昭和37年9月15日第三種郵便物認可　三菱電機技報　51巻10号(通巻557号)昭和52年10月25日発行(毎月1回25日発行)

MITSUBISHI DENKI GIHO

三菱電機技報

Vol.51 No.10

レーダ特集

10
1977

未来を開発する
三菱電機

三菱電機技報

Vol. 51 No. 10 OCTOBER 1977

レーダ特集

目　次

特集論文

レーダ技術の動向……玉真哲雄　639

最近の特殊レーダ技術とその応用……岩部　昭・篠原英男・江口紀英・横内通憲・尾形良征　640

レーダのハードウェア技術の現況……水沢丕雄・中司浩生・田中安敏・増野芳樹・徳丸芳孝　647

24 GHz 空港面監視用高分解能レーダ……近藤輝夫・橋本　一・徳丸芳孝・飯森昌直・福井清緝　653

レーダ技術の民生応用……北原照義・古東啓吾・伴　和紘・森中明善・野田博司　657

降雨観測レーダ用2周波数共用アンテナ……山田松一・小川明義・古田　治・片木孝至・別段信一　662

普通論文

《MELCOM》70 シリーズ・モデル35のハードウェアとオペレーティングシステム
……出口博章・深尾忠一郎・北原拓也・渡辺修亨・稲坂朋義　667

気化予熱混合式石油燃焼技術とその応用《クリーンヒーター》……野間口有・松野信義・西　敦義・八代勝雄・桑沢宏康　672

石油温風暖房器《クリーンヒーター》の制御……古屋芳明・西　敦義・八代勝雄・桑沢宏康・川渕　勇　676

大容量発電機主回路用ガスしゃ断器の開発……松村　晋・富永正太郎・信崎泰秀・山田和豊・浅田正敬　681

三菱オゾン濃度計 OA シリーズ……竹内秀夫・城下賢司・米川浅治　686

直流機の整流現象理論……阪部茂一・野村達衛・岩本雅民　691

往復動圧縮機の熱解析……石嶋孝次・福島　満・大串哲朗　696

直流機の通風冷却解析……星野吉信・佐々木希晴・久野和雄・西山　槐・山中晤郎　701

特許と新案……665

帯電防止用ブラウン管・回路しゃ断装置・過負荷保護回路・機関点火時期調整装置

当社の登録特許一覧……700・710

スポット……706

汎用クレーン電機品，Gシリーズ電磁開閉器　電磁接触器・DH-T形トランジスタインバータ・電子式クッションスタータ　電子式ブレーキ・KL-5形高圧進相コンデンサ・三菱エレベータ停電時自動着床装置（表紙-3）

FEATURING RADAR TECHNOLOGY

CONTENTS

FEATURED PAPERS

Recent Developments in Specialized Radar Technology, and Their Applications……Akira Iwabe et al.　640

The State of the Art in Radar Hardware……Moto'o Mizusawa et al.　647

24GHz Airport-Surface-Detection Equipment……Teruo Kondo et al.　653

Applications of Radar Technology for the General Public……Teruyoshi Kitahara et al.　657

Dual-Frequency Radar for Rainfall Monitoring……Matsuichi Yamada et al.　662

GENERAL PAPERS

The Hardware and Operating System of the MELCOM 70 Model 35 Computer……Hiroaki Deguchi et al.　667

The Kerosene Clean Heater, and Application of Kerosene-Combustion Technology Using Vaporization and Premixing……Tamotsu Nomaguchi et al.　672

Control of the Kerosene-Fired Clean Heater Room-Heating System……Yoshiaki Furuya et al.　676

Development of SF_6-Gas Circuit Breakers for the Main Circuit of Large-Capacity Generators……Susumu Matsumura et al.　681

Series OA Ozone Analyzers……Hideo Takeuchi et al.　686

The Theory of Commutation of DC Machines……Shigekazu Sakabe et al.　691

A Thermal Analysis of Reciprocating Compressors……Koji Ishijima et al.　696

Ventilation and Cooling of DC Machines……Yoshinobu Hoshino et al.　701

表　紙

カナダ運輸省納め空港面監視用高分解能レーダ 〈ASDE〉

表紙はトロント国際空港のタワーに設置された ASDE のアンテナと，空港周辺を表示した PPI パターンである。

この装置は国内での当社の実績が世界的にも認められカナダ運輸省に納入したもので，晴天時はもちろんのこと夜間・雨・霧などの視界が悪い時でも高分解能で空港面を捜索できる。

PPI 指示機は16インチテレビに高輝度表示され，明るい室内での監視も可能で，航空機の衝突事故防止をはじめ航空交通管制の円滑化に威力を発揮している。

COVER

Airport-Surface-Detection Equipment for Canada

Recently delivered for use at Toronto International Airport is this Mitsubishi Electric ASDE system, of which the plan position indicator and the antenna (inset) are shown. The system provides extremely high detection not only during daylight hours, but also at night, in rain or fog and during other periods of poor visibility.

Equipped with a bright, 16" TV screen, the PPI shows the location of aircraft and vehicles on the surface of the airport clearly and accurately, even in brightly lit rooms. Currently in operation, this ASDE is providing smooth surface-traffic control, aiding greatly in the prevention of airplane collisions.

アブストラクト

最近の特殊レーダ技術とその応用
岩部　昭・篠原英男・江口紀英・横内通憲・尾形良征
三菱電機技報 Vol.51・No.10・P640～646
最近のレーダ技術の進歩は著しく，クラッタ抑圧技術，フェイズドアレイ技術，ディジタル処理技術，パルス圧縮技術等この数年の間に画期的な進歩を遂げた．これらはコンピュータ技術の進歩，ＭＩＣを初めとする各種高性能の電子デバイスの開発に支えられ今後もますます進歩発展の傾向にある．当社でもこれらの技術の進歩に従って新製品を開発し納入して来たので，実例を挙げながら最近の注目すべきレーダ技術について紹介する．

レーダのハードウェア技術の現況
水沢丕雄・中司浩生・田中安敏・増野芳樹・徳丸芳孝
三菱電機技報 Vol.51・No.10・P647～652
レーダ技術を，アンテナ，送信機，受信機，指示機，及び関連技術としてのマイクロ波デバイスの五つの立場からながめて，その現況を述べ，将来動向を知るための手掛かりとした．すなわち，各立場ごとに比較的最近研究開発され，実用化されてきた技術を実例を挙げながら述べ，新たに生まれようとしている新しい概念に基づく技術についても触れた．

24GHz空港面監視用高分解能レーダ
近藤輝夫・橋本　一・徳丸芳孝・飯森昌直・福井清絹
三菱電機技報 Vol.51・No.10・P653～656
ブラウン管の輝線の輝度は，残像の輝度に比べて数十倍の明るさがある．この明るい輝線でブラウン管全周を表示できれば，従来に比べて格段に明るいレーダ画像が得られる．これはアンテナを高速回転させることにより実現することができたが，設計段階において考察した事柄につき，ここにまとめた．

レーダ技術の民生応用
北原照義・古東啓吾・伴　和紘・森中明善・野田博司
三菱電機技報 Vol.51・No.10・P657～661
マイクロ波半導体素子及び集積回路技術の進歩により，容易にマイクロ波が発生できるようになり，これまであまり利用されていなかった分野でのレーダの応用が開拓されつつある．レーダスピードメータ，天井クレーン衝突防止装置等，既に実用化されているものもあり，自動車用マイクロ波センサ，救命用レーダビーコン等，現在開発中のものもある．これらの現状について述べる．

降雨観測レーダ用２周波数共用アンテナ
山田松一・小川明義・古田　治・片木孝至・別段信一
三菱電機技報 Vol.51・No.10・P662～664
国際電信電話(株)(KDD)茨城衛星通信所に設置されている，開口径７ｍのホーンリフレクタフィードカセグレンアンテナを降雨観測レーダアンテナとして使用するに当たり，5.265GHzと13.85GHzで同時観測を行うため，これらの周波数におけるビーム能率を等しくすることが必要になった．このため，副反射鏡の形状のみを成形する方法を採用し，その設計，製作を行った．測定した結果，ほぼ所期の性能を実現することができた．

《MELCOM》70シリーズ・モデル35のハードウェアとオペレーティングシステム
出口博章・深尾忠一郎・北原拓也・渡辺修亨・稲坂朋義
三菱電機技報 Vol.51・No.10・P667～671
《MELCOM》70シリーズ・モデル35は，当社のミニコンピュータ《MELCOM》70シリーズの新機種３モデル（モデル20，25，35）の最上位機種である．モデル35は他のモデルとの上位方向互換性を保ちつつ，16ビットマシン最大の限界である最大主記憶容量を64Ｋ語から128Ｋ語まで拡張し，拡大の一途をたどる市場要求に十分こたえる高位ミニコンである．この論文では，モデル35のハードウェアと基本ソフトウェアのねらい，特長を述べる．

気化予熱混合式石油燃焼技術とその応用《クリーンヒーター》
野間口有・松野信義・西　敦義・八代勝雄・桑沢宏康
三菱電機技報 Vol.51・No.10・P672～675
石油の気化予混合燃焼特性に関する研究結果を示し，実用上都市ガス，LPガスなどの気体燃料とほぼ同等の特性を持ち得ることを明確にした．この研究結果に従って開発した実際の予混合燃焼方式《クリーンヒーター》VKB形，VKN形の詳細を説明する．ポット式などとは比較にならないクリーン燃焼，高い熱効率が実現されている．

石油温風暖房器《クリーンヒーター》の制御
古屋芳明・西　敦義・八代勝雄・桑沢宏康・川渕　勇
三菱電機技報 Vol.51・No.10・P676～680
温風暖房機は今後我が国における暖房機の主流を占めると思われ，市場規模も拡大の一途をたどっている．当社では快適暖房・燃料効率の向上・安全性の向上を目ざし，MICS石油ガス化燃焼方式によるVKB形及びVKN形の２タイプの石油《クリーンヒーター》を開発し，他社に先駆けて市場に送り出している．本稿では，上記２タイプの温風暖房機の燃焼機構と，制御回路及び安全装置について述べる．

大容量発電機主回路用ガスしゃ断器の開発
松村　晋・富永正太郎・信崎泰秀・山田和豊・浅田正敬
三菱電機技報 Vol.51・No.10・P681～685
大容量発電所の発電機主回路に適用されるしゃ断器には，特に過酷な性能が要求されるため，従来は発電機と主変圧器とを相分離母線で直結する方式が採用されていた．このたび，関西電力(株)と三菱電機(株)との共同研究により，発電機用しゃ断器の分野で初めてSF_6ガスを使用した揚水発電所用16kA，火力・原子力発電所用36kAしゃ断器の開発に成功したので，このしゃ断器の定格・構造概要・試験結果等について述べる．

三菱オゾン濃度計OAシリーズ
竹内秀夫・城下賢司・米川浅治
三菱電機技報 Vol.51・No.10・P686～690
最近，オゾンのもつ強力な酸化力・分解力を用いた産業廃水処理，脱硝，上下水処理などのオゾン処理プラントが注目されてきた．それに伴い，プラントを最適に制御するための高精度オゾン濃度計の必要性が高まっている．当社では紫外線吸収法を応用したプラントの監視・制御用オゾン濃度計を製品化した．この論文では，オゾン濃度計ＯＡシリーズの概要・動作原理・特性・特長を紹介する．

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 667~71 (1977)

The Hardware and Operating System of the MELCOM 70 Model 35 Computer

by Hiroaki Deguchi, Chuichiro Fukao, Takuya Kitahara, Osamu Watanabe & Tomoyoshi Inasaka

The MELCOM 70 Model 35 is the high end of the MELCOM 70 series of minicomputers, retaining upward compatibility with the other models (20 and 25) of the series. The maximum capacity of the main memory can be expanded from 64~128 kilowords, the maximum possible with a 16-bit machine, to satisfy market requirements for ever-increasing capacities. The article discusses the objectives and features of the hardware and the basic software of the Model 35.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 672~75 (1977)

The Kerosene Clean Heater, and Application of Kerosene-Combustion Technology Using Vaporization and Premixing

by Tamotsu Nomaguchi, Nobuyoshi Matsuno, Atsuyoshi Nishi, Katsuo Yashiro & Hiroyasu Kuwazawa

The results of research into the combustion properties of vaporized kerosene premixed with air are presented, and it is shown that actual performance equivalent to that using city gas, Propane gas, etc. can be obtained. Details are presented of the Types VKB and VKN Clean Heaters, which employ a method of premixing and combustion developed on the basis of these findings. It was possible to achieve much cleaner combustion and higher heat efficiency than with pot-type burners.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 676~80 (1977)

Control of the Kerosene-Fired Clean Heater Room-Heating System

by Yoshiaki Furuya, Atsuyoshi Nishi, Katsuo Yashiro, Hiroyasu Kuwazawa & Isamu Kawabuchi

There is every indication that hot-air heating is becoming the most popular method of heating in Japan, and the size of the market is increasing rapidly. With emphasis on greater comfort, higher combustion efficiency and improved safety, Mitsubishi Electric has become the first to start production of equipment fueled by vaporized kerosene. This system is available in two types, VKB and VKN, and the article describes the combustion mechanism, control circuitry and safety equipment.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 681~85 (1977)

Development of SF_6-Gas Circuit Breakers for the Main Circuit of Large-Capacity Generators

by Susumu Matsumura, Shotaro Tominaga, Yasuhide Shinozaki, Kazutoyo Yamada & Masanori Asada

Since the breakers for the main circuit of generators in large power stations must operate under particularly severe conditions, the generators are usually connected directly to the main transformers by separate-phase buses. In a joint effort, Kansai Electric Power and Mitsubishi Electric have succeeded in developing the first generator breakers to use SF_6-gas—a 16kA type for pumped-storage generation, and a 36kA type for fossil-fuel or nuclear generation. The article presents the ratings and a structural description of the breakers, as well as the results of tests.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 686~90 (1977)

Series OA Ozone Analyzers

by Hideo Takeuchi, Takashi Shiroshita & Asaji Yonekawa

Recently attention has been focused on plants using the powerful oxidizing and decomposing effects of ozone for the treatment of industrial waste water, denitration, and treatment of supply and waste water. This has increased the need for high-precision ozone-analysis equipment for the optimum control of these plants. Mitsubishi Electric has developed the OA series of ozone analyzers for plant monitoring and control, which applies the principle of ultraviolet absorbtion. The article describes the equipment, its operating principle, characteristics and features.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 640~46 (1977)

Recent Developments in Specialized Radar Technology, and Their Applications

by Akira Iwabe, Hideo Shinohara, Norihide Eguchi, Michinori Yokouchi & Yoshimasa Ogata

Over the past several years, revolutionary advances have been made in such aspects of radar technology as clutter suppression, phased arrays, digital processing and pulse compression. This progress has rested on progress in computer technology and in the development of various high-performance electronic devices, and in particular, microwave ICs, and is expected to expand further in the future. In line with these technological advances, Mitsubishi Electric has developed and marketed a number of new products. The article describes noteworthy developments in the field of radar technology, with the aid of actual examples.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 647~52 (1977)

The State of the Art in Radar Hardware

by Moto'o Mizusawa, Koki Nakatsuka, Yasutoshi Tanaka, Yoshiki Masuno & Yoshitaka Tokumaru

The present situation in radar engineering is examined in terms of five areas—antennas, transmitters, receivers, indicators, and the related field of microwave devices—in an attempt to anticipate future trends. Techniques that have recently reached practicability in each area are discussed with the aid of actual examples, and mention is made of technical developments based on new concepts.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 653~56 (1977)

24GHz Airport-Surface-Detection Equipment

by Teruo Kondo, Hajime Hashimoto, Yoshitaka Tokumaru, Masanao Iimori & Kiyotsugu Fukui

The scanning lines of a CRT are many dozen times brighter than image persistence, and displaying them on the whole of the CRT screen would make it possible to obtain radar pictures far brighter than at present. This has been achieved by rotating the antenna at high speed. The article discusses the various factors that were considered at the equipment design stage.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 657~61 (1977)

Applications of Radar Technology for the General Public

by Teruyoshi Kitahara, Keigo Koto, Kazuhiro Ban, Akiyoshi Morinaka & Hiroshi Noda

Advances in the technology of microwave solid-state devices and microwave ICs have greatly facilitated the generation of microwaves, with the result that applications are being found for radar in fields in which it has been little used in the past. Equipment for measuring automobile speeds, and collision-avoidance sensors for traveling cranes are already in actual production, while microwave sensors for automobiles and radar beacons for marine search and rescue are now under development. The article describes the present status of these developments.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 662~64 (1977)

Dual-Frequency Radar for Rainfall Monitoring

by Matsuichi Yamada, Akiyoshi Ogawa, Osamu Furuta, Takashi Katagi & Shin'ichi Betsudan

With the conversion of a horn-reflector-feed Cassegrain antenna at KDD's Ibaraki Satellite Communications Center, having an aperture 7m in diameter, to use in the monitoring of rainfall simultaneously on 5.265 and 13.85GHz, it was necessary to assure identical beam efficiency on both frequencies. A method involving the reshaping of the sub-reflector alone was applied in design and manufacture, and actual measurements showed that the expected performance was achieved.

アブストラクト

直流機の整流現象理論

阪部茂一・野村達衛・岩本雅民

三菱電機技報 Vol.51・No.10・P691～695

この論文は，複雑な整流現象を解析する理論解析を紹介している．筆者らの理論解析は，整流現象の複雑な要因として(1)ブラシ抵抗の非線形性，(2)整流中の多数のコイルの電磁結合，(3)正確な整流起電力を考慮したものである．この理論解析法を利用して，電流変化，ブラシ整流子片間電圧，無火花帯が計算される．

直流機の通風冷却解析

星野吉信・佐々木希晴・久野和雄・西山　槐・山中唔郎

三菱電機技報 Vol.51・No.10・P701～705

直流機の容量，寿命を制限するものに温度上昇があり，精度の高い通風及び温度の計算は最適設計を行う上で重要である．ここでは他力通風形式の大・中形直流機に対する実測と各種解析法を紹介する．解析には，通風計算プログラム，熱等価回路網を用いた直流機全体温度計算プログラム，有限要素法による界磁温度計算プログラムなどがあり，それぞれ実測値と良好な一致をみた．また，通風冷却の技術は製品に幅広く応用され，具体的な成果が得られている．

往復動圧縮機の熱解析

石嶋孝次・福島　満・大串哲朗

三菱電機技報 Vol.51・No.10・P696～700

密閉形往復動圧縮機を構成する部品，及び冷媒ガスの温度による性能劣化を防止し，かつ簡素な冷却構造を得るために圧縮機各部の温度を予測する解析手法の実用化を目ざして，小形冷蔵用及び小形空調用圧縮機を例にとり熱回路網法によって計算を行った．計算結果は前者について20%，後者について7%の精度で実測値と一致し，ここで用いた計算方法は有効であることが分かった．

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 701～05 (1977)

Ventilation and Cooling of DC Machines

by Yoshinobu Hoshino, Kiharu Sasaki, Kazuo Kuno, Enju Nishiyama & Goro Yamanaka

Temperature rise is a major factor limiting the capacity and service life of DC machines, and accurate ventilation and temperature calculations are vital to achieve optimum design. The article describes actual measurement and a number of analytical methods as applied to large and medium-sized DC machines using forced ventilation. Analytical tools include a ventilation-calculation program, a program for calculating overall DC-machine temperatures using a thermal equivalent network, and a field-temperature calculation program based on the finite-element method; all showed good agreement with measured values. The techniques developed have been put into actual application, leading to concrete results.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 691～95 (1977)

The Theory of Commutation of DC Machines

by Shigekazu Sakabe, Tatsuei Nomura & Masatami Iwamoto

The article presents a theoretical analysis of the complex phenomena of commutation. It takes into account the following complex factors influencing commutation: 1) the nonlinearity of brush resistance, 2) magnetic coupling of multiple coils during commutation, and 3) accurate commutation voltage. The analysis has been applied to the calculation of current fluctuation, bar-to-brush voltage drop, and the no-spark zone.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 51, No. 10, pp. 696～700 (1977)

A Thermal Analysis of Reciprocating Compressors

by Koji Ishijima, Mitsuru Fukushima & Tetsuro Ogushi

In order to prevent deterioration in compressor performance caused by the temperature of components and of the refrigerant, and at the same time achieve a simplified cooling structure, a method is required for predicting the working temperatures of compressor components. As a step toward this end, calculations were carried out by means of a thermal-network method on typical small hermetic reciprocating compressors, used both for refrigeration and for air-conditioning. The calculations agreed with actually measured values within an accuracy of 20% for the former and 7% for the latter, indicating that the method of calculation used provides an effective tool.

レーダ技術の動向

玉真哲雄*

かつてのレーダは，おおむね4個の箱で表現することができた（図1.)。送信機の発生した電磁波はアンテナで電波ビームに成形されて放射され，目標物からの反射波は再びアンテナで捕えられ受信機の増幅・検波作用でビデオ信号となり指示機のCRT（ブラウン管）上に表示される。これを人間が肉眼で観察するのであって，レーダ自体は純然たるセンサ(sensor)であり，いわば人間はオブザーバ(observer)，オペレータ(operator)であるとともに，CRT上の信号中から所望の情報を弁別抽出するプロセッサ(processor)でもあった。

近年のレーダ技術はこの様相を大いに変えてしまった（図2.)。アンテナ・送信機・受信機の区別は一応認められるものの，アクティブアンテナの場合のように，小形化した送受信機を内蔵した多数の素子でアンテナが構成されることもある。レーダ情報ディジタル処理の誕生は，ディジタイザとコンピュータとから成る信号処理装置という第5の箱をレーダにもたらし，更にディジタル素子の進歩により検波後の受信処理の多くをも包みこみ，進んで指示機もビデオだけでなくコンピュータの

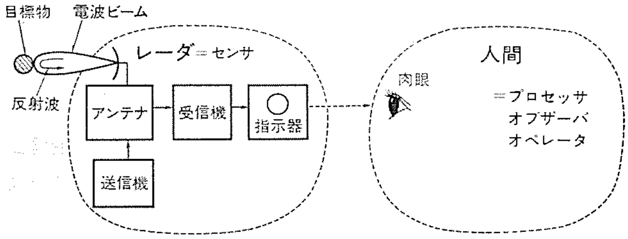


図 1. 従来のレーダ

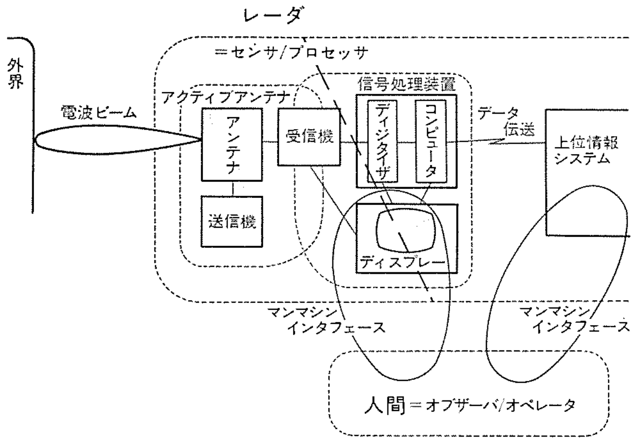


図 2. 情報システム化したレーダ

出力のキャラクタ表示をも行う複合ディスプレー能力を持つに至り，更に上位の情報システムとのデータ伝送による結合も含めて，もはや単なるセンサでなく情報システムの一環としてのセンサ／プロセッサと見られるようになった。そして指示機も今は肉眼だけでなくキーボードの操作などを伴って，オブザーバ／オペレータとしての人間とのマンマシンインタフェースの役を果たすのである。

このような情報システム化したレーダは，航空交通管制用及び一部の防衛用途に見られるものである。しかし，レーダの発展は他方では小形軽量化・高信頼化・コストエフェクティブ化の面でも進められ，我々の日常生活に密着した民生応用の拡大が求められている。

そのほかにもレーダ単体のシステム及びそれ以下のレベルで見るとき，次のような新しい技術を認めることができる。

（1） レーダシステムとして

3次元レーダ，電子走査フェーズドアレイレーダ，精密追尾レーダ，雷・降雨観測レーダ（観測の定量性の増大）など。

（2） レーダを構成する装置・サブシステムとして

フェーズドアレイアンテナ，ダブルカーブ複反射鏡アンテナ，超高速回転アンテナ，ツイストレフレクタアンテナ，MTI・パルス圧縮・パルスドップラ（特に高速フーリエ変換FFTを用いたディジタル処理において），固体化送信機，周波数自動可変（アジリティ）送信機，ビデオ／ディジタル複合表示，ディジタイザ（目標自動検出），コンピュータ（目標自動追尾）とそのソフトウェア(α-β, V-H，カルマン方式）など。

（3） 構成素子・デバイスのレベルで

Gunn, Impatt固体発振素子，低雑音トランジスタ，FFTに適したLSI，高速偏向CRT，カラーCRT，ブライトディスプレー用変換管，移相器・サーキュレータ等のフェライト素子，マイクロ波IC(MIC)など。

こうした技術の流れの中で，我々も過去二十数年にわたる努力により国産技術による初のパルス圧縮レーダ，レーダ情報処理（ディジタイザ，コンピュータとも），3次元レーダ，周波数アジリティレーダ（発振式，増幅式とも），アクティブフェーズドアレイレーダ，パルスドップラレーダ等を完成してきたと信じており，また民生応用の分野でも衝突防止装置，救命ビーコン，レーダスピードメータ，エアバッグセンサ(ABS)をはじめとする応用を進めてきた。

今回，レーダ特集として近来のレーダ技術をいくつかの見地から紹介するが，これらの実績を背景に今後いっそうの技術開発に心がけ，ますます多岐にわたる市場の要求にこたえるよう努力する所存である。

* 通信機製作所

最近の特殊レーダ技術とその応用

岩部　昭*・篠原英男*・江口紀英*・横内通憲*・尾形良征*

1. まえがき

最近のレーダ技術の進歩は著しく，単にマイクロ波パルスを送信して目標の平面的な位置を測定する単純なレーダから出発し，固定クラッタを消去して，移動目標だけを識別するMTI (Moving Target Indicator)，更に固定クラッタの消去性能の優れたパルスドプラレーダ，情報理論から最適信号検出方式と考えられるパルス圧縮レーダ，目標の高度も測定できる3次元レーダ，目標を追尾して位置情報を連続的に測定できる追尾レーダ，これらの機能を電子走査により実現するフェーズドアレイレーダ等が実用化され，今後ますます発展の一途をたどると考えられる。

当社では，これら技術の進歩に従って最新のレーダ技術の開発に専念し，各種の新製品を納入して来たので，実例を挙げながら最近の注目すべきレーダ技術について紹介する。

2. 3次元レーダ

従来のレーダは，多くは2次元的であって，対象目標の3座標の内いずれか2個（普通は距離と方位角）を測定するものであった。

3次元レーダは，これに第3の座標（普通は仰角又はこれから導びかれる高度）を加えて，不特定多数の目標に関してその3次元位置を連続して測定できるレーダとして定義される。

この3次元レーダは，各国で多数の方式が試みられており，主要な方式は次のとおりである。

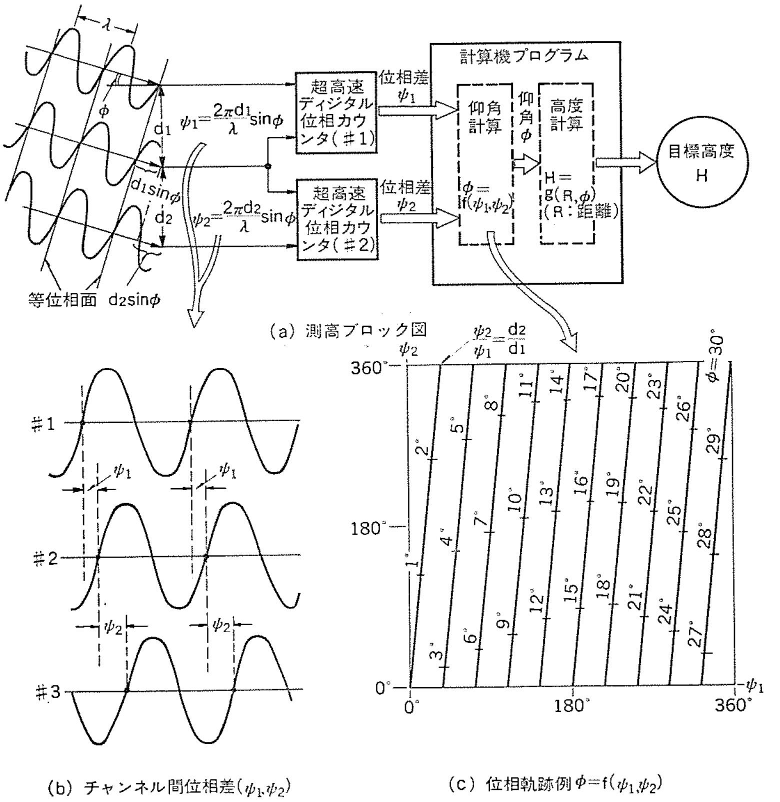
(1)　位相走査方式　　(仰角走査：単ビーム)
(2)　周波数走査方式　　(〃　：単／多ビーム)
(3)　位相・周波数走査方式　(〃　：多ビーム)
(4)　Defocus 方式　　(〃　：多ビーム無走査)
(5)　受信位相差方式　　(〃　：ファンビーム無走査)
(6)　2次元位相走査方式　(仰角・方位角走査：単ビーム)

ここに(1)～(5)の方位角走査は，機械的回転による。

これら各方式はそれぞれ相異なる特徴を有しており，実際のシステム設計にあたっては，要求性能・目的等に最も適した方式を選定すべきである。ただし，一般的に言えることは，(i)仰角面内無走査方式はデータレートが高く，特に遠距離レーダの場合，安定で優れたプログラム追尾が可能であり，(ii)受信位相差方式は受信位相差を用いているため，アンテナパターンの振幅情報を用いている他の方式に比して非常に高い高度精度が得られることである。また，一般的に言われている単ビームとファンビームの差については，放射エネルギの大部分が集中する電力半値ビーム幅でみれば通常2～3倍といったところで，探知上著しい差を生ずるものでないことは留意する必要がある。

2.1 受信位相差方式

当社の3次元レーダにおいては，高い高度精度・安定な追尾性能を実現するために，当社独自の“受信位相差方式”を開発し，十分要求性能を満足するものとして完成することができた。



(a) 測高ブロック図

(b) チャンネル間位相差(ψ_1,ψ_2)

(c) 位相軌跡例 $\phi=f(\psi_1,\psi_2)$

図 1. 受信位相差方式

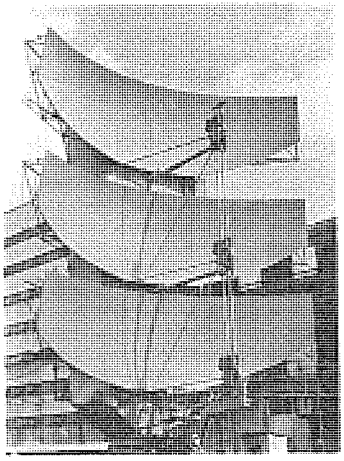


図 2. 3次元レーダアンテナ

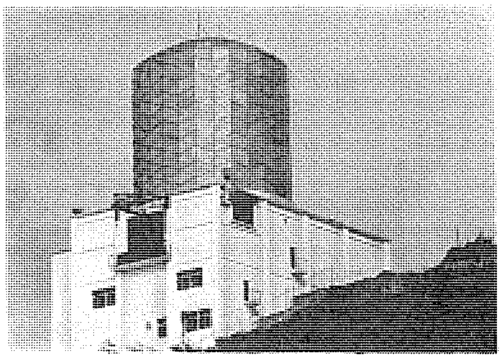


図 3. 3次元レーダサイト

* 通信機製作所

図 1. に，この方式の原理図を示す。

2. 2　応用例

当社は，この“受信位相差方式”を採用し，防衛庁の指導のもとに昭和37年に研究・試作開発に着手し，本邦初の3次元レーダを開発することに成功した。この成果にもとづき，昭和46年度に装備1号機をレーダサイトにすえ(据)付納入したことを皮切りに毎年1サイトずつ納入し，現在7号機を製作中である。

図 2. は，アンテナ部，図 3. は，サイト外観である。

3.　フェーズドアレイ レーダ

レーダと言えば回転するアンテナを連想するほど定着しているが，この概念を全く打破したフェーズドアレイ レーダはマイクロ波 ICを中心とするデバイスとコンピュータ技術の進歩に支えられ，画期的な進歩を遂げた。フェーズドアレイ レーダはアンテナ送信機，受信機等の能動素子を含むか否かによってアクティブ フェーズドアレイ レーダとパッシブ フェーズドアレイ レーダに分類される。

フェーズドアレイ レーダはビームを電子走査できるので下記の長所を有する。

(1)　多機能，多目的使用が可能となる。
(2)　データレートが向上できる。
(3)　空中線回転機構の廃止により信頼性が向上する。

更にアクティブ フェーズドアレイ レーダの場合は

(1)　送信電力が増大できる。
(2)　全固体化レーダの構成が可能となる。
(3)　抗担性が増大できる。

等の長所がある。このようなフェーズドアレイ レーダについては当社でも開発研究を進めて来たが，文献[1][2]に発表したとおり図 4. に示すモジュールで構成されるX-band アクティブ フェーズドアレイ レーダを昭和46年度に防衛庁技術研究本部第1研究所へ納入し，その後も継続して更に高性能化の開発研究を進めている。パッシブ フェーズドアレイ レーダについても，単一の送信機で発生した信号をアンテナ素子に分配する給電系，アンテナ素子に給電された信号の位相を制御する移相器の試作開発も完了し，これら素子と前記アクティブ フェーズドアレイ レーダのビーム走査技術を組合せた装置の試作も進めている。これらの実例については，別稿「レーダのハードウェア技術の現況」で紹介する。

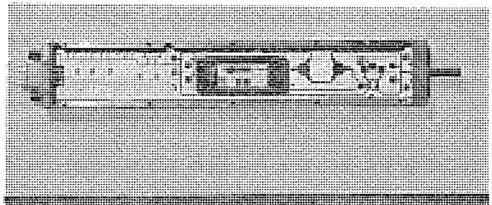


図 4. アクティブ空中線モジュール

4.　パルス圧縮レーダ

レーダ技術上重要な課題の一つと考えられる遠距離探知性能の向上のためには送信平均電力の増大が必要となるが，送信管の性能限界で定まる送信せん(尖)頭電力以上の探知性能を達成するためには，パルス幅を広げざるを得ない。この場合は距離分解能の劣化を招く結果となるが，このように相反する要求を両立させる方式として発明されたのがパルス圧縮レーダである。すなわち送信時には特殊な変調をかけた長パルスを送信し，受信時に適当な処理を行って短パルスを得る方式である。このような信号の送受信を行う方式は情報理論で言う整合フィルタの応用であり[3]，S/Nが最大で受信できる理想的な方式といえる。したがって従来の方式と同じ送信尖頭電力で距離分解能を劣化させることなく探知性能向上が実現でき，送信機の小形化，半導体化にも適しており，またECCM (Electronic Counter-Countermeasure) 性も優れている。この外前述の整合フィルタ受信により，海面クラッタ，気象クラッタ，チャフ等微少な多数の目標の集合と考えられる反射エコーに埋もれた目標の探知にも優れた方式と言える。以下代表的なパルス圧縮方式について述べる。

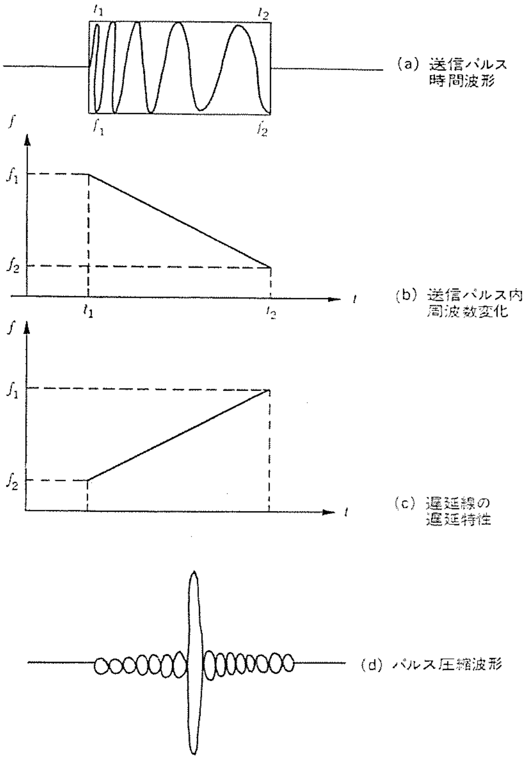


図 5. チャープパルス圧縮原理図

4. 1　直線周波数変調方式

送信信号の発生及び受信信号処理が遅延線で容易に行えるという特長から広く用いられている方式でチャープ方式とも呼ばれる。送信パルスの内部を図 5. (a)(b) に示すように直線状に周波数変調し受信時には同図(c)に示すような遅延時間対周波数特性を持つ遅延線を通過させることによって送信パルス内の各エネルギを1カ所に集中させる結果となりパルス圧縮が行われる。送信パルス幅をT，周波数偏移をΔfとするとパルス幅は$1/\Delta f$に圧縮され，パルス圧縮比は$T\cdot\Delta f$となるが，通常は図 5. (d)の圧縮波形から分かるとおりレンジサイドローブが発生するため，これを抑圧するためろ(沪)波器を用いて周波数スペクトラムに重みを掛けるので圧縮パルス幅は若干広くなる。前述の防衛庁技術研究本部第1研究所へ納入したアクティブ フェーズドアレイ レーダではこのチャープパルス圧縮方式を採用し，探知性能の向上を図った。

4. 2　階段状周波数変調方式

この方式は4. 1節の周波数変調を階段状に行う方式であるが，必ずしも周波数配列を直線状に選ぶ必要はなく任意に選ぶことができ，ECCM性の優れた方式である[4]。この方式ではN分割されたおのおのの短パルスをそれぞれの中心周波数を有する別個の沪波器で選別し，送信時のパルス発生時刻を補正するような遅延時間を与えることにより4. 1節の場合と同じく同一時刻にエネルギを集中させパ

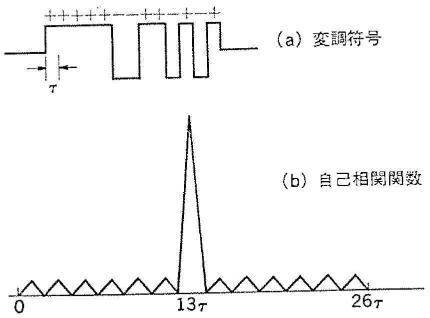


図 6. 13 ビットバーカ系列

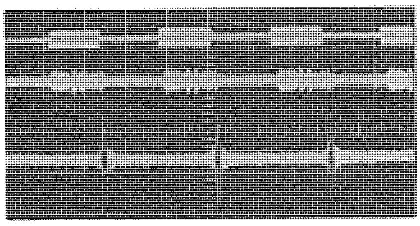


図 7. 位相変調方式

ルス圧縮を行う。前述の ECCM 性と別稿で述べるとおりディジタル化に適すという利点があり，今後更に応用されるようになると考えられる。

4.3 位相変調方式

この方式では送信パルスを N 分割しておのおののパルスの搬送波の位相を特殊な符号配列で変調し，受信側では分割されたパルス幅ずつ遅延させた N 個の信号に送信時の符号配列に整合のとれた位相変化を与え，合成することによって送信時に位相変調した特殊な符号配列の性質によりパルス圧縮が行われる。

この符号配列にはバーカ系列，M 系列，多相系列等が用いられるが，変復調の容易さ，レンジサイドローブ抑圧を考慮するとバーカ系列が適している。図 6. (a)は 13 ビットバーカ系列で符号の＋，－に対し送信パルスの位相を 0，180° 位相に偏移させる 2 相位相変調を行う。このような位相変調を加えた信号は同図(b)に示すように，$N\tau$ だけ時間がずれた位置で自己相関関数がピークを示す性質があり，前述の遅延回路によりパルス圧縮が行われる。

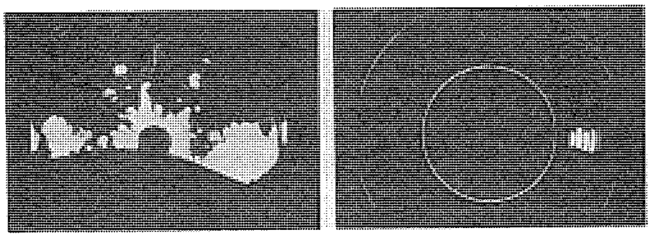
この方式は前述の周波数変調を行う方式と比べて，ドプラ偏移の影響を受けないという利点があり，当社の人工衛星とう(搭)載電離層観測用レーダの実験装置[5]にはこの方式を採用し，郵政省電波研究所へ納入した。この装置の圧縮前，圧縮後の波形を図 7. (a)，(c) に示す。

5. パルスドプラ レーダ

最近，航空機搭載用レーダ，低空監視レーダ等強力な固定クラッタを消去するシステムが要求されるようになり，各種の方式の開発が進められている。従来この種の装置としては MTI，パルスドプラ等があるが，後者のほうが消去性能が優れており主に用いられている。

MTI とパルスドプラはいずれも目標からのドプラ周波数偏移信号を選択受信する方式で両者の区別は必ずしも明確ではないが，繰り返し周波数を高くして，消去性能を向上させ，高速度まで測定できるようにした方式がパルスドプラと考えられる[6]。最近，当社で高性能の固定目標消去機能を有するパルスドプラレーダを開発したので，この実例に基づいて以下に技術紹介を行う。

従来の MTI では増幅式送信機を用いた場合でも消去比が 35～40 dB 程度しか得られなかったが，パルスドプラを採用し 60 dB 以上の固定目標消去比が得られた。また実際に目標を探知する場合に静的な消去比でなく，固定目標信号に埋もれた移動目標に対しての探知性能を動的に規定するサブクラッタビジビリティも 60 dB 以上の値が得られた。このような画期的な性能の装置は下記の回路方式の採用によって実現できた。



(a) 生ビデオ　(b) 処理ビデオ(移動目標のみ表示)

図 8. ディジタル パルスドプラ

(1) パルスドプラの採用

消去比の劣化原因の一つとして，空中線ビームが目標を照射する時間内に，受信するパルス数が有限であるため，固定目標が完全に静止しており送受信機の周波数変動，位相変動が零であっても固定目標からの受信信号の周波数スペクトラムに広がりを持つようになる。このためパルスドプラを採用し PRF (Pulse-Repetition Frequency) を高くして受信パルスヒット数を増やして，性能向上を図った。

(2) 低リプル送信機の採用

送信機のリプルは送信信号を位相変調するため，消去比劣化の原因となる。送信機の高圧電源は DC をいったん PRF と同期した交流に周波数変換し，昇圧して高圧電源を得る方式を採用し，リプルが発生しても消去比が劣化しないようにした。

(3) シャープカットオフ特性のディジタルフィルタの採用

従来のアナログ式フィルタでは減衰傾度が十分とれなかったが，ディジタルフィルタを用いることにより理論通りの周波数特性のフィルタが容易に得られるようになり，最近の超小形化された LSI を用いて，減衰傾度 50 dB/oct，減衰量 66 dB 以上の減衰特性が得られた。

(4) 広ダイナミックレンジ受信機の採用

強力な固定目標の中に埋もれた微弱な移動目標を受信する場合，受信機のダイナミックレンジが十分なければ，固定目標が飽和すると移動目標が減衰し，固定目標とともに移動目標も消去される。

通常，受信機のダイナミックレンジは少なくともサブクラッタビジビリティと同じ値が必要とされており，広ダイナミックレンジの A/D 変換器を用いたディジタル受信機により 60 dB 以上のダイナミックレンジを得た。

上記により強力な固定目標を除去し，雑音もスライス回路で除去して，移動目標のみを表示させるようにした結果，鮮明な画像が得られ，オペレータによる誤認の軽減も可能となった。図 8. はこの装置で移動目標を探知した PPI(Plan Position Indicator) スコープの画像である。

6. 周波数アジリティレーダ

パルス繰り返し周期ごとに周波数を変化させて送受信を行う方式で，この周波数変化が敏しょう(agility)であるという意味から周波数アジリティレーダと呼ばれる。この方式の特長は，下記のとおりである。

(1) 妨害波に強い。

(2) 周波数ダイバーシティ効果による探知性能の向上。

(3) 海面クラッタが減少する。

(4) 追尾レーダでは追尾誤差が減少する。

妨害波に強いという性質から最近世界的に軍用レーダに広く用いら

れるようになった。この場合は周波数の変化幅はできる限り広くそしてランダムに変化させることが好ましい。(2)～(4)の効果を得るためにはパルス幅の逆数以上，つまり受信信号の周波数スペクトラムに共通な部分がないように周波数を変化させればよい。(2)，(3)の特長から水上レーダにも適しており，海面クラッタに埋もれた微少な目標に対する探知性能が優れている。この効果は空中線の一走査内の受信パルス相互間の相関がなくなり受信信号の振幅の変動 (fluctuation) が少なくなるために生ずるもので，探知確率 90 %の場合，探知距離が約 1.5 倍[7]に伸び，海面反射は 10～20 dB 抑圧される。(4)も(2)，(3)と同じく受信信号の変動が少なくなるために生ずる効果で誤差が標準偏差で 1/4～1/2[7] に改善されている。当社では国産初の周波数アジリティレーダを開発，製品化したが，この実例に従って以下技術紹介を行う。

周波数アジリティレーダでは送信周波数が敏速に変化するため，受信機局部発振器の周波数追尾が問題となる。レーダの送信機はマグネトロン式送信機と増幅式送信機とに大別されるが，後者については通常送信信号発生用の局発信号を受信用として共用するので問題はない。しかしながら，マグネトロン式送信機ではマイクロ波で短パルスの自励発振を起こして送信信号とするためパルス幅に相当する時間内で送信周波数に局部発振周波数を同調させなければならない。また送信周波数の変化についても増幅式送信機の場合は特に技術的な問題はない。したがってここではマグネトロン式送信機の場合についてだけ周波数アジリティ信号の発生方法と受信機の同調機構について述べる。

(1)　周波数アジリティ信号の発生

マグネトロンの送信周波数は発振空胴の共振周波数によって定まるのでこの共振周波数を管球内部に設けられたロータリチューナ，チューニングプランジャ，チューニングピン等により機械的に共振周波数を変化させる。このようなチューナ機構はモータ，ボイスコイル等により駆動されるが，本来往復運動よりも回転運動のほうが高速であり，また発振空胴の構造上ロータリチューナ 1 回転の間に周波数は複数回上限，下限の間を変化するのでロータリチューナが最も周波数変化速度を大きくとれる。ECCM 性を向上するには，周波数変化速度は大きいほうが好ましいが現在国産されているロータリチューナを用いたマグネトロンは数 ms で下限周波数から上限周波数まで変化でき，ほぼ所期性能が得られている。

(2)　受信機同調回路

従来の固定周波数レーダに用いられている受信機の AFC 回路は応答速度が数 ms～数十 ms であり，数 μs のパルス幅の時間内での周波数追尾は不可能である。このため周波数追尾を閉ループの AFC 回路だけに頼らず，ロータリチューナの回転角度から概略の周波数追尾を行った後，精密周波数追尾を高速応答の AFC 回路で行う方法がある。以上，主としてマグネトロンの周波数アジリティレーダを説明したが，ECCM 性等を考慮すれば，パルス圧縮等併用することが好ましく，今後はむしろ増幅式の周波数アジリティレーダの応用がますます広がって行くものと考えられる。

7.　高精度追尾レーダ

アンテナを常に目標方向に自動的に指向させながら，目標を追跡し目標の方位角，仰角，距離を連続的に計測する追尾レーダは，近年の宇宙開発の目ざましい発展に伴って人工衛星打上げロケットの追跡，誘導用としてその性能も一段と高い高精度なものが要求され，これにこたえるため性能の向上が図られている。当社ではこの要求性能を満たす同種のCバンドの追尾レーダを開発したので，ここに高精度追尾レーダの角度追尾系と距離追尾系の高精度化の要点とその性能の概略を報告する。

7.1　角度追尾系の高精度化の要点

角度追尾方式には(1)コニカルスキャン方式，(2)振幅／位相比較モノパルス方式，(3)(2)に含まれるが高次モードを用いる方式がある。コニカルスキャン方式は到来エコーの振幅変動による角度誤差，熱雑音による角度誤差の点から，また数個のパルスから角度情報を得なければならないため追尾サーボ帯域が制限される点等によりモノパルス方式より劣る。また高次モードの方式では直径 4～5 m のアンテナ開口をもつアンテナ給電系として直線，円の両偏波追尾を可能とするには系が複雑になるためモノパルスのほうが優れている。ここでは表 1. の性能諸元を持つ追尾レーダの角度追尾系を構成する各系の高精度化について要点を述べる。

7.1.1　アンテナ放射給電系

振幅比較モノパルス放射給電系に起因する角度追尾誤差には表 2. の角度誤差配分表に列記されているとおりであるが，これらを少なくするには角度検出感度を高くすること，各チャンネルの交差偏波の発生を少なくする構成とし，だ(楕)円偏波率のばらつきを小さくすること，放射パターンの広角度サイドローブレベルを低くすること，ヌルデプスを深くすることなどが肝要である。

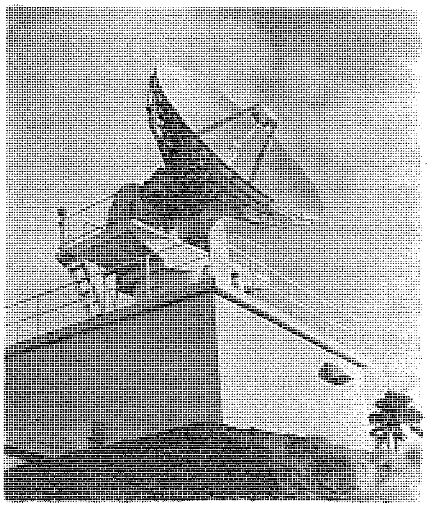


図 9.　高精度追尾レーダアンテナ

7.1.2　追尾受信系

和と差（水平及び垂直方向の誤差チャンネル）の 3 チャンネルの低雑音増幅後，スーパヘテロダイン受信を行い位相同期検波して角度誤差電圧を発生する追尾受信系に起因する誤差は表 2. のとおりである。アンテナ放射系のヌルデプスが有限であるこ

表 1.　高精度追尾レーダ主要性能諸元

システム総合性能諸元	
項目	性能
(1) 追尾方式	振幅比較モノパルス方式
(2) 空中線	4ホーン給電カセグレン空中線　直径 5.4 m，AZ ELマウント方式
(3) 周波数	Cバンド
(4) ビーム幅	0.67 度 (θ 1/2)
(5) 空中線利得	46 dB
(6) 送信電力	1 MW Peak 1 kW ave.
(7) パルス幅	0.5, s
(8) パルス繰返し周波数	250，$267\frac{6}{7}$ pps
(9) 総合雑音指数	3.1 dB 以下
(10) 受信帯域幅	1.5 MHz
(11) 最大追尾距離	3,000 km
(12) 追尾精度	角度：0.05 mil rms 以下 距離：3 m rms 以下
(13) 最大追尾速度，加速度	角度：10°/s，20°/s^2 距離：20 km/s 10 km/s^2
(14) 追尾可能受信レベル	−104 dBm

表 2. 角度誤差配分の一例　(単位 mil=0.0573 deg)

誤差の分類	水平軸	垂直軸	備考
1. アンテナ放射給電系による誤差			
(1) RF 周波数変化によるもの	neg	0.01	
(2) 受信偏波面変動によるもの	0.01	0.01	
2. 追尾受信系による誤差			
(1) 位相ずれによるもの	neg	neg	
(2) 角度誤差検波器不平衡による誤差	0.01	0.02	
(3) 熱雑音誤差	0.02	0.02	サーボバンドナロー
3. 角度追尾サーボ系による誤差			
(1) アンテナ不平衡誤差	neg	neg	
(2) アンテナ角度ドリフト	0.01	0.02	
(3) アンテナ角度不感域	neg	neg	
(4) 風圧, 風のガストによる誤差	0.01	0.01	(計算値)平均風速15m/secにて
4. アンテナ機械系による誤差			
(1) 方位軸垂直度誤差	—	0.01	
(2) 両軸直交度	0.01	—	
(3) 弾性変形誤差	neg	0.01	
(4) ベアリングガタによる誤差	0.02	0.01	
(5) 角度検出系による誤差	neg	0.01	
(6) 太陽熱による変形誤差	0.02	0.02	
5. 設定精度による誤差			
(1) 電波軸と機械軸の設定誤差	0.01	0.01	
(2) 真北の設定誤差	0.02	—	
第1項～第5項の計	0.05	0.05	

とと, 追尾受信系の和と差の チャンネル に位相差が存在することによって生ずる位相差による ヌルシフト は, 各 チャンネル とも RF 伝送路長を等しくし, かつ位相特性をそろえ, AGC 電圧等により帯域特性が変化しないようにして各 チャンネル 間の位相差を少なくすることによってこれを小さくすることができる。角度誤差検波器不平衡誤差は, 和差信号に PRF 変調方式を採ることにより追尾 スレッショルドレベル を上げると同時にこの誤差を低減させ得る。 チャンネル 間結合による誤差は主として局部発振回路を通して行われるので, この部分に アイソレータ をそう(挿)入することが有効である。

7.1.3 角度追尾サーボ系

角度追尾 サーボ 系の誤差は表 2. に示すとおりであるが, バックラッシュ による サーボ 誤差を除いてこれらの誤差を少なくするには, サーボ 帯域を広くすることが必要で, このためには アンテナ 機械共振周波数を上げ, 駆動 モータ の慣性能率を下げ, かつ駆動電力増幅器の時定数を小さくし, 非線形性を少なくすることである。 バックラッシュ によるものは各軸 (水平及び垂直) に 2 個の モータ によって見かけ上なくする駆動方式を採る必要がある。 アンテナ 機械共振周波数を 8 Hz 以上とし, トランジスタチョッパ 形の駆動電力増幅器を開発し, サーボループ を多重帰還 ループ とし, かつ速度誤差定数≅0 加速度誤差定数=0.03 sec^2 の 2 形 サーボ を形成する系を採用したが, 速度比 1/10,000 という極めて高性能な サーボ 系となった。

7.1.4 アンテナ機械系

アンテナ 機械系に起因する誤差は角度変換誤差が主で, その主要なものは表 2. のとおりである。これらについては前述の高性能 サーボ 系の実現のために機械共振周波数を高めること, かつ風圧外乱による誤差, 弾性変形による誤差を少なくすることから各部の剛性を十分に高める必要がある。更に各部とも精密加工は言うまでもないが, 直交度については ベアリング の選定が特に重要であり, かつ組立時には細心の注意が必要とされる。

太陽熱による変形誤差については アンテナ 構造部を防熱 カバー で覆い, 更に白色 ペイント を塗布し日光直射による各部の温度差を少なくすることによって誤差を少なくすることができる。角度検出器の取付けには回転軸と直結する方式がよいがその カップラ の選定, 取付けの アラインメント 等には十分な注意が必要となる角度検出器の選定にあたっては, 回転 マサツトルク, 線形性, リピータビリティ 等を考慮しなければならない。以上の角度変換誤差の チェック あるいは機械軸と電波軸の整合のため アンテナ を仰角まわりに反転を可能にする構造とすることが肝要である。

外に レーダ 原点設定精度, 機械軸, 電波軸との合わせ込み精度等があるが数多くの データ を積み重ねて統計的処理を行い角度検出精度で決まる精度で設定あるいは合わせ込みを行っている。

表 3. 距離誤差配分の一例

誤差の分類	誤差	備考
レーダ系による誤差	m rms	
(1) 送信機ジッターによる誤差	neg	
(2) オフセット設定誤差	0.5	
(3) 距離検出部の零点移動誤差	neg	
(4) 原発振周波数による誤差	1.1	
(5) 受信装置遅延の変動誤差	2.1	
(6) 熱雑音誤差	0.4	S/N=20 dB サーボバンド NARROW
(7) 距離計数部ドリフト	0.8	
	2.6	

$\sqrt{(定常分)^2+(雑音分)^2}=2.6$ m rms

7.2 距離追尾系高精度化の要点

ノンコヒーレント な パルスレーダ での距離追尾方式には スプリットゲート 方式と リーディングエッジ 方式とが代表的である。両者に大きな差異はないが ロケット 追尾の目的からは入力雑音の フィルタ 効果を持つ前者の方式が採用されている。距離追尾 サーボループ 内の積分器として モータ を用いた アナログメカニカル なものと ディジタルカウンタ を用いた全電子式とがある。 データ が瞬時に出力されることと, 摩擦 トルク 等の機械的性能に左右されない全電子式のほうが高精度化には適している。

連続測距方式としては PRF 切換方式 (250 pps/267$\frac{6}{7}$pps) が普通である。通信機は パルサ として大電力 ハードチューブ を用い ジッター を少なくする必要があり, 測距装置内の距離弁別部は雑音に対し バランス をよくし, 数 ns で動作する ダイオードスイッチ を用いる必要がある。

原振周波数の ドリフト によって距離誤差が発生するため高安定 (10^{-8}/day) な水晶発振器を用い, かつ最小分解能 (約 1.14 m) を得るための遅延回路には高速で動作し, 温度変動の少ない シフトレジスタ が適している。誤差配分と実績 データ を表 3. に示す。

7.3 追尾誤差の計算機による補正

角度変換誤差のような直流的 バイアス 誤差, あるいは受信系の遅延による距離追尾誤差等は計算機によって補正することが可能である。また, 7.1.3 項に記したように サーボ 帯域を広くすることは熱雑音による誤差を増すことになるので, 追尾 データ を計算機にて平滑化を行うことも高精度化の有力な一手段である。

7.4 当社の実施例

これら高精度追尾 レーダ は東京大学宇宙航空技術研究所納め精測 レーダ, 宇宙開発事業団納め誘導 レーダ, 宇宙ケ丘 レーダ, 父島精測 レーダ があり, いずれも ロケット の追跡あるいは誘導に所期の性能を発揮している。

8. 雷観測レーダ

電力事業及び航空関係の分野では, 雷の予知は重要な課題とされており, 各種の研究開発が進められているが, 東京電力(株)が昭和42

年度から雷雲の自動探知に関する実用化研究に着手し，昭和44年度には雷雲予知システムの実用化に成功した。三菱電機(株)は開始時より共同研究として参加し，装置の製作を担当[8][9]したのでこのシステムについて紹介する。

従来，気象レーダでも雷雨前線の観測などが行われて来たが，台風観測，雨量観測が主であり，雷雲だけを観測して予知するシステムはこれが初めてである。

レーダで気象観測を行った場合，雷雲は他の雲と比べて発生高度が高く，反射エコーの強度も強いので，ある高度以上で，あるレベル以上の雲は雷雲と判定できる。具体的には6,000 m と 9,000 m の高度で−70 dBm 以上のエコーを観測し，高度の高い雲ほど落雷の可能性が大きいのでそれぞれ弱雷，強雷として予報を出す。このような判定基準は実用化研究時の実験結果により決定され十分予測の機能を果たすことが立証されている。

この装置のシステム構成は図 10.，主要性能諸元は表 4. に示すとおりで，基本的には C-band の気象レーダに定高度表示機能及び前述の判定を行うための信号処理機能を付加したもので，この外明るい場所で観測ができるよう高輝度変換装置，発雷情報を音声及びランプ表示信号で伝送するための情報処理装置，録音制御装置で構成されており，発雷情報が発変電所，制御所に設置された300台以上の表示盤に時々刻々伝送される全自動化システムである。この装置は図 11. に示すとおり現在東京電力(株)本社ビルに設置され順調にか(稼)動中で関東一円の雷事故防止に威力を発揮している。

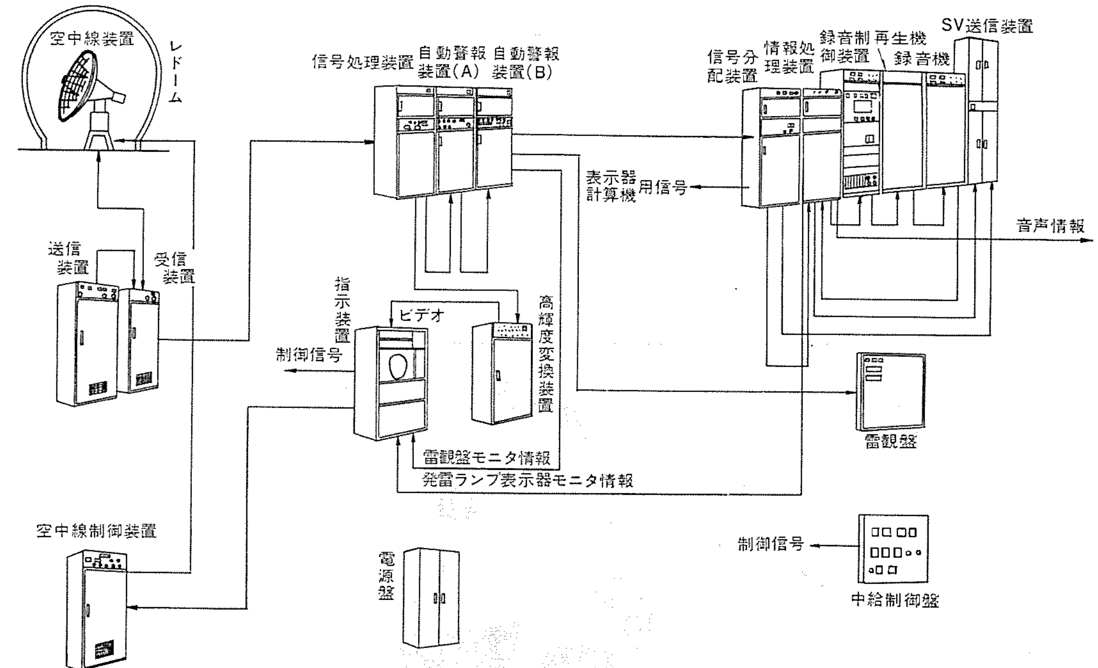


図 10. 雷観測レーダシステム構成

表 4. 主要性能諸元

機器名	性能
空中線装置	
反射鏡直径	3 mφ パラボラ形
利得	40 dB 以上
ビーム幅	1.7° 以下
回転速度	10 rpm
送信装置	
送信周波数	5,685 MHz
送信尖頭電力	175 kW
パルス幅	2 μs
パルス繰返し数	250 pps
受信装置	
最小受信電力	−105 dBm 以下
雑音指数	9 dB 以下
指示装置	
表示形式	高輝度ビデオによる PPI 表示
CRT 直径	16インチ丸形
信号処理装置	
機能	ISO 及び CAPPI 処理
ISO 計算範囲	6〜200 km
CAPPI による観測高度及び設定	低高度及び高々度とも 3〜15 km
自動警報装置	
計算範囲	1〜200 km
距離量子化単位	1 km

図 11. 雷観測レーダ外観

9. レーダ情報処理

電子計算機とディジタル技術の進歩はレーダを「空中線，送信機，受信機，指示機で構成するシステム」から「空中線−送信機−受信機から成る入力装置と，ビデオも見ることのできる計算機入出力装置である指示器とを主要な周辺装置とする情報処理システム」に変えてしまった。レーダシステムをこのような目で見るとき，他の情報処理システムとの比較の上でレーダを扱っていることを特徴づける重要な技術は第1にレーダ・ビデオからの目標情報の自動検出であり，第2は検出された情報による目標の自動追尾であると考えられる。ここではこれらについて極めて簡単に概要を述べる。

9.1 目標情報の自動検出

目標情報の自動検出は時々刻々到来するレーダ・ビデオを量子化し，統計的処理であるスイープ間相関により，雑音の除去，クラッタの除去，及び孤立目標の検出を行う。これらの処理の特徴は，レーダパルス幅程度の短時間内で，検出，算術演算，判定などの演算を行わざるを得ないところにあり，通常はレーダ目標検出装置又はディジタイザと呼ばれる専用のハードウェアによって処理が実行される。

目標の自動検出の際はレーダエコーの次の性質が利用される。

表 5. 製品例 1　航空路管制用レーダ目標検出装置の主要性能

入　力	ARSR ビデオ (NORMAL/MTI), SSR ビデオ, 方位信号, トリガ
出　力	目標情報 (ARSR/SSR), SSR モード／コード, 試験目標情報 ブランク エリヤ メッセージ, ステイタスメッセージ
分 解 能	(距離) 1/4 nm (ARSR/SSR 共通) (方位) ARSR 1.3°, SSR 3.0°
精　度	(距離) 1/8 nm (ARSR/SSR 共通) (方位) 0.25°
最大探知距離	200 nm
データ伝送速度	4,800 bps

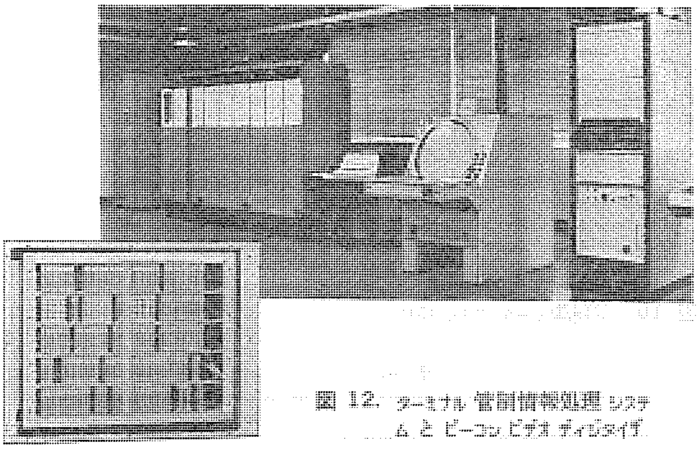


図 12. ターミナル管制情報処理システムとビーコンビデオディジタイザ

表 6. 製品例 2　ターミナル管制情報処理システムの主要機能

1. 航空機自動追尾と航空状況表示 2. 管制席入力機能 3. 飛行情報処理	1. 航空機シンボルとタグ表示 2. リスト表示 (出発予定時刻など) 3. システム データ表示 (時刻, 大気圧設定値など)

(1)　雑音は相関性がなくランダムである。

(2)　航空機目標は方位方向にのみアンテナビーム幅程度連なる。

(3)　陸地, 雨などの反射は広い範囲にわたって連なる。

目標情報の自動検出を行う装置はレーダ特性の影響を大きく受け, レーダが1次レーダの場合, 2次レーダの場合, 及び1次2次同時のコモンディジタイザの場合で相当異なった様相を呈する。例えば雑音の少ない2次レーダだけの場合はビデオの量子化だけをハードウェアで行い, スイープ間相関を追尾計算機で行っている当社製品例もある。いずれの場合も基本的原理は前述のとおりである。なお細部については経験の積重ねによる事項も多く, 実例は文献(10)を参照されたい。

9. 2　目標の自動追尾

各スキャンごとに得られる目標の位置諸元をもとに, 座標系変換, スキャン間相関, 平滑及び予測を行うのが, 目標の自動追尾である。これらの処理には自動検出に見られるほどの強いリアルタイム性は要求されないため, 通常はん(汎)用のディジタル計算機が利用される。自動検出された目標情報は過去のスキャンにおける情報により確立している航跡の予測値と照合がなされる。この処理をスキャン間相関と呼ぶ。スキャン間相関においては通常, 航跡の予測位置のまわりに追尾ゲートを作成し, このゲート内に入る入力を航跡に対応させる。ゲートの大きさは追尾の状況により, また旋回を考慮することにより, 通常は多段階設けられ制御される。航跡予測値と入力情報間に完全な1：1の対応がとれた場合は相関がとれたとされ, 新しい入力情報を用いて位置, 速度データの平滑と次スキャンの予測位置が求められる。一例は文献を参照されたい(11)。

平滑及び予測には通常は1次の $\alpha\beta$ トラッカが多用される。平滑パラメータ $\alpha\beta$ の大きさは通常追尾情況により選択される。特殊な要求, 例えば旋回性能が特に重視されるような場合には2次系のトラッカ, 入力情報にばらつきが特に大きいような場合は蓄積形のトラッカの使用が考えられることもある。

9. 3　応用例

表 5. に目標情報の自動検出を行う製品の代表的一例として, 航空路管制用レーダ目標検出装置の主要性能を示す。これは前述のコモンディジタイザの一例である。

図 12. には目標の自動追尾を行う製品の代表的一例としてターミナル管制情報処理システムの外観を目標情報の自動検出を行う構成品であるビーコン・ビデオ・ディジタイザの外観と併せて示し, 表 6. にシステムの主要機能を示す。

当社はレーダの目標情報の自動検出及び目標の自動追尾に関しては約15年の経験を有し, 代表的製品としては上記の外, 防衛用3次元レーダ, 艦船用目標指示装置, 空港用の SSR 識別表示システムなどがある。

10. む す び

以上, 最近の注目すべきレーダ技術について概要を紹介したが, 紙面の都合上, また防衛関係の製品もあるため十分な技術紹介ができなかったことをお断りしたい。

冒頭に述べたようにレーダ技術の進歩は日進月歩であり, 今後も新技術が急テンポで開発されると思われるが, これらの技術開発とその応用に専心努力する所存である。

最後にここに紹介した各技術及び製品の開発, 製作に際してご指導とご協力を賜った関係各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

(1)　山岸ほか：信学誌宇宙航行エレクトロニクス研資, SANE 72-12 (昭 47-9)

(2)　山岸ほか：信学誌マイクロ波研資, MW-72-101 (昭 47-11)

(3)　M. Bernfeld, et al. : Matched Filtering, Pulse Compression and Waveform Design, the Microwave Journal, p. 59, Oct. (1964)

(4)　近藤ほか：レーダ方式, 特公昭 40-662

(5)　相京ほか：信学誌宇宙航行エレクトロニクス研資, SANE 74-17 (昭 49-11)

(6)　M. I. Skolnik : Radar Handbook, Mcgraw-Hill, p. 19-2 (1970)

(7)　B. G. Gustafson et al. : System Properties of Jumping Frequency Radars, Phillips Telecomm, Rev 25, 70～76 (1964)

(8)　西本ほか：三菱電機技報, 45, No. 2, p. 199 (昭 46)

(9)　西本ほか：三菱電機技報, 47, No. 7, p. 778 (昭 48)

(10)　鎌田ほか：三菱電機技報, 51, No. 4, p. 282 (昭 52)

(11)　苅田ほか：信学誌宇宙航行エレクトロニクス研資, SANE 76-8 (昭 51)

レーダのハードウェア技術の現況

水沢丕雄*・中司浩生**・田中安敏**・増野芳樹**・徳丸芳孝**

1. まえがき

レーダ技術は，その ソフトウェア と ハードウェア の発展が，互いに他を刺激しながら車の両輪となって進歩してきたが，特に レーダ 用途の拡大，要求性能の向上に伴い，ハードウェア への要求も多様化・高度化してきた。例えば，小出力の小形 レーダ に限ってみても，半導体及び関連技術の目覚ましい進歩に支えられ，民生用の各種 マイクロ 波 センサから，人工衛星とう(搭)載用の特殊な レーダ に至るまで，広く我々の生活と係り合いをもちながら多様化し，システム の高度化が進んできたが，同時にこれが ハードウェア 技術の進歩を促してきた。

ここでは，レーダ 技術を主として ハードウェア の面からながめ，その現況の認識を通じて，将来の方向を見定める手掛かりとなるよう，主な構成品について実例を挙げながら技術の紹介をする。

2. レーダアンテナ

アンテナ は目標に対して電波を送信したり，また目標からの電波を受信したりする役目を持ち，探知距離や分解能など レーダシステム の基本性能を決める重要な サブシステム である。レーダ にはその システム の目的に応じて多くの アンテナ 方式が採用されており，レーダシステム の用途の拡大及びその技術の進展と相まって アンテナ 技術もその著しい性能・機能の向上を遂げている。アンテナ の性能向上としては探知距離に関係する高利得化，クラッタ 性能の向上を図った低 サイドローブ 化及び偏波特性を示す ICR (Integrated Cancellation Ratio) 特性の向上などがあり，一方，機能的な面では有効な カバリッジ を得る ビーム 成形技術(1)(2)，フェーズドアレイ アンテナ のような電子的走査技術(2)，多くの目標を同時に捕そくしたり捜索したりできる マルチビーム 技術(1)などの進展がある。更に，妨害波除去をねらった アダプティブ アンテナ，アンテナ に情報処理機能を持たせた シグナルプロセッシング アンテナ などの研究開発も進められている。レーダ によく用いられる アンテナ 形式を大別すると，反射鏡 アンテナ と アレイアンテナ に分けられる。

2.1 反射鏡アンテナ

反射鏡 アンテナ は比較的簡単な構成で高利得を得たり，成形 ビーム，マルチビーム，ビーム 走査などの機能を持たすことができ，広帯域性のある経済性の高い アンテナ である。特に，マイクロ 波帯における 10～30 m 級の大形 アンテナ では経済性の点からも反射鏡 アンテナ によらなければならない。また，飛しょう体や航空機などに用いられる小形の反射鏡 アンテナ の中には副反射鏡によって生じる影を避けるため，副反射鏡では偏波面によって反射と透過の双方の働きを持たせ，主反射鏡に偏波面の回転の働きを持たせたいわゆる ツイスト リフレクタ を用いたものをよく用いられている。

図 1. は最近の進歩の一例であって，コセカント 2 乗形円偏波 ビーム をもつ ダブルカーブ 複反射鏡 アンテナ(4)である。この アンテナ は，ビーム 内のあらゆる方向でだ円偏波率が小さい円偏波反射を得るために，2 枚の ダブルカーブ 反射鏡を用い，その 1 次放射器として偏波特性の良好な複 モード 円すい ホーン を用いるものである。この形式の アンテナ は空港面探知 レーダ 用として用いられており，ICR 22 dB を得ている。

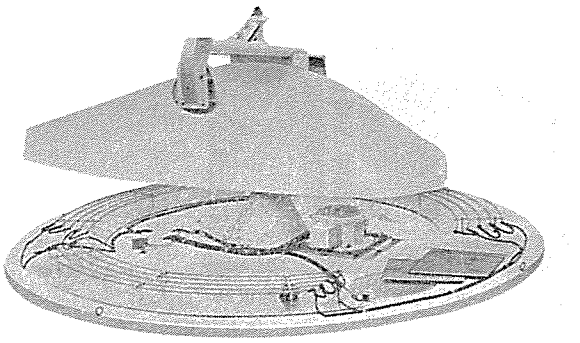


図 1. カナダ 国納め空港面探知 レーダ 用 ダブルカーブ 複反射鏡 アンテナ

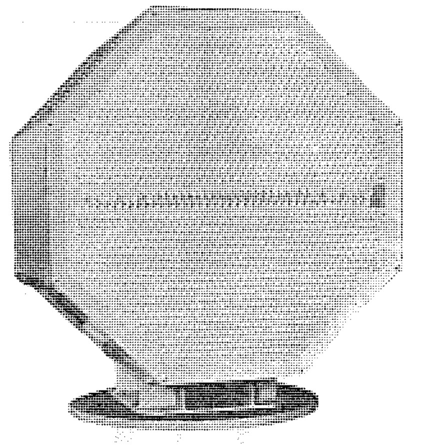


図 2. X バンド アクティブ フェーズドアレイ アンテナ

2.2 アレイアンテナ

アレイアンテナ は同一形状の放射素子を線状や平面あるいは任意の形状をした面に配列したもので，その放射素子の励振条件を選定することにより種々の放射特性を得ることができる。

放射素子として導波管に切った スロット を用いたいわゆる導波管 スロットアレイ アンテナ は，低 サイドローブ などの設計が容易であり，また，平面状の コンパクト な アレイアンテナ を構成できるので，レーダ 用としても有用である。

一方，各放射素子の励振位相を電子的に制御して ビーム を走査するものとして フェーズドアレイ アンテナ がある。フェーズドアレイ アンテナ は高速で ビーム 走査できるのが特長であり，これによって レーダ の多機能性や多目標処理が可能となる。フェーズドアレイ アンテナ の方式には素子ごとに送信機をもつ アクティブ 方式と 1 個の大電力の送信機の電力を各素子に分配する パッシブ 方式とがある。これら両方の方式はそれぞれ特長をもつが，特に アクティブ 方式は素子数を増加することによって出力を増大させうること，送信機を固体化できることなど将来の フェーズドアレイ アンテナの主流になるものと考えられている。図 2. はこの アクティブアレイ アンテナ の試作品である(5)。また，素子数の多い場合の給電系は導波管で構成した場合複雑になる。このため空間給電形などが用いられている。しかし，その空間給電では奥行が大きく航

* 本社(工博)　** 通信機製作所

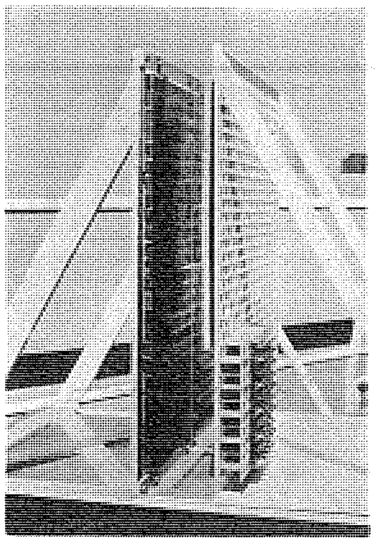


図 3. フェーズドアレイ用平面薄形給電系

表 1. 各送信管の概要

性能項目 ＼ 管種	発振管	増幅管			
	マグネトロン	進行波管	クライストロン	CFA	極管
1. 使用周波数	L〜K バンド	同 左	同 左	同 左	VHF〜L バンド
2. 帯域	機械同調により広帯域をカバーできる	広帯域 (10〜15%)	狭帯域 (数%以下)	広帯域 (10〜15%)	使用キャビティによるが10%まで
3. 尖頭送信電力	最大 数MW	最大 数100kW	最大 30MW 位	最大 数MW	同 左
4. 位相変調感度 (小さい方が望ましい)	—	20° 前後 (1% $\Delta E/E$ に対し)	10° 前後 (1% $\Delta E/E$ に対し)	0.4〜1° (1% $\Delta I/I$ に対し)	1° 以下 (1% $\Delta I/I$ に対し)
5. 周波数変調感度 (同軸マグネトロン)	$\frac{\Delta f}{f} \doteqdot \left(\begin{array}{r}0.0002\\ \sim 0.0005\end{array}\right)\frac{\Delta I}{I}$	—	—	—	—
6. 動作電圧	低い (1MWで40kV位)	高い (200kWで50kV位)	高い (1MWで90kV位)	低い (1MWで40kV位)	低い (1MWで40kV位)
7. 利得	—	30〜70dB	30〜70dB	6〜20dB	10〜20dB
8. 能率	45%前後	30%前後	同 左	45%前後	同 左
9. 寸法・重量	小	大	大	小	小
特徴及び用途	○送信機は最も小形，軽量，経済的に構成できる ○安定度の点で増幅管に劣る	○終段増幅管，励振増幅管としてよく用いられる	○大電力送信機の終段管として用いられる	○利得の点を除けば他の性能は非常に優れている ○数 100kW 位までの終段増幅管として用いられる	○UHF 帯以下の送信機は，ほとんどこれを用いる

空機などには適さない場合もある。このため 図 3. に示すような薄形給電系も考えられている(6)。フェーズドアレイ アンテナ は非常に優れた性能・機能をもった アンテナ であるが，経済性の点から広く用いられているとは言い難い。近年，それを解決するものとして フェーズドアレイ に反射鏡を組合せたものや レンズ を組合せたもの(7)が考えられている。前者は フェーズドアレイ の素子数を節減しても開口の大きさが小さくならないように反射鏡を用いたもので走査範囲が狭い場合に有効である。一方，後者は フェーズドアレイ を球かく レンズ で覆ったもので，もともとの フェーズドアレイ よりも走査範囲を拡大することが可能となる。このため1個の平面 フェーズドアレイ で半球面以上の ビーム 走査が可能になる。

3. 送信機

送信機の基本機能は，所要の送信周波数，パルス 幅，パルス くり返し周波数で，所要の送信電力を出力することであるが，近年の高性能 レーダ においては，下記に示す性能が要求されるようになってきた。

(1) 位相，周波数，送信くり返し周波数，出力電力，パルス 幅に関して高い安定度を有する送信信号

(2) 半導体化

(3) 小形化，軽量化，高能率化

送信機の ハードウェア は，主に送信管，パルス 変調器及び高圧直流電源より構成され，前記の要求にこたえてこれらも進歩を続けており，例えば，ここ10年間における新しい送信管 (CFA，同軸 マグネトロン 等) や全固体化変調器の実用化となって現れており，次項でこれらについて述べる。なお，近年目覚ましい進歩を遂げている マイクロ 波半導体を用いた送信源は，一部実用段階に入り将来更に発展して行くものと思われるが，これについては6章にゆずり，ここでは kW 級以上の送信管を用いた送信機について述べることとする。

3.1 技術の現況

(1) 送信管

送信管としては，各種各様の球があるが，広く用いられているのは マグネトロン，進行波管，クライストロン，CFA (Crossed Field Amplifier) 及び極管 (3極管，4極管) であり，これらの概要を 表 1. に示す。これらを含めた各種送信管の詳細は文献(8)にあり，ここでは大電力送信管の一例として，当社製の クライストロン (S バンド，せん(尖)頭出力 5 MW，ビーム 電圧 140 kV，ビーム 電流 110 A，利得 39 dB) の写真を 図 4. に示すにとどめる。

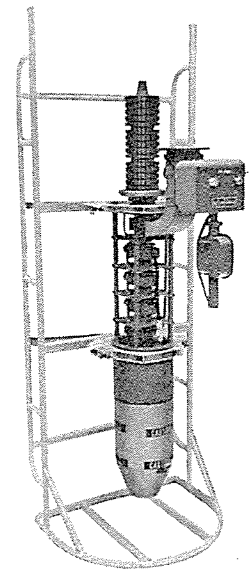


図 4. S バンド 5 MW クライストロン (形名 PV-3105 A)

(2) パルス 変調器

送信管に印加する パルス 波形は，送信信号の質を左右する。例えば，パルス 頂部の波形の乱れは増幅管の送信信号に位相変調を与え，パルス 圧縮 レーダ においては サイドローブ の増大の原因となる(9)。近年，レーダ の高性能化に伴い，パルス 波形に対する要求は厳しくなってきている。パルス 変調器としては，ライン 形変調器 (Line Type Pulser) と ハードチューブ 変調器 (Hard Tube Pulser) の2種類がある。前者は，パルス 波形の点では後者にはるかに及ばないが，小形・軽量・高能率等の利点がある。更に前者は，スイッチ 管としていままで サイラトロン を用いていたが，大容量 SCR の出現により，SCR を用いた全固体化 パルス 変調器も実用化されてきている(10)。一方，ハードチューブ 変調器は，極管に代わる大電力半導体素子が無いため，固体化は困難であるが，良好な パルス 波形や特殊な パルス を必要とする場合はこれを用いることとなる。図 5. に大電力 ハードチューブ で変調器を用いた送信機の写真を，また 表 2. に，その性能を示す。

(3) 高圧直流電源

高圧直流電源の リップル は，送信管に印加される パルス 電圧の リップル となり，これは増幅管に位相変調を与え，送信 パルス ごとの位相変動は，MTI レーダ の消去性能を劣化させる原因となる(9)。高圧直流電源の リップル の最小値は 0.01 %くらいが限界であり，通常の MTI レーダ の消去性能 (Improvement Factor(1) で約 30〜40 dB 程度) は満たすことができるが，パルスドプラ レーダ のように極めて高い消去性能 (Improvement Factor で 60 dB 以上) は満たすことができない。

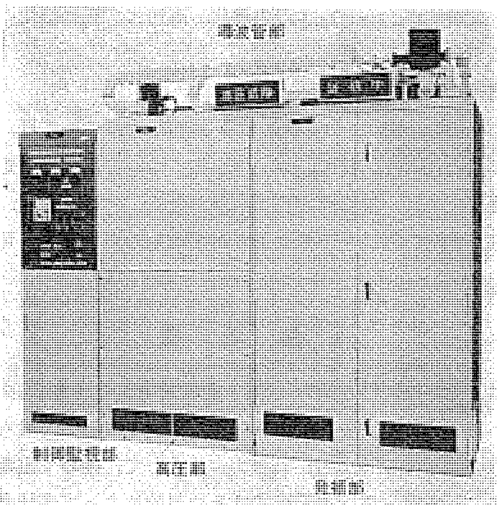


図 5. ハードチューブ 変調器を用いた大電力送信機

表 2. ハードチューブ 変調器を用いた送信機 (図 5.) の主要諸元

項　　　目	性　　　能
1. 周　波　数	Cバンド
2. 尖頭送信電力	1 MW 以上 (マグネトロン)
3. 変　調　器	
(1) 形　式	ハードチューブ変調器
(2) パルス幅	シングルパルス 1 s ダブルパルス 0.25 s
(3) パルス間隔 (ダブルパルスの場合)	←→ 3 s, 5 s 又は 7 s
(4) 送信くり返し周波数	約 250 pps 及び約 267.9 pps
(5) スイッチ管	3 極管 ML-8040 (Machlette 社)
プレート電圧	38 kV
プレートパルス電流	140 A
グリッドパルス電圧	+1,200 V
グリッドパルス電流	40 A
出力パルス電圧	34 kV (マグネトロン電圧)
4. 高圧直流電源	
(1) 出力電圧	+45 kV max
(2) 出力平均電流	90 mA max
5. 寸法 (mm)	2,800(W)×2.510(H)×1,040(D) 以下
6. 重　量	2,260 kg

この場合は, DC-DC コンバータ 等を用い, リップル の周波数と送信くり返し周波数を同期させ, 各送信時でみれば, リップル の大きさに関係なく電圧が一定になるようにして リップル の影響を除き, 所要の消去性能を得る方式が採用される。

3. 2 将来動向

将来動向として, まず現存する各送信管の性能改善 (特に帯域, 送信電力, 能率, 寿命) が引続き強力に進められようが, 新種送信管が出現しない限り, 急激な性能改善は望めないであろう。

また, マイクロ 波半導体の送信電力は, 引続き早い テンポ で増大し, 低中電力の送信管は, すべて半導体に置換わってゆくものと思われる。更に, 全固体化 アクティブ フェーズドアレイ レーダ の実用化を支える, モジュール 化された半導体送信機の開発が, 早い テンポ で進められるであろう。

4. 受　信　機

最近の レーダ 受信機の中で大きな比重を占める技術として, パルス 圧縮技術, クラッタ 抑圧技術が挙げられる。

パルス 圧縮技術に関しては, SAW (表面音響波), 周波数分散形遅延線を用いる アナログ 方式の外に, FFT (Fast Fourier Transform, 高速 フーリエ 変換) アルゴリズム による ディジタル パルス 圧縮が内外で研究され, 実用化されつつある。

クラッタ 抑圧に関しては クラッタ (地面, 海面, 雨雲等からの不要反射信号) の中から, ドプラ 偏移情報の相違を利用して, 目標からの反射信号を弁別, 抽出する MTI (Moving Target Indication, 移動目標表示方式) が中心であり, 更に クラッタ 抑圧性能のよい パルスドプラ 方式を採用する方向にある。パルス 捜索 レーダ に適合する パルスドプラ 方式としては, アナログ 方式は実際的ではなく ディジタル 方式のものが開発されている。

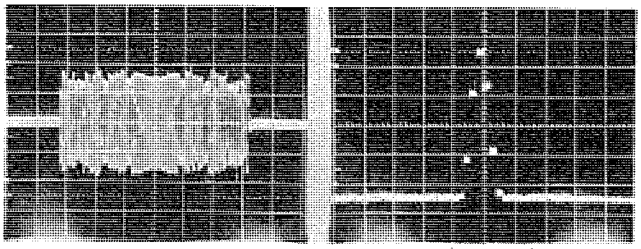
4. 1 技術の現況

4. 1. 1 パルス圧縮

パルス 圧縮方式には種々の方式があり, 用途, 目的, 性能, 実現性などを考慮に入れて選ぶべきであるが, チャープ (直線周波数変調) パルス 圧縮が多く用いられるようである。アナログ 方式における主要構成素子は周波数分散形超音波遅延線であり, 圧縮比数百, 圧縮後の パルス 幅数千 ナノ 秒までを実現できる SAW デバイス が市販されている。一方, 近年, ディジタル 信号処理技術として FFT による周波数領域での フィルタリング の概念が導入され, 内外各方面で ディジタル パルス 圧縮装置の開発が行われている。これは, 従来の アナログ 技術の延長という方向でなく, ディジタル 信号処理によってこそ実現できる, 言うなれば, ディジタル 独自の処理方法ということで特徴づけられるものである。処理の概要は次のようになる。まず, 入力時系列信号 サンプル 群を FFT アルゴリズム によって周波数系列 サンプル 群に変換し, 次に複素乗算器で, 所望の フィルタ 係数と掛け合わせたのち, 逆 FFT 処理により出力時系列信号 サンプル 群として出力する。ディジタル パルス 圧縮の大きな長所は, システム 構成上の融通性に富むという点にある。例えば, フィルタ 係数, 伸長波作成用係数は メモリ で蓄えておけばよく, 数種の送信波変調 パターン を準備しておくことにより, 容易に種々の モード の パルス 圧縮を実現することができる。反面, ディジタル パルス 圧縮における処理演算は, 複素数の乗算, 加減算が大部分であるから, 現在市販のはん(汎)用 IC を用いて構成するのでは, ハードウェア の大きさ, 速度, 経済性の面で アナログ より不利な場合が多い。しかし, FFT 向き信号処理回路の LSI 化が内外で試みられており, その実用化とともに, 実施しやすいものから ディジタル 化されよう。

ディジタル パルス 圧縮の実例を図 6. に示す。概略性能諸元は次のとおりである。

方　　式: ディジタル チャープ
圧縮前 パルス 幅: 31.6 μs
圧縮後 パルス 幅: 3 μs
圧　縮　比: 10.5
レンジ サイドローブ レベル: −36 dB



(a) 伸長波形の合成 (5 μs/div)　(b) 圧縮波形 (5 μs/div)

図 6. ディジタルパルス 圧縮 (チャープ)

サンプリング レート： 1 μs

サンプル サイズ ： 64

4.1.2 クラッタ抑圧

(1) MTI

ここ数年の間に，ディジタル MTI は技術的に定着しているので改めて述べるまでもないが，ディジタル パルス ドプラ 技術との関連において技術上の相違点をあげて見ると次のようになる。第1に，ディジタル MTI の基礎は，一般的には，巡回形 ディジタル フィルタ であり，演算は実数の乗算，加減算が主である。この点で，FFT 方式の ディジタル パルス ドプラ（次項参照）に比べて，ハードウェア 規模は小さくて済む。しかし，第2に，MTI への要求が高まり，例えば，クラッタ トラッカ のような適合 フィルタリング 処理を行うには，一部分複素数の乗算も必要となり，処理が複雑になる傾向にある。一方，第3に，ディジタル 信号処理用として巡回形 フィルタ を LSI 化する動きもあり，ハードウェア の小形化，高速化の可能性が期待できる。

(2) パルス ドプラ

単純化して考えると，パルス ドプラ は MTI の発展形としてとらえることができる。

最近，パルス 捜索 レーダ における クラッタ 抑圧性能に対する要求が強まっており，MTI における対処法としては送信 パルス 繰り返し周波数 (PRF) を大きくするのが最も効果的である。通常，PRF は レンジ アンビギュイティ を発生しない限度ぎりぎりに選ばれているので，更に PRF を大きくすると，クラッタ 抑圧性能の向上と引換えに レンジ アンビギュイティ 除去（レンジング）処理が必要となる。レンジング 処理は，PRF を若干ずらす スタガ PRF によるものが知られており，電子走査 アンテナ の出現と相まって，捜索 レーダ への適合も現実的なものとなってきている。

従来の アナログ 方式 パルス ドプラ は，特定目標についての輝線 スペクトル 群のうちの1本だけを対象として狭帯域 フィルタ 処理を行うので距離情報が失われ，したがって，トラッキング レーダ のように特定目標だけを対象とする場合はともかく，捜索 レーダ のように全距離範囲の目標について パルス ドプラ 処理を行うには，ハードウェア の規模が大きくなりすぎ，非現実的である。全距離について パルス ドプラ 処理を行うには，MTI フィルタ のようにくし（櫛）歯形 フィルタ 構成とすればよく，ディジタル 技術が適している。ディジタル パルス ドプラ 方式としては，大別して，

(a) 個別 ディジタル フィルタ 並置方式

(b) FFT 方式

に分けることができる。

個別 ディジタル フィルタ 並置方式は，中心周波数が若干ずれた複数個の狭帯域 MTI 形 フィルタ を並置して，所望の周波数帯域を カバー する方式で，主な演算は実数の乗算，加減算である。個々の フィルタ の構成が単純であることが長所であるが，ハードウェア 量は フィルタ 数にほぼ比例するので，フィルタ 数が多い場合には FFT 方式より不利である。

FFT 方式は，FFT 処理が櫛歯形 フィルタ バンク 構成と等価であることを利用する。入力時系列 サンプル $N(=2^n)$ 個についての FFT 処理は，中心周波数が PRF/N ずつずれた N 個の櫛歯形 フィルタ を形成し，その ハードウェア 量は，N でなく，ほぼ $n(=\log_2 N)$ に比例する。したがって，フィルタ 数 N が大きいほど ハードウェア は相対的に小さくて済み，有利である。なお，この方式の主要な演算は，パルス 圧縮の場合と同様，複素数の乗算，加減算であるから，FFT 専用 LSI の開発，実用化が，ハードウェア の小形化，高速化，低価格化の重要なかぎをにぎっていると言えよう。

4.2 将来の動向

全般的に装置の小形化，ディジタル 化，高性能化については，将来とも努力が払われよう。特に，ディジタル 化については，信号処理専用 LSI が実用化され，単に性能面ばかりでなく，寸法・重量，経済性の面でも，アナログ 方式を十分りょうがするものが出現する可能性がある。

5. 指 示 機

指示機は，受信機で得た情報又は，計算機系から成る レーダ 情報処理装置からの情報を，最終的に利用する人間に対して，最も利用しやすい形で表示する マンマシン インタフェース として，極めて重要な役割を果たす。したがって，表示形式はその目的によって多種多様であるが，表示素子としては今後とも相当の期間にわたって ブラウン 管 (CRT) が主流を占めるものと思われる。そこで本稿では，CRT を使用した レーダ 指示機を主体に述べることとする。

電子計算機の普及と利用技術により，レーダ 情報の処理に電子計算機が導入されるようになって，指示機は，従来の機能に加えて，データ 処理系との インタフェース 機能を備えた コンピュータディスプレー としての機能を備えるようになってきた。また，データ 処理装置から出力される多量の データ を，分かりやすく表示するために，表示の シンボル 化，英数字化，あるいは カラー 化の必要が生じ，これに伴って，偏向の高速化，表示の高精細度化及び高輝度化の必要がますます高まっており，各方面で研究が進められている。

5.1 技術の現状

5.1.1 CRT

(1) 偏向の高速化技術

従来，高速偏向が要求される場合には，静電偏向式の ブラウン 管が使用されているが，装置の小形化，高精細度化，表示面の フラットフェース 化，大形化の要求に対しては難点があった。一方，大電力高周波 トランジスタ の出現により，電磁偏向方式でも，加速電圧 18 kV の 20 インチ CRT において 10 μs／直径の セトリング が得られるようになったが，更に高速化を可能とするものとして「後段偏向拡大」(Post Deflection Magnification) 方式の CRT が開発されている。この CRT は，電子 レンズ により，偏向後の偏向角（及び ビーム 径）を約3倍に拡大するもので，走査面積を10倍に拡大することができる。ビーム 径も拡大されるので解像度が低下するが，2倍程度の拡大率とすると 1,000 本以上の解像度を得ることができる。したがって，この CRT を使用することにより，4～10 倍の高速化，あるいは，偏向電力を 1/4～1/10 に低減することが可能になる。更に，拡大 レンズ 系の作用によって ピンクッション ひずみ（歪）及び収差を内部的に補正することができる。

(2) 高精細度化技術

CRT の電子銃の設計の究極の目標は，高分解能 高輝度，長寿命かつ最小電力のものを最小の大きさで達成することである。過去40年近く，CRT の電子銃として クロスオーバ 形が使用されてきたが，1973年に "Laminar Flow Gun" という クロスオーバ を持たない電子銃が考案された(11)。この電子銃を利用した CRT は，高 ドーム 電流機においても高解像度が得られるという特長がある。

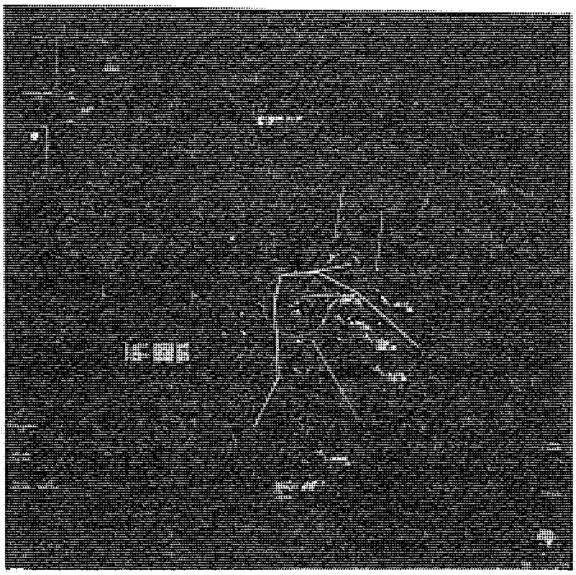


図 7. 複合表示による航空管制用 レーダ 表示の例

5. 1. 2　表示方式

（1）　複合表示

レーダの生ビデオと，英数字又は記号化したレーダ情報処理装置からの出力データを重畳表示するものである。記号，英数字を構成する線分の発生方法により，ドット法，ドットストローク法，ストローク法，リサージュ法，モノスコープ法などがあるが，文字品質の点で，ドットストローク法あるいはストローク法が採用されている。複合表示の一例を図 7. に示す。

（2）　フルディジタル表示

計算処理したレーダ情報と，表示制御用マイクロコンピュータによって発生する線描データにより，フリッカのない，高輝度表示を行うものである。CRT としては，直径 20 インチの高輝度で高解像度のものが使用される。この表示装置は，ランダムアクセス方式の高性能グラフィックディスプレーとして使用することが可能である。

（3）　ブライトディスプレー

航空路管制用表示装置やコックピット用の表示装置にはブライトディスプレーが使用される。この方式には，直視形蓄積管（DVST）によるものと走査変換によるものとがある。航空機に搭載する場合には，小形・軽量化が要求されることから DVST を使用しており，大画面表示を必要とする場合には，表示品質の優れた走査変換方式が採用されているが，走査変換管の小形化，高性能化に伴い航空機搭載用表示装置にも走査変換方式のものが採用されつつある。

5. 2　ディスプレー技術の将来動向

集積回路の集積度の飛躍的向上により，電子計算機はますます小形化，高性能化するであろう。この利用技術と，レーダ情報処理技術の向上とにより指示装置には，電子計算機周辺機器としての機能要求が強まってくるであろう。したがって，カラーキャラクタディスプレー技術を応用したシャドーマスク式 CRT によるカラー表示などの発展が考えられるほか，表示素子として，プラズマパネルあるいは液晶を使用するものも出てくるであろうが，当分は CRT の全盛時代が続くものと考えられる。

6.　マイクロ波デバイス

レーダに使われる半導体やフェライトの応用製品は，商用周波数から数十 GHz に至る周波数帯のものまで，多種，多様のものが開発され，実用に供されている。特にマイクロ波機器の高性能化，小形軽量化，高信頼性，経済性を支え，かつ，これからもその原動力となるであろう高周波用素子の進歩には目覚ましいものがある。

一方では，これら高周波用素子の進歩と，写真製版を主体とする精密加工技術の進展により，マイクロ波 IC（MIC）化は，ますます進んで，今やらん（爛）熟期を迎えた感がある。すなわち，機器が複雑，高性能化するにつれて，構成回路の小形軽量化，高信頼性，経済性に対する要望は高まるばかりで，その要望を満たし得るものとして，今や，低電力マイクロ波回路の MIC 化は常識となってきた。このような現状において，MIC 応用製品も数多く見られるが，これについての詳細は文献[12]によることにして，ここでは高周波用素子の幾つかについて，その応用製品を中心に現況を紹介する。

6. 1　半導体応用製品

（1）　送信，局発源

従来，電子管に依存していた高周波，高出力の送信，局発源も，固体発振素子としてのガンダイオードやインパットダイオード，周波数てい倍用電圧可変容量ダイオード，高効率のトランジスタなどによって，半導体化が可能になった。また近年は，シリコンバイポーラ形高出力トランジスタでは及ばない，4 GHz 帯以上の高周波領域に対しても，優れた出力特性をもつ，高出力の GaAs FET トランジスタが現れ，増幅，発振両面から，数多くの特性の報告がなされている[13][14]。

図 8. は，外国のあるメーカで，比較的最近売出している半導体高出力増幅器の供給可能な出力範囲を示すもので，図ではまだ最高周波数が 4.2 GHz となっているが，上記の技術現況からみて，近いうちに更に高い周波数領域まで包含する製品が出現することは明らかである。

固体発振素子についても，出力 20 W 以上，効率 10 %以上の X バンドシリコン DDR インパットダイオードや，24 GHz 帯ガン発振器の開発[15][16]に見られるように，高出力，高効率，高上限周波数を求め，進歩が続いている。

（2）　低雑音増幅器

高周波領域で高出力の得られる GaAs FET 形のトランジスタは，低雑音増幅器用としても注目を集めており，この種トランジスタを用いた 12 GHz から 18 GHz まで，雑音指数 7 dB 以下を示す広帯域増

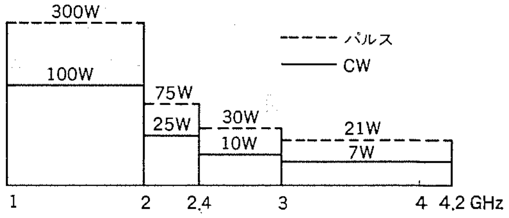


図 8. 固体電力増幅器の出力

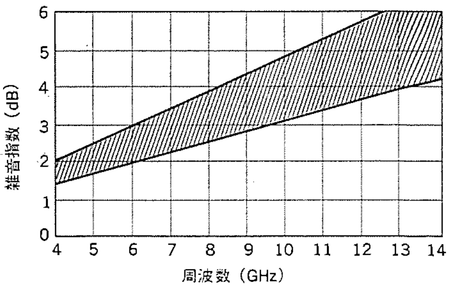


図 9. 狭帯域 GaAs FET 増幅器で得られる雑音指数の範囲

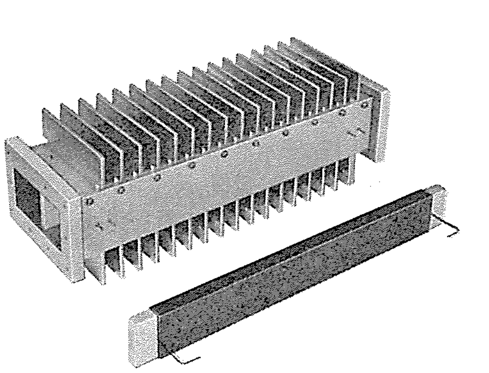


図 10. Sバンド導波管形ラッチング非可逆移相器

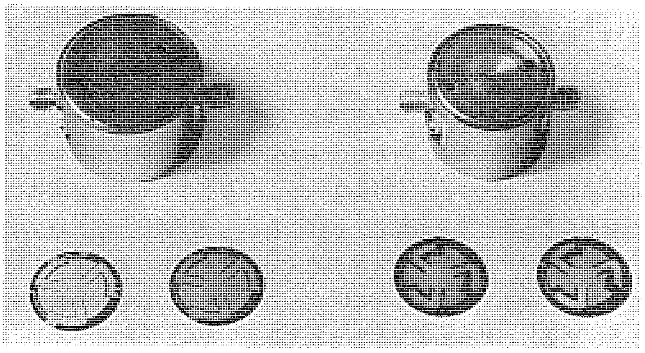


図 11. MIC小形サーキュレータ

幅器や，低雑音狭帯域増幅器が，既に製品として見られるようになった。図 9. は，市販の各種狭帯域 GaAs FET 増幅器で得られる雑音指数の範囲の概略を示すものである。

小形軽量，高信頼で，ダイナミックレンジが広く，堅ろう(牢)であると言う有利な点を備えているので，高価で，構造複雑な TWT やトンネルダイオードアンプ，パラメトリックアンプに代わって，漸次，低雑音増幅器の主流を占めるものと思われる。

6.2 フェライト応用製品

(1) 移相器

フェーズドアレイレーダ用移相器としては，そのレーダの性格に応じて大電力形，可逆低損失形，あるいは小形軽量形など種々の形のものが要求される。大電力用としては例えば，導波管形ラッチング非可逆移相器があり，従来のものより放熱効果を向上させた構成とすることにより，Sバンドで尖頭電力 10 kW 以上，平均電力 400 W 以上の特性のものが得られている。(図 10.)

可逆低損失形としては，デュアルモードラッチング移相器があり[17]，透過形はもちろん，反射形についても，良特性のものが 90% 以上の好歩どまりで製作できるようになった。

また，小形軽量化については，マイクロストリップ線路と結合メアンダ線路を利用することにより，大幅な小形軽量化を達成したメアンダ線路形ラッチング移相器が実用化されている[18]。

(2) サーキュレータ

サーキュレータに関しては，小形で耐電力の大きいサーキュレータと，MIC に適合する小形サーキュレータについての進歩が著しい。小形大電力用としては，例えば Ku バンド導波管形で，尖頭電力 60 kW のものが既に数年前から実用されている[19]。

また，MIC 小形サーキュレータに関しては，1〜20 GHz にわたる標準的なサーキュレータの外に，接合部にインピーダンスを装荷する独得の設計法に基づき，従来の MIC 形状を，より小形化した MIC 小形サーキュレータも実用に供されるようになった[20]。

参 考 文 献

(1) 武市，永井：開口面アンテナのビーム成形技術，電子通信学会誌，60，p.398 (昭52)

(2) 水沢，久郷：アンテナの指向性合成の理論と実際〔III〕，電子通信学会誌，59，p.626 (昭51)

(3) 徳丸，鷹尾：アンテナの指向性合成の理論と実際〔II〕，59，p. 516 (昭51)

(4) 水沢ほか：円偏波レーダ用ダブルカーブ形複反射鏡アンテナ，電子通信学会アンテナ伝播研資，A・P 74–81 (昭50–2)

(5) 山岸ほか：Xバンド・アクティブ・フェーズド・アレイ・レーダについて，電子通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研資，SANE 72–12 (昭47–9)

(6) 真野ほか：フェイズドアレイ用薄形給電系の効率，電子通信学会アンテナ伝播研資，A・P 76–53 (昭51–9)

(7) 佐藤ほか：レンズ付フェイズドアレイの放射特性，電子通信学会，アンテナ伝播研資 A・P 76–90 (昭52–2)

(8) Skolnik ; Radar Handbook, McGRAW HILL Book Co.

(9) D. Hayes, S. Logan : M/W Tube Reguirements For Radar Application, Microwave Journal April (1973)

(10) 近藤，中司：レーダ用固体パルス変調器，三菱電機技報，49，No. 5 (昭50)

(11) Norman H. Lehrer : SID Journal p. 7, March/April (1974)

(12) 例えば，三菱電機技報 (マイクロ波 IC 特集)，46，No. 11 (昭47)

(13) 三井ほか：GaAs MES FET 発振器，電子通信学会，ED 76–39，7月 (昭51)

(14) 中谷ほか：GaAs MES FET の高出力化，電子通信学会，ED 76–68，11月 (昭51)

(15) 渡瀬ほか：X メバンドシリコン DDR インパットダイオード，昭和51年度電気関係学会関西支部連大，G 8–26

(16) 小谷ほか：センサ用 24 GHz 帯ガン発振器の試作，電子通信学会，MW 76–134，2月 (昭52)

(17) 溝渕，紅林：デュアルモード・ラッチング移相器，電子通信学会，MW 74–1〜7，4月 (昭49)

(18) 中原ほか：マイクロ波 IC 用フェライト回路，三菱電機技報，46，No. 11 (昭47)

(19) 紅林，古屋，中原：Ku バンド高電力接合形サーキュレータ，昭和47年度電子通信学会全大，679

(20) 紅林，折目：接合部にインピーダンスを装荷した小形マイクロストリップサーキュレータの設計法，電子通信学会，MW 76–85，10月 (昭51)

24GHz空港面監視用高分解能レーダ

近藤輝夫*・橋本　一**・徳丸芳孝**・飯森昌直**・福井清緝**

1. まえがき

交通の手段としての航空機の利用が高まるにつれて，飛行場内の交通はますますふくそう(輻輳)の度を増し，地上交通管制もいよいよその重要性を増して来た。

飛行場内の管制の手段として用いられる装置には，工業用テレビジョン，赤外線利用の暗視装置や，電磁ループの埋設，レーザ光の利用等も考えられ，いずれも管制の補助手段として，それぞれの目的に応じた利用方法を考えるとき，十分有効なものとなり得るが，いずれも特定部分の監視にとどまり，一望のもとに空港全体の監視ができる，全天候性の管制機器としては，現在でも高分解能レーダに代わる手段は無いように思われる。この目的に適したレーダとして，我々はミリ波を用いた空港面監視用高分解能レーダ(Airport Surface Detection Equipment—ASDE)を製作し，これらは既に羽田の東京国際空港，名古屋空港で使われて来ているが，この度従来のこの種のレーダの欠点を一挙に解決した，高速回転アンテナ方式の半導体化ASDEを開発し，大阪国際空港及び北海道千歳空港にすえ(据)付けられてか(稼)働中であり，成田の新東京国際空港にも据付けられ間もなく稼働に入る予定である。本機は以下説明する点に考慮をはらって設計してある。

1.1 高分解能性

レーダの指示装置での目標の識別能力を向上させるためにはレーダの距離，方位の分解能を共に向上させる必要がある。方位分解能を上げるには，大形アンテナを使って方位方向のビーム幅を狭くする必要があるが，このためにはミリ波を使ってアンテナの小形化を図り，距離分解能の向上のためにナノセカンドパルスを用いている。

24 GHz帯で水平0.3°のビーム幅，20 nsのパルスを用いているので，航空機の形状の識別，人，車両等の認識も可能であり，距離，方位ともに実用上十分な分解能が得られている。

1.2 高速データレート

飛行場内の航空機の動き，特にその離着陸時の速度は非常に大きく，アンテナ無走査時のデータの欠如は，指示装置ブラウン管(CRT)上に高速移動物体の跳びとして現れるので，アンテナを速く回転させる事が望ましい。一方，回転数を上げる事により，アンテナ一走査当たりの目標に当たる高周波パルスの数が減り，レーダの探知確率が下がるので，パルス繰り返し周波数を上げなければならない。直径3 mのアンテナを高速で回転させるには，空気力学的にも，機械構造上からも厳しい制限を受け，一方繰り返し周波数も，送信系の電子管のデューティを超えることはできないので，これらの要素を勘案してアンテナはレドームに収容して回転数を毎分500回転とし，パルス繰り返し周波数は，14,000 ppsに選んだ。

1.3 高輝度表示

飛行場内の交通管制に当たっては，管制室からの目視によるのが最も感覚的，直接的である。したがって，夜間や，雨・もや(靄)・霧などのため，目視が全くきかない場合合を別にすると，肉眼による目視の補助手段としてASDEを利用するのが最も効果的である。このために，ASDEの指示装置は明るい管制室内で外を見ながら使われることになるので，できる限りの高輝度で表示できることが望ましいが，従来のレーダ指示装置は主としてブラウン管の残像を見ているため，フードを用いて外からの光をしゃ断するなどして使用されており，白昼表示には程遠いものであった。

蓄積管は分解能の劣化を招き，走査変換管を用いたTV表示も，繰り返しが早く，表示距離が1～5 kmと極端に短いこの種のレーダでは書込み時間が短いので，表示最小レンジでは十分な性能を発揮することができない。一方，レーダ指示装置ブラウン管の輝線の輝度は，残像のそれに比べて数十倍も明るいことに着目し，スイープの輝線を高速回転することにより，ブラウン管全周をこの輝線で表示することができれば極めて明るい画像が得られる。このためにも，アンテナを高速で回転させることが必要となるが，このためには下記の問題点がある。

(1) 回転数が高い程，ちらつきが減り，輝度は上がるが一走査当たりの目標へのパルスヒット数が減少し，目標の探知確率も低下するので，おのずから高速回転数に上限がある。

(2) 機械的な制限が大きく，アンテナ系の構造・寸法・重量が回転数の増加とともに加速度的に増える。

(3) 回転方位位置の表示系の設計，精度の保持に細心の注意を払う必要がある。

これらの点をすべて勘案して，最適点を見い出す協調設計が必要であった。

1.4 高感度・高解像度表示

高感度を得るために，ホットキャリアダイオードを使ったバランスドミクサを使用し，ミリ波帯で低い雑音指数を得ている。また指示装置には，16インチの高解像度のブラウン管を使用して，レーダシステムの持つ高分解能と，高速回転アンテナによる高輝度性とを十分発揮できるよう，注意して設計した。

大阪国際空港に据付けたアンテナ，送受信装置及び指示装置の写真

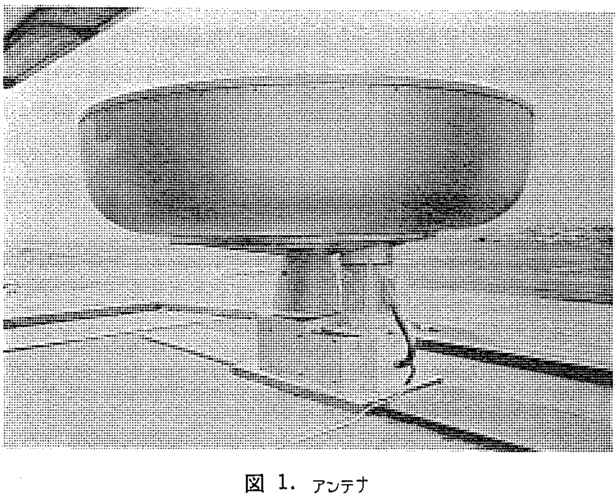


図 1. アンテナ

* 鎌倉製作所　** 通信機製作所

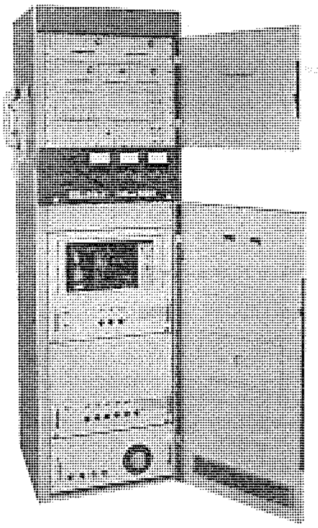


図 2. 送受信装置

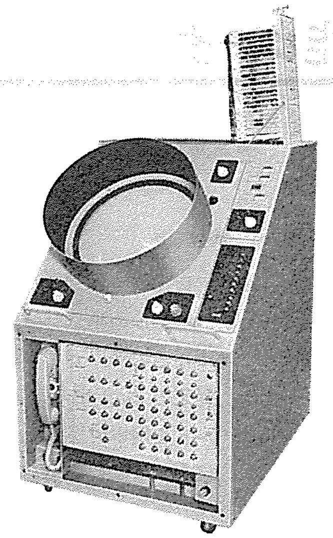


図 3. 指示装置

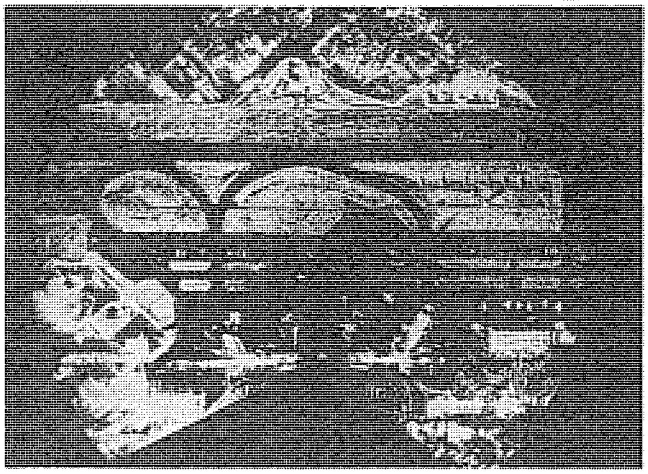


図 4. 明るいレーダ画像（大阪国際空港）

を図1.～図3.に，レーダ画像の写真を図4.に示す。

2. アンテナ

送信電力を効率よく放射し，目標からの反射電力を距離に関係なく一定のレベルで受信できる，高分解能・高利得のアンテナを得るために，周波数は24 GHz帯とし，アンテナの大きさは幅約3 m，高さ0.5 mとした。アンテナは1次放射器，反射鏡，駆動部及びレドームで構成される。

2.1 放射系

反射鏡は駆動動力を軽減するため，レドームに収容した。レドームは，アンテナを外的条件より保護し，反射鏡の流体騒音をしゃへい（遮蔽）する役目をも果たしている。反射鏡の形状は縦面が狭く，横面が広く，その比が約1：6で縦面は，コセカント2乗パターンが得られるような曲面に設計されている。反射鏡形状の決定には以下に述べる事柄につき特に注意をはらって設計している。

（1） 使用周波数が24 GHz帯であるので，鏡面は耐食アルミ合金板を成形し，その精度は0.15 mm rms以下に抑えた。

（2） 1次放射器及びその支持わく（枠）が，下向きのビームに対して遮蔽体にならないように鏡面軸より10°オフセットし，かつ上方より放射する構造とした。

（3） 空港面上35 mの高さにアンテナが据付けられた場合，空港面で，最小70 mの探知距離を得るためのふ（俯）角は約27°になる。27°における相対レベルは主ビームから −33 dB の非常に低いレベルであり，アンテナのスピルオーバやブロッキングによる不要放射レベルを極力抑えるような構造とした。

（4） 反射鏡が毎分500回転すると最外周部で460 Gの遠心力と回転による風圧とを受けるので，反射鏡の構造は軽量（約120 kg）で剛性の高い箱体構造とし，回転中の反射鏡の変形量は，最外周で0.5 mm以下になるように設計した。

（5） 回転中の機械振動を少なくするために反射鏡部は，JIS-B 0905の回転体のつりあいよさ5級（偏心量0.32 mm以下）のバランスをとってある。

1次放射器は，円偏波発生器を備えたく（矩）形ホーンで構成されており，その前面にはFRPのホーンカバーをつける。

レドームは使用周波数が高いことからその厚みが高精度に制御でき，電気的，機械的にも優れているFRP半波長板を使用し，その表面にはポリウレタン樹脂を塗布して耐候性をよくしてある。

設計条件として，

（a） 瞬間最大風速75 m/sまで永久変形及び破損しないこと。

（b） レドーム内の回転体による風圧に耐えること。

（c） 入射角30°において最適な厚みになること。

（d） 入射角が50°を超えないこと。

（e） アンテナ上限の点からみて俯角35°以内に金属物体がないこと。

（f） レドームの継ぎ目は，それによるブロッキングが最小に，かつ電力透過率が最大になるようにすること。

などを考慮し，レドームの断面形状及び厚みを決定した。

入射角の変化に対して最大50°までは，ほぼ均一な透過率になっている。直径4 mφの大きさのレドームを，厚み精度0.15 mm rms以下になるように成形している。

2.2 駆動部

幅3 m，高さ0.5 mの大きさの反射鏡を空気中に露出して，毎分500回の高速回転をさせた場合，約380 kWの動力が必要である。駆動力が大きくなればそれにつれて所要強度を満足させるために，駆動部を含めたアンテナ全体の重量・寸法が増大してしまう。しかしながら，このレーダは空港内の建物の屋上などに据付けられることが多いので，重量・寸法をできるだけ軽減したコンパクトな構造でなくてはならない。

駆動力の大きさに大きな影響を与える反射鏡形状の変化やレドームの有無による駆動力の変化を定量的に求めるため，1/4模型による予備実験を行い，実物のアンテナの駆動力を推定した。一般に，空気抵抗を受けて回転する回転体の回転トルク及び，駆動力は次式で与えられる。

$$T=C_M\frac{\rho\cdot\pi^2\cdot N^2\cdot H\cdot R^4}{3600}(\mathrm{kg\cdot m})$$

$$P=\frac{T\cdot N}{974.2}(\mathrm{kW})$$

ここに， C_M：トルク係数（形状によりきまる係数）
ρ：空気密度（kg・S²/m⁴）
N：回転数（rpm）
H：反射鏡高さ（m）
R：反射鏡半径（m）

実験により種々の形状の反射鏡の C_M を求め駆動力を算定した。実験は下記のものについて行った。

Ⓐ 反射鏡のみで回転させる。

Ⓑ レドーム内で反射鏡を回転させる。

Ⓒ 反射鏡後部に回転体のバランスを考慮した形状のカバーを取りつける。

Ⓓ 反射鏡後部に半円形のカバーを取りつける。

Ⓔ 回転対称のレドームを反射鏡と一体として回転させる。

駆動力が最も少ないものはⒺ方式の回転対称形のレドームを反射鏡と一体として回転させたものである。この方式は回転中に受ける空気抵抗が，レドーム表面の摩擦によるもののみであるからである。しかし，レドームは電気的性能を満足させるための寸法・形状，及び材料の制限が厳しく，高速回転の遠心力に耐えるための強度を持たせるための独立した設計が困難であり，また回転体を露出したまま高速回転させることは安全性の点からも問題があるので採用しなかった。反射鏡をレドームで覆って回転させた場合は，レドームのない場合に比較して回転トルクを大幅に減少させることができるが，レドームで覆う容積が小さい程回転トルクが小さくなり，またレドームが一定の容積の時には空気抵抗の小さい形状の反射鏡のほうが回転トルクが小さくなる。

実機で採用した形状はⒸ方式で，レドームを電気的性能を満たす範囲で小形にし，反射鏡の形状は機械的強度とバランスを保てる範囲で空気抵抗が小さくなるようにした。これにより所要動力は，500 rpm の時で約 45 kW となり目標値を満足することができた。

このアンテナの性能は

(1) 使用周波数帯：24,250～24,750 MHz

(2) 指向特性：垂直面内　コセカント 2 乗

：水平面内　0.3°

(3) 偏波：円偏波

(4) サイドローブ：−16 dB 以下

(5) VSWR：1.4 以下

(6) 利得：43 dB 以上

(7) 回転数：500 rpm

3. 送受信装置

送受信装置は 24.5 GHz のミリ波をパルス発振させ，アンテナに給電し，その受信信号を増幅，検波したのちビデオ信号として指示装置に送り出している。

制御表示盤に集められた操作スイッチにより電源投入，送信 ON–OFF, STC 及び FTC ON–OFF 等送受信装置の全機能が制御される。また，remote に切換えることにより，すべての操作は指示装置で行うことができる。

主要部分の動作電圧，電流値は 3 個のマルチメータで監視しており，日常の動作点検を容易にしている。

各回路は機能ごとにシャーシに分けられプラグイン方式を採用し，箱体前面からの保守を容易にしている。また，立体回路は箱体裏面から保守する構造とし，送受切換回路のアンテナ側に −40 dB の方向性結合器を組み込み，送信出力，送信周波数，送信パルス波形など必要時に動作を監視できるようにしている。

3.1 送信機

レーダの距離分解能を上げるためには，送信パルス幅をできるだけ狭くしなければならない。一方，指示装置のブラウン管に高輝度表示をするため，アンテナは 500 rpm の高速回転をしているので，一走査あたりの目標への送信パルスのヒット数が下がり，目標の探知確率が下がる。したがって送信パルスの繰り返し周波数を上げねばならないが，送信管のデューティサイクルから決まる値を超すことはできない。

今回製作した送信機は，パルス幅が 20 ns と極めて狭い上に繰り返し周波数が 14,000 pps と極めて高いものである。

20 ns の短パルスを発生するために，パルス増幅管をスイッチチューブとしたハードチューブパルサを用いている。このときパルス回路の浮遊容量に蓄えられる静電エネルギは，パルス増幅管を通して放電するが，マグネトロンの発振には寄与しないだけでなく，パルス増幅管の陽極損失を著しく増している。このため通常のパルス幅のレーダ送信機では無視できるような部品の配列についても十分に考慮し，浮遊容量や，配線のインダクタンスが最小になるように設計しなければならない。

パルス成形は，パルサ出力管のグリッドドライブ回路で行っているが，パルス成形回路として高周波同軸ケーブルを終端開放で用い，サイラトロンでスイッチするラインタイプパルサでパルス幅 20 ns，振幅 1 kV のパルスを発生している。

マグネトロン，双 TR 管，パルス増幅管，サイラトロンを除き，すべて高信頼度のシリコントランジスタ，シリコンダイオード等，半導体で回路を構成している。

高周波パルスは送受切換器，ロータリジョイントを経て 1 次放射器より反射鏡に向かって放射され，反射信号はこの逆の経路をたどってミキサに給電される。

ミキサはショートスロット・ハイブリッドを用いたバランスドミキサで，ミリ波帯で非常に低い雑音指数が得られ，かつ高い耐電力特性をもつホットキャリアダイオードを用いている。プリアンプには低雑音のシリコントランジスタを用いて雑音指数の低減を図っている。

局部発振器は，半導体直接発振素子のガンダイオードを使用している。

3.2 受信機

受信機は，高さ 90 mm，長さ 169 mm，幅 26 mm のアルミダイカストシャーシを使用し，バスケットとシャーシ間の信号及び電源等の接続は，すべてプラグイン方式を採用し整備性を良くした。

送信パルス幅が 20 ns と非常に短いため，受信機では広帯域のビデオ帯域幅を必要とする。したがって，IF 帯域幅も広くなり，IF 帯域幅とビデオ帯域幅とが重なることのないように IF 中心周波数を高くとっている。

受信機付属回路として，STC，FTC，MGC 機能を有している。局部発振周波数が 24 GHz と高いが，IF 帯域幅を所要の帯域幅よりも広くすることによって，局部発振周波数の変動を補償すると同時に，AFC 回路を省略することができた。送信機と同一箱体にして小形化を図るとともに，洩れ込みなどの影響を抑えるため，特に注意して設計してある。

送受信装置の性能は

(1) 送信電力：　30 kW

(2) パルス幅：　20 ns

(3) 繰り返し周波数：　14,000 pps

(4) 雑音指数：　10 dB

(5) IF 中心周波数：　160 MHz

(6) IF 帯域幅：　120 MHz

(7) ビデオ帯域幅：　50 MHz

4. 指示装置

このレーダ装置は，アンテナを高速で回転させることが特徴の一つになっている。アンテナを高速で回転させると，画像の毎秒像数が増え，画像の輝度が上がる。一方，(1)ヒットパースキャン及び画像を構成する

掃引線数の減少，(2)角度信号の高速伝送，に対する配慮が必要である。

アンテナの回転速度と，送信繰り返し周波数の関係から，画面の周辺部分において，1本1本の掃引線を確認できる程度になるので，送信繰り返し周波数とアンテナの回転との同期をとり，各掃引線が静止した状態で観測できるようにした。角度信号は，アンテナの回転軸に直結したレゾルバにキャリアを通し，その2相出力を同期検波するmodulator-demodulator方式によって，高速伝送を行っている。

トリガ系及び角度信号系は，送受信装置及びアンテナとの関係上，送受信装置内に収容されている。指示機は送受信装置から，トリガ，ビデオ信号及び角度信号を受け，16インチCRT上にPPI画像を表示する。CRTには，レーダ用としては中位の残光特性を持つP12けい光体の電磁偏向静電集束管を用いた。

4.1 トリガ及び角度信号系統

4.1.1 トリガ系統

(1) トリガは，アンテナの回転に同期して発生させる。アンテナの回転速度500 rpm，送信繰り返し周波数(PRF)＝14,000 ppsとすると，1回転の間に発生するパルス数は1,680パルスである。すなわち，CRT上に1,680本の放射状の掃引が行われる。CRTの有効径を380 mmとすると，周辺部における掃引線の間隔は0.72 mmとなる。この間隔は掃引線の太さと視距離からみた場合，無視できない。

視力1.0で50 cmの距離から観測する場合の掃引線間のギャップは最大0.15 mmが要求される。画像輝度，コントラスト等の諸条件により一概には言えないが，この値を目安として掃引線数を決定することができる。掃引線の太さを考慮し，インタレースによって掃引線数を倍増すれば，掃引線間の間隔はCRT最外周においても0.08 mmとすることができる。以上の考察から，トリガはアンテナの回転に同期して2:1のインタレースとなるようにした。

(2) トリガ系は14 kHzを中心周波数とする可変周波発振器，1/10のカウンタ，位相差検出回路及び誤差増幅回路によって構成される位相同期回路によってPRFを得る。回転信号は角度パルスとして供給されるが，これは，9:2のギヤ比でアンテナに結合されたしゃ光円板で光電式検出器の光路を断続することによって発生する。しゃ光円板の歯数は，71歯にしてあるので，2回転に639パルスが発生する。このパルス周波数の1/2と可変周波発振器の発振周波数の1/10の出力を位相比較して，その誤差出力で可変周波発振器を制御するので，

PRF×1/10＝毎秒回転数×歯数×ギヤ比×1/2

の関係が成立する。また，

1回転当たりの掃引線数＝歯数×ギヤ比×5
＝1,597.5

となって，2:1のインタレースが実現される。したがって，1枚の画像を構成する掃引線は3,195本になる。

4.1.2 角度信号系統

(1) 偏向コイルを機械的に回転させてPPI掃引を行う場合は角度信号は，シンクロ信号として伝達され，指示装置には極座標形式で与えられる。固定コイル式のものでは，偏向信号は直角座標形式で与えなければならない。しかしこのレーダ装置では，アンテナの回転速度が極めて高いため，従来のサーボ追随方式によってレゾルバを回転させ角度信号を得ることは困難である。レゾルバをアンテナに直結することによって追随の問題は解決されるが，レゾルバとレゾルバ励振電源及びデモジュレータまでの距離が問題になるので，これらと角度信号分配器とを送受信装置内に収容した。これによって，レゾルバまでの距離を数m以内にすることができた。

(2) レゾルバの出力は，デモジュレータによってアンテナ方位角のサイン及びコサインに比例した電圧に変換し，分配器によって，各指示装置に分配する。

アンテナの回転速度は500 rpmであるから，角度信号は8.3 Hzの正弦波となる。レゾルバに供給するキャリアは，角度信号を正確に伝達でき，復調後のリップル含有率を－60 dB程度にできる周波数でなければならない。以上の点を考慮してキャリア周波数を20 kHzとした。

4.2 指示装置

4.2.1 設計の要点

(1) 指示装置は，コントロールタワーに設置されるので，高さ方向の寸法が制約され，コンパクトな設計にした。

(2) 用途上，移動式にする必要があるため，電源部を分離して重量を軽減し，キャスタを取付けて移動を容易にした。

(3) CRTは，フリッカを少なくして，できるだけ高い輝度を維持できるようにするため，P12けい光体の16インチ丸形を使用した。

(4) 監視対象が空港面であるということから，四つの固定レンジのほか，任意のレンジと掃引中心位置の組合せがプリセットできる五つのプリセットレンジを設け，押ボタン選択により，この中の一つをワンタッチ選択できるようにした。

(5) 信頼度，安定度を向上するために，集積回路を大幅に採り入れた設計とした。

(6) 点検・修理・調整が容易なように，回路は機能別にプラグインカードとし，テストポイントはカード前面に出した。掃引傾斜，輝度補正，プリセットレンジのプリセッティング等の調整器は全て調整パネルに集め，調整を容易にした。また，指示装置単体でも容易に点検，調整ができるように，内部トリガ試験用方位信号，テストマーカを内蔵した。

(7) 映像増幅器は，広帯域(50 MHz以上)，大振幅(35Vp-p以上)とするため，4セクションよりなる分布増幅器とした。

4.2.2 CRT

CRTには高解像度で高輝度のものが必要である。また，フィールド周波数が8.3 Hzになるため，けい光体の選定に当たっては，フリッカを減らすことが可能な残光特性のものを選ばなければならない。

P12けい光体は，10%残光時間が約210 msで，e^{10t}の減衰特性をもつ，オレンジ色を発光するけい光体である。

これの採用によって，フリッカをかなり軽減することができた。

解像度は，アノード電流200 μAにおいてline widthが0.011インチである。

5. む す び

従来のレーダの常識を破った，高速回転アンテナを用いた新形ASDEについて報告した。1973年には厳しい国際競争の結果，欧米の一流メーカを退けてカナダ運輸省にも採用され，アンテナ及び指示装置に改良を加えたものを製作し，現在トロント国際空港で実用化のための評価試験を受けている。カナダに引き続き諸外国からの引き合いも活発になってきている外，東京国際空港，名古屋空港のASDEの更新も計画されており，今後もこの機種の改善に努力を継続する所存である。

終わりに，このレーダの製作にご協力をいただいた関係者各位に感謝の意を表す次第である。

レーダ技術の民生応用

北原照義*・古東啓吾**・伴　和紘**・森中明善**・野田博司***

1. まえがき

マイクロ波半導体素子及び集積回路技術の進歩により，マイクロ波の発生が容易になり，新しい応用分野が急速に開拓されつつある。

これまではマイクロ波の発生にはマグネトロン，クライストロン等が用いられていたが，最近はガン発振器，インパット発振器等が開発され，低電力ではあるがミリ波帯まで実用化されている。また，受信機についてもMIC化された低雑音ミキサが製品化されており，近距離用であれば容易に全固体化レーダが製作できるようになった。

当社ではこのようなマイクロ波半導体素子を使った全固体化レーダの応用製品としてレーダスピードメータ，天井クレーン衝突防止装置等を製品化し，自動車用マイクロ波センサ，救命用ビーコン等を現在開発中で，以下これらの現状について述べる。

2. レーダスピードメータ

当社のレーダスピードメータは，警察関係用途あるいは鉄道貨車操車場用として1,000台以上の実績を持ち業界第1位を誇るものである。レーダスピードメータはCWドップラレーダの一種で，車両あるいは貨車に電波を照射し，その移動速度に応ずる電波のドップラ周波数偏移を検知して速度を測定する装置である。

2.1 動作

装置の基本ブロックを図1.に示す。発振器は小電力マイクロ波発振器として広く使用されているガン発振器を使用し，無変調でアンテナから目標へ照射する。アンテナは送受共用であり，車両などの受信信号はミキサで発振器出力の一部と周波数混合され，ドップラ周波数偏移分の信号が得られる。この周波数 fd は，

$$fd=\frac{2vf_0}{C}\cos\theta$$

v：移動速度，C：電波伝ぱ(播)速度

f_0：発振周波数，θ：電波の投射角

として表され，通常の車両速度では可聴領域の周波数となる。この周波数信号が速度に比例した周波数を持つため，カウンタで周波数測定して，速度に換算する。発振周波数精度が良いため，周波数 fd の測定による速度測定値は高精度である。

2.2 応用例

2.2.1 警察関係用途用

これは速度測定用RS-7形シリーズとしてよく知られているもので図2.にRS-7ED形の外観を示す。

RS-7ED形の特長は，表示器に液晶を使用し炎天下でも十分見やすくなったこと，サーマルプリンタを使用し，高速なプリントができることなどである。なおRS-7ED形の送受信装置だけを小形にして，車両に取付けられるよう変更したものにRS-26形がある。

2.2.2 貨車操車場用

貨車操車場（ヤード）用としては，既に全国5カ所の自動化操車場へ納入し，営業運転中である。用途は貨車の速度測定であり，速度値に応じリターダ（貨車減速器）を動作させ，最適速度に貨車速度を制御し，連結，仕分け等の自動化の一端を担っている。この装置のセンサ部分（高周波部）を図3.に，主要性能を表1.に示す。ヤード用

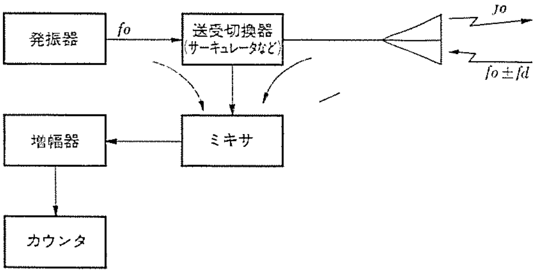


図1. レーダスピードメータの基本ブロック図

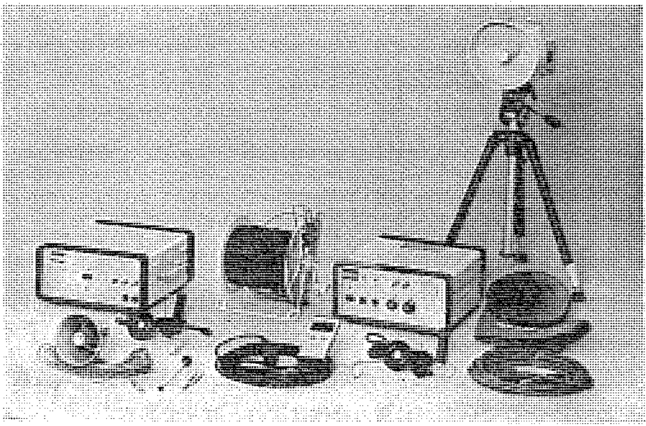


図2. RS-7ED形レーダスピードメータ

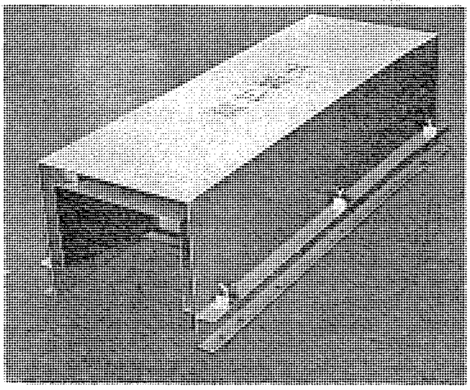


図3. ヤード用レーダスピードメータ高周波部

表1. ヤード用レーダスピードメータの基本性能

	項目	性能
1	送信周波数	10.525 GHz±12 MHz
2	送信出力電力	25～60 mW
3	速度測定範囲	0.5～10 m/s
4	最大測定可能距離	45 m 以上

* 鎌倉製作所　** 通信機製作所　*** 京都製作所

に軌道内に設置するため対環境性と自動化機器であることから信頼性に重点を置いて製作しており，近年はガン発振器を含めマイクロ波部をIC化したものを開発し，使用している。なお今後の課題としては，装置の小形化と高性能化等があり，目下検討中である。

レーダスピードメータの用途としては上記の2機種の外に，警告用電光表示板と組合せて，車両の速度測定により速度違反警告を自動的に行う装置も道路公団関係に納入している。

2.3 将来動向

レーダスピードメータの速度検知は，光，超音波，磁気，などに比較し，環境によって特性が変化しない，設置工事が簡単である，などの優れた特性を持っている。この優れた特性を生かし，交通管制用端末機器など，他方面への発展性が十分期待できるものである。

3. 電波警笛

接近した船舶の相互間で緊急時に必要な意志伝達手段としては，これまで帆船時代の音・光・手旗等の前時代的なものしかなく，それらは，現在の高性能・大形化・高速化した船と，過密した水域のもとでは有効な手段とはならなくなっている。早急に船舶の安全航行のための近距離の意志伝達手段開発及びルールの取決めが必要になり，この意志伝達手段として，マイクロ波を使用した簡易な通信方式の電波警笛が考えられ，(財)日本舶用機器開発協会と三菱電機との共同で開発を進めている。

3.1 動作

緊急時のみに使用し，他船への妨げにならないようにするためマイクロ波を使用し，送信に指向性をもたせることにより，当該船間だけで交信する。この装置のブロック図を図4.に示す。

信号はコード化しており，バラクタチューナ付ガン発振器により周波数変調波を送受している。装置の操作は次のとおりである。

(1) このままでは危険と判断したとき，相手船に送信アンテナを向けて送信キーを押す。

(2) 相手船で受信，送信コードに対応したランプ点灯及びブザーが鳴り，自船の意志が相手に伝わる。

(3) 相手船にて送信してきたと判断した船に送信アンテナを向けて送信キーを押す。

(4) 自船に相手応答が表示されブザーが鳴り相手の意志を知る。

3.2 仕様

主な仕様は次のとおりであり，図5.に外観を示す。

相互通報距離	最大2海里
送信出力	50 mW
送信周波数	13.5 GHz
最小受信電力	−80 dBm
送信アンテナ	15°
受信アンテナ	水平無指向

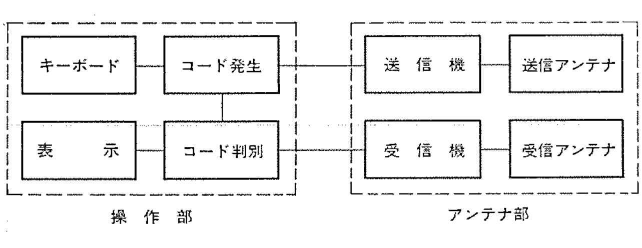


図4. 電波警笛ブロック図

図5. 電波警笛外観

4. 天井クレーン衝突防止装置

主として同一工場，同一ヤード上に2台以上の天井クレーンが走行する場合のクレーン相互間の衝突事故防止と，天井クレーン建屋間の衝突防止を図るため開発した二つの方式について述べる。

その一つ対向式は，ガン発振器の特徴及びマイクロ波(X-Band)の伝搬特性を利用して幾何学的に距離設定を行い，対向クレーン又は建屋との距離が10〜30 mに近づいたとき，これを検出する。他の一つ反射式は，パルスレーダ方式によって12〜50 mの距離検出を行うものである。

4.1 対向式

4.1.1 動作

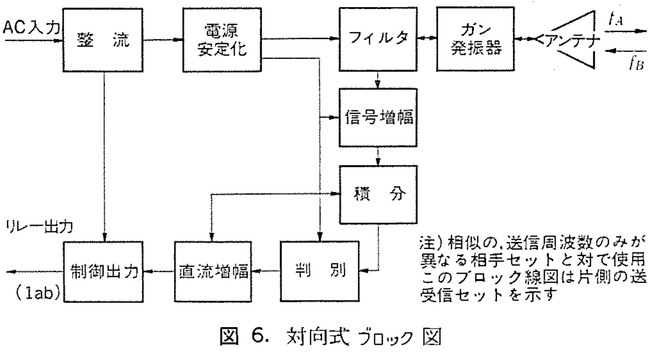
装置のブロック図を図6.に示す。

装置は相似の，送信周波数のみ異なる相手セットと対で使用する。ガン発振器には自己の発振と受信信号とを混合検波して，受信入力に比例した検波出力をバイアスに取り出す自己検波作用がある。この自己検波作用を利用して，図6.における信号増幅器の周波数特性と，自身のガン発振器発振周波数 f_A と相手セットのガン発振器周波数 f_B の周波数差とを一致させておくことにより，互いに相手からの受信の有無を，ガン発振器で送信と同時に処理の容易な低周波に変換して知ることができる。

4.1.2 仕様

対向式の仕様は次のとおりであり，その外観を図7.に示す。

検知距離	30 m (ただし10〜30 m任意設定可)
検知出力	1回路 A又はB接点出力
電源	AC 100/200/220 V
消費電力	25 VA
送受信子	ガン発振器



注) 相似の，送信周波数のみが異なる相手セットと対で使用 このブロック線図は片側の送受信セットを示す

図6. 対向式ブロック図

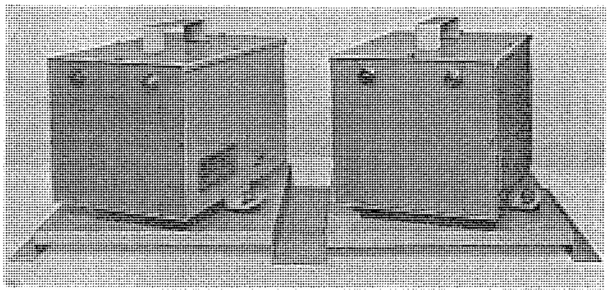


図 7. 対向式天井 クレーン 衝突防止用検出装置

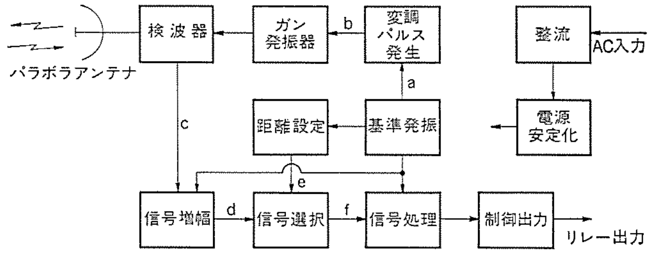


図 8. 反射式 ブロック 図

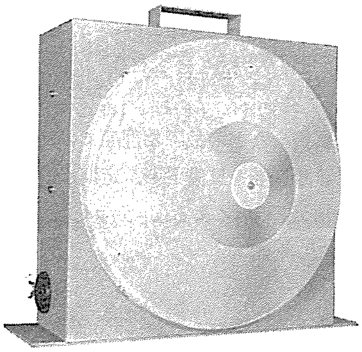


図 9. 反射式天井クレーン衝突防止用検出装置

発振周波数	10.525 GHz±10 MHz
発振出力	微弱
アンテナ	ホーンアンテナ　垂直水平 ビーム 角 15°
使用温度範囲	−10〜+60°C

4. 2　反射式

4. 2. 1　動　作

装置の ブロック 図を図 8. に示す。装置前方へ マイクロ 波 パルス を発射し，その パルス が物体（相手 クレーン）により反射され装置へもどってくるまでの時間で反射物体までの距離判別を行う パルスレーダ 方式を採用している。この装置は， バラクタチューナ 付 ガン 発振器を使用し FM パルス を発生し，同じ発振器を局部発振源として使用して，簡易な小形 レーダ を可能にした。

4. 2. 2　仕　様

反射式の仕様は次のとおりであり，その外観を図 9. に示す。

検知距離	2〜50 m　ただし検知距離調整範囲は 12〜50 m
検知出力	2 回路　A 又は B 接点出力
電　源	AC 100/200/220 V
消費電力	25 VA 以下
発振器	バラクタチューナ 付 ガン 発振器
受信素子	ショットキ ダイオード
発振周波数	10.525 GHz±20 MHz
発振出力	微弱
アンテナ	パラボラアンテナ　垂直水平共 ビーム 角 7°
使用温度範囲	−10〜+60°C

5.　救命用レーダビーコン

この装置は，船舶の航海用 レーダ を対象とした トランスポンダ 方式の救命用 レーダビーコン で，主として船舶に装備される膨脹式救命いかだに装着して海難事故における遭難者の早期発見や救助率，生存率の向上を目的としたものである。なおこの装置は昭和 44 年，（財）日本舶用機器開発協会の開発事業として発足した「救命用 ガンダイオード 発振器」の開発が発端となり，昭和 51 年 3 月に開発を完了した。以下この装置の概念，開発における留意点及び動作の概要などについて述べる[1]。

5. 1　装置の概念

不幸にして海難事故が発生した場合，捜索活動を助けるための現行手段としては，救命いかだなどに装備されている信号紅炎や日光信号鏡及び標識灯などがあり，経済的にも有効な手段であるがいずれも肉眼に頼るもので，霧中や夜間，悪天候における発見は至近距離でも困難である。

またレーダがいかに高性能であっても，ゴム を主体とする救命いかだは極めてその反射が少なく，海面反射に混じった エコー の識別は不可能に近い。この装置はこのような場合に極めて有効な捜索手段を提供するもので，救助船 レーダ の PPI 指示器上へ直接遭難者の方向，概略の距離を含めた遭難 シンボル を表示させることができる。図 10. に装置の外観，図 11. に表示された遭難 シンボル を示す。この装置による捜索は，昼夜を問わず，肉眼による方法に比べて捜索範囲も広がり，PPI 指示器上に示された方向へ操船することにより，最短距離で速やかに遭難者に到達でき，救助率を飛躍的に向上させることが期待できる。また，装置の受信機能を活用して遭難者自身も音響によって救助船の接近を知ることができるので，既設の信号

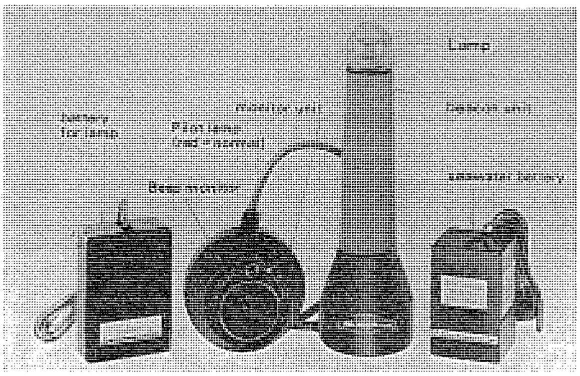
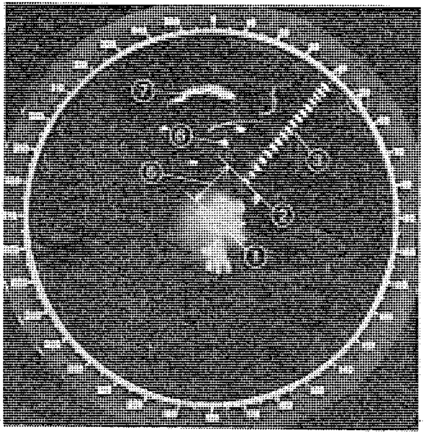


図 10. 救命用 レーダビーコン の外観（標識灯付き）



① 救助船の位置
② 救命用レーダービーコンを備えた救命いかだの位置
③ 輝点列で表示された遭難シンボル
④ 方向
⑤ 相対距離（最大誤差約 0.8 海里）
⑥ 通常の船舶のエコー
⑦ 陸地のエコー

図 11. PPI 指示器上の受信信号

紅炎などの発射のタイミング信号として利用できるほか，遭難者を励まして生存率を高めるなど心理的な効果も期待される。

5.2 開発における留意点

5.2.1 周波数帯及び遭難シンボル

現在最も多く普及しているXバンド帯水平偏波レーダを対象とし，現用の航海レーダのほとんどを占める周波数帯がカバーできるようにレーダ波受信パルスに毎回同期した周波数掃引方式を採用した。これにより捜索レーダ側に何らの改造や付加装置を要することなく，そのPPI上には約0.8海里ごとの20輝点列が表示される（図11.）。この遭難シンボルは人命救助を第一とする場面において使用される観点から，他のエコーと確実に区別がつく人為的なもので視覚的アピールの大きい見地から採用された。この目的の装置はIMCO NAV XIX/WP. 7/Add. 1 16. Feb. 1977, ANNEX Ⅲで条件つき使用が承認されている。有効到達距離は長いほうが良いのは当然であるが，特性上3cm波の伝播には各種の制約があるので見通し内伝播に的を絞った。

5.2.2 信頼性・保全性

使用部品数を極力減らして実績あるものを採用し，1,000 fit以下の故障率を目標としている。海難という特殊な状況の関係上，救命いかだ着水時の衝撃（大形船舶で100G以上），塩水，日射，気象変化など想像を絶する悪環境が考えられるのでこれらの耐環境性はもちろんのこと，救命いかだへの収納性を踏まえて小形軽量化を第一とした。

この装置はその性格上，一挙動操作を前提とし，救命いかだに装備された海水電池を海中に投入するだけで瞬時に作動するようにした。また保全上は部品選択や金属接合などの故障物理面での完全な対策を前提に，装置自身に自己診断機能を具備させ，定期点検時には別途準備する簡単なチェッカ（パルス波照射によるループテスト機能）によって良否の判別ができるようにした。

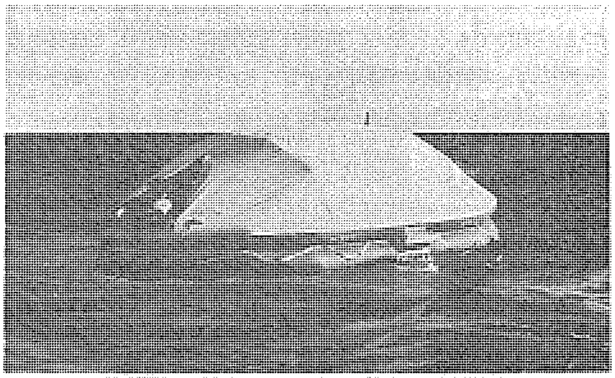


図12. 救命いかだへの取付け状況

表2. 救命用レーダビーコンの仕様

有効距離	4海里以上
標準アンテナ高	1.5 m
送信出力	50 mW (17 dBm) 以上
送受信周波数	9,385±65 MHz
変調諸元	レーダのパルス波に同期したきょ(鋸)歯状波の繰返しによる周波数掃引，掃引周期 10±1 μs，送信時間 毎パルス 200±5 s
アンテナ特性	水平偏波，水平面内無指向性，垂直面内30°以上
応答可能な最小受信電力	−35 dBm以下
動作電圧，電流	DC 20±4 V，平均 30 mA 以下
動作可能時間	40時間（ただし海水電池1個の場合）
保存温度	−30～+85°C
動作温度	−30～+66°C
重量	1 kg以下（本体部400 g以下，モニタ部100 g以下，海水電池500 g以下）

レーダ側の条件[3]
アンテナ高：13 m　　送信出力：10 kW
アンテナ利得：30 dB　　パルス幅：0.06～1 μs
実効最小受信電力：−80 dBm　　PRF　：500～3,500 pps
（一般的に初期の性能は −90 dBm 以下にあるが，その後の保守状況を考慮した）

5.3 動作の概要

救命いかだへの装着は，本体部を天幕頂部へ，モニタ部を内部の気柱へ，海水電池を天幕下部の収納部へあらかじめ取付けておく（図12.）。

遭難時に，救命いかだに乗込んでから，前記海水電池を海中に投下すれば装置は作動する。

モニタ部の発光ダイオードが点灯すれば，この装置が待受状態にあることを示す。図13.の系統図により動作概要を説明する。

救助船又は付近を航行中の船舶がレーダを作動させていると，そのアンテナが回転指向されるごとに10～20ビットのパルス波が照射され，これがこの装置のトリガ信号となる。このトリガ信号によってマイクロ波発振器に内蔵されたガンダイオードとバラクタダイオードを励起して応答パルスが発射される。（特にマイクロ波半導体素子は，この装置の目的用途に適用できるものが市場にないため，当社の研究部門で特別に開発したものを採用した。）

同時にモニタ部のスピーカーがレーダの繰り返し周波数（PRF）に応じて数秒ごとに短い笛音を発し，近くに船舶が存在していることを

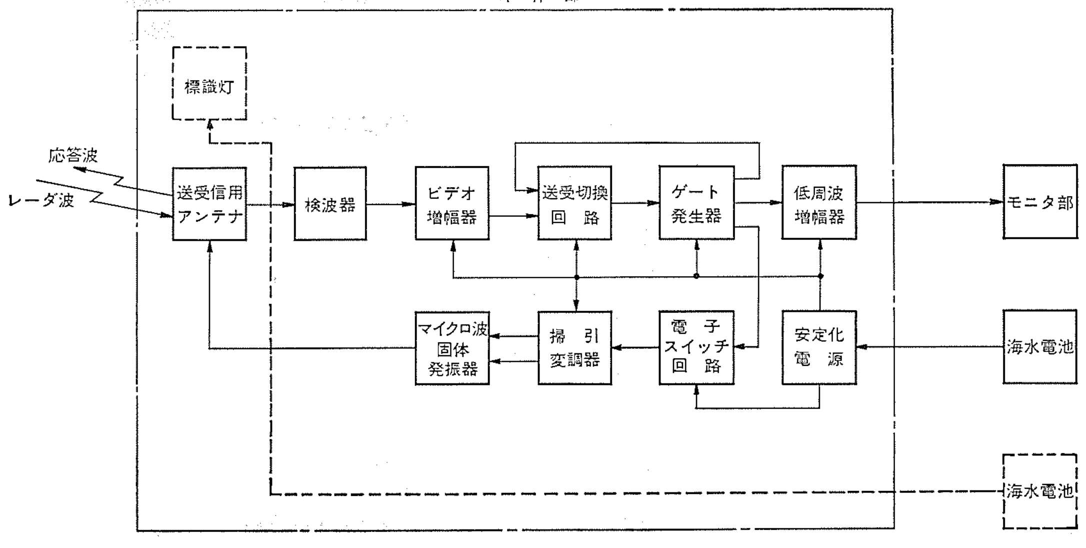


図13. 系統図

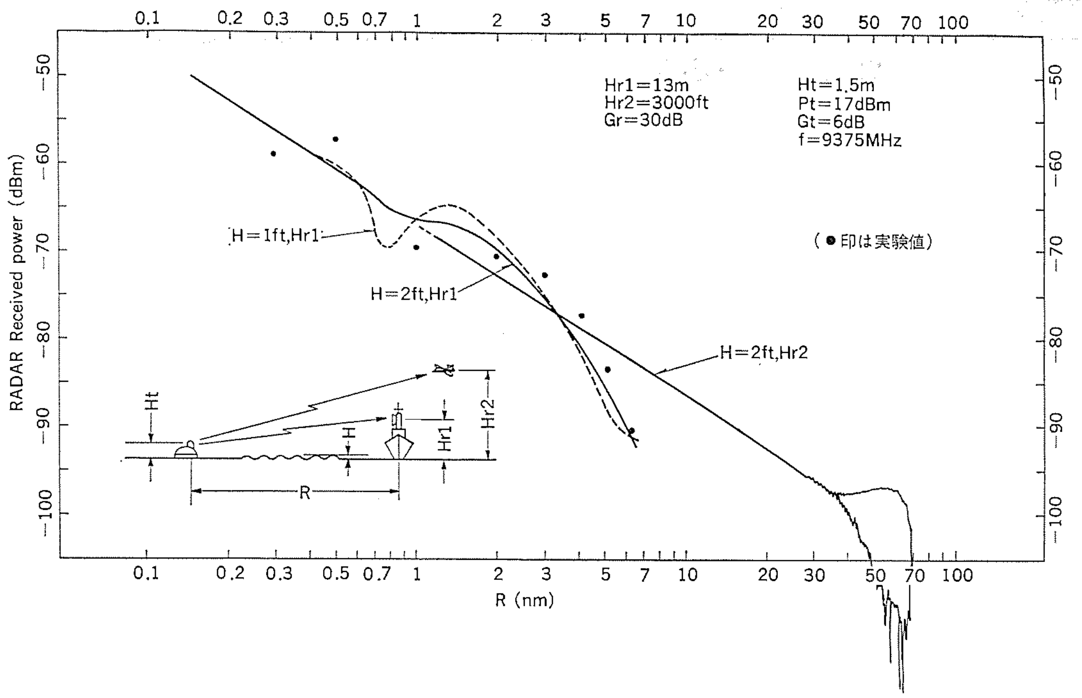


図 14. レーダ受信電力と相対距離の関係を示す電波伝播特性(2)(3)

知らせる。

2隻以上の船舶からパルス波が照射された場合にも応答し，おのおのPRFの違いに対応した音色がスピーカーから発せられ，何隻の船が近くにいるかも知ることができる。船が近づくにつれてレーダアンテナのメインビームのほかにサイドローブからの送信パルスでも応答するようになり，レーダのPPI指示器上では前記遭難シンボルは長く孤を描いたようになると同時にスピーカー音も長く続き出すので，信号紅炎を打上げるタイミング信号として活用できる。

海上実験は前記「救命用ガンダイオード発振器の開発事業委員会」の指導のもとに行った。この実験は遭難の場面を想定して前記のように供試救命いかだを投下させ，その後船は救命いかだから遠ざかり再び回収するまでの往復過程において，各距離に対する応答信号の受信電力を，指示器で測定，観測した。

この装置の信号をレーダで受信するとき，その受信電力は相互間距離の2乗に反比例するが，実際には波浪の高さと，偏波面，空気中での吸収などの影響が加味される。図14.はこれらを含めた計算値を実験値と対照させたもので，波浪が時間によって異なること，これによって偏波面の傾きが互いに生じることなどを考慮すれば，実験値は計算値とかなりよく一致している。

現在，遭難時に船舶が遭難通報を発してから消息が跡絶えることを防ぐために，中短波帯の救難用ラジオブイ（SOSブイ）が備えられ遭難時にこれを漂流させる手段もとられているが，より局部的な捜索段階において救助率を向上させるために一日も早く救命用レーダービーコンの装備化が望まれるところである。

6. エアバッグセンサ(4)

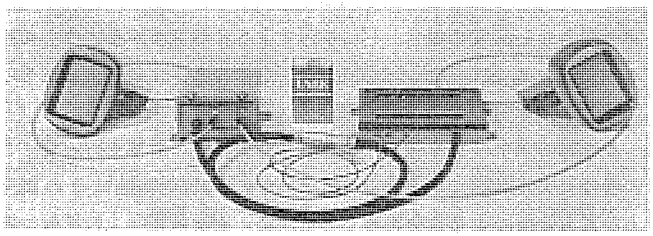
車の衝突事故から乗員を保護する手段として，エアバッグ又はシートベルトを作動させる方法が考えられている。衝突前に衝突必至条件をレーダにより検出し，この信号によって作動させるものであるが，その要求仕様を表3.に示す。

この外，自動車用部品としての価格，信頼性等も考慮する必要があり，できるだけ簡単な回路構成で，要求仕様を満たすことが最大の課題であった。現在開発されているこの装置の構成を図15.に示す。本品は，数次の試作を繰り返し，量産を前提として設計，製作したものである。

エアバッグセンサとしては，レーダ式の外に衝突時の衝撃を検出するGセンサ方式があり，これは予知時間が零のため，低速走行時の衝突には効果が期待されるが，被害の大きくなる高速走行時の衝突事故に備えるためには，レーダセンサのほうが優れているといえる。

表 3. 要求仕様

項目	仕様
予知時間	衝突前 20〜100 ms
警戒領域	車幅の 60〜70 %
相対距離	車の前方 1〜2 m
相対速度	20 mile/h (32 km/h) 以上
最小検知物標	街路灯支柱



左から，受信アンテナ，送受信部，信号処理部，送信アンテナ
図 15. エアバッグセンサの構成品

参考文献

(1) 木村，古東：捜索・救難活動用レーダビーコン，船舶，50，No. 2（昭 52-2）
(2) Skolnik : Radar Handbook, Mcgraw Hill.
(3) 飯島：救命用送信器，信学誌 B，58-B，7（昭 50-7）
(4) 清都，近藤，伴：自動車の衝突を予測するレーダセンサ，日経エレクトロニクス，No. 91，p. 82〜101（昭 49-9-23）

降雨観測レーダ用2周波数共用アンテナ

山田松一*・小川明義*・古田　治*・片木孝至**・別段信一***

1. まえがき

国際電信電話(株) (KDD) 茨城衛星通信所において，開口径7mの ホーンリフレクタ フィード カセグレンアンテナ を使用した，2周波 (5.265 GHz/13.85 GHz) レーダ 方式による降雨減衰の連続測定が行われている。その結果，特に雨の強い場合上記2周波での アンテナ パターン（半値幅はそれぞれ 0.5°/0.2°）の相違が問題になる程，降雨媒質の不均一性の大きいことが判明した。そこで7m アンテナ の上記2周波での放射 パターン 特に ビーム 能率をほぼ等しくすることが必要になり[1]，種々の方法を検討した結果，これを実現する方法として副反射鏡の形状のみを成形する方法をとり，ほぼ所期の性能を実現することができた。この論文はその設計方法及び測定結果を報告する。

2. 等ビーム能率を得る開口の波面

KDD 7m アンテナ は，図 1. に示すように ホーンリフレクタアンテナ を1次放射器とする カセグレンアンテナ である。当初ミリ波用 アンテナ として設計されたので，ホーンリフレクタアンテナ の開口径と副反射鏡の開口径は等しく，主・副反射鏡とも回転放物面鏡である。

この副反射鏡の鏡面を成形して，5.265 GHz と 13.85 GHz で等しい ビーム 能率を得るために，開口の波面をもとに副反射鏡の形状を決定する方法[2]をとった。開口の波面の形状として，図 2. に示すように，球面波面の場合，球面と円環面を組合せた波面の場合について検討した，球面波面の場合，パラメータ は図 2.（a）に示すように，球面波がその中心に張る角の半分 θ_a のみであり，球面と円環面を組合せた波面の場合，（b）に示すように球面波がその中心に張る角の半分 θ_a 及び波面の球面部分に対応する主反射鏡部分がその焦点Fに張る角の半分 ψ_1 である。

これらの パラメータ を種々に変化して放射特性の計算を行った。この場合1次放射器である ホーンリフレクタアンテナ の放射特性はその鏡面上の電流分布による放射電界として求め，副反射鏡面上の反射は幾何光学的に行われるものとして主反射鏡面上の電流分布を求めた。アンテナ の放射特性は，この電流を波源とする放射電界を計算して求めた。なお副反射鏡及びその支柱による ブロッキング 効果は考慮していない。

放射特性の計算には 図 3. に示す座標系を用いた。1次放射器が ホーンリフレクタアンテナ であるので，ZX 面を Longitudinal 面，YZ 面を Transvevse 面と呼ぶ。ビーム 能率は Z 軸を中心とする或る角度範囲内に放射される電力と，アンテナ から放射される全電力の比と定義される。この アンテナ の放射 パターン は Longitudinal 面で非対称であるので，P における放射電界 $E(\Theta, \Phi)$ を次のように展開する。

$$E(\Theta, \Phi) = E_0(\Theta) + E_1(\Theta)\cos\Phi + E_2(\Theta)\cos 2\Phi \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで $E^2(\Theta, \Phi)$ が利得 パターン を示すように係数を定める。この場合，Z 軸から Θ 以内の角度範囲の ビーム 能率 $\eta(\Theta)$ は次のようになる。

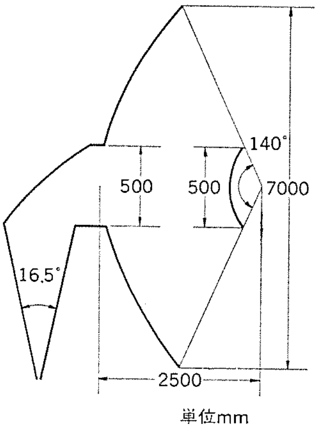
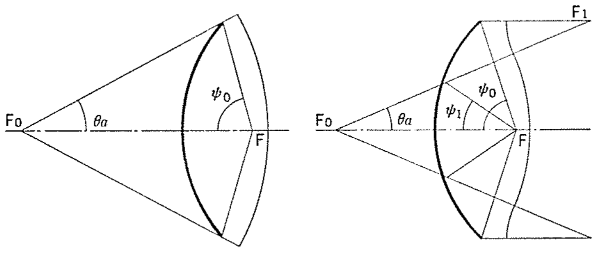


図 1. 7m アンテナ の形状



（a）球面　（b）球面と円環面の組合せ

図 2. 開口の波面

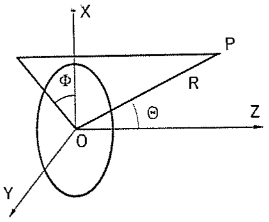
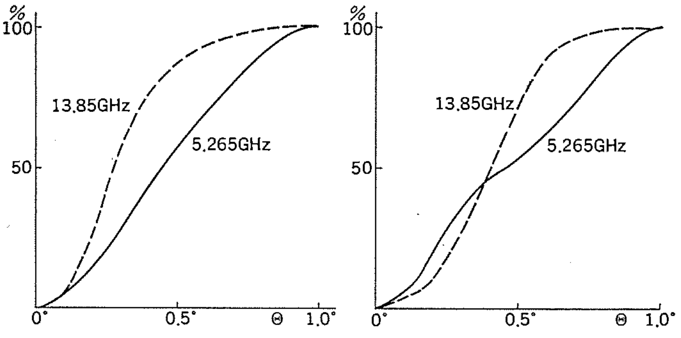


図 3. 観測点の座標系



（a）球面の波面　（b）球面と円環面の組合せの波面

図 4. ビーム 能率の計算結果（$\Theta = 1°$ の値で規格化）

$$\eta(\Theta) = \frac{1}{4T_1}\int_0^{\Theta}\int_0^{2T_1} E^2(\Theta, \Phi)\sin\Theta\, d\Theta\, d\Phi$$

$$= \frac{1}{2}\int_0^{\Theta}\left[E_0^2(\Theta) + \frac{1}{2}\{E_1^2(\Theta) + E_2^2(\Theta)\}\right]\sin\Theta\, d\Theta \cdots (2)$$

 * 国際電信電話(株)　** 三菱電機(株)鎌倉製作所（工博）　*** 同 通信機製作所

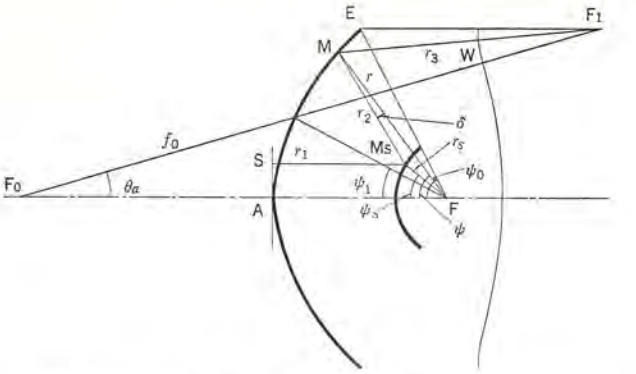


図 5. 球面と円環面の組合せの波面に対応する副反射鏡

種々の場合についての計算の結果，開口の波面の形状として球面を用いた場合，パラメータ $\theta_a=0.6°$ の場合が最適であり，また球面と円環面の組合せを用いた場合，パラメータ $\theta_a=0.05°$，$2\psi_1=40°$ の場合が最適となった。これらの場合のビーム能率を $\Theta=1°$ の値で規格化したものを図 4. に示す。これらを比較して，最終的には球面と円環面を組合せた波面による設計を採用した。

3. 副反射鏡の形状

副反射鏡の形状は波面の形状より光路程一定の原理を用いて決定される。図 5. に示すように主反射鏡の焦点を F，頂点を A，端を E とし，波面の球面部分の中心を F_0，円環面の中心を F_1 とし，F_1E が Z 軸に平行となるようにする。アンテナの形状は，次のパラメータを与えることによって決まる。

D：主反射鏡の直径

d：副反射鏡の直径

ψ_0：主反射鏡の開口角の半分

ψ_1：波面の球面部分に対応する主反射鏡部分が焦点に張る角の半分

θ_a：波面の球面部分がその中心に張る角の半分

これらの値より，F_0F_1 の長さ f_0，FA の長さ r_0，FF_0 の長さ R_0 は次のように決まる。

$$\left.\begin{aligned} f_0&=\frac{D}{2}\cdot\frac{1}{\sin\theta_a}\\ r_0&=\frac{D}{4}\left(\frac{1+\cos\psi_0}{\sin\psi_0}\right)\\ R_0&=2r_0\left(\frac{\sin\psi_1}{1+\cos\psi_1}\right)(\cot\theta_a+\cot\psi_1)\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(3)$$

1次放射器の開口面上の点 S より出た光線が，副反射鏡面上の点 M_S，主反射鏡面上の点 M で反射されて開口の波面上の点 W に至るものとし，FM を r，SM_S を r_1，M_SM を r_2，MW を r_3，$\angle$AFM を ψ，$\angle AFM_S$ を ψ_s，$\angle M_SMF$ を δ とすれば，$\psi_1\leqq\psi\leqq\psi_0$ の場合，これらの間には次のような 6 個の関係が成立つ。

$$\left.\begin{aligned} &r_1+r_2+r_3=C_1\ (\text{定数})\\ &f_0\sin\theta_a=r\sin\psi+r_3\sin\delta\\ &f_0\cos\theta_a=R_0-r\cos\psi+r_3\cos\delta\\ &r\sin\psi=r_s\sin\psi_s+r_2\sin(\psi+\delta)\\ &r\cos\psi=r_s\cos\psi_s+r_2\cos(\psi+\delta)\\ &r_1+r_s\cos\psi_s=r_0\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(4)$$

上式で未知数は r_1，r_2，r_3，r_s，ψ_s，δ の 6 個であるので，これを解いて次の結果が得られる。

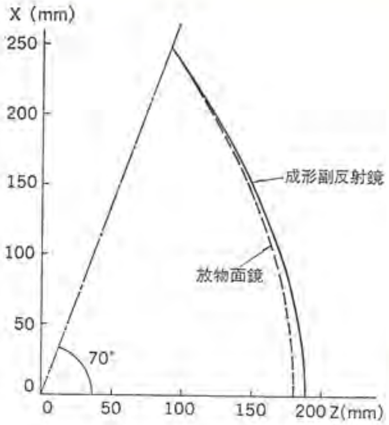


図 6. 副反射鏡の形状

図 7. 副反射鏡と電波吸収板

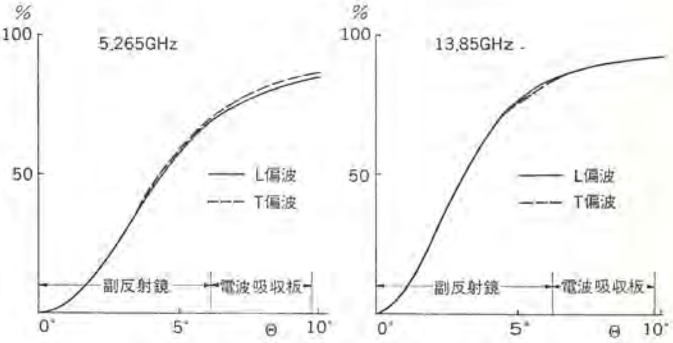


図 8. 1次放射器のビーム能率（計算結果）

$\psi_1\leqq\psi\leqq\psi_0$ の場合

$$r=\frac{2r_0}{1+\cos\psi}\quad\cdots\cdots(5)$$

$$\left.\begin{aligned} r_3&=\sqrt{(f_0\sin\theta_a-r\sin\psi)^2+(f_0\cos\theta_a-R_0+r\cos\psi)^2}\\ \sin\delta&=\frac{f_0\sin\theta_a-r\sin\psi}{r_3}\\ \cos\delta&=\frac{f_0\cos\theta_a-R_0+r\cos\psi}{r_3}\\ r_2&=\frac{C_1-r_3-r_0+r\cos\psi}{1+\cos(\psi+\delta)}\end{aligned}\right\}\quad(6)$$

$$\left.\begin{aligned} r_s&=\sqrt{r^2+r_2^2-2rr_2\cos\delta}\\ \sin\psi_s&=\frac{r\sin\psi-r_2\sin(\psi+\delta)}{r_s}\\ \cos\psi_s&=\frac{r\cos\psi-r_2\cos(\psi+\delta)}{r_s}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(7)$$

$\psi\leqq\psi_1$ の場合式（6）の代わりに次式を用いる。

$$\left.\begin{aligned} l&=\sqrt{R_0^2-2R_0r\cos\psi+r^2}\\ r_3&=R_0-l\\ \sin\delta&=\frac{r\sin\psi}{l}\\ \cos\delta&=\frac{R_0-r\cos\psi}{l}\\ r_2&=\frac{C-r_3-r_0+r\cos\psi}{1+\cos(\psi+\delta)}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(6)'$$

定数 C，C_1 は次のようになる。

$$\left.\begin{aligned} C&=r_0+\frac{1}{2}(D-d)\left(\frac{1+\cos\psi_0}{\sin\psi_0}\right)-\frac{D}{2}\left(\frac{\sin\theta_a}{1+\cos\theta_a}\right)\\ C_1&=C+f_0-R_0\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(8)$$

表 1. 副反射鏡，電波吸収板からのスピルオーバ

周波数 (GHz)	偏波	副反射鏡のスピルオーバ能率*	電波吸収板からの溢出電力
5.265	Long.	67.89 %	16.02 %
	Trans.	69.64	14.05
13.85	Long.	84.24	8.11
	Trans.	83.75	8.14

注 * 1−(副反射鏡からの溢出電力)

表 2. ビーム内電力積分による利得 (dB)

周波数	5.265 GHz		13.85 GHz	
積分範囲	±1.8°		±1.2°	
偏波	Long	Trans.	Long.	Trans.
積分による利得	48.70	48.55	44.44	44.72
スピルオーバ*	−1.68	−1.57	−0.74	−0.77
計**	47.02	46.98	43.70	43.95
計算値 (計算値との差)	46.65 (0.37)	46.69 (0.29)	47.69 (−3.99)	47.83 (−3.88)

* 表 1. のスピルオーバ能率より算出　** 積分による利得とスピルオーバの和

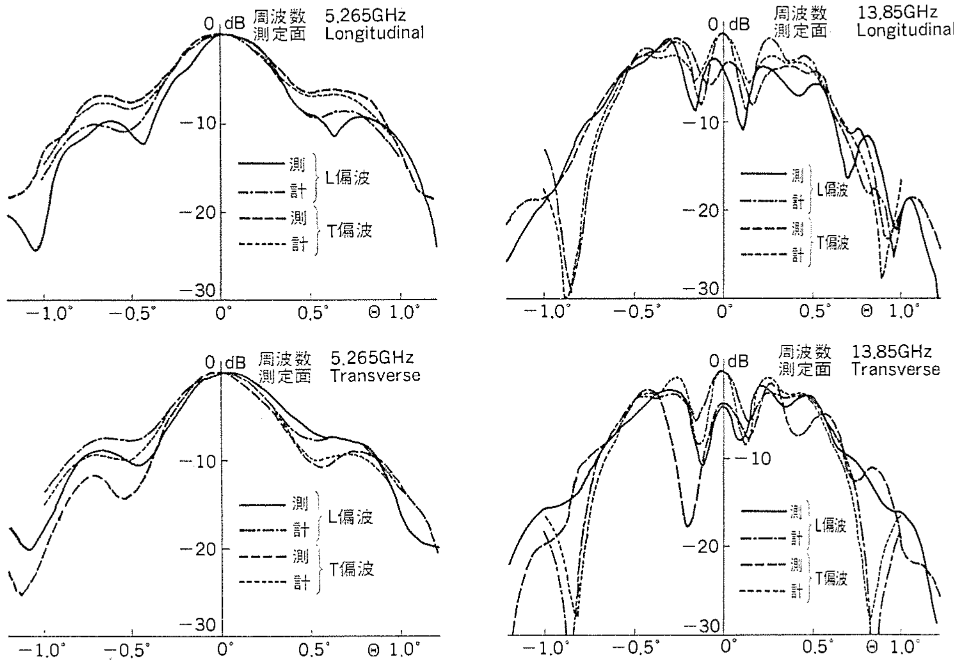


図 9. 放射パターンの測定結果と計算結果

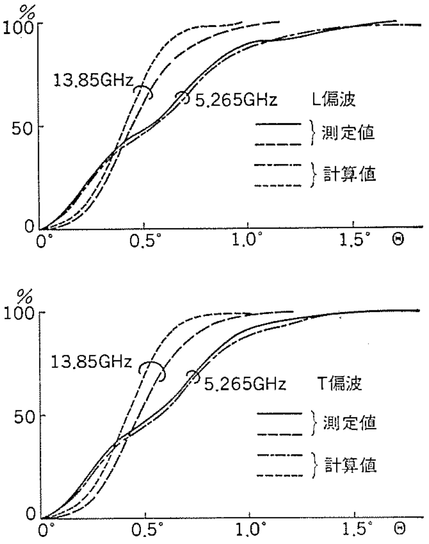


図 10. ビーム能率の測定結果と計算結果

$\theta_a=0.05°$, $2\psi_1=40°$ の場合の副反射鏡の形状ともとの形状を比較したのが図 6. である。その差は中央部で 9.93 mm である。

実際には 5.265GHz における副反射鏡からのスピルオーバが主ビームに影響するのを防ぐ目的で，直径 800 mm の電波吸収板を図 7. に示すように副反射鏡の後に設けてある。この場合主反射鏡の頂点Aから副反射鏡を見込む角の半分は 9.7° となる。図 8. に1次放射器のビーム能率の計算値を示す。また副反射鏡からのスピルオーバ能率，及び電波吸収板を設けてもなお後方にいつ（溢）出する電力を表 1. に示す。

4. 放射特性の測定結果と計算結果の比較

放射特性の測定は，KDD 茨城通信所で 5.5 km 離れた石尊山に対向アンテナを設けて行われた。放射パターンの測定結果を計算結果とともに図 9. に示す。この放射パターンの測定結果より，ビーム内電力積分によって求めた利得を表 2. に，ビーム能率を求めた結果を図 10. に示す。5.265 GHz と 13.85 GHz のビーム能率の差は 20 %以下である。13.85 GHz の測定結果から求めた利得が計算値より低いのは，ビーム幅が計算値より広いためであり，その原因として副反射鏡の後に設けられた電波吸収板が 13.85 GHz で余り有効でないこと，ブロッキングの影響があることなどが考えられる。

5. む す び

既設のホーンリフレクタフィードカセグレンアンテナの副反射鏡だけを改造して，5.265 GHz と 13.85 GHz でビーム能率がほぼ等しいアンテナを実現することができた。こうしたアンテナを用いることによって，降雨が電波伝ぱ（播）に及ぼす影響の周波数相関を測定することができる。

このアンテナの改造に当たりご指導，ごべんたつをいただいたKDD 研究所横井次長，KDD 本社佐藤次長に深謝する。

参 考 文 献

（1） 山田，小川，古田：二周波レーダによる降雨減衰の測定，信学会，技研報告，A・p. 77-21 (昭 52-6)
（2） 井上，片木：扇形ビーム複反射鏡アンテナ，信学論，56-B，〔I〕，p.p28-33 (昭 48-1)

特許と新案

帯電防止用ブラウン（実用新案 第1075147号）

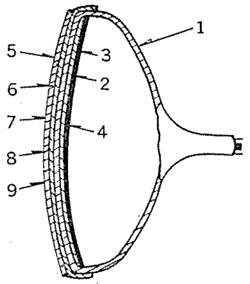
考案者　太田勝啓

この考案は，テレビジョン受像機などのブラウン管前面に帯電防止のために施される透明導電性皮膜を保護するようにした帯電防止用ブラウン管に関するものである。

従来，この種のものはブラウン管ガラスバルブの前表面に形成された透明導電性皮膜が，テレビジョンセットの使用中にブラウン管前表面を布などでふ(拭)くことにより次第にはく(剥)離してくるという欠点があった。

この考案は，このような欠点を改善するもので，図に示すように，ブラウン管ガラスバルブ（1）の前表面に形成された透明導電性皮膜（6）の表面（7）にアルカリ珪酸塩水溶液を塗布し，それを高温中で熱処理することにより強じん(靱)な保護皮膜（8）を形成するものである。

このような構成によれば，剥離しやすい透明導電性皮膜（6）を外的機械力及び薬品などによる腐蝕から有効に保護することができる。そして，アルカリ珪酸塩より形成された保護皮膜（8）は透明導電性皮膜（6）の表面抵抗により影響を受けるが，保護皮膜（8）の表面（9）を水を浸した布などで拭いてもその保護皮膜（8）の表面抵抗はあまり大きく変化しない。従って，保護皮膜（8）の表面（9）を布などで拭いた場合に，透明導電性皮膜（6）の導電性がある程度侵されても十分実用に耐え得るものが得られ，また帯電防止用ブラウン管として十分な性能があり，十分耐久性のあるものを作ることができる。



回路しゃ断装置（特許 第726273号）

発明者　山本清美

この発明は，引外し特性を負荷の保護特性に適応させ得るようにした回路しゃ断装置に関するものである。

従来この種の装置はバイメタルの形状や材質を変えることにより遅延特性を変えているが，この手段によれば大幅に特性を変える事は困難であり，このため，負荷の保護特性と回路しゃ断装置の動作特性とを適応させることができず，これを補うため他の保護機器を併用している。

この発明は図1に示すように時延引外し装置を構成するバイメタル（1）と並列に図3に示すように正の抵抗温度特性を有し所定の電流値で固有抵抗が急激に増加する熱感応抵抗素子（2）を接続したものである。

したがって，過電流が流れてある値に達すると熱感応抵抗素子の固有抵抗 r が急激に増加し，バイメタルの抵抗 R との関係が $r \gg R$ となる。そのため，$I_1 \fallingdotseq I$，$I_2 \fallingdotseq 0$ となり，熱感応素子にはほとんど分流せず，回路しゃ断装置を流れる過電流のほとんどはバイメタルを流れることになる。このためバイメタルの温度上昇率が大きくなり，回路しゃ断装置の動作時間が早くなるので，その動作特性は図2に示すように従来の回路しゃ断装置の動作特性曲線 a と違って負荷の保護特性曲線 c より低い曲線 b となり，負荷の保護特性を満足できるものである。

以上のようにこの発明は負荷に応じて熱感応抵抗素子を選ぶことによって，回路しゃ断装置の動作特性を保護特性に合わせることができ，他の保護機器を用いずに負荷を保護し得るものである。

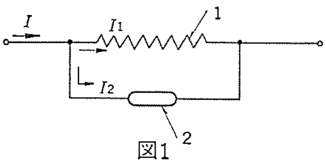


図1

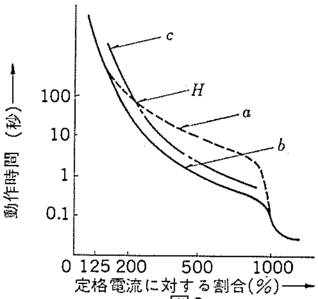


図2

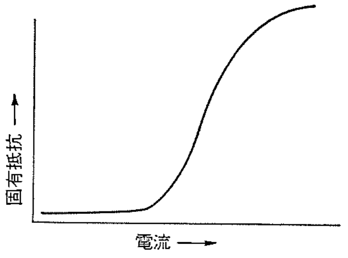


図3

過負荷保護回路 (特許 第770660号)

発明者　中司浩生

この発明は，直流電源に接続された任意の負荷回路において，その負荷抵抗が急激に小さくまたは短絡となるような瞬間的過負荷時に，電源と負荷とを切離してこれらの回路を保護する過負荷保護回路に関するものである。

従来一般に用いられている過負荷保護回路は図1に示すように直流電源(1)と負荷回域(6)との間にそう(挿)入する電源開閉リレー(2)，過負荷リレー(3)，過負荷リレー(3)の感度調整用可変抵抗(4)，自己保持リレー(5)からなる回路であり，負荷電流が異常に増大する過負荷時には，負荷電流の一部をその励磁コイルに流している過負荷リレー(3)が動作し，これにより自己保持リレー(5)が働いて，電源開閉リレー(2)を開放し，直流電源(1)と負荷回路(6)とを切離して，回路を保護する働きをする。

しかし，過負荷は負荷回路の異常に基づきほとんど瞬間的に起こるものであるが，従来の過負荷保護回路では，負荷電流が異常に増大した瞬間から過負荷リレー(3)が動作し，続いて自己保持リレー(5)，電源開閉リレー(2)が動作して電源が断たれるまでにはこれらのリレーの動作時間の総和で決まる時間遅れを生じ，従ってこの時間内に流れる異常大電流は防止することができないという欠点があった。

この発明は電源と負荷回路との間に一定量のバイアス電流を流したダイオードを負荷電流の方向とは逆向きに挿入することにより，瞬間的過負荷時に，負荷電流が上記バイアス電流値以上には増大しないようにするもので，図2に示すようにダイオード(7)，塞流線輪(8)，バイアス用直流電源(9)，バイアス電流調節用可変抵抗(10)を備えたものである。

このように構成することにより，正常動作時にはダイオード(7)をONさせ，過負荷時には負荷電流 I_L が急激に増大しバイアス電流 I_b に達すると同時にダイオード(7)をカットオフさせ，瞬間的に，過大電流を電源および負荷回路に流すことなく過負荷保護作用を行うことができる。

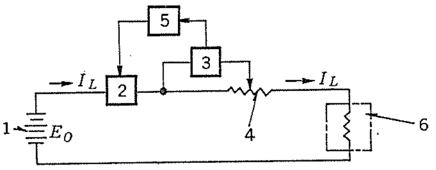


図1

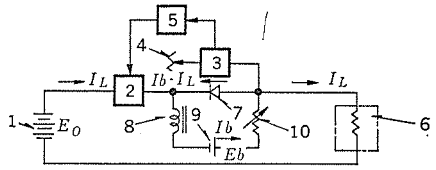


図2

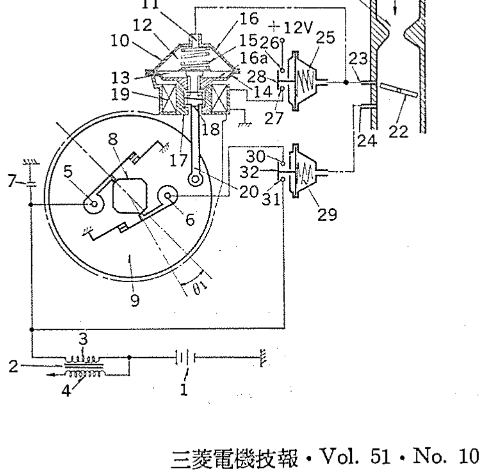
機関点火時期調整装置 (特許 第785202号)

発明者　大西正[illegible]義

この発明は，機関の各種運転状態に応じて機関点火時期を選択制御する機関点火時期調整装置に関し，特に機関点火系によりHC，NOx等の排気ガス有害成分の減少を計るようにしたものである。

すなわち，図に示すように，第1，第2，第3バキューム装置(10)(25)(29)をおのおの設け，まず機関のアイドル時，減速時においては第3バキューム装置(29)に加わるマニホールド負圧が大きくなり，その接点(32)を閉成して，進相側断続器(5)に対し遅相側断続器(6)を並列接続して，点火1次電流を遅相側断続器により制御することにより点火時期を遅らせて，アイドル，減速時に多量に排出される有害成分HCを減少させる。次に機関が中速中負荷運転状態になると，第2バキューム装置(25)に加わるバキューム負圧が大きくなり，その接点(28)を閉成して電磁ソレノイド(19)の通電回路を構成し，電磁ソレノイドを付勢してプランジャ(16a)を吸引し，ストッパ(17)で定まる位置まで変位させることにより点火時期を遅らせて，上記運転状態において多量に排出される有害成分Noxを減少させる。

この発明によれば，機関のアイドル，減速，中速中負荷などの所要負荷領域または所要の回転領域において，おのおの異なった複数の点火時期変化を確実に，かつ迅速に行える効果がある。



《MELCOM》70シリーズ・モデル35のハードウェアとオペレーティングシステム

出口博章*・深尾忠一郎*・北原拓也*・渡辺修亨*・稲坂朋義*

1. まえがき

ミニ コンピュータ の適用分野は拡大の一途をたどり，比較的小規模構成による データ 収集，端末制御といった分野から技術計算，プロセス 制御，事務処理，データ 通信，医療に至るまで，多様化を続けている。

このような情勢の中で，既に当社では昭和46年以来，国産最高級の性能を持つ《MELCOM》70によって，各分野に豊富な適用実績を積んできたが，その過程で得られた経験を生かし，ますます発展を続ける適用分野の需要にこたえるため，統一された アーキテクチャ のもとで体系化された シリーズ・マシン を登場させた。

新 シリーズ は《MELCOM》70/20・25・35の3機種からなり，いずれも従来からある《MELCOM》70との間で上位方向互換性を持っている。

《MELCOM》70 シリーズ・モデル 35は新 シリーズ 3 モデル の最上位機種であり，他の モデル との上位方向互換性を保ちつつ16 ビット・マシン 最大の限界である最大主記憶容量を64K語から128K語まで拡張し，拡大しつつある市場要求に十分こたえる高位 ミニコン である。

この論文では モデル 35の ハードウェア と基本 ソフトウェア のねらい，特長を述べる。

2. ハードウェアの特長

(1) 最大主記憶容量の拡大

最大128K語の主記憶を実装できる。

(2) ソフトウェア の負担を軽くする命令群

ビット，バイト，語，倍語，浮動小数点数値（単精度，倍精度），10進数値などあらゆる単位の情報を効率よく処理できる。

論理演算，シフト 命令，メモリ 転送命令など強力な命令が完備している。

(3) ファームウェア による演算高速化

浮動小数点数演算（単精度，倍精度）機構，10進数演算機構

(4) 強力な割込処理

内部1レベル（9要因），外部4レベル。割込処理用命令

(5) スタック 機構

スタック 命令，ハードウェア による スタック オーバフロー チェック

(6) 強力な入出力 チャンネル

プログラム 制御 チャンネル，マルチプレクサ チャンネル，DMA チャンネル，セレクタ チャンネル

(7) 豊富な入出力機器

(8) マルチ プログラミング に有効な メモリ プロテクション

(9) 《MELCOM》70 シリーズ の他の モデル との上位方向互換性

3. システム構成

図1.に《MELCOM》70 シリーズ・モデル 35の外観を，図2.に システム 構成を示す。

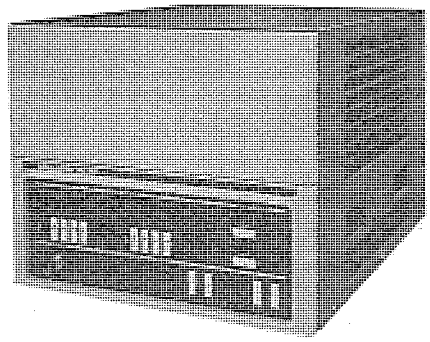


図 1. 《MELCOM》70 シリーズ・モデル 35 の外観

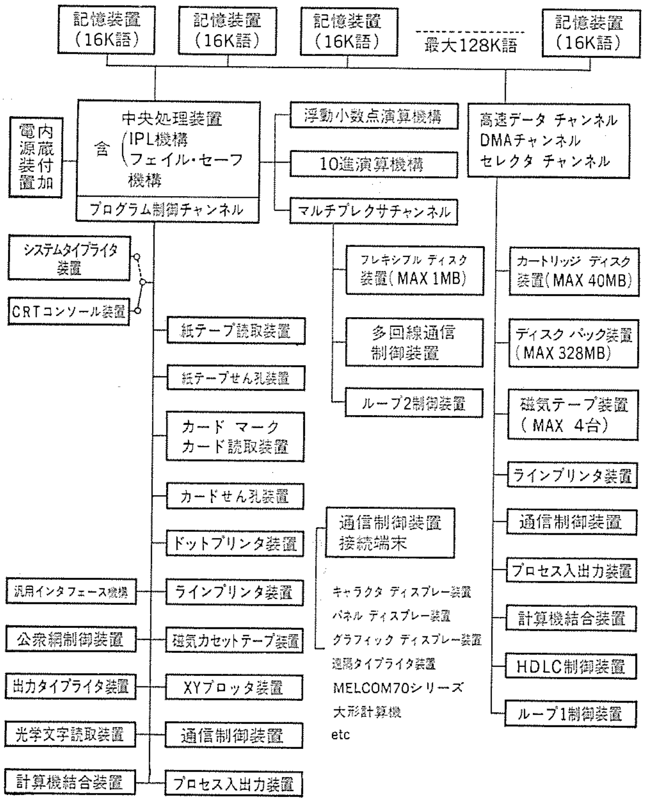


図 2. システム 構成

4. 中央処理装置

表1.に中央処理装置の諸元を示す。

中央処理装置を論理構成から大別すると演算制御部と マイクロ プログラム 制御部に分けられる。（図3.）演算制御部には，4 ビット スライス の バイポーラ LSI を中心に ショットキー TTL IC が使用されている。マイクロプログラム を格納する制御記憶としては，1K ビット／チップ の バイポーラ ROM を使用している。マイクロ プログラム の1語は48 ビット で構成され，命令の形式は図4.に示す種類がある。マイクロ プログラム は最大4K語まで実装可能であり，基本命令処理と マルチプレクサ チャンネル 処理のために1K語，更に単精度及び倍精度の浮動小数点演算命令処

* 計算機製作所

表 1. 中央処理装置諸元

中央処理装置 (CPU)

			MELCOM 70/35
主記憶	素子		n MOS LSI
	語長		16ビット+1パリティ+1スペアビット
	サイクルタイム		0.5 s
	記憶容量		16K～128K語
	増設単位		16K語
演算制御	素子		バイポーラ LSI, ROM 等
	制御方式		マイクロプログラム制御
	演算方式		並列2進法, 2の補数表示, 固定／浮動小数点
	命令	命令語長	1語及び2語
		命令数	74+14 (浮動小数点オプション)
		乗除算	標準
		ビット, バイト, 倍長処理	標準 8／16／32ビット
	データ形式	固定小数点	16／32ビット
		浮動小数点	32／64ビット
		論理演算	1／8／16ビット
	アドレス形式		6種 (直接, 相対, インデックス, 間接及びこれらの組合せ) 外にオート インデックス, イミーディエットあり
	アキュムレータ		4 個
	プッシュ ダウン スタック		最大 16組
	割込レベル		内部 9 外部 4
	演算速度	加減算 R-R	1.10 μs
		加減算 R-S	1.60 μs
		乗算	8.60 μs
		除算	11.75 μs
諸機能 (標準装備)			パリテイチェック, 不正アドレス検知, スタックオーバフロー検知, メモリ読出し再試行, メモリ μ 診断, IPL (STW, PTR, ELD), プログラム割込, フェイルセーフ機構(A 1329 の機能包含)
入出力制御	標準	プログラム制御チャンネル	転送幅 16ビット, 転送速度 4～40K語／秒
		マルチプレクサチャンネル	転送幅 8／16ビット, 転送速度 50K語 (又はバイト)／秒 最大レイテンシ 56.5 μs
	オプション	高速データチャンネル DMA	転送幅 16ビット, 転送速度 1.25M語／秒 最大レイテンシ 3.1 μs
		高速データチャンネル セレクタ	転送幅 16ビット, 転送速度 1.54M語／秒 最大レイテンシ 0.7 s
構造(基本シャーシ)	構造		ラックマウント形／テーブルトップ形
	外形寸法 重量	幅	480 mm
		高さ	400 mm
		奥行	590 mm
		最大重量	60 kg
	入出力制御装置収容スロット		4
設置条件(基本シャーシ)	周囲温度		0～40°C
	周囲湿度		10～90% RH
	入力電源		AC 100V ±10% 50／60 Hz
	最大所要電力		700 VA

CPU オプション

型名	仕様	
IPL機構	磁気ディスク, 磁気テープ, カードリーダ, カセット磁気テープ等任意の入力機器からのイニシャル プログラム ロードがスイッチ選択可能	
浮動小数点演算機構 (単精度／倍精度)	加減算	21.2 s (単), 30.3 (倍)
	乗算	43.6 μs (単), 142.4 (倍)
	除算	59.9 μs (単), 358.2 (倍)
10進演算機構	キャラクタ転送 加減算	58 μs (13バイト) 65 μs (5桁)

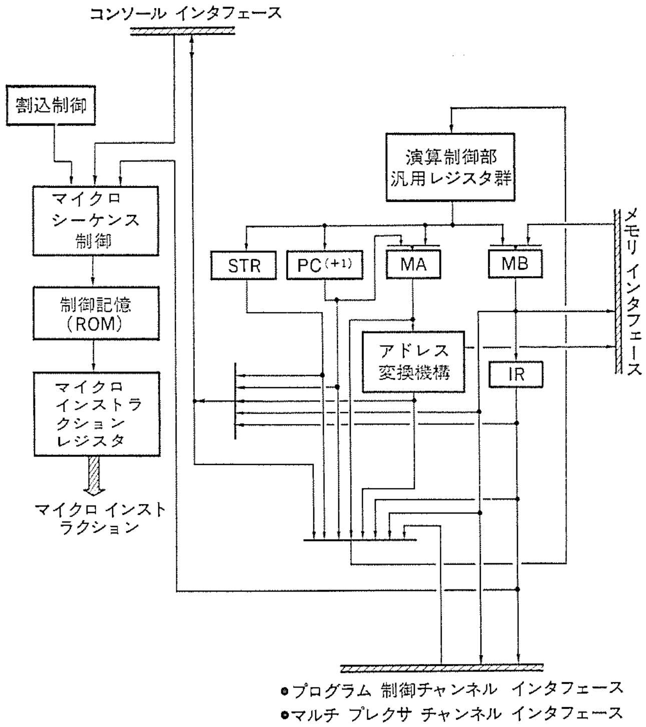


図 3. 中央処理装置の論理構成

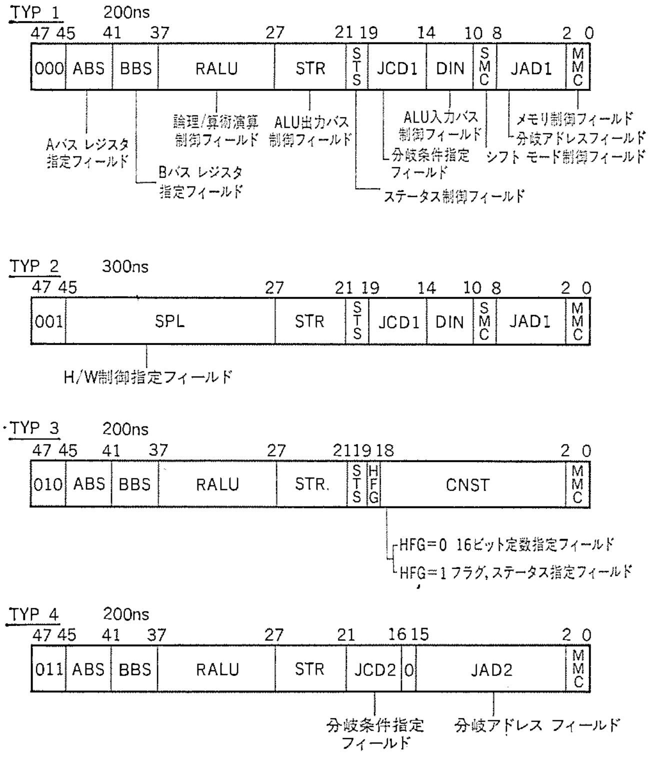


図 4. マイクロ 命令の形式

理のために768語を使用し, 10進演算命令処理のために768語を使用している。

5. アドレス変換機構によるメモリ拡張

1個の プログラム で使用可能な メモリ 領域を プログラム の論理 アドレス 空間といい, 一般に16 ビット マシン では最大64K語である。また ハードウェア 的に実装されている メモリ 領域を物理 アドレス 空間という。従来の ミニコン のように論理 アドレス 空間のほうが物理 アドレス 空間より

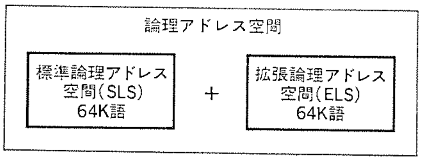


図 5. 論理アドレス空間

大きいか等しい場合には論理アドレスはそのまま物理アドレスに対応する。ところが逆にモデル35のように物理アドレス空間のほうが大きい場合，論理アドレスは一義的には物理アドレスに対応しないため，何らかの機構によって物理アドレスに変換する必要がある。この変換機構をアドレス変換機構という。

モデル35のアドレス変換機構は境界レジスタ (BR : Boundary Register) とリロケーションレジスタ (RR : Relocation Register) からなり，論理アドレス (LA) が境界レジスタの内容より大きいか又は等しいとき (LA≧BR)，論理アドレスとリロケーションレジスタの内容を加算し，これを物理アドレスとする。逆に論理アドレスが境界レジスタの内容より小さいとき (LA<BR)，論理アドレスをそのまま物理アドレスとする。

モデル35の変換機構の大きな特長は，プログラム領域，データ領域いずれにも使用可能な最大64K語の標準論理アドレス空間 (SLS : Standard Logical Address Space) の外に，データ領域として使用可能な最大64K語の拡張論理アドレス空間 (ELS : Extended Logical Address Space) を用意し，合計最大128K語の主記憶を1個のプログラムで使用可能としていることである。このためにSLS, ELSのおのおのの論理アドレス空間に対し，独立の1組のアドレス変換機構 (BRとRR) を用意し，プログラムリロケーション及び物理メモリの拡大を可能にしている。

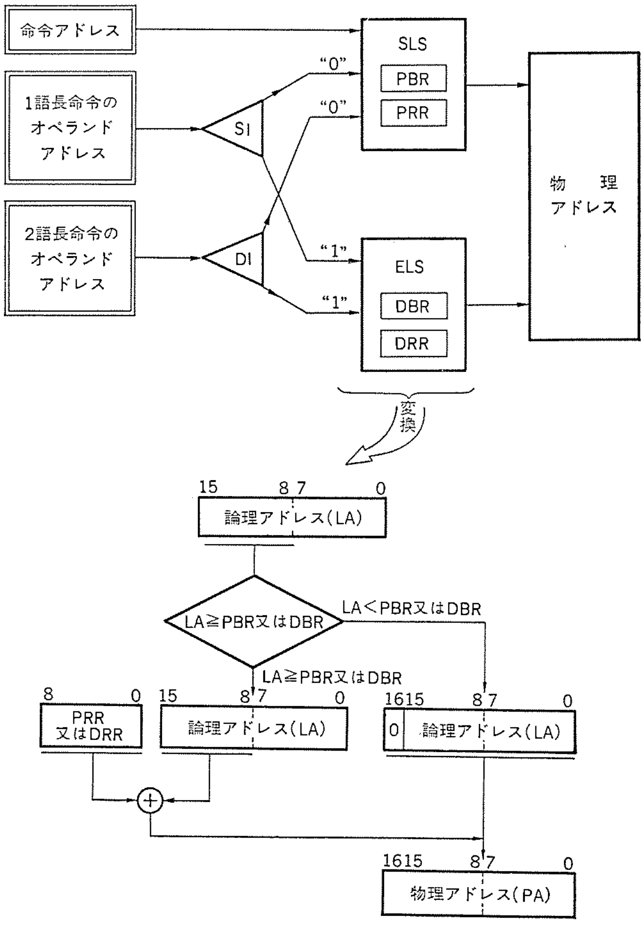


図 6. アドレス変換概念図

SLS {PBR : Program Boundary Register
PRR : Program Relocation Register

ELS {DBR Data Boundary Register
DRR : Data Relocation Register

(1) プログラム(命令)アドレスの変換

命令はSLSだけに置くことができ，PBRとPRRにより論理アドレスから物理アドレスの変換が行われる。

(2) データ(オペランド)アドレスの変換

オペランドはSLS, ELSのいずれにも置くことができ，その指定はう

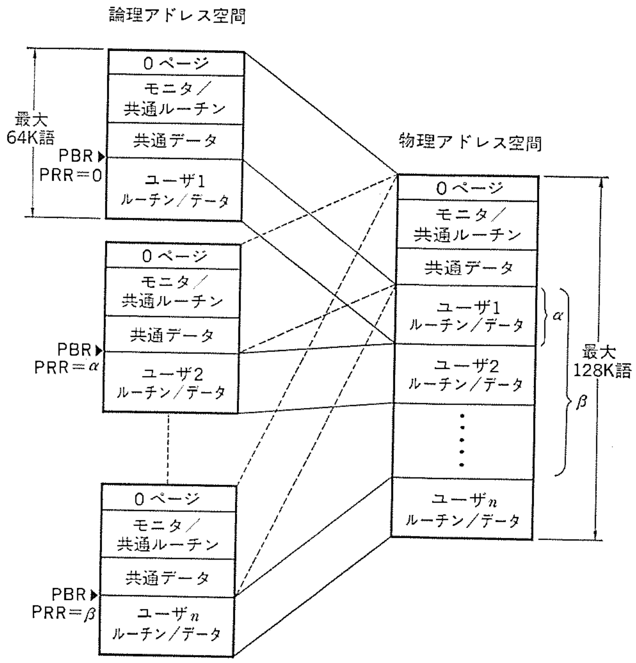


図 7. 主メモリ空間の使い方 1 (SLSだけ使用)

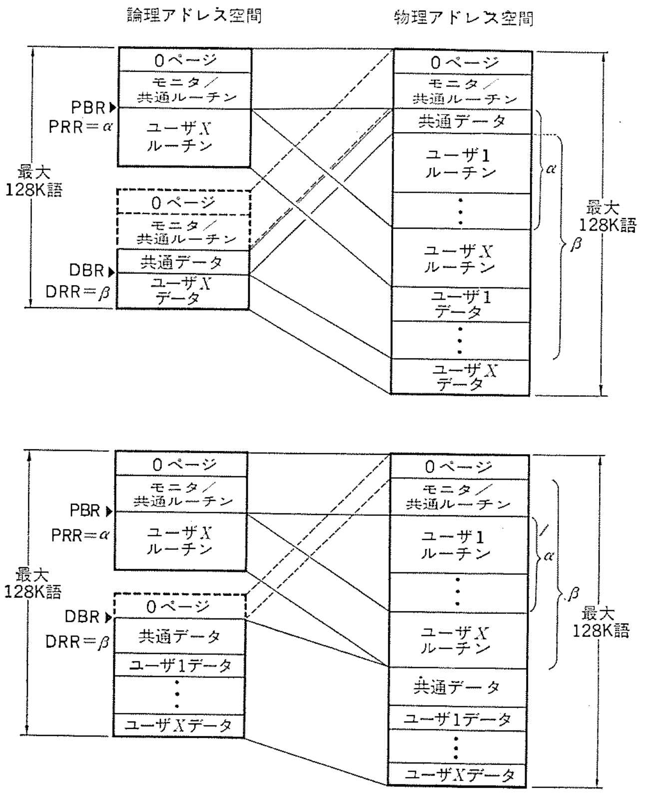


図 8. 主メモリ空間の使い方 2 (SLSとELSを使用)

ログラムステータスの SI (Single Word Instruction Status) ビットと DI (Double Word Instruction Status) ビットによって行われる。SI ビットが0のとき1語長命令のオペランドアドレスは SLS にあるものと見なされ，PBR と PRR により物理アドレスへの変換が行われる。SI ビットが1のとき1語長命令のオペランドアドレスを ELS にあるものと見なされ，DBR と DRR により物理アドレスへの変換が行われる。DI ビットの場合は2語長命令のオペランドアドレスが対象となるが，SI ビットと同様にオペランドアドレスはDI ビットが0のとき SLS に，1のときに ELS にあるものと見なされる。ただし，アドレス形式が相対アドレス形式の場合は，常に命令が置かれている番地からの相対アドレスであるので，必ず PBR，PRR により変換される。(図 6.) 主メモリ空間の使用例を図 7.，図 8. に示す。

6. 基本ソフトウェアのねらい

高位ミニコン，モデル 35 の最も特長的なことは，65 K 語を超える主記憶を実装できるようになったことである。しかし，モデル 35 が高位ミニコンと呼ばれるのは，単に主記憶容量が増加しただけではなく，機能的にも性能的にも従来のミニコンの概念を一新し，はん(汎)用中形機の領域に迫るものとなってきた点である。(表 1.)

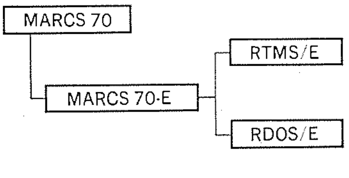
市場要求にこたえたハードウェアの機能拡張に対応して，基本ソフトウェアもハードウェア機能を十分生かし，応用分野の拡大に対処している。すなわち，モデル 35 のオペレーティングシステム (OS) ではオンライン，リアルタイム，タイムシェアリング，バッチの4次元の処理を同時に行えるマルチプログラミングの機能を持ち，言語も会話形 FORTRAN，リアルタイム FORTRAN，BASIC-E といった科学技術計算用のものから，マルチリビング用言語 BPL (Business Processing Language)，COBOL といったビジネスオンラインシステムを指向した事務処理用言語を完備し，すべての応用分野をカバーしている。

適用業務の地域的広がりに対しても HDLC (ハイレベルデータリンクコントロール) サポート機能，ループ状ネットワークを使ったデータ集配信システム，コンピュータネットワークシステムのサポート機能を用意し，オンライン機能を充実している。

7. MARCS 70-E

《MELCOM》70/35 では，モデル 20・25 で使用できる基本ソフトウェアはもちろんすべて使用できるが，128 K 語の主記憶をフルに活用するオペレーティングシステムとして，MARCS 70-E が用意されている。

MARCS 70-E は，ディスクなしシステム用に RTMS/E と，ディスク付きシステム用に RDOS/E を整えたソフトウェアシステムであり，モデル 20・25 の全オペレーティングシステムと上位方向互換性を持っている。RTMS/E は，機能的に見ると RDOS/E からバッチ処理機能を削除したサブセットになっている。以下に，RDOS/E について説明する。



MARCS : MELCOM All Round Adaptive Consolidated Software system.
RTMS/E : Extended Real Time Memory System.
RDOS/E : Extended Real Time Disk Operating System.

図 9. MARCS 70-E の構成

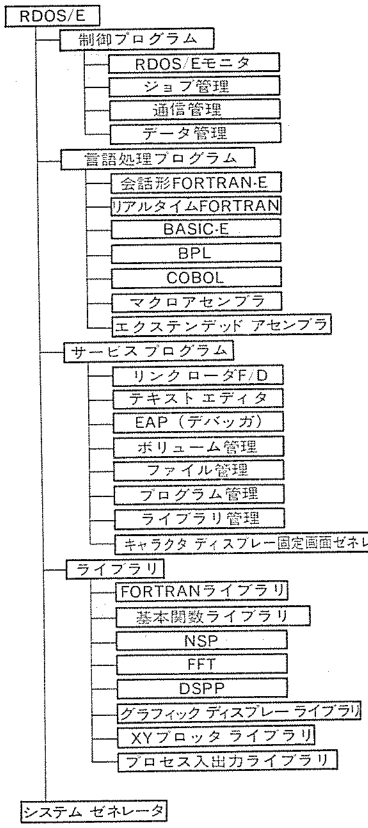


図 10. RDOS/E のソフトウェア構成

8. RDOS/E の構成

RDOS/E は汎用システムとして，オンライン処理，リアルタイム処理，タイムシェアリング処理，バッチ処理の並行処理機能を持つ汎用 OS である。RDOS/E のソフトウェア構成を図 10. に示す。

9. RDOS/E の特長

RDOS/E の主な特長を以下に述べる。

(1) 4次元多重処理

(a) オンライン処理： 遠隔端末装置を通信回線で結んで，問合せ，データ集配信，メッセージ交換等を行う。

(b) タイムシェアリング処理： 遠隔端末装置を通信回線で結んで会話形処理を行う。

(c) リアルタイム処理： アナログ入出力，ディジタル入出力，パルス入出力，割込み入力などの入出力装置を経由してデータ処理を行う。

(d) バッチ処理： 各種データの一括処理，プログラムのコンパイル，リンク等のスタックトジョブの処理を行う。

上記4次元の処理を並行処理する。

(2) システムの最適構成が容易

バッチ処理だけのシステムから，オンライン処理，タイムシェアリング処理，リアルタイム処理を含むフォアグラウンド，バックグラウンド並行処理システム，更にリアルタイム処理だけのシステムというように適用業務に最適なシステムを容易に構成できる。

(3) 強力なフォアグラウンド機能

(a) マルチタスク処理機能を持つ。最大 16 レベルの実行優先度制御を行い，各レベルには最大 256 サブレベルを設定できる。

(b) オンライン機能

(c) プロセス制御機能

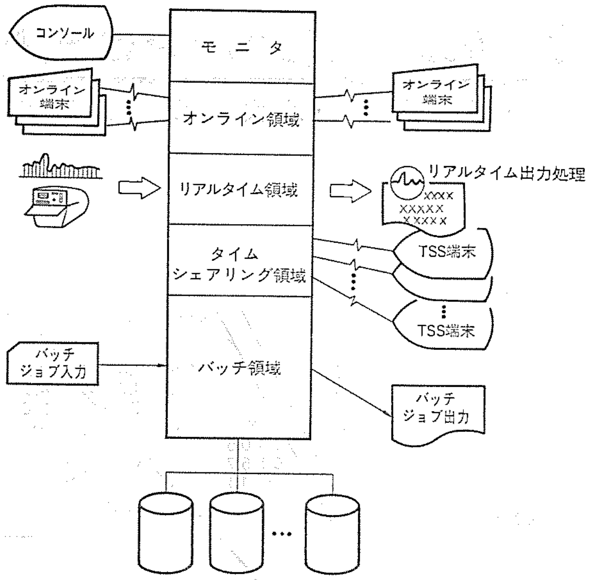


図 11. RDOS/E の4次元多重処理概念図

(4) 使いやすい バッチ 処理機能

(a) スタックト ジョブ の連続処理

(b) カタログド プロシジュア

(c) 豊富な サービス プログラム

(6) 豊富な高級言語

(a) 会話形 FORTRAN/リアルタイム FORTRAN/BASIC-E

(b) COBOL/BPL

(c) マクロアセンブラ/エクステンデッド アセンブラ

10. 豊富なパッケージ

10.1 NSP (Numerical Subroutine Package)

科学技術計算,統計計算で用いられる計算部分を 50 種以上の サブルーチン としてまとめたものである。構成は次のとおり。

(1)記述統計,(2)確率統計,(3)行列,(4)多項式,連立方程式,微分,積分,特殊関数,(5)多変数解析

10.2 FFT (Fast Fourier Transformation)

高速 フーリエ 変換を行う サブルーチン をまとめたものである。

(1)実数 データ の フーリエ 変換,(2)複素 データ の フーリエ 変換,(3) データ を逆2進に並び変える,(4)コンボリューション 法,(5)倍精度固定小数点数の フーリエ 変換

10.3 XY プロッタ基本サブルーチン

XY プロッタ に容易に描けるよう準備されたものである。

(1)ペン の上下,移動,紙送り,(2)英数字,特殊文字を描く,(3)実数を 10 進数で描く,(4)軸名称と目盛りのついた軸を描く,(5)点と点を線で結ぶ,(6)現在の ペン の位置と図形の尺度を求める

10.4 グラフィック ディスプレー ライブラリ (TCS)

グラフィック ディスプレー 装置に容易に図形が表示できるよう準備されたものである。

(1)画面消去,(2)ハード コピー 生成,(3)仮想 グラフィック (仮想 ウインドウ,縮小,拡大),(4)ダイレクト グラフィック,(5)英数字 データ 入出力,(6)ソフトウェア キャラクタ ゼネレータ

10.5 M 395/M 2397 図形処理パッケージ

M 395/M 2397 キャラクタ ディスプレー 装置の持つ図形表示機能を生かして,図形の作成,管理が容易に行えるよう準備されたものである。

(1)任意 パターン の設定,(2)図形 データ の作成,(3)画面管理 (表示,消去,色指定,ブリンク 指定)

10.6 DSPP (Digital Signal Processing Package)

各種計測処理を行うための データ 入出力から波形処理までを行う パッケージ である。

(1)FFT,高速 HAAR 変換,高速 WALSH 変換,高速 HADAMARD 変換,ウインドウ 処理,(2)コンボリューション,自己相関,相互相関(3)各種 ディジタル フィルタ

10.7 プロセス入出力ライブラリ

プロセス 機器に対する データ 入出力を容易に行えるよう用意されている。

(1)ディジタル 入力,(2)ディジタル 出力,(3)アナログ 入力,(4)アナログ 出力

10.8 キャラクタ ディスプレー固定画面ゼネレータ

キャラクタ ディスプレー の固定画面を容易に作成,修正できるよう用意されている。

(1) 位置,色,けた(桁)数指定

(2) フィールド 指定 (プロテクト,アンプロテクト,ライトペン)

(3) 字種指定 (数字入力領域,英数字 カナ 文字入力領域)

(4) けい(罫)線指定

10.9 HDLC

JIS の ハイレベル データ リンク 制御手順に基づく高速 バイナリ,データ 伝送を行うために用意されている。

(1) アンバランス 形手順 クラス

(a) 非同期応答 モード

(b) 正規応答 モード

(2) バランス 形手順 クラス

(a) 非同期平衡 モード

10.10 ループ

ループ 状 ネットワーク に接続された端末あるいは コンピュータ との伝送を効率よく行うために用意されている。

(1) LOOP 1

2 MB/s の性能を持ち,コンピュータ ネットワーク の コンピュータ 間超高速 データ リンク を可能とする。

(2) LOOP 2

データ 集配信,リモート プロセス データ 入出力,POS 端末制御等の経済的な伝送を可能とする。

11. む す び

以上《MELCOM》70/35 の特長などを説明した。モデル 35 では アーキテクチャ,命令の数,機能,性能ともに高度なものとなっており,汎用機並みの命令を備えるようになった。一方,それに付随する オペレーティング システム についても強力な多重処理機能を備えており,今後,汎用小,中規模の計算機 システム として十分威力を発揮するものと思われる。

参 考 文 献

(1) 深尾:《MELCOM》70 の ハードウェア,三菱電機技報,48, No. 6 (昭 49)

(2) 田原:《MELCOM》70 の基本 ソフトウェア,三菱電機技報,48, No. 6 (昭 49)

(3) 深尾:《MELCOM》70 モデル 20・25 の ハードウェア,三菱電機技報,51,No. 3 (昭 52)

気化予熱混合式石油燃焼技術とその応用《クリーンヒーター》

野間口　有*・松野信義**・西　敦義**・八代勝雄**・桑沢宏康**

1. まえがき

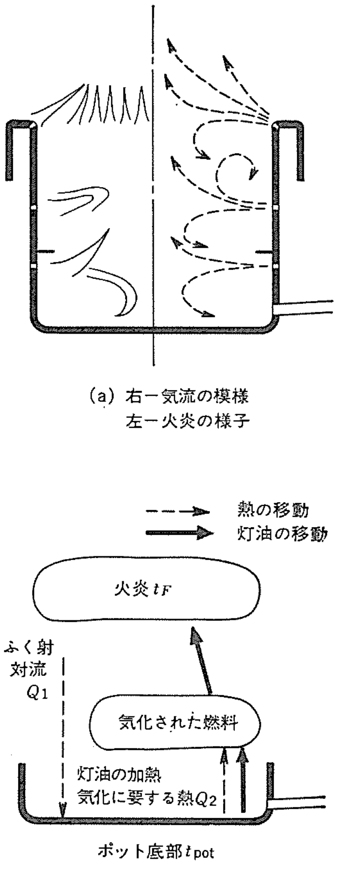
当社が，ガス《クリーンヒーター》を他に先きがけて開発し，クリーン暖房を経済的に実現するシステムを可能にしたことは周知のことである。本報では，このクリーン暖房を一般に使用される暖房用燃料である灯油で実現した温風暖房機，石油《クリーンヒーター》について述べる。

灯油の燃焼においては，すす(煤)，においの発生が避けられないものと従来考えられてきたが，我々は，この欠点をできるだけ軽減し，ガス燃料使用の場合と同じクリーン燃焼を可能にする研究を重ね，温風暖房機を完成した。温風暖房機は，室内空気の汚染を避けるため強制給排気式にすることが望ましいが，それにはいかなる燃焼法がよいか，それを実現するにはいかなる技術課題があるか，それが現実にはどのようにして解決されているかという点を明らかにする。

2. 各燃焼方式の比較研究

――どんな方式が温風暖房機に向いているか――

液体燃料の燃焼は必ず，燃料の供給，気化，空気との混合，燃焼という順序をとる。このプロセスを実際に具体化する方法にはいく通りかあり，これがいわゆるポット式 (Pot-type)，ガン式 (Gun-type) 等々の燃焼法の違いとなっている。対象を温風暖房機にするとポット式，心式 (Wick-type)，予混合式の三つに検討範囲が絞られるので，この中でどの方式が適当か比較検討してみよう。



(a) 右ー気流の模様
左ー火炎の様子

(b) 熱的モデル

図 1. ポット式バーナ

図 1. はポット式の説明図で，(a)は燃焼室内の空気の流れと火炎の様子，(b)は熱的モデルである。図より，灯油の気化，部分燃焼が行われる1次燃焼室と残余の可燃成分の燃焼が行われる2次燃焼室とにわかれていることが分かる。1次燃焼室の動作が特に重要で，ここにおける火炎からの熱伝達によってポット底部を加熱し，灯油の気化を可能にする。ポット底部の温度 t_{pot} は，図に示した火炎からの熱伝達量 Q_1 と，灯油の気化に使われる熱量 Q_2 とがバランスするように決まる。ここで，Q_1 は火炎温度 $t_F \gg t_{pot}$ が成立つような一般的な条件下では，t_{pot} には強く依存しない。一方，Q_2 は気化の行われる領域の面積と単位面積当たりの気化速度の積に比例する量である。気化速度は t_{pot} に強く依存し，150～250°C の領域では 10°C の変化で 30 % 強も変化する。そのため，全体として Q_1 と Q_2 とがバランスするためには，t_{pot} の変動に合わせて気化にあずかる面積が刻々と変動している。ところが，実際の機器で，気化領域の変動で対応できる範囲には限度があり，この限度をこえると，ポット底部での油だまり，大振幅の脈動燃焼を生じてしまう。

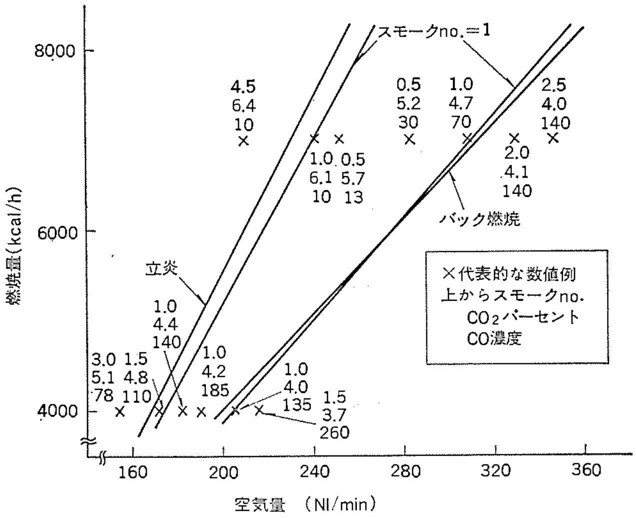


図 2. 試作ポットバーナの燃焼性

気化領域の変動は，また，1次燃焼室における混合の変動をもたらし，良好な燃焼の実現を難しくする。図 2. は，試作したポットバーナにおける燃焼性を示す例で，排ガス中の CO，CO_2 濃度，スモーク数を示してある。全般的に CO が高く，しかもスモーク数が高いことが分かる。もう少し詳しくみると，空気量を小なる領域から次第に増してゆくと，立炎（2次燃焼室において火炎が長大化し，多量の煤を発生）の状態から，スモーク数が1以下で，CO 濃度も比較的小さい状態，スモーク数，CO 濃度ともに大きな状態と変化する。図にバック燃焼とあるのは，1次燃焼室において燃焼がほぼ完了するような火炎の状態で，この状態では t_{pot} の上昇スモーク数，CO 濃度の増加が起こる。1次，2次燃焼室への空気配分を変えると，図中の数値にかなり変化がみられるが，検知可能な煤がかなり広い条件で発生するというポット燃焼の基本的な特性を変えるには至らない。

次に，心式について述べる。心式の熱的なモデルは，図 1. で示した t_{pot} の代わりに心先端の温度をとるとポット式の場合と全く同様になる。良好な燃焼条件では，心先端からの燃料の気化拡散速度と心の毛管現象によって吸い上げる能力とがほぼバランスしているが，このバランスがくずれるとにおいの発生，脈動燃焼の発生につながる。スモーク数はポット式の場合ほど大きくなく，スモーク数0の範囲もかなり広く確保できる。しかし，点火，消火の歯切れが悪く，負荷に

 * 応用機器研究所(工博)　** 中津川製作所

応じた入力の制御が難しいという基本的な問題がある。

予混合式のモデルを図 3. に示す。予混合式は上の 2 者と違って，火炎に燃料が投入されるに先だって燃料と空気の一部（1 次空気）とが混合される方式である。灯油の気化は，気化部の熱板上で行われるのが一般的であるが，この熱板の温度 t_h は，供給される灯油が気化部で完全に気化されるに十分なレベルに設定されるので，その変化が燃焼性，火炎の形態に大きな影響を及ぼすことはまずない。

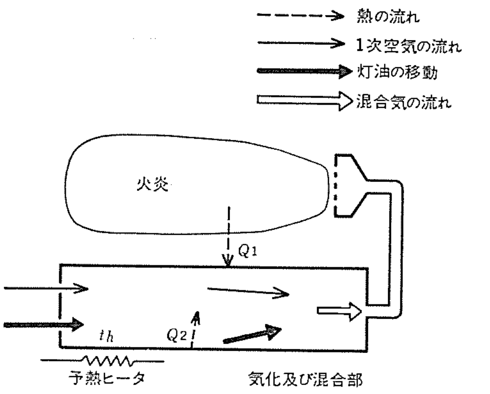


図 3. 灯油予混合 バーナ の モデル

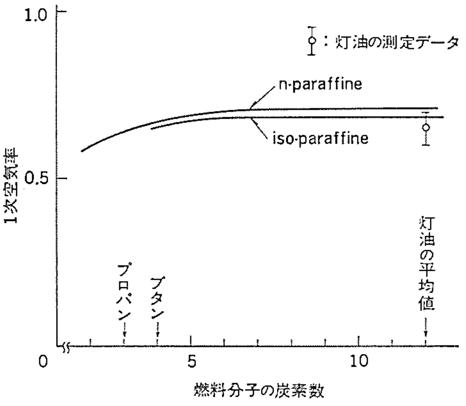
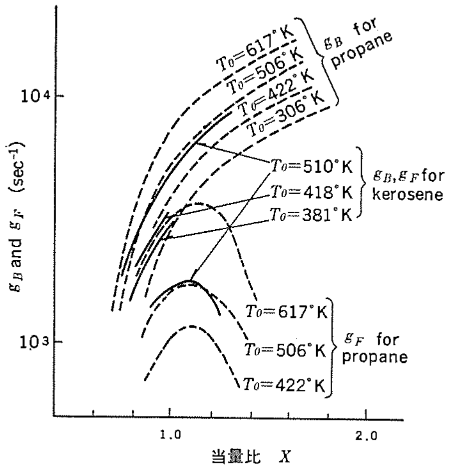


図 4. 予混合炎で黄炎が消滅するときの 1 次空気率

予混合式における燃焼の特徴は，煤の排出のない青炎をつくり得ること，火炎が炎口からリフト (lift) したり，逆火 (flashback) したりする不安定現象があることである。第 1 の点は都合のよい性質であるが，第 2 の点は応用に際して注意を要する点である。これら 2 点について少し詳しく調べてみよう。

まず，煤生成についてみると，予混合炎の燃焼では 1 次空気率（1 次空気量／理論空気量）を小さい値から次第に増していくと黄炎主体で煤生成の大なる火炎から青炎部の多い火炎へと変化していく。黄炎が完全に消滅する 1 次空気率を，いろんな物質について示したのが 図 4. である。図より，灯油でもプロパンなど一般に使われているガス燃料とほぼ同一の 1 次空気率 (0.6～0.7) で完全な青炎をつくれることが分かる。ポット式の場合完全な青炎をつくるのは難しい。図 4. に示した灯油の完全な青炎が得られる 1 次空気率は反応帯における炭素と酸素原子の数の比〔C〕/〔O〕がおよそ 0.5 に相当することに注目して，ポット式の 1 次燃焼室における〔C〕/〔O〕を同様な値にしてみると青炎の多い燃焼が得られる。しかるに，このような条件下では不完全燃焼がはげしく排ガスの臭気，CO 濃度が大となり，実用には全く不向きである。



X= 1 次空気率の逆数，g_B : リフト限界
g_F : 逆火限界

図 5. 灯油予混合炎の安定性

次に，予混合式における火炎の不安定現象についてみよう。この問題については筆者らが灯油の予混合燃焼に関する総合的な研究の一環として検討している。図 5. はその結果の一例である。図にはほぼ同じ温度条件における プロパン の データ も示しているがこの場合も，両者は極めて高い類似性をもっている。この結果は予混合気さえつくれるならば，灯油の予混合燃焼をプロパンなどのガス燃料の場合と同等の容易さをもって実現できる可能性を示していると言えよう。

図 6. は，上の検討を基にして試作した バーナ における燃焼性の データ である。空気量を大きくしていくと，スモーク数が 0 になる条件，CO が 100 ppm 以下となる条件，黄炎消滅限界，CO が再び 100 ppm を超える条件，リフト条件の順序であらわれる。二つの CO 100 ppm の条件の少し内側では CO は 2～30 ppm 以下であり，しかもこの領域における スモーク 数は完全に 0 であるので，クリーン 燃焼という点では最も優れている。このように燃焼性が優れているのは予混合式の火炎のでき方にある。すなわち，予混合炎は，炎口の上に予混合気の流速が燃焼速度と バランス するように火炎面（内炎）が形成されるのであるが，この火炎面は普通 1,500°K 以上の高温であるため，ここを通過する予混合気は必ず燃焼する。これに対して ポット 式では，高温火炎面を燃料成分が必ず通過する形にはなっていないため，予混合式に比べて CO 濃度が全般的に高くなるものと考えられる。

以上，各方式に関する比較研究の結果を述べた。これらの研究より，我々は予混合式が最も温風暖房機に適していると結論することができる。予混合式が優れている点を整理してみると，

(1) 煤の発生を完全に防止できる。煤が生成すると，その一部がどうしても熱交換器内，排気管内にたい（堆）積するため風圧損失が増大し，良好な燃焼を行うに十分な空気量の供給を不可能にする。この意味で，煤なし燃焼は強制給排気式においては不可欠である。

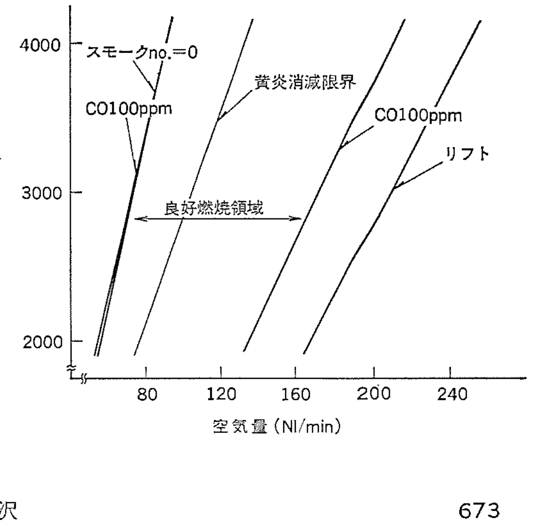
(2) 排ガス中の CO 濃度も最も低レベルである。また，1 次空気率によっては，NOx を非常に低いレベルに抑えることもできる。

(3) 燃料の気化が，火炎からの熱伝達量に直接依存しないため，極めて安定に行われ，結果として安定な燃焼が得られる。

(4) 燃焼量当たりの空気量が最も少なくて済むため，熱交換が容易である。したがって，機器全体のコンパクト化が可能になる。

これらの利点のほかに，予混合式を実現するための問題点，技術課題があることは言うまでもない。灯油の気化，

図 6. 試作予混合 バーナ (VKN 形) の燃焼性



空気との混合，安定な予混合炎の形成等々の問題を解決して実現した実際の機器の技術的内容について以下に説明しよう。

3. 石油《クリーンヒーター》

石油《クリーンヒーター》の全機種の仕様を，表1. に示す。石油《クリーンヒーター》には，VKB形とVKN形の二つの系列がある。VKB形の外観と構成図を図7. に，VKN形の外観と構成図を図8. に示す。VKB形はできるだけコンパクトに温風暖房機を構成する目的で設計されたもので，ガス《クリーンヒーター》VGB形とほぼ同一の寸法になっている。VKN形はより省資源化を目指したもので，2枚の平板によって燃焼室，主熱交換器を構成している。

以下，各《クリーンヒーター》の技術的内容を，少し具体的に説明しよう。

3.1 予混合気のつくり方

VKB, VKN形ともに，高温の熱板上で灯油を気化し，熱板上を流れている空気と混合させて予混合気をつくる。しかし，熱板上に灯油を供給する方法は違っている。VKB形では，図9. 中に示すような，微粒化板を回転させ，結果として生じる遠心力で灯油を微粒子し，これを熱板に衝突させる。灯油は，微粒子なるが故にスムーズに気化するため，ON・OFF運転に適している。VKN形では，灯油は単に熱板上に細い導管より流し込まれるだけである。一般に，このような方法では気化が時間的に安定せず，そのため脈動燃焼が生じるのであるが，本機では，気化現象に関する詳細な検討によって見い出された対策によって，安定な気化が実現している。この方法では気化は若干緩漫であるが，Hi・Lo運転には最も適した方法である。

なお，気化の行われる熱板の温度は常に250°C以上になるようになっている。これは，灯油を膜沸騰的に加熱，気化するためで，気化速度を高め，しかも残さ(渣)の生成を最小にする効果を発揮する。熱板をこの温度以上に保温する熱量は，燃焼中は火炎からほぼ100%調達されるが，停止中は電気ヒータによって与えられる。

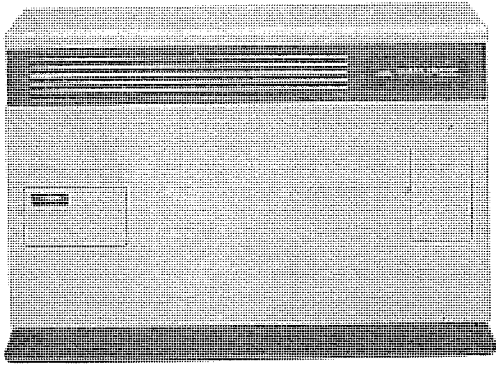
3.2 バーナ

VKB形のバーナは，1次空気率1.0以上の予混合気を燃焼させるいわゆる全1次バーナである。逆火を完全に防止するために，消炎距離以下の有効開口部をもつメッシュ，パンチングメタルの積層タイプである。この種のバーナは，空気率の高いところでリフトしやすいという性質をもつが，この点をカバーするため，常に良好な燃焼状態が得られるような空気率になるように自動的にコントロールされるようになっている。燃焼状態の良否は，火炎の半導体的導電性を利用して確実に検知される。そのため，屋外の風などによって空気率を変動させるような働きが生じても，煤，COの発生のない理想的な燃焼が常に保証される。このバーナの概略図を図9. に示す。

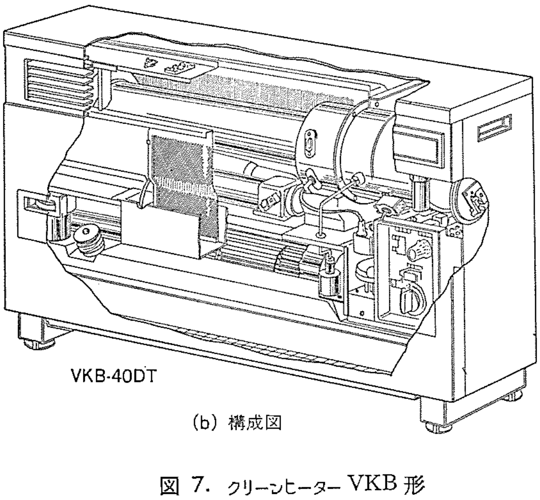
VKN形のバーナは，1次空気率はほぼ0.7に設定されるブンゼンタイプのバーナで，細長いスリット状の炎口を多数備えている。2次空

表 1. 各《クリーンヒーター》の仕様

項目＼形名		VKB-40 DT	VKB-40 D	VKN-40 VT	VKN-30 VT
暖房能力 (kcal/h)		3,400		Hi 3,200　Lo 1,880	Hi 2,400　Lo 1,250
暖房可能面積 (畳)		8～14		8～12	8～10
使用燃料		白灯油 (JIS 1号灯油)			
灯油消費料 (l/h)		0.46		高 0.46　低 0.28	高 0.34　低 0.19
熱利用効率 (%)		約 92		約 85	
製品重量 (kg)		34	31.5	35	32
タンク容量 (l)		9.6 (内蔵)	別置式	6.8 (カートリッジ式)	
電源		単相 100 V　50/60 Hz			
消費電力 (W)	点火時	400		400	
	平均	125		120	105
温風循環風量 (m³/min)		強 4.4/4.8　弱 3.8/4.2	強 4.5/4.9　弱 3.9/4.3	ラインフローファン4極コンデンサモータ	
騒音Aレンジ (ホン)		強 40.5/43　弱 37.5/39	強 39.5/42　弱 36.5/38	強 43/43　弱 36/36	
点火方式		自動点火方式，タイマ内蔵 (12時間 ONスイッチのみ)		自動点火方式，別売タイマ使用可	
室温調節器		室温調節器による ON・OFF 制御		室温調節器による Hi　Low 制御	
加湿器		手動注水十燃焼凝縮水加湿器 (容量 1,500 cc) 加湿能力約 150 cc/h		別売品　VGZ-197	
安全装置	過熱防止装置	オートカット2コ (100°C OFF)	オートカット2コ (90°C OFF)	オートカット　温度ヒューズ	
	遅延サーモ	ディスクサーモ (ON 60°C　OFF 43°C)		冷風防止 (ON 60°C　OFF 43°C)	
	爆発防止装置	風圧スイッチ組込み，プレパージ方式		プレパージ，ポストパージ (燃焼 OFF 時) 付	
	点火確認装置	P.T.C タイマ回路組込み		タイマ方式	
	停電保護装置	リレー組込み		即時消火，燃焼時再通電時自動復帰不可	
	対震自動消火装置	落球式 150～250 gal 動作 (震度4程度)			
	燃焼検知装置	炎検知棒+IC 回路		熱電対方式	
	電流ヒューズ	6 A			
	自動復帰防止装置	リレーによる自己保持回路			
標準付属部品		給排気トップ，ジョイントパイプA・B，背面カバー，エルボ，傾斜フランジ，ネジ類，等		標準給排気セット1式，壁取付金具1式，置台1個，油抜きとい1個，ダンパ60Hz用1個等	

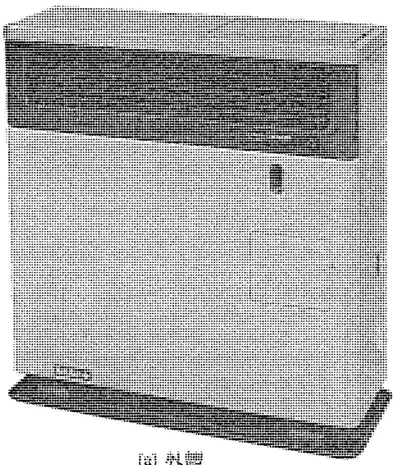


(a) 外観

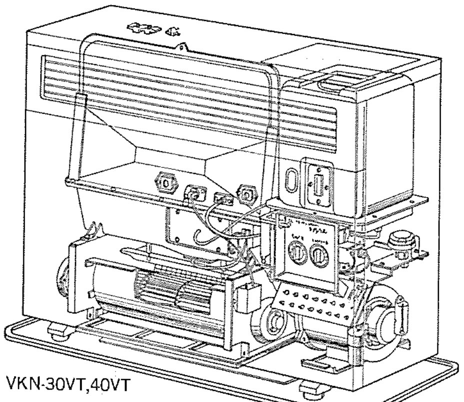


(b) 構成図

図 7. クリーンヒーター VKB 形



(a) 外観



(b) 構成図

図 8. クリーンヒーター VKN 形

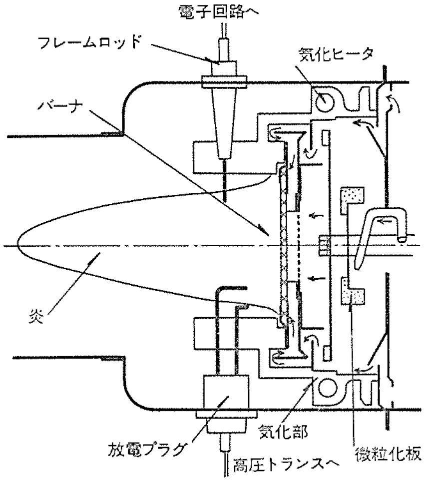


図 9. VKB 形 バーナ の概略図

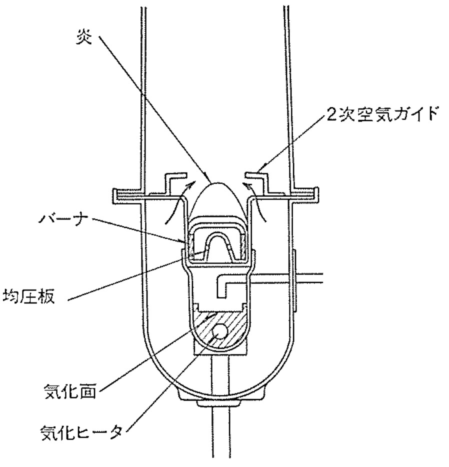


図 10. VKN 形 バーナ の概略図

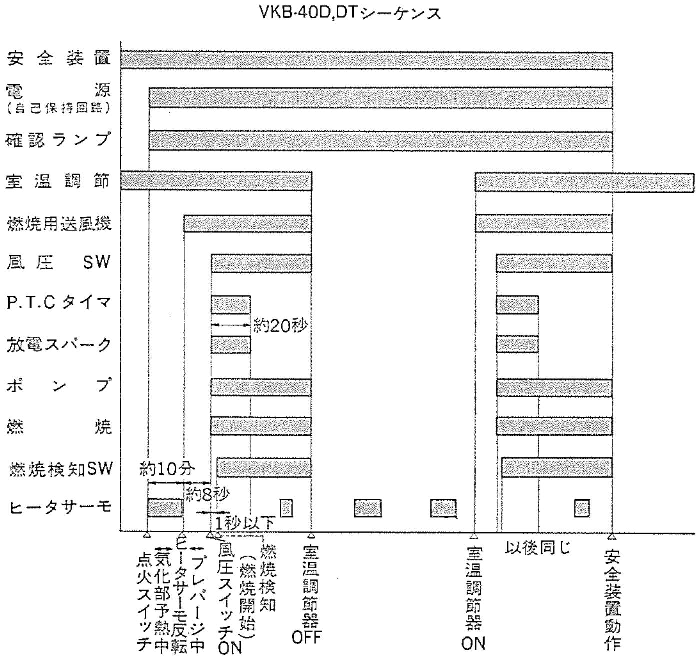


図 11. 運転の シーケンス (VKB 形の例)

気は図 10. に示すように火炎の周囲に供給される。この バーナ では，煤生成のない クリーン 燃焼が可能なだけでなく，その範囲が広いという特長がある。これは，図 10. に示す円形 スリット 炎口が極めて予混合炎の安定化に優れているためである。

VKN，VKB 形ともに，火炎はそれをとり囲む バーナ 壁へ熱伝達し，それによって燃料を気化する熱量を与えられるようになっている。

3.3 熱交換器

VKB 形は円筒形，VKN 形は平行平板形で，いずれも バーナ と最も合理的に結合できるようになっている。熱交換器としての設計は，ガス《クリーンヒーター》における高効率熱交換の経験を踏まえ，よりシンプルな構造で高い効率が得られるようになっている。標準的な運転条件では VKB 形で 90 %以上，VKN 形で 85 %の熱効率が得られる。

熱交換器の構造の設計においては，熱応力，材料の耐食性に関する検討結果をとり入れ，長寿命化，信頼性の向上を図っている。

3.4 安全装置

地震対策，異常温度上昇，異常燃焼対策を可能な限り フェイル セーフ 性の高いかたちで備えている。また図 11. に示すような手順で運転を行い，燃焼開始時に特に問題になる点火異常（爆発点火，点火不全）のないよう万全を期している。

安全面での予混合燃焼の利点は，燃焼検知が確実にしかも迅速に行えることである。VKB 形では火炎の導電性，VKN 形では熱電対を用いて火炎を検知しているが，これらの方法は ポット 式などにおける方法よりも，本質的に早い応答性をもっているので，何らかの異常が生じたときにすばやく検知することができる。また，気化部への燃料の供給を止めると，直ちに燃焼も停止させることができるが，このような歯切れのよい制御性は，他の方式にない大きな メリット である。

4. む す び

各種の燃焼方式に関する比較研究の結果をもとにして開発した実際の《クリーンヒーター》の技術的内容について概要を述べた。詳細は本文末尾の関係文献を参照されたい。

なお，今後不良灯油対策，予熱時間の短縮などなお改良を重ね，暖房の質的向上に寄与する所存である。

参 考 文 献

(1) 野間口，伊藤：超高温研究，10，1（昭 48）

(2) 野間口，松井，酒井，藤原：三菱電機技報，49，No. 11，p. 724（昭 50）

(3) Nomaguchi, T・Fujiwara, M : Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Sience, 18, 55 (1975)

(4) 古屋，西，八代，桑沢，川渕：石油温風暖房器《クリーンヒーター》の制御，三菱電機技報，51，No. 10，p.676（昭 52）

石油温風暖房器《クリーンヒーター》の制御

古屋芳明*・西　敦義**・八代勝雄**・桑沢宏康**・川渕　勇**

1. まえがき

我が国の今後の暖房機の主流を占めると目されている温風暖房機は，近年目ざましい性能向上をみせ，1千億円の市場を形成しつつある。快適な暖房生活のニーズの高まりの中で，一方では省エネルギという立場から燃料の有効利用率を高める必要があり，このような要求にこたえる機器として，温風暖房機の地位は今後ますます高まるものと考えられる。快適な暖房というには，安全に使用できることが前提で，更に，家庭用暖房機として複雑な操作を避けながら，安全性・信頼性を確保する必要がある。特に，石油《クリーンヒーター》は灯油のガス化機構[3]を有するために，複雑になり勝ちな制御機構をいかに信頼性が高く，簡潔にまとめ上げるかに多くの技術上の課題が存在する。しかし，当社はこれらの課題を解決する石油温風暖房機として，いわゆる石油《クリーンヒーター》を，他社に先がけて開発することに成功した。

本報はその神経系統ともいうべき制御機構の内容を紹介するともに，制御機構と機能及び安全性の関連についても明らかにする。なお，三菱石油《クリーンヒーター》にはVKB形とVKN形の2タイプがあるので，それぞれのタイプごとにシーケンス制御の内容を説明し，更に，自動的に完全燃焼を行わせるためにVKB形に採用した定空燃比制御についても紹介する。

2. シーケンス制御と安全装置

暖房機をできる限り簡単な操作により，安全で確実に，また，快適な暖房運転を行わせるためには，その燃焼機構とシーケンス制御装置及び安全装置を有機的に結合させることが必要である。

(1)　三菱石油《クリーンヒーター》のシーケンス制御は，点火スイッチの投入により，次に述べる一連の動作を自動的に行う。

まず，灯油を気化させるための気化ヒータを予熱し，その気化面温度を灯油の蒸発速度が迅速でタールの生成の少ない理想的な温度まで上昇させる。次に，燃焼用送風機運転・プレパージ・点火及び燃料の供給の順序で動作する。このプレパージ動作は未燃ガスをあらかじめ排出して爆発の危険を払しょくし，正常な着火を行わせるためのものである。VKB形では風圧スイッチに付属するオリフィスの作用による動作時間遅れにより，また，VKN形では後述のタイマモータによってプレパージ時間を得ている。

燃焼が開始されても，遅延サーモの動作によって対流用送風機の送風開始は数分後となるように構成され，燃焼初期の冷風吹出しを防止している。

一方，点火スイッチをOFFすることによって燃料の供給が停止され，消火動作は瞬間的に行われるが，対流用送風機は遅延サーモの動作により，燃焼器が十分冷えるまで運転される。VKN形においては，特に燃焼停止後も対流用送風機が停止するまで燃焼用送風機を運転し，これによって燃焼器内の残留未燃ガスを排出し，いわゆるポストパージを行う。

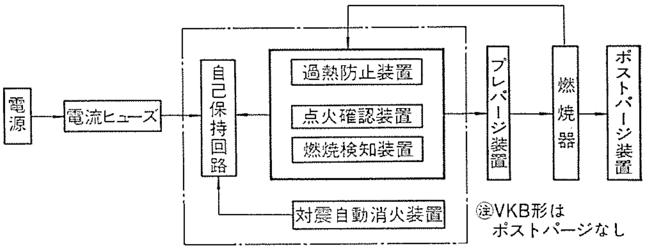


図 1.　三菱石油《クリーンヒーター》の安全装置

このような一連の動作の外に，快適暖房にとって欠くことのできない機能として室温調整機能がある。室温調整は本体に内蔵された室温調節器により，VKB形においては燃焼が断続され，VKN形においては強弱に燃焼量が切換えられる。強弱燃焼切換えの場合は，燃料供給量が切換えれるとともに，燃焼用送風機の回転数も切換えられ，安定な燃焼が維持される。また同時に対流用送風機の回転数も切換えられ，常時快適な温風が得られるようになっている。

(2)　石油《クリーンヒーター》の安全装置は，異常があった場合，すばやくそして確実にその異常を検出し，瞬時に燃焼を停止させる。三菱石油《クリーンヒーター》は，気化ヒータによって灯油を瞬時にガス化して燃焼させるMICS石油ガス化方式を採用し，異常時は各種安全装置によって灯油供給が停止されるので，燃焼が瞬間的に停止する。この燃焼機構と各種の安全装置との関係を図1.に示す。

本体内部の各種安全装置のかなめとしてリレーによる自己保持回路が形成され，異常過熱を検知する過熱防止装置，点火時所定の時間内に確実に点火が行われたかを検知する点火確認装置，燃焼器にとって不可欠な燃焼検知装置，更に地震時には瞬時に燃焼を停止させる対震自動消火装置を備え，これらが有機的に結合されている。これら安全装置のいずれか一つが動作すれば，自己保持回路が解除され，燃焼停止はもちろんすべての回路が切られ，安全が確保される。もちろん停電時は自己保持回路が解除されるので，再通電しても自動再点火はしない。

以上述べたように，シーケンス制御及び安全装置は暖房機の神経系統であり，暖房機の安全性・快適性を確保する上で欠くことのできない重要な役割を果たしている。

3. シーケンス回路

3.1 VKB形

図2.はVKB形のシーケンス回路図，図3.，図4.はシーケンスフローチャート及びタイムチャートである。図2.において

(1)　対震自動消火装置をセットして点火スイッチを投入すると，リレーX_1が自己保持して確認ランプが点灯する。

(2)　気化ヒータの予熱が開始されて所定の気化面温度に達すると，ヒータサーモがこれを検知し，C接点はHからLに切換わる。その時燃焼用送風機が回転し，またX_2が動作して接点X_{2-1}を閉じる。

(3)　燃焼用送風機始動後約8秒経過すると，風圧スイッチがNOからNCに切換わり，点火トランス及びポンプが動作を開始する。こ

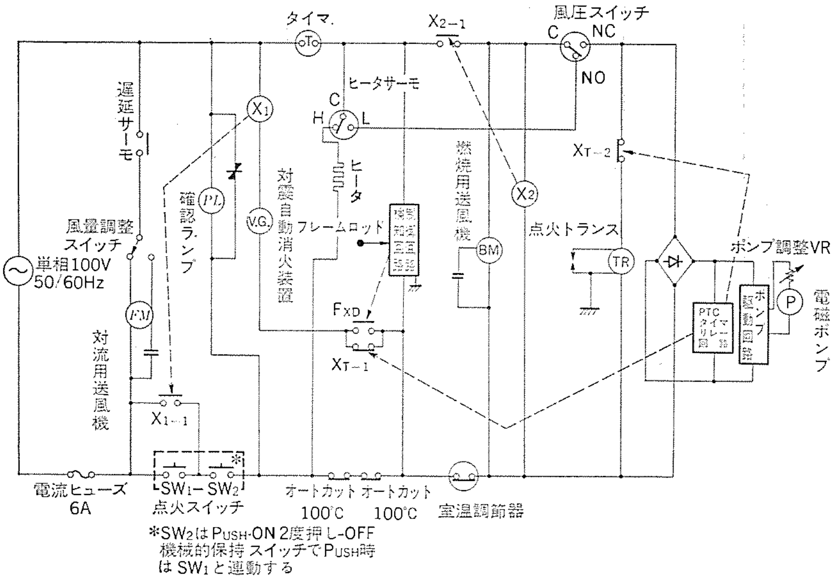


図 2. VKB形のシーケンス回路

の約8秒間がプレパージ時間となる。

(4) PTCタイマ(点火タイマ)は通電後一定時間で接点 X_{T-1} と X_{T-2} をOFFし,一方,燃焼検知装置は炎の導電性を利用して(後述),リレー接点 F_{XD} をONする。所定時間内に点火しない場合には X_1 回路はOFFとなり自己保持回路は解消して全回路がOFFとなる。所定時間内に点火した場合だけ燃焼が継続される。また燃焼途中,何らかの原因で失火した場合は燃焼検知装置が働き,F_{XD} がOFFとなり,燃料供給停止はもちろんすべての回路がOFFとなる。

(5) 遅延サーモが動作して対流用送風機が運転を開始する。

(6) 消火動作は,電源保持回路をOFFすることによって燃料の供給が停止し,瞬間的に消火する。同時に対流用送風機を除くすべての電源がOFFする。

(7) 各種安全装置は,すべて自己保持を解除してすべての回路がOFFするように動作する。ただし,電流ヒューズ溶断の場合には手動再投入も不可能となる。

(8) 室温調整動作は室温調節器によって燃焼の断続をくり返し行う。

3.2 VKN形

図5.はVKN形のシーケンス制御を行うタイマモータと燃焼検知装置,図6.は回路図,図7.及び図8.はそれぞれフローチャート及びタイムチャートを示す。以下にこれらの図を用いてシーケンス動作を説明する。

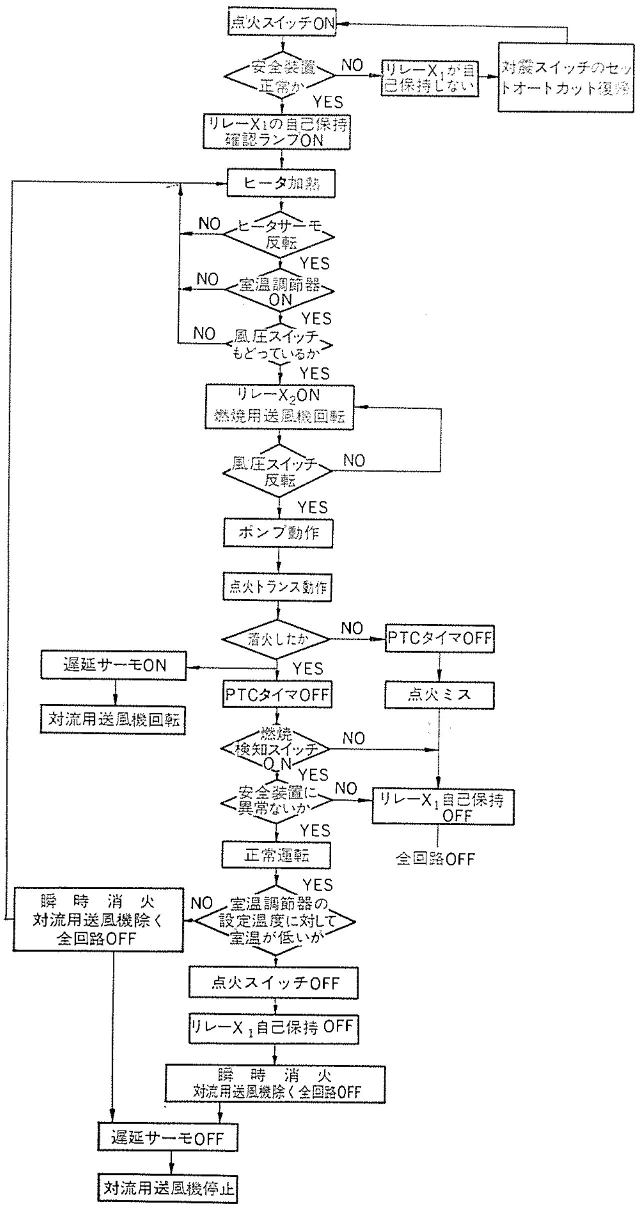


図 3. VKB形のシーケンスフローチャート

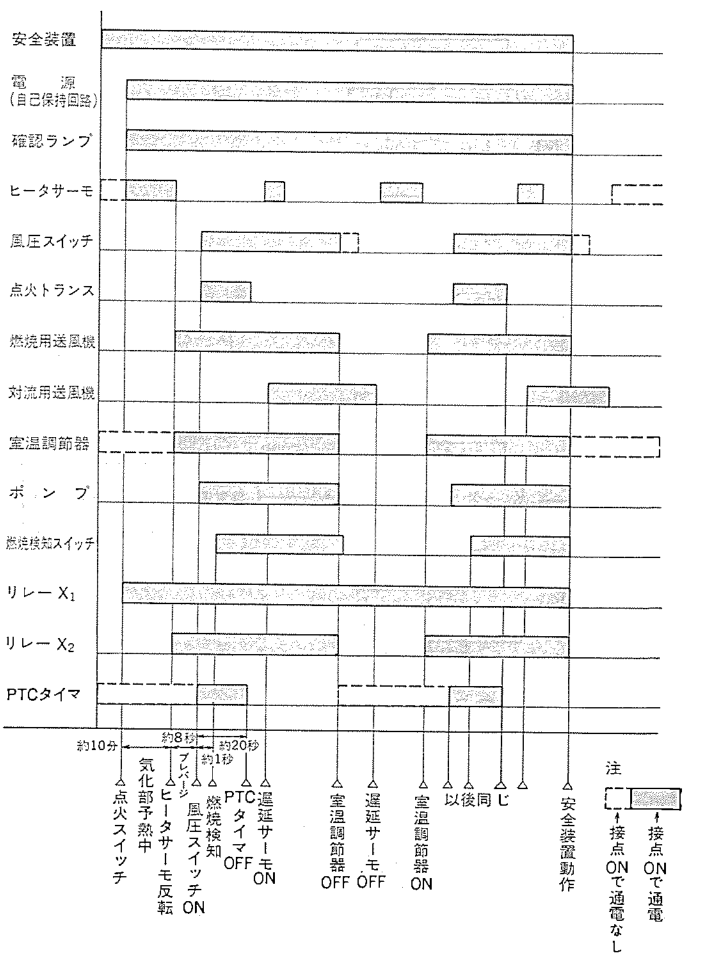


図 4. VKB形のシーケンスタイムチャート

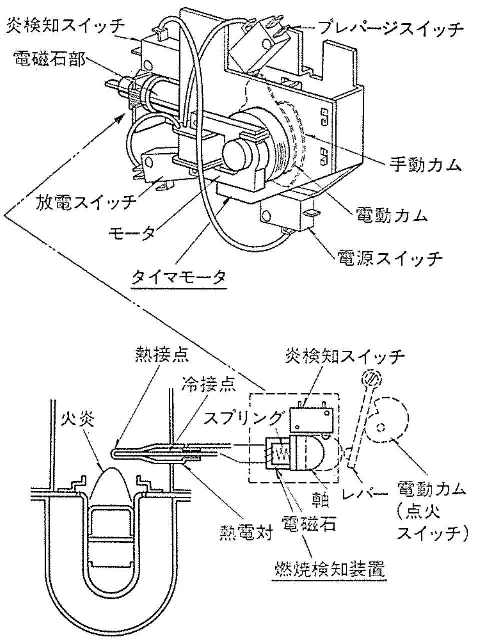
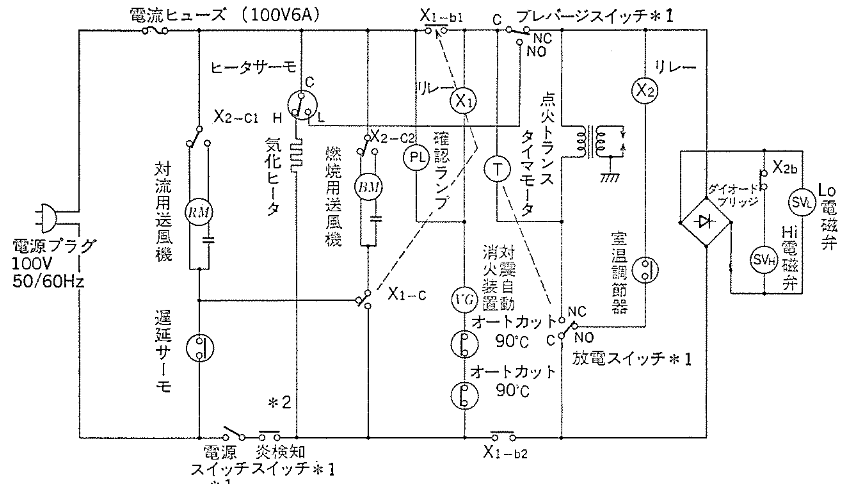


図 5. タイマモータと燃焼検知装置



＊1印のものはタイマモータのセットと連動してON又は切換えられる
＊2炎検知スイッチは炎検出用熱電対の熱起電力によりONを維持される

図 6. VKN 形 シーケンス回路

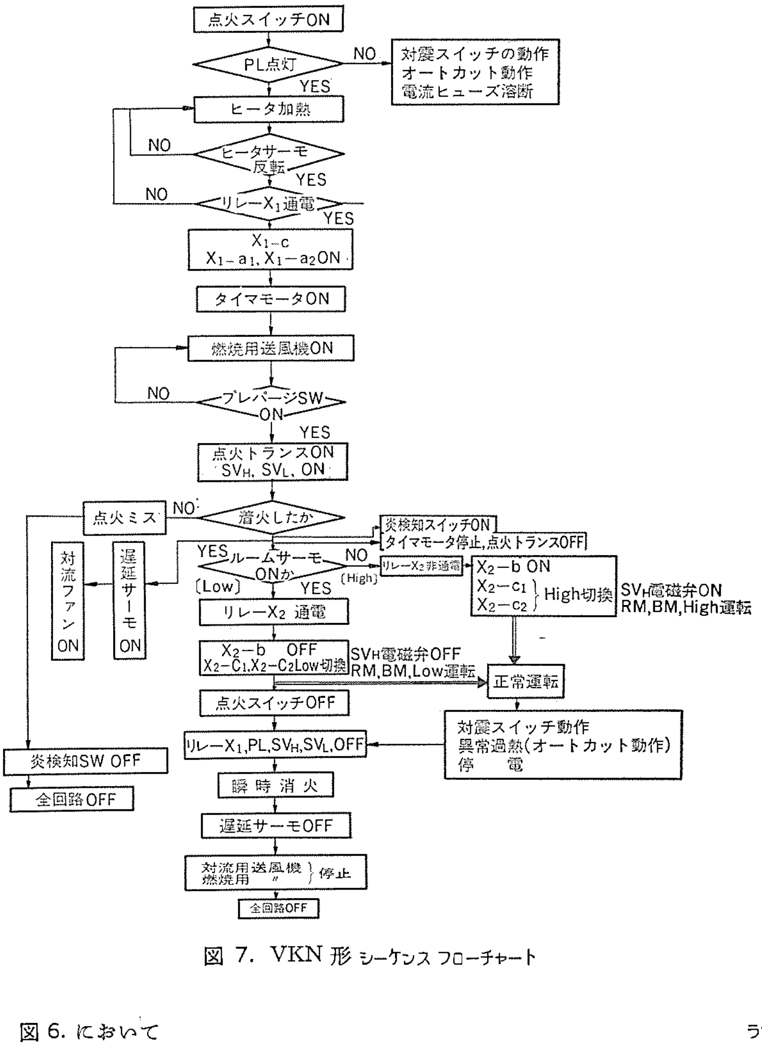


図 7. VKN 形 シーケンス フローチャート

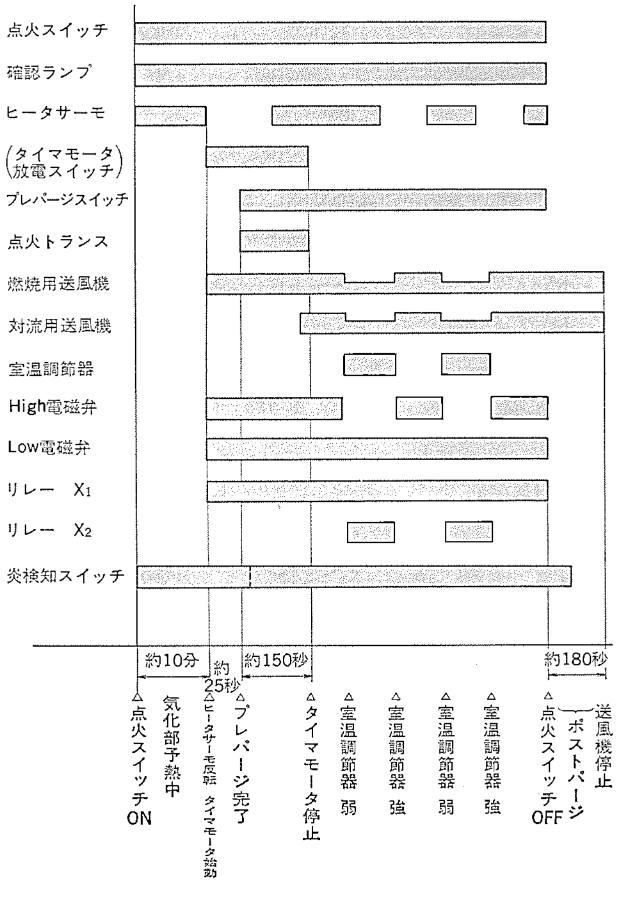


図 8. VKN 形 シーケンス タイムチャート

図 6. において

(1) 対震自動消火装置をセットした後，タイマモータのつまみを時計方向に 120 度回すことにより，電源スイッチ・炎検知スイッチを ON させ，プレパージスイッチを NO 側，放電スイッチを NC 側にセットするこの時電源の入ったことを示す確認ランプが点灯する。

(2) 気化ヒータの予熱が行われ，所定の温度に上昇するとヒータサーモが L 側に反転し，リレー X_1 による自己保持回路が形成される。同時に接点 X_{1-C} も切換わって燃焼用送風機が強運転で始動し，プレパージが始まる。またタイマモータも回転を始める。

(3) 約 25 秒後にプレパージスイッチが NC 側に切換わって点火トランス及び電磁弁が動作する。

(4) 放電スイッチが NO 側に切換わる (タイマモータ始動後約 180 秒)。この間に正常に点火した場合は熱電対の熱起電力によって電磁石が動作し，炎検知スイッチが ON する。点火しない場合は炎からの熱が与えられないので起電力は発生せず，炎検知スイッチは OFF になって全回路が OFF する。また燃焼途中何らかの原因で失火した時

にも，起電力がなくなって炎検知スイッチがOFFし，全回路がOFFする。

（5） 遅延サーモ動作により対流用送風機が始動する。

（6） 消火動作は，タイマモータのつまみをもどすことによって電源スイッチがOFFし，瞬時に燃焼が停止するとともに，対流用送風機・燃焼用送風機を除くすべての電源がOFFする。

（7） 各種安全装置の動作は，電流ヒューズの溶断及び炎検知スイッチによって全回路しゃ断の外はすべて自己保持回路を解く。

（8） 室温調節動作は室温調節器により，電磁弁・燃焼用送風機・対流用送風機の強弱運転をくり返す。

4. 燃焼制御系

一般的な予混合燃焼方式は完全燃焼による排気の清浄さ，高温燃焼などの利点を有する反面，一般に用いられている拡散燃焼方式と比較して安定燃焼範囲が狭い欠点があった。

VKB-40形三菱石油《クリーンヒーター》ではこの予混合燃焼方式を採用しているが，新たにメッシュバーナを開発して安定燃焼範囲を広げるとともに，燃焼に基因するイオン電流の定量的測定を可能にした。この結果燃焼状態の変化に応じて常に燃焼空気と気化燃料の混合比率を最適に自動調整することができ，上記欠点を完全に解消した。

この「イオン電流による燃焼状態の直接監視」は全く新しい技術で，これを用いて初めて，予混合燃焼方式の長所を生かしつつ短所を完全に解消した，VKB-40形石油《クリーンヒーター》が実現した訳である。

4.1 炎電流と検出回路

燃焼に基因する正・負イオンの生成過程の理論的解明は他の文献(4)にゆずり，4.1節ではイオン化現象を電気的に炎電流という形で捕える。

燃焼炎中に金属電極（フレームロッド）をそう入し，この電極と燃焼器の一部である炎口板との間に交流電圧を印加すると，炎電流が検出できる。

炎電流を電気的に観察すると，正・負イオンの性質が顕著に現れる。すなわち，負イオンと正イオンの移動度の差による整流性，負イオン濃度による抵抗分，正イオン濃度による抵抗分に分離できる。整流性を示すダイオードをD_f，負イオンによる抵抗分をR_{fF}，正イオンによる抵抗分をR_{fR}とすると，等価回路は図9.で示される。更に，電極と炎口板との間には絶縁抵抗が存在し，これをR_lで表す。燃焼炎に交流電圧を印加すると，図10.に示すi_fなる波形の電流が流れ，このi_fの値が燃焼状態によって変化するので，適切な検出回路で検出すれば，制御用信号に利用できる。この電流検出において重要なことは次の2点である。

（1） 燃焼状態を正確にモニタできる。

（2） 電極と炎口板との絶縁が多少劣化しても機能を発揮する。

特に（2）項は，後述するフィードバック回路及び燃焼検知回路の動作に影響がないようにしなければならない。

図10.，図11.に基づいて絶縁劣化の問題を考察してみる。

図9.に示す炎電流検出回路で，炎電流$I_f=30\ \mu A_{DC}$一定に設定した場合の信号電圧V_0のデータ例を図10.に示す（図9.のR_Bをパラメータとする）。$R_l=\infty \sim 4\ M\Omega$までは信号電圧$V_0$はほぼ一定である。定常使用状態においては，完全燃焼が行われているために絶縁抵抗R_lは$5\ M\Omega$以上確保されている。これは多くの実験で確認されており，定常使用条件においては絶縁劣化は余り問題にならない。しかし，長年月の間多様な設置条件で使用される温風暖房機に

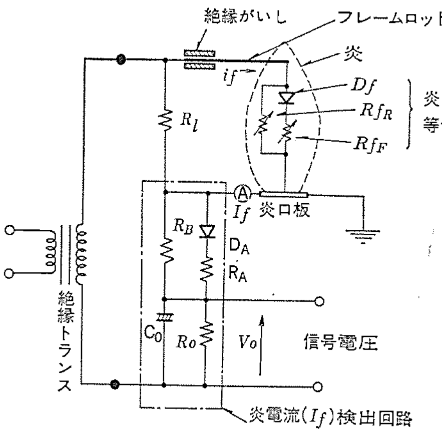


図9. 炎の電気的等価回路とI_f検出回路

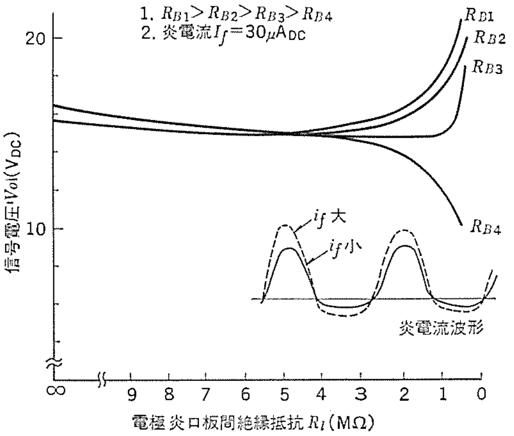


図10. 電極の絶縁劣化と炎電流信号電圧

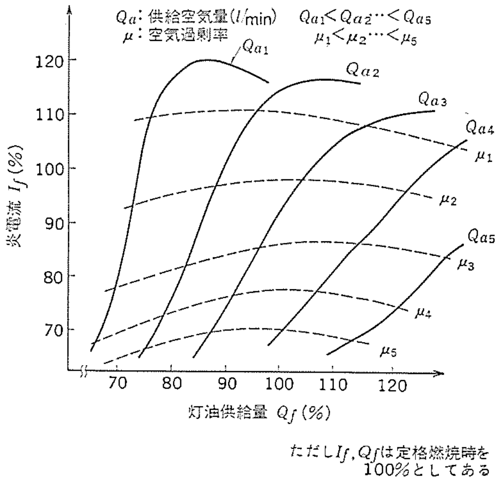


図11. 燃焼状態と炎電流

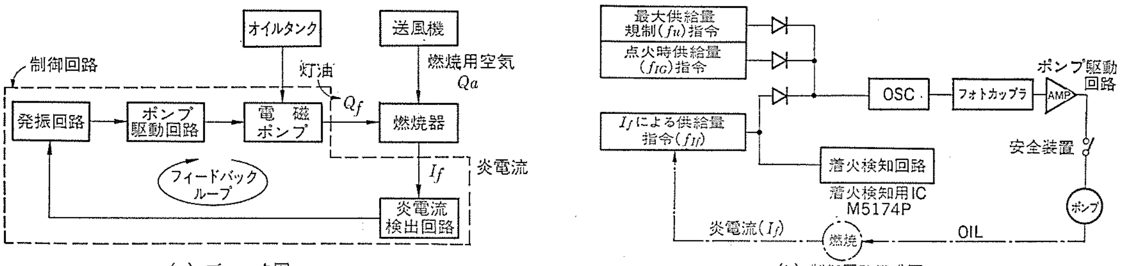
おいては，過酷な条件で燃焼させた場合にも十分な安全性が確保されねばならない。そのため，R_Bを適当に選択することにより，図10.のR_{B2}で示すように$R_l<1\ M\Omega$となっても，ほぼ一定の出力電圧を得る回路となっている。更に，R_lが低下した場合にも後述するフィードバック回路の動作により，燃焼器全体としては安全動作を行う設計となっている。

炎電流検出回路を含めて主要な回路は商用電源と電気的に絶縁され，温風暖房機を構成する他の電気部品（気化ヒータ・送風機等）の絶縁が万一劣化しても，十分な制御機能を発揮するように構成されている。

4.2 燃焼と炎電流

図9.の炎電流検出回路で測定した，VKB-40形の燃焼状態と炎電流の関係を図11.に示す。

この特性は，燃焼状態を炎電流でモニタできることを示すとともに



(a) ブロック図　　(b) 制御回路構成図

図 12. 燃焼 フィードバック 制御回路 ブロック 図と制御回路構成図

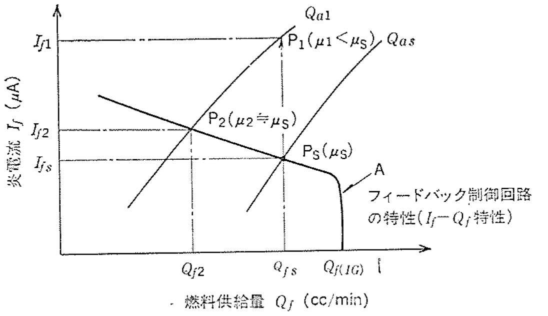


図 13. フィードバック 制御の基本特性

に フィードバック 制御の基本となるものであり，燃焼状態を判断する新しい判断基準として品質管理にも応用できるものである。

図 11. の実線は燃焼空気量 Q_a を パラメータ として，灯油供給量 Q_f と炎電流 I_f の関係を示したものである。この曲線上の同一空気過剰率の点を結んだ線を，空気過剰率曲線として破線で示してある。

ここで空気過剰率 μ とは

$$\mu=\frac{\text{供給空気量}}{\text{供給灯油量に相当する理論空気量}}$$

で定義され，燃焼状態を示す基準となる。燃焼状態はこの空気過剰率に大きく左右される。安定した燃焼状態を確保するためにはこの空気過剰率を一定に保つことが望ましい。一方，空気過剰率曲線と炎電流の関係をみると，空気過剰率が一定ならば炎電流もほぼ一定となり，したがって炎電流の値によって燃焼状態を モニタ することが可能になる。VKB-40 形《クリーンヒーター》は，この炎電流によって燃料供給量を制御する フィードバック 制御を行っている。

4. 3 フィードバック制御の基本動作

ここでいう フィードバック 制御とは，図 12. に示すように，炎電流によって供給空気量に合わせて灯油供給量を制御する方式である。この制御は炎電流基準値を設定し，炎電流が設定値より大の時は灯油供給量を減少させ，小の時は灯油供給量を増大させるように電磁 ポンプ を制御している。この結果，炎電流はほぼ一定となり，燃焼状態の変動に対しても安定燃焼を維持できる。

図 13. に フィードバック 制御の動作の一例を示す。今，空気量 Q_{as}・灯油量 Q_{fs} で示される最適燃焼点 Ps で燃焼しているとする。この時の空気過剰率を μ_S とする。ここで，何らかの原因で空気量が Q_{a1} に減少した時，無制御の場合には灯油量 Q_{fs} 一定のために動作点は Ps 点→P_1 点へ移動し，この点で灯油量過大のまま燃焼する。この結果，$\mu_1<\mu_S$ となり，炎電流も $I_{f1}\gg I_{fs}$ と変化し，最適燃焼範囲外で燃焼する。ここで，図 13. の曲線 A で示す Q_f-I_f 制御特性を有する フィードバック 制御を行う場合は，空気量が $Q_{as}\to Q_{a1}$ と減少するに従って炎電流が増加するので，灯油量は曲線Aに沿って減少して Q_{a1} とAの交点 P_2 で安定燃焼を継続する。P_2 点の空気過剰率 μ_2 は $\mu_2≒\mu_S$ となり，燃焼状態は Ps 点とほぼ同一な最適燃焼となる。これが フィードバック 制御の基本動作である。

4. 4 VKB-40 の制御回路の実構成

VKB-40形の実際の制御回路は，図 12. に示すように フィードバック 制御回路の外に多くの付属回路を含む。

(1) IC 燃焼検知回路

当社が新しく開発した炎検知用 IC・M 5174 P を用い，フェイルセーフ 性の高い検知方式を採っている。従来の サーモカップル 方式に比較して応答の早い動作が可能である。また，機械的部分が無いため，故障が少なくて信頼性の高い燃焼検知方式である。

(2) 点火時灯油供給回路

この回路によって点火時には定常燃焼時より多い灯油供給を行い，点火が容易になるように制御する。

(3) 最大灯油供給量規制回路

灯油供給量の最大値を規制する回路で，定常状態はもちろん，フィードバック 制御中の過渡状態においても，灯油供給量が異常に多くなることを防止する。VKB-40 形においては，(2)項と兼用して図 13. に示す $Q_{f(IG)}$ がこれに相当する。

上記回路と フィードバック 回路とで制御系が構成され，各制御部の相互関係は図 12. に示すようになっている。

各灯油供給量指令は ダイオード 比較回路を介し，各指令の高い電圧指令が発振回路 (OSC) に入力される。したがって点火時は f_{IG} 指令が，また着火後は f_{If} 指令が OSC の発振周波数を制御する。発振回路は 2 コ の時定数回路を有する無安定 マルチ 回路で構成され，一方の時定数回路の充電電圧を前記発振指令によって変化させ，パルス 幅一定で周波数可変の短形波 パルス を発振させている。この パルス を フォトカプラ で ポンプ 駆動回路に伝送し，増幅後 スイッチング 回路を介して電磁 ポンプ を パルス 的に駆動する。

5. む す び

三菱石油《クリーンヒーター》の安全性とそれを支える制御回路の優秀性について述べてきた。今後温風暖房機が暖房機の主流となるにつれて，市場はより安全な，より快適な製品を要求するであろうし，かつ多種な要求も出てくるものと考える。またこのような要求に答えるため制御回路にはより多くの技術的課題が課せられるものと思うが，我々は現状に安んずることなくたえずより良き製品を供給するため努力してゆくつもりである。なお紙面の都合上，制御回路と両輪の関係にある燃焼については余り触れることができなかったが，これについては既に発表されている論文(1)~(3)などを参照されたい。

参 考 文 献

(1) 野間口，伊藤：超高温研究，10，1 (昭 48)

(2) 野間口，松井，酒井，藤原：三菱電機技報，49，No. 11，p. 724 (昭 50)

(3) 野間口，松野，西，八代，桑沢：気化予熱混合式石油燃焼技術とその応用《クリーンヒーター》，三菱電機技報，本号，p.672 (昭52)

(4) R. A. Strehlow：基礎燃焼学

大容量発電機主回路用ガスしゃ断器の開発

松村　晋*・富永正太郎**・信崎泰秀**・山田和豊**・浅田正敬**

1. まえがき

近年，系統容量の拡大に伴って発電機の単機容量も飛躍的に増大し，火力・原子力発電所では 600 MW～1,2000 MW 級，揚水発電所では 300 MW 級の大容量機が採用されている。

これらの大容量発電所では発電所主回路の単純化及び経済性の面から，発電機と主変圧器との間に設置される発電機主回路用しゃ断器の実現が要望されていたが，その責務が過酷なために発電機と変圧器とを直結してその高圧側にしゃ断器を設け，始動用・所内用には専用変圧器回路を別置するという複雑な方式が採用されてきた。

しかし，550 kV GIS を初めとする一連の SF_6 ガスしゃ断器を開発・製品化した技術力を基に，消弧室構造に工夫を加えることによって SF_6 ガスを使用した大容量発電機主回路用しゃ断器の開発が可能であるとの着想から，関西電力(株)と三菱電機(株)とは昭和48年より共同開発を開始した。まず，発電機主回路用しゃ断器として要求される性能の検討から始め，モデルしゃ断器による各種性能の基礎的検討，及び大容量発電機主回路にしゃ断器を適用した場合の短絡電流の電算機による現象解析など一連の検討を行い，第一段階として，定格電流 16 kA の揚水発電所用しゃ断器を開発した。引続いてその結果を反映させつつ，定格電流 36 kA の火力・原子力発電所用についても，各種検証試験を実施して成功裏に開発を完了した。

ここに，しゃ断器の定格概要，構造及び試験結果を報告するが，このしゃ断器は，発電機用しゃ断器として世界で初めて SF_6 ガスを消弧媒体に使用したものであり，1号機を関西電力(株)奥吉野揚水発電所に適用した。

2. 定格概要

今回開発したしゃ断器を相分離母線と直結したところ（1相分）を図 1. に，外形寸法を図 2.，定格を表 1. に示す。

発電機用しゃ断器には，一般のしゃ断器と比べて大電流通電，大短絡電流しゃ断，多数回負荷開閉等の過酷な条件が多く，これらの条件に対処するため，この分野で特に優れた特性を発揮できる SF_6 ガス吹付け2重圧力式を採用した。

しゃ断器の形状は，相分離母線と容易に直結できる構造であり，内部導体・外被ともにたわみ(撓)導体で接続され，外被相互間はベローズで連結される。36 kA 定格器と 16 kA 定格器とは，基本的に同一構造で，36 kA 定格器は直結される相分離母線の冷却風をしゃ断器部に流して冷却する方式が採用されている。このため，しゃ断器部における流路抵抗による圧力損失が極めて少ない。

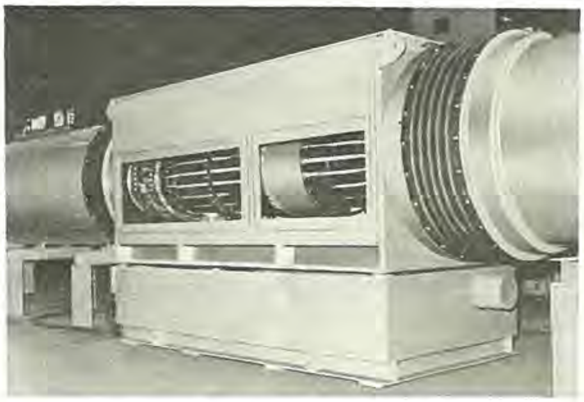


図 1. 24 kV 36,000 A 110 kA 20-SFW-110 形ガスしゃ断器

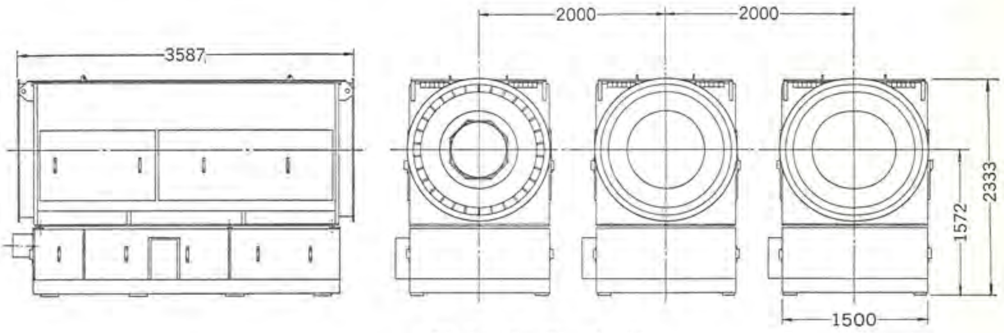
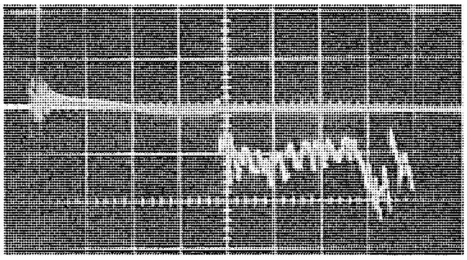


図 2. 外形寸法

表 1. 定格事項

形式			20-SFW-110
定格	電圧	(kV)	24／36
	電流	(kA)	16（自冷）　36（強制風冷）
	しゃ断電流	(kA)	110 (144)
	投入電流	(kA)	360
	短時間電流	(kA)	144　2秒
	再起電圧上昇率	(kV/ s)	1.2
	しゃ断時間	(サイクル)	5
	投入時間	(秒)	0.15
	絶縁階級	(号)	極間 30 B　対地間 20 B
	操作圧力	(kg/cm²・g)	15
操作方式	投入		圧縮空気
	しゃ断		ばね
標準動作責務			CO-3分-CO
消弧方式			SF_6 ガス吹付け（2重圧力式）
ガス圧	高圧側	(kg/cm²・g)	15
	低圧側	(kg/cm²・g)	3
ガス重量 (kg)			80×3相
総重量 (kg)			6,000×2相
準拠規格			JEC-181 に準ずる

* 関西電力(株)　** 三菱電機(株)伊丹製作所



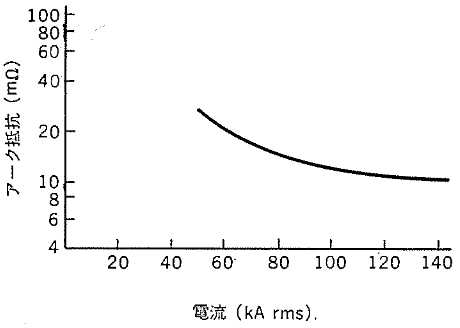
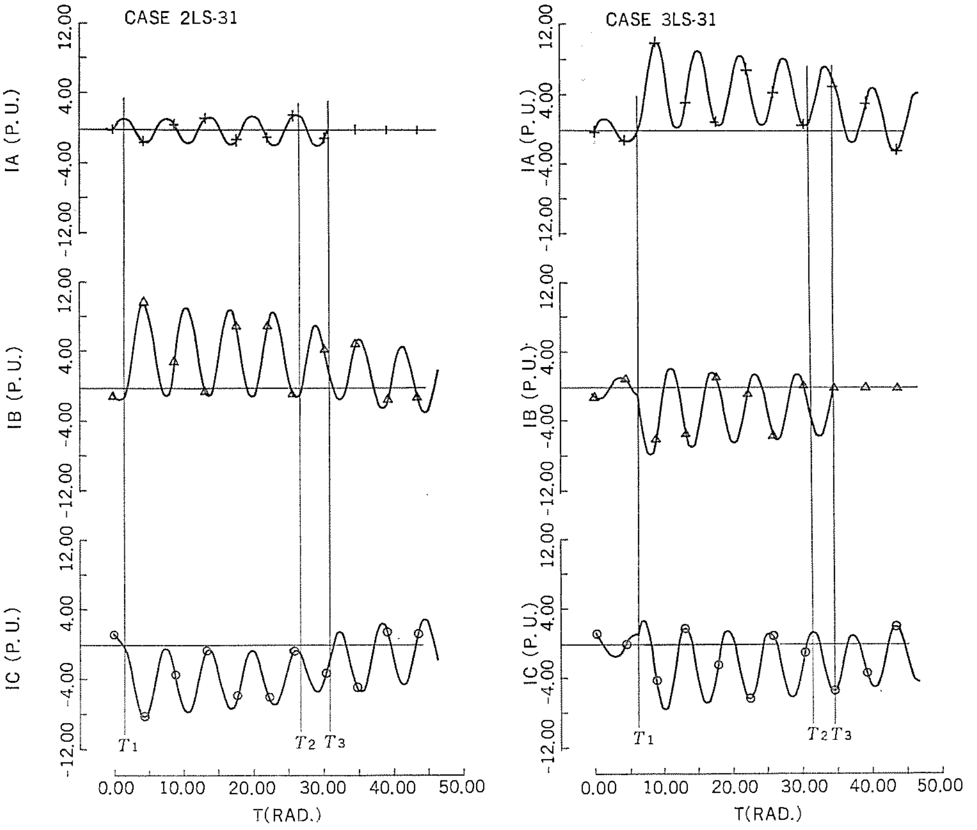


図 3. (a) 100kAしゃ断時のアーク電圧波形の一例　　(b) 電流ピーク時のアーク抵抗の傾向



T_1：短絡発生　　T_2：しゃ断器開極　　T_3：第1相しゃ断

図 4. 原子力発電所 (1,300 MVA) をモデルにして計算した短絡電流オシログラム

3. 大容量発電機短絡電流の検討

しゃ断器の構造及び動作原理とは別に，大容量発電機主回路には，短絡電流の長時間零点不通過という現象があり，しゃ断器適用上に本質的な問題がある。以下，この点について述べる。

3.1 短絡現象のシミュレーションによる解析

発電機主回路に短絡事故が発生した場合，発電機側から供給される非対称短絡電流の交流分が直流分より早く減衰する場合があるため，最大直流分の入った相は多サイクルの間，電流零点を通過しない現象が生じ得る。従来の発電機の時定数は比較的小さく，電流零点を通過しない時間は最初の数十 ms 前後に限られており，しゃ断器の開極時間と比べて短いために問題にならなかった。

しかし，近年の大容量発電機では，短絡発生後に数百 ms もの間電流零点を通過しないケースもあり，しゃ断するために電流零点が必要な交流しゃ断器を発電機主回路に適用する場合，限界時間内に消弧可能かどうかを検討する必要がある。しかし，実際に大容量発電機を短絡して試験することは事実上不可能なため，計算プログラムを開発して電算機で現象解析を行った。

このプログラムでは，発電機の定常状態から1線地絡・2相短絡・3相短絡等を発生させて各相の電流を求めることができる。また，実系統と十分に等価な現象をは(把)握することができるように，しゃ断器の開極過程でしゃ断時のアーク抵抗をそう（挿）入できるように考慮されている。

3.1.1 アーク抵抗の測定

アーク抵抗は，短絡電流しゃ断試験時にアーク電圧を測定し，アーク電圧の瞬時値と，その時点における短絡電流とから算出した。

図 3. (a)に実測したアーク電圧の一例を示す。

この実測結果からアーク抵抗の最小値は 10 mΩ 以上であり，しゃ断電流が 140 kA 程度まではこの値に余り変化がないことが判明した。しゃ断電流ピーク値におけるアーク抵抗（アーク時間中における最小アーク抵抗）が，しゃ断電流によって変化する様子を図 3. (b)に示す。

実際のアーク電圧は，電流ピーク近傍で最小になり，電流零付近で極めて大きくなるが，電算機へインプットするためのアーク抵抗には，余裕をみて 10 mΩ 一定にした。

3.1.2 短絡電流の計算

短絡電流の計算には，系統を1機－無限大系で表し，事故点を発電機用しゃ断器の主変圧器側にして，しゃ断器端子故障2相短絡（2 LS）及び3相短絡（3 LS）時の電機子電流を，開極後のアーク抵抗挿入，それに続く第1相しゃ断までを考慮して求めた。

奥吉野揚水発電所及び原子力発電所 (1,300 MVA) を対象にして計算した結果，どちらのケースも発電機短絡電流は，アーク抵抗の効果により，開極後に最初に零点を通過した第1相がしゃ断を完了すれば，残りの相も零点を通過することが判明した。

一例として，原子力発電所をモデルにした，2 LS・3 LS 条件による計算結果を図 4. に示す。

4. 構造及び動作

4.1 構造

しゃ断器は，図 5. に示すように，下部タンクを基礎にして絶縁支持筒があり，その上に大地から絶縁された消弧室部がある。消弧室部は，低圧タンク・消弧室筒・高圧タンクから構成されている。

開極時の絶縁は，消弧室筒の部分で保たれる。高圧タンクは，高圧絶縁筒を介して下部にある高圧補助ガスタンクと連通している。

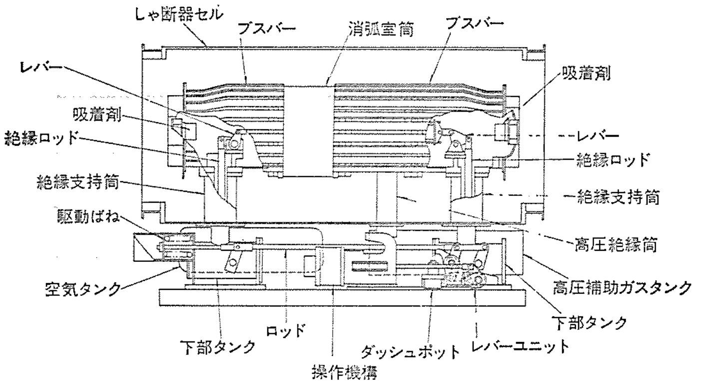
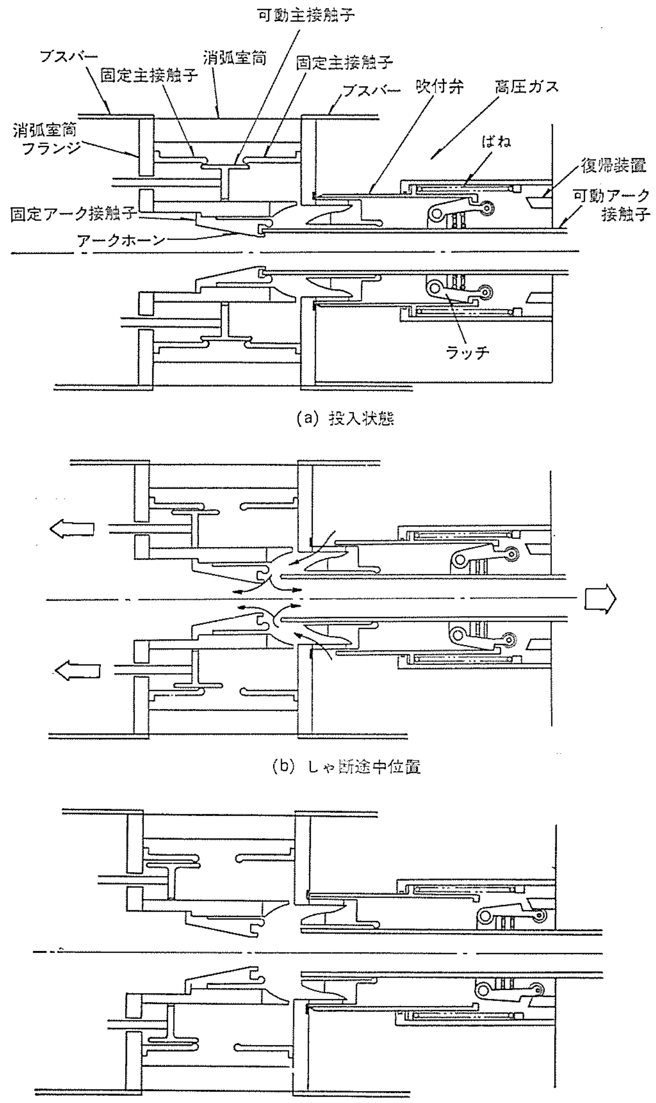


図 5. しゃ断器の構造



(a) 投入状態

(b) しゃ断途中位置

(c) しゃ断完了位置

図 6. 消弧室の構造

消弧室の構造を図 6. に示す。接触子部は，通電用の主接触子（固定・可動），しゃ断用のアーク接触子（固定・可動），及びアークホーンから構成され，いずれも低圧ガス内に置かれている。主・アーク接触子は，それぞれ絶縁操作ロッドによって駆動される。通電時・しゃ断時の電流経路は次のようになる。

（1） 通電時の電流経路

ブスバー→消弧室フランジ→固定主接触子→可動主接触子→固定主接触子→消弧室フランジ→ブスバー。

（2） しゃ断時のしゃ断電流経路

ブスバー→消弧室フランジ→固定アーク接触子→可動アーク接触子→消弧室フランジ→ブスバー。

36 kA 定格器の場合には，ブスバーに放熱フインが付加される。

可動主接触子と可動アーク接触子とは，引外し動作時には可動アーク接触子に先行して可動主接触子が開離し，投入動作時には引外し動作とは逆に，可動アーク接触子が可動主接触子に先行して接触し，その後に可動主接触子が閉路される。

操作機構部は，しゃ断器セルの下部に設置され，操作機構・ダシュポット・ロッド・リンク・レバー・駆動ばね等からなり，絶縁操作ロッドによって消弧室部と連結されている。

また，高圧補助ガスタンク・空気タンクもしゃ断器セルの下部に配置され，しゃ断器全体として小形化されている。

相分離母線のシース電流は，しゃ断器セルを介して通電され，外部に磁束の影響をほとんど及ぼさないミニフラックス構造を形成している。

高圧タンクと高圧補助ガスタンクとには高圧の SF_6 ガスが，低圧タンク・下部タンク・消弧室筒には低圧の SF_6 ガスが封入されており，引外し動作時に吹付弁から高圧ガスが低圧側に放出される。

低圧側に放出された SF_6 ガスは，配管によってガスハウジング内に導かれ，ガス圧縮機を通って高圧補助ガスタンクへ送られる。

高圧 SF_6 ガスは，温度補償圧力スイッチによって一定範囲のガス密度に制御される。高圧補助ガスタンクの下部にはヒータ室があり，冬期の寒冷時に高圧ガスが液化して圧力が低下するのを防止するため，サーモスタット制御による強制加熱を行う。

4. 2 動 作

操作機構は圧縮空気で投入され，同時に圧縮された引外し用駆動ばねをラッチで保持し，引外し指令によってこれを解放する。

4. 2. 1 引外し動作

引外し信号によって操作機構のラッチ係合が外され，駆動ばねに蓄えられていたエネルギが放出されて引外し動作が始まる。駆動ばねの力は，ロッド・絶縁操作ロッドを介してレバーに伝達され，可動主接触子及び可動アーク接触子を駆動する。

このとき，可動アーク接触子に設けられたラッチによって吹付弁が開離し，高圧タンク内の SF_6 ガスが図 6. の矢印で示す方向にノズル部を流れ，アーク接触子部に発生したアークを消弧する。開極位置の最終付近でラッチは復帰装置によって吹付弁との係合を外し，吹付弁はばねの力で復帰して再び高圧を閉鎖する。

4. 2. 2 投入動作

投入信号によって空気タンクの圧縮空気が操作機構のシリンダに送られると，ピストンが作動し，レバーユニット・ロッドを介して絶縁ロッドが上方に駆動されて可動アーク接触子と可動主接触子とが閉路される。投入動作時にはガス吹付けは行われず，可動アーク接触子に設けられたラッチは，投入完了直前に吹付弁と係合される。同時に，しゃ断用駆動ばねも圧縮空気のエネルギによって圧縮され，次の引外し動作に備える。

5. 試 験

5. 1 温度試験

しゃ断器の両端に相分離母線を接続し，母線と外被とを往復導体にして通電するミニフラックス方式を模擬した構造にして自冷で定格電流 16 kA，強制風冷で 36 kA の温度試験を実施した。自冷の 16 kA，強制風冷の 36 kA 共に規格値を十分に満足する結果が得られた。

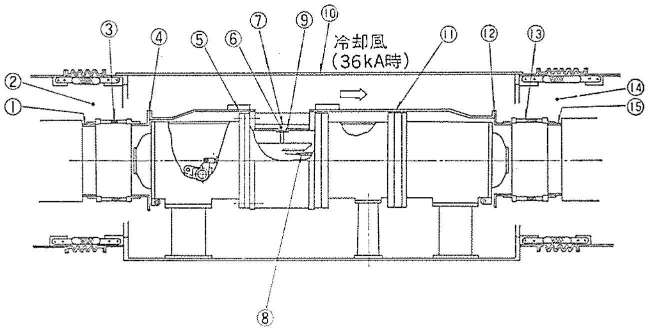


図 7. 温度測定点

表 2. 温度上昇試験結果

測定箇所		16,000 A(自冷)		36,000 A (強制風冷)		規格値
		測定値 (°C)	上昇値 (deg)	測定値 (°C)	上昇値 (deg)	(deg)
1	相分離母線ターミナル	63	39	55	29.5	65
2	接続部空気温	—	—	33	7.5	—
3	相分離母線たわみ導体	64	40	53.5	28	—
4	しゃ断器母線ターミナル	65	41	57.5	32	65
5	ブスバー	—	—	55.5	30	65
6	ガス温	66	42	70.5	45	—
7	消弧室筒内壁	62	38	65.5	40	—
8	アーク接触子	62	38	67	41.5	65
9	主接子	68	44	78.5	53	65
10	しゃ断器セル上部カバー	40	16	42	16.5	70
11	ブスバー	59	35	61	35.5	70
12	しゃ断器母線ターミナル	64	40	63	37.5	65
13	相分離母線たわみ導体	66	42	57.5	32	—
14	接続部空気温	—	—	40.5	15	—
15	相分離母線ターミナル	64	40	60.5	35	65
周囲温度		24°C		25.5°C		—
通電時間		16 時間		—		
封入ガス圧 15/3 kg/cm²·g (at 20°C)						

試験周波数 60 Hz
測定器 熱電対自動記録温度計

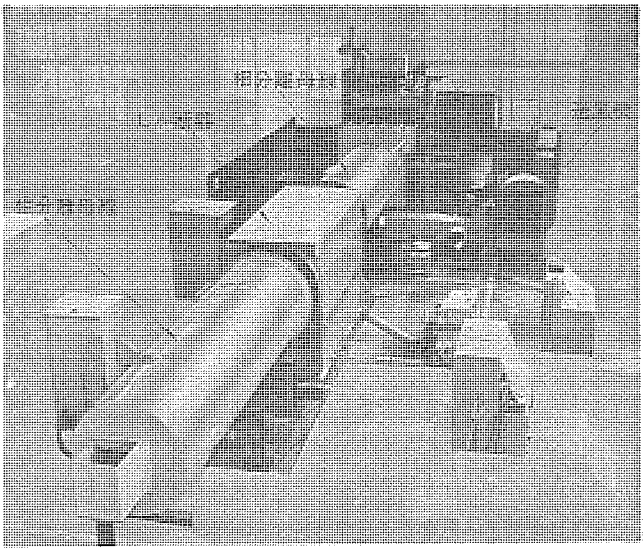
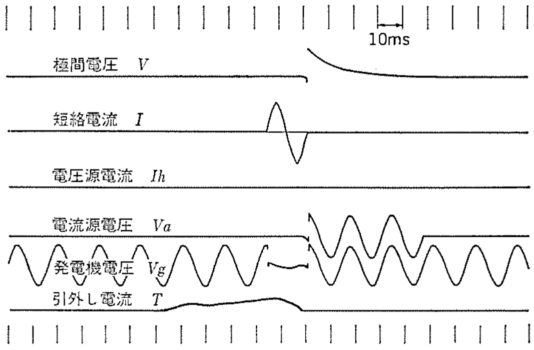


図 8. 36,000 A 温度試験中のしゃ断器

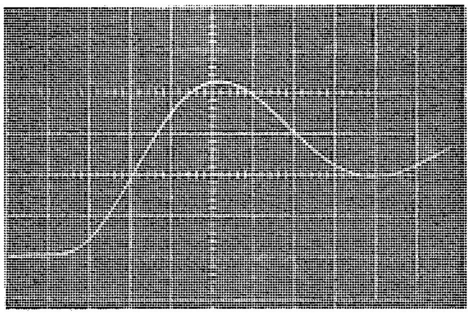
図 7. に各部の測定位置，表 2. に試験結果，図 8. に試験状況を示す。

5. 2 短時間電流試験，投入容量試験

短時間電流試験は，電流 148 kA rms (451 kA ピーク) 2.06 秒間，投入容量試験は 453 kA ピーク で試験し，いずれも良好であった。また，同時に各部のひずみ(歪)を測定したが，全く問題のないことを確認



(a) 短絡試験オシログラム



(b) 再起電圧波形

図 9. 20.8 kV 110 kA (対称) 単相合成短絡試験

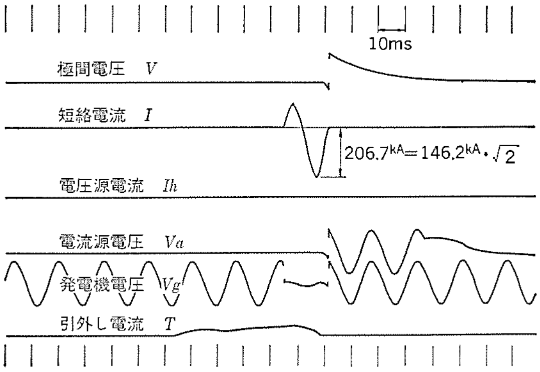
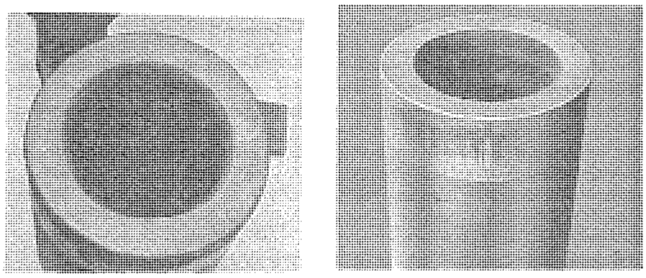


図 10. 20.8 kA 対称 144 kA 相当単相合成短絡試験 オシログラム



(a) 短絡試験後 (110 kA 10 回)　(b) 負荷電流開閉試験後 (16.3 kA 1,000 回)

図 11. 試験後の アーク 接触子

した。

5. 3 短絡しゃ断試験

単相合成及び単相直接試験を行ってしゃ断性能を検証した。図 9. (a) に 20.8 kV，110 kA (対称) 単相合成短絡試験の オシログラム，図 9. (b) にその再起電圧 オシログラム を示す。この外，16.9 kV，110 kA (直流分 40%) の単相直接短絡試験も実施した。また，試験設備の

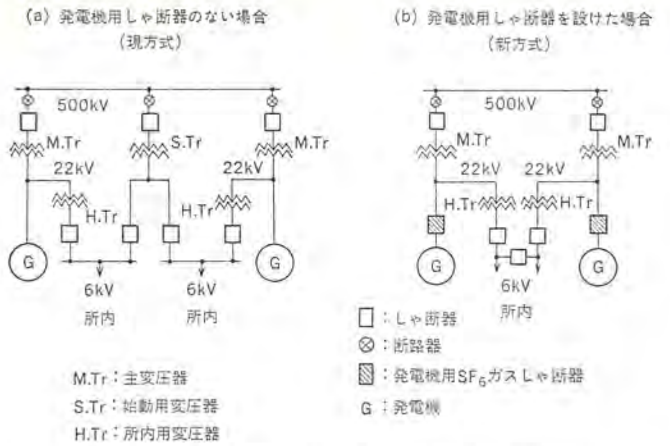


図 12. 発電機主回路の現方式と新方式との比較

都合上, 短絡電流に直流分を含めて波高値を 144 kA (rms) 相当にし, 注入電流の電流零点における電流傾斜 (di/dt) を 144 kA 相当にした単相合成試験を実施した。その オシログラム を図 10. に, 短絡試験後の アークコンタクト を図 11. (a)に示す。

5.4 脱調電流しゃ断試験

JEC-181 を参考に, 36 kV, 144 kA を基準にして 52 kV, 36 kA の脱調条件でしゃ断試験を実施したが, 良好な結果であった。

5.5 連続負荷電流開閉試験

揚水発電所における負荷開閉条件をそのまま試験条件に設定することは困難であるため, 一般の短絡試験と同一条件の試験回路で 11.6 kV, 16.3 kA のしゃ断試験を実施した。

連続 1,000 回の電流開閉試験を実施してアーク接触子の損耗程度からその限度を推定し, 2,500 回度の負荷電流開閉に十分に耐えることを確認した。

また, 最小アーク時間は 0.2 サイクル があるが, 0.65～0.75 サイクル の範囲で試験を実施した。図 11. (b)に試験後の アーク 接触子の状態を示す。

5.6 耐電圧試験

極間 30 号B, 対地間 20 号Bの商用周波・インパルス 耐電圧試験に加え, 短絡電流しゃ断試験後及び連続負荷電流開閉試験後に商用周波 45 kV 10 分間の耐電圧試験を実施し, 問題のないことを確認した。ガス 圧が 0 kg/cm² のときでも 30 号B程度の耐電圧能力を有することが確認された。

5.7 その他の試験

既に述べた試験の外に 2×10^4 回以上の無負荷連続開閉試験, 耐震試験, 進み・遅れ小電流しゃ断試験等の種々の試験を実施したが, 優れた性能を有していることが確認された。

6. 特　　長

6.1 発電機用しゃ断器を適用した発電所の特長

発電機用しゃ断器を適用していない従来の方式と, しゃ断器を適用した新方式の発電所回路との典型的な一例を図 12. に示す。

(1) 超高圧又は超々高圧の始動変圧器, 開閉装置, 敷地等が不要になる。

(2) 発電機始動・停止時の所内母線の切換えが不要になり, 操作が簡単になる。それに伴って補機電源の信頼性も高くなる。

(3) 発電機回転上昇時に変圧器が切り離されているため, 変圧器が過励磁される心配がない。

(4) 場合によっては, 主機 2～3 台に対応した超高圧機器の集中化が可能になる。

6.2 しゃ断器の特長

(1) 極めて優れたしゃ断性能

SF_6 ガス を使した 2 重圧力式で, ガス 吹付け消弧能率の良い ノズルパッキン, 2 方向吹付けを採用しているため, 短絡しゃ断・脱調しゃ断・・多数回負荷開閉能力等に優れた性能を有する。

(2) 低騒音

密閉された タンク 内で消弧が行われるため, 空気しゃ断器のような衝撃的な排気音を発生しない。

(3) 相分離母線に直結可能な構造

相分離母線に容易に直結できる構造であり, 発電機主回路の任意の場所に設置できるので, 合理的な配置が可能になる。

また, しゃ断器の外被は, 相分離母線と同様に ミニ フラックスタイプ であるので, 外部へ磁束はほとんど漏れない。

(4) 長寿命

大電流しゃ断を行っても, 高能率 SF_6 ガス 消弧室を使用しているため, 接触子の消耗は極めて少なく, 保守点検回数が少なくてすむ。

(5) 大きな通電能力

しゃ断用接触子と通電用接触子とが完全に独立した構造であるため, 安定した通電能力を有し, 自然冷却で 16 kA の大きな通電能力を持っている。このため, 例えば揚水発電所用として適用する場合, 650 MVA の大容量機に至るまで冷却しないで適用できる。

また, 相分離母線の冷却風を共用する 36 kA 定格の場合, 火力・原子力発電所用として 1,700 MVA 程度の超大容量機まで適用可能で, しかも水冷却方式と比べて構造が簡単で, 高い信頼性がある。

7. む　す　び

以上, 大容量発電機主回路用 SF_6 ガス しゃ断器の開発経緯, 定格, 構造概要, 及びしゃ断器適用に関する短絡現象の解析について述べた。このしゃ断器は, 既に多数の製作実績を持つ 550 kV 用 SF_6 ガス しゃ断器や ガス 絶縁開閉装置 (GIS) の技術に基づいて開発されたもので, 高信頼度が要求される新分野である発電機主回路(GMCS)で, 優れた性能を発揮できるものと信じられる。

終わりに, この共同研究に協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

参　考　文　献

(1) 松村, 富永ほか : 昭 51 電学関西支部大会, G 3-18
(2) 松村, 富永ほか : 昭 52 電学連大, No. 938

三菱オゾン濃度計OAシリーズ

竹内秀夫*・城下賢司*・米川浅治*

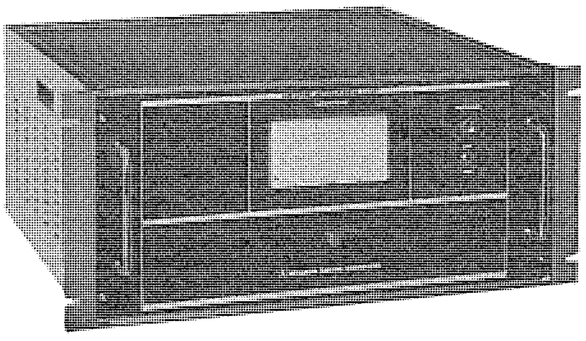
1. まえがき

最近，生活・産業排水による河川の汚濁，水資源の枯渇による原水の臭気，濁りの発生，工場の煙突から排出される窒素酸化物などの大気の汚染が著るしく大きな社会問題となっている。

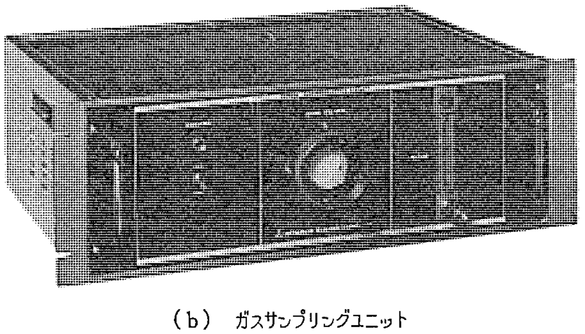
このような状況において，オゾン (O_3) のもつ強力な酸化力，分解力を生活・産業排水の脱色，脱臭，上水の浄化，排ガスの脱硝等の分野に適用した各種オゾン処理プラントが開発され，急速に公害防止機器として実用化が進んでいる。

このようにオゾンが注目されてきた背景には，オゾンが他の方法では得られない強力な酸化力，分解力を有していること，空気と電力だけからプラントの現場で生成でき，輸送・貯蔵の必要がないこと，オゾン発生量が電力により容易に制御できる，などの特長が挙げられる。しかしながら，オゾンの生成コスト(主に消費電力)は，決して安いとは言えない。また，余剰オゾンの排出による光化学オキシダントの生成など2次公害が発生する問題もある。したがって，オゾン処理プラントでは，省力化，省電力化，2次公害発生防止の観点から，オゾン発生濃度，オゾン処理後の残オゾン濃度，排出ガス中のオゾン濃度を常時監視し，プラントを最適に制御する必要がある。当社では，昭和49年10月よりオゾン処理プラントの監視，制御用として各種用途に応じられるオゾン濃度計の開発を進め，このたび，三菱オゾン濃度計OAシリーズとして製品化を完了した。

本文では，三菱オゾン濃度計OAシリーズのオゾン処理プラントにおける役割，特長，特性を中心に概要を報告する。



(a) オゾンアナライザユニット



(b) ガスサンプリングユニット

図 1. 三菱オゾン濃度計 OA-101形

2. 三菱オゾン濃度計OAシリーズの概要

2.1 オゾン処理プラントにおけるオゾン濃度計の役割

オゾン処理プラントは，基本的には図2.に示すフロー図で代表される。すなわち，オゾンを発生するオゾン発生装置，排ガス・排水等被処理物をオゾンと反応させ，被処理物を酸化分解処理するオゾン反応装置及び排出ガス中のオゾンを除去する排オゾン処理装置から構成される。オゾン処理プラントでオゾン濃度を測定する箇所としては，図2.に示すとおりオゾン発生装置出口の発生オゾン濃度を測定するM1点，オゾン反応装置後の残オゾン濃度を測定するM2点，排出ガス中のオゾン濃度を測定するM3点があるが，三菱ゾオン濃度計OAシリーズのOA-101形，OA-201形，OA-301形は，それぞれM1点，M2点，M3点のオゾン濃度測定に適用される。

オゾン処理プラントにおけるオゾンの目的は，排ガス・排水等の被処理物と反応させ処理することであるが，オゾン生成のコストは決して安いものとはいえない。時々刻々被処理物の量や濃度が変動するプラントにおいては，過不足のないオゾン注入量を制御することが省電力化の観点から重要である。すなわち，被処理物を完全に処理するためにはオゾン注入量を過剰に与えればその目的を達成できるが，余剰オゾン生成のための余分な電力が必要となるとともに，オゾン反応装置後の残オゾン濃度が増加し，排オゾン処理装置の過負荷を招きプラントのランニングコストを上げる原因になる。また，反対にオゾン注入量が少ない場合，被処理物が不完全な処理のまま排出されるので公害の問題を残すことになる。

このような観点から，オゾン処理プラントを最適に制御するオゾン濃度計の重要な役割がある。図2.のオゾン処理プラントに示すM1，M2，M3点のうちどの箇所のオゾン濃度を測定しプラントを制御するかは，プラントの種類，規模により異なるが，一般的にはオゾン反応装置後（M2点）の残オゾン濃度を測定してオゾン発生装置を制御することが多い。オゾン発生装置後（M1点）の発生オゾン濃度の測定は，オゾン発生装置の作動状況を適確に監視する上で重要であり，プラントの種類によってはこのM1点のオゾン濃度を測定してオゾン発生装置を制御することもある。排オゾン処理装置後（M3点）のオゾ

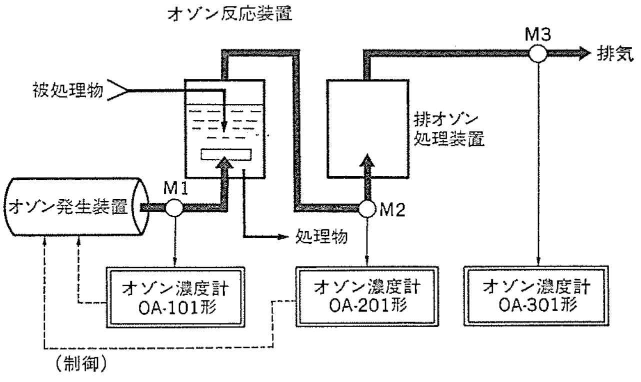


図 2. オゾン処理プラント基本フロー

 * 鎌倉製作所

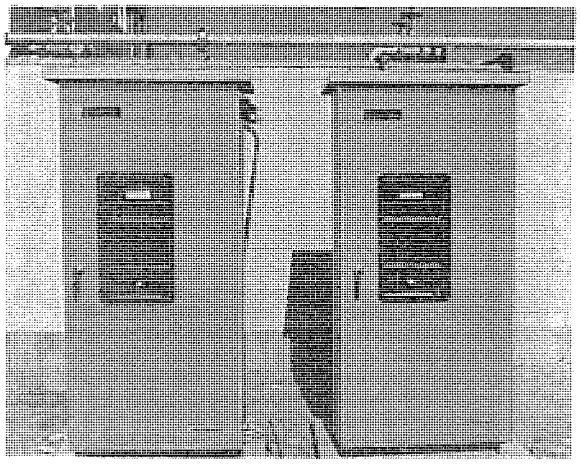


図 3. 三菱 オゾン 濃度計 OA-201 形, OA-301 形設置例

表 1. OA シリーズ の構成

No	項目	構成品	OA-101形	OA-201形	OA-301形	備考
1	オゾンアナライザユニット	光学部 電子回路 電源	○	○	○	
2	ガスサンプリングユニット	吸引ポンプ 流量計 電磁弁 ガス・エアフィルタ	○	○	○	
3	除湿装置	ドレンセパレータ 除湿器		○		試料ガスが水分を多く含む場合(残存オゾン,排オゾン測定)使用する。
4	キュービクル	キュービクル		○		屋外設置の場合使用する。

注) ○印は標準構成である。

表 2. OA シリーズ の標準仕様

	OA-101 形	OA-201 形	OA-301 形
測定方式	紫外線吸収法 (連続測定)		

測定範囲: 標準ガスセルと測定レンジ (4 レンジ切換)

形式	ガスセル \ レンジ	フルレンジ	1/2レンジ	1/4レンジ	1/10レンジ
OA-101 形	40G	40g/Nm³	20g/Nm³	10g/Nm³	4 g/Nm³
	20G	4 〃	2 〃	1 〃	0.4 〃
OA-201 形	10G	10g/Nm³	5 g/Nm³	2.5g/Nm³	1 g/Nm³
	20G	4 〃	2 〃	1 〃	0.4 〃
	200P	200 ppm	100 ppm	50 ppm	200 ppm
OA-301 形	20P	200 ppm	10 ppm	5 ppm	2 ppm

測定精度

項目 \ レンジ	フルレンジ	1/2 レンジ	1/4 レンジ	1/10 レンジ
再現性 (% FS)	±0.4	±0.8	±0.8	±2
ゼロドリフト (% FS)	±0.2	±0.4	±0.8	±2
スパンドリフト (% FS)	±2	±2	±2	±2
直線性 (% FS)	±2	±2	±2	±2

注) 1. 試験条件は JIS B 9981 (1975) に準ずる同一条件とする
2 ゼロリフトは OA-101 形・OA-201 形については 1 時間に 1 回, OA-301 形については15分間に 1 回の零点調整を行った場合の値である。

	OA-101 形	OA-201 形	OA-301 形
表示	リニア目盛 1.5 級メータによる		
出力信号	(1) DC 4〜20 mA リニア (絶縁) 負荷抵抗 400Ω 以下 (2) DC 0〜1 V リニア, 出力抵抗 500Ω 以下		
アラーム信号	(1) Power Alarm : 電源断の時メイク接点 (2) Check Alarm : 点検時メイク接点		
試料ガス流量	約 2 l/min (標準)		約 3 l/min (標準)
応答時間 (90%応答)	10 秒以下 (流量 2 l/min)	30 秒以下 (流量 2 l/min)	30 秒以下 (流量 3 l/min)
零点調整	内蔵のタイマによる自動零点調整 (3.75, 7.5, 15, 30, 60分 2, 4, 8 分又は16時間に 1 回) 任意時の零点調整はモード切換スイッチでワンタッチで可能		
暖時間	約 3 時間		
接ガス部材質	SUS 316, テフロン, バイトン ポリプロピレン, 石英ガラス		
所要電源	AC 100 V±10 % 50/60 Hz		
消費電力	(1) オゾンアナライザユニット 70 VA 以下 (2) ガスサンプリングユニット 50 VA 以下	(1) オゾンアナライザユニット 70 VA 以下 (2) ガスサンプリングユニット 50 VA 以下 (3) キュービクル(除湿器を含む) 250 VA 以下	(1) オゾンアナライザユニット 70 VA 以下 (2) ガスサンプリングユニット 50 VA 以下
周囲温度	−5〜+40°C		
寸法・重量	(1) オゾンアナライザユニット 約 27 kg 480 W×500 D×200 H (2) ガスサンプリングユニット 約 15 kg 480 W×380 D×150 H	(1) オゾンアナライザユニット 約 27 kg 480 W×500 D×200 H (2) ガスサンプリングユニット 約 15 kg 480 W×380 D×150 H (3) キュービクル 約 160 kg 90 0W×690 D×1,860 H	(1) オゾンアナライザユニット 約 30 kg 480 W×500 D×200 H (2) ガスサンプリングユニット 約 15 kg 480 W×380 D×150 H

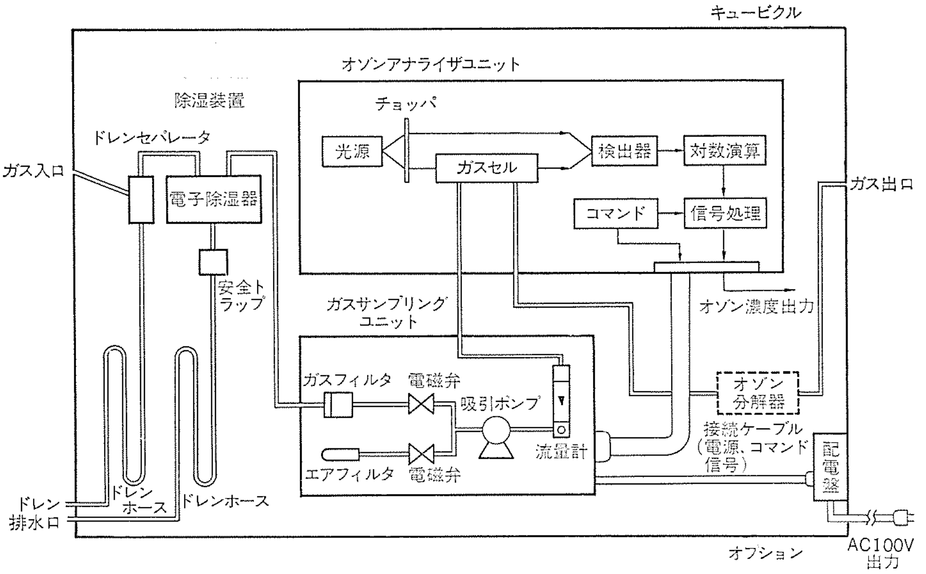


図 4. OA-201 形基本構成

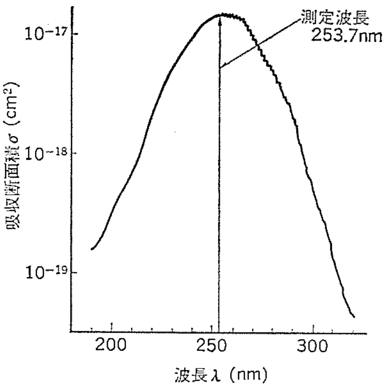


図 5. オゾンの共鳴吸収スペクトル

ン濃度測定は一般的に，プラント制御用として使われることは少ないが，排出ガスの大気汚染防止の観点と，排オゾン処理装置の保守管理の立場からすべてのオゾン処理プラントにおいて不可欠な測定といえる。また，M 3 点の測定に代表される低濃度用オゾン濃度計 OA-301形は，高濃度オゾンを発生するオゾン発生装置付近の有毒な漏えいオゾン検知にも適用でき，作業者の安全管理の面にも有用である。

2.2 構成及び標準仕様

OA シリーズの構成を表 1. に，オゾン処理プラントで最も重要な役割をする OA-201 形を代表してその系統図を図 4. に示す。オゾンアナライザユニットはオゾンによる紫外線吸収量からオゾン濃度を求め，各測定レンジに対して DC 0-1 V 及び DC 4-20 mA の出力を得るためのユニットである。ガスサンプリングユニットはオゾンアナライザユニットからの制御指令により試料ガス又はゼロガスをガスセルに導入するためのユニットである。除湿装置は図 2. のM 2 点，M 3 点の試料ガスのように水分を多く含む場合に水滴によるガスセル窓のくもり，あるいはフィルタの目づまりを未然に防ぐために用いられる。キュービクルはオゾン濃度計を屋外に設置する場合に用いられる。

OA シリーズの標準仕様を表 2. に示す。

3. 測定原理

オゾンは図 5. に示すように紫外領域 (200～300 nm) において固有の共鳴吸収スペクトルをもっている。したがって，オゾンを含む試料ガスをガスセルに導き，吸収スペクトルに合致する紫外線スペクトルを照射した時の吸収量からオゾン濃度を非破壊的に測定することができる。このような測定法を紫外線吸収方式という。

すなわち，長さ l のガスセルに濃度が N の試料ガスを封入し，波長 λ で強度 I_0 の紫外線を照射すると，ガスセルを通過した透過光の強度 I は Lambert-Beer の法則から次のように表される。

$$I(\lambda)=I_0(\lambda)\exp(-N\cdot\sigma(\lambda)\cdot l) \quad \cdots\cdots(1)$$

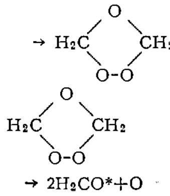
ここで，$\sigma(\lambda)$ は波長 λ における試料ガスの吸収断面積で一般に実験的に求められる定数である。式 (1) を変形して次式を得る。

$$N=-\frac{\ln T(\lambda)}{\sigma(\lambda)\cdot l},\quad T(\lambda)=\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad \cdots\cdots(2)$$

したがって，試料ガスの濃度 N は，$\sigma(\lambda)$ 及び l が既知の定数であるので透過率 $T(\lambda)$ を測定することにより求めることができる。

紫外線光源は低圧水銀ランプを用い，253.7 nm の線スペクトルに対する透過率からオゾン濃度を求めている。

表 3. オゾンの測定方式

測定方式	測定原理	特徴
紫外線吸収法	○ オゾンが紫外線領域 (250 mm 付近) で強い吸収を示すことを利用したもので，その光の吸収量(透過率)からLambert-Beer の法則により試料ガス中のオゾン量を求める。 $N=-\frac{1}{\sigma l}\ln T$ ○ 測定波長 253.7 nm (低圧水銀ランプ)	(1) 純物理的な測定方式のため，オゾンガスを非破壊連続測定できる。 (2) したがって保守性がよい。 (3) 測定濃度範囲が広い。 (4) 共存ガスの干渉は受けにくい (5) 応答性がよい。 (6) 試料ガス流量変動による精度の低下がない。
吸光光度法	○ KI 吸収液と試料ガスを一定流量比で接触させ，遊離したよう素を吸光光度計で測定し，試料ガス中に含まれるオゾン濃度を求める。 ○ $2KI+H_2O+O_3 \rightarrow 2KOH+I_2+O_2$ ○ 吸光度測定波長 352mm	(1) 共存ガス (H_2S, SO_2, NO, NO_2 等) の干渉を受ける。 (2) KI 吸収液が必要なため保守性が悪い。 (3) 試料ガスの流量変動が直接誤差になる。 (4) 応答性が悪い。 (5) 測定濃度範囲が狭い。
電量法	○ KI 吸収液と試料ガスを一定流量比で接触させ，試料ガス中のオゾン濃度に比例したよう素を遊離させ，このよう素を吸収液中で陰極電解し，得られた電解電流量から試料ガス中に含まれるオゾン濃度を求める。 ○ $2KI+H_2O+O_3$ $\rightarrow 2KOH+I_2+O_2$ $I_2+2e \rightarrow 2I^-$ $C+2OH^- \rightarrow CO+H_2O+2e$	吸光光度法とほぼ同じ。
化学発光法	○ オゾンとエチレンガスを反応させたときに生ずる化学発光の発光強度を測定し，試料ガス中のオゾン濃度を求める。 ○ $H_2C=CH_2+O_3$  $\rightarrow 2H_2CO^*+O$ $H_2CO^* \rightarrow H_2CO+h\nu$ ○ 発光波長 300mm～500mm (ピーク 430mm)	(1) 試料ガス，エチレンガスの流量変動が直接誤差となる。 (2) 検出器 (光電子増倍管) の感度変化が直接スパンドリフトとなる。 (3) 有毒，爆発性のあるエチレンガスを使用するため，保存性が悪い。 (4) 測定濃度範囲は，吸光光度法，電量法よりもやや広く，共存ガスの干渉も比較的受けにくい。

4. 特　　長

三菱 オゾン 濃度計 OA シリーズ は オゾン 処理 プラント の監視・制御用として開発設計したものである。以下に原理的な面も含めて特長を述べる。

(1)　非破壊連続測定方式である。

純物理的な紫外線吸収方式を測定原理としているため，試料 ガス 中の オゾン を紫外線の透過率から直接かつ連続的に測定できる。他の測定方式のように KI 吸収液，エチレンガス 等の補助試薬，ガス を必要としないため精度，安定性，保守性に優れている。

(2)　共存 ガス の干渉対策は不要である。

紫外線領域 (253.7 nm 付近) における共存 ガス (CO, CO_2, NH_3, H_2O, NO, NO_2, SO_2 等) の吸収断面積が オゾン(O_3) に比べて極めて小さいため，通常共存 ガス の干渉は無視できる。

(3)　相対値測定方式である。

光学的な透過率の測定には相対値測定方式（2光束方式）を採用しているので，ゼロドリフト の要因となる光源の輝度変化，検出器の感度変化の影響が実用上無視できる。

(4)　自動零点調整機能を内蔵している。

ガスセル 窓の汚れなどによる ゼロドリフト を自動的に補正できるので，長期間の連続測定においても高い測定精度を維持することができる。

(5)　スパン 温度補償回路を内蔵している。

試料 ガス の温度変動は直接 スパンドリフト(絶対温度に反比例) になるが，ガスセル の温度を検出することにより スパン の温度補正を行う当社独自の スパン 温度補償回路を内蔵しているので スパンドリフト は非常に小さく，スパン 調整は通常1～3カ月に1回程度で要求精度を十分満足する。また，スパン 調整は スパンチェッカ(光学 フィルタ) によって簡単に実施できる。

(6)　低濃度から高濃度まで測定範囲が広い。

ガスセル 交換と レンジ 切換えにより フルスケール 値で最大 40 g/Nm^3 (≒18,000 ppm) から最小 2 ppm までが得られ，発生源の オゾン 濃度から排 オゾン あるいは漏えい オゾン までの幅広い測定が可能である。

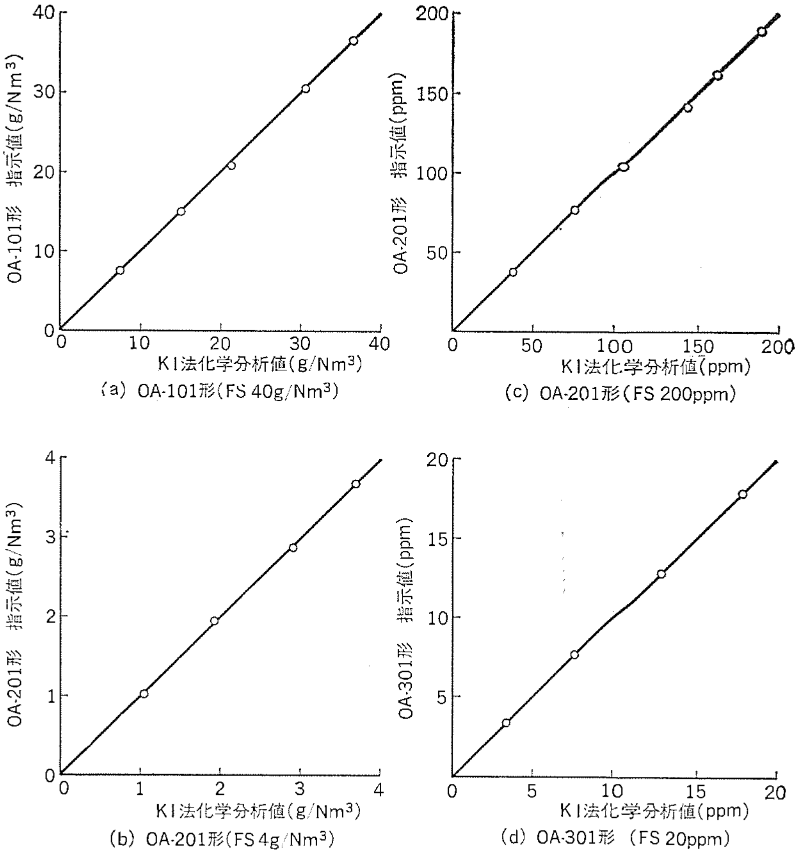
(7)　保守性

日常点検，定期点検項目とその標準的な実施期間を表 4. に示す。保守，点検操作を簡単化し，ガスセル 窓の清掃，低圧水銀 ランプ の交換が未熟練者でも行える構造になっている。

表 4. 点検項目

	No.	点検項目	点検方法	標準的な周期	備考
日常点検・定期点検	1	試料ガス流量	流量目視点検	1 週間	
	2	ガスフィルタ	目づまり，汚れを目視点検	1 週間	約2週間ごとに新しいものと交換する。
	3	ドレンホース	水位を目視点検	1 週間	水位が異常になればサンプル導管等を点検する。
	4	ミストフィルタ	目づまり，汚れを目視点検	1～2週間	約2週間ごとにエレメントを新しいものと交換する。
	5	エアフィルタ ゼロガスフィルタ	目づまり，汚れを目視点検	2 カ月	2～3カ月で新しいものと交換する。
	6	零点チェック	零点を手動零点調整	1～3カ月	零点調整ができなくなればガスセル窓を清掃する。
	7	スパンチェック	スパンチェック	1～3カ月	
	8	光電管出力	光電管出力チェック	1～3カ月	水銀ランプの交換は半年～1年

注）表は一般的な試料ガス（例えば，水処理）に対するものである。



(a) OA-101形(FS 40g/Nm³)　(b) OA-201形(FS 4g/Nm³)　(c) OA-201形(FS 200ppm)　(d) OA-301形 (FS 20ppm)

図 6. 三菱 オゾン 濃度計と KI 法の相関

5. 特　　性

三菱 オゾン 濃度計 OA シリーズ の性能については 表 2. に示したとおりであるが，性能中特に重要な直線性，ゼロドリフト，スパンドリフト，応答時間に対する特性は以下のとおりである。

5.1 直線性

OA-101 形，OA-201 形，OA-301 形の測定値と一般的な オゾン 分析方法であるよう化 カリウム 法 (KI 法) による測定値を比較した結果を 図 6. に示す。両者は フルスケール に対し±2％以内で一致しており，高濃度から低濃度までの広い範囲で測定精度が高いことが分かる。

5.2 ゼロドリフト・スパンドリフト

OA-201 形 (10 G) の ゼロドリフト 試験を フルスケール 10 g/Nm^3 レンジ で約 40 時間実施した結果を図 7. に示すが，ゼロドリフト は ±0.14％以下であった。なお，この試験では自動零点調整回路を使用していない。スパンドリフト 試験を フルスケール 1 g/Nm^3 レンジ で SO_2 スパンガス (SO_2 1.02％) を用いて実施した結果を 図 8. に示すが，スパンドリフト は −12°C から +50°C の範囲で 3.3％であった。

5.3 応答時間

OA-101 形，OA-201 形の応答時間 (90％応答) の測定例を図 9. に示す。応答時間は OA-101 形で約 5.5 秒，OA-201 形で約 18 秒，OA-301 形で約 13 秒である。実際の プラント においては採取点 (測定点) から オゾン 濃度計までの採取導管などによる 応答遅れも加わるため プラント の監視・制御を行う場合には注意が必要である。

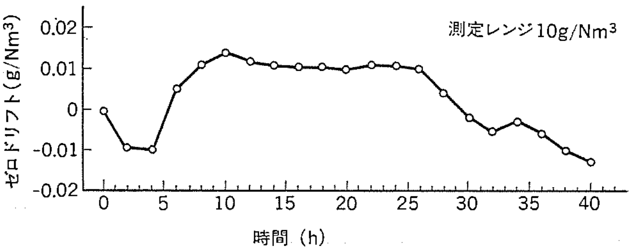


図 7. OA-201形 (10G) ゼロドリフトデータ

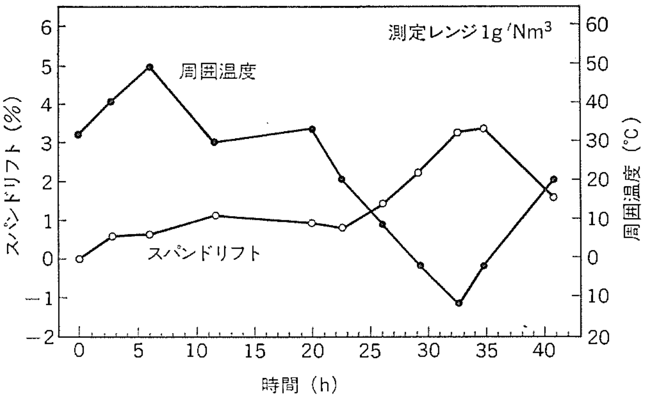


図 8. OA-201形 (10G) スパンドリフトデータ

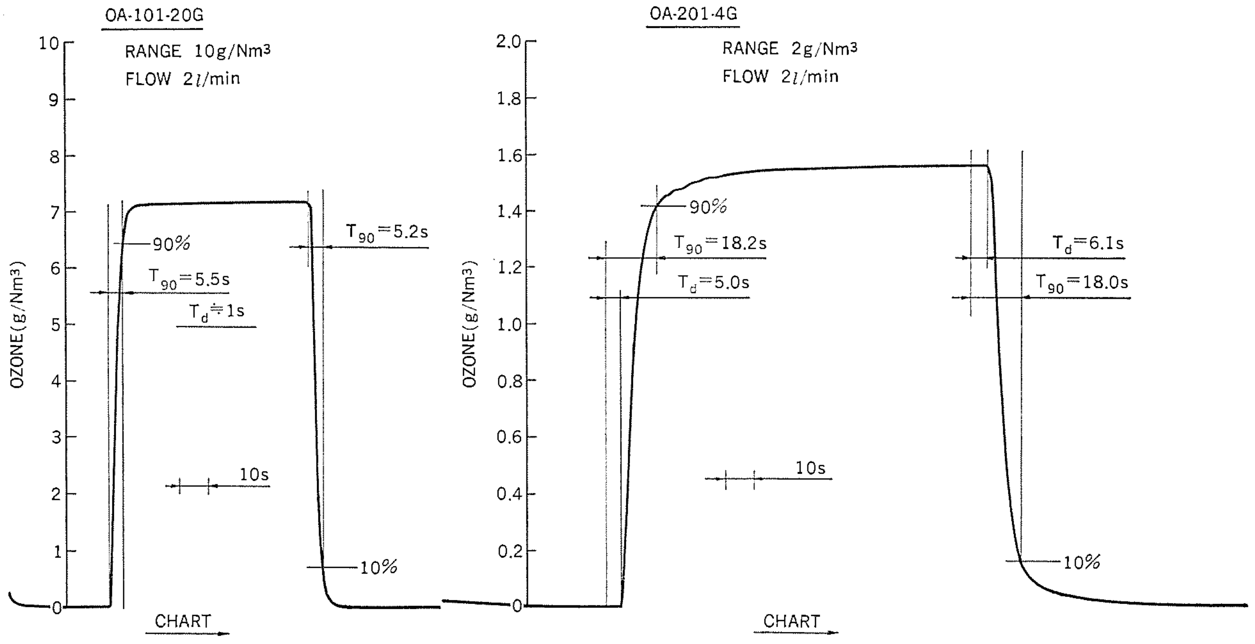


図 9. OA-101形, OA-201形応答時間データ

注) 1. OA-101形の応答時間はガスサンプリングユニットのGAS INLETからガスを入れた場合の (90%) 応答である。
2. OA-201形の応答時間はキュービクルのGAS INLETからガスを入れた場合の (90%) 応答である。

6. むすび

三菱オゾン濃度計OAシリーズは現在までに染色廃水処理場，浄水場，し尿処理場等に納入されか(稼)動している。また某電力会社におけるオゾン脱硝実験プラントで実測試験を実施し良好な結果を得ており，各種オゾン処理プラントにおける適合性は十分に評価されている。今後，広い分野にわたりオゾン処理プラントが発展するのに伴いプラントの監視・制御用センサの必要性が高くなるが，これらの要求に十分こたえられるものと考える。

直流機の整流現象理論

阪部茂一*・野村達衛*・岩本雅民**

1. まえがき

直流機は整流子という独特の機構をもっている。この整流子は補極及び補償巻線の助けによって，多数の電機子コイルの電流の極性を短時間(~1 ms)に，かつ，低誘起電圧(数~数十V)で順次，高速切換え(転流)するものである。この時の現象を整流現象と呼 でいる。この整流現象は複雑であって，現象を詳細かつ完全には(把)握することはなかなか難しいとされていた。整流現象を複雑にする要因として

(1) ブラシ抵抗の非線形性

(2) ブラシの広いカバーリングやスタガ配置

(3) 同時に整流状態にある多数の電機子コイル間の電磁結合と回転に伴うその複雑な変化

(4) 補極の作る整流磁束によって誘起される整流起電力の複雑な時間変化

(5) 電機子コイルに短節巻やトレッペン巻などの非対称性が存在すること

などがある。通常の直流機では，これらの要因を設計及び調整パラメータとして採用し，できるだけ最適な条件に選定組合せることによって良好な整流状態が達成されている。過去においては，これらの要因をすべて考慮して整流現象を究明することはできなかった[(1)(2)]。そのため整流設計は，主な二，三の要因だけを考慮した近似理論[(3)(4)]と長年にわたる実験データを基にした設計者の優れたどう(洞)察力とによってなされてきた。

筆者らは電子計算機による数値解析技術を適用して，上述の要因をすべて考慮した新しい整流理論を導出した。この整流理論は既に実機の設計開発に適用されており[(5)]，直流機の合理化や性能向上に貢献している。この論文では筆者らの整流理論を実例をまじえながら紹介したい。なお，この論文では具体的な解析例として，図 1. に示すような大形の直流機を採り上げた。またモデル機の主要諸元を表 1. にまとめた。

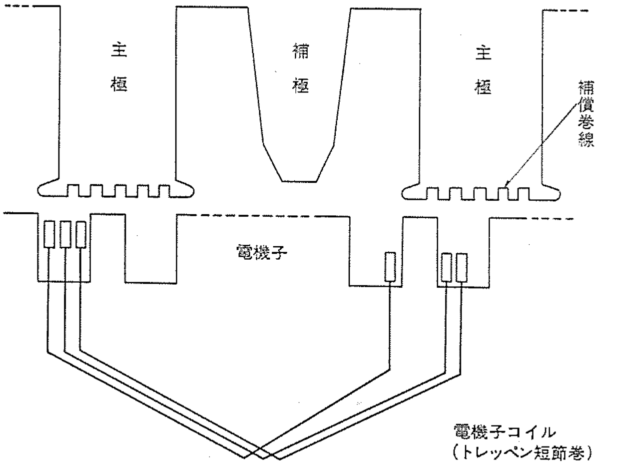


図 1. 大形直流機の補極周辺の原理構造

表 1. 解析に用いた主要諸元

ブラシ	抵抗特性	$V=0.017\ (i/I_{co})^{1/1.8}\Omega$
	カバーリング	5.27 セグメントピッチ
電機子コイル	スロット内コイル数	3列×2段/スロット
	巻線方式	トレッペン短節巻
アンペアターン	主極(低速時)	1 (base)
	補極	1.44
	補償巻線	1.26
	電機子	2.08
ライナ	非磁性ライナ付	

2. 整流方程式

整流現象を検討するためには，ブラシと整流子片(セグメント)との間の電圧変化を詳細に把握する必要がある。このためには"同時に整流状態にある多数の電機子コイル"の電流変化を正確に求めなければならない。この同時に整流状態にある電機子コイルの個数を n，電機子コイル電流を $[i]$ とすれば，次のような方程式が成立つ。

$$I_{co}\cdot\begin{bmatrix} L_1(t) & M_{12}(t)\cdots M_{1n}(t) \\ M_{21}(t) & L_2(t)\cdots M_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots\quad\quad\vdots \\ M_{n1}(t) & M_{n2}(t)\cdots L_n(t)\end{bmatrix}\begin{bmatrix} di_1/dt \\ di_2/dt \\ \\ di_n/dt\end{bmatrix}+R_cI_{co}\cdot\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \\ i_n\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} e_{c1}(t) \\ e_{c2}(t) \\ \\ e_{cn}(t)\end{bmatrix}+[\boldsymbol{V}_b(t)]=0 \quad\cdots\cdots(1)$$

ここで電機子コイル電流 $[i]$ は電機子並列回路電流の定格値 I_{co} で除して無次元化している。また記号は次のとおりとする。

t: 時間

L_k: 電機子コイルの自己インダクタンス

M_{jk}: 電機子コイルの相互インダクタンス

R_c: 電機子コイルの一線輪辺分の抵抗

e_{ck}: 整流起電力

この式(1)がいわゆる整流方程式と呼ばれる方程式である。第1項は各電機子コイル間の電磁結合による電圧に相当する。また，第2項は各電機コイルの抵抗電圧降下分に，第3項は補極下の整流磁束による速度起電力(整流起電力)に，第4項はブラシ整流子片間の接触電圧降下にそれぞれ相当する。第4項のブラシ整流子片間電圧 $[\boldsymbol{V}_b(t)]$ は電流に関して非線形であること，及び整流子片のブラシに対する接触面積が回転に伴い時間的に変化することを考慮して，次のように表せる。(ただし，電機子コイルが重ね巻の場合)

$$[\boldsymbol{V}_b(t)]=R_bI_{co}\cdot\begin{bmatrix} \left(\dfrac{i_1+i_c}{S_{fn}(t)}+i_1-i_3\right)^q \\ \left(\dfrac{i_2+i_c}{S_{fs}(t)}+i_2-i_4\right)^q \\ (i_3-i_1+i_3-i_5)^q \\ \vdots \\ (i_{n-2}-i_{n-4}+i_{n-2}-i_n)^q \\ \left(i_{n-1}-i_{n-3}+\dfrac{i_{n-1}-i_c}{S_{bn}(t)}\right)^q \\ \left(i_n-i_{n-2}+\dfrac{i_n-i_c}{S_{bs}(t)}\right)^q \end{bmatrix} \quad\cdots\cdots(2)$$

* 中央研究所 ** 中央研究所(工博)

ここで S_{fn}, S_{fs} は隣り合った異極ブラシの各入口端の近傍の整流子片とブラシの接触面積を，S_{bn}, S_{bs} は同じく各出口端の近傍の整流子片のそれを表す。また R_b は定格電流に対するブラシ抵抗，i_c は電機子並列回路電流を I_{co} で無次元化した値，q はブラシ抵抗の電流依存性を示す指数[6]であるとする。

整流現象の解析とは，以上に述べた整流方程式を各電機子コイル電流 [i] を未知数として数値解析することである。これは瞬時々々の時間 t をパラメータとして電流 [i] に関する多次元連立微分方程式を解くことになる。筆者らの計算では，t のステップサイズ（時間間隔 Δt）は整流周期（~1 ms）の数千分の一の時間に選定しており，未知数 [i] の個数 n は最大34まで取扱っている。なお，数値解析法としては n の大きさに対応して Runge Kutta 法，Gear 法及び Kutta Merson 法を使いわけて計算時間の短縮を計っている。

式(2)，式(3)から求められるブラシ整流子片間電圧は整流状態を予測するための最も重要なパラメータであって，火花電圧と比較検討される。

3. 整流起電力

3.1 整流磁束

整流磁束はその誘起する整流起電力がリアクタンス電圧を補償するように選定される。整流方程式（式(1)）に含まれる整流起電力 [e_c] を正確に知るためには，この整流磁束の分布を求める必要がある。整流磁束分布は補極の形状によって決まるものである。整流磁束分布を解析する方法としては，差分法や有限要素法などの数値解析[7]と等角写像法による解法が考えられる。ここでは計算時間の経済性の点から後者の等角写像法を選んだ[8]。

3.1.1 等角写像法

図 2. は主極，補極及び電機子の磁気回路を Z 平面（$z=x+jy$）上に示したものである。ここで主極及び補極は一方向に無限大の広がりをもつものと仮定している。この境界条件に対する Schwarg Christoffel の $z-t$ 変換式[9]は次のようになる。

$$\frac{dz}{dt}=\frac{g_i}{\pi\sqrt{-t_1t_3}}\frac{\sqrt{(t+t_1)(t-t_3)}}{(t+1)t}\left[\frac{(t-t_2)t_3}{(t-t_3)t_2}\right]^{\beta/\pi}\cdots\cdots\cdots(3)$$

ここで，t は t 平面上での座標で，t_1, t_2, t_3 は境界上の角点に相当する t 平面上での t の値である。g_i は補極空げき(隙)長，β は補極端切上げ角度（ラジアン）である。また，主極と補極に対応する境界に対しては，主極アンペアターン AT_m，補極アンペアターン AT_i 及び補償巻線アンペアターン AT_c で決まる磁位（図中に記入）を与えた。電機子表面に対応する境界に対しては，電機子コイルアンペアターン AT_a の分布によって決まる磁位を与える。ここでは，AT_a は整流帯外では，主極中心位置で零とし直線的に変化するものと仮定し，整流帯内では，放物線曲線分布であると仮定した。

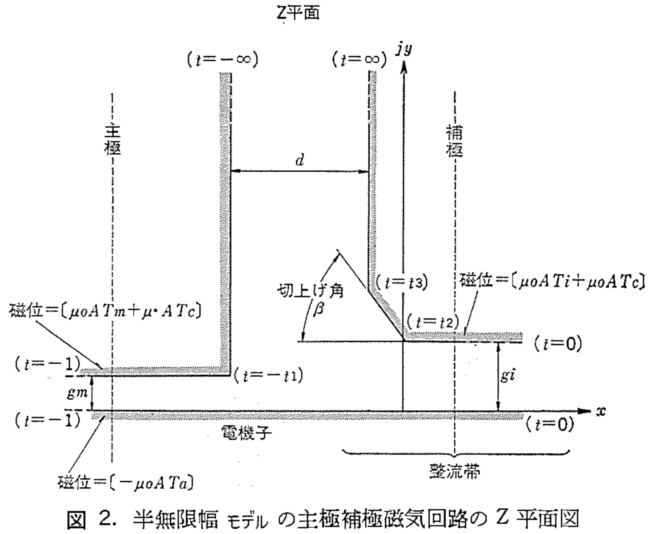


図 2. 半無限幅モデルの主極補極磁気回路の Z 平面図

実際の主極と補極は，左右対称の中心軸をもち有限幅であるので上記の解析理論を修正する必要がある。ここでは，補極中心軸で各磁束分布に対称性が成立つよう修正する Dreyfus 氏らの近似法[10]を採用した。

3.1.2 整流磁束分布

(1) 整流磁束分布の成分

整流磁束分布は補極アンペアターンの作る磁束成分だけでなく補償巻線，主極及び電機子の各アンペアターンの作る磁束成分から成立っている。図 3. は，各アンペアターンによる磁束成分と，それらの総和として得られる全体としての整流磁束分布を示している。これから分かるように，補極・補償巻線・電機子の各アンペアターンの作る磁束分布は互いに異なっており相似でない。従来の解析法[11]においては，これらの各アンペアターンの整流磁束分布に対する寄与を同一に扱っていたが，整流磁束分布を正確に把握するためにも，これらの各成分を区別して厳密に取扱うことが必要である[8]。

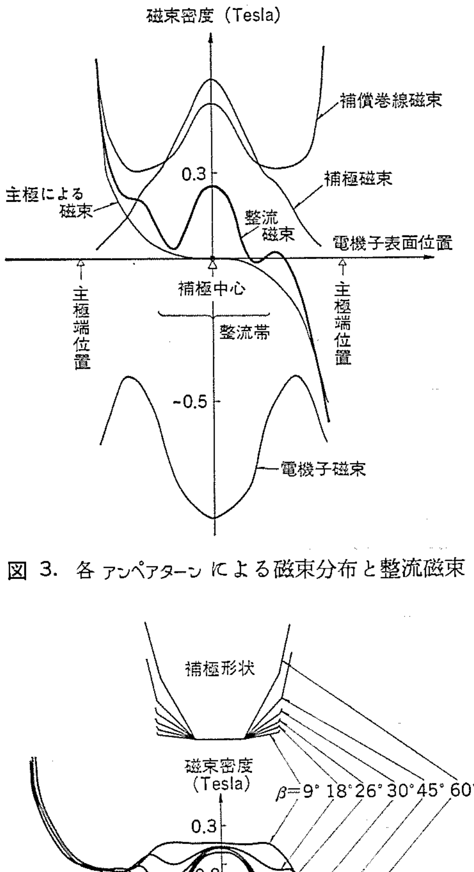


図 3. 各アンペアターンによる磁束分布と整流磁束

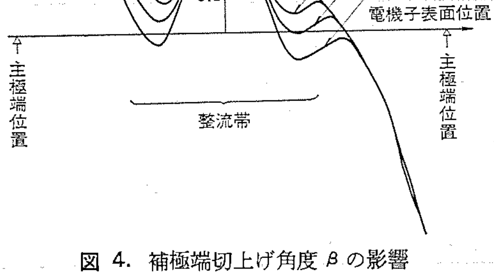


図 4. 補極端切上げ角度 β の影響

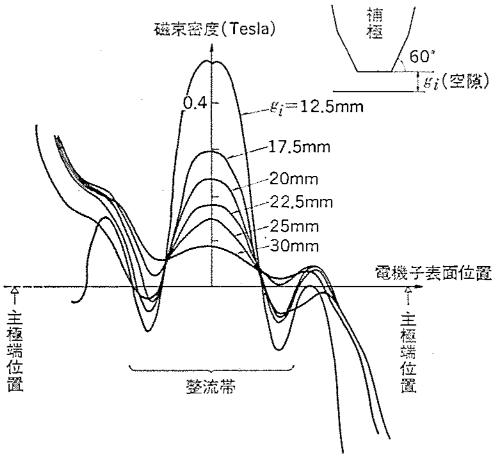


図 5. 補極空隙長 g_i の影響

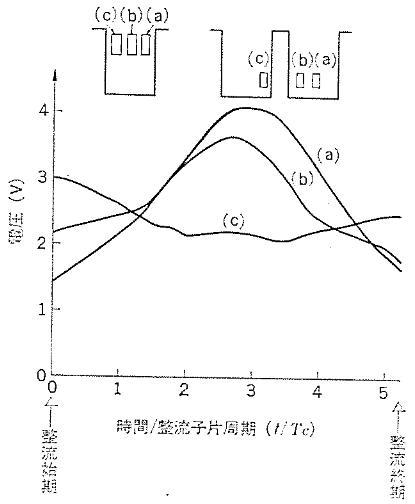


図 6. 整流起電力分布

整流磁束分布は補極中心軸に関して非対称であり，整流帯内に磁束分布の大きなおうとつ(凹凸)が存在しているが，このことは実際の直流機においてしばしば起こっている。今までの解析では，整流磁束分布を簡単な三角関数表示で近似する寸法[11]がしばしば採られてきたが，この従来の方法は厳密とはいえない。

(2) 補極の形状

整流磁束分布は補極の形状によって影響されるので，その形状の選定は整流設計における重要な作業である。ここでは，補極の形状を表示する パラメータ として， 図 2. に示すような補極端切上げ角度 β を選ぶ。この切上げ角度 β の大きさの整流磁束分布への影響を前述の等角写像法を用いて検討しておく。 図 4. はその結果を示す。この図から切上げ角 β が大きい場合，整流帯内に整流磁束分布の“くぼみ(凹部)”が存在することが分かる。この磁束分布の“くぼみ”が著しいと整流現象が複雑になって整流調整がやっかいになる傾向がある。このことから，整流帯の広い場合には切上げ角 β を極端に大きくするのは望ましくないことが多い。

(3) 補極空隙長の影響

図 5. は補極端の空げき(隙)長 g_i を パラメータ として変化させたときの整流磁束分布を示したものである。極端に空隙長が小さい場合には，補極中心で高い磁束密度が得られるが，磁束分布の凹凸が著しくなり平たんさが失われる傾向にある。すなわち，整流調整のための手段として，空隙長を変えることは整流磁束分布の大幅な変化を引き起こすことを示している。

3. 2 整流起電力

整流起電力とは電機子 コイル が補極下を通過する時にその コイル に誘起される速度起電力である。 この整流起電力は， 3. 1 節で求めた整流磁束分布から コイル の巻線方式を考慮して求めることができる。電機子 コイル の整流起電力は N 極補極下の コイル 辺 の 速度起電力と S 極補極下の コイル 辺の速度起電力の和として求められる。この場合，次の要因を考慮しなければならない。

(1) 短節巻の場合， 各 コイル 辺の補極中心に対する相対位置が同一でないこと。

(2) 同一 スロット 内の複数個の電機子 コイル は，それぞれ整流開始時の位置を異にする。

(3) トレッペン 巻の場合，各 コイル 線輪辺間の ピッチ が同一でないこと。

このようにして求めた整流起電力の時間変化を図 6. に示す。 対象 モデル は表 1. に示したもので， トレッペン 巻である。この場合，同一 スロット 内の コイル (a)，(b)，(c)（ただし，上口側でみて）の各整流起電力が異なっている。特に線輪辺間 ピッチ の最も小さい コイル (c) の場合，その整流起電力の時間変化がほぼ平たんになることを示している。 トレッペン 巻を採用した直流機では， コイル によって整流起電力が異なり， したがって無火花帯が コイル ごとに異なるものであることは注意しなければならない。なお，このような同一 スロット 内の各 コイル の整流起電力の差異は， トレッペン 巻でない場合にも，小さいながらも存在することもこの論文の理論を用いた筆者らの検討によって分かっている。

4. インダクタンス

整流方程式において重要な項の一つである リアクタンス 電圧（式(1)の第1項）を正確に求めるには整流中の各 コイル の自己及び相互 インダクタンス を正確に知る必要がある[12]。ここでは，筆者らが導いた インダクタンス の理論式をまとめておく。

4. 1 インダクタンスの理論式

整流中の コイル の インダクタンス は， スロット 部 インダクタンス， 端部 インダクタンス 及び歯端部 インダクタンス から成る。この各 インダクタンス の理論式を以下に示す。

4. 1. 1 スロット部インダクタンス

図 7. (a) は スロット 内における コイル の位置関係を示す。この配置に対して磁界の 2 次元解析を行い， 各 コイル の自己及び相互 インダクタンス を求める。 この 2 次元解析においては， 従来の Langsdorf 氏らの理論[13]とは異なり各導体の スロット 内における幅方向の位置関係が厳密に考慮される。一般の直流機では， スロット 内に多数の コイル が存在するからこのような厳密な 2 次元解析が整流特性のより詳細な解析のために必要である。鉄心部分の透磁率を無限大 ($\mu=\infty$) と仮定して 2 次元解析を行うと， コイル I，II の相互 インダクタンス M_s は次のようになる。

$$M_s=\frac{4\mu_0 W_s^2\ h_s^2\ l}{(a_2'-a_2)\,(b_2'-b_2)\,(a_1'-a_1)\,(b_1'-b_1)}$$

$$\int_{a_2}^{a_2'}\int_{b_2}^{b_2'}\sum_{m=0}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\left(\sin\frac{m\pi a_1'}{W_s}-\sin\frac{m\pi a_1}{W_s}\right)}{m^2(n+0.5)^2\pi^4}$$

$$\times\frac{\left(\sin\frac{(n+0.5)\,\pi b_1'}{h_s}-\sin\frac{(n+0.5)\,\pi b_1}{h_s}\right)}{(m^2h_s^2+(n+0.5)^2W_s^2}$$

$$\cos\frac{m\pi x}{W_s}\cos\frac{(n+0.5)\,\pi y}{h_s}dxdy \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

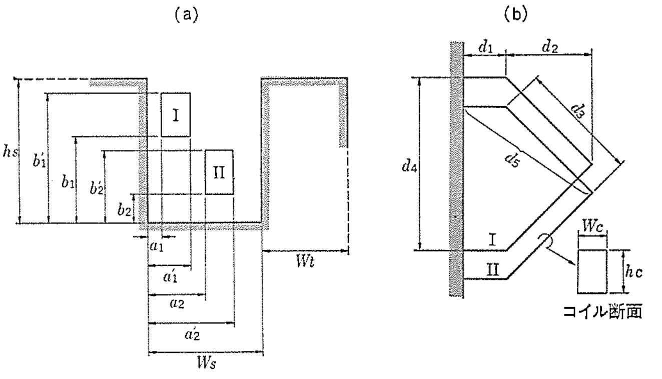


図 7. インダクタンスの計算のモデル

ここで，l は有効電機子長である。その他の記号は図中に示したとおりとする。コイル I の自己インダクタンス L_s はコイル I がコイル II とスロット内の同一位置（$a_1=a_2$，$b_1=b_2$……）にあると仮想して式（4）より求められる。

4. 1. 2 端部インダクタンス

図 7.（b）に示した端部コイルについてインダクタンスを求めるものとする。今まで，このインダクタンスは Langsdorf 氏[13]や Richter 氏[14]らの近似式で求めるのが普通であって，筆者らは，コイル端部の旋回角度 α 及びコイル辺間の距離 d_m を正確に考慮できる理論式を導いた。

まず，コイル I の自己インダクタンス L_e は

$$L_e=\frac{\mu_0}{\pi}\Big\{d_1\ln\frac{2d_1}{h_c+W_c}+d_3\ln\frac{2d_3}{h_c+W_c}+0.5(d_1+d_3)$$
$$-2d_1\tan h^{-1}\frac{d_1}{d_3+d_5}-2d_3\tan h^{-1}\frac{d_3}{d_1+d_5}+2\cos 2\alpha\cdot$$
$$d_3\tan h^{-1}\frac{1}{1+\sqrt{2+2\cos 2\alpha}}-\cos\alpha\cdot d_3\tan h^{-1}\frac{d_3}{d_4+d_3}$$
$$-\cos\alpha\cdot d_4\tan h^{-1}\frac{d_4}{2d_3}+2.5\,d_1\Big\}\quad\cdots\cdots(5)$$

である。なお記号は図中に示したとおりとする。次にコイル I，II の相互インダクタンス M_e は

$$M_e=\frac{\mu_0}{\pi}\Big[d_1\Big\{\ln\Big(\frac{d_1}{d_m}+\sqrt{1+\Big(\frac{d_1}{d_m}\Big)^2}\Big)-\sqrt{1+\Big(\frac{d_1}{d_m}\Big)^2}+\frac{d_1}{d_m}\Big\}$$
$$+0.5(d_3+d_m\cos\alpha)\sinh^{-1}\Big(\frac{d_3}{d_m}+\cos\alpha\Big)$$
$$-(d_3-d_m\sin\alpha)\sinh^{-1}\Big(\frac{d_3}{d_m}-\sin\alpha\Big)+0.5(d_3-d_m\cos\alpha)$$
$$\sinh^{-1}\Big(\frac{d_3}{d_m}-\cos\alpha\Big)-0.5\sqrt{(d_3+d_m\cos\alpha)^2+d_m^2}$$
$$+0.5\sqrt{2(d_3-d_m\sin\alpha)^2+d_m^2}-0.5\sqrt{(d_3-d_m\cos\alpha)^2+d_m^2}$$
$$+2\sin\alpha\cdot\Big\{d_1\tan h^{-1}\frac{d_1}{d_3+d_5}+d_3\tan h^{-1}\frac{d_3}{d_1+d_5}\Big\}$$
$$+2\cos 2\alpha\cdot d_3\tan h^{-1}\frac{1}{1+\sqrt{2+2\cos 2\alpha}}-\cos\alpha\cdot$$
$$\Big\{d_3\tan h^{-1}\frac{d_3}{d_4+d_3}+d_4\tan h^{-1}\frac{d_4}{2d_3}\Big\}+2.5\,d_1\Big]\cdots\cdots(6)$$

である。

4. 2 インダクタンス マトリクス

同時に整流状態にある複数個のコイル間の自己及び相互インダクタンスを求めて，n 行 n 列のインダクタンスマトリクスが得られる。この場合，各コイルの自己及び相互インダクタンスは，コイルの位置の時間変化にしたがい変化する。このマトリクスの導出においては，短節度やトレッペンの巻線条件を考慮しなければならない。

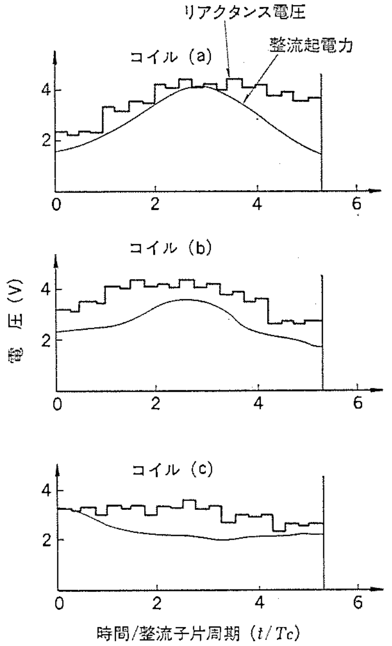


図 8. リアクタンス電圧

4. 3 リアクタンス電圧

補極端形状の選定にあたっては，コイルに誘起する整流起電力とリアクタンス電圧の間のずれの小さいことが一つの目安となる。このための判断基準の一つとして，電流変化を直線整流とみなした場合のリアクタンス電圧 $e_r(t)$ を採る。このリアクタンス電圧 $e_r(t)$ はインダクタンスの時間変化によって次式であらわされる。

$$e_{rk}(t)=\frac{2I_c}{T}\Big(L_k(t)+\sum_{i=1}^{n}M_{ki}(t)\Big)\cdots\cdots(7)$$

ここで I_c は電機子並列回路電流，T は整流周期である。実際の直流機のモデル（表 1.）に対して求めたリアクタンス電圧を図 8. に示す。同図には 3 章の方法で求めた整流起電力を併記しているが，両者の間のずれは小さい。トレッペン巻であるために，線輪辺間ピッチの小さいコイル（c）において，リアクタンス電圧の時間変化が平たんとなっている。これは，整流起電力の傾向（図 7.）と同一傾向である。

5. 整 流 特 性

5. 1 電流変化とブラシ整流子片間電圧

整流方程式を解くことにより整流時の電流変化とブラシ整流子片間電圧の変化を詳細に解析することが可能である。以下，具体例について説明する。

電流変化とブラシ整流子片間電圧を，回転数をパラメータとして図 9. に示す。高速になるほど過整流になることを示している。整流

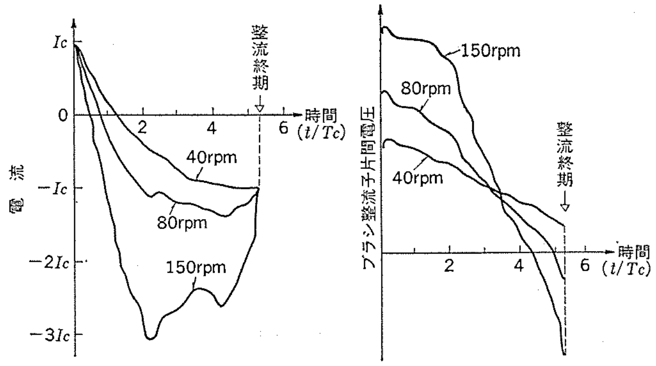


図 9. 回転数の影響（（b）コイルについて）

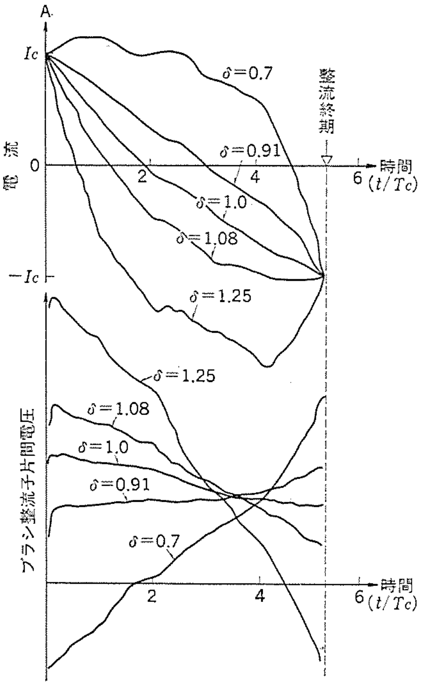


図 10. 補極の強さと整流（δ は補強 アンペアターン（相対値）とする）

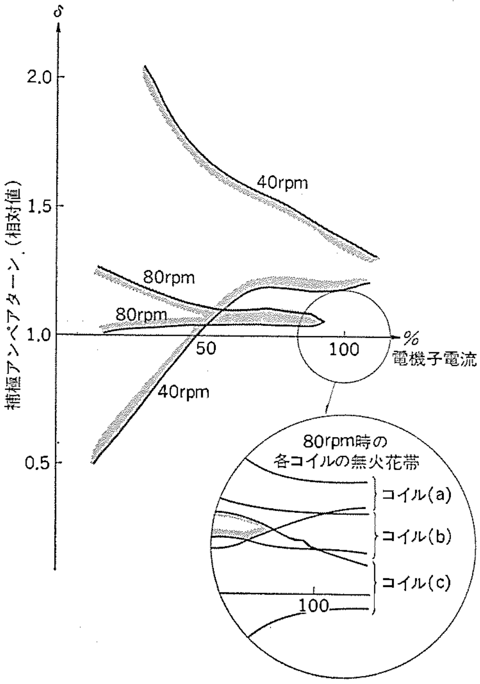


図 12. 補極端幅を狭くした場合の無火花帯

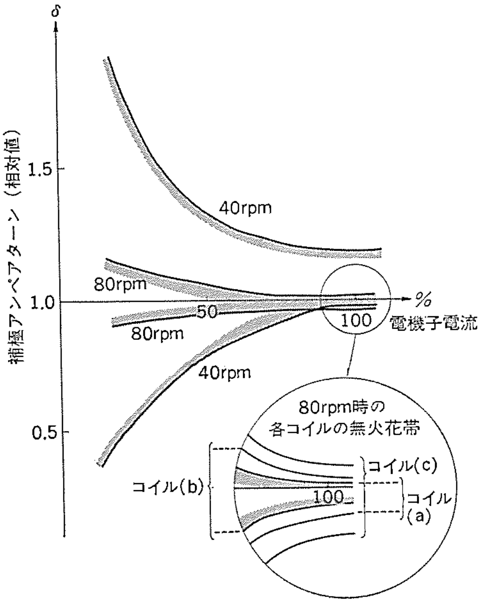


図 11.
無火花帯の
計算例

終期における ブラシ 整流子片間電圧値の絶対値の大きさから， 火花発生の可能性の有無が推定できる。図 10. は 40 rpm 時について，電流変化と ブラシ 整流子片間電圧を解析した例である。 補極磁束の大きさを表すものとして補極 アンペアターン（相対値）δ を用いる。補極磁束の大きさによって，電流変化，ブラシ 整流子片間電圧は変化する。補極 アンペアターン を調整することにより，整流終期における ブラシ 整流子片間電圧の絶対値が小さくなるように補極 アンペアターン を選定することができる。

5. 2 無火花帯

図 10. から，整流終期での ブラシ 整流子片間電圧を一定範囲内に制限する場合に許される補極磁束の可変範囲を求めることができる。この補極磁束の可変範囲を無火花帯と呼んでいる。この可変範囲は電機子電流の大きさによって変化するものである。図 11. は無火花帯を解析した例であり，横軸を電機子電流，縦軸を補極 アンペアターン として示している。無火花帯は回転数によって異なる。高速回転の場合には調整範囲が狭くなる。全速度範囲で無火花整流を実現するよう調整できるためには，低速時の無火花帯と高速時の無火花帯に共通域が存在しなければならない。

補極形状の変化によっては，図 12. に示すような低速時と高速時のそれぞれの無火花帯の大幅なずれが生じることがある[15]。この場合には，無火花整流を全速度範囲にわたって得ることができない。

詳細には， 無火花帯は コイル ごとに異なるものであり，図 11.， 図 12. の ハッチング で示した無火花帯は全 コイル が無火花条件を満たすような無火花帯である。図 11.，図 12. の拡大図には コイル ごとの無火花帯の差異を示す。図 12. の場合，同一速度においても各 コイル の共通の無火花帯が存在しない領域があることを示している。

6. む す び

この論文では，広い カバーリング，ブラシ 抵抗の非線形性，電機子 コイル インダクタンス の複雑な時間変化，整流起電力の複雑な時間変化，短節巻や トレッペン 巻の影響などを考慮できる整流解析理論を実例をまじえながら紹介した。

整流現象は要因数が多く， しかも一種の スイッチング 現象であるため複雑であり，完全な理論解析は困難とされていた。 しかし，この論文で紹介した筆者らの整流理論は，この複雑な整流現象を詳細かつ総合的な把握を可能にするものであり，今までの直流機の整流研究における壁をうち破る一つの ブレークスルー となるものである。

最後に，この研究に協力くださり種々の助言を賜った神戸製作所河村寿三氏，河村博敏氏，中西悠二氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

(1) E. Arnold and G. Mie : ETZ, 20, 97 (1899)
(2) L. Dreyfus : Die Stromwenclung grosser Gleichstrom-maschinen Julius Springer, Berlin (1929)
(3) 安部：電学誌，60，74（昭 15）
(4) J. S. Ewing : IEEE trans, PAS-91, p.1,663 (1972)
(5) 阪部，中西外：電気学会関西支部大会，G 115（昭 51）
(6) 松田：電学論誌，94-B，No. 10（昭 49）
(7) 岩本，野村：電学誌，97，No. 3（昭 52）
(8) 阪部，中西外：電気学会全国大会，G 846（昭 52）
(9) H. Prinz : "Hochspannungsfelder" Oldenburg (1969)
(10) L. Dreyfus : Arch, Elektrot, 21, S 497 (1929)
(11) J. R. M. Alger : AIEE trans, 76, No. 8, p.399 (1952)
(12) 阪部，中西外：電気学会全国大会，G 838（昭 52）
(13) A. S. Langsdorf : Principles of Direct Current Machine, Mcgraw Hill, New York (1940)
(14) R. Richter : Elektrische Maschinen, Springer (1924)
(15) 阪部：電気学会関西支部大会，G 118（昭 51）

往復動圧縮機の熱解析

石嶋孝次*・福島　満**・大串哲朗**

1. まえがき

密閉形往復動圧縮機について，性能，コスト，信頼性のそれぞれの面から改良すべき点を見い出し，かつその対策を施すために，広範囲な研究が行われているが，著者らはその一環として圧縮機を構成する部品及び冷媒ガスの温度による性能劣化を防止し，かつ簡素な冷却構造を得る目的のために圧縮機各部の温度を予測する技術の実用化研究を行ってきた。

密閉形圧縮機においては各構成部品及び冷媒ガスの温度は圧縮による発熱のほかに駆動モータの損失熱，ピストン等のしゅう(摺)動に伴う損失熱の複合した流れに応じて定まるので，それらの局所的温度を求めるためには圧縮機全系を考慮した熱解析を行わなければならず，このような場合に有効な方法は従来確立されていない。

そこで著者らは熱回路網法を圧縮機にも適用する方針をとり，この方法の有用性を検証するための具体的事例として小形冷蔵庫用圧縮機（冷凍能力90 kcal/h），小形空調用圧縮機（冷凍能力1,900 kcal/h）を採用した。その結果，熱回路網法による解析方法は有効であり，この方法を用いれば圧縮機の熱特性を改善する際に温度予測が可能であることが分かった。

この報告では2章で熱回路網法による計算の原理，3章で小形冷蔵庫用圧縮機についての計算値と実測値の比較，4章で小形空調用圧縮機についての計算値と実測値の比較について述べている。

2. 熱回路網法による温度計算

熱回路網法は，物体の各部をいくつかのブロックに分割し，その代表点に節点（ノード）を取り，各ノード間を熱抵抗で結んだ熱回路網を用いて各部の温度を求める方法である[1]。すなわち，各ノードにおいて成立する熱平衡の式を連立させて解くことにより，各部の温度を求めることができる。この方法は，比較的簡便であり，ノード数が少ない場合については，古くから用いられてきた方法であるが，近年の電子計算機の発達に伴い，多ノードを要する複雑な電気機器にも適用され，機器の熱特性をは(把)握するのに有効に利用されるようになった。

熱回路網中のノード i，ノード j 間の熱抵抗 R_{ij} は次式で表される。

物体中のノード間では

$$R_{ij}=\frac{l}{\lambda S} \qquad \cdots\cdots (1)$$

物体と流体のノード間では

$$R_{ij}=\frac{1}{\alpha A} \qquad \cdots\cdots (2)$$

ここに，λ：物体の熱伝導率，α：物体，流体間の熱伝達率，S：断面積，A：表面積である。式(1)は，熱が物体中を熱伝導により伝達される場合の熱抵抗であり，式(2)は，熱が物体表面から流体へ伝達される場合の熱抵抗である。

熱回路網中の各ノードにおいて成立する熱平衡の式は，これらの熱抵抗を用いた次式で表される。

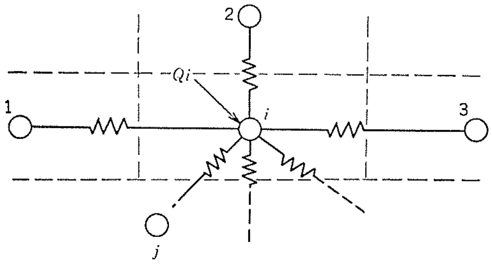


図 1. 熱回路網（物体中のノード）

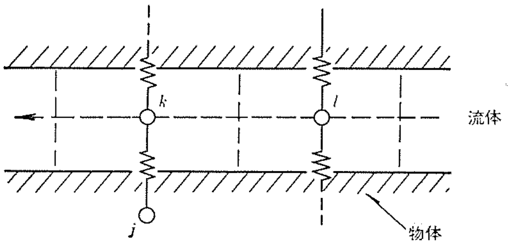


図 2. 熱回路網（流体中のノード）

図1.で示す物体中のノードでは，

$$\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{R_{ij}}(\theta_j-\theta_i)+Q_i=0 \qquad \cdots\cdots (3)$$

ここに θ_i，θ_j はノード i，j の温度，Q_i はノード i での発熱量である。

圧縮機中の冷媒のように，流れながら周囲と熱交換を行うことにより温度変化する流体中にとったノード k（図2.）では，次式が成立する。

$$C_pG(\theta_e-\theta_k)+\sum\frac{1}{R_{kj}}(\theta_j-\theta_k)+Q_k=0 \qquad \cdots\cdots (4)$$

ここに G は流体の重量流量，C_p は比熱である。またノード l は，ノード k よりも上流側の流体中のノードである。

式(3)，式(4)は，$\theta_1, \theta_2, \cdots\cdots\theta_n$ に対する n 元連立方程式となり，これを解くことにより，各部の温度 $\theta_1, \theta_2, \cdots\cdots\theta_n$ を求めることができる。また，得られた温度をもとに，次式で表される各ノード間の熱流量 Q_{ij} も求められる。

$$Q_{ij}=\frac{\theta_i-\theta_j}{R_{ij}} \qquad \cdots\cdots (5)$$

式(5)により得られる熱流量の大小により，発熱源から吸熱源までの主要な熱の流れを知ることができ，圧縮機の経済設計を有効に行うことができる。

3. 小形冷蔵庫用圧縮機の熱解析

図3.小形冷蔵庫用圧縮機の断面写真，図4.に概略構造を示す。この報告で述べる両機種の圧縮機は上部圧縮，下部モータ形式でクランク軸とモータの回転子軸とが一体化しており，この構造が密閉形往復式圧縮機の代表的なものである。吸入冷媒ガスは吸入管からシ

 * 静岡製作所　** 中央研究所

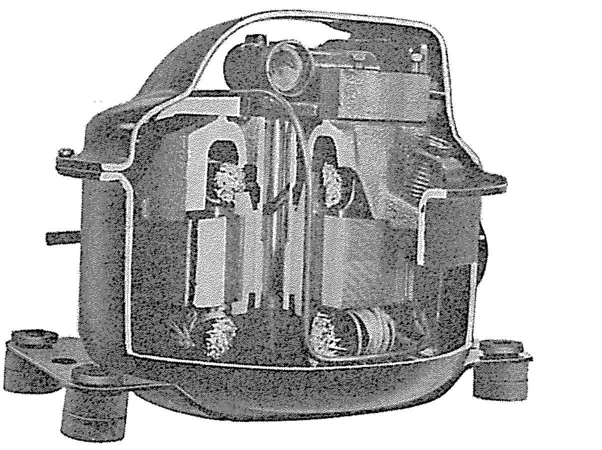


図 3. 小形冷蔵庫用圧縮機の断面

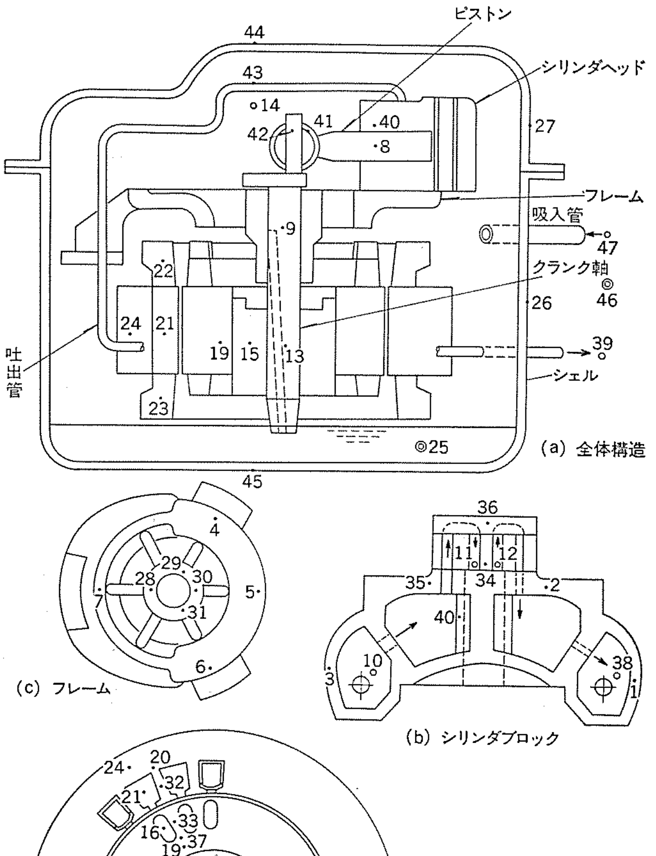


図 4. 小形冷蔵庫用圧縮機の概略構造及びノード位置

シェル内へ噴出したあと吸入マフラへ流入する。そして低圧側連結管，シリンダヘッドの低圧通路を通ってシリンダ内へ吸入される。ピストンによって圧縮され高圧になった冷媒ガスは再びシリンダヘッドの高圧通路を通って高圧側連結管に入り，吐出マフラに達する。吐出マフラには吐出管が連結されており，高温冷媒ガスはこの吐出管内を流れてシェル外へ出ていく。冷媒ガスの圧縮はピストンの往復運動によって行われるが，この運動はクランク軸，コネクティングロッド（小形冷蔵庫用の場合はスライダ）を介してピストンに伝えられる。回転子軸の下端はシェル底部にたまった潤滑油に使っており，油は軸内にあけられた通路を通って遠心力の作用を受けて上部に送られ，スリーブベアリング，クランク軸とコネクティングロッド連結部，ピストンとシリンダ摺動部の潤滑を行うと同時に，マフラ，シリンダハウジング，フレーム等の高温部分の冷却を行

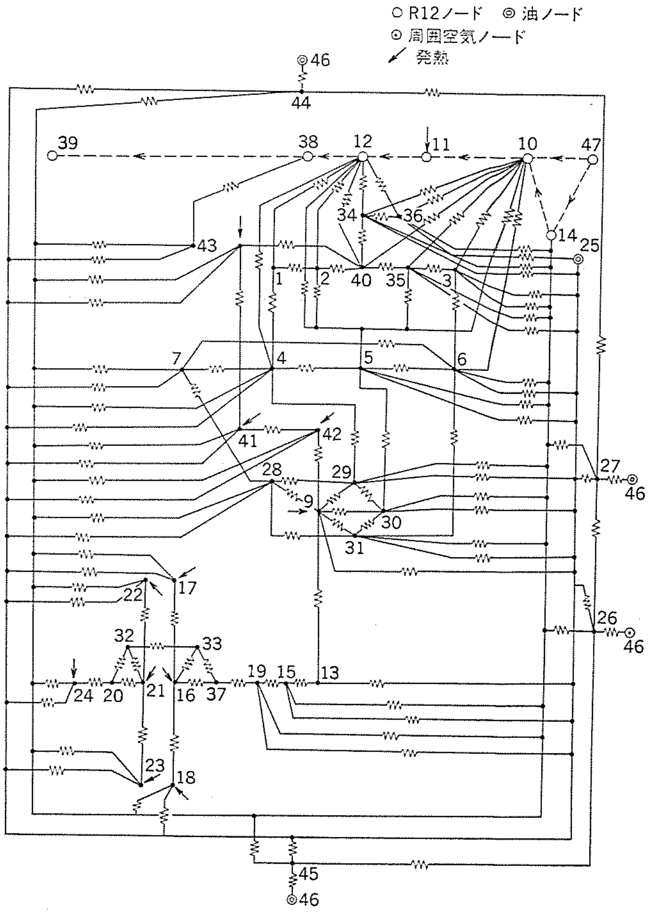


図 5. 熱回路網（小形冷蔵庫用圧縮機）

表 1. 小形冷蔵庫用圧縮機諸元

シリンダ径：	21 mm
ストローク：	13.52 mm
行程容積：	4.679 cc
冷媒：	R 12
冷媒流量：	2.48 kg/h (60 Hz)
吸入圧力：	1.34 kg/cm²abs
吐出圧力：	13.7 kg/cm²abs
吸入冷媒温度：	32.1°C
周囲温度：	32.4°C

うようになっている。またモータにおける回転子，固定子のコイル，コアの冷却も主として油によって行われる。

3.1 熱回路網

図 4. には熱回路網法によって計算を行う場合のノード点位置を示してある。これらのノード点を結んで構成される熱回路網図を図 5. に示す。ノード総数は 47 点でそのうち既知温度ノードは圧縮機外気温度46，吸入冷媒ガス温度47である。ノード47，10，11，12，38，39は冷媒ガス中に流れ方向順にとったノードであり，11は吸入弁直前，12は吐出弁直後の温度ノードである。25は潤滑油，14はシェル内冷媒ガス中にとったノードで，両者とも便宜上圧縮機各部で一様温度であると見なした。

3.2 発熱分布

表 1. に小形冷蔵庫用圧縮機の諸元を示す。これに基づいてまず圧縮仕事を見積る。この場合に圧縮中の冷媒ガスからシリンダへの熱の逃げが問題になるが，ピストンの移動によって生じるガスの強制対流熱伝達の際の熱抵抗とガスの熱容量から求まる時定数は回転周期に

対して十分大きいので，いまの場合は圧縮過程は等エントロピ的であると見なすことにする。

以上の条件に基づいて，まず冷媒ガスの吸入弁直前温度 θ_{11} を適当に仮定する。$S(p, \theta)$, $H(p, \theta)$ を圧力 p, 温度 θ に対する冷媒ガスのエントロピ及びエンタルピとすると次式によって吐出弁直後の温度 θ_{12} 及び圧縮中の低圧比熱 C_{p12} が求まる。

$$S(p_{12}, \theta_{12})=S(p_{11}, \theta_{11}) \quad \cdots\cdots(6)$$

$$C_{p12}=\frac{H(p_{12}, \theta_{12})-H(p_{11}, \theta_{11})}{\theta_{12}-\theta_{11}} \quad \cdots\cdots(7)$$

ただし，p_{12}：吐出圧力（$=p_H$），p_{11}：吸入圧力（$=p_L$）である。

圧縮仕事 Q_{12} は次式で与えられることになる。

$$Q_{12}=G\cdot[H(p_H, \theta_{12})-H(p_L, \theta_{11})] \quad \cdots\cdots(8)$$

ただし，G：冷媒ガスの質量流量である。式(7)で与えられる定圧比熱及び式(8)で与えられる圧縮仕事を用いて全系の温度分布を計算した結果として得られる θ_{11} が仮定した値と一致するまで計算を繰り返せば正しい圧縮仕事に対する温度分布が得られることになる。冷媒ガスの質量流量を用いないで圧縮仕事を出そうとすれば，圧縮機の容積効率を正確に知らなければならない。

次にモータ部の発熱はそれぞれ次のようになる。

固定子コイル（ノード20，21，22）＝11.05(W)
固定子コア（ノード24）＝15.82(W)
回転子コイル（ノード16，17，18）＝7.03(W)
風損（ノード33）＝3.5(W)
……………(9)

最後に各摺動部における機械損による発熱は，モータ入力より圧縮仕事及びモータにおける損失熱を差し引くことにより求め，それを各摺動部の面積に応じて配分した。

3.3 熱抵抗

図5.の各ノードを結ぶ熱抵抗のうち主要なものは，冷媒ガス，潤滑油及び周囲空気の熱伝達に基づくもので，それらは次の各場合に分けられる。

自然対流の場合：シェル内冷媒ガス及び潤滑油によるシリンダブロック，フレーム，モータ固定子の冷却，シェル内面の加熱及びシェルより外気への熱放散

強制対流（乱流）の場合：高圧低圧通路内における冷媒ガスの加熱冷却，モータ，クランク軸における回転部分の冷媒ガス及び潤滑油による冷却

強制対流（層流）の場合：クランク軸内通路の潤滑油によるモータ回転子及びベアリングの冷却

同心2重円筒熱伝達の場合：モータ回転子，固定子間クリアランスへの熱移動

放射の場合：シェルより外気への熱放散

それぞれの場合に応じて文献（2）等により冷媒ガス，潤滑油あるいは空気の熱伝達率 α を算出した。潤滑油はスピンドル油の物性値を用い，また冷媒ガスの物性値は文献（3）によった。シェル内では冷媒ガスあるいは潤滑油は幾分強制対流的な熱伝達になっていると思われるが，ここではその効果は小さいと考えてシェル内空間に接している静止部の熱伝達はすべて自然対流とした。

3.4 計算結果

表2.に計算値と実測値の比較を示す。表の下部に記した η は吸入管からシェル内に入った冷媒ガスのうち直接吸入マフラへ吸い込まれるものの質量流量比を示している。計算は数種の η の値について行い，$\eta=0.5$ の場合の計算値が実測値に最も近いことが分かったが，

表 2. 温度分布計算結果（小形冷蔵庫用圧縮機）

ノード	位置	60 Hz 計算値	60 Hz 実測値
14	ケース内冷媒	83.7	86.3
10	吸入マフラ内冷媒	57.9	—
12	シリンダ内冷媒	163.9	144.0
38	吐出マフラ内冷媒	140.7	—
39	吐出部冷媒	132.0	—
43	吐出配管	102.5	89.8
22	モータ固定子巻線コイルエンド上	89.5	103.3
23	モータ固定子巻線コイルエンド下	89.5	103.0
17	モータ回転子巻線コイルエンド上	83.6	—
18	モータ回転子巻線コイルエンド下	83.9	—
28	主軸受	88.3	101.1
25	潤滑油	83.1	96.5
1	シリンダブロック（高圧側）	89.1	113.6
4	フレーム（高圧側）	86.8	—
44	ケース上	74.1	86.4
26	ケース中	75.4	80.9
45	ケース下	75.4	83.0

単位 °C　（η=0.5 の場合）

この値のはん(汎)用性については今後の計算事例によって追求する必要がある。計算値と実測値の偏差は約20％であり，全入力115 Wの34％が冷媒ガスのエンタルピ上昇，66％が熱損失となってシェル壁より外気へ放熱されている。このように小形冷蔵庫用圧縮機においては入力に対するエンタルピ変化の割合が小さく，また吐出温度が高温になるので，信頼性向上の面から合理的な熱設計を行っていかなければならないことが分かる。

4. 小形空調用圧縮機の熱解析

ノード法による熱解析を小形空調機に用いられる圧縮機に適用し，その計算手法の適否の吟味を行った。この小形空調用圧縮機は3章に解析を行った小形冷蔵庫用圧縮機とは異なり，冷媒としてR-22を使用しており，かつその冷媒流量もかなり大きい。更に構造的には図6.に示すように，小形冷蔵庫用とはかなり異なった構造をしている。この圧縮機の諸元を表3.に示す。

4.1 熱回路網

圧縮機中に設定した温度ノードは図6.の概略構造図に代表的な位置を示したように，冷媒（R-22）領域の11点，外部既知温度領域の2点を含めた80点である。ここで外部既知温度領域とは圧縮機外周囲温度（ノード78），及び圧縮機吸入ガス温度（ノード79）である。また潤滑油を示すノード73は，小形冷蔵庫用圧縮機と同様に各部に分散した潤滑油の温度は一様であると仮定している。また，シェル内部の自由空間に存在する冷媒領域に設定したノード（1，9）についても同様の仮定を設けている。これらの80点に設けたノードにより構成した熱回路網を図7.に示す。この熱回路網を構成している各ノード間を結ぶ熱抵抗は2章に述べた手法によって計算した値である。

4.2 発熱分布

圧縮機内部における発熱は大別すると次の領域で生じている。

（a） 圧縮作用を受けるシリンダ内冷媒の領域
（b） 電気的損失の存在するモータの領域
（c） 機械摩擦の存在する各摺動部

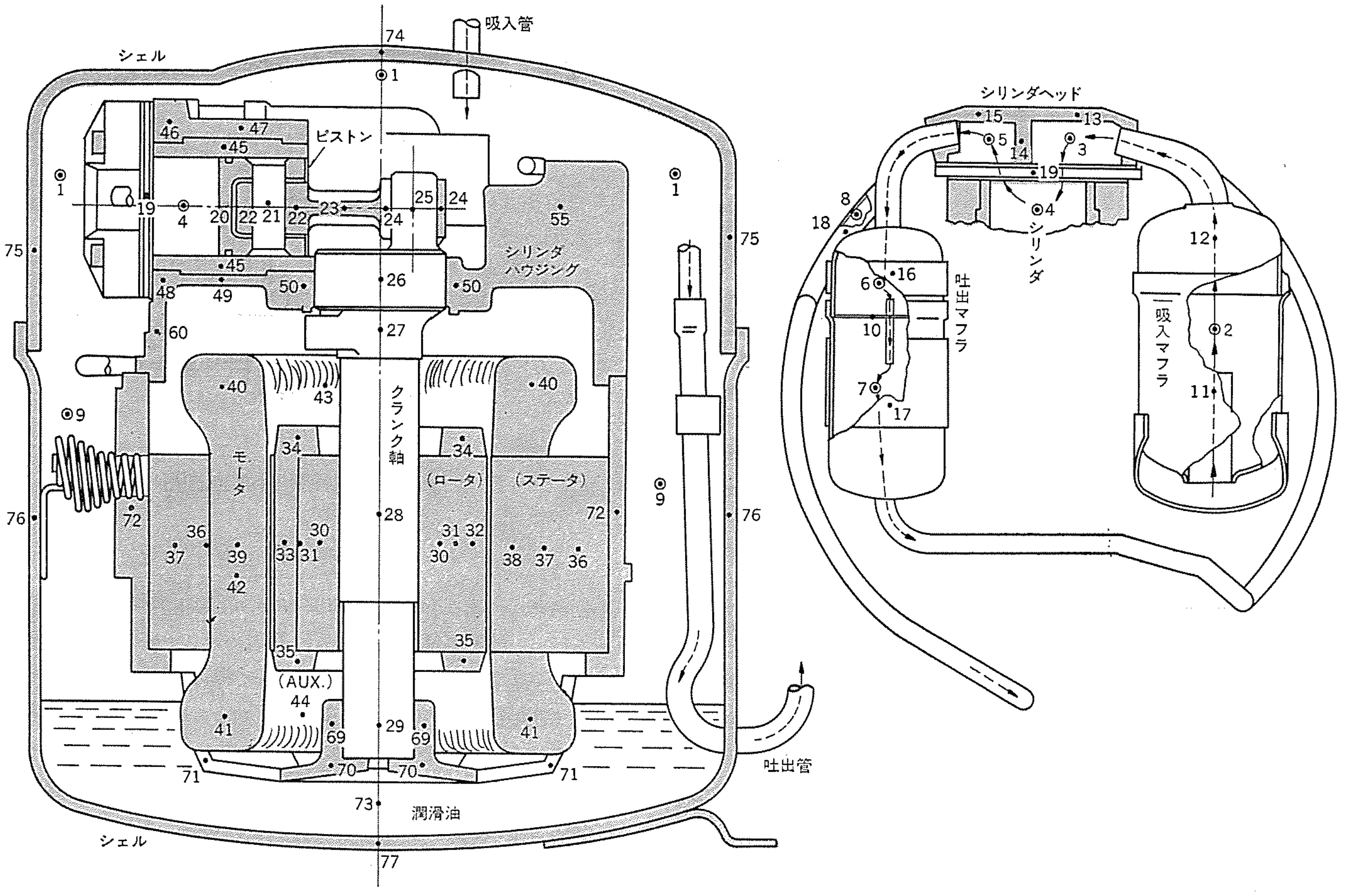


図 6. 小形空調用圧縮機概略構造及び温度ノード

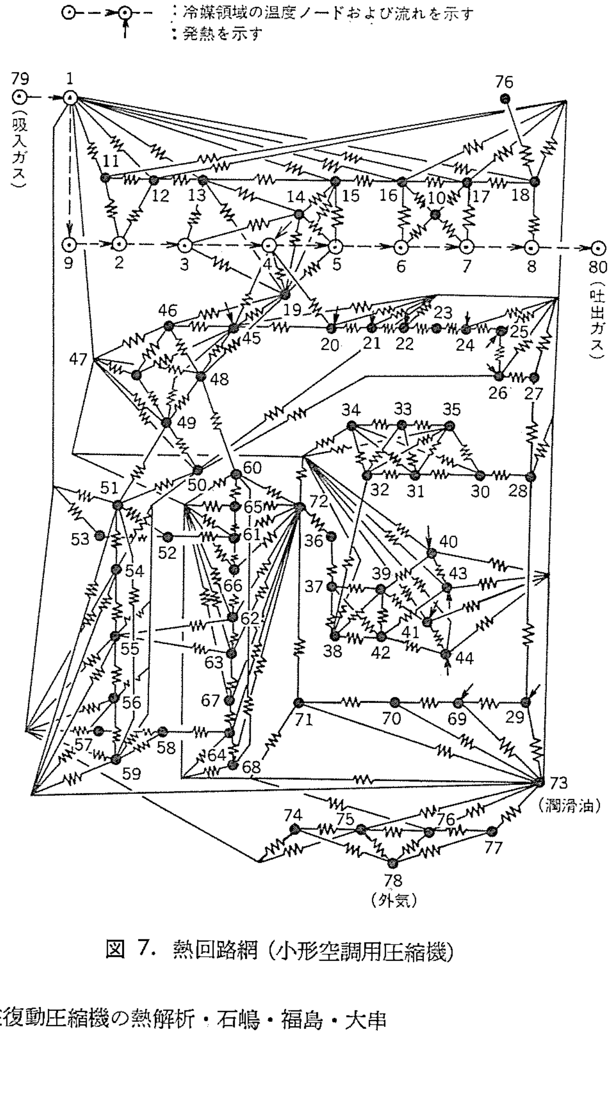


図 7. 熱回路網 (小形空調用圧縮機)

表 3. 小形空調用圧縮機諸元

シリンダ径	:	30.9 mm
ストローク	:	19.8 mm
行程容積	:	14.848 cc/rev
冷媒	:	R-22
冷媒流量	:	50.08 kg/h (60 Hz)
		41.20 kg/h (50 Hz)
吸入圧力	:	5.92 kg/cm²abs
吐出圧力	:	20.73 kg/cm²abs
吸入冷媒温度	:	15°C
周囲温度	:	35°C

表 4. 小形空調用圧縮機における内部発熱量

	60 Hz	50 Hz
圧縮発熱	534	450
(モータ発熱)	(172.3)	(195.0)
2 次損 (ロータ損)	53.1	51.0
鉄損	49.4	60.2
主巻線銅損	20.7	50.2
補助巻線銅損	49.1	33.4
機械部分発熱	235.8	144.7

単位 W

この発熱を生ずる各領域での発熱量は 3 章に示す小形冷蔵庫用の場合と同様に求まり，その結果を表 4. に示す。

4. 3 計算結果及び考察

この圧縮機の解析によって得られた結果の温度分布を代表ノードについて実測データとともに表 5. に示す。この表 5. より計算結果と

表 5. 温度分布計算結果（小形空調用圧縮機）

温度ノード	60 Hz		50 Hz	
	計算値	実測値	計算値	実測値
ケース内冷媒	26.5～53.5	64～72	28～56	65～72
シリンダヘッド吸入内冷媒	54	53.05	56.4	54.3
シリンダ内冷媒	112.5	—	116.0	—
シリンダヘッド吐出内冷媒	112.1	112.8	115.7	111.5
吐出冷媒	103.3	103.5	104	101.6
吐出配管	94	102.8	93	102.1
モータ主巻線コイルエンド上	76.8	68.0	77.5	74.3
モータ主巻線コイルエンド下	78.1	77.8	79.3	83.7
モータ補助巻線コイルエンド上	78.4	72.3	77.2	70.8
モータ補助巻線コイルエンド下	79.7	77.9	79.0	78.8
主軸受	76.0	70.5	72.4	71.7
潤滑油	74.7	73.0	71.4	73.6
ケース上	46.3	52.4	45.5	53.1
ケース中	74.9	59.5	62.5	59.5
ケース下	72.9	68.8	69.8	68.7

単位 °C

実測値の偏差は冷媒領域において約4％程度，その他の領域においても約7％程度であり，かなりの精度であることが分かり，熱回路網法による熱解析手法が小形空調用圧縮機に十分適用できることが分かる。

また，この計算による温度分布より求めた圧縮機各部での熱移動量を図 8. に示す。これより，吸入系冷媒を予熱する熱流はモータ部からの流入熱が最も多く，次いで機械部分，潤滑油，シェルの順である。つまりモータの冷却は吸入系冷媒によって行われており，その結果として吸入系冷媒の比容積が増加することにより圧縮機性能を低下させる一原因となっていることを示唆している。更に潤滑油→シェル→外気の熱流量が比較的少ないことは，モータ，機械部分等への潤滑油供給量を増加させることにより，吸入系冷媒への流入熱量を減少させ圧縮機性能を更に向上させるような改善策も示唆している。

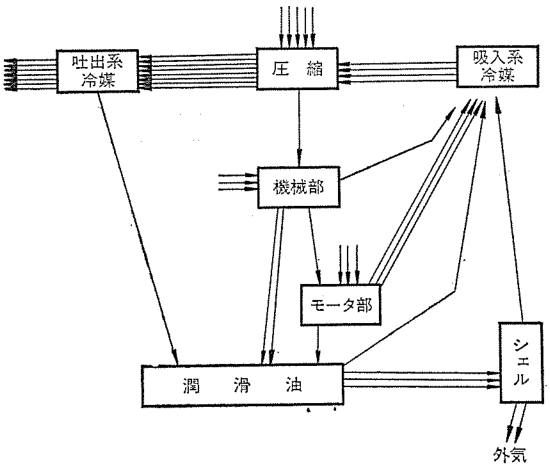


図 8. 内部での熱移動（小形空調用圧縮機）

5. むすび

熱回路網法による小形冷蔵庫用圧縮機，小形空調機用圧縮機の熱解析を行い，前者に対しては20％，後者に対しては7％の精度で実測値と一致する結果が得られた。ここで得られた結果を踏まえて，この方法の他機種への適用が現在推し進められており，今後更に豊富な計算と実測の比較データが集積されるものと思われる。それに応じて現在まだ不確定性を含んでいるフロン及び油の熱伝達率値についても漸次精密になっていくと考えられる。

最後にこの研究に対し絶大なご尽力をいただいた当社静岡製作所の関連部門のかたがたに誌上を借りて感謝の意を表します。

（昭和 52-7-11 受付）

参考文献

（1） ギート著，横堀，久我共訳：基礎伝熱工学（テキスト），丸善
（2） 機械学会編：伝熱工学資料
（3） 内田秀雄編：冷凍機械工学ハンドブック，朝倉書店

当社の特許

登録番号	名称	発明者
796609	論理積回路	金子弘美
796610	カード情報読み取り装置	松永 宏・竹田誠之
796611	広帯域受信機	沢田道弘・真崎昭雄 田原清一
796612	半導電性塗料	柴山恭一・飯坂捷義
796613	サイリスタ	中田仗祐
796614	プラズマ反応装置	伊藤和男・奈良愛一郎 阿部東彦
796615	放電灯の水銀蒸気圧制御装置	竹田俊幸・野田昭吉 安西良矩・土屋伍六
796616	アーク溶接法	鵜飼 順
796617	液体ポンプ	尾畑喜行
796618	半密閉形2段圧縮機	保坂征宏
796619	金属ハロゲン化物入り水銀ランプの製造法	竹田俊幸・土橋理博 若林正雄
796620	金属ハロゲン化物入り水銀ランプの製造法	竹田俊幸・土橋理博 若林正雄
796621	ディジタルタイマ回路	竹内照男
796622	半導体装置	中田仗祐
796623	溶接速度制御装置	堀部 透
796624	ドリフト型横形トランジスタの製造方法	原田眩嗣

直流機の通風冷却解析

星野吉信*・佐々木希晴*・久野和雄*・西山　槐**・山中晤郎***

1. まえがき

近年，絶縁物を中心とした材料の進歩とともに直流機の大容量化，小形軽量化には目覚ましいものがあり，これとともに直流機の3大テーマである整流，機械強度，温度について厳しい設計が要求されつつある。回転機に使用されている絶縁物の寿命は温度と関連しており，絶縁種別と回転機各部の温度上昇限度が規格に定められている。通風冷却は回転機の容量と寿命を決定する最大要因であり，設計段階で精度の高い温度上昇値を推定することは必要不可欠なことである。直流機では，従来から温度上昇の推定・冷却の改善に力が注がれているが，当社では，最近，特に大形電子計算機を駆使した解析方法を開発するとともに新しい計測方法を導入することによって通風冷却技術の向上に努めている。これらの技術は，既に日常の設計業務だけでなく新製品の開発など各処に応用されており，具体的に出力の増大，小形軽量化につながる成果が得られている。

ここでは，他力通風形式の大・中形直流機を対象に，その通風冷却解析方法の現状と温度及び通風の実測結果について紹介する。

2. 直流機通風冷却解析

直流機の温度上昇は，発熱量を除けば，絶縁物による熱抵抗，コイルとコア間の接触熱抵抗，材料の熱伝導率，冷却面積，冷却面の形状，通風（各部の風速・風量）などによって決定される。通風冷却解析にとってこれら諸定数の計算式の精度向上とともに，解析手法の確立も必要事項の一つである。

温度計算では直流機の複雑な構造や日常業務の便宜を考慮して，次の3種類のプログラムが用意されている。

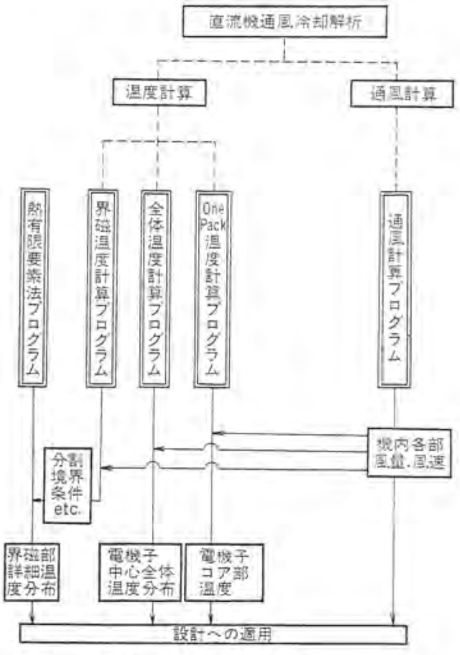


図 1. 解析手順

全体温度計算プログラム：　直流機全体の温度を計算するものであり，熱等価回路の手法によっている。

One Pack 温度計算プログラム：　熱等価回路の手法を使い，電機子コア部分のラジアルダクトにはさまれた1個のブロック（One Pack）を対象にしている。このプログラムは日常の設計業務に利用するため，インプットを簡単にし手軽に計算でるるようになっている。

界磁温度計算プログラム：　複雑な断面の界磁では，各界磁断面内の詳細な温度計算のため，熱の有限要素法のプログラムが利用される。

これらの温度計算の精度向上のためには，冷却に関係した機内各部の詳細な通風分布を知る必要がある。このため多数の実測結果などから得られた通風抵抗のは（把）握によって計算法を確立し，これを**直流機通風計算プログラム**としてプログラム化した。

図 1. に，通風計算プログラムと各種の温度計算プログラムによる直流機通風温度計算の手順を示す。

3. 通風解析

3. 1　計算法

通風計算では，直流機の各通風路を電気回路網に置換し，各回路における風圧のつり合い式より，各部の風量配分・圧損が求められる。図 2. に中形直流機の構造と通風回路の一例を示す。一般に直流機の通風路は図 3. の回路網で表され，a の部分が電機子側の通風路に，f が界磁側の通風路に対応する。d は風仕切り板とコイルエンド間，コイルエンド，ラジアルダクト等の通風路を表す。ここで，圧力降下を h，流量を Q とし各風路の添字をつけて表すと，それぞれの回路において次式が成立つ。

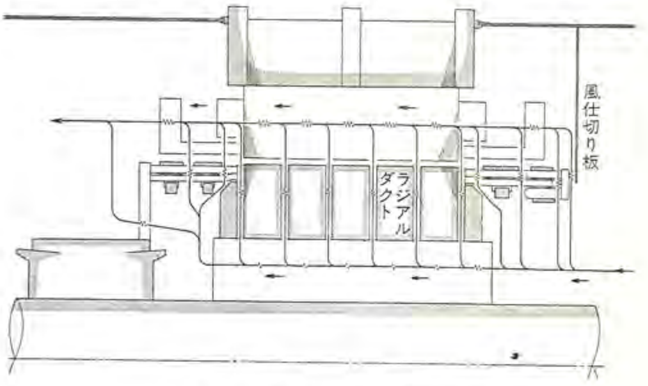


図 2. 直流機の通風回路

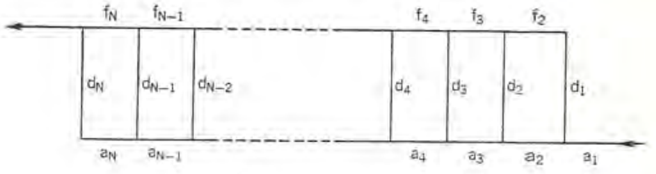


図 3. 通風モデル

* 神戸製作所　** 中央研究所　*** 中央研究所（工博）

$$h_{ai}+h_{di}=h_{di-1}+h_{fi} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$h_{ai}=F(Q_{ai-1},\ Q_{ai},\ Q_{ai+1}) \quad \cdots\cdots(2)$$

$$h_{f}{}^{i}=G(Q_{fi-1},\ Q_{fi},\ Q_{fi+1}) \quad \cdots\cdots(3)$$

$$h_{di}=H(Q_{di},\ Q_{ai},\ n) \quad \cdots\cdots(4)$$

$$Q_{di}=Q_{ai}-Q_{ai+1} \quad \cdots\cdots(5)$$

$$Q_{TOTAL}=Q_{ai}+Q_{fi} \quad \cdots\cdots(6)$$

$i=2\sim N$

$F,\ G,\ H$：関数

n：電機子回転速度

ここで，h_{ai}，h_{fi}，h_{di} は摩擦損失，エルボ損失，風路断面積変化による損失，入口損失，出口損失，分岐損失，合流損失などの各種の損失や，ファン効果による静圧上昇，流速の変化による静圧変化などの項を含んでいる(1)。通風計算プログラムでは式(1)～式(6)の連立方程式を数値的に解くことによって各部の風量・風速を求める。

3.2 実測値との比較

図4. は5,500 kW 直流電動機の電機子ラジアルダクトの風速分布である。実測値と計算値の間に非常によい一致がみられ，流速分布上にみられる小さな起伏はスパイダ板の影響を受けている。図5. は4,000 kW 直流電動機の機内静圧分布である。実測値が幅を持っているのは周方向の位置の違いにより，ばらつきがあるためである。電機子側から界磁側へ向かう矢印は静圧差によって，コイルエンド又はラジアルダクトを通過する空気を表している。大きな圧力降下がみられる部分は，風仕切り板・スパイダ板などによるものである。界磁部の圧力降下は主に界磁スペースを通過する空気と，ラジアルダクトから流出する空気とによって界磁部の流量が増し，流速が大きくなって静圧が減少するためである。このケースでは上流側の静圧を与えて静圧分布を計算し，実測との比較を行っている。上流側に，一部相違がみられるが，全体的によく一致している。

なお，図4.，図5. の実測値と計算値はともに電機子静止中の値である。しかし，これらのマシンは低速回転のため，ラジアルダクトにおけるファン作用は，そこでの圧損に比べて十分小さく，停止中の風速は回転中のものとほとんど一致していると考えられる。

3.3 通風解析の効果

計算例で述べたようにこのプログラム計算の結果は，実測値とよく一致し，かなりの精度で得られる。このプログラムの完成により，次のことが可能になった。

(1) 通風構造の決定に利用できる。通風路面積は，機械強度，磁気回路などとのスペースの取り合いであり，通風構造の決定には，それぞれの設計に応じた総合的な判断が必要となる。また，各部の発熱量を考慮し，通風配分の最適化も可能になる。このように通風計算プログラムによって通風効率の定量的な把握ができるようになった。

(2) 熱計算の精度アップが可能になる。例えば個々のラジアルダクトにおける風速が計算されるため，熱伝達係数を精度よく計算できる。

(3) 冷却用送風機の容量決定に利用できる。

図6. は機内通風構造の差異による電機子コイルの温度分布で，温度分布を均一にし，しかもマシン全体の温度を下げることに成功した例である。両者の差異は，機内の通風路を変え，ラジアルダクトの通過風量を増やしたことにある。なお，運転条件は供給風量，運転定格

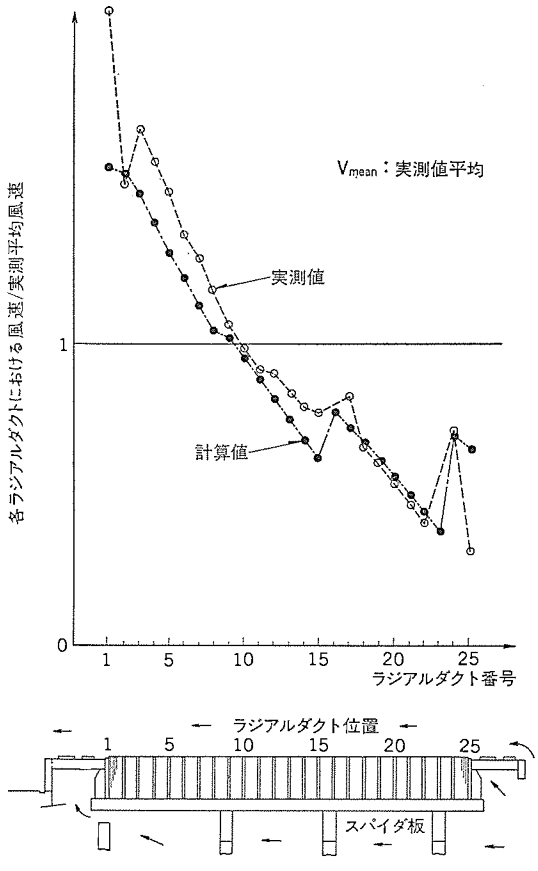


図4. 5,500 kW 直流電動機のラジアルダクト風速分布

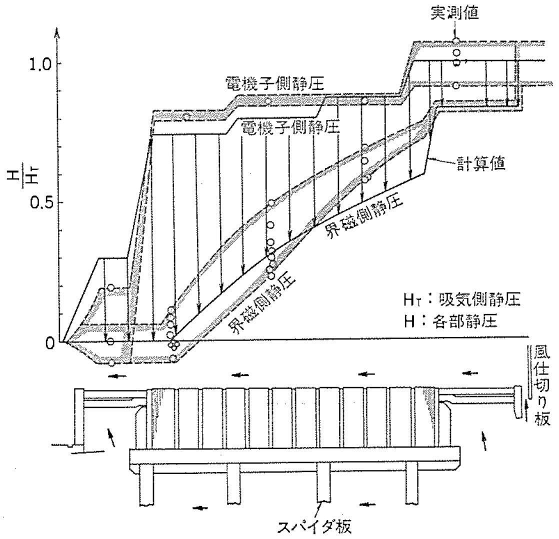


図5. 4,000 kW 直流電動機機内静圧・ラジアルダクト風速分布

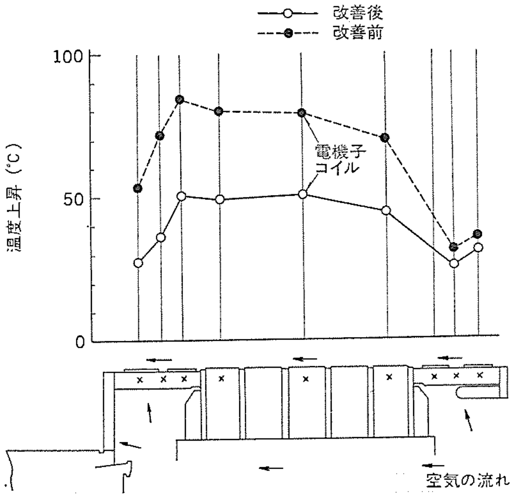


図6. 通風改善の効果

とも同一である。

図 6. から明らかであるが，通風路の変更によって大幅な温度上昇の低減を図ることができ，40% 強の冷却性能向上となっている。このマシンでは，更に容量をアップ，あるいはマシンの軽量化が可能であると言える。

その外このプログラムによって，電機子ラジアルダクトの幅，ピッチの最適化を試みており，マシンの冷却能力向上，温度分布の均一化などの成果が得られている。

4. 熱等価回路網による熱解析と実測

熱等価回路網を使った熱解析プログラムとして全体温度計算プログラムと One Pack 温度計算プログラムがあり，ここでは全体温度計算プログラムと実測について述べる。

4.1 熱等価回路網の基本的な考え方(2)

計算する部分をいくつかのブロックに分割し，そのブロックを1点(Node)で代表させる。ノード間を熱抵抗又は熱コンダクタンスで結べば，熱等価回路網ができる。熱抵抗の計算式は熱伝導部では

$$R=\frac{L}{kA} \quad \cdots\cdots (7)$$

熱伝達部では

$$R=\frac{1}{hA} \quad \cdots\cdots (8)$$

となる。定常状態では，熱等価回路を電気回路に見立てると，キルヒホッフの法則を適用することができる。固体中のノード i に対しては，

$$\sum_j C_{ij}(o_i-o_j)=q_i \quad \cdots\cdots (9)$$

空気中のノード m に対して，その下流のノードを n とすると，次のヒートバランスの式が成り立つ。

$$GC_p(o_n-o_m)=\sum C_{mj}(o_j-o_m) \quad \cdots\cdots (10)$$

それぞれのノードおいて式(9)，式(10)のいずれかの式が成立するので式(9)，式(10)を o に関して整理すると，次の連立方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} A_{11}, A_{12}, \cdots\cdots, A_{1N} \\ A_{21}, A_{22}, \cdots\cdots, A_{2N} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ A_{N1}, A_{N2}, \cdots\cdots, A_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ \vdots \\ o_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_N \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (11)$$

ここで，

$A_{ij}=-C_{ij}$, $A_{ii}=\sum_j C_{ij}$ (固体中)

$A_{nj}=-C_{nj}$, $A_{nn}=GC_p$, $A_{nm}=\sum_j C_{mj}-GC_p$ (空気中)

R：熱抵抗

L：ノード間の長さ

k：熱伝導率(3)

h：熱伝達係数(4)(5)

A：熱移動の断面積

q_i：発熱量

c：熱コンダクタンス $\left(=\frac{1}{R}\right)$

G：流量

C_p：空気の比熱

式(11)の連立方程式を解くことによって各部の温度上昇が得られる。図 7. に熱等価回路網の一例を示す。

4.2 プログラムの特徴と効果

直流機全体温度計算プログラムの特徴として以下の点が挙げられる。

(1) 直流機は，わく(枠)番・用途によりかなり構造が異なり，これらをすべて含んだプログラムを作成することは非常に困難であるが，このプログラムでは大形～中形機を対象とし，大部分の機種を計算できるようになっている。

(2) マシン構造により自動的にノード数が選ばれ，ネットワークが形成される。またインプットデータに細工をすることによってノードの取り方

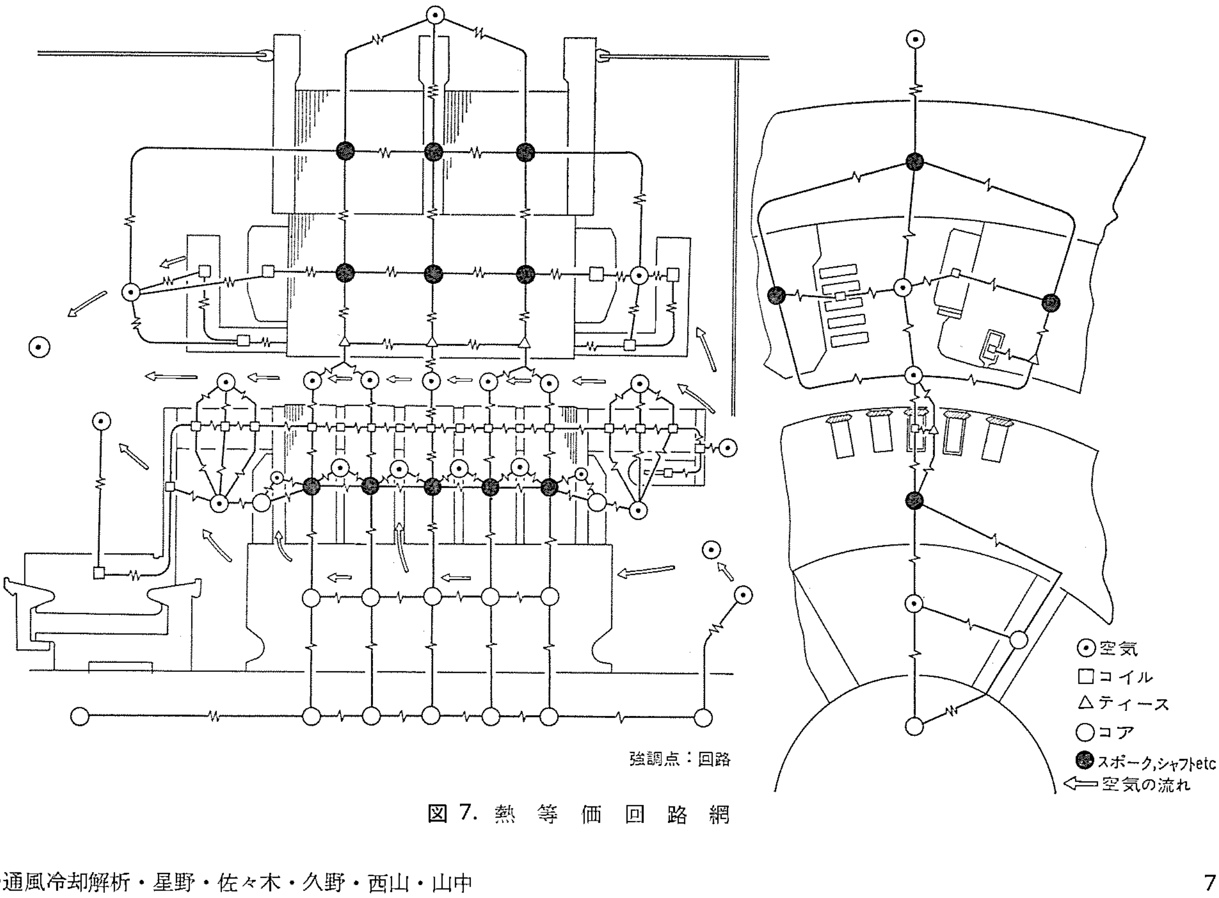


図 7. 熱等価回路網

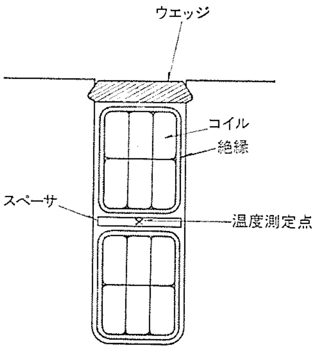


図 8. 電機子コイルの温度測定点

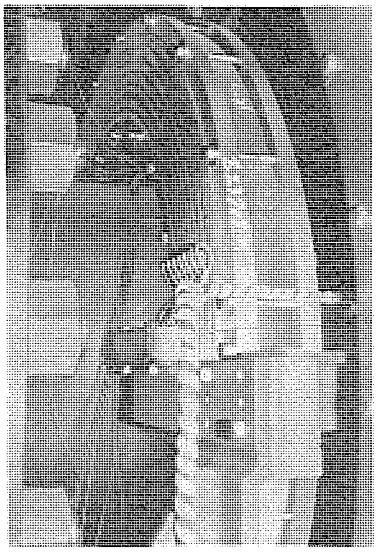


図 9. 大形スリップリング

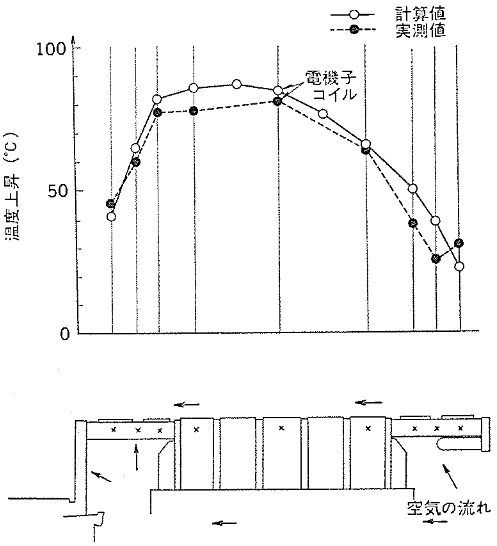


図 10. 中形直流機（モデル機）電機子コイルの温度分布

を変え，粗い計算から詳細な計算までをすることができる。

（3） コイル（銅）の電気抵抗の温度依存性は相当大きく，0°Cと100°Cでは，その差が43%にも達する。この効果は温度上昇だけでなく，温度分布の形状にも影響を与えるため，温度計算上不可欠な条件である。このプログラムでは電気抵抗の温度依存性を取り入れており，温度計算後，ロスの値も得られる。

通風計算プログラムと併せて使用することにより次のような効果が得られる。

（1） 設計段階での温度推定に役立つ。

（2） 冷却上の改良ポイントと，その効果を容易につかむことができる。

（3） 温度測定において測定点を決定するのに役立つ。

（4） 試験不可能な特殊な状態での温度上昇を推定できる。

4.3 温度測定

機内の温度分布を知るために，各所にサーモカップルを取付け温度測定を行った。界磁部分は，直接コイルの層間に埋込む方法と，表面に張り付ける方法により測定した。

電機子コイルの温度測定は，回転部のために測定が難しい部分であった。コイル温度を直接計測することは困難であったため，図 8. の上口コイルと下口コイルの間のスペーサにサーモカップルを埋込んだ。この位置では，測定温度はコイル温度と近似的に等しいことを確かめた。

実測に際しては，サーモカップルのリードをスリップリングを介して取り出し測定を行った。図 9. に大形機の温度測定に用いた大形スリップリングを示す。スリップリングを使用する場合，回転体の温度測定において生じる誘起起電力，スリップリングとブラシのあたり，材質・接続点での温度補償などが問題になるが，多くの実験によりこれらの問題を解決することができた。

現在までに多くのテストデータと計算値との比較を行ってきた。図 10. はその一例であり，他力通風形式の中形直流機の電機子コイル温度分布である。このモデル機の温度計算は，全体温度計算プログラムを使い，マシン全体でノード 150 点を置き，そのうち電機子コイル部分にノード 16 点を置いて計算した。計算値と実測値は，よく一致している。

実機による機内温度分布測定に加えて，モデル試験・材料の熱伝導率の測定などを行い，解析に必要な各種データを得ている。

5. 有限要素法による界磁部熱解析

有限要素法による熱伝導問題の解析には，熱等価回路網を使った方法にない多くの利点がある。

（1） 複雑な形状に対処でき，はん（汎）用性がある。

（2） 熱流の状態を見ることができ，視覚に訴える点で最も適している。

これらの特性を利用し，また熱等価回路網を用いた方法との比較を行うため，2次元定常の熱伝導問題に対するプログラムを開発した。現在このプログラムを直流機界磁部の熱計算に利用している。

5.1 解析方法

2次元定常問題に対する基礎方程式は次式となる。

$$k_x\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+k_y\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+Q=0 \quad \cdots\cdots(12)$$

T：温度

k：熱伝導率

Q：発熱量

発熱量は温度の関数とする。式(12)に対し，次の3種類の境界条件を考える。

$$\left.\begin{array}{ll}\text{定温条件} & T=T_0\\ \text{熱流条件} & -k_n\dfrac{dT}{dn}=q_0\\ \text{熱伝達条件} & h(T_{00}-T)=k_n\dfrac{dT}{dn}\end{array}\right\} \quad \cdots\cdots(13)$$

n：境界に対し法線方向を示す

式(12)，式(13)を考慮した汎関数を考え，この汎関数の停留値問題を有限要素近似によって解き，温度分布を求める[6]。

プログラム化にあたっては，領域を三角形要素で分割し，三角形要

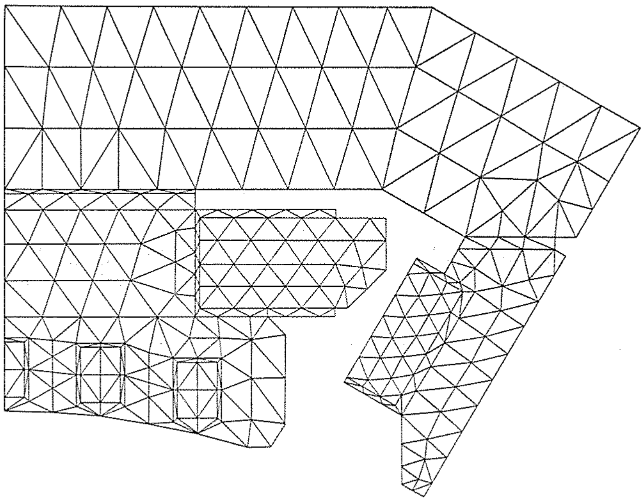


図 11. 中形直流機要素分割図

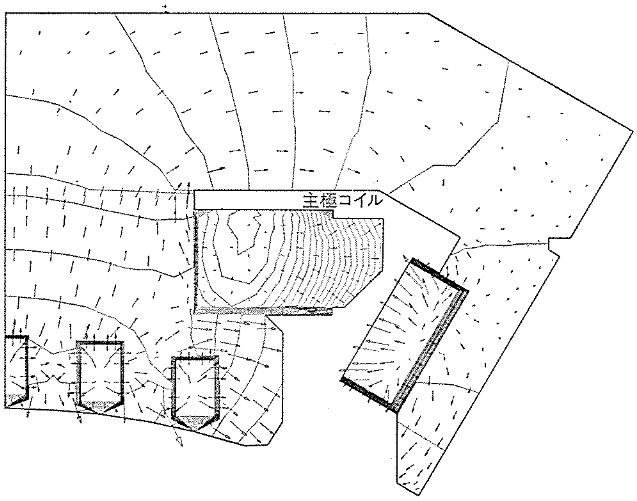


図 12. 中形直流機の温度分布・熱流図

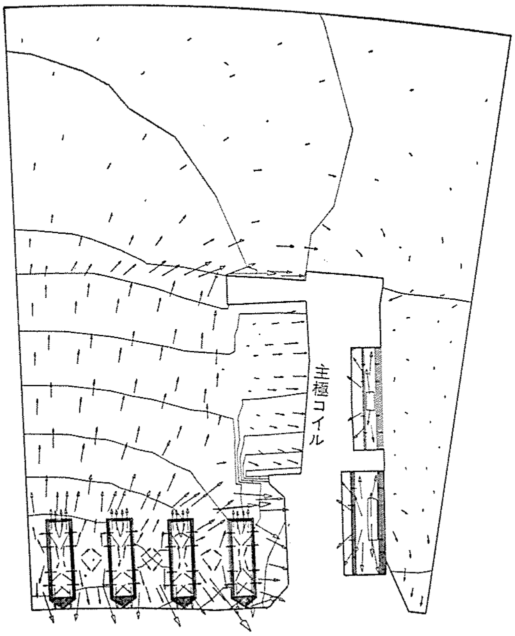


図 13. 大形直流機の温度分布・熱流図

素の内部では温度は線形であると近似した。この プログラム では要素数 500, 節点数 400 まで計算可能である。

計算を行う場合，界磁部各部を材料ごとに単一領域に区分し，その領域を図 11. に示すように三角形要素に分割する。通常，この分割のための データ 量は膨大なものとなるため，界磁温度計算 プログラム によって自動分割を行い熱有限要素法 プログラム に受け渡す。したがって，界磁温度計算 プログラム には，界磁部分の形状を決定する寸法を与えればよく，インプット 量は少なくなる。また，通風計算 プログラム から得られた結果を利用して熱伝達の境界条件を与える。同時に材料定数・発熱量を与える。この プログラム では材料の異方性や発熱の温度依存性を考慮した計算をすることができる。以上の操作により，有限要素法 プログラム のための インプットデータ を作成し，計算を実行すれば，図 12.，図 13. の温度分布，熱流図が得られる。

5. 2 計算結果

図の折線は等温線であり任意の温度間隔にすることができる。絶縁物の部分では温度こう(勾)配が大きく，等温線が密になっている。矢印は熱流を示し，矢印の方向と大きさで熱流の方向と量を表している。等温線と矢印が直角を成していないのは異方性材料の部分である。この プログラム によれば図 12.，図 13. に示すように熱量の様子が一目りょう然であり，コイル の巻線方式，絶縁方式，冷却方式などの決定に役立てることができ，また冷却上の改良点の発見が容易になる。例えば図 12. の主極 コイル は平角線を多層に巻くため主極 コイル 内温度傾斜が大きく，図 13. の主極 コイル では コイル 素線が大きいため，図の横方向の温度変化がほとんどない。

このように主極 コイル の構造や コイル 素線の寸法・コイル と コア 間の絶縁厚さが温度上昇に影響を及ぼすため，これら寸法の決定に対して有限要素法による計算が有効となった。以上のようにこの解析の効果は大きく，今後この種の プログラム を充実させ適用範囲を広げる予定である。

6. む す び

直流機の通風冷却改善のために新しい解析方法を導入した。通風冷却解析の結果，機内通風計算及び温度計算が精度よくできるようになった。計算値と実測値との比較については，前述のとおりよく一致している。

これらの計算 プログラム の利用により，設計段階において，マシン 構造の最適設計が可能となり，マシン の軽量化・信頼性向上など多大な成果をもたらした。既にこれらの技術を適用し，小形軽量化が達成された製品も生まれている。

今後，直流機は更に高い コストパフォーマンス が要求され，厳しい条件下での限界設計が予想される。これにこたえるため，地道な データ の蓄積，測定方法の改良，解析の精度 アップ，利用しやすい プログラム 化などを推進している。

参 考 文 献

(1) 生井武文：送風機と圧縮機 (17 版)，(昭 49) 朝倉

(2) I. Robert : Heat Transfer and fluid flow in electrical machines, I. Mech. E. (1969)

(3) 三富ほか：全閉外扇形誘導電動機の通風冷却解析，三菱電機技報，48, No. 10, P. 1,196 (昭 49)

(4) W. M. Kays : Convective heat and mass transter, Mc-GRAW-HILL

(5) 機械学会：伝熱工学資料 (昭 50)

(6) R. H. Gallagher and R. H. Mallet : Efficient solution process for finite analysis of transient heat conduction, Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer.

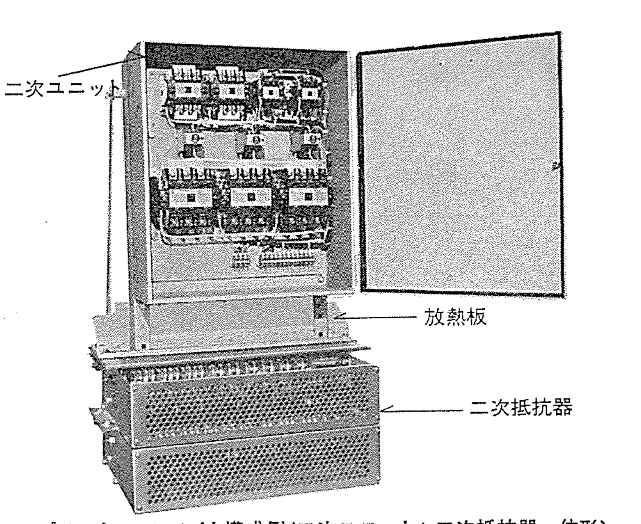
スポット

三菱汎用クレーン電機品〈パワークレーンメイト〉

三菱電機は小形軽量で安価な汎用クレーン電機品〈パワークレーンメイト〉を開発しました。新設クレーンはもちろん既設クレーンにも使用できます。

特長

- 制御盤はコンパクトな一次ユニットと二次ユニットからなります。
- 主幹制御器、二次抵抗器（電動機対応）を制御方式に関係なく使用できるようにしました。
- 使用機器を標準化しましたから安価で短納期です。
- 各ユニットは小形軽量ですから、クラブ上、ガーダ上、ガーダ内に設置でき配線が短くなります。
- 既設の直接制御クレーンを容易に間接制御にできます。また、容易に無線操作、押ボタン操作にすることができます。



パワークレーンメイト構成例〈二次ユニット＋二次抵抗器一体形〉

三菱電磁開閉器・電磁接触器Gシリーズ

三菱電機は空調機のモートルやヒータの開閉に適した瞬時電圧降下に強く小形軽量で安価な電磁開閉器・電磁接触器Gシリーズを新発売いたしました。

特長

瞬時電圧降下に強い

モートルの始動電流により電圧が定格値の70％まで（G80～G125形は75％まで）降下しても正常に動作しますから、空調機のコンプレッサに適しています。

小形軽量

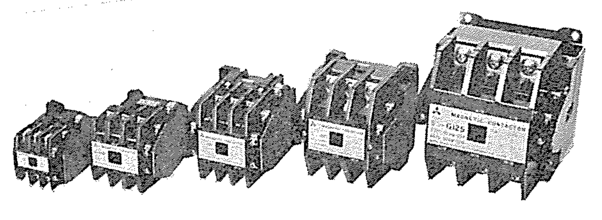
AC200Vで同一容量の当社従来品と比べますと、取付面積は66％、重量は60％です。

使いやすい構造です

- 取付け後に定格表示が正前から見えるようにしました。
- 配線作業がしやすいようにセルフアップ端子ねじを採用しました。（G10～G100形）
- コイルの50Hz/60Hzのタップ切替えが不要です。
- 動作しているかどうか一目でわかる動作表示付です。
- サーマルリレーのツマミは電流値表示付です。

用途

- 空調機のコンプレッサ、ファンのモートル、および補助ヒータ
- 温水器のヒータ
- 照明設備
- 電源開閉用



三菱電磁接触器Gシリーズ

定格と仕様

形名		AC3級定格容量(kW) 3φかご形モートル		AC3級定格電流(A)		定格通電電流(A)	補助接点数	電磁接触器外形寸法(mm)(タテ×ヨコ×奥行)
電磁開閉器	電磁接触器	220V	440V	220V	440V			
MSO-G10	S-G10	1.5	2.2	10	6	16	2a1b	64×38×90
MSO-G15	S-G15	3	4	15	9	20	1a	62×44×79
MSO-G20	S-G20	4	5.5	20	13	26	1a1b	60×55×78
MSO-G35	S-G35	7.5	7.5	35	17	50		74×68×90
MSO-G50	S-G50	11	15	50	32	50	2a2b	89×85×103
MSO-G65	S-G65	15	22	65	46	70		106×100×106
MSO-G80	S-G80	19	37	80	75	100		116×120×129
MSO-G100	S-G100	20	37	93	75	100		116×120×129
MSO-G125	S-G125	30	55	125	110	100		140×140×145

スポット 三菱トランジスタインバータ DH-T形

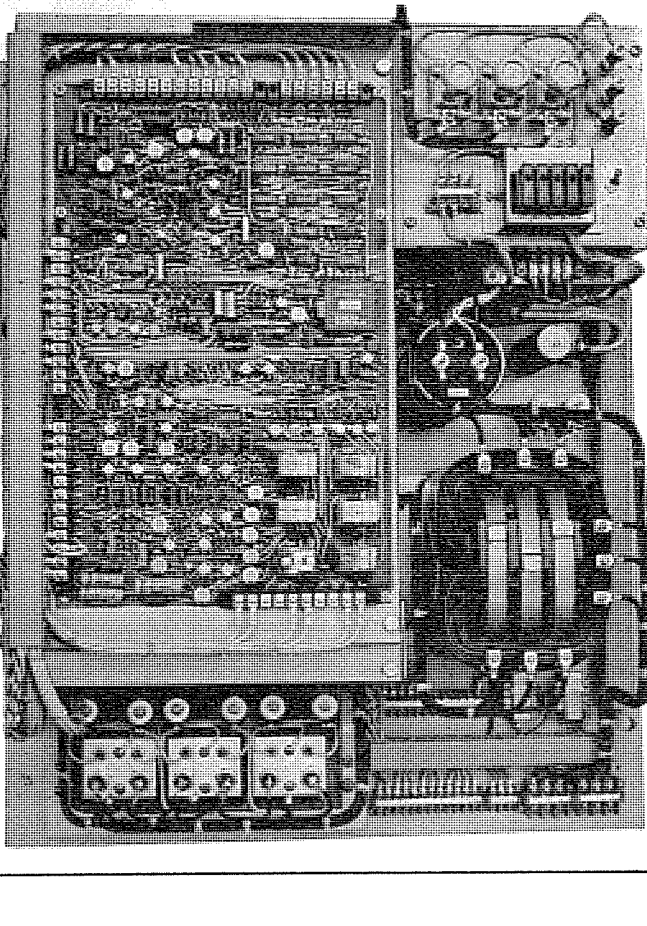
菱電機はこのたび小容量交流電動機の可変速用トランジスタインバータを開発しました。このインバータは当社独自の回路成により電流制御ができますから、モートルの定電流加減速や直流制動が行えます。

長

- 電流制御ができますから定電流加減速ができ、負荷短絡の保護も容易に行えます。
- 発電制動と直流制動ができますから急減速や簡単な位置決めもできます。
- 誘導電動機、永久磁石式同期機、ヒステリシス電動機などあらゆる交流電動機に使用できます。
- サイリスタインバータのような転流回路がなく、またコンバータにダイオードブリッジを使用していますから、高効率、高力率です。
- 使用部品は適切なディレーティングを施してあります。また、十分なフィールドテストとエージングを行っていますから信頼性にすぐれています。
- コンパクトなユニット形ですから、箱入形、壁掛形どちらでも使用できます。また放熱フィンを絶縁して外部に出しましたから、密閉形としても使用できます。
- 保守点検はすべて前面から行えます。

仕様

仕様＼機種		DH-T-2500	DH-T-7500
入力電源		3φ 200V±10% 50Hz、200／220V±10% 60Hz	
瞬時電圧降下		補償なし　（標準）	
瞬時停電		補償なし　（標準）	
出力	容量（VA）	2,500	7,500
	電圧（V）	3φ 200V （出力トランスにて昇圧可能）	
	電流（A）	7.3	22
過電流耐量		150%　30秒	
周波数上限		250Hz	
PGなし	周波数精度	±0.1%以下（ただし周囲温度25℃ ±10℃）	
	電圧／周波数	定トルク範囲で一定（補正可）	
	出力電圧変動率	±5%以下	
	起動停止方法	ソフトスタート、ソフトストップ	
電流波形		方形波	
オプション		過速度検出回路など	
周囲温度		−5～55℃（ユニット）	
標準適用電動機(kW)		0.4，0.75，1.5	2.2，3.7



三菱トランジスタインバータ
DH-T形の外観

スポット

三菱電子式クッションスタータ 電子式ブレーキ

三菱電機は汎用誘導電動機を緩衝起動・緩衝制動する安価で手軽なクッションスタータとブレーキを新発売いたしました。この装置は電圧制御に半導体(トライアック、サイリスタ)を使用したもので、現在好評を得ている三菱定位置停止装置〈ファイントップ〉の技術をいかしています。

三菱電子式クッションスタータ

《FC形(ファインスタート)》

モートルへの入力電圧をトライアック(BCR)で制御し、モートルへの印加電圧を設定時間だけ減圧することによって始動時の出力トルクを低減します。なお、電圧、時間ともに無段階に調節できます。

《EQ形》

FC形に短絡用電磁接触器、タイマ、サーマルリレーを組込んだものですから、電源および負荷に接続するばけですぐ使用できます。

《特長》

- 始動トルク、始動時間を無段階に調節できます。
- 過負荷・サージに耐えるように保護回路をそなえています。
- EQ形はモートルの過負荷や拘束をサーマルリレーで防止します。

《用途》

- 糸、紙、電線の巻取り機
- ホイスト、クレーン、コンベア
- 精密ギヤ、リンク機構をそなえた機器

三菱電子式ブレーキ

《FB形(ファインブレーキ)》

サイリスタ(SCR)で制御した直流電圧を設定時間だけモートルに印加しますから、緩急自在の制動が行えます。(電圧・時間ともに無段階に調節できます)

また、外部コンタクタの無通電開閉を行うための制御端子や制動をさらに滑らかにするための漸減励磁機能もそなえています。

《ER形》

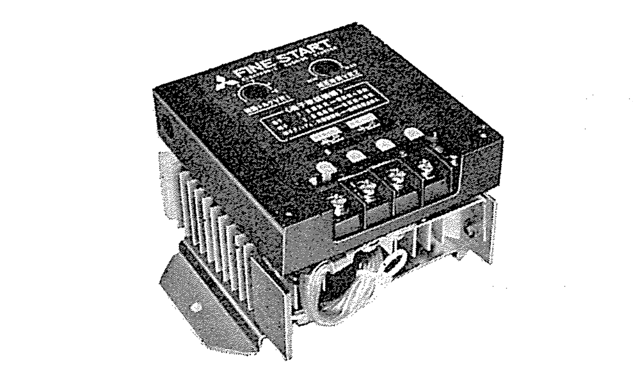
FB形に電源用電磁接触器を組込んだものですから電源および負荷に接続するだけですぐ使用できます。

《特長》

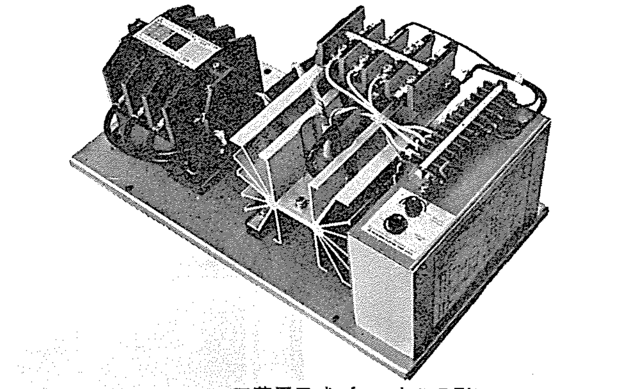
- 制動トルクと制動時間を無段階に調節できます。
- サイリスタを使用していますからブレーキ開閉の接点摩耗があまりありません。
- 機械的な消耗部分がありませんから保守はほとんど不要です。

《用途》

- ホイスト、クレーン、コンベア



三菱電子式クッションスタータ〈FC形〉



三菱電子式ブレーキ〈ER形〉

<table>
<tr><th>形名</th><th>容量</th><th>仕様</th></tr>
<tr><td>ファイン
スタート
(FC形)</td><td>22kW以下
(5種類)</td><td>電圧AC200V 50Hz　電圧AC200/220V 60Hz
<table><tr><th>挿入数</th><th>始動ひん度</th><th>始動時間</th></tr><tr><td>1相挿入</td><td>2～3回/分以下</td><td>3秒以下</td></tr><tr><td>2相挿入</td><td>15回/分以下</td><td>15秒以下</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>ファイン
ブレーキ
(FB形)</td><td>22kW以下
(5種類)</td><td>電圧 200/200/220V 50/60/60Hz
制動トルク 20～200% (対定格トルク比)
制動時間 0.25～10秒</td></tr>
<tr><td>EQ形
スタータ
(電磁接触器内蔵)</td><td>閉鎖形
開放形
(各7種類)</td><td>主回路電圧 AC170～242V
始動トルク比 30～200% (対定格トルク比)
始動時間 10秒以下
始動ひん度 60回/時間</td></tr>
<tr><td>ER形
(電磁接触器内蔵)</td><td>閉鎖形
開放形
(各4種類)</td><td>主回路電圧 AC170～242V
制動トルク 0～100%(3.7kW以上)
0～200%(0.75～2.2kW)
制動時間 0.2～6秒</td></tr>
</table>

三菱高圧進相コンデンサ KL-5形

スポット

三菱電機は従来品の高圧進相コンデンサKL-4s形の信頼性を全く損なうことなく小形軽量化したKL-5形を製品化しました。このKL-5形はポリプロピレン・フィルムの電力損失に対する特長とコンデンサ・ペーパの過電圧耐用性に対する特長を最大限発揮させる当社独自の設計により電極端部の電界強度を従来品の半分以下にしましたから、過電圧耐用性を損なわずに小形軽量化できたわけです。また、電極端部の電力損失も同時に低減できました。

特長

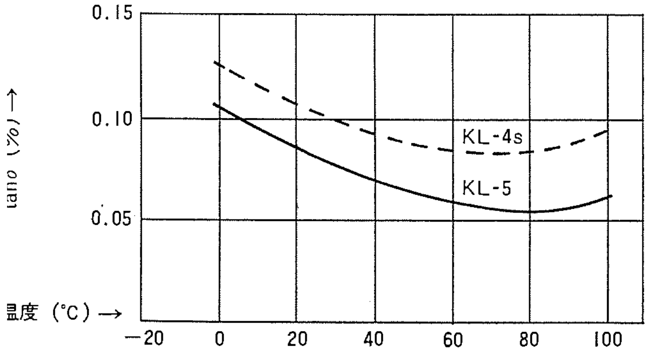
- 過電圧耐用性にすぐれていますから、開閉ひん度の高い回路や異常電圧が発生しやすい回路にも安心して使用できます。
- 運転中の電力損失は100kVA当り 50～60Wですからオールペーパのものとほとんどかわりません。
- 温度上昇が低いので高温度の環境下でも安心です。
- 50／60Hz共用です。

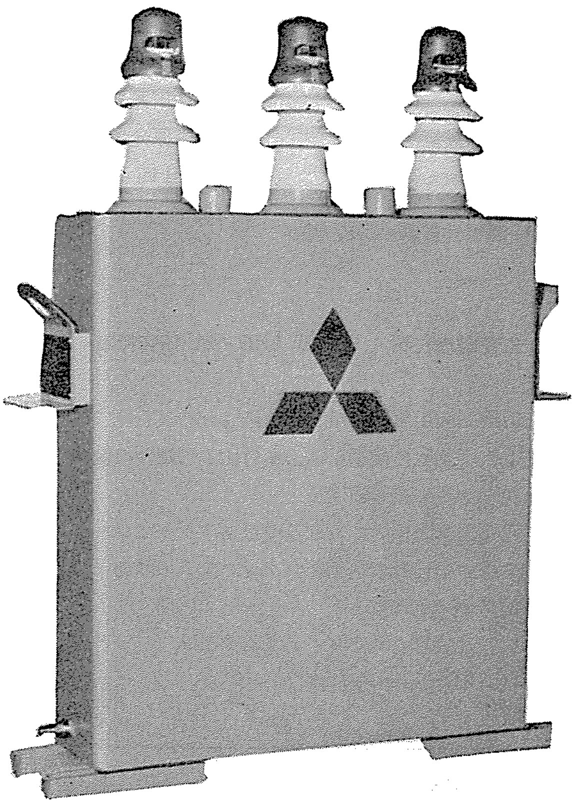
定格および性能

規格はJIS C 4902に準拠しています。

定格	電圧	3,300Vおよび6,600V
	相数	三相
	周波数	50Hz および 60Hz
	容量	10、15、20、30、50、75、100、150、200、250、300kVA
容量偏差	−5%～+10%　相間平衡度±3%	
耐電圧	端子相互間	定格電圧×2倍　1分間
	端子一括・外箱間	3,300Vに対し 16,000V　1分間 6,600Vに対し 22,000V　1分間
誘電正接	20℃において 0.1%以下	
絶縁抵抗	端子一括・外箱間　1,000MΩ以上	
油密性	80℃、8時間加熱して油洩れしないこと。	
使用温度	−20℃～+40℃	
温度上昇	定格容量で連続運転したとき、外箱壁の最高温度部で25deg以下	
放電特性	印加電圧開放 5分後で 50V以下	

KL-4s形とKL-5形のtanδ特性の比較





三菱高圧進相コンデンサ　KL-5形

当社の特許

登録番号	名称	発明者
796625	環状螢光灯の製造装置	服部 睦
796626	半導体素子用チップの分割法	坂根英生・富田政雄
796627	回転速度検出装置	稲荷隆彦・高嶋和夫
796628	MIS形半導体装置	河津 哲
796629	同期パルス発生装置	茂木 克
796630	サイリスタの製作方法	中田仗祐
796631	車両用電気装置の制御方式	上田 敦・石井光明
796632	絶縁導体装置	岸田光弘
796633	双方向性半導体装置	蒲生 浩・宮嶋辰夫
796634	圧電磁器材料	林 次郎・柳瀬正人 漆原善一・大野克弘
796635	電気機器の冷却装置	田中潤次郎・浜崎祥博
796636	限時装置付圧力スイッチ	加藤 悟・榊 道治
796637	半導体装置用リードフレームの製造方法	山本 勇・倉 正久 辻 哲朗
796638	レーザ装置	樋口隆一
797707	レーダにおける相関演算方式	山内信治・柴田信之
797708	レーダにおける相関演算方式	山内信治・柴田信之
797709	レーダ方式	御法川秀夫・岩部 昭
797710	固定記憶装置	小笠原光孝
797711	壁貫通ブッシング	石田四男・岩田光弘
797712	透明導電性被膜の形成方法	西楽隆司・時本市郎 竹田俊幸・安西良矩

登録番号	名称	発明者
797713	剝離性被覆組成物	伊藤公男
797811	連続式真空蒸着装置等の真空シール	鳥取 浩
799294	制動装置	浅野哲正
799295	内燃機関点火装置の点火位置検出法	日野利之
799296	内燃機関点火装置	三木隆雄
799297	内燃機関点火装置	三木隆雄
799298	アンテナ装置	河上国彦・吉田和彦
799299	巻取り制御装置	浅財哲正
799300	点火装置	才田敏和
799301	周波数偏移変調装置	後藤正彦
799302	連続式真空凍結乾燥装置	安生三雄・鳥取 浩
799303	永久磁石式渦電流形連結装置	車戸秀男
799304	ループアンテナ装置	伊藤信一
799305	空気ブレーキ制御装置	二橋英一・亀田康幸
799306	揚水発電所の低周波同期起動装置	石井清隆・大政久則
799307	溶触メッキ装置	大野栄一・岸本 健 小倉新三
799308	マルチバイブレータ	小島正典
799309	事故点標定装置	高田信治
799310	冷房制御装置	辰巳 巧

〈次号予定〉 三菱電機技報・Vol. 51 NO. 11 研究特集

特集論文

- しゃ断現象研究用プラズマ診断技術
- 大形発電機用絶縁の繰返し応力に対する信頼性の検討
- 送水系統の解析と最適運用法
- 活性汚泥処理プロセスにおける曝気槽のシミュレーション
- 半導体素子の全自動ボンディングシステムの開発
- 空調用蓄熱槽の動作解析とシステムへの応用
- 半導体におけるマイクロビームアナリシス
- 赤外線装置用光学系の試作

普通論文

- 高周波パルス TIG 溶接機とその応用
- 須賀川ダム計算機制御システム
- ベネズエラ向け 900 MW アルミ精錬用整流装置
- 揚水発電所の発電電動機始動用サイリスタ始動装置
- 高級テレビモニタ用カラー受像管
- 4メガバイト IC メモリ装置

三菱電機技報編集委員

委員長	樫本俊弥	常任委員	茶谷三郎
副委員長	浦徳太郎	〃	平林庄司
〃	後藤正之	委員	遠藤裕男
常任委員	佐々木二郎	〃	村上卓弥
〃	荒川信雄	〃	神谷友清
〃	葛野信一	〃	橋爪 基
〃	武藤 正	〃	吉田太郎
〃	奈川敏雄	〃	山崎 肇
〃	三矢周夫	〃	松村長延
〃	高橋広光	〃	小野勝啓
〃	忍足 博	幹事	本間吉夫
〃	武田克己	〃	三田村和夫
〃	清田 浩	10号特集担当	岩部 昭
〃	福家 章		

三菱電機技報 51 巻 10 号

(無断転載を禁ず)　昭和 52 年 10 月 22 日 印刷　昭和 52 年 10 月 25 日 発行

編集兼発行人　本間吉夫
印刷所　東京都新宿区市谷加賀町1丁目12番地　大日本印刷株式会社
発行所　東京都千代田区大手町2丁目6番2号 (〒100)　菱電エンジニアリング株式会社内　「三菱電機技報社」 Tel. (03) 243 局 1785
発売元　東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 (〒100)　株式会社 オーム社書店　Tel. (03) 291 局 0811，振替口座 東京 20018
定価　1部 400 円送料別 (年間予約は送料共 5,200 円)

スポット

三菱エレベータ停電時自動着床装置《メルド》Mitsubishi Emergency Landing Device

停電や回路故障で階と階の途中に停止したエレベータを最寄りの階に着床させ、扉を自動開閉して乗客を救出する装置です。

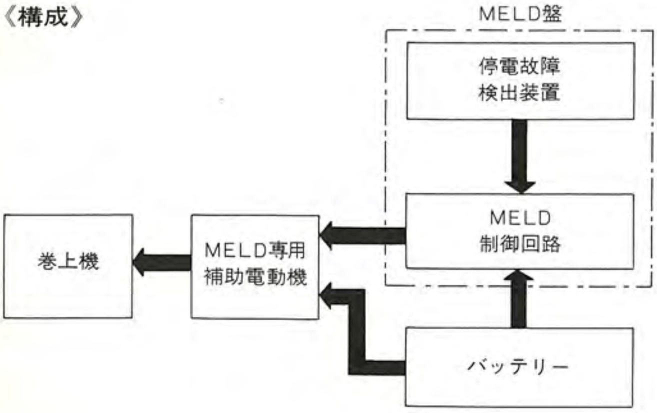
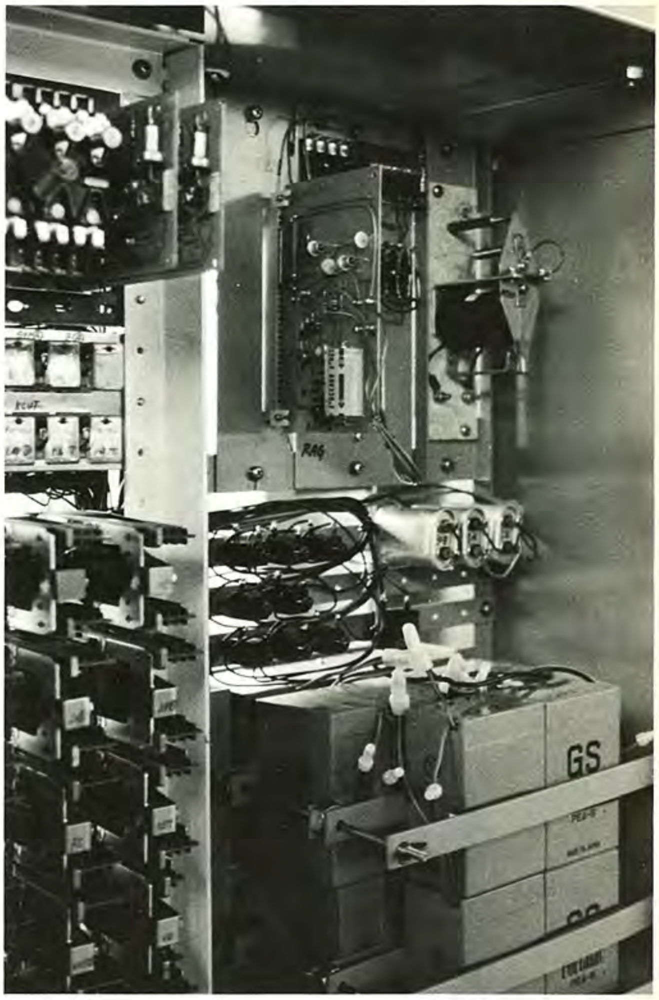
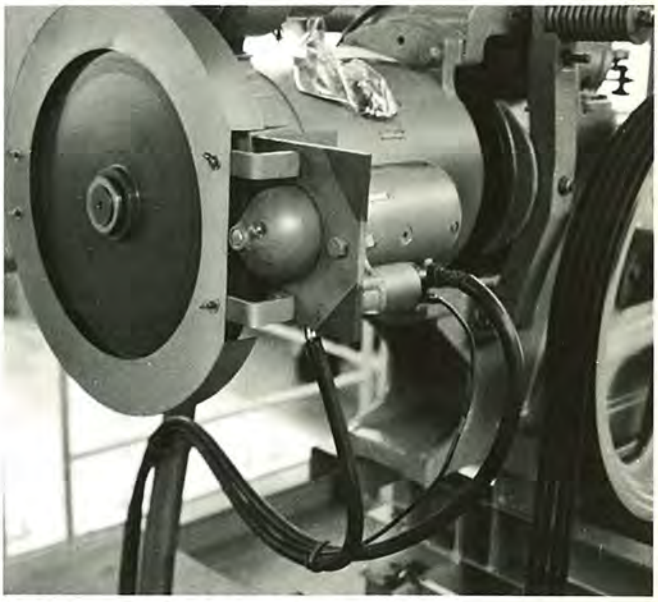
特長

- 停電に限らず電源しゃ断器が動作した場合や制御回路が故障した場合にも救出運転します。
- 停電が復帰すればエレベータは自動的に平常運転にもどります。
- エレベータの安全装置(法令で定められたものを含む)を利用する信頼性の高い救出運転です。
- 専用の補助電動機を備えていますから信頼性の高い救出運転ができます。

次のようなビルに適しています

- 昼夜をとわずにエレベータを使用するビル
- 夜間に管理人が不在となるビル
- 保守会社から遠く離れているビル
- 雷害などにより停電が多発する地域のビル

《救出運転の順序》

1. 停電又は階間停止を検出
2. かご内インジケータに次の表示がでます（停電のとき、天井照明が消えると同時に停電灯が点灯します）　　救出運転中です　しばらくお待ちください
3. エレベータは最寄階へ自動着床したのち扉は自動的に開きます
4. 乗客が降りたあと、扉は自動的に閉まります

《構成》