

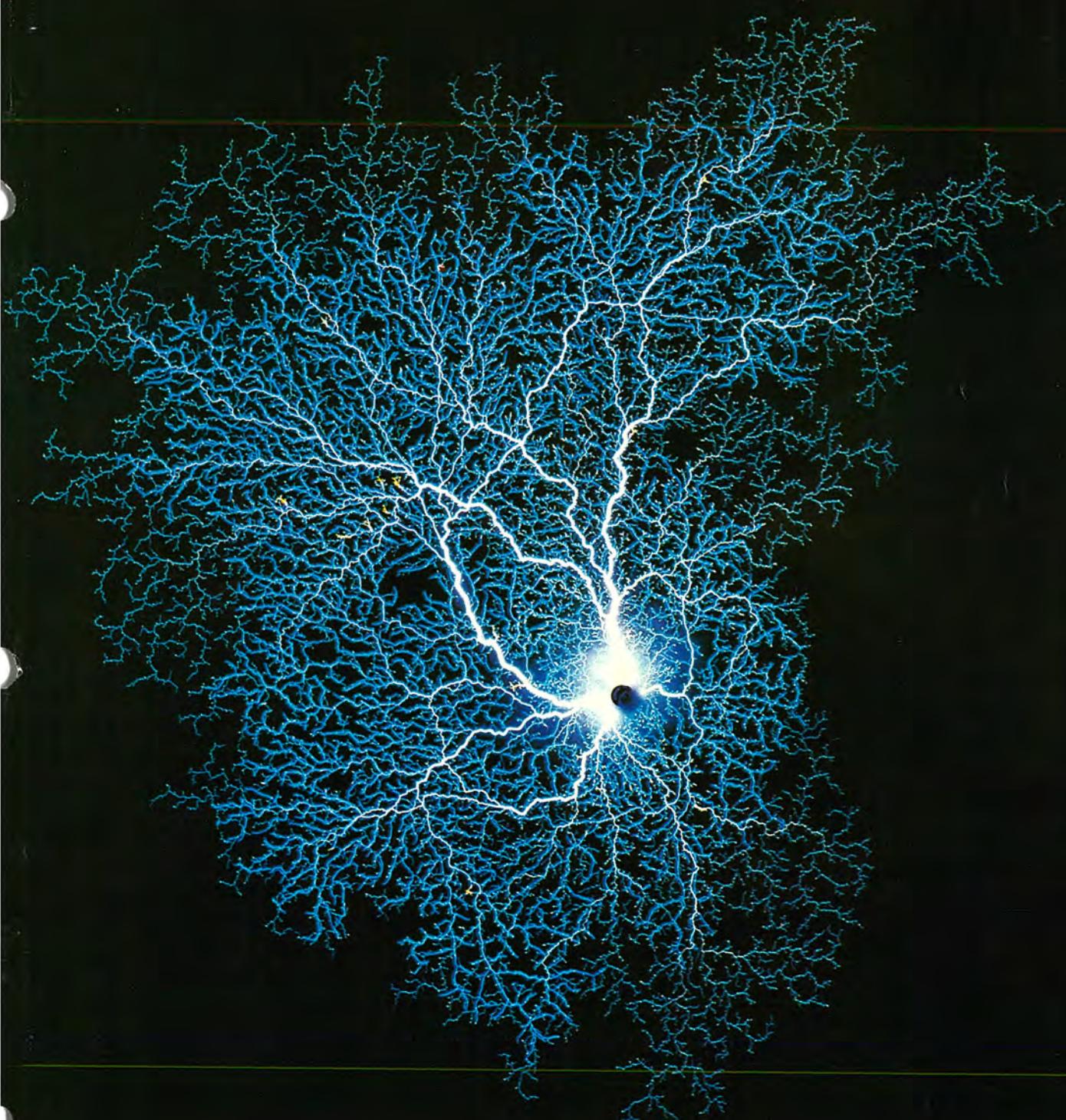
MITSUBISHI DENKI GIHO

三菱電機技報

Vol.49 No.11

研究所創立40周年記念特集

11
1975



三菱電機技報

Vol. 49 No. 11 NOVEMBER 1975

研究所創立 40 周年記念特集

目 次

特 集 論 文

| | | |
|--------------------------|----------------------|-----|
| 研究所創立 40 周年に寄せて | 山森末男 | 703 |
| 電力系統における新しい安定問題 | 上村勝彦・武田捷一・鈴木 浩 | 704 |
| 色彩図形認識とそのソフトウエア | 伊藤貴康 | 708 |
| 真空スイッチの開閉異常電圧 | 村井 裕・高見紀二 | 715 |
| 三軸制御中高度衛星の姿勢制御 | 今度史昭・土屋和雄・斎藤春雄 | 719 |
| 液体燃料の予混合燃焼特性 | 野間口 有・松井安次・酒井正博・藤原通雄 | 724 |
| 多重反射鏡型アンテナの等価パラボラ表示とその応用 | 水沢丕雄・片木孝至 | 729 |
| 電子腕時計用 C-MOS LSI | 中山光雄・坂根英生・堀場康孝・安岡晶彦 | 733 |
| マイカエポキシ複合絶縁組織の熱劣化機構 | 岡橋和郎・林 修・今村 孝・柴山恭一 | 738 |
| 生産自動化のための新しい計測及び加工技術 | 稻荷隆彦・渡辺光人 | 743 |
| 冷凍・空調設計用ソフトウエア | 笠置 訓・大坪道夫 | 748 |

COMMEMORATING THE 40th ANNIVERSARY OF INSTITUTIONALIZED R&D ACTIVITY

CONTENTS

| | | |
|--|-------------------------------------|-----|
| New Problems of Stability in Electric Power Systems | Katsuhiko Uemura et al. | 704 |
| Color-Picture Recognition, and the Requisite Software | Takayasu Ito | 708 |
| Switching Overvoltages in Vacuum Switches | Yutaka Murai & Toshiji Takami | 715 |
| Three-Axis Attitude Control of Satellites in Mid- or Low-Altitude Orbits | Fumiaki Imado et al. | 719 |
| On the Combustion Properties of Aerated Gasified Liquid Fuels | Tamotsu Nomaguchi et al. | 724 |
| The Equivalent-Parabola Concept for Multireflector Antennas, and Its Application | Motoo Mizusawa & Takashi Katagi | 729 |
| A C-MOS LSI for Analog Crystal Wristwatches | Mitsuo Nakayama et al. | 733 |
| The Degradation Mechanism of Mica-Epoxy Insulation Systems During Thermal Aging | Kazuo Okahashi et al. | 738 |
| New Techniques for the Automation of Manufacturing | Takahiko Inari & Mitsuhiro Watanabe | 743 |
| Design Software for Refrigeration and Air-Conditioning Systems | Hiroshi Kasagi & Michio Otsubo | 748 |

表 紙

SF₆ ガス中の放電図形

気体中を放電が進展するときの発光を、直接に写真フィルム上で感光させて得られる放電図形は、気体の種類・気圧により著しく異なり、絶縁破壊現象を理解する上に有力な手がかりを与えてくれる。表紙の写真は、電気機器の絶縁に広く使われている SF₆ ガスの中で、圧力を変えて沿面放電の様相を観測していく得られた放電図形の一例である。

COVER

Discharge Figure Obtained in Pressurized Sulphur Hexafluoride
Discharge figures, the photographic records of the light emission of electrical discharges exposed directly on film, show various patterns depending on the kind of gas and the pressure. The technique presents a powerful aid to an understanding of dielectric breakdown phenomena in gases. The cover shows a typical discharge figure of a surface discharge in pressurized sulphur hexafluoride, an insulating material widely used in electrical power apparatus.

アブストラクト

UDC 621.311.1

電力系統における新しい安定問題

上村勝彦・武田捷一・鈴木 浩

三菱電機技報 Vol.49・No.11・P704~707

近年の巨大化高密度化された電力系統は、必ずしも従来の常識からでは推しはかれないと新たな現象を秘めている。複雑化する系統特性は、解析的に次のように特徴づけられる。(1)電力系統の定常特性の基本的な潮流特性に従来見られた弱線形の概念があてはまらなくなる。(2)動態安定度において、直列コンデンサ等の導入によってモデルのあり方に問題が生じる。特に、電気系と機械系の間の結合による不安定現象がありうる。(3)従来静的と考えられた系統や負荷特性が、動特性を用いねば説明できなくなる。これらの問題につき検討を行った。

UDC 621.396.677.8

多重反射鏡形アンテナの等価パラボラ表示とその応用

水沢正雄・片木孝至

三菱電機技報 Vol.49・No.11・P729~732

アンテナの開口分布を幾何光学的に導くことは普通に行われる方法であるが、集束ビーム給電カセグレンアンテナのように反射鏡の数が多くなったり、非対称のものを含む場合、反射鏡ごとに順次電界分布を求めていくのでは複雑となり、解析が難しくなる。ここでは多くの回転2次曲面鏡から成る系が1枚の等価な回転放物面鏡、すなわち、"等価パラボラ"で表し得ることを示し、そのような系の解析が容易になるような手法を導いた。

UDC 681.3.01:02

色彩図形認識とそのソフトウェア

伊藤貴康

三菱電機技報 Vol.49・No.11・P708~714

計算機による図形認識が、画像工学・パターン認識技術の発展とともに脚光をあびている。その中でも、色彩図形認識は、欧米にも余りその試みを見ない斬新な研究テーマであるが、この論文は、色彩図形認識に関する初めての本格的研究とも言える三菱電機中央研究所における研究開発の状況を紹介するものである。色彩図形認識の研究を支える色彩図形処理計算機システム、色彩情報の正しい解析のためのアルゴリズム、色彩情報を有効に利用した認識アルゴリズムとその応用及びソフトウェアについて概説した。

UDC 621.382:681.11.114

電子腕時計用 C-MOS LSI

中山光雄・坂根英生・堀場康孝・安岡晶彦

三菱電機技報 Vol.49・No.11・P733~737

今回シチズン時計機と共同で開発した指針式水晶電子腕時計用C-MOS LSIは、この種の腕時計に付加しうる機能を"精度"と"使いやすさ"の点から徹底的に追求し、電子帰零装置をはじめとする多くの新機能と、更に小型化と量産性の点で有利なパッケージとしてミニモッド方式を採用するなど、世界ではじめての特長を豊富にもつユニークなLSIである。ここではこのLSIの電子回路と製造法について述べる。

UDC 621.313.333:621.3.064:621.316.5

真空スイッチの開閉異常電圧

村井 裕・高見紀二

三菱電機技報 Vol.49・No.11・P715~718

真空スイッチはその良好な消弧性能のために波高値の高いサーボ電圧を発生する。この論文では、まず真空スイッチをモータ回路に適用した場合についてサーボの発生メカニズムを述べ、つぎにモータの保護をするためのアクトル《VSアクトル》を用いたサーボ抑制方法と、アクトルの構造、機能について述べる。最後にアクトルで保護した場合のモータ事故確率を検討し、真空しゃ断器及び真空コンタクタの場合に対して事故確率の数値計算例を示している。

UDC 621.3.048:678.643:541.66:621.315.6

マイカエポキシ複合絶縁組織の熱劣化機構

岡橋和郎・林 修・今村 孝・柴山恭一

三菱電機技報 Vol.49・No.11・P738~742

高電圧発電機絶縁組織として広く使われているマイカエポキシ複合絶縁組織の熱劣化中における $\Delta \tan \delta$ 増大現象を解明した。エポキシ樹脂単体及びマイカエポキシ複合体の熱劣化中の活性化エネルギーが大きいほど、熱劣化後のモデルコイルの $\Delta \tan \delta$ が小さい。熱劣化は酸素の拡散律速に支配されているが、熱分解生成物もマイカエポキシ複合体内部に蓄積されており、これが複合体の熱的、機械的性質を低下させる。すなわち、マイカとエポキシ樹脂間の接着力が、熱だけでなく、熱分解生成物により弱められて微小ボイドが発生し、 $\Delta \tan \delta$ が増大するものと思われる。

UDC 629.78

三軸制御中高度衛星の姿勢制御

今度史昭・土屋和雄・斎藤春雄

三菱電機技報 Vol.49・No.11・P719~723

任意緯度の中高度衛星に適用できる新しいバイアスモーメンタム形三軸制御方式の概要を述べた。この方式はレベル可変の磁気トルカによりピッチ方向に一定の磁気モーメントを与え、軌道面後退の影響を相殺しつつオフセットスラスターによりロール/ヨー制御を行うもので、ヨーセンサを必要とせずに精密な制御が行える。またこの研究の過程で、根軌跡解析その他により制御系の主要なパラメータを定め、更にシミュレーションによって値を洗練していく設計手法もほぼ確立できた。

UDC 622-52+65.011.541.56

生産自動化のための新しい計測及び加工技術

稻荷隆彦・渡辺光人

三菱電機技報 Vol.49・No.11・P743~747

昨今、社会的、経済的に大きな変化を受けているが、製造業にとって生産性の向上は今後とも不可欠の命題であり、生産自動化はそのための重要な手段である。自動化の対象とする規模が大きくなったり、作業者の人間性の回復が問題となったりなどから、自動化の技術は一層複雑になっている。こうした要求に対応するためには、新しい生産自動化の技術を開発していくなければならない。本文では当社で開発している二、三の新しい技術を紹介している。

UDC 697.2:644.1

液体燃料の予混合燃焼特性

野間口 有・松井安次・酒井正博・藤原通雄

三菱電機技報 Vol.49・No.11・P724~728

液体燃料(灯油、n-ドデカン)を気化し、その予混合燃焼特性をしらべた。この研究によって、燃焼速度、活性化エネルギー及び安定限界がはじめて明らかになった。その結果、灯油、n-ドデカンとともに、これまで明らかにされているメタンやプロパンなど飽和炭化水素系の燃料ときわめて類似した特性を有することが分かった。予混合燃焼は、燃焼特性がすぐれているので、この研究によって液体燃料の予混合燃焼特性が明らかになったことは、実用的見地からみても大きな意義があるといえる。

UDC 697.975:697.911:681.3.06

冷凍・空調設計用ソフトウェア

笠置 紘・大坪道夫

三菱電機技報 Vol.49・No.11・P748~753

空調機器設計技術の高度化・省力化・高速化などの要求が高まってきたので冷凍・空調設計用ソフトウェアの充実を計り、この中からいくつかのプログラム開発を行ってきた。このソフトウェアは建物の冷暖房負荷計算からシステムシミュレーションまでにわたり、また機種も冷蔵庫・ルームエアコンをはじめ各種の熱回収システムと幅広い。本文はこれらソフトウェアの概要を示すとともに、このなかから「マルチセンタラルシステムシミュレーション」と「冷蔵庫のシミュレーション」を例示して、プログラムの内容と効果について述べる。

Abstracts

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 49, No. 11, pp. 729~32 (1975) UDC 621.396.677.833

The Equivalent-Parabola Concept for Multireflector Antennas, and Its Application

by Motoo Mizusawa & Takashi Katagi

Antenna aperture distribution is usually achieved optically, but when the number of reflectors is large, as in focused-beam-feed Cassegrain antennas, or when the design includes asymmetrical reflectors, field distribution must be obtained for each reflector in turn. This increases complexity and makes analysis difficult.

The paper shows how a series of revolving quadratic mirror surfaces may be resolved into a single equivalent reflector—i.e., an equivalent parabola—and introduces a method by which the analysis of such a system may be simplified.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 49, No. 11, pp. 733~37 (1975) UDC 621.382:681.11.114

A C-MOS LSI for Analog Crystal Wristwatches

by Mitsuo Nakayama, Hideo Sakane, Yasutaka Horiba & Akihiro Yasuoka

This C-MOS LSI was developed in cooperation with Citizen Watch Co. Ltd. for use in analog watches; i.e., those with the conventional 3-hand face. It contains not only those functions fundamental to this type of watch (oscillator, dividers, motor driver) but also one-touch time setting, dividing ratio control, LED pulse indication, and many more.

This C-MOS LSI is fabricated using silicon gate C-MOS technology to obtain low V_{TH} and to minimize chip size, and is assembled with tape-assembly techniques to minimize the space factor of the LSI package.

The paper discusses the electronic circuitry and fabrication technology of this new C-MOS LSI.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 49, No. 11, pp. 738~42 (1975)
UDC 621.3.048:678.643:541.66:621.315.6

The Degradation Mechanism of Mica-Epoxy Insulation Systems During Thermal Aging

by Kazuo Okahashi, Osamu Hayashi, Takashi Imamura & Kyoichi Shibayama

The paper explains the mechanism by which $\Delta \tan \delta$ increases during the thermal aging of mica-epoxy insulation systems, which are widely used in high-voltage electric generators. The higher the activation energy of epoxy resin alone or of a mica-epoxy system during thermal aging, the smaller the value of $\Delta \tan \delta$ will be for the model coil after aging is completed. The aging process is governed by the diffusion rate of oxygen, and volatile products of thermal decomposition accumulate at the mica-epoxy interface, resulting in degradation of the thermal and mechanical properties of the system. Thus adhesion between the mica and epoxy is weakened not only by heat but also by the decomposition products, and minute voids appear which are thought to be the cause of the increased $\Delta \tan \delta$.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 49, No. 11, pp. 743~47 (1975)
UDC 62-52+65.011.541.56

New Techniques for the Automation of Manufacturing

by Takahiko Inari & Mitsuhiro Watanabe

In these days of major social and economic change, increasing industrial productivity will continue to be vital. The automation of manufacturing processes is an important means to this end, and with the increasing scale on which automation is applied, and with the growing attention being given to workers' human needs, the techniques of achieving automation must become more sophisticated. The paper discusses several new techniques developed at Mitsubishi Electric.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 49, No. 11, pp. 748~53 (1975)
UDC 697.975:697.911:681.3.06

Design Software for Refrigeration and Air-Conditioning Systems

by Hiroshi Kasagi & Michio Otsubo

Increasingly, design work must be accomplished quickly, with a great degree of sophistication and using less manpower. As a result, steps have been taken to firm up the design software for refrigeration and air-conditioning installations.

Several computer programs have been developed, extending from cooling and heating load calculation for buildings to system simulation, and involving a wide range of equipment, from home refrigerators and room air-conditioners to various types of heat-recovery air-conditioning systems.

The paper outlines the various items of software, and discusses the contents and effectiveness of programs by adducing examples of simulation of a multicentral system, and of a refrigerator.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 49, No. 11, pp. 704~07 (1975) UDC 621.311.1

New Problems of Stability in Electric Power Systems

by Katsuhiko Uemura, Shoichi Takeda, & Hiroshi Suzuki

The greater size and heavier load density of electrical systems in recent years point to new aspects which do not respond to conventional analysis. The paper presents an analytical discussion of the following factors which characterize such systems.

1. The conventional concept of weak linearity can no longer be applied to the basic power-flow characteristics of power systems.
2. The introduction of series capacitors has upset the dynamic stability of system models, leading to a tendency to instability at the interface of the electrical and mechanical sections.
3. System and load characteristics which have heretofore been regarded as static, must now be recognized as dynamic.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 49, No. 11, pp. 708~14 (1975) UDC 681.3.01:02

Color-Picture Recognition, and the Requisite Software

by Takayasu Ito

With advances in image technology and pattern recognition, great interest has been shown in computerized picture recognition. In particular, color-picture recognition is an emerging field, with little work being done even in Western countries. The paper describes the progress of the pioneering R&D work done at Mitsubishi Electric, touching on a computer system for color-picture processing that is the foundation of the whole program, algorithms for accurate analysis of color information, recognition algorithms for the effective utilization of color information, and their applications and software.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 49, No. 11, pp. 715~18 (1975)
UDC 621.313.333:621.3.064:621.316.5

Switching Overvoltages in Vacuum Switches

by Yutaka Murai & Toshiji Takami

Because of their high arc-quenching ability, vacuum switches produce high surge voltages. The paper describes first the surge mechanism that occurs when vacuum switches are applied to motor circuits, and then a method of protecting motors through surge suppression using Type VS reactors, along with the construction and function of the reactors. Consideration is also given to the probability of motor-insulation failure occurring when reactor protection is applied, and examples are given of numerical calculation for the failure probabilities of motors controlled by vacuum circuit breakers and vacuum contactors.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 49, No. 11, pp. 719~23 (1975) UDC 629—78

Three-Axis Attitude Control of Satellites in Mid- or Low-Altitude Orbit

by Fumiaki Imado, Kazuo Tsuchiya, & Haruo Saito

The paper presents a new, biased-momentum-type 3-axis attitude-control system for controlling satellites in mid- or low-altitude, arbitrary-latitude orbits. This system uses a variable-level magnetic torquer to apply a constant magnetic moment in the pitch direction, and an offset thruster to control roll and yaw by cancelling out the effect of nodal regression of orbit, thereby achieving precise control without the need for a yaw sensor. In the course of this work, root locus analysis was used in defining the main parameters for the control system, and on the basis of values refined through simulation, a substantially complete design method was established.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 49, No. 11, pp. 724~28 (1975) UDC 697.2:644.1

On the Combustion Properties of Aerated Gasified Liquid Fuels

by Tamotsu Noguchi, Yasuji Matsui, Masahiro Sakai & Michio Fujiwara

The combustion properties of gasified liquid fuels (kerosene, n-dodecan) when aerated prior to combustion were investigated for the first time, and their burning velocity, activation energy and stability limits were determined. It has become clear that the properties of both kerosene and n-dodecan are greatly similar to those of such previously studied paraffin hydrocarbon fuels as methane and propane. In that pre-aeration enhances the completion of combustion, the clarification of the pre-aerated combustion characteristics of these liquid fuels is of great practical significance.

研究所創立40周年に寄せて

常務取締役

山森末男



三菱電機株式会社全体の研究機関として、研究部門が創設されてから、本年秋をもってちょうど40年となる。昭和10年9月に本店研究課として発足したときには、総勢約20名に過ぎなかつたが、研究開発を必要とする時代の要請と先輩諸賢の絶えざるご努力のもとに、四つの研究所と四つの事業部研究部を擁する研究部門へと成長した。

いまや、研究開発は企業にとって不可欠のものとなり、企業活動が国家経済のみならず、社会や生活の環境に大きな影響を及ぼすに至った昨今の情勢は企業内の研究に従事するものに、新たな挑戦課題を提起している。

その一つは、長期間を要する大形化した技術開発の必要性である。例えば、高速増殖炉・核融合・太陽エネルギーの利用などのエネルギー開発計画や、つぎの世代の電子計算機と超LSIの開発などである。このような大きな技術開発は先進国の一員としての道を歩もうとしている我々にとって極めて重要である。しかしながらその達成には多大の開発努力が必要である。いかに効率よく研究を進めるか、大きな課題である。

第二は、公共社会や人間生活との連けいを考えた研究開発である。

高度成長はGNPを拡大し、大きな繁栄をもたらしたが、オイルショックや公害問題などを契機に、資源問題や地域社会との連けいの重要さを如実に体験することとなった。省資源・省エネルギー、公害の防止と排除、安全性の確保、社会生活に有効なシステム技術の開発などに研究部門の果たさなければならない役割は大きい。

第三は、技術力の着実な育成と結集である。上述のような課題を達成するためにはもちろん、我々が日常より組んでいる多くの製品開発、あるいは製品の性能や安全性・信頼性の向上などのためにも、借りものでない基礎から積み上げられた技術とその結集なくしては世に通用するものは造り出せない時代となった。かつては多くの外国技術も容易に導入することができたが、現在は技術を導入するのにも、対価として同等の技術を要求される。ここには研究部門が不斷に努力すべき広い分野がある。

1970年代も半ばに達し、高度成長から安定成長へと転換を迫られているときに当たり、研究所への期待すなわち果たさねばならぬ役割は大きい。企業研究所として社会に役立つ技術発展の一翼を担うために、更に新たな努力を続ける覚悟である。ここに各位のご一読を得て一層のご協力とご支援をお願いする。

電力系統における新しい安定問題

上村 勝彦*・武田 捷一**・鈴木 浩**

1. まえがき

過去十数年に及ぶ高度経済成長政策による電力需要の約7年倍増の伸び、及び環境問題や土地問題は電力系統の性質や系統機器に大きな変化をもたらした。すなわち、一口にいって系統の巨大高密度化である。この傾向は、たとえ低成長経済時代に入っても、土地確保の困難性、大容量化による経済性原則の存在する限りそうたやすく変わらないものと思われる。更にエネルギー問題から見ても長期的には原子力発電の重みが増すことから巨大高密度化の傾向はますます助長されるであろう。

さて、このような巨大高密度化された電力系統は、必ずしも従来の常識からでは推しはかけない新たな現象を秘めている。そして、その現象を生みだす要因はおよそ次のようない解特性の言葉を借りて特徴づけられるのではなかろうか⁽¹⁾。

(1) 電力系統の定常特性の最も基本的な潮流特性において、従来の電力系統において見られた、有効電力と電圧位相との関係、無効電力と電圧の大きさとの関係の弱線形性の概念が遠ざかりつつある⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

(2) 電力系統の動搖維持能力である動態安定度や過渡安定度の概念において、直列コンデンサの導入やその他の系統機器の大容量化に伴う解特性の変化によってそのモデルのあり方に大きな問題がでてくる。特に、発電機及びその動力系を一つの剛体とみなしていた従来の考え方に対して、これらの機械振動系と系統側電気現象との間に深く関連する新しい不安定領域が問題として出現していく可能性が大きくなってきた。

(3) 従来の系統においてはほとんど静的として考えてよがった、系統や負荷の特性が、その動特性を用いなければ説明できない新たな現象がでてくる可能性がある。

もとより、電力系統の安定性とは、全局的にも部分的にも、それに加わる外乱や環境の変化に対しそれに耐え得る能力のことであり、従来は、その変化の性質により定態安定度、動態安定度、過渡安定度により代表されたものであるが、上記(1)、(2)、(3)により、これらの内容も従来の概念より変化し、また新しい安定性概念が必要になってきた。

以下、これらの概念のうち特に重要な問題につき各章にてその具体的展開を行う。

2章においては、定態安定度に関する潮流解の問題について述べ、3章では、直列コンデンサ系統における動態安定度の概念をその機械系との関連において述べ、4章では、電圧と無効電力の安定性の概念につき述べる。

2. 定常特性としての潮流特性

電力系統における電力輸送の流れを潮流と呼ぶが、これらは各母線において発生あるいは消費される有効電力量及び無効電力量と、そ

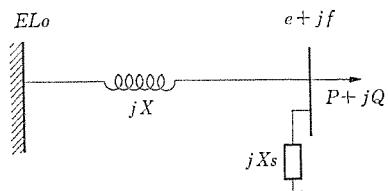


図 1. 1母線系統

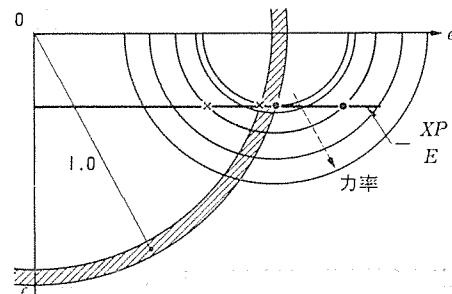


図 2. 解の位置

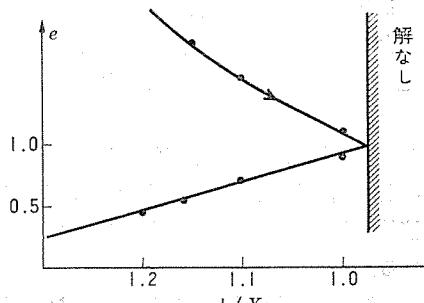


図 3. 並列要素と解の動き

こにおける電圧位相及び電圧の大きさの関係にて定まる一般には非線形方程式によって記述することができる。従来、多くの電力系統においては、有効電力量と電圧位相、無効電力量と電圧の大きさの関係が支配的であり、弱線形性(線形近似が十分の精度で行われる)の関係を有し、そしてその解は物理的に妥当と考えられる領域でたた1組あるだけであった。これを系統の運転点と呼んでいた。しかし、母線間の線路インピーダンスが大きくなり、またそこを流れる電力量も増加するに従い、本来の性質である非線形性が支配的となり、物理的に妥当な範囲内で多くの解を有する可能性がでてきた。

図1.に示す最も単純な系統でさえも、その潮流関係は、

$$P = -\frac{Ef}{X} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$Q = -f^2(1/X + 1/X_s) - e^2(1/X + 1/X_s) + \frac{eE}{X} \quad \dots \dots \dots (2)$$

であるから、2組の解を有することが容易に理解されるが、 X 、 X_s 、 P 、 Q の値によっては、図2.に示す斜線の部分に2組の物理的に妥当な解を有する。

ちなみに、このような系統において並列コンデンサの操作により電圧の維持をはかることを考えた場合、図3.に示すように(この場

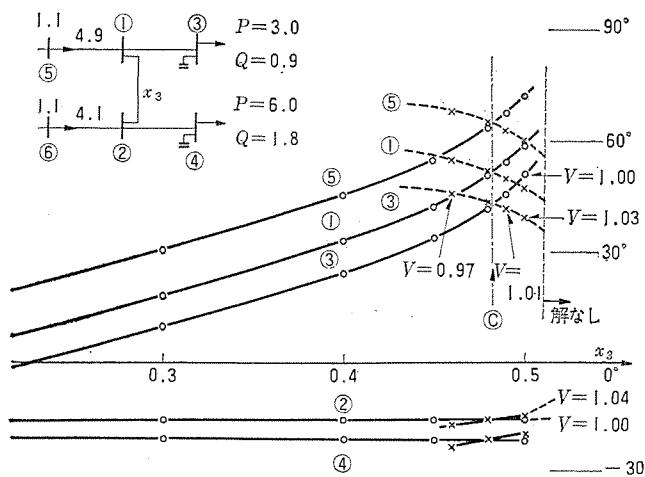


図 4. 多機系における解の多重性

合 $P=0.6$ (p. u.), $Q=0.3$ (p. u.), 一方の解においては投入コンデンサ容量の増加にしたがって電圧の大きさも大きくなり従来の常識になるのに対し, 一方の解においては, 全く逆の関係をもたらし, 投入量が多ければ多い程電圧の異常低下をもたらし, 電圧の安定性が維持できなくなり, 解の多重性が新たな新しい安定性の問題を提供する。

一般の多母線系統においても、解の物理的に妥当な範囲での多重性を見る事ができる。図4.は連係線のリアクタンスをパラメータとしたときの2組の解を図示したものであり、いずれの解も◎点付近では従来の定態安定度の概念においては安定である。しかし、種々の系統操作により、一方の解が安定で、他方が不安定であるという可能性も十分に秘められている。

一般に妥当な範囲内に多くの潮流解を有する条件、現実の運転点は、その中のどの点であるのか、あるいは、その点が系統変化や外乱によってどのように移りかわって行くかと言う問題については、解明されていないのが現状である。またいまだに、すべての解を算出する潮流計算法の決定版は発表されていない。

3. 動能安定度の新しい概念

3章では電力系統における、微小外乱に対する安定度としての動態安定度について述べる。

3.1 動態安定度解析法

電力系統において、一つの同期発電機に着目すると、その動態方程式は次のように表される。ただし $s = d/dt$ (微分演算子) である。

$$\Delta T_e = F_e(s) \Delta \delta \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここで、 ΔT_e 、 ΔT_m は発電機の電気、機械トルク変動で、 $\Delta\delta$ は相差角変動、 $F_e(s)$ 、 $F_m(s)$ は電気系モデルと、発電機機械振動系モデルの伝達関数である。

電力系統の動態安定度は、上記2式を解いて得られる特性方程式から判定される。すなわち、 $s = j\omega$ において ω を 0 から ∞ まで変えたときのこの特性方程式の（周波数）軌跡が、複素平面上の原点を右側に見れば不安定、右に見なければ安定と判断される（ナイキスト判定法）⁽⁵⁾。

従来の動態安定度の考え方では、同期機 モデル としては電機子過渡効果を無視し、発電機機械系はこれを一つの剛体として扱っていた。この場合の特性方程式周波数軌跡を図 5. に示す。図 5.(a) は同期化力不足により生じる発散形不安定(定態不安定)で、(b) は

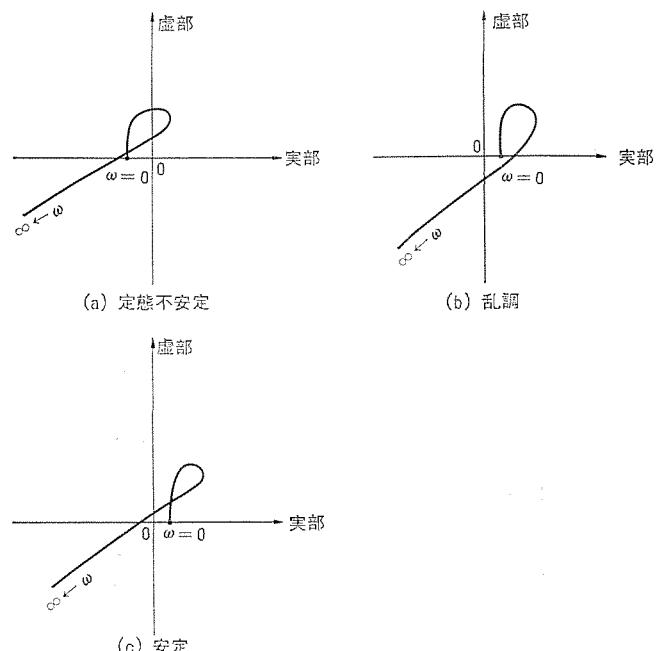


図 5. 従来 モデル の 周 波 数 軌 跡

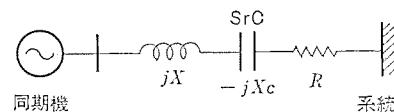


図 6. SrC を含む系統

数 Hz 程度の低周波振動形発散不安定（乱調）に相当し、(c) は動態的に安定な系を示している。上記のような簡略モデルを用いた動態安定解析では安定判別にも簡略判定法を使用することができた。

3. 2 直列コンデンサ補償時の動態安定度

電力が大容量化し、送電線が長くなると系統の定態安定度を向上させる目的で、送電線リアクタンス (X) 補償用の直列コンデンサ (SrC) を使用するようになると(図 6.)、従来の動態安定度解析のモデルでは系統の安定度を正確に判定できなくなってくる。すなわち、 SrC と超高压送電線の低抵抗性とから生じる新たな不安定現象の生じる可能性がある。送電系の特性は X と X_c により電気回路としては 2 次系になり、ある固有振動を有する。この周波数 f_e は系統周波数に対するスリップとして

と表される。ここで X_a は発電機 リアクタンス である。

この振動現象は Subsynchronous Resonance(SSR) と呼ばれ振動周波数は 0.5(p. u.) 前後の値をとる。SSR は従来の動態安定度解析では考慮されていなかった中間周波数での現象であるため、電気系モデルとしてこれまで無視していた同期機の電機子の過渡効果を考慮する必要がある。その結果、特性方程式の周波数軌跡は図 7. のようになる。図 7.(a) では SSR 不安定が生じており、(b) は安定であることを示している。SSR 不安定現象発生の物理的説明としては以下のように考えるのが分かりやすい。SSR 周波数に対して同期機は負のスリップを有する誘導発電機として働き、発電機抵抗が見かけ上負となり、送電系の抵抗 R を加えても全体として負になるとき、動的に不安定な負制動現象が発生する⁽⁷⁾。SSR 現象は送電線 SrC 補償の高い程、また送電線抵抗の小さい程不安定になりやすく、

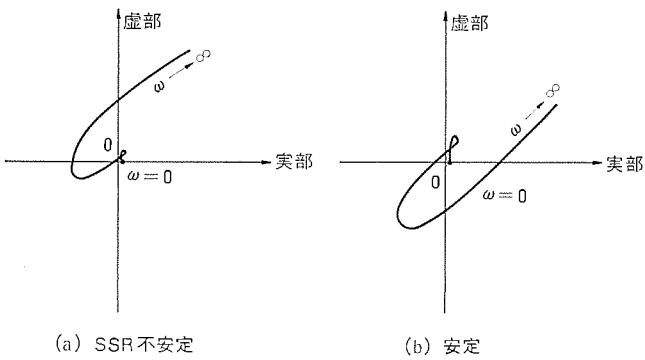


図 7. SrC を含む系の周波数軌跡

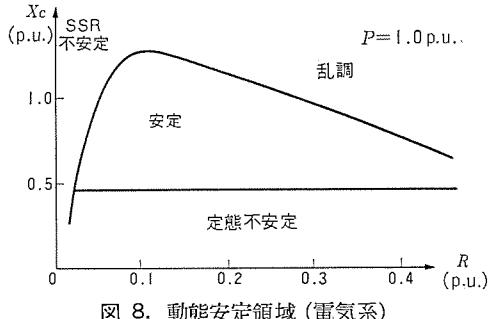


図 8. 動態安定領域(電気系)

横軸に送電系抵抗 R 、縦軸に SrC サセプタンス X_c をとったときの動態安定領域は図 8. に示すようになる。図 8. 右上部は乱調領域で、下側に定態不安定、左上部に SSR 不安定領域があらわれる。中央の三角形内部がこのモデルでの安定領域となる。

3.3 モード結合不安定

発電機機械系を一体と仮定したモデルの安定領域は図 8. に示されるが、火力・原子力発電機のように数車室のタービンと発電機がタンドムにつながっているような場合には、機械系自身が周波数 $0 \sim 1$ p. u. に幾つかの共振周波数を有している(図 9.)。このうちの一つ f_m が電気系の SSR 周波数 f_e と一致した時に、モード結合(電気系モードと機械系モードとの結合)の不安定現象を生じることがある。機械系自体の振動は減衰形であるが、電気系における SSR 現象とのモードが一致した時に、電気系独自では安定であるとしても両系の間に正の帰還がかかり複合系として不安定となるのがモード結合不安定現象である。その不安定領域は、図 8. と同じ平面上で、図 10. に見るような結合するモード数に対応する数の穴の形で表れてくる。穴の位置は、対応するモードの周波数を与える式(5)で決まる X_c のところに来、この不安定領域の深さ、広さはそのモードの軸ダンピングの大きさによって決まる。ここでは出力 $P=0$ とした。

1970, 71 両年にアメリカの南カリフォルニアの Mohave 火力発電所において、255 MW 機の転事故が起きたのは、このモード結合による不安定現象が原因であった⁽⁸⁾。この種の不安定は SrC 補償率を下げれば解決するというものではない。

3.4 動態安定度解析の今後

上記のように、電力系統の安定度を解析するのに、発電機機械系、電力系統のモデルとして何を選ぶか、また安定判別をどのように行うかによって、不安定領域が正しく現れたり隠れたりすることがある。また、 SrC のように系統の定態安定度を増すためにそう(挿)入した機器が、動態安定度上種々の不安定現象を生じたり、新しい制御機器が効果を発揮する周波数領域以外のところでかえって系統安定度上不都合を生じる可能性がある。安定度解析には、これらの点を考慮に入れたモデルを用いることが必要となつてこよう。

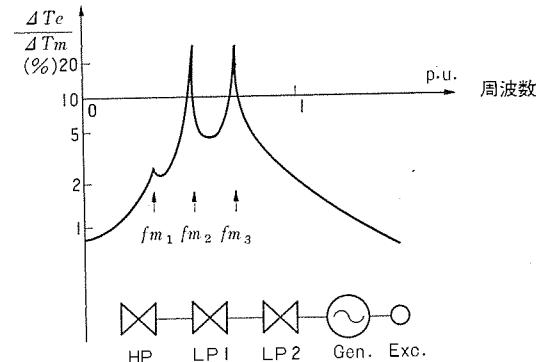


図 9. 機械系周波数応答

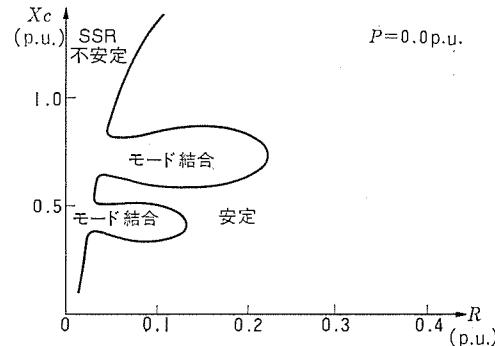


図 10. モード結合不安定領域

4. 電圧と無効電力の安定性⁽⁹⁾

電力系統の周波数変動が主に有効電力変動に支配されているのに対して、電圧変動はその点における無効電力と深く関連していることは衆知であるが、近年複雑な無効電力過度応答を有する誘導電動機負荷の増大が負荷端電圧不安定現象の問題を表面化させるに至った。更に系統の長距離、高密度化が送電路の等価的リアクタンスを増大させた結果、発電機端より負荷端への無効電力供給を困難なものとし、それを補う目的で負荷側に設置される並列コンデンサが後にのべる系統の電圧復旧能力を劣化させる結果となっている。

一般に元来単独には安定な過度応答を有する要素が不安定現象を呈するのはそれらの結合による相互作用の結果であることはフィードバック理論の示すところであるが、このことからも分かるようにそれぞれ誘導機を主体とする負荷が系統に接続されている場合、それぞれの負荷の無効電力過度応答と系統側特性との相互作用によって全体が不安定となる場合が理論的にも十分予想されるわけである。

ところがこのように安定性に重要な意味を持つ負荷の過度応答特性は一般に複雑で場所、時間により変わることが予想され、これを正確に知り得ないために、この現象の解析的取扱いに困難な面が多くあった。ここでは周波数領域における安定論の結果を利用して、図 1. の簡単な系統にこのような不明確な過度応答を示す負荷が接続されている場合の安定条件を述べ、これが満たされない場合に電圧不安定現象が発生することを示す。(一般的な系統の場合については⁽¹⁰⁾を参照されたい。)

いま端子電圧を V_0 とし、それよりの微小変動を ΔV 、それに対する負荷の無効電力変動を ΔQ として、その過度応答を $\Delta Q = f(s) \cdot \Delta V$ と表す。また系統側については $\Delta Q = (\partial Q / \partial V) \cdot \Delta V$ と書けるので、端子電圧変動は方程式

$$\left(f(s) - \frac{\partial Q}{\partial V} \right) \cdot \Delta V = 0 \quad \dots \dots \dots (6)$$

で記述される。したがって $\operatorname{Re} s \geq 0$ で $f(s) - (\partial Q / \partial V) \neq 0$ ならば

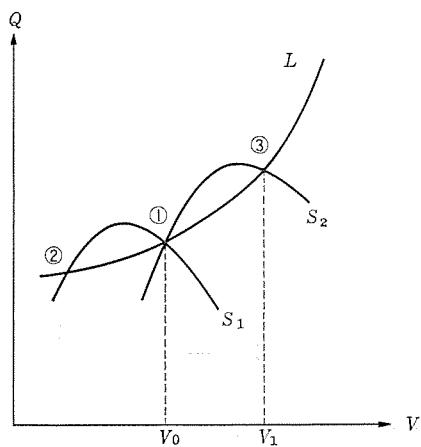


図 11. Q-V のつり合い

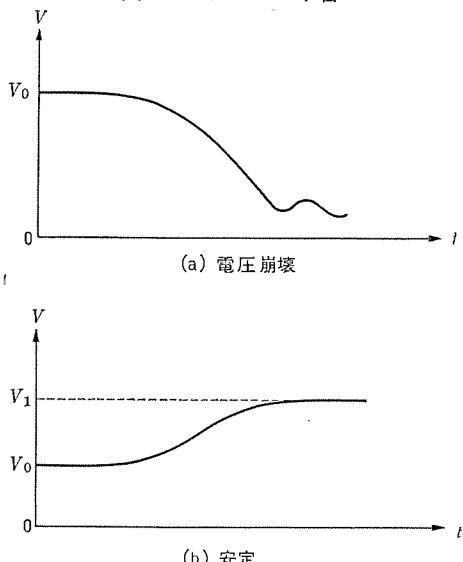


図 12. シミュレーション結果

式(6)の解は安定であることが分かる。ここでナイキスト流の考え方を適用すれば

$$\operatorname{Re}\{f(j\omega)\} > \frac{\partial Q}{\partial V} \quad \dots \dots \dots (7)$$

が電圧安定の十分条件となる。ところが前述のように、過度特性 $f(j\omega)$ は ω の全域で正確に知られ得ないが、次のような際立った特長を有している。すなわち誘導機を主体とする負荷について実測、シミュレーション等により

$$\operatorname{Re}\{f(j\omega)\} \geq f(o) \quad \dots \dots \dots (8)$$

が成立していることが判明した。その結果式(7)の安定条件は

$$f(o) > \frac{\partial Q}{\partial V} \quad \dots \dots \dots (9)$$

と書ける。ここで $f(o)$ は負荷の静特性そのもので、端子電圧に対する負荷の消費無効電力の変化率であるから、実在の系統において

その値は実測可能である。

さて式(9)により系統の各潮流解についてその電圧安定性を静的な特性のみにより判定することが可能となったが、その状況を図11の系統で調べてみる。図11において L は負荷の V - Q 特性で、その微係数がその電圧における $f(o)$ に相当する。 S_1 は無効電力を供給する系統側の V - Q 特性で、この時 L と S_1 の交点①と②が可能な潮流解である。これに式(9)を用いると①の電圧 V_0 は安定となっていることが分かる。ところが系統の長距離高密度化により X が増大した場合、端子電圧を維持する目的で並列コンデンサを投入することになるが、その時の系統の V - Q 特性は S_2 のようになる。その結果①と③の潮流解が得られるが、①においては式(9)は成立しておらず、③の電圧 V_1 が安定となることが図よりも明白である。このような場合の電圧の時間的変化をシミュレートした結果が図12.(a), (b)である。ここで両者の相違は最初の外乱の相違によるもので、前者はいわゆる電圧崩壊現象を呈しており、後者は標準電圧 V_0 より高い電圧 V_1 に落ちつくことが分かる。

以上簡単に電圧と無効電力の安定問題を述べたが、今後ますますこのような点を留意した系統、機器の設計運用が必要であろう。

5. む す び

以上述べたことは、必ずしも我が国の電力系統において、現実に起ったものとは限らないが、巨大化する今後の系統を考えると検討しないでも済むという問題ではない。もとより、これらの不安定問題を避けうる第1歩は系統計画であろうが、その段階ですべての可能性を予見することは困難であろうし、運用面の制御に頼らねばならない側面も多々あるだろう。今後の方針として、現象自体を実に解析的に明らかにするとともに、これをベースとして抑制策の具体案を示す方向が重要である。

参 考 文 献

- (1) 上村：高密度電力系統の系統解剖上の諸問題、昭50電学会全国大会シンポジウム S 10-5 (昭50-4)
- (2) V. Idelchik, V. Tarasov : PSCC Conf. 1.3/8, 1 (1972)
- (3) V. A. Venikov : IEEE Winter Meeting (1974)
- (4) A. M. Sasson, C. Trevino, F. Aboytes : IEEE Trans. Power Apparatus and Systems 90-5, p. 1974 (1971)
- (5) B. C. Kuo : Automatic Control Systems (1967) Prentice-Hall Inc.
- (6) W. G. Heffron, R. A. Phillips : AIEE 71-III, p. 692 (1952)
- (7) L. A. Kilgore, L. C. Elliott, E. R. Taylor : IEEE 70 TP 626-PWR (1970)
- (8) C. E. J. Bowler, D. N. Ewart, C. Concordia : IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, 92-5 (1973)
- (9) 上村、武田：電圧安定性と負荷の静特性・動特性との関係、電学会・電力技術研究会 ET 75-14 (昭50-5)

色彩図形認識とそのソフトウェア

伊藤 貴康*

1. まえがき

パターン認識は、計算機及び情報処理に関する高度の応用分野として、活発に研究され、文字認識を始めとして、一部実用化も進み、広く知られるようになっている。パターン認識のいくつかの研究テーマの中で、最近、特に脚光をあびているのが、計算機を用いた図形認識及び画像処理である。この中には、航空写真の認識、医用・生物写真の処理、3次元情景の認識、指紋・顔の識別、各種パターンの欠陥認識、画像伝送のための画像の符号化や帯域圧縮といったテーマがあり、実用化の段階に入っているものもある。これまでの図形認識は、白黒濃淡図形を対象としてきたが、現実の図形・情景は、すべて、色彩を含んでおり、人間の図形知覚や認識では色彩が重要な役割を演じている。これは、取りも直さず色彩図形認識のパターン認識における重要性を意味していると言えよう。

しかし、色彩図形認識に関する研究は、最近まで、余り行われていないのが現状である。この理由には、色彩図形に含まれる膨大な画像データ量と実時間使用に耐える色彩図形入出力装置の欠陥に大きな原因があると考えられる。このような点についての基礎的考察を文献(2)において行い、この考察をもとに開発された計算機による色彩図形処理システムについて文献(7)に紹介した。本文においては、これらを基にして更に発展されている色彩図形認識とそのソフトウェアのいくつかについて、基本的考え方を紹介する。

本文では、色彩図形処理計算機システム、それを用いた色彩解析と色彩の認識について述べ、更に色彩情報を有効に利用した図形認識とその応用について述べる。

2. 色彩図形処理計算機システム

色彩図形処理計算機システムの一つの試みが、当中央研究所において開発されているが、このシステムは、

- ①計算機への色彩図形の入力
- ②色彩情報の計算機解析
- ③色彩情報の有効利用による図形認識
- ④色彩図形の構造解析
- ⑤色彩図形の対話的処理

が行えるように考慮されている。このシステムは、各種の色彩図形入出力装置が接続されたミニコンピュータ(PDP-11)と上位計算機《MELCOM 7500》とからなる計算機複合システムを基礎としており、対話形の色彩解析ソフトウェアがミニコンで利用できるのを始めとして、リスト処理言語 LISP/M, SL データ構造に基づく定理証明プログラム、図形演算コンパイラ、図形前処理ソフトウェアパッケージ等が利用できるようになっている。図1.は、このシステムの主要部のハードウェア構成を示しており、このシステムは、ネットワークハンドラの制御の下に動作するようになっている。システムの概要は、文献(7)及び(11)に詳しく述べられているので参照されたい。

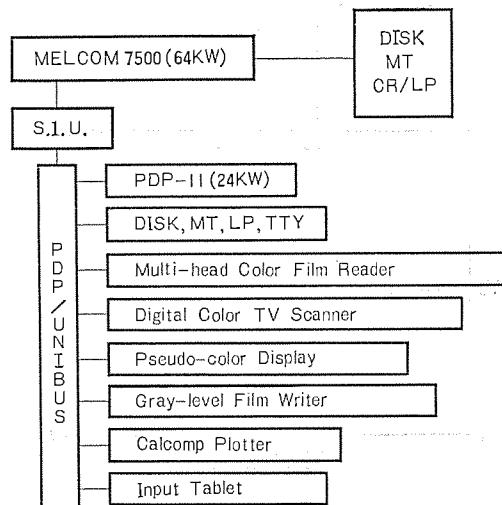


図 1. 色彩図形処理 計算機 システム

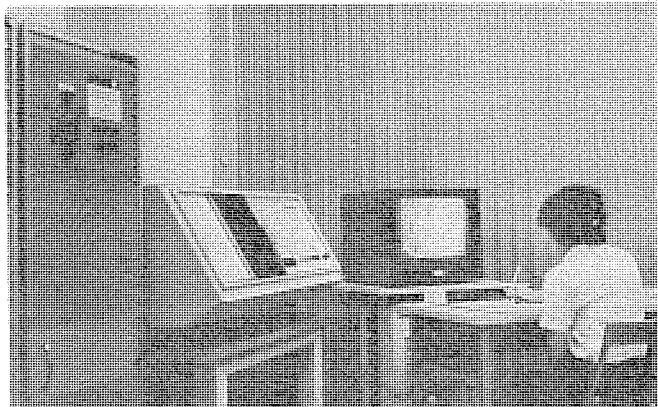


図 2. 高性能 カラーフィルム リーダーと擬似 カラー ディスプレー

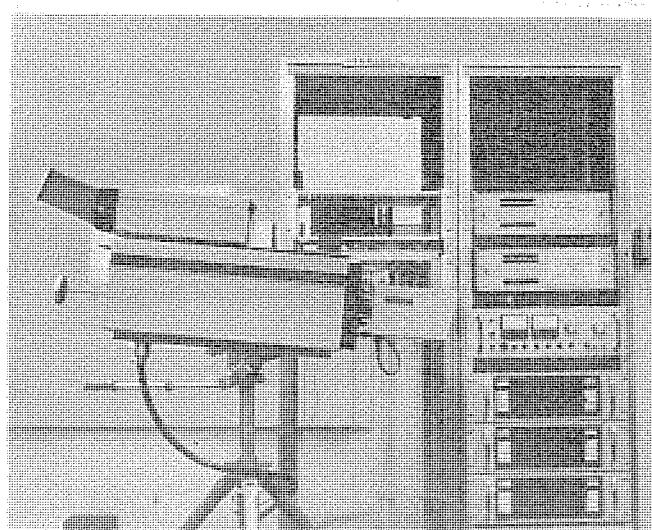


図 3. カラー TV カメラ を用いた色彩図形入力 システム

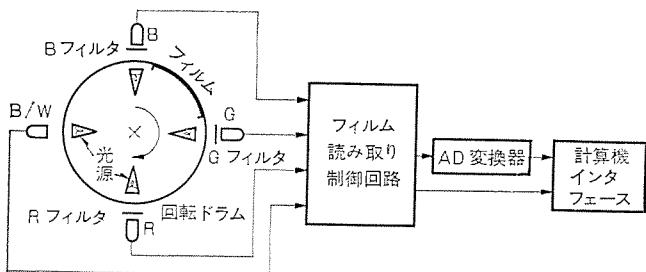


図 4. 高性能 カラーフィルム リーダ の構成図

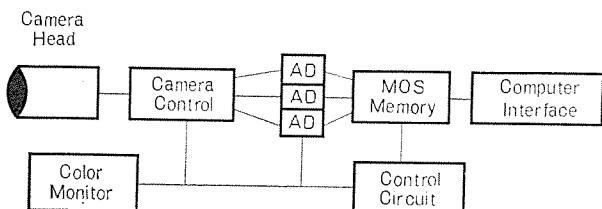


図 5. カラー TV カメラを用いた色彩図形入力 システム の構成図

表 1. 高性能 カラーフィルム リーダ の主要特性

| | |
|------------------|-------------------------------------|
| no. of heads | 4 (R, G, B, B/W) |
| MAX. film size | 125 mm × 175 mm |
| aperture size | 50 μm × 50 μm |
| scaling | 0.0~3.0 D |
| scaling mode | 2 D or 3 D |
| bit density | 8 bits/head |
| scanning mode | 50, 100, 200 (μm) |
| data rate | 200 KB/s |
| standard filters | Wratten 47 D, 58, 25 (B) (G) (R) |

表 2. カラー TV カメラを用いた色彩図形入力 システム の主要特性

| | |
|---------------|---|
| scanning mode | scanning points: 256 × 256/frame digitization level: 4 bits/pixel monochromatic picture/field |
| data rate | camera MOS memory: 16.7 ms/frame MOS mem. core mem.: 500 KB/s core mem. MOS mem.: 400 KB/s |
| camera head | 3 tube type |
| MOS memory | capacity: 96 KB access time: 500 ns |

表 3. 擬似 カラー ディスプレー の主要特性

| | |
|-------------------|------------------------|
| no. of pixels | 256 × 240 |
| no. of colors | 15 colors/pixel |
| vector generation | 8 direction |
| character mode | alphanumeric, Katakana |
| memory | MOS memory |

表 4. デジタル フィルム ライタ の主要特性

| | |
|------------|-----------------------|
| spot size | 25, 50, 100, 200 (μm) |
| density | 0~2.5 D |
| resolution | 64 gray levels |
| data rate | 60 kHz |
| film size | 8" × 10" |

色彩図形の対話的実時間処理を許容するために、図 1. に示したように、いくつかの図形入出力装置が接続されている。これらの中で、色彩図形入力装置として重要なものが、高性能マルチヘッドカラーフィルムリーダ (Multi-head color film reader) とカラー TV カメラを用いた色彩図形入力システム (Digital color TV scanner) であり、それらの構成図と試作装置の写真を図 2.~図 5. に、またそれらの主要特性を表 1., 表 2. に示した。入力タブレット付きのカラー図形ディスプレーが図 3. にも見られるように利用できるが、カラー図形ディスプレーとデジタルフィルムライタの主要特性を表 3., 表 4. に示した。

3. 計算機による色彩情報の解析法

色彩図形処理計算機システムを用いることによって、オンラインで色彩図形を入出力し、対話的に処理を進めることができたが、これをもとにして、色彩図形認識を行うには、色彩情報の正しい認識が、まず第一に重要となる。これは、色彩情報を有効利用した図形認識においては、特定の色彩が、重要な意味を持つことになるので、その色彩の正しい解析及び認識が不可欠となるからである。

色彩情報の解析には、古典的な色彩学の手法を応用することが考えられ、実際に有効な手法も提供してくれるが、これらを採用し、適用するに当たって、新しい考慮も必要となる。従来の手法は、人手で解析することと色彩そのものの厳密な解析を行うことに目的があった。しかし計算機による色彩図形認識の立場からは、厳密な色彩解析よりも、近似的でもよいから、色彩図形認識に必要な正しい色彩認識を計算機を用いて、簡便に行なうことが望まれる。実際に、いろいろな色彩図形を対象として、色彩の解析を行おうとすると、一つの方法だけで、すべて行えるということではなく、複数個の手法を準備せざるを得ない。またマルチヘッドカラーフィルムリーダの標準フィルタもカラー TV カメラを用いた色彩図形入力システムのフィルタ特性も色彩学における標準特性とは異なるので、この点に対する考慮もされねばならない。

ここでは、上記のような考慮の下に検討され、開発され、実際にも用いられている色彩情報の有用な解析・表示・演算機能の代表的なものについて述べよう。

3.1 色彩情報の数値化

色彩情報を解析するに当たってまず問題になるのは、色彩情報が数値的に取扱えないかということであり、この代表的な方法として、次のような方法がある。

(1) XYZ 値の算出

色彩図形入力装置からの濃度値が CIE-XYZ 値に対応するとして、近似的に解析を進めることもできるが、入力装置のフィルタの CIE-XYZ 値が知られているので、(色彩学における常套的な手法を用いて) 線形変換により、CIE-XYZ 値に良い近似を与える数値を求めることができる。

(2) 色彩 3 属性の算出

色彩を色相 (Hue), 彩度 (Chroma あるいは Saturation) と明度 (Brightness) によって表示する方法があるが、これを数値的に算出することにより、色彩の認識・解析に用いようとするものであり、色相、彩度は図 6. に三角形色度図の説明とともにその計算法を与えた。なお明度は、 $B = aX + bY + cZ$ なる線形結合で求まるが、(a, b, c) の値は入力装置のフィルタ特性によって異なり、例えば、カラー TV カメラの場合には $(a, b, c) = (0.35, 0.59, 0.11)$ となる。

3.2 色彩の三角形表示

色彩学の結果によれば、あらゆる色は、赤 (R)・緑 (G)・青 (B) の適当な組合せにより表色されることが知られているが、これは (R, G, B) からなる色彩 3 次元空間の点 (あるいはベクトル) として、あらゆる色が表現されることを意味している。色彩の認識・解析は、この色彩 3 次元空間に対して、いかなる演算・処理を行い、いかなる表現を行ってやるかということになると考へてよい。

色彩学的な立場からは、XYZ 値や色彩 3 属性を図式的にうまく表示し、色彩の分布状況を解析しようという試みがあり、その代表的なものが、図 6. のような三角形色度図である。これらは、色彩

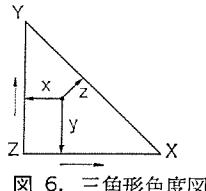
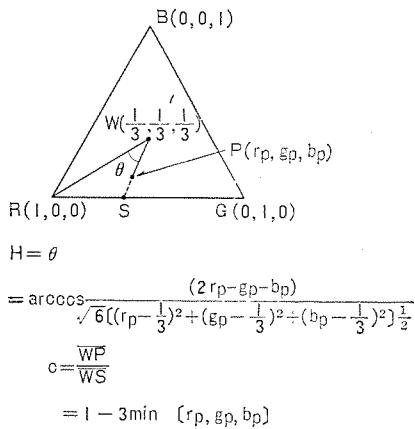


図 6. 三角形色度図

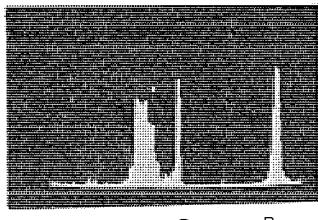


図 8. 色相ヒストグラム

空間をそれぞれに対応する面で切り、射影を取つたものになっている。

ここに示した三角形色度図の場合、明度情報は、白も黒も三角形の中心点に表示されることになり、明度に対する解析が必要となると問題になる。そこで、筆者は多三角形表示法という方法を提案して、色相・彩度とともに明度に関する分布も同時に表示するようにしている。その一例を図 7. に示した。人手によってこのような表示を行わせるのはかなりの労力となるが、計算機によって行わせると考えると、簡単であり、計算機による色彩解析の特徴はこのようなところに現れてくる。また色彩に関する特定のパラメータをもとにして、ヒストグラム表示することも考えられるが、色相を横軸にとって表示する一例を図 8. に示した。

3.3 色差表示法

色差 (Color difference) とその分布の状況が、色彩構造と色彩のバランスを知る上での有効な手段となることもあり、このために各種のものが提案されているが、アダムス空間法による解析法が、簡便かつ有効に使える模様である。その一例を図 9. に示した。

3.4 色彩空間のダイナミック射影

上述してきた色彩の解析表示法は、色彩 3 次元空間を適当な面で射影し、その分布を解析することを目的としている。計算機を用いた图形処理の立場から考えると、色彩图形処理計算機システムのように、图形表示ディスプレーが接続されている場合、色彩空間の射影をパラメータを変えながら、逐次、ディスプレー上に表示して行き、色彩空間上での色彩分布の仕方をダイナミックに見ることができる。色彩空間のダイナミックな射影を見ながら、その際のパラメータを得ることにより、色彩の分離、クラスタリング等を行うこともできる。

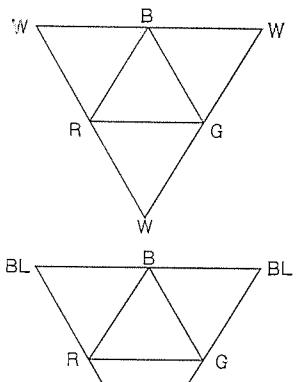


図 7. 多三角形色度図の例

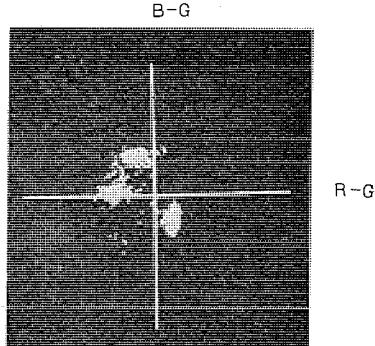


図 9. アダムス空間表示の例

3.5 色彩空間上での演算について

色彩空間の解析を行うことにより、色彩の認識を行うことができるが、色彩空間の上において定義される各種の演算とその意味づけを行うことによって、色彩空間上の演算系を考えることができる。

(1) スカラー演算

色彩に関する各成分 (R, G, B 等) に関するスカラー演算は例えば、 $Y = aR + bG + cB$ のように定義されるが、この例にも見られるように、色彩图形を単色濃淡图形に変換したり、各色成分ごとに濃淡图形として取扱うのがこの場合に当たる。

(2) 色彩ベクトル演算

あらゆる色彩が、色彩空間のベクトルとして表現されることは上述したが、色彩ベクトルに関する四則演算オペレータを次のように考えることができる。

$\underline{x} + \underline{y}$: 色彩ベクトル \underline{x} と \underline{y} の加算

$\underline{x} - \underline{y}$: 色彩ベクトル \underline{x} から \underline{y} の引き算

$\underline{x} \otimes \underline{y}$: 色彩ベクトル \underline{x} と \underline{y} の掛け算

$\underline{x} \div \underline{y}$: 色彩ベクトル \underline{x} と \underline{y} の割り算

これらの演算に対する解釈は、 \underline{x} 及び \underline{y} をスペクトル表現し、それらの物理的意味を考えれば自然に行える。例えば、後述の色彩効果法は、この代数系でも説明でき、また、理論も一般化できることが分かっている。

(3) 色彩空間の変換と演算

色彩空間の表現に XYZ 座標を用いる立場と色彩 3 属性表現のような表現を用いる場合とが考えられるが、前者のほうが直交座標系を用いているのに対して、後者のほうは、数学的には球面座標を用いていることになる。したがって、片方の演算は、他の座標系の演算に変換できる。例えば、色彩に関する微分演算、ラプラシアンといった演算を XYZ 空間及び 3 属性空間で考えることができ、また、直交座標と球面座標の相互変換規則により、他のものの意味づけを一方を基にして与えることもできる。これは雑音フィルタ、細線化、クラスリング等の演算の場合にも拡張され得る。

上述してきたような色彩情報の認識のための解析・表示・演算機能は、計算機による色彩解析をベースとして、システム的にとらえることによって実現化され、応用に結び付くことになる。この点については、次章で言及することにしよう。

4. 色彩图形認識とその応用

色彩情報を有効に利用した图形認識を、上述してきた色彩图形処理計算機システムや色彩情報の認識法をもとにして行う方法とそのためのソフトウェアについて紹介する。まず、色彩情報の解析を行うシステムとして、ミニコンピュータを用いた対話形色彩图形解析表示システムの概要について述べ、その後、色彩を用いた領域同定、カラー航空写真的解析、色彩効果法によるパターン欠陥認識、色彩分離とその応用、対話形图形修正・編集、擬似カラーディスプレーとの応用等について説明しよう。

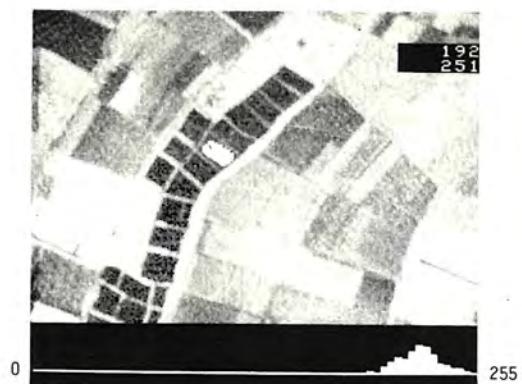
4.1 ミニコンによる対話形色彩图形解析表示システム

色彩图形の色彩解析、前処理、特徴抽出等を対話的に行うためにミニコンピュータを用いてシステム化したのが、対話形色彩图形解析表示システム⁽⁸⁾であって、これは、次のような装置からなる。

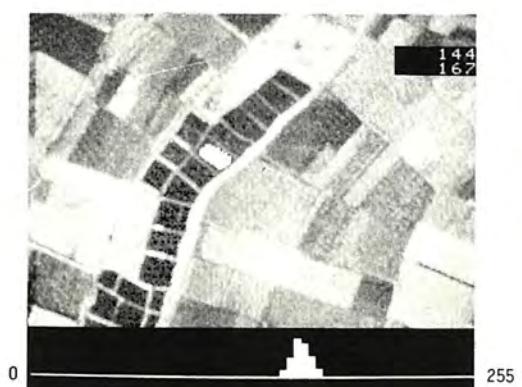
①ミニコンピュータ (PDP-11 又は《MELCOM》70)



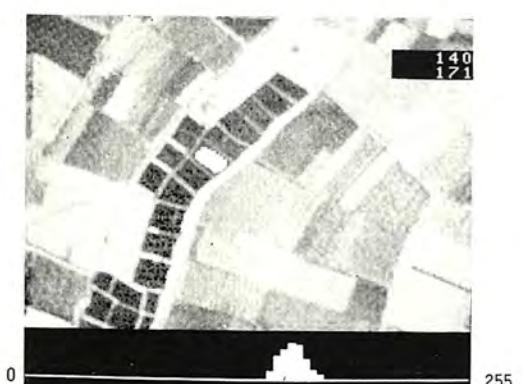
(a) カラー航空写真的例



(b) 赤成分のヒストグラム



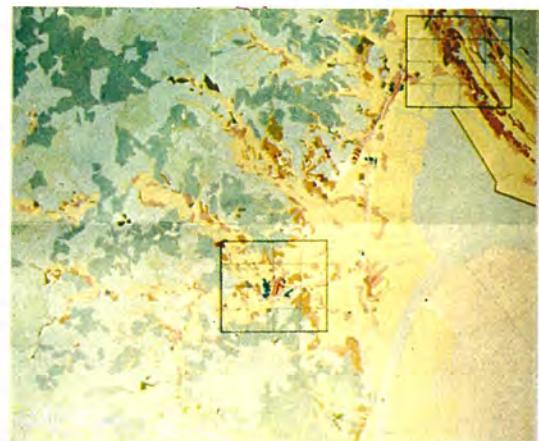
(c) 緑成分のヒストグラム



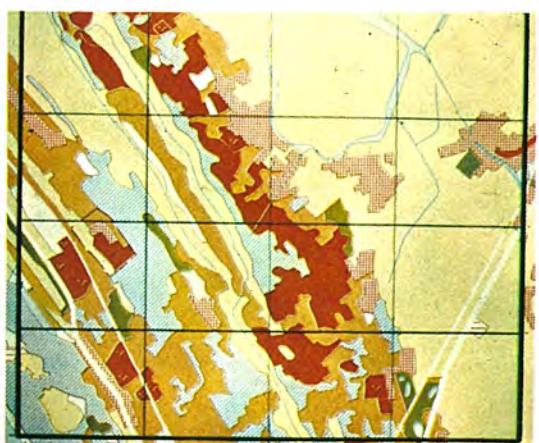
(d) 青成分のヒストグラム



(e) クラス分けの結果（白色部が同じクラス）



(f) カラー土地利用図の例

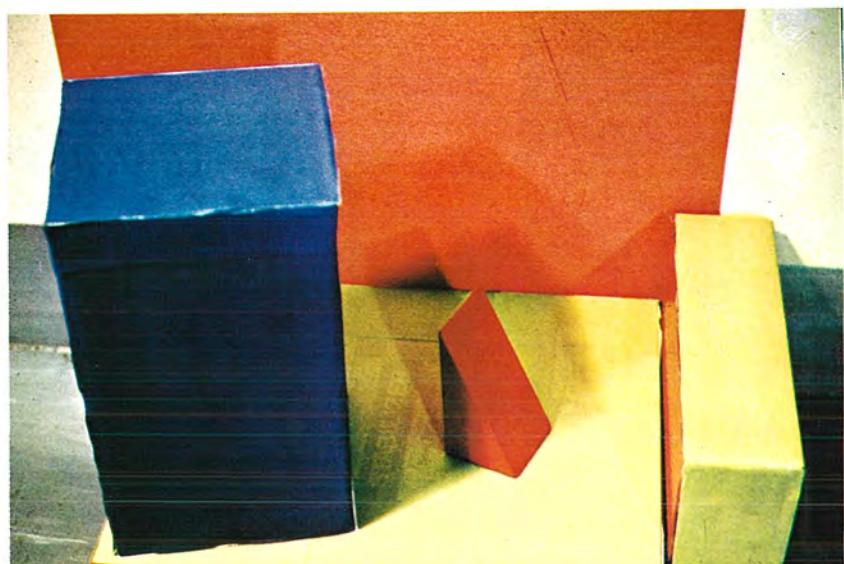


(g) カラー土地利用図の部分拡大図

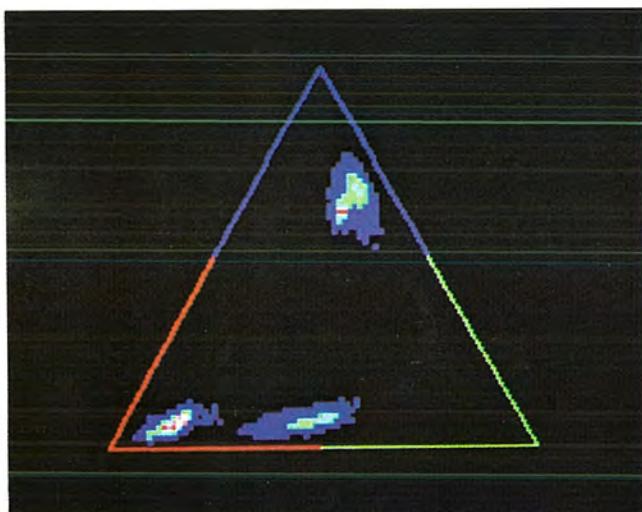


(h) 土地利用図の赤色部の抽出例

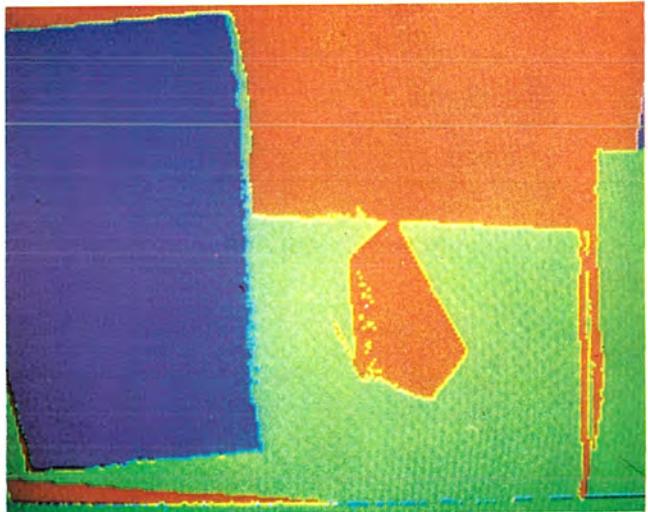
図10. カラー航空写真的解析例



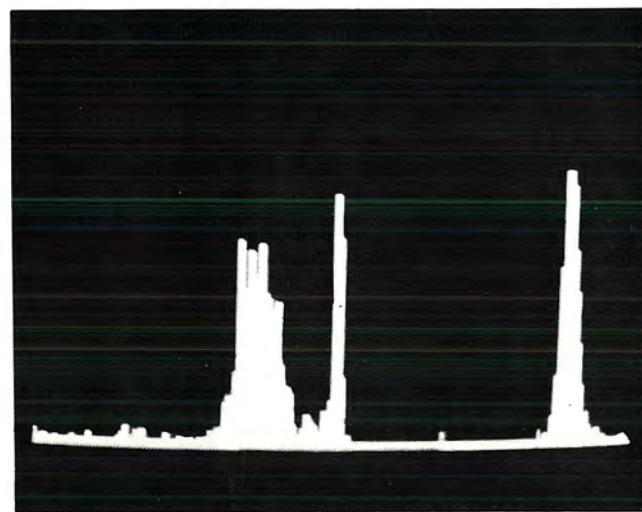
(a) カラー積み木の情景の例



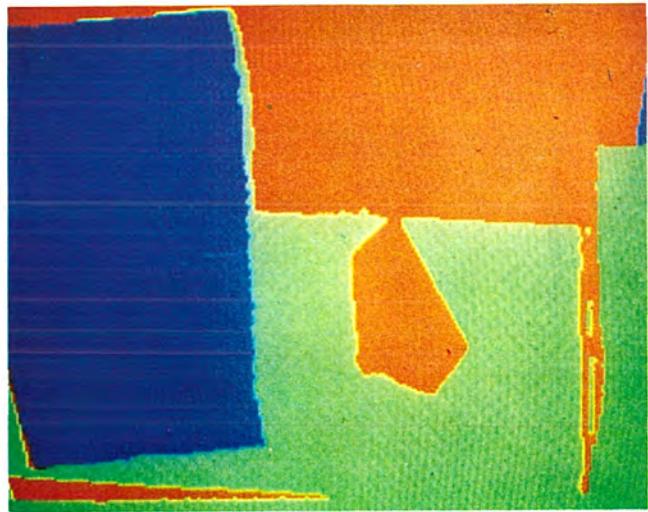
(b) 色彩分布の色度図



(d) 色彩による領域同定



(c) 色相ヒストグラム



(e) ノイズ処理の結果

図 11. 色彩情報を用いた領域同定の例

表 5. 対話形色彩图形解析表示 基本 ソフトウェア

| 基 本 機 能 | ソ フ ト ウ エ ア 名 と そ の 機 能 | | | |
|--------------|------------------------------------|---|---------------------|---|
| 色彩基本量の算出機能 | HSB COMPD | ・色相、彩度、明度を算出 ・特定色彩領域の面積比算出 | TRIT BUNPU | ・正三角形色度図を算出・表示 ・領域内の画素の濃度分布算出 |
| 色彩情報の表示機能 | PSEUD CMONIT | ・濃淡画像の擬似カラー表示 ・オリジナル图形・処理图形の表示 | HIST | ・图形の濃淡値のヒストグラム表示 |
| 图形の演算機能 | SMTHNG LAPL CLRSP MCLUST | ・平滑化 ・単色画面のラブリッシュ ・色相分離 ・指定された距離による最短距離クラスタリング | CLASS GREY | ・指定された濃度分布特性を持つ画素を抽出表示 ・(a, b, c) に対し $aR + bG + cB$ を算出 |
| 色彩图形の入出力記憶機能 | FREAD TVREAD FWRITE LPOUT | ・高性能フィルムリーダ用入力ソフト ・カラー TV カメラ用入力ソフト ・白黒フィルム・ライタ出力ソフト ・ラインプリンタ重ね打ちソフト | TAB PAIR PLOT | ・タブレット指示点の入力 ・タブレットによる任意領域指定 ・XY プロット出力ソフト |
| ディスプレー用機能 | POINT LINE PICT | ・点表示 ・線表示 ・文字、く形などの基本图形表示 | DEL PDEL | ・全面消去 ・部分消去 |

②マルチ ヘッド カラーフィルム リーダ 又は カラー TV カメラ を用いた色彩图形入力システム

③擬似 カラー ディスプレー 及び対話用入力 タブレット

④磁気 ディスク 及び磁気 テープ

⑤ミニコン用標準入出力装置

このシステムの機能は、①入出力制御 プログラム ②擬似 カラー ディスプレー プログラム ③色彩解析・表示 プログラム ④图形 データ 変換・前処理 プログラム ⑤対話的処理制御 プログラム からなる。その基本 プログラム と 処理機能を表 5. に示した。

4.2 カラー航空写真の解析

航空写真や人工衛星からのリモートセンシングによる地表の状況の解析においても、対象の持つ色彩情報を有効に利用することにより、地質・植生や土地利用状況の認識が行われつつある。この場合、色彩の検知に、カラー航空写真方式とマルチバンドスペクトル写真方式がある。マルチバンドスペクトル写真の場合、各バンド単位には、単色濃淡图形になっているのに対し、カラー航空写真の場合には色彩图形になっており、色彩图形認識の直接の対象となる。

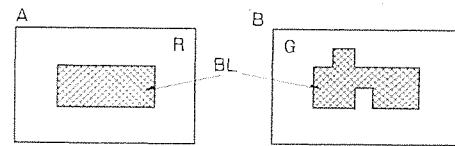
カラー航空写真にも、リアル カラー写真とフォールス カラー写真とがあるが、それぞれ対象・目的に応じて使い分けられている。カラー航空写真の解析については、文献(9)に詳述したので、ここでは、そこで述べた方法を対話形色彩图形解析表示システムを活用しながら、特定の植生地域の認識を行い、領域の同定を行った例を、図 10. に示す。(711ページ参照)

4.3 色彩情報を用いた領域の同定

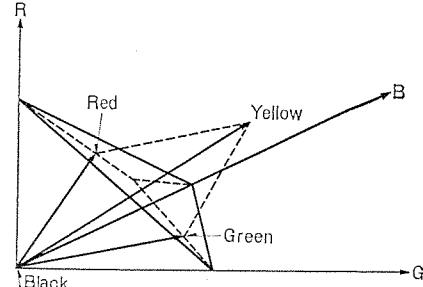
領域の同定を行うことが、3次元景観の認識において重要なことが多い。人が領域の同定を行うときに、色彩情報を有効に用いていることが、かなり多いと考えられるが、これは領域同定への色彩情報利用の有効性を示唆するものである。色彩が着いた積み木の情景のような場合でも、影の問題が発生すると白黒濃淡画像では扱えなくなったり、相当困難な問題となってしまうことが多い。このような時に、景観の色度分布を調べ、クラスタリングの手法を用いて、領域の同定を色相情報を用いて行ってやると効果的な解析が行えることが多い。簡単な積み木の情景を対象として領域の認識を行った一例を図 11. に示した。(712ページ参照)

4.4 色彩効果法によるパターン識別

色彩効果法といふのは、パターンの欠陥認識のために、筆者により考



(a) 色彩効果法の原理説明



(b) 色彩効果法のベクトル表現

案された方法であり、その方法の基本原理を図 12. に示した。

図 12.(a) に見られるように赤(R)と緑(G)の「バックグラウンド」を持つ图形 A, B を光学的に (レジストレーションを取って) 複合したとき、複合图形として C のような图形を得ることになる。このとき A を標準パターン、B を二つ(凸)状傷とおう(凹)状傷を持つサンプルパターンとしたとき、それぞれの傷が、複合图形 C では、赤(R)及び緑(G)に着色することに着目し、欠陥認識を色彩 (R, G) の検出によって行わせようとする方式である。この方式の色彩空間における原理説明を図 12.(b) に示した。色彩効果法は、色彩图形の複合によって人工的に着色する点では、擬似 カラー 表示などと類似しているが、欠陥に対して特定の色彩効果を出し、これを機械的に読み取らせるこことによって、パターン識別を行わせるという点に斬新さがある。この方法は現実のパターン検査にも有効な方法となることが判明してお

り、方式の各種の拡張も行われている。

4.5 色彩図形の対話的修正・色彩分離とその応用

色彩図形を読み取り、色彩や色彩図形の修正をモニタを見ながら対話的に行なうことは、計算機による画像の再生や色彩分離をもとにして図形の修正・編集を行う場合にも有効な手法となり、相当広範な応用分野が存在することが分かっている。このような仕事を行なうには、対話形色彩図形解析表示システムの基本機能に加えて、特に、デジタルフィルムライタを用いた図形の出力機能が望まれ、ソフトウェア的にも、次のような諸機能が具備されることが強く要望される。

①図形の編集

②色彩図形の色分離と色合成

③図形の補間や外そう(挿)による平滑化と情報圧縮

④色彩の除去、シャープニング効果、マスキング

⑤擬似カラー及びナチュラルカラーでのモニタ

⑥特定領域の入力タブレットによる対話的指示と各種濃度パラメータの算出。

これらの諸機能を色彩図形解析表示システムをベースとして、集約することにより、色彩図面の修正、織物パターンのデザインへの応用、印刷分野への各種の応用等が考えられる。

4.6 擬似カラー表示と図形の計量的測度

図形の擬似カラー表示は、上述してきた応用に対して、有効なものであるが、特に、リモートセンシングにおける画像解析や複雑な構造化されたパターンの設計過程において使われている。その際、画素に対する擬似カラーの割当てとその評価が重要となる。リモートセンシングの場合には、数多のケーススタディがあるが、最適な擬似カラーの割当ての仕方は知られていない。また、色彩パターンのデザインの立場からは、画質評価のために、画像に対する計量的測度や図形の美度といったものが望まれることになる。色彩学における美度 β は、色彩調和の立場からは有効に使える場合がある。美度 β は、次のように定義される。

$$\beta = W/Q$$

ここに W は秩序の要素であり、 Q は複雑さの要素である。この量は、色彩学における Moon-Spencer の色彩調和論をもとにして計算される。この種の測度は、理論的立場からは興味深いものであり、今後、情報理論、パターン認識、計算の複雑性に関する理論等を用いて研究が進展せられることが期待される。

5. む す び

色彩図形認識は、パターン認識の分野の中でも、未開拓の新しい分野であり、本文において述べたような本格的な研究開発は、欧米においても例が見られない試みである。色彩図形認識には、高度な認識アルゴリズム、色彩図形入出力装置への要求、応用分野の開拓と実用化への努力等、今後に残された課題が多い。しかし本文において述べてきた事柄は、色彩図形認識の分野的確立の基礎を与えるものであると考えることができよう。文献(14)及び(15)におけるような図形処理ソフトウェアを用いて、複雑な色彩図形処理(色彩線図形認識や色彩テキスチャ解析)への発展があるが、当面の課題としては、本文に述べたアイデアの理論化、はん(汎)用的な色彩図形演算システムの開発、特定分野に対する専用システムの開発等も重要なテーマであると言えよう。

なお、この研究は、通産省大形プロジェクト「パターン情報処理システムの研究開発」の一環として進められたものであり、ご指導・ご協力いただく各位に謝意を表したい。

参 考 文 献

- (1) Duda, R. and Hart, P. : Pattern Classification and Scene Analysis, John Wiley & Sons (1973)
- (2) Ito, T. : Towards color picture processing, Computer Graphics and Image Processing, 2, No. 3 (1973)
- (3) Ito, T. : An algebraic theory of pattern manipulation, Second International Joint Conference on Pattern Recognition (1974)
- (4) Ito, T. : Color picture processing by computer, Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (1975)
- (5) 伊藤：ミニコンピュータ複合体によるパターン情報処理、電気学会全国大会(昭49-3)
- (6) 伊藤：計算機による色彩図形認識の諸問題、電子通信学会、パターン認識と学習研究会資料(昭49-7)
- (7) 伊藤：計算機による色彩図形情報処理、三菱電機技報、48, No. 8 (昭49-8)
- (8) 伊藤、中島：ミニコンピュータを用いた色彩図形解析表示システム、情報化設計(昭49-6)
- (9) 伊藤、中島：カラー航空写真的計算機処理、航空宇宙学会誌(昭50-10)
- (10) 伊藤、福島、秋田：色彩図形解析表示システムとその応用、エレクトロニクス、1974-10 (昭49-10)
- (11) 伊藤、中島、福島、成川：パターン処理システム——色彩図形解析表示システム、三菱電機技報、49, No. 3 (昭50-3)
- (12) 伊藤、福島、中島、深田：計算機による色彩解析とその応用(I)、電子通信学会、パターン認識と学習研究会資料(昭50-6)
- (13) 伊藤、辻、深田、秋田：カラーTVカメラを用いた色彩図形入力システム、テレビジョン学会誌(掲載予定)
- (14) 伊藤、佐藤、深田：DNA電子顕微鏡写真的処理(I)、電子通信学会パターン認識と学習研究会(昭49-3)
- (15) 佐藤、伊藤、深田：DNA電子顕微鏡写真的処理(II)、電子通信学会パターン認識と学習研究会(昭49-10)
- (16) 小磯：色彩の科学、美術出版(昭47)
- (17) 長尾：画像処理のためのソフトウェア、電子通信学会誌、58, No. 1 (昭50-1)
- (18) 長尾、福永：マルチスペクトラル航空写真的解析の試み、電子通信学会パターン認識と学習研究会(昭49-11)
- (19) 坂井：コンピュータネットワークによる画像処理、画像技術、No. 12 (昭49-12)
- (20) 坂井、金出：計算機による色彩画像処理、第4回画像工学シンポジウム(昭48)
- (21) Tenenbaum, J. et al. : ISIS-An interactive scene interpretation system, Second International Joint Conference on Pattern Recognition (1974)
- (22) 谷内田、辻：色の情報を用いた三次元物体の認識、電子通信学会インホメーション理論研究会(昭46-5)

真空スイッチの開閉異常電圧

村井 裕*・高見 紀二*

1. まえがき

真空スイッチは小形、無保守、無火花などの多くの長所を有しているので、最近では3/6kVのモータ回路の制御用として多数使用されている。しかしながら真空スイッチは、従来の気中電磁開閉器と比較してその消弧特性が異なるので、モータのように絶縁に対する余裕が小さい機器に真空スイッチを適用する場合には、開閉サージに関して十分検討しておく必要がある。

この論文では、まず筆者らが行ったモータ回路における開閉サージ発生機構の理論的及び実験的解析について概説し、次に開閉サージからモータを保護するために開発された保護装置《VS リアクトル》とその機能について述べ、最後に《VS リアクトル》により保護されたモータの事故率を検討し、事故率の計算例を示す。

2. 開閉サージの発生

まずここで異常電圧とサージとを区別し、しゃ断後にあらわれる再起電圧で、その波高値の高いものを異常電圧、再起電圧で真空スイッチが発弧したときに発生する急しづらな波頭を有する電圧進行波をサージと呼ぶことにする。

異常電圧の発生原因としては、従来電流きい断現象が問題となっていたが、真空コンタクタの場合には接点材料の改良によってきい断電流が1A以下になり、この問題の重要性は低下している。一方新しく異常電圧の原因として、再起電圧拡大現象^{(1)~(3)}及び三相同時しゃ断現象^{(4)~(6)}が注目されている。以下にこれらについて概説する。

2.1 再起電圧拡大現象⁽¹⁾

真空スイッチでモータ回路をしゃ断した場合、きい断電流が小さくても異常電圧が発生する場合がある。この現象を明らかにするために、第1相しゃ断の場合を想定し、図1.に示す回路を構成して実験を行った。図でまず C_0 を充電し、次に Sh を投入して電流を流す。そこで Sp をしゃ断すると電流は半サイクル後の零点でしゃ断される。しかし Sp の開極時点がしゃ断零点の直前である場合には、しゃ断後の極間耐圧が低いために、再起電圧によって極間が発弧する。図2.は極間が発弧した場合の代表的なオシログラムで、(a)は Sp を流れる電流と極間電圧との関係を、(b)は L_0 を流れる電流と極間電圧との関係を示している。これらのオシログラムから明らかのように、発弧後には Sp を高周波電流が流れるが、この高周波電流は減衰していく過程で Sp によってしゃ断されてしまう。 Sp がしゃ断すると再び再起電圧が上昇し、発弧するという過程がくり返される。さて Sp が高周波電流をしゃ断した時点では、図2.(b)から明らかのように L_0 には電流が流れている。この現象は L_0 の電流を直接きい断するのと等価である。この等価的な電流きい断によって、高周波電流しゃ断後にあらわれる再起電圧が拡大される。したがってこの現象を「等価きい断による再起電圧拡大現象」と称している⁽¹⁾。

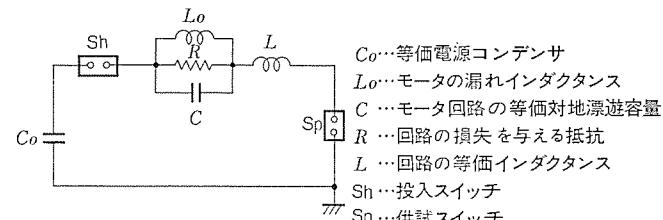


図1. 実験回路のブロック線図

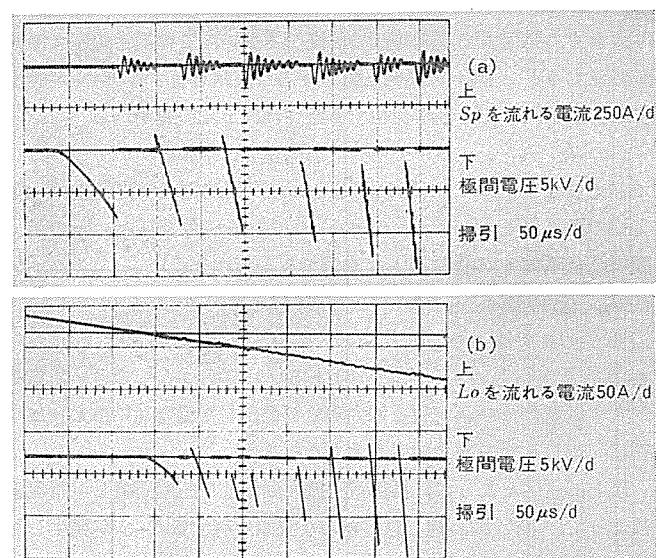


図2. 発弧期間の電流電圧波形

図2.に示すように高周波電流の通電期間がしゃ断期間と比較してかなり長い場合には、拡大された再起電圧の波高値は、次式によって与えられる⁽¹⁾。

$$V_m = 2\pi\sqrt{A/(1+A)} E \sum N_t \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに $A = L/L_0$, E は回復電圧, N_t は i 回目の発弧後に流れる高周波電流のサイクル数である。一般に A の値は 1 と比較してかなり小さいが、 N_t の値は大きくまた加算されるために V_m の値は数万Vに達しうる。そして発弧するたびに、そのときの極間耐圧と等しい波高値と急しづらな波頭を有するサージが発生する。

上記の現象は、一般に電源のサージインピーダンスが低い回路でモータの突流をしゃ断する場合に顕著であり、定常運転時の電流をしゃ断した場合には、異常電圧もそれほど高くならない。

2.2 三相同時しゃ断現象⁽⁴⁾

三相回路ではしゃ断の第1相が発弧したときに、これが原因となって、他の2相が第1相とほとんど同時にしゃ断されてしまう場合があり、この現象を三相同時しゃ断と称している。図3.は三相同時しゃ断の概念図である。最初に電流零点をむかえた第1相がしゃ断した直後に発弧すると、前述のように高周波電流が流れる。このとき他相にも三相ケーブルの導体間の結合により高周波電流が誘導され、負荷電流に重畠する。この電流が図の第2相のように電流零を通過

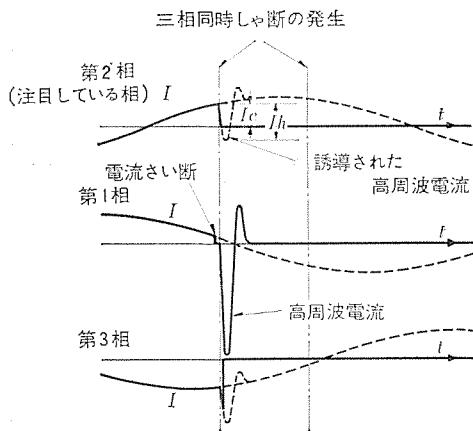


図 3. 三相同時しゃ断現象の概念図

してしゃ断されると、三相がほとんど同時にしゃ断される。三相同時しゃ断が発生すると、図 3 の I_e が等価しゃ断されることになる。 I_e は負荷電流実効値の $\sqrt{3/2}$ 倍であって真空スイッチのしゃ断電流より大きく、発生する異常電圧の波高値も高い。この異常電圧で極間が発弧すると、高い波高値と急しゅんな波頭を有する サージ が発生する。三相同時しゃ断が発生する条件は、上記の説明から

$$I_h > I_e \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

で与えられる。ここに I_h は誘導された高周波電流の波高値で、第 1 相の発弧電圧 V 、ケーブルの サージ インピーダンス Z_c 及びケーブルの導体間の結合係数 γ の関数として次式で与えられる。

$$I_h = \gamma V / Z_c \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

三相ケーブルでは $\gamma \approx 0.5$ 、 $Z_c \approx 30 \sim 40 \Omega$ である。式(2)、(3)から、モータ容量が小さい場合 (I_e が小) あるいは真空スイッチのしゃ断電流が大きい場合及び再起電圧拡大現象が発生した場合 (V が大) には、三相同時しゃ断の発生確率が大きくなる。

以上に述べたように、再起電圧拡大現象及び三相同時しゃ断現象によって、高い波高値と急しゅんな波頭を有する サージ が発生しモータに進入するのでモータ巻線のターン間絶縁が脅かされる。このことは保護装置が必要であることを示唆している。

3. サージ保護装置⁽⁵⁾⁽⁸⁾

モータ保護の方法として、アレスタにより サージ の波高値を制限し、モータの近傍にコンデンサを接続して波頭を緩和する方法⁽⁷⁾、抵抗とコンデンサの直列回路を各相と対地間にそう(挿)入する方法⁽²⁾などが提案されている。しかしこれらの方法は取付空間、経済性の点で問題があると考えられる。

筆者らは上記の点を考慮して、可飽和リアクトルと抵抗から構成された保護装置《VS リアクトル》を開発し、良好な結果を得ている。図 4. は VS リアクトルを装備した真空コンタクタの写真である。以下に VS リアクトルの構成及び機能について述べる。

3.1 《VS リアクトル》の構造

VS リアクトルの構造を図 5. に示す。リアクトルはコアに導体を数ターン巻いて構成され、電流端子以外はモールドされている。コアとしては、発生する サージ が 1 MHz 程度の高周波成分を有するため、周波数特性のよい フェライト が使用されている。コアの断面積は サージ の波頭を所定の値まで緩和することを目的として、次式から決定される。

$$S = V\tau_0 / 2N_t B_s \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここに V は進入 サージ の波高値、 τ_0 は サージ 印加後コアが飽和するまでの時間、 N_t は導体のターン数、 B_s はコアの飽和磁束密度であ

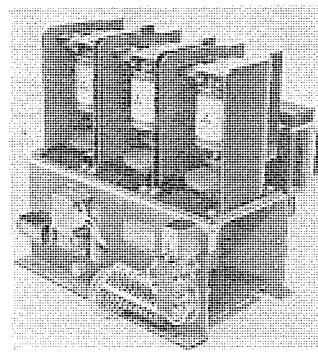


図 4. 《VS リアクトル》を装備した 真空 コンタクタ

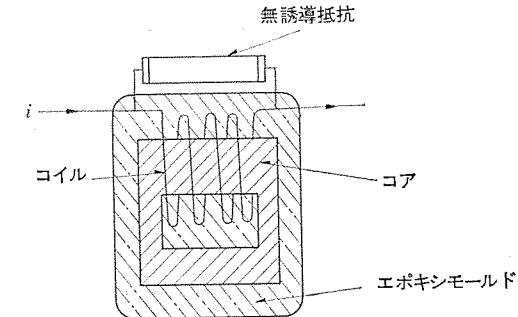


図 5. 《VS リアクトル》の構造

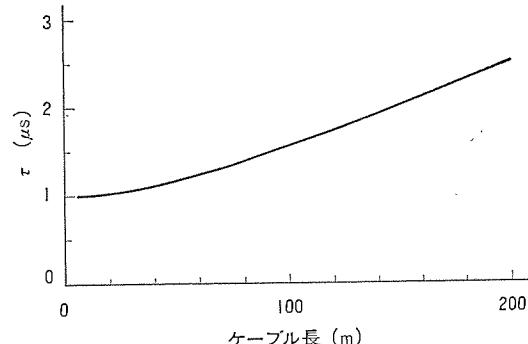


図 6. 波頭長 τ とケーブル 長との関係

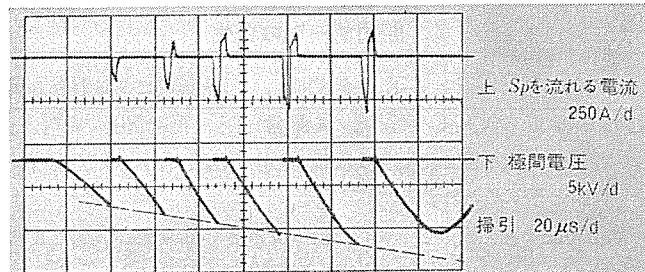


図 7. 《VS リアクトル》による電流電圧の抑制

る。コアが フェライト の場合にはコア内部の損失が小さいので、ケーブルの サージ インピーダンス 程度の値を有する抵抗が並列に接続される。なお負荷電流に対しては、コアが飽和するため、VS リアクトルによる電圧降下は無視できる程小さい。

3.2 《VS リアクトル》の機能

3.2.1 サージ波頭の緩和

この機能を調べるために、立上がり $0.2 \mu s$ の サージ を VS リアクトルを介してケーブルに印加し、ケーブルの開放端の電圧を観測した。ケーブルの他端が開放されているのは、ケーブルの サージ インピーダンス が モータのそれと比較して十分小さいからである。観測された電圧波形から、VS リアクトルによって緩和された波頭長 τ とケーブル長との関係を求めるに図 6. のようになる。VS リアクトルのこの機能は、後述するようにモータ巻線のターン間に印加される電圧を低下させ、ターン間絶縁の劣化の防止に有効である。

3.2.2 高周波電流の抑制

VS リアクトルを図 1. の Sp と L の間にそう入り、 Sp の電流と極間電圧波形を観測した。図 7. に代表的なオシログラムを示す。この波形と図 2.(a) の波形とを比較すれば明らかのように、高周波電流は 1 サイクル以内で減衰してしゃ断されるとともに、再起電圧の上昇率も抑制されている。これは式(1)の N_t が常に 1 となることを意味しており、したがって高周波しゃ断後の再起電圧波高値が低下して拡大現象が抑制されるという効果を有する。

更に重要な効果は真空スイッチの高周波電流しゃ断に関する不確定要素を排除し、発弧現象を明確にすることである。その結果発弧のくり返し回数がさい断電流 I_c と発弧電圧 V の関数として求められ、近似的に次式によって与えられる⁽⁵⁾。

$$n(V, I_c) = \begin{cases} \frac{\psi^2}{1-\psi^2} \ln \left[1 + \frac{(1-\psi^2)(Z_0 I_c)^2}{(E-V)^2 - (\psi E)^2} \right], & V \leq V_m \\ 0, & V > V_m \end{cases} \quad (5)$$

ここで ψ は再起電圧の第1ピークまでの減衰率、 Z_0 はモータのサージインピーダンス、 V_m は再起電圧の波高値である。このように発弧の回数を把握できることによって、後述するようにターン間絶縁のサージによる劣化を定量的に解析することが可能になる。

4. サージの統計的分布⁽⁵⁾

負荷電流が I_c でさい断された場合に発生する再起電圧の波高値は次式であらわされる。

$$V_m = E + \psi \sqrt{E^2 + (Z_0 I_c)^2} \quad (6)$$

ここに回復電圧 E は定格電流しゃ断の場合にはほとんど零であり、突流しゃ断の場合には有限の値となる。もし V_m の値が極間耐圧をこえると、発弧してサージが発生する。図8.は開極と再起電圧との関係を示しており、開極が電流さい断前の V_m/k の範囲にあれば発弧が起こる。ここに k は開極に伴う極間耐圧の上昇速度である。 V_m/k の値は、通常 V_m は 10 kV、 k は 10 V/μs のオーダであるから、商用周波の半周期と比較して十分小さい。したがって開極がランダムであると考えて、1相の発弧確率 ϕ を求めると次のようになる。

$$\phi = (V_m/k) / (1/2 f) \quad (7)$$

式(7)を V_m で微分し、発弧電圧の増分 dV に対する発弧確率の増分 $d\phi$ を求めると次のようになる。

$$d\phi = (2 f/k) dV \quad (8)$$

次にさい断電流の確率密度関数 $\phi(I_c)$ を導入し、式(5)で与えられる発弧回数 $n(V, I_c)$ を使用すれば、1相1しゃ断当たりのサージ発生回数の増分 dn_1 は次式のようになる。

$$dn_1 = (2 f/k) n(V, I_c) \phi(I_c) dV dI_c \quad (9)$$

三相同時しゃ断については、一般に第1相と第2相の開極時点は必ずしも一致しないので、これを極間耐圧で表現し、第2相の発弧電圧 V と第1相の発弧電圧 V_1 の関係をあらわす確率密度関数 $g(V, V_1)$ を導入する。この場合のサージ発生回数の増分 dn_2 は

$$dn_2 = 2 \times (2 f/k) n(V, I_c) g(V, V_1) \phi(I_c) \times dV dV_1 dI_c \quad (10)$$

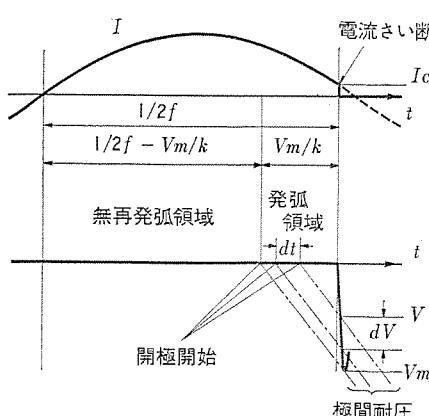


図8. 極間耐圧の回復と再起電圧

となる。係数2は第2相の半周期の間に三相同時しゃ断の可能性がある瞬間が2回存在することに対応している(図3.参照)。また $n(V, I_c)$ は式(5)で I_c に I_e を代入して求められる。

結局、式(9)、(10)から1相1しゃ断当たりのサージ発生回数の増分 dn_t は次のようになる。

$$dn_t = dn_1 + dn_2 \quad (11)$$

なおモータの端子に印加される電圧 V_a は、ケーブルのモータ端におけるサージの反射のために、発弧電圧 V の2倍になる。すなわち

$$V_a = 2V \quad (12)$$

5. サージに対するモータの寿命

以上でモータの端子に印加されるサージ電圧の波高値と発生回数及び波頭しゅん度が求められたので、以下ではサージ電圧のモータ巻線内の分布を考察し、サージによるターン間絶縁の劣化について検討を加える。

5.1 モータ巻線内電圧分布

モータ巻線内の電圧分布をコイル間の分布とコイルのターン間の分布に分けて表現する。ターン間の分布はターン間の漂遊容量が大きいために、通常あらわれる最も急しゅんな波頭を有するサージに対しても一様である。これに対してコイル間の分布はサージの波頭しゅん度に依存する。図9.は端子に近いコイルに印加される電圧の進入サージの波高値に対する比 β の実験値を波頭長 τ の関数として示している。図から波頭しゅん度を緩和すると、コイルに印加される電圧が低下してターン間電圧が低下することは明らかである。なお図の実線は以後の計算に使用した値を示している。以上の説明から巻線のターン間に印加される電圧 v は

$$v = \beta V_a N_a / N_c \quad (13)$$

で与えられる。ここに N_a はコイル内の隣接した導体間の最大ターン数、 N_c は1コイルの全ターン数である。

5.2 サージによる絶縁の劣化

式(13)で与えられる電圧がターン間にくり返し印加された場合の絶縁の劣化は、ターン間絶縁の v - N 特性から求められる。ターン間絶縁の v - N 特性は、実験的に同一波高値の標準インパルス波形を、絶縁が破壊するまでくり返し印加し、電圧の波高値と破壊までのくり返し回数で表現される。

しかしながら、この論文で取扱うサージはその波高値が統計的に分布しているため、上記の方法で得られた結果をそのまま利用することはできない。そこで絶縁の劣化は、ある電圧 v の印加回数に比例するものと仮定して次の重み関数を導入する。

$$r(v) = N/N_0 \quad (14)$$

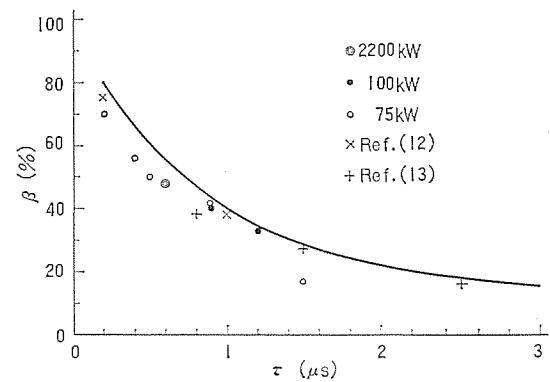


図9. 波頭長 τ と β の関係

ここに N_0 及び N はそれぞれ規準とする ターン 間電圧 v_0 及びある与えられた ターン 間電圧 v に対する破壊までの印加回数である。
 $r(v)$ を用いると任意の電圧 v の サージ の印加回数 n を電圧 v_0 の サージ の等価な印加回数 n_0 に変換できる。すなわち

したがって式(12), (13), (15)を使用すれば、式(9)及び(10)で与えられたサージの印加回数は、電圧 v_0 における等価な印加回数 dn'_1 及び dn'_2 に変換される。

$$dn_1' = (2 f/k) n(V, I_C) \varphi(I_C) r(2 \beta V N_a/N_c) dV dI_C \quad \dots \dots \quad (16)$$

$$dn'_2 = (4 f/k) n(V, I_e) g(V, V_1) \varphi(I_C) r(2 \beta V N_a / N_c) \times dV dV_1 dI_C \dots \dots \dots \quad (17)$$

式(16)及び式(17)を積分すれば、1相1しゃ断当たりに印加される電圧 v_0 の サージ の等価回数が求められる。すなわち

$$\begin{aligned}
n_{t'}' = & \frac{2f}{k} \int_0^\infty \int_0^{V_{\text{lim}}} n(V, I_C) \varphi(I_C) r(2 \beta V N_a / N_c) dV dI_C \\
& + \frac{4f}{k} \int_0^\infty \int_{V_c}^{V_{\text{lim}}} \int_0^{V_{\text{lim}}} n(V, I_a) g(V, V_1) \varphi(I_C) \\
& \times r(2 \beta V N_a / N_c) dV dV_1 dI_C \quad \dots \dots \dots (18)
\end{aligned}$$

ここで V 及び V_1 の積分の上限は真空スイッチの耐圧で制限される。もしアレスタが真空スイッチの近傍に接続されている場合には、アレスタの放電電圧で制限される。 V_1 の積分の下限 V_c は三相同時しや断が起こる最低の発弧電圧で定まり、VS リアクトルが接続されていると高周波抵抗は最低で 5 倍になるので、式(2), (3)から

以上で n'_t が求められたので、 v_0 における N_0 との比 $P_t = n'_t/N_0$ を求めると、これは 1 回のしゃ断に対する モータの事故確率をあらわしている。

5.3 数值計算例

P_t の計算を行うために次の仮定をおく。

(1) $\phi(J_c)$ は平均値 μ_i 、標準偏差 σ_i の正規分布である。数種の接点材料について実験を行い正規分布に近い分布を得ている。

(2) $g(V, V_1)$ は平均値 V_1 、標準偏差 σ_v の正規分布である。一般に真空開閉器の製造過程では、三相の開極時点が一致するよう調整されるので、この仮定は妥当なものと考えられる。

(3) ターン間絶縁の $v-N$ 特性を次式で与える⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

$$v - v_s = cN^{-m} \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

ここで v_s は劣化を起こす最低電圧, c 及び m は絶縁物の材料及び構造で定まる定数である。この場合式(14)の $r(v)$ は

となる。

上記のほかに、再起電圧の振幅率はケーブル長の増加とともに 1.6 ~1.8 に変化するものと仮定し、またモータのサージインピーダンスは回路電圧、kVA 容量、極数の関数として与えている⁽¹¹⁾。

図 10. は 3.3 kV のモータについて行った計算例を示したもので、ケーブル長 30 m, $\sigma_v = 6 \text{ kV}$, $v_s = 1 \text{ kV}$, $m = 0.15$, $v_0 = 3 \text{ kV}$, $N_0 = 10^4$, $\psi = 0.8$ (定格電流しゃ断) 及び 0.5 (突流しゃ断), $\beta = 0.4$, $f = 60 \text{ Hz}$, $k = 20 \text{ V}/\mu\text{s}$, $N_c/N_a = 6$ としている。図 10. の (a) は真空コンタクタの例として $\mu_i = 0.4 \text{ A}$, $\sigma_i = 0.15$, (b) は真空しゃ断器の例として

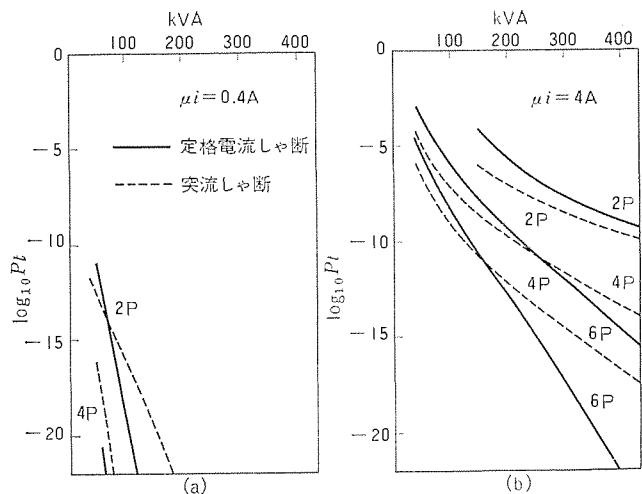


図 10. 3.3 kV モータの事故率計算例

$\mu_i = 4 \text{ A}$, $\sigma_i = 1 \text{ A}$, $V \lim = 14 \text{ kV}$ とした。図から P_t の値は平均さ
い断電流値に大きく依存しており、真空コンタクタの場合には、VS
リアクトルが接続されていれば発弧がほとんどモータの絶縁に影響を及
ぼさないことが分かる。一方真空しゃ断器の場合には、例えば2極
モータで 350 kVA 以下では P_t が 10^{-8} をこえる。 10^{-8} は 10^4 台のモ
ータを 10^4 回閉開すれば 1 台が事故を起こすことを意味している。
この値が許容できるか否かはモータの制御系の設計方針との関連で
定まるが、もしこの値が許容できない場合には C-R アブソーバなどの
保護装置が必要となる。C-R アブソーバは式(6)の ψ 及び Z_0 を低下
させ再起電圧を抑制するので有効である。

筆者らは与えられた回路条件に対して、上記の計算を行い保護システムを決定している。現在この方法を適用して約4年になるが1台の事故もなく良好な結果を得ている。

最後に、この研究の推進にご協力いただいた当社真空スイッチサージ対策委員会の方々に深謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) T. Itoh et al. : IEEE Trans. PAS-91, No. 5, 1897 (1972)
 - (2) M. Murano et al. : IEEE Trans. PAS-93, No. 1, 264 (1974)
 - (3) 黒沢, 菅原: 電気学会全国大会 No. 909 (昭 47)
 - (4) 村井ほか: 電気学会全国大会 No. 1126 (昭 48)
 - (5) Y. Murai et al. : IEEE Trans. PAS-93, No. 5, 1472 (1974)
 - (6) M. Murano et al. : IEEE Trans. PAS-93, No. 1, 272 (1974)
 - (7) A. N. Greenwood et al. : IEEE Trans. PAS-90, No. 4, 1589 (1971)
 - (8) 岡田ほか: 誘導電動機における開閉 サージ 問題と 真空開閉器 の適用, 三菱電機技報, 45, No. 12, 1650 (昭 46)
 - (9) S. Zoiedyewski and S. Soan : IEEE Trans. EI-1, No. 2, 84 (1972)
 - (10) B. R. Haywood : IEEE Trans. EI-3, No. 2, 47 (1968)
 - (11) F. X. Forstmaier : IEEE Trans. IGA-1, No. 5, 349 (1965)
 - (12) K. A. Christianen and A. Pedersen : IEEE 68 C 6-EI-87 (1968)
 - (13) AIEE Committee Report, AIEE Trans. 79, Pt III, 182 (1960)

三軸制御中高度衛星の姿勢制御

今度史昭*・土屋和雄*・斎藤春雄*

1. まえがき

近時要求される衛星機能の高度化に伴って、実用化される三軸制御衛星の数が急増している。デュアルスピニ衛星に対する三軸制御衛星の主な特長は次の点にある。すなわち大きな太陽電池パネルを展開できるから大電力を得ることができること、また大きなロータを必要としないから静止部分のスペースが大きくかつ姿勢精度が良いことである。こうした利点を踏まえて最近に至り日本においても三軸制御衛星の打上げがいくつか計画されるようになった。

三軸制御衛星を大別すると衛星固定素子としてのモーメンタムホイルを有するバイアスモーメンタム方式と、これを有しないゼロモーメンタム方式とがあり、前者は精度と機構の上で問題の多いヨーセンサを必要とせず、かつ後者に比べて構造的に単純で信頼性が高いなどの利点がある。一方その欠点としては、バイアスモーメンタム形の衛星はデュアルスピニ衛星と同様にニューテーションの制御が必要となり、また赤道軌道の場合以外は軌道面後退による姿勢変化の補正を行わなければならぬ。

著者たちは衛星に一定の磁気モーメントを与えておくことにより軌道面後退の影響が相殺できることに注目し、このための磁気トルカとオフセットスラスターを組合せた中高度衛星のための姿勢制御方式の研究を行ってきた。根軌跡法による解析とデジタル計算機によるシミュレーションのもとに詳しい検討を行った結果は、軌道面後退の影響は衛星に一定の磁気モーメントを与えておくことによりほぼ完全に相殺され、かつ軌道周期が比較的短いためこの方式によればヨー精度はほぼロールと同じくらい良好に保たれること、姿勢修正用の燃料消費もごく少量で十分長い寿命を保てることが判明した。本稿は高度1,000 km、傾角45°の円軌道上にある地球指向形三軸制御衛星を例にとり、この方式によるロール/ヨー制御系の設計と解析についてその概要を述べたものである。

2. 座標系と運動方程式

図1において \bar{i}_I , \bar{j}_I , \bar{k}_I は慣性座標系 $X_I-Y_I-Z_I$ の単位ベクトルで、 \bar{i}_I は春分点方向、 \bar{j}_I はこれと直交して赤道面上にあり、 \bar{k}_I は地軸と一致する。また \bar{i}_o' , \bar{j}_o' , \bar{k}_o' は軌道面に固定された座標系 $X_o'-Y_o'-Z_o'$ の単位ベクトルで、 \bar{i}_o' は軌道の昇交点方向、 \bar{j}_o' は \bar{i}_o' と直交して軌道面内にあり、 \bar{k}_o' は軌道面に直交している。図中 \bar{k}_M は地球に固定された地磁気ダイポールの負方向に向かう単位ベクトルで、地軸 \bar{k}_I と $\delta=11.4^\circ$ の傾きをなす。衛星軌道面は赤道面と θ_I の傾角を有し、また \bar{i}_o' と \bar{i}_I のなす角を η とする。軌道の近地点及び衛星の近点離角はそれぞれ \bar{i}_o' からの角度 ω_P , η で表される。

衛星位置よりそれぞれ軌道進行方向、軌道面直交下方、地球中心方向に $X_O-Y_O-Z_O$ 軸をとり軌道座標系と呼ぶ。各軸方向の単位ベクトルをそれぞれ \bar{i}_o , \bar{j}_o , \bar{k}_o とする。一方、図2に示されるよう衛星に固定された座標系 $X_B-Y_B-Z_B$ を衛星座標系とよび、各

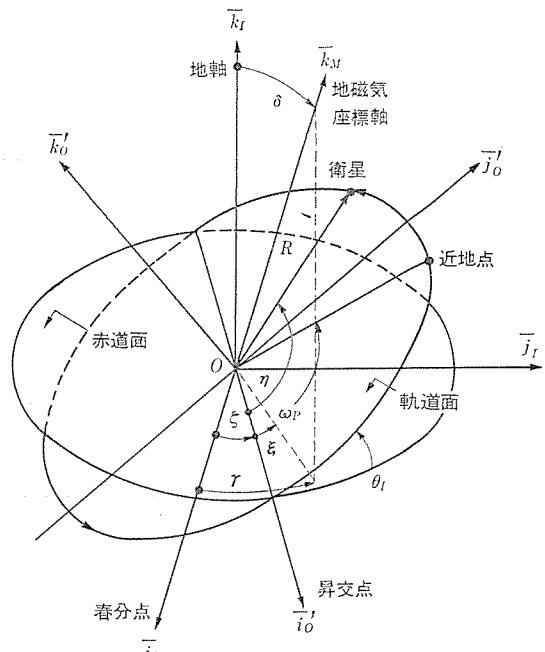


図1. 衛星位置と座標系

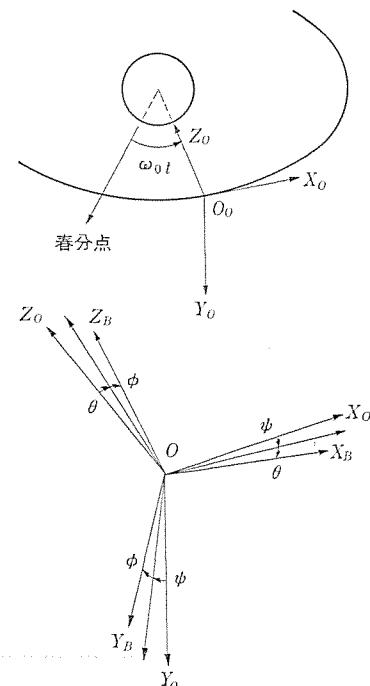


図2. 軌道座標系と衛星座標系

軸方向の単位ベクトルをそれぞれ \bar{i}_B , \bar{j}_B , \bar{k}_B とする。 X_B 軸, Y_B 軸, Z_B 軸はそれぞれロール軸, ピッヂ軸, ヨー軸と呼ばれる。この座標系は軌道座標系を Z , Y , X 軸まわりに順次 ψ (ヨー角), θ (ピッヂ角), ϕ (ロール角)ずつ回転して得られる。衛星の有する角速度の衛星座標系における各軸まわりの成分をそれぞれ ω_x , ω_y , ω_z とすれば、衛

星の運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} I_x \dot{\omega}_x &= (I_y - I_z) \omega_x \omega_z - H_B \omega_z + T_{cx} + T_{dx} \\ I_y \dot{\omega}_y &= (I_z - I_x) \omega_x \omega_z + T_{cy} + T_{dy} \\ I_z \dot{\omega}_z &= (I_x - I_y) \omega_x \omega_y + H_B \omega_x + T_{cz} + T_{dz} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで I_x, I_y, I_z は衛星の各軸まわりの慣性モーメント, T_{cx}, T_{dx} 等はそれぞれ各軸まわりの制御トルク, 外乱トルクであり, H_B は衛星固定ホイールの有するピッチ軸方向の角運動量の大きさである。衛星の角速度とオイラーアングルの関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin \theta - \omega_0 \sin \psi \cos \theta + \dot{\zeta} \sin \theta_I \cos \eta \\ \omega_y &= \dot{\theta} \cos \phi + \dot{\psi} \cos \theta \sin \phi - \omega_0 (\sin \psi \sin \theta \sin \phi \\ &+ \cos \psi \cos \phi) - \dot{\zeta} \cos \theta_I \\ \omega_z &= -\dot{\theta} \sin \phi + \dot{\psi} \cos \theta \cos \phi - \omega_0 (\sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ &- \cos \psi \sin \phi) - \dot{\zeta} \sin \theta_I \sin \eta \end{aligned} \quad (2)$$

ここで ω_0 は衛星の軌道角速度である。

本稿で扱う正規モードにおいては $\phi, \theta, \psi, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ はいずれも微小とする。式(2)を微分したものを式(2)とともに式(1)に代入し、微小量の高次項を省略するとピッチのカッピングは無視できて次のオーラルヨー方程式を得る。

$$\begin{aligned} I_x \ddot{\phi} + \omega_0 [H_B - \omega_0 (I_y - I_z)] \phi + [H_B - \omega_0 (I_x - I_y + I_z)] \dot{\psi} \\ = T_{cx} + T_{dx} + T_{dx,n} \\ I_z \ddot{\psi} + \omega_0 [H_B - \omega_0 (I_x - I_y)] \psi - [H_B - \omega_0 (I_x - I_y + I_z)] \dot{\phi} \\ = T_{cz} + T_{dz} + T_{dz,n} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで $T_{dx,n}, T_{dz,n}$ は軌道面後退のため衛星座標系が回転することによる見かけの外乱項で、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} T_{dx,n} &= \dot{\zeta} [\omega_0 (I_x + I_y - I_z) + H_B] \sin \theta_I \sin \eta \\ T_{dz,n} &= \dot{\zeta} [\omega_0 (-I_x + I_y + I_z) + H_B] \sin \theta_I \cos \eta \end{aligned} \quad (4)$$

衛星が軌道上で受ける外乱としては空気力、太陽ふく(輻)射圧、残留磁気によるもの、重力傾度トルク等があるが、中高度軌道において主として問題になるのは残留磁気モーメントによるものである。制御用の磁気トルク及び残留磁気モーメントにより衛星に働くトルクの定式を3章で導く。

3. 磁気トルクの定式

地磁気をダイポールモデルで近似した場合、衛星位置における地磁気ベクトル \bar{B} は次式で表すことができる⁽¹⁾。

$$\bar{B} = (M_e/R^3) [\bar{K}_M - 3(\bar{K}_x \cdot \bar{K}_y) \bar{K}_x] \quad (5)$$

ここで R は軌道半径、 M_e は地磁気ダイポールの大きさ (8.06×10^{25} e. m. u.) である。

$$D_M = M_e/R^3 \quad (6)$$

とおき、式(5)を軌道座標系の成分で表すと次のようになる。

$$\begin{aligned} B_{01} &= D_M [-\sin \delta \cos \xi \sin \eta + (\sin \delta \sin \xi \cos \theta_I \\ &+ \cos \delta \sin \theta_I) \cos \eta] \\ B_{02} &= D_M (\sin \delta \sin \xi \sin \theta_I - \cos \delta \cos \theta_I) \\ B_{03} &= 2 D_M [\sin \delta \cos \xi \cos \eta + (\sin \delta \sin \xi \cos \theta_I \\ &+ \cos \delta \sin \theta_I) \sin \eta] \end{aligned} \quad (7)$$

また式(7)を座標変換して衛星座標系の成分で表すと次のようになる。

$$\begin{aligned} B_{B1} &= D_M (\cos \theta \cos \psi B_{01} + \cos \theta \sin \psi B_{02} - \sin \theta B_{03}) \\ B_{B2} &= D_M (-\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi) B_{01} \\ &+ (\cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi) B_{02} + \sin \phi \cos \theta B_{03} \\ B_{B3} &= D_M [\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi] B_{01} \\ &+ (-\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi) B_{02} \end{aligned}$$

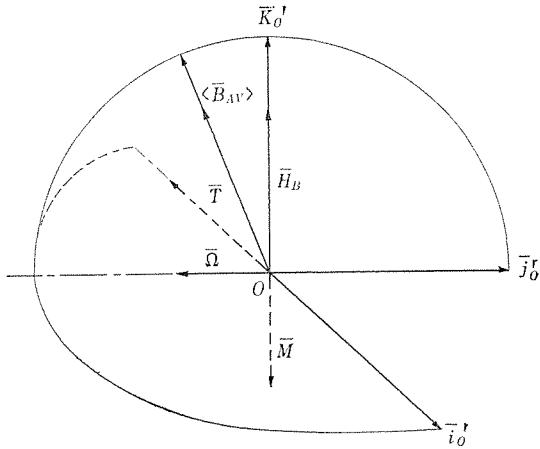


図 3. 磁気トルクによるプリセッション

$$+ \cos \phi \cos \theta B_{03}] \quad (8)$$

衛星の有する全磁気モーメントを \bar{M} とすれば、地磁気との干渉により衛星に働くトルク \bar{T}_M は次のように表される。

$$\bar{T}_M = \bar{M} \times \bar{B} \quad (9)$$

よって \bar{M} の衛星座標系における各軸方向の成分をそれぞれ K_1, K_2, K_3 とすれば、式(3)右辺 T_{dx}, T_{dz} のうち磁気トルクによる成分 $T_{dx,m}, T_{dz,m}$ はそれぞれ次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} T_{dx,m} &= K_2 B_{B3} - K_3 B_{B2} \\ T_{dz,m} &= K_1 B_{B2} - K_2 B_{B1} \end{aligned} \quad (10)$$

次に軌道面後退による外乱項を相殺するのに必要な磁気モーメントの大きさを計算する。今地磁気ダイポールの傾き $\delta = 0$ とした簡単化モデルを用いると、これを軌道1周につき平均して得られる平均地磁気 $\langle \bar{B}_{AV} \rangle$ の方向は次のように表すことができる。

$$\langle \bar{B}_{AV} \rangle = D_M (-\sin \theta_I/2 \bar{j}_o' + \cos \theta_I \bar{K}_o') \quad (11)$$

地球捕捉終了後の正規モードにおいては衛星のピッチ軸はほぼ $-\bar{K}_o'$ 軸に一致しているので、ピッチ軸の正方向に磁気モーメントを与えると図3に示すように式(9)、式(11)より $-\bar{j}_o'$ 軸方向のトルク \bar{T}_M を生じ、これが $-\bar{j}_o'$ 軸まわりのプリセッション $\bar{\Omega}$ をもたらして軌道面後退の影響を相殺する。このために必要な磁気モーメントの大きさは次のようにして計算できる。

今、軌道長半径を a 、離心率を e 、地球の赤道半径を a_e とすれば軌道面の回転速度は次式で与えられる。

$$\dot{\zeta} = -\frac{10}{(1-e^2)^2} \left(\frac{a_e}{a} \right)^{3.5} \cos \theta_I \text{ (deg/d)} \quad (12)$$

モデルとした軌道(高度 1,000 km、傾角 45°)の場合この値はおよそ $-5 \times 10^{-5} \text{ deg/s}$ で、これによる \bar{K}_o' 軸の変化率は \bar{j}_o' 軸まわりに $-\dot{\zeta} \sin \theta_I$ となるから

$$(-5 \times 10^{-5}) \times (-\sin 45^\circ) \cong 3.5 \times 10^{-5} \text{ (deg/s)} \quad (13)$$

一方式(6)で与えられる D_M は 0.201 gauss となり、ピッチ軸($-\bar{K}_o'$ 方向)に 1 ATm² の磁気モーメントを発生させたとき生じるトルクは式(9)を用いて計算すれば \bar{j}_o' 軸まわりに $-0.07 \text{ g} \cdot \text{cm}$ となる。一般に角運動量を有する物体に働くトルクとプリセッションの間には次の関係が成り立つ。

$$\bar{\Omega} \times \bar{H}_B = \bar{T}_M \quad (14)$$

したがって今衛星の有する角運動量を 9.5 N·ms とする、これにより \bar{j}_o' 軸まわりに生じるプリセッション $\bar{\Omega}$ の大きさは式(14)より $(-0.07 \times 980)/(9.5 \times 10^{-7}) \times 57.3 \cong -4.2 \times 10^{-5} \text{ (deg/s)}$ である。

式(13), 式(15)を用いて

$$(3.5 \times 10^{-5}) / (4.2 \times 10^{-5}) \cong 0.84 \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

すなわち 0.84 ATm^2 の一定の磁気モーメントをピッチ軸方向に与えておけば、軌道面後退の影響はほぼ相殺できることになる。

4. 線形解析による制御系パラメータの検討

図4にモデルとしたオフセットスラスタを有する三軸制御衛星の概念図を示す。式(3)を満たす衛星の運動は自由運動として、短周期的ニ

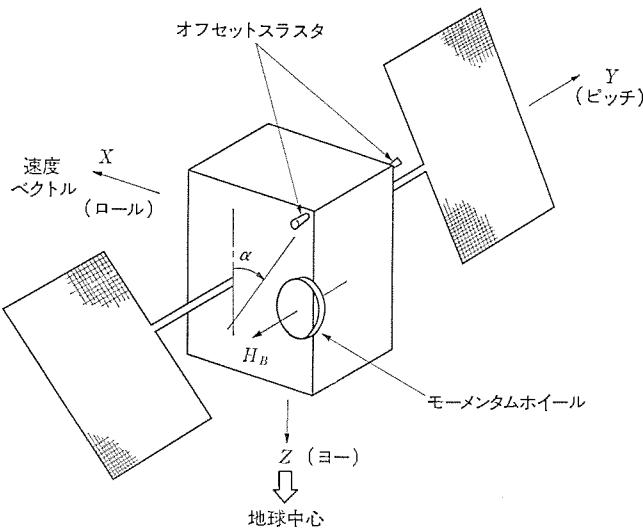


図4. 衛星固定 モーメンタムホイール：オフセットスラスタ制御

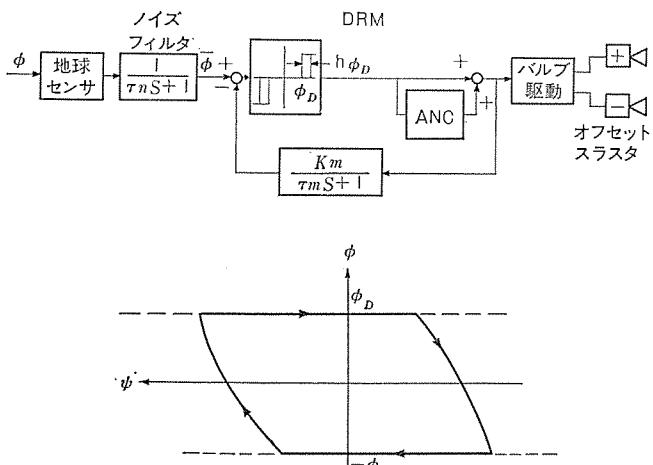


図5. オフセットスラスタ制御系とそのリミットサイクル

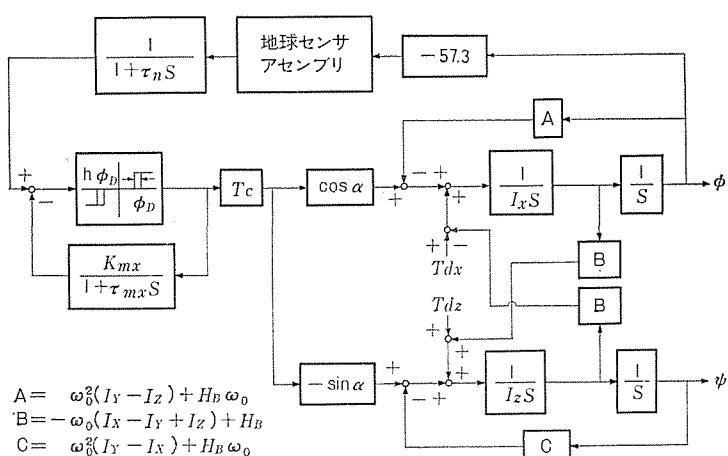


図6. ロール／ヨー制御系ブロック図

ューテーション運動と、軌道角速度による長周期的ロールヨー変換運動、及び強制運動としての制御トルク及び外乱トルクによるプリセッショングの重ね合わせとして表される。図5にオフセットスラスタ制御系の機構とそのリミットサイクルを示す。オフセットスラスタの役割は衛星のロール誤差が不感帯土角を超えるとスラスタを吹かし、これを不感帯の内部に押しもどすと同時にANC(アクティブニューテーションコントロール)ロジックにより、第1のスラスタパルスの一定時間後第2のスラスタパルスを与えてニューテーションを減衰させる。このとき図に示すようにバルブ駆動信号を1次遅れを通してフィードバックすることにより疑似微分項を導入でき、制御系に安定性を与えることができる。この機構はドライブドレーモジュレータと呼ばれる⁽³⁾。

ニューテーションを無視した場合の衛星の運動(すなわち角運動量ベクトル中心の運動)は一般的には図に示されるようなリミットサイクルを描き、その振幅はロールの不感帯土角の大きさに依存する。したがってオフセットスラスタ制御系においてロール精度はほぼ土角により定められる。一方ヨー制御はロールヨー変換運動を介して行われ、ヨー誤差のピーク値は通常ロール不感帯に達する直前に生じる。衛星が一つの不感帯から次の不感帯に達するまでの期間はおよそ1/4周期であるから、ロールヨー平面内での定常偏差トルクの大きさを T_s とし、ヨー誤差のピーク値を ψ_p とすれば次の関係が成立つ。

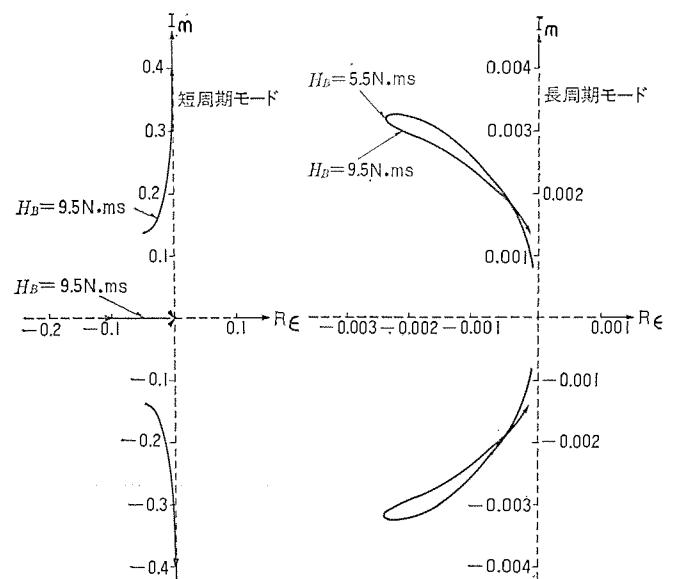


図7. ロール／ヨー系の H_B に対する根軌跡

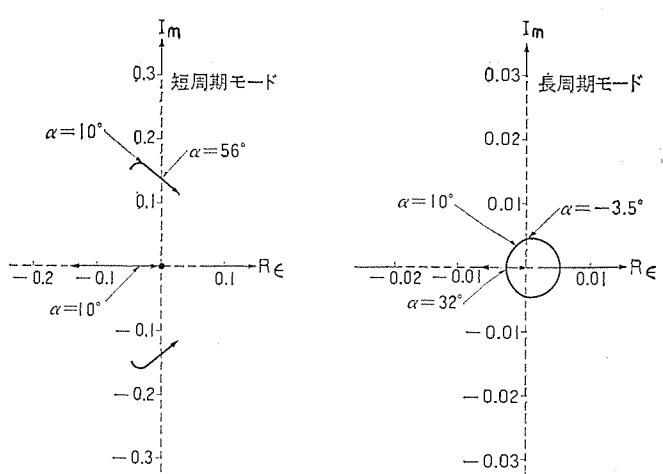
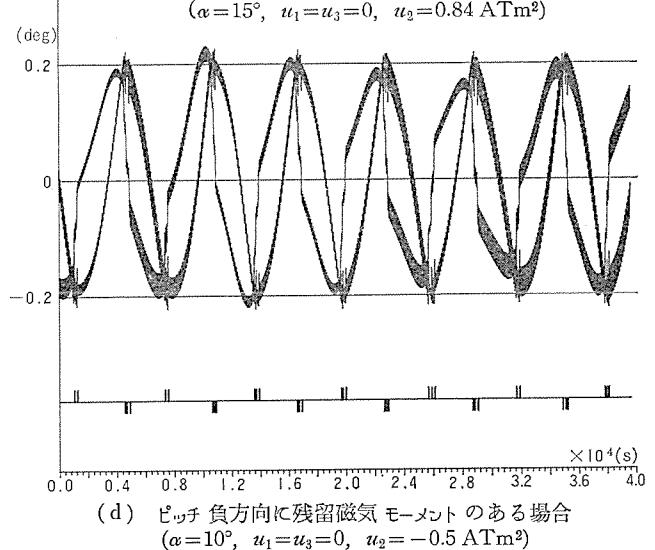
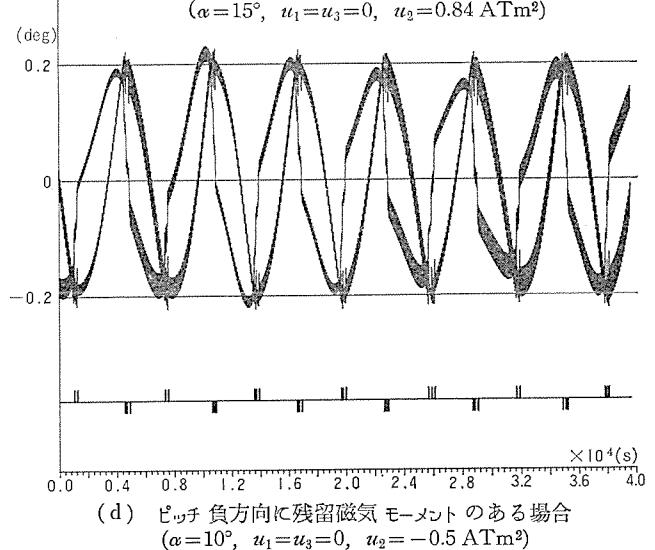
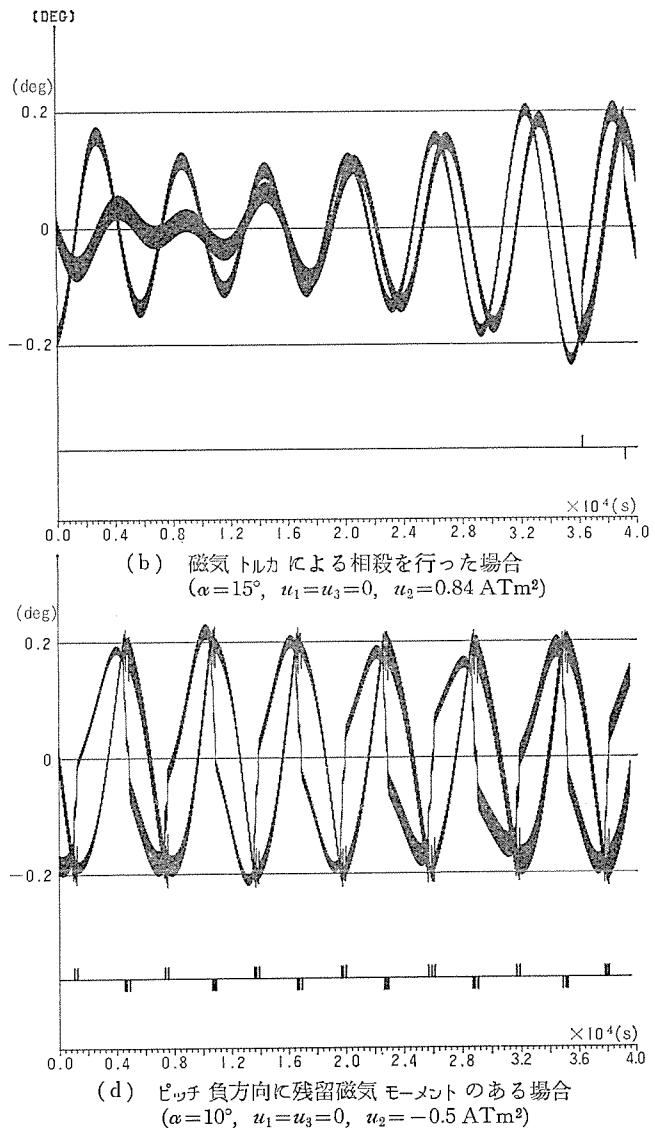
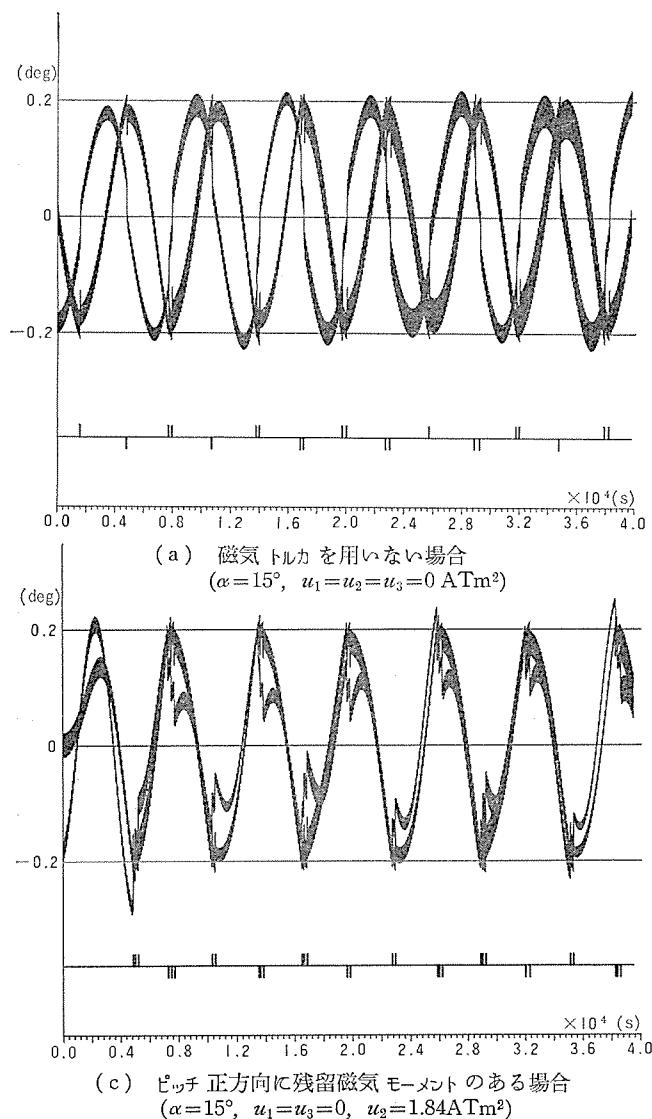


図8. ロール／ヨー系の α に対する根軌跡



$$H_B \psi_P \cong H_B \phi_D + T_S \pi/2 \omega_0 \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

したがってヨー誤差の許容値を ψ_m とすれば、 H_B は次式を満たさねばならない。

$$H_B \geq 1/(\psi_m - \phi_D) \times (T_S \pi/2 \omega_0) \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

図 6. にオフセットスラスタを用いたロール/ヨー制御系のブロック図を示す。図中 α はオフセット角である。両側ヒステリシスを近似的に線形化すれば次の閉ループ特性方程式を得る。

$$1 + \frac{T_c \cos \alpha}{I_x} \frac{\tau_f (S + 1/\tau_f)}{K_f \tau_n (S + 1/\tau_n)} \frac{[S^2 + (H_B \tan \alpha / I_z) S + \omega_0^2 H_B / I_z]}{(S^2 + H^2 B / I_x I_z) (S^2 + \omega_0^2)} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

この制御系の諸パラメータを定める上で式(18)をはじめとするいくつかの条件を考慮に入れた上で適当な値を選び、式(19)の根軌跡を検討して値を改良していく方法をとった。最終的にはこれらの値は更に 5 章で示すシミュレーションの結果を比較検討して定められた。モデルとした衛星に対し他のパラメータを一定にして H_B の値を変化させた場合の根軌跡を図 7. に示す。この例では $H_B=5.5$ N·ms で長周期モードの安定性が最大となり、短周期モードは H_B が増すにつれて安定性が悪くなる。図 8. は同様に α の値を変化させた場合の根軌跡である。長周期モードの 2 根が実軸と出合う点は $\alpha=32^\circ$ で、この近傍で安定性が最も良いと思われるが、一方短周期モードの安定性と減衰性は α が増すとともに悪化する。このほか τ_n , T_c の値は短周期モードの減衰性が最大となるように選ばれた。

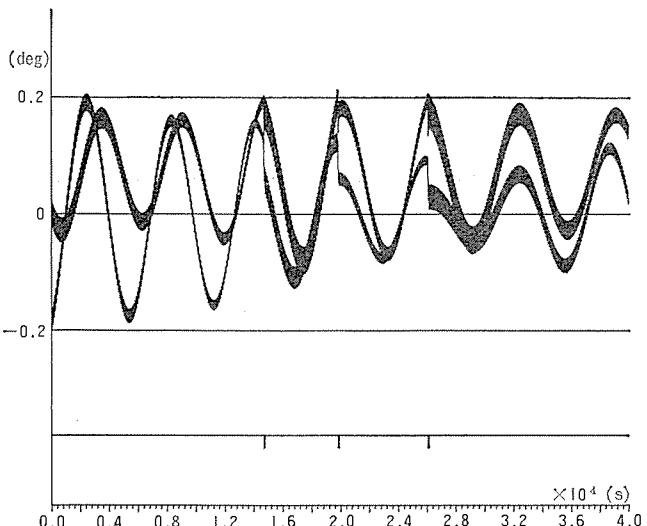
5. シミュレーションによる検討

前章までの解析に加えて更にデジタル計算機を用いたシミュレーションによる検討を行った。5 章においてはこれらの結果について述べる。

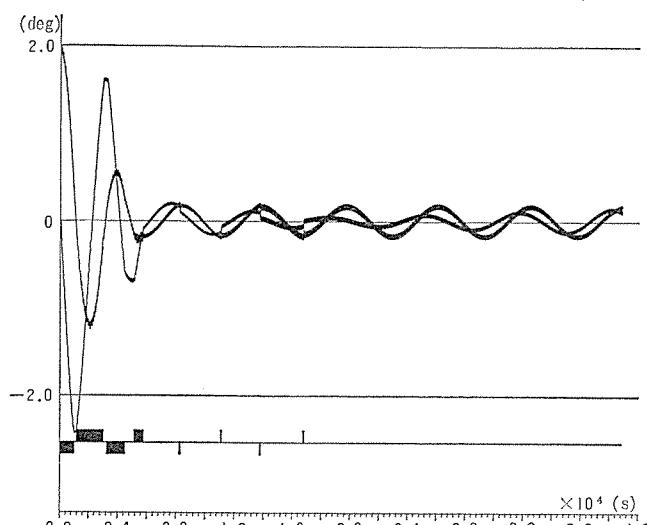
図 9. (a ~ g) は外乱トルクとして軌道面後退による見かけの外乱項、及び残留磁気によるトルクのみを考え、ロールヨー系のシミュレーションを行ったものである。これらの図において縦軸はロール角 ϕ 、及びヨー角 ψ (deg) をとり、横軸は時間を 4×10^4 s までとった。衛星の一周期は約 6,300 s であるから、これは 6 軌道強にあたる。また ± 0.2 deg の横線はオフセットスラスタのロール不感帶境界を示す。図中使用した記号は α がオフセット角 (deg), u_1 , u_2 , u_3 はそれぞれ衛星の有するロール、ピッヂ、ヨー軸方向の磁気モーメント (ATm 2) を示す。またシミュレーションの初期値は ξ_0 (図 1. ξ の初期値) = 0° , ϕ_0 = 0° , ψ_0 = -0.2° , $\dot{\phi}_0 = 1.72 \times 10^{-3}$ deg/s, $\dot{\psi}_0 = 0$ deg/s である。

図 9. (a) は $\alpha=15^\circ$, $u_1=u_2=u_3=0$ ATm 2 すなわち残留磁気及び制御用磁気の全く無い場合で、ニュートーションにより振動しながら軌道周期でロールとヨーが変換される様がよく観察できる。またこのとき軌道面後退による見かけの外乱項を補正するため、 4×10^4 s のうちで 42 回スラスタを噴射している。(図中一つのパルスのように見えるのは、最初不感帶境界に接したときのパルスと、ANC のための第 2 のパルスと重なったものである)

図 9. (b) はこの軌道面後退による影響を相殺するための磁気モ



(e) ヨー方向に残留磁気モーメントのある場合
($\alpha=15^\circ$, $u_1=0$, $u_2=0.84 \text{ATm}^2$, $u_3=1.0 \text{ATm}^2$)



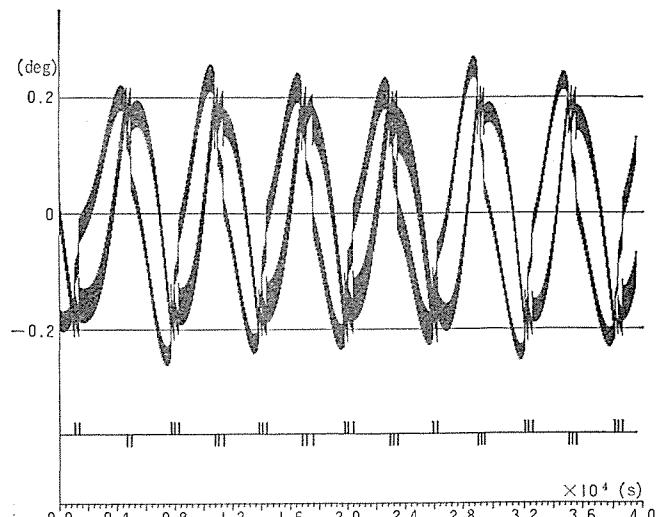
(g) 大きな初期ロール誤差のある場合
($\alpha=15^\circ$, $u_1=u_3=0$, $u_2=0.84 \text{ATm}^2$)

図 9. Roll/Yaw offset thruster control.

メント 0.84ATm^2 をピッチ軸方向に与えたもので、他の条件は図 5. と同じである。この場合わずか 4 回しかスラスターを噴射しておらず、磁気トルカの効果は明白であり、これによって軌道傾角が 0° でない衛星に対してもバイアスモーメンタム方式が適用できることが明らかになった。この状態を基準状態として図 9. (c), (d) はそれぞれピッチ軸方向に正及び負の残留磁気モーメントを仮定した場合で、いずれもかなりの数スラスターを噴射しており姿勢制御系に対する影響の大きさが知られる。図 5. に示したような典型的なリミットサイクルが描かれるのは図 9. (d) のように ϕ と ψ の位相差が大きい場合で、図 9. (c)においては ϕ と ψ はほぼ同相に近いが、その場合でもオフセットスラスターにより精密に制御が行われる。

一方ロール軸及びヨー軸方向の残留磁気モーメントの影響は、衛星が軌道を一周する間に相殺されてしまうのでごく小さいことが分かった。すなわち図 9. (e) は軌道面後退の相殺を行った後に更にヨー軸方向に磁気モーメントの残留する場合で、ほとんどスラスターを吹かしていない。ロール方向に磁気モーメントが残留する場合も同様であった。

図 9. (f) はオフセット角 α を 30° にしたシミュレーション例である。同一条件下で $\alpha=10^\circ$ の図 8. と比較すると、スラスター噴射回数は全く同じであるが ψ のピーク値は前者のほうが大きくなっている。不感



(f) 大きなオフセット角を使用した場合
($\alpha=30^\circ$, $u_1=u_3=0$, $u_2=-0.5 \text{ATm}^2$)

帶近傍での様相は必ずしも安定性の検討結果と一致しない。一方大きな初期ロール誤差を与えて長周期モードの収束性を比較した例では前者がずっと優れており、この点は根軌跡解析の結果とよく一致している。図 9. (g) は長周期モードの収束性を示す一例である。

根軌跡解析の結果によれば衛星の角運動量 H_B は $5.5 \text{N}\cdot\text{ms}$ くらいが安定性が最も良いはずであるが、実際にはヨーのピーク誤差がかなり大きくなってしまうので、安定性を損なわない程度に大きな値を用いてある。

6. むすび

以上の解析とシミュレーションから得た結論は次のとおりである。

- (1) バイアスモーメンタム形の三軸制御方式を中高度中緯度軌道の衛星に採用した場合、軌道面後退の影響は衛星のピッチ軸方向に一定の磁気モーメントを与えることにより、ほぼ完全に相殺できる。
- (2) ピッチ方向にレベル可変の磁気モーメントを与えることにより、オフセットスラスターを用いて姿勢制御を行えば、ヨーセンサを用いなくても非常に良い姿勢精度を得ることができる。またこの組合せにより燃料消費を小さくすることができるから、長期の使命を達成することができる。
- (3) 著者たちが開発した設計手法に従えば、オフセットスラスターによる姿勢制御系のパラメータ設計は容易に行える。また根軌跡解析とシミュレーションによる設計技術は、あらゆる衛星の制御系設計に応用できる。

参考文献

- (1) W. F. Hodge, W. T. Blackshear : An Analytical Study of the Magnetic Field Encountered by Artificial Earth Satellites in Circular Orbits, NASA TN D-2041, Feb. (1964)
- (2) H. J. Dougherty, E. D. Scott, J. J. Rodden : Analysis and Design of WHEC-ON—an Attitude Control Concept, AIAA Paper 68-461, San Francisco, Calif., (1968)
- (3) J. C. Nicklas and H. C. Vivian : Derived Rate Increment Stabilization : Its Application to the Attitude Control Problem, Trans. ASME, Ser D, J. Basic Eng., No. 84, Mar. (1962)
- (4) 今度：バイアスモーメンタム形中高度三軸制御衛星の姿勢制御, 宇宙航行の力学シンポジウム 予稿集 (昭 49-10)

液体燃料の予混合燃焼特性

野間口 有*・松井安次**・酒井正博**・藤原通雄**

1. まえがき

著者らは、これまで、気体燃料の予混合燃焼に関する研究をおこない、それを強制燃焼機に応用するうえでの技術的問題に関する先端的研究の成果を報告してきた^{(1)~(3)}。この論文では、視点を液体燃料にうつし、その基本的な予混合燃焼特性について検討した結果を述べる^{(4), (5)}。

従来の液体燃料燃焼機では、燃料と空気との混合及び燃焼反応が同一の空間の中ではほぼ併行して進むタイプのいわゆる拡散燃焼が主として用いられてきた⁽⁶⁾。拡散燃焼をつかう方式では、簡単な構造の燃焼機で安定な火炎が得られるという特長がある反面、燃焼ガス中に含まれるススや一酸化炭素などの割合が高いという大きな欠点がある。これらの欠点は、環境保護の見地からいって、早急に解決すべき問題であり、各方面で検討されている。予混合燃焼は、このような拡散燃焼のもつ本質的な欠点を解決する可能性を最も大きくなっているので、この研究において、その特性を明らかにすることは大きな意義をもつものといえよう。

この研究では、燃料としては最も一般的な液体燃料である灯油、その平均的分子式 ($C_{12}H_{25}$)⁽⁷⁾ に類似した分子式をもつ n-ドーカン ($nC_{12}H_{26}$) の 2 種類を用いた。これらの燃料を用いた予混合炎の伝ば(播)速度(燃焼速度)⁽⁴⁾、活性化エネルギ⁽⁴⁾、安定限界⁽⁵⁾等が明らかにされる。なお、予混合炎に関する研究は、都市ガス等の気体燃料が世界的規模で使われだした 1940 年代よりはじめられ^{(8), (10)~(12)}、既に 35 年以上の歴史をもつが、液体燃料の予混合燃焼の基礎的な特性を総合的に明らかにしたのは、著者らの研究がはじめてである。

2. 予混合燃焼機構

具体的な実験をおこなう前に、これまで気体燃料の予混合炎について調べられてきた事項^{(1)~(3), (8), (9)}を参考にして、予混合燃焼を特徴づける二、三の因子について理論的に考察しておこう。

2.1 予混合炎の構造

図 1. は、管状バーナー上の予混合炎の説明図である。図 1.(a) は火炎の大体の形状、(b) は火炎帯における温度分布等を示す。

内炎 (inner cone) は、ほぼ完全な円錐をしており、その底部(基部)とバーナー先端との間には、1 mm 程度の死域 (dead space) がある。外炎 (outer mantle) は、内炎で燃焼しつくされなかつた成分が周囲の空気と混合して燃焼する領域である。内炎部は、予混合気の着火温度 T_f の地点を境にして予熱域と反応域にわけられる。予熱域は伝導あるいは拡散によって予混合気が加熱される領域であり、反応域は、炭化水素の燃焼を例にとれば、H, CH, OH, ……をラジカルとする燃焼の連鎖反応が進行する領域である。反応は、非平衡的に進むと考えるべきであるが、大気圧下の燃焼においては、反応域の直後では熱力学的平衡は成立しているとしてよい。このときの燃焼ガスの温度 T_f は次式より求めることができる。

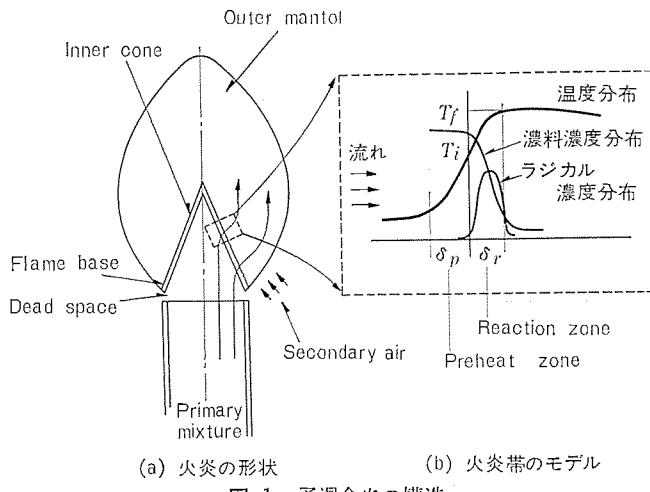


図 1. 予混合炎の構造

$$qX^{-\alpha}/(1+\phi_0X^{-1}) = \int_{T_0}^{T_f} C_p T dT + L \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 q 、 ϕ_0 、 C_p 、 X は、それぞれ燃料単位量当たりの発熱量、燃料単位量を化学量論的に燃焼させるに必要な空気量、予混合気及びその燃焼ガスの比熱、予混合気の当量比(化学量論的空燃比のときの燃料濃度で規格化した燃料濃度)。 T は温度で、 T_0 は初期温度を意味する。 L は燃焼ガスからの熱損失の項。 α は定数で、 $X \geq 1$ で 1, $X < 1$ で 0 である。 $L=0$ として求まる T_f を、通常、断熱火炎温度という。

さて、定常的に安定な火炎では、火炎に流入する予混合気流速とつり合った燃焼の伝ば速度が存在するはずである。この速度のことを燃焼速度といふが、これを S_u で表し、内炎の頂角を α 、バーナー管出口における予混合気流速を U とすると、上のつり合い関係は、

$$S_u = U \sin(\alpha/2) \quad \dots \dots \dots (2)$$

となるはずである。この燃焼速度は、内炎部においてエネルギ保存式と連続の式とを連立させて理論的に求められる⁽⁹⁾。すなわち、

$$S_u = (1/\rho) \left\{ 2\lambda \left(\int_{T_0}^{T_f} \omega dT \right) / n \bar{C}_p (T_f - T_0) \right\}^{1/2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 λ 、 ω はそれぞれ熱伝導率、反応率。 n は予混合気単位体積当たりの燃料モル数。 ρ は T_0 における予混合気密度。 \bar{C}_p は平均値をあらわす。燃焼反応を一つの反応とみなし、その活性化エネルギを E として、アレニウス形の反応速度を考えると、 $\omega = A \exp(-E/RT)$ である。 A は定数、 R は気体定数。

また、 S_u は、前述した反応域、予熱域の厚さ δ_r 、 δ_p と次のようないくつかの関係をもつとも簡単な理論的考察よりわかる⁽⁹⁾。すなわち、

$$\delta_r = \delta_p = \bar{\lambda} / (C_p \rho S_u) \quad \dots \dots \dots (4)$$

以上の考察によって、 S_u 、 T_f 、 C_p 、 λ ……など予混合炎の構造を理解するうえで重要な因子が明らかになった。

2.2 予混合炎の安定性

予混合炎は、予混合気の流速が小さすぎると逆火 (flash-back) し、

大きすぎると吹消える (blow-off) という不安定性を示す。この性質は、バーナ管壁よりわずか (δ_p の程度) 流れの内側に入った位置における燃焼速度と流速との大小関係によって説明できる。とくに、流速の代わりに、境界部における速度こう(勾)配 g を用いると、バーナ管径によらず、

$$g_F \leq g \leq g_B \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

と、安定範囲が表せることが分かっている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。Fは、逆火、Bは吹消えを示す記号。

速度こう配 g は、バーナ管における粘着力と流体圧力損失との関係 $g \cdot \eta \cdot 2 \pi R = (\Delta p / l) \cdot \pi R^2$ より簡単に求められる。

$$g = fVR_e/16 \pi R^3 = fUR_e/16 R \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

ここで、 R 、 l は、バーナ管径及び長さ。 V は予混合気の体積流量。 R_e はレイノルズ数。 η は粘性係数で、 $2\rho V/\pi R \cdot R_e$ 、 ΔP はバーナ管における圧力損失で、 $f_p V^2 l/4 \pi^2 R^5$ と表せる。 f は摩擦係数で、具体的な値は文献(9)にまとめられている。

逆火及び吹消えが生じるときの V を求めると、式(6)をつかって g_B , g_F を知ることができる。

3. 実験装置及び実験方法

2章において、予混合燃焼特性を(把)握するうえで重要な因子がいくつか明らかになった。その中で、とくに重要な燃焼速度や安定限界などは実際に求める必要がある。3章では、これらに関する実験的研究の結果について述べる。実験は主に、小形燃焼機において重要な層流域において行った。上記以外の特性については付録参照。

3. 1 燃烧装置

実験に用いた燃焼装置の構成図を図2.に示す。燃料と空気(1次空気)を混合する予混合気供給部、電気こう(恒)温炉、管状バーナ、予混合気をバーナに導く導管から構成されている。

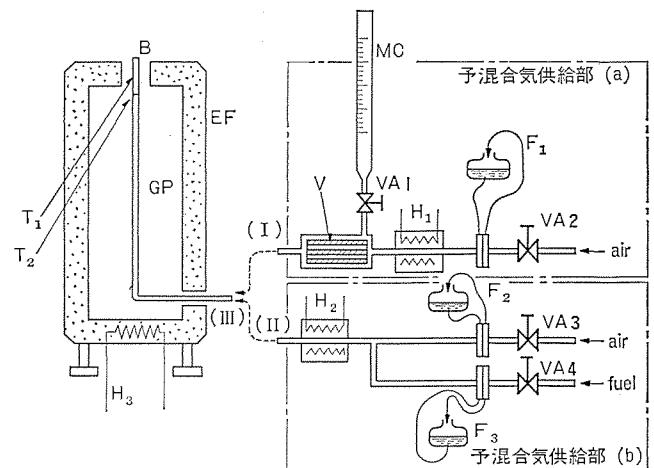
液体燃料（市販の灯油、n-ドデカン（純度95%））の場合、メスリンダに入れた燃料を流量可変バルブVA1を経て、約1mmの直径の貫通した穴を多数もつアルミナ（多孔質）ブロック製の蒸発器に流し込んだ。1次空気は、オリフィス流量計で計量した後、電熱ヒータH1で予熱されてから、前記蒸発器の貫通した穴の部分を強制的に流される。1次空気が蒸発器の部分を通過する過程で、燃料成分は蒸発し、1次空気中に拡散混合していく。その結果、出口部(I)では、燃料と空気とが分子レベルで混じり合った予混合気が得られる。蒸発器の寸法、1次空気の予熱温度は、供給された燃料の蒸発残さ(道)が生じないように十分配慮してきめた。燃料供給量はメスリンダ内の液面の減少割合より求めた。

こうして得られた予混合気は、(Ⅲ)より所定の温度に加熱されている導管部に入り、ここを通過する過程で、導管とほぼ同じ温度となつてバーナ管に達する。導管部の温度は、熱電対 T_1 , T_2 の指示をみながら、電気こう温炉によって制御した。

気体燃料の場合は、燃料と1次空気とを別々に計量したのち混合する方法(予混合気供給法(b))を用いた。ほかは、液体燃料の場合と全く同じである。この研究で用いた気体燃料は、メタン(純度99%), プロパン(98%), n-ブタン(98%)である。

3. 2 光学觀測装置

火炎の光学観測のブロック図を図3.に示す。バーナ及び燃料供給法は図2.と同一である。シュリーレン写真的光源には、500Wのキセノンランプを用い、スクリーン上に倒立したシュリーレン像を得た。像の記録は、スクリーンにすりガラスを用い、背景より写真撮影する方法でおこなつ



EF：電気こう（恒）温炉
 B：バーナ管
 T₁、T₂：アルメル・クロメル熱電対
 H₁～H₃：電気ヒータ
 MC：メスシリング
 V：多孔質アルミナ利用蒸発器
 VA1～VA4：流量可変バルブ
 F₁～F₃：オリフィス流量計
 GP：導管

図 2. 実験用燃焼装置

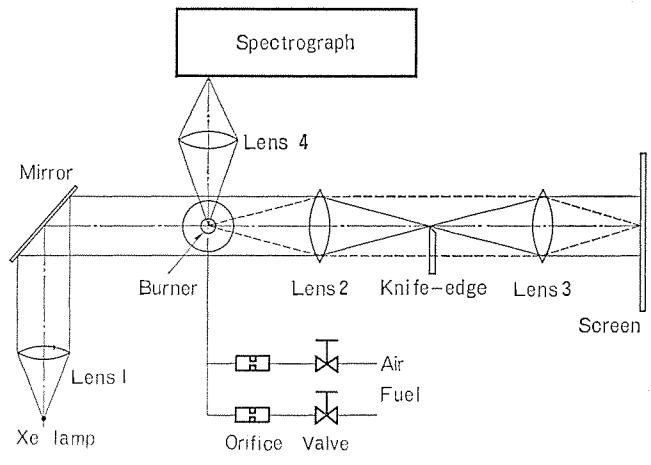


図 3. 光学観測系

た。フィルムはコダック High Speed 2475 を用いた。また、同時に火炎の直接撮影をおこなった。

分光観測は、レンズ 4 により火炎の 1 対 1 の像をつくり、分光器（島津 GE 100）の入口スリットと火炎の反応域が平行になるようにセットした。回析格子のブレーブス波長は、5,000 Å (600 本/mm), 3,000 Å (12,000 本/mm) であり、必要に応じて、分光写真（乾板 - コダック 103 aF）と光電測光とをおこなった。

4. 測定結果と考察

4.1 火炎の形態

当量比によって火炎の形態がどのように変わらるかを調べたのが図4. である。Xが大きいところでは、基部に近いところでは透明であるが中央部から上方にかけては黄炎（写真では白く見える）である。黄炎は、H, O, Cからなる複合粒子（通常カーボン粒子という）からの黒体ふく射（5~6,000 Åを中心とした連続光）のため黄色に見える。この黄炎が完全になくなるのは、メタンでは $X \approx 3.3$ 他の炭素数の多い炭化水素類ではやや減少し、ブタン以上ではほぼ 1.7~1.3 となる。この値は、予混合気温度やバー+径等にも依存するのである。

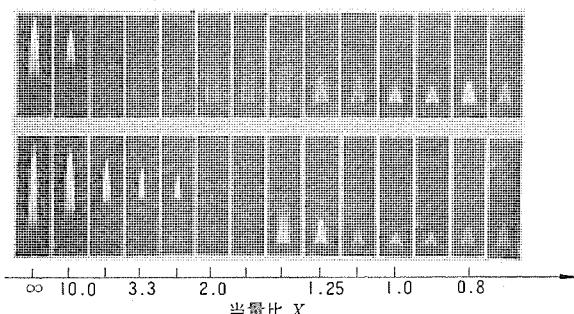


図 4. 予混合炎の形態
 $X = (\text{fuel/air})_{\text{actual}} / (\text{fuel/air})_{\text{stoichi.}}$

$X = 1.25 \ 1.0 \ 0.85$ OH 3064 Å system
 $3064(0,0) \ A^2\Sigma^+ - X^2\pi$
 3078

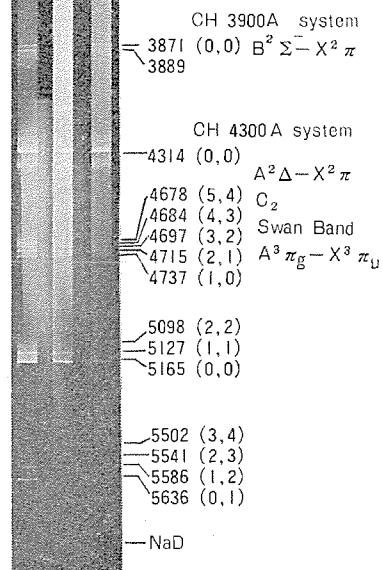


図 5. スペクトル写真の例

るが、注意深く調べた結果、灯油の場合は、ブタンの場合とおよそ等しい値になることがわかった。

1次空気の量を増やして X を次第に小さくしていくと、 $X \approx 2$ あたりでまず円錐状の内炎が形成される。更に小さくなると、内炎は明確になり、発光も緑→青→紫と変化し、いわゆるブルーフレームになる。分光観測した結果、図 5. に示すように、緑色の発光は C_2 Swan band によるものであり、発光強度は X が大きい程よくなる。また、青→紫にかけての発光は CH によるものであり、二つの異なる励起準位からの光 (3,900 Å, 4,300 Å system) の放出がある。紫外部には、OH の強い発光 (3,064 Å system) があり、 $X \approx 1$ で最大強度を示すことがわかる。

$X \leq 1$ では、燃焼の全反応は内炎部で完全に終了し、外炎部は光学的に非常に薄くなる。この領域では、 X の減少とともに燃焼速度も減少するため、火炎は伸長する (式 (2)において、 α が小さくなる)。

4.2 燃焼速度

図 6. に、灯油、n-ドデカンの予混合炎の燃焼速度 S_u の測定結果を示す。シリーレン写真より、内炎の頂角 α を求める式 (2) より S_u を知ることができる。この測定は、当量比 $X = 0.6 \sim 1.4$ 、 $R_e = 600 \sim$

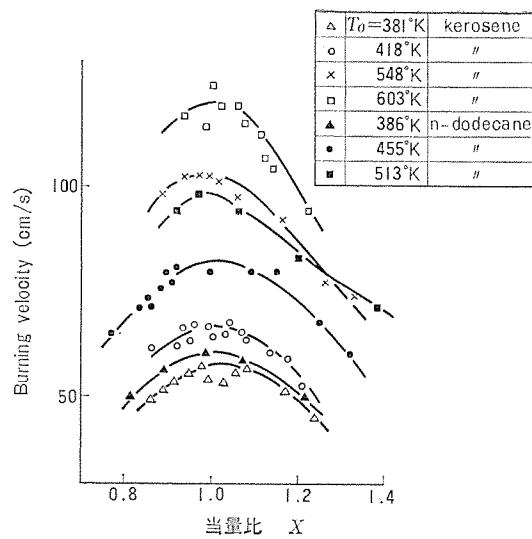


図 6. 灯油、n-ドデカンの燃焼速度

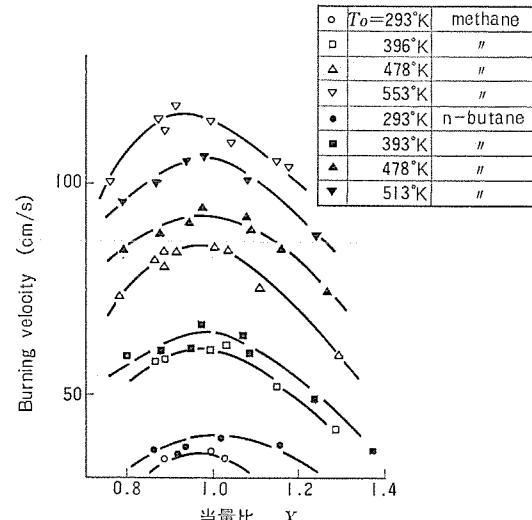


図 7. メタン、ブタンの燃焼速度

2,000 の範囲でおこなった。 S_u は、一般に R_e に依存するのであるが、この測定の範囲では、 R_e による違いはほとんど見い出されなかつたので、図には R_e による区別を行っていない。図 7. は比較のために測定したメタンとブタンの S_u である。予混合気温度 T_0 への依存性、最大値が $X=1$ よりわずか燃料過濃側にあらわれることなど、両図の間には類似点が多い。なお、 S_u の最大値 $S_{u\max}$ の T_0 への依存性は、次の関数関係であらわされる⁽⁵⁾⁽⁹⁾。

$$\text{灯油: } S_{u\max} = 8.0 + 0.325 \times 10^{-3} T_0^2 \text{ cm/s} \quad (7)$$

$$\text{n-ドデカン: } S_{u\max} = 10.1 + 0.346 \times 10^{-3} T_0^2 \text{ cm/s} \quad (8)$$

$$\text{メタン: } S_{u\max} = 7.0 + 0.354 \times 10^{-3} T_0^2 \text{ cm/s} \quad (9)$$

$$\text{n-ブタン: } S_{u\max} = 6.3 + 0.375 \times 10^{-3} T_0^2 \text{ cm/s} \quad (10)$$

$$\text{プロパン: } S_{u\max} = 10.0 + 0.342 \times 10^{-3} T_0^2 \text{ cm/s} \quad (11)$$

プロパンの結果は、Dugger ら⁽¹⁰⁾によって求められたものである。炭素数 10 以下の各種の炭化水素については、これまで多くの測定^{(11)~(13)}があり、飽和炭化水素では炭素数によらず、 $T_0 = 298^\circ\text{K}$ で約 40 cm/s であることが分かっているが、これは式 (7), (8) の結果とよく一致している。

4.3 活性化エネルギーの推定

式 (3)を、密度の温度依存性を考慮して、変形すると、

$$(298/T_0) S_u \propto \{\exp(-E/RT_f)\}^{1/2} \quad (12)$$

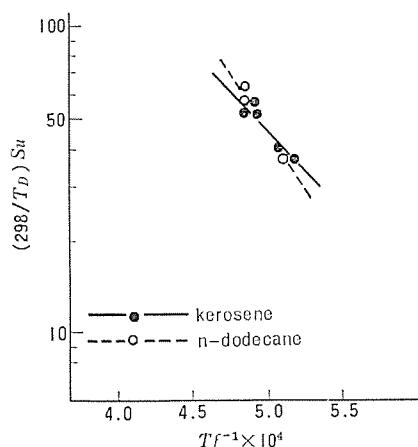


図 8. $(298/T_0)S_u$ と T_f^{-1} との関係

表 1. 活性化 エネルギ

| Fuel | E (kcal/mol) | ref. |
|------------|----------------|--------------|
| Kerosene | 41 | Present work |
| | 45 | (14) |
| n-Dodecane | 46 | Present work |
| | 60 | (12) |
| Methane | 40 | (9) |
| | 60 | (12) |
| Ethane | 39 | (9) |
| | 40 | (9) |
| Propane | 42 | (9) |
| | 39 | (10) |

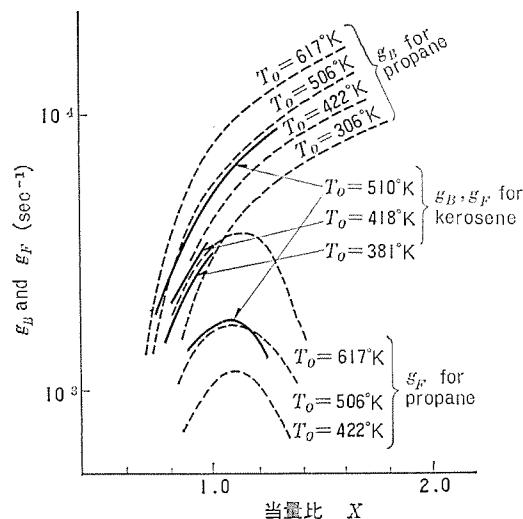


図 9. 灯油の安定限界とプロパンの安定限界⁽⁹⁾との比較

となる。ただし、式(3)において、 $\bar{\lambda}$ 、 n 、 \bar{C}_p は T_0 あるいは T_f にそれほどよく依存しない。上式は、 T_0 をかえたときの S_u 、 T_f の値がわかると、活性化 エネルギ E が推定できることを示している。

図 8. は、 $S_u(298/T_0)$ と T_f の逆数との関係をプロットしたもので、図中の線の傾きより E を求めることができる。 T_f は、Na-D 線反転法で測定した。表 1. に灯油、n-ドデカンについて求めた結果を示す。表には、参考のために、高温気流中における着火おくれの測定から求められた灯油に対する結果⁽¹⁴⁾、この研究と同じ方法で求められた気体燃料にたいする結果⁽⁹⁾もあわせて示した。活性化 エネルギ E は燃料分子の大きさの違いに、それほど依存しないことが分かる。このことより、燃料分子がより軽質な成分に壊されていく過程は燃焼反応の律速過程ではなく、むしろそれ以後の過程に律速反応は含ま

れているものと考えられる。

4.4 安定限界

図 9. に、灯油の場合の、 $T_0=510^\circ\text{K}$ 、 418°K 、 381°K における吹消え限界 g_B 、 $T_0=510^\circ\text{K}$ における g_F の測定例を示す。 g_B 、 g_F ともにまず、安定な火炎をバーナ管上につくり、ついで1次空気をしだいに増加していき、火炎が吹消えあるいは逆火するときの1次空気量と燃料量を求め、それを式(6)に代入して求めたものである。図には n-ドデカンの結果は示していないが、ほぼ同じ特性をもつことを確認している。

g_B 、 g_F ともに、内径が 8.1 mm、3 mm のバーナを用いたが、ほぼ同じ結果であった。気体燃料の場合は、 g_B 、 g_F がバーナ管径によらないということは既に確かめられていたのである⁽⁸⁾が、液体燃料の場合も、同じことが成立つことが明らかになった。

また、図 9. には、プロパン⁽¹⁰⁾にたいする同じような測定結果(点線)も示してある。 T_0 がほぼ等しい条件では、灯油とプロパンとは非常によく似た特性を示しており、気体燃料の場合の安定機構⁽⁹⁾⁽¹⁵⁾と本質的な違いはないものといえよう。

5. むすび

以上の検討によって、最も一般的な液体燃料である灯油の予混合燃焼の基本的な特性が、ほぼすべて明らかになった。この研究の結果をまとめると、次のようになる。

(1) 火炎の形状が、当量比によって変化する様子、火炎の光学的性質が明らかになった。その結果は、基本的には飽和炭化水素系の気体燃料の性質とほぼ同じであると理解してよい。

(2) 燃焼速度を、 $T_0=381^\circ\text{K} \sim 603^\circ\text{K}$ の範囲で測定し、 S_u と T_0 との関係を得た。この関係を用いると、 $T_0=298^\circ\text{K}$ のとき、灯油は、 $S_{u \max} \approx 38 \text{ cm/s}$ 、n-ドデカンは $S_{u \max} \approx 40 \text{ cm/s}$ である。また、式(2)より活性化 エネルギ E も推定され、灯油で約 41 kcal/mol、n-ドデカンで約 46 kcal/mol であることを明らかにした。

(3) 安定限界(吹消え限界、逆火限界)も測定し、境界速度こう配理論で整理できることをはじめて見出した。予混合気温度、当量比が等しければ、灯油とプロパンとはほぼ同じ限界を示した。

(4) 以上の実験的研究のほかに、灯油の予混合気、燃焼ガスの熱力学的性質も明らかになった(結果は付録に示す)。

以上の研究は、実際の開発研究と平行して行われた。当社が他に先がけて開発したクリーンボイラや灯油クリーンヒータにはこの研究の成果が生かされている。

この研究の遂行にあたって、データの提供、実験の援助をいただいた社内外の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤、野間口：燃焼研究誌、28, 1 (昭 46)
- 2) 野間口、藤原、伊藤：機械学会論文集、39, 3134 (昭 48)
- 3) Nomaguchi, T., Matsui, Y. and Itoh, T.: Combustion Institute European Symp., 695 (1973)
- 4) Nomaguchi, T., Fujiwara, M.: Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Science (to be published).
- 5) 野間口、酒井、石田、藤原：第 9 回燃焼シンポジウム 前刷集、113 (昭 46)
- 6) Burkhardt, C. H.: Domestic and Commercial oil Burners,

- 3rd. ed., McGrawhill, (1969)
- (7) 山本, 森田, 川上, 小沢: 工化, 63, 1372 (昭35)
- (8) Lewis, B. and von Elbe, G.: Combustion, Flames and Explosions of Gases, 2nd. ed., Academic Press (1961)
- (9) 野間口: Thesis (昭50)
- (10) Dugger, G. L.: NACA TN 2170 (1950)
- (11) Wagner, P. and Dugger, G. L.: J. Am. Chem. Soc., 77, 227 (1955)

- (12) Kaskan, W. E.: 6th Symp. (International) on Combustion, 134 (1957)
- (13) Andrews, G. E. and Bradley, D.: Combustion and Flames, 8, 133 (1972)
- (14) Mullins, B. P.: Fuel, 32, 211 (1953)
- (15) Edmondson, H. and Heap, M. P.: I. G. E. Journal, 11, 305 (1971)

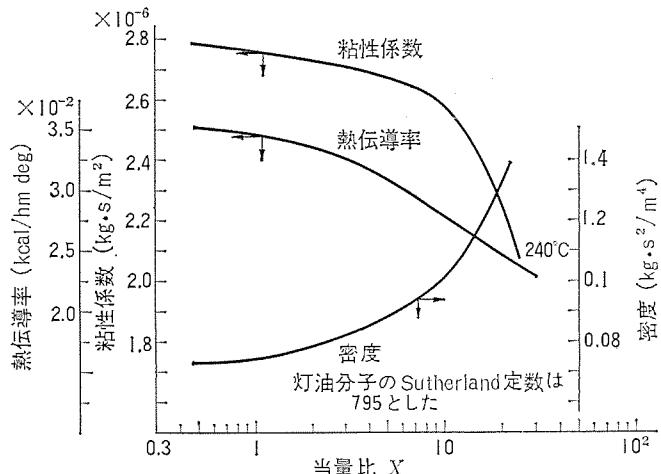
付録

付表 1. は、灯油, n-ドデカンの性状, 付図 1. は、灯油の予混合気の粘性係数, 热伝導率。付図 2. は、燃焼ガスの熱平衡組成, エンタ

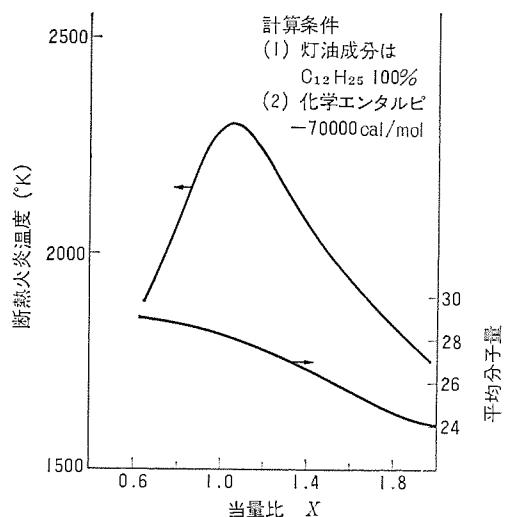
付表 1. この研究で用いた灯油, n-ドデカンの諸定数

| | (相当)分子式 | 分子量 | 比重(g/cc) | 比熱(cal/g°C) | 潜熱(cal/g) | 燃焼熱(cal/g) | 沸点(°C) |
|----------|-----------------------------------|-----|----------|-------------|-----------|------------|---------|
| 灯油 | C ₁₂ H ₂₅ * | 169 | 0.79 | 0.5 | 70 | 10,500 | 160~250 |
| n-ドデカン** | n-C ₁₂ H ₂₆ | 170 | 0.75 | 0.5 | | 11,370 | 214~217 |

* 本文文献(7)による。 ** 化学便覧による。

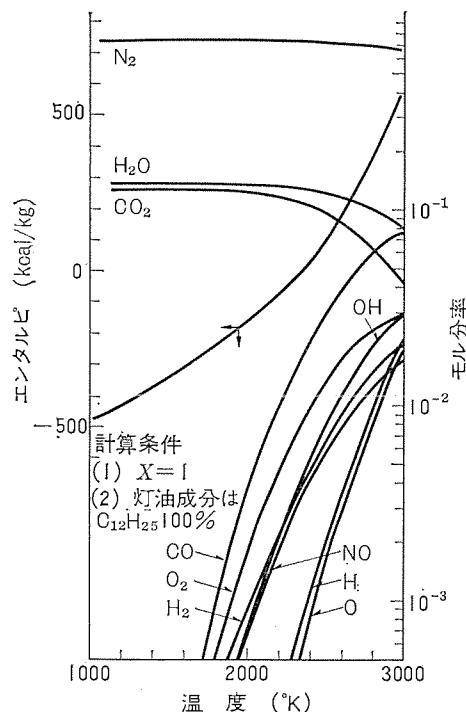


付図 1. 240°Cにおける灯油予混合気の熱伝導率、粘性係数、密度

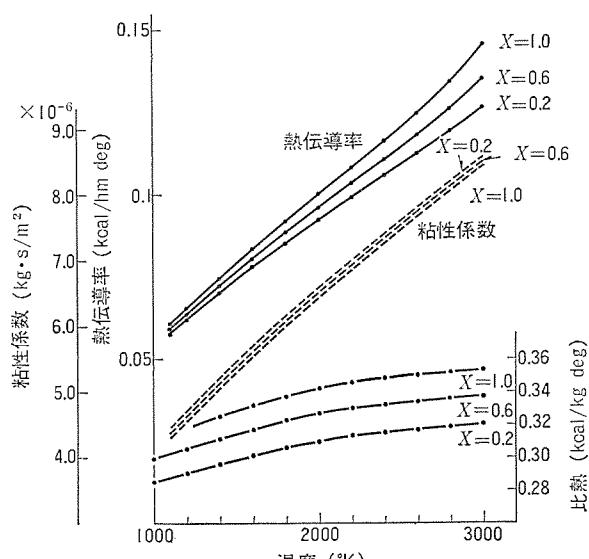


付図 2. 灯油燃焼ガスの断熱火炎温度と平均分子量

ル比、付図 3. は、燃焼ガスの定圧比熱、粘性係数、熱伝導率の計算結果である。



付図 3. 灯油燃焼ガスの熱平衡組成とエンタルピ



付図 4. 灯油燃焼ガスの熱伝導率、粘性係数、比熱

多重反射鏡形アンテナの等価パラボラ表示とその応用

水沢 丕雄*・片木 孝至*

1. まえがき

回転放物面鏡や回転双曲面鏡は、パラボラアンテナやカセグレンアンテナの反射鏡として広く用いられている。これらの鏡面には主として回転対称なものが用いられるが、副反射鏡によるブロッキングを避けるためにオフセット形式にしたカセグレンアンテナ⁽¹⁾や、1次放射器に円錐ホーンリフレクタを使用したカセグレンアンテナ⁽²⁾など非対称な形状のものもある。また衛星通信地球局アンテナで、受信機室を地上に固定するために、1次放射器に2枚あるいは4枚の反射鏡から成る系を使用するカセグレンアンテナも実用化されている⁽³⁾⁽⁴⁾。こうした多くの反射鏡から成るアンテナの特性を波動的に計算することは複雑な手順を必要とし容易ではない。このためアンテナの開口分布、特にその対称性や交差偏波特性の解析には、通常幾何光学的な手法が用いられる。この論文では、最終段が回転放物面鏡から成り、多くの回転2次曲面鏡で構成される系が幾何光学的にはホーンと単一の回転放物面鏡から成るパラボラアンテナと等価であることを示し、これを用いれば上に述べた複雑なアンテナの特性を容易に計算することができる事を示す。

回転2次曲面鏡から成るアンテナは、図1.に示すように円錐ホーンと2次曲面鏡から成る給電系、及び回転放物面鏡の組合せで表される。給電系の2次曲面鏡系の構成要素は、表1.及び表2.に示すような回転双曲面鏡、回転だ円面鏡、及び回転軸が平行な2枚の回転放物面鏡であり、これらの相隣りあう構成要素が一焦点を共有するように並べられている。幾何光学的に考えた場合、これらの構成要素の一方の焦点を中心とする球面波は、鏡面で反射されて他方の焦点を中心とする球面波に変換されること、最後の回転放物面鏡によってこの球面波が、開口面上で平面波に変換されることはよく知られている。この論文においては、円錐ホーンより放射された球面波面上に直交曲線座標系を設けたとき、これを光線によって開口面上に投影すれば、やはり直交曲線座標系となること、入射球面波面上の座標曲線に接する電界ベクトルが、開口面上の対応する座標曲線に接する電界ベクトルとなることを示し、この結果を用いてこうし

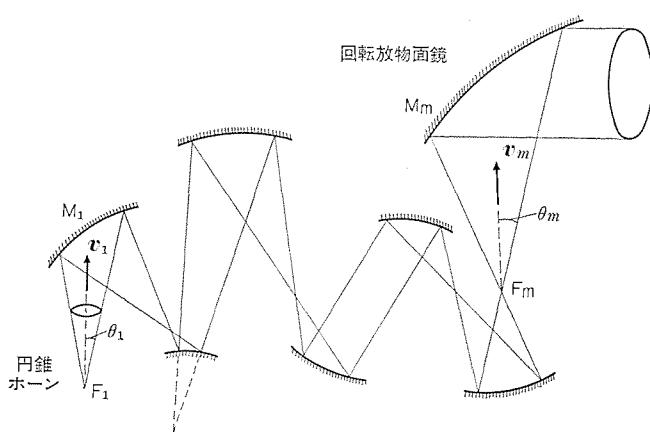


図1. 回転2次曲面鏡系

表1. 回転軸が平行な2枚の回転放物面鏡

| δ_n | I | -I |
|------------|---|----|
| 1 | | |
| -1 | | |

表2. 回転だ円面鏡及び回転双曲面鏡

| δ_n | I | -I |
|------------|---|----|
| 回転だ円面鏡 | | |
| 回転双曲面鏡 | | |

た系の等価パラボラ表示を導く。応用例として、このような等価パラボラの概念を用いて、アンテナの形状は非対称であるにかかわらず、この鏡面の非対称による交差偏波発生のないアンテナ形式が存在することを示す。

2. 波面上の曲線座標系

図2.に示すように、鏡面、入射波面 S_1 、反射波面 S_2 を考え、これらの上で1本の光線によって結ばれている点を M, N, W とする。 S_1 上に u, v をパラメータとする曲線座標系を設けると、それに対応して鏡面、反射波面上にも u, v をパラメータとする曲線座標系が投影される。このような座標系の対応関係だけから反射前後の電磁界成分の対応関係が導けるならば、計算上非常に便利である。

入射波面上の点 N における電界 E_1 と、反射波面上の点 W における電界 E_2 の対応について、まずエネルギー保存の法則より振幅について次の関係が成立つ。

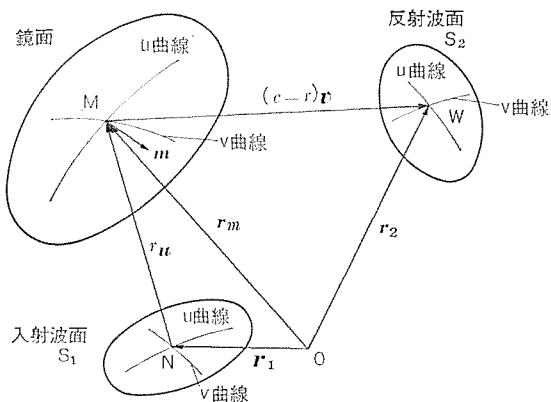


図 2. 鏡面, 入射波面及び反射波面

$$|E_1|^2 dS_1 = |E_2|^2 dS_2 \quad \dots \quad (1)$$

ここで dS_1, dS_2 は S_1, S_2 上の面素であり, 共に パラメータ u, v で表されるので, $|E_1|$ と $|E_2|$ の関係は式(1)から容易に求まる。しかし偏波方向については, S_1 上で u, v 曲線に接した電界成分が, S_2 上でも u, v 曲線に接するとは必ずしもいえない。

鏡面上の点 M で反射される場合について考えることとし, S_1', S_2' を M を含む位置にとった入射波面及び反射波面とする。点 M における鏡面の単位法線ベクトルを m , S_1', S_2' 上の電界ベクトルをそれぞれ E_1', E_2' とすれば, 境界条件より次の関係がある。

$$E_2' = 2(E_1' \cdot m)m - E_1' \quad \dots \quad (2)$$

図 2. に示すように, 原点 O より入射波面 S_1 上の点 N に至るベクトルを r_1 , 鏡面上の点 M に至るベクトルを r_m , 反射波面 S_2 上の点 W に至るベクトルを r_2 とする。 N から M に向かう単位ベクトルを u , 距離を r , M から W に向かう単位ベクトルを v とすれば, 次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} r_m &= r_1 + ru \\ r_2 &= r_m + (c-r)v \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (3)$$

ここで c は N から M に至る距離で, 定数である。入射波面 S_1' 上で M を通る u 曲線に接するベクトル $\frac{\partial r_1'}{\partial u}$ は, r_m の式で r を定数と考えて偏微分すれば得られる。また反射波面 S_2' 上で M を通る u 曲線に接するベクトル $\frac{\partial r_2'}{\partial u}$ は, r_2 を u で偏微分し, 結果において $c=r$ とすれば得られる。 u, v は光線に沿う単位ベクトルで Snell の法則

$$v = u - 2(u \cdot m)m \quad \dots \quad (4)$$

に従うこと, m が鏡面の法線ベクトルで $\frac{\partial r_m}{\partial u}$ と直交することなどを考慮すれば, 次の関係のあることが容易に導ける。

$$\frac{\partial r_2'}{\partial u} = \frac{\partial r_1'}{\partial u} - 2\left(\frac{\partial r_1'}{\partial u} \cdot m\right)m \quad \dots \quad (5)$$

これを式(2)と比較すれば, 入射波面 S_1' 上で u 曲線に接している電界ベクトルは, 反射波面 S_2' 上でも u 曲線に接していることが分かる。

幾何光学によれば, 自由空間を伝ば(播)している途中で偏波の方向は変わらない⁽⁵⁾ので, 空間を伝ばして波面 S_1 から S_1', S_2' から S_2 に至る間に, u, v 曲線に接するベクトルが変化しない条件を見い出す。 S_1 上の曲線座標 u, v を, u, v 曲線が曲面の曲率線であるように選び, u, v の値は S_1 上の距離を表すようにしておくと, Rodrigues⁽⁶⁾ の公式によって, 次式が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial u} &= -\frac{1}{R_u} \frac{\partial r_1}{\partial u} \\ \frac{\partial u}{\partial v} &= -\frac{1}{R_v} \frac{\partial r_1}{\partial v} \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (6)$$

ここで R_u, R_v は u 曲線, v 曲線の曲率半径である。曲率線以外の径数曲線を考え, そのパラメータを s とすれば, 波面 S_1' 上の点を示すベクトル r_1' について,

$$\frac{\partial r_1'}{\partial s} \times \frac{\partial r_1}{\partial s} = r \frac{\partial u}{\partial s} \times \frac{\partial r_1}{\partial s} = r \left(\frac{1}{R_u} - \frac{1}{R_v} \right) \left(\frac{\partial r_1}{\partial u} \times \frac{\partial r_1}{\partial v} \right) \frac{du}{ds} \frac{dv}{ds} \quad \dots \quad (7)$$

となる。したがって s 曲線に接するベクトルが, 波面 S_1 と S_1' 上で方向を変えない条件は式(7)が 0 となる場合, すなわち s 曲線が曲率線に一致する場合か, $R_u = R_v$ となる場合である。 R_u と R_v が一致するのは曲面が球面又は平面の場合であり, このとき曲面上のあらゆる曲線は曲率線である。したがって, u, v 曲線として S_1 上で直交する曲率線を選べば, 電界ベクトルはこれらの曲線に接するベクトル成分に分解し, 他の波面上で対応するベクトル成分を合成してこの波面上の電界ベクトルを得ることができる。

回転 2 次曲面鏡系の場合, 入射波面, 反射波面は常に球面又は平面であるから, 入射波面上に任意の直交曲線座標系を設ければ, 光線によって対応づけられる反射波面上の曲線座標系も直交系である。そして電界ベクトルをその座標系の成分に分解して考えることができる。したがって二つの系で最初の入射波面と最後の反射波面上の座標系の対応関係が同一であれば, それらの系は等価であるといえる。

しかし一般の場合, 入射波面 S_1' 上で u, v 曲線を S_1 の曲率線に選んでも, 反射波面 S_2 上の u, v 曲線は必ずしも S_2 の曲率線とならないことに注意がいる。

3. 回転 2 次曲面鏡の性質

3.1 回転放物面鏡

回転放物面鏡の焦点を頂点とする円錐に沿う光線は, 反射されて回転軸に平行な円筒に沿う。図 3. に示すように焦点を F_m , 焦点距離を f_m , 回転軸に沿う単位ベクトルを k_m , F_m を頂点とする円錐の中心軸に沿う単位ベクトルを v_m , 円錐の半頂角を θ_m とする。また回転軸と F_m' で直交する平面を考え, F_m' よりこの面と反射光線の沿う円筒の交線である円の中心に至るベクトルを P , この円の半径を r_a とすれば, これらの間には次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} P &= 2f_m \frac{v_m - (v_m \cdot k_m)k_m}{\cos \theta_m - (v_m \cdot k_m)} \\ r_a &= 2f_m \frac{\sin \theta_m}{\cos \theta_m - (v_m \cdot k_m)} \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (8)$$

逆に回転軸に平行な円筒に沿って光線が入射したとき, 反射光線は焦点を頂点とする円錐に沿うことになる。

3.2 回転 2 次曲面鏡系の構成要素の性質

表 1. 及び表 2. に示した

回転 2 次曲面鏡系の構成要素

素においては, いずれの場合についても, 一方の焦点 F_n を通る入射光線は, 反射後他方の焦点 F_{n+1} を通る光線になる。更に F_n を頂点とする円錐に沿う光線は, 反射後 F_{n+1} を頂点とする円錐に沿うことが証明できる。 F_n を頂点とする円錐の中心軸に沿い, 光線の

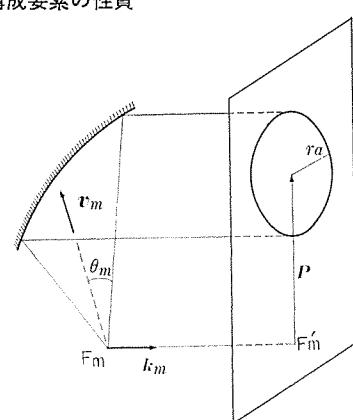


図 3. 回転放物面鏡

進行方向に一致する単位ベクトルを v_n 、半頂角を θ_n とし、 F_{n+1} を頂点とする円錐のそれらを v_{n+1} 、 θ_{n+1} とすれば、これらの間には次の関係が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} v_{n+1} &= \frac{1}{z_n} (A_n \cdot v_n + b_n \cos \theta_n) \\ \cos \theta_{n+1} &= \frac{1}{z_n} (a_n \cdot v_n + b_n \cos \theta_n) \\ \sin \theta_{n+1} &= \frac{1}{z_n} \cdot \sin \theta_n \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで A_n はダイアディクス、 b_n 、 a_n はベクトル、 b_n はスカラーで、 鏡面の形状、配置によってきまる定数である。 z_n は $v_{n+1}^2 = 1$ 、 $\cos^2 \theta_{n+1} + \sin^2 \theta_{n+1} = 1$ を満足する値である。

(1) 回転軸が平行な2枚の回転放物面鏡

2枚の鏡面 M_n 、 $M_{n'}$ の焦点距離を f_n 、 $f_{n'}$ 、 回転軸に沿う単位ベクトルを k_n 、 $k_{n'}$ 、 M_n の焦点 F_n より $M_{n'}$ の焦点 F_{n+1} に至るベクトルの k_n に垂直な成分を $2f_n d_n$ とする。鏡面と入射、反射光線の配置には、表1.に示す4通りの場合があり、これらを区別するために δ_n 、 $\delta_{n'}$ なるパラメータの値を、光線が鏡面の(凹)側にある場合+1、(凸)側にある場合-1と定める。このとき式(9)の A_n 、 b_n 、 a_n 、 b_n は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} A_n &= -\delta_n \delta_{n'} [\Pi - (k_n - d_n) k_n] - \left(\frac{f_n}{f_{n'}} \right) k_n d_n \\ &+ \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{f_n}{f_n'} \right) - \left(\frac{f_n}{f_n'} \right) (d_n^2 - 1) \right\} k_n k_n \\ b_n &= -\frac{\delta_n}{2} \left\{ \left(\frac{f_n}{f_n'} \right) - \left(\frac{f_n}{f_n'} \right) (d_n^2 + 1) \right\} k_n + \delta_{n'} d_n \\ a_n &= -\frac{\delta_n}{2} \left\{ \left(\frac{f_n}{f_n'} \right) + \left(\frac{f_n}{f_n'} \right) (d_n^2 - 1) \right\} k_n - \delta_n \left(\frac{f_n}{f_{n'}} \right) d_n \\ b_n &= \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{f_n}{f_n'} \right) + \left(\frac{f_n}{f_n'} \right) (d_n^2 + 1) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

上式で Π は恒等ダイアディクス、 d_n は $|d_n|$ を示す。

(2) 回転だ円面鏡及び回転双曲面鏡

回転だ円面鏡及び回転双曲面鏡と入射、反射光線の配置には表2.のような場合がある。パラメータ δ_n の値を(1)と同様に定め、 F_n より F_{n+1} に向かう単位ベクトルを k_n 、回転だ円面鏡あるいは回転双曲面鏡の離心率を e_n とすれば、次の関係が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} A_n &= p_n \left(\Pi - \frac{2e_n^2}{e_n^2 - 1} k_n k_n \right) \\ b_n &= -2\delta_n \frac{e_n}{e_n^2 - 1} k_n \\ a_n &= -b_n \\ b_n &= p_n \frac{e_n^2 + 1}{e_n^2 - 1} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここで $p_n = 1$ は回転双曲面鏡、 $p_n = -1$ は回転だ円面鏡を示す。

4. 等価パラボラ表示

3章で述べたように、回転2次曲面鏡系のすべての構成要素について、入射光線の沿う円錐を示す v_n 、 θ_n と、反射光線の沿う円錐を示す v_{n+1} 、 θ_{n+1} の間には常に式(9)の関係がある。そしてこれらの係数 A_n 、 b_n 、 a_n 、 b_n はすべて系を構成する要素の形と配置だけで決まる。したがって図1.の系において、最終段の回転放物面鏡に入射する光線の沿う円錐を示す v_m 、 θ_m と、最初の円錐ホーンの中心軸に沿うベクトル v_1 、半頂角 θ_1 の間には次の関係がある。

$$v_m = \frac{1}{z} (A \cdot v_1 + b \cos \theta_1) \quad |$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_m &= \frac{1}{z} (a \cdot v_1 + b \cos \theta_1) \\ \sin \theta_m &= \frac{1}{z} \cdot \sin \theta_1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここで A 、 b 、 a 、 b は系の構成要素の形と配置できる量で、各要素の A_n 、 b_n 、 a_n 、 b_n より次式で求められる。

$$\left(\begin{array}{cc} A & b \\ a & b \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cc} A_{m-1} & b_{m-1} \\ a_{m-1} & b_{m-1} \end{array} \right) \cdots \left(\begin{array}{cc} A_1 & b_1 \\ a_1 & b_1 \end{array} \right) \quad (13)$$

また z は $v_m^2 = 1$ 、 $\cos^2 \theta_m + \sin^2 \theta_m = 1$ の両方を満足する。したがって、 A 、 b 、 a 、 b の間には次の関係があることがわかる。

$$\left. \begin{aligned} A^t \cdot A &= \Pi + aa \\ b \cdot A &= ba \\ b^2 &= b^2 - 1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

図1.の最後の回転放物面鏡の焦点距離を f_m 、回転軸に沿う単位ベクトルを k_m とし、式(12)を式(8)に代入して整理すれば次の結果が得られる。

$$\left. \begin{aligned} p &= 2f \left\{ \frac{v - (v \cdot k_m) k_m}{\cos \theta_1 - (v \cdot k_m)} + d \right\} \\ r_a &= 2f \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1 - (v \cdot k_m)} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{f_m}{b - (b \cdot k_m)} \\ d &= b - (b \cdot k_m) k_m \\ v &= L \cdot v_1 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

である。 L は次式で表されるダイアディクスである。

$$\left. \begin{aligned} L &= (\Pi - k_m k_m) \cdot (A + bc) + k_m c \\ c &= \frac{k_m \cdot A - a}{b - (b \cdot k_m)} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

この式から式(14)の関係を考慮すれば

$$L^t \cdot L = \Pi \quad (18)$$

となることが導ける。すなわち L は直交変換を示すダイアディクスであるから式(16)で v_1 が単位ベクトルのとき、 v も単位ベクトルである。

この結果を式(8)と比較すれば、図1.の回転2次曲面鏡系において、最初の焦点を頂点とする円錐 v_1 、 θ_1 に沿って出た光線は、最終段の回転放物面鏡の反射によって円筒に沿うことになり、これが焦点距離 f 、焦点が F_m より $2f d$ 変位した位置 F にある回転放物面鏡に、 F を頂点とする円錐 v 、 θ_1 に沿って光線が入射した場合と同一であることがわかる。ただし v は v_1 に L で示される直交変換を行ったベクトルである。この関係が v_1 、 θ_1 のすべての値について成立つの、2章で述べた理由によって回転2次曲面鏡系を1枚の回転放物面鏡と円錐ホーンから成るパラボラアンテナに置きかえることができる。

5. アンテナ解析への応用

今、簡単な応用例として、図4.に示すように、主反射鏡に回転放物面鏡を、副反射鏡に回転双曲面鏡を用いたオフセットカセグレンアンテナの場合について考える。反射鏡の数は2個であるから、式(13)で与えられる系の A 、 b 、 a 、 b は回転双曲面鏡としたとき得られる式(11)で決まる値そのものとなる。この A 、 b 、 a 、 b を式(16)及び式(17)に代入することによって f 、 v が決まり、等価パラボラを決定することができる。アンテナの開口分布は、この等価パラボラにものオ

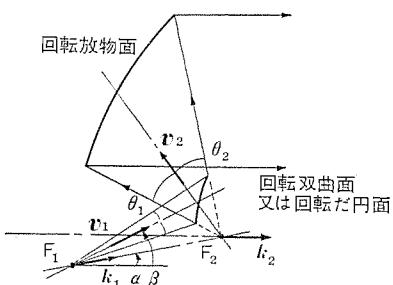


図 4. オフセット カセグレン アンテナ

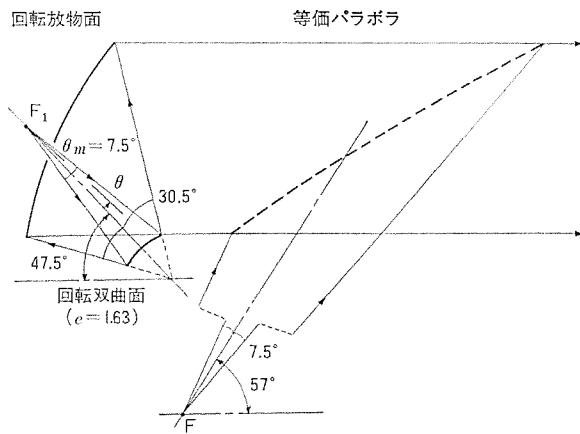


図 5. Open Cassegrain Antenna と等価 パラボラ

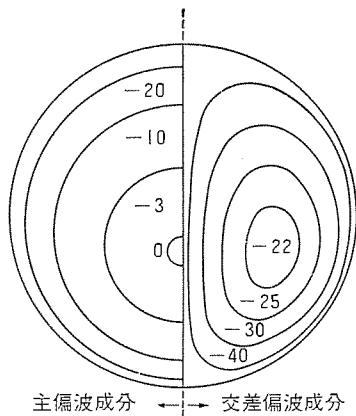


図 6. Open Cassegrain Antenna
の開口分布 (数値は dB)

フセット カセグレン アンテナ の 1 次放射器で照射したときの開口分布として求めることができ、その計算式は一般円錐 ホーリフレクタ アンテナにおいて導かれている⁽⁷⁾。数値例として、Bell 研究所において研究された図 5 の Open Cassegrain Antenna⁽¹⁾についてその等価 パラボラを求めるときの開口分布は図 6 となる。1 次放射器の放射パターンがビーム 軸に関して回転対称であり、 θ に関し、 E_{p0} を定数として

$$E_p(\theta) = E_{p0} J_0(2.405\theta/\theta_m) \quad \dots \dots \dots (19)$$

であるとするとそのときの開口分布は図 6 となる。この図から反射鏡の非対称によって開口分布の回転対称性がくずれるとともに交差偏波発生の様子が明確に分かる。

最近、このようなオフセット カセグレン アンテナにおいて、回転対称な開口分布をもち、反射鏡の非回転対称による交差偏波を消去し得る鏡面系の存在が示唆されている⁽⁸⁾が、このような鏡面系の条件を求めるのにここで述べた等価 パラボラを用いるとその条件式を容易に導くことができる。すなわち、式(15)の等価 パラボラにおいて回転対称軸 k_m と 1 次放射器のビーム の中心軸 v とが一直線上になるようにそのビームを照射することがその条件で、式で表せば

$$k_m \times v = 0 \quad \dots \dots \dots (20)$$

である。式(20)を図 4 で示すような副反射鏡の各定数を用いて表し直すと

$$K \sin(\beta - \alpha) + (1 + p_1 \sqrt{1 - K^2}) \cos(\beta - \alpha) \sin \alpha - \sin \beta = 0 \quad \dots \dots \dots (21)$$

となる⁽⁹⁾。ここで K は式(11)の表示を用いて、

$$K = -2p_1 \delta_1 e_1 / (e_1^2 + 1) \quad \dots \dots \dots (22)$$

である。式(21)から分かるように回転対称な開口分布をもち、反射鏡の非回転対称による交差偏波を消去する条件は、放物面鏡の軸に対する副反射鏡の軸のなす角及び 1 次放射器のビーム 軸のなす角、副反射鏡の鏡面の種類、おうとつ、及び離心率から決まる。この条件は鏡面の パラメータ選定の自由度がかなりあり、実用的な形状寸法の鏡面を得ることが可能である。図 7 は式(21)の条件を満足する反射鏡系の一例である。

以上のような解析手法は、衛星通信地球局に用いられる集束ビーム給電 カセグレン アンテナ の 1 次放射系の設計にも用いられており⁽¹⁰⁾、回転対称なビームをもち、交差偏波成分の小さな反射鏡系が得られている。

6. む す び

最終段が回転放物面鏡からなり、多くの回転 2 次曲面鏡で構成される系が等価的に 1 枚の回転放物面鏡で表しうることを明らかにした。これは従来回転対称なカセグレン アンテナにおいてよく知られている等価 パラボラの概念に類似しており、この

論文は多くの反射鏡から成り、非対称な反射鏡も含まれる場合の等価 パラボラの概念を導いたものである。このような解析手法はアンテナの開口分布、特にその回転対称性や交差偏波特性の解析及び反射鏡系の設計に対し有用である。(昭和 50-7-7 受付)

参 考 文 献

- J. S. Cook, et al. : The Open Cassegrain Antenna, Bell Syst. tech. J., 44, 1255 (1965)
- 西田ほか : 茨城衛星通信所第 2 アンテナ, 三菱電機技報, 43, No. 2, 227 (昭 44)
- 島田ほか : 横須賀衛星通信所用 アンテナ 系, 三菱電機技報, 48, No. 7, 819 (昭 49)
- 松本ほか : 茨城衛星通信所第 3 アンテナ 設備, 三菱電機技報, 47, No. 3, 252 (昭 48)
- M. Born and E. Wolf : Principles of Optics, Pergamon Press, 117 (1964)
- 窪田, 佐々木 : 微分幾何学, 岩波全書 226, 岩波 (昭 32)
- 武市, 片木 : 一般円錐 ホーリフレクタ アンテナ, 信学会 アンテナ 伝播研資, A・P 67-13 (昭 44-6)
- R. Graham : The Polarisation Characteristics of Offset Cassegrain Aerials, IEE Inter. Conf. on Radar, No. 105, 23 (1973)
- 田中, 水沢 : オフセット 複反射鏡 アンテナ における交差偏波消去反射鏡設計, 信学会 アンテナ 伝播研資, A・P 73-84 (昭 49-2)
- M. Mizusawa, et al. : A Beam-Waveguide Feed Having a Symmetric Beam for Cassegrain Antennas, IEEE Trans., AP-21, 884 (1973)

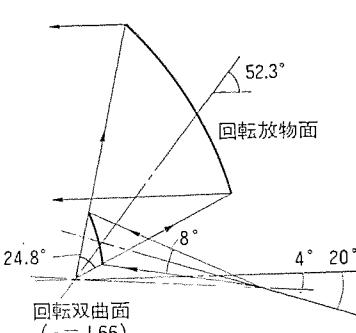


図 7. 交差偏波消去反射鏡
設計の一例

電子腕時計用C-MOS LSI

中山光雄*・坂根英生*・堀場康孝*・安岡晶彦*

1. まえがき

機械式腕時計の精度を飛躍的に向上させたことにより注目をあびて いる水晶電子腕時計用 IC は、また需要の大きさから IC の量産性を 生かせる市場として電卓用 LSI に次ぐ大市場になるものと期待され ている。

現在の水晶電子腕時計には表示方法の違いにより デジタル式と指 針式の 2 方式があるが、いずれも初期の開発段階から性能向上、低 價格化の段階に入り、本格的な普及がはじまりつつある。

このため、この腕時計に使われる IC に対しても低消費電力化、 超小形化、多機能化とともにチップ縮小と歩留り向上に関する技術 レベルの向上が特に要求されている。

以下に報告する指針式水晶電子腕時計用 C-MOS LSI は全機械式 腕時計を含めて国内、国外に例を見ない豊富な機能を腕時計に付加 したものであり、更にパッケージとしても小形化、量産化の点で優れた ミニモード方式をはじめて腕時計用として採用した画期的な LSI で ある。

すなわち、この LSI は 1 年前報告した⁽¹⁾ 指針式水晶電子腕時計用 IC の持つ基本機能として

- (1) 水晶制御発振 (32.768 kHz)
- (2) 16 段分周
- (3) ステップモータ ドライバ
- のほかに
- (4) 発振周波数安定化回路
- (5) 時計組立の際の調時 (精度調整) を簡単にするための分周比 微調機能
- (6) ステップモータ 誤動作に対する自動修正機能
- (7) 時報に合わせて時刻修正するためのワンタッチ 時刻修正
- (8) 任意秒位置からの秒針発進
- (9) 発光ダイオード 点滅機能 (1 分に 1 回、0 秒位置に秒針が来た ときと 1 秒に 1 回、ワンタッチ 時刻修正中に点滅する)

など、時計の精度向上、使用者の時計操作の簡便さ、時計組立の省 力化をねらった新しい機能が豊富に盛り込まれている。

ここではこの LSI の電子回路と製造法について述べる。

2. 電子回路

2.1 システム構成

機械式腕時計の テンプ に代わって、電子式腕時計の精度を決定する ものは水晶振動子であるが、開発当初は 8 kHz, 16 kHz, 32 kHz 等の音き形 +5° Xcut 低周波水晶から 2 MHz 以上のレンズ形 ATcut 水晶に至るまで各種の水晶について適否が論議された。しかし最近では、音き形水晶片の製造技術、+5° Xcut 水晶の温度特性の温度補 償方法の進展に伴い全システムとして廉価化の可能な 32 kHz 水晶を 用いる方向に次第に定着してきている。ただし、SOS 等の LSI 技

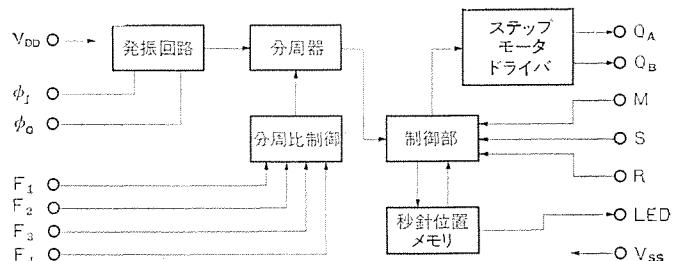


図 1. 指針式水晶電子腕時計用 LSI ブロック図

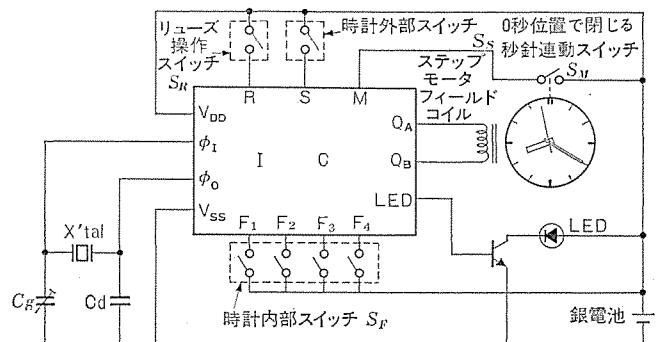


図 2. 指針式水晶電子腕時計の構成

術によつて、高周波での電流増大を抑え、2 MHz 以上の ATcut 水晶を用いる試みも根強く続いている。一方、指針式水晶腕時計の機能については、発振、分周、ステップモータ ドライバ の三つの基本機能に限定した構成が一般的で、各社間の差異は発振、分周、ドライバ の各ブロックの回路構成に認められる程度である。以上の背景において、この LSI では水晶発振周波数としては 32 kHz を選びながらも、前記基本機能に加えて電子腕時計に付加しうる機能を徹底的に追求し、指針式水晶腕時計に新しい将来モデルを提起することを試みた。後述するようにそれらは携行時の操作性向上、環境変化による精度低下の防止、調時 (精度調整) の省力化を意図したものである。また時計ムーブメントの小形化の上から、機能増大に伴う外部端子数の増大を最小限にとどめるため、複数端子の組合せあるいは共用化により、端子数の削減も図っている。

図 1. はこの LSI のブロック図であり、図 2. は外部端子も含めたこの水晶電子腕時計構成図である。

2.2 基本機能

水晶制御発振は C-MOS インバータによる増幅器の入出力間に水晶及び 2 個のコンデンサからなる π 形回路を接続して構成される。上記増幅器は図 3. に示す形のもので、 R_F は C-MOS インバータの電圧増幅率 A_v を最大にする点 (ほぼ $V_{in} \approx V_{out}$ の点) にバイアスするための負帰還抵抗である。インバータの直流入力インピーダンスは 1,000 M Ω 以上あるから、 $R_F < 100$ M Ω であれば直流負帰還率は 1 に近く $V_{in} \approx V_{out}$ となる。これに対し交流的には、インバータの入力インピーダンス Z_{in} がミラー効果のため低下し、電圧増幅率 A_v はほぼ R_F/Z_{in} となり、水晶を含む π 形回路の帰還率を β とすると、バルクハウゼンの

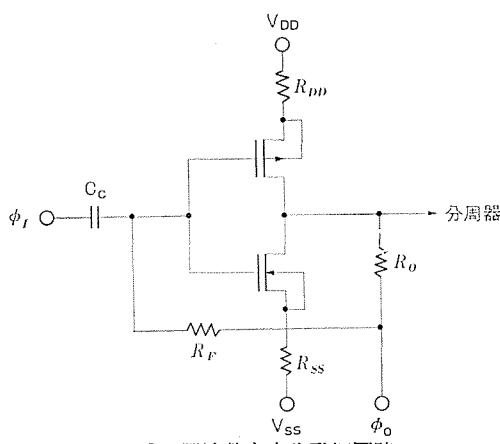


図 3. 周波数安定化発振回路

発振条件 $A_v \cdot \beta \geq 1$ を満たすためには R_F として下限が要求される。通常 $10 \text{ M}\Omega < R_F < 100 \text{ M}\Omega$ であることが必要で、後述するようにこの LSI には多結晶シリコンを用いた精度のよい高抵抗が内蔵されている。

分周電流は、波形整形段及び分周器初段付近の発振周波数に近い周波数で動作するゲートの数及びゲート当たりの容量により決まるが、この LSI の場合、後述の附加機能増大のため発振周波数付近で動くゲート数が通常より多いので 1 ゲート当たりの寄生容量をできるだけ減少させる回路及びパターン構造及びレイアウトを採用している。なおゲート面積の削減によりゲート容量そのものを減少させることも消費電流削減のための一方法であるが、チップ完成後のテスト時間短縮のため高入力周波数に応答できることも必要で、トランジスタサイズの設定には注意を要する。

この LSI は 16 段分周器を有し、分周出力として周期 1 秒の交互反転電流パルスを得てステップモータのフィールドコイルに流しステップモータを 1 秒ごとに往復動作させる。ステップモータはアンクルを介して秒針を 1 秒ステップに進める。

2.3 附加機能

2.3.1 発振周波数安定回路

腕時計用として現在用いられている水銀電池又は銀電池は極めて平坦な放電特性をもつが、放電初期、末期にはやや変化が大きく、また温度特性によっても電池電圧はかなり変動する。図 3. 中の抵抗 R_{DD} , R_{SS} , R_o はかかる電源電圧変動による発振周波数変動を補償するためにそう(挿)入してある。また R_{DD} , R_{SS} , R_o のそう入は消費電流を低減させる効果をも併せ持つおり、これら両効果に対して最適値を与える R_{DD} , R_{SS} , R_o の組合せを考慮して、P ウェル拡散層を用いたバルク高抵抗によって、 R_{DD} , R_{SS} , R_o がこの LSI 中に内蔵されている。

2.3.2 秒針位置メモリ

図 1. に示すこの LSI のブロック図において、秒針位置メモリは秒針が現在どの位置にあるべきかを電気的に記憶するためのものであり 60 秒カウント及び運動するラッチメモリで構成されている。図 2. に示すように秒針が毎分 0 秒位置にくると秒針運動スイッチ S_M が閉じ、秒針位置メモリの内容との照合が行われ、“ずれ”が生じているときは、制御部(図 1.)がこれを修正する。この機能はゴルフインパクトなどの機械的ショックにより、ステップモータが万が一誤動作した場合に備えた機能であり、水晶電子腕時計の高精度を維持するためのものである。

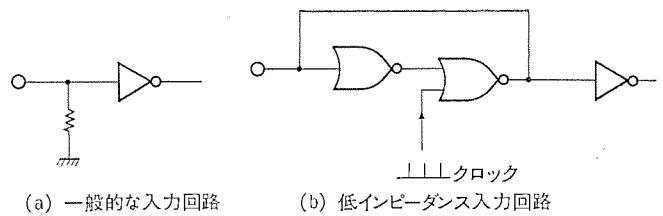


図 4. 入力回路

2.3.3 ワンタッチ時刻合わせ

水晶電子腕時計の高精度をもってしても 1 カ月数秒程度の進み遅れを生ずることがある。一般的な水晶電子腕時計では、時報などによる時刻合わせに際して、あらかじめ秒針が 0 秒位置にきたとき、リューズを抜いて秒針を止めて時報を待ち、時報と同時にリューズをもどす操作が必要である。この LSI では時報と同時に、時計外部のリセットスイッチ S_S (図 2.) を押せば、秒針が進んでいたときはその位置で待機、遅れていたときは早送りして、スイッチ S_S を押した瞬間に 0 秒とする時間系に、秒針及び秒針位置メモリとも修正されるようになっている。

2.3.4 調時(精度合わせ)

この LSI の 16 段分周器の出力の周期は 4 コの時計内部スイッチ S_F (図 1.) で微調(プログラム)できるようになっている。このためステップモータへの出力を正確に 1 秒に合わせ込む調時(精度調整)作業工程が著しく簡略化される。

2.3.5 入力端子の処理

発振部のインバータ入力端子は入力側発振容量 C_g (図 2.) と接続するため、外部に引出されているが、この端子と接地ラインが湿気などにより電気的にリークすると、前述の発振部インバータのバイアスができなくなり発振停止に至る。このためこの LSI ではバイアス用高抵抗 R_F (図 3.) をチップ内蔵した上、同じくチップ内蔵の直流カットコンデンサー C_c を介して入力端子 ϕ_I を外部に引出す方法をとっている。

また、F, M, S, R (図 1.) などの各入力端子は通常 “L” レベルに落としておく必要があり、一般的には通常、高抵抗を入力とアース端子間に接続して電位的に “L” 入力を与える方法が採られるが、この LSI では、上述の湿気による電気リークのあった場合の誤動作を防止するため、図 4. (b) に示すようにラッチ回路を利用して電位を固定する方法が採られている。

これらの処置により湿気に起因する水晶電子腕時計の動作停止はほとんど完全に防止される。

2.3.6 その他の機能

2.3.3 項に述べた時刻修正の際、秒針が早送り又は待機状態に入ったとき、文字盤面にはめ込まれた LED が点滅し、修正動作を行っていることを表示する。

また一般的な水晶電子時計用 IC を用いた場合は、リューズをもどして 1 秒後に秒針発進させるためには、アンクル動作の関係上、リューズを抜いたとき偶数秒位置で止まるよう時計を機構設計することが必要であるが、この LSI を用いた場合は任意秒位置で停止させてもリューズをもどせば 1 秒後の発進が可能である。

3. C-MOS ウエハプロセス

水晶電子腕時計用 IC のウエハプロセスとしては低電圧動作、低消費電力の点から C-MOS が最適とされているが、その製造方式にはアミゲートとシリコンゲート C-MOS の 2 製造方式がある。この LSI は下

記の理由でシリコンゲート C-MOS を採用した。

(1) ゲート構造が自己整合構造で電極間容量が小さいため高周波特性が良い。

(2) 多結晶シリコンとアルミを用いた2層配線が可能で、チップサイズ縮小に適している。

(3) ゲート膜厚を薄くしやすいため、 V_{TH} の低減が行いやすい。

(4) 仕事かん(函)数の値からシリコンゲートは、Pチャンネル MOS Tr のしきい値電圧を低くしやすい。

(5) 多結晶シリコンを高抵抗素子として使用できる。

(6) 多結晶シリコン膜はミニモッドパッケージのメタライズ工程に利用できる。

低電圧動作を特に必要とする腕時計用 C-MOS LSI 特性及びウエハプロセス歩留り向上の点からは、特に P 及び N チャンネル Tr のしきい値電圧 V_{TH} の低減とそのばらつき制御が重要となる。

3.1 シリコンゲート C-MOS ウエハプロセス

シリコンゲート C-MOS ウエハプロセスの工程の概略を図 5. に示す。

(1) N 形シリコンウエハの一部に P ウエル領域を形成する。(図 5. (a))

腕時計用 IC は 1.5 V 以下の電圧で動作することが要求されるため、P ウエル領域に形成される N チャンネル MOS Tr の V_{THN} を 0.5 ± 0.15 (V) に制御する必要があり、このために P ウエルの表面濃度を $1 \times 10^{16} \text{ cm}^3$ 以下に精密制御しなければならない。図 6. は P ウエルへの不純物ドーピング量と N チャンネル MOS Tr の V_{THN} の関係を示す。

次に P ウエル内の N チャンネル MOS Tr の活性領域(ゲート、ソース、ドレイン領域)を除く全面に P⁺ フィールドドーピングを行った後、フィールド酸化膜を形成する。

(2) P 及び N チャンネル Tr の活性領域のフィールド酸化膜を除去し、ゲート酸化膜、窒化膜、多結晶シリコン膜の成長を行う。

ゲート絶縁膜の膜厚は V_{TH} を小さくするためには、できるだけ薄いほうが良い。しかしあまり薄いと多結晶シリコンゲートにドープした不純物がその後の熱処理により基板まで突き抜けて V_{TH} を変化させたり、絶縁膜上のピンホールが生じやすくなったりしてゲートの絶縁破壊を起こしたりする。このためこの LSI ではゲート絶縁膜を酸化膜と窒化膜の 2 層膜構造にして膜の強度を高めるとともに、実効膜厚を薄くしている。また 2 層膜にすると界面不安定性の問題が発生するが、特殊なアニーリング法を開発することによって解決した。

(3) 多結晶シリコン膜形成後、高抵抗素子(後述)を形成するため全面に微量のボロンをドーピングする。この後、不要部分をフォトエッチングにより除去する。(図 5. (c))

(4) 低温酸化膜形成後、P チャンネル領域のフォトエッチングとボロン拡散を行う。(図 5. (d))

(5) 低温酸化膜形成後、N チャンネル領域のフォトエッチングとリン拡散を行う。(図 5. (e))

(6) 低温酸化膜形成後、コンタクトホールのフォトエッチングと Al 配線

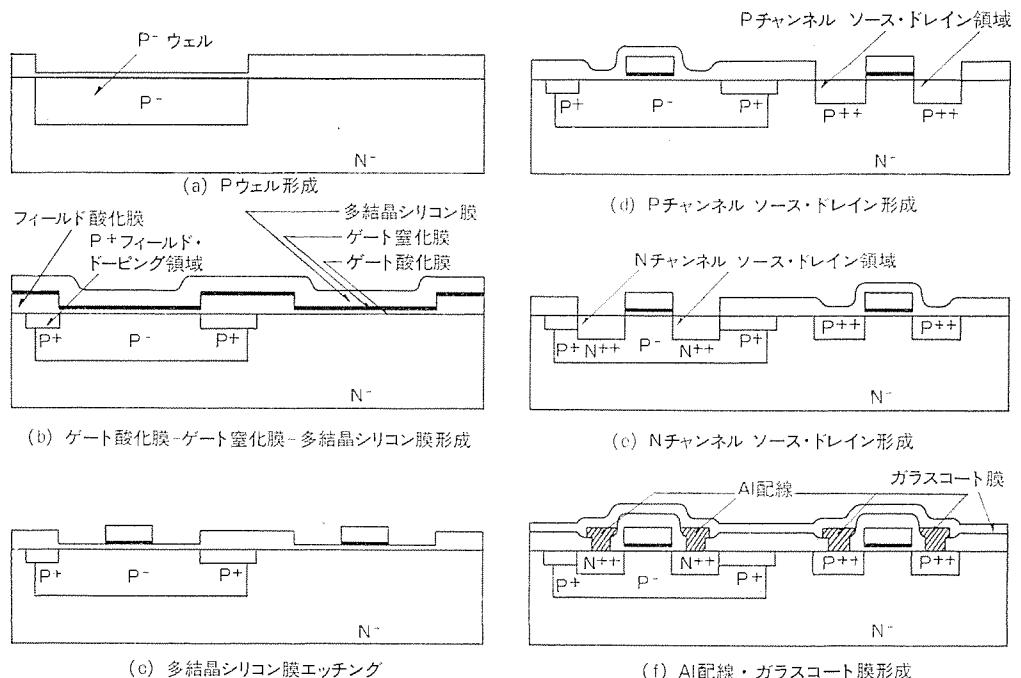


図 5. シリコンゲート C-MOS IC 製造工程の概略

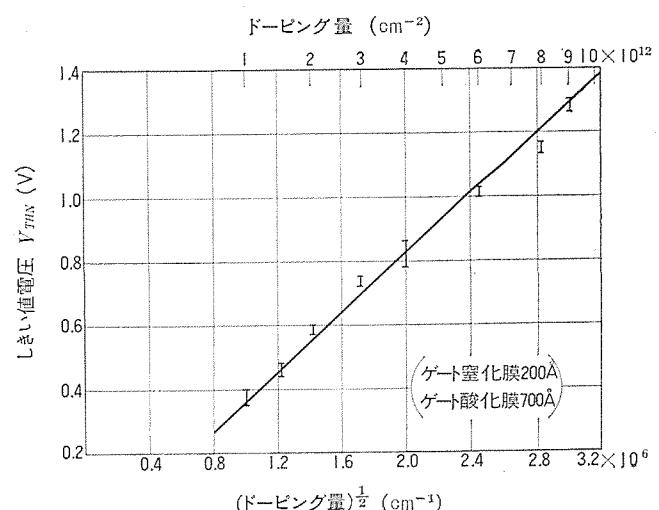


図 6. P ウエル不純物ドーピング量と N チャンネルトランジスタのしきい値電圧の関係

を行う。最後に CVD 法によるリンドープした酸化膜でチップ全面をコーティング(ガラスコート)し、Al 配線の保護と LSI の信頼性向上をはかる。(図 5. (f))

以上がシリコンゲート C-MOS ウエハプロセスの標準工程であるが、この LSI ではミニモッド方式のパッケージを採用しているため、この後、ミニモッド方式パッケージのメタライズプロセスに入る。

3.2 メタライズプロセス

通常のパッケージの場合には、チップ側の最終端子となる Al のボンディングパッド上のガラスコート膜にスルーホールが設けられここに外部リードをボンディングする。

ミニモッドパッケージの場合、Al のボンディングパッド上に Au の突起電極(パンプ)を設け、ここに外部端子をボンディングする。しかし、Al と Au を直接接触させると付着強度などの点で問題があるので、以下に述べる多層金属構造を採用している。Al ボンディングパッド上のガラスコート膜にスルーホールを設けた後、真空蒸着法により、Cr, Ag 膜を連続的に形成する。その後フォトレジスト膜により不要部分をマスク

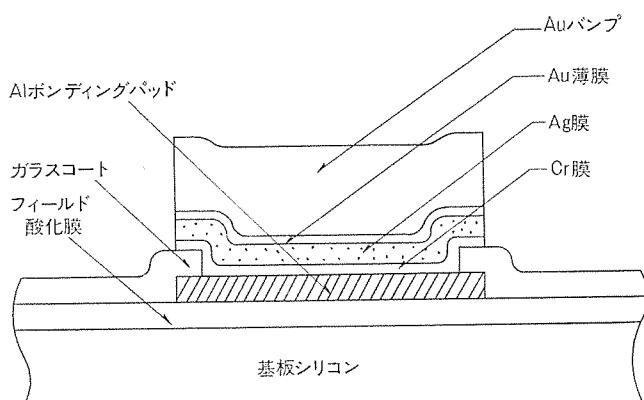


図 7. 金バンプの構造

し、約 10μ の Au 層をめっき法により形成する。最後に、このフォトレジストを除去し Au バンプをマスクとして不要部分の金属層をエッチングにより除去する。

図 7. に示すようにチップはガラスコート膜と耐腐食性の優れた Au 電極により完全にシールされた構造となる。

4. 多結晶シリコン層を用いた高抵抗素子

この LSI には、発振回路部の帰還抵抗（抵抗値 $10\sim100(M\Omega)$ ）が内蔵されている。通常このような高抵抗素子を IC 内部に形成するのは、かなり困難である。この LSI においては、多結晶シリコン膜に微量のボロンをドーピングすることにより、この高抵抗素子を実現した。多結晶シリコン膜は、不純物をドープしない状態では、絶縁膜に近い高抵抗を示す。これにリチウム又はボロンなどの不純物をドープすると抵抗値が低下する。図 8. にボロンのドーピング量、多結晶シリコン膜の膜厚とシート抵抗の関係を示す。 $0.1\sim1(M\Omega/\square)$ のシート抵抗が再現性よく得られれば、 $10\sim100(M\Omega)$ の高抵抗素子が実現できる。

多結晶シリコン膜は多数のシリコン結晶粒で構成され、その結晶粒の境界にはトラップ準位があり、トラップ準位への帶電により電位障壁が形成されている。電気伝導度は主にこの電位障壁により左右され、担体移動度が単結晶の場合より 1 けた以上小さくなる。これが、多結晶シリコン膜が大きな抵抗値を示す原因である。

図 9. (a) IC, 多結晶シリコン膜にボロンをドーピング (ドーピング量 2

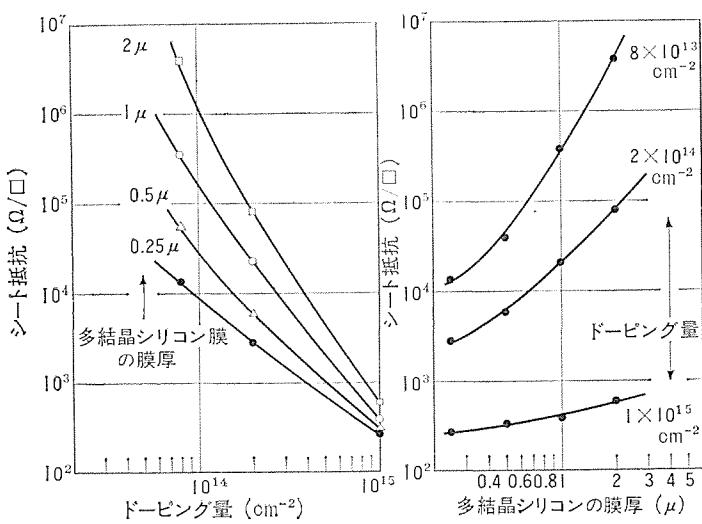


図 8. シート抵抗とドーピング量及び多結晶シリコン膜厚との関係

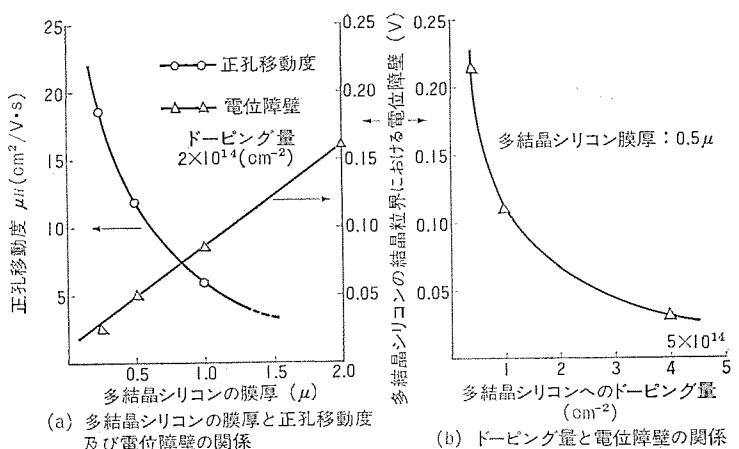


図 9. 多結晶シリコン中の電位障壁及び正孔移動度

$\times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ）したときの膜厚と、電位障壁及び正孔移動度の関係を示す。膜厚が大きくなると電位障壁も大きくなり、Hall 移動度が低下する。図 9. (b) にドーピング量と電位障壁の関係を示す。ドーピング量の減少とともに、電位障壁が大きくなる。電位障壁はシート抵抗の温度依存性より求めた。この抵抗素子は、温度特性、直線性等を含めて、時計用 IC の使用範囲内では問題ない特性を有している。

5. パッケージング

水晶電子腕時計用 IC のパッケージには、小形化という面で従来の IC になかつた外形寸法に対する厳しい要求がある。このため超小形セラミックパッケージや、ハイブリッド方式を採用し、IC とその他の電子部品を同一パッケージ内にコンパクトに組み込んだトータルパッケージなど種々の方法が考案されている。

この LSI のパッケージにはミニモッド方式が採用されているが、その特長は次のとおりである。

- (1) 超小形かつ軽量な実装方式
- (2) 内蔵された LSI と他の部品とを結線するためのプリント配線が行える。
- (3) ギヤングボンディング法、テープアセンブリ法が採用されているため量産性に優れている。

この LSI のパッケージ工程は次のとおりである。

5. 1 基板フィルムの作成

ミニモッド方式では基板としてテープ状のフィルムを用いるが、これは 35 mm 幅の写真用フィルムと同様、フィルムの両端に連続送りのためのスプロケット孔が打ち抜かれており、材質として耐熱性に優れたポリイミドフィルムが使用されている。

次に銅はく (35μ) をこのフィルムに張り合わせ、更にこの銅はくから銅リード端子及び外付部品用の配線がエッチングにより形成される。

なおこのパターン精度はボンディング位置合わせ精度に大きく影響するため、高い精度を必要としている。特に、ポリイミドのパンチングによる打抜き孔と、写真製版後のエッチングによる銅パターンとの相対位置の精度を確保することが技術的に最も難しく重要なポイントとなる。

この後、銅はく上にすず(錫)めっきが施されて基板フィルムが完成する。

5. 2 ボンディング

LSI チップ上にはボンディング電極として最上層を金めっきされた多層

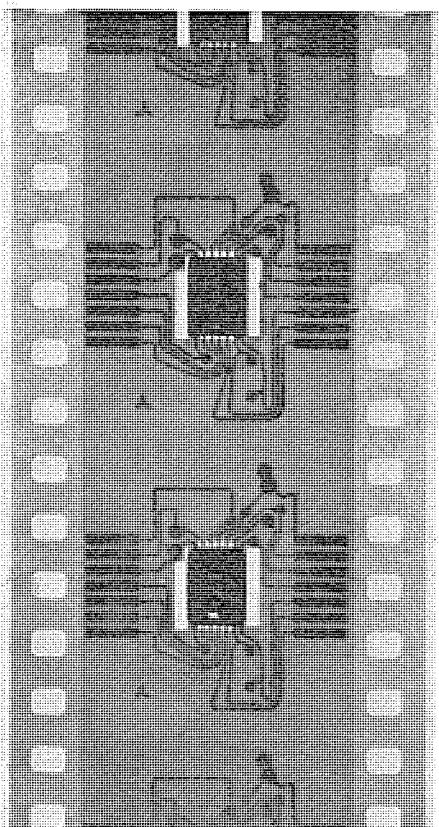


図 10. ボンディング後樹脂封じされた LSI チップ

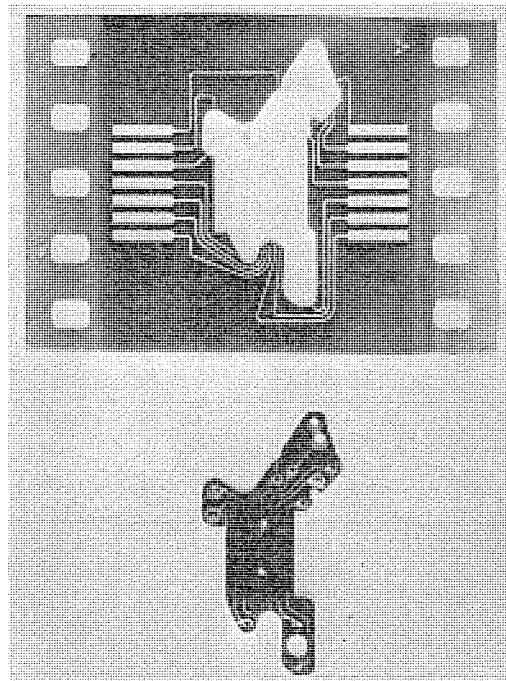


図 11. ミニモッド方式 C-MOS LSI

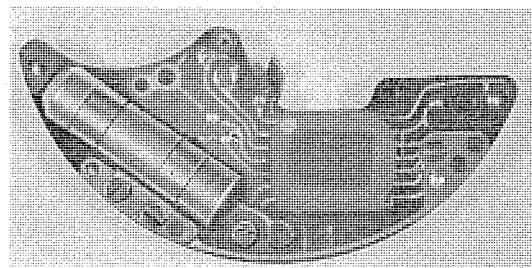


図 12. 電子回路モジュール

金属構造のバンプが形成されているが、ミニモッド方式のボンディングは、まずこの金バンプとすずめっきされた銅リードが位置合わせされ、次いでボンディングツールにより、一定圧力の下で、瞬間に加熱して、金-すず共晶合金を作成することにより金リードの同時ボンディング(ギャングボンディング)を行う。

このボンディングの信頼性は、即 LSI の信頼性と結びつく重要なポイントであり、良好なボンディングを得るためには、次の各項に関する配慮が必要である。

- (1) 金-すずめっきの材質及び厚み
- (2) ボンディング荷重
- (3) ボンディングツールによる加熱及び冷却条件
- (4) 銅リードと金バンプの位置合わせ精度

各条件は互いに影響し合うので、条件調整が不調の場合には金-すず合金中にクラックが発生し、ボンディング強度が著しく低下することがある。しかし各条件の調整が良好な場合のボンディング強度は従来のワイヤボンディングで得られる強度にくらべて 1 けた以上高い値を示す。

5.3 樹脂封じ

樹脂封じは LSI チップ上に液状樹脂を滴下させ、高温キュアにより硬化させる方法を探る。この際、腕時計組み上要求される外形寸法から、基板フィルムを中心にして上下の厚みが一定になるよう樹脂の滴下量をコントロールすることが重要である。図 10. は樹脂封じ後の状態を示す。

5.4 最終仕上げ

環境テスト、再すずめっき、最終検査後出荷される。LSI 電気特性テスト用配線及び端子等は、時計への実装の前に、打抜き除去するため、最終形状は図 11. に示すようにコンパクトでむだのない形となる。

6. む す び

今回、シチズン時計(株)と共同開発のミニモッド方式を採用した指針式水晶電子腕時計用 C-MOS LSI の電子回路と製造法について報告した。

伝統ある機械式腕時計の一部を LSI 化することにより、“精度”に加えて、特に“使いやすさ”の点から新機能の追求を試みたが、従来の全機械式腕時計が現在なお保持している長所、すなわちムーブメントが小形かつ薄くできるため腕時計のデザインの自由度が大きいこと、またムーブメントの加工・組立の自動化により低価格であることをいかに電子化腕時計にも取り入れるかが、この種腕時計に残された大きな課題となりそうである。

C-MOS LSI に対しても更に性能向上と低価格化に対する要求が強まる傾向にあり、技術的にはパターン微細化技術とともに、高周波、高密度、低電力化のための SOP (Selective Oxidation Process) あるいは SOS (Silicon on Saphire) 技術、イオン注入によるソース・ドレイン形成技術、I²L (Integrated Injection Logic) 技術、超小形パッケージ技術等の開発又は実用化が急がれている。

終わりに、この時計用 LSI 開発の機会を与えられ、本文発表に際して資料の提供をご快諾いただきましたシチズン時計(株)に対し厚くお礼申し上げます。(昭和 50-7-10 受付)

参 考 文 献

- (1) 大久保ほか：三菱電機技報、46, No. 10, 1,140 (昭 47)

マイカエポキシ複合絶縁組織の熱劣化機構

岡橋和郎*・林修*・今村孝**・柴山恭一***

1. まえがき

高電圧発電機絶縁組織として広く使われている集成マイカエポキシ絶縁組織の長期信頼性の確認は、総合機能評価試験あるいはヒートサイクルテストによって行われてきた⁽¹⁾。これらの評価において、絶縁破壊を早期に発見するために、コイル寸法の変化や $\Delta \tan \delta$ などの測定による非破壊試験法が採用されてきたが、 $\Delta \tan \delta$ の増大は絶縁組織内の樹脂状物質の分解により生成するポイドに関連していると推定されている程度で、詳細な劣化機構についてはほとんど解明されていない。高電圧発電機絶縁組織のヒートサイクルテスト中に発生する $\Delta \tan \delta$ の増大現象を解明することは、絶縁組織の寿命を推定する上に有用であるだけでなく、新しい高性能、高信頼性絶縁組織を開発するためにも必要である。そこで、一連の化学組成を持つエポキシ樹脂について、エポキシ樹脂単体及びマイカエポキシ複合体の熱劣化を反応の動力学及び分解生成物から研究し、 $\Delta \tan \delta$ の増大と関連させて検討した結果、劣化機構の一端を明らかにすることができた。

2. 実験方法

2.1 試料

試料のエポキシ樹脂組成を表1.に示す。マイカエポキシ複合体は無焼成集成マイカを用い、マイカの重量分率が65%になるように調節した。モデルコイルは、集成マイカテーブを12×50×1,140 mmの鉄棒に巻回して、4.26 mm厚さの絶縁層を作り、それに表1.のエポキシ樹脂を真空含浸させて作製した。モデルコイルの絶縁構成はエポキシ樹脂が30%、ポリエステル不織布が10%、集成マイカが60%の割合であることを確認した。これらの試料の硬化条件は150°C 8時間+175°C 4時間である。

2.2 $\Delta \tan \delta$

$\Delta \tan \delta$ は、5 kV/mmの電界における $\tan \delta$ と 0.5 kV/mmの電界における $\tan \delta$ の差である。 $\tan \delta$ の測定はシェーリングブリッジを用いて、60 Hzで行った。コイルのふくれは、コイル寸法をダイヤルゲージにより測定し、熱劣化前後の寸法変化を求めた。

表1. 試料

| 記号 | 原 料 | 成 分 | 配 合 [*] (重量部) |
|-----|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| B-0 | アラルダイトGY-260 HN-2200 | ビスフェノールA形エポキシ樹脂 メチルテトラヒドロ無水フタル酸 | 100 79 |
| B-1 | アラルダイトGY-260 エポキシ系希釈剤 HN-2200 | — ブタジオールのシグリシジルエーテル — | 80 20 82 |
| B-2 | アラルダイトGY-260 エポキシ系希釈剤 HN-2200 | — — — | 60 40 85 |

* 硬化促進剤としてカブリル酸亜鉛を1%添加した。

2.3 热的性質

熱重量測定(TGと略記する)は、島津製作所製の熱天ばかり(PP)を用い、昇温速度10°C/分、窒素ガスふんい気中で行った。熱劣化中の加熱重量減少率は、160°C、180°C、200°Cの3温度で熱風循環式こう(恒)温炉を用いて行った。試料の大きさは50×50 mmであり、厚さは、樹脂板が0.25 mm、0.50 mm、1.0 mmの3点、マイカエポキシ複合体が1.0 mm、3.0 mm、5.0 mmの3点である。

2.4 热分解発生気体

5×3×40 mmのマイカエポキシ複合体の5個を、真空に排気したガラス容器に封入し、180°Cで8日間熱分解させて生成した気体を捕集し、質量分析装置(日本電子製JMS-015 G形)により分析した。

2.5 物理的、機械的性質

線膨脹係数の測定は、ASTM 696-44の方法により行った。接着強度の測定は、25×25 mmの鉄片間に表1.のエポキシ樹脂あるいはエポキシ樹脂を含浸させた集成マイカをはさみ、10 kg/cm²の圧力でプレス硬化させ、引張り試験機により5 mm/分の条件で行った。抗張力は、JIS-K 6911の方法により測定した。

3. 実験結果と解析

3.1 热劣化における $\Delta \tan \delta$ の変化

180°Cで熱劣化させたときのモデルコイル及びマイカエポキシ複合体の $\Delta \tan \delta$ とコイル寸法の変化を表2.及び表3.に示す。 $\Delta \tan \delta$ の初期値が非常に小さいことから、ポイドのない密な絶縁組織がつくれられていることが分かる。180°Cで熱劣化させると、次第に $\Delta \tan \delta$

表2. モデルコイルによる180°C熱劣化後の $\Delta \tan \delta$ とコイルの寸法変化

| 試料 | 初期値 | | 熱劣化後 | | | |
|-----|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| | | | 8日間 | | 16日間 | |
| | $\Delta \tan \delta$ (%) | 寸法変化 (mm) | $\Delta \tan \delta$ (%) | 寸法変化 (mm) | $\Delta \tan \delta$ (%) | 寸法変化 (mm) |
| B-0 | 0.00 | 0 | 0.19 | 0 | 0.24 | 0.01 |
| B-1 | 0.01 | 0 | 7.20 | 0.47 | 11.78 | 1.50 |
| B-2 | 0.01 | 0 | 12.89 | 1.88 | 13.30 | 1.98 |

表3. マイカエポキシ複合体による180°C熱劣化後の $\Delta \tan \delta$ と寸法変化

| 試料 | 初期値 | | 熱劣化後 | | | |
|-----|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| | | | 8日間 | | 16日間 | |
| | $\Delta \tan \delta$ (%) | 寸法変化 (mm) | $\Delta \tan \delta$ (%) | 寸法変化 (mm) | $\Delta \tan \delta$ (%) | 寸法変化 (mm) |
| B-0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.01 | 0 |
| B-1 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.03 | 0 |
| B-2 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.05 | 0.01 |

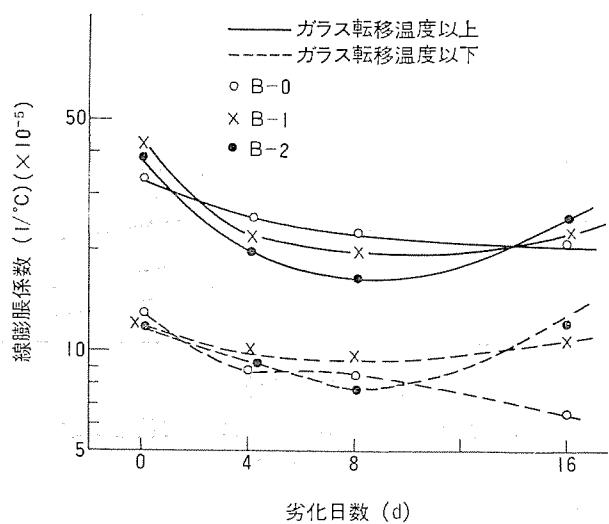


図 1. マイカエポキシ複合体による熱劣化後の線膨脹係数の変化

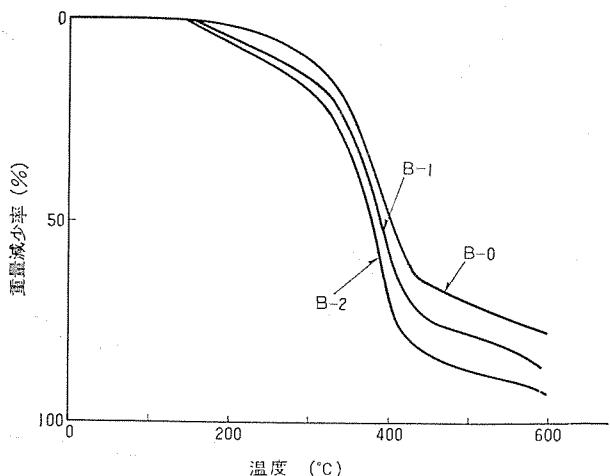


図 2. 热重量曲線

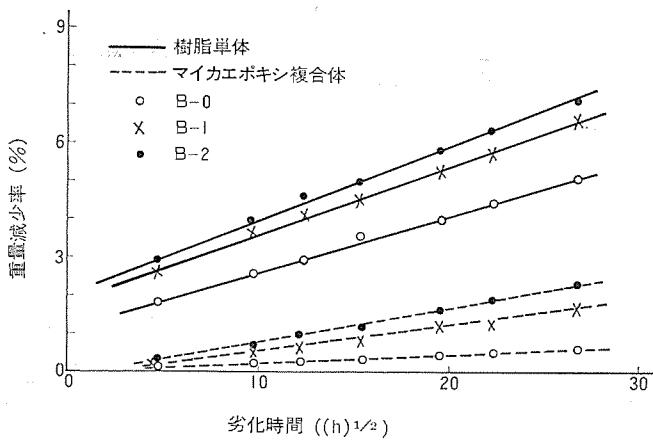


図 3. 樹脂単体及びマイカエポキシ複合体の180°Cにおける加熱重量減少率(試料の大きさは樹脂単体が50×50×0.5 mm, マイカエポキシ複合体が50×50×3 mm)

やコイル寸法が大きくなっている。エポキシ系希釈剤の添加量が多くなるほど、この傾向は更に大きくなっている。モデルコイルを使用した場合は、マイカエポキシ複合体に比べて $\Delta \tan \delta$ の増大が大きくなっている。

180°Cで熱劣化中のマイカエポキシ複合体のガラス領域とゴム領域における線膨脹係数の変化を図1に示す。ビスAエポキシ樹脂-酸無水物系(B-0)の線膨脹係数は、熱劣化が進行するにつれて減少しているが、B-0にエポキシ系希釈剤を添加した系(B-1, B-2)の線膨脹係数は、180°C8日間で極小値を示し、180°C16日間では、180°C8日間より高い値を示している。このことは、B-1, B-2では、熱劣化中に微小ポイドが発生していることを意味しており、 $\Delta \tan \delta$ 増大現象の結果と一致する。

3.2 热分解の動力学

エポキシ樹脂単体及びマイカエポキシ複合体の熱劣化挙動をTG及び重量減少率により、反応速度論の立場から解析した。

TGによって得られた各試料のTG曲線を図2に示す。TG曲線から熱分解反応速度を求める方法については多くの報告があるが、ここでは基本的と考えられるFreeman-Andereson法⁽²⁾(式(1))により解析した。

$$\Delta \log (d\omega/dt) = n \Delta \log W_r - (\Delta E/2.3R) \Delta (1/T) \quad \dots \dots (1)$$

ここで $d\omega/dt$ は反応速度、 n は反応次数、 ΔE は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度、 W_r は残存率である。TG曲線を式(1)により解析した結果を表4に示す。熱分解反応は、試料B-0、B-1では3段階、B-2では2段階で進行し、活性化エネルギーはエポキシ系希釈剤の添加量が多いほど低くなる傾向にある。また、熱分解は初期、中期では0次反応、後期では2次反応により進行している。

エポキシ樹脂単体及びマイカエポキシ複合体の180°Cにおける重量減少特性を図3に示す。加熱重量減少率は劣化時間の1/2乗に比例する。更に、樹脂単体の厚さを0.25 mm、1.0 mm及びマイカエポキシ複合体の厚さを1.0 mm、5.0 mmと変化させ、また温度も160°C、200°Cと変化させた場合も、劣化時間の1/2乗に比例する結果を得た⁽⁶⁾。

3.3 热分解生成物

180°Cで8日間熱劣化させたマイカエポキシ複合体から発生する気体の種類を図4に示す。図4以外にも、エチレン、プロピレン、トルエン、水、ノルボニレンなどが少量発生した。これらの発生気体の由来を調べるために、アラルダイトGY-260、エポキシ系希釈剤、HN-2200をおののおの、180°Cで熱分解させて、分解生成物をガスクロマトグラフ-質量分析法で測定すると、アラルダイトGY-260からは、トルエン、ベンゼン、アクリレン、プロピレン、アセトン、炭酸ガスが発生し、HN-2200からは、シクロペンタジエン、トルエン、マレイン酸無水物などが発生し、エポキシ系希釈剤からは、テトラハイドロフラン、アクリレン、プロピレン、アセトン、炭酸ガスなどが発生した。なお、エポキシ系希釈剤の添加量が増加するにつれて、発生ガ

表4. 热重量解析

| 試料 | 初期反応 | | | | 中期反応 | | | | 後期反応 | | | |
|-----|----------|---------|--------------------|------|----------|---------|--------------------|------|----------|---------|--------------------|------|
| | 加熱温度(°C) | 重量減少(%) | 活性化エネルギー(kcal/mol) | 反応次数 | 加熱温度(°C) | 重量減少(%) | 活性化エネルギー(kcal/mol) | 反応次数 | 加熱温度(°C) | 重量減少(%) | 活性化エネルギー(kcal/mol) | 反応次数 |
| B-0 | 0~230 | 0~3 | 16.8 | 0 | 230~320 | 3~14 | 7.4 | 0 | 320~600 | 14~67 | 26.2 | 2 |
| B-1 | 0~200 | 0~5 | 3.2 | 0 | 200~270 | 5~12 | 6.2 | 0 | 270~600 | 12~77 | 22.0 | 2 |
| B-2 | 0~290 | 0~16 | 5.2 | 0 | | | | | 290~600 | 16~87 | 17.1 | 2 |

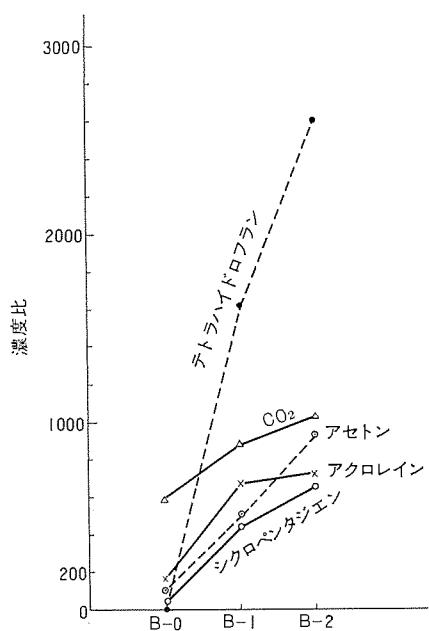


図 4. マイカエポキシ複合体の熱分解生成物 (180°C 8日間)

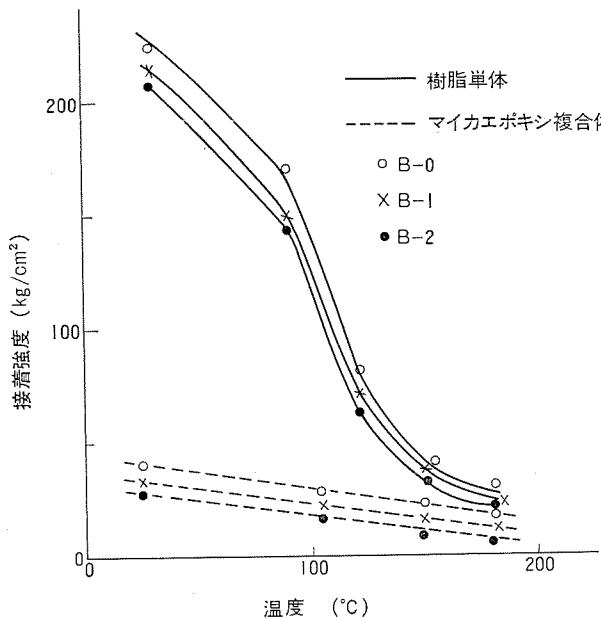


図 5. 接着強度の温度特性

スの濃度比が増加しており、加熱重量減少率の結果と対応している。

3.4 热劣化中の機械的、物理的性質

エポキシ樹脂単体及びマイカエポキシ複合体の接着強度の温度特性を図5.に示す。低温領域では樹脂単体の接着強度のほうがマイカエポキシ複合体よりはるかに高いが、高温領域では両者の差が小さくなっている。この結果及び目視観察から、接着破壊の形態は、低温領域では鉄片と樹脂層、あるいはマイカと樹脂層の界面破壊、高温領域では凝集破壊又は凝集破壊と界面破壊の混合系であると思われる⁽³⁾。図6.に、マイカエポキシ複合体の180°Cで熱劣化中の接着強度の変化を示す。接着強度は劣化時間の1/2乗に比例して減少しており、重量減少率が劣化時間の1/2乗に比例することと同じ傾向にある。

空気(air), 窒素(N₂), 炭酸ガス(CO₂)ふんい気中において180°Cで熱劣化させたマイカエポキシ複合体の加熱重量減少率と抗張力の値を図7., 8.に示す。いずれの場合も、CO₂>air>N₂の順に、熱劣化

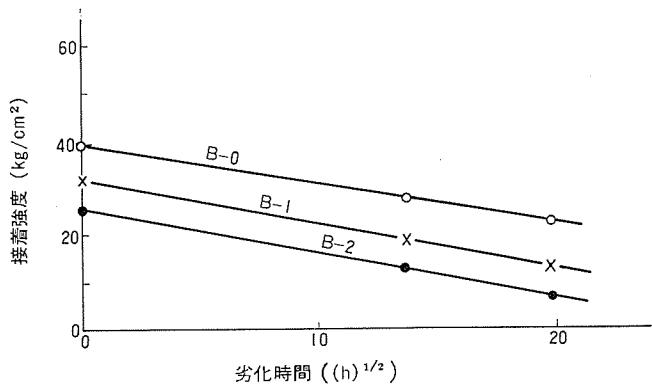


図 6. マイカエポキシ複合体の180°Cにおける接着強度の熱劣化特性 (測定温度 25°C)

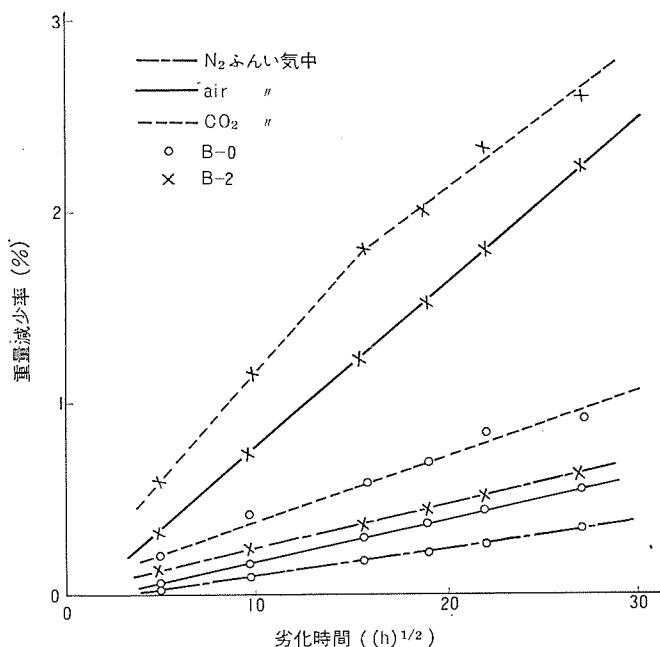


図 7. 各種気体中におけるマイカエポキシ複合体の熱劣化中における重量減少率 (劣化温度 180°C)

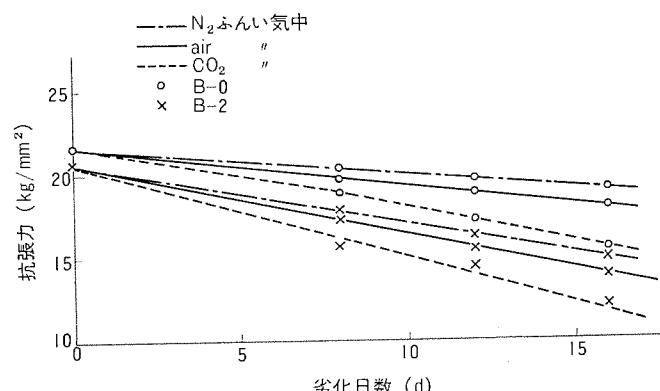


図 8. マイカエポキシ複合体の各種気体中における熱劣化中の抗張力の変化

中の抗張力の低下と重量減少率の増加が見られる。

4. 考 察

4.1 热劣化中の微小ボイド

モデルコイルとマイカエポキシ複合体について熱劣化後の $\Delta \tan \delta$ を比較すると、マイカエポキシ複合体のほうがはるかに小さい。熱劣化中における両者の化学的変化はまったく同じであると考えられるから、この差異はモデルコイルとマイカエポキシ複合体の幾何学的形状及び導体(鉄)の有無による内部応力の差が原因であると考えられる。しかし、マイカエポキシ複合体を熱劣化させた場合、 $\Delta \tan \delta$ の増加及び線膨張係数の解析から熱劣化中に微小ボイドが発生していることは確実であり、次に微小ボイドの発生機構及びモデルコイルを用いた場合の $\Delta \tan \delta$ 増大現象について考察を進める。

4.2 热劣化の律速段階

熱劣化の温度域によって活性化エネルギーが変化することは、3.2節で述べたTG解析の結果から明らかである。これを説明するために、熱劣化反応の素過程として、酸素の絶縁物内への拡散と反応を考慮に入れた理論が提案されており、絶縁物内の酸素濃度 C_0 は式(2)で示されている⁽⁴⁾。

$$C_0 = C_1 \exp \left\{ - \left(\frac{kC_2}{D} \right)^{1/2} a \right\} \quad (2)$$

ここで、 k は反応速度定数、 D は拡散速度定数、 a は絶縁物表面からの距離、 C_2 は酸素の初期濃度、 C_1 は定数である。式(2)を更に近似して絶縁物を平面として取扱い、熱劣化は拡散律速($D \ll k$)によって支配されると仮定すると式(3)のようになる⁽⁵⁾。

$$\frac{da}{dt} = \frac{K_0 D (C_1 - C_0)}{a} \quad (3)$$

ここで、 t は時間、 K_0 は定数である。 C_0 を一定として式(3)を解くと式(4)のようになる。

$$a^2 = 2K_0 D (C_1 - C_0) t \quad (4)$$

絶縁物単位体積当たりの初期重量を W_0 、劣化時間 t の重量を W_t 、単位体積当たりの分解生成物量を V 、未反応絶縁物の密度を d 、絶縁物厚さを h とすると式(5)のようになる。

$$\begin{cases} W_0 - W_t = aV \\ W_0 = hd \end{cases} \quad (5)$$

したがって、重量減少率 W は

$$W = \frac{W_0 - W_t}{W_0} = \frac{aV}{hd} \quad (6)$$

となり、これを整理すると、式(7)、(8)のようになる。

$$W = Bt^{1/2} \quad (7)$$

$$B = \frac{K^{1/2}}{h} \quad (8)$$

ここで、 K は $2DV^2K_0(C_1 - C_0)/d^2$ に等しく、熱劣化の速度定数である。そこで、見かけの速度定数 B と試料厚さ h との関係をプロットすると式(9)に示すような関係が得られた⁽⁶⁾。

$$B = \frac{K^{1/2}}{h} + S \quad (9)$$

すなわち、実験結果が理論式(7)、(8)のとおりに原点を通らないがいすれも直線になることから、この実験に用いたエポキシ樹脂単体及びマイカエポキシ複合体の加熱重量減少率は、酸素の拡散律速反応であることが分かる。式(8)で求めた重量減少率の速度定数を劣化温度に対してプロットすると直線関係が得られ⁽⁶⁾、活性化エネルギーを求めることができる。以上の結果を整理すると表5. のようになる。樹脂単体の重量減少率はマイカエポキシ複合体に比べてかなり大きいが、速度定数 K は 200°C、180°C では樹脂単体のほうが小さい。 S 値の理論的意義は不明であるが、速度定数 K を補正するものであり、試料の種類や劣化温度によりかなり数値が異なるので、重量減少率を比較する場合は K 値と S 値の両方を考慮しなければならない。活性化エネルギーは、エポキシ系希釈剤の含有量が多くなると小さくなっています。また、マイカエポキシ複合体は樹脂単体より約3倍高い。

4.3 热分解機構

この実験に用いたエポキシ樹脂の化学構造の概略図を図9. に示す。この化学構造から各気体の生成機構を推定すると次のようになる。Aの部分からはアクリレイン、アセトンが、Bの部分からはシクロペンタジエン、CO₂ が主として発生する。テトラハイドロフランはB-0の試料からは発生しないで、B-1とB-2の試料のCの部分から発生する。エポキシ樹脂の硬化剤であるHN-2200の存在比は各試料ともほとんど変わらないのに、エポキシ系希釈剤の添加量が増加するにつれて、図9. のBの部分から発生するシクロペンタジエンが大幅に増えている。また、硬化エポキシ樹脂中のエステル結合の存在比(表1. の原材料配合モル比からエステル結合の存在比を計算すると、B-0が1に対して、B-1が1.01、B-2が1.05になる)に比べてCO₂の発生量が非常に多い。更に、図9. のAの部分に相当するエポキシ基の存在比(表1. の原材料配合モル比から計算すると、B-0が1に対して、B-1が1.14、B-2が1.25になる)に比べて、アクリレインやアセトンの発生量が非常に多い。これらの原因の詳細な検討はまだ完了していないが、この実験に用いたエポキシ樹脂の硬化促進剤がカプリル酸亜鉛であるため

表5. 加熱重量減少率の拡散律速的解析

| 試料 | 樹脂板 | | | マイカエポキシ複合体 | | | | |
|-----|----------|--|--------------------|--------------------------|----------|--|--------------------|--------------------------|
| | 劣化温度(°C) | 速度定数 $\left\{ \frac{(\text{mm} \cdot \%)^2}{h} \times 10^2 \right\}$ | 活性化エネルギー(kcal/mol) | S 値($S \times 10^2$) | 劣化温度(°C) | 速度定数 $\left\{ \frac{(\text{mm} \cdot \%)^2}{h} \times 10^2 \right\}$ | 活性化エネルギー(kcal/mol) | S 値($S \times 10^2$) |
| B-0 | 200 | 2.69 | 16.9 | -2.39 | 200 | 57.8 | 50.3 | -69.4 |
| | 180 | 1.08 | | -2.06 | 180 | 3.61 | | -16.1 |
| | 160 | 0.46 | | -3.46 | 160 | 0.33 | | 5.09 |
| B-1 | 200 | 8.41 | 13.3 | -7.02 | 200 | 100 | 43.0 | -90.0 |
| | 180 | 4.00 | | -8.39 | 180 | 11.5 | | -26.6 |
| | 160 | 1.77 | | -7.00 | 160 | 1.21 | | -9.21 |
| B-2 | 200 | 67.2 | 10.5 | -48.0 | 200 | 400 | 34.8 | -334 |
| | 180 | 38.4 | | -42.0 | 180 | 110 | | -97.5 |
| | 160 | 22.1 | | -37.0 | 160 | 13 | | -34.0 |

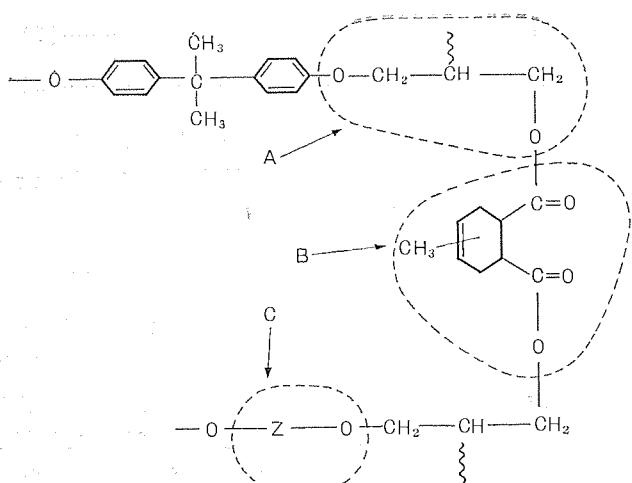
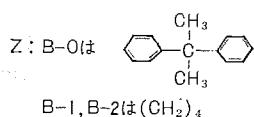


図 9. 硬化エポキシ樹脂の化学構造



に、B-0 の場合は、エーテル結合が 22.2% 生成するが、B-1, B-2 の場合は、エポキシ系希釈剤のエーテル化反応がビスフェノール A 形エポキシ樹脂より遅いためにエーテル結合の生成量が少ない⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

エステル結合とエーテル結合の差は、CO₂の発生量への直接の影響のほかに、両者の結合強度の差による全分解生成物量の相違も影響していると推定できる。更に、図 9 の A の部分から発生するアセトンが、アクリレインに比較して、エポキシ系希釈剤の添加により直線的に増加しているのは、エポキシ希釈剤のエポキシ基の部分が水酸基を形成しやすく、その水酸基が脱水素反応を起こしてケトンを生成する⁽⁹⁾からであると思われる。

4.4 热分解と拡散

樹脂単体及びマイカエポキシ複合体の加熱重量減少率及びTGより求めた熱劣化の活性化エネルギーが大きいほど、熱劣化後の $\Delta \tan \delta$ が小さいことが分かる。これは、熱劣化中のエポキシ樹脂の重量減少が $\Delta \tan \delta$ の増大に大きな影響を与えていていることを意味する。熱劣化中の分解反応は酸素とマイカエポキシ複合体の表面樹脂層とがまず反応する。4.2 節で述べたように、熱劣化は酸素の拡散律速により支配されているから、酸素と表面の樹脂層との分解反応が完了すると酸素はより内部（モデルコイルの場合は導体側）へ拡散していく。酸素と樹脂との反応による分解生成物は複合体内部に蓄積され、劣化の進行とともに濃度が大きくなる。すなわち、劣化の初期には式(2)で示されるような鋭い酸素濃度こう配（表面層のほうが酸素濃度が大きい）が形成され、その内部には酸素はほとんど拡散されず、未反応部分が残されている。劣化の進行とともに、この鋭い濃度分布

表 6. 180°C 16 日間熱劣化後の接着強度と初期接着強度との比

| 試 料 | $\frac{A_{16}}{A_0}$ |
|-----|----------------------|
| B-0 | 0.58 |
| B-1 | 0.44 |
| B-2 | 0.32 |

A_0 : マイカに対するエポキシ樹脂の接着強度

A_{16} : 180°C 16 日間熱劣化後のマイカに対するエポキシ樹脂の接着強度

の層が漸次導体側へ移動していく。分解生成物の場合も同様であり、酸素と樹脂層との反応が起こっている位置において濃度が大きく、劣化の進行とともにこの濃度分布が漸次導体側へ移動していく。したがって、熱劣化中のある期間では、表面側は酸素濃度が大きく、内側（導体側）は分解生成気体の濃度が大きい定常状態を保っているものと考えられる。

それゆえ、3.4 節で述べたように、分解物として生成する CO₂ はマイカエポキシ複合体の諸性質を悪化させる要因になるので、熱劣化中の $\Delta \tan \delta$ の増大はマイカエポキシ複合体内部に存在する酸素及び分解生成物の両者が寄与していると思われる。図 5. で述べた熱劣化中の接着強度特性を、初期値と 180°C 16 日間熱劣化後の値の比 (A_{16}/A_0) として整理すると、表 6. のようになり、 $\Delta \tan \delta$ の小さいものほど A_{16}/A_0 値は大きい。このことは、マイカと樹脂間の接着力が、熱だけではなく、CO₂ などの影響を受けて弱められることにより微小ポイドが発生し、 $\Delta \tan \delta$ が増大するものと思われる。更に、モデルコイルの場合は、CO₂ などにより弱められたマイカとエポキシ樹脂との界面に導体の熱膨脹や収縮に起因する応力を受けて凝集破壊を起こし、 $\Delta \tan \delta$ が増大するものと思われる。（昭和 50-7-7 受付）

参考文献

- (1) 柴山、平林ほか：三菱電機技報、48, No. 3, 291 (昭 49)
- (2) D. A. Anderson, E. S. Freeman : J. Polymer. Sci., 54, 253 (1961)
- (3) 畑：接着協会誌、8, No. 2, 64 (昭 47)
- (4) 日野：電気学会連合大会シンポジウム (昭 44, 仙台)
- (5) 耐熱性試験法専門委員会：電気学会技術報告 (昭 49)
- (6) 柴山、岡橋、林：2nd BEAMA, International Electrical Insulation Conference, London, May. (1974)
- (7) 岡橋、林、柴山：日本化学会第 26 春季年会 (昭 47)
- (8) 岡橋、林、柴山：日本化学会第 29 秋季年会 (昭 48)
- (9) D. P. Bishop, D. A. Smith : J. Appl. Polymer. Sci., 14, 205 (1970)

生産自動化のための新しい計測及び加工技術

稻荷 隆彦*・渡辺 光人*

1. まえがき

昭和40年ごろから積極的に取組まれ始めた生産設備の自動化は、その後の高い経済成長による労働力不足と製品の高度化に対応するために生産のあらゆる方面にわたって要請され、最近10年間にもっとも集中的に努力の払われた部門である。内外の情勢の変化により、経済成長のパターンは変わりつつあるが、自動化の必要性が減少したわけではない。すなわち、材料費及び人件費の上昇に対応し、内外の厳しい競争に打ち勝つためには、現状に合った自動化、合理化による生産性向上への努力は以前にも増して強く要求されている。

電機メーカーにおける特長的な生産形態である個別生産(Discrete Manufacturing)の代表的な工場モデルにおける物と情報の流れは図1.に示すようである⁽¹⁾。ここで生産自動化の最初の段階は、物の流れ、すなわち直接的な作業工程に対するものであった。まず、既設の生産ラインのうち、容易に自動化できそうな部分へ機械を投入して、作業者を減らそうと試みられた。そしてこれまでに数多くの専用加工機、組立装置、マテリアルハンドリング装置、NC機械、自動試験装置などが作られ、それぞれ生産性の向上に寄与してきた。しかし、そのような範囲は、特に経済性を考えると、限られており、また局部的な自動化を積重ねるだけでは、全体として見る場合に矛盾があるので、もっと総合的なとらえ方をするとか、従来とは違った新しい方式をとり入れるとかしなければ、大幅な生産性の向上は望めなくなってきた。

こうして生産自動化は第2段階に進み、単体機械の自動化からラインの自動化へと大形化し、そこには複雑な機械、装置がたくさん

含まれるようになった。そしてそれらをうまく動かすために、機械、装置のか(稼)動状況や生産状況を監視、管理するモニタリングシステムが導入され、間接作業の自動化が図られるようになってきた。これは図1.において、操業管理から生産管理の一部を含む部分の自動化である。計算機を利用した群管理システムはこの段階の自動化と見ることができる。

更に第3段階の生産自動化としては、生産管理、経営管理システムと組合わされたトータルシステムとしてとらえようとする方向、すなわち Integrated Manufacturing System へと進む方向にある⁽²⁾。

このように生産システムが大形化するとともに、計画段階でのミスは技術的にも経済的にも決定的な影響を及ぼすようになり、失敗は許されなくなってきた。このため、経験や勘に頼る要素をできる限り無くするような自動化技術の開発は一層重要になっている。

一方、自動化の進行とともに、特に機械化しやすいところから自動化していくことの結果、人間の作業が機械の側からの規制されるようになり、いわゆるダーティジョブ化した部分がでてきた。それに対する反発が生まれたこと、及び教育程度が高くなり作業者の高学歴化が進んだ結果、レベルに合った意義のある仕事が要求されるようになったことなどから、新しい仕事のやり方が探究されるようになった。これに対しては工場の無人化という構想もあるが⁽³⁾、技術的、経済的な理由から近い将来に実現するとは期待できない。とすると、Job Enlargement や Job Enrichment のように人間性を強調することによって作業者の仕事に対するモチベーションを高めるとか、作業者の働きやすさも考えた自動化などの方法についても、新しいやり方を開発しなければならない。

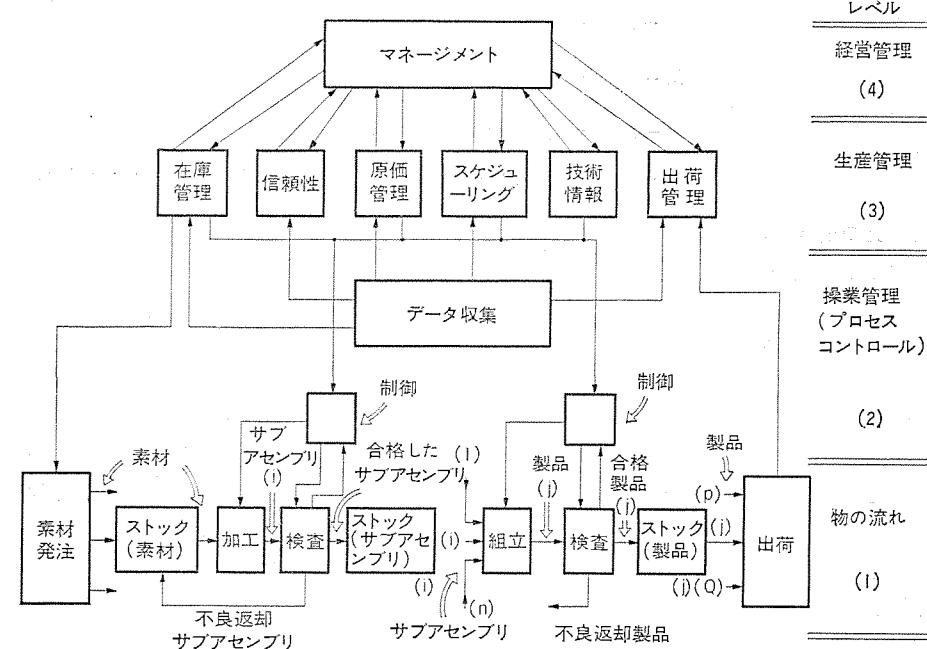


図1. 代表的な工場における情報と物の流れ

これらの多様な要求にこたえるには、従来からある自動化の技術を組合せ、より合理的なシステムを合成する研究を進める一方で、新しい技術を開発し、自動化が困難とされていた部分の打開も真剣に検討されねばならない。これらの新しい技術により、より高いレベルの新しいシステムが可能となり、実現していくことになる。

このような意味から、現在我々が最も大切と考えアプローチしている課題の第1は人間のもつ特有の五感や認識機能に頼る単純作業の実用的な代替であり、第2は製造プロセスそのものを自動化、ないしは合理化という観点から見直し、研究することである。本文では当研究所でとり上げている二、三の研究例につき、内容と動向を簡単に述べる。

2. 新しい自動化技術

2.1 統計的手法による官能検査の自動化

高度な自動化を実現するための一つの大きな課題として、人間の感覚による検査作業の自動化があげられる。その中でも騒音、振動などを判断する、あるいはブラウン管上で描かれる電気信号波形を見て判定するといった作業は非常に大きなウエイトを占めている。こういった検査の特徴は、①入力情報が極めて複雑な“波形”であること、②その

“波形”が簡単な、かつ特徴的な数値で表すことが難しいこと、③更に人間の判断とその“波形”との関連が複雑で、多様であることである。

このような課題の一つの解決策として最近注目され始めているのがここで述べる統計的手法の利用である。統計的手法による自動化は一般的に次の手順をふむ。まず相関関数、パワースペクトラム、バイスペクトラム、コヒーレンス関数といった関数を、入力波形から計算し、これにより入力波形に内在する統計的な特徴を抽出する。次にこの抽出された特徴と、真にほしい情報（検査の場合であれば不良品を示す情報）を示しているかどうか検討し、次にその特徴を検出して、例えば不良品と良品を区分する。すなわちこの場合には複雑で、ほしい情報が内在している入力波形からその特徴を抽出する段階で、前述の統計的手法を用いるところに特徴がある。

このような統計的手法自身は従来より知られた方法で、特に音響や振動の解析技術として用いられてきた。この場合は前述の手順のうち特徴を抽出するところまでであって後の手順は自動化という課題から初めて必要性が現れてきたものである。抽出された特徴も一つのパターンとしての情報であり、これをどう処理するかは自動化技術の範囲に属する一つの課題である。前述の諸関数の演算はもちろん計算機に頼らねばならず、こうした技術も最近高速フーリエ変換などの高速積分演算が小形計算機で可能になって初めて現場にて用いる技術としての現実味を帯びてきたと言える。

上に述べた特徴抽出から判定の検出、処理系の基本構成は図2.に示すとおりである。研究段階で特徴を抽出できるかどうか、それがほしい情報を表しているかどうか検討する段階では大形計算機により前述の諸関数の計算を行う。図3., 4.にその一例を示す。これは小形モータの極めて低い騒音をマイクロホンで検知したもので、図はそのパワースペクトラムである。図3.は現場で良品とされているもの、図4.は不良品とされているものである。このように元の波形では区別が困難なものが、パワースペクトラルを演算することにより、不良品を示すスペクトル（図中○印で示す）が抽出されることが分かる。

このような技術により、前述したような従来困難とされていた複雑な入力波形の検査といった作業の自動化も大きく推進されることが期待される。またこのような技術は機器の異常を検知する故障検知システムや、従来波形を目視するように作られていた種々の計測機器の自動化などにも有力な手段を提供することが期待される。

2.2 光学的手法による目視作業の自動化

前述の人間の感覚に頼る作業のうち、最も大きいウエイトを占めているのは目視に頼る作業である。人間が目視により行う作業は例えば金属表面の欠陥の検査を考えてみても、極めて複雑で感覚的なものであることが分かる。すなわち、この場合も大部分は数値化の困難

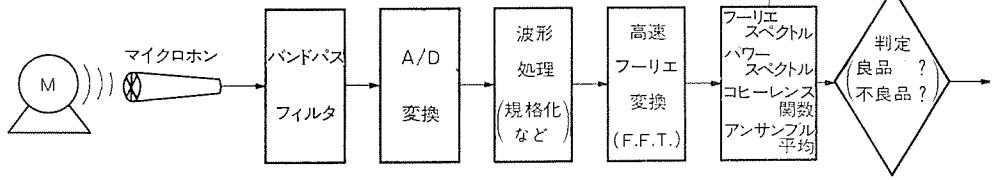


図2. 統計的データ処理による検査の自動化

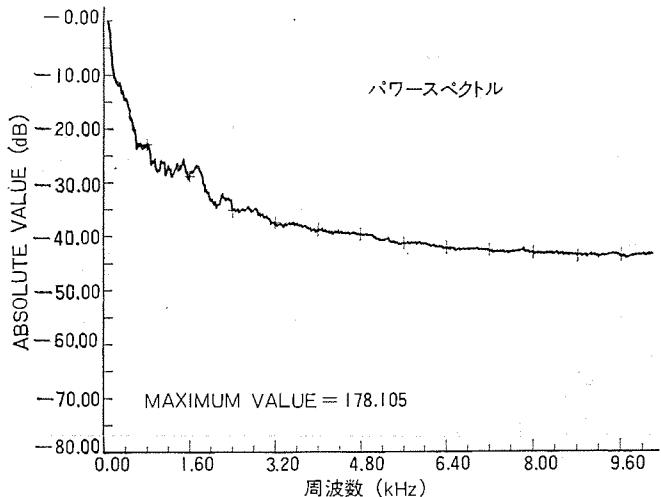


図3. 低騒音モータの音響のパワースペクトラル分析（良品）

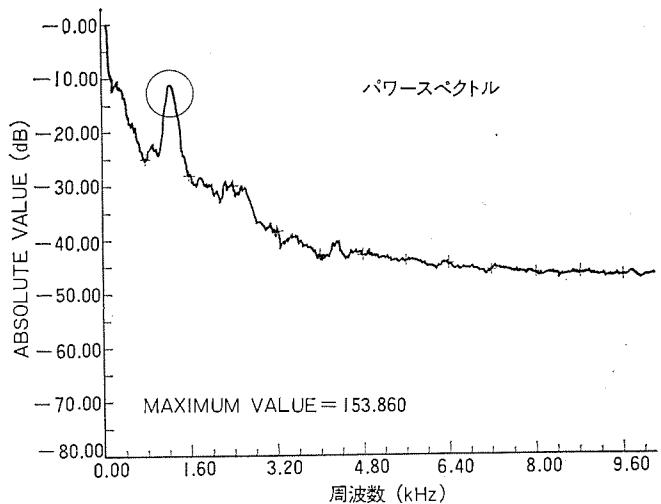


図4. 低騒音モータの音響のパワースペクトラル分析（不良品）

なパターンとしての情報を扱うことになり、その自動化は本質的にはパターン認識の問題に帰着する。こうした問題は人間が機械に対し最も力を発揮する代表例であるが、しかし大部分の作業は人間にとてはやはり過酷な単純作業であることにには間違いない。

目視による作業の代表的なものは、一つには前述の官能検査の一例である目視検査、第2には組立作業その他のにおいて物体の形や位置を検知して制御することである。形にあらわれた作業はそうであるが、しかし検知するという機能という点では、技術的にはほとんど共通である。

目視作業の場合には入力情報はもちろん光学的なものであり、入力を扱う装置としては種々の光検知器の外に、1次元に検知器を配

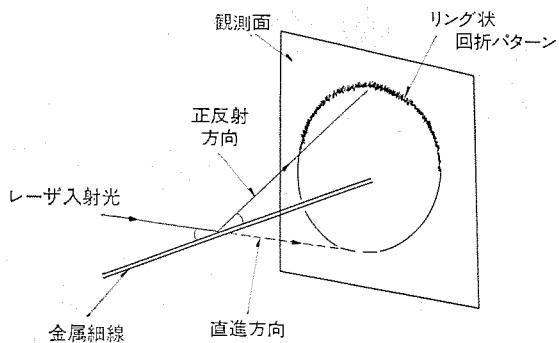


図 5. 金属細線からのリング状回折パターンの形成

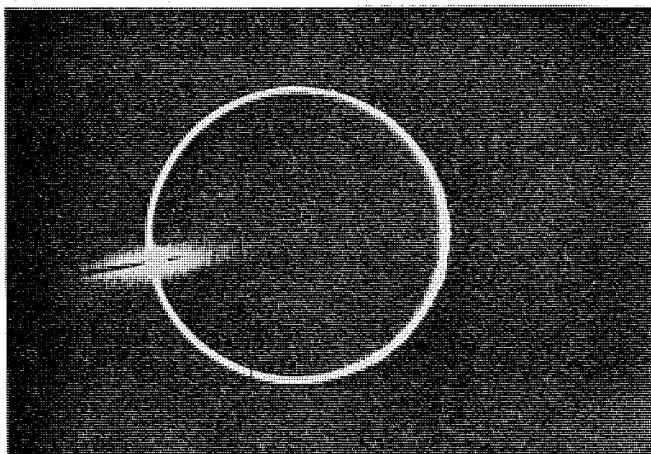


図 6. 正常な細線表面からの回折パターン (レーザ光走査中)

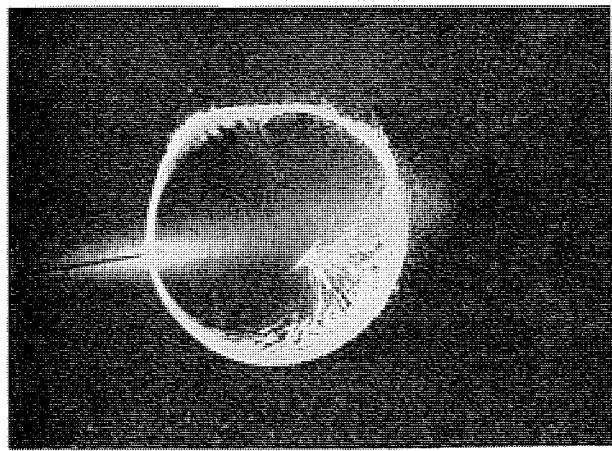


図 7. 表面に欠陥のある場合の回折パターン (レーザ光走査中)

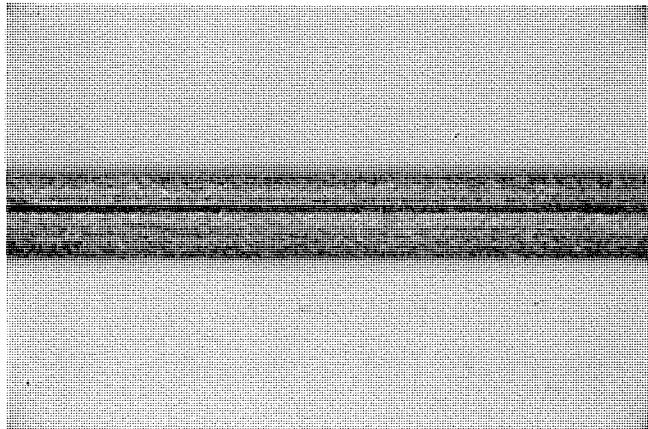


図 8. 欠陥のある細線の顕微鏡写真
(線径 0.5 mmφ 長手方向のワレ傷)

列したアレイ形のもの、2次元に配列したマトリックス形、ないしはテレビカメラ等が用いられる。一般的な形としては、こうした検知器で光情報は電気信号に変えられ、これを計算機又は専用的な電子装置により処理され、判定される。しかし本質的にはパターン認識の問題であるため、電気的処理が膨大となり、これだけのシステムで実用的な装置にするには、限られた対象に対してだけとなる。ただし限られた対象ではあっても、最近では相当多くの実用化された装置が作られ、使用されている。

このような問題を扱う手順はまず入力情報をできるだけ光学的に処理して、少なくとも光検知器が応答するのに十分な光学情報を与え、更にできるだけ入力情報から特徴を抽出しておくよう工夫する。一般的にできるだけ光学的処理をおこない、電気的処理の負担を小さくしておく方が実用的である。

レーザの応用はその意味からも期待されるものの一つである。レーザの特長は種々の方面に応用できるが、自動化技術の観点から最も興味深いものはその回折の容易さである。レーザ光はその可干渉性により表面粗さ程度の表面構造により回折をうけ、極めて容易に回折パターンを形成する。その回折パターンは表面からの反射光分布のパワースペクトラムで表され、表面構造の統計的な特徴を示すものとなる⁽⁴⁾。この回折パターンをいろいろな方法で検知することにより、表面構造の微細な乱れや、半導体工業に多く見られるような微細なパターン構造の形や位置の検知の有力な方法となる。

図 5. に我々の開発した細線表面のオンライン欠陥自動検査装置の原理的な構成を示す⁽⁵⁾。細線に限らず、一定の方向性のある構造をもった表面に対し、その長手方向に傾斜した方向からレーザ光を照射した場合、反射光は回折によりその細線を中心軸とした円錐上を進み、細線と直角におかれた観察面では三日月状の回折パターンを形成する。表面に欠陥のある場合、このパターンに乱れが生ずる。また光線を細線に対し直角方向に走査すると、この三日月状パターンは自身の円の上を回転する。図 6. は細線が正常である場合の走査中の回折パターンで、露出時間中に何回もパターンは回転しているので、完全な円になってみえる。図 7. は欠陥のある場合で回折パターンが乱れているのがよく分かる。図 8. はその場合の細線表面の顕微鏡写真である。この回折パターンの乱れは、このパターンだけを通して光検知器に光を入れる空間フィルタにより検知され、生産中の細線の欠陥をオンラインで検査することができる。

このような細線のほかにも生産中の金属板表面の検査には、レーザは既に実用段階に入っている。この場合は一般的に光の検知そのものは比較的容易であるが、光線の走査や検知系の配列などに相当苦心が払われ、現在実用段階のものも種々の方式のものが使われている。前述の回折パターンの形状より、欠陥の大きさ、形状を自動的に選別するものも実用段階にある。

種々の部品の表面検査にもレーザは応用されている。図 9. は我々の開発したレーザ式の小形歯車の歯先検査機であり、図 10. に検知された欠陥歯先を示す。この装置では歯先欠陥はやはり回折パターンの乱れにより検知し、一方で歯先の背面におかれて透過していく光を検知する検知器の出力と比較する方式がとられている。この場合は歯車を回転させ、レーザ光は歯車の直径方向に走査している。こうした検査機の信号処理はいずれも簡単な専用装置で行っている。

微細パターンの検知は、例えば微細パターンからの反射(又は透過)光の形成する回折パターンにより行う。図 11. は半導体素子(a)からの回折パターン(b)である⁽⁶⁾。これがもし表面上の1本の線に照射さ

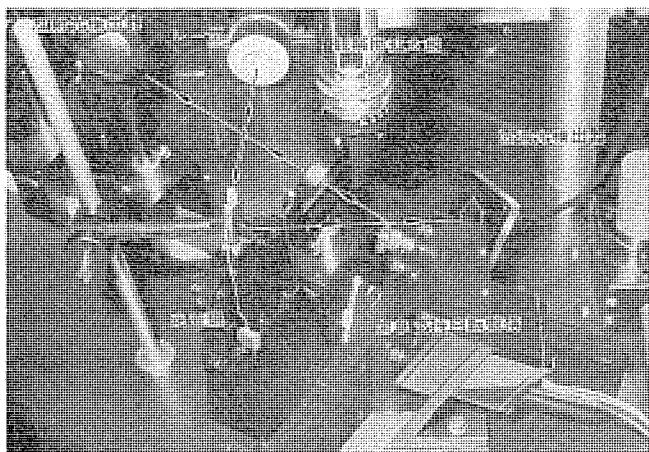


図 9. 小形歯車の歯先検査機 本体部

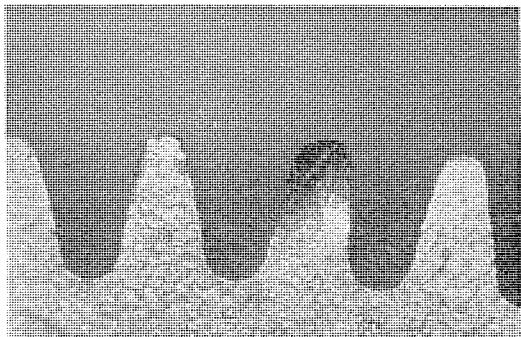


図 10. 小形歯車歯先の欠陥例

れていれば、その線に直角方向に広がった回折パターンが生じ、この形、方向より微細表面の線が簡単に検知される。我々はこれを用いて半導体素子の方向選別を行った。また同様な原理は LSI 用マスク検査などにも応用が可能である。このように新しい光学的処理手法を導入することにより、従来困難であった多くの課題を解決する可能性が見出されてきている。

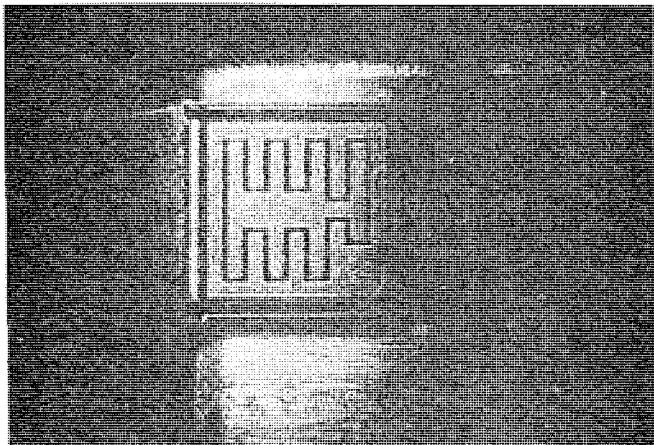
2.3 視覚付ロボットによる3次元物体の位置方向検出

ここ数年、いわゆる産業用ロボットが生産ラインに導入される例は増えている。しかし現在では、まだ簡単な機能のものが中心であり、ロボットは対象に適応できず、導入に当たっては生産工程において種々の条件を整備しなければならない。一方、製品の多様化に対する要求を満たすために多種生産へと移行する必要があり、また単純な繰り返し作業には人を集めにくくなっている。その解決方法の一つとして、視覚、触覚などの感覚と組合せたロボットの研究開発が各所で進められている。

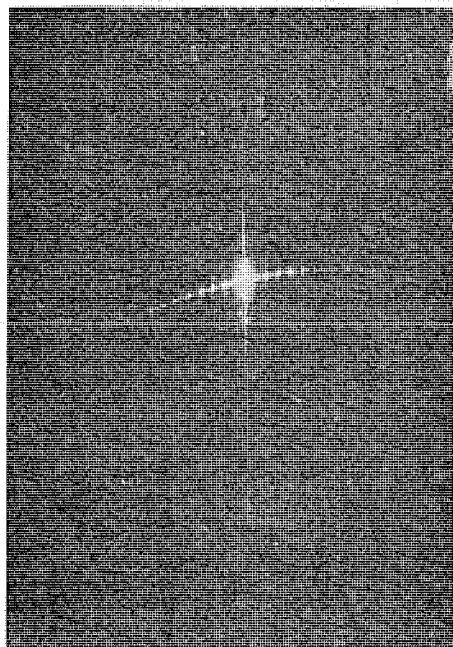
当社では、手先に小形テレビカメラを組込んだ視覚付ロボットの研究を行っており、平面上におかれた柱体を対象に2次元的情報による形状判別と位置決めの方法、更に機能を拡張し3次元空間にある物体の位置、方向の検出技術を開発した。

3次元空間にある物体の位置、方向の決定には、2台のテレビカメラを用いたり⁽⁷⁾、スリット光の投影⁽⁸⁾などが試みられているが、ここでは1台のテレビカメラだけを用いて、空間内を移動させることにより行っている。

視覚付ロボットは図12に示すような、(6+1)自由度を持つ円筒座標形ロボットであり、その2本の指の間に小形テレビカメラを内蔵している。そのテレビカメラの光軸は、ロボットの手の回転の中心軸と一致していて、物体は(把)握るために手を向けたとき、対象物体の状



(a) 半導体素子表面(レーザ光を全面に照射している)



(b) 回折パターン

図 11. 半導体素子表面の微細構造による回折パターン

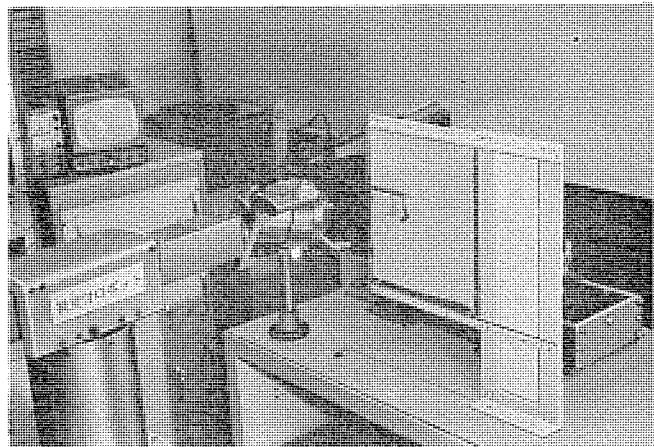


図 12. 視覚付ロボット

態を観測できるようになっている。対象物体としては、図13に示すようなリード線つきの直方体を選んだ。

対象物の位置、方向検出の動作順序は、まず作業領域内に対象物体を機械的な方法で粗位置決めした後、テレビカメラを動かしながら重

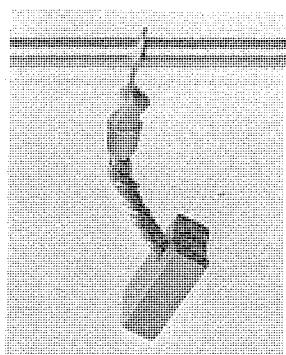


図 13. 対象物体—リード
線付直方体

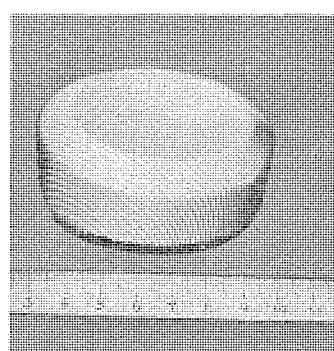


図 14. プリペイント板を利用
した絞り加工品

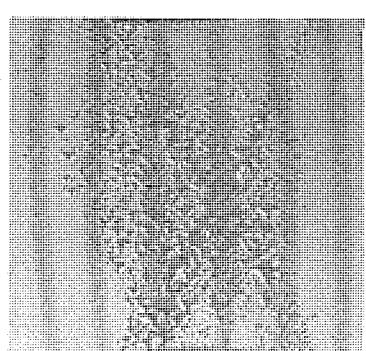


図 15. 引張り試験後の塗膜
剝離状態

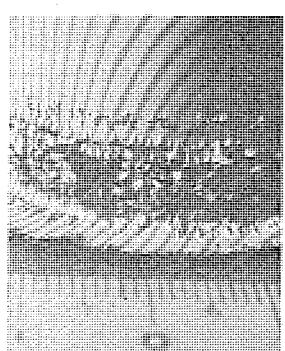


図 16. 絞り試験後の
塗膜剝離状態

心測定、距離測定、及び 3 方向の角度測定を行う。このロボットの制御にはミニコンが使われているが、そのアルゴリズムの詳細、精度検討については別に詳しい報告があるので⁽⁹⁾、参照していただきたい。

2.4 プリペイント鋼板の応用

従来、薄鋼板は成形加工後めっきや塗装を施して美観を備え、耐食性を付加してきたが、

- (1) 省力化……………人件費の増加対策、悪環境下の作業追放
 - (2) コストダウン……………工程省略や削減
 - (3) 環境衛生対策……………排ガス、排水処理設備の省略
 - (4) 製品品質向上……………高級化、多様化動向に対応
- などを目的として、SPC、SPG を表面処理鋼板に変える傾向にある⁽¹⁰⁾。プリペイント鋼板はこの表面処理鋼板の一種で、平板時に（つづ状あるいは切板状）塗装されており、各種の加工に耐えるものである。

プリペイント鋼板自体は古くから知られていたが、主として価格の面と特有の欠点があるため多用されてはいなかった。特有の欠点というものは、①切断面がむき出しになり、外観及びさびが問題になる、②加工・運搬工程で傷、汚染を防ぐ必要があり、取扱いがやっかいである、③薄鋼板に最も多く使われるスポット溶接が使えない、ことである。しかし、環境衛生問題がクローズアップされるようになり、プリペイント鋼板の使用を真剣に考える必要がてきた。

プリペイント鋼板を本格的に使用するためには、上述の欠点を克服するために、幅広い研究が必要になるが、ここではその一環として加工性に関して述べる。プリペイント鋼板を使って絞り加工した部品の例を図 14. に示すが、塗膜の基本的性能として加工に耐える必要があり、塗膜の機械的性質のは握は重要である。そのための方法としては、エリクセン試験、ごん目試験などがあるが、ここではその一つとして、JIS 5 号試験片による引張り試験を行い、各種塗膜の性質を調べた。図 15. はアクリル系塗料の場合であり、原板の伸びが 28% くらいから剝離が起こっている。一方、実際の加工実験も行い、図 16. は同じ材料に対する絞り試験の結果の例を示す。ここでも剝離は原板の伸びが 30% 前後のところで起こっており、応力状態が違っていても、主として一軸伸びが支配的な変形をするとところでは引張り試験の結果が適用できそうである。

技術的な問題は解明されつつあり、今後コストが下がれば本格的に採用され、プリペイント鋼板のメリットを発揮すると期待される。

3. む す び

自動化技術は生産のあらゆる面に関係しており、その内容は個別的、具体的であり、かつ極めて広範囲な技術分野を包含している。また対象とするシステムは大形化と同時に内容的にも、例えば従来人間にしかできなかった作業の自動化のように、技術的にも困難な課題の解決を必要としてきている。

一方で機械技術、計測制御技術、更には材料技術、その他広範囲にわたる各専門分野で技術の革新が進行している。今後の自動化技術としては、これらを活用することにより、高度な自動化技術の開発や、合理化の観点からの製造プロセスの革新等の上記の課題を解決していくことが是非とも必要である。それにより更に人間との協調の上に立つ新しい生産システムを作り出していくことが可能になると考えられる。(昭和 50-6-9 受付)

参 考 文 献

- (1) J. L. Hammond et al. : Evolution of Systems Approaches to Computer Control in Discrete Manufacturing, IEEE Trans. on Manufacturing Technology, MFT-2, No. 1 (1973)
- (2) 壱井：生産システムの自動化、三菱電機技報、48, No. 8 (昭 49)
- (3) 機械工場無人化モデル作成報告書、機械技術協会 (昭 50)
- (4) T. Inari : Automatic Detection and Control of Surface Roughness by Coherent Diffraction Patterns, 16th SPIE Meeting, P. 47 (1972)
- (5) 稲荷、亀井：レーザ回折パターンによる金属細線表面欠陥の検出、輻射科学研究会資料 (昭 49-12)
- (6) 稲荷ほか：レーザスペックルパターンによる半導体素子の表面パターン自動検出、第 10 回 SICE 学術講演会予稿集, P. 611 (昭 46)
- (7) 松島ほか：相関を利用してした工業用ロボットの目に関する研究 (第 1 報), 第 11 回 SICE 学術講演会, No. 3202 (昭 47)
- (8) 電子技術総合研究所彙報 (ETL ロボット MKI 特集号), 35, No. 3 (昭 46)
- (9) 壱井ほか：視覚付ロボットによる 3 次元物体の位置方向検出の一方法、電子通信学会 パターン認識と学習研究会資料 (昭 50)
- (10) 金生：表面処理鋼板の種類と特性、プレス技術 (昭 49)

冷凍・空調設計用ソフトウェア

笠置 紘*・大坪道夫*

1. まえがき

冷凍・空調機器の普及、コンピュータの発達とともに設計技術の高度化・省力化・高速化などの要求が高まってきたので、空調設計用ソフトウェアの充実をはかり、今まで多くのプログラム開発を行ってきた。これらのプログラムは建物の冷暖房負荷計算から各種のシステムシミュレーションにまで、また機種についても冷蔵庫・ルームエアコンをはじめ各種の熱回収システムまでと幅広い。これらプログラムを駆使することによって営業部門への技術的援助、設計の高度化・省力化、システムや制御法の検討が可能となりそのおののへ活用されてきている。冷凍・空調用ソフトウェアはこのように幅広い研究や技術の確立に寄与している。今回このなかから主なプログラムの概要を紹介し、また、比較的最近開発し、利用・普及を期待している「マルチセントラルシステムシミュレーション」と「冷蔵庫のシミュレーション」の二つを選びプログラムの内容、利用方法などについて述べる。

2. 開発したプログラムの概要

今まで開発・利用しているプログラムの主なものについてその概略の内容・アウトプット・使い方について述べる。

2.1 冷暖房負荷計算プログラム

建物の冷暖房負荷計算法は種々あるが、負荷の性格としては定常負荷と非定常負荷とに分かれ、この二つを計算するプログラムを利用している。

前者は相当温度差、ストレージロードファクタなどを用いた比較的一般性のあるもので、後者は単位熱パルスに対する応答係数を計算するレスポンスファクタ法によっている。建物の冷暖房負荷計算は空調システム設計の基礎であるから、これら負荷計算プログラムの商談での使用ひん(頻)度は多く、現在当社のはん(汎)用プログラムとして活用している。

これらの負荷計算プログラムは建物の状況・計算条件及び気象データを与えた場合、各時刻の定常及び非定常冷暖房負荷を各部屋ごとに計算するようになっている。

2.2 空対空ヒートポンプシミュレーションプログラム

このプログラムは室内・室外の条件によって特性が刻々と変る空対空ヒートポンプを住宅やビルに取付けて運転した場合、種々の外部条件や使用状況に対して室温(特に立上がり・立下がり状態)がどのようになるか、また使用しているヒートポンプのON-OFF状況・COPが計算され、年間のランニングコストをアウトプットするようになっている。

このヒートポンプシミュレーションにはブースタヒータや蓄熱暖房器との組合せ使用によるシミュレーションも可能となっている。

このプログラムは今まで補助熱源の大きさ決定・ヒートポンプとの組合せの技術的検討・販売地域での能力推定や機種選定などの営業面でも利用されている。

2.3 蓄熱暖房器のシミュレーションプログラム

深夜電力を利用し、レンガに蓄熱する蓄熱暖房器のシミュレーションを行うものである。蓄熱暖房器を例にしたとき、1台1室暖房・1台多室暖房・暖房給湯兼用などが考えられる。これらの熱バランス・室内の温度状況・残熱量・使用電力量などいろいろな条件を与えたとき、各条件ごとに動作を解析するようになっている。このプログラムも前述のヒートポンプのシミュレーションプログラムと同様、ヒータ容量・制御方法などの技術的検討とともに、機種選定などの営業用資料作成にも役立っている。

2.4 空調機のパフォーマンス作成プログラム

このプログラムでは技術資料となるための空調機のパフォーマンスを各条件ごとに計算可能としたので、パフォーマンス算出の省力化・高精度化を計ることができた。計算は圧縮機の性能・各熱交換器の特性から、与えた条件(吹出しや吸込み空気温度・冷却水温度・外気温度など)ごとに能力と入力を計算するものである。適用機種は水冷又は空冷のパッケージエアコン、パッケージヒートポンプの各シリーズをはじめ他の機種にも利用できる。

2.5 蓄熱式ヒートポンプシステムシミュレーションプログラム

省エネルギーの観点から一般のビルにかなり普及が進んできた蓄熱式ヒートポンプシステムの各システム要素(熱源機・ポンプ・ファン・蓄熱槽など)の設備容量の選定・消費電力を計算するプログラムである。このプログラムは後述するマルチセントラルシミュレーションプログラム及びダブルバンドル方式シミュレーションプログラムとともに熱回収空調方式の検討のための資料を得る目的で開発したものである。このプログラムによって商談が発生したビルでの営業・受注活動用のシステム設計が即時に可能となり、前述の二つの熱回収方式のシミュレーションプログラムとともにシステム設計面での利用を期待している。また現在ではこれらプログラムにより、空調システムの検討・熱回収システムの各種条件下での経済性検討などを行っている。

2.6 日射量解析プログラム

太陽冷暖房・給湯システム研究のための基本的な問題である日射量を解析するため、いくつかのプログラム開発をしている。これらのプログラムは最終的には各都市・季節・時刻及び集熱面の傾斜及びその方向により、それぞれどれだけの日射量が得られるかを計算するものであるが、この計算には日射量の測定データを与えたり、理論計算を行ったり、また日射出現率を統計的に解析したりする入力の仕方・計算処理の方法などによりいくつかのプログラムに分かれている。現在、これらのプログラムを利用して太陽冷暖房・給湯システムの各種の検討用資料を作成し、利用している。

2.7 太陽集熱器(コレクタ)シミュレーションプログラム

このプログラムは同じく太陽冷暖房・給湯システム研究の一環としてコレクタの集熱効率、最適構造設計を行うためのシミュレーションプログラムである。コレクタには低温用・高温用などいろいろな構造が考えられるが、これらについてそれぞれの熱モデルを設定し、シミュレーションを

表 1. プログラム入出力の一例

| プログラム名 | インプットの概略 | アウトプットの概略 |
|----------------------------|---|---|
| 冷暖房負荷計算プログラム (定常・非定常計算の両種) | 建物の状況、内部負荷の状況、計算条件、気象条件 | 各計算条件 (指定した月日) での各時刻の定常は非定常、冷暖房負荷 |
| 空対空ヒートポンプシミュレーション プログラム | 建物の各時刻負荷、建物の熱容量、空調の使用パターン、外気の状況、ヒートポンプ、その他補助熱源パフォーマンス | 室温の変化状況、使用電力量 (ランニングコスト)、ヒートポンプの COP、入力電力、出力 |
| 蓄熱ユニットシミュレーション | 建物の各時刻負荷、建物の熱容量、空調パターン、外気の状況、蓄熱暖房器のパフォーマンス | 室温の変化状況、使用電力量、入力電力、残熱量 |
| 空調機のパフォーマンス作成 | 使用圧縮機のパフォーマンス、熱交換器特性、計算する温度範囲 | 各温度条件における冷・暖房能力、入力電力 |
| 蓄熱式ヒートポンプシステムシミュレーション | 建物の状況、システム設計条件 | 各ゾーンの年間負荷、各機器、蓄熱そうの容量、各機器のランニングコスト、入力電力 |
| 日射量解析プログラム | 大気透過率、北緯、東経、気象データ、受熱面の傾角、方位角 | 各時刻の太陽高度、 1m^2 当たりの受熱日射量直達日射量・天空ふく射量 |
| 太陽集熱器のシミュレーション | コレクタの構成、フィン厚・ピッチ、パイプ材料・径、各ふく射率、断熱材及び厚み | 各パラメータごとのコレクタ効率 |
| 太陽冷暖房・給湯システムの評価プログラム | 各種方式、技術的判定フィルタ、各種価格・特性、建物負荷、日射量 | システムの選択、選択されたシステムの経済性評価 |
| マルチセントラルシステムシミュレーション | 建物の状況、システム設計条件 | 各ゾーンの年間負荷、各機器、蓄熱そうの容量、各機器のランニングコスト |
| 冷蔵庫のシミュレーション | 冷蔵庫の構造要素、圧縮機特性、熱交換器特性、冷蔵庫システムと制御条件 | 冷凍・冷蔵庫内各温度変化、各部温度、熱負荷、圧縮機運転率 |

行って各種パラメータの影響などを解析している。このプログラムはコレクタ開発のための設計に利用するとともに、これから得た集熱効率の特性を基にしてシステムの経済性計算やその可能性の研究に利用している。

2.8 太陽冷暖房・給湯システムの評価プログラム

太陽冷暖房・給湯システムは熱源機・補助ヒータ・蓄熱そうなどの構成要素の種類及びこれらの組合せを考えると膨大な数となる。これらのシステムを、技術的評価フィルタにより選択していくとともに、選択したシステムについての経済性を評価するプログラムを開発した。このプログラムは設定したシステムについての経済評価も可能である。経済評価はそれぞれ次のような指標により行う。

- (1) F : 年間に省エネルギー可能なエネルギーの価格 (電力料円/年) と太陽熱システムのために投入した価格 (円) の比率
- (2) 太陽熱依存率 : 年間にシステムが利用した太陽エネルギー (kcal/年) とシステムが年間に使用した全エネルギー (kcal/年) との比率
- (3) 年間の省エネルギー量 kcal/年

以上は今まで利用しているプログラムの主なものについてその概要を述べた。次にマルチセントラルシミュレーションプログラムと冷蔵庫のシミュレーションプログラムの二つを詳しく説明するが、この二つのプログラムを含め、これらプログラムの入出力の一例を簡単にまとめ表 1. に示した。

3. マルチセントラルシステムシミュレーションプログラム

3.1 プログラム開発のねらい

最近省エネルギーの観点から熱回収空調方式の研究がさかんに行われているが、当社もこれらについて種々の研究を行ってきている。この一連の作業の中で、建物規模や内部の熱的条件をふまえて熱回収成立の検討や熱バランスのとれた適正なシステム設計を計算図表や手計算によって行うのは不可能に近く、このプログラム開発に着手したのである。したがって、プログラムの直接の目標は次の 3 項になる。

- (1) 热回収が成立するかどうか
- (2) 热回収のための各設備の大きさはどの程度となるか
- (3) 年間及び季間の使用エネルギーはどの程度となるか

このマルチセントラルシミュレーションプログラムは熱回収システムとして検討すべき一つのシステムであるが、他のシステム、例えばダブルバンドル方

式のもの及び一般の空気熱源ヒートポンプ方式などについて各方式間の比較・評価を行っている。

これらの各プログラムは前述のごとく、熱回収方式の検討用であるが、年間の負荷・機種選定及びランニングコストを算出するためビルの空調設備の商談用に、また設計の省力化・高速化のために便利であり、開発完了以前からかなりの営業活動に利用されている。

3.2 プログラムの概要

プログラムの機能は次のようにある。

- (1) 建物を各ゾーンに分割し、このゾーンを規準ブロック (10m^2) の集合体として熱負荷を計算する。計算される熱負荷は空調時間を 8~18 時とした非定常負荷である。
- (2) 各設備の設計 (ヒートポンプ・ファン・冷却塔・ポンプなど)
- (3) 各設備の消費電力が冬期・中間期・夏期及び年間について計算できる。
- (4) 計算に使用する気象データは 1954~1960 年の 7 年間の平均値によりランニングコストを計算し設備容量の決定は超過確率基準の気象データをインプットして計算する。
- (5) システムはマルチセントラルの蓄熱方式及び閉回路方式の双方について計算可能である。

マルチセントラルシステムは小さな建物で水冷ヒートポンプとして利用する実績も多々あるが、本来のねらいとするシステムは水対空のヒートポンプユニットを各ゾーン分散配置し、水回路を閉ループで結んだ熱回収システムである。このシステムの詳細については現在まで本誌にも紹介した。(参考文献 (1)~(7) 参照)

図 1. に蓄熱方式の場合のシステム内の熱流を示す。閉回路方式の場合のシステム及び熱流は図 1. で蓄熱そうが無いものを考えればよい。図 2. にプログラムのゼネラルフローチャートを示す。図 2. からわかるようにプログラムは 14 個のサブプログラムを持ち、コモンデータとして内蔵しているデータ数が多く、カード枚数で約 2,500 枚、リジョンサイズも 500 キロバイトと大きい。これら各サブプログラムの機能の概略を図 2. に示す。

3.3 計算結果の一例

前述のごとくこのプログラムは営業活動・システム設計をはじめ多くの利用方法があるが、計算結果の一例として表 2. のように条件を変化させた場合の熱回収成立条件について述べる。

この結果のまとめの一部として断熱層付カーテンウォール構造、延面

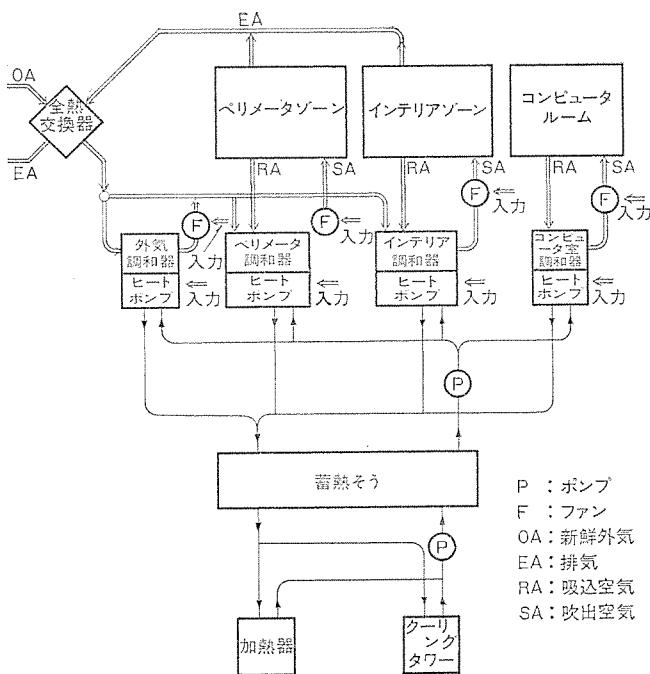


図 1. 蓄熱式マルチセントラルシステムと熱流

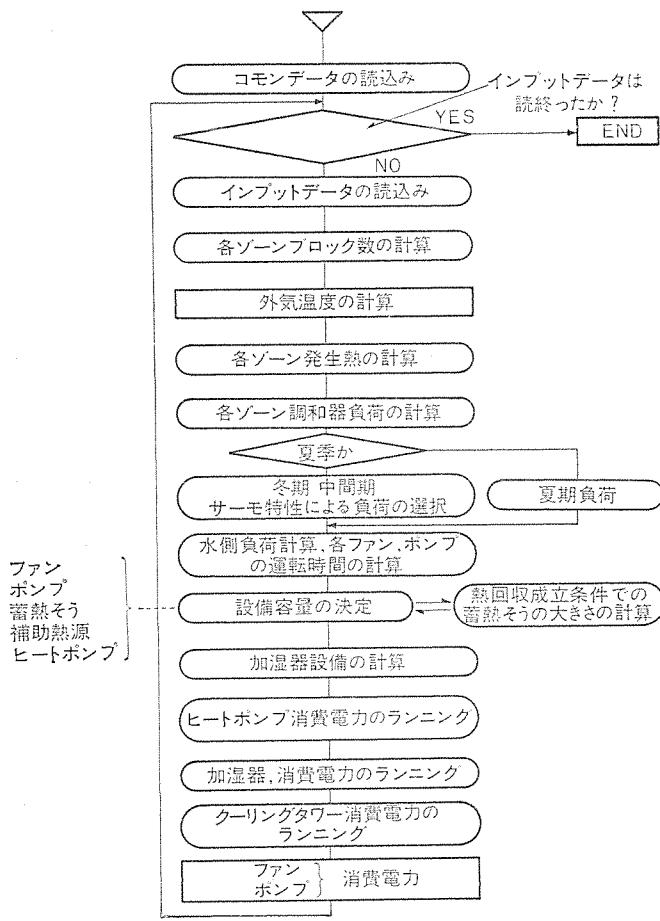


図 2. ゼネラルフローチャート

積 3,000 m², 両端コア, アスペクト比 1:2 の場合についての設備と運転電力の計算結果を表 3. に示す。図 3.~6. にこれらの計算結果から建物延面積・照明の大きさ及びコンクリートと断熱層付カーテンウォールの差について熱回収成立条件・設備の大きさ及び年間消費電力がどのように変化するかを示す。これらの図及び外の計算結果から次のことがいえる。

(1) マルチセントラルシステムにおいて熱回収によって補助熱源が不要

表 2. 計算条件

| 空調条件 | 室 内 | 夏 | 冬 |
|------|--------|--|--|
| | | 27°C DB 50% RH | 20°C DB 50% |
| 空調方式 | 室 外 | TAC 2.5% | TAO 2.5% |
| | | マルチセントラル | 蓄熱方式 |
| 地 域 | | 大阪 | |
| 建物条件 | | 階高 3.16m 窓面積率 0.4 人員 0.2人/m ² | 天井高 2.5m 空調面積率 0.7 外気取入量 25m ³ /h・人 (室内取入) |
| 計算条件 | 照 明 | 20 30 40 50 W/m ² | |
| | 建物規模 | 3,000m ² 7F 6,000m ² 9F | 12,000m ² 11F 24,000m ² 14F |
| | 外 壁 | カーテンウォール | コンクリート |
| | アスペクト比 | 1:1 1:2 | 1:4 |
| | コア位置 | | N 4 |

表 3. 計算結果の一例

比較項目 内部発熱 (延面積 3,000m²)
マルチセントラル蓄熱方式 空調面積率 0.7 窓面積率 0.4
人員 0.2人/m² OA取入25m³/h・人 直接室内混入
補助熱源 昼間10時間運転

| | | | | | | |
|--------------|--|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 設備 | N 7F カーテンウォール 延面積3,000m ² ロスナイ有(0.6) | 照 明 (W/m ²) | 20 | 30 | 40 | 50 |
| | | H・P (kw) | 69.94 | 77.59 | 85.24 | 92.90 |
| 備 | | (RT) | 51.12 | 56.72 | 62.31 | 67.91 |
| | | クーリングタワー(RT) | 55.06 | 61.08 | 67.11 | 73.14 |
| 年間運転電力 | | 補助熱源(kcal/h) | 45,460 | 26,700 | 7,426 | 0 |
| | | 蓄熱そう(t) | 19.21 | 21.82 | 24.42 | 27.04 |
| | | ポンプ(m ³ /min×m ³ Δq) | 0.7158×43.08 | 0.7941×43.08 | 0.8724×43.08 | 0.9508×43.08 |
| | | 加温器(kcal/h) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| H・P | | 冬 | 9,965 | 15,060 | 23,290 | 31,570 |
| | | 中間 | 16,000 | 23,700 | 31,450 | 39,210 |
| | | 夏 | 57,640 | 67,260 | 76,660 | 86,040 |
| | | 年間 | 83,600 | 106,000 | 131,400 | 156,800 |
| クーリングタワー(密閉) | | 冬 | 2,815 | 3,584 | 4,356 | 5,129 |
| | | 中間 | 2,711 | 3,496 | 4,312 | 5,157 |
| | | 夏 | 7,385 | 8,526 | 9,623 | 10,700 |
| | | 年間 | 12,910 | 15,610 | 18,290 | 20,990 |
| (kwh) | | 加温器 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | | 送風機 | 16,250 | 16,600 | 17,800 | 19,380 |
| | | ポンプ | 45,960 | 50,240 | 54,490 | 58,730 |
| | | 計 | 159,400 | 189,500 | 223,100 | 257,200 |
| | | 年間補助熱源加熱量(kcal) | 2820,000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

となるのは断熱層付カーテンウォール、両端コアのような熱回収に有利な条件の場合

照 明 20 W/m² で 20,000 m² 以上

30 W/m² で 8,000 m² 以上

これがセンタコアの建物では

40 W/m² で 30,000 m² 以上

コンクリート構造では

30 W/m² で 30,000 m² 以上

40 W/m² で 11,000 m² 以上

にもなり、熱回収を行う場合、コアの位置をも含めた建物の断熱性

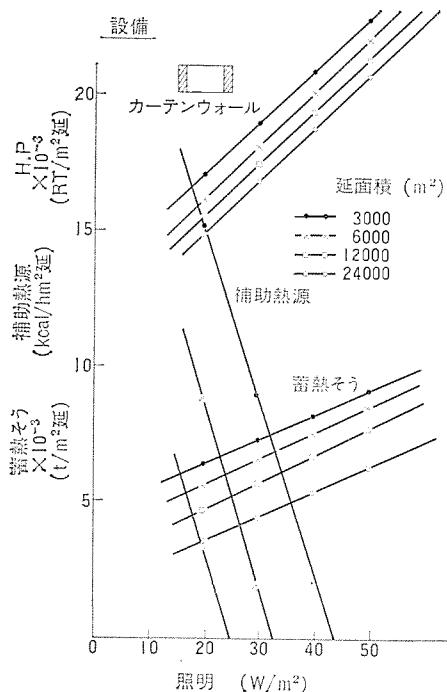


図 3. カーテンウォール建築の単位面積当たりの設備

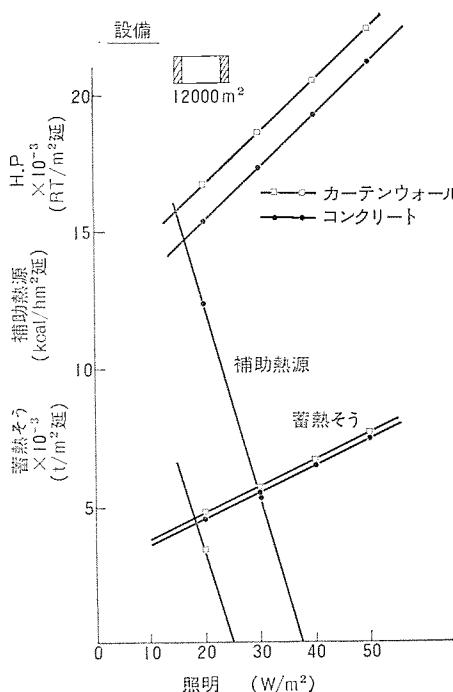


図 5. カーテンウォールとコンクリートの設備の比較

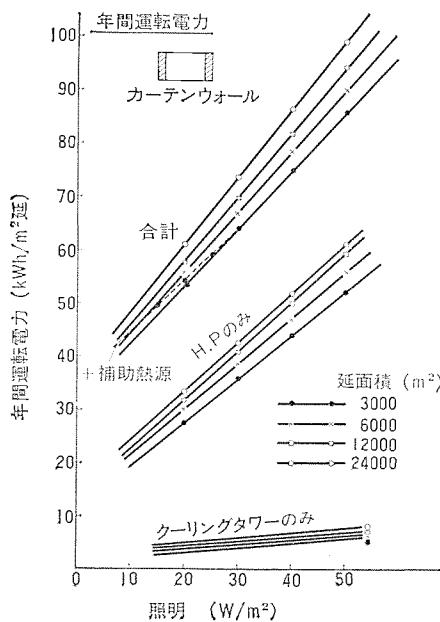


図 4. カーテンウォール建築の単位面積当たりの運転電力

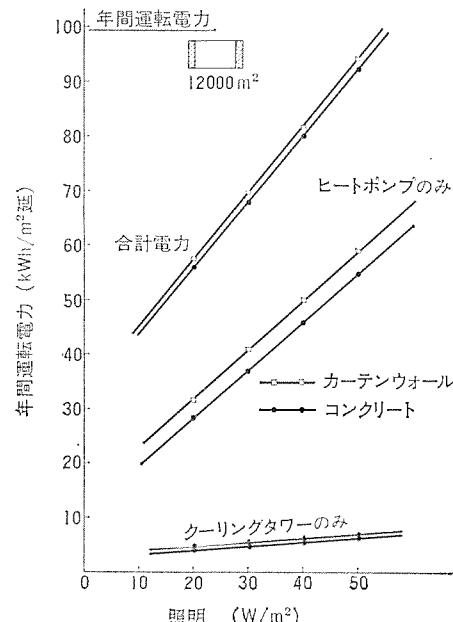


図 6. カーテンウォールとコンクリートの運転電力の比較

がいかに重要であるかがわかる。

- (2) 熱回収の成立するような建物は外気冷房を積極的に取り入れないと冬期の軽負荷時及び中間期に冷房運転する率が高くなり、かえって消費電力が多くなってしまう。
- (3) 内部負荷(例えは照明)が増えると熱回収は成立するが、設備・夏期の運転費は増加するのでエネルギー的には不利となる。
- (4) 補機の運転時間(ヒートポンプ設備換算)が年間1,100~1,400 hにもなる。これはヒートポンプの年間運転時間1,400~1,800 h(照明30 W/m²)に比較して70~80%にもなっていて補機の運転費を少なくすることは重要な問題となる。設備の過大、ポンプ・送風機の安全率の見過ぎには十分注意を要する。またセントラルやコンクリート構造のように負荷変動の大きな建物はこの値が大きくなる方向である。

4. 冷蔵庫のシミュレーション

4.1 プログラム開発のねらい

家庭用冷凍・冷蔵庫の性能は、冷媒サイクルの特性と、フリーザー・冷蔵室・野菜ケースなどの種々の構造体との複雑な相関関係により決定される。したがってバランスの良い製品を設計するためには、長い設計・試験期間を必要としていた。そこで合理的な設計や設計・試験期間を短縮するため、冷蔵庫の熱系シミュレーションを行うことが必要となった。

冷蔵庫各部の温度変化・熱移動を、各部の熱方程式を解くことによって動的に解析することができ、冷蔵庫を設計するときや設計変更で、熱系がどのように動作するかを把握できる。また冷蔵庫各部の要素(圧縮機・蒸発器の性能、蒸発器風量等)の設計・各室サーモの設定温度・サーモスタットのディアレンシャル・ダンプ特性などの制御方法の検討及び断熱材の最適厚さなどの構造上の設計を検討することができる。

4.2 プログラムの概要

冷蔵庫のシミュレーションを行うには、冷蔵庫蒸発器の冷却能力を把握しなければならない。この冷却能力は圧縮機はもちろん各冷蔵庫の冷媒サイクル要素・外気温度・庫内温度など種々の要因により変化する。

したがって、第1ステップとして冷媒サイクルの解析を行い、この解析プログラムの開発によって、冷蔵庫の冷却能力を各種パラメータごとに、外部温度と蒸発器吸込空気温度の関数の形で表すことができる。インプットとしては次のようなものがある。

- (1) 各圧縮機のパフォーマンス(図7参照)
 - (2) 冷媒の乾き度又はサブクール温度
 - (3) 庫外温度
 - (4) 蒸発器性能($U \times A$)
 - (5) 蒸発器吸込空気温度
 - (6) 風量
- など、またアウトプットとしては、インプットをパラメータとして、

- (1) 冷媒の蒸発温度、冷凍能力
 - (2) 圧縮機の効率・放熱量・入力
 - (3) 凝縮器の面積・放熱量
- などが得られる。

次に第2ステップとして、第1ステップで求めたパフォーマンスを使用して冷蔵庫各部の温度、熱移動を動的に解析する。

冷蔵庫各部温度は、基本的には流入熱量と除去熱量との差による温度こう(勾)配により動的に求められる。冷蔵庫キャビネットの構成は図8のようで、図9に示す断熱材からの熱漏れがある場合のヒートバランスは次式で与えられる。

$$Q = \alpha_t \cdot A \cdot (T_{\omega i} - T_i) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\alpha_0 \cdot (T_0 - T_{\omega 0}) = \frac{\lambda}{D} (T_{\omega 0} - T_{\omega i}) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$C_{\omega} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{T_{\omega i} + T_{\omega 0}}{2} \right) = \alpha_0 \cdot (T_0 - T_{\omega 0}) - \alpha_t (T_{\omega i} - T_i) \quad \dots \dots \dots (3)$$

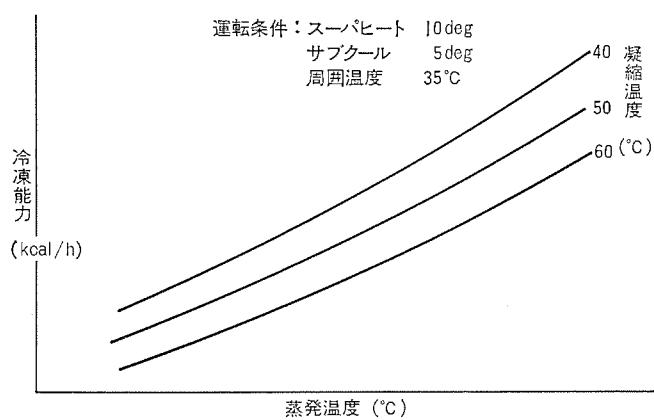


図 7. 圧縮機のパフォーマンス

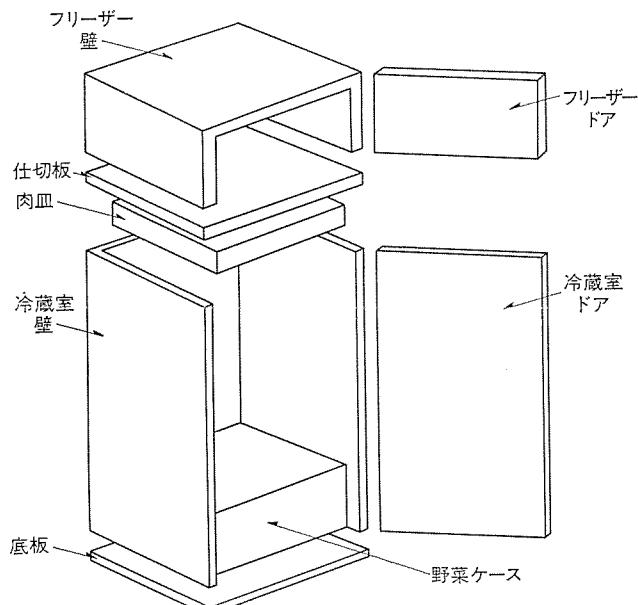


図 8. キャビネット構成

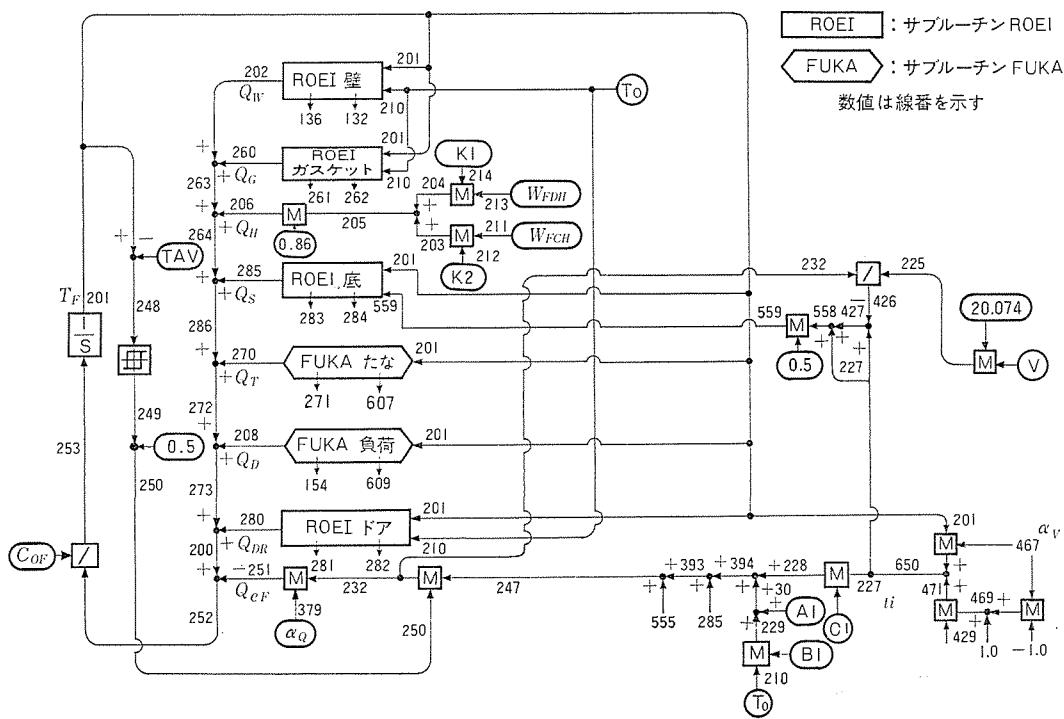


図 11. BACS ブロック線図 (フリーザー)

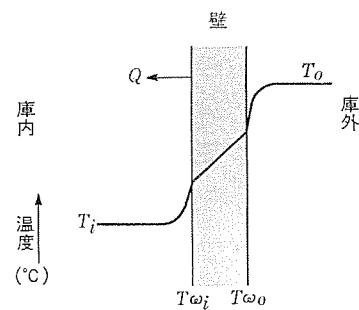


図 9. 壁の熱漏れモデル

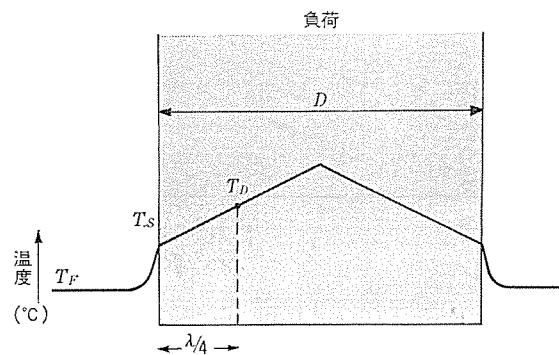


図 10. 冷却負荷モデル

ここに Q : 庫内空気への熱漏れ (kcal/h)

T_i, T_o : 庫内・外空気温度 (°C)

$T_{\omega i}, T_{\omega o}$: 断熱材の内・外表面温度 (°C)

α_i, α_o : 庫内・外空気熱伝達率 (kcal/m² h °C)

C_o : 断熱材の単位面積当たりの熱容量 (kcal/m² °C)

λ : 断熱材の熱伝導率 (kcal/mh°C)

A, D : 面積 (m²), 厚さ (m)

式(2), (3)より $T_{\omega i}$ を消去して, $T_{\omega o}$ の微分方程式をつくると次式のようになる。

$$\frac{C_o}{2} \left(2 + \alpha_o \cdot \frac{D}{\lambda} \right) \cdot \frac{d}{dt} \cdot T_{\omega o} = - \left\{ \alpha_o + \alpha_i \left(1 + \alpha_o \cdot \frac{D}{\lambda} \right) \right\} \cdot T_{\omega o} + \alpha_i T_i$$

ROEI : サブルーチン ROEI + $\alpha_o \left(1 + \frac{D}{\lambda} \cdot \alpha_i \right) T_o \dots \dots \dots (4)$

FUKA : サブルーチン FUKA ただし T_o は一定値とみなして $\frac{d}{dt} T_o = 0$ と仮定してある。

庫内負荷モデルは図 10 のように仮定し, ヒートバランスは

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_D = \alpha_o \cdot A_D \cdot (T_S - T_F) \\ C_D \cdot \frac{d}{dt} T_D = -Q_D \end{array} \right. \dots \dots \dots (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_D \cdot \frac{d}{dt} T_D = -Q_D \\ Q_D = \frac{\lambda}{D/4} (T_D - T_S) \end{array} \right. \dots \dots \dots (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_D = \frac{\lambda}{D/4} (T_D - T_S) \\ \frac{Q_D}{A_D} = \frac{\lambda}{D/4} (T_D - T_S) \end{array} \right. \dots \dots \dots (7)$$

で与えられる。

ここに

Q_D : 負荷からの放熱量 (kcal/h)

T_S, T_D : 負荷の表面, 平均温度 (°C)

T_F : 庫内ふんい気温度 (°C)

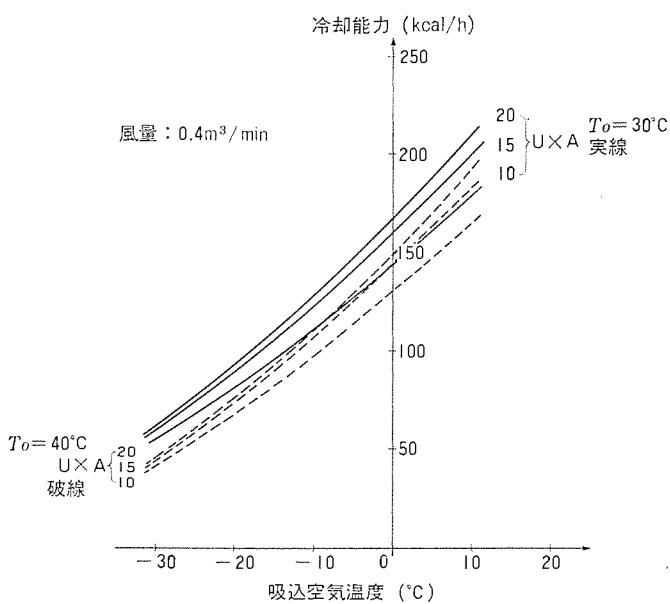


図 12. 冷蔵庫パフォーマンスの例

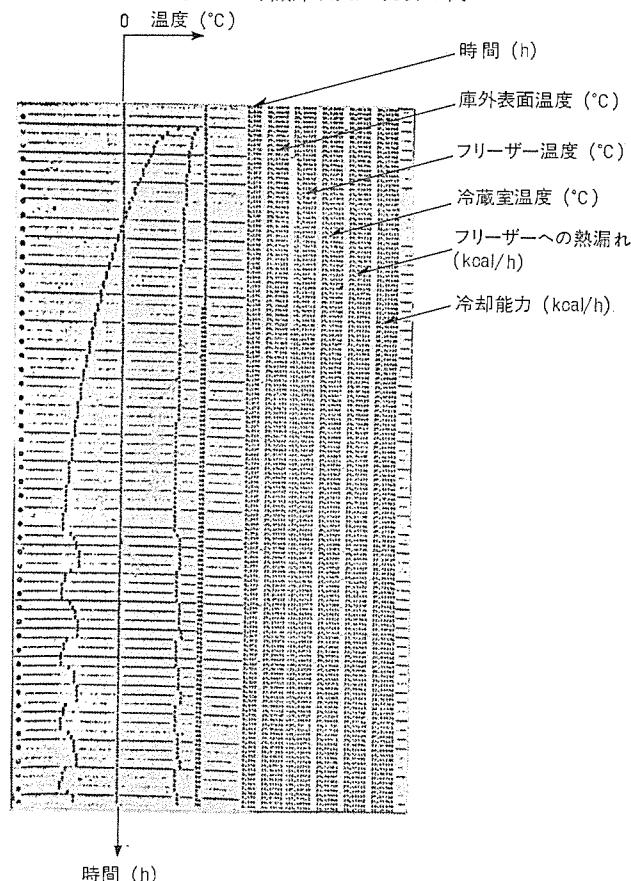


図 13. 热系シミュレーションアウトプットの例

α_2 : 負荷表面空気の熱伝達率 (kcal/m² h °C)

C_D, λ : 負荷の熱容量 (kcal/°C), 热伝導率 (kcal/m² h °C)

A_D, D : 負荷の表面積 (m²), 最小辺長さ (m)

庫内の空気温度は次式で与えられる。

$$C_{of} \frac{d}{dt} T_F = \sum_i Q_i \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

ここで C_{of} , T_F : 庫内空気熱容量 (kcal/°C), 温度 (°C)

Q_i : 热漏れ・放熱量・冷却能力など (kcal/h)

これらと同種の微分方程式を冷蔵室, 野菜ケース, バターケースなどに對しても作成する。これらのヒートバランスの解析による熱系シミュレー

ションプログラムの作成は当社のシミュレーション言語 BACS を使用した。これによるプログラム作成はブロック線図と呼ぶフローチャートによって行う。一例を図 11. に示す。計算はこのループに沿って微小時間ごとに積分していく。今回はその刻み時間を 2/1,000(h) とした。この刻み時間はシミュレーション精度・計算時間に重大な影響を与えるため選び方に注意が必要である。

4.3 計算結果の一例

図 12. に第 1 ステップでの冷蔵庫パフォーマンスの計算例を示す。この例から分かるように、冷凍能力は蒸発器吸込温度に大きく依存する。すなわち冷蔵室設定温度を下げるほど冷却能力が減少し、運転率が急に高くなるなどの影響が考えられる。図 13. には第 2 ステップでの熱系シミュレーションの結果の一部を示す。ほかに数十種類の各部の温度、熱移動が任意の時間間隔でアウトプットできる。

以上冷蔵庫の熱系シミュレーションを紹介するにあたり、冷媒サイクルの解析と熱系のシミュレーションについて、プログラムの概要及びその結果の一例を示した。このプログラム開発では結果を正確にするため、熱モデル、計算式の検討が必要であったため、その点に多くの時間を費やした。この結果このプログラムは冷凍冷蔵庫設計の合理化や設計の期間短縮などに貢献している。今後更に複雑な冷蔵庫の設計に役立つものへと展開を計っていく予定である。

5. むすび

空調設計用ソフトウェアとして開発してきた主なプログラムの概要、及びマルチセントラルシステムと冷蔵庫のシミュレーションについてやや詳しい紹介をしてきた。社会情勢の変化によって曲折はあるものの今後空調・冷凍機器及びコンピュータは発達・普及していくであろう。また省エネルギー、快適性などの観点から高度な設計や制御方法の検討なども今後の重要な課題となってくると予想される。したがってこれらを結ぶソフトウェアはますます必要不可欠なものになると思われる。このような意味からここに紹介した各プログラムが大いに駆使され、これらの問題解決のための強力な武器となっていくであろうと確信している。

なお、ここに紹介したプログラムは当社各部門の協力により開発してきたが、特に共同研究として進めてきたものもあり、ご支援いただいた関西電力(株)営業部の方々に深く感謝する次第です。

参考文献

- 笠置ほか：電子計算機による冷暖房熱負荷計算、三菱電機技報, 45, No. 9 (昭 46)
- 貝瀬ほか：マルチセントラル空調システム、三菱電機技報, 46, No. 3 (昭 47)
- 小原ほか：マンションにおける室内温度の立ち上りシミュレーション、三菱電機技報, 46, No. 3 (昭 47)
- 笠置ほか：ヒートポンプエアコンのシミュレーション、三菱電機技報, 47, No. 4 (昭 48)
- 小原ほか：住宅の冷暖房負荷の解析、三菱電機技報, 47, No. 4 (昭 48)
- 小原ほか：ヒートポンプとビル排熱利用、三菱電機技報, 47, No. 5 (昭 48)
- 笠置ほか：空気熱源ヒートポンプによる空調環境のシミュレーション、三菱電機技報, 48, No. 5 (昭 49)

当社の特許

| 登録番号 | 名 称 | 発 明 者 | 登録番号 | 名 称 | 発 明 者 |
|--------|------------------------|----------------------------|--------|--------------------|---------------------|
| 745208 | ガラス管スリーブを備えた添加物入り水銀放電灯 | 林 次郎・平野昌彦 鈴木 武 | 745224 | 電圧分配装置 | 小島 正典 |
| 745209 | 自己復旧形電流制限装置 | 山県 穆・伊藤利朗 | 745225 | 可変周波数発振器 | 江頭 英隆 |
| 745210 | 自己復旧形電流制限装置 | 山県 穆・伊藤利朗 宮本 紀男 | 745226 | ブラシレス電動機の速度制御回路 | 細野 孝雄 |
| 745211 | 自己復旧形電流制限装置 | 山県 穆・和田勇一 宮本 紀男 | 745227 | パルス発生装置 | 林 正之 |
| 745212 | 自己復旧形電流制限装置 | 山県 穆・松浦 清 伊藤利朗 | 745228 | 交流電動機の高速運転回路 | 藤 井 学 |
| 745213 | 同期機の励磁制御装置 | 久松 章三 | 745229 | 半導体装置の製造方法 | 小倉 正久・辻 哲朗 |
| 745214 | エレベータかご呼打消方式 | 板垣 晃平・篠崎 裕久 竹内 照男 | 745230 | けい光体 | 大田 重吉・山崎清司 成田二朗 |
| 745215 | エレベータかご呼登録装置 | 板垣 晃平・篠崎 裕久 竹内 照男 | 746186 | 高圧水銀放電灯 | 竹田 俊幸・三上 龍夫 |
| 745216 | コアメモリプレーン | 水上 益良・長谷川洋三 描塚 正道・村松 和茂 | 746187 | ライン形パルサ回路 | 上富 勇・朝井 克治 |
| 745217 | 電流制限装置 | 幸島 邦茂・木原 幸治 | 746188 | 周期磁界発生装置 | 建石 晶彦・竹延 真哉 |
| 745218 | ブラシなし同期機の励磁装置 | 米澤 英憲 | 746189 | 自動製氷機 | 芹沢 市夫 |
| 745219 | 放電灯用電極 | 竹田 俊幸・土橋理博 菅野 文夫 | 746190 | マイクロ波相対変位計 | 立川 清兵衛・小畑 哲男 |
| 745220 | バナジン酸塩の単結晶の製造方法 | 栗津 健三・武藤 勝俊 | 746191 | 真空しゃ断器 | 樋野 貞義・北敏 一 大倉 敏幹 |
| 745221 | 充電発電機制御装置 | 平田 穀・森下 光晴 壺井 芳昭・篠尾 勇夫 | 746192 | 電着塗装によって得られる皮膜の改質法 | 柴山 恒一・地大英穀 |
| 745222 | 充電発電機制御装置 | 平田 穀・森下 光晴 壺井 芳昭・篠尾 勇夫 | 746193 | 半導体発光装置 | 中尾 佳生・奥 泰二 |
| 745223 | 限流装置 | 松浦 清・原 文吾 | 746194 | 絶縁継手の製造方法 | 井上 武男・白沢 宗 |
| | | | 746195 | 電気車制御装置 | 北岡 隆 |
| | | | 746196 | 電気泳動的塗装装置 | 大西洋一郎・末武 隆 |
| | | | 746197 | 2重ヒンジ装置 | 井原 興 |
| | | | 746198 | 電力制御装置 | 赤松 昌彦 |
| | | | 746199 | 距離追尾装置 | 大貫 益夫 |
| | | | 746200 | 偏波面回転角測定装置 | 立川 清兵衛・小畑 哲男 |

〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol. 49 No. 12 道路トンネル用電機品

特集論文

- 最近の道路トンネル用電気設備
- 恵那山トンネル用電源設備
- 高速道路トンネル換気設備用電動機と制御方式
- 恵那山トンネル中央管制システム
- 高速道路トンネル用遠方監視制御装置
- トンネル内監視通報装置

普通論文

- 1,000t エアクショントランスポータ
- 海洋石油掘削リグ用電機品
- レイクシティ・ケーブルビジョン網納め CATV システム
- 気象衛星による気象データ収集局

三菱電機技報編集委員会

| | | | |
|------|-------|------|----------|
| 委員長 | 松岡 治 | 常任委員 | 吉山 裕二 |
| 副委員長 | 神崎 遼 | 委員 | 飯田 春吉 |
| " | 武藤 正 | " | 熊本 永 |
| 常任委員 | 宇佐見重夫 | " | 久保博司 |
| " | 北川和人 | " | 祖父江晴秋 |
| " | 清田 浩 | " | 竹田 俊幸 |
| " | 日野 雅行 | " | 橋爪 基 |
| " | 福家 章 | " | 林 留寿 |
| " | 本間 吉夫 | " | 渡辺 茂 |
| " | 三輪 進 | | (以上50音順) |
| " | 迎 久雄 | | |

11号特集担当 吉山裕二

三菱電機技報 49巻11号

昭和50年11月22日 印刷

昭和50年11月25日 発行

定価1部300円(送料別)無断転載を禁ず

編集兼発行人 松岡 治

印刷者 高橋 武夫

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 東京都千代田区丸の内2丁目1番2号(〒100)

三菱エンジニアリング株式会社内

「三菱電機技報社」 Tel. (03) 218局2494

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0912, 振替口座 東京 20018

研究所40年と社外受賞

| 昭和 | 年 | 事件 | 歴代所長 | | | |
|----|---|--------------|-------|---------|---------|-------|
| | | | 中央研究所 | 応用機器研究所 | 生産技術研究所 | 商品研究所 |
| 9 | (神戸製作所に工作研究係が設けられ (研究所の発端となる(大正15年)) | | | | | |
| 10 | 神戸製作所構内に本店研究課が誕生 | | | | | |
| 15 | 本店研究課を本店研究部と改称 | | | | | |
| 17 | 伊丹製作所構内に移転 | | | | | |
| 18 | 高松宮殿下の御台臨 | | | | | |
| 19 | 研究所と改称 | | | | | |
| 21 | 無線機部門を伊丹製作所に移管・班係制度の採用 | 若元夫 若山高根 | | | | |
| 24 | | | | | | |
| 26 | 研究室制度が設けられる 特許部が本社直轄となり本社に転出 | 弘田実輔 大野才三 | | | | |
| 30 | 天皇、皇后両陛下行幸啓の光栄に浴す | | | | | |
| 32 | | | | | | |
| 33 | | | | | | |
| 34 | 商品事業部の中に商品研究所を設立 | 柴山一郎 | | | | |
| 35 | | | | | | |
| 36 | 主任研究員制度が新設される | 石黒亮巳 | | | | |
| 37 | 中央研究所と改称 研究室制度廃止部制の実施 | 小原敬助 | | | | |
| 38 | | | | | | |
| 39 | | | | | | |
| 40 | 金属材料部(相模製作所駐在)が 相模製作所研究部となる | 柴山一郎 西岡勝 | | | | |
| 41 | 高周波機器研究部(鎌倉製作所駐在)が 鎌倉製作所研究部となる | 山森末男 | | | | |
| 42 | 半導体分室(北伊丹製作所駐在)が 北伊丹製作所研究部となる | 小椋義正 | | | | |
| 43 | | | | | | |
| 44 | | | | | | |
| 45 | 生産技術研究所を中央研究所から 分離設立 | 兼山森末男 | | | | |
| 46 | 通信機製作所に通信研究部を設ける | 広尾次郎 | | | | |
| 47 | | | | | | |
| 48 | 部制廃止、グループ制の実施 | 内藤虎春 | | | | |
| 49 | 応用機器研究所を中央研究所から分離設立 | 大野寛孝 | | | | |
| 50 | 商品研究所が事業部より分離研究担当 常務の分掌となる | 原仁吾 | | | | |
| | | 喜連川隆 | | | | |