

MITSUBISHI DENKI GIHO
三菱電機技報

Vol.47 November 1973

研究特集

11

ネマティック液晶によるカラーディスプレイ





研 究 特 集

目 次

《特集論文》

超高速列車用 超電導電磁石およびクライオスタットの開発

-大野 栄一・岩本雅民・荻野 治・河村寿三・忍 正寿...1125
- ✓ 高出力 CO₂ レーザ.....永井治彦・樋口隆一・菱井正夫・安東 滋・秋葉稔光...1130
- コルゲート円すいホーンアンテナ.....水沢 丕雄・武田文雄・田中宏和・別段信一...1136
- 電界効果型ネマティック液晶を用いたカラーディスプレイ技術.....内田裕子・上田文夫・新居宏壬...1141
- 有限要素法による構造解析のための自動データ作成法.....川面 恵司・荒木裕子・中村正人・南 久美子...1147
- 凍結—融解による汚泥処理.....森口 哲雄・本多敏一・松尾敏治・難波敬典...1153
- GaAs 液相エピタキシャル結晶.....三木秀二郎・大坪 睦之...1159
- 低圧 TIG アークによる高速片面溶接法.....山本利雄・島田 弥...1165
- 各種試験法による絶縁材料の耐トラッキング性.....平林庄司・川上 剛...1172
- カルシウム—アルミナ系ガラスの封着性能.....河原 一雄・西樂隆司・岡本礼二...1177
- 家電用接触機構部品の信頼性.....長谷川知治・小袋勝久...1182

《普通論文》

シーケンス制御装置 MELSEC-310

-久保田伸夫・仁田周一・大野陽吉・山下弘雄・山本 修・大野宣男・岩永俊之・山崎宣典...1189
- シーケンス制御装置 MELSEC-710.....岩永俊之・片岡猪三郎...1197
- 三菱マイクロコントローラ MELMIC-100.....松村雅司・伊藤祐暢・森本克英・加川廣光・近藤耕一...1203

《技術講座》

超音波探傷試験法(5)——超音波探傷の実際——その1.....河野勝美...1209

《新製品紹介》

大形エアソースヒートポンプパッケージ PAH 形シリーズ

《ニュースフラッシュ》.....1214

関西電力(株)姫路第二発電所納め5号 670,000 kVA タービン発電機運転開始・九州電力(株)玄海発電所向け 625,000 kVA タービン発電機完成

《特許と新案》

トランジスタ増幅器用保護装置・エレベータ出発管理方式・近接検出装置

《表 紙》

表紙 1 ネマティック液晶によるカラーディスプレイ

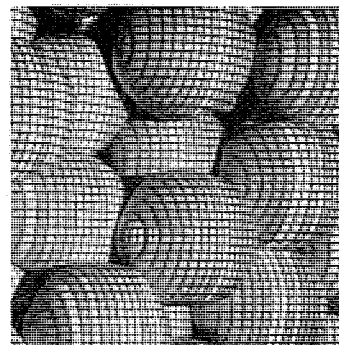
液晶は液体のように流動性がありながら、光学的には結晶のような性質を示すものである。その中でネマティック液晶と呼ばれるものは最近、表示用材料として注目を浴びてきている。

表紙の写真は中研で開発された新しい液晶カラー表示(ネマティック液晶分子を一様に配向させ、その配向を電界で変化させることによって、そのみかけの複屈折性を制御し、カラーパターンの表示を行なう)技術を用いた表示例で音に合わせて色調の変化する格子状パターンを白い風船の壁に投写したもので、'73 エレクトロニクスショーに出展し、好評を博した。その他、装飾照明や大画面の文字表示装置、画像表示装置などへの応用が期待されている。

表紙 2 三菱シーケンサ MELSEC-310

表紙 3 三菱ポータブル超音波探傷器

表紙 4 三菱エレベータ





SPECIAL EDITION FOR RESEARCH AND DEVELOPMENT

CONTENTS

SPECIALLY COLLECTED PAPERS

Development of Superconducting Magnets and Cryostats for Magnetically Levitated High Speed Trains	E. Ôno • M. Iwamoto • O. Ogino • T. Kawamura • M. Shinobu	1125
High Power CO ₂ Laser	H. Nagai • T. Higuchi • M. Hishii • S. Ando • T. Akiba	1130
A Corrugated Conical Horn Antenna	M. Mizusawa • F. Takeda • H. Tanaka • S. Betsudan	1136
A Color Display Using a Field Effect Type Nematic Liquid Crystal	Y. Uchida • F. Ueda • H. Arai	1141
A Study on Two-Dimensional Automatic Mesh Generation for Structural Analysis by a Finite Element Method	K. Kawamo • H. Araki • M. Nakamura • K. Minami	1147
Sludge Freezing and Dewatering System	T. Moriguchi • T. Honda • T. Matsuo • K. Nanba	1153
GaAs Crystals Grown by Liquid Phase Epitaxy	H. Miki • M. Ôtsubo	1159
High Speed-One Side TIG Arc Welding at Low Gas Pressure	T. Yamamoto • W. Shimada	1165
Tracking Resistance of Insulation Materials According to Various Test Methods	S. Hirabayashi • T. Kawakami	1172
Sealability of Calcia-Alumina System Glass	K. Kawahara • T. Nishiraku • R. Okamoto	1177
Reliability of Electromechanical Components of Home Appliances	T. Hasegawa • M. Kobukuro	1182

TECHNICAL PAPERS

Programmable Sequence Controllers MELSEC-310	N. Kubota • S. Nitta • Y. Ôno • H. Yamashita • O. Yamamoto • N. Ôno • T. Iwanaga • N. Yamasaki	1189
Programmable Sequence Controllers MELSEC-710	T. Iwanaga • I. Kataoka	1197
MITSUBISHI Micro Controllers MELMIC-100	M. Matsumura • S. Ito • K. Morimoto • H. Kagawa • K. Kondo	1203

TECHNICAL LECTURE

Ultrasonic Testing (5)	K. Kôno	1209
------------------------	---------	------

NEW PRODUCTS	1213
--------------	------

NEWS FLASH	1214
------------	------

PATENT AND UTILITY MODEL	1187
--------------------------	------

COVER :

Color Display by the use of Nematic Liquid Crystal

Liquid crystal has properties like ordinary crystal from the photometrical viewpoint that it has fluidity similar to liquid. Among those coming under the same classification, the one called nematic liquid crystal has been drawing attention as a display material. The illustration on the cover is a newly developed liquid crystal color display in the Central Research Laboratory of the Company. This operates to display color patterns through the technique of uniformly oriented nematic liquid crystal molecules which are changed of their orientation with electric field so as to control their apparent double refractivity.

The device projects on the wall of white balloon a latticed pattern that changes color according to sounds. This was exhibited in the 1973 Electronic Show and gained public favor. Besides this performance, application is anticipated to decorative illumination, character display on a large picture and image display.

UDC 537.312.62:621.318.3:621.315.5

超高速列車用 超電導電磁石および クライオスタットの開発

大野栄一・岩本雅民・荻野 治・河村寿三・忍 正寿

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1125～1129

現在、国鉄（JNR）では東京一大阪間の輸送需要の増大に対処するため、時速 500km/h の超高速鉄道の開発を進めている。これには、リニアモータと超電導磁気浮上という全く新しい技術の適用が考えられており、当社でもそれらの研究開発に積極的に取り組んでいる。

本文では、磁気浮上にとって核心となる超電導電磁石およびそれを内蔵するクライオスタットの技術的問題点を述べ、当社における高性能・実用クライオスタットの開発段階について紹介する。



UDC 516.1:624.07:681.3

有限要素法による構造解析のための自動データ作成法

川面恵司・中村正人・荒木裕子・南久美子

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1147～1152

有限要素法により構造解析を行なう場合に多量のインプットデータを作成しなければならない。ここでは、このデータを電子計算機によって自動的に作成する方法、およびこの方法により作成したデータの作成状況について述べる。

本方法の特徴として次のものがあげられる。1) 実用性に留意し、自動データ作成のためのデータを極力最小におさえるように、対象とする連続体の形状を円弧と直線とからなるものに限った。2) 連続体の形状あるいは応力の高低に合わせて、要素分割のパターンを自由に変えられるように工夫した。3) 要素分割ばかりでなく、荷重条件、境界条件のデータも自動的に作成できるようにした。



UDC 621.375.826.038.8

高出力CO₂ レーザ

永井治彦・樋口隆一・菱井正夫・安東 滋・秋葉稔光

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1130～1135

光軸、放電、流れの方向が互いに直角な構成の加工用CO₂ レーザを試作した。CO₂-N₂-He混合気体の圧力26torr、流速60m/s、放電長80cmの下で、短時間ではあるが出力800W、効率7%が得られた。放電の下流側で測定した気体温度は電流に比例し、電圧にはほぼ無関係である。

これらの測定結果と、2準位モデルに基づいたレート方程式の解析から、さらに高出力化を図る場合、電流を増大させるよりもむしろ気体の圧力を上昇させ、飽和パラメータを増大させる方が有効であることが分った。また高出力化に際して生ずる問題点が指摘され、種々の物質の切断、溶接への応用について検討されている。



UDC 628.3:621.58:621.56/59.561

凍結—融解による汚泥処理——

森口哲雄・本多敏一・松尾敏治・難波敬典

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1153～1158

現在、汚泥処理は焼却による熱処理法が多く使われているが、脱臭、脱硫など2次公害対策が問題で、最近では有害物質を含む汚泥はコンクリート缶体につめて海洋投棄する例が多くなった。この方式は投棄するための処理費が高価であり、そのため処理汚泥量を少なくする必要がある。

汚泥を凍結後、融解すると、汚泥固相分に含まれている水が脱水され、さらに粒子が粗大化され、汚泥量が著しく減少すると共にろ過抵抗が極度に減少するため簡単な脱水機で容易に汚泥の含水率を下げるができる。

ここでは凍結脱水の原理、各種汚泥の凍結脱水効果に関する研究と並行して、2トン/日の処理能力をもつ装置を製作し実用化の検討をおこなった結果を報告する。



UDC 621.396.677.73

コルゲート円すいホーンアンテナ

水沢至雄・武田文雄・田中宏和・別段信一

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1136～1140

コルゲート円すいホーンアンテナは内壁に軸対称に溝を設けたホーンであって、約1オクターブの周波数範囲にわたって、交差偏波成分の少ない軸対称なビームをもち、低サイドローブをもつホーンである。したがって、このホーンはカセグレンアンテナの一次放射器や、集束伝送のロンチャとして有用である。

ここではこのホーンの放射特性が、コルゲート溝の寸法から決まる変数 χ およびホーンの開口径、長さ、観測距離から決まる変数 ι によって表わし得ることを示し、その変数を用いて放射特性を調べている。さらにこのホーンを実際に応用したアンテナについて述べている。



UDC 546.19:548.5

GaAs液相エピタキシャル結晶

三木秀二郎・大坪睦之

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1159～1164

近年、GaAs液相エピタキシャル成長技術は、各種マイクロ波デバイス製作に欠かすことのできないものとなってきている。本論文ではGa溶液を用いたGa-As液相エピタキシャル成長技術について述べた。

最初に高純度エピタキシャル結晶を得るうえでの酸素の影響、成長温度およびGa溶液の水素処理の影響について調べ、高純度GaAs結晶のドーパ濃度を求めているのは酸素で、酸素の汚染を減少させ高純度結晶を得るには、Ga溶液の水素処理がきわめて重要であることを明らかにした。次にn形およびp形不純物をドーピングした場合のエピタキシャル層の性質について述べた。



UDC 548-144

電界効果型 ネマティック液晶を用いたカラーディスプレイ技術

内田裕子・上田文夫・新居宏壬

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1141～1146

現在実用化されている表示素子は放電管やCRTであるが、それらは最近のIC化された電子回路とは適合しにくい欠点を持っている。従って新しい種々の固体表示素子の開発が積極的に進められ、さらにそのカラー化が望まれるようになってきた。

電界効果型ネマティック液晶を用いて新しい電極面処理を施すことにより、従来実現が困難であった色相の一様性が優れたカラー表示技術を開発した。この液晶表示は応答速度が遅い、液晶セルの組立に高い精度の工作が要求されるなどの問題を残してはいるが、6V程度の低電圧でカラー表示ができるという特徴を持っており、新しいカラー表示、特に投影型の大画面ディスプレイへの応用が期待される。



UDC 621.791.016.75

低圧TIGアークによる高速片面溶接法

山本利雄・島田 弥

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1165～1171

片面溶接の高速化には、表ビードのアンダーカット防止および裏ビードの安定化が技術上の問題となる。表ビードのアンダーカットには、溶融池前面の固体面の存否が決め手となるが、著者らは低アークにおける微弱なプラズマ気流および高温の陰極域という観点から、低圧気中における溶融池現象の研究を行ない、溶融池内部の湯流れを制御して、正常ビード形成限界を著しく大電流・高速側に拡大した。

また裏ビードについても、低圧陰極域の特性を利用して、熱容量の大きい溶融金属を媒介としてアーク入熱を裏面に移行させ、裏面に低温の溶融金属を形成させることにより、大気圧アークの場合より著しく裏ビードを安定化させることができた。



「三菱電機技報」 アブストラクト

UDC 621.315.61.015.533:621.317.333.8

各種試験法による絶縁材料の耐トラッキング性

平林庄司・川上 剛

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1172～1176

有機材料を高電圧・屋外に適用する場合、環境条件の悪化に伴い、絶縁材料の耐トラッキング性が重要になってきた。

本文では各種材料の耐トラッキング性試験法を比較検討した結果についての、その結果良好な試験法であると考えられたDip Track試験法について、トラッキング発生時の表面温度を検討し、この方法がエポキシ樹脂の化学構造から考えられるトラッキング性をよく表現し、かつまた5年間の屋外暴露試験との対応も比較的良好であることを示した。



UDC 621.316.7

シーケンス制御装置 MELSEC-710

岩永俊之・片岡猪三郎

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1197～1202

近年、自動化・省力化が盛んに行われているが、その制御装置として、プログラマブルなシーケンス制御装置が脚光をあびている。特に、設備の規模が大形化、複雑化してくると、従来のワイヤードロジック式に代って信頼性・融通性・保守性の点から、この装置が有利である。

今回これらの要求を満足するはん(汎)用シーケンス制御装置として、MELSEC-710を製品化したので、その概要について説明する。



UDC 666.11:628.98

カルシアーアルミナ系ガラスの封着性能

河原一雄・西楽隆司・岡本礼二

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1177～1181

結晶化ガラスを用いる封着法はその他の方法に比べて比較的簡便である。カルシアーアルミナ系のガラスとその結晶化したガラスの諸特性を、密度・強度・熱膨張係数を測定し、結晶相を観察し、X線回折、示差熱分析を行なうことによって調べた。その結果封着条件の重要性を認識し得た。

ナトリウム蒸気に対する安定性については、ガラスの電気伝導度と侵食層の厚さの測定より興味ある結果を得た。このガラスの適用例として高圧ナトリウムランプの発光管封着を行ない満足できるものであった。



UDC 681.323-519

三菱マイクロコントローラ MELMIC-100

松村雅司・伊藤祐暢・森本克英・加川廣光・近藤耕一

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1203～1208

1970年代に入って、自動化・省力化の重要な手段として、はん(汎)用シーケンス制御装置(Programmable Logic Controller)が注目され、種々の方式のものが開発・発展された。

マイクロコントローラMELMIC 100は、このような動きの初期の段階から独自の手法で開発・製品化され、単なる入出力条件の組合せや順序制御・インタロック制御だけでなく、簡単な算術演算やデータの記録も可能なはん用シーケンス制御装置としてユニークな位置を占め、計算機制御やワイヤードロジックによる制御とは異なった新しい応用分野を開拓している。



UDC 621.3.06:621.316.5

家電用接触機構部品の信頼性

長谷川知治・小袋勝久

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1182～1186

家電品に使用される接触機構部品(Electromechanical Components)について、その重要性および家電部品の中における特異性について述べた。また、この部品の信頼性を確保する上で必要となる電氣的接続上の種々の基礎的技術について述べた。

さらに、実際に検討した個々の部品(スイッチ・リレー・サーモスタット・コネクタ)における信頼性確認の事例をあげ、あわせてこれらの部品の現状と問題点について説明した。



UDC 534.8-8:681.89

超音波探傷試験法(5) 超音波探傷の実際—その1

河野勝美

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1209～1212

金属材料の内部欠陥を外部から超音波パルスを使って非破壊検査する超音波探傷試験法は、最近、各方面で使用されるようになってきた。しかしながら、探触子の特性については、まだ十分理解されていない面があり、その用途が最適とは見られない場合が時折り見られる。

今回は、この場合に、いささかでも役立つよう探触子の選び方と使い方について述べたい。



UDC 621.316.71:681.326

シーケンス制御装置 MELSEC-310

久保田伸夫・仁田周一・大野陽吉・山下弘雄

山本 修・大野宣男・岩永俊之・山崎宣典

三菱電機技報 Vol.47・No.11・P1189～1196

近年、プラント設備の大形化は著しく、制御も複雑になってきている。これにともないシーケンス制御の分野でも同様にシーケンス制御回路の規模は大形化複雑化の傾向にあり、シーケンス制御を遂行するシーケンス制御装置も新しい考えのものが要求されている。

従来シーケンス制御は電磁リレーや無接点リレーによるワイヤードロジックによって実現されていたが、最近ではここに紹介するシーケンサのごときプログラマブルなシーケンスコントローラによってシーケンス制御が行われている。三菱電機では、永年にわたるシーケンス制御に関する豊富な経験から、シーケンサMELSEC-310を開発し、順調なか(稼)動を得たので概略を



超高速列車用 超電導電磁石およびクライオスタットの開発

大野 栄一*・岩本 雅民*・萩野 治**

河村 寿三***・忍 正 寿***

Development of Superconducting Magnets and Cryostats for Magnetically Levitated High Speed Trains

Central Research Laboratory Eiichi Ôno・Masatami Iwamoto・Osamu Ogino
Itami Works Toshimi Kawamura・Masatoshi Shinobu

The Japanese National Railways are now developing super-high speed trains to run at a speed of 500 km/h between Tokyo and Osaka to cope with the increase of traffic demands. The project will be realized by the application of entirely new technique what is called superconducting magnetic levitation. Mitsubishi participates in it positively by endeavouring the study and development of the equipment.

This article describes superconducting magnets which form the heart of the engineering of magnetic levitation, and technical problems posed by cryostats contained in the setup, introducing the stages of working out them to ensure high performance and practical operation.

1. ま え が き

経済・社会の発展に伴って、人々の移動はビジネスに、レジャーにと急激な増大を示している。現在の東海道新幹線によって支えられている東京一大阪間の輸送需要は、とくにその傾向が強く、さらに全国新幹線網の整備・拡充によって、この間に誘発される旅客を考えると、遠からず輸送の限界に達することが予測されている。

世界でも希有な人口ちゅう(稠)密地帯である、この東京一大阪間に必要な新しい高速大容量輸送機関として、現在日本国有鉄道では超電導磁気浮上と、リニアモータの組み合わせによる時速 500 km/h の超高速列車の開発を進めていることは周知のとおりである。

当社においても、リニアモータおよび磁気浮上技術を始めとして、その基本となる技術についての研究、開発を実施し、多くの成果を得ている⁽¹⁾⁽²⁾。今回は、超電導磁気浮上にとって中心となるクライオスタットに焦点をおいて、研究開発の一端を紹介することにしたい。

2. 浮上用クライオスタットの要点

超電導磁気浮上システムの心臓部は浮上用クライオスタットである。高速で走行する車両の底部に装備された超電導コイルはその強力なアンペアターンによって、軌道面に磁界を発生すると共に、軌道面からの反作用電磁力をこのコイルに受け、それを断熱支持構造を介して車体に伝達し、浮上させる。したがって、この超電導コイルを含む浮上用クライオスタット開発に際しての基本的な項目は下記となる。

- (1) 強力なアンペアターンを安定に発生する超電導コイル
- (2) 液体ヘリウム温度の超電導コイルに発生する浮上電磁力を常温の車体へ有効に伝達する断熱支持機構
- (3) 熱侵入が少なく、堅牢な低温容器としてのクライオスタット
- (4) 超電導コイルを極低温に保つための冷却システム

実際には、これら機器は車上に積載されるものであり、きりつめた軽量化と共に、高い信頼性と安全性が要求される。

従来、超電導マグネットは主として物理実験用に開発が進められて来たため、列車浮上のような一般使用に対してはとくに新しい考え

方による工学的検討に基づく開発が必要であらう。

以下にそれらの問題点の 2, 3 について述べる。

2. 1 超電導コイルの安定性と電流密度

軽い超電導コイルを作るためには、電流密度を高くとり、使用線材の量を少なくしたい。一方、安定性の増加、すなわち超電導破壊を避けるためには一定限度以上の電流密度は危険となる。したがってコイル電流密度の選択は最も基本的な問題といえる。ここではその詳細な理論に立ち入ることは目的でないので、安定性に関する考え方について紹介することにしたい。

2. 1. 1 完全安定化 (Complete Stabilization)

完全安定化の考え方は、超電導体内において flux jump などのじょう乱により、局部的に超電導消失が生じて、その間電流は周囲を取り巻く良導体(銅)に流れ、そこで発生する熱量は液体ヘリウムの冷却効果により奪い去られて、再び超電導性を回復するというものである。

したがって、完全安定化のためには、超電導線の銅量を多くし、電流密度を下げ、かつ線材と液体ヘリウムとの直接接触による冷却効果を大きくするコイル構成が必要となる。

この原理による最大電流密度についても種々検討されているが、例えば Lubell によれば大形マグネットに対しては理論的に

$$(\text{平均電流密度})^2 = \text{定数} / (\text{蓄積エネルギー}) \cdots \cdots (2.1)$$

の関係が得られている⁽⁴⁾。

図 2. 1 には式 (2. 1) による限界と、現在までに実際に運転された超電導マグネットの実績限界 (1971 年) を示す⁽⁴⁾。これから、10 MJ 以上の大形マグネットは、いずれも式 (2. 1) で与えられる完全安定化の限界以下であるのに対し、1 MJ 以下の小形のものではより大きな電流密度が達成されていることがわかる。その根拠が次に述べる本質的安定の考え方による。

2. 1. 2 本質的安定化 (Intrinsic Stabilization)

本質的安定化は、超電導体内の不安定現象そのものを本質的に除去しようとする考え方である。これを具体化する線材としては、複合超電導線において、銅中に埋め込まれた超電導体のコアサイズを極

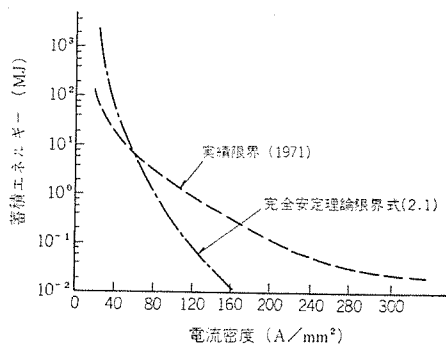


図 2.1 超電導コイルの電流密度と蓄積エネルギー
Stored energy versus overall current density for superconducting magnets.

めて細くて数を増すと共に、線材全体にひねりを与えたツイストファイナリティ線が必須であり、逆にこの線材の製造技術の進歩が大きく貢献したものである。(表 3.2 および図 3.3 参照)

また、コイル成形に関しても、電磁力等による移動を防止するため、エポキシ固めするなど、完全安定の考えとはむしろ相反する対策をとる。これは不安定現象の発生防止に役立つことを目的とするからである。

この本質的安定化の考え方によれば、線材の銅量は少なくてもよく、電流密度はかなり高くとることができ、著しい軽量化を達成することができる。また、浮上用マグネットの問題点の一つとされている交流損に対しても、銅量の減少はそれの中でのうず電流損を少なくする点で有利となる。

従来の実績としては図 2.1 にも示すように、とくに 100 kJ 以下の小形マグネットにおいてこの考え方に基づいて、200 A/mm² 以上も実証されている。浮上用マグネットは、エネルギーの点では 100 kJ のオーダーであり、200 A/mm² は達成可能な領域に入るが、形状的には細長く、大きな電磁力を生じ、しかも高速走行する車両に設置されて、一般乗客と至近距離に置かれることなど難しい点も含むため、信頼性・安全性をも考慮しつつ、この新しい考え方を採り入れた開発を進めることが肝要である。

2.2 超断熱支持

浮上電磁力は液体ヘリウム温度の超電導コイルに発生するから、これを支持する構造は、十分な機械強度を持つと同時にそれからの熱侵入を最小に抑える必要がある。

このための断熱支持材料としては、機械的強度(圧縮または引張)と熱伝達率の比の大きいものが良く、ナイロン線やステンレス線による引張り支持方式や、ファイバグラス等による面支持方式、中間的なカルム支持方式などが提案されてきている。

我々は CSI と呼ぶアルミ蒸着シートとナイロン系ペーパーを組み合わせた多層断熱積層方式を開発し、すでにその実用性を確認している。この方式によれば、浮上用クライオスタットは、コイル、シールド等を含む低温部分と常温部分とを完全に一体構造化できるため、耐振動特性にも特にすぐれ、堅牢で信頼性の高いものとなる点で、他の方式にない大きな特長をもつものである。

2.3 着脱励磁方式

上述のすぐれた断熱支持方式が開発されると、クライオスタットの浸入熱量はかなり小さくなり、コイル励磁用端子からの熱浸入が大きな比重を占めてくる。

したがって、運転時の熱損失をさらに低減するために、コイル励磁度、永久電流スイッチによって短絡し、永久電流モードとして、不要

となった端子は除去してリード線からの熱浸入を完全に防止する方式が好ましいと考えられる。このためには低損失・高信頼度の永久電流スイッチおよび着脱式リード線の開発が中心となる。

以上の考察により列車浮上用のモデルとして実用クライオスタットの開発を当社においても具体的に進めているが、その内容については次章に紹介する。

3. 浮上用クライオスタットの開発

ここでは当社における浮上用クライオスタットの開発状況を、試作品および実車用モデルについてご紹介したい。

3.1 軽量クライオスタット(超電導磁気浮上動特性試験装置用)

軽量クライオスタットは、超電導磁気浮上による超高速鉄道開発を促進するため、国鉄鉄道技術研究所に設けられた超電導磁気浮上動特性試験に供するために、当社が昭和 46 年度に製作した円板形(ドーナツ形)クライオスタットである。

3.1.1 超電導コイル

このクライオスタットに使用した超電導マグネットは図 3.1 に示す形状で、略円形を 2 分割した扇状で図 3.2 に液体ヘリウムそう(槽)へ納めた状態を示す。またこの軽量クライオスタットの主要要目は表 3.1 のとおりである。

超電導コイルには、表 3.2 に示す三菱超電導線の中の MSW-36 を使用した。図 3.3 は、表 3.2 に示した超電導線の断面を示す。

コイルは各層ごとに巻型にそわせて扇形に巻線し、巻線中に各ターンごとに絶縁テープをはさみ込んで絶縁する方式とし、線材には特に絶縁を施ささないで使用し、層ごとの絶縁は絶縁物のスペーサを使

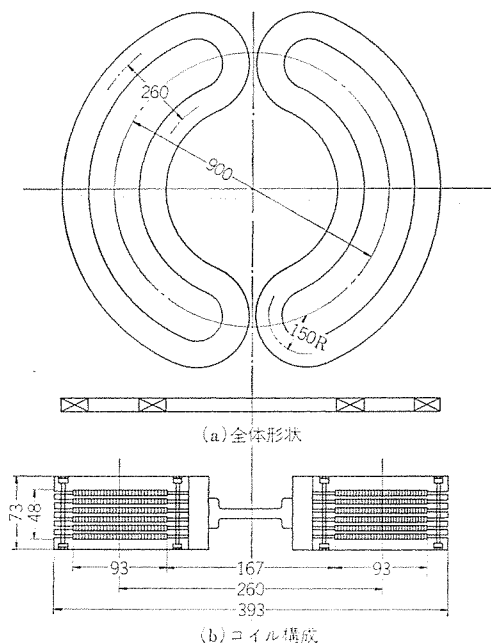


図 3.1 軽量クライオスタット用超電導コイルの構成
Superconducting magnetic coil for light-weight cryostat.

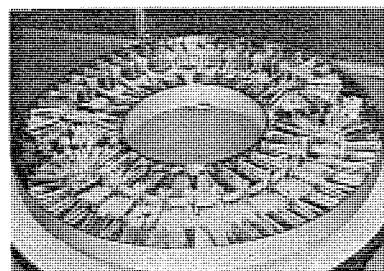
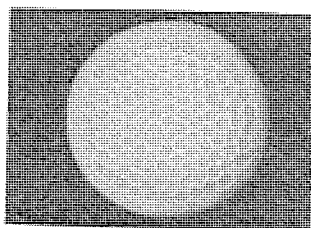
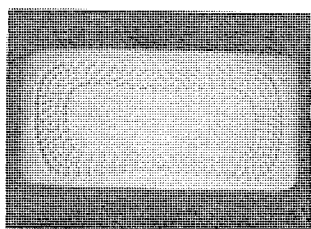


図 3.2 軽量クライオスタット超電導コイル内部
Inner view of superconducting magnetic coil of light-weight cryostat.



(a) MSW-120



(b) MSW-300

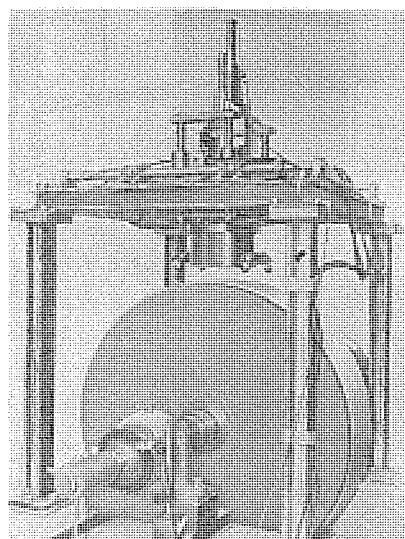


図 3.4 超電導磁気浮上 動特性試験装置
Dynamic test equipment of superconducting magnetic levitation.

図 3.3 三菱超電導線材の断面
Cross section of Mitsubishi superconducting wire.

用した。このためコイルの冷却は完全なエッジクーリングが期待できるものとなり、スペーサ間隔を適当に選ぶことにより、機械的にも十分強固な超電導マグネットを製作することができた。

コイルは層間スペーサ（挿）入部で、クライオスタットの LHe そうに完全に固定するよう設計したため、コイルに発生する力はすべて LHe そうに伝達される構造となり、後述の CSI 断熱構造と合わせてすべての作用力をクライオスタットの真空そうに伝えることが可能となった。

3.1.2 クライオスタット

クライオスタットの構造は、超電導コイルを収容するヘリウムそうと真空そうの中間に液体窒素による中間熱シールド板より構成され、ヘリウムそうと真空そうの間に CSI を用い断熱すると同時に、ヘリウムそうの支持を行なっている。さらに CSI 層をほぼ 2 分する位置に上記熱シールド板をそう入する構造としている。

実験用の液体ヘリウム貯液そうは円周上の対称位置 2 か所に円筒状のタワーを設け、この上にパワーリード、安全弁などのサービス用および保安用付属品を取り付けた。

クライオスタット材質は SUS 304 を使用したが大幅な軽量化に努めたため、当初計画重量 800 kg に対し完成重量 695 kg とすることができた。

この装置はすでに浮上試験にも成功し、200 kAT の励磁により、浮上高さ 50 mm を得ることができた。

完成品の外観は本誌 Vol. 46, 10 月号 (2) (1972 年) に紹介したとおりである。

3.2 動特性試験装置用小形クライオスタット⁽⁵⁾

動特性試験装置は、昭和 47 年度運輸省補助金により当社が製作したものである。この装置は超電導磁気浮上方式における動特性を試験研究する目的で 360 km/h までの超高速試験ができるとともにシート浮上、コイル浮上の試験が可能のように製作された。

装置は図 3.4 に示すようにドラム形軌道、小形クライオスタットとその支持装置、ドラム駆動用電動機、および各々の電源装置より構成されている。本文では小形クライオスタットについて詳述する。この装置用に作られたクライオスタットは、その目的に従って I, II および III の 3 種類がある。(表 3.3 および図 3.5)

表 3.1 軽量クライオスタットの要目
Specifications for light-weight cryostat.

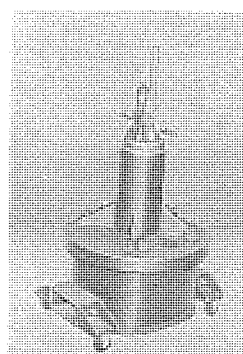
項 目	諸 元
浮 上 力	2,000 kg (SC, NC コイル中心間 130 mm)
つ り あ い 高 さ	40~50 mm (800 kg 荷重において)
超電導コイル起磁力	200 kAT
液体ヘリウム消費量	15 l/h (通電時) 10 l/h (非通電時)
断 熱 方 式	CSI+真空+LN ₂
クライオスタット材質	SUS 304
蓄 積 エ ネ ル ギ ー	55 (kJ)
コイル最大磁界	1.7 (Tesla) (at 1,000 A)

表 3.2 三菱超電導線材の仕様
Mitsubishi super-conducting wire.

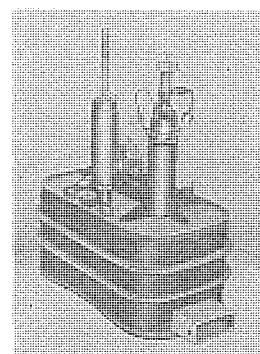
名 称	MSW-36	MSW-120	MSW-300
組 成	Nb-Ti-Ta	Nb-Ti-Ta	Nb-Ti-Ta
寸 法	2.4×4.8	1 φ	1.8×3.6
索 線 数	36	121	305
Cu ratio	5.2	2.5	4.5
ツイスト	な し	20 mm (ピッチ)	32 mm (ピッチ)
臨界電流 IC (at 30 kG)	3,000 A	600 A	1,500 A
実 用 例	軽量クライオスタット	HCM モデル	PCM, HCM モデル

表 3.3 動特性試験装置用クライオスタットの要目
Specifications of cryostats for dynamic levitation test.

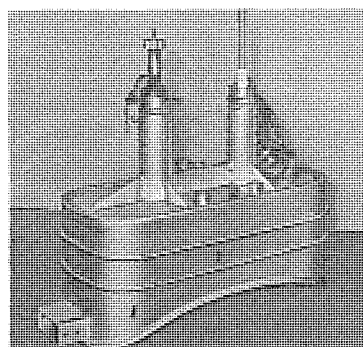
	クライオスタット (I)	クライオスタット (II)	クライオスタット (III)
コイル寸法 mm	150×150	150×150	150×450
超電導コイルアンペアターン kAT	150(max)	150(max)	150(max)
コイル数	1	2	1
クライオスタット外形 W L H	240×240×500	240×420×520	240×550×540
クライオスタット重量(コイル含む) kg	23.5	29.0	25.0
クライオスタット材質	SUS 304	SUS 304	A 5052
	ステンレス鋼	ステンレス鋼	アルミニウム合金



(a) クライオスタット I



(b) クライオスタット II



(c) クライオスタット III

図 3.5 動特性試験装置用各種クライオスタットの外観
Three kinds of cryostats for dynamic test equipment.

3. 2. 1 超電導コイル

このマグネットの特長は本質的安定化の考えに立って設計されたものである。使用した超電導線材は 0.5 mmφ のファインマルチ線で 61 本の素線からなり、ツイストピッチ 25 mm である。最大 150 kAT の超磁力を与えるために、コイルは 1,500 ターンとした。

I, II 用のコイルは中心間 150 mm の正方形コイルで (I) は 1 個, (II) は 2 個 (N 極, S 極の 1 対) を取付けている。また, (III) は 150 mm × 450 mm の長方形コイルとしている。いずれも SUS 304 のコイル巻わくに巻き、エポキシワニス を真空含浸して成形している。

このコイルの電流密度は平均 300 A/mm², 線材での電流密度は 500 A/mm² に達している。このような高電流密度の超電導コイルが得られたのは、エポキシ含浸により超電導コイルのワイヤムーブメントを阻止したこと、ツイストした、ファインマルチ線を使用し、本質的安定化を計ったことによると考えられる。

3. 2. 2 クライオスタット

上記超電導マグネットを収納するクライオスタットは、いずれも特長のある設計を施してある。各クライオスタットに共通なことは、(i) CSI + 真空断熱であること、(ii) ヘリウムそう底板をおう (凹) 形とし、この部分に CSI を収容することで、クライオスタット底面と超電導コイル中心間を十分小さくするよう設計したことである。クライオスタット (I) は SUS 304 の薄板を使用し、真空そうが上下に分割できる構造としている (図 3. 6)。一方クライオスタット (II) は完全溶接構造とした。

また、クライオスタット (III) はすべてアルミニウム合金を使用し、完全溶接構造をとっている。熱侵入を防ぐため、タワ- 部のヘリウムガスクーリングを強化した。

これらのクライオスタットの冷却は、常温から低温のヘリウムガスを用い、液体ヘリウムの張込完了まで 1 ~ 2 時間である。実験中の液体ヘリウム消費量は、ほぼ 5 l/h で 30 ~ 40 分間試験を継続することができた。

磁気浮上時のダンピング特性などの動特性については、当社におい

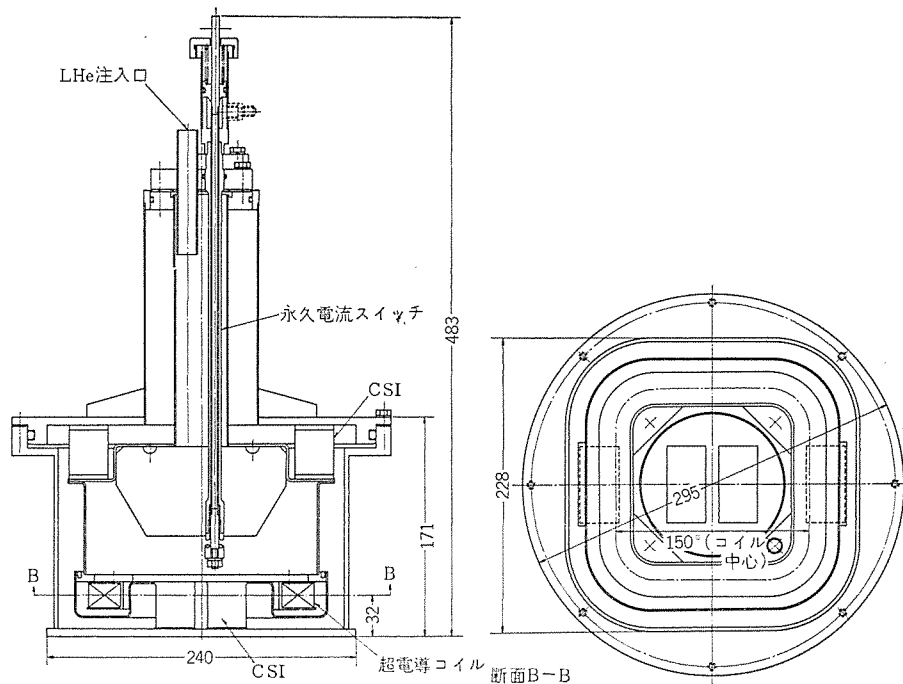


図 3. 6 動特性試験装置用クライオスタット I の構造
Structure of cryostat I for dynamic test equipment.

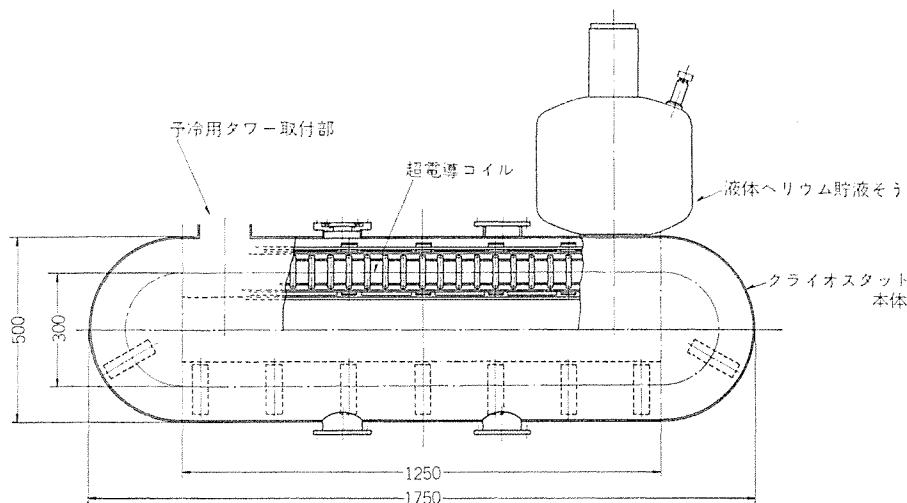


図 3. 7 PCM 形クライオスタット外形図
Outline of PCM type cryostat.

表 3.4 浮上用クライオスタットの試設計例
Designed values of cryostats for magnetic levitation.

	A	B	C
クライオスタット寸法 (幅×長さ)	0.3 m×2 m	0.5 m×2 m	0.3 m×2 m
アンペアターン	250 kAT	450 kAT	250 kAT
全重量	225 kg	270 kg	90 kg
超電導線材	MSW-36	MSW-300	MSW-120
コイル電流密度	135 A/mm ²	135 A/mm ²	300 A/mm ²
クライオスタット構造	扁平チューブ式	扁平式	扁平式



図 3.8 PCM 形クライオスタット超電導コイル
Superconductive magnetic coil for PCM cryostat.

て理論解析を行ない、ダンピング特性が、速度に大きく依存し、高速では絶対量は小さいが負のダンピング係数となることを明らかにした⁽⁶⁾。

本試験装置を用いて、300 km/h に至る高速時の浮上特性の実測を行なうとともに、上記浮上時のダンピングについても実証試験を行っているが、本論文では装置の説明を主としたため、別の機会にゆずることにしたい。

3.3 PCM 形実用クライオスタット

上記の各種クライオスタットはいずれも実験装置用であるが、この PCM (Plactical Cryostat Model) 形は実用車両に供することを想定して設計し現在製作中のもので、表 3.4 の A 相当品である。外形図は図 3.7 に示すとおりである。

我々がこのクライオスタットで目標としたことは、『いかに小形軽量で、必要な機能を満足させ得るか』ということであり、可能な限りの限界設計を行なうことであった。

3.3.1 超電導コイル

超電導コイルは表 3.2 の MSW-300 をレストラック形に巻線し、前記軽量クライオスタットと同様、層間絶縁と絶縁スペーサによる絶縁方式とし、完全安定化としての最高電流密度の実現をねらった。

超電導コイルをヘリウムそうに納めた写真を図 3.8 に示す。

3.3.2 クライオスタット

クライオスタットは種々の形状が考えられるが、薄肉構造で強度設計上最適と考えられる円筒形断面を採用した。真空そう、ヘリウムそうともに薄肉ステンレス鋼板 (SUS 304) を使用し、上記 CSI 断熱支持層とあわせて、同心配置とすることにより、軽量で剛性の高いクライオスタットの設計が可能となった。

また、CSI のほぼ真中に中間熱シールド板を入れペーパーシールドにより熱侵入の減少を計った。さらに、クライオスタットの厚さが 175 mm という超薄形とすることができたことは、浮上時の空間ギャップを規

定した時の超電導コイルのアンペアターンの減少が期待でき、その効果は大きく評価されるであろう。

3.4 改良形実用クライオスタット

改良形実用クライオスタットは上記 PCM 形をさらに改良し、高性能で製作容易なものとしたもので表 3.4 の B および C に相当するものである。とくに断熱支持材に新材料を採用し、軽量化と、熱侵入の低減を計った点に特長がある。

HCM-I は 135 A/mm² の電流密度で 450 kAT を PCM と同じ線材を用いて完全安定化の考えにより設計したものである。

HCM-II は本質的な安定化の適用可能性の検証を目的とし、電流密度を 300 A/mm² という、この大きさのコイルにとっては画期的な高い値をねらって設計し、著しい軽量化を計ったもので、その成果が期待される。

この 2 種類のクライオスタットは、昭和 48 年度運輸省補助金を得て試作中である。

4. むすび

超電導磁気浮上の中心機器となる超電導電磁石およびクライオスタットの開発状況について紹介した。ここに述べたように、ツイストされたファイナルチ超電導線が開発され、超電導コイルは従来に比べて格段の安定性の増大を示し、実用化に明るい見通しを開いたといえる。また、進歩したコイル成形法や、各種超断熱支持材の採用によるクライオスタットの合理的設計により、磁気浮上の必要とする軽量・薄肉形の扁平構造が実現されつつある。

超高速列車の実現までには、さらに多くの技術開発と試験・改良が必要とされよう。国鉄を中心とした国家的計画のもとに、世界に先がけて完成に到達せんことを祈りつつ筆をおく。

最後に、常日ごろご指導賜っている運輸省ならびに日本国有鉄道の関係者の方々、並びにクライオスタットの設計・製作・試験に協力いただいている社内関係各位に、心より感謝する次第である。

(昭和 48-9-6 受付)

参考文献

- (1) 浅越, 新良, 大野: 超高速鉄道の基礎研究, 三菱電機技報, 45, No. 4 (昭 46)
- (2) 大野, 岩本ほか: 超高速列車磁気浮上方式の研究, 三菱電機技報, 46, No. 10 (昭 47)
- (3) H. T. Coffey, F. Chilton and L. O. Hoppie: The Feasibility of Magnetically Levitated High Speed Ground Vehicles, FRA-10001 (Feb., 1972)
- (4) M. S. Lubell, State-of-the-art of Superconducting Magnets, Cryogenics (Oct., 1972) (April, 1973)
- (5) 大野, 河村ほか: 超電導磁気浮上動特性試験装置, 第 11 回低温工学研究発表会, C3-15 (昭 48-5)
- (6) 山田, 岩本ほか: 誘導反発型磁気浮上方式における磁気ダンピング, 電気学会論文集 B (昭 48-11 予定)

高出力 CO₂ レーザ永井 治彦*・樋口 隆一*・菱井 正夫*
安 東 滋**・秋 葉 稔 光**High Power CO₂ Laser

Central Research Laboratory

Haruhiko Nagai・Takaichi Higuchi・Masao Hishii
Shigeru Ando・Toshimitsu Akiba

A trial unit of high power CO₂ laser has been built for the purpose of material processing. It has three mutually perpendicular directions with a beam, a discharge and a gas flow. The CW maximum power of 800 W with an efficiency of 7 % is obtained under a condition of CO₂-N₂-He mixed gas pressure of 26 torr, the flow velocity of 60 m/s and the discharge length of 80 cm. It is made known that the gas temperature measured at the down stream of discharge region increases proportionally to the current, but is almost independent of the sustained voltage. An analysis of rate equations based on the model of two levels and experimental results reveal that a higher power is effectively obtained by raising the gas pressure that leads to increase the saturation parameter rather than by increasing the current.

Problems posed in delivering high power are specified ; discussion is made on the application to cutting and welding of various materials.

1. ま え が き

CO₂ レーザは効率が良く、各種のレーザの中で最も高い連続出力を発生する。最近特に高出力化が目ざましく、加工用熱源として応用できる範囲が広まりつつある。種々の物質の加工へ応用すれば、微小体積に大きなエネルギーを集中でき、高精度の切断、溶接を高速度で行なうことができる。また電子ビームと異なり、大気中でのビームの減衰が少なく、指向性も良いので、適当な光学系と数値制御技術との併用により任意の曲線、図形の裁断が能率良く行なわれるという期待がもたれる。

CO₂ レーザは励起方法の違いにより、放電励起レーザ (EDL)、ガスダイナミックレーザ (GDL)、化学レーザ (CL) の3種類に分けられる。いずれも他のレーザにみられない高い連続出力を発生し得るが、GDLは他の二つに比べ、本質的に効率が1けた(桁)以上低く不経済である。またGDLおよびCLは大容量の真空ポンプを必要とする。実用的立場からなめると、小形化が可能で効率がよく、かつ励起方法の簡単なEDLが最もすぐれている。ここではEDL、特に当所で試作した連続発振のEDLについて述べる。

1964年 Patel が CO₂ 分子の振動回転準位間のレーザ発振に成功したとき、出力は約1 mW であった⁽¹⁾。その後 N₂, He を順次加えることにより出力は飛躍的に増大され、106 W の出力を得ている⁽²⁾。このレーザは気体の温度上昇を拡散効果で押える、いわゆる水冷式、二重ガラス管形である。このような通常形の CO₂ レーザでは放電長1 m 当り 50~70 W の出力しか得られず、たとえば1 kW の連続出力を得ようとすれば、20 m 近くの長さが必要となる。

装置の大形化をさけ、高出力を得ようとすれば、大きな放電電氣入力に対してレーザ出力が飽和あるいは減少するのを防ぐ工夫がなされなければならない。そこで次に考えられた方法が、混合気体を、拡散による上下準位にある CO₂ 分子の減衰時間より十分短い時間内で放電領域を流し去る方法である。つまり、混合気体の使い捨てにより、共振器部に存在する気体の温度をより低い状態に保つ方法

である。共振器軸と流れの方向が同一の通常形 CO₂ レーザでこのような条件を満足するためには、ばくだいな排気装置を必要とし⁽³⁾、实际的でない。同じように共振器軸と放電の方向が同一の場合は高電圧を必要とし、得策でない⁽⁴⁾。共振器軸・放電・流れの方向の3軸の幾何学的構成についてはいくつかの異なった方法が採用されているが⁽⁵⁾⁽⁶⁾、ここでは3軸が互いに直角な構成を採用した。

このような高出力 CO₂ レーザにとって最大の問題は放電の安定化である。放電は励起効率の良いグロー放電で行なわれなければならないが、電氣入力が大きくなるとアーク放電に移行しがちである。またレーザ出力の飽和点を上昇させるためには圧力を高める必要があるが、高圧力下でのグロー放電の維持が特に困難である。当所で試作した CO₂ レーザ⁽⁷⁾⁽⁸⁾ は低圧力で動作させ、流れの効果で高出力を得ている。

2. 高出力化の原理

2. 1 励起機構

CO₂ レーザの励起機構はいまだ十分解明されたとはいえず、不明な

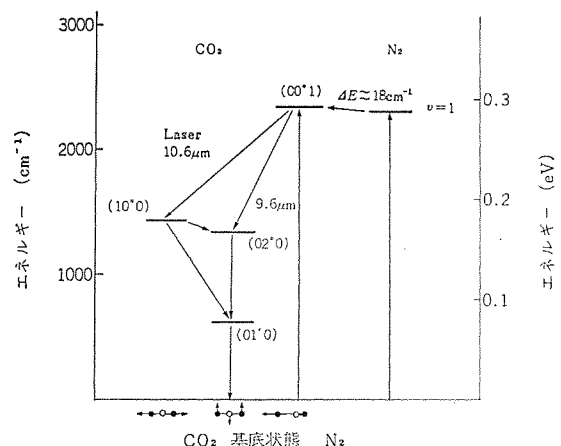


図 2.1 レーザ発振に関連した主な振動エネルギー準位
Main vibrational energy levels related to laser oscillation.

点が多い。特に He の役割についてはいろいろな説があるものの、確証に乏しい。図 2. 1 にレーザ発振に直接関連のあるおもなエネルギー準位を示す。まず N_2 分子が電子との衝突で振動準位 $v=1$ の準安定状態に励起される。この準位は CO_2 分子の (00^01) 振動準位とわずか 18 cm^{-1} のエネルギー差しかなく、共鳴衝突により効率的に N_2 から CO_2 へエネルギーが伝達される。 CO_2 分子の (00^01) 準位には電子との衝突による直接励起も加わり、分布数が異常に増加し、 (10^00) 準位あるいは (02^00) 準位との間に反転分布が生ずる。

レーザ発振はこの上下振動準位の回転準位間で行なわれ、通常複数の回転準位間で発振する。 $9.6\text{ }\mu\text{m}$ 線より $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 線の方が利得が高く、高出力化には $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 線を利用する。下位準位 (10^00) の分子は、大部分 (01^10) 準位を経て基底状態へ落ちる。 (01^10) 準位は低いエネルギー状態にあるので、基底状態の CO_2 分子はこの準位へ熱的に容易に励起される。この結果 (10^00) 準位の緩和時間を長くし、 $(00^01)-(10^00)$ 間の分布数差が減少する。気体の温度が上昇するとレーザ出力が飽和あるいは減少するのはこのためである。

通常形の CO_2 レーザではガラス管壁との衝突を通じて気体の温度を下げているが、そのような拡散効果を利用する冷却方法にはおのずから限度がある。 CO_2 , N_2 のほかに大量の He を加えると、衝突により (01^10) 準位の CO_2 分子を緩和させる効果が大きいといわれている。

2. 2 準位モデル⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

利得曲線が均一な広がり (homogeneous broadening) とみなせる CO_2 レーザでは、単位長当りの利得 g は式 (2. 1) で表わされる。

$$g = \frac{g_0}{1 + I/I_S} \quad (2. 1)$$

ただし、 g_0 は単位長当りの小信号利得 (光強度に対する不飽和利得)、 I は平均の共振器内光強度、 I_S は飽和パラメータである。

一对の反射鏡のうち一方に 100% の反射率のものを使用した場合、発振の定常状態において式 (2. 2) が成立する。

$$g \cdot (2L) = a + t \quad (2. 2)$$

ここで、 L は放電長、 a は共振器を 1 往復する間の損失、 t は出力側反射鏡の透過率である。

CO_2 レーザの出力 P_{out} は式 (2. 1), (2. 2) より

$$P_{\text{out}} = tI = tI_S \left(\frac{2g_0L}{a+t} - 1 \right) \quad (2. 3)$$

で表わされる。つまり P_{out} は I_S に比例する。 g_0 は反転分布数に比例する量なので、混合気体の圧力が一定の場合、放電電流を増加すると大きくなるが、気体温度の上昇に伴ない、いずれ飽和する (後述するように、気体温度は放電電流に比例して上昇する)。しかし飽和時のレーザ出力 P_{out} は I_S の値に依存する。 I_S が大きければ大きいほど強い共振器内光強度の下でも高い利得を維持し、 P_{out} は増大する。

次に I_S の圧力依存性について考察する。取り扱いを単純化するため、発振遷移の上下 2 準位のみを考慮し、共振器部で流れ方向には平均化された Rate Equation をたてると

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_u}{\partial t} &= R_u - \frac{N_u}{T_u} - (N_u - N_l) W_{st} + \frac{N_{u0} - N_u}{T_{ud}}, \\ \frac{\partial N_l}{\partial t} &= R_l - \frac{N_l}{T_l} + (N_u - N_l) W_{st} + \frac{N_{l0} - N_l}{T_{ld}}, \\ T_{ud}^{-1} &= T_f^{-1} + T_{ud\text{if}}^{-1}, \\ T_{ld}^{-1} &= T_f^{-1} + T_{ld\text{if}}^{-1}, \end{aligned} \right\} \quad (2. 4)$$

$$\begin{aligned} T_f &= l/v, \\ W_{st} &= \lambda^3 I / 8\pi^2 h c \Delta\nu t_{sp} \end{aligned}$$

ここで、添字 u , l はそれぞれ上, 下位準位を示し、 N は分子数密度、 R は流速が 0 の時単位時間当り励起される分子数密度、 T_u^{-1} , T_l^{-1} は衝突緩和確率、 $T_{ud\text{if}}^{-1}$, $T_{ld\text{if}}^{-1}$ は拡散による減衰確率、 W_{st} は誘導放出の遷移確率、 t_{sp}^{-1} は自然放出の遷移確率、 $\Delta\nu$ はスペクトル線の幅、 λ は波長、 c は光速、 h はプランクの定数、 N_{u0} , N_{l0} は励起される前の分子数密度、 l は流れ方向の放電領域の長さ、 v は流速である。

利得 g の計算式は

$$g = \frac{(N_u - N_l) h \nu W_{st}}{I}, \quad (v = c\lambda) \quad (2. 5)$$

で表わされるので、式 (2. 4), (2. 5) より定常状態 ($\partial N_u / \partial t = \partial N_l / \partial t = 0$) における g を式 (2. 1) の形に導出すると

$$\left. \begin{aligned} I_S &= \frac{8\pi^2 h c \Delta\nu t_{sp}}{\lambda^3} \left(\frac{T_u T_{ud}}{T_u + T_{ud}} + \frac{T_l T_{ld}}{T_l + T_{ld}} \right)^{-1}, \\ g_0 &= \frac{\lambda^2}{8\pi^2 \Delta\nu t_{sp}} \left(R_u \frac{T_u T_{ud}}{T_u + T_{ud}} - R_l \frac{T_l T_{ld}}{T_l + T_{ld}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2. 6)$$

となる。なお、 $N_{u0} \ll N_u$, $N_{l0} \ll N_l$ として計算した。 $\Delta\nu$, T_u^{-1} , T_l^{-1} は圧力に比例するので、圧力を上げた場合 g_0 の大きな増大は望めない。また電流を増大させた場合、気体温度の上昇に伴ない T_l が大きくなり、したがって g_0 の右辺第 2 項が大きくなり、 g_0 は飽和する。以下 I_S に着目して話をすすめる。

混合気体を高速度で流す CO_2 レーザの場合、 $T_{ud\text{if}}$, $T_{ld\text{if}}$ の効果は無視できるので、 $T_{ud} \approx T_f$, $T_{ld} \approx T_f$ が成立する。また流速を高め、新しい気体を次々に供給するか、パルス励起により気体の温度上昇を小さくおさえることができれば、 $T_u \gg T_l$ が成立する。 $\Delta\nu \equiv K_1 p$, $T_u^{-1} \equiv K_2 p$ (p : 気体の圧力) とおき、各場合について検討する。

(1) $T_f \gg T_u$, T_l の場合

式 (2. 6) より

$$I_S \approx (8\pi^2 h c t_{sp} / \lambda^3) K_1 K_2 p^2 \quad (2. 7)$$

となり、 I_S は p^2 に比例する。TEA (Transversely Excited Atmospheric Pressure) レーザはこの場合の一例である。

(2) $T_u \geq T_f > T_l$ の場合

$$I_S \approx (8\pi^2 h c t_{sp} / \lambda^3) K_1 (v/l + K_2 p) p \quad (2. 8)$$

となり、 v/l か p の少なくともいずれか一方を上げれば I_S は大きくなる。これらは見かけ上の上位準位の緩和時間 ($T_u T_{ud} / (T_u + T_{ud})$) を短かくする効果をもつ。 T_u に対して熱運動の効果を考慮に入れると、一定の p に対して I_S の最低値を与える v が存在する⁽¹⁰⁾。

(3) $T_f \ll T_u$, T_l の場合

$$I_S \approx (8\pi^2 h c t_{sp} / \lambda^3) (K_1/2) p (v/l) \quad (2. 9)$$

となる。 v を大きくしすぎると、発振の立上り時間内に気体が共振器部を通過する状態が生ずる。

本報告の CO_2 レーザは上述の (2) の場合に相当する。 $v=60\text{ m/s}$, $l=1\text{ cm}$ で低圧力の場合 $v/l \gg K_2 p$ となり、 I_S は v/l と p に比例する。高圧力になると $v/l \approx K_2 p$ となり、 I_S は p に対して放物線的に増大する。試作したレーザの動作領域では主に v/l の効果で I_S を大きくしている。

3. 装 置

図 3. 1 に共振器軸、放電、流れの方向が互いに直角な構成の連

続発振 CO_2 レーザの構成図を、図 3. 2 (a) に装置全体 (電源を除く) の写真を、図 3. 2 (b) に放電部 (共振器部) の写真を示す。 CO_2 - N_2 - He の混合気体を送風機 (120 m^3/min) によりレーザ共振器部へ送られ、その後、水冷の熱交換器で冷却された後送風機の入口にもどる循環形の閉ループを形成している。放電部を通過する流速は 60 m/s であり、傾斜形のマノメータで測定された。放電方向と流れの方向が直角な配置は前述の v/l の効果を大きくする役割を果たすとともに、気体の分解を防止している。放電長は約 80 cm 、共振器長は約 1 m である。

共振器は 2 枚の反射鏡で形成されており、一方はステンレスの基板に金蒸着を施した曲率 20 m 、透過率 0 のものであり、他方は Ge

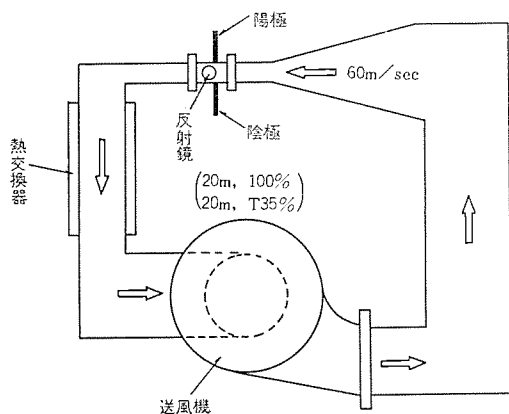
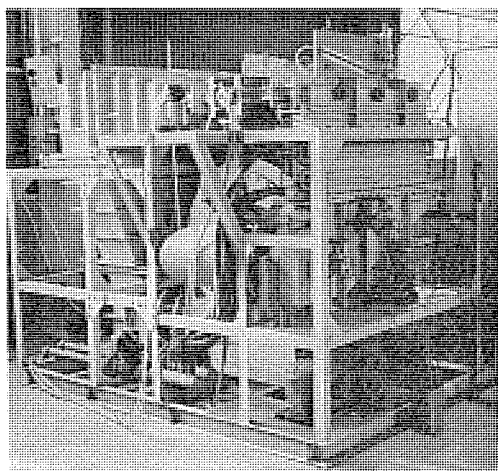
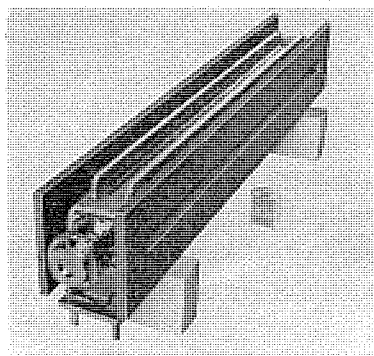


図 3. 1 高出力連続発振 CO_2 レーザの構成図
Schematic diagram of high power cw CO_2 laser system.



(a) 全 景



(b) 放電部

図 3. 2 高出力連続発振 CO_2 レーザ装置
High power cw CO_2 laser.

の基板に誘電体の多層膜コーティングを施した曲率 20 m 、透過率 35 % のものである。いずれも円周側面を水冷している。約 1 m の共振器に対し曲率 20 m の反射鏡を採用したのはモード体積を大きくし、レーザ出力を大きく取り出すためであるが、それだけに反射鏡の調整がきびしくなっている。後述するように共振器軸は放電軸より下流側へ約 1.5 cm ずらした状態が最適である。

陽極は直径 2 mm の Mo のピン電極 100 本を光軸にそって配列しており、実験では 1 本おきに約 50 本を使用した。安定抵抗はそれぞれ 2 $\text{k}\Omega$ である。対向して配置された陰極は、銅の塊に切りこんだ溝 (溝形)、あるいは分割して配置された円筒の穴 (分割形、50 個) の内面を陰極面として使用している。グロー放電からアーク放電への移行を抑制するため、陰極の冷却を十分行なうとともに、陰極表面の面積を大きくとり、電流密度の低減を図った hollow 形の陰極を採用している。電極間隔は約 3 cm である。

4. 特 性

4. 1 放電特性

放電の電圧—電流特性を図 4. 1 に示す。いわゆるグロー放電域の特性を示しており、この時、安定なシャワー状放電が観察される (図 4. 2)。測定された最右端の点はアーク放電域への移行直前の測定点であり、圧力が約 20 torr 以下 (領域 A) では圧力とともに、グロー放電で注入可能な電流が増大する。圧力が 20 torr 以上 (領域 B) になると注入可能電流が減少し、注入可能な電気入力値はほぼ一定 ($\sim 12 \text{ kW}$) に保たれる。また、領域 A と B の境界となる圧力は混合気体の成分、混合比等に依存することと、領域 B における

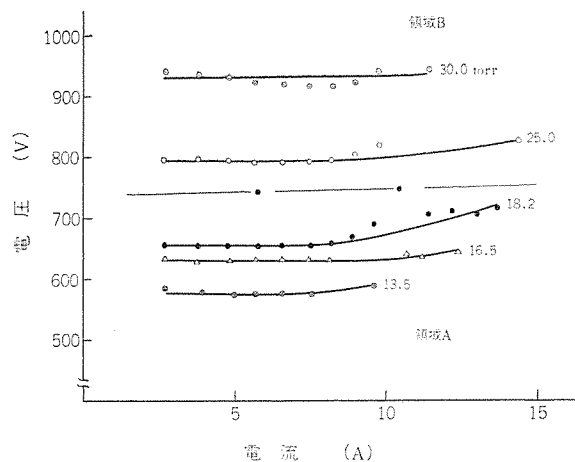


図 4. 1 放電の電圧—電流特性
V-I curves of discharge.

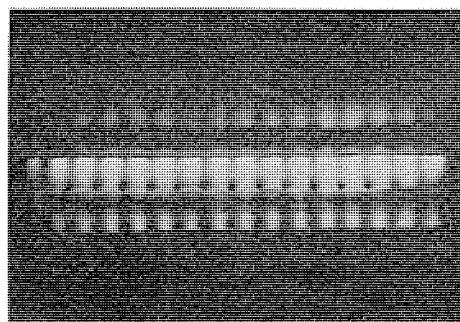


図 4. 2 流れ方向からみた放電の写真
Photograph of discharge viewed from the direction of gas flow.

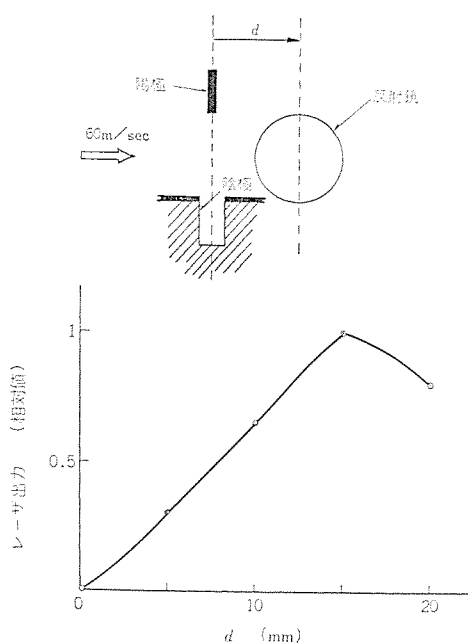


図 4.3 反射鏡の最適位置
Optimum position of reflectors.

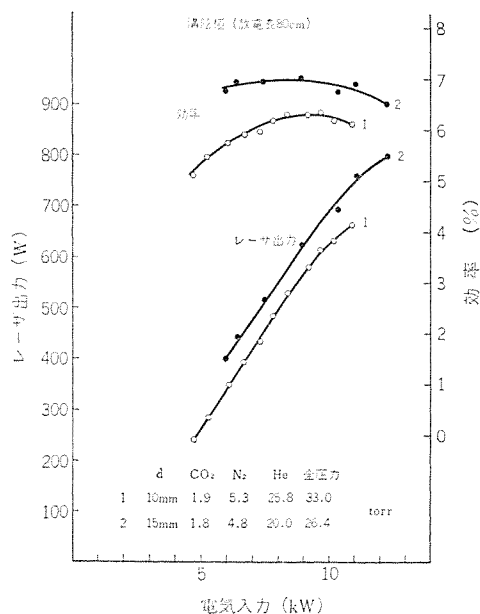


図 4.4 出力特性 (溝形陰極)
Characteristics of output power (groove type cathode).

最大電気入力値は陰極の材質、形状、過度に依存することが明らかとなった。

4.2 出力特性

図 4.3 は陽極と陰極を結ぶ線から下流側へ光軸をずらした時、各位置でのレーザー出力を測定した結果である。 d (ずれの距離) が 15 mm で最大出力が得られ、 $d=0$ では発振を観測できなかった。この反射鏡の最適位置は、流れによる放電路のずれと、N₂ ($v=1$) から CO₂ (00⁰1) にエネルギー伝達される時定数により決定される⁽⁷⁾。

図 4.4 は溝形陰極を使用した場合の出力特性を示し、短時間ではあるが最高出力 800 W、効率 7 % が得られた。図 4.5 は分割陰極を使用した場合の出力特性を気体全圧力をパラメータにして測定した結果である。圧力は一定に保たれているので、横軸は電流の変化を示す。分割形の場合、各円筒陰極表面の 2 次電子放出係数のバラツキが問題であり、溝形より放電の安定性が劣る。レーザー出力は低い

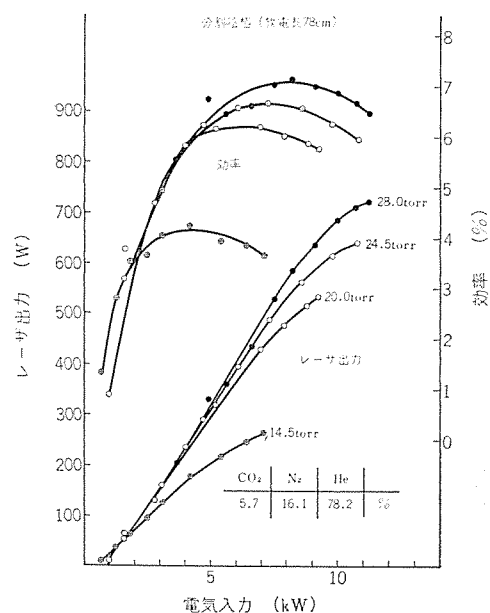


図 4.5 出力特性 (分割形陰極)
Characteristics of output power (array of cylindrical cathodes).

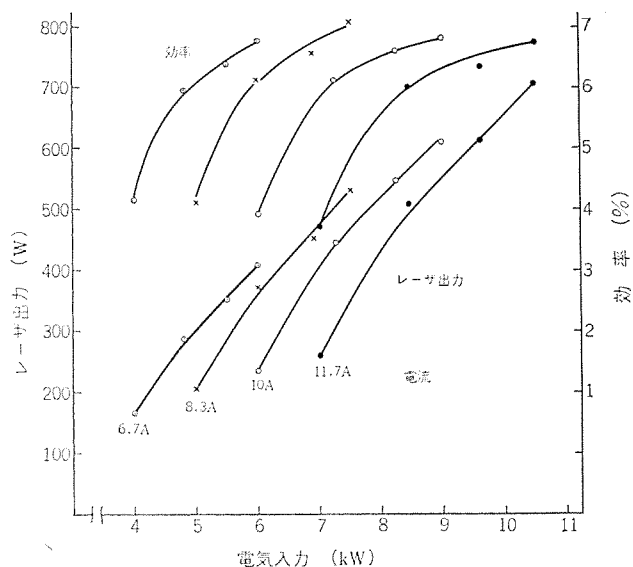


図 4.6 出力特性 (図 4.5 を書き換えた特性)
Characteristics of output power (changed from Fig. 4.5).

電流範囲では電流に比例して増加するが、電流が大きくなると効率は減少し、レーザー出力に飽和がみられる。これは後の気体温度の測定結果からも分るように、気体温度が電流に比例して上昇するからである。図 4.6 は電流をパラメータにして図 4.5 を書き換えたもので、横軸は電圧の変化を意味する。レーザー出力は電圧に対しさらに比例して伸びる傾向にある。圧力を上げて気体温度の上昇はあまりみられず、飽和する傾向にある (参照 図 4.8) ので、飽和パラメータが圧力とともに増加の傾向にあることを示している。

4.3 温度特性

出力特性と密接に関連するのが気体温度である。流れに直角な放電領域の断面積を A とすると、気体の温度上昇分 ΔT は次式で表わされる。

$$\Delta T = \frac{760 T_{in}}{273 C_P A p_0} \cdot \frac{\eta P_{in}}{v p} \left[1 - \exp \left(-\frac{l}{v \tau} \right) \right]$$

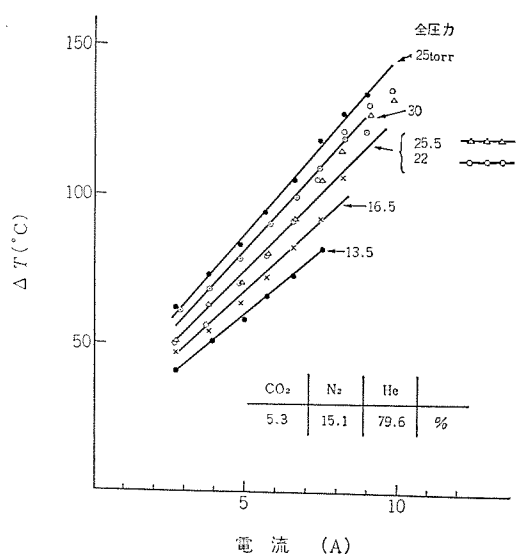


図 4.7 気体温度上昇分 ΔT の電流依存性
Dependence of the increase ΔT in gas temperature on discharge current.

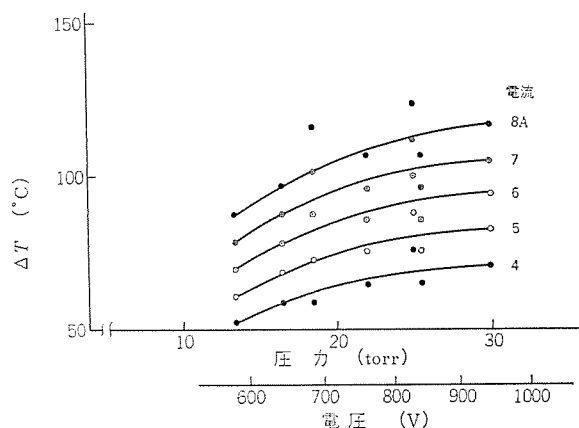


図 4.8 気体温度上昇分 ΔT の電圧依存性 (図 4.7 を書き換えた特性)
Dependence of the increase ΔT in gas temperature on sustained voltage (changed from Fig. 4.7).

ここで、 τ は温度上昇の時定数、 T_{in} は放電領域に入る前の温度、 P_{in} は電気入力、 η は P_{in} のうち気体の温度上昇に寄与する割合、 C_P は気体の定圧比熱、 ρ_0 は標準状態における気体密度である。 ΔT は電流に比例し、 v 、 p に反比例する。ここで η の圧力依存性を無視し、かつ電圧 $V = \alpha p$ (α ; 定数) を仮定できるならば、 ΔT は電圧に依存しない。

図 4.7 は放電領域から下流側に約 15 cm 離れた点で測定した ΔT の電流依存性を示す。予期されたように ΔT は電流に比例して増加する。図 4.8 は電流をパラメータにして図 4.7 を書き換えたものである。20 torr 以上では ΔT はほぼ一定である。

5. 高出力化と応用

5.1 高出力化の諸問題

CO₂ レーザの高出力化は装置の小形化と合せて考慮しなければ意味がない。単に出力を上げるだけならば既存の装置を大形化するか、あるいは何台も並べて増幅すれば達成される。小形化を図りつつ出力を上げるためには、グロー放電で単位体積あたりに注入できる電気入力を増大させる必要がある。そのためには、電流を増大させる方法と、圧力を上げて電圧を増大させる方法とが考えられる。2.2 節

で検討したように、前者の方法は g_0 を増大させることになるが、4.3 節で指摘したとおり気体の温度は電流に比例して上昇する。したがってこの場合、気体の温度を一定に保つためには、電流の上昇に比例して流速を上げねば効果がない。流速が一定の場合、電流の上昇に対するレーザ出力の飽和現象は図 4.4、4.5 に現われている。

一方圧力を上げる方法は I_S を増大させることになる。低圧力領域では I_S 、したがってレーザ出力は圧力に比例して増大するが、高圧力領域では放物線的に増大する。この場合気体の温度は上昇しないので、流速を上げる必要もない。図 4.6 は電圧 (すなわち圧力) の増大に対して、レーザ出力が比例して上昇する様子を示している。しかし高気圧でグロー放電を維持することが特にむずかしく、今後に残された課題である。

次に改善しなければならないことは効率の問題である。一般に高速気体流形の効率は 5~10 %⁽⁵⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ で、通常形に比べて 5~10 % 低い。考えられる原因としては、高速気体流の下で誘導放電が行なわれているため、反転分布数をレーザ出力として取り出す効率が悪いこと、および通常形との放電条件の違いにより、電子のエネルギーが励起に最適な値からずれていることが上げられる。高速気体流形では通常形に比べ気体の温度上昇が低いので、発振遷移の下位準位に関しては良い条件にある。したがって上位準位の分布数に関係深い電子のエネルギーを種々の放電条件の下で測定し、励起に最適な放電条件を知る必要がある。

実的な問題としては、特にレーザ出力が 1 kW 以上になると、出力側反射鏡の材料が大きな問題となる。Ge は常温近傍で吸収係数が急激に上昇し、破壊しやすい。GaAs は吸収係数の点では Ge よりはるかにすぐれているが、大きな直径のものが得られず、高価でもある。基板の材料とともに問題なのが、適当な反射率をもたせるための多層膜コーティングで、熱応力による亀裂を生ずるおそれがある。これらの問題をさけるため、高速流形レーザを透過鏡を必要としない増幅器として使用したり、あるいは不安定共振器の研究が最近進められている。不安定共振器とは 2 枚の全反射鏡で透過損をゼロとし、回折損をきわめて大きくした共振器で、回折損をレーザ出力として取り出す。通常のレーザ共振器では回折損をできるだけ小さくし、透過損をレーザ出力として取り出しているの、不安定共振器は正に正反対の考え方である。

5.2 応用

高出力 CO₂ レーザの応用は種々考えられるが、最も身近で実現性の高い応用は加工であろう。レーザによる加工の特長をあげると次のようになる。

(1) レーザビームのコヒーレントな性質のため、微小体積に大きなエネルギーを集中でき、微小加工が可能である。

(2) 材料に対して機械的な接触が不要であるから、ドリル、カッターのようには摩滅しない。かたくてドリルを使えない物質に対しても有効である。

(3) 電子ビーム加工と比べた場合、真空を要しないこと、低価格であること等でまざるが、反面、金属面等での反射の大きいことが欠点である。

微小な穴あけにはパルス発振で波長の短い固体レーザ、あるいは TEA レーザなどが適しており、連続発振の CO₂ レーザは切断、溶接に適當である。しかも高出力化が達成されると、高速度、高精度の切断、溶接が可能になる。たとえば紙の高速切断に用いれば、1 分間に数千 m の速度で切断が可能になり、カッターの摩滅による限界速

度を突破する。また1章で述べたように、大気中での任意の曲線、図形の裁断に対する可能性は電子ビームでは得られないことである。このように従来なし得なかった加工が可能になる。

具体的に1kW以内の加工となると、紙・木材・繊維・石英・ガラス・合成樹脂等の非金属物質の切断、あるいは薄手の金属の切断、溶接が対象となろう。加工の条件として材料の種類に応じて、材料の厚さ、切断あるいは溶接速度が存在し、高出力化により許容される範囲が広がっていく。たとえばレーザー出力800Wで、厚さ15mmの木材は1.5m/min、厚さ2.3mmの冷間圧延鋼は1.75m/min、厚さ3.3~7.5mmのステンレス鋼は0.75~0.4m/min程度の切断、またレーザー出力1kWで厚さ3mmのステンレス鋼は0.8m/min程度の溶接が可能である。さらにレーザー出力が10~20kW級になれば加工条件が高まるとともに、金属の溶接が現実性を帯びてくる。たとえばレーザー出力20kWで、厚さ13~20mmのステンレス鋼の溶接速度は2.5~1.3m/min程度になる。

一方材料の種類に応じて加工法の研究が必要であり、加工状態を知る必要がある。たとえば紙はきわめて容易に切断されるが、燃焼を防ぐため窒素を吹きつけながら切断する必要がある、金属は熱伝導率が大きいため、酸素を補助ガスにしてその燃焼熱を利用すれば有効である。また合成繊維の切断は切り口が溶けて固まるので、刃物で切ると違い、ほつれることがなく、一方合成樹脂では切断時に刺激臭が激しく、炭化の激しいものもある。

6. む す び

試作した横方向励起連続発振CO₂レーザーの高出力化の原理、構造、諸特性について述べた。短時間であるが放電長80cmで800Wの出力が得られた。さらに高出力化を図る場合、圧力を上昇させ、飽和パラメータ I_s の増大を図ることが有効である。その際、高気圧におけるグロー放電の維持が最大の課題となる。また当面の技術的問

題として、効率良い出力取り出し方法のほかに、励起に最適な放電条件を確立する必要がある。

加工を応用の対象とした場合、レーザーの出力に応じて用途を選別し、材料の種類に応じて加工条件を明確にする必要がある。さらに10kW以上の高出力では従来のガス切断、プラズマ切断、アーク溶接等による加工法、あるいは電子ビーム溶接との比較を行ない、差異を明確にする必要がある。

参 考 文 献

- (1) C. K. N. Patel : Phys. Rev. Letters 13, 617 (1964)
- (2) C. K. N. Patel, P. K. Tien and J. H. Mc-Fee : Appl. Phys. Letters 7, 290 (1965)
- (3) T. F. Deutsch, F. A. Horrigan and R. I. Rudko : Appl. Phys. Letters 15, 88 (1969)
- (4) A. J. Beaulieu : Appl. Phys. Letters 16, 504 (1970)
- (5) W. B. Tiffany, R. Targ and J. D. Foster : Appl. Phys. Letters 15, 91 (1969)
- (6) A. E. Hill : Appl. Phys. Letters 18, 194 (1971)
- (7) 樋口, 永井, 安東 : 第33回応用物理学会学術講演会 (昭47秋)
- (8) 永井, 樋口, 菱井, 安東 : 第20回応用物理学関係連合講演会 (昭48春)
- (9) 永井 : 超高温研究 10, 55 (昭48)
- (10) 永井, 樋口, 菱井, 安東 : 電子通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会資料 OQE73-11 (昭48-07)
- (11) H. J. Seguin and G. Sedgwick : Appl. Opt. 11, 745 (1972)
- (12) N. Ben-Yosef, E. Bin-Nun, F. Dothan and S. Yatsiv : J. Phys. E (Scientific Instr.) 4, 708 (1971)

コルゲート円すいホーンアンテナ

水沢 丕雄*・武田 文雄**・田中 宏和**・別段 信一***

A Corrugated Conical Horn Antenna

Kamakura Works

Motoo Mizusawa・Fumio Takeda・Hirokazu Tanaka

Communication Equipment Works

Shinichi Betsudan

A corrugated conical horn antenna is a horn having grooves arranged symmetrically against the axis inside the wall. It provides a symmetrical beam against the axis with few cross-polarized components over a frequency range of an approximately one octave and with low sidelobes. This horn is useful as a primary radiator of Cassegrain antenna or as a launcher of beam waveguide. In this article it is denoted that the radiation characteristics are represented by a variable χ which is to be determined by the dimensions of corrugated grooves and by a variable z which is to be determined by the diameter of the horn aperture, the length and the distance of observation. These variables are used for the investigation of the radiation characteristics. In addition description is made on an antenna in which this horn is put into practical application.

1. ま え が き

マイクロ波帯での衛星通信回線や地上通信回線において用いられるカセグレンアンテナにおいては、通常の円すいホーンを一次放射器として用いるのが普通である。しかし、この場合通常の円すいホーンのビームが軸対称でないこと、サイドローブの高いことから、アンテナの開口能率、サイドローブ、雑音温度などの性能におのずから限界が現れてくる。このような限界を取り除くためには軸対称なビームをもち、低サイドローブをもつ一次放射器が必要とされ、これまでに複モードホーン⁽¹⁾、誘電体装荷ホーン⁽²⁾など数多くの研究が行なわれてきた。しかし、この二つのホーンは広帯域性などの点で十分とはいえなかった。ここに述べるコルゲート円すいホーンは、ホーンの内壁に軸対称に溝を設けたホーンであって、ほぼ1オクターブの帯域にわたって軸対称なビームと低サイドローブをもつホーンを得ることができる。

コルゲート円すいホーンに関する研究は偏波によって反射係数の変わらない壁面を用いるという着想による A. F. Kay の Scalar Feed⁽³⁾に始まり、その後、角すいホーンの低サイドローブ化⁽⁴⁾、コルゲート導波管に近似したホーン内のモード解析⁽⁵⁾⁽⁶⁾、その解析をもとにした放射特性の解析⁽⁷⁾⁽⁸⁾、およびコルゲートモード変換器⁽¹⁰⁾などの研究が行なわれている。ここではコルゲート円すいホーンに対して、コルゲート内壁の溝の深さ、ピッチ、幅によって決まる一つの媒介変数 χ およびホーンの開口径、長さ、観測距離によって決まる媒介変数 z を導入し、この二つの媒介変数によってホーンの放射特性を明らかにしている。さらにこのホーンを実際に応用した衛星通信地球局用集束ビーム給電カセグレンアンテナおよび地上中継用ホーン給電カセグレンアンテナについて述べる。

2. 理 論

2.1 ホーンの構成

コルゲート円すいホーンアンテナは、図 2.1 に示すように、円形導波管、コルゲート変換器、およびコルゲート円すいで構成される。円形導波管内を伝搬してきた TE₁₁ モードの波はコルゲート変換器によってコルゲート導波管の EH₁₁ モードの波に変換され、コルゲート円すい内を伝搬してホーン開口から空間に放射される。コルゲート変換器としては、リング

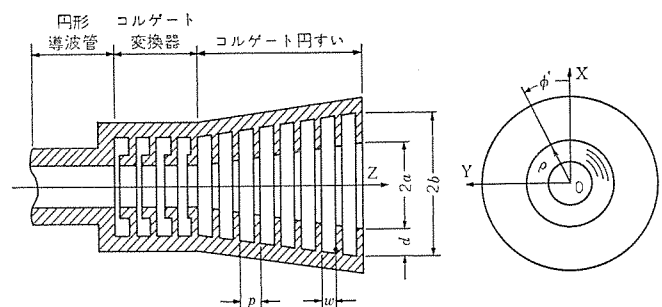


図 2.1 コルゲート円すいホーンアンテナ
A corrugated conical horn antenna.

装荷コルゲート導波管⁽¹⁰⁾を用いるのが有効で、リング装荷量を漸次変化させることにより広帯域にわたるモード変換が可能となる。以下ここではモード変換器の性能は良好なものとする。

2.2 開口分布

開口の振幅分布としては、ホーンの開き角が小さいとしてコルゲート円形導波管における電界分布を考え、位相分布すなわち開口における波面は円すいホーンの頂点を中心とする球面波と考えることができる。コルゲート円形導波管の電界分布は非常に複雑となる⁽⁶⁾が、カセグレンアンテナの一次放射器のように、開口径 $2a$ が自由空間波長 λ に比べ比較的大きい場合、管内波長 λ_g は λ に近似的に等しいと考えることができ、さらに溝のピッチ p が λ に比べ十分小さいとし、導波管内での横方向位相定数 k_0 が、自由空間の位相定数 k および導波管内での位相定数 β_0 として、

$$k_0 = k^2 - \beta_0^2 > 0 \quad (2.1)$$

であるとすると、基本モードである EH₁₁ モードの波で励振したホーンの開口の電界分布は、主偏波成分 E_x および交差偏波成分 E_y で表わして、

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \frac{E_0}{1-\gamma} \{ J_0(\chi \rho') + \gamma J_2(\chi \rho') \cos 2\phi' \} \\ E_y &= \frac{E_0}{1-\gamma} \gamma J_2(\chi \rho') \sin 2\phi' \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

を得る⁽⁹⁾。ここで

$$\gamma = J_0(\chi)/J_2(\chi)$$

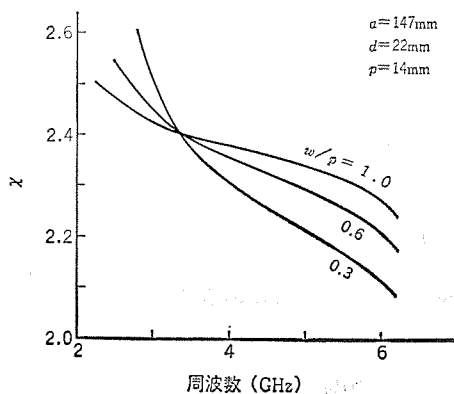


図 2.2 パラメータ χ の周波数特性
Frequency characteristics of a parameter χ .

$$\chi = k_0 a$$

$$\rho' = \rho/a$$

である。

式 (2.2) からわかるように、 χ のみが開口の振幅分布を決定するパラメータとなっている。この χ は コルゲート 導波管の形状寸法、すなわち、内径 $2a$ 、溝のピッチ p 、幅 w 、深さ d をもとにした境界条件から決る特性方程式を解くことによって、一義的に決る⁽⁹⁾。 χ の周波数特性の計算例を図 2.2 に示す。導波管としての解析からホーンとして応用できるための χ の範囲は、

$$\chi_1 \leq \chi \leq \chi_2 \dots \dots \dots (2.3)$$

$$\chi_1 = 1.8412 : J_1'(\chi) = 0 \text{ の最初の根}$$

$$\chi_2 = 2.4048 : J_0(\chi) = 0 \text{ の最初の根}$$

である。式 (2.2) からわかるように $J_0(\chi) = 0$ となるとき、すなわち $\chi = \chi_2$ となるとき $\gamma = 0$ となり、開口の振幅分布は軸対称となり、交差偏波成分もゼロとなる。一方、 $\chi = \chi_1$ となるとき電界分布は通常の円形導波管のそれと同一になる。結局、回転対称な開口分布を広帯域にわたって得るには χ が χ_2 の近傍の値をもち、周波数に対し平坦な特性をもつコルゲート壁を採用する必要がある。図 2.2 の例では w/p が 1 に近い方が良いことがわかる。

開口の位相分布は、円すいホーンの頂点を中心とする球面と開口平面との差と考え、ホーンの開き角が小さいとして、

$$\psi_a = \frac{\pi a^2}{\lambda l} \rho'^2 \dots \dots \dots (2.4)$$

とする⁽⁹⁾。ここで l はホーンの長さである。

2.3 放射電界

開口の振幅分布および位相分布が、式 (2.2) および (2.4) で与えられ、放射電界を近軸に限るとすれば、図 2.3 に示す座標系において、放射電界の主偏波成分 E_{PX} および交差偏波成分 E_{PY} は

$$\left. \begin{aligned} E_{PX} &= E_{P0} [I_0 + \gamma I_2 \cos 2\phi] \\ E_{PY} &= E_{P0} \gamma I_2 \sin 2\phi \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.5)$$

である⁽⁹⁾。ここで

$$E_{P0} = j2\pi e^{-jk_r a^2} E_0 / \lambda r (1 - \gamma)$$

$$I_n = \int_0^1 J_n(\chi \rho') J_n(u \rho') e^{-j2\pi t \rho'^2} \rho' d\rho'$$

$$u = ka \sin \theta$$

$$t = \frac{a^2}{2\lambda} \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{r} \right)$$

である。これらの式からわかるように、放射電界は χ 、 u 、 t のパラメータで表わすことができる。ここで u は正規化された角度を示す変

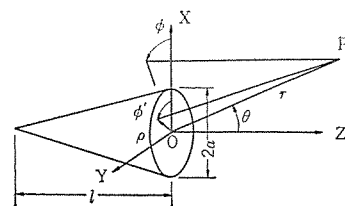


図 2.3 座標系 Coordinates.

数であり、 t はホーンの開口径、長さ、観測距離によって決まる変数である。

3. 放射特性

3.1 放射特性の解析

放射特性に及ぼすパラメータ χ 、 t の効果を具体的に調べる。

(1) χ の効果

ホーンの長さ l および観測距離 r がともに非常に大きい場合、すなわち $t=0$ の場合の χ をパラメータとした放射パターンの例を図 3.1 に示す。また図 3.2 には χ に対するビーム幅、第 1 サイドローレベル、および交差偏波の最大レベルの変化を示している。これらの図からわかるようにビーム幅、第 1 サイドローレベルとも $\phi=90^\circ$ 面、すなわち H 面ではあまり変化せず、 $\phi=0^\circ$ 面、すなわち E 面で大きく変化している。図 3.2 から、E、H 面でのビーム幅の違い、サイドローレベル、交差偏波レベルなどへの条件が与えられれば χ のとり得る範囲が得られる。

(2) t の効果

理想的なコルゲートホーン、すなわち $\chi = \chi_2$ の場合の t をパラメータとした放射パターンの例を図 3.3 に示す。またホーンの形状寸法および観測距離が決まった場合の周波数、すなわち t に対するビーム幅の変化および位相遅れを図 3.4 に示す。この図で f_1 、 λ_1 および U_{1r1} は $t=1$ のときの周波数、波長、およびビーム幅である。また位相遅れは振幅パターンで、 -10dB となる方向での幾何光学波面からのずれである。 t は周波数に比例した変数で t が大きくなるにしたがって、ビーム幅、位相とも一定の値に近づく。広帯域にわたって一定のビーム幅、一定の波面が必要な場合、変数 t を大きくとればよく、

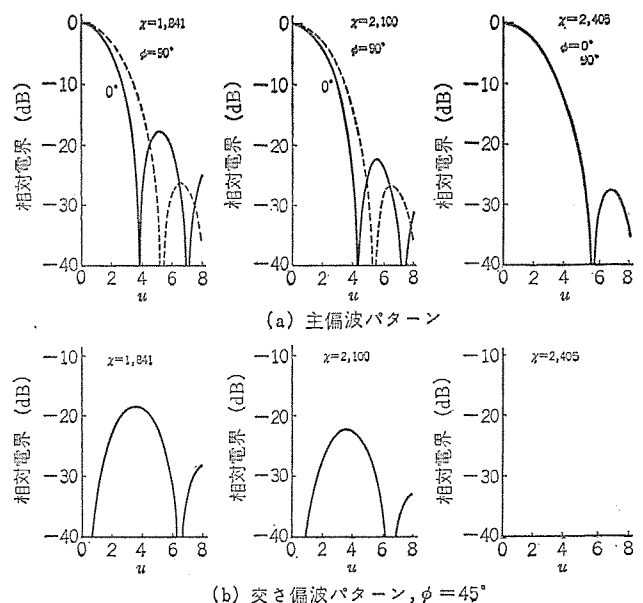


図 3.1 コルゲート円錐ホーンの放射パターン
Radiation patterns of corrugated conical horns.

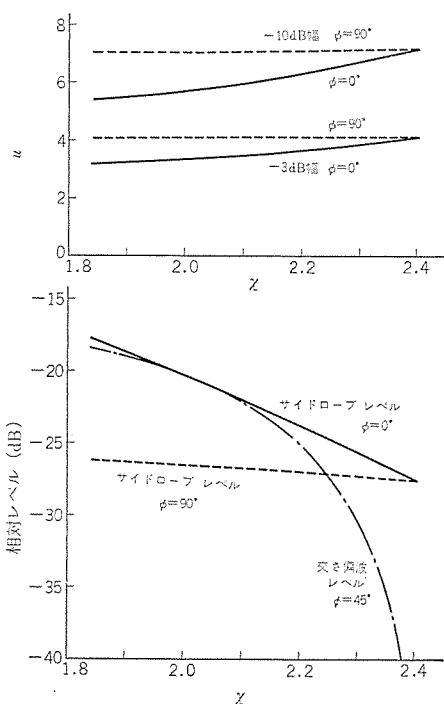


図 3.2 χ に対する放射特性
Radiation characteristics vs. χ .

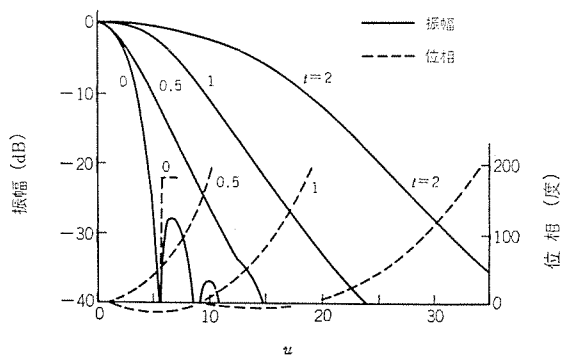


図 3.3 コルゲート円錐ホーンの放射パターン
Radiation patterns of corrugated conical horns.

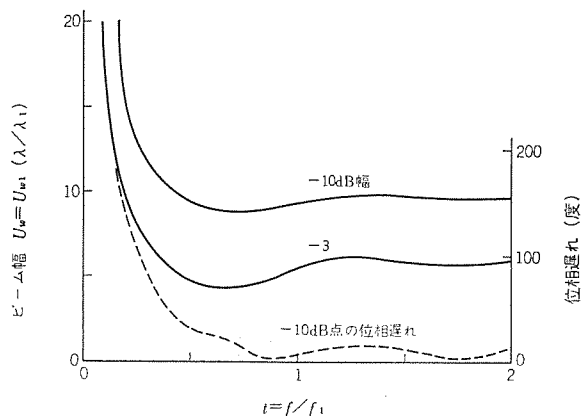


図 3.4 t に対するビーム幅および位相遅れ
Beamwidths and phase lags vs. t .

図 3.4 の結果から変数 t は最低周波数で 0.4 以上に選べばよいことがわかる。

3.2 実験例

衛星通信地球局用カセレンアンテナの一次放射器として、設計した図 3.5 に示すコルゲート円錐ホーンの模型実験を行なった。ここでホーンの寸法は 4GHz で t が 0.4、副反射鏡周辺照射レベルが -20

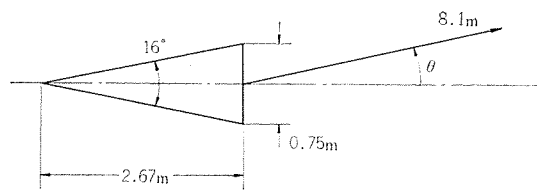


図 3.5 設計したホーンの寸法
Dimensions of the designed horn.

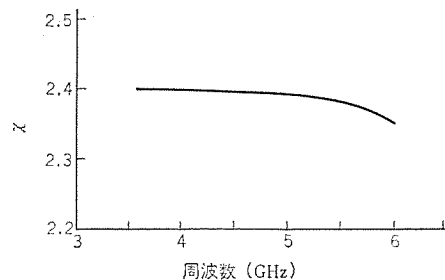


図 3.6 設計したホーンの χ の周波数特性
Frequency characteristics of χ of the designed horn.

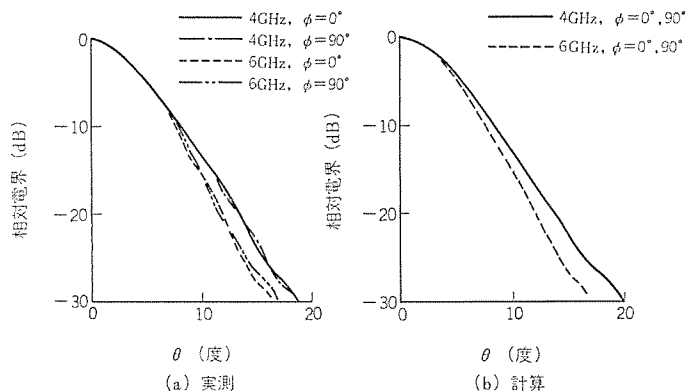


図 3.7 試作ホーンの放射パターン
Radiation patterns of the corrugated conical horn.

dB となるよう設計してある。このとき 6GHz での t は 0.6 となる。計算した χ は図 3.6 に示すとおりで、2.405 でほとんど一定の値を保っている。図 3.7 には実測の放射パターンを計算のものとともに示してある。これらの結果よりわかるように 4 および 6GHz 帯にわたって軸対称で一定のビーム幅をもち、低サイドローブの放射特性が得られている。

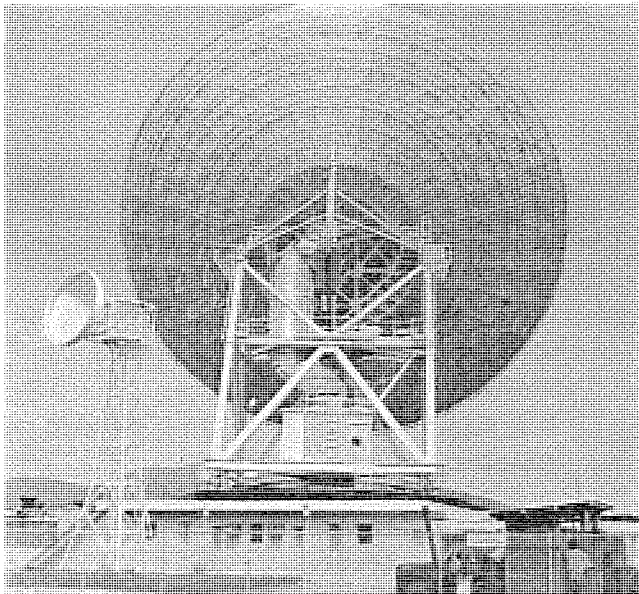
4. 応用例

4.1 衛星通信地球局アンテナ

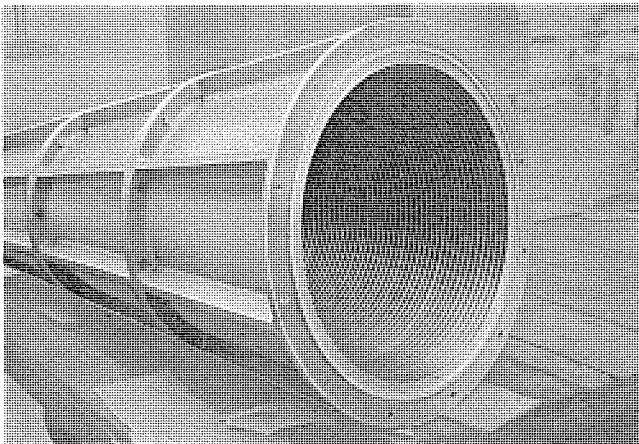
図 4.1 は、一次放射系に集束伝送の技術を応用した集束ビーム給電カセレンアンテナで、衛星通信地球局用として建設された開口径 32m のアンテナである⁽¹¹⁾。この一次放射系のホーンに、集束伝送に適した軸対称でガウス形に近いビームをもつコルゲート円錐ホーンが用いられている。このホーンの使用により、4, 6GHz 帯の広帯域にわたって高性能の集束ビーム給電カセレンアンテナが得られている。図 4.2 にはこの一次放射系の副反射鏡上での放射パターンを、図 4.3 にはコルゲート円錐ホーンのインピーダンス特性を示す。このアンテナの利得および開口能率は 4GHz で 61.5dB および 80%，6GHz で 64.5dB および 72% であり、雑音温度は 4GHz、仰角 10° で 31°K である。

4.2 地上中継回線アンテナ

コルゲート円錐ホーンは低サイドローブであり、また交差偏波特性が



(a) 背面よりみた アンテナ 外観



(b) コルゲートホーン

図 4.1 衛星通信地球局用集束ビーム 給電 カセグレンアンテナ
A focused-beam feed Cassegrain antenna for satellite communication earth station.

良好なので、直交二偏波の共用を目的とした地上中継回線用のカセグレンアンテナの一次放射器として有用である。図 4.4 はそのカセグレンアンテナの一例であり、正面方向で -40 dB 以上の交差偏波識別度をもつものが得られている。このアンテナの開口径は 1.8 m である。図 4.5 には広角の包絡線パターンの例を通常ホーンの場合とともに示してある。コルゲート円すいホーンで給電したものは、ホーンのサイドローブが低いので良好な広角放射特性を示している。

5. む す び

コルゲート円すいホーンアンテナにおいて、コルゲート内壁から決まる変数 χ およびホーンの形状寸法と観測距離から決まる変数 ϵ を導入して、その放射特性の周波数変化について調べた。広帯域にわたって軸対称なビームをもち、低サイドローブ特性をもたせるには χ を 2.405 の近傍で、周波数に対し平たい特性をもつようにコルゲート内壁寸法を設計する必要がある。また、広い周波数範囲にわたって一定のビーム幅を得るには、変数 ϵ の値を大きく選べばよく、最低周波数で 0.4 以上にする必要がある。以上の結果を考慮して、衛星通信地球局用に建設した集束ビーム給電カセグレンアンテナおよび地上中継回線用

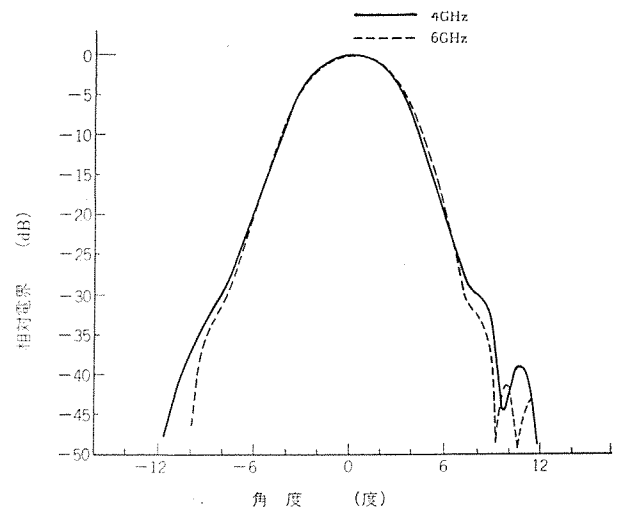
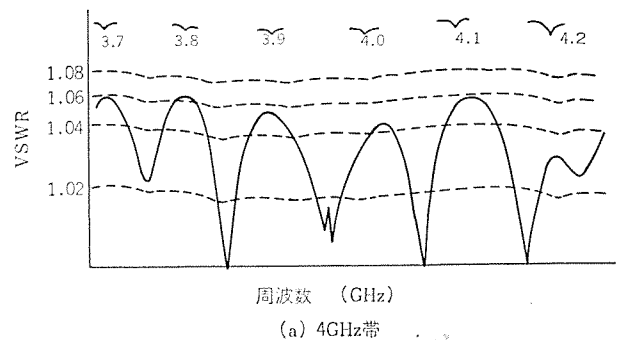
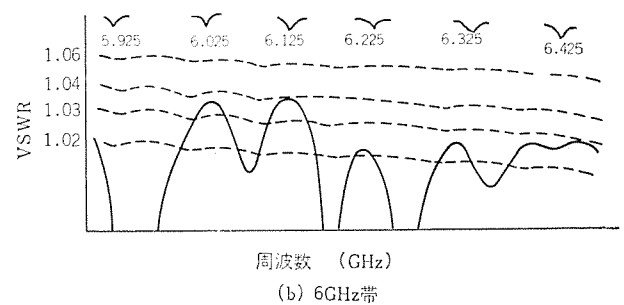


図 4.2 集束ビーム形一次放射系の放射特性(実測値)
Radiation pattern of focused-beam feed (measured data).



(a) 4GHz帯



(b) 6GHz帯

図 4.3 コルゲートホーンのインピーダンス
Impedance of the corrugated horn.



図 4.4 20 GHz 地上中継回線用カセグレンアンテナ
A Cassegrain antenna in the 20 GHz band for terrestrial relay links.

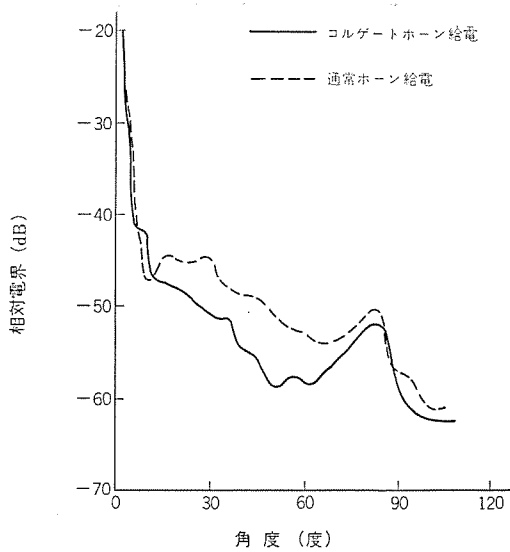


図 4.5 20 GHz 地上中継回線用カセグレンアンテナの包絡線パターン
Envelopes of radiation fields of Cassegrain antenna
for terrestrial relay links.

カセグレンアンテナにコルゲート円すいホーンを応用し、良好な特性を得ることができた。
(昭48-9-3 受付)

参 考 文 献

- (1) P. D. Potter : the microwave jour., 6, 6, 71 (1963).
- (2) 佐藤 : 電子通信学会論文誌, 54-B, 475 (昭46).
- (3) A. F. Kay : TRG Science Report 5, AFCRL Project 4600, Contract no. AF 19(604)-8057.
- (4) R. E. Lawrie, L. Peters, Jr. : IEEE Trans., AP-14, 605 (1966).
- (5) G. H. Bryant : Proc. IEE, 116, 203(1969).
- (6) 武市, 橋本, 武田 : 電子通信学会 マイクロ波研究会資料, MW 70-77(1971-02).
- (7) P. J. B. Clarricoats, P. K. Saha : Proc. IEE, 118, 1167 (1971).
- (8) P. J. B. Clarricoats, P. K. Saha : Proc. IEE, 118, 1177 (1971).
- (9) 水沢, 武田, 別段 : 電子通信学会論文誌, 56-B, 14 (昭48).
- (10) Y. Takeichi, T. Hashimoto, F. Takeda : IEEE Trans., MTT-19, 947(1971).
- (11) 別段, 青木, 浦崎, 水沢 : 電子通信学会 アンテナ伝播研究会資料, AP 73-29(1973-06).

電界効果型ネマティック液晶を用いたカラーディスプレイ技術

内田 裕子*・上田 文夫*・新居 宏壬*

A Color Display Using A Field Effect Type Nematic Liquid Crystal

Central Research Laboratory Yûko Uchida・Fumio Ueda・Hirotsugu Arai

Display devices now in practical use are made out of discharge tubes or Braun tubes, which, however, have a drawback of poor adaptability to recent electric circuits consisting of integrated circuits. Then, development has been positively tried with a variety of new solid state display devices, and further color effect is called for in their operation. By using a field effect type nematic liquid crystal for a new processing of the electrode surfaces, there has been worked out color display technique of excellent uniformity that was hard to realize in the past.

Although the liquid crystal display has a few problems left unsolved such as slow response and highly accurate workmanship required for the formation of the liquid crystal cell, its feature of being able to effect color display at low voltages to the extent of 6 V promises application to a new sphere, in particular to a large picture area of projection type.

1. ま え が き

現在実用化されている表示装置としては、数字や文字の表示には放電管やけい（蛍）光表示管が、また画像の表示には CRT（ブラウン管）が主に使用されている。しかしながら電子回路の集積化とともに、上記のような表示装置の欠点、すなわち占積率の大きなこと、駆動電圧が高いこと、消費電力が大きいこと、表示パターンのひずみなどの改良が望まれるようになってきた。そのため発光ダイオード、プラズマディスプレイ、EL、液晶など数多くの新しい表示装置の検討が行なわれつつある。このような種々の材料の中で液晶は受動的な表示用材料ではあるが、低電圧で動作するという特色を生かしてその実用化が進められつつある。

一般に液晶は分子配列の様子によって、スメティック液晶、ネマティック液晶、コレステリック液晶にわけられるが、表示用として利用されているものは大部分後者の2種のものである。このうちネマティック液晶によるディスプレイは液晶による光の散乱を利用するもので、液晶中のイオン流れによる液晶分子配列のみだれに基づく動的散乱モード(DSM)によるもの⁽¹⁾であり、すでに時計や電子卓上計算機等の数字や文字の表示に応用されており、

- (i) 周囲の明るさに関係なく一定のコントラストで表示できる。
 - (ii) 動作電圧が10~20 Vと低く、さらに消費電力が100 μ W/cm²と非常に小さい。
 - (iii) 薄形の大形表示装置が実現可能である。
 - (iv) パターン設計にフレキシビリティが大きい。
- といったすぐれた特徴をもっている。

しかし一方、このような表示素子では、

- (i) 応答速度があまり速くない（数ms~数十ms）
- (ii) コントラストが50:1程度で十分ではない。
- (iii) 寿命が10,000時間程度と幾分短い。
- (iv) カラーでない。

等の欠点があり、さらに今後の改良が望まれる。

液晶において色表示を行なう方法としては、すでにネマティック液晶に二色性色素を混ぜて行なうゲストホスト効果を利用するもの⁽²⁾、

コレステリック液晶を用いる等の方法があるが、しかし前者では表示の色が固定されること、後者では温度変化、電圧印加によって行なうが、寿命が短い、高電圧が必要である等の問題がある。

これらに比し、最近電界効果型ネマティック液晶を利用するもの⁽³⁾⁽⁴⁾が、注目されている。これは液晶分子の配列を電界で変化させて、その複屈折性を利用するもので、低電圧での光の強度変調のみならず、色相変調も可能で、カラー表示装置や光変調装置が実現できる。ここでは、我々のグループで得られた電界効果型ネマティック液晶を利用したカラー表示の原理、特性、およびその応用について述べる。

2. ネマティック液晶によるカラー表示の原理

液晶は一般に一軸結晶と同様の複屈折性を示すことはよく知られている。このような複屈折性物質に直線偏光を光学軸以外の方向から入射させるとだ（楕）円偏光となり、この複屈折性物質を透過してきた光を検光子を通してとり出せば、ある特定の波長の光だけが選択的に得られることになる。

一般にネマティック液晶は細長い分子が長軸を一方方向にそろえて配列しており、その光学軸は分子の方向と一致している。ここに述べるネマティック液晶のカラー表示においては、この分子配列を電界によって一様に傾けることにより、実質的に入射光に対する複屈折性を変化させ、交差偏光板を用いることによって、前述のような色変化を生じさせるものである。

しかし実際にはネマティック液晶を狭いすき間をもつサンドイッチ形セル内にそう（挿）入した時、セルの壁面の影響を強くうけ、必ずしも広い領域に渡って一定方向に分子軸をそろえて配向するとは限らないし、またそのため、外力によって配向方向を一様に変えることは容易ではない。そのため、一様な色表示が困難となる。

従ってこの電気光学効果を得るには、一定方向の配列を得るような処理や液晶の選択⁽⁵⁾⁽⁶⁾が必要となる。

液晶セルは図2.1に示すような構造で、液晶はSnO₂またはIn₂O₃の透明電極をつけた2枚のガラス基板の間にはさまれており、その層厚は数 μ mから数十 μ mのスペーサによって定められている。

液晶は壁面に対して分子長軸を垂直にして配列しやすいMBBA

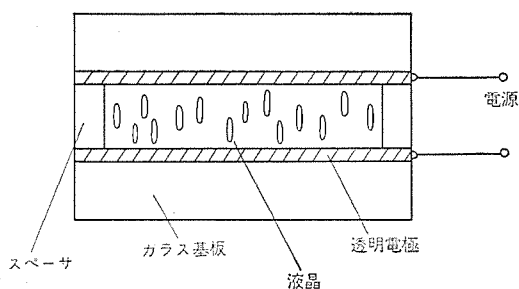


図 2.1 液晶セルの構造 (断面)
Liquid crystal cell (section).

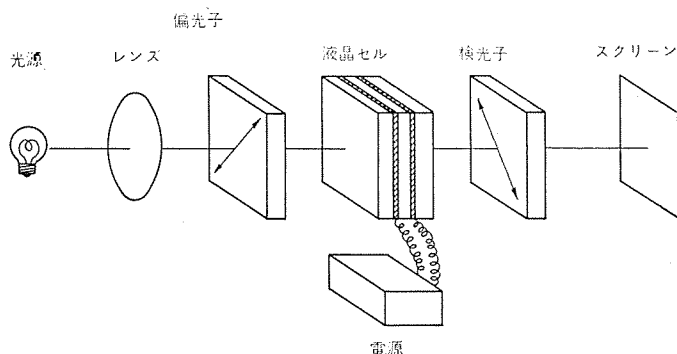


図 2.2 カラー表示装置の構成
Construction diagram of color display.

(N-(P-methoxy benzylidene)-P-n-butylaniline) に EBBA (N-(P-ethoxy benzylidene)-P-n-butylaniline) を混合したものを用い⁽⁷⁾、表示に用いるセルにはさらに、透明電極表面に SiO₂ 薄膜をつけることによって、電圧印加状態で分子配列の乱れを防ぐと共に分子の傾いてゆく方向を制御している。

原理的な装置の構成は図 2.2 に示すようなものである。光源からでた光はレンズ系で平行光線になり、偏光子によって直線偏光となって液晶セルを通過して検光子に至る。液晶分子は上述のように分子長軸を壁面に対して直角になるようにして配列しており、この分子長軸方向に光軸があるので、この方向から入射した直線偏光は複屈折を受けず、そのまま液晶セルを透過する。

検光子の偏光方向は偏光子とは直角になるように配置されているため、液晶セルを通過してきた光は検光子を通過できず、スクリーンには光は到達しない。

MBBA および EBBA は動的散乱を利用した表示に用いられる液晶で、負の誘電異方性をもち、電気双極子モーメントが分子長軸に対してほぼ直角方向を向いている。前述のように一様な分子配列をしている液晶に電圧が印加されると、(この場合、電界は分子長軸方向にかかる) 電気双極子が電界方向に向うとするため、電界強度に応じてある一定の角度、分子長軸を電極面と直角方向から傾けることになる。このため電極面から入射した直線偏光は複屈折を受け、液晶層通過中にだ円偏光となり、その印加電圧の変化によってだ円偏光の様子が変化することになり、検光子を通過する光が生じ、さらに電圧によってその強度が変化することになる。

いま入射する直線偏光の偏光方向が液晶の光軸と ϕ の角度で入射した場合、検光子から透過してくる光の強度 I は、

$$I = I_0 \sin^2 2\phi \sin^2 \frac{\pi \Gamma}{\lambda} \dots \dots \dots (2.1)$$

で表わされる。ここで、 I_0 は入射光強度、 λ はその波長、 Γ はリタレーションと呼ばれるもので、液晶中を通過する二つの光線の光学的な距離の差を表わしている。

Γ は液晶分子の長軸の光の進行方向に対する角度によって変化する、その分子長軸の方向は電圧によって変化するの、結局 Γ が電圧によって変化していることになる。いま $\phi = 45^\circ$ とすると、式 (2.1) から明らかのように $\Gamma = N\lambda$ (N は正の整数) を満した時には $I = 0$ となり、検光子からの光は出てこないことになる。一方、 $\Gamma = (N - 1/2)\lambda$ の時には、 I は最大となり、波長 λ の光が検光子から透過してくる。すなわち、電圧によって上記の条件を満たすように Γ を変化させれば特定の波長の光の透過光強度を制御できることになり、もし光源が白色光であれば、ある特定の電圧である特定の波長の光が透過してくることになり、電圧を変化させることで透過する光の波長が選択できるようになり、色相の変調ができることになる。

3. 特性と検討

図 2.2 に示したような装置で液晶に MBBA と EBBA の混合物を用い、測定されたいくつかの特性について以下に述べる。

図 3.1 は液晶層厚 6μ のセルによる透過光強度の電圧変化を 672 m μ 、550 m μ 、450 m μ の三種の波長の光に対して測定したものである。

図から明らかのように

- (i) 白色光源を用いれば、電圧によって色相が変化する。(単色光源の場合は強度変調になる)
 - (ii) 印加電圧が 5 ~ 6 V の範囲で色相および強度を変化できること。
 - (iii) 高いコントラストを示すこと。(光源が He-Ne レーザの場合約 10⁴:1)
 - (iv) 透過光開始電圧が比較的明確なしきい値をもつこと。
- 等の大きな特徴をもっている。

3.1 周波数依存性

このような特性は動的散乱が生じる電圧範囲外であれば、直流でも交流でも (パルスも含めて)、本質的に差はなく、正弦波による動作でも 100 kHz 程度まで十分応答し、動的散乱モードのように数百 Hz 以上で急速に駆動電圧が高くなるといった問題は生じない。

図 3.2 は正弦波周波数を 100 Hz、1 kHz、10 kHz、50 kHz と変化させた時の印加電圧と透過光強度の関係を示したものである。

周波数の増加とともに、幾分曲線のピーク位置は高電圧側にシフトしているが、その程度は非常にわずかである。液晶層厚は 9μ 、光源には He-Ne レーザを用いて測定したものである。100 Hz では、7 V 強で曲線は終っているが、これはこの付近で動的散乱が生じているためである。なお、このような分子配列は動的散乱によって乱されるが、電圧を下げれば再びもとの配列にもどり、動的散乱を生

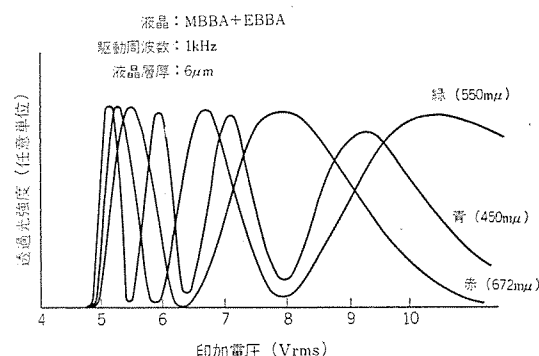


図 3.1 透過光強度の電圧変化
Transmitted optical intensity vs. AC voltage.

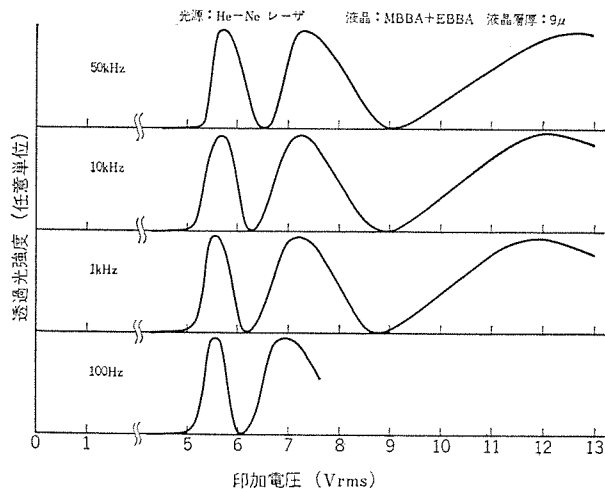


図 3.2 透過光強度の駆動周波数変化
Transmitted optical intensity vs. drive frequency

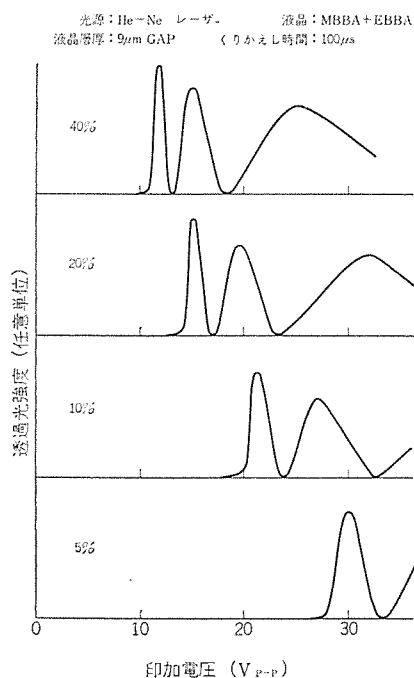


図 3.3 透過光強度のデューティ変化
Transmitted optical intensity vs. pulse duty.

じせしめたために色相変調ができなくなるといった問題はない。

なお、液晶セルは容量性であるため、駆動回路からみれば、できるだけ低周波で駆動したほうが供給電力が少なくてすむ。そのためには動的散乱が生じないように液晶の不純物をできる限り除去することが望ましい⁽⁸⁾。

3.2 印加電圧波形による影響

前述のように、このような特性は直流でも交流でも（パルスも含めて）生じる。図 3.3 に DC パルスで種々のデューティにおける電圧と透過光強度の関係を測定した結果を示す。液晶層厚は 9μ で、光源には He-Ne レーザを用い、くり返し時間は $100\mu s$ 一定にした。また、図 3.4 はこの測定結果を透過光が極大になる電圧（以下ピーク電圧とよび、低電圧側から順に第一ピーク、第二ピーク……と名づける）のデューティによる変化として表にしたものである。

各々のピーク電圧 V_{P-P} とデューティにおいて、 $\log V_{P-P}$ と $\log D$ の関係はほぼ $-1/2$ の傾きをもった直線で示される。DC パルスにおいては、

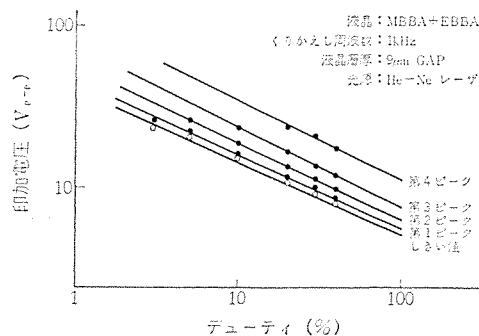


図 3.4 透過光ピーク電圧 (V_{P-P}) のデューティ変化
Peak voltage vs. pulse duty.

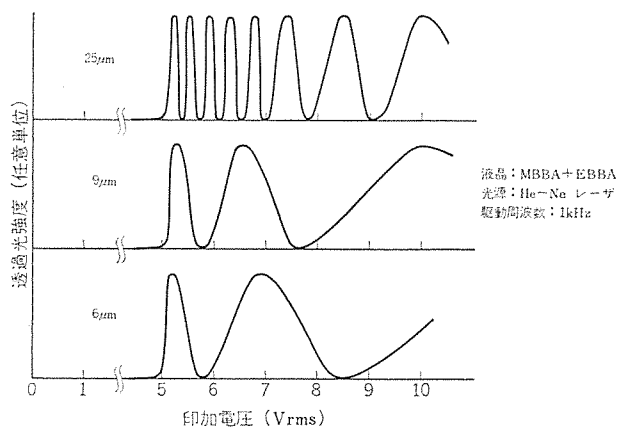


図 3.5 透過光強度の液晶層厚による変化
Transmitted optical intensity vs. cell gap.

$$V_{rms} = \frac{1}{10} V_{P-P} \sqrt{D} \quad (3.1)$$

で示されることより、透過光強度がほぼ実効値により決定されることがわかる。各ピークの実効電圧値 V_{rms} は正弦波におけるピークの電圧値（実効値）ともほぼ一致しており、透過光強度特性の波形による影響はほとんど受けないことがわかる。

これらのことはマトリクスアドレス方式のディスプレイにおいて、パルス変調を行なうのに非常に有利となる。ただし DC 印加の場合には、液晶の分解や電極反応がおこり寿命が短くなるので、実際の表示装置には AC を用いるほうが好ましい。

3.3 透過光強度—電圧特性の層厚依存性

透過光強度の式 (2.1) には層厚 d を含むため、透過光の層厚依存性が考えられる。図 3.5 にこれを示す。層厚 6μ 、 9μ 、 25μ に対し、しきい電圧はほとんど変化はないが、それ以上の電圧での透過光の様子は層厚に強く依存している。このことは、電圧変化による色相変調において、色むらの原因となり、工作上、層厚に対して、きびしい精度が要求される。

3.4 応答時間

電界効果型液晶での光学特性は、DSM を利用したものと同様、応答時間の遅いことが気づかれる。図 3.6 は、 100 Hz 、 10 kHz 、 100 kHz の正弦波で各ピーク電圧のバースト波形を加えた時の立上り、および立下りの応答時間を示したものである。周波数に対する依存性は小さく、立上りは印加電圧が高くなると早くなり、立下りは印加電圧が高くなる程、分子の傾き角が大きくなるため、遅くなるものと考えられる。応答時間は各ピークによって異なるが、 $0.1\sim 2\text{ s}$ 程度である。前述のように電圧変化に対する立上りと立下りの応答時間は逆の傾向があるが、第三ピーク付近の電圧で駆動すれば比較

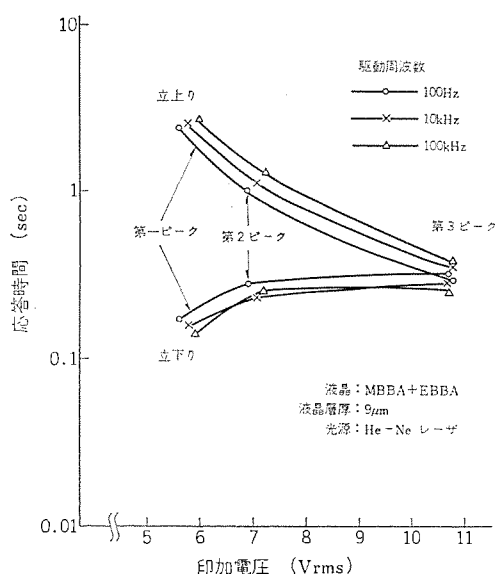


図 3.6 応答時間の印加電圧変化
Response time vs. applied AC voltage.

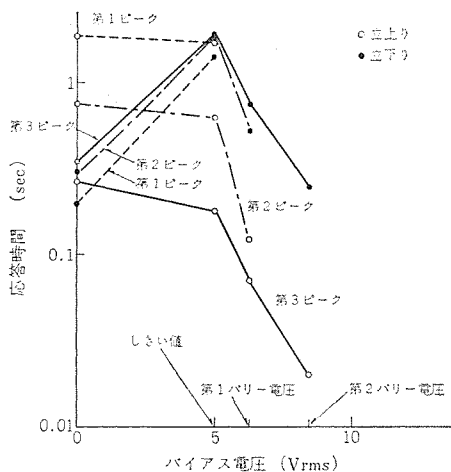


図 3.7 バias 電圧印加における応答時間の変化
Response time vs. bias voltage.

的速い応答が得られることがわかる。

さらに、ここでは、ある特定波長の光を dark の状態から電圧を加えて取出しているが、この透過光強度の電圧依存性が明確なしきい値をもつこと、また、透過光がほぼ 0 となる谷をもつことを利用して、あらかじめバイアスとしてしきい値以下の電圧、あるいは、透過光が極小になる電圧（以下 バリー電圧と呼び、低電圧側から第一バリー、第二バリー……と名づける）をかけておき、それに適当な電圧を重畳して、各ピークの電圧になるようにすれば、応答時間を短くすることができる。この場合の応答時間の変化を図 3.7 に示す。横軸にはバイアス電圧として印加されるしきい電圧およびバリー電圧が示されている。この方法によって立下り時間はあまり改良されないが、立ち上り時間をかなり速くすることができる。この結果、第二バリー電圧をあらかじめ印加しておき、ここから第三ピークまでの電圧を加えて、透過光を出せば、立ち上り約 20 ms、立下り 200 ms 程度まで応答時間をはやめることが可能である。

3.5 透過光スペクトル

以上の測定は He-Ne レーザを光源として用いたが、このような透過光特性は他の波長の光でも同様であり、ただ、図 3.2 に示されたように、しきい値以上の印加電圧に対して、各波長によって、透過光強度のピークの周期等の様子が異なるのみである。この結果、電

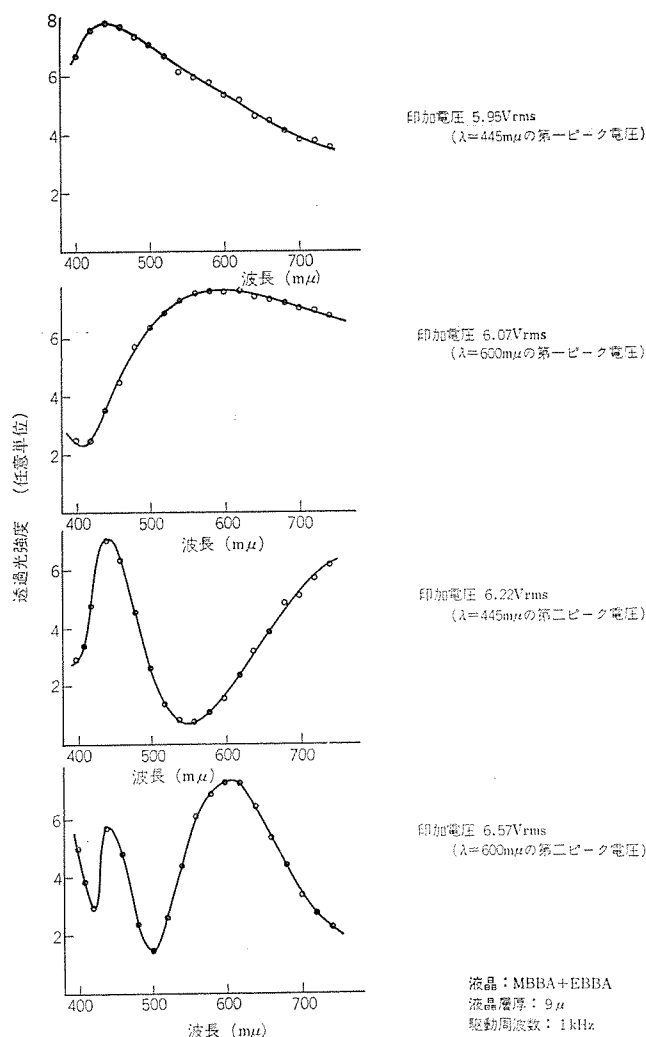


図 3.8 透過光スペクトルの電圧変化
Spectral response vs. applied AC voltage.

圧を変化させる事により、色相変調が可能になる。図 3.2 では各色の第一ピークは非常に接近しているので、肉眼での色相変化は、5 V 付近まで暗黒で、さらに電圧をあげることによって灰色—白色—オレンジ—赤—青—緑—赤の順で変わっていく。図 3.8 に印加電圧を 5.95, 6.07, 6.22, 6.57 Vrms と増加させていった時の透過光スペクトルを示す。各電圧は 445, 600 mμ の波長の透過光強度が第一、および第二ピークを示す電圧である。これによれば比較的低い電圧印加のものは非常にブロードなスペクトルを示し、実際には白色光に近いものになる。これに比し、比較的高い電圧印加のものになると、しだいにスペクトルはシャープな形を示し、可視光の範囲で特定の波長域の光を出すことが可能になることがわかる。さらに印加電圧を高くとっていくと透過光スペクトルは可視光の範囲でもいくつかのシャープなピークを生じることになり、再び透過光が白色光に近づいていく。従って純度のよいカラーを出すためには、各波長における透過光特性の第 2 または第 3 ピークあたりの電圧範囲で動作させることが、望ましい。

3.6 温度依存性

実際に表示に用いる時、透過光強度および透過光色の温度に対する安定性が問題となる。ここで用いた MBBA と EBBA の混合液晶は公称 -10°C より 57°C の範囲でネマティック液晶相を示すものである。この透過光特性の温度による影響を図 3.9 に示す。この図は、光源に He-Ne レーザを用い、ピーク電圧およびしきい値の温度

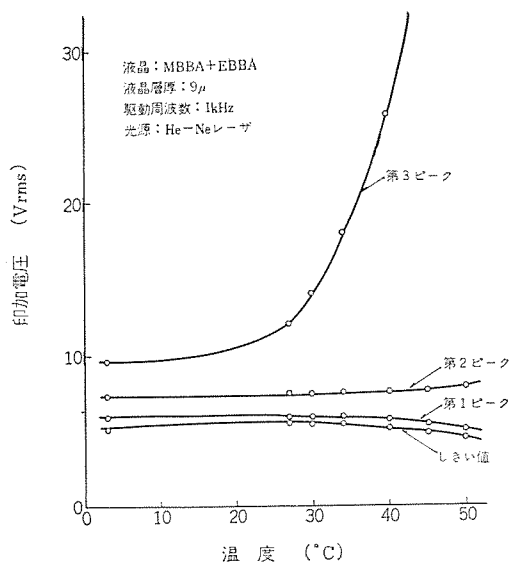


図 3.9 透過光ピーク電圧の温度変化
Peak voltage vs. temperature.

による変化を見たものである。しきい値、および第一ピーク電圧の温度特性と、第二ピーク、および第三ピーク電圧の温度特性には、逆の傾向があり、印加電圧が10V以上になるとその傾向がより顕著になり、原因は明らかでないが、第三ピーク電圧は高温で著しく増加する。このため、高温で、透過光強度の減少、または色相の変化を起こさせる。しかし、第二ピーク電圧ぐらいまでならば、この場合、0°~40°Cの温度範囲で、ピーク電圧のシフトは、数%以下におさえられ、安定な動作を示すと思われる。

以上述べたように電界効果型ネマティック液晶を用いた表示では、5~6Vの低電圧で光の強度変調、色相変調ができ、明確なしきい値をもち、高いコントラストを示す。さらに透過光特性は印加電圧の実効値に依存し、高い周波数でも応答するといった特徴を示す。しかし、応答性が悪い、寿命があまり長くない（特にDCで用いると著しく劣化する）。高温になるとピーク電圧等のシフトがおこり透過光強度、色相の変化をおこすといった欠点をもつ。

また透過光の色変化は層厚や電圧に、大きく依存するため、セルの製作においては液晶層厚のむらがなく、また電極において電圧の低下のないよう、できる限り低抵抗の電極を用いることが必要となる。解決すべき問題や工作上的の技術的困難な点は多々あるが、このような点が改良されれば、カラー表示素子として有望なものではないかと考えられる。

4. 応 用

上記のように従来の表示素子ではなかったようなユニークな特徴を有するため、装飾照明、キャラクタディスプレイ等へのさまざまな応用が考えられる。以下、2, 3の試作例について述べる。

4.1 固定パターンカラー表示

液晶セルの電極形状を表示すべきパターンにしたもので、従来のDSM方式の液晶セルと本質的な差はない。図2.1に示したような簡単なシステムでカラー表示装置が実現できるのが大きな特徴である。例としては、セグメント方式による数字や文字の表示などが考えられる。図4.1は固定パターン表示の一例でセルの大きさは20×25で約10倍に拡大投写して表示したものである。三菱マークの部分は赤、文字の部分は緑である。

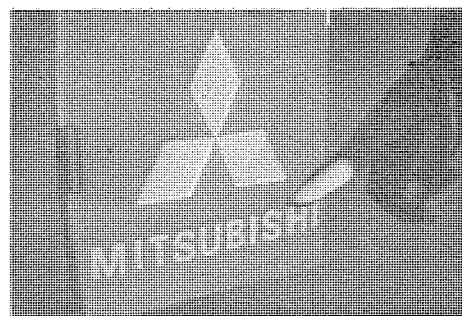


図4.1 固定カラーパターン表示の例
An example of static color pattern.

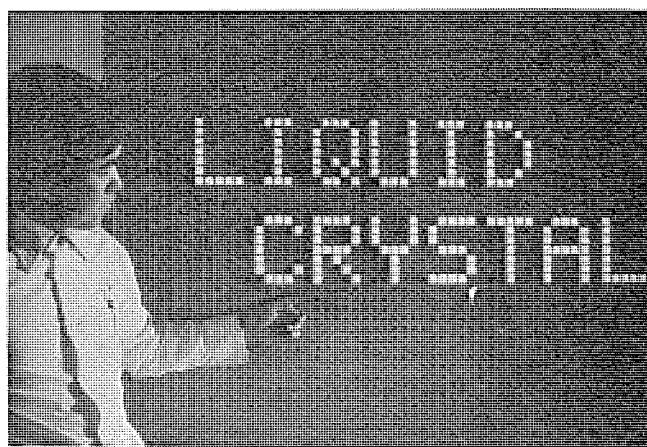


図 4.2 マトリックスアドレスによるキャラクタ表示の例
An example of matrix addressed character display

4.2 マトリックス アドレス表示

マトリックス表示によれば自由なグラフィックパターンや画像の表示が可能であるが、ここではキャラクタディスプレイ装置への例について述べる。この装置は80本のY(走査)電極、160本のX電極をもつ素子を用いたもので5×7要素でアルファニューメリック表示を線同時アドレスで8行×25文字(200文字)を同時に表示できるものである。セル寸法は32mm×64mmである。旧来方式によるマトリックスアドレスを用いた場合、用いる表示素子が液晶素子に限らず被表示パターンによっていわゆるクロストークの様子が変化する、パターンの縦方向成分だけが極端に明るくなったりする、表示コントラストが十分でないなど致命的な問題があった。

試作装置は全く新しく開発した実効的なクロストークが全マトリックス要素にわたって均一になるようなクロストーク均一化マトリックスアドレス方式を導入したものであり、さらにこの方式は表示パターンのコントラストが最高になるように、Y電極電圧パルスのPeak-Peak値とX電極電圧パルスのそれを特定の関係に設定したものである⁽⁹⁾。なお、このような方式を利用すれば、十分高いコントラストで250本×300本程度のマトリックス表示が可能という結果も得ており、これが実現されれば1,000文字程度のキャラクタディスプレイができることになる。図4.2に、上記最適化クロストーク均一化マトリックスアドレス方式による文字表示の例を示す。印加電圧はY電極電圧パルスのPeak-Peak値は約65V、X電極のそれは9Vである。

4.3 装飾照明

電圧で透過光の色相を自由に变化させられることから装飾用としてもショーウィンドウや壁面の照明など種々の応用が考えられよう。ここで示すのは10×10のマトリックス電極構造のセルを用いて、オーディオアンプの出力の大小に同調してその投写表示パターンの形状や色彩

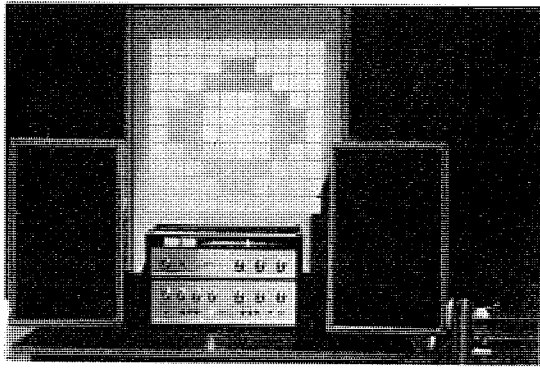


図 4.3 装飾ディスプレイの例
An example of decorative display.

が変化するものである。非常に簡単なシステム構成で視覚的に変化のある装飾ディスプレイが得られる。図 4.3 はその表示パターンを示す。

5. む す び

以上、垂直配向電界効果型ネマティック液晶によるカラー表示の原理、特性、その応用などについて述べたが、実用化のためには特性上まだ解決されねばならない問題があり、また技術的にも困難を伴う部分もあり、今後さらに検討が必要である。しかし、従来の材料では得られていないような低電圧での色相変調が可能であるという大きな特徴を持っており、その発展が大いに期待されるものである。

最後に、本実験に当り、液晶材料を御提供いただいた大日本塗料(株)開発部の関係各位に厚くお礼申し上げますと共に実験遂行に当り、協力いただいた当社 中央研究所、有機物性グループおよび生産技術研究所 自動機開発部の各位にお礼申し上げます。

(昭和 48-8-28 受付)

参 考 文 献

- (1) G. H. Heilmeyer, L. A. Zanoni, L. A. Berton : Proc. IEEE, 56, 1662 (1968)
- (2) G. H. Heilmeyer, L. A. Zanoni : Appl. Phys. Lett., 13, 91 (1968)
- (3) M. F. Schiek, K. Fahrenshon : 1972 SID Symposium
- (4) R. A. Soref, M. J. Rafuse : J. A. P., 43, 2029 (1972)
- (5) T. Uchida, H. Watanabe, M. Wada : J. J. A. P., 11, 1559 (1972)
- (6) 女川, 宮下 : 1972 (秋) 応物学会予稿集 315
- (7) H. Mailer, K. L. Likins, T. R. Taylor, J. L. Fergason : Appl. Phys. Lett., 18, 105 (1971)
- (8) M. S. Schiek, K. Fahrenshon : Appl. Phys. Lett., 19, 391 (1971)
- (9) 上田, 新居 : 電子通信学会 電子装置研究会資料, 資料番号 ED 72-64 (昭 48-2)

有限要素法による構造解析のための自動データ作成法

川面 恵司*・荒木 裕子*
中村 正人**・南 久美子**A Study on Two-Dimensional Automatic Mesh Generation
for Structural Analysis by A Finite Element MethodMitsubishi Electric Corp., Central Research Laboratory Keishi Kawamo・Hiroko Araki
Mitsubishi Research Institute Masahito Nakamura・Kumiko Minami

In the structural analysis by a finite method a good number of input data must be made. Herein are described a method of producing these data automatically with a digital computer and also a producing state of the data through this method. The feature of the method are given below.

1) By paying notice to practicability and trying to minimise the data to be used for the formation of the automatic data, the shapes of the continua as the object are limited to circular arcs and straight lines, 2) patterns of element division are made changeable at will in conformity to the shapes or stresses of the continua, and 3) not only the mesh generation but also the load condition and the boundary condition are devised to be formed automatically.

1. ま え が き

近年、大形・高速の電子計算機の発達に伴い構造解析の一方法として、有限要素法が急速に発達し、国内外において盛んに研究され、また実用に供されている。有限要素法は一種の近似数値解析法であるが、在来のそれと異なり次のような特徴を有している。

板、かく(殻)、三次元的な物体のような連続体をすべて多数の小さな構造的に簡単な要素に細分し、それらの各節点においてのみ互いに連結されている集合体に模擬する。力は各節点を通してのみ作用するとの仮定のもとで、各要素の変形様式をある簡単な形(変位関数)に定めて、各要素ごとに節点における力(節点力)とそれに対応する節点変位との関係式を求める。この関係式を連続体の形状にしたがって組立てることにより連続体全体にわたる関係式を定義し、これを解くことによって外荷重とそれに対応して生ずる各節点における変位を求め、さらに要素ごとの関係式と求められた各節点の変位から応力を求める。

この解析法により、従来実際上解析が困難であった複雑な形状の構造体の応力および変形を求めることが可能となったが、一方、このために複雑な連続体の形状、要素と節点の関係、境界条件、荷重条件などを電子計算機に認識させるために、多重のインプットデータを準備する必要が生じた。このデータの作成を人力で行なうとすれば長時間にわたって多大の労力を課すばかりでなく、しばしば人はデータの作成ミスを犯すので所要の計算結果を得るまでに多くの日数を要する場合が多い。このことから、極力少ないデータを基にして、有限要素法による構造解析を行なうのに十分なデータを電子計算機によって、自動的に作成するいわゆる「自動データ作成プログラム」を開発することが実用上きわめて重要である。

この種の自動データ作成法の研究ならびに実用化が盛んに行なわれるようになってきた。たとえば、二次元連続体に対する自動要素分割法について、J. L. Egenberg⁽¹⁾、C. O. Fredrick⁽²⁾、栖原⁽³⁾などの研究が報告されている。Egenbergの方法を含めほとんどの方法は、連続体をいくつかの部分に分割し、この部分ごとに要素分割

を行なう方法であるが、部分間で共有する辺の分割を等しくしなければならぬため、要素分割の仕方がかなり制限される。Fredrickらの方法は、人力により連続体の内部および境界上に節点を作成し、この節点を基に、自動的に要素分割を行なわせる方法であるが、この場合には、節点の作成を人力に頼るためかなりの労力を要する。栖原らの方法は連続体をいくつかの部分に分割し、その周辺上に人力で節点を与え、また、要素が局部的に細かくあるいは粗く分割できるように個々の部分ごとに平均分割長さを与え、これらのデータに基づき乱数を用いて各部分の内部に節点を作り、さらに要素を作るものである。この方法によれば任意の形状の連続体について、無理のない要素分割パターンを作成することができるが、実用性に問題があるように思われる。

そこで、筆者らは実用性に留意して輪郭形状が円弧と直線とからなる二次元連続体について、有限要素法により構造解析を行なうのに必要なデータを作成する方法を検討し、プログラム化を試みたので、ここに報告する。

2. 自動データ作成法

2.1 自動データ作成法の条件

自動データ作成プログラムが具備していなければならない条件をつぎに列挙する。

(1) 電子計算機による処理時間が短いこと。すなわち費用が安いこと。これは電子計算機を用いても、人力で直接インプットデータを作成するのに比べて、はるかに高価であれば実用的であると言えないからである。

(2) インプットデータが少量で、複雑でないこと。

(3) 要素分割ばかりでなく、境界条件および荷重条件も自動的に作成し、これらのデータを構造解析プログラムへ、ほとんど人が介入することなしに、容易に受け渡しできること。

(4) 要素分割の粗密が容易に与えられること。有限要素法では応力集中部では要素分布が密に、その他の部分では粗になるような要素パターンを作ることが重要であり、これが容易に行なわれること。

(5) 複雑な連続体に対して適用できること。

2.2 自動データ作成法の概要

前述の条件を十分に満足させるために、対象とする連続体の輪郭形状は円弧と直線とからなる連続体に限り、また、要素の自動分割ばかりでなく、境界条件および荷重条件の作成も自動的におこなえるようにした。対象連続体の外形を上記のように制限することにより、インプットデータを大幅に少量化することができる。しかも、実際の構造の多くは外形が円弧と直線とから構成されているので、この制限により、本方法の実用性はほとんど失なわれることはないであろう。

要素分割の粗密を容易に行なえる一方法として、要素の分布密度を定義する一つの単位としての要素の集まり（以後これを PART と呼ぶことにする）を考え、対象連続体をこの PART 単位で分割し、要素分割はこの PART ごとに行なう方法が考えられる。文献(1)、(3)の方法を含め多くの自動分割法では、この方法を採用しており、本方法でもこれを用いることにした。ただし、文献(3)の方法を除きいずれの方法も相隣りある PART が共有する辺に沿っての要素の密度分布を等しく（共有する辺の要素分割数が両 PART で等しい）しなければならないという制限がある。このため、要素分布の密度を局部的に変えることに不自由さがあつた。本方法ではこの共有する辺に沿っての要素分布を二つの PART で独立に設定できるように工夫し、この不自由さをとり除いた。

自動分割と同時に、境界条件および荷重条件を自動的に作成するという事は、文献(1)でもおこなっているが、インプットデータの与え方によっては、一つの節点に対して、二つ以上の境界条件が設定されてしまう場合がある。文献(1)はこの場合の処理が不十分であるが、本方法では同一節点に設定された境界条件の内容を分類し、一つの境界条件に設定しなおすとともに、インプットデータの矛盾をもチェックできるようにした。

3. 自動要素分割のアルゴリズム

連続体の境界上および内部に節点を作成し番号づけを行ない、さらに、この節点を基に三角形要素を作成し番号づけする一連の処理を自動的に行なう作業を自動要素分割と呼ぶ。この具体的なプロセスは次のとおりである。

(1) 連続体の全領域を幾つかの四辺形状の PART に分割し、各 PART を構成する主要な点の座標データ、ならびに各 PART の各辺に対して要素分割数を与える。

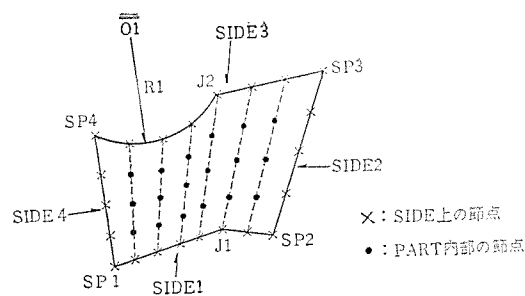
(2) (1)で与えたインプットデータに基づいて、電算機が自動的に各 PART の結合状態を調べ、連続体の形状を認識する。

(3) 各 PART ごとに、インプットデータが指定した分割数に従って、電算機が自動的に PART に分割し、その境界上および内部に節点を作り、節点番号を付す。

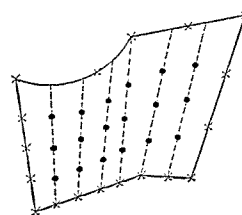
(4) さらに、この節点に基づいて、自動的に各 PART ごとに小さな四辺形状の部分を作り、さらに、これから三角形要素を作成し番号を付す。

3.1 PART の定義

図 3.1 (a) に示すように、各 PART ごとに四つの辺（以後これを SIDE と呼ぶ）を定義し、各 SIDE の始点 ($S_1, \dots, S_4$) の座標、形状変化点 ($J_1, \dots$) の座標、SIDE のすべてあるいはその一部が円弧の場合には曲率半径 ($R_1, \dots$)、曲率中心 ($O_1, \dots$) の座標、ならびに各 SIDE の要素分割数をインプットデータで与える。



(a) 相手の PART の SIDE 分割数が等しいか多い場合



(b) 相手の PART の SIDE 分割数が少ない場合

図 3.1 節点の作成
Node generation.

3.2 PART 結合状態の認識

電算機はインプットデータに基づき、各 PART の各 SIDE について、これらの両端の 2 点（これは PART の相隣るふたつの始点である）の座標が他の PART の SIDE の両端の始点の座標と一致しているかどうか調べ、また同時に、その SIDE に形状変化点があれば、その一致性についても調べて、各 PART の結合状態を認識する。

3.3 節点の作成

節点の作成は、各 PART ごとに、まず、1) SIDE 上の節点の作成、ついで、2) この節点に基づいて PART 内部の節点を作成する過程よりなる。

3.3.1 SIDE 上の節点

各 SIDE は図 3.1 に示すように、インプットデータで指定した分割数に等分し、この等分した点をもって境界上の節点とする。

本方法ではある SIDE が他の PART の SIDE と接しているとき、両者の SIDE 分割数が等しくない場合がおこるので、次のように処理することにする。すなわち、相手の SIDE の分割数がこの SIDE の分割数に等しいか、あるいは多い場合には指定どおりの分割数によって、相手の SIDE の分割数が少ない場合には相手の SIDE の分割数によって、この SIDE 上に節点を作ることにする。図 3.1 にはこの境界上の節点を × 印で示してある。

3.3.2 PART 内部の節点

PART 内部の節点は SIDE 1 上の節点とこれに相対する SIDE 3 上の節点、(この節点は相手の SIDE の分割数に関係なくインプットデータで指示した分割数により作成した節点)、を直線で結合して得られる線分を SIDE 2、4 の指定した分割数で等分割することにより得られる。この節点を図 3.1 に • 印で示してある。

3.3.3 節点の番号づけ

次に述べる前処理により節点の番号づけ、および後述の要素の作成および番号づけを効率よく行なえるようにする。

図 3.2 に示すように、SIDE 2、SIDE 4 および内部の節点を作成するために利用した線分を LINE と呼び、この LINE を SIDE 4 側から SIDE 2 側に向け序列をつけ、PART 内のすべての節点をこの LINE 内に含める。図 3.1 (a) の場合はすべての節点を容易に

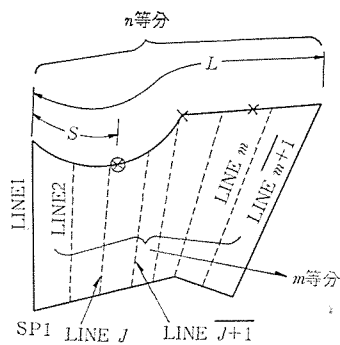


図 3.2 節点の分類
Node grouping.

LINE 上に含めることができるが、図 3.1 (b) の場合は次の操作を行なう。今、図 3.2 に示すように、この PART の SIDE 1, 3 の指定分割数が m 個で、SIDE 1 あるいは、SIDE 3 が実際には n 個で分割されており、SIDE 1 あるいは SIDE 3 の長さを L 、SIDE 1 の始点 SP 1 あるいは SIDE 4 の始点 SP 4 から SIDE 1 あるいは SIDE 3 上の任意の節点までの SIDE に沿って測った長さを S とする。このとき S の値が次式

$$\frac{L}{m} \times J \leq S < \frac{L}{m} \times (J+1) \quad (3.1)$$

を満足すれば、この節点は LINE J にあるとする。

節点の番号づけは LINE 1 から順次、SIDE 1 側から、SIDE 3 側に向けて行なう。上述の番号づけと並行して、各 PART について、各 LINE ごとに LINE 上の節点番号を格納したテーブルを作成する。

3.3.4 要素の作成

要素の作成は、近接した四つの節点を選び四辺形を作る過程と、この四辺形をふたつに分離してふたつの三角形要素を作る過程とからなる。

(1) 過程 1

注目している節点 C_i を含む LINE とその次の LINE を選び、先のテーブルを用いてこの相隣るふたつの LINE 内の節点から C_i に最も近い 3 節点を選んで四辺形を作る。この C_i もこのテーブルを用いて順次選出することができる。 C_i に対してふたつの節点しか選べないことがあるが、この場合には直接三角形を作る。

(2) 過程 2

四辺形を三角形に分割する方法として、偏平状の三角形* の生成 (* 有限要素法では演算精度の観点から、極端な鋭角をもつような偏平状の三角形要素を作らないようにする必要がある。) を避けるために、四辺形のふたつの対角線の長さを比較し、短い対角線について三角形を作成するいわゆる「対角線法」が一般に用いられているが、この方法はかならずしも万能でなく、本方法では次に述べる方法 (以後これを「面積法」と呼ぶ) と「対角線法」と併用している。

「面積法」は分割されるふたつの三角形の面積比に関する後述の関係式を用いて、面積がほぼ等しくなるように分割する方法である。三角形の面積は図 3.3 に示すように四つの頂点を反時計方向に採番した四辺形 $\square 1234$ から任意に番号順に選んだ 3 頂点からなる三角形 $\triangle ijk$ の面積として次式により定義する。

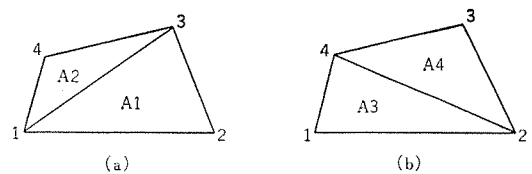


図 3.3 四辺形の三角形要素分割例
Division of quadrilateral into triangular element.

$$A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} \quad (3.2)$$

$i < j < k$

今、図 3.3 に示すように $\square 1234$ を $\triangle 123$ と $\triangle 134$ および $\triangle 124$ と $\triangle 234$ とに分割したとする。 A_1, A_2, A_3, A_4 をこの四つの三角形の面積とすると、 $A_1 \geq A_2, A_3 \geq A_4$ であれば面積比は次式

$$1 \geq \frac{A_2}{A_1} > k \geq \frac{A_4}{A_3} > 0 \quad (3.3)$$

$$1 \geq \frac{A_4}{A_3} > k \geq \frac{A_2}{A_1} > 0 \quad (3.4)$$

$$1 \geq \frac{A_2}{A_1} > k \text{ および } 1 \geq \frac{A_4}{A_3} > k \quad (3.5)$$

のいずれかを満足する。 A_1 と A_2 および A_3 と A_4 の大小関係が逆の場合には上式中の面積比はこれの逆数を用いる。ここで、 k は 1 より小さな正の実数でこの値は適当に選定する。

「面積法」は式 (3.3) を満足する場合に図 3.3 (a) の分割を、式 (3.4) を満足する場合に図 3.3 (b) の分割を行なうように判定するが、式 (3.5) を満足する場合には「面積法」で判定しないで、「対角線法」を用いて判定する。

本方法による分割例を「対角線法」と対比して表 3.1 に示す。表より本方法が「対角線法」に比べ、すぐれていることがわかる。とくに例題 3 のようにおう (凹) 状の四辺形に対して「対角線法」は誤った要素分割を行なうことがある。

表 3.1 三角形要素分割例
Example of triangular element division.

例	四辺形	対角線法	本方法(面積法+対角線法)	分割結果
1				○対角線法: $\triangle 124$ と $\triangle 234$ に分割 ○本方法: 式(3.4)により $\triangle 124$ と $\triangle 234$ に分割
2				○対角線法: $\triangle 123$ と $\triangle 134$ に分割 ○本方法: 式(3.3)により $\triangle 124$ と $\triangle 234$ に分割
3				○対角線法: $\triangle 123$ と $\triangle 143$ に分割 ○本方法: 面積法では $\triangle 143$ が負になるので、式(3.3)が満足されない式(3.4)により $\triangle 124$ と $\triangle 234$ に分割
4				○対角線法: $\triangle 123$ と $\triangle 234$ に分割 ○本方法: 式(3.3)が満足されるので対角線法により $\triangle 124$ と $\triangle 234$ に分割

4. 境界条件作成のアルゴリズム

4.1 境界条件の種類

境界条件あるいは強制変位 (Permanent set ; 変位量を指定する

場合)を構造体の境界上、あるいは内部の1点に対して与える場合(以後これを点境界条件と呼ぶ)と、連続的に与える場合(これを連続境界条件と呼ぶ)について、境界条件を規定できるようにした。

点境界条件ではインプットデータの座標値に最も近い節点を選び出し、この節点に対して、また連続境界条件ではインプットデータで指定したふたつの点の座標値に最も近い位置にあるふたつの節点を選び出し、この2節点を直線で結んだ線分上の節点に対して、境界条件あるいは強制変位量を与える。強制変位量が与えられる場合には、両端の変位量を与えることにより、上記線分上の変位量は変位分布が線形に変化するとして内そう(挿)法により求める。

4.2 支持条件の種類

点境界条件あるいは連続境界条件で選出された節点はインプットデータの指示に従いローラ支持、ピン支持のいずれかの境界条件が設定される。ここでは図4.1に示すようにローラ支持は x 方向の移動に対して自由であるが、 y 方向の移動を拘束し、ピン支持は x 、 y 方向の移動を拘束するという通常の意味以外にローラ支持は y 方向の強制変位量 δ_y 、ピン支持は x 、 y 方向の強制変位量 δ_x 、 δ_y を規定することもできるとする。ここで $O-XY$ は基準座標系、 $P-x'y'$ は境界条件のための局所座標系である。

4.3 境界条件が重なる場合の処理

上記の手法により境界条件を設定する際、同一節点に対して2個以上の境界条件が与えられる場合があるが、この場合には2個ずつ処理して、1個の境界条件に変換し、これを繰り返して最終的には1個の境界条件に設定しなおす。

2個の境界条件の組合せとして、(i)両者ともローラ支持、(ii)一方がローラ支持、他方がピン支持、(iii)両者ともピン支持の場合、が考えられる。今、2個の境界条件を第 i 番目、第 j 番目とし、これらの強制変位量を δx_i 、 δy_i 、および δx_j 、 δy_j 、局所座標系の傾き角を、それぞれ θ_i 、 θ_j とする。具体的には、第 j 番目の境界条件を第 i 番目の局所座標系に変換し、これと第 i 番目の境界条件とを組合せて新しい境界条件を生成する方式をとっている。上記境界条件の組合せに対して変換された境界条件は表4.1に示すとおりである。表中の条件式とは、第 j 番目の強制変位量を第 i 番目の局所座標系に変換した値と第 i 番目の強制変位量との比較式であって、上

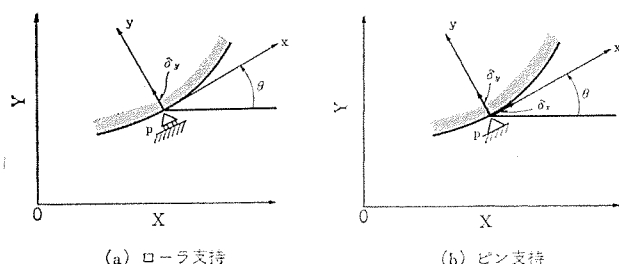


図4.1 支持条件の種類
Kinds of support condition.

表4.1 境界条件の変換
Transformation of boundary condition.

境界条件の組合せ	両境界条件の局所座標系の関係	変換された境界条件			
		支持の種類	x_i 方向の初期変位量	y_i 方向の初期変位量	条件式
両者ともローラ支持	二つの座標系が一致している あるいは互いに180°傾いている	ローラ支持	自由	δy_i	$\delta y_i = \delta y_j \cos(\theta_j - \theta_i)$
	上記以外の場合	ピン支持	$-\delta y_j \sin(\theta_j - \theta_i)$	δy_i	
一方がローラ支持 他方がピン支持	すべての場合	ピン支持	δx_i	δy_i	$\delta x_i = -\delta y_j \sin(\theta_j - \theta_i)$ $\delta y_i = \delta y_j \cos(\theta_j - \theta_i)$
両者がピン支持	すべての場合	ピン支持	δx_i	δy_i	$\delta x_i = \delta x_j \cos(\theta_j - \theta_i) - \delta y_j \sin(\theta_j - \theta_i)$ $\delta y_i = \delta x_j \sin(\theta_j - \theta_i) + \delta y_j \cos(\theta_j - \theta_i)$

式を満足しないことは両境界条件式の設定値に矛盾があることを意味する。プログラムでは上式を境界条件のインプットデータのチェックに利用している。

5. 荷重条件作成のアルゴリズム

5.1 集中荷重条件

インプットデータの座標値に最も近い節点を選び出し、この節点に集中荷重を与える。

5.2 分布荷重条件

インプットデータで指定した二つの点の座標値と分布荷重値を与えて、これらの点に最も近い位置にある二つの節点を選び出し、この2節点を結ぶ線分上の節点に対して、等価節点荷重を与える。

また、インプットデータで円弧の両端の座標、半径、中心の座標、分布荷重値などを指定し、指定した円弧上の節点を選び出し、これに等価節点力を与える。ここで、分布荷重値より等価節点力を求める方法は文献(4)によった。

6. 試計算例

以上述べてきた方法に基づいて、自動データ作成プログラムを作成した。本方法の実用性を確めるためにこのプログラムにより、1)データの作成率、2)処理時間、3)要素分割状況、4)境界条件、荷重条件の設定状況などについて試計算を実施した。ここで、データの作成率はこのプログラムのインプットデータのカード枚数とアウトプットデータ(構造解析プログラムのインプットデータ)のカード枚数の比である。電算機はIBM 370/165、プロッタはCALCOMP 763/780、磁気テープ装置はIBM 3420-003を用いた。試験結果を表6.1に示す。本プログラムによりデータ量が約5~20倍程度生成され、また処理時間は約10~30秒であって、構造解析のための演算時間に比べ、各計算例題においていずれも同程度、ないしはそれ以下であった。したがって、本プログラムを使用することによってデータ作成作業を大幅に軽減できるばかりでなく、データ作成費用は比較的安価におさえることができる。

図6.1に示す連続体に対して図示のようなPART分割、境界条件、荷重条件をインプットした場合のプロットの節点図、要素図、境界条件図および荷重条件図を図6.2に示す。また、図6.3、6.4はそれぞれ回転電気機器の回転子の部分、および圧力容器の部分のプロット図を示す。付図はPART分割図である。

これらの図より明らかなように、特に要素分割状況に不適当な箇所は認められず、本プログラムを正しく使用すれば、適切な自動要素分割が行なえる。

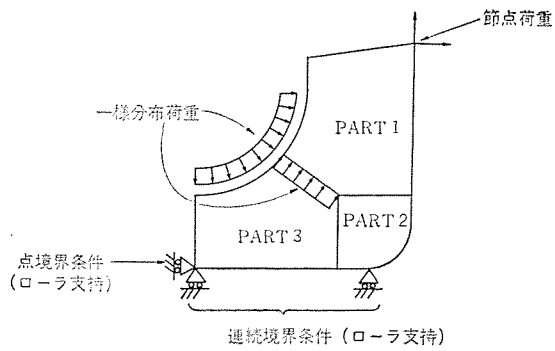


図 6.1 例題
Test example.

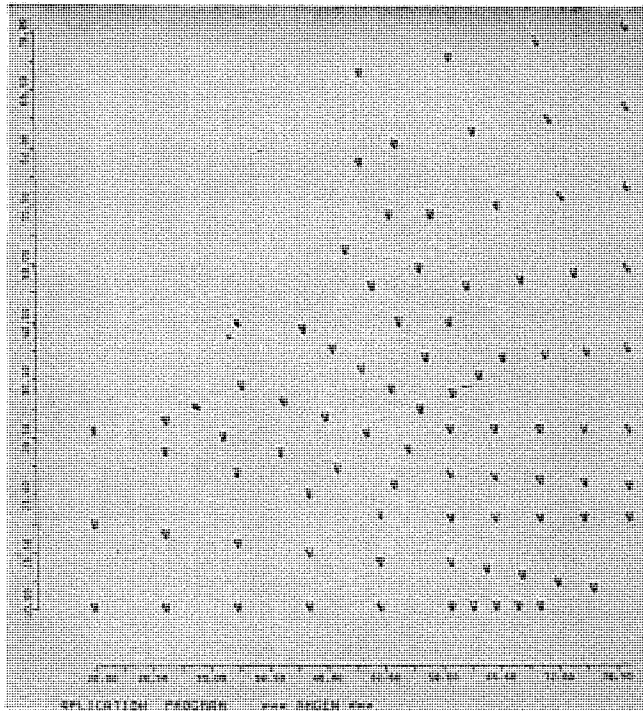
表 6.1 試計算結果
Test run.

試計算例	節点総数	要素総数	データ(アウトプット)* 作成率(インプット)	プロット図		処理時間*** (s)	プロット 実行時間 (min)
				図数**	サイズ (cm)		
1	417	718	12.5	3	75	29	39
2	426	694	18.2	3	75	27	39
3	298	528	18.5	4	75	24	38
4	186	316	9.8	4	30	11	16
5	187	311	14.9	4	75	16	26
6	340	505	6.2	3	75	19	27
7	340	594	6.4	3	75	23	34
8	167	282	12.1	3	75	13	23

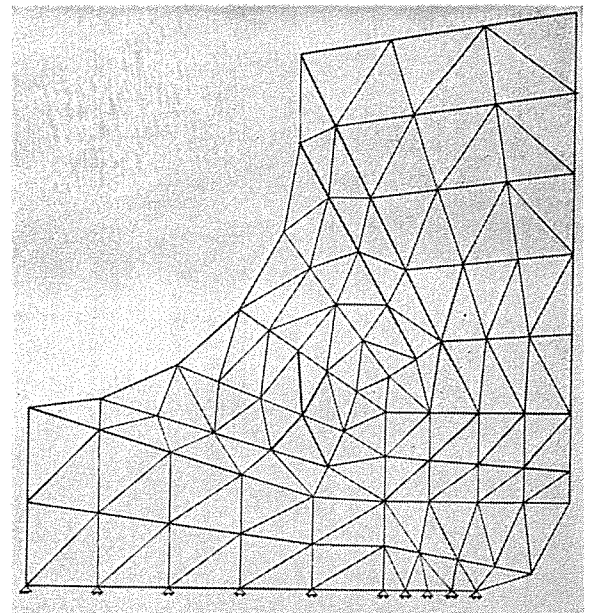
* カード枚数比

** 図数 3 は節点図, 要素図, 境界条件図。図数 4 は節点図, 要素図, 境界条件図, 荷重条件図

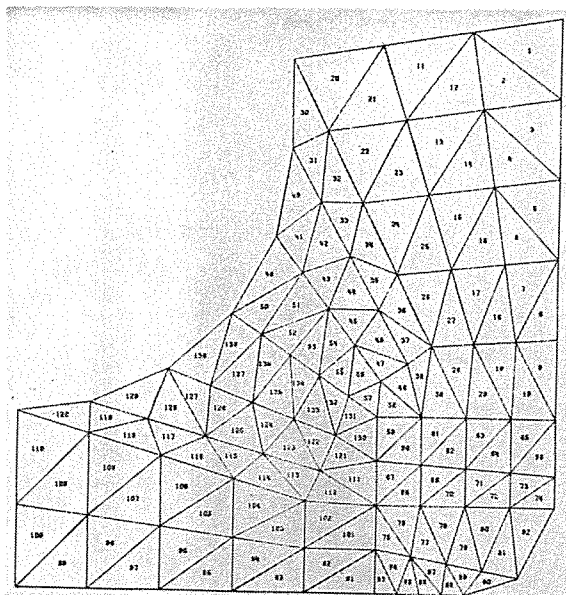
*** 節点, 要素, 境界条件, 荷重条件の作成時間, ならびにプロットのためのデータ処理時間



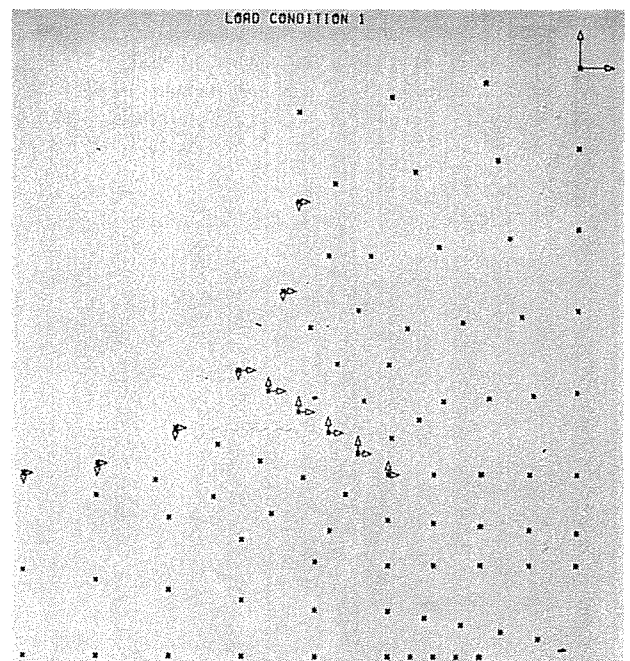
(a)



(c)



(b)



(d)

図 6.2 例題のプロット図

Plotter map of example.

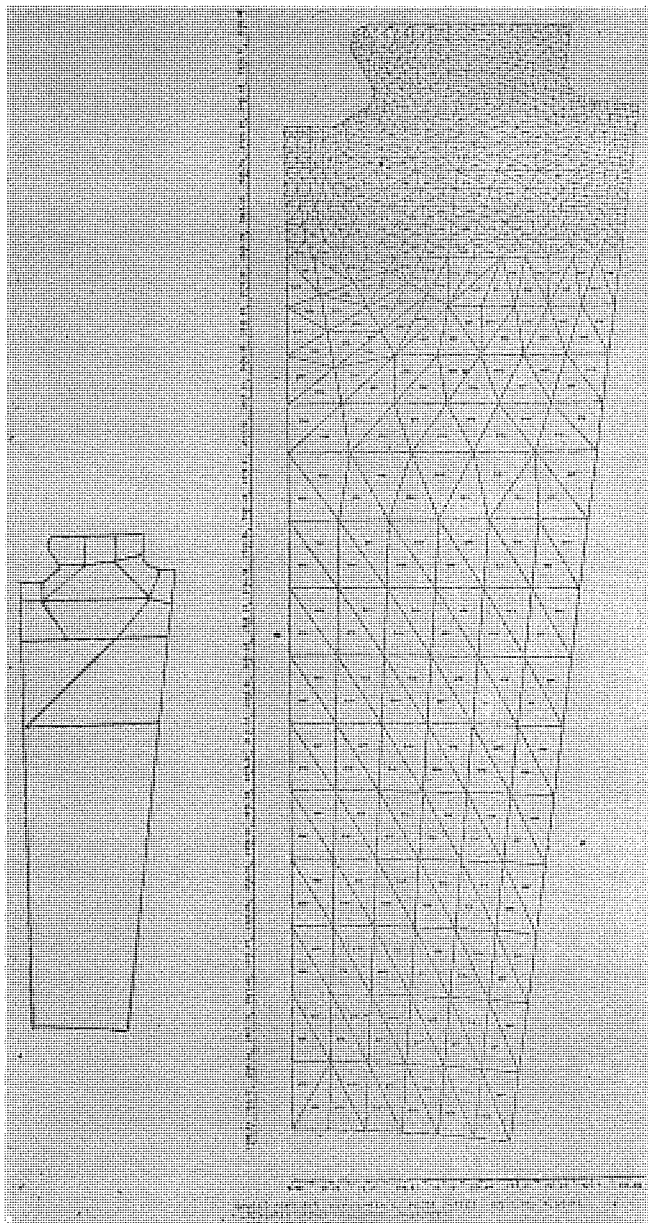


図 6.3 回転電気機器の回転子 (要素図)
Rotor of rotating electric machine (element map).

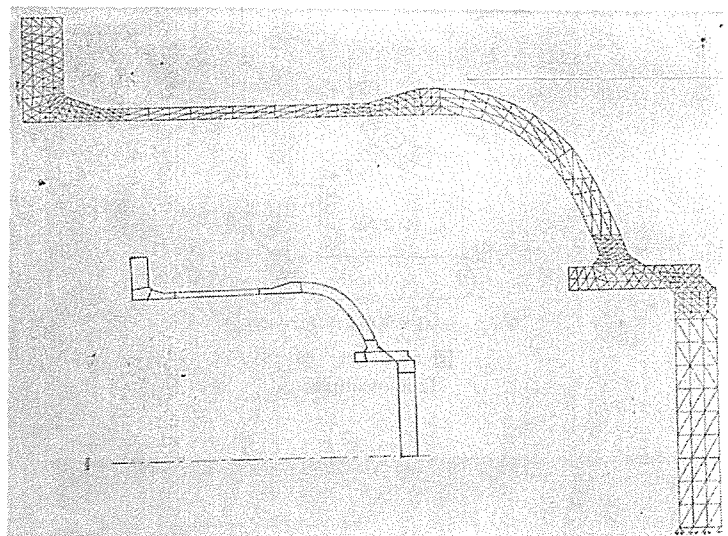


図 6.4 圧力容器 (境界条件図)
Pressure vessel (boundary condition map).

7. む す び

以上、有限要素法による構造解析のための一自動インプットデータ作成法について述べると共に、これに基づいて作成したプログラムの試計算結果を紹介した。本プログラムにより、人が行なうのと同程度の自動分割が行なえるばかりでなく、かなりの労力の軽減を計ることができた。

参 考 文 献

- (1) J. L. Egenberg : United States Atomic Energy Commission の依頼研究, Contract No. AT-(29-1)-789 (1969)
- (2) C. O. Frederick, et al. ; Int. Jr. of Numerical Methods in Eng., 2, 133 (1970)
- (3) 栖原ほか : 日本鋼構造協会 第5回大会研究集会, マトリックス構造解析法 研究発表論文集, 70 (昭46)
- (4) O. C. Zienkiewicz and Y. K. Cheung : The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, (1967) Mac Grawhill Book Co.

凍結—融解による汚泥処理

森口 哲雄*・本多 敏一*・松尾 敏治*・難波 敬典*

Sludge Freezing and Dewatering System

Central Research Laboratory

Tetsuo Moriguchi・Toshikazu Honda

Toshiharu Matsuo・Keisuke Nanba

At present a combustion method is used for sludge treatment, in which the sludge is burnt and disposed of. It involves, however, problems of deodorization and desulfurization to prevent a secondary public hazard. Consequently in many cases the sludge is packed in concrete vessels and thrown away in the ocean. The cost of the disposal in this system amounts to a considerable sum. To cut down the expenditures the quantity of sludge for treatments is to be reduced as much as possible. If the sludge is frozen and melted again, solid sludge is dewatered, its grains are roughened and the quantity is decreased. Furthermore, the specific resistivity of filtration is decreased extremely so as to permit the reduction of water content of sludge with ease by using simple dehydraters.

In this article is described the principle of freeze dewatering and the study of its effect on sludge of various types, and also is reported on the result of investigation made in parallel by building a set with a treating capacity of 2 tons/day for practical purposes.

1. ま え が き

最近、公害防止や環境保全に関する法令などの施行により、産業廃棄物の排出基準が厳しく規制されるようになった。

それに伴い、産業排水の無公害化工程や、生産工程から出てくる汚泥を二次公害を出すことなく処理することが厳しく義務づけられてきた。廃出汚泥は生産プロセスの最終段で出てくるものであるため、その有効利用が重要視されながらも焼却、または投棄されているのが現状のようである。燃焼法による焼却は悪臭および大気汚染等を伴うため環境保全等に問題が生じ、現在海洋投棄するケースが多くなってきた。この場合、処理費は運搬費別で約2万円/m³(汚泥)と非常に高価なものになる。そのため廃出汚泥量を極力少なくすることが急務とされはじめた。

これらの要求に答えるため、汚泥を凍結することによって汚泥中に含まれている水分を除去し、含水率の低い固形分にするによって投棄量を低減する汚泥凍結処理技術を確認し、実用化の検討をおこなった。

以下、汚泥を凍結することによって二次公害を全く出さずに効果的に脱水処理する方式の原理について述べ、基礎的な凍結処理効果の研究と並行して汚泥処理量2トン/日の容量をもつ装置を製作し実用性能を調べた結果を報告する。

2. 凍結処理について

(1) 原 理

汚泥の構造は図2.1に示すように、汚泥の固形質のまわりに、自由水、毛管結合水、間けき(隙)水、表面付着水、内部保留水などの名称で呼ばれる水が付着した構造になっている。

これらの付着水のうち、自由水、毛管結合水、間けき水は脱水機などの機械的な手段で除去可能である。表面付着水、内部保留水は固形質との結合が強く、機械的に脱水することは困難とされている。

汚泥中に含まれている水分は、汚泥量に非常に影響を及ぼすもので、図2.2に汚泥の含水率と汚泥体積(Sludge Volume)の関係を示す。この図から、たとえば含水率85%の濃縮汚泥を含水率50%

の脱水汚泥にした場合、汚泥量は1/3~1/5に低減することを示している。また、含水率50%以下では体積の減少率は小さくなり、汚泥体積を低減するためには汚泥の含水率を50%程度に下げればよいことが明らかである。

汚泥を凍結した後、解凍すれば固形質から水が分離して固形質の

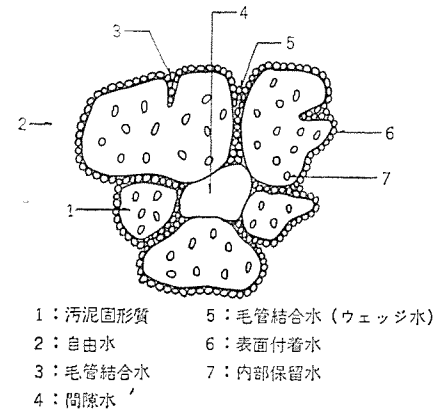


図 2.1 汚泥の粒子と水の結合
Combination of sludge particles and water.

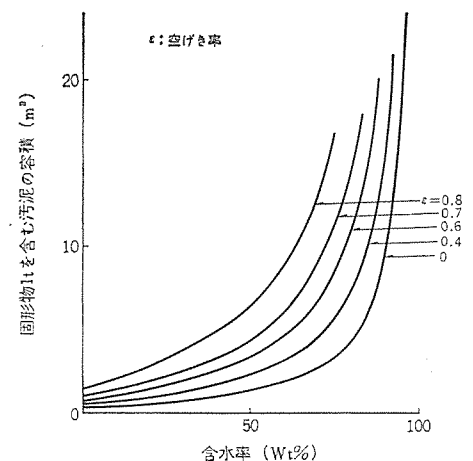


図 2.2 汚泥容積と含水率、空けき率の関係
Sludge volume and dewatering ratio.

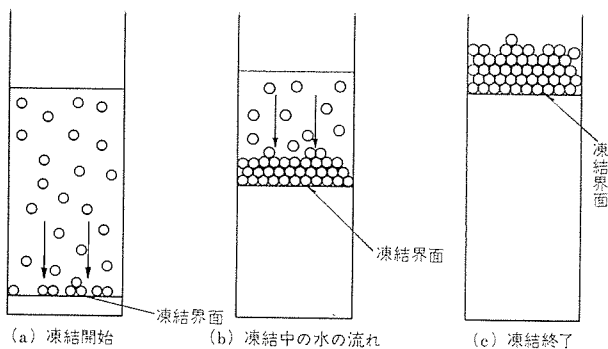


図 2.3 マクロ移動のメカニズム
Macromoving mechanism.

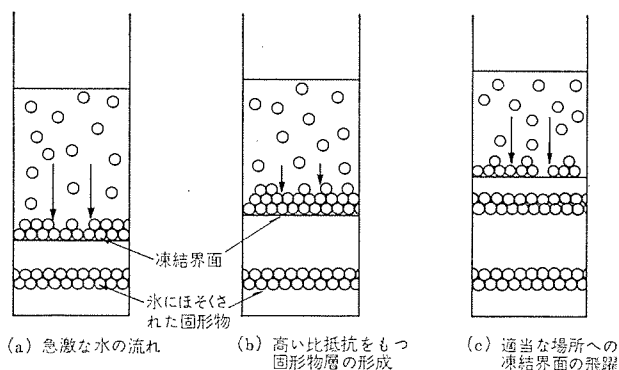


図 2.4 ミクロ移動のメカニズム
Micromoving mechanism.

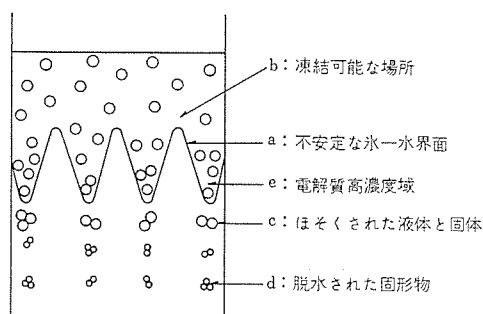


図 2.5 凍結パターンに及ぼす濃厚電解質の影響
Effects of condensed electrolyte on the freezing pattern.

占める体積が減少する現象は早くから知られており食品の加工などにも応用されている。また、凍結分離に関する研究も早くからおこなわれていたが⁽¹⁾、当時の状況から実用化には至らなかったようである。

凍結による汚泥の脱水効果を実験的に説明した報告は少なく、Longsdon⁽²⁾らがつぎのようなマクロ移動、ミクロ移動で脱水効果を説明している。

まず、マクロ移動の機構は、図 2.3 のように汚泥を凍結させると冷却面より水が成長して凍結界面が上部へ移動するが、汚泥中の固形物は水中にほそく(捕捉)されることなく、凍結界面上に濃縮されながら凍結界面と共に上部に移動する。しかし、濃縮された固形物の比抵抗が比較的大きい場合には、固形物層を通して凍結界面への水の移動が妨げられるため凍結界面は、図 2.4 に示すように順調な水の流れの状態に遭遇するところまで飛び起えて、そこで再び凍結を開始する。こうしてミクロ移動を生ずる。濃縮された固形物は氷の層の間に閉じこめられた形で凍結が進み、固形物微粒子間の水が引き抜かれ効果的に脱水される。このように脱水された粒子は互いに吸着し合い水の膨張力を受けながら粗大粒子に成長する。この

表 2.1 各種汚泥の凍結融解前後の物性
Characteristics of sludges.

試料	原液含水率 wt %	凍結処理 有 無	沈降容積 [*] ml	ろ過比抵抗 1/cm	真空脱水後の 含水率 wt %
ふっ酸処理廃水汚泥	92.25	未処理	99.2	3.7×10^6	67.9
		処 理	23.2(7分)	7.2×10^4	49.4
中和そう汚泥	98.26	未処理	99.8	4.1×10^7	88.7
		処 理	8.8(10分)	2.4×10^5	60.2
メッキ廃水汚泥(1)	95.44	未処理	99.6	2.1×10^7	85.6
		処 理	19.6(7分)	2.0×10^5	65.2
メッキ廃水汚泥(2)	97.28	未処理	100	6.1×10^7	88.3
		処 理	9.8(3分)	1.3×10^5	54.3
電解加工廃水汚泥	97.26	未処理	99.8	2.3×10^7	88.4
		処 理	11.2(3分)	1.1×10^5	53.6
染色廃水汚泥	97.98	未処理	100	1.3×10^8	92.0
		処 理	18.8(8分)	1.2×10^5	61.3

* 沈降容積の欄内に () で示した数値は沈降容積が一定に達するに要する時間であり原汚泥についてもこの時点での値を示した。

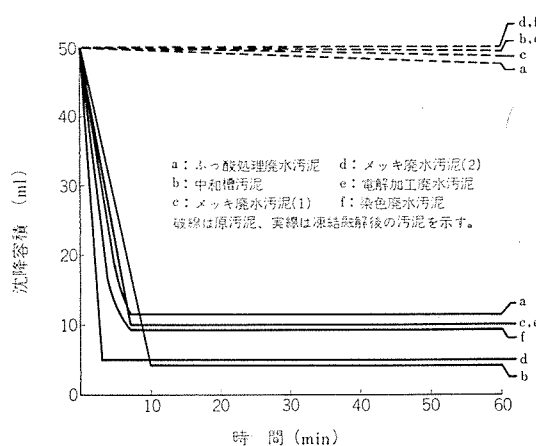


図 2.6 各種汚泥の沈降速度曲線
Sedimentation rates of sludges.

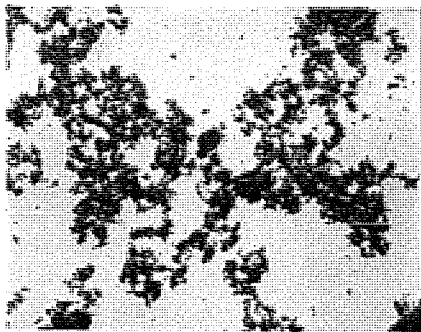
粗大粒子は融解後も水和性はなくなりそのまま沈降してしまう。

つぎに塩類濃度の高い汚泥の場合は、図 2.5 のように不安定な凍結界面を形成しながら凍結が進行する。溶質は凍結界面に沿って濃縮されるため液体の凝固点下がるが、界面から離れたある場所でおこる凍結の影響によって凍結界面の状態が破壊されると汚泥固形質と溶質濃縮液は氷にほそくされる。このとき溶質濃縮液を凍結させる温度まで下げないと汚泥は効果的に脱水されない。

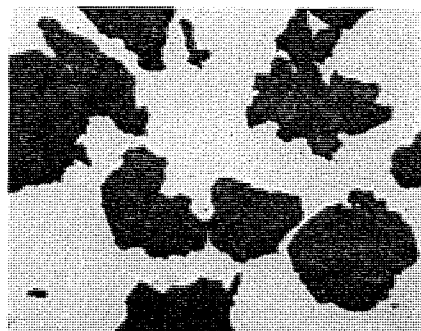
(2) 凍結処理の効果

各種汚泥の凍結脱水効果を調べるため、実験的に汚泥原液および凍結処理後の汚泥について沈降速度、ろ過比抵抗、ろ過後の含水率を測定した。処理は厚み 2 mm のアルミニウム かん(缶)内に 100 ml (液柱 15 mm) の汚泥を入れ、底部より凍結時間 150 分で最終的に -10°C まで冷却して上部まで完全に凍結したのち加温融解したものである。表 2.1 は各種汚泥の凍結処理前後の物性の測定結果をまとめたものである。図 2.6 は、沈降体積の時間的変化を示したものである。

これらの結果、ほとんどの汚泥は沈降体積にして数分以内に $1/5 \sim 1/10$ に減少し、ろ過比抵抗では $1/50 \sim 1/1000$ に減少する。これは、図 2.7 から明らかなように、凍結することによって汚泥中の固形物が粗大化したために沈降速度が早くなったものである。これは、式 (2.1) の stakes の式からも明らかなように

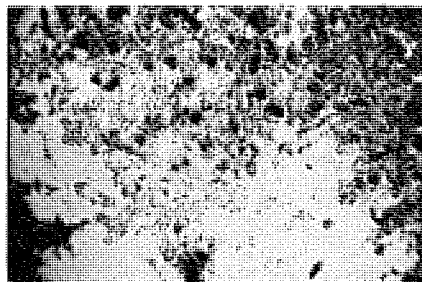


(a) 原汚泥

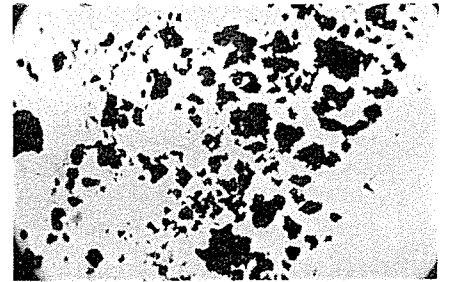


(b) 凍結処理汚泥

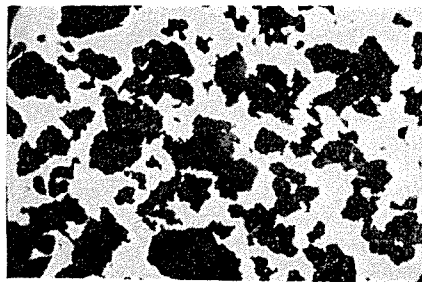
図 2.7 電解加工廃液汚泥の顕微鏡写真
Micro photographs of etching sludge.



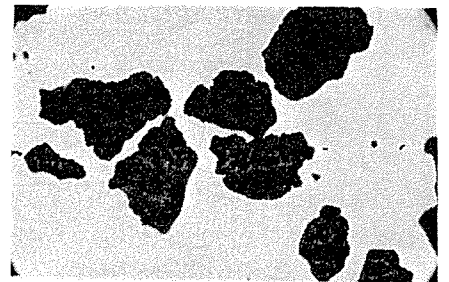
(a) 2分



(b) 15分



(c) 55分



(d) 180分

図 2.8 凍結時間が粒子の粗大化に与える影響
Effects of freezing time on the gathering of particles.

一方、粒子の粗大化は汚泥液中の水と粒子の相互移動によるものであり、水および粒子の移動速度以上の速さで凍結面が成長すると粒子の粗大化に大きく影響を与える。図 2.8 および図 2.9 は、凍結速度に対する粒子の粗大化およびろ過抵抗・沈降速度の変化を示したものである。これらの図から 15 mm の厚さの水をつくる凍結時間が 50 分以下では脱水効果が急激に変化し、それ以上の凍結時間であれば効果の変化はゆるやかになっている。

最終的な冷却温度と脱水効果は、直接大きな関係を示さないようである。しかし一部でも不完全凍結部があればろ過抵抗等に悪影響をおよぼす。

3. 凍結処理装置の概要

(1) 装置の概要

上記の基礎実験と並行して、2 トン/日の汚泥処理能力をもつ装置を製作し、基礎実験で得られた結果と比較し、実用性能を検討した。以下、その概要を紹介する。

本装置は、凍結加熱系統、汚泥処理系統、脱水系統に大別されている。

凍結加熱系統は図 3.1 に示すように、ヒートポンプで構成されてお

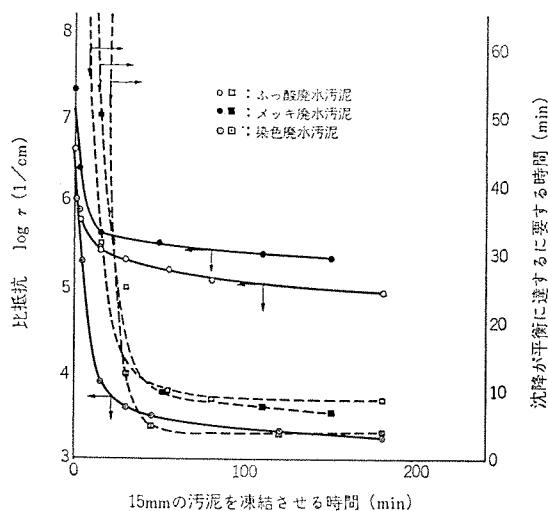


図 2.9 凍結速度のろ過抵抗、沈降速度が平衡に達するに要する時間に与える影響
Effects of freezing time on the specific resistance of filtration and sedimentation rate.

$$v = \frac{D^2(\rho_s - \rho_f)g}{18\eta} \quad (2.1)$$

ただし、 v ：終末沈降速度
 D ：固形物粒子径
 ρ_f ：液体の密度
 ρ_s ：固形物の密度
 η ：液体の粘度
 g ：重力加速度

固形物粒子の沈降速度が粒子径の 2 乗に比例しているためである。さらに、含水率の減少は、粒子が粗大化したため粒子の全表面積が小さくなり、表面付着水の量が減少すると共に内部保留水が除去されたためと考えられる。

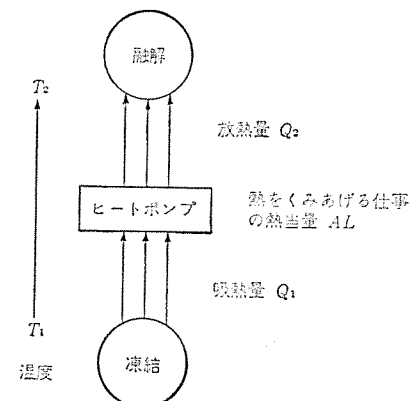


図 3.1 ヒートポンプの構成図
Block diagram of heat pump.

り、温度 T_1 の低温部から熱量 Q_1 を吸収し、温度 T_2 の高温部に熱量 Q_2 を放出するシステムである。冷凍サイクル理論から、 Q_1 と Q_2 の間には次の関係式が成立する。

$$Q_2 = Q_1 + AL \quad (3.1)$$

ただし、 A : 仕事の熱当量

L : 圧縮機の駆動動力

上式より、放熱量 Q_2 は常に吸熱量 Q_1 より大きい値を示し、その度合は T_1 および T_2 に関係しており、 T_1 と T_2 の差が小さければ AL の値は小さく、その差が大きければ AL の値は大きくなる。通常のヒートポンプでは、

$$\frac{Q_2}{Q_1} \approx 1.5$$

である。

汚泥から Q_1 の熱量を吸収すれば汚泥は凍結し、 Q_2 の熱量を凍結した汚泥に与えれば融解することができる。

汚泥処理システムは、汚泥を凍結し、さらに融解するシステムで、バッチ式と連続式の二つの方式が考えられているが、いずれも脱水効果を上げるためには、ある程度時間をかけて凍結する必要がある。

ここで述べる装置では、コンパクトにまとまるバッチ式を採用している。

脱水システムは、凍結融解した汚泥を水と固形分に分離するシステムで、凍結処理した汚泥は、粒子が粗大化されており、ろ過抵抗が $1/50 \sim 1/1000$ に減少するため、簡単な脱水機で十分であり、砂ろ過でも含水率は 70 % に減少するが、ここでは遠心脱水機を採用している。

(2) 構成

本装置の主要構成機器は次のとおりであり、図 3.2 にその系統図を示す。

冷凍機

1 基

処理そう

2 基

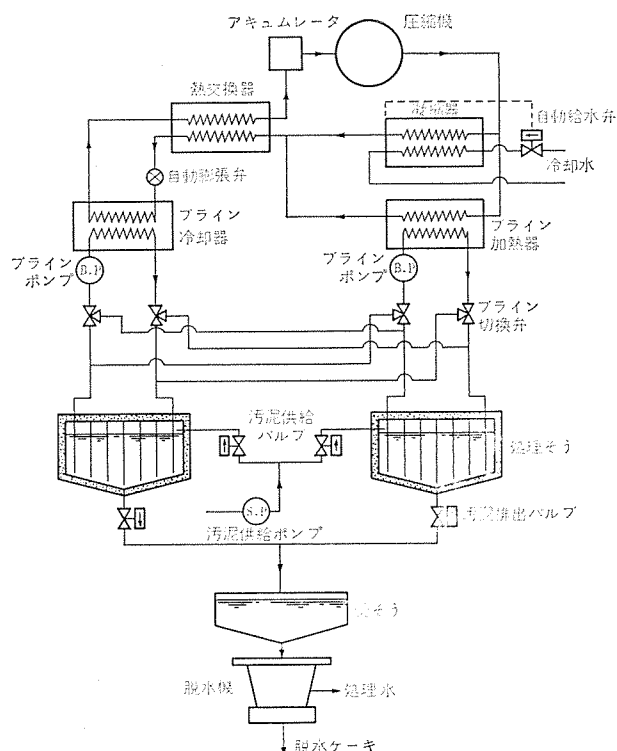


図 3.2 汚泥凍結処理装置系統図
Flow sheet of freeze dewatering system.

ラインポンプ	2 台
脱水機	1 台
汚泥供給 ポンプ	1 台
ライン 冷却器	1 式
ライン 加熱器	1 式
計測制御装置	1 式

本システムはライン方式を採用しており、ライン冷却器およびライン加熱器と処理そう(槽)をライン配管で接続している。ライン回路にはラインポンプが入っており、加熱または冷却されたラインはラインポンプによって系内を循環している。

処理そうは容量 250 l の角形のかん体で、底部はテーパ状にして汚泥の滞留がおきないようにしている。そうの底部からは断熱壁の外側を通してそう上部に細いパイプが連結しており、凍結時、そうの底部に液が氷によって閉められた場合、汚泥が凍結する時に体積膨張することによって底部に応力が働き、そうが圧壊することのないようになっている。

処理そうの中には、アルミ合金の合板でできた伝熱板が等間隔に取り付けられている。伝熱板の中には溝が設けられており、その中にラインが流れ、伝熱板の温度制御がおこなわれている。

汚泥の凍結速度は伝熱板の温度によって定まる。伝熱板の温度が一定の場合、氷の厚みと凍結時間の関係は次式で与えられる⁽³⁾。

$$\tau = \frac{\gamma H}{\lambda(\theta_f - \theta_b)} x \left(\frac{x}{2} + \frac{\lambda}{\alpha} \right) \quad (3.2)$$

ただし、 τ : 凍結時間

γ : 水の密度

H : 水の凍結潜熱

λ : 氷の熱伝導率

θ_f : 水の凍結点

θ_b : ブライン温度

x : 凍結層厚さ

α : 冷却を受ける氷表面における伝熱率

氷の成長の小さい初期は、氷による熱抵抗は小さく、冷凍機的能力によって氷の成長速度は定まる。汚泥の脱水効果は凍結時間に大きく影響しており、凍結時間が早ければその効果は弱くなる。本装置では冷却時間を 3 時間に設定し、伝熱板ピッチを 40 mm としている。

処理そうの下部には受そうがあり、凍結処理汚泥を一時貯え、順次そこから脱水機に供給される。

図 3.3 は 2 トン/日の処理能力をもつ凍結融解装置の外観図であ

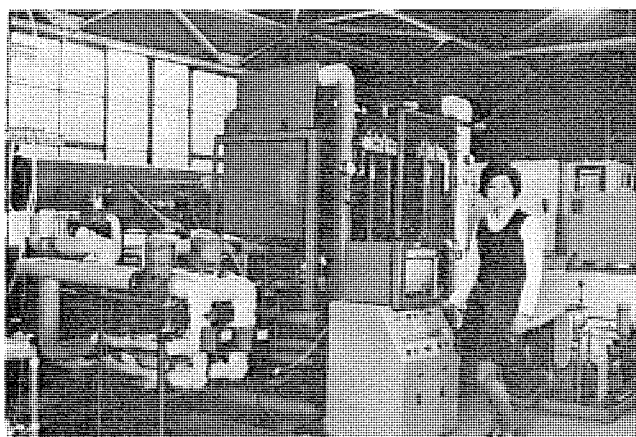


図 3.3 汚泥凍結処理装置外観
Exterior view of sludge freezing and dewatering plant.

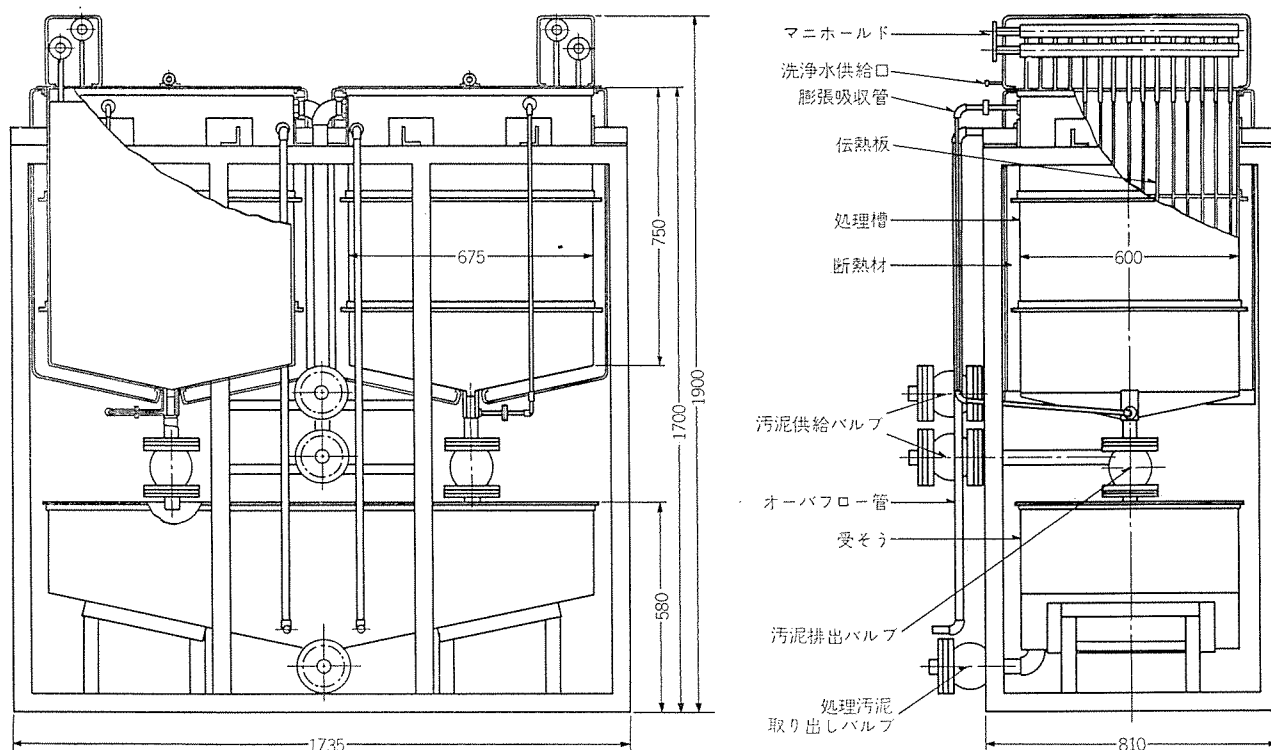


図 3.4 凍結処理そう外形寸法図
Outline dimensions of freezing and thawing vessels.

表 3.1 凍結融解処理装置の主要構成機器
Specification of the plant.

項 目		
電 源		三相 200 V, 单相 100 V, 50/60 Hz
運 転 電 流		200 V 53.5 A 100 V 8.5 A
外 形 寸 法	高 さ	2,000 mm
	幅	1,750 mm
	奥 行	1,800 mm
製 品 重 量		1,500 kg
処 理 能 力		2,000 l/日
冷 媒 回 路 機 器	圧 縮 機	開放形
	圧 縮 機 形 式・台数	三相誘導電動機×1
	電 動 機 定 格 出 力	7.5 kW
	凝 縮 機 形 式・台数	水冷シェルアンドチューブ×1
	受 液 器 形 式・台数	水冷シェルアンドチューブ×1
	冷 媒 制 御 器	温度式自動膨張弁・定圧自動膨張弁
	冷 媒	R-12 43 kg
	冷 凍 機 油	冷凍機油 2号 3.5 l
	伝 熱 板	アルミロールボンド×30
	油 分 離 器・液 分 離 器	各 1
運 転 調 整	操 作 ス イ ッ チ	押しボタンおよびトグルスイッチ
	表 示 灯	赤色表示
	凍 結 融 解 温 度 調 節	サーモスタット
制 御 装 置		全自動および手動
		高低圧圧力開閉器, 自動圧力給水弁 クランクケースヒータ過電流継電器 吸入圧力調整弁
保 護 装 置		
プ 回 ラ イ ン 路	ボ ン プ	高 温 用 三菱循環ポンプ 250 W 揚程 7~10 m
		低 温 用 三菱循環ポンプ 450 W 揚程 10~15 m
	流 量 計	×2

り、図 3.4 は処理そうの外形寸法図を示したものである。

(3) 動作

圧縮機で圧縮された冷媒(フロン12を使用)は、ブライン加熱器内で熱を放出してブラインを加熱し、冷媒は凝縮する。凝縮した冷媒は自動膨張弁を通してブライン冷却器内でブラインから熱を吸収して蒸発

し、圧縮機の吸込側にもどる。冷却、または加熱されたブラインはブラインポンプで処理そうに送りこまれ、汚泥を凍結、または凍結した汚泥を融解する。汚泥が完全に融解して常温にもどれば、加熱ブラインの循環ポンプを止める。この時、自動給水弁が作動し、外部からの冷却水によってブライン加熱器内で発生する熱を系外に放出する。

汚泥の融解が完了した時点で汚泥排出バルブが開き、汚泥は受そうに排出され、そこから順次脱水機に凍結処理汚泥が供給され水と固形分に分離される。汚泥が処理そうから完全に排出された時点で、汚泥供給ポンプおよび汚泥供給バルブが作動し、新たな汚泥が処理そうに満され、一方の処理そうの凍結が完了するまで放置される。

凍結中の処理そうの中の汚泥の凍結が完了すれば、ブライン切換弁が作動し、凍結した処理そうに加熱ブラインが流れ、新たな汚泥が供給された方の処理そうに冷却ブラインが流れ、凍結および融解がおこなわれる。この操作を順次繰返すことによって自動的に凍結処理がおこなわれる。

表 3.1 は本装置の主要構成機器の仕様をまとめたものである。

4. 運転特性と経済性

本装置は現在、当社中央研究所内の水処理プラントに組み込まれ各種汚泥の脱水処理に供しており、基礎研究による結果との比較検討がおこなわれている。図 4.1 はそう上部の伝熱板間の中心点の時間に対する温度変化の一例を示したものである。250 l の汚泥が約 1 時間で凍結温度に達し、2 時間で凍結が完了する。最終凍結温度は汚泥の質によっても異なるがだいたい -5°C にすれば満足できる脱水効果が得られている。融解時間は冷却および凍結に要する時間よりも短かく、解凍に 1.3 時間、加温が 0.7 時間で、約 2 時間で解凍、加温が完了している。

表 4.1 は本装置による脱水ケーキの含水率を、凍結処理しないで脱水した場合、および実験室的に凍結処理して脱水した場合と比較したものである。ここで、原液および実験室的に凍結処理したもの

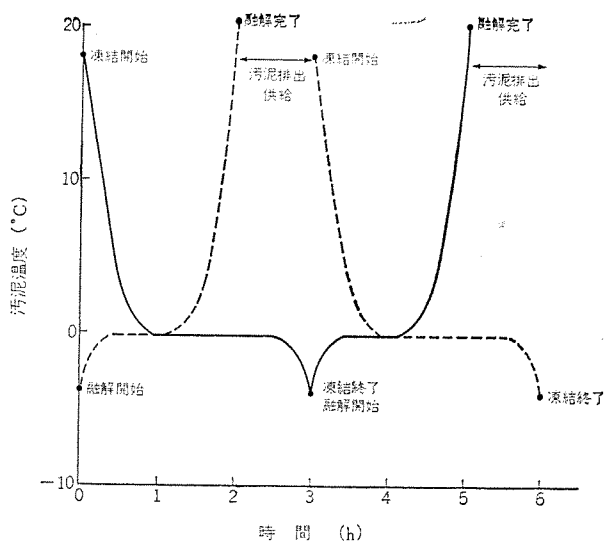


図 4.1 処理そうの温度曲線
Freezing and thawing curves in the vessels.

表 4.1 凍結処理汚泥の含水率
Dewatering of sludges by freeze treatment.

処 理 法	未 処 理	実 験 室 的 凍 結 処 理	プ ラ ン ト に よ る 凍 結 処 理	主 成 分
脱 水 法	真 空 脱 水	真 空 脱 水	遠 心 脱 水	
メッキ廃水汚泥	86 %	63 %	62 %	銅, 鉛, 亜鉛, ク ロム, 鉄の水酸化 物
ふっ酸処理廃水汚 泥	82 %	49 %	54 %	ふっ化カルシウム
中和そう汚泥	89 %	60 %	60 %	水酸化鉄

に関しては真空脱水機で脱水をおこない、凍結処理装置で処理した汚泥は遠心脱水機で脱水した値である。

この表から、凍結処理を施さないで脱水した場合 80~90 % の含水率の値が、凍結処理を施した場合 50~60 % の含水率に低下している。これは汚泥体積の減少の点からみると図 2.2 から約 1/3~1/7 に低減する。

脱水方式の点からみると、含水率の限界は従来から、遠心分離方式で 80 % 台、真空脱水方式で 70 % 台、加圧ろ過方式で 60 % 台といわれているが、凍結処理したものは表 4.1 からみると、真空脱水方式も遠心分離方式でも余り変わらず、50 % 台の含水率の脱水ケ

ーキが得られている。

次に運転コストをみると、動力としては電力のみである。1 サイクル当たりの電力使用量の内訳は次のとおりである。

冷凍機	20.4 kWh
冷却 ブラインポンプ	1.2 kWh
加熱 ブラインポンプ	0.5 kWh
汚泥供給 ポンプ	0.3 kWh
脱水機	3.4 kWh
計測制御装置	0.6 kWh
使用電力量	26.4 kWh

1 サイクル 当たり含水率約 96 % の汚泥が 250 l 処理され、それに使用される電力量は 26.4 kWh である。したがって 96 % 原液 1 トン当たりの使用電力量は 105.44 kWh となり電力料金を 4 円/kWh とすれば処理に要する動力費は約 420 円/トン 程度になっている。

5. む す び

以上、凍結脱水に関する基礎研究ならびに 2 トン/日 の処理能力をもつ実用規模の汚泥凍結処理装置の運転特性ならびに脱水性能について述べた。

汚泥の凍結による脱水方式は二次公害を全く出さないこと、常温以下の温度領域で脱水処理ができ構造物の腐食が少ないなど大きな特長を有する。また、高温にすれば熱分解して毒性ガスを発生するような汚泥の含水率を下げる場合などは特に有効な手段と考えられる。処理費に関しては、96 wt% の原液を 50 % 含水率の乾燥汚泥にし、コンクリート かん体につめて海洋投棄するとした場合、コンクリート処理費を 2 万円/m³ (汚泥) とすれば、96 wt% 原液 1 トン 当たり処理費 (電力代) が 420 円、固形分が 56 l 程度出てくるため、そのコンクリート処理費が 1,120 円で合計の運転処理費は 1,540 円/トン (原液) 程度となり、他の方式との比較の参考となろう。

今後、汚泥の投棄規準も一段と厳しくなると思われるが、これが公害防止の一助となれば幸甚である。

参 考 文 献

- (1) 馬野：冷凍，32，第 353 号，8 (昭 32)
- (2) G. S. Longsdon, et al. : Jour AWWA, 63, No. 11, 734 (1971)
- (3) 源生：冷凍，32，第 354 号，4 (昭 32)

GaAs 液相エピタキシャル結晶

三木 秀二郎*・大坪 睦之*

GaAs Crystals Grown by Liquid Phase Epitaxy

Central Research Laboratory Hidejiro Miki・Mutsuyuki Otsubo

Growth technique of GaAs liquid phase epitaxy has become indispensable in the manufacture of microwave devices of various kinds. This paper deals with the above growth technique using Ga solution. First, study is made with the effect of oxygen, of the tip temperature and of heating of Ga solution on the properties of liquid phase epitaxially grown GaAs crystals. As a result, it is made clear that oxygen is the one to determine the donor concentration of GaAs crystal of high purity; heating of Ga solution under hydrogen is very important to decrease the contamination of oxygen and to obtain the high quality GaAs crystal. Next, discussion is made on the properties of the epitaxial layers doped with donor and acceptor impurities.

1. ま え が き

GaAs 結晶の液相エピタキシャル成長は融液からの結晶成長や気相成長に比べて不純物の混入する割合が少なく、比較的簡単な装置で手軽に良質の結晶が得られる。Ga/AsCl₃/H₂ 系による GaAs 気相成長法は Ga 温度、基板温度、AsCl₃ の温度および流量、H₂ ガス流量等コントロールしなければならないファクタが多い。このため所定の濃度の高純度 GaAs エピタキシャル結晶を再現性よく成長させることは容易でない。またエピタキシャル層の格子欠陥、Si による汚染、エピタキシャル層—基板界面の高抵抗層の発生など問題が多い⁽¹⁾。これに対して、液相成長法はコントロールすべきファクタ(たとえば成長開始温度、冷却速度など)が少なく、10¹² cm⁻³ オーダの高純度結晶^{(2)~(4)}から 10¹⁹ cm⁻³ オーダの高濃度結晶⁽⁵⁾まで再現性よく得ることができる。また、気相エピタキシャル結晶に比べ格子欠陥も少なく⁽⁶⁾、キャリア濃度分布も平たん(平坦)で、エピタキシャル層—基板界面の高抵抗層の問題はほとんどない。さらに最近では、液相成長法の最大の難点であった厚み制御、成長表面の滑らかさもスライド式ボートの発明^{(7) (8)}により、ある程度解決され 0.5 μm 以下のエピタキシャル層を得ることも可能になってきている。このようなわけで、GaAs 液相エピタキシャル結晶はオームミックコンタクト用下地層、レーザダイオードやガンダイオード、インパットダイオードなどに用いられており、各種デバイス製作に欠かせないものになってきている。

ここでは、高純度 GaAs エピタキシャル結晶、ガンダイオード、インパットダイオードを主としたマイクロ波素子用のエピタキシャル結晶の成長に関する検討を行なった結果を報告する。

2. 成長方法と測定方法

GaAs 結晶の液相エピタキシャル成長法はボート傾斜法、スライディング法およびルツボ浸漬法に大別されるが、本実験では、高純度 GaAs エピタキシャル結晶を成長させる場合はボート傾斜法を、またガンダイオード、インパットダイオード用エピタキシャル結晶の成長の場合はスライディング法を用いた。図 2.1 に実験装置の構成図を示す。成長ボートは高純度カーボンで、また反応管は高純度石英で作られており成長前に高温の水素ガス中で十分空焼きして使用した。ふん囲気としては純化した水素ガスを用いた。溶媒として 99.9999% Ga 溶液を特に処理しないで用いた。ソース GaAs 結晶を飽和させたあとの (Ga+GaAs) 溶

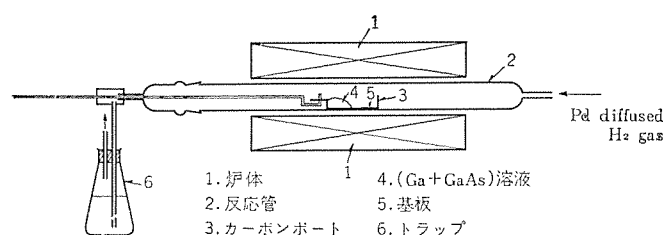


図 2.1 実験装置の概略図
Schematic diagram of the horizontal epitaxial furnace.

液の処理はきわめて重要である。

基板結晶にはエピタキシャル層の電気的特性測定用として Cr ドープ半導体結晶を、またデバイス製作用として Si, Sn, Te ドープ n⁺ 基板(キャリア濃度 $\approx 1 \sim 2 \times 10^{18}$ cm⁻³)を用いた。

基板、ソース用 GaAs ウエハはラッピング後、臭素+メタノール溶液でエッチングしさらに成長直前に硫酸系のエッチング液で軽くエッチングして使用した。

次に成長手順を説明する。

まず、十分洗浄された反応管および成長ボートを高温の水素ガス中で長時間空焼きし付着した不純物を取り除く。空焼きの温度は成長開始温度より高いほうがよいが、あまり高すぎるとかえって系が汚れる場合もあるので注意する必要がある。次に十分空焼きされた成長ボートに Ga 溶液とソース用 GaAs 結晶をチャージして、成長開始温度に設定された炉中にそう(挿)入し Ga 溶液に As を十分飽和させる。As を飽和させた Ga 溶液を水素ガス中で加熱処理(以下水素処理と称することにする)を行ない溶液に含まれる不純物を除去する。後に述べるように、(Ga+GaAs) 溶液の水素処理は高純度 GaAs エピタキシャル結晶を得るうえできわめて重要である^{(2)~(4)}。不純物を添加してキャリア濃度をコントロールしようとする場合、不純物の種類によっては溶液を水素処理することによって不純物が蒸発してしまいエピタキシャル成長層のキャリア濃度をコントロールすることが困難なことがある⁽⁹⁾ので十分注意する必要がある。以上で反応管、成長ボート、溶液の前処理を終りエピタキシャル成長を行なう。成長ボートに水素処理された (Ga+GaAs 溶液) と基板結晶とをそれぞれが接触しないようにセットし反応管中にそう入する。窒素ガスを水素ガスに十分置換したのち炉中にそう入する。炉温が設定値に回復するのを待って、ボート傾斜法の場合は炉の傾きを反転させ、スライディング

法の場合はスライダをスライドさせて、溶液と基板とを接触させたあと一定時間経過したのち炉温を一定の割合で降下させて成長を開始する。スライディング法を用いて多層エピタキシャル成長を行なう場合は、第1層成長後いったん炉の冷却を休止し、一定時間後第2の溶液と基板とを接触させると同時に再び炉の冷却を開始しエピタキシャル成長を行なう。以下同様な手順で行なう。

Crドープ半絶縁性基板上の成長層のキャリア濃度および移動度は、van der Pauwの方法⁽¹⁰⁾またはbridge typeのHall効果の測定から算出した。n⁺基板上の成長層のキャリア濃度分布は成長層上に形成したschottky barrier diodeの容量—電圧特性からJ. A. C. Electronics製impurity profile plotterで片対数グラフ用紙上に直接プロットすることによって求めた。イオン化したドナー不純物濃度N_Dおよびアクセプタ不純物濃度N_Aは、77°Kにおけるホール係数を測定し、Brooks-Herringの式⁽¹¹⁾を用いて計算した。

3. エピタキシャル成長層の性質

エピタキシャル成長層の特性は成長開始温度に大きく影響される⁽¹²⁾⁽¹³⁾。図3.1は成長開始温度とエピタキシャル成長層のキャリア濃度との関係を示したものである。図中(a)は(Ga+GaAs)溶液を水素処理しないで成長を行なった場合で、(b)は(Ga+GaAs)溶液を高温のH₂ガス中で長時間水素処理を行なったのちエピタキシャル成長を行なった場合のものである。いずれの場合についても成長開始温度が高ければキャリア濃度の低いエピタキシャル層が得られ、逆に成長開始温度が低いとキャリア濃度の高い結晶が得られる。(a)と(b)とを比較してみると成長前の(Ga+GaAs)溶液の水素処理が高純度GaAsエピタキシャル結晶を得るうえできわめて重要であることがわかる。(Ga+GaAs)溶液を水素処理しないで成長を行なった場合、得られるエピタキシャル層のキャリア濃度は成長開始温度が750°Cのとき $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 程度であるが、(Ga+GaAs)溶液を長時間水素処理すると $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 程度のエピタキシャル結晶が得られる。(Ga+GaAs)溶液を水素処理したあと成長開始温度800°Cでエピタキシャル成長を行なった場合の成長層の電気的特性の一例を表3.1に示す。成長開始温度を800°Cとすれば $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ オーダのキャリア濃度の成長層を比較的容易に得ることが可能である。現在最高純度のものでキャリア濃度 $3.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 、77°Kにおける移動度244,000 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ の結晶が得られている。

図3.2はGa溶液にGaAsを飽和させたのち水素処理を重ねた場合の累積処理時間とキャリア濃度および移動度の関係を示したものである。第1番目の結晶はGa溶液にGaAsを十分飽和させたのち水素処理をしないでそのまま成長を行なった場合のものである。第2番目以降の結晶は(Ga+GaAs)溶液を図に示した時間、水素処理を行なったあと得られたものである。Ga溶液にソース用GaAsを飽和させた直後に成長を行なった場合はキャリア濃度 $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

程度のエピタキシャル層しか得られないが、(Ga+GaAs)溶液を3時間水素処理すると $9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、さらに3時間水素処理すると $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ のエピタキシャル結晶が得られる。 10^{13} cm^{-3} オーダのキャリア濃度を持ったエピタキシャル層を得ようとする場合は、Ga溶液にGaAsを飽和させたのち少なくとも5～6時間程度水素処理を行なうことが必要である。その後は各成長ごとに3時間程度水素処理すればよい。

エピタキシャル成長層の特性に大きな影響を及ぼすものとして酸素がある。酸素はSolomon⁽¹⁴⁾によって明らかにされたように、GaAsの液相エピタキシにおいては浅いドナーとして作用する。GaAsの液相エピタキシにおける酸素の影響をより詳しく調べるために99.999% Ga₂O₃のドーピングを行なった⁽¹⁵⁾。(Ga+GaAs)溶液中に添加されたGa₂O₃は900°Cにおける溶液の水素処理によって容易に蒸発す

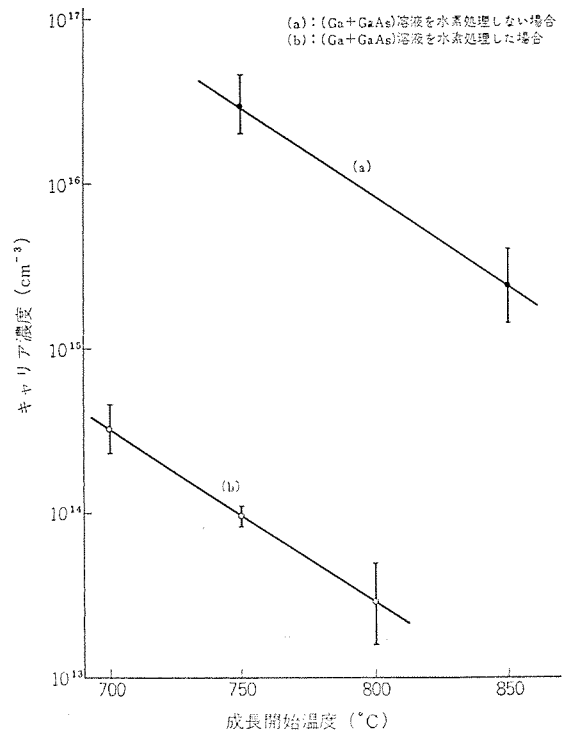


図 3.1 成長開始温度とキャリア濃度の関係
Temperature dependence of the carrier concentration.

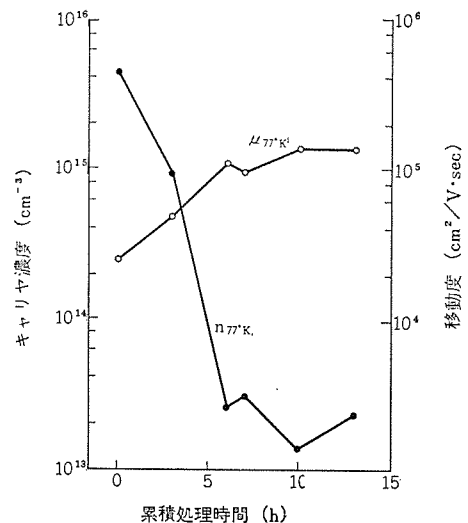


図 3.2 (Ga+GaAs) 溶液の累積処理時間とキャリア濃度および移動度の関係
Heating effect of (Ga+GaAs) solution.

表 3.1 エピタキシャル層の電気的特性
Electrical properties of the epitaxial layers.

Sample No	$n_{77^\circ\text{K}} (\text{cm}^{-3})$	$\mu_{77^\circ\text{K}} (\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$	$N_D (\text{cm}^{-3})$	$N_A (\text{cm}^{-3})$
LN-4	2.7×10^{13}	136,000	2.5×10^{14}	2.2×10^{14}
LN-11	3.7×10^{12}	244,000	7.5×10^{12}	3.9×10^{12}
LN-20	7.4×10^{12}	189,000	8.5×10^{13}	7.7×10^{13}
-28	2.6×10^{13}	142,000	2.3×10^{14}	2.0×10^{14}
-33	1.3×10^{13}	166,000	1.4×10^{14}	1.3×10^{14}

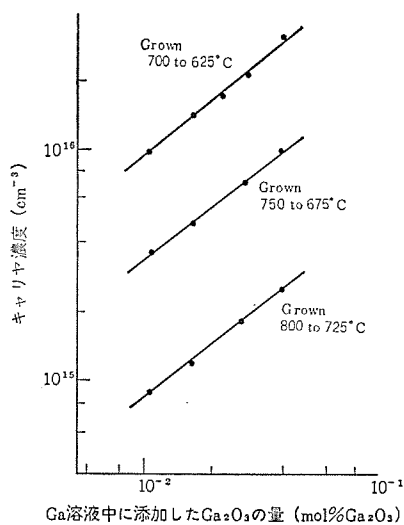


図 3.3 Ga_2O_3 のドーピング特性
Doping characteristics of Ga_2O_3 .

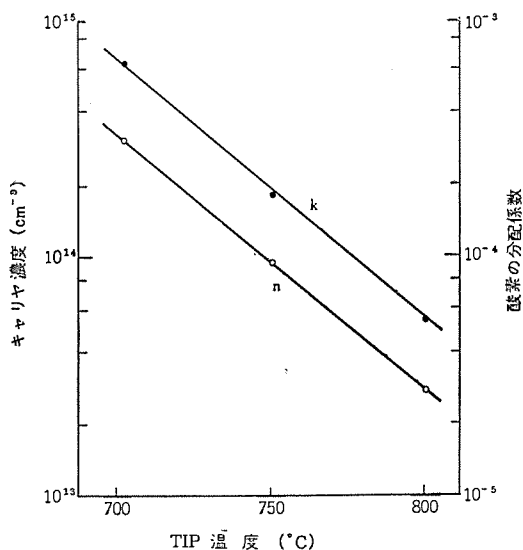


図 3.4 エピタキシャル層のキャリア濃度および酸素の分配係数の成長開始温度依存性
Tip temperature dependence of the distribution coefficient of oxygen and the carrier concentrations.

る。たとえば、 Ga_2O_3 を添加しないとき $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 程度のエピタキシャル結晶が得られるような (Ga+GaAs) 溶液に 0.1 mol % の Ga_2O_3 を添加すると、その直後では $4.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ のエピタキシャル結晶が得られる。この溶液を 900°C で 4 時間および 8 時間水素処理を行なうと、そのとき得られるキャリア濃度はそれぞれ $9.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ および $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ となる。したがって、ここでは一度 Ga_2O_3 を添加してエピタキシャル成長を行なったあと、 900°C で 8~10 時間水素処理した溶液に Ga_2O_3 を添加し直ちに成長する方法を採用した。

図 3.3 は (Ga+GaAs) 溶液中に添加した Ga_2O_3 の mol % とエピタキシャル層のキャリア濃度の関係を示す。実験範囲は狭いが両者の関係はほぼリニアである。成長開始温度が低くなるとキャリア濃度の高いエピタキシャル層が得られ、成長開始温度が高いとエピタキシャル層のキャリア濃度は低くなる。これは (Ga+GaAs) 溶液に故意に不純物を添加しないで成長を行なった場合の成長開始温度とエピタキシャル層のキャリア濃度の関係 (図 3.1) と同様な関係であることは注目される。図 3.3 から (Ga+GaAs) 溶液中へ添加した Ga_2O_3 はすべて溶解し、かつ酸素は溶液中では atomic な状態にあると仮定して、エピタキシャル層のキャリア濃度と溶液中への Ga_2O_3 の添加量との比か

ら酸素の分配係数を求めると、成長開始温度 800°C では 5.1×10^{-5} 、 750°C では 1.8×10^{-4} 、 700°C では 6.5×10^{-4} となる。この値を成長開始温度に対してプロットすると図 3.4 のようになる。図 3.4 には図 3.1 に示した成長開始温度とキャリア濃度との関係も示しておいた。酸素の分配係数と成長開始温度との関係を示す直線とエピタキシャル層のキャリア濃度と成長開始温度との関係を示す直線とは互いに平行であることに注目しなければならない。このことはエピタキシャル層のキャリア濃度の成長開始温度依存性の主な原因は酸素の分配係数の温度依存性であることを示している。

以上、(Ga+GaAs) 溶液に故意に不純物を添加しないとき得られるエピタキシャル成長層の性質について述べたが、次に溶液中に不純物 (ドーパント) をドーピングした場合のエピタキシャル層の性質について述べる。

4. ドーピング特性

所定のキャリア濃度およびキャリア濃度分布を持ったエピタキシャル層を得るためには、エピタキシャル層へ適当な不純物をドーピングする必要がある。GaAs の n 形不純物として Sn, Te, Se, S などがよく用いられる。Te, Se, S は GaAs の液相成長温度付近の温度では分配係数が大きい (~ 1) ためキャリア濃度の低いエピタキシャル結晶を得るには不向きで、もっぱらキャリア濃度の高いエピタキシャル結晶を得るのに用いられている。Te, Se, S をドーピングしたキャリア濃度の低いエピタキシャル結晶を得る場合は、これらのドーパントがドーピングされた GaAs 結晶が用いられる。一方 Sn は液相成長を行なう近傍の温度においては分配係数が小さい ($\sim 10^{-4}$) ためキャリア濃度の低い結晶を得るのに適しているし取扱いも簡単である。ここでは Sn と Te ドープ GaAs 結晶をドーピングした結果について述べる。

図 4.1 は (Ga+GaAs) 溶液中への Sn の添加量とエピタキシャル層のキャリア濃度との関係を示したものである。図中の点線は平均値の $\pm 20\%$ のキャリア濃度の変化範囲を示したもので、実験値の大部分はこの領域に入っている。

図 4.2 は Sn をドーピングしたエピタキシャル層のキャリア濃度分布を示したものである。(a) はスライディング法によって、(b) はポート傾斜法によって得られたエピタキシャル層のキャリア濃度分布で、エピタキシャル成長層上に形成したショットキバリアダイオードの容量-電圧特性から得られたものである。いずれの方法を利用してキャリア濃度分布

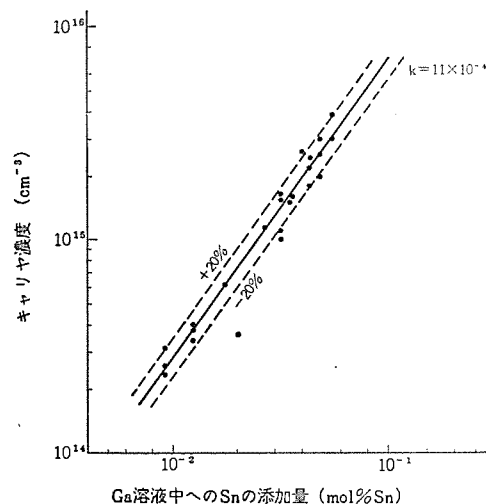


図 4.1 Ga 溶液中への Sn の添加量とキャリア濃度の関係
Carrier concentration of epitaxial layer plotted against amount of Sn doped into Ga solution.

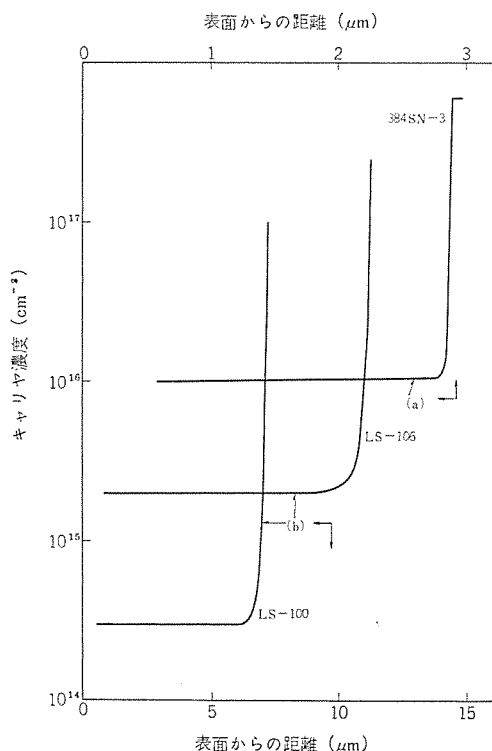


図 4.2 深さ方向のキャリア濃度分布
Carrier concentration profiles of the Sn-doped epitaxial layers.

はきわめて平たんで、気相成長でしばしば観測されるようなエピタキシャル層—基板界面の高抵抗層は存在しない。エピタキシャル層—基板界面付近の立上りはスライディング法を用いた場合は急しゅん（峻）で遷移幅（キャリア濃度が1けた変わる距離）は0.2～0.3 μm程度のものが得られる。ポート傾斜法を用いた場合は遷移幅は1～2 μm程度である。

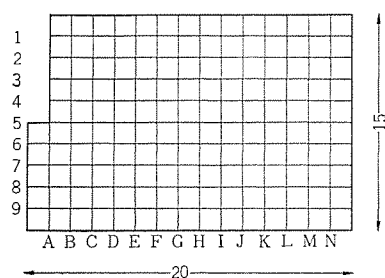
図 4.3 はポート傾斜法を用いて得られた Sn ドープエピタキシャルウエハ面内のキャリア濃度の分布で、エピタキシャル層上に形成したショットキバリアダイオードの容量—電圧特性から得られたものである。ウエハ面上のキャリア濃度の分布はウエハ全面にわたって均一で平均値の±10%の範囲内に抑えることができる。このウエハと同時に Cr ドープ半絶縁性基板上に成長させた場合の成長層のキャリア濃度は、ホール係数の測定から求めると $1.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ で容量法から求めた値 $1.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ときわめてよく一致している。

図 4.4 は図 4.2 に示した GaAs エピタキシャル結晶 (384 SN-3) のへき（劈）開断面写真で、 n^+ 基板上に 9.0 μm の緩衝層を、さらにその上に動作層となる n 層を 5.8 μm 成長させたもので緩衝層、動作層の厚みは一様で平たんであることがわかる。

次に Te をドープした場合について述べる。

図 4.5 は (Ga+GaAs) 溶液中に添加した Te ドープ GaAs 結晶（キャリア濃度 $7 \sim 8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ）の量とエピタキシャル成長層のキャリア濃度との関係を示す。キャリア濃度と Te ドープ GaAs 結晶の溶液中への添加量との関係は $10^{14} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の範囲にわたってほぼリニアであることがわかる。ちなみに (Ga+GaAs) 溶液約 5 g 中に 100 μg の Te 単体をドープした場合は $5 \sim 6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度のエピタキシャル層が得られる。したがって、キャリア濃度 $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ のエピタキシャル層を得るには 1～10 μg 以下の Te を添加しなければならない。通常の方法では 1 μg 程度の測定は困難である。Te ドープ GaAs 結晶を用いれば、ガンダイオード、インパットダイオードに用いる低キャリア濃

LSN-61 (Sn doped wafer) 成長温度 800°C
Si doped substrate



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1		1.60	1.65	1.70	1.80	1.65	1.70	1.70	1.65	1.65	1.70	1.55	1.90	
2		1.65	1.60	1.75	1.70	1.60	1.65	1.70	1.60	1.55	1.60	1.70	1.70	
3		1.65	1.70	1.70	1.70	1.60	1.65	1.70	1.60	1.55	1.70	1.70	1.50	
4		1.65	1.70	1.75	1.80	1.60	1.70	1.70	1.60	1.60	1.60	1.75	1.70	
5		1.60	1.70	1.75	1.80	1.65	1.80	1.85	1.85	1.70	1.75	1.70	1.60	
6	×	1.60	×	1.85	1.85	1.65	1.80	1.70	1.70	1.65	1.55	1.70	1.65	
7	1.70	1.70	1.75	×	1.85	1.65	1.75	1.70	1.55	1.60	1.5	1.65	1.80	
8	×	1.65	1.70	1.75	1.85	1.80	1.80	1.70	1.70	1.50	1.55	1.70	1.80	
9	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	

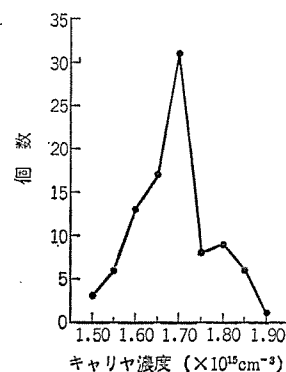


図 4.3 ウエハ内キャリア濃度分布
Lateral variation of carrier concentration.

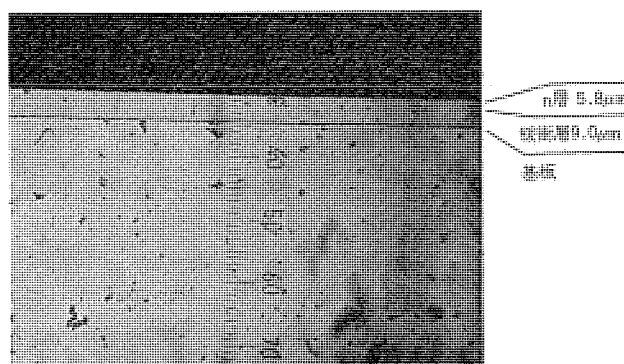


図 4.4 エピタキシャル結晶のへき開断面写真
Cross-sectional view of the epitaxial wafer.

度の結晶を容易に得ることができる。

図 4.6 は Te をドープしたエピタキシャル層上に形成したショットキバリアダイオードの降伏電圧とキャリア濃度との関係を示す。比較のために Sze ら⁽¹⁵⁾の one sided abrupt junction の降伏電圧とキャリア濃度の関係も示した（点線）。Te をドープした試料では、キャリア濃度 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ で 300～500 V のものが得られる。成長方法によってはキャリア濃度が $2 \sim 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ のエピタキシャルウエハ上に形成したキャリア濃度分布測定用のショットキバリアダイオードの降伏電圧は 600～800 V にも達する。この値は Sze らの計算値に近い値である。

以上 n 形不純物をドープした場合のエピタキシャル層の性質につい

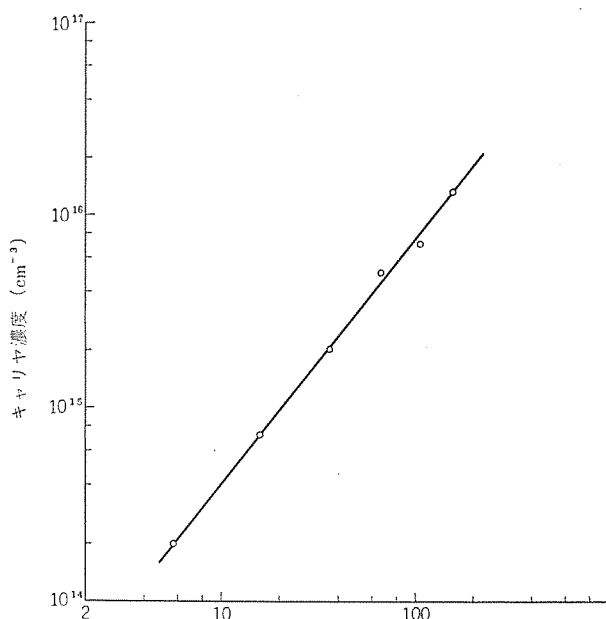


図 4.5 溶液中への Te ドープ GaAs の添加量と エピタキシャル成長層の キャリア 濃度との関係
Carrier concentration of epitaxial layer plotted against amount of Te-doped GaAs crystal into Ga solution.

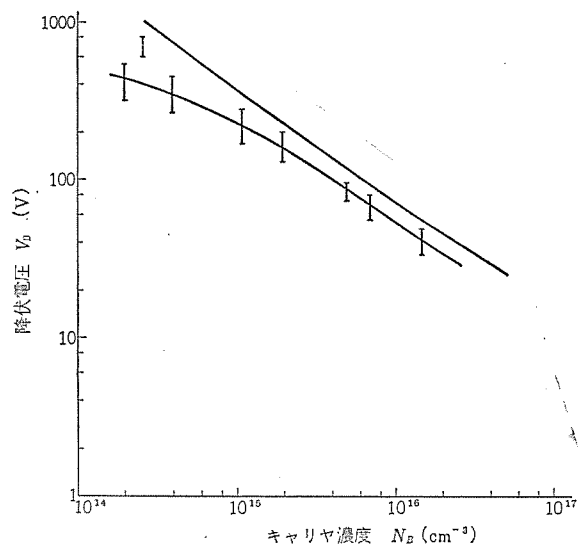


図 4.6 Te ドープエピタキシャル 層のキャリア濃度と降伏電圧の関係
Breakdown voltage versus carrier concentration.

て述べたが、次に p 形不純物をドーピングした場合について述べる。

液相成長法を利用した p 形 GaAs エピタキシャル 結晶は接合形 インパットダイオードやレーザダイオードなどの各種ダイオードに用いられてきたが、いずれもキャリア濃度の比較的高い領域 ($p \geq 10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) のものである。最近、double drift インパットダイオードやバリットダイオードが試作されているが、これらのダイオードを製作するにはキャリア濃度の低い p 形結晶 (キャリア濃度 $\approx 10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) が必要である。ここでは p 形不純物のドーピング特性について述べる⁽⁹⁾。

p 形不純物として Zn, Cd, Si, Ge 等がよく用いられるがここでは Zn, Si, Ge をドーピングした場合について述べる。

図 4.7 はエピタキシャル 成長層の キャリア 濃度と (Ga+GaAs) 溶液中に添加した Zn, Si および Ge の mol % との関係を示す。Zn, Ge については成長開始温度 800°C のみ、Si については 800°C, 750°C, 700°C の三つの温度領域について実験した。Zn と Ge の場合、

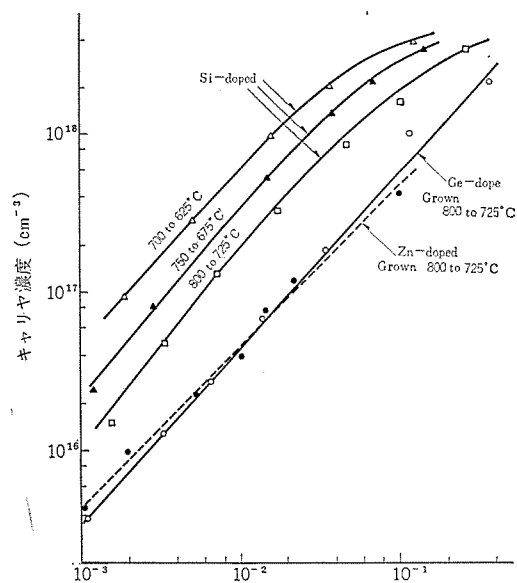


図 4.7 溶液中への P 形不純物の添加量と キャリア 濃度の関係
Carrier concentration of epitaxial layer plotted against amount of Zn, Si and Ge into Ga solution.

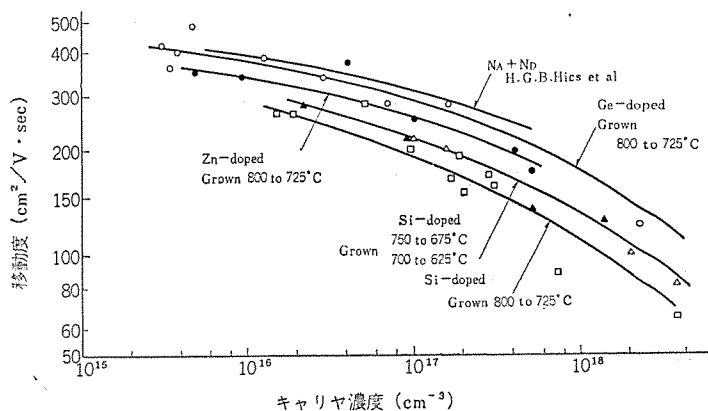


図 4.8 キャリア 濃度と 移動度の 関係
Mobility versus carrier concentration of the p-type epitaxial layer.

キャリア濃度と溶液中への不純物の添加量との関係はキャリア濃度 $10^{15} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の広範囲にわたってほぼリニアな関係にあるが、Si をドーピングした場合は溶液中への添加量が増加すると、キャリア濃度は飽和する傾向がある。Si ドープの結晶では成長開始温度が低くなるにつれてキャリア濃度は高くなる。図 4.7 から見かけ上の分配係数を求めると Zn の場合は 1.0×10^{-2} 、Ge の場合は 7.4×10^{-3} 、Si の場合は 800°C では 6.9×10^{-2} 、750°C では 1.2×10^{-1} 、700°C では 2.0×10^{-2} となる。

図 4.8 はエピタキシャル 層の キャリア 濃度と室温における移動度の関係を示したものである。実験した不純物のうちでは全濃度領域にわたって Ge をドーピングした場合が最も大きく、次いで Zn, Si ドープの順になっている。Si ドープの場合は成長開始温度が低いほど移動度は大きい。Ge をドーピングした場合、液体窒素温度でキャリア濃度 $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 移動度 $7,600 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ の結晶が得られている。Zn ドープの場合は同程度のキャリア濃度での結晶でも移動度は $3,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 程度である。Si ドープの場合はさらに低い。

図 4.9 は p 形不純物 Zn, Si, Ge を一度溶液中に添加したあと新たに添加することなく、ただ溶液の水素処理のみ行なった場合の

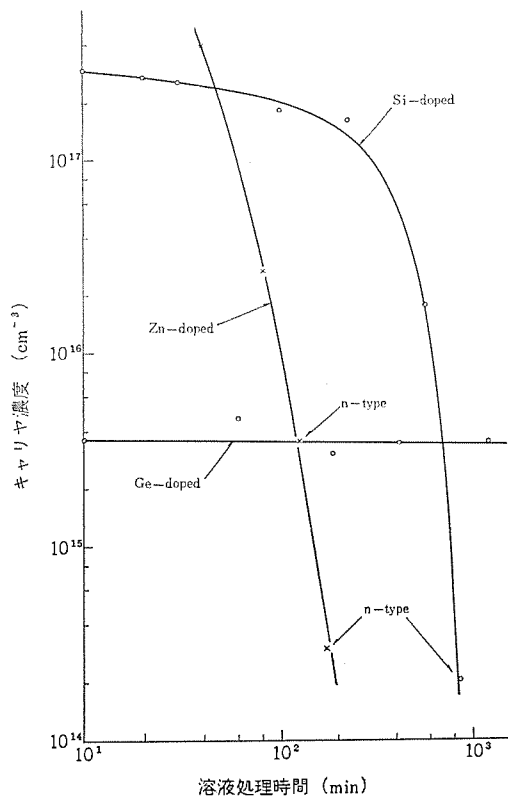


図 4.9 溶液の水素処理によるドーパントの蒸発
Heating effect of Ga solution.

エピタキシャル層のキャリア濃度の変化を示したものである。Znをドーピングした場合はキャリア濃度は急激に減少し100分程度、水素処理を行なえばn形エピタキシャル層が得られるようになる。Siの場合はZnほど急激ではないが水素処理時間を長くするにつれてキャリア濃度は徐々に減少し、ついにはn形エピタキシャル層が得られるようになる。これはZn, Siが(Ga+GaAs)溶液の水素処理によって蒸発するためであると考えられる。(Ga+GaAs)溶液の高温での水素処理はSiによる汚染を防止するのにも重要であることがわかる。Geをドーピングした場合はキャリア濃度の変化はない。以上の点を考慮すればp形ド

ーパントとしてGeが最も適している。

5. む す び

各種マイクロ波素子の固体化を進めるための重要な材料の一つであるGaAs結晶の液相エピタキシャル技術について報告した。Ga溶液を用いた液相成長法はキャリア濃度の低いものから高いものまで、所望の伝導形のエピタキシャル層を簡単な装置で再現性よく得ることができ、各種マイクロ波デバイスへの応用が期待される。

参 考 文 献

- (1) 三木, 伊藤, 織田: 三菱電機技報, 46, 1153 (昭47)
- (2) H. B. Hicks, D. F. Manley: Solid-State Commun., 7, 1463 (1969)
- (3) H. Miki, M. Otsubo: Japan J. appl. phys., 10, 509 (1971)
- (4) 三木, 大坪, 瀬川: 半導体トランジスタ研究会資料, SSD 71-47 (昭46-10)
- (5) H. Nelson: RCA Review, 24, 603 (1963)
- (6) C. S. Kang, P. E. Greene: Appl. phys. letters, 11, 171 (1967)
- (7) M. B. panish, et al.: J. phys. Chem. Solids, 30, 129 (1969)
- (8) I. Hayashi, et al.: Appl. phys. lett., 16, 326 (1970)
- (9) 大坪, 三木, 堀内: 昭和48年電気学会全国大会予稿集, 電気電子材料, 409, p. 518
- (10) L. J. van der Pauw: philips Res. Rep., 13, 1 (1958)
- (11) H. Brooks: Advance Electronics and Electron phys., p. 158 (Academic press New York, 1955)
- (12) J. Vilms, J. P. Garrett: Solid-State Electronics, 15, 443 (1972)
- (13) M. Otsubo, K. Segawa, H. Miki: Japan J. appl. phys., 12, 797 (1973)
- (14) R. Solomon: Proc. Internat. Conf. on GaAs, p. 11 (1968)
- (15) S. M. Sze, G. Gibbons: Appl. phys. letters, 8, 111 (1966)

低圧TIGアークによる高速片面溶接法

山本利雄*・島田 弥**

High Speed-One Side TIG Arc Welding at Low Gas Pressure

Manufacturing Development Laboratory Toshio Yamamoto・Wataru Shimada

One side welding at a high speed poses technical problems for the prevention of under-cut with surface beads and for the stability of back beads. Regarding the under-cut of the surface bead whether or not there is a solid surface ahead of the molten pool plays a decisive part. The authors of this article, from the viewpoint of weak plasma stream and high temperature cathode zone in low pressure arc, have made a study on the molten pool phenomena at low gas pressure and has made success in the extension of the limit of forming the normal beads greatly toward large currents and higher speeds through the control of molten metal flow inside of the molten pool. As to the back beads, it has been successful in stabilizing them greatly by making use of the characteristics of a low pressure cathode zone and shifting the arc energy to the back through the intermediate of molten metal pool of a large thermal capacity so as to form molten metal at low temperatures on the back.

1. ま え が き

アーク溶接施行の高速化は溶接技術開発上の大きな課題となっているが、技術的には高速アーク溶接時の表ビードのアンダーカット発生の防止、および片面溶接における裏ビードの安定化がその成否を支配すると考えられている。このようなビード形成に対しては、アークの熱源的特性、プラズマ気流の強さ、熔融金属の諸性質などがそれぞれ影響を及ぼしていると考えられるが、そのうちでもとくに熔融金属内部の湯流れ現象の影響が大きく、その制御が高速化の成否の決め手になると考えられる。

著者らは、すでに報告したごとく低圧ふん囲気中でTIGアークを発生させた場合に、陰極直下に高温の球状発光部が存在することを明らかにしている⁽¹⁾。この球状発光部は陰極の電極材質がたとえばタングステン、タンタルなどの高融点金属の場合にのみ発生し、その直径は120 mmHg程度のふん囲気圧力では約4 mm、32 mmHgでは約10 mmになり、圧力の低下とともに増大する。低圧アルゴンTIGアークの分光分析結果では、この発光部（以下便宜上“陰極域”と呼ぶ）はAⅡ状態にあることがわかっている。また陰極域が母板に接触した状態では、陰極域の直径に対応した接触部分が他の部分より著しく早く、しかも比較的均一に静かに熔融することから、低圧陰極域が強力なプラズマ圧力をともなわない、高温面熱源の特性を有していることが明らかである。

本報ではさらにその陰極域のエネルギー密度、加熱面積およびプラズマ気流の強さなどを調整することにより、ビード形成を制御できるとの考えのもとに、比較的板厚の薄い突合せ継手の片面溶接法についてその高速化の方策を実験的に検討した。

2. 低圧TIGアークによる母板溶融の特徴

1章で熱源としての陰極域の特長についてこれまで明らかにしてきたことを述べたが、これに加えて低圧TIGアークのもう一つの重要な特徴は、プラズマ気流が大気圧TIGに比べると微弱なことである。図2.1は、陽極水冷銅板上に直径1 mmの小穴を設け、その直上にTIGアークを発生させた場合の、プラズマ気流による母板上の圧力増加を測定した結果の一例である。母板上の圧力増加 P_d は、

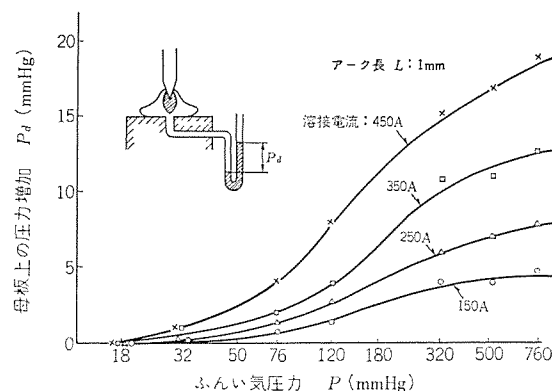


図 2.1 低圧TIGアークのプラズマ気流による母板上の圧力増加
Pressure increase on anode plate by plasma stream of TIG arc at low gas pressure.

大気圧から圧力低下とともに著しく低減し、32 mmHgでは大気圧の約1/10程度になっている。したがって、たとえば32 mmHgにおける450 Aのアークのプラズマ気流は、大気圧における150 Aのアークのプラズマ気流よりもかなり微弱なわけである。

図2.2は、固定TIGアークによる軟鋼試片の溶込み形状を圧力、電流条件に対して形態別に分類したものである。大気圧TIGの場合、100 A以下の小電流域では単純な“熱伝導形溶込み”(A)、100 A以上200 A程度の条件域では中央部から周辺方向への溶融池表面の湯流れaによって周辺へ浅く広がった“周辺形溶込み”(B)、さらに250 A以上の電流条件では強力なプラズマ気流bによりアーク直下の溶融金属が押し下げられ、アークの直接加熱作用により中央部が著しく深く溶込む“中央溶込み”(C)、へと移行する。

これに対して低圧条件では、大気圧条件と比較すると著しく大電流条件まで陰極域を面熱源とする単純熱伝導型溶込み(A)を呈しており、電流の増加とともに周辺形溶込み(B)からさらに中央下部に向かう湯流れcによる中央溶込み(D)へと変化し、プラズマ気流の押下げ作用による中央溶込み(C)は600~700 A以上の大電流条件になってからはじめて現出するようになる。

以上のように固定アークによる溶込み形態に対して、圧力、電流条件はそれぞれ特有の作用を及ぼしているが、このうち(B)の周辺

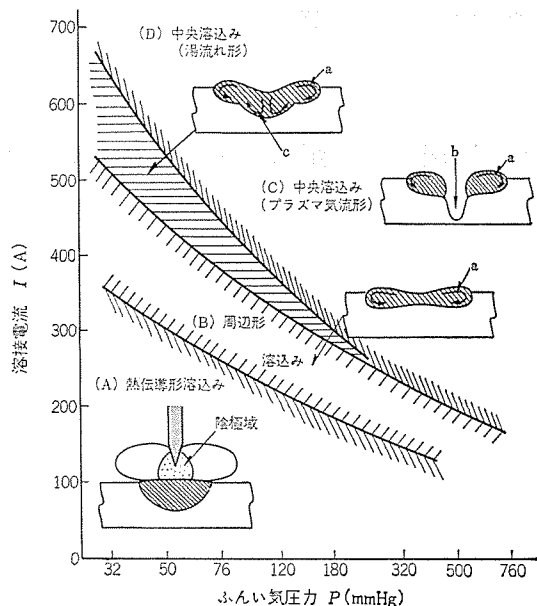


図 2.2 ふん囲気圧力と溶接電流に対する固定 TIG アークの溶込み形態の変化
Change in penetration shape with gas pressure and arc current by fixed TIG arc.

溶込みおよび(D)の中央溶込みでは、主として溶融池内部の湯流れ現象が溶込み形態を支配していると考えられる。すなわち(B)では溶融金属の表面張力流、気流の摩擦力等にもとづいて中心部から周辺方向への表面湯流れaがおこり、これによってアーク入熱が周辺部分へ運ばれるためアーク直下の溶込み深さはほとんど増大しない。むしろアーク熱源から遠い位置にある周辺部分では、高温の溶融金属流が周辺固体部を溶融・拡大しながら下方に方向を転じて深さ方向にも溶込みを拡大するため、中央部分よりも溶込みが深くなる場合もある。

このような形態(B)は熱源中央部のエネルギー密度がかなり高く、しかも周辺部も適度に加熱されて溶込み中央部と周辺部の温度差が大きくなる条件で、しかもプラズマ気流があまり強力でないような場合に形成されやすい。

また(D)の形態は高電流密度条件で、しかもプラズマ気流が強力でない場合のみ形成される形態であるが、その主体は溶融池内部の電磁ピンチ力による下向きの湯流れcであり、これによりアーク直下が溶融・拡大される。大電流条件下におけるこのような電磁流の存在については、溶融池中に異材金属をそう入して、その混入流線の方から実験的に確認しており、他にも同様の報告がなされている⁽²⁾。

図 2.2 の(D)には表面流aによる周辺部拡大と、電磁力にもとづく湯流れcによる下向き方向の溶融・拡大とが共存する状態を示しているが、熱源のエネルギー密度、加熱面積および電流密度等を制御することにより、いずれか一方のみを他方より著しく優先させ、これにより浅く広い扁平な溶込み、あるいは逆に狭くて深い溶込みを形成させることができる。これについては3章で詳述する。

なお(C)のようにアーク直下に固体面が露出するか否かは、臨界条件近傍ではきわめて不安定かつ微妙であるが、固体面が露出しない条件下で浅い周辺形溶込みであったものがひとたび固体面が出ると、急激に溶込みが深くなり中央溶込み形へと変化する。この間の変化は不連続的であり、移動ビードにおいても注意を要する現象である。

3. 高速置きビード溶接におけるアンダーカット防止の方策

薄板の片面溶接の高速化に際してまず問題になるのは、裏ビード形成の安定化の問題よりもむしろ表ビードのアンダーカットをいかに防止するかである。そこでこの章ではアンダーカットの形成現象および発生防止の方策について述べ、ついで4章において大気圧 TIG と比較した場合の、低圧アークにおける裏ビード安定化の方策について述べることにする。

3.1 低圧 TIG アークによる置きビード形成現象

大気圧および低圧条件において、電流値および走行速度を変化させた場合の、置きビード溶接におけるアンダーカット発生傾向を図 3.1 に示す。図において2本の曲線に囲まれた三角形の条件内は、正常ビードが形成される領域、左上方の小電流高速条件は母板が溶融しない領域、右上方の大電流高速条件はアンダーカットビード、さらには不均一なハンピングビードが形成される領域である。図に見るように、ふん囲気圧力の低下にとともに正常ビード形成領域が著しく大電流・高速側まで拡大されているのが明瞭にうかがえる。なお図中でハンピングビード限界および遷移領域を示してあるのは、いずれも $P=32 \text{ mm Hg}$ の場合のみについてである。

図 3.2 は正常ビードとアンダーカットビードとにおける溶融池現象の特徴を図示したものである。低圧アークでは一般に電流（または走行速度）を増すとともに、溶融池前面に固体面が次第に大きく形成されるようになるが、固体面(A域)が小さく加熱源たる陰極域の大部分が溶融池(B域)を覆っている(a)では、横方向への湯流れ(横対流)が強力に認められ、二次溶融により横方向に拡大された扁平な正常ビードが得られる(S形)。

これに対して走行速度（または電流）が大になると、湯の前一後部の表面張力差にもとづく表面流、プラズマ気流の作用などによって溶融池が後方に後退し、(b)のように前方に大きな固体面(A域)が形成されるようになって、アークが固体面に直接作用するため深い溶込みが形成されるようになる。この場合は陰極域が溶融池(B域)の前方のみを加熱するため、溶融金属は主として後方へのみ運ばれて(縦対流)、ビードの周辺部分を満たさないため、典型的なアンダーカットビード(L形)となる。

以上は比較的行走速度が早く電流値が低い条件を例にあげて説明

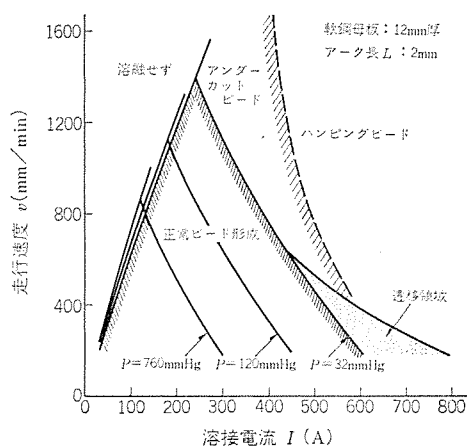


図 3.1 溶接電流と走行速度に対する移動 TIG アークのビード形態の変化
Change in bead shape with welding current and travel speed by moving TIG arc.

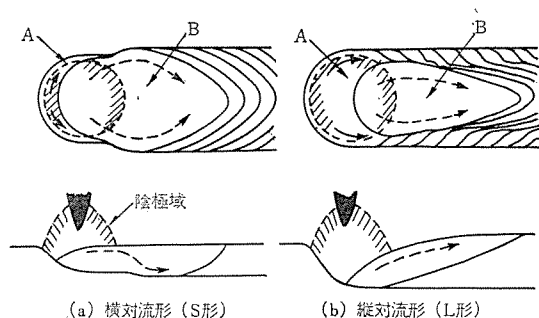


図 3.2 溶接ビードのクレータにおける溶融金属の挙動
Behavior of molten metal in the crater of the welding bead.

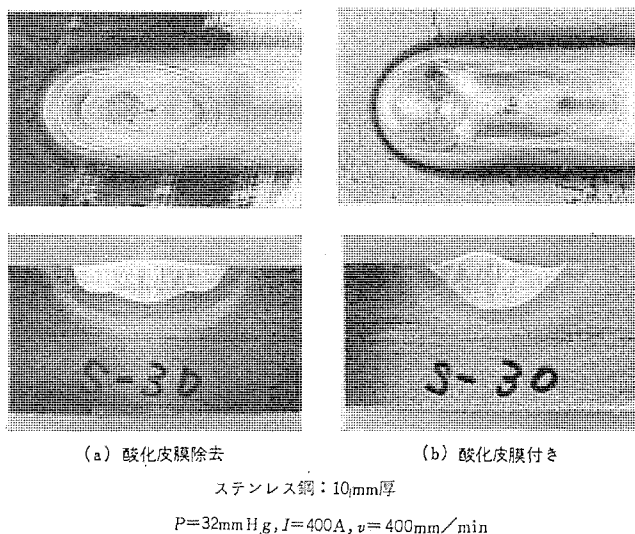


図 3.3 母板表面状況の差異によるビード外観の違い
Appearance of bead under different surface conditions.

したが、図 3.1 の右下方の遷移領域、すなわち低速・大電流の境界条件では溶融金属量が多いため、正常ビードが得られる場合には溶融金属は完全に溶融池全面をおおっており、強力な横対流により偏平な正常ビードが形成されるが、何かのきっかけで溶融池前面に固体面がわずかに形成され出すと溶融金属は急速に後退し、固体面が大きく露出して幅狭く深いアンダーカットビード、あるいはハンピングビードへと急変する。

図中の遷移領域内では上記 2 種類のビードが共存しているが、このように固体面の形成は、アンダーカットビード形成のうえで重要な役割を果たしていることが明らかである。固体面の形成およびその際の溶込み深さの増大には、プラズマ気流の作用が効果を及ぼしていることは事実であるが、同一条件下で固体面が露出しない浅い偏平ビードが形成されていることから、このような条件下ではプラズマ気流の作用と同等、あるいはそれ以上に溶融金属の物理的挙動が何らかの形でビード形成を強く支配しているのも事実である。これについては本報では詳細には述べないが、今後の検討課題であると考えている。

以上溶融金属の諸性質、とくに湯流れ特性がビード形成に大きな影響を及ぼすことを指摘してきたが、母板の表面状況によっても湯流れは左右され、これによりビード形状も影響を受ける。図 3.3 はステンレス鋼母板表面の酸化皮膜をグラインダで除去した場合と、皮膜を残した場合のビード形成状態を比較したものである。同一溶接条件でも酸化物がある場合の方が溶融金属の後退が著しく、図 3.2 (b) の L 形になっているのに対し、酸化物のない場合には溶融金属は溶融池をほぼ満たしており、(a) の S 形になっている。このような傾向は、鋼では軟鋼よりステンレス鋼の方がより顕著である。この

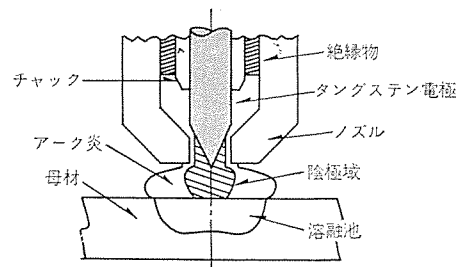


図 3.4 ノズルによる陰極域の拘束
Constriction of cathode zone by the nozzle.

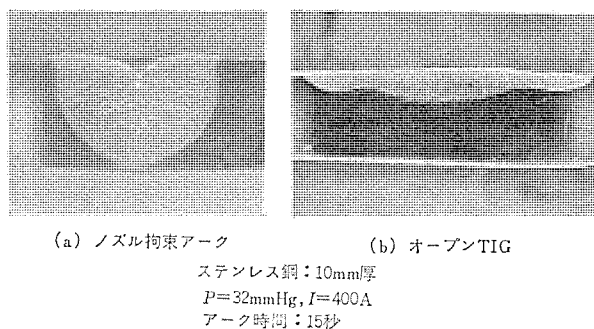


図 3.5 熱源特性による溶込み形状の差異
Penetration shapes depending on the character of heat source.

場合酸化皮膜の有無にかかわらず A 域のプロファイルには大した差異はなく、B 域の形状に極端な差を生じている。酸化物の添加による表面張力、粘性—温度の関係はさだかではないが、酸化物の存在は結果として後方への湯流れを助長すると考えざるを得ない。また、母板を予熱した場合には、正常ビードの得られる条件範囲は著しく大電流・高速側に拡大される。これは溶融池 B 域の前半—後半部間の温度差が小さくなって溶融池後方への湯流れが緩和され、溶融池の後退現象が抑制された結果として理解できる。このような大幅な条件域の拡大は大気圧 TIG の場合には認められないところで、プラズマ気流がビード形成の主導権をとる大気圧の場合とはビード形成機構が大いに異なるわけである。

3.2 低圧アークのノズル拘束によるビード形成の制御

溶融池現象に及ぼす陰極域のエネルギー密度および加熱面積の影響を検討するため、および置きビード溶接高速化の方策を検討するため、図 3.4 に示すような構造のトーチを用いて陰極域の拘束およびエネルギー密度の向上化をはかった。拘束ノズルの使用により陰極域の半径が小さくなるとともに、外周アーク炎の半径も著しく収縮した。また、アーク熱の一部が水冷ノズルに吸収されるため、陽極吸収熱量が多少低減するにもかかわらず、アーク発生後試片表面が溶融しはじめるまでの時間が短縮されることから、エネルギー密度が高くなっていることが明らかになった。ここに用いたトーチ構造では、ノズル内部が閉じているため、プラズマ気流の供給源がなく、このためエネルギー密度が高くなるにもかかわらず、プラズマ気流は低圧オープン TIG におけると同程度、あるいはそれよりむしろ低減している。

図 3.5 は低圧気中のオープン TIG とノズル拘束アークとによる固定溶込み断面形状を比較したものである。(b) のオープン TIG の場合には、中央部にわずかに湯流れによる溶融拡大がみられるものの、外周アーク炎の予熱効果および表面流による周辺部分の溶融拡大の効果の方がはるかに顕著であり、幅広く浅い溶込みとなっている。これに対して (a) のノズル拘束の場合には幅が著しく狭かつ深い溶込みになっている。これはひとつには外周アーク炎が著しく縮小されて周辺部の予熱作用がなくなったため、表面流が周辺部を遠方まで

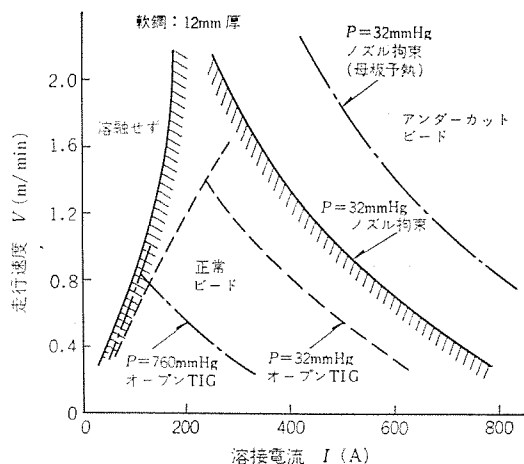


図 3.6 種々の入熱形態による正常ビードの適正条件
Welding conditions for normal bead by various heat inputs.

で浅く溶融させず、むしろ近傍部で方向を板厚方向に転換するためもあると考えられるが、断面形状からもわかるように、それ以上に高い電流密度に基づく電磁ピンチ力によって下向きの湯流れを発生し、これによる溶融拡大が表面流の影響をはるかに上回るためであると解釈される。

図 3.6 は低圧気中のノズル拘束アークおよびオープン TIG による置きビード溶接の結果を示すものである。図示のようにノズル拘束アークでは、オープン TIG アークの場合に比べて正常ビードの得られる条件は大電流・高速側に拡大されている。比較的小電流域で適正範囲が著しく高速側にまで伸びているのは、熱源のエネルギー密度が著しく向上したからである。ノズル拘束アークでは、電流密度が高くなりしかも陰極域が緊縮しており、電磁流で深溶込みが得られると共に狭く、しかも強力な表面流により溶融金属が溶融池の前方、および側方を満たしているため、固定面が現出し難く、オープン TIG の場合よりも大電流・高速条件まで正常ビードが維持されるものと思われる（プラズマ気流の多少の低減もこれに寄与している）。なお図中の鎖線は、参考までにこのようなアーク拘束下における予熱の効果を示したものであるが、オープン TIG の場合と同様、条件域は著しく拡大されている。

3.3 電極傾斜によるビード形成現象の制御

溶融池前部における固体面の露出を防止する方策の一つとして、タングステン電極を進行方向に傾斜させた場合のビード形成について検討した。この場合にも陰極域はタングステン電極の軸方向に維持されるので、この高温部は母板上では傾斜方向に末広がり状に接触する。また外周アーク炎も同様に傾斜方向に片寄って形成される。このように前進角 θ を設けると、母板上の入熱分布（および大電流条件ではプラズマ気流の方向も）が変わるため、傾斜方向への表面流は反対方向へのそれに比べて顕著になる。これと同時に溶融池内の電磁流も前向きになるので、結局溶融金属は常に前向きの力を受けることになり、前にのべた表面張力流やプラズマ気流に起因する溶融池の後退、およびそれに伴う固体面の露出を防止することができる。図 3.7 は大電流条件下の固定および移動の傾斜アークによる溶融池内の湯流れの状況を示したものである。実験ではステンレス鋼母板中に、あらかじめ直径 1.6 mm のニッケル心線を埋め込んだ後溶接を行ない、消弧後化学エッチングによりニッケルの流線を求めているが、ニッケルの流線および滞留域の状況から上述の湯流れ状況が確認できる。

図 3.8 は電極を傾斜させた場合の電流、走行速度に対する表ビ-

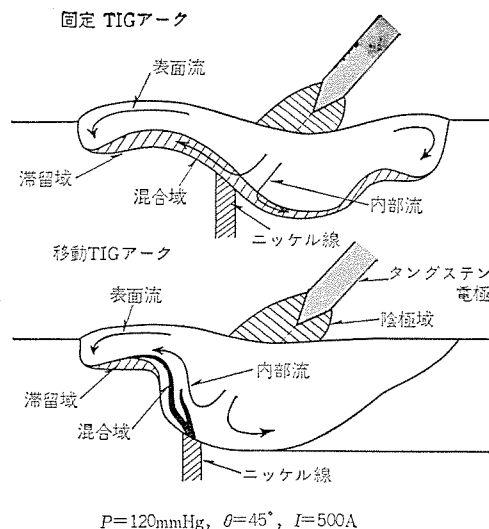


図 3.7 トーチ傾斜下における溶融池中の金属の挙動
Behavior of molten metal in the molten pool under inclined torch angle.

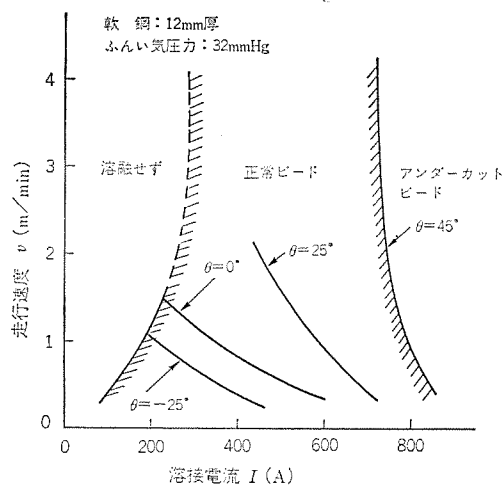


図 3.8 種々のトーチ傾斜角における正常ビードの適正条件
Welding conditions for normal bead under various inclined torch angles.

ドのアンダーカット発生限界を示す。図のように前進角 θ の増大とともに、正常ビードの得られる条件範囲は著しく拡大される。とくに注目すべきは、前進角の増大に伴って走行速度に対する条件裕度が急激に大きくなり、たとえば $\theta=45^\circ$ の場合には限界条件がほぼ電流値によってのみ決まるような傾向をみせることである。この場合にも、前方への湯流れにより溶融池前面は溶融金属で満たされているが、電流増大にともないプラズマ気流も増大するので、遂にはアーク直下に固体面が露出するようになり、溶融金属の対流形態が変化してアンダーカットあるいはハンピングビードになる。先にも述べたように、薄板片面突合せ溶接の高速化には、裏ビードの不整よりもむしろ表ビードのアンダーカット形成が成否を支配する。このアンダーカット発生限界は、低圧 TIG アークで電極を前方に傾斜させることにより、たとえば 1.5, 0.6 mm 厚 ステンレス鋼板の溶接の場合、大気圧 TIG における 1.2, 3.0 m/min の溶接速度限界を、3.0, 10.0 m/min 以上に増大が可能である。

以上に述べたように、アンダーカット防止には、溶融池前面の固体面の形成を防止する必要がある、それにはふん囲気圧力を低下させてプラズマ気流を微弱化させるとともに、母板表面上の酸化皮膜の除去

および母板の予熱等により、表面張力流に起因する溶融金属の後退を防止する方法も有効である。さらにノズル拘束によりプラズマ気流を低減せしめた状態で、陰極域を収縮させてエネルギー密度および電流密度を高め、電磁流および強力な周辺流を形成させる方法、および前進角を設け溶融金属を後方へ押しやる方法などにより、正常ビード条件域を著しく拡大することができた。

4. 片面溶接における裏ビードの安定化

一般に片面裏波溶接においては、(1)いかにして裏面まで溶融させるか—すなわちいかにして入熱を裏面まで持ちきたすか—という問題と、(2)裏面まで溶融した金属の重量をささえて、いかにして良好な形状の裏ビードを安定に形成させるかの二点が技術上の重要な問題点であるが、この二点に対して低圧アークの特性を有効に作用させようと考えられる。

板の表面側に与えられた入熱をいかにして裏面側に移行させるかということについては、一般につきの3種類の形態が考えられる。

まず(1)小電流の溶接条件では、母板内部の熱伝導により裏面の溶込みが得られるが、この形態による裏面の溶融は実用的には板厚が薄い場合に限られ、しかも溶接条件のわずかな変動に対して裏ビード幅が著しく変動する欠点がある。

つぎに(2)大気圧条件下のアーク溶接においては、その強力なプラズマ気流によって湯を下方へ押下げ、入熱位置を積極的に板厚下方へ持ってゆく作用をさせることがあり、場合によってはプラズマアーク溶接の場合のように、プラズマ気流によって板厚方向に貫通した穴をあけ、線熱源的な入熱形態をとることもある。この第2の形態は入熱を下方へ移行させる点ではもっとも有効であるが、プラズマ気流の押下げ力が反面溶融金属を吹き落とす作用をなすこと、およびこの形態では裏ビードの表面温度が高いため、表面張力による溶融金属保持能力が小さいこと等の原因により、裏ビード保持の安定性に欠ける難点がある。これらの形態に対して、(3)溶融池内部の湯流れ作用を利用して入熱を裏面に移行する形態が、裏ビード安定化の観点から注目されるべきであると考えている。

一般に片面突合せ溶接においては板厚を増すほど、しかも溶接速度を高めようとするほど、溶接電流値を増加させなければならない。大気圧アークにおいては、電流値の増大、したがって入熱量および入熱密度の増大にともなって、前述の各種湯流れも活発化するが、それ以上にプラズマ気流の作用が強力になって、溶融池現象に対する主体的因子となるため、継手に間げき(隙)を設けて、プラズマ気流の作用を緩和するとともに、これを表面側から裏面側への湯流れに積極的に転化・利用する場合以外は、上記湯流れ現象を有効に利用しがたい。これに対して低圧アークの場合は、前述のようにプラズマ気流が著しく微弱であるので、大電流条件の高入熱密度、高電流密度下では以下に述べるように、湯流れ現象を裏ビード形成の安定化に利用できる裕度大きい。

図4.1は3mm厚ステンレス鋼の、低圧TIG片面溶接のクレータ部を前部から順次切断した場合の横断面写真である。(b)の場合は湯流れによる溶融・拡大は、主として表ビード側のみ発生しており、裏ビード形成には有効に作用していない。これに対し(a)の場合は、クレータ前部においては、主として表ビードの拡大が行なわれているが、後半部においては表ビードとは機構を異にする裏ビード形成が認められる。

図4.2は一定走行速度の低圧アーク下で電流値を増大させて、裏

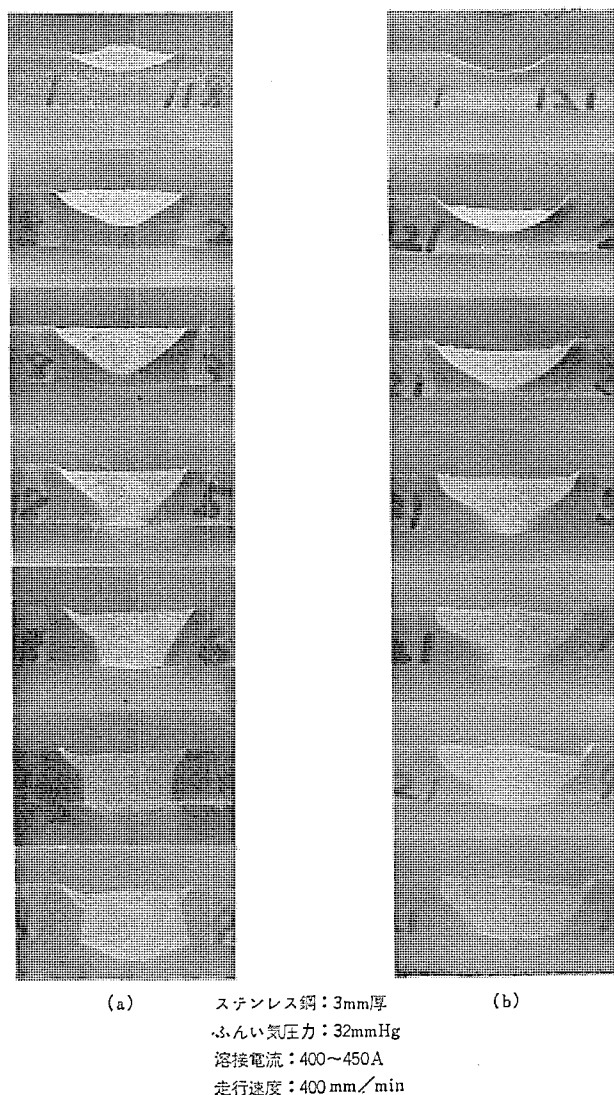


図 4.1 低圧 TIG アークによる薄板の片面溶接部の横断面
Transverse cross sections in one side welding of thin plate by low pressure TIG arc.

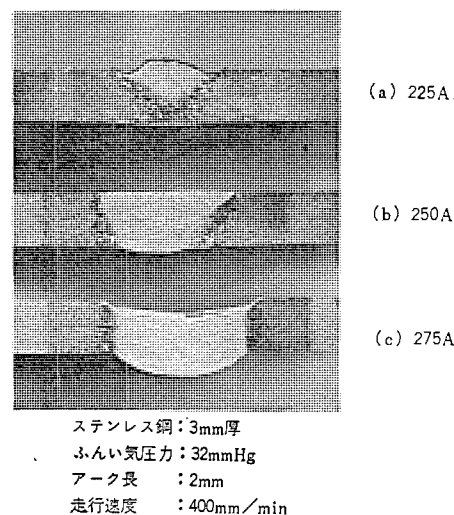
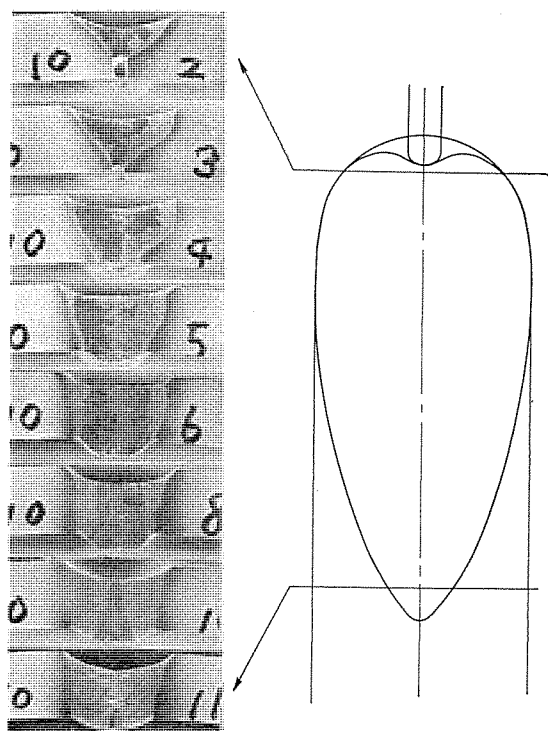


図 4.2 片面溶接の電流変化に伴うビード形状の変化
Change in bead shape with arc current in one side welding.

ビードが形成される前後の条件における横断面形状の変化を示すものである。(a)のように裏ビードが形成されない場合、すなわち置きビード溶接においてアンダーカットビードになっているものが、電流をさらに増加して(b), (c)のように裏ビードが形成されるようにな



ステンレス鋼：5mm厚、継手間けき：1.5mm
ふんい気圧力：120mmHg、溶接電流：275A
走行速度：250mm/min

図 4.3 間けきを設けた継手の片面溶接におけるそう(挿)入
ニッケル心線の流動模様

Metal flow pattern of inserted nickel wire in one side welding of gap joint.

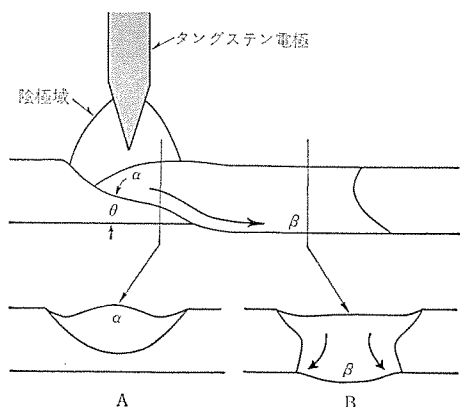


図 4.4 低圧気中の片面 TIG 溶接における溶融金属の挙動
Behavior of molten metal in one side TIG welding at low gas pressure.

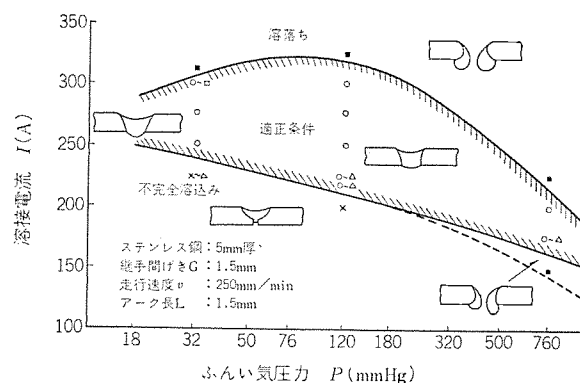


図 4.5 間けきを設けた継手の片面溶接における
ふん囲気圧力に対する適正条件

Welding conditions in one side welding of gap joint at various gas pressures.

ると、表ビードのアンダーカットは逆に消滅する。このことから、表ビード内の縦対流のかかなりの部分が裏ビード側への湯流れに変化をしていることが推測される。

図 4.3 は間けきを設けた突合せ継手の低圧片面溶接において、前方よりニッケル心線をそう入した場合のクレータ部分の横断面形状であるが、ニッケル心線の混入部位(黒い部分)の変化から、クレータ前部の表側からクレータ後部の裏側への湯流れの存在が確認されるわけである。

以上の低圧片面溶接における裏面湯流れの状況を模式的に示したものが図 4.4 であるが、アーク直下の α 部分ではアーク熱により主として表側が加熱されて、高温の溶融金属が形成される(A位置)が、その溶融金属は未溶融部を溶融・拡大しながら後方へ流れて裏ビード β を形成する(B位置)。すなわち表側に与えられた入熱が熱容量の大きい溶融金属を媒介として、湯流れによって裏側に運ばれるのがこの形態の特徴といえるが、このため条件の微少な変動に対して本質的に安定化する長所がある。

このように湯流れが主体になって裏ビードが形成される状態では、溶融池前面にゆるい固体傾斜角 θ を形成するので、保持されにくい高温の溶融金属の重力およびプラズマ気流の押下げ力はこの固体面で受けとめられる。裏側の β 部は湯流れによって溶融・拡大されるため、溶融金属の温度は当然低下するので、裏ビードの表面張力が増して湯の保持力が増すうえに、裏ビード幅は微小な条件変動に対してほぼ一定に保たれるという利点がある。

ではこのような湯流れの原因力はどういう機構で与えられているかについて考えてみる。先に図 4.2 に示したように、表ビード内の縦対流の一部は裏ビード形成に寄与しているが、この場合には溶融池前面に深い固体面が形成されており、溶落ちの危険性が大きいのでこれを積極的に利用し難い。また図 4.1 の(b)に示したように、表ビード内で発生する幅広い横対流は、必ずしも裏ビード形成に役立っていない。これらに対して前述のように低圧アークをノズル拘束した場合には、電磁ピンチ力により板厚方向の湯流れが生じるとともに、表面流も方向転換によって板厚方向の溶込みを助長するので、湯流れによる裏ビードの形成には当然のことながらもっとも適した形であると判断されるが、事実以下に述べるように、これにより片面裏波溶接条件裕度は著しく拡大される。

図 4.5 は継手間けき(隙)を設けた突合せ継手を、各圧力条件下で溶接した場合の条件裕度を示すものである。大気圧では強力なプラズマ気流の吹き落と作用のため条件域は狭いが、低圧条件では著しく広がっている。図 4.6 および図 4.7 は、低圧オープン TIG とノズル拘束 TIG とを走行速度、および継手間けきに対する条件裕度の観点から比較したものであるが、湯流れによる裏ビード形成により条件裕度は、ノズル拘束 TIG において著しく拡大されているのが明瞭にうかがえる。なお図 4.6、4.7 中のオープン TIG の場合に、大電流条件にもかかわらず不完全溶込みになっている領域 B があるが、これは電流増大にともない表ビードの表面流のみが強力になって幅広い溶込みとなり、溶込み深さがかえって減少したためである。

以上に述べたように、プラズマ気流が微弱な低圧アークにおいて、表側から裏側への湯流れ現象を制御・利用し、湯を媒介として入熱を裏面に運ぶことにより、片面裏波溶接を大気圧条件より安定に行なわせることを明らかにした。

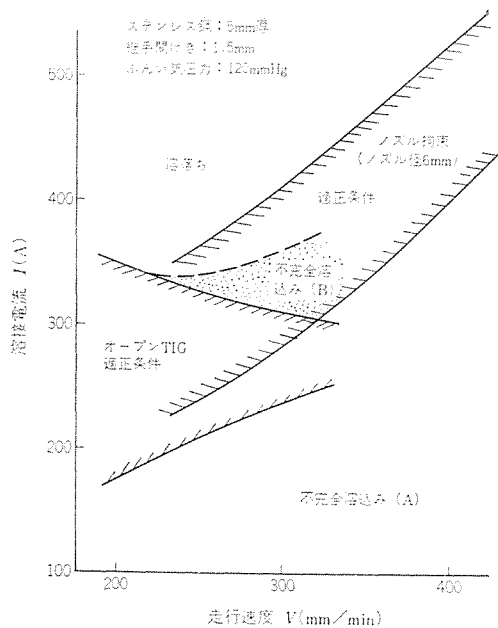


図 4.6 走行速度に対するオープン TIG とノズル拘束 TIG の間けき継手の片面溶接条件
One side welding conditions of gap joint by open TIG and constricted TIG under various travel speed.

5. む す び

片面溶接の高速化には、表ビードのアンダーカット防止および裏ビードの安定化が技術上の問題になるが、これに対してプラズマ気流が微弱で、しかも陰極直下に高温陰極域が形成される低圧 TIG アークの特性を適用できるとの考えのもとに研究を進めた。

まず大電流条件下の低圧アークによる溶融池現象の観察を行ない、プラズマ気流が微弱な低圧下では、表面張力および気流の摩擦力にもとづく表面流、および電磁ピンチ力にもとづく内部流の2種の湯流れが溶込み形成の主因となることを明らかにした。

ついで片面溶接の高速化の成否を支配する表ビードのアンダーカットについて現象的に検討を行ない、表面張力流および気流の摩擦力による湯の後退、およびそれにもとづく固体面の露出がアンダーカット形成の決め手となることを見出した。さらに陰極域をノズルで拘束することにより電磁対流を促進させる方策、トーチ前進角を設けて溶融金属を前方に押しやる方策、などによって固体面の露出を防止する

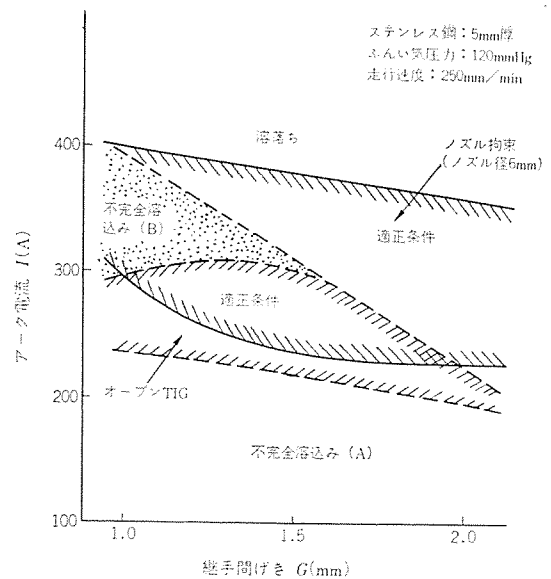


図 4.7 継手間けきに対するオープン TIG とノズル拘束 TIG の片面溶接条件
One side welding conditions by open TIG and constricted TIG under various joint gap.

ことにより、10 m/min 以上の高速条件下でも正常な表ビードを形成させることができた。

さらに裏ビードの安定化については、プラズマ気流の微弱な低圧陰極域の特性の制御により、表面から裏面側への湯流れを促進させ、熱容量の大きい溶融金属を媒介としてアーク入熱を裏面に運ぶことにより条件裕度の拡大を可能にした。この場合、湯流れによる裏面側の溶融・拡大により溶融金属の温度が低下して、表面張力による保持力が増すこと、およびプラズマ気流の吹き落とし作用が微弱なこと、などの理由により大気圧条件よりも裏ビード形成を著しく安定化させ得た。

最後に本研究の遂行にあたり、大阪大学工学部 西口公之教授のご指導を受けました。誌して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 山本ほか：三菱電機技報，45，No. 6，727～735（昭46）
- (2) R. A. Woods and D. R. Milner：Welding Journal，50，No. 4，163-S～173-S（1971）

各種試験法による絶縁材料の耐トラッキング性

平林 庄司*・川上 剛*

Tracking Resistance of Insulation Materials
According to Various Test Methods

Manufacturing Development Laboratory Shôji Hirabayashi・Takeshi Kawakami

When organic materials used for insulation outdoor at high voltage, their tracking resistance with the changes of environmental conditions plays a vital part. This article describes the results of comparative studies on the tests of tracking resistance with a variety of materials. Investigation has been made on the surface temperature when the tracking occurs by using the dip track test method which is considered satisfactory. It has been revealed that this test represents very well the tracking phenomena anticipated from the chemical construction of epoxy resin. Also it has been attested that this method well corresponds to outdoor exposure tests conducted for five years.

1. ま え が き

高分子材料を高電圧・屋外化に適用する場合、環境条件の悪化に伴い、絶縁材料の耐トラッキング性が重要になってきた。これら材料の耐トラッキング性の試験法としては、各種の試験法があり、学会の専門委員会でも検討され⁽¹⁾⁽²⁾、IEC法⁽³⁾、DIN法⁽⁴⁾に準拠した方法が推奨されているが、耐トラッキング性のすぐれた材料が開発され使用されている現在、必ずしもその評価能力および実際の対応性に関し満足するものではないのが現状である。ここでは、まず一般によく使用されている各種耐トラッキング性試験法を比較検討した結果について言及し、その結果、材料の耐トラッキング性選別試験としては有用な方法であると考えられた、DIP TRACK試験法⁽⁵⁾については、トラッキング破壊機構の解明の手段として、発生時の表面温度の検討ならびに化学構造上との関連性について検討した結果を述べる。さらに耐トラッキング性判定基準の確立という観点から、これら材料の試験結果と、5年間の屋外課電暴露試験結果との関連性について検討した。

2. 各種耐トラッキング性試験法の比較

有機材料の耐トラッキング性試験方法はすでに約20年も前から種々提案されてきたが、まだ完全な方法が決定されるまでに至っていない。試験法としては、1) 実際使用上の結果とよく対応する。2) 再現性がよい。3) 処理が簡単で短時間で得られる。4) 装置、設備費が安い。などの要因が満足されるべきであるが、決定的な試験法が確立されない最大の理由は上記1)項で、実際使用条件時の複雑な現象を一つの試験法で推定できないためである。今回、これらの意味から代表的と考えられる下記の耐トラッキング性試験法の比較を行なった。

2.1 電気学会標準法⁽³⁾

IEC法に準拠した方法で、電解液50滴で破壊する電圧を比較トラッキング指数(CTI)とよび、トラッキング性を表示するもので、CTI 600以上は評価不能である。この方法は、再現性もよく世界で広く採用されている試験法であるが、一般に評価能力がせまいといわれている。

2.2 電気学会簡易法⁽¹⁾

電解液を100滴まで滴下し、破壊までの滴下数で判定する。DIN・KA法⁽⁴⁾に準じている。すなわち1~10滴でトラッキング破壊するのは、KA₂、101滴で破壊しないものは、最大浸食深さでKA_{3a}(2mm以上)、KA_{3b}(1~2mm)、KA_{3c}(1mm以下)と判定するもので、試験は簡便でありヨーロッパでは非常に古くから採用されている試験法であるが、やはり評価能力は低いとされている⁽²⁾。

2.3 Dust/Fog法⁽⁶⁾

試料表面に合成ダストをふりかけ、スプレーにより雨をふらせ破壊までの時間で判定する方法で、実際の対応のよい方法とされている。しかし試験の調節がめんどろで、評価時間もかかるという欠点がある。

2.4 高電圧小電流耐アーク性試験法⁽⁷⁾

通電電流、通電間隔等、エネルギーを変えて放電させ、アークで試料表面が炭化するまでの時間で判定するもので、他の試験法のように不純物、もしくは電解液等で表面を汚損させてシンチレーションを中心にトラッキングを起こさせる、いわゆる湿った状態での試験法とは異なり、Dry arcによる方法であるが、トラッキング試験法としても相当広く用いられている。

2.5 Differential Wet法⁽⁸⁾

小さな試料に1.5φのきり穴をあけ、その小孔に毛细管現象により上ってきた電解液と電極間に放電させ、その放電エネルギーを順次上げていき、破壊時の電力レベルと時間WT(Watt Minute Tracking Index)で判定する。

2.6 Dip Track法⁽⁵⁾

図2.1、2.3に示すように、試料片に45°の角度でとりつけた1φのニクロム線を高圧側電極とし、低圧側電極である電解液(0.1% NH₄Cl+表面活性剤0.5%)に4rpmの早さで上下に浸漬する。判定は回路抵抗を一定(30kΩ)に固定した条件で、電圧一破壊浸漬特性を求め、平均25回で破壊する電圧をDip Track Voltとして表示し判定する。この方法は電極間隔がかわり、間隔のせまいとき、すなわち、ニクロム線が液に出入りする際に放電が生じ、距離がある程度はなれると、表面にシンチレーションが起こるといった、放電とシンチレーションの両方が試料に加わり、評価範囲、試験時間、再現性も比較的良い。なお、Dip Track試験条件そのものは統一されていない。

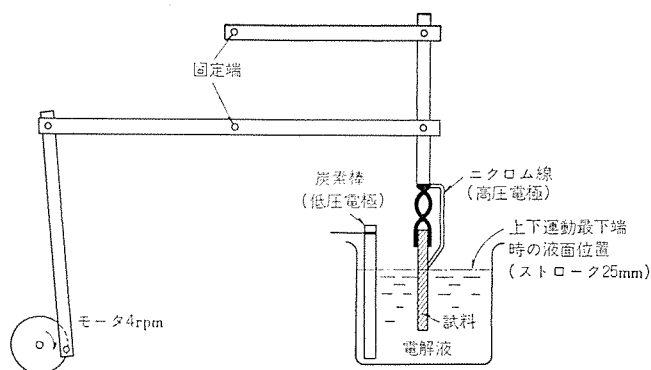


図 2.1 Dip track 法の機構部
Mechanical schematic of Dip track test method.

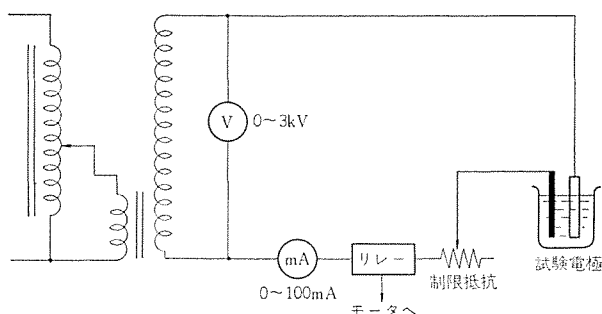


図 2.2 Dip track 法の回路図
Electrical schematic of Dip track test method.



図 2.3 Dip track 法電極
Electrodes of Dip track test method.

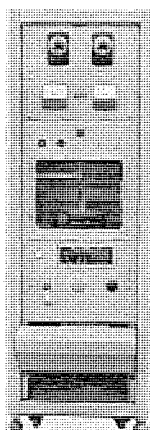


図 2.4 Dip track 法測定装置
Measuring equipment of Dip track test.

表 2.1 各種試験法による耐トラッキング性
Tracking resistance of insulation materials according to test of various types.

試料		耐トラッキング性					
		学会標準法 IEC (C.T.I.)	簡易法 DIN	DIP法 (kV)	DUST & FOG法 (hour)	WET法 (Watt-min)	ASTM 耐アーク (s)
熱硬化性材料	フェノール	120	KA ₁	1.0	0.1	0.093	6
	紙-メラミン	>600	KA _{3c}	>3.0	3.8	0.867	73
	ガラス-メラミン	595	KA _{3c}	2.3	3.5	2.74	182
	ガラスマット	375	KA ₂	1.8	9.8		
	ポリエステル エポキシ-ガラス	150	KA ₁	1.0	0.4	0.105	12
	シリコン-ガラス	585	KA _{3c}	2.0	1.5	1.8	245
	ブリミックス	>600	KA _{3c}	2.4		1.46	183
熱可塑性材料	PVC	>600	KA _{3b}	0.7	0.7	0.187	6.7
	ポリスチレン	365	KA ₂	1.5	0.3		95
	ポリエチレン	378	KA ₂	1.5	0.3		95
	ポリカーボネイト	260	KA ₁	0.7	0.2	0.348	51
エポキシ樹脂	828/DDM	>600	KA _{3c}	0.9	0.15	0.0413	32.4
	828/MNA	>600	KA _{3c}	1.5	0.16	0.086	10.4
	828/DTA	>600	KA _{3c}	2.4	1.8	0.174	82
	828/HHPA	>600	KA _{3c}	2.9	2.0	0.175	98.2
	CX 206/HHPA	>600	KA _{3c}	>3.0	>1,000		
	CY 175/HHPA	>600	KA _{3c}	>3.0	>1,000		

くて、種々検討され報告されているが⁽²⁾、当社では、表面のぬれの効果として、表面活性剤（アルキルナフタレンスルホン酸ソーダ）0.5%添加することにより、データのバラツキが少なくなり評価能力が上がる⁽⁹⁾、回路電流についても、各電圧で30mAに調節する、いわゆる定電流方式で評価しているという報告もあるが⁽¹⁰⁾、回路抵抗を一定（30kΩ）にした定抵抗式、測定操作が簡単で、試験電圧による放電エネルギーを大きくとれる点、また、電圧-浸漬回数曲線の立上りが急激なためトラッキング電圧が求めやすい長所があり⁽¹¹⁾、上記試験条件による本方式を、昭和41年より当社の材料の標準耐トラッキング性選別試験法として採用している。装置の写真を図2.3、2.4に示す。

各種試験法による各材料の試験結果を表2.1に示す。この結果よりわかるように、ここで取り上げた試料の数も多いとはいえないし、また、トラッキング性も、良好なものから悪いものまで一様に網羅していなくて、比較的トラッキング性の悪いものが多いで、明確な関係は見出せていないが、大略の傾向は認められる。すなわち、Dust/Fog法が実用との対応がよいと仮定して、本方式を基準に各試験法を比較すると、学会標準法は評価される最高のトラッキング性を示すCTI600以上の材料でも、シクロ系エポキシを除けば、Dust/Fog法で0.15~数時間程度であり、評価範囲はせまい。学会簡易法も同様で、Dust/Fog法で簡単にトラッキング破壊を起こしてしまう材料でも、トラッキング発生なしと判定され、その評価能力は低い。

耐アーク性試験結果も耐アーク性の非常に弱い材料については、特に問題はなく、かなりよい対応を示すが、Dust/Fog法で数時間程度の耐トラッキング性を有する材料になると、耐アーク性結果とトラッキング性との関係は薄いように思われる。湿潤汚損状態で使用される場合のトラッキングに対して、これらのドライアークによる結果との関連性は少なく、この試験法で判定すべきではないとの報告があるが⁽¹²⁾、筆者も同意見である。

Differential Wet法とDust/Fog法との間には、

$$[\text{Dust/Fog法}(\text{hours})]^{0.73}$$

$$=[0.55 \times \text{Differential Wet法}(\text{Watt-minute})]^4$$

という関係があるとの報告があり⁽¹³⁾、また、他の文献でも屋外暴露との関連性がよいことが報告されている⁽¹²⁾。今回のデータのかぎりでは、かなりよい対応がみられるようであるが、比較的トラッキング性の悪い材料のみであるので、さらに検討の必要があろう。

Dip法とDust/Fog法との関連を図2.5に示す。図から明らかのように、またデータ不足の点と、評価能力が少し狭いのではないかという感じはするが、比較的良い対応が得られている。

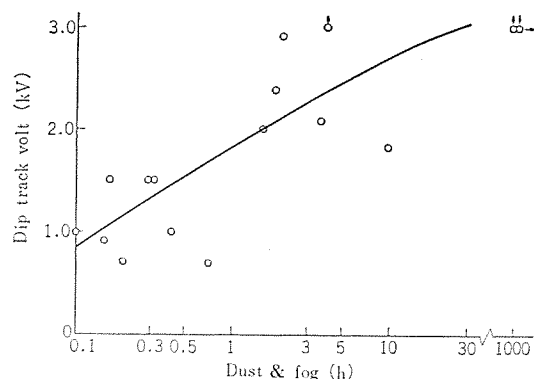


図 2.5 Dust & Fog法とDip trackとの関係
Relation between Dip track voltage and Dust/Fog hours.

3. Dip Track 法による検討

3.1 表面温度の測定

トラッキングの発生が、熱分解による炭化反応だけでなく、汚染物、水分などの触媒効果、荷電粒子によるふん囲気中の分子の励起など、種々の要因がからんでいるが、主体はあくまで熱分解であろうと考えられるので、インフラビジョン (IRV) で直接試料表面温度を測定した。測定原理は図 3.1 に示すように、温度を有する物体からの赤外線

検出器: InSb
使用赤外線波長: 2~5.5 μ
瞬間視野: 約 1 ミリラジアン (固定測定: 1 mm ϕ)
測定温度範囲: 常温~800°C

測定箇所は高電圧電極であるニコム線と液面が 1~2 mm 程度になり、この間に放電が生じている付近の最高温度を測定した。この放電時の試料表面の状態は、電圧により電解液が対流により、電極間でかなりの速さで動いており、放電状態にあっても、試料表面はわずかにぬれている。測定は固定焦点で測定しており、したがって測定視野は 1 ϕ である。測定温度は高圧電極であるニコム線や放電アークは直接測定せず試料物体表面の温度を測定している。試験条件は 2.6 節で述べた条件で、測定結果を図 3.2 に示す。

試料表面がわずかにぬれている状態であるにもかかわらず、Dip 法では、最高 575°C に達しており、有機材料の炭化温度 (300~500°C) を越えており、炭化が材料の熱分解温度により決まるという考え方⁽¹⁴⁾をまつまでもなく、炭化するに十分な高い温度になっている。Dip 法によるトラッキング発生は、測定箇所の最高温度付近のみでなく、周辺のシンチレーション部でもトラッキングは発生しているが、その

発生箇所が安定しないためもあるとあって測定は行っていない。

3.2 エポキシ芳香環と Dip 法との関係

Parr らは⁽¹⁵⁾、トラッキング性を化学的な見地から、有機絶縁物の結合エネルギー (ΔH_{cpd}) を、炭化されやすい結合 (ΔH_c) と、気化されやすい結合 (ΔH_v) とにわけ、材料の原子団から炭素が脱出することの難易さから、すなわち、 $\Delta H_c/\Delta H_{cpd}$ の値によって、トラッキング性を推定した。

そこで、草川、橋本氏らは⁽¹⁶⁾、エポキシ芳香環とトラッキング性の関係を、前記した 2.1 節の学会標準法と、2.6 節の Dip 法を用いて検討した。用いた材料組成、配合および芳香環数、 $\Delta H_c/\Delta H_{cpd}$ を表 3.1 に示し、芳香環数と Dip Track 電圧の関係を図 3.3 に、Dip track 電圧と $\Delta H_c/\Delta H_{cpd}$ の関係を図 3.4 に示す。これらの結果より芳香環をもつエポキシ樹脂の Dip 法によるトラッキング性が、芳香環や $\Delta H_c/\Delta H_{cpd}$ と強い相関をもっていることがわかる。すなわ

表 3.1 エポキシ樹脂試料の組成
Effect of formulation of epoxy resins.

試料 No.	試料組成					トラッキング性	
	エポクロン 200	エポクロン 400	PA	HHPA	DY-065	芳香環数	$\Delta H_c/\Delta H_{cpd}$
1	100(Wt)	—	80(Wt)	—	5(Wt)	36.6	0.470
2	70	30	80	—	5	32.1	0.456
3	30	70	80	—	5	26.9	0.436
4	—	100	80	—	5	22.8	0.424
5	100	—	56	24	5	29.9	0.445
6	100	—	24	56	5	20.6	0.406
7	100	—	—	80	5	13.8	0.382
8	70	30	56	24	5	25.3	0.431
9	30	70	24	56	5	11.0	0.377
10	—	100	—	80	5	0	0.366

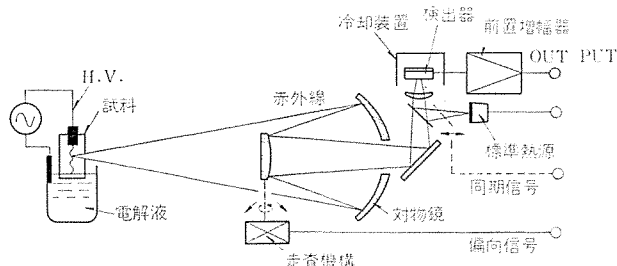


図 3.1 IRV 原理図
Diagram of IRV.

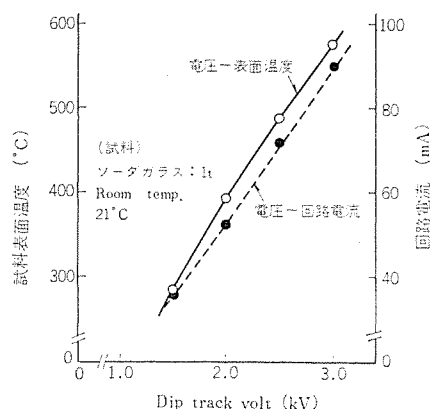


図 3.2 Dip track 電圧と表面温度の関係
Relation between Dip tracking voltage and surface temperature.

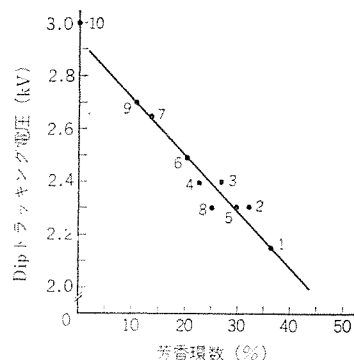


図 3.3 芳香環数と Dip トラッキング 電圧の関係
Dependence of Dip tracking voltage on amount of aromatic rings.

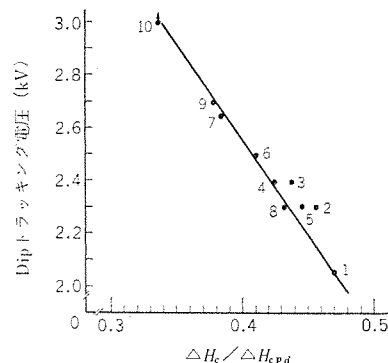


図 3.4 $\Delta H_c/\Delta H_{cpd}$ と Dip トラッキング 電圧の関係
Dependence of Dip tracking voltage on $\Delta H_c/\Delta H_{cpd}$

ち硬化したエポキシ樹脂のトラッキング性は、芳香環の数によって耐トラッキング性の高いものから、低いものまで得られる。逆にいえば、図 3. 4 の関係から、必要とするトラッキング性を有するエポキシの配合は、 $\Delta H_c/\Delta H_{cpd}$ を計算することにより、あらかじめ設計段階でコントロールできることになる。なお、学会標準法とこれら芳香環数や $\Delta H_c/\Delta H_{cpd}$ の関係については、紙数の都合で割愛するが、データのばらつき、評価順位、評価能力の広さの点より Dip 法にくらべて劣っている⁽¹⁰⁾。

4. 屋外暴露試験と耐トラッキング性試験との対応性

各種絶縁材料の耐トラッキング性寿命のはあく(把握)、材料の耐トラッキング性試験結果と実用との対応性、ならびに、耐トラッキング性判定基準の確立を目的として、昭和 43 年 6 月より屋外暴露試験を実施し、現在 5 年経過している。設置場所は神戸で、海岸より 500 m、地上より 19 m の位置にあり、南向き(南側に海がある)に試料を約 110 本設置している。屋外暴露試験状況の写真を図 4. 1 に示す。試料形状は図 4. 1 に見られるとおり丸棒状で、垂直に保持し、電極間隔 100 mm に 6.6 kV rms を印加している。ここで報告する試験期間中(43-6-3~48-6-3 までの 5 年間)の平均雨量は、3.2 mm/day、降雨ひん度は 0.47 であった。なお、降雨ひん度は、雨量計で計測できない程度の雨が降った日も計算に入れてある。試験開始約半年後のパイロットがいし(碍子)の付着物は、 SO_4^{2-} 11.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、 Cl^- 4.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、その他、じんあい、土砂、鉄粉(Fe_2O_3)などであるが、付着物は測定する時期に関係するので(すなわち、雨により洗い流されてしまうので)この値が必ずしも最大の値を示しているかどうかは不明である。

供試材料ならびに試験結果を表 4. 1 に示す。本試験に用いたクロップレングムは、高圧引下げ線で、この材料は塩害地域で約 1 年程度でトラッキング破壊して使用できなくなったという事故統計報告⁽¹⁷⁾があるし、電線会社の屋外暴露試験にも供試されており、当方の試験条件を判定する基準として、とり入れたものである。この材料は本試験では平均 26 日でトラッキング破壊しており、実用状態よりかなりシビアであると考えられる。

電気学会法と屋外暴露結果を比較して図 4. 2 に示す。これからわかるように、比較トラッキング指数(CTI) 600 以下のものは暴露 260 日以下で必ず破壊している。しかし、CTI 600 以上の材料では、5 年経過してもまだトラッキングの発生していない材料もあるが、一方では、数十日でトラッキング破壊しているものがあり、材料の評価との対応性はよくない。

Dip 法と屋外暴露試験の関係を図 4. 3 に示す。図中、ビスフェノール A 系のトラッキング性の悪いレジと、耐トラッキング性の良好なマイクロ系エポキシのブレンド系で、しかも充てん(填)剤入りの試料については、Dip 法で評価したものより、平均的に暴露試験の方が結果的に良好な傾向を示しており、一方、ガラス基材入りの試料は、Dip 法で評価した結果より悪い結果を示している。前者は長期の暴露試験の場合、エネルギーの集中度、持続性が Dip 法より少ないため、耐トラッキング性の良いレジや充てん剤のバリヤ効果が良い方向に寄与し、一方、後者の場合、表面層の樹脂が、メラミンやシリコンのかなり良好なトラッキング性を示す材料のため、表面樹脂の効果が、Dip 法には強く現われ、長期の暴露試験に対しては、樹脂の種類よりも、ガラス繊維と樹脂の界面、すなわち、ガラス繊維の収束剤の効果が強く出てきているものと考えられる。これらの点は、Dip 法の評価が、浸漬回数 25~

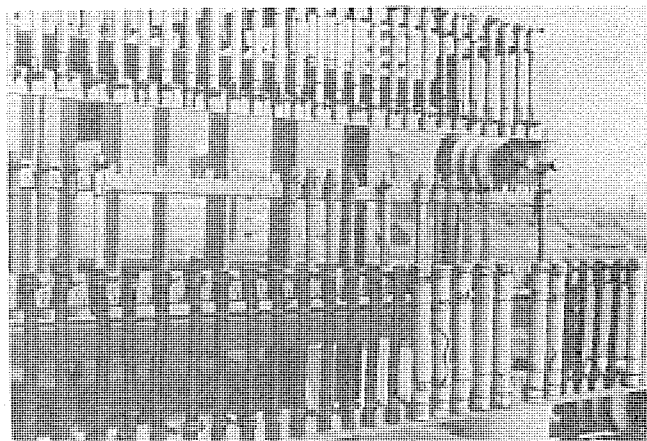


図 4. 1 屋外暴露試験状況
Out-door exposure test.

表 4. 1 耐トラッキング性試験法と屋外暴露試験法の関係
Relation between tracking resistance tests and out-door exposure test.

試料	学会標準法 (C. T. I.)	DIP 法 (kV)	暴露日数 (days)
エポキシ注形品			
ビス A・シクロ*	>600	1.8	439
ビス A・シクロ*	>600	>3.0	>1,825
ビス A・シクロ*	>600	>3.0	>1,825
ビス A・シクロ*	>600	1.6	>1,825
シクロ*	>600	>3.0	>1,825
ビス A (828/HHPA)	>600	2.9	1,150
ビス A (828/MNA)	>600	1.5	124
含浸			
シクロ-ガラス	>600	>3.0	>1,825
ビス A-テトロン	>600	1.1	6
積層品			
ビス A-ガラス	130	1.3	24
メラミン-ガラス	590	2.4	318
シリコン-ガラス	580	2.2	113
フェノール-ベーパー	130	1.2	71
ガラスマットポリエステル	310	1.8	179
成形品			
ダボ	>600	2.4	>1,825
ブリックス	>600	2.4	>1,825
ゴム			
PVC	>600	0.7	37
クロップレング	280	1.1	26
EPT	>600	>3.0	>1,825
ブチル	>600	>3.0	>1,825

4 本の平均値 * 充てん剤入り

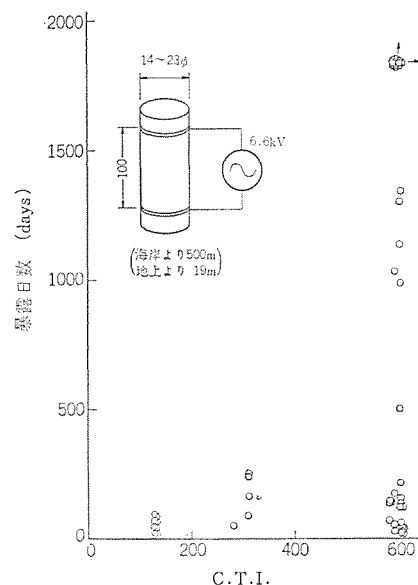


図 4. 2 学会標準法と暴露日数の関係
Relation between C. T. I. and out-door exposure time.

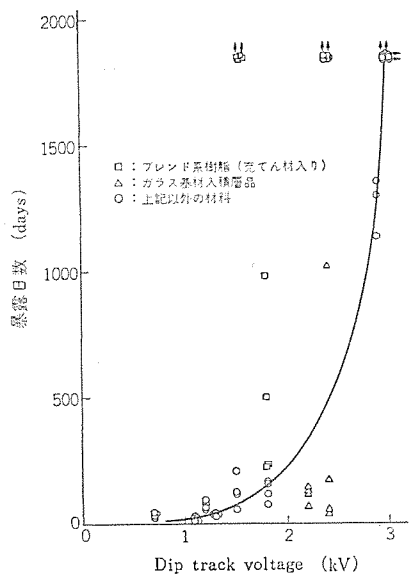


図 4.3 Dip track 法と暴露日数の関係
Relation between Dip tracking voltage and
out-door exposure time.

50 回、試験時間にして、6 分～13 分という短時間で評価しているためであろうと考えられるので、これら不均質な材料の場合、さらに浸漬回数をふやした試験条件を採用することにより、よりよい対応が得られるものと考えている。しかし、これら不均質材料の対応を別とすれば、一般のいわゆる均質材料の Dip 法と暴露試験との間には、非常に良好な対応性が認められ、この試験環境条件ならば、Dip 法で 3.0 kV の Dip Tracking 電圧があれば、トラッキング性は良好と考えてもよいと思われる。

絶縁材料のトラッキング性に関する、屋外暴露試験との関連性については、現在もこの暴露試験を継続実施するかたわら、異なった汚損環境条件との関連性、電圧、電界条件の異なった場合の対応性、耐トラッキング性の基準の考え方などを、さらに検討するため、あらたに 5カ所の屋外暴露試験を設置すると共に、要因検討のため塩水噴霧試験を行なうべく準備中（一部開始）である。稿をあらため報告したいと考えている。

5. む す び

絶縁材料の各種トラッキング性試験法の比較と、この結果比較的良好な結果を得た Dip 法について、その表面温度を検討し、この方法がエポキシ樹脂の化学構造から考えられるトラッキング性をよく表現し、かつまた、実際の屋外暴露試験との対応も比較的良好であることを示した。材料のトラッキング性試験としては、電解液滴下法による、いわゆるシンチレーションを主体とした評価法では評価能力が低く、か

つ対応性も劣る。しかし、汚損、湿潤のない Dry アークによるトラッキング性評価は、実用の汚損、湿潤状態におけるトラッキングとはよく対応しない。結局、湿った状態でアークとシンチレーションが混在する形の評価法がよいように思われる。

しかし、実際使用条件時の複雑な現象を一つの試験法で適確に推定することはむずかしく、あくまで、材料の第一次選択試験と考えるべきで、最終的な信頼性の確認には、屋外暴露試験が必要だと考えている。

耐トラッキング性判定ならびに基準の確立には、これら材料のトラッキング性試験と、実際の屋外暴露試験との対応性のデータの蓄積が必要だと考えるが、その意味でご参考になれば幸いである。

高電圧化、汚損条件の多様化にしたがい、さらにこれら環境条件に対する耐トラッキング性は重要となるので、今後さらに検討を進めていく所存である。

おわりに、ご指導、ご協力をいただいた関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 電気学会技術報告 (I) 部 第 82 号 (昭 42)
- (2) 電気学会技術報告 (I) 部 第 86 号 (昭 43)
- (3) IEC Publication 112 (1959)
- (4) DIN 53480 (1964)
- (5) C. F. Wallace, C. A. Bailey : IEEE, Summer Power Meeting, No. 31, 66~360 (1966)
- (6) ASTM, D-2132-62 T (1962)
- (7) ASTM, D-495 (JIS K-6911)
- (8) ASTM, D-2302-64 T (1964)
- (9) 原, 川上 : 耐トラッキング性試験法 専門委資料, No. 165 (昭 41-10)
- (10) 古沢 : 耐トラッキング性試験法 専門委資料, No. 202 (昭 42-2)
- (11) 原, 川上 : 昭和 42 年電気学会連大, 488
- (12) M. Kurtz : IEEE, Trans. Elect. Insul., E1-6, No. 2, 76~81 (June, 1971)
- (13) L. Mandelcorn, G. M. Sommerman : Tech. Paper of Elect. Insul. Conf., p. 91 (1963)
- (14) R. Wilkins, M. J. Billings : PIEEE, 116, No. 10, 1707~1784 (Oct., 1969)
- (15) D. J. Parr, R. M. Scarisbrick : PIEEE, 112, 1625 (1965)
- (16) 草川, 橋本 : Mitsubishi Denki Laboratory Reports, 10, No. 3/4
- (17) 電気協同研究, 20, 第 1 号 (昭 39-3)

カルシア—アルミナ系ガラスの封着性能

河原 一雄*・西楽 隆司*・岡本 礼二*

Sealability of Calcia—Alumina System Glass

Manufacturing Development Laboratory

Kazuo Kawahara・Takashi Nishiraku・Reiji Okamoto

Sealing off an object with glass-ceramic is relatively simpler than other techniques. The properties of calcia—alumina glass and its crystalized forms have been studied by measuring their density, mechanical strength and coefficients of thermal expansion to observe the crystalline phase and to perform X-ray diffraction and differential thermal analysis. As a result importance has been perceived of the sealing condition. Regarding the stability of the seal against sodium vapor, interesting results have been obtained through the measurement of electrical conductivity and of the thickness of a corroded layer with glass. As the application sealing of the ends of an arc tube of high pressure sodium lamp has been accomplished with a satisfactory result.

1. ま え が き

ガラスを含めたセラミック対セラミックやセラミック対金属の封着には種々の方法があるが、金属を介在させる封着法は工程が複雑になりがちなのに対して、ガラスを使用する封着は多種のセラミックと表面処理された金属とが良く馴染み、1回の加熱工程で封着が完了するという大きな長所を有している。この簡便さのため低温領域においては、低融点 ソルダガラス が広く使われこれに関する報告も多い。近年前述のようなガラスによる封着の手軽さと、ガラス組成を変化させることによって被封着体の熱膨張係数に合せ得る利点により、高温領域にも高融点の封着ガラスが各所に用いられるようになった。

高融点と言っても厳密な境界があるわけではなく、600～700°C以上で用いられるものが、一般に高融点ガラスと呼ばれている。

封着材料としてのガラスに要求される特性として

(1) 被封着体の変形、変質温度より低い温度でガラスが軟化すること

(2) 被封着体に良くぬれなじむこと

(3) 封止部が気密に保たれること

(4) 熱膨張係数が被封着体に一致するか近接していること

(5) 長期間にわたって安定であること

(6) その他使用される場所の要求に応じて

(a) 耐熱性 (d) 電気的特性

(b) 機械的強度 (e) 化学的特性

(c) 耐熱衝撃性 (f) 耐放射線特性

などを考慮に入れなければならない。

現在、高融点封着ガラスに関する報告は少ない。我々は $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{O}_3-(\text{RO}+\text{R}_2\text{O}_3)$ 系の一連の高融点ガラスについて検討を加えた。これらの系列のガラスは封着前は微粉末として取り扱われ、封着完了時には結晶状態を示す一種の結晶化ガラスである。前述の(3)以下は封着後の状態におけるガラスの要求特性であって、結晶化ガラスの場合、封着前後で状態が異なり、また封着の熱処理条件によっても変化させ得るので、これらの相関性を十分に検討しておくことが重要である。

$\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{BaO}$ 系ガラス (M-1763 と称する) について熱処理前後の特性を測定し、高圧ナトリウムランプへの応用について検討を加えた。

2. 実験方法

M-1763ガラスの熱処理前後の密度測定、X線回折、結晶組織の観察、示差熱分析、ボタンフローテスト、熱膨張係数の測定、抗折強度測定、耐ナトリウム蒸気性の検討、封着体の評価試験を行ない、比較検討した。

2.1 試料

2.1.1 M-1763 ガラス

調合された原料粉末を白金製のるつぽに入れ、1550°Cの電気炉内で溶融したのち、急激に冷却してガラスを得た。溶融は酸化雰囲気で行なった。以下の実験で棒状の試料を必要とする場合は、このガラス塊から適宜切り出して用いた。

2.1.2 結晶化ガラス

2.1.1項で得たM-1763ガラスを約1mmに粗砕して、その粗砕片をグラファイト製のるつぽに入れ、真空炉内においてそれぞれ、1400°Cと1500°Cで5分間熱処理した。このかたまりから粉砕して粉末状にするか、切断して棒状の試料を取り出した。

2.2 密度の測定

5mm×5mm×10mmの試料を各3個ずつ準備し、乾燥重量と水中重量を測定して見かけ密度を算出した。測定は0.1mgの単位まで行なった。

2.3 X線回折

74μm以下の粉末を用い、ターゲット:Cu, フィルタ:Ni, 加速電圧40kV, 電流20mAの条件でX線回折による生成結晶の同定を行なった。装置は島津製作所製のX線回折装置VD-1を用いた。

2.4 結晶組織の観察

5mm角の試験片を樹脂に埋め込み、#800のサンドペーパーで研磨後、10%の熱燐酸で5分間エッチングした表面を金蒸着して走査型電子顕微鏡により観察した。装置は日本電子KKの走査型電子顕微鏡JSM-2である。

2.5 示差熱分析

74μm以下の粉末を白金セルに入れ、標準サンプルを空気として、10°C/minの上昇速度で示差熱分析を行なった。装置は島津製作所製の示差熱分析装置DT-1Aである。

2.6 ボタンフローテスト

M-1763ガラスを74μm以下に粉砕し、その1gを直径16mm,

厚さ 2.6 mm に圧縮成形して、この外径が温度と共にどのように変化するかをみて、粘性流動特性を調べた。基板には、混成集積回路用のアルミナ微器板を用い、加熱は真空炉中で行なった。最高温度での保持時間は 5 分間とした。

2. 7 熱膨張係数の測定

3 mm × 3 mm × 20 mm の試験片を作り、ライツ社の UBD 型熱膨張測定装置により熱膨張係数を測定した。

2. 8 抗折強度の測定

5 mm × 5 mm × 25 mm の角棒を各 5 本ずつ準備し、表面を研磨後、30 % の硝酸中に 5 分間浸漬して表面の傷を除去した。スパン間隔 20 mm、一点荷重法によりアムスラ万能材料試験機で抗折強度を測定した。

2. 9 耐ナトリウム蒸気性

化学的安定性のうち、ナトリウム蒸気に対する安定性を調べるため、ナトリウムに侵食された試験片の電気伝導度と拡散層の厚さの変化を測定した。

2. 9. 1 試験片の作製

3 mm × 3 mm × 15 mm の試験片の表面を #800 のサンドペーパーで研磨して、別に準備した外径 6 mm、肉厚 0.75 mm、長さ 100 mm の一端を閉じたニッケルパイプに、各 2 本ずつ入れた。内部を排気後、窒素ふん囲気中で 14 mg のナトリウム (固体) を入れ (各実験条件で Na が過飽和になる量である)、さらに排気してニッケルパイプの他端をチップした。取扱いを容易にするため試験片の入ったニッケルパイプを直径 12 mm の石英管を試料容器とし排気後封止した。

このようにして作った試料を各温度に設定した電気炉内に入れ、所定の時間だけ保持した。処理の終わった試料はアルゴンふん囲気中に置き、石英管とニッケルパイプを破ってナトリウム蒸気に接触した試験片を取り出し、表面をアルコールで洗浄した。

2. 9. 2 電気伝導度の測定

ガラスの電気伝導度を測定するため、図 2. 1 のとおり銀ペーストを塗って電極とした。リードにはアルミニウム箔を用いた。

直流安定化電源を用い、印加電圧は、1,400°C 処理ガラスの場合 2 V、1,500°C 処理ガラスの場合 10 V とし、10 秒後の電流を読みとった。電流計は、3 μA ~ 50 mA まで切り換えられるようにした。極性を逆にした場合も読みとり、両方の数値を平均して試料の値とした。試料のふん囲気はアルゴンで温度は室温で測定した。

2. 9. 3 拡散層の厚さの測定

電気伝導度の測定を終わった試験片を切断し、ナトリウム拡散層の厚さを測定した。測定はユニオン光学社製の工場用測定顕微鏡 SMZ-50 によった。

2. 10 封着体の試験

M-1763 ガラスの適用例としてこのガラスを高圧ナトリウムランプの発光管端部封着に用いた封着体の評価試験を行なった。項目として、封着部の外観目視検査、リーク試験、熱衝撃試験を取りあげた。

2. 10. 1 封着体の作り方

図 2. 2 に示す発光管端部の間げき (隙) に、M-1763 ガラスの粉末を塗りつけ、真空炉内で加熱して封着した。

2. 10. 2 外観検査

目視によりガラスの流れ具合を判定した。

2. 10. 3 リーク試験

ヘリウムリーク試験機により封着部のリークの有無を検査した。

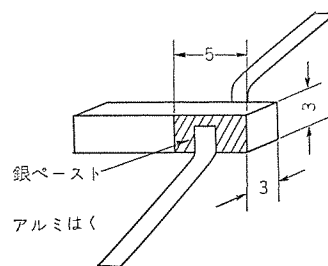


図 2. 1 電気伝導度測定用試料の形状
Size of specimen for electrical conductivity measurement.

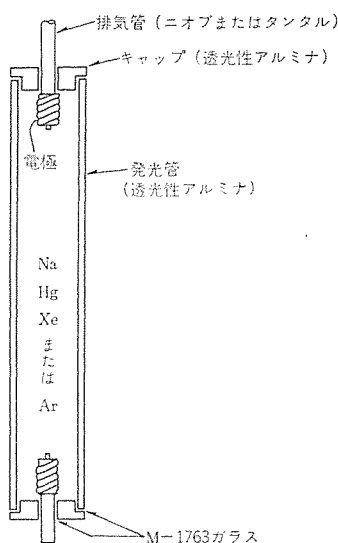


図 2. 2 高圧ナトリウムランプの発光管
Arc tube of high pressure sodium lamp.

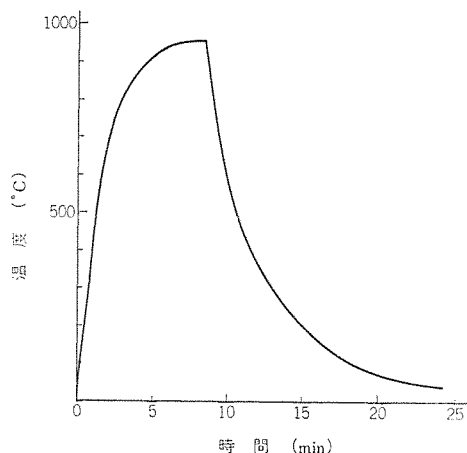


図 2. 3 封着部の加熱冷却曲線
Heating-cooling temperature curve.

2. 10. 4 熱衝撃試験

上下することのできる炉を準備して石英管内に入れた封着体に熱衝撃を与え、劣化状態をリークの有無により評価した。加熱冷却曲線は図 2. 3 のとおりであった。

3. 実験結果と考察

3. 1 密度

未処理ガラスの見掛け密度は 3.00 g/cm³、1,400°C 熱処理の結晶化ガラスは 2.85 g/cm³、1,500°C 熱処理の結晶化ガラスのそれは 2.95 g/cm³ であった。次の X 線回折の結果によれば 1,400°C では 12CaO · 7Al₂O₃ (C₁₂A₇ と略す) と CaO · Al₂O₃ (CA と略す) が、1,500°C では CaO · Al₂O₃ と 3CaO · Al₂O₃ (C₃A と略す) という結晶のできてい

ることがわかった。一方、各生成物の密度の文献値は $C_{12}A_7$ が 2.69 g/cm^3 ⁽¹⁾, CA が 2.98 g/cm^3 , C_3A が 3.00 g/cm^3 ⁽³⁾である。したがって熱処理温度が高くなるに従い、高密度の結晶が析出する様子は密度測定によっても確かめられた。

3.2 X線回折結果

図 3.1 にX線回折結果を示している。各熱処理温度における析出結晶の違いは、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 成分系の状態図⁽²⁾と一致している。1,500°C でもまだかなりのガラス相が結晶相を包むマトリックスとして存在することがわかった。熱処理温度の違いによるCAの析出量をピーク高さと比較してみると、1,500°C 熱処理の結晶化ガラスでは1,400°C 熱処理のものに比べ、約1.5倍となっている。高温になるに従いCA量が増加することを示している。

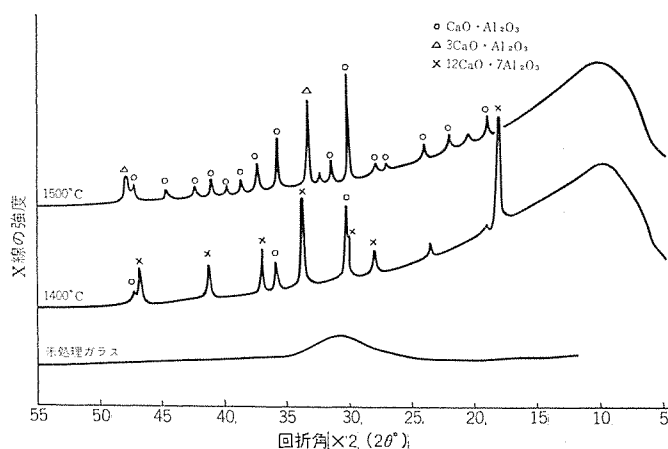


図 3.1 M-1763 ガラスの未処理品と熱処理品のX線回折図
X-ray diffraction patterns of original and heat-treated glass.

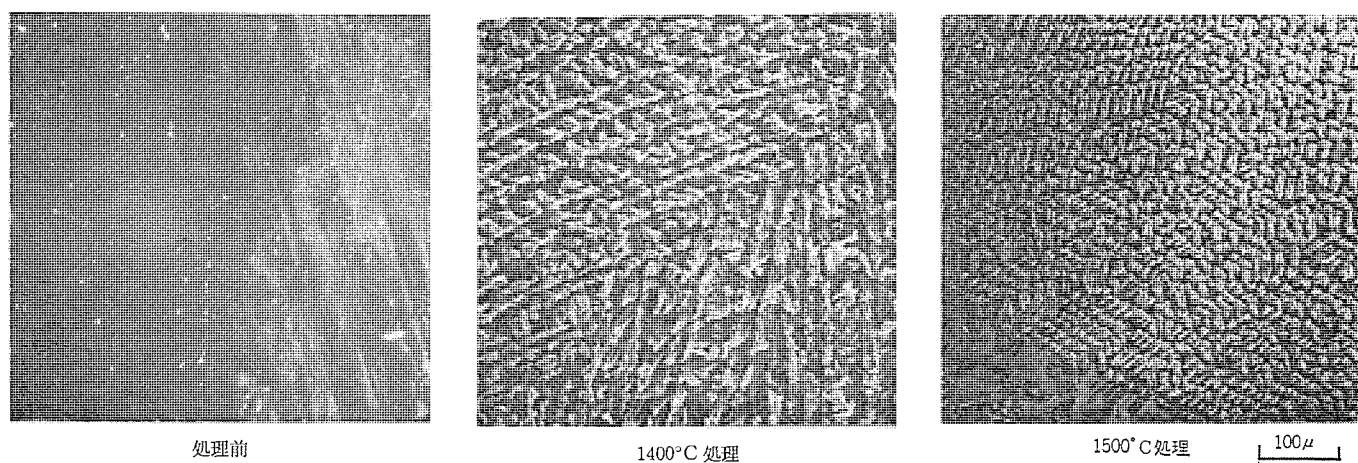


図 3.2 走査型電子顕微鏡写真 Scanning electron micrographs of glass.

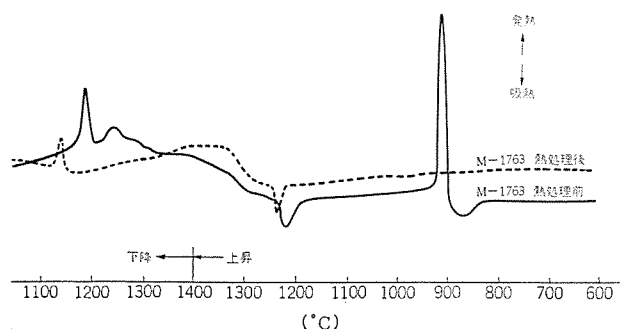


図 3.3 ガラスの示差熱分析曲線
D. T. A. curves of glass.

3.3 結晶組織の観察結果

図 3.2 は試料表面の走査型電子顕微鏡写真である。未処理ガラスには結晶相は存在しないが、熱処理した結晶化ガラスは比較的均一な結晶相となっている。1,400°C 熱処理のほうに結晶が大きく凹凸から判断すればガラスマトリックス量も多いようである。高温で結晶が小さくなるのは析出結晶が異なることと結晶の焼結が進み始めるためと解釈できる。

3.4 示差熱分析結果

M-1763 ガラスの熱処理前後の熱的挙動を調べるために示差熱分析を行なったが、その結果を図 3.3 に示した。未処理ガラスでは 910°C 付近で結晶が析出し、1,200°C 付近から融解し始める。高温からの冷却時には、融液からの結晶析出に相当した発熱ピークが1,180°C 付近に見られる。920°C まで加熱を止め、この試料をX線回折した結果では、 $C_{12}A_7$ と CA の両結晶ができていたことがわかった。熱処理後のガラスでは 910°C 付近のピークは最早みられず、1,220°C 付近から融解が始まる。したがってこの結晶化ガラスの耐熱度は1,200°C に近いであろう。

3.5 ボタンフローテスト結果

熱処理温度に伴う直径の変化を図 3.4 に示した。直径が約2倍になる温度で、良好な気密封着が得られるという報告⁽⁶⁾があるが、M-1763 ガラスの場合、元の直径の1.3倍になる温度でも高純度アルミナ磁器を封着するのに好結果を得ている。流動性が温度に対して鈍感なことは、封着条件の管理上好ましいともいえる。

3.6 熱膨張係数の測定

50~600°C の範囲における熱膨張係数は、未処理ガラスが $81 \times 10^{-7} \text{ deg}^{-1}$, 1,400°C 熱処理のものが $63 \times 10^{-7} \text{ deg}^{-1}$, 1,500°C 熱処理のもの

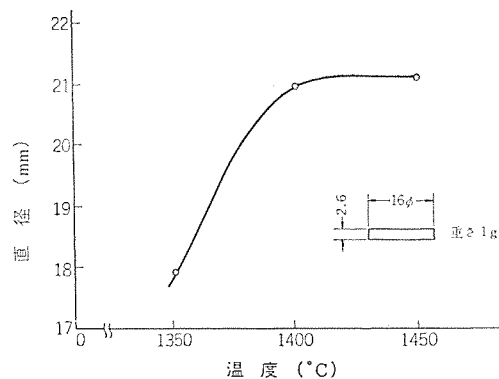


図 3.4 ガラスの流動性と温度の関係
Fluidity of glass vs. temperature.

のが $71 \times 10^{-7} \text{deg}^{-1}$ であった。結晶化ガラスの熱膨張係数はアルミナ、磁器やタンタル、ニオブウムなどの金属と比べて小さいようであるが、被封着体の外側に塗布される場合には磁器のうわ薬についても知られるとおり、かなり小さい方が好結果を生むものである。

3.7 抗折強度の測定結果

計算はよく知られる次式に従った。

$$\sigma = \frac{3}{2} \cdot \frac{Wl}{bh^2}$$

ここで σ : 応力, W : 全荷重, l : スパン間隔, b : 試料の幅, h : 試料の厚さである。未処理のガラスの強度は 7.1 kg/mm^2 , $1,400^\circ\text{C}$ 熱処理のものは 7.5 kg/mm^2 , $1,500^\circ\text{C}$ 熱処理のものは 3.7 kg/mm^2 で高温処理のものは約 $1/2$ に低下することがわかった。元のガラスおよび $1,400^\circ\text{C}$ 熱処理のガラスの強度は、一般のガラス強度と比較して平均以上ということができる。

表 3.1 に M-1763 ガラスの熱処理前後の主な性質を比較した。

3.8 耐ナトリウム蒸気性の結果

図 3.5 に ナトリウム蒸気中での処理時間一定 (16 時間) で、温度を変数とした場合の電気伝導度とナトリウム拡散層の厚さの変化を示した。概して $1,500^\circ\text{C}$ 熱処理品は、 $1,400^\circ\text{C}$ 熱処理品に比べて耐ナトリウム性にすぐれていることがわかる。しかし $1,400^\circ\text{C}$ 熱処理品の厚さの変化は 900°C を過ぎるくらいまでわずかである。この曲線の傾向は、他の耐ナトリウム性ガラスについて測定された報告⁽⁴⁾と良く一致している。拡散層を含んだガラスの電気伝導度と厚さの変化とは同じ傾向にはなく、高温になるに従い電気伝導度の上昇率が鈍っている。これは高温でのガラスの結晶化の促進によりガラスマトリックスの組成が変化し、ガラス修飾酸化物とガラス形成酸化物のモル比が増加することとなり、ナトリウムイオンの易動度が低下するためと推察される⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

図 3.6 に ナトリウム蒸気中での処理温度一定 (850°C) で、時間を変数とした時の電気伝導度とナトリウム拡散層の厚さの変化を示した。図 3.6 から $1,500^\circ\text{C}$ 熱処理品が $1,400^\circ\text{C}$ 熱処理品よりも耐ナトリウム性がすぐれていることを証明している。したがって CA や C_3A が C_{12}A_7 よりもナトリウム蒸気に対して安定であるということができ、これまでの報告と一致している⁽⁴⁾。測定時間内での拡散層の厚さの変化はほとんどなく、ごくわずかの表面変質層はきわめて初期に生ずることを示している。これは試料表面の凹凸や傷などの欠陥に起因するものと考えられ、その後の拡散は非常に緩やかである。文献⁽⁴⁾によれば、 400°C のナトリウム蒸気に侵食された他の耐ナトリウム性ガラスの拡散層の厚さは 1 時間から 10 時間の間に 3~4 倍に増加しているが、M-1763 ガラスではそのような現象はみられなかった。

3.9 封着体の試験結果

M-1763 ガラスは耐熱度を必要とし、しかも酸化ふん囲気中使用したい場合などの封着材として各方面に適用可能であるが、封着の一例として、高圧ナトリウムランプの発光管端部封着を取りあげた。高圧ナトリウムランプについては本誌 46, No. 4 の技術解説⁽⁵⁾に詳しくのべているのでここでは触れないことにする。

3.9.1 外観検査結果

適当な封着条件のもとでは、良好な濡れ性とガラス特有の光沢が得られた。その結果を図 3.7 の写真に示した。しかし $1,500^\circ\text{C}$ では過度に流れすぎる欠点が見られた。

3.9.2 リーク試験結果

封着した試料の中には 10^{-8} cc/s より大きなリークを示すものはな

表 3.1 M-1763 ガラスの性質
Properties of M-1763 glass.

性 質	M-1763 ガ ラ ス		
	未 処 理	$1,400^\circ\text{C}$ 熱処理	$1,500^\circ\text{C}$ 熱処理
密 度 g/cm^3	3.00	2.85	2.95
結 晶 の 種 類	非 晶 質	C_{12}A_7 と CA	CA と C_3A
熱 膨 張 係 数 deg^{-1}	81	63	71
抗 折 強 度 kg/mm^2	7.1	7.5	3.7

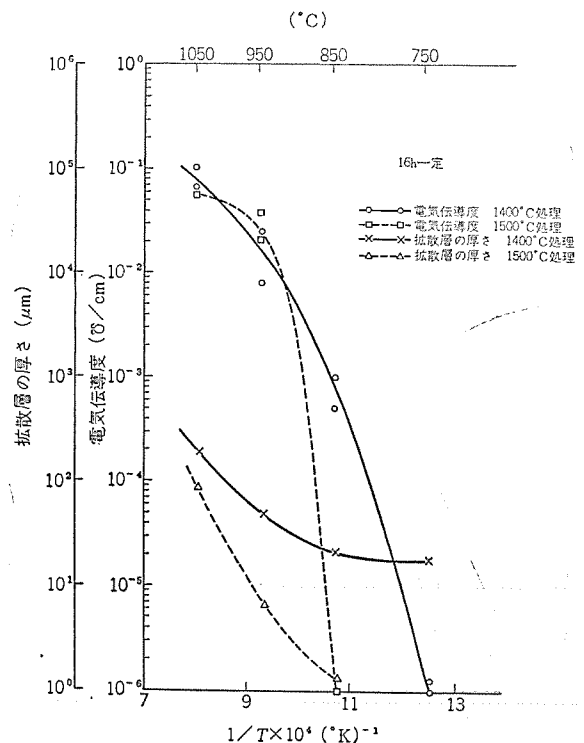


図 3.5 温度と電気伝導度およびナトリウム拡散層の関係
Temperature vs. electrical conductivity of glass and thickness of Na diffusion layer.

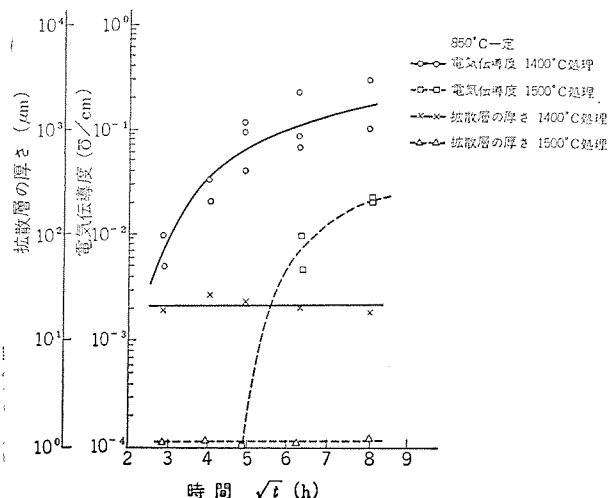


図 3.6 時間と電気伝導度およびナトリウム拡散層の関係
Time vs. electrical conductivity of glass and thickness of Na diffusion layer.

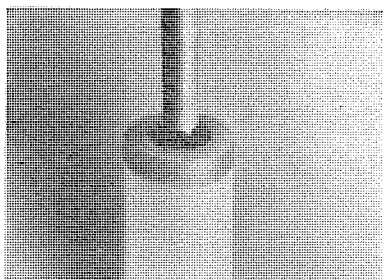


図 3.7 発光管の封着状態
Appearance after sealing at the end of arc tube.

かった。

3.9.3 熱衝撃試験結果

1,000 回以上の熱衝撃を繰り返しても、封着部には何らの異常も認められなかった。

4. む す び

高融点の $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-BaO}$ 系ガラス (M-1763) を試作し、熱処理品の機械的特性、化学的特性を検討した結果、熱処理条件が大きく影響することがわかった。M-1763 ガラスの $1,400^\circ\text{C}$ での熱処理品は濡れ性が良く、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ と $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ の結晶を生成し、機械的強度も大きく、熱膨張的にも高アルミナ磁器と適合し気密性も有している。さらに耐ナトリウム蒸気性についても耐ナトリウム蒸気性が良いといわれる $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 結晶以外に $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 結晶を含んでいるが、ナトリウム蒸気との接触初期にわずかな変質層を生じるのみで、それ以上の拡散はきわめて緩やかに進行し、特に 920°C 以下で使用される場合は長期間にわたり耐ナトリウム蒸気性を有することがわかった。

$1,500^\circ\text{C}$ 熱処理品では $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ を多く生成するため耐ナトリウム蒸気性は良くなるが、機械的特性がやや悪くなる。この M-1763 ガラスを高圧ナトリウムランプの発光管として透光性アルミナ-透光性アルミナ、および透光性アルミナ-ニオブウムの封着に適用した場合の封着性についても検討を加えたが、ほぼ満足できる結果を示した。以上のように、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 系ガラスは高温域での封着材として適用性はかなり高いものである。

なお、この一連の実験は大船製作所の協力のもとに行なわれたものである。

参 考 文 献

- (1) T. D. Robson : 5th Intern Symp. on Chemistry of Cement, Tokyo 349 (1968)
- (2) E. M. Levin, H. F. McMurdie, F. P. Hall : Phase Diagrams for Ceramists, The American Ceramic Society, 46 (1956)
- (3) J. F. Lynch, C. G. Ruderer, W. H. Duckworth : Engineering Properties of Ceramics., Databook to Guido Materials Selection for Structural Applications, Battells Memorial Institute Columbus Laboratories, 5.5.2-7 (1966)
- (4) A. J. Burggraaf, H. C. van Velzen : Journal of The American Ceramic Society, 52, 238 (1969)
- (5) 竹田, 加茂部, 田中 : 三菱電機技報 46, 498 (1972)
- (6) 鈴木 : セラミックス 7, 780 (1972)
- (7) 森谷, 成瀬, 功刀, 田代 : ガラス工学ハンドブック 朝倉書店 (1963)
- (8) Advances in Glass Technology., The American Ceramic Society, 270 (1962)

家電用接触機構部品の信頼性

長谷川 知治*・小 袋 勝 久*

Reliability of Electromechanical Components of Home Appliances

Consumer Products Research Laboratory Tomoharu Hasegawa・Masahisa Kobukuro

Electromechanical components used for home appliances are discussed herein of their importance and special nature among the components of the kind. Also discussion is made on numeral points in the basic technics concerning the electric connection which is regarded as essential in the maintenance of the reliability of the components.

In addition, examples are quoted with individual parts switches, relays, thermostats and connectors from the viewpoint of the reliability from the result of studies on those in practice. Also, description is given on the present state of these component parts and problems posed on them.

1. ま え が き

接触機構部品とは、電気回路をつないだり開閉したりする、いわゆる電氣的接続を機能とする部品の総称であり、その構造の中に機械的に接触するための接点を有するものである。

家電製品を構成する部品は非常に多く、それぞれ重要な働きをしているが、接触部品は、その中でもこの故障が製品の機能を完全に停止させること、また、最近話題になっている発火などに対する安全性とも深い関係があることから、最も重要なものの一つである。

一方、電子機器の高度の発達に伴い、この部品の需要（種類と用途）も増大の一途をたどっているが、機器によって使われる環境や負荷条件がまちまちであることから問題も多い。

こうした背景から、接触部品の重要性が認識され、一部で機構解明のための基礎的な研究も進められているが⁽¹⁾、まだ一般的には十分に理解されているとは考えられない。この原因は、接点現象そのものが複雑多岐であること、広い分野の知識を必要とすることなどと思われるが、上記した重要性を考えると、地道な研究・開発活動が望まれる。

当社では、かねてより接触部品の信頼性評価を行ってきたが、ここでは、家電品に使用されるものを中心に、この部品の特異性、信頼性を得るために必要とされる技術について、二、三の具体例をあげながら述べる。

2. 接触機構部品の信頼性確保に必要なこと

2.1 接触機構部品の特異性

家電品に使用される接触部品を分類したものが表 2.1 であるが、その種類は非常に多い。また、これらの部品に要求される性能は、各々異なっており、広範囲にわたることに注意せねばならない。これは、接触部品が他の電気部品と相違して機構部分を有するためであり、負荷条件の相違がそのまま接点部の性能の差となって現われる。加えて、周囲ふん囲気、振動・衝撃などの環境条件による影響も受けやすく、使われ方、使われる場所において著しい相違が認められる。たとえば、低電圧・低電流を安定な接触抵抗のもとに通電するものと、数十 A の電流を開閉するものとを、同一の部品で兼ねさせることはむずかしい。また、異なる汚染ガス中に置かれる場合も同様である。

表 2.1 家電用接触機構部品の分類
Classification of electromechanical components of home appliances.

分 類	部 品 の 種 類
動 接 触 部 品 (開 閉 機 能)	1. スイッチ
	2. リレー
	3. サーモスタット
	4. タイマ
	5. その他 (チューナ、漏電ブレーカ、……)
静 接 触 部 品 (通 電 機 能)	6. コネクタ
	7. ソケット
	8. 差込プラグ・ジャック
	9. 圧着端子
	10. その他 (ボリューム、コードリール、……)

以上のことは、接触部品には万能なものが少なく、要求仕様ごとに検討・用意（選定または開発）される場合が多いことを示している。したがって、接触部品を製品の一部として正しく実装する技術がより要求されるということになり、この点も他の部品と異なる点である。

このような特異性を認識することが、接触部品の信頼性を得る第一歩である。

2.2 接続技術と周辺材料技術

2.1 節に述べたように、接触部品は機械的接触部を有しており、このコンタクト面に起こる現象は、非常に複雑である。

この電気を接続する上で要求される種々の技術、つまり接続技術は、接触部品の技術的根底をなすものであり、この技術と部品を構成する周辺材料技術とを十分に握ることが、この部品の信頼性を確保する上で最も重要なことである。

ここでいう周辺材料技術とは、電気の接続には直接関係しないが、接触部品としての性能を維持するために必要な材料、たとえば絶縁物・ばね・潤滑油などに関する基礎的技術である。

2.3 接触機構部品を研究・開発する場合のポイント

接触部品の信頼性を確保するためには、接続技術および周辺材料技術が必要であると述べたが、本節でこれらをもう少し具体的に展開してみる。これは、この部品の研究・開発を行なう場合のポイントでもある。ここで(1)、(2)、および(3)は、接続技術の範ちゅうに含まれるものである。

(1) 負荷回路の解析

電氣的接触を行なう以上、最初に考慮しなければならないことは、

どのような電圧・電流を開閉あるいは通電させるか、つまり、使用回路上の要求仕様の明確化である。この負荷回路の解析は、あくまでも定常的なものでなく、接点が動作するときの過渡的電圧・電流を対象にしなければならない。

この回路上の検討の成否が、信頼性を左右する場合が少なくない。

(2) 接点挙動の検討

動的な運動をする接点であれば、接点の開閉挙動（投入・開離速度、バウンスなど）に伴う接点上の放電現象、静的なものであれば、荷重下における接点の接触面の状態など、接点の動作およびそれに付随して起こる現象を、(1)との相関のもとに詳細に検討せねばならない。

(3) 接点材料の検討

(1)、(2)についての十分な考察のもとに、接点材料として何を採用すればよいかがつぎの重要なポイントになる。開閉接点(動接点)に通常起こる、接触不良、消耗・移転、溶着などと接点材の関係、あるいは通電接点(静接点)におけるコンタクトメッキの接触信頼性、周囲ふん囲気による接点面の腐食の問題など、接点材料の接触界面で起こる諸々の現象を検討しておかねばならない。

これと(2)とが、接続技術研究の主要な部分を占める。

(4) 周辺材料技術

いかに良好な電氣的接続が接点部で得られたとしても、接触部品としての機械的寿命に耐えないものであったり、絶縁上の欠陥があったり、または発火焼損などの危険性のあるものでは実用に供せられない。そこで、しゅう(摺)動部の摩耗の程度、ばねの疲労、絶縁物の電氣的劣化機構など、材料の基礎的諸現象を十分確認することが必要になる。これらの材料が接点部以上に問題となるケースも多い。

それでは、次章より動接触部品、静接触部品にわけて、それぞれ当社における具体的な例をあげ、上記した(1)~(4)の接続技術および周辺材料技術の検討と、それにもとづく信頼性の評価が実際にどのように行なわれたかを説明し、あわせて接触部品の現状と問題点について述べることにする。

3. 動接触機構部品

動接触部品は、開閉を行なうので必ず放電現象を伴う。これが4章で述べる静接触部品と根本的に相違するところである。

火花・グロー・アークなどの放電によって引き起こされる各種の接点上の故障や、絶縁物の劣化が問題であり、構成材料の燃焼との関連も重要である。これらについて、スイッチ、リレー、サーモスタットを例に説明する。

3.1 スイッチ

家電品に使用されるスイッチは、電圧が数V~数百V、電流が数十mA~十数A程度で、通信機などに使用される弱電流領域と、大電力用の強電流領域の中間に位置している。したがって、まったく違うともいえる弱電と強電との考え方が入りまじった範囲を取り扱うことになり、混同による間違いを起こす可能性がある。このことは、単にスイッチだけでなく接触機構部品全般にいえることでもある。

スイッチで問題となるのは、接触不良・溶着などの接点障害とインクロジャの燃焼であろう。

(1) 接点材質

接点材質と開閉電流との関係について試験検討した結果をつぎに説明する。図3.1は、通電電流とアーク時間の関係である。図3.2

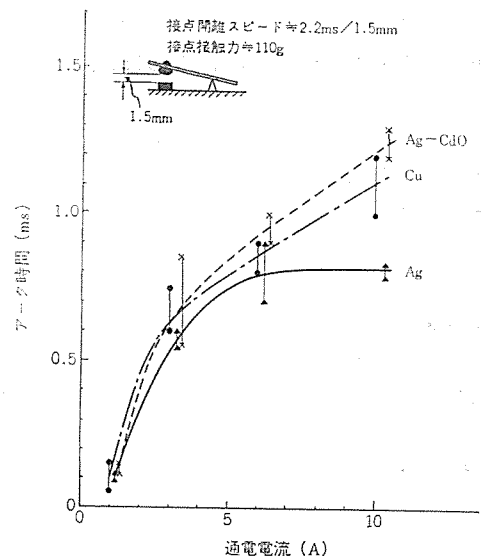


図 3.1 各種接点の電流とアーク時間の関係
Relation between current and arcing duration with various contacts.

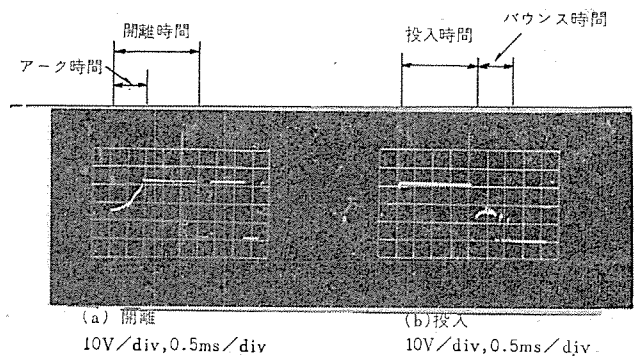


図 3.2 接点の開閉挙動の一例 (Ag-CdO, 6A)
Example of operation manner in switching contact.

表 3.1 接点材質と負荷との関係
Relation between contact materials and load.

電 流 A	力 率 $\cos \theta$	接 点 材 質
10	0.6	Ag-CdO, (Ag)
6	0.6	Ag-CdO, Ag
3	0.6	Ag-CdO, Ag (Cu上 Agメッキ)
1	0.6	Ag-CdO, Ag Cu上 Agメッキ Cu

() 内は性能的に疑問

は図3.1の一例で、接点の開閉動作挙動を示す。Ag-CdOの方がAgよりアーク時間が長く、従来の報告⁽²⁾と一致している。

つぎにこれらを開閉試験 (AC 100V, 力率0.6~1.0) にかけて種々のデータを取り、総合判定を与えたのが表3.1である。

これはあくまでもある条件下の結果であるが、Ag-CdOの万能性が見られる。10AクラスでのAgは、Ag-CdOに比較して消耗量が大きく、(2)で述べるスパッタリングが著しい。3AクラスへのCu系接点は危険で、Agメッキをしてもなお十分でない。薄くてもクランプを採用すべきである。

(2) インクロジャ

スイッチのインクロジャの焼損原因として、つぎの三点をあげることができる。

- (a) 接点部の接触不良による異常温度上昇
- (b) インクロジャのトラッキング現象
- (c) 接点のスパッタリングによる絶縁抵抗の低下

このうち、(a)、(c)は接点材質の選定でカバーできるが、(b)は環境に支配される場合が多いので、耐トラッキング性の良い材質の選定が必要である。しかし、(b)、(c)については、もっと詳細なデータを取ることに由る定量化が進められねばならない。

当社は、設計のモデルケースとしての標準スイッチの開発、基本部分の標準化、技術マニュアルの作成などを行なって、スイッチの信頼性を確保している。

3.2 リレー

高容量の家電品の出現や機器の容量アップが進む反面、リレーにおいてはむしろ小形・軽量化が進められた。このため、高容量タイプのリレーに問題が発生する場合があります、中でも溶着が多い。機器の断続をリレーで行ない、かつ、接点の投入時に非常に大きい突入電流を伴う場合に起こしやすい。

リレーは、マグネットの吸引力で動作し、復帰は、ばねの反力による場合が多い。スイッチのように人の力で開閉しないのでおのずと機械力に限界があり、溶着力がこれを上回るとき故障となる。とくにMake接点(コイルONのときMakeする接点)の場合、開離力が大きくとれないので十分な考慮がたいせつである。

溶着を防止するためには、つぎの諸点を考慮する必要がある。

- (1) 接点投入時の回路の過渡現象を明らかにする。
- (2) リレーの接点バウンスを減少させる。
- (3) 接点の開離力を大きくする。
- (4) 耐溶着性のある接点材質を採用する。
- (5) 回路上、突入電流をなくすか低下させる対策をする。

つぎに、この溶着に関する特殊な一例として、コンプレッサ起動リレーの場合について述べる。

図3.3は、起動リレーの回路で、リレーがOFFになりb接点がMakeするとき、 C_s 、 C_R がショートし短絡電流が流れる。この短絡電流と溶着力との関係を実験した結果が図3.4、3.5である。図3.4

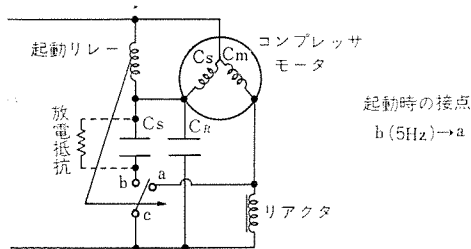


図 3.3 コンプレッサ 起動回路(運転中)
Starting circuit of compressor.

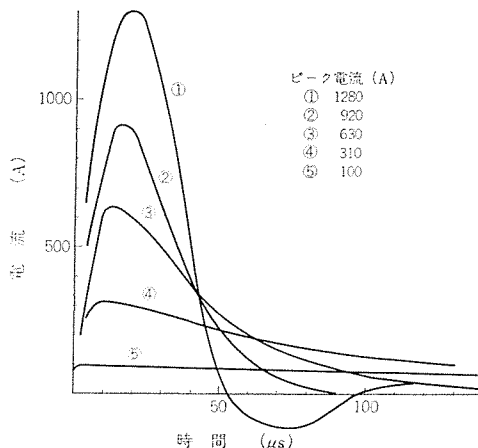


図 3.4 実験用急しゅん波電流
Experimental impulse currents.

は、図3.3の C_s 、 C_R のチャージ電圧の状態と考えられる短絡電流をシミュレートしたもので、①が最悪の状態である。図3.5は、図3.4の電流における溶着力測定の結果であり、数十 μs というごくわずかの時間であるが電流が大きいため、かなりの溶着があることが理解される。接点の引離し力はマグネットの吸引力で、a接点の場合よりはるかに大きい、条件の悪い場合溶着力がこれを上回ることがわかる。

この溶着力の制御は、 C_s に放電抵抗を加えてこの電荷を0にすることによってもたらされる。このときの短絡電流が、図3.4の⑤にほぼ相当する。図3.5よりこのときの溶着力は100gをきり、問題ないことが理解される。当社の起動リレーはすべて放電抵抗を加え、溶着に対する接点の保護を行なっている。

このようなコンデンサショート回路の急しゅん波電流による溶着はよく認められるが、このほか、モータ起動時、ランプ点灯時などの突入電流による溶着也非常に多い。突入電流の大きさ(ピーク、時間)、接点バウンス値および接点材質の溶着力に与える影響を、十分検討しておかねばならない。

3.3 サーモスタット

有接点サーモスタットの温度感知には、つぎの三つの方法がある。

- (1) バイメタルの変形
- (2) 密封気体・液体の膨張・収縮
- (3) 軟磁性体の磁束密度変化

(1)、(2)のタイプは非常に多く使われるが、接点動作のおそいスローアクションのものと、マイクロスイッチのようなスナッフアクションのものに分かれる。前者は廉価であること、構造が簡単であることから広く採用されているが、接点の開閉速度がバイメタルの変形速度と同じ

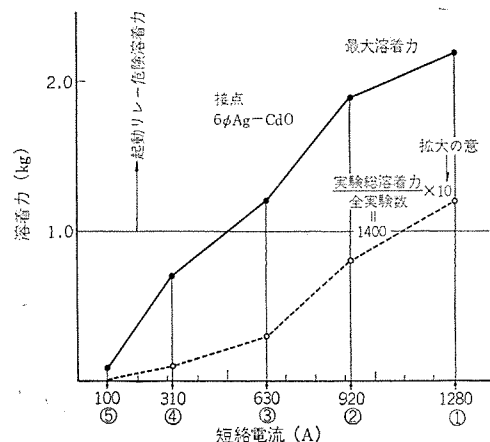


図 3.5 電流と溶着力の関係
Relation between current and welded strength.

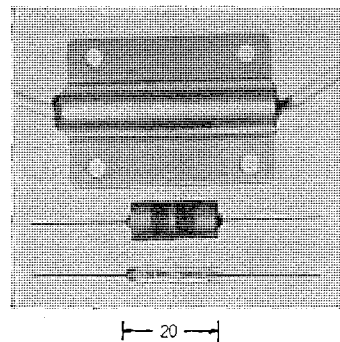


図 3.6 TRS 外観
Appearance of TRS.

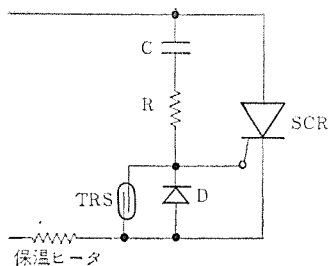


図 3.7 TRS 導入回路
Circuit with TRS.

図 3.8 TRS 中のリードスイッチの動作範囲
Operation of reed switch in TRS.

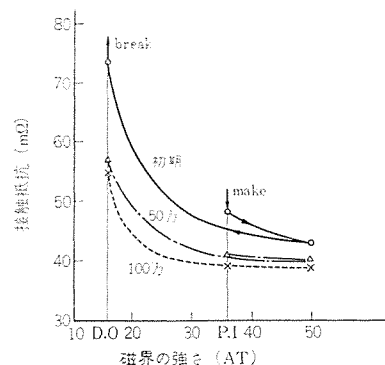
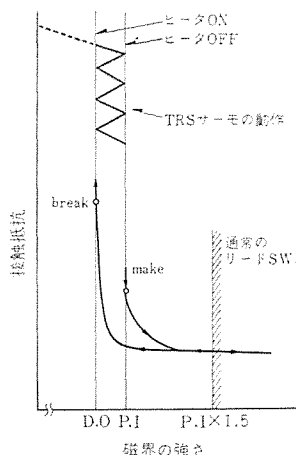


図 3.9 リードスイッチの接触抵抗変化
Contact resistance of reed switches.

であり、アークや接触部ジュール熱による接点部損耗が大きい。過負荷条件には、消耗、溶着、ブリッジなどの障害を起こす場合がある。後者は、この点安定な性能を与えるが、電流が過大となれば 3.2 節と同様に溶着について十分考慮せねばならない。(1)、(2)のいま一つの欠点は、接点部そのものが機械系の支点を形成しており、接点の消耗が直接動作点の変動をもたらす点である。動作点変動の許容値が小さいとき、長寿命を要求される場合には適していない。

(3)はこれらの欠点を解決するものであり、軟磁性体のキュリー点を利用してプラジャを可動させ接点を開閉させたり、リードスイッチと組み合わせて直接接点を開閉させる。このため、(1)、(2)のような動作点変化がほとんどない。ただ欠点は、セッ温度の可変ができない点である。

図 3.6 は、当社のジャー炊飯器の保温用サーモスタットとして使用したサーマルリードスイッチ (以下 TRS) の外観、図 3.7 は、これを導入した回路である。TRS は上記の(3)に属し、マグネットと感温フェライトとリードスイッチの組合せでできている。接触信頼性の上で問題となるのは、接点部のリードスイッチであり、この動作を示したものが図 3.8 である。

普通、リードスイッチは、外部磁界により ON した点 (PULL IN) より 1.5 倍以上の磁界の印加された接触抵抗の安定なところで使われるが、TRS の場合には、図のように接触圧力の十分でない、接触抵抗としては不安定な領域で開閉を繰り返すことになる。

この点が最も注意を要するところであり、TRS としての熱的開閉試験を行なう一方、図 3.8 に示したような P, I と D, O (DROP OUT) 間を動作させるリードスイッチの加速寿命試験を行なった。この結果が図 3.9 であるが、開閉に伴い動作点の変化はなく、接触抵抗はむしろ安定な結果が得られた。これは図 3.7 の回路条件 (AC 0.7 V 7 mA ピーク) が良好なためと考えられるが、リードスイッチの高信頼性が理解できる。

TRS は、高信頼性、長寿命という点ですぐれたサーモスタットであるが、接点容量が小さい点 (数十 W) が欠点である。この点の改良が今後の課題であろう。

4. 静接触機構部品

静接触部品は、3 章の動接触の場合のような放電現象を伴わないが、反面、長期の接触安定性を要求される点で動接触とは別の問題が多い。大電流開閉では問題とならないほこりや汚染ガスによる接点障害は、微妙なコンタクト現象を伴い、技術的にもむずかしい場合が多い。電源プラグやけい光ソケットのように、電圧の高い場合

には問題が少ないが、低接触力下での低電圧・低電流の接続には種々の検討が必要となる。本章では、コネクタを中心に述べる。

コネクタは、近年、とくに民生用電子機器において、生産性向上、機種多様化への対応、サービス性向上などの目的で、非常に多く採用されるようになった。種類も電源を接続するものから TV などの内部配線に使用されるものまで数多いが、問題となるのは多くの場合後者である。TV などのコネクタでは、基板とリード線を接続するリードコネクタと、基板同士を接続する基板用コネクタに大別されるが、これらに等しくいえることはコンタクトメッキの問題である。

接続する負荷条件が広い範囲にわたることも、これらのコネクタの特長である。また、民生用の場合、コストの制約から産業用コネクタとして実績のある Au, Rh などのメッキが簡単に取り入れられないことも苦しいところである。

実例を中心に説明を加えたい。図 4.1 は、当社の TV 用に開発

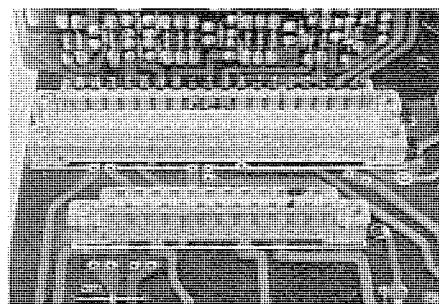


図 4.1 プリント基板用コネクタ外観
Appearance of the printed circuit connector.

表 4.1 各コンタクトメッキの耐ふん囲気性
Performance of various contact platings in various environments.

コネクタ側 メッキ 試験条件	Ag				Sn				Ni			
	耐熱	耐湿	硫化 (SO ₂)	塩霧	耐熱	耐湿	硫化 (SO ₂)	塩霧	耐熱	耐湿	硫化 (SO ₂)	塩霧
Ag	○	○	H ₂ S △	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Sn	×	△	×	×	○	○	H ₂ SO ₄ △	○	×	×	×	×
Ni	×	△	×	×	×	×	△	×	△	×	×	×
*Cu	×	○	○	○	×	×	○	○	×	○	×	○

○: MAX<10⁻²Ω, △: $\bar{x}$ <10⁻²Ω かつ MAX<2×10⁻²Ω

×: $\bar{x}$ >10⁻²Ω あるいは MAX>2×10⁻²Ω

* メッキなし

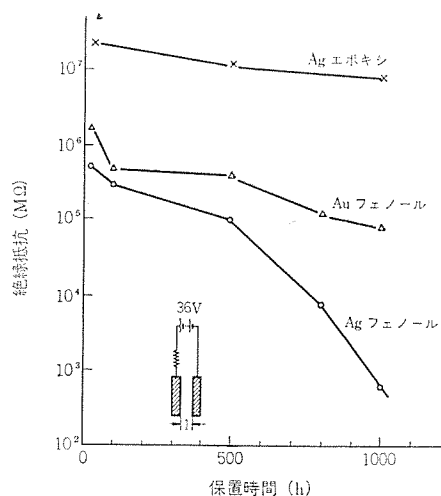


図 4.2 フェノール基板中の Ag の移行
Silver migration in phenol lamination.

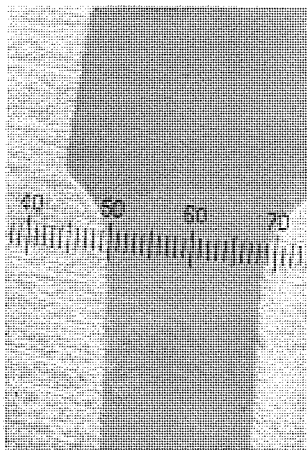


図 4.3 Ag 移行の例 (800 h 後)
Example of silver migration.

されたプリント基板用コネクタである。この開発上一番問題となったのは、やはりコンタクトメッキの決定である。

表 4.1 は、各種メッキのいろいろなふん囲気における接触信頼性を表わしたものである。これらのことから、コンタクトメッキとしては Ag, Sn が好ましく、Ni, Cu はほとんど使えないことが明らかである。また、メッキされる側の相違 (コネクタ側あるいは基板側) によって、性能が相違することも注目される。

Ag は H_2S に弱いこと、つぎに述べるフェノール基板中の Ag の移行の問題から⁽³⁾、当社では、基板側、コネクタ側ともに Sn メッキを採用し導入している。もちろん、振動・衝撃に対する対策、ほこり対策もセットへの実装の段階で実施された。

つぎに、Ag の移行について検討した結果の一例を図 4.2 に示す。これは、耐湿グレードのフェノール基板を $60^\circ C$ 、湿度 90% 中に放置したときの絶縁抵抗の低下を示しており、Ag の移行が認められる。図 4.3 は、移行状態を示す一例である。

このように、直流印加下で Ag の使用が困難であること、および硫化に弱い点から、多くのコネクタは Sn メッキの採用に向かっている。ただ、Sn メッキにはウイスカ (金属ヒゲ) の成長が起こることがあり⁽⁴⁾、近接導体との短絡を起こす場合がある。この発生のメカニズムの解明およびその防止法はある程度研究されているが、まだ十分なものではない。Ag の移行の防止およびウイスカ対策が、民生用コネクタにとって重要な課題である。

5. その他の接触部品および共通の問題点

以上例示したもののほかにも、たとえば、チューナ、タイマ、IC ソケットなど、それぞれに特有の問題点をもっているものが多い。また、動接触と静接触の両方の機能が要求されるようなものもある。これらは、互いにそのデータを活用できることもあるが、多くの場合、その部品特有の使い方をするので、個々に入念な検討を行なわねばならない。

つぎに、接触抵抗の安定化や、耐ふん囲気性の向上あるいは機械的潤滑の目的で使用される接点潤滑剤があるが、これについては従来から十分に研究された報告がない。しかし、その効果は認められるし、今後は積極的にこれを活用していかなければならない場合も多いことから、その性状や効果について十分明らかにしておかねばならない。

潤滑剤によるコンタクト金属の腐食、潤滑剤の劣化、接触抵抗への影響、直流電界下での電気化学的挙動などそれぞれに重要なものである。

6. む す び

家電品に使用される接触機構部品について、その重要性、特異性に触れ、この部品の信頼性を確保する上でたいせつな接続技術、周辺材料技術について述べた。また、具体的な部品の信頼性について実例をあげ、その現状と問題点についておおよそに述べた。これらの例は、同じ接触機構部品でありながらそれぞれに特有な現象をみつかうものであり、この部品に要求される性能の幅広いことがあらためて理解される。しかし、だからといってこれを個々のものとしてとらえるのではなく、接続技術という分野の中で分類し整理していかなければならない。それが、この種部品の信頼性を確保する正道と考えられる。

当社においても、“つなぐ”ことの困難さを認識して、今後さらにその信頼性・安全性を追求していくつもりである。

参 考 文 献

- (1) 真野：“コンタクトに関する諸問題”電気通信学会全国大会，S13-1 (昭42) など
- (2) 山森ほか：三菱電機技報，34，No. 5 (昭35)
- (3) G. T. Kohman, et al. : Bell, Sys. Tech. J. 34, 115 (1955)
- (4) H. K. Hardy : Prog. Met. Pys. 6, 45 (1956)

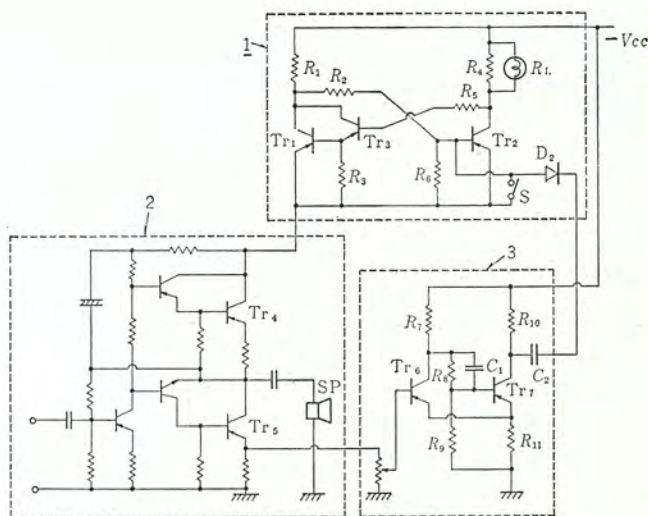


特許と新案

トランジスタ増幅器用保護装置 (実用新案 第927904号)

考案者 東 譲

この考案は、少なくとも出力段をトランジスタで構成した増幅器の負荷回路に過電流が流れた場合に、これを自動的に軽減せしめて出力トランジスタの破損を防止しようとするもので、増幅器(2)を共通エミッタ抵抗とする双安定マルチバイブレータ回路(1)の負荷抵抗 R_1 および R_4 を、 $R_1 \ll R_4$ に設定し、常時は R_1 を介して増幅器(2)へB電圧 $-V_{cc}$ を供給するとともに、増幅器の負荷回路に過電流が流れたとき、これを検出回路(3)で検出して、上記双安定マルチバイブレータ回路(1)を反転させて、B電圧 $-V_{cc}$ が抵抗 R_4 を介して増幅器(2)へ供給されるよう構成したことを特徴とするものである。なお、 R_4 は異常状態を表示する警報ランプである。



エレベータ出発管理方式 (特許 第608839号)

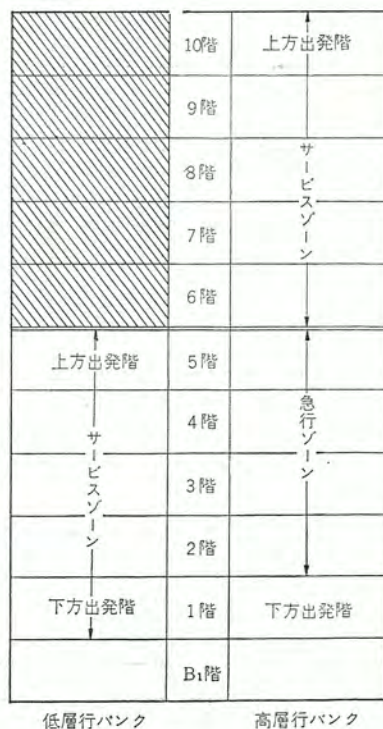
発明者 板垣晃平・篠崎裕久

この発明は複数の階床からなる非停止階、すなわち急行ゾーンを有する建物に並設された複数のかごからなるエレベータ装置の出発管理方式に関するものである。

超高層ビルにおいては、輸送力の向上と良質なサービスを得るために、図に一例を示すごとく、エレベータのバンク割を行って高層行急行バンクと低層行バンクのようにエレベータバンクを分けて設けることが多い。この場合、高層行急行バンクでは図に示すごとく下方出発階と、最初のサービス階すなわちサービスゾーンの最下階との間に、相当数の非停止階からなる急行ゾーンを有するようになる。しかし、従来の運転方式では、一般に下方出発階を基点としてエレベータの出発管理を行うため、かごは常に急行ゾーンを走行した後、サービス階床の呼びにตอบสนองすることになる。したがってサービス階で乗場ボタンを押してかごを待つ乗客は、かごが急行ゾーンを走行して階床に到着するのを待たしい気持ちで待っていなければならない欠点がある。

この発明はこのような欠点を解消したものである。すなわち、交通状態が閑散な場合以外は、下方出発階とサービス階床との交通がかなりあるものと予想されるので、一般に用いられる方式と同様に下方出発階を基点としてエレベータの出発管理を行い、そして交通が閑散になった時には下方出発階と、急行ゾーンの上にあるサービスゾーンの最下階とに、予定の台数ずつかごを分けて待機させ、下方出発階に待機するかごには、下方出発階からの乗客及び下方出発階より下の階からの乗客の輸送を受持たせ、サービスゾーンの最下階に待機す

るかごには、サービスゾーンの各階床からの乗客の輸送を受持たせる方式である。



特許と新案

したがって、サービスゾーン の各階床からの呼びに応答する場合に、その都度 下方出発階からかごが急行ゾーン を上昇して行って 応答するのではなく、サービスゾーン の最下階に待機するかごが迅速に 応答する

るので、乗客を長く待たせることがなくなり、良質なサービスを提供することができる。

近 接 検 出 装 置 (特許 第 637516 号)

発 明 者 寺 園 成 宏

この発明は容量式近接検出装置に関するものである。

この発明を図示実施例により説明する。図 1 において、(1)はアンテナ、(11)はその大地容量、(2)は大地容量(11)を共振回路内の同調容量として含む発振回路で、図 2 のごとく構成されている。すなわち図 2 において、(21)はトランジスタ、(22)はエミッタ抵抗、(23)、(24)はバイアス抵抗、(25)はバイパス用コンデンサ、(26)は帰還用コンデンサ、(27)はコイル、(28)は可変リアクタンス回路であり、コイル(27)と並列にアンテナ(1)の大地容量(11)、可変リアクタンス回路(28)を接続し共振回路を構成している。(30)は周波数変化検出回路で、振幅制限回路(31)、周波数弁別回路(32)、整流回路(33)から構成されている。(4)は交流増幅器、(5)はエレベータ等のとびら制御装置、(6)は周波数変化検出回路(30)の出力電圧を発振回路(2)の可変リアクタンス回路(28)の端子(29)へ、発振周波数変動に対し、負帰還となるように印加するための遅延回路を含む帰還回路である。

この装置において、今発振回路(2)が基準周波数 f_0 ヘルツで発振している場合、この出力は周波数変化検出回路(30)に送られる。周波数変化検出回路(30)は、図 3 のごとく特性をもっており、入力周波数に対応する基準電圧 e_0 を発生しているが、交流増幅器(4)の出力はゼロである。

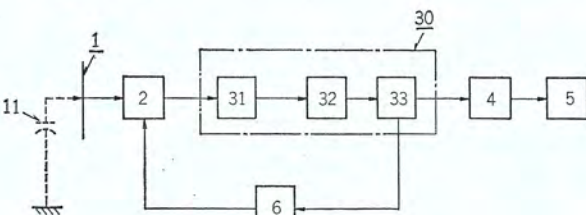


図 1

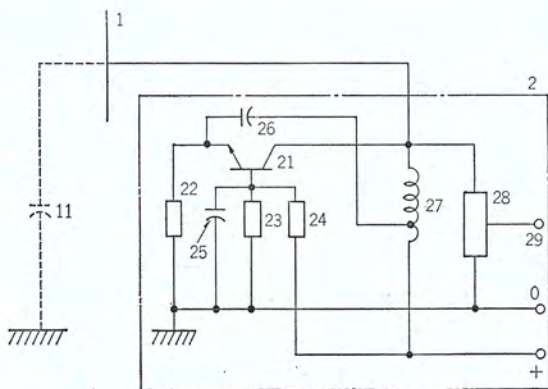


図 2

アンテナ(1)に物体が近接すると、図 4 (a)のごとく大地容量(11)が増加するため発振周波数が f_0 ヘルツよりも低い f_1 ヘルツとなり、図 3 のごとく周波数変化検出回路(30)の出力電圧が Δe に低下する。周波数変化検出回路(30)の出力は帰還回路(6)に印加され、遅延されて発振回路(2)内の可変リアクタンス回路(28)に、発振周波数が f_0 ヘルツになるように印加されているので、帰還回路(6)の時間定数 T_1 に対応した時間の後に発振周波数はほとんど f_0 ヘルツとなる。

したがって周波数変化検出回路(30)の出力波形は、図 4 (b)のごとくになり交流増幅器(4)の出力電圧は図 4 (c)のごとくパルス状となり、この出力によりとびら制御装置(5)を駆動する。

以上述べたようにこの発明の容量式近接検出装置は、簡単で安定性が良く、しかも周囲条件の変化によりアンテナの大地容量が増加しても検出感度がほとんど変化せず、とびら閉め途中に必要な十分に高い検出感度を有するものである。

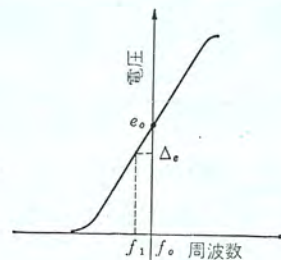


図 3

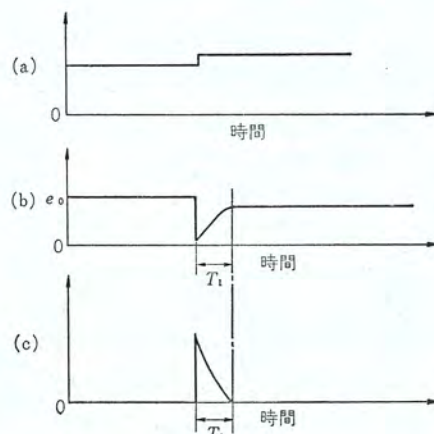


図 4

シーケンス制御装置 MELSEC-310

久保田伸夫*・仁田 周一*・大野 陽吉*
 山下 弘雄**・山本 修**・大野 宣男**
 岩永 俊之+・山崎 宣典++

Programmable Sequence Controllers MELSEC-310

Head Office Nobuo Kubota・Syuichi Nitta・Yokichi Ôno
 Kobe Works Hiroo Yamashita・Osamu Yamamoto・Nobuo Ôno
 Nagasaki Works Toshiyuki Iwanaga
 Nagoya Works Nobunori Yamasaki

Plant equipment is getting extremely larger sized of late and its control also is required to be complicated. This in turn makes the field of sequence control larger scaled and intricate. The controllers used for them, then, demanded to be built with a new concept. In the past wired logic equipment consisting of magnetic relays and contactless relays dominated in the field, but in the latest practice programmable sequence controllers introduced herein superseded the old equipment. Mitsubishi has rich experience with the sequence control, which has culminated to the development of sequencers MELSEC-310 as outlined.

1. ま え が き

近年、各業界におけるプラント設備の大形化は著しく制御も複雑になってきている。一方設備の運転については、自動化省力化が叫ばれており、シーケンス制御の分野でも同様に、シーケンス制御回路の規模は大形化・複雑化の傾向にあり、シーケンス制御装置も新しい考えを織り込んだものが要求されている。

従来シーケンス制御は電磁リレーや、無接点リレーによるワイヤードロシックによって実現されていたが、最近ではここに記すシーケンサによってシーケンス制御が行なわれている。すなわちシーケンサなるメモリを有する標準H/Wを使用して制御対象によって異なるシーケンス回路を、S/W的にプログラムすることによりシーケンス制御を実現するやり方である。従ってシーケンサに対しては従来のリレー盤と同じ感覚で扱えるとか、高信頼性を有するとか、リレー盤とはH/W的に異なっても機能・性能の点からは優れていなければならない。

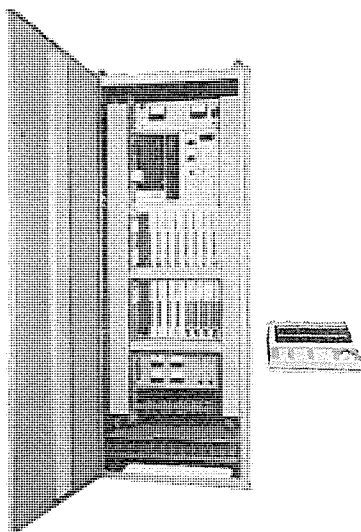


図 1.1 MELSEC-310 制御盤
 MELSEC-310 control panel.

三菱電機では、永年にわたり多くのシーケンス制御を行なってきたが、この豊富な経験から上記のごとき時代の要求に合致したシーケンサの開発を行ない、シーケンサ MELSEC-310 として順調なか（稼）動を得たのでここにその概略を記す。

MELSEC はシーケンス制御という応用面からの要求と、一方では半導体集積回路技術の発展と、電子計算機を中心とするデジタル技術の発展という基礎技術の発展とがよくマッチして生まれたものである。図 1.1 は MELSEC-310 の制御盤の写真である。

2. MELSEC-310 の特徴

シーケンサ MELSEC-310 はシーケンス制御専用機として次のような特徴をもっている。

2.1 MELSEC はシーケンス制御専用機

(1) シーケンス制御専用のプログラム命令体系、H/W 構成をもっている。すなわち MELSEC はシーケンス回路を構成する、論理命令 AND, OR, F/F 等、表 4.1 に示す命令のごとき 2 値で表わされる論理演算を実行するのに最適な命令体系、H/W 構成をもっている。

(2) プログラミングパネル (PP) を持っている。図 3.2 に示す PP の機能として、a) PP の上のシーケンス記号が記入してある押しボタンを押してシーケンスを組む。b) プログラムされたシーケンスのデバッグおよびチェック機能と、これらが便利にできるための表示機能、があげられる。

2.2 MELSEC は使い易いシーケンサ

(1) シーケンス回路図を見ながら直接 PP を使ってシーケンスを組む。すなわち電磁リレーや無接点リレーを扱ってきた技術者が容易に扱えるシーケンサであるので、これを扱うための特別な教育はいささい不要である。つまりシーケンス回路図の表現、(記号)は従来の電磁リレー、無接点リレーによるシーケンス回路図と全く同じであり、このシーケンス回路図を使用して、回路図のとおりプログラミングパネル上の押しボタンを押せば、シーケンス回路が組まれることになる。

(2) プログラミングパネル上の押しボタンに記されている命令はシーケ

ンスが容易に組める命令を選択してある。すなわち表4.1にMELSECの命令一覧表を示すが、この命令を大別すれば論理命令、機能命令、出力命令、制御命令になるが、MELSECがシーケンサとして使い易い命令を持っている理由に、機能命令と制御命令に特徴がある。

機能命令は、シーケンス制御回路にひんばんに出てくる一つの機能を有する回路動作を押しボタンの命令一つで実現しようとするものであって、この命令があるため複雑な押しボタン操作の必要がなくなり、プログラムメモリ効率のよい、使い易いシーケンサとなる。

制御命令は従来のハードワイヤードロジックのシーケンス回路図には表示されていない命令であるが、シーケンサとしてこのような命令は少ない方が使い易い。逆に制御命令が多いと、シーケンサにプログラムする場合の約束事が多いことになり使い難いということになる。

(3) シーケンスの追加変更がPP上で容易にできる。シーケンス制御は実際にシーケンサと制御対象である機械と組合せて試験調整を行なう段階でシーケンス回路の追加変更がしばしば生じるが、このときPPの押しボタンを押し換えるだけで容易にシーケンスの追加変更ができる。

(4) シーケンス制御のオンラインモニタができる。PPはシーケンスをプログラムする機能のほかに、オンライン中のシーケンス動作をモニタしたり、試験調整中のプログラムデバッグが容易にできる表示機能を持っている。

(5) 付属機器としてプログラム自動書込装置(カセットMT)、およびプログラム自動記録装置(プリンタPT)が用意されている。

MELSEC-CPUとカセットMT、プリンタの接続を図3.3に示す。

(a) カセットMT: メモリにプログラムされている内容をMTに記録することができるのでシーケンスの保存ができる。従ってメモリが故障したとき、別の正常なメモリにMTから自動的に書き込んだり、プロセスのスケジュールを変更して運転したい時、メモリ内容をMTの内容に自動的に書き換える。またPPからMTにCPUを使用しないでシーケンスをプログラムすることができるので、シーケンサH/Wとメモリ内容(S/W)とを分離でき、ユーザはH/Wのみ購入して使用することができるし、S/W、H/W一体の製作の場合にH/WとS/Wの製作期間を別々に管理できるので、メカ製作期間が短期間になる等のメリットがある。

(b) PT: メモリ内容あるいはMT内容をプリントアウトすることができるので、プログラムのデジタル化が実現される。従って、試験調整期間の短縮、シーケンス追加変更の確認、等のメリットがある。

(6) 豊富なPI/Oの標準シリーズを有している。表3.1、3.2にMELSEC PI/Oの一覧表を示す。

(7) メンテナンス性が高い。上に述べたようにPP、MT、PTを用いればメンテナンスが容易に行なえるが、このほかにMELSECを構成しているH/Wについても次のごとく特徴がある。

(a) プリント基板実装のモジュール化の採用。

(b) PI/Oモジュールの入出力回路にはランプ回路を付加し、MELSEC制御盤の設置場所から外部プロセス機器の動作状態の判別ができる。

(c) CPU故障時のためには表示および信号接点を用意してある。

2.3 MELSECの高信頼性を有するシーケンサ

(1) 完全無接点化が実現できる

MELSEC出力とプロセスを直結する部分(プロセスアウトプットPO)は、

完全無接点化が実現できるために高信頼性長寿命が得られる。

プロセス出力POで電磁弁のコイル、大形コンタクトのコイルをサイリスタスイッチで直接制御できる。

(2) CPUロジック回路の規模が小さい

CPUロジックはシーケンス制御専用設計されているため、回路規模は小さく、使用している部品点数が少なく故障率が低い。

(3) 非破壊読出しメモリを使用している

シーケンスを記憶しているメモリは、非破壊読出しメモリであるワイヤメモリを使用しているため完全な記憶保護が実現されている。非破壊読出しの特長を生かしメモリからの命令読み出し誤動作を自動的に修正する機構を有している。すなわち外乱等により瞬間的な誤読み出しが発生した場合自動的に再読み出しを実行し、正しい命令によるプログラムの続行を行なう。ワイヤメモリはスイッチ一つでRAM-ROM切替が可能であるためプログラム中はRAMとして使用し、オンライン運転中はROMとして使用し高信頼性を得る。

(4) IC回路の全面的採用

IC素子特にMSIを多く使用して部品点数をへらしている。

(5) 耐ノイズの回路設計

MELSECは従来のリレー盤の代わりに使用される場合が多いが、耐ノイズ性については十分考慮された設計がなされている。一つは、MELSECの入出力に接続される外部信号用電源と、CPU、I/O電源は完全に分離されている。例えばAC入力信号はトランスで絶縁し、DC入力はいくろリレーで絶縁されている。出力はサイリスタスイッチのゲート回路にパルストランスを使用して絶縁している。また入出力回路にはフィルタ回路をそう(挿)入しノイズ信号をバイパスする回路方式を採用している。

3. MELSEC-310の基本構成と機能

3.1 概要

図3.1は、MELSEC-310の基本構成を示すブロック図である。図に示すように、演算制御部、メモリ部を中心として、プロセス入力部、入力制御部、出力制御部、プロセス出力部、一時記憶ユニット、タイマユニットなどがシーケンス制御信号の処理を行なう。これらに加えて、プログラミングパネル、カセットMT、プリンタが付属機器として組み合わされて、一つのシーケンス制御装置を構成する。以下各部の詳細を述べる。

3.2 演算制御部(CPU)

3.2.1 演算制御部

演算制御部はMELSEC-310の中心となる基本装置であり、メモリ部にあらかじめ記憶されたシーケンス制御手順を順次読出し、入力制御部を介して読取った各種入力状態に基づいて、判断・演算処理を行ない、その結果を出力制御部へ供給する機能を持つ。演算処理は繰返し方式を採用しており、1命令当り2.5μsの演算処理速度を有する。このため、MELSEC-310は、割込機能を持つことなくシーケンス制御の実行が可能である。構造的には、高い保守性を有するように極力回路の小形化が実現されており、一時記憶ユニットを含めて、カードモジュールがわずか2枚で構成されている。

3.2.2 メモリ部

メモリ部は、表4.1に示す命令によってあらかじめプログラムされたシーケンス制御の実行順序と制御内容を記憶する機能をもち、メモリ素子としてワイヤメモリを採用している。ワイヤメモリの非破壊メモリという大きな利点を生かすことにより、下記のような特徴あるシーケン

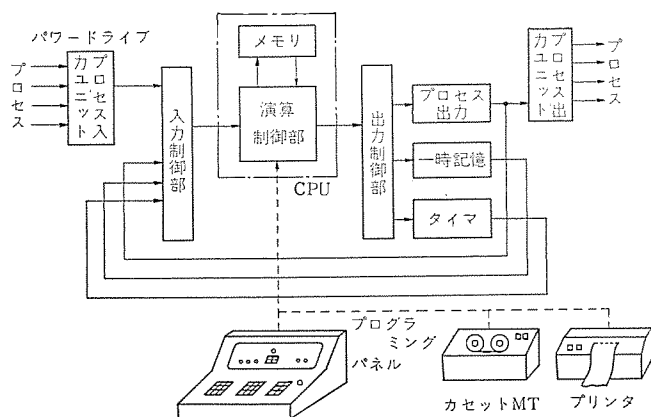


図 3.1 MELSEC-310 基本構成図
System configuration of MELSEC-310.

ス制御装置が実現できる。

- (a) 非破壊読み出し素子であるので安定度が高い。
- (b) RAM, ROM の切換が自由に行なえる。

(c) メモリのエラー検出回路の2重化が容易に行なえる。

3.3 入力制御部

演算制御部への各種入力状態を選択する機能を有する。入力信号としてプロセス入力部からのプロセス入力信号 (I) はもちろんのこと、プロセス出力信号 (O), 一時記憶 (M), タイマ (T) が任意に選択できる。特に、プロセス出力信号、一時記憶、タイマの各信号は、内部でフィードバックされているので、プロセス入力部を介することなく入力信号として使用できるため、入力最大点数が常にプロセス機器信号と接続して使用できる。

3.4 出力制御部

演算制御部で演算処理された結果を出力命令により、プロセス出力部、タイマユニット、一時記憶ユニットへ分配転送する機能を有する。

3.5 プロセス入力部

プロセスからの入力信号の受信を行なう。プロセス入力ユニットは直接プラントと接続可能で、仕様は表 3.1 に示す通りである。入力点数は、16 点単位でユニット化されており最大 512 点まで実装可能である。

表 3.1 プロセス入力ユニット Process input unit.

アイテム	形名	入力信号(プロセス側)		出力信号 (CPU側)	入出力間絶縁			プロセスとの接続		実装 点数	特長	用途
		電圧	電流		有	無	方式	コネクタ	端子台			
1	(PIAF)	AC 110V	10mA	IC レベル(5V)	○		トランス	○	—	16	AC入力 トランス絶縁 無接点式	プロセス一般 リミットスイッチ リレー } 等
	PIAA	AC 110V	10mA	IC レベル(5V)	○		トランス	○	○			
2	(PIBF)	DC 220V	10mA	IC レベル(5V)	○		トランス	○	—	16	DC入力 リレー絶縁 有接点式	コンピュータとの接点
	PIAB	AC 220V	10mA	IC レベル(5V)	○		トランス	—	○			
3	PICA	DC 48V	10mA	IC レベル(5V)	○		リードリレー	—	○	16	DC入力 リレー絶縁 有接点式	近接スイッチ デジタルスイッチ ロジックレベル
4	(PIDF)	DC 100V	10mA	IC レベル(5V)	○		リードリレー	○	—	16		
	PICB	DC 100V	10mA	IC レベル(5V)	○		リードリレー	—	○			
5	PIDA	DC 12V 24V DC 12V 24V	10mA			○		—	○	16	DC入力 非絶縁 無接点式	

表 3.2 プロセス出力ユニット Process output unit.

アイテム	形名	出力信号(プロセス側)		入力信号 (CPU側)	入出力間の絶縁			プロセスとの接続		実装 点数	特長	用途
		電源電圧	負荷電流		有	無	方式	コネクタ	端子台			
1	(POAF)	AC 110V	2A	IC レベル(5V)	○	—	パルストランス	○	—	8	AC出力 無接点式 BCR使用	プロセス一般 ACバルブ用
	POAA	AC 110V	2A	IC レベル(5V)	○		パルストランス	—	○	8		
2	(POBF)	AC 220V	2A	IC レベル(5V)	○		パルストランス	○	—	8	接点出力	8点独立接点
	POAB	AC 220V	2A	IC レベル(5V)	○		パルストランス	—	○	8		
3	(POCF)	AC220V 110V	S-50 コンタクト以下 SD-112 以下	IC レベル(5V)	○		リレー	○	—	8	接点出力	8点コモン接続 8点トランスファ コンピュータ用 低レベル用
	POCA			IC レベル(5V)	○		リレー	—	○	8		
4	POCB	DC100V		IC レベル(5V)	○		リレー	—	○	8		
5	POCC	DC48V以下	低レベル	IC レベル(5V)	○		リレー	—	○	8		
6	POBA	DC 100V	2A	IC レベル(5V)	○		パルストランス	—	○	8	DC出力 無接点 AC電源	DCバルブ クラッチ プレーキ DCコンタクト

3.6 プロセス出力部

プロセスへの出力を行なう。プロセスユニットは、表 3.2 に示すように大容量半導体スイッチの採用により、直接、電磁弁や電磁スイッチを駆動することが可能である。出力点数は 8 点単位で最大 512 点まで拡張可能である。

3.7 一時記憶

電磁リレー回路での中間リレーに相当する機能を持つ中間メモリで最大 512 点が演算制御部に実装されている。

3.8 タイマ

ソフトウェアによって任意の時限が得られるプログラマブルタイマで、最大 128 点が 8 点単位で実装できる。時限の設定は 0.05 秒から最大 950 秒まで可能である。

3.9 付属機器

MELSEC-310 の付属機器は、標準としてプログラミングパネル、オプションとしてカセット MT、プリンタが用意されている。

3.9.1 プログラミングパネル

図 3.2 に示すプログラミングパネルは MELSEC-310 が持つ唯一のマシンインタフェースで下記機能を有する。

- (a) プログラム書込み機能
- (b) プログラム読出し機能
- (c) プログラムの 1 ステップ実行機能
- (d) オンラインモニタ機能
- (e) 各種表示機能

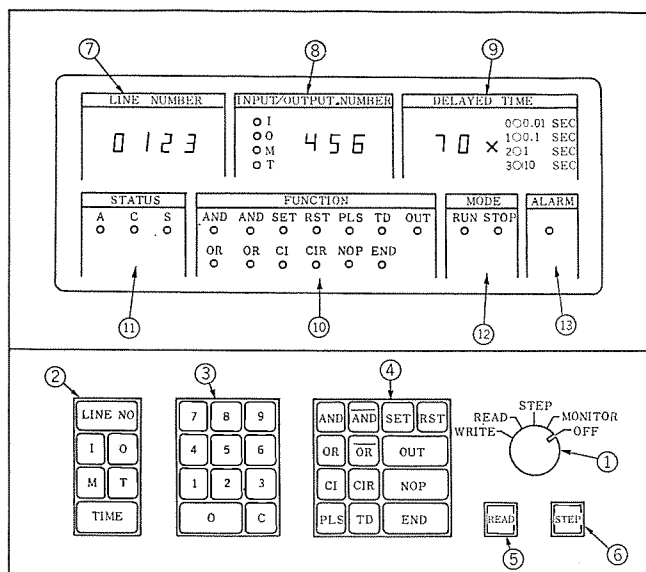
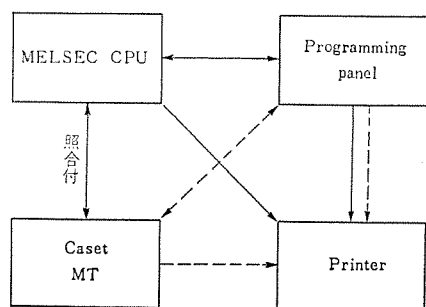


図 3.2 プログラミングパネル
Programming panel.



破線はCPU無で実行可能

図 3.3 MELSEC-CPU と付属機器
MELSEC-CPU and option devices.

プログラミングパネルの製作には、使い易く、簡単な操作でシーケンスの組立て、すなわち、プログラミングができるよう下記の点に注意が払われている。

- (a) 押しボタンを押すだけでプログラムできること
- (b) 設定、表示はすべて 10 進法の採用
- (c) シーケンスの表現とスイッチ操作手順が同一
- (d) 容易に持運びが可能

3.9.2 カセット MT, プリンタ

オプションとして用意されているカセット MT およびプリンタは MELSEC-310 におけるプログラムの取扱いや作成をより使い易く、容易にする装置である。カセット MT は、外部記憶装置としてプログラムの保存、交換・修正、上位計算機とのプログラム交換などの機能を有する。一方、プリンタは、プログラミングパネルの操作記録、メモリ内容のハードコピー等の機能を持つ。図 3.3 は、MELSEC-310 における CPU と各付属機器との接続および機能を示している。

特に注目すべきことは、図中、破線で示すように、CPU なしで使

表 3.3 MELSEC-310 の主仕様
Specifications of MELSEC-310

項 目	仕 様
演算制御部	・演算方式 くり返し演算方式
	・演算速度 10 ms/4 k 語 2.5 μs/1 step 13 種類
入プロセス部	・命令語 素子 容量 ・一時記憶
	ワイヤードメモリ (非破壊形) 2 k, 4 k 語 (max) IC メモリ, 512 点 max
出プロセス部	・実装点数 ・種類と仕様 ・入力ユニット収納 フレーム
	最大 512 点, 16 点単位 表 による 128 点/フレーム……入力専用 64 点/フレーム……入出力混在
タイマ	・実装点数 ・種類と仕様 ・出力ユニット収納 フレーム
	最大 512 点, 8 点単位 表 による 64 点/フレーム……出力専用 32 点/フレーム……入出力混在
方式 実装点数	デジタル式ソフトタイマ最大 最大 128 点, 8 点単位 128 点/フレーム
付 属 機 器	機能……プログラム書込, 読出 1 ステップ実行, オンラインモニタ 外形……可搬形
	機能……プログラム書込, 読出 作成, 修正, 保存 容 量……4 k 語
プリンタ (オプション)	機能……プログラミングパネル操作記録 プログラムメモリ, ハードコピー 印字速度……350 ms/line けた数……18 けた, 89 mm 幅
アナログタイマ	設定範囲……50 ms~200 秒 実装点数……最大 128 点 デジタルソフトタイマと互換性あり
シーケンスカウンタ	方式……直列歩進, 並列歩進 ステップ数……7 ステップ/単位, 28 ステップ/ カード
プリセットカウンタ	プリセット方式……直接および Remote けた数……10 進 4 けた PI/O と互換性あり
ラッチ出力	実装点数……最大 256 点, 4 点単位……外部出力有 最大 512 点, 8 点単位……外部出力無 PI/O と互換性あり
使用条件	電 源 温 度 湿 度 振 動 AC 100 V/110 V, -15%~+10%, 50/60 Hz 0°C~+50°C 10%~90% NDS-XF-8017 に準ずる

用できることである。すなわち、プログラミングパネル、カセットMTおよびプリンタの組合せによりプログラム作成、修正などの機能を机上で実行することが可能である。

以上、MELSEC-310の主機能について述べたが、これらをまとめたのが表3.3に示す主仕様一覧である。

4. プログラミング

4.1 命令

MELSEC-310において、特に留意されたことの一つに命令体系がある。すなわち、従来、リレーシーケンスを扱っていた技術者が、MELSECでシーケンス回路を組立てる時、計算機的手法を感じることなく取扱えるプログラム方式を採用することである。この点から、MELSEC-310で用いられる命令は、表4.1に示すように、従来のリレーシーケンスと対応させており、さらにシーケンス制御上よく使われる機能を一つの命令として採用することにより、押しボタンの操作だけで容易にプログラムできるよう工夫されている。

表 4.1 MELSEC-310 の 命令
Instructions of MELSEC-310.

命令	命令後	シンボル	機能
論理命令	AND		論理積
	ANDI		論理積
	OR		論理和
	ORI		論理和
出力命令	OUT		プロセス出力、一時記憶に対する出力
機能命令	TD		オンタイム デレイ 遅延時間: 1けた+1/2けた 0...0.01秒 レンジ: 1...0.1秒 2...1.0秒 3...10.0秒 設定範囲: 0.05秒~950秒
	SET		自己保持形出力
	RST		プロセス出力、一時記憶のセット、リセットを行う
	CI		共通インタロック
	CIR		共通インタロック無条件解除
制御命令	PLS		信号の立上り検出 入力信号の立上り微分と論理的にあって信号の立上りを検出する
	NOP		無効
	END		プログラムの最後に おける命令

表 4.2 遅延時間とレンジ
Delay time and range.

レンジ番号	レンジ(秒)	設定範囲(秒)	精度(秒)
0	0.01	0.05, 0.1, 0.15 ~ 0.95	± 0.01
1	0.1	0.5, 1.0, 1.5 ~ 9.5	± 0.1
2	1.0	5.0, 10.0, 15.0 ~ 95.0	± 1.0
3	10.0	50.0, 100.0, 150.0 ~ 950.0	± 10.0

4.1.1 論理命令と出力命令

リレー回路におけるリレーや、半導体ロジックにおける素子の取扱いと全く同様な機能を持つ。否定命令(NOT)の代りに、ANDI, ORIなどの信号反転命令を有することにより、プログラム効率の向上をはかっている。

4.1.2 機能命令

(a) TD(タイマ)

任意のタイマ素子に対し、0.05sから950sの範囲内で任意の時限設定(表4.2)を行なう命令である。反転命令と組合せることにより、OFF-DELAYタイマとしても使用できる。

(b) SET, RST

シーケンス制御回路における自己保持回路の機能を実行する命令で、任意の条件でプロセス出力および一時記憶をセット、リセットすることができる。この命令では、セット条件、リセット条件をそれぞれ独立して組めばよいので、複雑な条件を有する自己保持回路も容易にプログラムできる。

(c) PLS

シーケンス制御において、入力信号のパルス化(微分)は非常に重要なかつひん(頻)繁に現れる機能である。従来、リレー回路で微分回路を組む場合、タイマリレーを必要としていたが、PLS命令では、一時記憶の1点を用いて論理的に信号の立ち上り微分を実行する方式を用いている。前述の反転命令(ANDI, ORI)を用いることにより信号の立下り微分も容易にプログラムできる。

(d) CI, CIR(共通インタロックセット、リセット)

図4.3(a)は、リレーシーケンス回路でよく用いられる共通条件回路である。リレー接点一つを使用して、いくつかの出力条件とすることこの手法はリレー回路における大きな特徴である。MELSECではこの機能をCI命令として採用している。すなわち、共通条件をCI命令でSetすると以後、CIR(共通条件リセット)命令が実行されるまでに実行される出力命令(OUT, SET, RST, TD)は、CIでSetされた共通条件が自動的にANDされる。

4.1.3 制御命令

MELSECのCPUを制御する命令であり、シーケンス制御上なくてもよい命令である。MELSECでは、この種の命令を極力少なくしている。ハードウェアの知識がなくても容易にプログラムできる。NOP命令は、プログラム修正時やメモリの空白部に使用する。END命令は、プログラムの最後尾に記されるもので命令を実行すると最初のシーケンスへもどる機能をもつ。

4.2 プログラミング

従来、プログラミングといえば、計算機のように十分なH/Wの知識と多くの命令を用いて行なっていたため非常に難しいものという考えがあった。MELSECでは、このプログラミング、すなわちシーケンス回路を組立てるという作業をだれにでもすぐ理解できるように、従来のリレーシーケンスと密着した命令およびかんたんなシンボルでの表現により、シーケンス制御回路のプログラミングが行なえるように工夫されている。MELSECのプログラミングには下記のような特長がある。

- (1) リレーや論理シンボルなどで表現できる。
- (2) プログラミング上のルールがほとんどない。
- (3) 機能命令によりシーケンス機能が容易にプログラムできる。
- (4) コーディング作業が不要である。
- (5) 機械のフローと制御シーケンスが一体で表現できる。
- (6) 従来の線符号的感覚でメモリアドレスが表現できる。

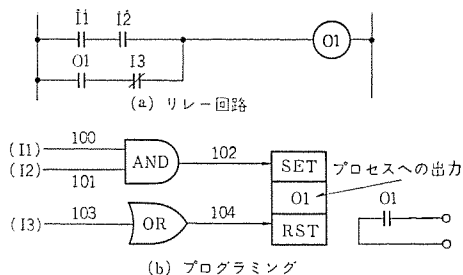


図 4.1 自己保持回路
Self hold circuit.

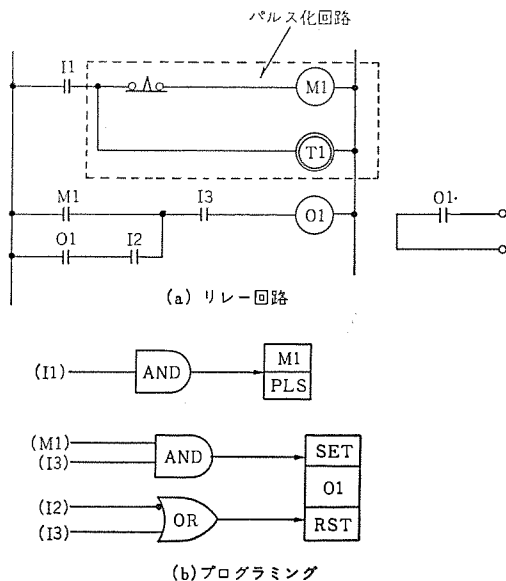


図 4.2 微分検出回路
Differential signal sensing circuit.

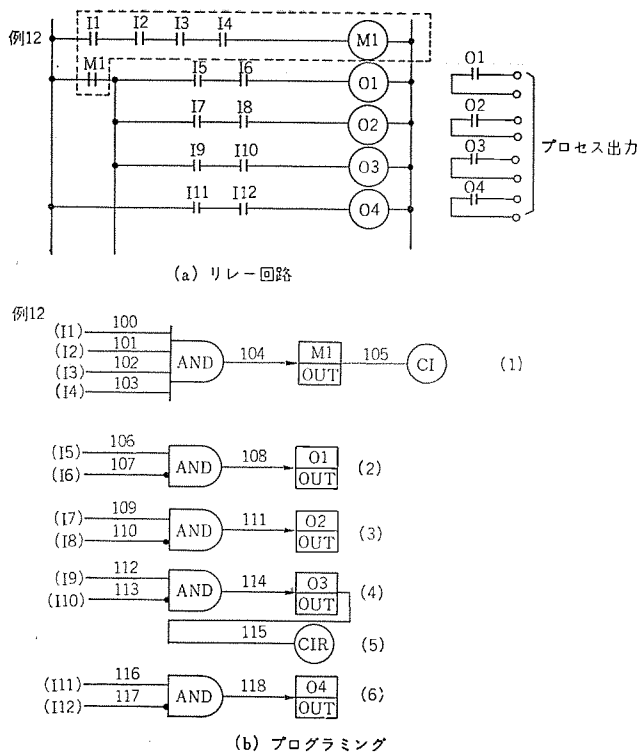


図 4.3 共通インタロック回路
Common interlock circuit.

図 4.1 (a), 図 4.2 (a), 図 4.3 (a) は従来のリレー回路による自己保持、パルス化、共通条件回路である。図 4.1 (b), 図 4.2 (b), 図 4.3 (b) は、それぞれの回路を MELSEC-310 の命令で表現したものである。図中の線符号 (LINE NO) はメモリアドレスを示している。

4.3 プログラムの書き込みと読出し

MELSEC では、プログラミングされたシーケンスをメモリ部に書き込むには、前述の命令シンボルで表現されたシーケンス図を見ながら、直接、プログラミングパネル (図 3.2) の押しボタンを押すことで実現される。各押しボタンの操作がなされると書き込み内容はパネル上に表示される。図 4.4 は、タイマ回路の例とその書き込み手順が示されている。一方、メモリに書き込まれたシーケンス内容を読出す場合の手順は図 4.5 に示すとおりである。

4.4 プログラムデバッグ

プログラムのデバッグには下記の 2 とおりがある。

(1) 1ステップ実行

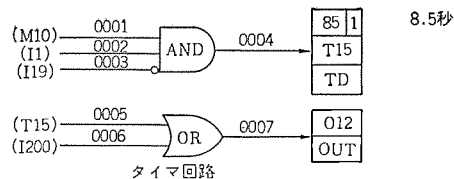
プログラミングされたシーケンス回路を 1 ステップずつ実行しながら入力条件、演算状態、出力状態をチェックする方法である。プログラミングパネルで 1 ステップ実行を行なう場合の手順を図 4.6 に示す。この方法によりプログラムは順次実行され、その実行内容を監視しながら機械を動かすことができる。

(2) オンラインモニタ

MELSEC の CPU が RUN の状態、すなわち、シーケンス制御が実行されている時にプログラムの内容チェック、入出力状態のチェックを行なう機能である。プログラミングパネル上のモードをモニタとし、ラインナンバを指示するだけで、時々刻々と変化するシーケンス制御の状態をオンラインでモニタすることができる。

4.5 プログラム変更

デバッグ中に変更が生じたり、設備の拡張などによりプログラムが変更される場合、プログラミングパネルによって変更する方法は下記のとおりである。



プログラム書き込み順序					
書き込み 順	モード切 換 スイッチ①	入出力選 択 スイッチ②	テンキー スイッチ③	命令ス イッチ ④	ライン ナンバ
1	WRITEモード				
2		LINE NO	→ 1		0001
3		M	→ 1 0	→ AND	0002
4		I	→ 1	→ AND	0003
5		I	→ 1 9	→ ANDI	0004
6		T	→ 1 5		
7		TIME	→ 8 5 1	→ T D	0005
8		T	→ 1 5	→ O R	0006
9		I	→ 1 0 0	→ O R	0007
10		O	→ 1 2	→ OUT	0008

完了

図 4.4 プログラム書き込み例
Example of program load.

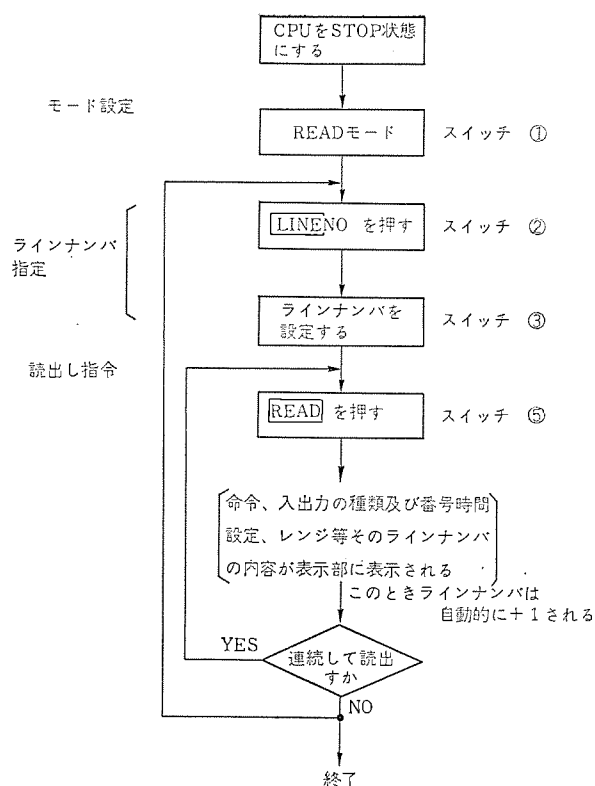


図 4.5 プログラム読出手順
Operation of program read.

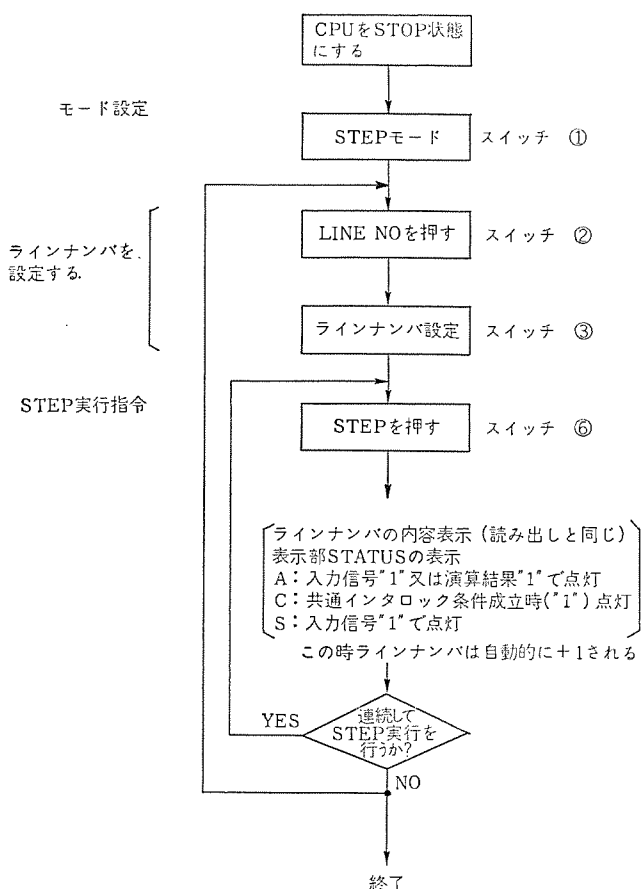


図 4.6 プログラムの1ステップ実行順序
Operation of program execution.

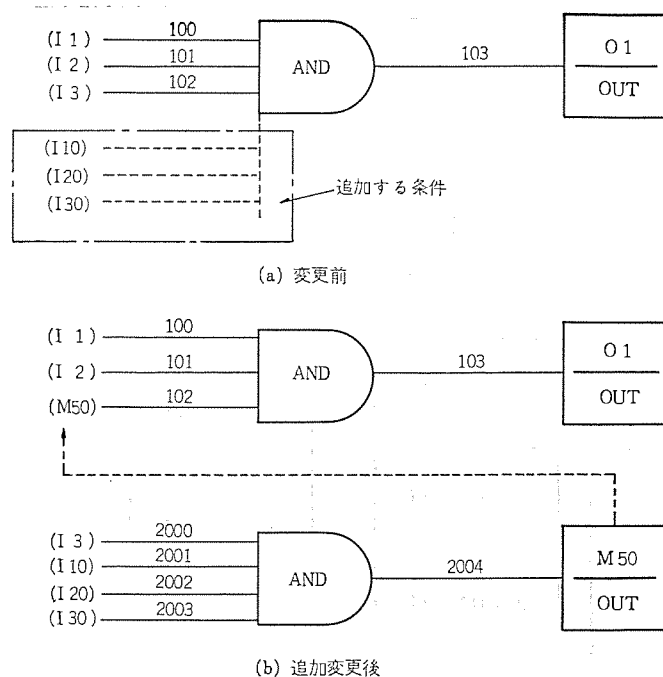


図 4.7 プログラム度実例
Example of program exchange.

(a) プログラムの修正方法

条件の種類が変わったり、条件の機能がかわったりした場合、プログラミングパネルからI/O番号や命令ボタンを押して変えるだけで任意に修正できる。

(b) プログラムの取消し方法

インタロック条件やシーケンス制御回路の一部が不要になって取消す場合は、プログラミングパネルから該当するラインナンバにNOP命令を書込むことによって変更できる。

(c) プログラムの追加方法

条件が一部追加されたり、シーケンス回路が一部追加された場合、全体のプログラムを書き換えることなく容易に追加変更できる。図4.7は3入力条件に対しさらに3入力の条件を追加したいが、ラインナンバが前後使用されている場合の例を示す。

以上、MELSEC-310におけるプログラミング手法は、命令、プログラミングおよびその取扱いなどすべてが容易に実行される。

5. MELSEC-310 制御盤

MELSEC-310の制御盤は、図5.1に示す構成となる。図の左側には、演算制御部とPI/O、右側はPI/Oを収納してある。PI/O点数の増加によって更に右側に一面追加になる場合がある。図は、PI=512点、PO=256点収納の例を示している。

PI フレーム: 128点 (1フレーム 当り)

PO フレーム: 64点 (1フレーム 当り)

デジタルソフトタイマ: 32点

6. む す び

シーケンス MELSEC-310 は、近年のシーケンス制御の分野における、シーケンス制御に対するS/W的、H/W的考え方の変化に従って生まれたものであるが、これらを扱う人達は従来からの流れの中にいるため、電磁リレー盤と半導体リレー盤を扱ってきた経験が生かされなければならないとの要求がある。またH/W的にも標準化された装置(特にCPU部)を集中的に使用するため、故障時のプラント運転に

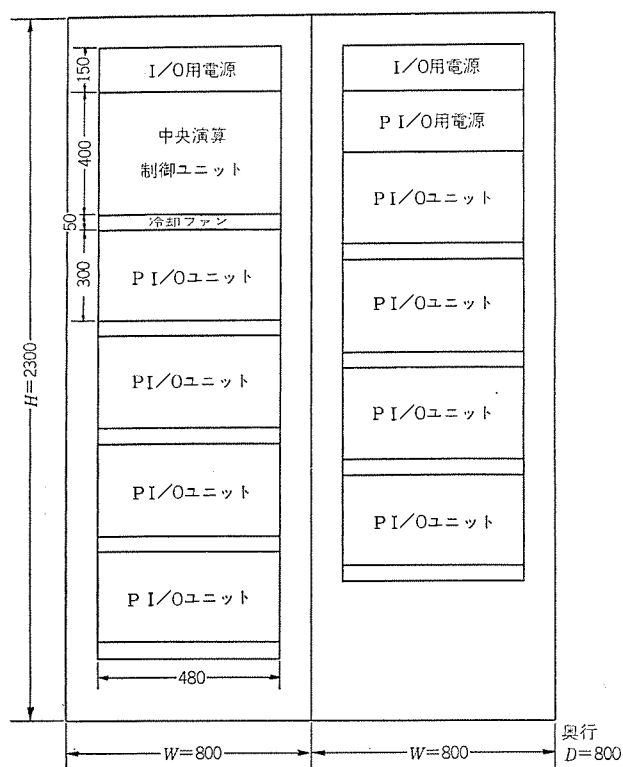


図 5.1 MELSEC-310 制御盤
MELSEC-310 control panel.

支障をきたさぬような高信頼性が強く要求される。

万一故障が生じた時に迅速な復旧が行なわれなければならぬことはもちろんである。

MELSEC-310 は以上のような、基本的な要求を満たすシーケンサを開発することに主眼を置いた。

最近各業における使用実績も積み重ねられ、十分満足すべき結果が得られていると考えている。

最後に MELSEC-310 開発に際し御協力あった関係部門の方および、MELSEC-310 をプラントの適用に関し御配慮いただいたユーザーの方々に深甚の謝意を表する。

シーケンス制御装置 MELSEC-710

岩永 俊之*・片岡 猪三郎*

Programmable Sequence Controllers MELSEC-710

Nagasaki Works Toshiyuki Iwanaga・Isaburo Kataoka

Recently automatic operation and labor saving are extensively taken up for industrial plants. To realize the projects programmable sequence controllers have come in the limelight. As the industrial installations become of a large scale and complication, these new devices are perceived far more advantageous than the wired logic type old arrangements in the points of reliability, flexibility and maintenance.

To meet the demand of these devices, Mitsubishi has developed general purpose sequence controllers MELSEC-710 and added them to the regular manufactures. This article deal with them.

1. ま え が き

今日のように、プラントの規模が大形化し、複雑化してくると、生産工程の自動化、省力化をはかるために、それに適用される制御装置も従来の電磁リレーや、半導体リレーによるワイヤードロジック方式に代わり、配線変更することなく、シーケンスを自由に変更できるプログラマブルユニバーサルシーケンスコントローラが脚光をあびるようになった。

当社では、長年にわたる総括制御装置 MELMAC シリーズの実績と豊富な制御用電子計算機の技術とを生かし、図 1. 1 に示されるような 4 本柱を十二分に発揮できるはん(汎)用シーケンス制御装置 MELSEC-710 を製品化した。

なお、MELSEC-710 は MELSEC-310 と同一思想のもとに、統一化、標準化をはかり、シリーズ化したものである。

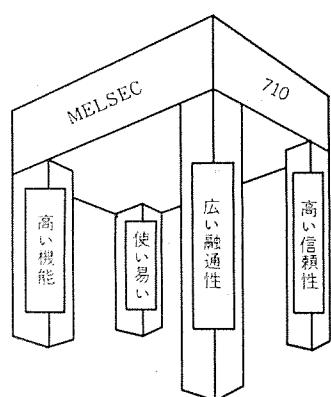


図 1. 1 MELSEC-710 の 4 本柱
Four objects of MELSEC-710.

2. MELSEC-710 の特長

MELSEC-710 は次のような特長をもっている。

2. 1 使い易いこと

(a) 従来のリレーシーケンスを作成する手法で、簡単にプログラムすることができ、電算機のような、プログラミングのための特殊教育は不要である。

(b) 更に計算機に慣れた人々のために、フローチャートやブール代数から、直接プログラムすることもできる。従ってリレーシーケンスに不慣れな人も、容易にプログラムすることができる。

(c) サブルーチン処理ができるので、プログラムの標準化ができ、特に類似シーケンスの繰り返しが多い場合は、プログラムのワード数を大幅に減らすと同時に、プログラムミスも減らすことができる。

(d) 分岐命令をもっているため、プログラムの修正、追加が容易である。

(e) 運転中のシステムの監視、チェックをプログラミングパネルによって容易に行なうことができる。(オンラインモニタ)

試運転中のシステムデバッグにおいては、指定のラインナンバ(プログラム番地)で、プログラムの進行を停止させることができる“デバッグホールド”機能とプログラムを任意のラインナンバから、1ステップずつ実行させる“ステップ”機能を持ち、これらの機能を随時使い分けながら、システムデバックやチェックを行なうことができる。

(f) 付属機器(プリンタ、紙テープパンチ、紙テープリーダー)を使うことによって、プログラムの内容のプリント、紙テープへの再生、紙テープとメモリとの照合、紙テープからメモリへの高速書き込みができるので、プログラムのメンテナンスやハードウェアのチェックが容易である。

(g) メモリは、スイッチ操作のみによって、読み出し専用メモリ(Read Only Memory=ROM)にするか、読み書きメモリ(Random Access Memory=RAM)にするかの選択ができるので、システムのデバッグが簡単である。

2. 2 高い機能を有すること

従来のシーケンス制御に必要な論理演算、一時記憶、タイムディレーのほか、次のような機能を有し、プログラムの融通性を高めている。

(a) 微分検出処理

プロセスからの信号の立上り、立下りを検出することができる。

(b) 共通インタロック処理

共通インタロック条件を設定することによって、プログラムの簡素化ができる。

(c) サブルーチン処理

プログラムの標準化と類似シーケンスの繰り返し使用に対しては、大幅にプログラム数を削減できる。

(d) 割込処理

非常事態の処理、優先制御、高速パルス処理、シーケンスコントローラ同士の並列運転、上位計算機との接続など、複雑な制御が容易となる。

2.3 高信頼性であること

(a) 完全無接点化もできる

集積回路 (SSI, MSI, LSI) を主体として、プロセス入出力を除いて、完全に半導体化しているために、可動分がなく長寿命である。なおプロセス入出力についても、無接点形を選択すると完全無接点化ができる。

(b) 非破壊読み出しメモリの採用

シーケンスを記憶するメモリには、非破壊読み出しであるワイヤメモリを使用しているため、記憶内容が誤って変わることなく、安定している。試運転中のシステムデバッグ中はRAMとし、完了後はROMとすることによって、高信頼性が得られる。

(c) パリティチェック

メモリから読み出される情報に対して、パリティチェックを行ない、情報の確認を行なっている。

(d) プログラムメモリの再読み出し

パリティチェックによって、エラーが発生した場合には、自動的に再読み出しを行ない、再度エラーが発生したことを確認して、エラーの発生をアラームし、自動停止を行なう。

(e) シーケンスの渋滞監視

演算制御部は Watch Dog Timer (WDT) によって、一巡シーケンスが、規定時間内にいることを監視し、規定時間を越えた場合はアラームする。

(f) 耐ノイズ対策

プロセスとのインタフェース部であるプロセス入出力部は、従来の強電用制御機器の経験を十分に生かし、耐ノイズ対策をほどこし、強電回路との直接接続ができる。

2.4 融通性があること

(a) ソフトウェアとハードウェアを完全に分離し、ハードウェアは共通化して、各仕様ごとのシーケンスは、メモリへ書き込む、いわゆるプログラムによって、仕様に合ったシーケンスを作成するストアードプログラム方式であるために、シーケンスの変更を必要とする場合も、配線変更することなく、メモリの書き換えだけでよい。

また、メモリへの書き込みは、製造の最終工程となるので、仕様決定のスケジュールとハードウェア製作の工程は別に管理できるので、仕様の検討を十分にこなす余裕をもつことができる。

(b) プロセス入力、出力、タイマなどの各ユニットはビルディングブロック式に増設できるから、システムの規模にあわせて、最適な点数を実装すればよい。

(c) 入力・出力点数が各々2,048点、タイマが1,024点、メモリが8kWと容量が大きいので、大規模な制御が容易に実現される。

(d) 各ユニットはMELSEC-310と互換性がある。

(e) 特殊プロセス入出力ユニットによって、パルスカウント、プリセットカウント制御等、パルス計数制御もできる。また、シーケンスカウンタによって、組合せ論理形のシーケンスのみならず、順序形シーケンスも簡単にプログラムできる。

(f) オフラインコンピュータを使って、アセンブラによってプログラムし、プログラムリスト作成、紙テープの作成が自動的にできる。この紙テープを紙テープリーダーにかけて、高速でメモリへの書き込みを行なうことができる。

3. MELSEC-710 の基本構成と機能

3.1 機能と構成

MELSEC-710 のシステムブロック図を図3.1に示す。この図によ

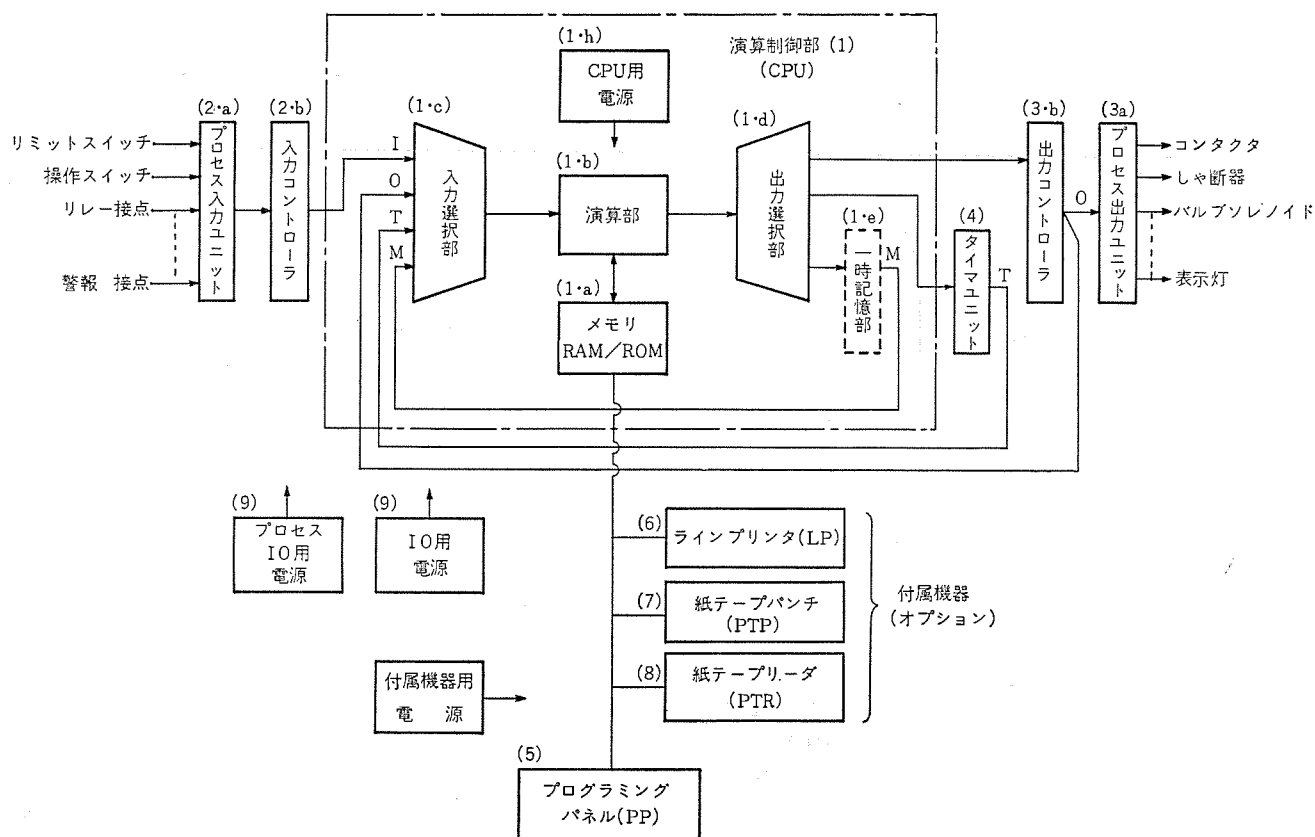


図 3.1 MELSEC-710 システムブロック図
MELSEC-710 system block diagram.

で各ブロックの機能の概要を説明する。

3.1.1 演算制御部 (CPU)

MELSEC-710 の中枢となる部分で、シーケンスの演算を実行し、プロセス機器への指令を出す部分であり、メモリ (1・a)、演算部 (1・b)、入力選択部 (1・c)、出力選択部 (1・d)、一時記憶部 (1・e) から構成される。

(1・a) メモリ

実行すべきシーケンスが、記憶されている部分で、この情報を CPU が 1 ステップごとに読み出し、解読して演算処理を行なう。ワイヤメモリを採用しているので次の利点がある。

(i) メモリの読み出しの場合、メモリの内容が、読み出しごとに破壊されて再書き込みを要するコアメモリと異なり、このメモリは、破壊せずに読み出す“非破壊メモリ”であるために、安定度が高い。

(ii) スイッチ操作のみによって、RAM、ROM の切換えが可能であるから、ディバック完了後は ROM としておけば、不要意にメモリが書き換えられることがない。

(iii) メモリの予備品に、常用品と同じ内容を記憶させておき、万一のメモリトラブル時に、ダウンタイムを最少にとどめることができる。

(1・b) 演算部

メモリの情報を解読して、入力選択部からの信号を演算処理し、その結果を出力選択部へ送る。

(1・c) 入力選択部

演算部で指定した入力信号を選択する部分で、入力の種類として、プロセス入力ユニットからの信号 (I)、出力コントローラからのフィードバック信号 (O)、タイマユニットからの信号 (T)、一時記憶部からの信号 (M) があり、この中で 1 点を選択し、演算部へ送出する。

(1・d) 出力選択部

演算部で演算処理された信号を送り出す出力点の選択を行なうところで、出力の種類として、プロセス出力 (O)、タイマユニット (T)、一時記憶部 (M) がある。

(1・e) 一時記憶部

演算処理の際、一時的に記憶する場合に用いるもので、補助リレーによる自己保持回路に相当するものである。

基本として 768 点が標準、オプションとして最大 1,280 点まで増設可能である。なお、一時記憶部の次の番地は特殊用として使用する。

3.1.2 入力部

入力部はプロセス入力ユニット (2・a) と入力コントローラ (2・b) からなる。

プロセス機器からの信号をプロセス入力ユニットによって、IC の動作電圧レベルに変換し、入力コントロールによって、1 点を選択して、演算制御部へ信号を送る。プロセス入力ユニットは表 3.1 に示すような標準品が完備しており、システムに応じて、この中から選択することができる。

3.1.3 出力部

出力部はプロセス出力ユニット (3・a) と出力コントローラ (3・b) からなる。

出力コントローラは、演算制御部からの信号を出力の選択された 1 点に信号を出すもので、プロセス出力ユニットは、その信号をプロセス機器を駆動することのできる信号レベルに増幅するものである。プロセス出力ユニットは、表 3.2 に示すような標準品が完備しており、システムに応じて、その中から選択することができる。

3.1.4 タイマユニット

ソフトウェアタイマであり、時限の設定 (0.05 秒～950 秒)、タイマのセット、リセット、タイマの状態検出すべてプログラムで処理することができる。

割込処理を利用することによって、1 個のタイマの多重使用が可能である。

そのほかに、時限の設定を可変抵抗器によって行なうアナログタイマもあり、用途に応じて、これらの特長を生かすように選定することができる。

3.1.5 プログラミングパネル (PP)

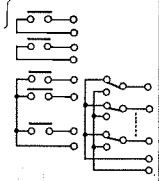
これは、演算制御部内のメモリのプログラムを書き込んだり、メモリの内容を読み出ししたりするほかに、演算制御部のチェック、オンラインシーケンスチェックなどを行なうことができる。

更に、ラインプリンタ、紙テープパンチ、紙テープリーダーを使うと、プログラムの再生、コピーを行なうことができる。(詳細については 4 章を参照)

表 3.1 プロセス入力ユニット Process input unit.

アイテム	形名	入力信号(プロセス側)		出力信号 (CPU側)	入出力間絶縁			プロセスとの接続		実装 点数	特長	用途
		電圧	電流		有	無	方式	コネクタ	端子台			
1	(PIAF)	AC 110V	10mA	IC レベル (5V)	○		トランス	○	—	16	AC入力 トランス絶縁 無接点式	プロセス一般 リミットスイッチ リレー } 等
	PIAA	AC 110V	10mA	IC レベル (5V)	○		ドランス		○			
2	(PIBF)	AC 220V	10mA	IC レベル (5V)	○		トランス	○	—	16	DC入力 リレー絶縁 有接点式	コンピュータとの接点
	PIAB	AC 220V	10mA	IC レベル (5V)	○		トランス	—	○			
3	PICA	DC 48V	10mA	IC レベル (5V)	○		リードリレー	—	○	16	DC入力 非絶縁 無接点式	近接スイッチ デジタルスイッチ ロジックレベル
4	PICB	DC 100V	10mA	IC レベル (5V)	○		リードリレー	—	○	16		
5	PIDA	DC 12V 24V DC 12V 24V	10mA			○		—	○	16		

表 3.2 プロセス出力ユニット Process output unit.

アイテム	形 名	出力信号(プロセス側)		入 力 信 号 (CPU側)	入出力間の絶縁			プロセスとの接続		実装点数	特 長	用 途
		電源電圧	負荷電流		有	無	方 式	コネクタ	端子台			
1	(POAF)	AC 110V	2A	IC レベル(5V)	○	—	ハルストランス	○	—	8	AC出力 無接点式	プロセス一般 ACバルブ用
	POAA	AC 110V	2A	IC レベル(5V)	○	—	ハルストランス	—	○	8		
2	(POBF)	AC 220V	2A	IC レベル(5V)	○	—	ハルストランス	○	—	8	BCR使用	
	POAB	AC 220V	2A	IC レベル(5V)	○	—	ハルストランス	—	○	8		
3	(POCF)	AC220V 110V DC100V	S-50 コンタクト以下 SD-112 以下	IC レベル(5V)	○	—	リレー	○	—	8	接点出力 	8点独立接点
	POCA			IC レベル(5V)	○	—	リレー	—	○	8		8点コモン接続
4	POCB			IC レベル(5V)	○	—	リレー	—	○	8		8点トランスファ
5	POCC	DC48V 以下	低レベル	IC レベル(5V)	○	—	リレー	—	○	8		コンピュータ用 低レベル用
6	POBA	DC 100V	2A	IC レベル(5V)	○	—	ハルストランス	—	○	8	DC出力 無接点 AC電源	DCバルブ クラッチ プレーキ DCコンタクト

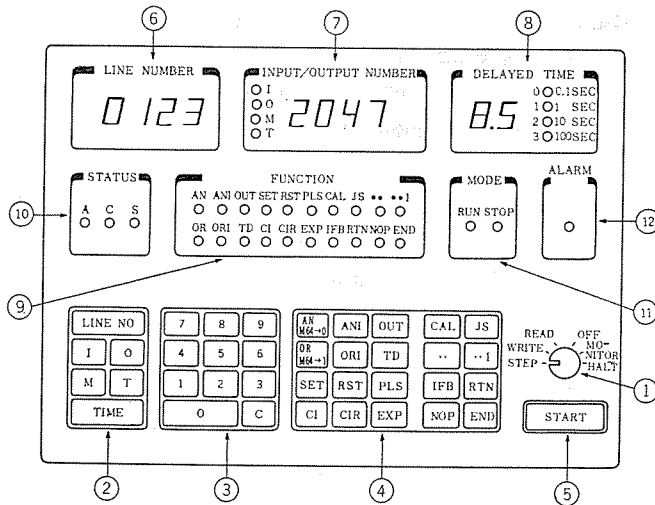


図 3.2 プログラミングパネル
Programming panel.

のこと)

プログラミングパネルは、マンマシンインタフェースであり、使い易いことを第一目標において、次のことを実現している。

- (i) テンキー押しボタンスイッチを採用。
- (ii) 10進表示としている。
- (iii) キー配置は、人間工学的に設計されている。
- (iv) 持ち運びが容易となるよう、アタッシュケースに収納している。

3.1.6 ラインプリンタ (LP)

演算制御部内のメモリの記憶内容(機械語で記憶)を人間が理解しやすいアセンブラ言語に変換して、プリントアウトする。

演算制御部を使用しない(オフライン使用)で、プログラミングパネルと紙テープパンチで、あらかじめプログラムを紙テープにする場合も、その内容をプリントアウトすることができる。

3.1.7 紙テープパンチ (PTP)

演算制御部内のメモリの記憶内容を紙テープに写し取る(メモリダンプ)ことができるので、システムデバッグ後のメモリの内容を紙テープで保存し、メモリへ再書き込みを必要とする場合、紙テープリーダーを使用して、簡単に処理できる。

上述のように、オフラインで、プログラミングパネルと紙テープパンチを使

表 3.3 MELSEC-710仕様一覧表
Specification of MELSEC-710.

演 算 制 御 部	方 式	ストアードプログラム式
	ア ド レ ス 方 式	メモリ直接アドレス式 入力、出力、タイマ、一時記憶に対しては、相対アドレス式
演 算 制 御 部	命 令 実 行 時 間	10 μ s
	命 令 語	18種類
	制 御 メ モ リ 素 子	ワイヤメモリ (非破壊形)
	制 御 メ モ リ 容 量	2k, 4k, 8k語
	一 時 記 憶	ICメモリ、基本768点、最大1,280点、256点単位
ブ ロ ッ ク 入 力 部	制 込 機 能	1レベル、9要因 このうち禁止可7点
	実 装 点 数	最大2,048点 16点単位
	種 類 お よ び 仕 様	表による
	入 力 ユ ニ ッ ト 収 納 フ レーム	128点/フレーム……入力専用 64点/フレーム……入出力混在
	出 力 ユ ニ ッ ト 収 納 フ レーム	128点/フレーム……入力専用 32点/フレーム……入出力混在
ブ ロ ッ ク 出 力 部	実 装 点 数	最大2,048点 8点単位
	種 類 お よ び 仕 様	表による
	入 力 ユ ニ ッ ト 収 納 フ レーム	128点/フレーム……入力専用 32点/フレーム……入出力混在
	出 力 ユ ニ ッ ト 収 納 フ レーム	128点/フレーム……入力専用 32点/フレーム……入出力混在
	種 類 お よ び 仕 様	表による
タ イ マ	方 式	デジタルソフトタイマ
	実 装 点 数	最大1,024点 8点単位 最大128点/フレーム 1個のタイマの多重使用可
	機 能	……プログラム書込、読出、1ステップ実行、ホールドオンラインモニタ
	紙 テー プ パ ン チ (オプション)	速 度……最大 1,800字/分 紙テープ……8単位 25.4mm幅 規 格……ISO
	紙 テー プ リー ダ (オプション)	速 度……最大 2,000字/分 紙テープ……8単位 25.4mm幅 規 格……ISO
付 属 機 器	プ リ ン タ (オプション)	機 能……プログラミングパネル操作記録 プログラムメモリ ハードコピー 速 度……350ms/ライン け た 数……18けた、89mm幅
	ア ナ ログ タイ マ	設定範囲; 最大 50ms~200s 手動設定 デジタルソフトタイマと互換性有
	シーケンスカウンタ	方 式; 直列歩進、並列歩進 ステップ数; 7ステップ/単位、28ステップ/カード
	プリセットカウンタ	プリセット方式; 直接およびリモートプリセット けた数; 10進4けた PI/Oと互換性有
	ラ ッ チ 出 力	実装点数; 最大256点、4点単位 外部出力有 最大512点、8点単位 外部出力無 PI/Oと互換性有

用して、プログラムの作成も可能である。

3. 1. 8 紙テープリーダー (PTR)

紙テープパンチやオフラインコンピュータで作成した紙テープの内容を演算制御部内のメモリへ書き込むものである。

以上に MELSEC-710 の主機能について述べたが、これらをまとめたものが表 3. 3 に示す主仕様一覧表である。

3. 2 命令体系

命令の詳細については表 3. 4 を参照、大別すると、次のようになる。

- (1) 論理命令： AND, OR とそれらの否定からなる命令である。
- (2) 機能命令： タイマ設定、セット、リセット、共通インタロック設定とその解除、微分検出命令が含まれる。
- (3) 出力命令： OUT 命令がある。
- (4) プログラム制御命令： 判断分岐、無条件分岐、無効、終了

表 3. 4 MELSEC-710 命令表
List of instructions for MELSEC-710.

大別		シンボル	マシンコード	内 容
論理命令	論理積(背)	AN	/B 8*	現在の演算結果と入力との論理積をとる
	(否)	ANI	/BC*	入力には I, O, T, M があり出力命令後は入力読込指令となる
	論理和(背)	OR	/B 0*	現在の演算結果と入力との論理和をとる
	(否)	ORI	/B 4*	入力には I, O, T, M があり出力命令後は入力読込指令となる
機能命令	タイマ設定	TD	01	0.05 秒～950 秒のセットが可能 タイマへのセット、リセットは現在の演算結果による
	条件出力	SET RST	/A 8* /AC*	条件が満たされた時のみこの指令セット、リセットは有効 出力先には O, M がある
	共通インタロック設定	CI CIR	/C 0* /E 4*	共通条件のセット、リセット指令でこの条件は出力命令時のインタロックとなる。条件として I, O, T, M を指定できる
	微分検出	PLS	/F 8*	入力信号の立上り、立下り微分をとらえるパルスカット指令
出力命令	無条件出力	OUT	/A 4*	現在の演算結果を無条件に出力する 出力先は O, M
プログラム制御命令	判断分岐	IFB	100	条件が満たされればオペラントに指定したプログラム No. にシーケンスを移行させる
	無条件分岐			IFB の前に強制的に“1”を読込む操作をしてやれば IFB で指定されたプログラム No. にシーケンスを無条件に移向
	無 効	NOP	/FF	シーケンスの削除等に有効
	終 了	END	001	シーケンスを開始番地にもどす
特殊命令	サブルーチン処理	CAL JS ..	110 /F 0* /E 0	相似形シーケンスの郡又は同一内容のシーケンス郡が存続又は散在する場合サブルーチン処理によりプログラム数の大幅削減が可能
	主ルーチン復帰	RTN	/E 8	サブルーチン→主ルーチンまたは読込ルーチン主ルーチンへの復帰に使用
	拡張	EXP	/00	入力、出力、タイマ、一時記憶の点数拡張に使用、各 256 点ごとに更新を行なう

マシンコード中 / は 16 進表示、他は上位ビットの構成を示す

* は 16 進の下位 2 ビットを 00 とみなして表示

I……入力信号 O……出力フィールドバック信号 T……タイマ出力信号

M……一時記憶の信号

命令が含まれる。

- (5) 特殊命令： サブルーチン 処理命令、拡張命令が含まれる。

4. 制 御 盤

MELSEC-710 の制御盤は、図 4. 1 の構成となる。外形寸法は 2,100(H)×800(W)×800(D) を標準とし、図の左側は演算制御部の収納盤を、右側は、入出力の収納盤を示す。

I……プロセス入力 フレーム 128 点/フレーム

O……プロセス出力 フレーム 64 点/フレーム

T……タイマフレーム 128 点/フレーム

M……入出力混合 フレーム I: 64 点, O: 32 点

I, O, T, M は上記 4 種のいずれかを任意に選択することができる。タイマフレーム以外の, I, O, M は同一配線となっている。

電源部は IO 電源 (+5 V) および PIO 電源 (+100 V, +48 V, +24 V, +12 V) のほかに、演算制御部のフレームに、その電源が実装されている。

制御盤の設置条件：

電 源 AC 100 V/110 V +10 %, -15 %

周囲温度 0～50°C

湿 度 10～90 % (相対湿度)

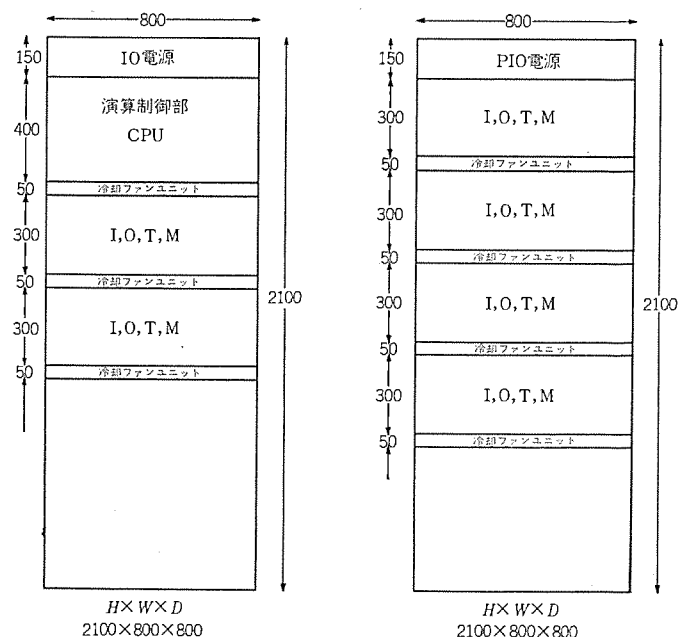


図 4. 1 制御盤の構成
Construction of control panel.

5. 応用と実例

5. 1 プログラミングパネルからの書き込み操作

図 5. 1 のようなリレー回路のプログラム例について述べる。なお、これは、図 5. 2 のような論理図に書き換えられる。

今このシーケンスをラインナンバ 1000 からプログラミングパネルを用いて、メモリへ書き込む操作について述べる。(図 3. 2 を参照のこと)

- (1) モードスイッチ①を WRITE にする。
- (2) スイッチ②の LINE NO を押す。
- (3) スイッチ③でラインナンバ 1000 を設定する。
1→0→0→0 の順に押す。
- (4) スイッチ②の 1 を押す。
- (5) スイッチ③の 1 を押す。

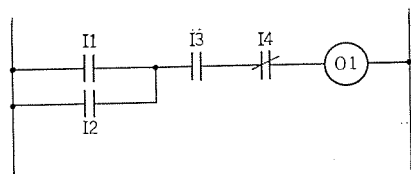


図 5.1 リレーシーケンス例
Example of relay sequence.

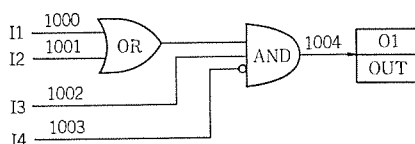


図 5.2 論理シンボルシーケンス例
Example of logical symbol sequence.

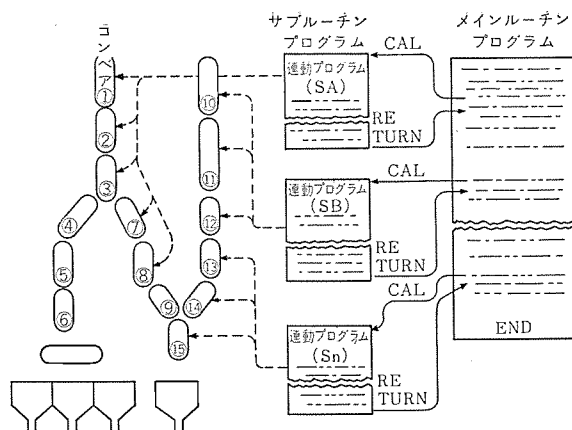


図 5.3 サブルーチン例
Example of subroutine.

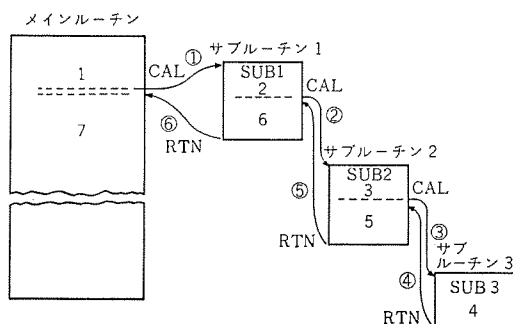


図 5.4 多重サブルーチンフロー
Flow of multiple subroutine.

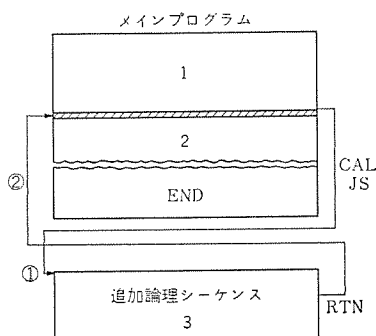


図 5.5 論理シーケンスの追加
Insertion of logical sequence.

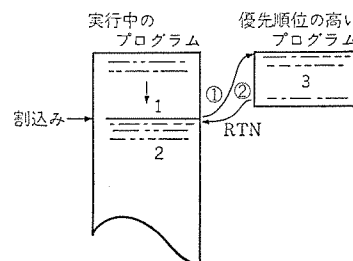


図 5.6 割り込み処理のフロー
Flow of interrupt control.

- (6) スイッチ④の **[OR]** を押す。
- (7) 表示器の内容を確認したうえでスイッチ⑤の **[START]** を押す。この時ラインナンバは 1001 になる。
- (8) スイッチ②の **[I]** を押す。
- (9) スイッチ③の **[2]** を押す。
- (10) スイッチ④の **[OR]** を押す。
- (11) 表示器の内容を確認したうえでスイッチ⑤の **[START]** を押す。この時ラインナンバは 1002 になる。
- (12) スイッチ②の **[I]** を押す。
- (13) スイッチ③の **[3]** を押す。
- (14) スイッチ④の **[AN]** を押す。
- (15) 表示器の内容を確認したうえでスイッチ⑤の **[START]** を押す。この時ラインナンバは 1003 となる。
- (16) スイッチ②の **[I]** を押す。
- (17) スイッチ③の **[4]** を押す。
- (18) スイッチ④の **[ANI]** を押す。
- (19) 表示器の内容を確認したうえでスイッチ⑤の **[START]** を押す。この時ラインナンバは 1004 となる。
- (20) スイッチ②の **[O]** を押す。
- (21) スイッチ③の **[1]** を押す。
- (22) スイッチ④の **[OUT]** を押す。
- (23) 表示器の内容を確認したうえでスイッチ⑤の **[START]** を押す。この時ラインナンバは 1005 となる。

5.2 サブルーチン処理

図 5.3 のコンパラインのように通常各モータの運転シーケンスは、ほぼ同じで代表的な数種のプログラムに分類され、この例ではサブルーチン SA はコンパ ①②③⑦⑧ に、サブルーチン SB は⑩⑪⑫ というように適用される。また多重サブルーチン (サブルーチンのサブルーチン化) のシーケンスフローを図 5.4 に示す。1～7 は実行されるシーケンスの順序、①～⑥ はシーケンスの移行を示す。

またサブルーチンとは多少異なった処理の利用により論理シーケンスの追加を追加後のシーケンスをずらすことなく容易にできる。図 5.5 にこの例を示す。斜線の部分 (シーケンス 1 と 2 の区切り) に追加論理シーケンス 3 を導入するが、2 のラインナンバの変更は必要ない。

5.3 割り込み処理

図 5.6 に示すように実行中のプログラム (シーケンス 1) を外部からの信号、つまり割り込みにより 1→2 を一時的に中断し、優先順位の高いプログラム (シーケンス 3) を実行し、その後もとのプログラム 2 を実行する。

6. む す び

以上 MELSEC-710 の概要を述べたが、シーケンス表現を簡易化できる新タイプのシーケンス専用制御装置として出現したものが MELSEC-710 である。

最後に開発一製品化にあたって多大の御協力を賜った本重計 (長駐: 船計) および長電の関係各位、また MELSEC 技術委員各位に深く感謝する。

三菱マイクロコントローラ MELMIC-100

松村 雅司*・伊藤 祐暢*・森本 克英*
加川 廣光*・近藤 耕一*

MITSUBISHI Micro Controllers MELMIC-100

Communication Equipment Works Masaji Matsumura・Sukenobu Itô・Katsuhide Morimoto
Hiromitsu Kagawa・Koichi Kondo

Since the outset of 1970 programmable logic controllers have come to draw attention as an important means of automatic control and labor saving and a variety of types have been developed and manufactured.

Micro controllers MELMIC-100 are the ones developed in use of inventive imaginations and techniques from the initial stage of the trend and applied in the various fields. They are used not only for sequence control and interlock control, but also for general purpose programmable logic controllers feasible to have arithmetic processing and data recording. They occupy a remarkable position in the field of automation and open out a new field of application different from the control by computers or wired logic systems.

1. ま え が き

シーケンス制御装置は、従来、電磁リレーを用いてシーケンスの内容を個別に配線で処理する専用のリレーシーケンス盤により製作されていた。しかし、制御内容の複雑化・大規模化・高級化の要請にともない、1970年代に入って、制御装置を共通のハードウェアで構成し、制御内容をプログラムの形でメモリに記憶させて、それを順次読み出して実行することによりシーケンス制御の実現を図ろうとする“はん(汎)用シーケンス制御装置”(Programmable Logic Controller)が現われはじめた。

このような動きは、その目的や内容、規模、方法などの千差万別なシーケンス制御を、従来のようなリレーのコイルや接点の配線という一品料理的な製造方法で処理していたのでは、設計・製作・調整・試験などに要する労力の合理化を図ることは困難であり、また、制御装置の量産効果や工期の短縮は望むことができないという事情から生れてきたものである。この傾向は、量的に増大し質的にも多様化しているシーケンス制御盤の需要に対する専門のシーケンス制御設計技術者の相対的な不足と、最近特に顕著になっている人件費の高騰とがいったん拍車をかけている。

このような形のはん用シーケンス制御装置の特長としては、

(1) 本来、シーケンス制御はその性質上、ほとんどが一品料理的色彩が強いが、これら制御内容の多様さに影響されない制御装置を実現できる。いかえれば、制御装置の設計・製作・調整が標準化できるため、制御装置のハードウェアおよびシーケンス作成作業が標準化でき、品質の均一なシーケンス制御装置が得られる。

(2) シーケンス内容の仕様決定が遅れても、ハードウェアは独立に製作できるため、納期に影響を与えない。

(3) シーケンス内容の変更はメモリ内容をかきかえるだけであり、また、入出力点数はブロック単位で増設できるため、現地でのシーケンス変更や設備増設時の仕様変更が容易である。

(4) ユーザ自身でシーケンスが組めるため、制御内容の機密保持が可能になる。

等をあげることができる。

一方、技術的な背景としては、電子計算機に代表されるディジタル

技術、および、その構成部品としての半導体素子特に集積回路(IC)が普及し、その信頼性が向上してオンライン制御装置として適用可能になるにつれて、そこで開発された技術をシーケンス制御の分野に導入し、電子計算機のもつ長所を積極的に活用することによってはん用シーケンス制御装置の製作が可能になったとみることができる。

しかし、電子計算機の技術を利用しているとはいえ、はん用シーケンス制御装置はあくまでも主要目的を「シーケンス制御」にしぼった単能機であり、電子計算機とは次のような種々の差異が認められる。

(1) シーケンス制御向きの簡単な言語でプログラムできるので、電子計算機につきまとう“ソフトウェア”体系というイメージはまったく必要としない。

(2) 回路的に、シーケンス制御に不要な機能は極度に切り詰めることができるため、動作も理解し易く、また、使用部品点数も少なくて済むため、高信頼化、小形化を図ることができる。

(3) 操作が容易(ほとんどワンタッチオペレーション)であり、誤操作防止を図ることができる。

(4) 外部機器との接続、配線は、装置自身に耐環境、耐雑音性の配慮がなされているため、従来のリレーによる制御盤と同じ感覚で取扱うことができる。

(5) 装置の基礎となっている計算機技術やエレクトロニクスなどの知識を必要とせず、“Component”または“Black Box”とみなして、所要のシーケンスを組むことができる。

マイクロコントローラ MELMIC-100 は、上記のようなはん用シーケンス制御装置を主な目的として開発・製作されたが、従来のシーケンス制御装置にはない新しい機能が付加されている。すなわち、単なる入出力状態の組み合わせや順序制御だけでなく、

(1) 数値データの演算や処理

(2) データの記録や作表

(3) 上位計算機との接続

等も可能にした点でユニークな存在である。MELMIC-100のもつこれらの特長は、1971年春、はん用シーケンス制御装置の草創期に発表して以来、数多くの適用実績をみてもユニークなはん用シーケンス制御装置として利用され、独自の応用分野を築いている。

2. MELMIC-100

2.1 特徴

(1) 演算機能を備えたシーケンス制御装置である

通常のシーケンス制御に必要なビット演算命令群に加えて、算術演算機能を有しているため、演算機能を必要とするシーケンス制御システムには最適である。

また、MELMIC-100は上位の計算機との接続や数値データの処理、記録等も可能である。

(2) プログラミングロジックである

MELMIC-100による制御装置の設計は、その制御手順を直観的に取扱い易いシンボリックな命令でプログラムし、その内容をメモリ(読み出し専用メモリROMカード、またはリードライトメモリRAMカード)に記憶させるだけであり、従来のワイヤードロジックのような回路設計は不要である。

したがってシステムの細部が決まらなくても、ハードウェアの製作を進めることができ、工期の短縮を図ることができる。

プログラムを記憶させるメモリにはROMカードまたはRAMカードを使用している。ROMカードは非破壊メモリなので、誤操作や停電などによって、その内容が破壊されることがなく半永久的に記憶されるので、従来のワイヤードロジックと同様な感覚で取扱うことができる。

プログラムやシーケンスの変更が予想される場合はRAMカードを使用すれば、現場で簡単に変更することができる。またRAMカードとROMカードは互換性があり、最初RAMカードでプログラムをテストし、現場での運用状況の結果をみてからROMカードに変更することができる。

(3) システムの変更や設備の拡張に容易に対応できる

プログラムの変更やブロック別に構成された入出力用のプリント基板を増減するだけでシステムの変更・拡張を行なうことができ、従来のワイヤードロジック回路のような配線の変更を必要としない。

(4) 低価格、超小形、高信頼性である

回路素子に集積回路を使用しているため、超小形、高信頼性である。また制御システムの規模に応じて入出力点数や、メモリ容量が決められるので、システムにむだがなく、また増設に対しても容易に変更できるため、価格面において非常に有利である。

さらに制御システムに組込んだ状態では、不必要になるメンテナンスパネルなどは別装置として完全に分離できるので、信頼性や価格の点でも有利である。

(5) 豊富な周辺装置が完備されている

多種の制御システムに対応できるように、多数の周辺装置が完備されている(表2.2参照)。

2.2 構成

MELMIC-100は、演算制御ユニットを中心としてその周辺に各種の周辺装置を接続することができる。構成を図2.2に示す。

2.3 仕様

(1) 演算制御ユニット

回路素子: TTL/DTL集積回路, MSI, LSI
 制御手順: 読み出し専用内部プログラム記憶方式
 演算方式: 2進並列, 固定小数点
 命令種類: 基本27種(表2.1)
 演算速度: 1命令当たり4 μ s
 語長: 16ビット

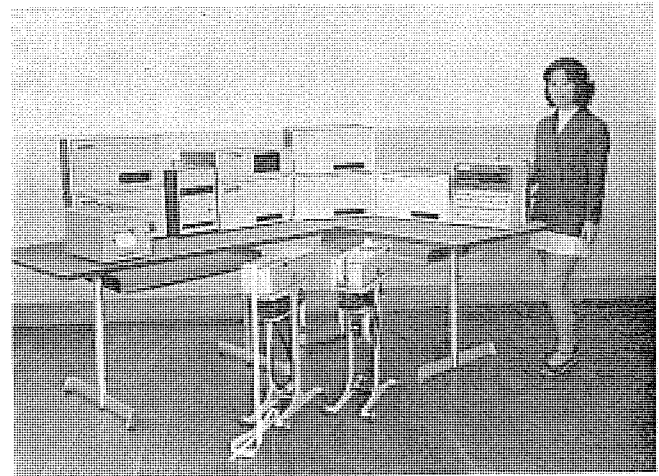


図 2.1 マイクロコントローラ MELMIC-100
Micro controller MELMIC-100.

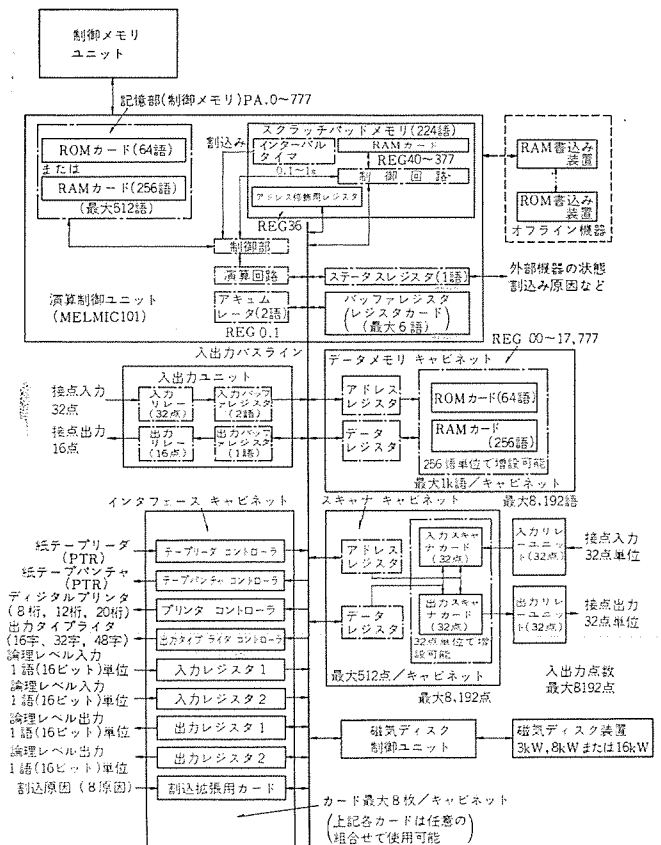


図 2.2 MELMIC-100の構成
Block diagram of MELMIC-100.

メモリ: 制御手順記述(制御メモリ); 読み出し専用メモリ 256語, ROMカードまたはRAMカード 最大1,024語まで拡張可能(ただし512語を越える場合は制御メモリユニットにメモリを収納)
 レジスタ; ICレジスタ(内部・外部とも最大31語)
 内部レジスタ
 アキュムレータ 2語
 ステータスレジスタ 1語
 アドレス修飾用レジスタ 1語増設可能
 バッファレジスタ 6語接続可能
 外部レジスタ 22語接続可能
 データ記憶用

スクラッチパッドメモリ 224 語、接続可能

割込み： 1 レベル 6 原因(標準装備)、割込み原因はさらに外部増設可能
 タイマ： 内蔵可能
 形状： 高さ 250, 幅 480, 奥行 410 mm, ラックマウントタイプ
 電源： AC 100 V $\pm 10\%$, 1 ϕ , 50/60 Hz
 周囲条件： 温度 0°C $\sim$ 50°C
 湿度 95 %以下(結露しないこと)

表 2.1 MELMIC-100 命令一覧表
Instruction list of MELMIC-100.

分類	シンボル コード	名 称
算 術 演 算	A	加 算 Add
	AI	直 接 加 算 Add Immediately
	S	減 算 Subtract
	SI	直 接 減 算 Subtract Immediately
論 理 演 算	AND	論 理 積 logical AND
	ANI	直 接 論 理 積 logical AND Immediately
	OR	論 理 和 logical OR
	ORI	直 接 論 理 和 logical OR Immediately
	EOR	排他的論理和 Exclusive OR
転 送	L	読 出 Load to accumulator
	TFR	転 送 Transfer to register
	LI	直 接 読 出 Load to accumulator Immediately
ビット 演 算	SEB	セットビット Set Bit
	REB	リセットビット Reset Bit
	TEB	ビット条件判定 Test Bit
け た 移 動	SL	左 シ フ ト Shift Left
	SR	右 シ フ ト Shift Right
	SLD	倍語長左シフト Shift Left Double word
	SRD	倍語長右シフト Shift Right Double word
判 断	B	無 条 件 飛 越 Branch unconditionally
	BNE	負 条 件 飛 越 Branch on accumulator Negative
	BZE	零 条 件 飛 越 Branch on accumulator Zero
	BPO	非負条件飛越 Branch on accumulator Positive or zero
	BIN	間 接 飛 越 Branch Indirect
制 御	CO	出 力 指 令 Command Output
	TM	割 込 復 帰 Terminate
	NOP	無 動 作 No Operation

表 2.2 周辺装置の主要性能
Fundamental characteristics of peripheral equipments.

名 称	主 要 性 能
入出力ユニット	入力：32点，継電器接点 出力：16点，継電器接点
デジタルスキャナ	32点単位で，入出力点合計 最大 8,192 点 接点または論理レベル (0 V/5 V) インタフェース
データメモリ	256 語単位で，最大 8,192 語 RAM カードまたは ROM カード
磁気ディスク	3,072 語，8,192 語または 16,384 語 平均アクセスタイム 60 Hz の場合 8.3 ms 50 Hz の場合 10 ms
入力レジスタ	1 語単位の論理レベル (0 V/5 V) 入力インタフェース
出力レジスタ	1 語単位の論理レベル (0 V/5 V) 出力インタフェース
紙テープリーダー	読取り速度 1,000 字/分
紙テープパンチャ	さん孔速度 1,000 字/分
デジタルプリンタ	1 行あたり 8, 12 または 20 けた 印字速度 最大 3 行/秒 印字種類 16, 32, 46 種類
出力タイプライタ	印字速度 最大 10 字/秒
ROM 書込装置	読出し専用メモリ (ROM) へのプログラム書込み装置
RAM 書込装置	可変メモリ (RAM) へのプログラム書込み，およびプログラムデバッグ用装置

(2) 周辺装置

表 2.2 に各周辺装置の仕様を示す。

2.4 各部の機能

各ユニットの機能は文献(1)に記載してあるのでここでは省略する。

2.5 シーケンスプログラムパッケージ

シーケンスプログラムパッケージは，MELMIC-100 をシーケンス制御(入出力条件の組合せや順序制御，インタロック制御)専用を使用する場合に，より便利に取扱うことができるよう開発された制御プログラムで，これを使用すると，シーケンス回路を AND，OR 等のブール代数式でリストするだけでプログラムを作成することができる。この場合，リストプログラムはデータメモリに記憶される。

シーケンスプログラムパッケージを利用したシステムの構成を図 2.3 に，命令を表 2.3 に，シーケンスリストプログラムの一例を図 2.4 に示す。

シーケンスプログラムパッケージは，データメモリにかかれたブール代数の形のリストプログラムを，演算制御ユニットに収納されたシーケンスプログラムパッケージで解釈・処理するためのマイクロプログラムとみることができる。

2.6 MELMIC-101 B

演算制御ユニット MELMIC-101 より更にメモリ容量の増加など改良したユニットとして，MELMIC-101 B がある。

この MELMIC-101 B の主要な特長は次のとおりである。

(i) メモリ容量を，最大 2,048 語まで MELMIC-101 B に内蔵可能とした。

(ii) ROM カードとして，消去可能な ROM を採用したので，専用消去装置を用いれば，一度 ROM 化してしまっても，その内容を消去して別の内容を再び書込むことができる。

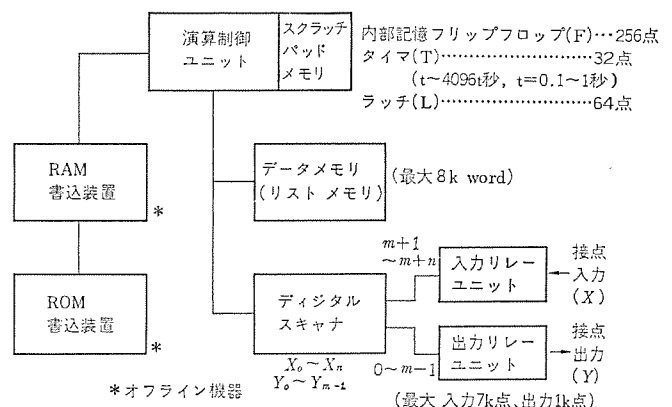
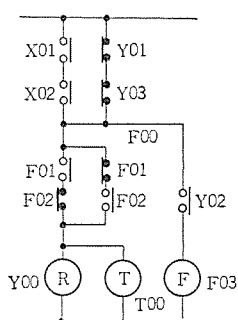


図 2.3 シーケンスプログラムパッケージ構成図
Block diagram of sequence program package.

表 2.3 シーケンスプログラムパッケージ 命令一覧表
List of instructions on sequence program package.

記号	命 令	機 能	処 理 対 照
論 理 命 令	AND	論理積命令	・ a X, Y, F, L, T
	OR	論理和命令	+ a X, Y, F, L, T
	ANI	否定論理和命令	・ ā X, Y, F, L, T
	ORI	否定論理積命令	+ ā X, Y, F, L, T
	L	出力命令	= a Y, F, L, T
	LI	ラッチ型 F F リセット命令	= ā (但しラッチ F F 専用) L
制 御 命 令	TM	割込シーケンスリストの終了記号	データメモリのページ (1 ページ=1,024 語) 切換
	B	無条件飛越	
	NOP	無動作	入力，出力スキャナのページ
	COI	修飾命令	(1 ページ=256 点) 切換



ブール代数式

$$\begin{cases} X01 \cdot X02 + Y01 \cdot Y03 = F00 \\ F00 \cdot F01 \cdot F02 \\ + F00 \cdot F01 \cdot F02 = Y00 \\ = T00 \\ F00 \cdot Y02 \\ = F03 \end{cases}$$

OR X 01
AND X 02
ORI Y 01
ANI Y 03
L F 00
OR F 00
AND F 01
ANI F 02
OR F 00
ANI F 01
AND F 02
L Y 00
L T 00
OR F 00
AND Y 02
L F 03

図 2.4 シーケンスリストプログラム例
Example of sequence list program.

(iii) 命令体系は MELMIC-101 と同じである。したがって既存のソフトウェアや RAM 書込装置をそのまま使用することができる。

(iv) MELMIC-101 の周辺装置をそのまますべて接続することができる。

3. MELMIC-100 の応用

MELMIC-100 は、プログラマブルロジックコントローラとして他社にききかけて発表・製品化し、そのユニークなアイデア (RAM/ROM コンパティブル、算術演算処理能力やデータロギング機能を有したはん用シーケンス制御装置など) と豊富に準備された周辺装置などのために、制御システムを構成し易く、また、操作の容易さ、低価格、高信頼性等の長所から非常に広範囲の分野で利用されているが、これまでの適用実績を業種別および用途別に分類した結果を、表 3.1 に示す。

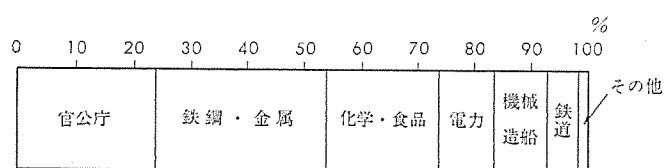
表 3.1 から分るように、非常に広範囲の分野に適用され、中でも、高い信頼性を絶対的な条件として要求される生産ライン制御、コンベア・クレーン等の自動倉庫・搬送ライン制御、水処理制御、メッセージ交換等の用途が多いことは、MELMIC-100 の性格をよく反映している。

上述のように、MELMIC-100 の応用分野は非常に広いが、ここでは、単なる入出力条件の組合せや順序制御だけでなく、算術演算機能やデータの記録等の機能を必要とする制御例をいくつかあげて具体的に説明する。

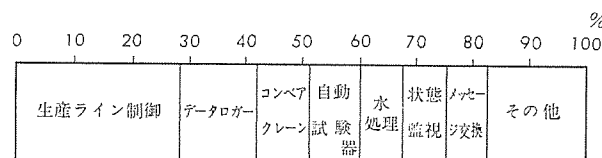
(例 1) 列車停止特性モニタ装置

これは電車の停止特性をモニタするもので、毎日、入駅する数百台の電車に対し、図 3.1 (a) に示すようなデータフォーマットでデータ番号、時刻、地点間隔、および一定の間隔で敷きつめてある地点信号を通過する際の時間、その地点番号およびブレーキパターン等を磁気テープに記録しておき、あるまとまったデータ収集後、これをモニタ装置にかけて、タイプライタと XY レコーダで出力する。出力する際に、地点間隔と時間から速度および減速度を算出する。XY レコーダでは X

表 3.1 MELMIC-100 の応用分野
Application field of MELMIC-100.



(a) 業種別分類

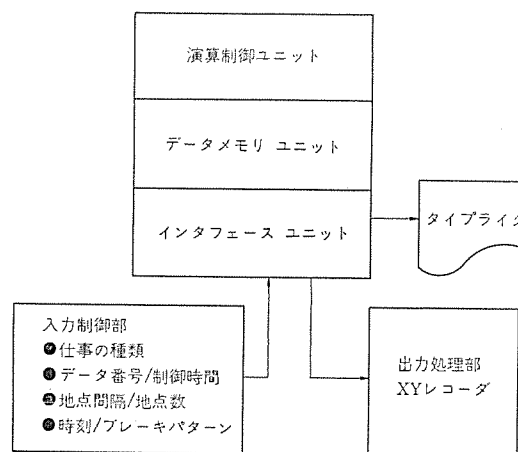


(b) 用途別分類

データNO.	制御時間	制御時間
時刻	地点数	地点数
地点間隔	ブレーキパターン	ブレーキパターン

制御時間	データNO.
地点数	時刻
ブレーキパターン	最終地点数

(a) データフォーマット



(b) 系統図

図 3.1 列車停止特性モニタ装置
Data processing system for stop characteristics monitoring of train.

軸に距離を、Y 軸には時間と速度を 2 ペンでプロットする。更に停止精度を検査するために、収集したデータの停止位置の度数分布を求め、印字することもできる。またテープから入力するだけでなく、直接入力することもできる。

なおこの構成を図 3.1 (b) に示す。

(例 2) 自動案内放送装置

駅構内などの案内放送を自動化するための装置で、与えられたデータに基づいて車種・行先・列車番号・発車時刻等を自由に変化させることができ、これらの変化部分を定形的な案内文の間にそう (挿) 入して一つの完全な文章として編集しなおし、案内文として円滑に自動放送しようとするものである。したがって、放送内容の組み合わせは非常に多種多様に変化させることができ、たとえば列車ダイヤ等の変更があっても、本装置には全く手を加える必要がなく、改正されたダイヤに対応したデータを入力するだけで、目的の放送を自動的に行うことができる。

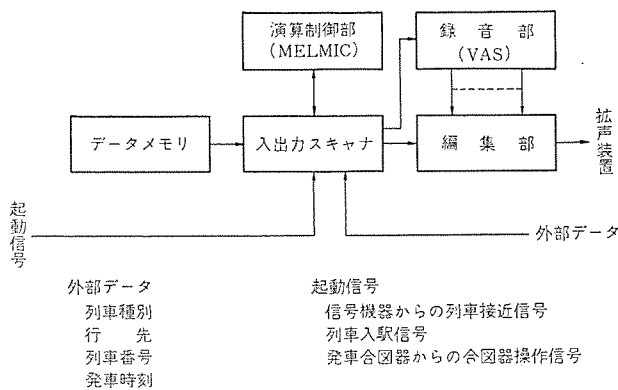
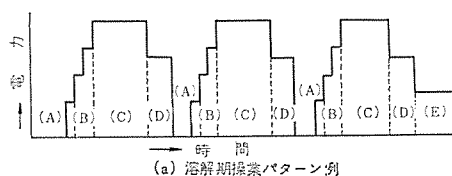
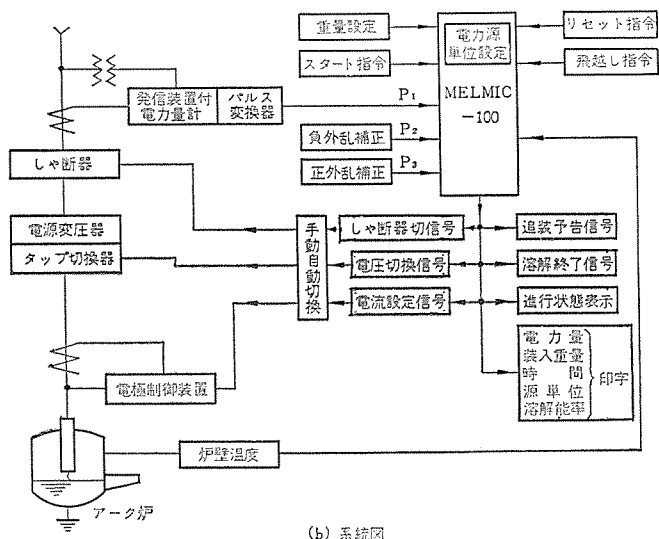


図 3.2 自動案内放送構成図
System block diagram.



(a) 溶解期操業パターン例



(b) 系統図

図 3.3 アーク炉電力量プログラム制御
Program control of arc furnaces.

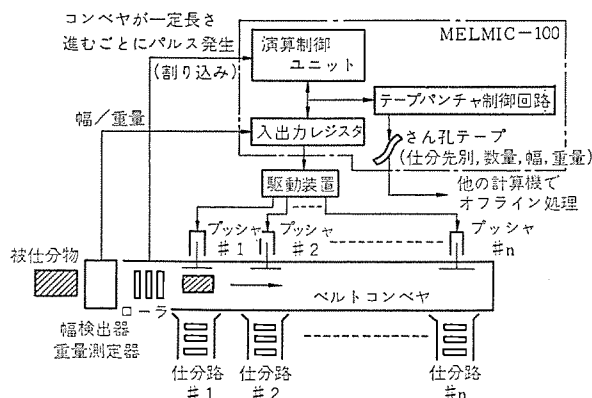


図 3.4 自動仕分装置
Automatic sorter.

ある駅の構内自動案内放送を一例にとると、列車通過・列車接近・入駅停車・発車を入力信号（放送開始信号）とし、上り8種類、下り9種類の文章にそう入文として、車種・列車番号（1号～999号）・行先（主要最終駅全部）・時刻（0時ちょうど発から23時59分発まで1分間隔で全部）が用意されている。

自動案内放送装置は、演算制御部として MELMIC-100 を、音声記憶部として VAS を使用し、これに入力切替部・データメモリ・操作盤・Q 信号検出部・編集ゲートなどを組み合せた制御架と記憶架との2架構成となっている。

(例3) アーク炉電力量プログラム制御

アーク炉の溶解期制御を、前もって決めておいた電力量を基準としたプログラムに従って、自動的に行なうもので、系統図を図 3.3 (b) に示す。溶解期のアーク炉の炉内状況は、溶解の進行に伴って、刻々変化するので、この変化をとらえ各状況に応じた最適な電力を投入する必要がある。炉況の変化と投入すべき電力はおおよそ図 3.3 (a) に示すような推移をたどる。実際の投入電力量を WH メータからパルス入力して、それを積算し、一方、基準電力量を記憶し、両者を比較しながら、トランスのタップを切り換えて、最適電力量を投入することにより、アーク炉を効率よく操業してゆく。また、本装置は投入材料の変更にも適応できる。

(例4) 自動仕分装置

これは、数種類の品物が生産ライン等から流れてきて、これに品種指定を行なうことにより、対応する仕分路に仕分される機能を持つもので、ブロック図を図 3.4 に示す。本装置の動作は、品種を区別した時、その時のシャフトエンコーダの数値をよみとり、仕分したい仕分路の位置に対応する値を加えて記憶しておく。一方、シャフトエンコーダの値を常時モニタして、一致したところでプッシャーを駆動することにより仕分路に仕分けする。シャフトエンコーダは軸方向の動きを回転角に変換し、これを数値でとり出せる機能のものである。

4. む す び

以上のように、マイクロコントローラ MELMIC-100 は、

- (1) 省力化（人件費の節約、非熟練作業化）
- (2) 自動化——運転の確実化、迅速化および安全性の向上（人間による誤操作・誤運転の防止、危険作業からの人間解放）
- (3) 能率化——数値演算やフィードバック制御の併用による製品品質および生産効率の向上

を目指して開発・製作されたはん用シーケンス制御装置である。

この種のはん用シーケンス制御装置は、国内では、1970年の後期から1971年の前期にかけて各社から多数発表され、第1期のラームを作ったが、MELMIC-100はこの時期から既に製作発表された。この時期には、主としてシーケンス制御装置のメカの立場から製作されたものが多く、ユーザの立場からみて、はん用シーケンス制御装置のねらいとするところは十分理解しても、新しい分野の製品に対するなじみが薄いということもあり、頭初、適用に際してとまどいがあったこともあったが、ユーザから指摘された各種要求事項の実現の努力等によりユーザの要求にマッチした形のものに改良が重ねられてきた。

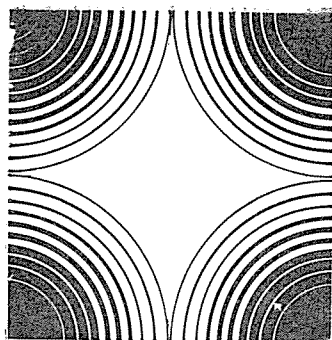
MELMIC-100 は、草創期から発売したことによる豊富なフィールド適用実績により、そこから得た知識と経験から、いっそう満足すべき制御装置にすべく改良を重ね、特に、ユーザ側の負担をできる限り軽減し、より使い易い装置にすべく努力を続けてきた。

このように、はん用シーケンス制御装置の分野にも他の製品と同様に、ユーザ・メーカ双方からの協力によりユーザの要求が反映され、一方他分野で利用された技術が導入されて新しい制御装置が誕生し、それがまた制御内容や制御の質を変えて新しい制御装置の出現を喚起するというサイクルがくり返されるので、メーカの立場としては、ユーザからの適確なニーズを御教示いただけるようお願いして本文の結びとしたい。

参 考 文 献

- (1) 松村：電子科学，21，No. 9，23（昭46）
- (2) 松村ほか：OHM，58，No. 10，2（昭46）
- (3) 合田ほか：三菱電機技報，45，No. 11，1,511（昭46）
- (4) 松村ほか：機械設計，15，No. 12，222（昭46）

- (5) 松村ほか：電気計算，39，臨，287（昭46）
- (6) 田口ほか：三菱電機技報，45，No. 7，827（昭46）
- (7) 佐竹ほか：三菱電機技報，45，No. 10，1,351（昭46）
- (8) 山下ほか：電気学会自動制御研究会，AC-72-7（昭47）
- (9) 松村：電子展望，9，No. 2，55（昭47）
- (10) 久保田ほか：三菱電機技報，46，No. 2，263（昭47）
- (11) 松田ほか：自動化技術，4，No. 5，124（昭47）
- (12) 吉田ほか：機械技術，20，No. 6，36（昭47）
- (13) 六藤ほか：三菱電機技報，46，No. 8，957（昭47）
- (14) 渡辺ほか：三菱電機技報，46，No. 9，978（昭47）
- (15) 山下ほか：電気計算，40，No. 11，58（昭47）
- (16) 松村ほか：自動制御とシステム，1，No. 1，58（昭48）
- (17) 正田ほか：三菱電機技報，47，No. 5，542（昭48）



技術講座

超音波探傷試験法 (5)

——超音波探傷の実際——その 1

河野 勝美*

1. ま え が き

金属材料の内部欠陥を外部から超音波パルスを使って非破壊検査する超音波探傷試験法は、最近、各方面で使用されるようになってきた。しかしながら、探触子の特性については、まだ十分理解されていない面があり、その用途が最適と見られない場合が時折り見られる。ここでは、この場合に役立つよう探触子の選び方と使い方について述べる。

2. 選 び 方

2.1 一般的な選び方

(1) 探触子の形式

探触子の形式（垂直探触子、分割形探触子、局部水浸探触子および斜角探触子など）は、原則として、被検材の材質・形状・寸法・表面状況、検出すべき欠陥の種類・形状・向き・大きさ・存在位置、探触子を接触させる面の範囲、要求する探傷精度および探傷作業の場所を考えて選定する。

次に一般的な選び方をあげる。

(a) 垂直探触子

垂直探触子は、超音波探傷でもっとも一般的に使用される探触子である。被検材の形状が、板材・角材・丸材・管材等で、超音波入射方向の距離が鋼材の場合約 3～10 mm 以上の場合に使用される。検出し得る欠陥の大きさは、波長に関係し、概略 $\lambda/2$ に近いと考えてよい。鋼材中の波長は、第 1 編、超音波探傷法 (1) の表 2.2 に記載されている。

(b) 局部水浸探触子

局部水浸探触子は、垂直探触子で達成できないような精密探傷または薄物探傷に使用される。局部水浸探触子の水中距離が 50 mm で、鋼材を探傷する場合、探傷距離は約 3～150 mm となる。被検材が、鋼材以外の材質の場合、探傷距離はその音速に関係し、上記と異なる。

(c) 分割形探触子

垂直探触子と局部水浸探触子で探傷できないような表面直下、たとえば鋼材の場合、約 2～3 mm 部分または、それ以上の一定深さを探傷する場合に使用される。

分割形探触子は、普通、遅延材付きのため、送信パルスによる不感帯がなく、試験周波数を下げても、表面直下の検出能力は大である。探傷範囲は、一般に被検材が、鋼材の場合で表示されており、他の材質の場合は異なる。

(d) 斜角探触子

斜角探触子は、被検材の形状、探傷面の状態および欠陥の方向性により、垂直探触子、局部水浸探触子または分割形探触子が採用できない場合に使用される。

斜角探触子の屈折角は、被検材の厚みと欠陥の方向性により決定され、一般に 35～80 度が使用される。なお、屈折角は、一般に鋼材の場合で表示されている。

(2) 試験周波数

試験周波数の上限は、被検材中の超音波減衰（底面エコーの出方）と林状エコー (S/N 比) で決定し、下限は検出感度、分解能、指向性で決定する。

被検材の材質、外形寸法、探傷面の状態によって使用できる試験周波数範囲の広いものと狭いものとがあり、超音波探傷試験の適用が不可能な場合もある。

(3) 振動子の寸法

振動子の寸法は、次の点を考えて選定する。

(a) 大形（大面積）の振動子の場合には、探傷範囲は近距離音場では広く、遠距離音場では指向性が良いためかえって狭くなる。逆に小形の振動子の場合には、探傷範囲は近距離音場では狭く、遠距離音場ではかえって広がる。

(b) 探傷面が粗い場合、小形の振動子の方が接触が安定して探傷しやすいことがある。ただ、小形の振動子の場合、遠距離音場になると、急激にエコー高さが小さくなる。

(c) 同一周波数であっても、振動子の寸法が変わると、近距離音場限界距離が異なるため、欠陥エコーと底面エコーの現われ方が異なってくる。

(4) 振動子の材質

振動子の材質は、次の点を考えて選定する。

(a) 垂直探触子の場合、水晶が一般的に使用される。超音波減衰が多い被検材または長尺物の被検材の場合は、水晶に比較して不感帯は広がるが、感度の良い圧電セラミックスが使用される。

(b) 分割形探触子、局部水浸探触子および斜角探触子の場合、シューまたは水柱による損失があるため、水晶に比較して感度の良い圧電セラミックが使用される。

2.2 探触子の性能規格面からの選び方

次に、探触子の選択に参考となる性能規格を示す。

(1) 感 度

(a) 垂直探触子……試験周波数 2 MHz、振動子直径 30 mm の場合、STB-N₁ のエコー高さは 70 % 以上のこと。（ただし、HPIS-F-109-72 による探傷感度を示す。以下、HPI と略す）

(b) 斜角探触子……試験周波数 2～5 MHz、振動子寸法 10×

表 2.1 斜角探触子の感度

屈折角	試験周波数 (MHz)	振動子寸法 (mm)	A1 感度 (dB)	A2 感度 (dB)
45°	2~5	10×10~20×20	40 以上	40 以上
70°	2~5	10×10~20×20	40 以上	20 以上

表 2.2 垂直探触子用振動子の寸法

試験周波数 (MHz)	有効直径 (mm)
0.4	30, 50
1	30, 40
2	20, 30
5	10, 20
10	10

表 2.3 斜角探触子用振動子の寸法

屈折角	45°	60°	70°
試験周波数 (MHz)			
1	20×20		
2~5	10×10, 20×20		

10~20×20 の場合、表 2.1 に示す値のこと。(NDIS-2404-70 による。以下、NDIS と略す)

(2) 試験周波数

(a) 垂直探触子……0.4, 1, 2, 5, 10 MHz (JIS-Z-2344-73 による。以下、JIS と略す)

(b) 斜角探触子……2, 5 MHz (NDIS による)

(3) 振動子の寸法

(a) 垂直探触子……振動子の外形は円形とし、その有効直径は表 2.2 に示すとおりとする。(JIS による)

(b) 斜角探触子……振動子の外形は角形とし、その有効寸法は表 2.3 に示すとおりとする。(JIS による)

(4) 遠距離分解能

(a) 垂直探触子……試験周波数 2 MHz, 振動子寸法 20~30mm の場合、B 級以上のこと。(JIS による)

(b) 斜角探触子……試験周波数 2~5 MHz, 振動子寸法 10×10~20×20 の場合、15 dB 以上のこと。(NDIS による)

(5) 近距離分解能

試験周波数 5 MHz, 振動子寸法 20 mm で STB-N₁ の E_コ 高さを 50 % にしたとき、振幅 10 % 点における送信パルスの幅は、12.5 mm 以下とする。(HIPIS による)

(6) 屈折角

45, 60, 70 度 (JIS による)

表 2.4 斜角探触子の不感帯

試験周波数 (MHz)	2 (mm)	5 (mm)
振動子寸法 (mm)		
10×10	40 以下	20 以下
20×20	50 以下	30 以下

表 2.5 斜角探触子の接近限界長さ

屈折角	45° (mm)	70° (mm)
振動子寸法 (mm)		
10×10	15 以下	18 以下
20×20	25 以下	30 以下

ただし、公称屈折角と実際の屈折角との差異は±2 度以内であること。(NDIS による)

(7) 入射点

(a) 入射点目盛は、両側につけること。(JIS と NDIS による)

(b) 入射点目盛は、公称入射点の少なくとも±5 mm の範囲に 1 mm 間隔でつけること。(NDIS による)

(注) + の記号については規定されていない。JIS-Z-2347 の 4.2(4) の + 記号は、試験片に対する規定である。

(8) 不感帯

斜角探触子の不感帯は、表 2.4 に示す値であること。(NDIS による)

(9) 接近限界長さ

斜角探触子の接近限界長さは、表 2.5 に示す値であること。(NDIS による)

(10) 一般表示

探触子の見やすい所に、周波数、振動子材質、振動子の大きさ、形式および屈折角を表示すること。(JIS による)

その他、製造会社名またはマーク、製造番号などを表示すること。(NDIS による)

3. 使 い 方

3.1 一般的な使い方

(1) 探傷器との組合わせ

探触子は、コネクタの形式・寸法、マッチングトランスの内蔵の有無、マッチングトランスの電気仕様およびダンパの仕様を適合させる必要があるため、使用する装置と同一製造会社のものを使用しなければならない。

探触子と装置間は、探触子ケーブルで接続する。一般に、探触子が大型の場合、太いケーブルを、探触子が小型の場合、細いケーブルを使用する。

分割形探触子の場合、2 本並行ケーブルを使用する。これらの探触子ケーブルは、いずれも規定長さのものを使用する必要がある。

(2) 被検材の探傷面温度

一般に、 $-5 \sim +50$ 度の範囲内で使用しなければならない。なお、 30 度以上の急激な温度変化をくり返し与えた場合、振動子の接着不良を生ずる恐れがある。

斜角探触子のくさび (シュー) は、温度の変化につれて音速と超音波減衰が変化するため、屈折角と感度が変化する。従って使用温度で入射点と屈折角をチェックすると共に、測定範囲と感度の設定をすることが望ましい。

分割形探触子のくさび (シュー) も、温度変化について音速と超音波減衰が変化するため、探傷範囲、エコーの位置および感度が変化する。従って使用温度で測定範囲と感度の設定をすることが望ましい。

(3) 被検材との接触、その他

(a) 直接接触形探触子の場合、接触状態により、感度差が生じるため、探傷面は 50 S 以下とし、接触媒質はグリセリンまたは水を使用し、接触圧力は均一になるよう注意する必要がある。

(b) 探傷面があらの場合、保護膜付きで使用する方が、実質感度が高くなる。

(c) 探傷範囲が近距離音場限界距離以内の場合、点探傷だけでは欠陥をみのがすおそれがあるので、探触子は数ミリメートルのしゅう (摺) 動操作を併用することが望ましい。

(4) 防水性

垂直探触子、局部水浸探触子、分割形探触子および斜角探触子とも、振動子部分以外は防水性がないので、水気に触れないよう注意する必要がある。

(5) その他

表 3.1 に被検材の各材質に対する試験周波数の目安を示す。

3.2 各種探触子の使い方

(1) 垂直探触子

(a) 探傷面があらの場合、露出形探触子を使用すると、振動子面が損傷しやすい。現在、このため探触子が大形の場合、振動子部分だけを交換するか、または振動子のはりかえが行なわれている。

(b) 探傷面があらの場合、または曲面の場合、探傷面と振動子面とのなじみ、すなわち音響的結合をよくし、実質感度をよくするため、保護膜を装着することが望ましい。ただし、露出形探触子の場合、電極の代わりに金属はく (箔) を水晶面に取付けた後、保護膜を装着しなければならない。

(c) セラムミック垂直探触子は、両面電極付振動子を使用しているため、マイナス電極の損傷をふせぐため、保護膜を装着して使用するが、または電極面に最初から保護板が装着されているものを使用しなければならない。

(注) 保護膜を装着すると、(b)、(c) の場合とも、感度は低下するが、一般に、あらかじめ試験片で感度設定して使用するため、実際の探傷では上記のように感度はよくなる。

表 3.1 超音波探傷試験の適用例

	被 検 材	試験周波数 (MHz)	超音波探傷試験法
鉄 鋼	大 形 鍛 鋼 材	1~5	垂直法
	小 形 鍛 鋼 材	3~10	垂直法
	車 軸 など 長 尺 物	1~2	垂直法 斜角法
	バ イ プ ・ 砂 傷	2~5	垂直法
	ゴ ー ス ト	2~5	垂直法
	白 点	2~5	垂直法
	大 形 鋳 鋼 材	0.4~2	垂直法 透過法
	小 形 鋳 鋼 材	2~5	垂直法
	鋳 鉄	0.4~1	垂直法 透過法
	銅 材 溶 接 部	2~5	垂直法 斜角法
	銅 材 表 面 傷	2~5	垂直法 表面波法
	銅板ラミネーション	2~5	垂直法 板波法
非 鉄 金 属	アルミニウム イングット	2~5	垂直法
	軽合金押出鍛造材	2~10	垂直法
	銅 合 金	1~2	垂直法 透過法
	核燃料被覆材料	5~15	垂直法 透過法
非 金 属	タイヤ、ゴム、ボウリング球	2 以下	垂直法
	陶 器 ・ ガ ラ ス	1~10	垂直法 斜角法
特 殊 用 途	異種金属接着状況検査	2~5	垂直法 透過法
	減衰度による材質判定	2~15	垂直法
保 守 検 査	溶接部など疲労傷	1~5	垂直法 斜角法
	機械部品疲労傷	2~10	垂直法
	一般回転軸の傷	2~5	垂直法
	車軸クラック	2~5	垂直法 斜角法

注) 垂直法には分割形探触子法を含む

(d) 垂直探触子による被検材の探傷は、普通、若干のしゅう動を含む点走査またはしゅう動による連続走査で行なう。

(2) 局部水浸探触子

(a) 局部水浸探触子は、普通、振動子の上方に空気穴を設けるため、上向きにすると水がもれるので、下向きで使用する。

(b) 局部水浸探触子の下部には、水を封入するため、普通、ビニール膜を装着しているが、ビニール膜がよじれないよう平たんに装着しなければならない。

(c) 局部水浸探触子による被検材の探傷は、垂直探触子と同様な走査法により行なう。

(3) 分割形探触子

(a) コネクタの所に、送信と受信の表示がある場合、その通り探触子ケーブルを接続しなければ、振動子の感度を消失させるおそれがあるので注意しなければならない。

(b) 検査範囲に応じた探傷可能範囲の探触子を使用すること。また、探傷感度の設定には、探傷可能範囲に標準穴をもった試験片を使用すること。

(c) 欠陥の広がり状態を、垂直探触子と等価にするためには、

振動子の分割面と平行に連続走査すること。

(d) 被検材が丸材の場合、探触子は振動子の分割面と直角方向の向きにして、丸材の長さ方向に点走査または連続走査しなければならない。

(4) 斜角探触子

(a) 屈折角は、溶接部探傷の場合、一般に母材の板厚 40 mm 未満では 70 度を、板厚 40 mm 以上では 45 度を使用する。

なお、使用する ビーム 路程は、一般に 250 mm 以下である。

(b) 屈折角が、70 度以上の場合、横波以外に表面波も発生するので、標準試験片で感度設定するとき、表面波だけ阻止するよう探触子前方を指でおさえた状態とする。

なお、感度設定のとき、試験片の標準穴へ入った接触媒質は除去しておかなければならない。

(c) 低炭素鋼で決定した屈折角は、被検材がステンレス、銅またはアルミニウムの場合、次のように計算できる。

被検材の音速 V_2 がわかっている場合、屈折角 ϕ_2 は、斜角探触子のシュウの音速 V_1 と入射角 ϕ_1 から、次式で計算できる。

$$\sin \phi_2 = \frac{V_2}{V_1} \sin \phi_1$$

ただし、 $V_1=2,720$ m/s, $\phi_1=36.5^\circ$ (A 45 のとき), 47.0° (A 60 のとき), 52.5° (A 70 のとき)

被検材の音速が不明の場合、図 3.1 の例のように被検材の端面エコーが最大になるように前後走査して斜角探触子の位置を決め、そのときの距離 l と厚み t により、屈折角 ϕ は次式で計算できる。

$$\tan \phi = \frac{l}{2t}$$

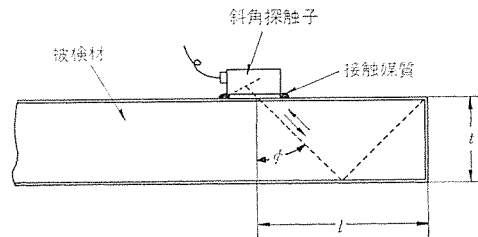


図 3.1 屈折角の測定例

(d) 斜角探触子のシュウは、破損しやすいため機械的衝撃を与えないように、また熱変形のおそれがあるため 70 度以上の温度を与えないように注意すること。

(e) 斜角探触子の走査中、左右または斜め方向の偏摩耗が生じないように、シュウの接触面が、できるだけ均等に接触するようしゅう動させること。

(注) 左右および斜め方向の偏摩耗の程度は、標準試験片では測定できず、寸法検査または感度変化で判断する以外にない。

(f) シュウが斜角探触子のケース下端まで摩耗した場合、次の方法により応急的に修理できる。

まずシュウをサンドペーパー (300 番程度) で平たんに仕上げる。次に探触子と同寸法に加工したアクリル板の片面を上記サンドペーパーで若干仕上げた後、その面に接着剤 (アロンアルファ No. 002 または セメダイン 3000 RS など) を塗布してシュウにはりつける。このようなアクリル板をはりつける方法では、新品の感度に比較して、約 3 ~ 9 dB 程度の感度低下がある。(昭和 48-9-12 受付)

新製品紹介

大形エアソースヒートポンプパッケージ PAH 形シリーズ

昨今、我々を取りまく自然環境はきわめて悪化し、大都市やその近辺の都市においては、光化学スモッグをはじめとする大気汚染が大きな社会問題となっている。

三菱電機ではこのような状況に対応し、“公害を出さない、公害に犯されない”パッケージエアコンの開発をおこない、このほど1台のユニットで冷暖房が可能な大形エアソースヒートポンプパッケージ・PAH形シリーズを完成した。

PAH形は室内ユニットPAH形と室外ユニットKD形で構成され、PAH-20+KD-20 (20馬力)、PAH-30+KD-30 (30馬力)、PAH-40+KD-40 (40馬力)の3機種からなるシリーズである。

PAH形は特に暖房運転を安定させるために冷媒回路に当社独自のHi/Re/Liシステムを採用した。

除霜方式はリバースサイクルを採用しており完全自動除霜を可能とした。さらに運転操作もワンタッチ全自動化し取り扱い易くしている。

■ 特 長

(1) 無公害 パッケージ

暖房時にボイラなどの燃焼装置を使わないため、大気汚染等の公害を出さない

(2) スイッチ一つで冷一暖切換えができる

大形電動四方弁を内蔵し、冷一暖切換えはスムーズに行なうことができる

(3) 安定した暖房運転

冷媒回路に当社独自のHi/Re/Liシステムを採用している ので、特に暖房時の低外気温度でも安定した運転を行なう

(4) リバースサイクルによる完全自動除霜

(5) 全自動運転

標準装備のサーモスタットにより全自動運転を行なう

(6) 万全な保護装置

高低圧圧力開閉器、圧縮機・送風機電動機用 過電流継電器、吐出ガスサーモを備え、万全を期している

(7) 低騒音室外ユニット

低騒音形送風機の採用により静粛運転を行なう

■ 仕 様

表1、表2を参照

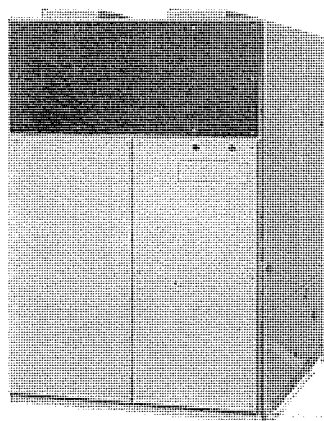


図1 エアソースヒートポンプパッケージ PAH-20形 (室内ユニット)

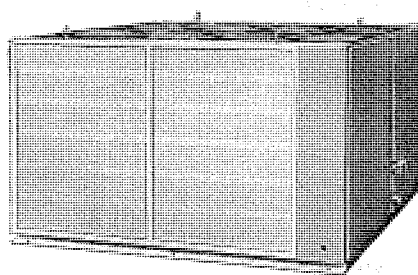


図2 空冷凝縮器KD形 (室外ユニット)

表1 室内ユニット仕様 PAH形

		PAH-20	PAH-30	PAH-40
電 源		3相 200/220 V 50/60 Hz		
外形寸法 mm (最大寸法)	高 さ	1,900	1,900	1,900
	幅	1,440	1,780	1,980
	奥 行	1,190	1,290	1,320
外 装	マンセル 5 YR 8/0.5 マンセル 10 B 5/8のツートンカラー			
性 能	冷房能力 kcal/h	43,000/48,000	64,500/72,000	81,000/91,000
	暖房能力 kcal/h	50,000/55,000	75,000/82,000	95,000/104,000
冷 媒 回 路	圧縮機形式×台数	密閉式×1	密閉式×1	密閉式×1
	電動機出力 (kW)	14/15	20.5/22	28/30
	室内コイル	プレートフィン式		
室 内 送 風 機	冷 媒 制 御	Hi/Re/Li システム		
	冷 媒	R-22		
	冷凍機油	スズノ 4G		
室 内 送 風 機	送風機形式×台	シロッコファン×2		
	風 量 (m³/min)	180	270	360
	機外静風圧 mmAq	25	25	25
エ ア フィ ル タ	電動機出力 kW	3.7	5.5	7.5
温 度 調 節 器	付 属			
保 護 装 置	高低圧開閉器 圧縮機・送風機過電流リレー			
製 品 重 量 kg	1,150 1,300 1,500			

※冷房能力は吸込空気 DB=27°C, WB=19.5°C, 外気温 DB=35°C の時を示す

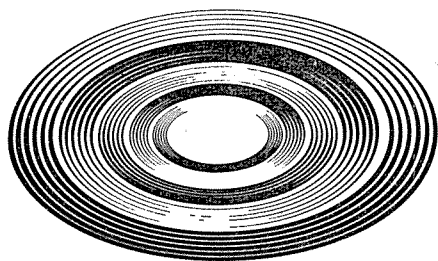
※暖房能力は吸込空気 DB=21°C, 外気温 DB=7°C, WB=6°C の時を示す

※冷暖房能力は配管相当長さ5mのときを示す

表2 室外ユニット仕様 KD形

		KD-20	KD-30	KD-40
電 源		200/220 V 50/60 Hz		
室 外 コ イ ル		プレートフィン式 (空冷式)		
室外送風機	形式×台	有圧換気扇×8	有圧換気扇×5	有圧換気扇×6
	電動機出力	0.1 kW×8	0.4 kW×5	0.4 kW×6
除 霜		リバースサイクル		
騒音(予想) Aスケール		60/64 ホン	71/74 ホン	71/74 ホン
		ユニットから 3m 離れ高さ 1.5m の位置		
保 護 装 置		送風機用 ヒューズ付刃形開閉器		
製 品 重 量	kg	550	650	790

[長崎製作所]



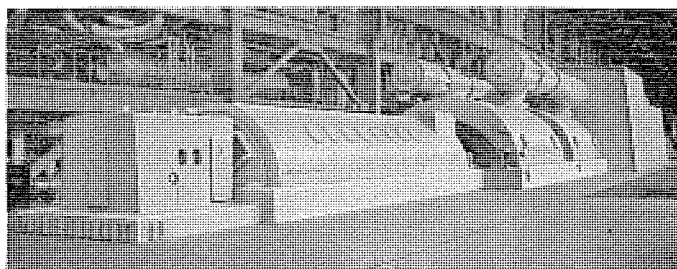
NEWS FLASH

関西電力(株)姫路第二発電所納め 5 号 670,000 kVA タービン発電機運転開始

関西電力(株)姫路第二発電所 5 号 670,000 kVA タービン 発電機は、振動調整を含む各種の現地試験および試運転を完了し営業運転を開始した。本機は、固定子 コイルに 2 列 ベントチューブ、回転子 コイルに Pressurized Gap 冷却方式を採用した内部冷却機で、タチム のタービン 発電機としてわが国最大級のものである。2,800 kW, 505 rpm の電動直流励磁機もこの形式として最大級のものである。

形 式 : 横置円筒回転界磁形
容 量 : 670,000 kVA
電 圧 : 19,000 V
周波数 : 60 Hz
回転数 : 3,600 rpm
力 率 : 90 %
短絡比 : 0.58
冷却方式 : 固定子水素内部冷却 2 列 ベントチューブ 式
回転子水素内部冷却 Pressurized Gap 方式
励磁方式 : 電動直流励磁機

[神戸製作所]



運転を開始した 670,000 kVA タービン 発電機

九州電力(株)玄海発電所向け 625,000 kVA タービン発電機完成

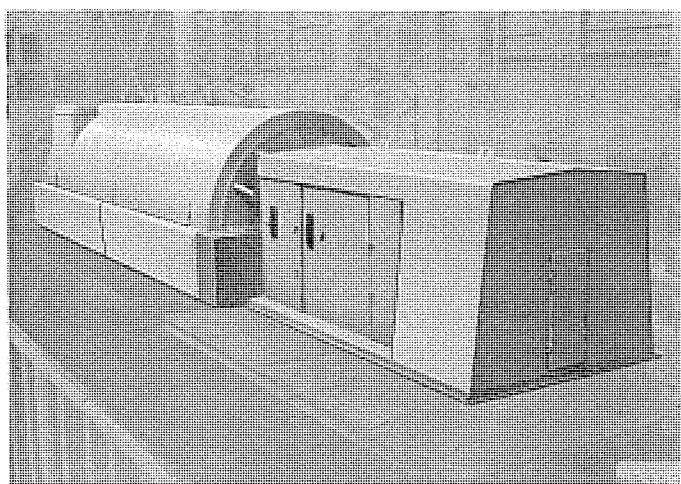
当社では、このほど九州電力(株)玄海発電所向け 1 号機 625,000 kVA タービン 発電機を完成した。本機は三菱重工(株)高砂製作所製の 559,260 kW タービンと直結されるもので、九州電力(株)の原子力第 1 号機となる。

このタービン 発電機は、非対称 スロット 配置を採用した最初の機械であり、これにより負荷時空げき(隙)磁束波形の改善・リアクタンスの減少を達成することができた。

固定子 コイルの冷却は 2 列 ベントチューブ 方式、回転子 コイルの冷却は標準内部冷却であり、固定子鉄心は軸方向通風を採用している。

形 式 : 横置円筒回転界磁形
容 量 : 625,000 kVA
電 圧 : 19,000 V
周波数 : 60 Hz
回転数 : 1,800 rpm
力 率 : 90 %
短絡比 : 0.58
冷却方式 : 固定子水素内部冷却 2 列 ベントチューブ
回転子標準水素内部冷却
固定子鉄心軸方向通風
励磁方式 : ブラシレス 2,300 kW, 440 V

[神戸製作所]



工場試験中の 625,000 kVA タービン 発電機と
2,300 kW ブラシレス 励磁機 (手前)

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2番3号(三菱電機ビル) (電 100) (電) 東京 (03) 218局2111番

大阪営業所	大阪市北区梅田町8番地(西阪神ビル) (電 530)	(電) 大阪 (06) 343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) (電 450)	(電) 名古屋 (052) 565局3111番
静岡営業所	静岡市伝馬町16の3番地(明治生命静岡支社) (電 420)	(電) 静岡 (0542) 54局4681番
福岡営業所	福岡市中央区天神2丁目12番1号(天神ビル) (電 810)	(電) 福岡 (092) 72局2111番
長崎営業所	長崎市丸尾町7番8号(長崎底曳会館) (電 852)	(電) 長崎 (0958) 61局6101番
札幌営業所	札幌市中央区北2条西4丁目1番地(北海道ビル) (電 060-91)	(電) 札幌 (011) 212局3711番
仙台営業所	仙台市大町1丁目1番30号(新仙台ビル) (電 980)	(電) 仙台 (0222) 21局1211番
富山営業所	富山市桜木町1番29号 (電 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) (電 730)	(電) 広島 (0822) 48局5311番
岡山営業所	岡山市駅前町1丁目9番地(明治生命館) (電 700)	(電) 岡山 (0862) 25局5171番
高松営業所	高松市鶴屋町2番1号 (電 760)	(電) 高松 (0878) 51局0001番
新潟営業所	新潟市東大通1丁目2番地23号(北陸ビル) (電 950)	(電) 新潟 (0252) 45局2151番
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル) (電 100)	(電) 東京 (03) 218局2111番
関東商品営業所	大宮市大成町4丁目298番地(三菱電機大宮ビル) (電 330)	(電) 大宮 (0486) 65局3211番
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1 (電 530)	(電) 大阪 (06) 344局1231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) (電 450)	(電) 名古屋 (052) 565局3111番
福岡商品営業所	福岡市中央区天神2丁目12番1号(天神ビル) (電 810)	(電) 福岡 (092) 72局2111番
札幌商品営業所	札幌市中央区北2条西4丁目1番地(北海道ビル) (電 060-91)	(電) 札幌 (011) 212局3777番
仙台商品営業所	仙台市大町1丁目1番30号(新仙台ビル) (電 980)	(電) 仙台 (0222) 21局1211番
北陸商品営業所	金沢市小坂町西97番地 (電 920)	(電) 金沢 (0762) 52局1151番
広島商品営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル) (電 730)	(電) 広島 (0822) 48局5311番
高松商品営業所	高松市鶴屋町2番1号 (電 760)	(電) 高松 (0878) 51局0001番
東京機器営業所	東京都港区北青山1丁目2番3号(青山ビル) (電 107)	(電) 東京 (03) 404局0336番
大阪機器営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1 (電 530)	(電) 大阪 (06) 344局1231番
名古屋機器営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル) (電 450)	(電) 名古屋 (052) 565局3111番
静岡機器営業所	静岡市小島2丁目1番22号 (電 420)	(電) 静岡 (0542) 82局2061番
浜松機器営業所	浜松市海老塚町479の1 (電 430)	(電) 浜松 (0534) 54局4121番
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地 (電 661)	(電) 大阪 (06) 491局8021番
生産技術研究所	尼崎市南清水字中野80番地 (電 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 (電 247)	(電) 鎌倉 (0467) 44局6111番
神戸製作所	神戸市兵庫区和田崎町1丁目1番2号 (電 652)	(電) 神戸 (078) 652局2121番
伊丹製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (電 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 (電 669-13)	(電) 三田 (07956) 3局4371番
赤穂工場	赤穂市天和651番地 (電 678-02)	(電) 赤穂 (07914) 3局2221番
長崎製作所	長崎市丸尾町6番14号 (電 850-91)	(電) 長崎 (0958) 61局6211番
稲沢製作所	稲沢市菱町1番地 (電 492)	(電) 稲沢 (0587) 32局8111番
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地 (電 640-91)	(電) 和歌山 (0734) 36局2111番
鎌倉製作所	鎌倉市上町屋325番地 (電 247)	(電) 鎌倉 (0467) 44局1111番
通信機製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (電 661)	(電) 大阪 (06) 491局8021番
北伊丹製作所	伊丹市瑞原4丁目1番地 (電 664)	(電) 伊丹 (0727) 82局5131番
熊本第一工場	熊本市竜田町弓削720番地 (電 862)	(電) 熊本 (0963) 38局7211番
熊本第二工場	熊本県菊池郡西合志町御代志997 (電 861-11)	(電) 熊本 (09624) 2局0151番
名古屋製作所	名古屋市中区矢田町18丁目1番地 (電 461)	(電) 名古屋 (052) 721局2111番
旭工場	尾張旭市下井町下井 (電 488)	(電) 尾張旭 (05615) 3局5101番
福岡製作所	福岡市西区今宿青木690番地 (電 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 (電 720)	(電) 福山 (0849) 21局3211番
相模製作所	相模原市宮下1丁目1番57号 (電 229)	(電) 相模原 (0427) 72局5131番
姫路製作所	姫路市千代田町840番地 (電 670)	(電) 姫路 (0792) 23局1251番
静岡製作所	静岡市小島3丁目18番1号 (電 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 (電 508)	(電) 中津川 (05736) 6局2111番
大船製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号 (電 247)	(電) 鎌倉 (0467) 44局6111番
郡山製作所	郡山市栄町2番25号 (電 963)	(電) 郡山 (0249) 32局1220番
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地 (電 370-04)	(電) 尾島 (02765) 2局1111番
藤岡工場	藤岡市本郷字別所1173番地 (電 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 (電 617)	(電) 京都 (075) 921局4111番
長野工場	長野市大字南長池字村前 (電 380)	(電) 長野 (0262) 43局1101番
札幌営業所	札幌市中央区北2条東12丁目98番地 (電 060)	(電) 札幌 (011) 231局5544番

次 号 予 定

三菱電機技報 Vol. 47 No. 12

普 通 号

《普通論文》

- 500 kV ガス絶縁開閉装置の開発とその適用
- 新幹線試作電車 961 形用電機品
- 大容量全閉外扇形誘導電動機
- LSH-E 形および S 形高压配电箱とその特長
- 20 GHz 帯扇形ビーム複反射鏡アンテナ
- 微少電力 TV サテライト装置
- 短波無線機用の混信に強いデータ伝送装置
- M-345 高性能カラーキャラクタディスプレイ装置
- 等時間原則による 2 車種経路配分

- 行列処理言語システム MAXFORT
- 拡張型言語の実験的システム
- シリコンアバランシェホトダイオードとその応用装置
- ガラス半導体のスイッチング現象
- カセットデータレコーダ用フェライトヘッド
- ハロリン酸カルシウムけい光体の均質性

《技術講座》

- 超音波探傷試験法 (6)
- 超音波探傷の実際 — その 2

三 菱 電 機 技 報 編 集 委 員 会

委員長	正 木 茂 雄	常任委員	堀 謙 二 郎
副委員長	神 崎 遼	"	湊 武 雄
常任委員	伊 藤 一 夫	"	武 藤 正
"	上 田 重 夫	"	吉 松 誠 一
"	宇 佐 見 重 夫	委 員	粕 谷 一 雄
"	大 田 重 吉	"	武 田 忠 夫
"	北 川 和 人	"	林 昇 寿
"	古 賀 亨	"	待 鳥 正
"	外 野 範 吾	"	吉 武 正 彦
"	塚 本 信 雄	"	若 宮 佐 三
"	藤 永 敦		(以上 50 首順)

三菱電機技報 47 巻 11 号

昭和 48 年 11 月 22 日印刷 昭和 48 年 11 月 25 日発行「禁無断転載」定価 1 部 金 200 円(送料別)

編 集 兼 発 行 人

東京都千代田区丸の内 2 丁目 2 番 3 号

正 木 茂 雄

印 刷 所

東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地
(郵便番号 162)

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 12 番地

高 橋 武 夫

発 行 所

東京都千代田区丸の内 2 丁目 2 番 3 号 (郵便番号 100)

三 菱 電 機 株 式 会 社 内

「三菱電機技報社」

(電話) (03) 218 局 2323 番

発 売 元

東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地 (郵便番号 101)

株式会社 オーム社書店

(電話) (03) 291 局 0912 番 振替口座 東京 20018 番