{df}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \cdot dt \quad (3.8)$$

このときの精度は主として乗算器の精度で決まる。

具体例をいくつかあげよう。

$$y = e^{\alpha x} \text{ または } y = e^{-\alpha x}$$

これは次のように表わすことができ、図3.6の接続で得られる。

$$\frac{dy}{dt} = \alpha \cdot y \cdot \frac{dx}{dt} \text{ または } \frac{dy}{dt} = -\alpha \cdot y \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.9)$$

$$y = x^\alpha$$

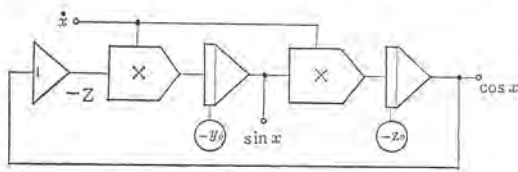


図 3.8 $\sin x, \cos x$ 発生回路

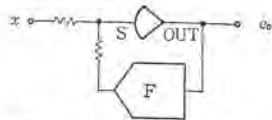


図 3.9 逆関数発生回路

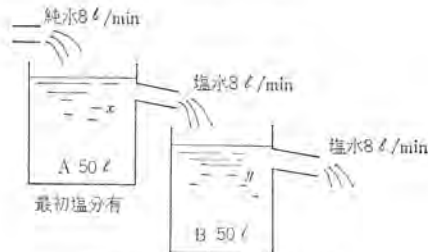


図 3.10 溶液の濃度変化

これは次式から図 3.7 の接続で得られる。

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\alpha y}{x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.10)$$

ただしこのときは除数 x の符号、入力値など除算の制限条件が満足されていなければならない。

$$y = \sin x \text{ および } z = \cos x$$

微分方程式形でこれを発生させた場合には、 x の角度制限がないためなかなか有用である。次の連立方程式から図 3.8 の接続が得られる。

$$\frac{dy}{dt} = (\cos x) \frac{dx}{dt} = x \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.11)$$

$$\frac{dz}{dt} = -(\sin x) \frac{dx}{dt} = -y \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.12)$$

このように有効であることも多いが、除算を含む場合や、入力範囲が小さくて定常値が誤差を含む可能性がある際には注意しなければならない。

また、実験結果などのように解析的には与えられず、また関数発生器もないといった場合には、乗算器を幾つか使って級数近似をする方法がある。この際、所望の付近で誤差が最も小さくなるように近似する。

また 2 変数関数発生に対しては多くの場合、次のように各関数発生の積で表わす。特殊な関数形の場合には工夫すれば少ない要素で正確な模擬ができる。

$$y = f(x_1, x_2) = f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \quad (3.13)$$

(4) 逆関数の発生

関数発生器の制限などで所望の関数形が得られないとき、この逆関数発生の手法が利用できることがある。

実は積分器、加算器を構成している主要素子は演算増幅器であり、その利得は 10^7 程度ある。演算増幅器が単体で用いられる場合には図 3.9 のような扇形で表わされ、その入力点 S の電圧は $e_0/10^7$ の

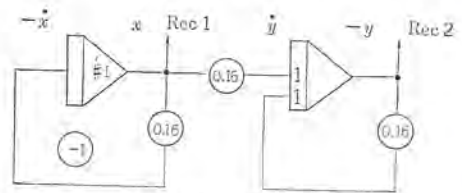


図 3.11 アナコン接続

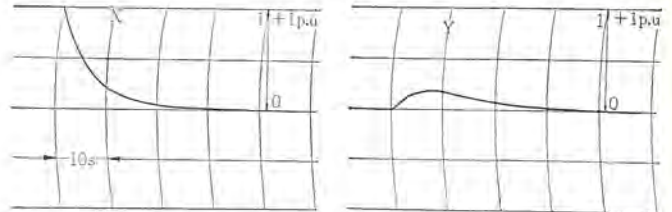


図 3.12 濃度変化解波形

ため、ほとんど 0 である。このことから図 3.9 の接続では次の関係が得られる。

$$F(e_0) - x = 0 \quad (3.14)$$

したがって

$$e_0 = F^{-1}(x) \quad (3.15)$$

ただし、 F のこう配は正でなくてはならないし、その他制限条件が生じることもある。

除算も実は乗算の逆関数発生で得ている。

アナコンでは微分は通常は用いない。信号に含まれる雑音のために誤差が大きくなるからである。しかし、方程式を解く上にどうしても微分が必要な場合がある。このときはこの手法を応用し、積分器を用いて微分を得ることも可能である。

3.5 各種問題の解析

これまでのことで常微分方程式はすべて解くことができる。以下具体的な例題を幾つかやってみよう。

(1) 溶液の濃度変化

化学分野の問題では物質収支、熱収支の法則が基礎式となる。

図 3.10 にあるように 50 l の溶液をもった A、B 二つのタンクがあり溶液は毎分 8 l 流入流出している。最初 A タンクにのみ塩 50 g があつたとしたとき、A B 両タンク内の塩の量の時間変化を求める。

題意から、塩分の変化量は濃度と流量の積に等しいから、次の方程式が成立する。

$$\frac{dx}{dt} = -8 \times \frac{x}{50} = -0.16x \quad (3.16)$$

$$\frac{dy}{dt} = 8 \times \frac{x}{50} - 8 \times \frac{y}{50} = 0.16x - 0.16y \quad (3.17)$$

$$x_{t=0} = 50(\text{g}) \quad y_{t=0} = 0$$

タイムスケールファクタは演算時間の秒が実時間の分であると考えれば $\beta = 1(\text{分/秒})$ とでき、塩分が初期値以上になることはないから $\alpha = 50(\text{g/pu})$ となり、演算方程式は変わらず初期値が変わる。

この接続図を図 3.11 に、解を図 3.12 に示す。

(2) 振動系解析

機械とか建築分野では運動の法則、運動量保存則が基礎式である。

図 3.13 の架台上に据付けられた ABB シャ断器の地震に対する振動解析をする。架台を 1 質点、ABB シャ断器を 1 質点としたと

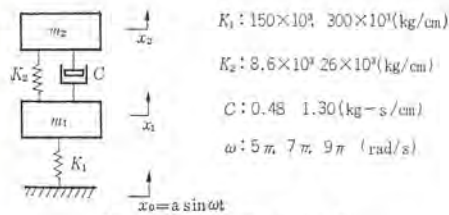


図 3.13 ABB の振動

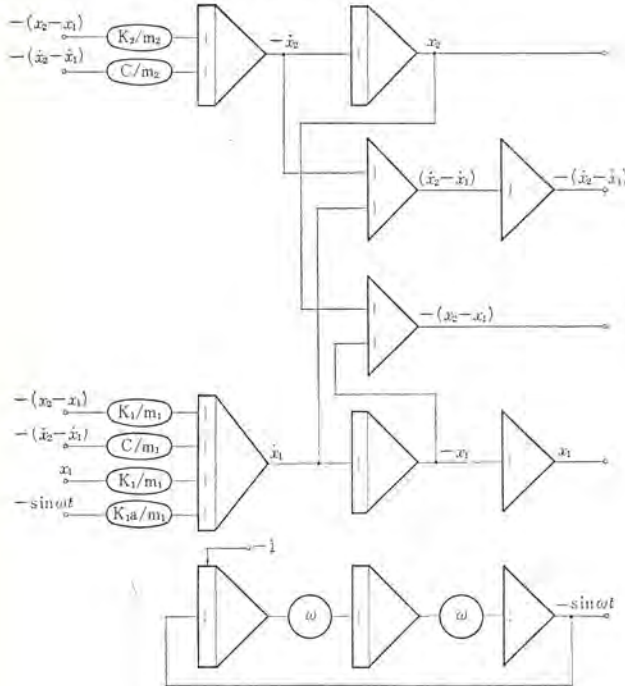


図 3.14 アナコン接続図

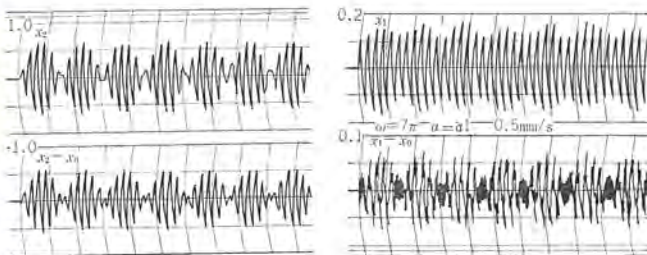


図 3.15 振動解波形

き、架台の質量を m_1 、ABB のそれを m_2 とすると $m_1=40$ kg, $m_2=35$ kg であり、ばね定数 k_1 , k_2 , 減衰定数 c はそれぞれ図の組合わせ時の応動をしる。

方程式は m_1 , m_2 のそれぞれに働く応力バランスより次の 2 式が成立する。

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) - c (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = k_1 a \sin \omega t \quad (3.18)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) + c (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (3.19)$$

固有振動数、入力角周波数が大きいところから $\beta=0$ 、共振点よりだいぶはずれているため、入力振幅より大きくはならないとして、 $\alpha=a$ において基準化する。

図 3.14 に接続図を、図 3.15 に解波形の 1 例を示す。

(3) 発振回路解析

最後に電気回路の発振現象を調べてみよう。 L 結合のトランジスタ発振回路とその関係式を図 3.16 に示す。

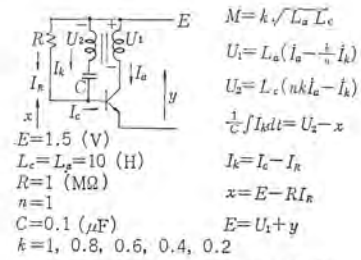


図 3.16 トランジスタ発振回路

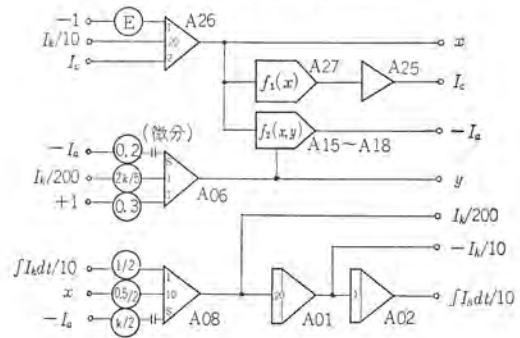


図 3.17 アナコン接続図

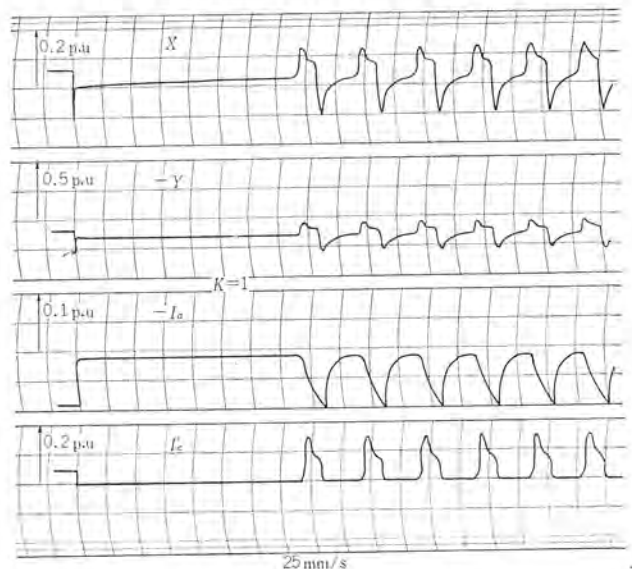


図 3.18 発振回路解波形

方程式は関係式より U_1 , U_2 , I_R を消去し次の三つの式が得られる。さらに、トランジスタの特性から I_c , I_a は関数形で与えられる。

$$x = E + RI_k - RI_c \quad (3.20)$$

$$y = L_a \cdot \frac{k}{n} \cdot \frac{dI_k}{dt} - L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + E \quad (3.22)$$

$$\frac{1}{c} \int I_k dt + x - L_c \cdot n \cdot k \cdot \frac{dI_a}{dt} = -L_c \cdot \frac{dI_k}{dt} \quad (3.23)$$

$$I_c = f_1(x) [= 0 \quad (x < a) = \alpha x \quad (a < x)] \quad (3.24)$$

$$I_a = f_2(x, y) \quad (3.25)$$

$I_c=10 \mu A$, $I_a=1 \text{ mA}$ を単位にとってスケールファクタを定め、 $\beta=0.001$ として変換した場合の接続図を図 3.17 に、演算結果を図 3.18 に示す。 k の選び方により、ブロッキング確立までの時間と発振波形がよくわかる。

最近における社外講演一覧表

講演日	主 催	演 題	講 演 者	所 属 場 所
43-1-24	電 気 3 学 会	最近の電気機器	大 野 栄 一	中央研究所
43-1-25	電 気 学 会	Rb 磁力計	安 東 滋	中央研究所
43-1-27	関西磁性懇話会	超電導材料について	小俣虎之助	中央研究所
43-2-7	大阪科学技術センター	アドバンスコート（オプトエレクトロニクス）とその材料	吾 妻 健 国	中央研究所
43-2-9	輻射科学研究会	レーザ応用無接触ならい計測装置	岡田武夫	中央研究所
43-2-12	大阪工業研	触媒入門講習会	吾 妻 健 国	中央研究所
43-2-14	固体物理ゼミナ	オプティカル パンピングによる弱磁場測定技術	安 東 滋	中央研究所
43-2-21	色 材 協 会	網目構造と塗膜粘弾性	柴 山 恭 一	中央研究所
43-2-22	通 信 学 会	4 線式 PAM 時分割交換機	前田良雄	中央研究所
43-3-2	応 物	短パルス放射線源としての線形電子加速器	入江浩一	中央研究所
43-3-2	テレビジョン学会	種々の injection Luminescence	伊吹順章	中央研究所
43-3-22	電子装置研究会	パルス進行波管	建石昌彦	中央研究所
43-3-26	M A P	放射線化学における加速器の利用	藤田彪太	中央研究所
43-3-27	アナログ技術研究会	アナログ IC 動向とその応用	大 西 勝	中央研究所
43-3-28	電 気 学 会	レーザ光散乱による多分散微粒子群の粒子径測定	田畑則一	中央研究所
43-3-29	電 気 学 会	静電フィルター（II）	森 貞次郎	中央研究所
43-3-29	電 気 学 会	差分法による渦電流解析の精度について	野村達衛	中央研究所
43-3-29	電 気 学 会	軸対称鉄心モデルの磁界解析	日比野昌弘	中央研究所
43-3-30	応 物	マスフィルタの定量性	藤 求 敦・花坂孝雄	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	メタルシールドヘリックスにおける誘電体えいきよう（2）	橋 本 勉	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	電流ソース付論理素子の発振現象	梅田義明	中央研究所
43-3-30	応 物	試作 Cu WO ₄ ; Nd ³⁺ レーザ結晶の発振特性	宮沢生行	中央研究所
43-3-30	応 物	繰返し発振ルビレーザ	宮沢生行	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	周期磁界集束装置の end effect の軽減	竹延真哉	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	サイリスタモータ式リニアモータ（2）	大 野 栄 一	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	リニアモータの吸引力について	岸 本 健	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	インバータ用フィルタに関する考察	熊野昌義	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	直列接続サイリスタの高圧点弧実験	光 岡 宏	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	相間リアクトル式および個別リアクトル式多相 DC チョッパの統合的解析	赤松昌彦	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	定尺試験器の研究	鈴木康弘・土屋英司	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	細隙中で磁気駆動されるアークの諸特性	新田東平	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	高気圧 SF ₆ の破壊時間遅れ	山田直也	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	液体 He 中における超電導線の安定電流	佐 藤 隆	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	サイリスタを使った Commutation の一方法	近藤博通	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	Feasible Solution を求める一方法 — 加速定数法 —	羽根田博正・国方敏行 林 重雄	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	系統構成変更後の潮流状態簡略計算における誤差	団 幸太郎・林 重雄	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	無効電力適正配分について	馬場洋一・宮田 林 重雄・石田 芳	中央研究所
43-3-30	電 気 学 会	積算電力計自動試験装置	弘 中 一 光	中央研究所
43-3-31	応 物	Ti-Nb-Ta 超電導合金の臨界磁場	田中光雄・小俣虎之助	中央研究所
43-3-31	応 物	パルスマグネットによる超電導臨界磁場の測定	田中光雄・小俣虎之助	中央研究所
43-3-31	日 本 化 学 会	ポリビロメリットイミドの合成	西崎俊一郎・森脇紀元	中央研究所
43-3-31	日 本 化 学 会	エポキシ樹脂における芳香核数と耐トラッキング性	草川英昭・橋本雄二郎	中央研究所
43-3-31	電 気 学 会	7.2 kV-350 MVA 真空しゃ断器	高見紀二	中央研究所
43-3-31	電 気 学 会	超高圧液体の絶縁耐力について	飛田敏男	中央研究所
43-3-31	電 気 学 会	K および N ₂ が、モードされた Ar プラズマの特性	野間口有	中央研究所
43-3-31	電 気 学 会	窒素プラズマの特性	小林宏次	中央研究所
43-3-31	電 気 学 会	異種金属対向接点の溶着特性	森 貞次郎	中央研究所
43-3-31	電 気 学 会	真空アークにおける縦磁束の効果	大倉敏幹	中央研究所
43-3-31	電 気 学 会	セミホットウォール MHD 発電ダクト	村井裕	中央研究所
43-3-31	電 気 学 会	細隙中磁気駆動アークの限流効果	渋谷義一	中央研究所
43-3-31	電 気 学 会	針対平板電極における放電の安定性	玉越泰彦	中央研究所
43-3-31	電 気 学 会	無限長平行分布電流のつくる磁界分布（MHD 発電機用コイル）	佐 藤 隆	中央研究所

NEWS FLASH

■ 井戸径 10 インチ用 75 kW 2 P 水中モートル完成

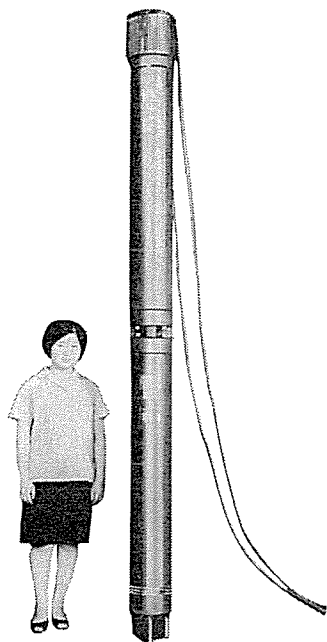
このたび、荏原製作所からフィリピン向けとして受注、製作中であつた深井戸用水中モートル、井戸径 10 インチ用 75 kW 2 P を完成し納入した。従来、わが国で製作された井戸径 10 インチ用は 37 kW 2 P が最大であつて、今回のフィリピン向け深井戸用水中モートルは、井戸径 10 インチ用として国内における容量記録品である。

この井戸径 10 インチ用 75 kW 2 P は 37 kW 2 P の水中モートルを 2 台 タンデムに直結することにより出力 75 kW が出るようにしたものである。特に 2 台の細長い水中モートルを同一心上に直結すること、および上下 2 台のモートル口出線を限られた寸法内で接続すること等、製作上の技術的問題点を克服し完成されたもので、運転中の振動・騒音もきわめて小さく優秀な結果が得られた。

今後、このような方式を採用することにより、一段細い井戸径に大きい出力の水中モートルが使用でき、さく井費用の低減、年々低下する地下水の水位などを考えるとこの種の水中モートルの利用度は増大することが期待される。

仕 様

出 力 (kW)	75
極 数	2
わく番号	M 10
電 圧 (V)	440
周波数 (Hz)	60



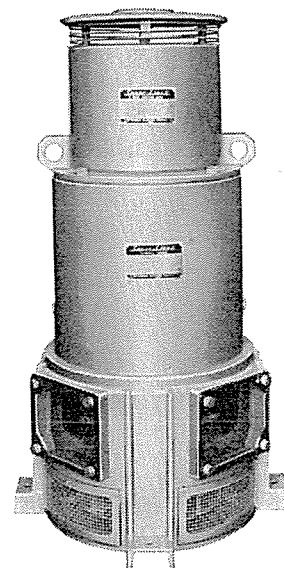
深井戸用水中モートル 10 インチ用 75 kW 2 P

回転数 (rpm)	3,480
効 率 (%)	84.7
力 率 (%)	89.5
定格電流 (A)	130
許容 スラスト 荷重 (kg)	900
モートル 外径 (mm)	203
モートル 全長 (mm)	2,960
重 量 (kg)	500

[名古屋製作所]

■ 立形誘導周波数変換機の開発

商用電源から簡単に周波数変換を行なう誘導周波数変換機は広く一般に使用されている。従来は横形で駆動電動機と共通台床上に設置される方式が多かったが、今回立て形で駆動電動機を同軸上に一体構造とするコンパクトな新形式を採用し、数々の利点をそなえて好評を博した。



立形誘導周波数変換機 1 kVA 8 P (駆動モートル 0.75 kW 8 P)
入力 50 Hz 200 V, 出力 100 Hz 200 V



特 長

- (a) 床面積を60%、重量を80%に低減して据付・運搬が容易。
- (b) 低騒音・低振動特性を保証。
- (c) 回転部が露出されず安全性向上。
- (d) 保守点検が容易。

[名古屋製作所]

■ わが国最初のミシン針定位位置停止装置付き クラッチモートル発売

縫製業界ではかねてから生産性向上・作業能率改善のため、ミシン針の定位位置停止装置付きクラッチモートルが要望されていたが、当社ではモートルと電子制御の技術を結集して、自社技術によるミシン針定位位置停止装置の国産第一号を完成した。さる5月には開発完了の発表を行ない、最近とくに人手不足に悩まされている縫製業界から大きな注目を浴びた。

当社はその後種々の実用試験・寿命試験を続け、改良を重ねて、このたびミシン針定位位置停止装置付きクラッチモートルを、「リミストップ」という商品名で11月1日から発売開始することになった。

この三菱リミストップは、ミシン針の検出装置と特殊クラッチモートルと制御装置の三点で構成されており、ミシン針の停止の瞬間を電子制御するソリッドステート方式を採用し、当社の独自の技術で開発したもので特許・実用新案12件を持っている。

(1) 原 理

三菱リミストップは、ミシン針の速度および位置を検出する検出装置と、特別なクラッチ操作機構をつけたクラッチモートルと、種々の操作を電子制御する制御装置の三点から構成されている。

動作原理は高速度で回転しているミシンをまず数十分の一程度にブレーキで減速し、速度は速度検出発電機と半導体を使った回路で所定の回転数を出しながらミシン針の上・下所定の位置を検出し、ブレーキで瞬間停止をかけるソリッドステート方式である。

(2) 効 用

最近人手がますます不足し、縫製業界でも作業の自動化・能率向上の必要に迫られており、現状では縫製業におけるミシンの実際の実動時間は2割程度で、作業の準備時間に大半を費やしているといわれている。

三菱リミストップはミシンの実動時間率を大幅に向上させ、また縫製作業を大幅にコストダウンするとともに、縫製業界の人手不足の解消に大いに役だっている。

(a) ミシン針を上で停止すれば縫い終わりで生地引出しがそのまま可能で、プーリを手で回したり半クラッチ動作でミシン針を上

手動調整する手間がなくなる。さらに糸切り装置と連動すれば縫製作業が連続してでき、大幅なコストダウンができる。直線連続縫いの工程はもちろん、とくにポケット、えり、ネーム、前だて、ボロなどの複雑な部品工程でも威力を発揮する。

(b) ミシン針を下で停止すれば布地を固定するので、縫う方向の転換がそのまま可能で、複雑な工程もミシン針の位置調整をせずに簡単に操作できる。

(c) ミシン針の一針縫い、低速縫い操作ができるので縫残りの一針・二針を確実に速く縫うことができる。

(d) ミシンの操作が非常に簡単になり熟練を要しない。したがって新人の教育期間を短縮し、また作業が簡単な操作を連続することになり、作業能率が大幅に向上する。

(3) 仕様および特長

- (a) ミシン針停止位置は上・下いずれも選択可能
- (b) ミシン針を上または下へペダルによるワンタッチで切換可能
- (c) ペダル操作により一針縫いまたは低速連続縫いが可能
- (d) 糸切り装置やすくい縫いミシンなど特殊ミシンにも応用可能
- (e) 三菱独自の特殊クラッチ機構で、モートルに減速装置や補助駆動装置や補助駆動装置はなく小形軽量で据付調整が簡単である。
- (f) どんなミシンでもそのミシンの回転に合った運転ができる
- (g) 安全制御回転になついているので、停止後ミシンプーリを手で回しても安全である

(4) 機 種

三 相	200 V	50/60 Hz	
			200 W 2 P CB-202 BN
			200 W 4 P CB-204 BN
			250 W 2 P CB-252 BN
単 相	100 V	50/60 Hz	
			400 W 2 P CB-402 BN
			200 W 2 P CA-202 BN
			200 W 4 P CA-204 BN
			250 W 2 P CA-252 BN



[名古屋製作所]

三菱電機技報 昭和43年 第42巻 総目次

第1号 昭和43年度回顧特集

ハイライト	9
巻頭言	21
1. 研究	22
1. レーザと光物性	23
2. 超電導	25
3. 材料	28
4. マイクロ波技術	33
5. 半導体応用	36
6. 機械設計と工作技術	37
7. 電力機器	39
8. インダストリアルデザイン	40
2. 発電機器	41
1. 火力および原子力発電	42
2. 水力発電機	50
3. ディーゼル発電	52
3. 送配電機器	54
1. 変圧器	55
2. しゃ断器	63
3. 避雷器・断路器・電力ヒューズ	68
4. 配電制御用機器	69
5. 配電盤およびキューピクル	71
6. 継電装置	76
4. 工業用電機品	81
1. ハイライト	81
2. 製鉄その他金属工業用電機品	84
3. 製紙・印刷および繊維工業用電機品	96
4. 荷役運搬設備およびポンプ所用電機品	97
5. 化学・石油・セメントおよび鉱山用電機品	99
6. 工作機用電機品および電動工具	101
7. 一般工業用電動機・特殊電動機および電磁クラッチブレーキ	106
8. 一般工業用変換機器	110
9. 一般工業用制御器具・開閉器および制御装置	115
10. 送風機その他一般工業用電機品	125
5. 船用電機品	128
1. 船用交流発電機	129

2. 船用配電盤	129
3. 交流機関室補機	130
4. 機関室補機用制御装置	130
5. 甲板補機	131
6. 自動化機器	132
7. 船用直流機	133
6. 電鉄用電機品	134
1. 電気機関車	135
2. 主電動機・駆動装置およびリアクトル	135
3. 補機類	137
4. 静止形インバータ	137
5. 車両用主変圧器	138
6. 車両用整流装置	138
7. 制御装置	139
8. 自動列車制御装置	140
9. ブレーキ装置	141
10. サービス機器	142
11. 変電所用電機品	142
12. 変電所集中監視制御装置	143
13. 信号用発電装置	143
14. 主電動機試験装置	143
7. 電 装 品	144
1. 自動車用電装品	144
2. 航空機用電装品	147
8. ビル用電気設備と電気機器据付・配線工事	148
1. ビル用電気設備	148
2. ビル総合設備工事	151
3. 発・変電機器据付配線工事	153
9. エレベータ・エスカレータ	154
1. エレベータ	155
2. エスカレータ	158
10. 空気調和・冷凍・空気清浄装置	160
1. 大形冷凍機	161
2. 小形冷凍機	162
3. 空気調和機	163
4. 小形冷凍応用品	168
5. ヘリウム液化装置	170
6. 空気清浄装置	170
7. 施設工事	173
11. 通信機および電子応用機器	174
1. 超短波無線機器	175

2. 極超短波多重通信装置	179
3. マイクロ波空中線と部品	181
4. 国際通信用印刷電信端局装置	182
5. 運転指令装置	182
6. テレメータ	183
7. 遠方監視制御装置	184
8. テレビジョン装置	185
9. カラー VTR 用 タイマ	186
10. 電波天文機器	187
11. 精測レーダ	187
12. 衛星通信用地球局アンテナ	188
13. ロケット関係電子装置	189
14. 静止形電源装置	190
15. 交通関係電子制御機器	191
16. 超音波非破壊検査機器	191
12. 電子計算機	193
1. デジタル電子計算機とその応用装置	194
2. アナログ電子計算機とその応用装置	201
13. 計 測 器	204
1. 配電盤計器および記録計	204
2. 工業計測器	206
3. 機械量計測器	207
4. 科学計測器	210
14. 原子力機器	212
1. 放射線計測器	212
2. 粒子加速器	215
3. 原子力施設	216
15. ランプ照明器具および照明施設	219
1. けい光ランプ	220
2. 水銀ランプ	220
3. 調光装置	221
4. 照明器具	222
5. 偏光板(ダイクローム)	224
6. 照明施設	224
16. 家庭用一般電気品	230
1. テレビジョン受信機	232
2. ラジオ	234
3. ステレオ	234
4. テープレコーダ	235
5. スピーカ	236
6. 電気冷蔵庫	236
7. ちゅう房用電熱器	236

8. 深夜電力利用温水器	237
9. 電気洗たく機	238
10. 電気扇および応用品	239
11. 電気冷房機	240
12. 暖房器	241
13. 回転機応用品	242
14. 乾電池応用品	244
15. ミシン	245
16. 編 機	245
17. 電子管および半導体素子	247
1. 電力管	248
2. 受像管	250
3. 受信管	251
4. 整流素子およびサイリスタ	251
5. 整流スタック	253
6. トランジスタ	254
7. ダイオード	255
8. モレクトロン	257
18. 材 料	259
1. 絶縁材料	260
2. 金属材料およびフェライト	262
3. 化成品	266

第 2 号 リニアック特集

《特別寄稿》

東北大学 300 MeV 電子リニアック建設をかえりみて	木村 一 治	271
------------------------------	--------	-----

《特集論文》

東北大学納め ML-300 電子リニアック建築計画	岡島 暢夫・山本 守之	276
東北大学納め ML-300 電子リニアック用加速管	池田 繁幸・大坪陽一郎・飯野陽弼	287
東北大学納め ML-300 電子リニアック用加速管冷却装置	池田 繁幸・待山義彦・藤田亮一	293
東北大学納め ML-300 電子リニアック用マイクロ波装置	戸田 哲雄・立川清兵衛・根本幸昭・正田茂雄	297
東北大学納め ML-300 電子リニアック用大電力パルス	阿部久康・池田和郎・上 富 勇・山本吉彦	306
東北大学納め ML-300 電子リニアック用測定制御装置	入江 浩一・鈴木敏允・坂東修三・川嶋良和・岩井 優・岸森真通	312
東北大学納め ML-300 電子リニアック用ビームトランスポート	後藤正之・秋葉稔光・入江浩一・上田孝寿	320
東北大学納め ML-300 電子リニアック用研究装置	後藤正之・宮下恭一・倉橋浩一郎・秋葉稔光・高月 一	328
東北大学納め ML-300 電子リニアック用冷却系	池田和郎・金沢正博・林 敏和・井上 驍・中村勝雄	334
東北大学納め ML-300 電子リニアック用真空排気系	藤永 敦・鳥取 浩・中村 貢	341
東北大学納め ML-300 電子リニアックの据付	橋本新三郎・高部俊夫・津田正夫・小笠原信雄・中田省三・岩佐辰弥	347
ML-5 A形線電子加速器	戸田 哲雄・入江浩一・根本幸昭・上 富 勇・美濃和芳文	355
MPL-5 線形陽子加速器	藤田 彪太・永井昭夫・高倉康一・上田和広・町田賢二・広 三寿・竹内政和	362
50 cm 半径空心 $\pi\sqrt{2}$ 形ベータ線スペクトロメータ	天道芳彦・橋 爪 朗・栗屋容子・秋葉稔光・上田孝寿・長田大三郎・島 幸弘・朝日照夫	369

《普通論文》

最近の三菱絶縁ワニス	中村立春・石川佳樹・犬塚敬彦	379
------------	----------------	-----

ディーゼル発電機のサイリスタ励磁装置	栗田 静夫・加来政博・畑瀬 昌宏...384
AS-200 形積算計	田井 昌輝・吉沢 忠男...389
《新製品紹介》	395
携帯用電気ハンマードリル (VD-25 A-1 形)・“三菱小形電子計算機 MELCOM-81 シリーズ” 発売	
《ニュースフラッシュ》	397
AMA の「自動車排気ガス浄化装置」特許相互交換協定に加入・八幡製鉄 (君津) 納めプレートミルイルグナー用 11,000 kW 三相誘導電動機・私鉄向け ATS 装置完成・メキシコ電力庁向けわが国初の超々高圧分路リアクトル完成・耐熱絶縁電車電動機の実用化に成功・オーストラリア向け車両用「サイリスタ使用の完全静止形」高圧コンバータ完成、出荷・真空スイッチを用いた抵抗式負荷時タップ切換器完成	
《特許と新案》	377
テレビジョン装置における 2 局同時受像方式・圧力継電器の誤動作防止装置・回転電機	

第 3 号 溶接機, 誘導炉および焼入・加熱装置特集

《特集論文》	
誘導加熱による焼戻し, 焼鈍, 焼準	酒井 良雄・上田 時芳...403
最近の高周波焼入装置	酒井 良雄・君塚 齊...408
鍛造・押出用誘導加熱装置	藤室 雅司・松尾 茂...413
自動車工業用抵抗溶接機	福井 三郎...421
マルチスポット溶接機の半導体制御	馬場 利彦・越智 紀明...425
SN 形ノーガスアーク溶接機	鶴飼 順・鉄 豊造・平松 正毅・平塚 秀雄...434
FC 形サブマージアーク溶接機	鶴飼 順・後藤 洋治・鉄 豊造・平塚 秀雄...440
三菱-BBC 形誘導炉	田口 堅...446
立形高周波発電機	生駒 鍬郎・鈴木 條夫...456
高周波発電機用制御盤	西山 卓...461
《普通論文》	
MELCOMEA-7200 シリーズ全トランジスタ式アナログ計算機	柴谷 浩二・多田 淳・持田 雅夫・井塚 秀弥・佐藤 毅...473
全 IC 化数値制御装置 MELDAS-3200 (自動位置ぎめ), MELDAS-4200 (自動位置ぎめ, 直線切削)	俵口 久元・金森 剛明・黒田 泰次...481
指令電話装置	三室 正巳・加藤 典正・室田 慎・山内 才胤・中川 弘平...487
MELCOM-3100 ソフトウェア (3) —モデル 30 T におけるプログラムの処理—	首藤 勝・中山 俊英・末沢 敏裕・東海林 正明...493
レンズによる超音波の集束と探傷への応用	奥村 謙...501
真空スイッチを用いた負荷時タップ切換器	嶋 裕史・西山 喜順・竹内 伴治...510
《新製品紹介》	518
T-630 形および, T-260 形三菱テープレコーダー発売・三菱電子検査装置 AN-1201A 形を完成!	
《ニュースフラッシュ》	520
超小形化変電所用 22 kV 機器試作完成・真空しゃ断器の公開試験を実施する・量産 IC 用 テスタ (LZ-2400 シリーズ) 完成・ED 形うず電流動力計続々出荷	
《特許と新案》	471
関数発生装置・雨量流量変換演算方式・炉内監視窓の保護装置	

第 4 号 コールドチェーン特集

《特別寄稿》	
たんばく質構成の変化に対応した食品流通体系	鈴鹿 寛昌...525
食品に対する放射線照射の現状	岡沢 精茂...530

《特集論文》

野菜の真空冷却装置	安生三雄	536
コールドチェーンにおける新しい販売容器—その問題点とあり方—	林久美雄・吉田明彦・市原輝彦	545
食品販売用オープンショーケース	山本喬夫	550
食料品貯蔵庫および冷蔵クーリングユニット	山本喬夫	556
コンテナ用冷凍ユニット	西部敏夫	563
コールドチェーン事例の実験	水野久隆	567
牛乳の流通経路と冷凍機応用製品	山風呂洋	580

《普通論文》

輸出化学繊維プラントの電機品	桑原兼一・木村隆信・北川博美・下野信男・安坂吉生	591
サイリスタ静止セルビウス装置	中野久夫・川畑隆夫・栗田静夫	603
東北大学電子リニアック用放射線モニタリングシステム	岩井 優	614
MELCOM-3100 ソフトウェア(4)—10 PT システムの概要—	首藤 勝・野田亮一・石川正躬・長田好正	620
高温気体の非平衡電離現象	野間口有・伊藤利朗	626
上下水道の計装設備	渡辺 宏・松本直己・古木寿人	632

《技術講座》

車両用電動発電装置	猪崎国男・酒井正昭	643
-----------	-----------	-----

《新製品紹介》

自動車のリヤウインドの曇り止め装置 “三菱 VD-101 形デホッガ” 発売・ハンドバッグタイプ “HC-400 形三菱掃除機(風神スバック)” 発売・RR-600 形三菱電子レンジ発売		651
---	--	-----

《ニュースフラッシュ》

関西電力納め記録の離相母線相次いで完成・ビットマンアーム誘導加熱成形機・シームアニーラ完成(電縫管溶接シーム連続焼鈍装置)・広東バンク納め分速 240 m エレベータ・電子線形加速器わが国初の輸出第 1 号—フランス原子力庁へ納入—		653
--	--	-----

《特許と新案》

車両の積荷高さ識別装置・電気ドリル・多種料金用電力計量装置		589
-------------------------------	--	-----

第 5 号 食生活機器特集

“食生活と人生” 談義-不老長寿を願う人々にささぐ-	中川俊一郎	659
----------------------------	-------	-----

《特集論文》

“冷” による食品貯蔵	市川健一・荒野詰也	662
食品の温蔵と食器の乾燥	市川健一・西郷 勝	673
家庭用ジュースミキサーおよびジュース	武井久夫・服部信道	677
家庭用電熱調理器具	野畑昭夫・小川 昇	682
家庭用タイムスイッチ	野畑昭夫	690
電子レンジによる食品加熱・調理	鈴木正高・池田宏司	694
深夜電力利用温水器	萩原孝久・赤羽根正夫	700
台所用換気扇	入澤淳三	705
台所と食堂の照明	小笠原善丸・井上貞成	709
飲料の殺菌ろ過	宮井 隆・城戸久吾・野上新平	715
電気調理器具の商品テスト	澤崎俊幸・山本和枝	719

《普通論文》

加圧水形原子炉の核計装機器	川島克彦・岩岸 聡	725
ミズーリ大学納め複式中性子回折装置	津田栄一・弘中一光・柳下和夫・岩岸 聡・丸山寿一・三富至道	732
ニュージーランド国鉄向けディーゼル電気機関車	高橋卓夫・平尾新三・東捷 敏・黒田義隆	739
二段圧縮冷凍機	大門啓治	748
三菱自動ムアリングウインチ	宮内貞夫・堀江将人・小吉 隆・鶴 史雄	752
自動車走行速度測定用レーダスピードメータ	田村祥一・中村泰而・北原照義	758
西阪神ビルの監視制御装置	糸岡義太郎・長町恒資・美濃順一・塚原昌恭	762

《新製品紹介》

NUK 形電磁クラッチブレーキユニット・高演色性けい光ランプ「三菱ハイデラックスけい光ランプ」「三菱ハイデラックス印刷用けい光		772
---	--	-----

ランプ」・高演色性けい光ランプ「三菱ハイデラックスけい光ランプ」「三菱ハイデラックス印刷用けい光ランプ」・航空工業向け三相低周波ユニバーサル溶接機完成・世界初のオール IC ラジオ開発に成功・精密微細加工用放電加工機・三菱デラックスけい光水銀ランプ

《ニュースフラッシュ》.....780

航空機用「窓氷結防止電源変圧器」国産化に成功・RONS (ロンス) による三菱モータの生産販売開始・AS モータの仕込生産開始

《特許と新案》.....723

摩擦接合装置・電気ルータ・電解加工装置・電解加工装置

第 6 号 変電機器特集

《特集論文》.....

工場配電設備の近代化	小滝喜久二	785
工場の新しい受配電管理	長町恒資・島田政代士・美濃順一	792
受配電系統における保護方式	天野恒	803
変動負荷による電圧変動	芝滝寿宏	810
受電用変圧器	菅寿郎・石井昭二	815
10~100 kV 特高キュービクル	田和稔・平河宏之	827
高圧真空スイッチ管応用開閉装置	梁川美孝	837
キュービクル内蔵の計器用変成器	長野光佑	845
低圧配電装置および機器	竹内孝治・久保修造	849
CNF 形分電盤および NC 形コントロールセンタ	町野康男	853
バスダクト配線方式の適用	堀田滋矩	858
抵抗溶接機用電源設備	馬場利彦	865

《普通論文》.....

大形レクチフロードライブ設備	神田政典	873
MELCOM-9100 システムシリーズ(1)一方式設計一	松本大四・坂和磨・飯川昭一	877
定電圧交流アーク溶接機を用いた無被包アーク溶接法	山本利雄・島田弥・竹内友彦・鶴飼順	888

《技術講座》.....

メーザ、レーザで代表される新しい技術分野 一量子エレクトロニクス(1)一	安東滋	895
--	-----	-----

《新製品紹介》.....904

BDF-25 形生ビールディスペンサー・風向・風速データ処理装置・画期的ミシン針定位停止装置付きクラッチモータ開発・抵抗溶接機用イグナイトロンに代わる新機種 三菱大電力用サイリスタスタック発売

《ニュースフラッシュ》.....909

伊勢丹百貨店納め 10,000 kVA 不燃性油入送油水冷式変圧器完成・高速大容量直流電動機の世界記録品完成・MHD 発電用ダクトーセミホット・ウォール発電ダクトー・宇宙通信機用ヘリウム冷凍機試作完成・わが国最高速 360 m/min エレベータの実運転に成功

《特許と新案》.....871

電解加工装置・電解加工装置・爆圧成形法

第 7 号 工作機用電機品特集

《特集論文》.....

工作機用交流電動機	小島敏男・三富孜・酒向潔	915
工作機用直流機	酒井正昭	922
電動油ポンプ	三富孜	927
工作機用電磁クラッチ・ブレーキ	村田俊哉・車戸秀男・西野広・浅野哲正	930
工作機用電動機速度制御	小川裕三・越田哲太・梶野幸男・石橋和夫	938
ならい制御装置	酒井靖夫・石橋和夫・久保田弘・清水賢一	948
数値制御装置	浜岡文夫・俵口久元・金森剛明・吉田太郎・宮幸助・山崎宣典	956
工作機用電磁制御器具	丸地謙二・茂手木良夫・岡戸弘行・杉浦博・松尾宏之	968
工作機用半導体応用制御器具	宮幸助・三浦守生・宮崎治	978

消磁装置	首藤佑吉	985
------	------	-----

《普通論文》

観測用ロケット積載電子機器	波多洋介・佐藤 武・近藤倫正	989
パッケージ形シリコン整流器変電所	冬広 力・鍋倉浩一郎・津久井 進	997
MELCOM 9100 システムシリーズ(2) —グループ 30 ハードウェア—	松本大四・曾我正和・貴田篤志	1003
トランジスタ形自己照合符合式遠方監視制御装置	島田政代士	1013
150 Mc/FM 50 W 全シリコン固体化ニュースカー連絡用無線装置	加藤 治・片山泰一・山本俊夫・白幡邦彦・来村 俊	1020

《技術講座》

量子エレクトロニクス(2) —メーザ、レーザとその応用—	安東 滋	1027
------------------------------	------	------

《新製品紹介》

新形エボキシレジンモールド計器用変成器 K シリーズ発売・三菱インバータ用大電力サイリスタ・シリコン整流素子 SR1EM SR 400 A FD 1,000 A およびサイリスタ FT 500 A・三菱高周波制御ダイオード (MI 7000 シリーズ)・三菱ステップリカバリダイオード (MS 7100 シリーズ)・Ga As バラクタ・三菱モレトロン DTLM 5930 P に新品種追加	1038
---	------

《ニューフラッシュ》

鉄鋼プロセスライン用 WT-125 M 形シングルシームウエルダ完成・厚板圧延用新鋭電気品実動開始・12 kV, 1,500 MVA, 4,000 A C 形空気しゃ断器・縮少形 DHE タイン磁気しゃ断器電動ばね操作機構	1046
---	------

《特許と新案》

電解加工装置・多重母線保護継電装置・イオン発生装置	987
---------------------------	-----

第 8 号 光源と照明特集

《特集論文》

電離放射線照射によりけい酸塩ガラスに生ずる着色中心の ESR による研究：可視領域の光吸収バンド	森川允弘・西楽隆司・松永直利	1051
CaF ₂ : Dy ³⁺ のルミネセンス	栗津健三・武藤勝俊	1060
諸構成要素を比率で表わした照明経済 —メタルハライドランプなどの経済性の検討—	小堀富次雄	1066
三菱 BOC ランプ —新しいメタルハライドランプ—	久保幸正・竹田俊幸・土橋理博・若林正雄	1072
三菱高演色性けい光ランプ —ハイデラックスけい光ランプおよびハイデラックス印刷用けい光ランプ—	大田重吉・朝長 朗・山崎清司	1076
けい光水銀ランプの演色性の改善 —ニューデラックスけい光水銀ランプ—	大田重吉・朝長 朗・山崎清司・大谷光興	1081
三菱高圧水銀ランプの働程特性	土井貞春・伊藤 弘・加茂部透・宮井 隆	1084
空調用けい光灯具の概要	石井重行	1087
空港照明と滑走路照明器具	田中民雄	1095
三菱 BOC ランプによる照明施設	小笠原善丸・田中民雄	1100
最近の各種光源および照明器具による照明施設の概要	宮本時夫	1104

《普通論文》

三菱電子検診装置 AN-1201A 形	岩田 誠・高崎紀良	1111
マイクロ波帯スเปースダイバーシティ用位相合成器	三宅 隆・山野辺国雄	1117
MELCOM-9100 システムシリーズ(3) —タイムシェアリングオペレーティングシステム—	中島正志・小泉寿男・五十嵐真・黒田寿一	1123
方向弁別レーダスピードメーター	阿部寿夫・中村泰而・邇里信夫	1130
高精度直流計器用変圧器	松田文雄・篠倉俊介	1135
400 チャネル波高分析器 (ND-1667 形)	倉橋浩一郎・大西良一・松宮正幸・小泉一到	1138
U ライン三相誘導電動機	石井 勇・上田五雄・宇都宮弓郷	1143

《技術講座》

メーザ、レーザで代表される新しい技術分野 —量子エレクトロニクス(3)— ホログラフイーとその応用	安東 滋	1149
---	------	------

《新製品紹介》

FM-103 A 形 150 Mc 1 W 移動用無線電話装置・10 分間で手軽に髪のカールができる HI-120 形三菱ヘアーカラー”発売・“20 T-7100 形三菱テレビ(愛称・桂 20)”発売・“AT-202 形三菱自動トースター(愛称・アトリエ)”発売	1155
---	------

《ニュースフラッシュ》

	1159
--	------

北米ミシガン湖の湖上祭に参加するやかた船の照明設備・世界最大の分塊圧延用 $2 \times 6,700$ kW 直流電動機完成・実証試験供試器 500 kV ガスシヤ断器超電研武山研究所に据付完成・ガスシヤ断器現地投入試験・ヘリコプタブレード試験用屋外立て形直流電動機完成・線路電荷放電試験装置と限流形高性能避雷器完成・豪州・南豪州政府向け“大形誘導電動機”大量受注・大容量サイリスタ高圧変換装置の開発に成功

第 9 号 電磁制御器具特集

《特集論文》

新形交流電磁開閉器、接触器	丸地 謙二・岡戸 弘行・長尾 良章	1167
新形制御用継電器と信頼性の諸問題	丸地 謙二・茂手木 良夫・河村 紀一	1182
新形交流電磁開閉器の応用	堀田 滋矩・有本 智美・清水 良之輔・遠藤 譲	1193
直流電磁接触器・直流制御継電器	寺田 光彦・石田 秀樹	1202
SH 形 高圧交流電磁接触器	木村 雅夫・中沢 俊郎	1205
真空電磁接触器とその応用	杉尾 憲一	1211
M 形制御スイッチの紹介と、一般用操作スイッチの適用上の問題点	立石 俊夫・松尾 宏之	1221
半導体を応用した制御器具	宮 幸助・宮崎 治・田原 武・三田村 隆輝	1228

《普通論文》

MELCOM 9100 システム —グループ 30 の主記憶装置—

	小島 一男・蒲生 容仁・布施 明・浜田 勝	1239
変圧器の乾燥とプレスボードの電気的性質	白井 万次郎・石井 敏次	1245
ドリル樹脂処理乾式変圧器	福田 信夫・稲村 晴雄	1251
マイクロ波によるプラズマ診断	小村 宏次	1254
台湾電力下達見発電所 100,000kVA 水車発電機	三浦 宏・石井 明	1260
UL-20 形ヘリウム液化装置	相良 泰一	1264
フルフィットライン三相誘導電動機	古川 俊幸	1269

《技術講座》

メーザ、レーザで代表される新しい技術分野 —量子エレクトロニクス (4)—

量子エレクトロニクスの今後の方向	安東 滋	1274
------------------	------	------

《新製品紹介》

日曜大工道具“たくみ”・三菱電気角のみ・超耐熱形 205 mm 電気ジスクグラインダ (PA-205 A-1 形)・ZKB-CM 形三菱水冷式バウダクラッチ

《ニュースフラッシュ》

気象レーダ RC-51 形大阪管区気象台に納入・エンジンおよびトランスミッション自動耐久試験装置・大形形鋼つり上げリフティングマグネット・カナダ BCPA 向け 125MVA 分路リアクトル完成・ブラシレス化進む—自家発タービン発電機—・ブロックパネル高圧配電盤・スペイン国鉄向け直流電気機関車受注・ボリビア国鉄向けディーゼル電気機関車完成・国鉄向け EF 71 形交流機関車

《特許と新案》

フレーム・直流電力制御装置・タンク形回路シヤ断器・大電流用回路用シヤ断器

第 10 号 カラーテレビ特集

カラーテレビ特集号の発刊にあたって	太田 顕	1291
-------------------	------	------

《特集論文》

色彩心理学とカラーテレビジョン	田口 柳三郎	1292
最近の三菱カラーテレビジョン受信機	瀬辺 国昭	1295
カラーテレビジョン受信機の信頼性	石川 博章	1300
テレビジョン IC 化研究とその問題点	糸賀 正己・仲野 孚・高田 豊	1306
19 形カラー受像管 490 AKB 22 A	水野 睦夫・鷹野 泰	1313
防爆形カラー受像管	岩田 浩	1319
カラー受像管の経時変化—コンバージェンスとランデング—	野阪 英荘・小磯 寛・藤村 健男	1326
偏向コイル内部磁界分布とコンバージェンス補正磁界	比田 井 猛・川田 雄彦・長谷川 実・猿田 貞吉	1331
カラーテレビジョン受信機の品質保証体制	下秋 忠雄・糟谷 忠範	1339

照明とカラーテレビジョン受信機	沢崎俊幸・伊藤晃徳	1345
カラーテレビジョン受信アンテナの問題点	倉田健一	1350

《普通論文》

吸込口改良うず流れ形ポンプの特性	井上誠治	1357
MELCOM-3100 ソフトウェア (5) — ACE コンパイラシステムの概要 —	国分倫任・有坂秀夫・首藤 勝・魚田務臣	1360
アナログ計算機用デジタル入出力装置	桑田 博・篠田東吾	1367
最近のノーヒューズシャ断器およびトライバックシャ断器	和田宏康・山本啓一	1373
誘導機特性の理論計算法	近藤博通・小倉新三	1386
フランス原子力庁納め ML-5 形線形電子加速器	入江浩一・根本幸昭・上 富 勇・美濃和芳文・塩田 勝	1392

《新製品紹介》

三菱ダイヤモンド MC-50 VB 形電解加工機・E 形コントロールセンタ・新形 100 mm ジスクグラインダ・三菱殺菌冷凍冷蔵庫	1400
--	------

《ニュース・フラッシュ》

大口径空中線用多周波帯共用低雑音一次放射器・わが国で最初の事業用ブラシレスタービン発電機完成・帝都高速度交通営団新東西線用制御装置完成・アメリカアルコア社よりブラジルアルコミナス社向け大容量 シリコン整流器一式受注・世界最初のレーザ式座標測定装置完成	1405
---	------

《特許と新案》

ミシン上糸案内装置・励磁機の切換方式・搬送保護継電装置・型彫り方法	1355
-----------------------------------	------

第 11 号 帝都高速度交通営団試作電車電機品特集

《特別寄稿》

地下鉄電車の特異性と試作電車の構想について	石原米彦	1411
-----------------------	------	------

《特集論文》

試作車用電機品の大要	松田新市	1414
主電動機および車両性能	浅越泰男・久山研一	1416
回生ブレーキ付き新方式チョップ装置	北岡 隆・芦谷正裕・大野栄一・赤松昌彦	1422
新形カム式制御装置	長井成吉・森田宣雄	1432
新方式ブレーキ装置	木嶋寛治・三橋英一・六藤孝雄	1438
IC化 A TC 装置	壺井芳昭・梅田義明・白庄司昭・鳥居健太	1446

《普通論文》

電動機絶縁の機能試験	坂田桂三・川上 剛・美藤 亘	1455
電気車用主電動機の絶縁試験	中野義映・浅野幸夫・平林庄司・玉越泰彦・相川一男・松原 博・内海権三	1459
電車総合試験装置	三橋英一・小田橋正寿・吉村元由・中司修徳	1468
車両用冷房装置	西部敏夫	1475
ZnSe 結晶の Franz-Keldysh 効果とその実用性	安川 武・吉沢達夫・伊吹順章	1483
広帯域トンネルダイオード増幅器の実用化	白幡 潔・武富大児・小木曾弘司	1488
カーボンブラックグラフトポリマを用いた電導塗料のベースレジンによる抵抗値の変化	草川英昭	1496
電力保護継電器の静止化	北浦孝一・古谷昭雄・寺田 真・天野 恒・鈴木健治・高田信治	1500
振動系の共振域通過	平野一郎・松倉欣孝・木曾又一郎	1511
貨車偏重量測定装置	石井 明・平山博英	1517

《新製品紹介》

放射線応用レベル検出器「ガンマリレー」完成・昭和 44 年度三菱ルームクーラー新発売・昭和 44 年度空調機器新製品発売	1523
--	------

《ニュース・フラッシュ》

深海潜水艇用油づけ均圧直流電動機完成・焼結用大形主排風機完成・国鉄向け ED76500 形交流電気機関車完成・AS モータの応用制御装置の全シリーズ完成 (ASPAC シリーズ)	1529
---	------

《特許と新案》

搬送保護継電装置・電圧検出装置・時計装置・電気時計装置	1453
-----------------------------	------

第 12 号 研究特集

《特集論文》

ZnSe結晶中の希土類イオンの分光学的研究	伊吹順章・小宮啓義・中田正矩・増井博光	1535
ポリイミドの物理的性質	柴山恭一・田中啓郎	1544
Ni-Zn-Co系VHFフェライト	荒居 徹・井戸猛夫・山田幸慶	1549
リテインングリング用18Mn-5Cr鋼の低サイクル疲れ特性	松木健次・阪部喜代三・塚田尚史・村上晃・和田文夫	1558
サイリスタ高圧変換器の研究	大野栄一・光岡 宏・木村好男	1567
超高圧用マイクロ波変流器(μ 波CT)	斎藤成文・大野 豊・喜連川 隆・中原昭次郎・立川清兵衛	1573
リニアモータの基本特性	大野栄一・岸本 健	1581
プラズマ電子ビーム溶接	後藤正之・上山善司・安永政司	1589
半導体レーザ装置	中原昭次郎・長能宗彦	1596
絶縁体薄膜の膜厚と屈折率の非破壊測定法	中山光雄	1600
ヒステリシス ロータを用いた小形ブラシレス直流電動機	藤井 学・吉川英之	1607
腐食におよぼす電流の影響	山本利雄・松岡宏昌・川岡靖子	1612
レーザ光散乱による微粒子の粒子測定	田畑則一・森 貢	1618

《普通論文》

30cm半径セクタ形二重集束ベータ線スペクトロメータ	秋葉稔光・小浜太郎・上田孝寿・磯貝文彦・長田大三郎	1627
	島 幸弘・岸森真通	
レーン探傷器FD-420形	河野勝美・佐藤春治	1636
YAC用レーダスピードメータ	東 昭・遊佐 晃・阿部寿夫・中村泰而	1642

《技術講座》

アナログ計算機のプログラミング(1)ー常微分方程式の解法ー	井塚秀弥・佐藤 毅・米谷光雄	1647
-------------------------------	----------------	------

《ニュースフラッシュ》

井戸径10インチ用75kW 2 P水中モートル完成・立形誘導周波数変換機の開発・わが国最初のミシン針定位停止装置付きクラッチモートル発売	1654
--	------

《総目次》

1656

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12番地(三菱電機ビル) (郵便番号 100) (電) 東京 (03)212局 6111番

大阪営業所	大阪市北区梅田町8番地(西阪神ビル) (郵便番号 530) (電) 大阪 (06) 312局 1231番
名古屋営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル) (郵便番号 450) (電) 名古屋(052)561局 5311番
福岡営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル) (郵便番号 810) (電) 福岡 (092) 75局 6231番
長崎出張所	長崎市丸尾町6番14号 (郵便番号 852) (電) 長崎 (0958)23局 6101番
札幌営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル) (郵便番号 060-91) (電) 札幌 (0122)26局 9111番
札幌工場	札幌市北2条東12丁目98番地 (郵便番号 060) (電) 札幌 (0122)23局 5544番
仙台営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル) (郵便番号 980) (電) 仙台 (0222)21局 1211番
富山営業所	富山市桜木町1番29号 (郵便番号 930) (電) 富山 (0764)31局 8211番
広島営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル) (郵便番号 730) (電) 広島 (0822)47局 5111番
岡山出張所	岡山市西長瀬字村北122番地の1(三菱電機岡山ビル) (郵便番号 700) (電) 岡山 (0862)24局 0331番
高松営業所	高松市鶴屋町5番地の1 (郵便番号 760) (電) 高松 (0878)51局 0001番
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2丁目12番地(三菱電機ビル) (郵便番号 100) (電) 東京 (03) 212局 6111番
中央家電営業所	東京都千代田区丸の内2丁目12番地(三菱電機ビル) (郵便番号 100) (電) 東京 (03) 212局 6111番
城北家電営業所	東京都文京区大塚3丁目3番1号(新茗溪ビル) (郵便番号 112) (電) 東京 (03) 944局 6311番
城南家電営業所	東京都世田谷区池尻3丁目10番3号(三菱電機世田谷ビル) (郵便番号 154) (電) 東京 (03) 411局 8181番
城西家電営業所	国分寺市南町2丁目16番14号(秀美ビル) (郵便番号 185) (電) 国分寺(0423)22局 1881番
横浜家電営業所	横浜市中区富士見町3番地4 (郵便番号 232) (電) 横浜 (045)251局 2226番
大宮家電営業所	大宮市寿能町1丁目37番地(大宮公園ビル) (郵便番号 330) (電) 大宮 (0486)41局 5324番
千葉家電営業所	千葉市新宿町2丁目49番地(三菱電機千葉ビル) (郵便番号 280) (電) 千葉 (0472)42局 5486番
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1 (郵便番号 530) (電) 大阪 (06) 344局 1231番
洲本出張所	洲本市上物部2丁目6番33号 (郵便番号 656) (電) 洲本 (07992)2局 0631番
名古屋商品営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル) (郵便番号 450) (電) 名古屋(052)561局 5311番
静岡出張所	静岡市七間町9番地の10(池田ビル) (郵便番号 420) (電) 静岡 (0542)53局 9186番
福岡商品営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル) (郵便番号 810) (電) 福岡 (092) 75局 6231番
札幌商品営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル) (郵便番号 060-91) (電) 札幌 (0122)26局 9111番
仙台商品営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル) (郵便番号 980) (電) 仙台 (0222)21局 1211番
富山商品営業所	富山市桜木町1番29号 (郵便番号 930) (電) 富山 (0764)31局 8211番
広島商品営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル) (郵便番号 730) (電) 広島 (0822)47局 5111番
岡山出張所	岡山市西長瀬字村北122番地の1(三菱電機岡山ビル) (郵便番号 700) (電) 岡山 (0862)24局 0331番
高松商品営業所	高松市鶴屋町5番地の1 (郵便番号 760) (電) 高松 (0878)51局 0001番
新潟営業所	新潟市東大通1丁目12番地(北陸ビル) (郵便番号 950) (電) 新潟 (0252)45局 2151番
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地 (郵便番号 661) (電) 大阪 (06) 491局 8021番
商品研究所	鎌倉市大船2丁目14番40号 (郵便番号 247) (電) 鎌倉 (0467)46局 6111番
神戸製作所	神戸市兵庫区和田崎町3丁目10番地の1 (郵便番号 652) (電) 神戸 (078) 67局 5041番
伊丹製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (郵便番号 661) (電) 大阪 (06) 491局 8021番
三田工場	三田市三輪町父々部85番地 (郵便番号 669-13) (電) 三田(07956)局 4371~5番
長崎製作所	長崎市丸尾町6番14号 (郵便番号 850-91) (電) 長崎 (0958)23局 6211番
稲沢製作所	稲沢市井之口町1100番地 (郵便番号 492) (電) 稲沢 (0587)32局 8111番
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地 (郵便番号 640-91) (電) 和歌山(0734)23局 7231番
鎌倉製作所	鎌倉市上町屋325番地 (郵便番号 247) (電) 鎌倉 (0467)46局 1111番
通信機製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (郵便番号 661) (電) 大阪 (06) 491局 8021番
北伊丹製作所	伊丹市大鹿字主ヶ池1番地 (郵便番号 664) (電) 伊丹 (0727)72局 5131番
熊本工場	熊本市竜田町弓削720番地 (郵便番号 862) (電) 熊本 (0963)62局 7211番
名古屋製作所	名古屋市中区矢田町18丁目1番地 (郵便番号 461) (電) 名古屋(052)721局 2111番
福岡製作所	福岡市今宿青木690番地 (郵便番号 819-01) (電) 福岡今宿(09295)6局0431番
福山製作所	福山市緑町1番8号 (郵便番号 720) (電) 福山 (0849)21局 3211番
姫路製作所	姫路市千代田町840番地 (郵便番号 670) (電) 姫路 (0792)23局 1251番
相模製作所	相模原市宮下1丁目1番57号 (郵便番号 229) (電) 相模原(0427)72局 5131番
世田谷工場	東京都世田谷区池尻3丁目1番15号 (郵便番号 154) (電) 東京 (03) 414局 8111番
静岡製作所	静岡市小島110番地 (郵便番号 420) (電) 静岡 (0542)85局 1111番
中津川製作所	中津川市駒場町1番3号 (郵便番号 508) (電) 中津川(05736)5局 2121・5221番
大船製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号 (郵便番号 247) (電) 鎌倉 (0467)46局 6111番
郡山製作所	郡山市栄町2番25号 (郵便番号 963) (電) 郡山 (02492)2局 1220番
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地 (郵便番号 370-04) (電) 太田 (0276)22局 4311番
藤岡工場	藤岡市本郷字別所1173番地 (郵便番号 375) (電) 藤岡 (02742)2局 1185番
京都製作所	京都府乙訓郡長岡町大字馬場小字図所1番地 (郵便番号 617) (電) 京都西山(075)921局4111番
ラジオ工場	尼崎市南清水字中野80番地 (郵便番号 661) (電) 大阪 (06) 491局 8021番

次 号 予 定

三菱電機技報 Vol. 43. No. 1.

昭和 43 年回顧特集

- | | |
|--------------|-------------------|
| ○ 研 究 | ○ 電装品 |
| ○ 発 電 | ○ 電子機器 |
| ○ 送電・変電 | ○ 電子計算機 |
| ○ 配 電 | ○ 計測器 |
| ○ 工業プラント用電機品 | ○ 放射線機器 |
| ○ 工業用電機品 | ○ ランプ・照明器具および照明施設 |
| ○ 船用電機品 | ○ 家庭用電気品 |
| ○ 電鉄用電機品 | ○ 電子管および半導体素子 |
| ○ ビル用電気設備 | ○ 材 料 |

三 菱 電 機 技 報 編 集 委 員 会

委 員 長	小 倉 弘 毅
副委員長	片 岡 高 示
常任委員	明 石 精 一
"	石 川 理 夫
"	上 田 重 夫
"	宇 佐 美 重 夫
"	大 野 寛 孝
"	神 崎 邇 人
"	北 川 和 雄
"	小 堀 富 次 材
"	鈴 木 正 秋
"	祖 父 江 晴 一
"	山 田 栄 茂
"	横 山 喜 行
委 員	尾 畑 成 一 郎
"	北 垣 達 郎
"	南 日 昇 寿
"	林 昇 寿 藏
"	松 元 雄 勝
"	和 田 義 勝

(以上 50 音順)

昭和 43 年 12 月 22 日印刷 昭和 43 年 12 月 25 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 12 番地

小 倉 弘 毅

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 (郵便番号 162)

高 橋 武 夫

発行所

東京都千代田区丸の内 2 丁目 12 番地 (三菱電機ビル)

三 菱 電 機 株 式 会 社 内 「三菱電機技報社」

(電) (03) 212 局 6111 番 (内線 3818)

発売元

東京都千代田区神田錦町 3 の 1 (郵便番号 151)

株式会社 オーム社書店

(電) 03-291-0921 振替東京 20018