

MITSUBISHI DENKI GIHO

三菱電機技報



Vol.56 No.7

大型電波望遠鏡特集

大型電波望遠鏡特集

目次

特集論文

大型電波望遠鏡特集号に寄せて……………	1
田中春夫	
電波望遠鏡と新しい天文学……………	2
森本雅樹	
大型宇宙電波望遠鏡観測装置……………	6
赤羽賢司・森本雅樹・立川清兵衛・水沢丕雄・塚田憲三	
45m電波望遠鏡……………	12
赤羽賢司・片木孝至・石井康一・滝沢幸彦・尾形良征	
大型アンテナのホモロジー設計……………	17
森本雅樹・海部宣男・滝沢幸彦・青木克比古・榊原 修	
10m 5素子干渉計……………	21
田中春夫・倉藤 康・岡野弘志・佐藤 巧・文田次哉	
5素子干渉計用10mアンテナ……………	26
石黒正人・別段信一・河村英四郎・増田剛徳・蛭子井 貴	
電波望遠鏡用CFRP製反射パネル……………	31
田嶋尚志・大段永治・村山邦彦・島本幸三・高橋一郎	

普通論文

高速増殖実験炉「常陽」向け原子炉停止中破損燃料位置検出実験装置の開発…………	39
土肥 明・神代哲哉・武田 淳・佐藤勲雄・大戸敏弘	
高電圧大容量変圧器の技術開発〔I〕……………	44
菅 寿郎・渡辺次男・石井敏次・武智盛明・玉置栄一	
高電圧大容量変圧器の技術開発〔II〕……………	49
菅 寿郎・渡辺次男・石井敏次・武智盛明・玉置栄一	
プラントコントローラ《MELPLAC-550》……………	54
大野宣男・石井哲夫・村川利幸・山中喜美雄・藤井信明	
《MELPLAC-300》制御監視トータルシステム……………	60
片岡猪三郎・重岡文昭・江上憲位・故島利美・桜井治夫	
電気クッキングヒーター“マイコンタッチコントロール式”……………	65
日比野浩一・鳥山建夫・岩松孝寿	
冷蔵庫内箱用押出連動真空成形システムの開発……………	68
馬場文明・齊藤 勝・大村 武・柏 直	
特許と新案……………	37
空気調和機	
ガス絶縁電気装置	
ロータリ式電動圧縮機	
当社の登録特許一覧……………	36, 74
スポットライト……………	
電子サーマル付MS-K形三菱電機開閉器……………	73
8時間ビデオ《ファンタス》55G(HV-55G形)……………	(表3)

表紙

大型宇宙電波望遠鏡観測装置

写真は東京大学東京天文台野辺山宇宙電波観測所に建設された大型宇宙電波望遠鏡観測装置で、直径45mの電波望遠鏡1基と直径10mの電波望遠鏡（干渉計用）及び30箇所の干渉計用ステーションなどから構成され、1GHzから115GHz帯での観測が可能である。特にミリ波帯での集光力、分解能が世界一で、太陽系、銀河系及び銀河系外宇宙における様々な天体・物質・現象に源を発する電波の性質を観測し、星の誕生過程、銀河の進化、宇宙の果てなどの探究に大きく貢献することが期待されている。この装置は昭和56年12月完成した後、試験観測に供されている。



アブストラクト

大型宇宙電波望遠鏡観測装置

赤羽賢司・森本雅樹・立川清兵衛・水沢丕雄・塚田憲三

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P6～11

センチ波からミリ波領域での観測に供される大型宇宙電波望遠鏡観測装置が野辺山宇宙電波観測所に建設された。この観測装置は45m電波望遠鏡、10m5素子干渉計、受信観測装置、データ処理・制御装置及び共通設備からなり、太陽系、銀河系、銀河系外宇宙におけるさまざまな天体・物質・現象に源を発する電波の性質を観測するものである。この装置の概要、主要性能、諸元及び特長などを述べる。

5素子干渉計用10mアンテナ

石黒正人・別段信一・河村英四郎・増田剛徳・蛭子井 貴

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P26～30

東京天文台に納入した5素子干渉計の素子アンテナの特長、設計及び製作結果を述べる。これは22GHz帯と115GHz帯を対象としたアンテナで、高い鏡面精度と機械的精度をもっている。更に22GHzの電波でアンテナの高度角回転に伴う機械的寸法の変化を測定し、5台間の位相安定度、2.5°RMSを得た。また、115GHzで二次元の放射パターンを測定した結果、主鏡鏡面の誤差分布を考慮した理論解析と一致していることが分かった。

45m電波望遠鏡

赤羽賢司・片木孝至・石井康一・滝沢幸彦・尾形良征

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P12～16

45m電波望遠鏡は、マイクロ波からミリ波にわたる広い波長域で天体観測を行うための装置であり、ミリ波での高精度観測などから非常に厳しい性能・機能が必要とされる。これに対して、光学系に一次焦点とクーデ焦点の両方を使えるグレゴリー変形クーデ方式を用い汎用性向上を図るとともに、ホモロジー理論を応用した主鏡設計法・高精度パネルの製造法などの開発により精度の向上を図って、必要性能・機能を十分満たす望遠鏡を設計・製作した。

電波望遠鏡用CFRP製反射パネル

田嶋尚志・大段永治・村山邦彦・島本幸三・高橋一郎

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P31～35

45m電波望遠鏡用反射パネルは鏡面精度、電気的特性、軽量化、耐屋外環境性などが高度に要求される。これらの条件を満たすものとして、炭素繊維強化プラスチック積層材とアルミニウムハニカムからなるサンドイッチ構造体に、電気的反射面及び表面保護層を形成する表面処理を施した反射パネルを製作した。

本稿では、この反射パネルに関する製造技術の概要を紹介するとともに、設置場所環境を模擬した促進試験による耐久性評価結果について述べる。

大型アンテナのホモロジー設計

森本雅樹・海部宣男・滝沢幸彦・青木克比古・櫛原 修

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P17～20

大口径高鏡面精度の可動形アンテナを実現するためには、アンテナが姿勢を変えたときに起こる自重変形による誤差を小さく抑える必要がある。45m電波望遠鏡では、主鏡の自重変形に対してホモロジー理論を適用し望遠鏡が傾いても鏡面がいつも理想的なパラボラ面を作る「ホモログス構造」とすることにより高精度鏡面を得た。ここではホモログス構造の設計概念、解析結果、鏡面設定／測定システム、ピント合わせについて述べる。

高速増殖実験炉「常陽」向け原子炉停止中破損燃料位置検出実験装置の開発

土肥 明・神代哲哉・武田 淳・佐藤勲雄・大戸敏弘

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P39～43

我が国初の高速増殖実験炉「常陽」は、熱出力75MWtの運転経験を経て、現在100MWt運転の準備段階にあり、今後建設予定の原型炉「もんじゅ」及び実証炉プラントへの貴重な技術蓄積に貢献している。本文では「常陽」炉心燃料における燃料破損の有無調査とその位置確認を目的とする新方式破損燃料位置検出装置に係る「常陽FFDL」実験装置の試作試験を完了したので、設計段階から現地総合機能試験に至る開発成果を報告する。

10m5素子干渉計

田中春夫・倉藤 康・岡野弘志・佐藤 巧・文田次哉

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P21～25

10m5素子干渉計は、直径10mの可搬式パラボラアンテナ5基で構成している。移動台車により東西560m、南北520mの基線上に設けた30箇所のステーションに適宜配置して、各アンテナの受信する宇宙電波の相互相関をとることにより、天体のシャープな電波写真（最高分解能1秒角）を合成するための装置である。アンテナの正確な位置及び高い指向精度を得るために、数多くの超精密部品を使用している。

高電圧大容量変圧器の技術開発〔I〕

菅 寿郎・渡辺次男・石井敏次・武智盛明・玉置栄一

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P44～48

当社では、エネルギーコストの高騰など社会環境の変化によって、大容量高電圧変圧器に対する要求も変化し、それに対応するため大容量高電圧外鉄形変圧器の技術開発に努力している。その内容を2回にわたり総括的にのべることとし、本稿はその〔I〕編として、ユーザー側に利益となるコンパクト化、低損失化を中心に説明した。

〔II〕編は、その他のユーザーメリットに直結する項目について述べる予定である。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 26~30 (1982)

10-Meter-Diameter Antennas for a 5-Element Synthesis Telescope

by Masato Ishiguro, Shin'ichi Betsudan, Eishiro Kawamura, Masanori Masuda & Takashi Ebisui

The article describes the features, design, and results of the 10-meter-diameter antennas produced for a 5-element synthesis telescope delivered to the Tokyo Astronomical Observatory. The antenna elements are intended for the 22GHz and 115GHz bands, and feature highly accurate reflector profiles and mechanical precision. Variations of mechanical dimensions due to elevation-angle rotation were observed at 22GHz, and a phase stability of 2.5 degrees RMS was established for the five antennas. Two-dimensional radiation patterns measured at 115GHz were found to coincide with a theoretical analysis embodying the error distribution over the main reflector.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 6~11 (1982)

Facilities at the Nobeyama Radio Observatory

by Kenji Akabane, Masaki Morimoto, Seibei Tachikawa, Moto Mizusawa & Kenzo Tsukada

A large-scale radio telescope has been installed at the Nobeyama Radio Observatory. The telescope is intended for observations in the centimeter- and millimeter-wave ranges, and consists of a 45-meter-diameter radio telescope, a 10-meter, 5-element, synthesis telescope, receiving system, data processor, control system, and shared facilities. It observes the properties of electromagnetic radiation from celestial bodies or cosmic materials, or attributable to celestial phenomena. The article presents a brief description of the telescope, its major functions, specifications, and features.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 31~35 (1982)

CFRP Surface Panels for Radio Telescopes

by Takashi Tajima, Eiji Odan, Kunihiro Murayama, Kozo Shimamoto & Ichiro Takahashi

The reflector surface panels for a 45-meter-diameter radio telescope must meet the necessarily high standards of reflector profile accuracy, electrical performance characteristics, light weight, and resistance to outdoor environmental changes. These surface panels, developed by Mitsubishi Electric, have a sandwich structure with an aluminum honeycomb between two carbon-fiber-reinforced plastic laminates. An RF reflecting surface is used, and a protective surface coating. The article introduces the production technology for the panels, with an evaluation of their durability as established by acceleration tests that simulate the environmental conditions where they are to be installed.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 12~16 (1982)

A 45-Meter Radio Telescope

by Kenji Akabane, Takashi Katagi, Koichi Ishii, Yukihiko Takisawa & Yoshimasa Ogata

This 45-meter-diameter radio telescope is intended for observation of celestial bodies over a broad range of microwave and millimeter wavelengths. The telescope was subject to very rigorous requirements for sophisticated functions and high performance in order to achieve highly accurate observations in the millimeter range. It uses a modified Gregorian system in which observations can be performed both at the primary focus and the Coudé focus, thus expanding its range of applications. The necessary functions and performance have been fully assured by the use of homologous design methods for the main reflector and by using highly accurate fabrication techniques for the antenna panels.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 39~43 (1982)

The Development of a Failed-Fuel Detection and Location Device for the "Joyo" Experimental Fast-Breeder Reactor

by Akira Doi, Tetsuya Kojiro, Jun Takeda, Isao Sato & Toshihiro Odo

"Joyo," Japan's first experimental fast-breeder reactor, has been tested for a thermal output of 75MW as a preparatory stage for operation at 100MW. This reactor has made a significant contribution to the planned development of the prototype fast-breeder reactor "Monju" and the construction of practical reactor plants now under consideration. The article covers the design, development, and overall on-site functional testing of a new failed-fuel detection and location (FFDL) device for Joyo to check the occurrence and location of fuel failure in the core-fuel subassembly.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 17~20 (1982)

Homologous Design of Large Antennas

by Masaki Morimoto, Norio Kaifu, Yukihiko Takizawa, Katsuhiko Aoki & Osamu Sakakibara

If steerable antennas are to retain the necessary high reflector profile accuracy, they must be subject to the least possible deformation under gravity as the antenna orientation is changed. The application of homology theory to gravity deformations of the main reflector enables the 45-meter radio telescope to use a homologous structure for the reflector with an ideal parabolic profile that is independent of the orientation and ensures high reflector accuracy. Discussed in the article are homologous design concepts, analytical results, the reflector parameters, the measurement system, and the means of focusing.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 44~48 (1982)

Recent Technological Developments for Large High-Voltage Transformers: Part I

by Hisao Kan, Tsugio Watanabe, Toshitsugu Ishii, Moriaki Takechi & Eiichi Tamaki

The great rise in energy costs and other changes in the social environment have generated corresponding changes in the performance specifications required of large high-voltage transformers. For many years, Mitsubishi Electric has been involved in the development of large high-voltage shell-form transformers. The article describes, as Part I of a survey of technical developments in transformers, the subsequent miniaturization and reduction in losses that constitute important user benefits.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 21~25 (1982)

A 10-Meter, 5-Element, Synthesis Telescope

by Haruo Tanaka, Yasushi Kurafuji, Hiroshi Okano, Takumi Sato & Tsuguya Fumita

This 10-meter, 5-element, synthesis telescope comprises five portable parabola antennas. There are 30 locations, or stations, at which the antennas, on bogies, may be arranged. The rails on which the bogies run extend 560 meters in the east-west direction and 520 meters north-south.

The correlation of radio-source signals received by each antenna enables the synthesis of sharp, composite source images with a resolution as high as one second of arc for celestial bodies. Many ultrahigh-precision components are used to ensure accurate antenna positioning and high directional precision.

アブストラクト

高電圧大容量変圧器の技術開発〔Ⅱ〕

菅 寿郎・渡辺次男・石井敏次・武智盛明・玉置栄一

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P49～53

〔Ⅰ〕編に引き続き、大容量高電圧変圧器の当社における開発状況を説明している。〔Ⅰ〕編は低損失化、コンパクト化を主に説明したが、本稿は、短絡強度、輸送性、耐震、流動帯電抑制などの重要特性関係や部品、周辺機器、周辺ソフトウェアなどの開発を主体に説明した。

電気クッキングヒーター“マイコンタッチコントロール式”

日比野浩一・鳥山建夫・岩松孝寿

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P65～67

全電化、厨房電化マンションが普及してきたが、これらの需要に対応すべくマイコンを利用した電気クッキングヒーターを開発した。このクッキングヒーターは、タッチ「キー」を軽く押すだけで操作ができ、火力が一目で分かるインジケータ付き、そのほか安全性の配慮や使いやすいワイドグリルの採用など、数々の特長がある。本稿ではそれら特長並びに技術内容を紹介する。

プラントコントローラ《MELPLAC-550》

大野宣男・石井哲夫・村川利幸・山中喜美雄・藤井信明

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P54～59

鉄鋼をはじめとする産業プラントの制御システムは、高度なユーザーニーズと日進月歩で進歩する技術革新のもとにめざましい発展を遂げており、複雑高級化した最近のプラントでは、その死命を制御システムが握っているといっても過言ではない。

当社では最近のユーザーニーズと現用プラントコントローラ《MELPLAC-50》の豊富な実績を踏まえ、最先端技術を駆使し《MELPLAC-550》を開発したのでその概要を述べる。

冷蔵庫内箱用押出連動真空成形システムの開発

馬場文明・斉藤 勝・大村 武・柏 直

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P68～72

省エネルギー、省資材を目的に、プラスチックのシート押出し、真空成形とトリミングプロセスを連動した新しい成形加工システムと、これに適したプラスチック材料（ABS樹脂）を開発し、冷蔵庫の内箱へ適用した。この新しい押出連動真空成形システムを適用することにより、冷蔵庫内箱の成形消費エネルギーを従来の $\frac{1}{2}$ に節減するとともに、生産性を2倍に向上することができた。ここでは、このシステム開発の概要について紹介する。

《MELPLAC-300》制御監視トータルシステム

片岡猪三郎・重岡文昭・江上憲位・故島利美・桜井治夫

三菱電機技報 Vol.56・No.7・P60～64

多様化を要求される今日の制御システムでは電気制御、計測制御、データ制御を含む融合システムとそれらを分散設置しローカルネットワークにより有機的に結びつける分散階層システムが主流を成している。これらでは応答性を考慮した機能の分割と、それらの制御装置に係る人間の配置をいかにするかが重要なファクターとなる。《MELPLAC-300》はそれらの適用に対し融通性のあるシステムを構築できることをねらって製品化したものである。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 65~67 (1982)

An Electric Cooking Range

by Koichi Hibino, Tateo Toriyama & Koju Iwamatsu

To supply the increasing number of all-electric kitchens in apartment houses, a microcomputer-controlled electric cooking range has been developed by Mitsubishi Electric. Presented in the article are some features of this range, including soft-touch key operation, an indicator to show heating power, operating safety, and a wide easy-to-use grill, with technical descriptions.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 49~53 (1982)

Recent Technological Developments for Large High-Voltage Transformers: Part II

by Hisao Kan, Tsugio Watanabe, Toshitsugu Ishii, Moriaki Takechi & Eiichi Tamaki

The article focuses on short-circuit strength, ease of transportation, resistance to earthquakes, static electrification control, components, peripheral equipment, and software.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 68~72 (1982)

The Development of a New In-Line Thermoforming System for Refrigerator Inner Liners

by Fumiaki Baba, Masaru Saito, Takeshi Omura & Nao Kashiwa

To save energy and materials in the manufacture of refrigerators, a new thermoforming system has been developed and a suitable plastic (ABS resin) identified. This system uses closely integrated extrusion, vacuum forming, and trimming of plastic sheets of the new material, which are used as the refrigerator inner liners. The application has cut the energy consumed in inner-liner production to one half, while doubling productivity. The article introduces the development of this system.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 54~59 (1982)

A New Plant Controller, the MELPLAC-550

by Nobuo Ono, Tetsuo Ishii, Toshiyuki Murakawa, Kimio Yamanaka & Nobuaki Fujii

Sophisticated user requirements and rapid technological growth have stimulated major developments in industrial plant-control systems, particularly for steel making. It is hard to exaggerate the critical rôle of control systems in such advanced plants. The article introduces the MELPLAC-550, which has been developed by Mitsubishi Electric using the most advanced technology and incorporating years of experience with the requirements of users of the current MELPLAC-50 plant controller.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 56, No. 7, pp. 60~64 (1982)

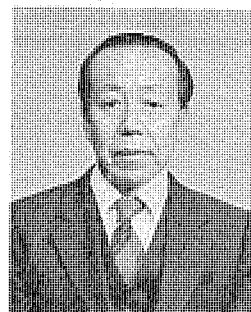
The MELPLAC-300 Remote Supervisory Total Control System

by Isaburo Kataoka, Fumiaki Shigeoka, Noritaka Egami, Toshimi Kojima & Haruo Sakurai

Control systems that meet the current need for versatility fall into two major categories: one comprises integrated, overall systems for electrical control, measurement control, and data control, the other, decentralized hierarchical systems for the fluid, organic establishment of these controls through local networks. In both types of systems, key factors include how to achieve the optimum location of human operators with respect to the controllers, and how the system functions should be allocated in accordance with the response required. The MELPLAC-300 can form a flexible system that satisfies these requirements.

大型電波望遠鏡特集号に寄せて

東洋大学教授 工学博士 田中 春夫
元東京大学東京天文台教授



四十数億年といわれる地球の歴史の中で、百万年という人類の歴史はその千分の一にも満たない。それでも百年足らずの人間の一生からみれば、これは何万倍という気の遠くなるような長さである。そして、ごく最近までの人類活動は、大自然の一部としてこれに順応し、地球の営みを大きく変えることはなかった。ところが、人類の歴史からみても何千分の一というこわすか200年の間に、人間は大自然に手を下し、地球の営みを急速に変えようとしている。その結果今我々はエネルギー問題、環境問題、人口問題など深刻な問題を抱え、将来の見通しもつかないまま悩んでいるのが実状である。

一方この200年の間に人類は、生活を豊かにし、その活動範囲を拡張する、いわゆる「文明」を大きく発展させた。今の悩みはまさにその報復にほかならない。そしてこの文明の原動力となったものは、大は果てしない宇宙から、小は素粒子に至る、さまざまな階層における自然現象の探究であった。今や人類は、この文明を最大限に活用し更に発展させて、自らを破滅から救う方途を模索しなければならない段階に達している。

核融合、サンシャイン計画、スペースコロニー構想などは、すべてこの線に添った現実的な努力の現れであろう。しかし、既知の原理を駆使するこれら現実的な努力もさることながら、更に基礎的な自然現象の探究から、ある日突然、すばらしい知恵が授けられないとは何人も断言できない。基礎科学は、まさに人類の存亡にもかかわるような重要な使命を担っているといえよう。

今回建設された大型宇宙電波望遠鏡も、単に果てしない宇宙のなぞに挑む壮大なロマンを追うばかりでなく、歴史的にみて、人類が後世のために果たさなければならない、重要な責務の一端を背負っているといえるのではなからうか。

宇宙電波の発見は、今から50年ほど前の1931年のことであるが、電波天文の歴史は第2次大戦終了後に始まったと考えて差しつかえない。我が国でも戦後4～5年にして太陽電波の研究に着手し、その後も着実な発展を遂げて、この分野では絶えず世界の第一線に立って多くの成果を挙げてきた。

一方宇宙電波については、1950年代の前半に波長21 cmの中性水素スペクトル線が発見されたところより、にわかに天文学者の注目を集め、各国で大型アンテナの建設が次々と進められた。そして1960年代は、巨大アンテナによる華やかな発見によって飾られ、新しい天文学の推進力としての電波観測の重要性がいやが上にも高まって行った。

このような背景のもとに、我が国の天文学者の間でも宇宙電波の重要性が認識され、大型電波望遠鏡を望む声が次第に強くなった。そして1960年代の後半に至り、天文学者の一致した要望と日本の技術革新とを背景として、大型宇宙電波望遠鏡の建設が真剣に討議

されるようになった。このころ、これと並行して、東京天文台では6 mミリ波望遠鏡の計画が進められていて、その反射鏡の製作に三菱電機(株)の技術陣が動員されていた。ミリ波での、星間分子観測を目指したこの計画にかかわる経験は、その後の大型装置の企画建設に大きな寄与をしたことは言うまでもない。

さて大型電波望遠鏡の計画をたてるに当たって、いろいろな案が出されたが、基本方針として、第一に「ある点で世界の水準を抜く」こと。第二に日本で初めての本格的装置としての「汎用性」を重視することになった。そこで、マイクロ波帯でもかなりの仕事ができるように単一アンテナの直径は45 mとし、しかもできるだけ鏡面精度を上げて、未開拓の短波長、大集光力に挑もうということになった。そして当時既に、分解能の点で光学望遠鏡に追い付き追い越そうという国際的動向を考慮して、基線長1 kmほどの干渉計を是非加えようということになった。

世の中に無いものを作るのを至上命令とした以上、新しい技術の開発がどうしても必要であった。そこで既にこのころから、アンテナの専門家として三菱電機(株)の喜連川隆氏、塚田憲三氏ほかが設計に参加することになった。その後も建設開始に至るまで、三菱電機(株)の技術陣がずっと「学術的」に参画し、計画実現の大きな力となったことは特筆に価する。

計画が一応まとまった1970年春に、「直径45 m級で特に鏡面精度の高い宇宙電波望遠鏡の早期設置」が日本学術会議から政府に勧告された。このときの説明資料では鏡面精度は未だ0.5 mmであった。

この段階で最大の問題は、どこがその建設と運営の世話をするかということであった。この計画が大学としては大きな予算と人員を伴うものであるため、その答えは容易に得られなかった。しかし1974年春に、東京天文台がすべて引き受けるという一大決意をしたことで、調査費がつき、計画が実現に向けて大きく前進した。

調査費が通ってからの最大の課題は用地交渉であった。混信が少なく、1 km四方ほどの平坦な高原ということで、富士山麓と八ヶ岳山麓に絞られていたが、う(紆)余曲折のすえ、結局信州大学の異例のご好意により10ヘクタールもの用地を借用することができた。この間3年の歳月が流れたが、これによりようやく本予算を提出することができ、1978年度から着工の運びとなったのである。学術会議勧告から数えて8年目であり、遅かったとも言えるが、三菱電機(株)の技術陣の協力で設計は絶えず更新され、世界第一級の装置ができ上ったことは喜びに堪えない。

今後この装置の最後の仕上げと改良とに、三菱電機(株)の最先端の技術が更に生かされ、宇宙への電波の目が、更に遠く更に明るく開かれることを期待して止まない。

1. ま え が き

1960年代におけるアンテナ技術の飛躍的發展、特にホモロジー概念の導入により、大型パラボラアンテナはそれまで精度の限界を与えていた自重変形による鏡面誤差から解放された。1971年、西独エッフェルスベルグに建設された直径100mの電波望遠鏡は、鏡面精度1mm(RMS)以上という驚異的な精度を実現しこのことを立証した。

1960年代後半から1970年代にかけてのミリ波技術の發展は、分子スペクトル観測という新しい窓を天文学にもたらし、複雑な有機分子を含む数十種類の分子が宇宙で発見された。

ミリ波の天文学の重要性が認識され、世界各国でミリ波用の電波望遠鏡が建設された。また、ミリ波で使用できる高精度の大型アンテナの建設が計画された。

大型宇宙電波望遠鏡の計画もこのようなものの一つである。

この論文では、大型宇宙電波望遠鏡計画の背景をなす天文学上の問題、世界の動向などについて論ずる。

2. 電波天文学の發展

最近20年の間に、天文学は大いに發展し宇宙像を大きく塗り替えていった。特に著しいのは、天文観測の手段が、ただ単に光(可視光)だけではなく電波、X線などに広がってきたことである。

ひとたび新しい窓がひらけると、そこで全く知られていなかった天体、あるいは現象がみつかって来る。そのような天体の本質が明らかになると、その背後のカラクリ——物質やエネルギーのやりとり、進化と循環の過程——がわかって来る。宇宙像のかくされた部分に光をあてることができるのである。

電波天文学の發展も、まさにそのようにして起こった。

新しい能力を持った電波望遠鏡によってもたらされた数々の発見が、「なぜ(謎)の天体」を登場させ、それが宇宙像に一筆書き加えるかぎ(鍵)となって行ったのである。

謎の天体クエーサーの発見、宇宙バックグラウンド放射の発見が、進化している宇宙の過去の姿を我々に見せてくれたし、謎の天体パルサーの発見は星の進化の最期の姿を研究する糸口を与えている。また、星間分子スペクトルの発見は、銀河の中での星の生成、物質の循環へと我々の眼を向けさせた。

これらの発見のほとんどは、従来の殻を破った新しい望遠鏡によってもたらされている。45m電波望遠鏡による観測がよいよいよ目前にせまり、5素子干渉計の建設が進んでいる現在、ここからひらけて来る新しい天文学について展望しておくことは意義あることと考える。

3. 電波はどうやって発生するか

3.1 基本的原理

天体における電波の発生原因は、針金やトランジスタを使わないだけで、人間が行っているのと同小異である。すなわち、電荷や双極

子を周期的に加速させればCWが発生し、不規則に加速させればある幅を持った雑音性のスペクトルの電波となる。

3.2 分子スペクトル線——宇宙の低温ガス

45m電波望遠鏡による観測項目で特に重要視されている分子の電波は前者に属する。

分子の中で+の電荷である原子核の配置と、-の電荷である電子の分布との間にズレがあれば、分子は電気双極子を有することになり、その回転によって電波の放射、吸収が起こる。

この場合、電波の周波数は分子の回転数に等しく、回転数は角運動量の量子化によっていくつかの値となる。例えば、最も単純な直線分子(HCN、CO、HC₃Nなど)では量子数 $n+1 \rightarrow n$ への遷移の周波数は

$$f = 2B(n+1) + (\text{遠心力などの微小項})$$

で与えられる。ここで、 B は周波数の次元をもち $2B$ の整数倍の周波数で放射、吸収が起こる。表1.にいくつかの分子の $2B$ の値を示すが、 B は分子の慣性モーメントに反比例するので、大型の分子ほど周波数が低いことがわかる。

更に複雑な分子では、回転ベクトルもXYZ3方向となり、状態間のカップリングなどでエネルギー準位構造は複雑となる。

図1.に45m電波望遠鏡でとられた青化水素(HCN)のスペクトルを示す。これは試験観測の際にとったもので、東京天文台製作の88GHz冷却ミクスと音響光学型分光計を使用した。横軸は周波数、縦軸は電波強度(雑音温度)を表す。

上のオリオン分子雲ではスペクトルは、中心のところが(尖)った部分が三つに割れ、更に横に広がった測帯波(スカート)を持っている。

スペクトルの幅の広がる最も重要な原因はドップラー効果で、上のスカートの部分はオリオン分子雲中心部での新しい星の誕生にともなっている乱流運動をあらわしているものだろう。中心の尖った部分は

表1. 分子の周波数, f

分 子 名	周波数, f (GHz) ($J=1 \sim 2$)
一酸化炭素 (CO)	115.271
青化水素 (HCN)	88.632
シアノアセチレン (HC ₃ N)	9.098
シアノテトラアセチレン (HC ₅ N)	0.581

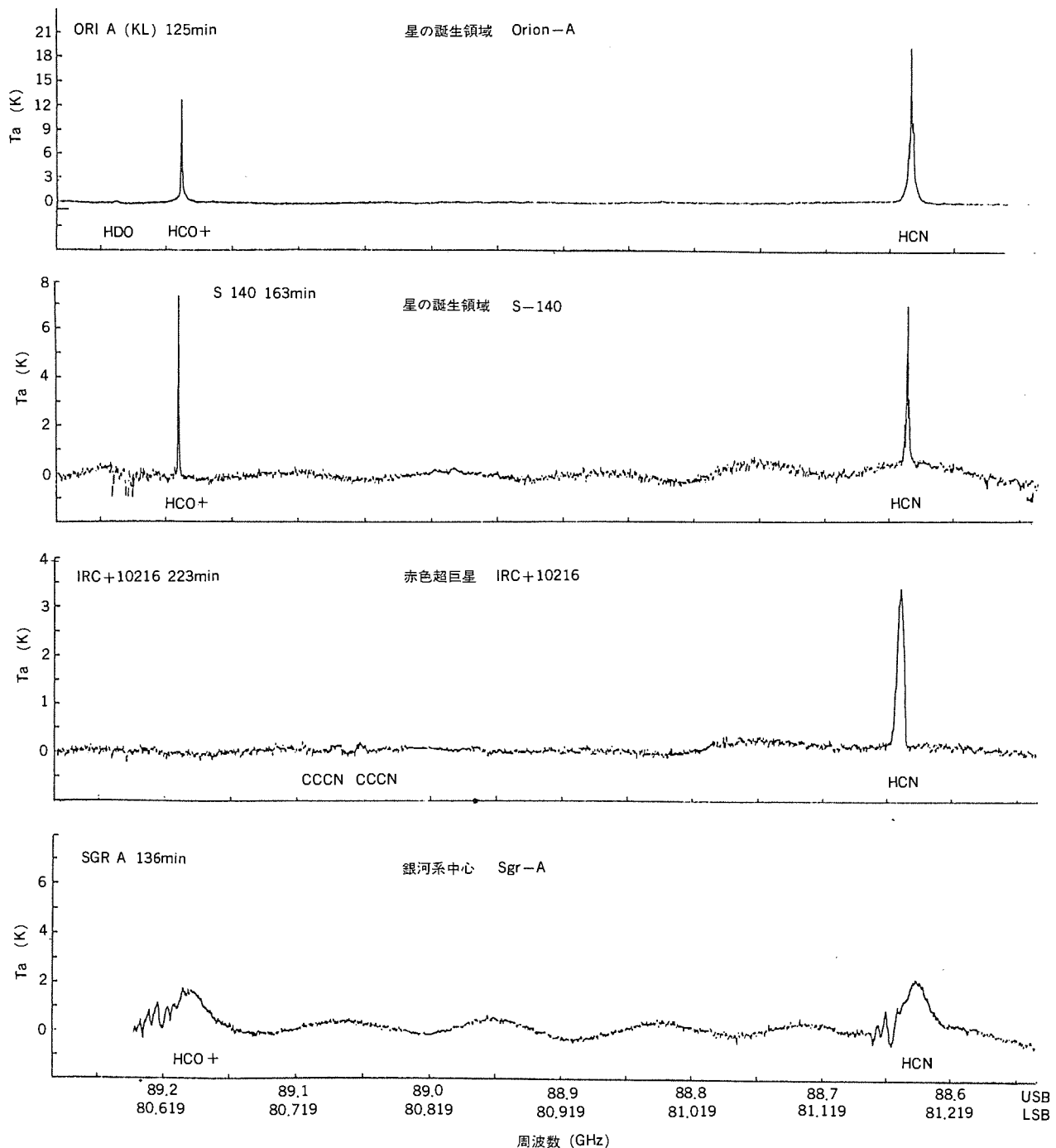


図 1. 青化水素(HCN) スペクトル

そのまわりを包んでいる静かなガス中のHCNの電波である。線が3本に分離しているのは窒素原子核の磁気モーメントのためにエネルギー準位が分離（超微細構造, Hyper Fine Structure）したものである。

その下のIRC+10216は、不安定を起こしガスを放出している変光星で、放出されるガスの流れの運動によって幅が広がっている。

銀河中心（射手座A）では、銀河系中心部の大規模なガス運動を反映して線幅は大きく広がっている。更に、手前にある冷たいガス中のHCNによる吸収があらわれている。

宇宙には、このように、分子を含むような低温のガス（星間ガス）が存在している。これらのガスは、低温で自らは発光しない、光に対してほとんど透明である、（ガスと共存するちり（塵）の微粒子は光

をさえぎるが）などの理由のため、従来の（光による）天文観測の手段ではなかなか手のとどかない対象であった。これが、分子スペクトルの電波観測によって一挙に、直接観測のメスが入るようになったわけである。

低温気相での代表的な現象は星の生成である。星間空間は、単に静かな冷たいガスではなく、その中で常に星が生まれ、また一生を終えた星の爆発によってエネルギーと物質が還元されるというダイナミックな輪廻の場である。そして、星の進化によって生じた重元素を百何十億年かけて蓄積してきた場所である。このような物質相に対し、電波スペクトルによって初めて観測が可能になったことは、天文学上まことに意味のあることである。

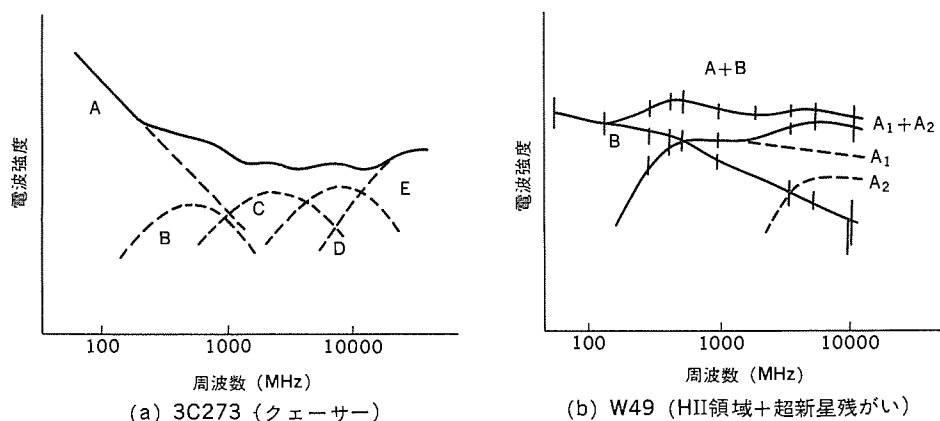


図 2. 電波源のスペクトル例

3.3 連続スペクトル——高温ガスの電波

さきにあげたもう一つの原因、すなわち、電荷の加速による電波について考えよう。

電荷といえばこの場合は電子である。我々が電子を加速して電波を発生させようとする場合には、アンテナを発振器につなぎ、電源電流を与える。

天体でも根本の理屈は同じで、振動電流を流す(アンテナ)、振動を起こす(発振器)、エネルギー源(電源)の三つの作用が必要である。

第一のアンテナになるのは、電子がある程度自由に動ける空間で、天体では、高温で電離した薄いガスがこれにあたる。電波天体の写真にいわゆる「星雲」が多いのはこのためである。

発振器としては、上記の電子が自由に動ける空間で、電子の動きを邪魔する機構が必要である。電子に作用する力としては電気と磁気の二通りが考えられる。

前者はイオンとの衝突である。電子がイオンと遭遇して進路をかえられることにより電波が発生する。電子の衝突エネルギーとしては熱運動だけで充分(エネルギーが高いとこえて衝突断面積が下がる)なので、熱電子からの電波という意味で「熱的電波」と呼ぶ。

もう一つの、磁場の場合は、電子は磁力線のまわりを eH/mc の周波数でらせん(螺旋)運動する(e は電荷、 H は磁場の強さ、 m は電子の質量、 c は光速)。熱電子の場合はすべての電子に対してこの周波数が同一であるので螺旋運動から生ずる電波は伝ばんしない。しかし、何等かの原因で電子のエネルギーが光速近くまで加速されると相対論的効果によって大量の高調波が発生する。これが外界に伝ばんして観測にかかることになる。

このような放射機構は昔電子シンクロトロンで加速された電子が発光してエネルギーを失うことからくわしく研究されたので、シンクロトロン放射と呼ばれている。また、

熱的でない放射機構ということで「非熱的電波」と呼ばれる。

熱的電波のエネルギー源は多くの場合生まれたばかりの高温星からの紫外線放射でまわりのガスが電離する、という過程で供給されるため、生まれたばかりの星の存在を示すと考えてよい。

非熱的電波における電子の加速は超新星や銀河中心核(クェーサーなども含む)の爆発によるガスのはげしい運動と磁場によるもので、そのような高エネルギー現象を代表している。

電子とイオンの衝突が不規則に起こること、いろいろなエネルギーの電子が存在すること等のために、これらの電波は広い周波数帯に広がった連続スペクトルとなる。

45 m 電波望遠鏡、5 素子干渉計の活躍が特に期待される短波長の領域にあっては熱的電波では高密度部分、すなわち生まれたばかりの非常に若い星のまわりのガス、非熱的電波源では高エネルギー、強磁場の部分を見ることになり重要な部分である。

そのような観測例を図 2. に示そう。図 2. は熱的電波源 W 49 及び非熱的電波源 3 C 273 のスペクトル(電波強度を周波数に対してプロットしたもの)を示している。

W 49 ではスペクトルは非熱的電波源 W 49 A と、熱的電波源 B₁、B₂ に分離される。短波長で観測される B₂ 成分はまさに生まれたばかりの星によって熱せられた密度の高いガス雲である。B₁ はそれより広がっているのも、誕生後 10 万年程度を経過しているであろう。

3 C 273 のスペクトルも同様に A、B、C……に分解される。高周波でみえる C、D、……の成分ほどより高エネルギー、かつ磁場の強いガス雲で、それらが膨張すると B、あるいは長時間たつてジェット状に外界に噴き出して A のようなスペクトルになる。

3 C 273 はクェーサー(あるいは準星)と呼ばれるはげしい爆発を繰返している天体の一つで、C、D 成分などは 1 光年の数分の一の大きさしかなく、しかも爆発エネルギーは我々の銀河系の百倍にも上ると考えられている。多くの銀河で、類似の(規模の大小はあるが)

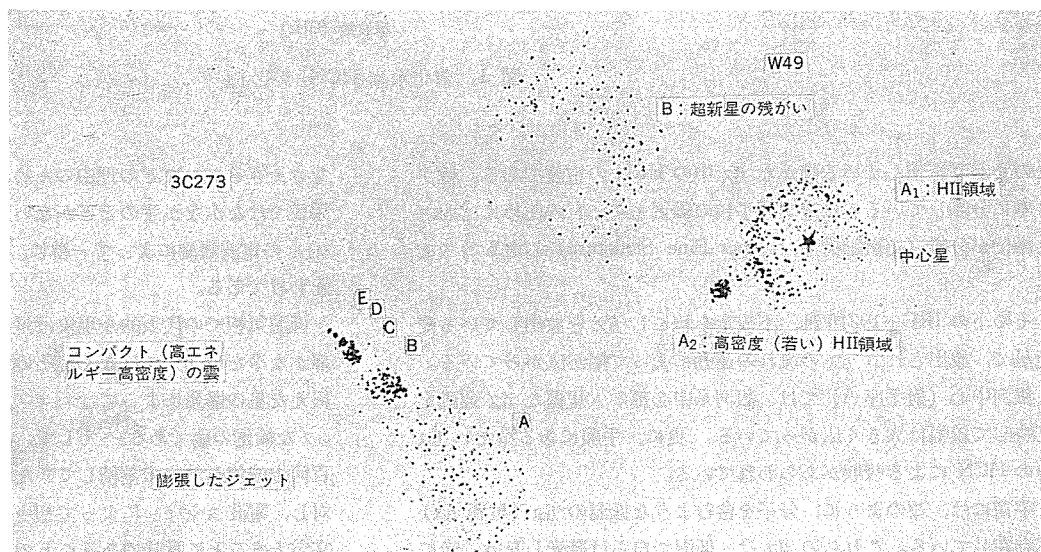


図 3. 電波源(W 49, 3 C 273)の姿モデル

爆発現象が観測されており、電波観測によって銀河進化の新しい側面をみることができるわけである。

図 3. は、上記の電波源の姿をモデル化して表したものである。

4. 電波望遠鏡

4.1 電波望遠鏡の発展

1960 年代、世界各地で大きな電波望遠鏡が建設された。これは、次々により大型のものを求めるといよりはむしろ高精度をねらって、観測の重点は短波長へと移って行った。1971 年、西独 エッフェルスベルグに完成した 100 m 望遠鏡はこの技術の集大成と言うべきもので、直径 100 m という世界一の大型ながら面精度 1 mm(RMS) 以内という驚異の高精度を示し、使い方によっては波長 7 mm でも観測できるといわれている。(図 4.)

1970 年代には、このような大型望遠鏡の建設は一時ストップした観があり、その代わりに、1960 年代後半にはじまった開口合成技術が発展し、オランダ、英国、オーストラリアなどに大規模な干涉計が建設された。

電波銀河やクェーサーの構造が直接観測されて爆発の姿が明らかになったのは、このような開口合成技術の発展のたまものである。このような技術の集大成として、1981 年米国ニューメキシコに完成した VLA(Very Large Array, 大規模アレイ望遠鏡)は、Y 字型に配された長さ 20 km の 3 つの基線上に直径 25 m のアンテナが全部で 27 台並べられており、角分解能 1 秒以下で電波源のマッピングが可能な望遠鏡である。(図 5.)

単一開口(いわゆるパラボラ型)アンテナでは、上述のように、大型の建設は一時ストップしたが、1960 年代終わりから 1970 年代に多くのミリ波望遠鏡が建設された。

これらの望遠鏡はほとんどが星間分子スペクトルの観測に使われ、宇宙に多くの分子を発見し、また、星の誕生の姿を明らかにしている。

この時期は、ミリ波エレクトロニクスが発展期にあり、この分野での強力なグループを持っている観測所では一様に成功し、そうでないところでは今一つ成果がさえないという傾向があり、従来、アンテナの「付属品」と考えられていた受信装置の重要性が認識されている。

1970 年代のもう一つの重要な発展として VLBI(超長基線干涉計)がある。これも、1960 年代にはじめられた技術であるが、1970 年代になって飛躍的に発展をとり、現在では世界各国の望遠鏡が参加してネットワークを組んでいる。

2 台のアンテナを干涉計としてつなぐ場合、直接ケーブルでつなぐ代わりに、両方のアンテナの信号をいったんテープレコーダーで記録し、テープを持寄って再生し相関操作によって干涉を得るという発想であるが、信号の位相まで含めた同期、2 本のテープから相関を抽出する操作、これを空間の輝度分布に逆変換する操作など、ハードウェア、ソフトウェアとも高度で大規模になるが、一方非常に長い基線長が得られるため分解能を高くとれる。

現在、このようなネットワークによって 1/1,000 秒角位の分解能が得られ、クェーサーのしん(芯)の構造が明らかになったり、 H_2O 分子の電波源の固有運動が測定されるなど、すばらしい成果が挙げられている。

4.2 期待される観測成果

大型宇宙電波望遠鏡は、ミリ波での世界で初めての大型観測装置である。45 m 電波望遠鏡は、汎用ながらミリ波での集光力が従来の

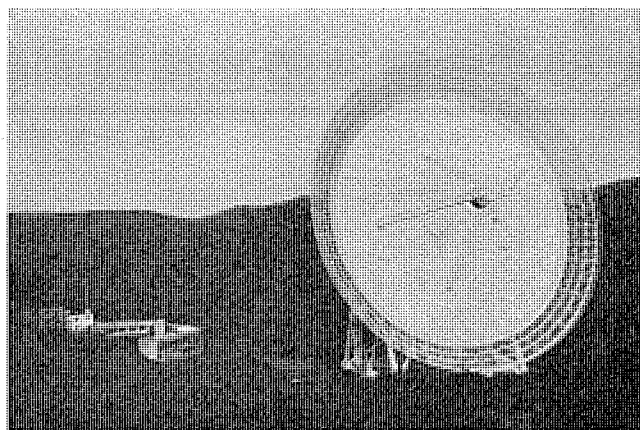


図 4. 西独 エッフェルスベルグ 100 m 望遠鏡



図 5. 米国 ニューメキシコ 大規模アレイ望遠鏡

ものとくらべてけた外れであり、また、ミリ波におけるビーム幅は約 15 秒で高分解能観測も可能にしている。また、バックエンドとして音響光学型分光計をそなえている。5 素子干涉計も、ミリ波における初めての開口合成望遠鏡でデジタル型分光相関装置により分子の観測が可能になった。

このように前例のない性能が生かされて様々な観測成果が期待されている。二、三の例について述べてみよう。

銀河外天体の分子の観測では、45 m 電波望遠鏡の大集光力によって観測範囲を 1 億光年近くまで広げ、また、近距離の銀河では中心核の構造を描き出すことができるだろう。

干涉計による観測によって星の誕生の場での分子雲の構造がくわしく観測され、原始星の活動などの手掛りも得られるだろう。

また、45 m 電波望遠鏡が VLBI 国際ネットワークに参加することにより、ネットワークの短波長における能力は大幅に上り、クェーサーの芯にせまることができるだろう。

以上は期待される観測成果の中のほんの一部にすぎず、多方面にわたって観測が行われ成果があげられるだろう。

これらの成果をあげ、更に、フロンティアを広げていくためには望遠鏡の能力を常に向上させていかなければならない。

その重要なものとしては、望遠鏡の精度、能率の向上のほか、超電導などを使ったミリ波高感度検出器の開発、更に大規模な分光分析装置の開発、画像処理技術の開発などを行って行かなければならない。

大型宇宙電波望遠鏡観測装置

赤羽 賢司*・森本 雅樹*・立川清兵衛**・水沢 丕雄***・塚田 憲三*

1. ま え が き

電波天文学はアンテナ技術、短波長での観測技術、分解能などの飛躍的發展に伴い、電波観測の間口が大きく広がり、光学望遠鏡では見れない星間分子スペクトルなどの新しい観測が行われ、独自の分野が開かれてきた。

こうした事情を背景に、この大型宇宙電波望遠鏡観測装置(図1. 参照)の建設が計画され、ミリ波などの短波長で利用できる高精度な大口径パラボラ型反射面を有し、同時に、広い分野の観測に対応できる万能性を持った45 m 電波望遠鏡とミリ波帯での高分解能を有する10 m 5素子干渉計の建設が計画された。

電波望遠鏡における必要な技術として、次の条件が必要である。アンテナには高集光力、高指向精度、広い分野の観測に対処できる広帯域性(広い周波数範囲、異なる周波数帯域の同時観測可能)、受信装置には低雑音化、広帯域性及び超合成干渉観測に耐えうる安定度、各種分子のスペクトルを観測し微弱電波の受信を可能とする電波分光・相関分光ができる処理技術、また大口径アンテナの鏡面精度及び重力や風による変形の精密測定、大量の情報の正確な処理、電波源の同定などを精確・迅速に行える電子計算機を駆使した制御処理技術などが必要である。

アンテナの高集光力を得るには大口径にし、重力変形を補償するホモロジー設計⁽¹⁾、高能率を目指した鏡面修整技術⁽²⁾、広帯域性が大口径アンテナで得られやすい集束ビーム給電技術⁽³⁾、大口径アンテナの高指向精度を得る方法として、アンテナの代表点を光学測定器で精度よく測定するコリメータ方式⁽⁴⁾、高精度鏡面を任意の姿勢で精密測定する方式などの技術⁽⁵⁾を、目的に合致するように駆使し、個々の技術を向上し具現化する必要がある。

受信装置は可及的に低雑音化し、観測に合致した広帯域性・高周波数安定性、相関分光方法と具現化、電子計算機を駆使した制御処理技術の開発が必要である。

これらの諸問題を宇宙電波観測の観点から分析し、この装置でど

のように解決し、具現化したかを述べるとともに、それらの結果に基づいて設計した大型電波望遠鏡観測装置の構成、主要性能、諸元を述べ、試験観測で得られた結果を例示する。

2. ミリ波観測装置としての技術的課題

2.1 アンテナ

大型アンテナをミリ波で使用する最大の難点は、鏡面精度であった。表1.に、世界の代表的大型電波望遠鏡(建設中、計画中のものを含む)を示したが、口径40 m以上のパラボラアンテナでは、鏡面精度1 mmが限度であることが分かる。

面精度を決定する最大のものは自重変形であるが、これはホモロジー構造の考え方の導入により克服されつつある。45 m 電波望遠鏡におけるホモロジー構造、更にそれに付随したジョイントの構造、高次変形モードなどの問題については、この特集の掲載論文「大型アンテナのホモロジー設計」⁽⁶⁾にくわしく述べられているが、自重変形による鏡面誤差寄与分を0.08 mm以内におさめることができた。

自重変形の問題が解決すると更にそれに隠されていた誤差要因がクローズアップされる。重要なものとしては、鏡面測定、鏡面パネルの精度、主鏡構造の熱変形からの保護などがある。

鏡面測定に関しては、小型アンテナでは回転テンプレート(舟形ゲージ)が用いられ、干渉計用10 mアンテナでは0.1 mm台の鏡面精度が得られており、更に改善の可能性が追究されているが、大型アンテナで

表 1. 世界の代表的大型電波望遠鏡

所在地	(国名)	口径(m)	面精度(mm)	完成年
パークス	オーストラリア	64	2	1962
グリーンバンク	米	43	1	1964
アルゴンキン	カナダ	46	1	1965
エッフェルスベルグ	西独	100	1	1971
野辺山	日本	45	0.2	1982
ビコベルタ(スペイン)	西独	30	0.1	建設中
マウナケア(ハワイ)	英	15	0.07	計画中

表 2. 鏡面測定装置の性能、諸元

測距装置	変調光を送出しコーナキューブからの反射光の遅延を変調光の位相によって測定する。
光源	単一モード半導体レーザー(1,200 MHzで変調)
受光部	フォトダイオード
測距範囲	2 m~24 m
測距精度	±0.1 mm(測距距離22.5 m以内)
測角装置	自動視準
方式	対物口径60 mm, 有効焦点距離500 mm
光源	LED
受光部	4分割フォトダイオード
角度読取	マグネスケールによる
測角精度	±2"
標的	コーナキューブ(50 mmφ) 700個
制御	小形計算機V-1500による自動測定
測定時間	約6時間

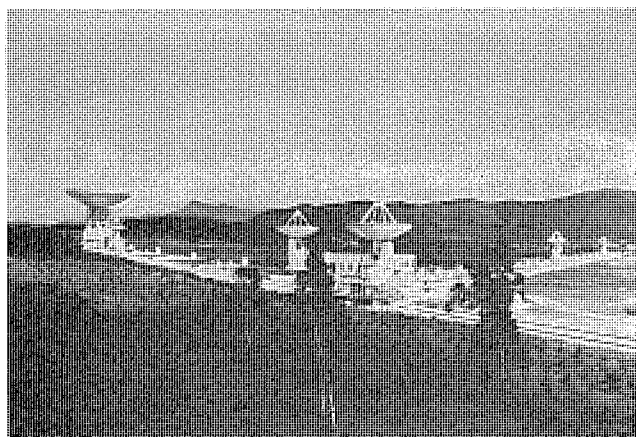


図 1. 大型宇宙電波望遠鏡観測装置

はこの方式は不適当である。45 m 電波望遠鏡ではレーザ測距儀と、自動視準のセオドライトを同軸の光学系に装荷した鏡面測定装置を開発し⁽⁶⁾、従来のテープと目視式セオドライトによる測量方法と比べ、精度を飛躍的に向上させ、更に測定シーケンスを自動化しコンピュータインタフェースを可能にした。鏡面測定装置の諸元を表 2. に示す。

鏡面パネルについては、日射時の変形防止、軽量で剛性が高いなどの理由からアルミニウムハニカムサンドイッチパネルを使用した。特に、45 m 鏡の内周部ではスキン材として熱膨張の少ない CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) を使用している⁽⁷⁾。

第三の問題である温度差による変形は、主鏡骨組構造を断熱板でカバーし、鏡面パネルの裏面に断熱材を張付けるなどで外気、日射などから遮断し、またカバー内部の空気をファンでかくはん又は換気することにより温度を均一化して防いでいる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

以上の方策によってそれぞれの誤差要因の鏡面誤差に対する寄与を小さくし、10 m で 0.1 mm 台、45 m でも 0.2 mm を切る値を実現している。表 1. で明らかとなおり、45 m アンテナについては、従来の大型アンテナの精度を大きく破り、ミリ波観測に必要な 0.2 mm RMS という値が実現された。また、表から分かるように、口径 D と鏡面精度との比は 5×10^{-6} を下回っている。使用最低波長限界を $\lambda \sim 8\lambda$ とすればビーム半値幅 λ/D は 4×10^{-5} ラジアンすなわち 3/1,000 度以下となる。アンテナの性能を 100% 生かすためには指向精度としてその 1/10 程度が要求されるが、大型アンテナでそのような性能を持ったものはまだ作られていない。高精度大型アンテナ技術としては、いまや、鏡面精度でなく、指向精度が限界を与える時代に入ったと言っていだろう。

特に重要と考えられるのが熱、風などの外乱による指向誤差で、なかでも後者は、ホモロジー構造という柔構造のアンテナに対しては重要である。

45 m 電波望遠鏡では、マスタコリメータの採用、副鏡位置の常時モニタなどによって 1/1,000 度 (RMS) の指向精度を得ているが、更に向上が必要である。

45 m 鏡をおいけて現在進行中の大型ミリ波望遠鏡計画としては、西ドイツがスペインに建設中の 30 m 望遠鏡、英国がハワイマウナケア山に建設を計画中の 15 m 鏡などがあるが、前者ではかなり丈夫な構造の採用で風による揺れを逃げようとしているのに対し、後者は光の天体望遠鏡のようなアストロドームを採用して根本的な解決を図ろうとしている。

2. 2 低雑音フロントエンド

マイクロ波帯の増幅器としてはヘリウム冷却のパラメトリック増幅器が、アンテナスピルオーバーによる雑音温度をはるかに下回る低雑音を示し、技術的には最終兵器とみなせる性能を有している。

これに代わるものとしては、マイクロ波用ガリウム砒素 FET 増幅器があり、冷却によってパラメトリック増幅器に匹敵、あるいはより優る性能を持ち得ることが明らかになってきている。20 GHz 程度までの周波数では近い将来パラメトリック増幅器と置き換わるであろう。

より短波長であるミリ波では、ポンプ源の得難さ、回路設計の困難などによりパラメトリック増幅器は性能的にも使い勝手からも不適当である。

現在は、ガリウム砒素ショットキーバリアダイオード、あるいはその改良形のモットダイオードなどによるミキサが使われている。中間周波初段に低雑音パラメトリック増幅器を用い、ミキサと一緒に 20 K まで冷却す

るなどにより 200 K 程度の雑音温度が得られている。

更に、マイクロ波領域と同程度の性能を求めるためにはこのようなオームックなミキサでは変換損失が存在し、温度を下げてても別の原因による雑音を有する半導体形のミキサには限界がある。

現在有望とされているのは超電導体の極端な非直線性を利用して周波数変換を行うジョセフソン接合あるいは SIS (超・不・超電導体の接合) 接合を使ったミキサである。超電導時の量子効果によるミクシングで動作点をえらべば変換利得がある、雑音発生が少ないなど本質的にダイオードミキサより良いとされている。実験室では光子のゆらぎによる雑音 (量子リミット) ぎりぎりの性能が得られたと報告されている。

ミリ波の雑音としては量子限界以上に、地球大気の熱放射が存在する。特に短ミリ波帯においてはこれが著しく、上記の技術発展によって近い将来には高冷乾燥地に観測所をえらぶことが雑音温度低減の決め手になる日も近い。

45 m 電波望遠鏡と 5 素子干渉計では、センチ波ではパラメトリック増幅器、ミリ波ではモットダイオードミキサを使用している。ミリ波で上記のように技術革新が近付いているので、積極的に開発を進め、アンテナの性能が最高に発揮されるこの領域で、低雑音の面でもリードしていくことが必要である。

2. 3 情報をとり出すバックエンド

ここでは、特に大がかりになる分光分析用バックエンド (ラジオスペクトロメータ) について述べる。

通常、電波分光分析は周波数掃引受信機などで行うが、雑音性の信号を扱う電波望遠鏡では信号対雑音比の観点から不利である。最も単純には、少しずつ違った周波数に同調したフィルタを多数ならべるフィルタバンク方式が考えられる。更に一歩進んだ方式としてはディジタル回路で自己相関をとり、これをオフラインの計算機でフーリエ変換してパワースペクトルを得る相関形スペクトル計がある。

ドップラー効果による周波数の広がり大きいミリ波では分光計の帯域幅が要求され、クロック周波数によって制限を受けるディジタル相関形は不利である。そのためフィルタ形が用いられているが、いちいちフィルタを巻き、同調をとって、それぞれに増幅、検波器をそなえるという複雑さのために、大規模なものは作りにくい。現在最大規模のフィルタバンクは 500 チャンネル程度である。

例えば、周波数分解能を 1 MHz (波長 3 mm ではドップラー幅の分解能 3 km/s) としても 500 MHz のバンド幅しかとることができない。アンテナは何オクターブもの帯域を受信し、フィード系でオクターブに制限され低雑音増幅器で更に 2 GHz 程度にしぼられたものが、またここで 1% 以下のバンド幅になってしまう。

6 m ミリ波望遠鏡用に東京天文台で実用化を進めてきた音響光学形分光計は中間周波信号をいったん超音波にかえ、これを二酸化チタル結晶中を伝ば (播) させ、レーザ光で照射、一回折光の分布をホトダイオードアレーで検出する方式 (超音波光変調・偏向素子と同じものである) で、チャンネルごとにフィルタを巻くなどの手作的要素はほとんどなく 2,000 チャンネル程度の分光能力を有するものの製作は比較的容易である。

45 m 電波望遠鏡ではこの方式で広帯域 8 台、高分散 4 台計 24,000 チャンネル分を備え、ミリ波におけるアンテナのけた外れの性能と相まって、分光能力でもけた外れのものとなっている。

5 素子干渉計においては、二つのアンテナからの信号を周波数ごと

に相関をとる分光相関計が必要となる。こちらでは中間周波信号を

直接フーリエ変換してから相関演算を行う、従来の相関形デジタル方式とは正反対の操作で、演算の平行、パイプライン化を可能にしたF X方式を開発採用し、当初100 MHz目標、最終的には320 MHzの

帯域幅が得られる見通しである。

2.4 計算機による制御、データ処理、ディスプレイ

上記のような技術的發展は、システムの高精度化、情報量の爆発的な

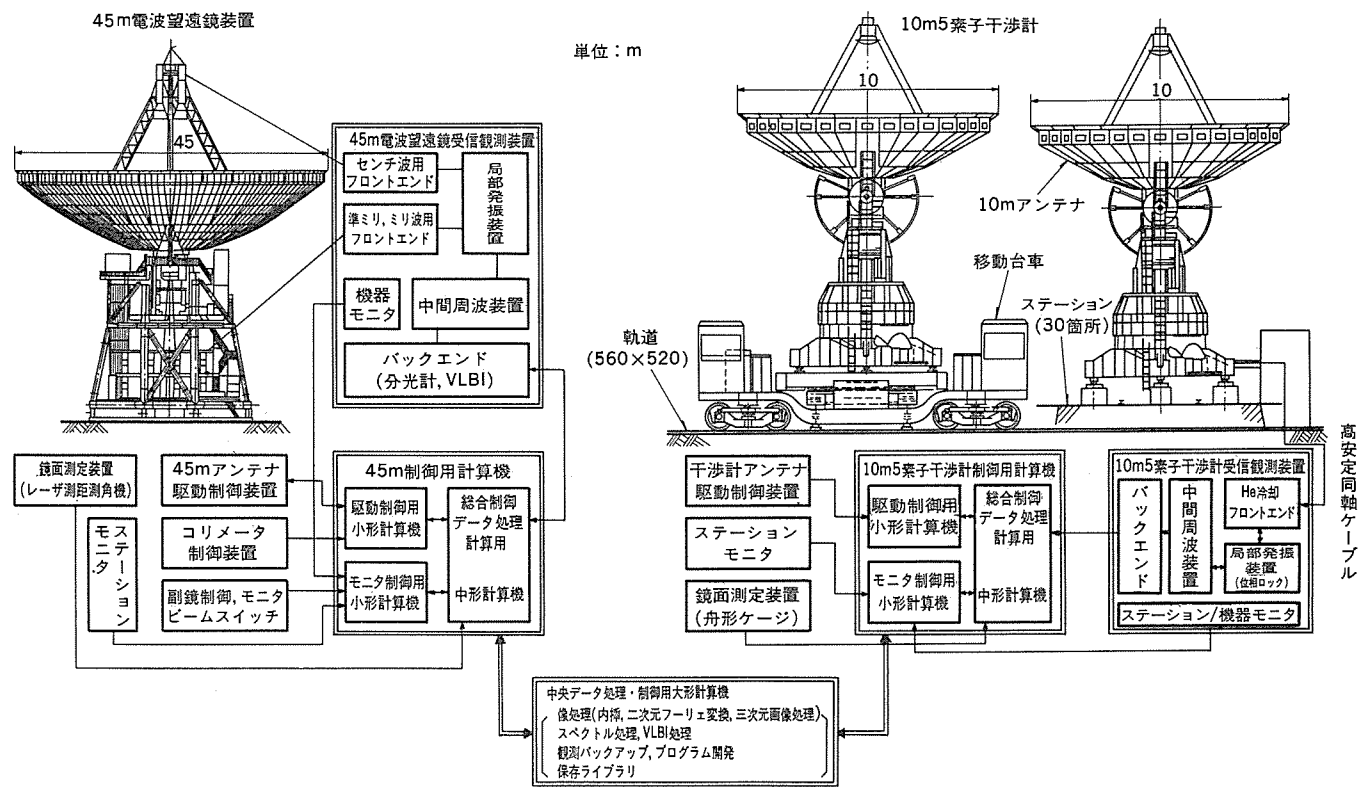


図 2. 大型宇宙電波望遠鏡観測装置構成

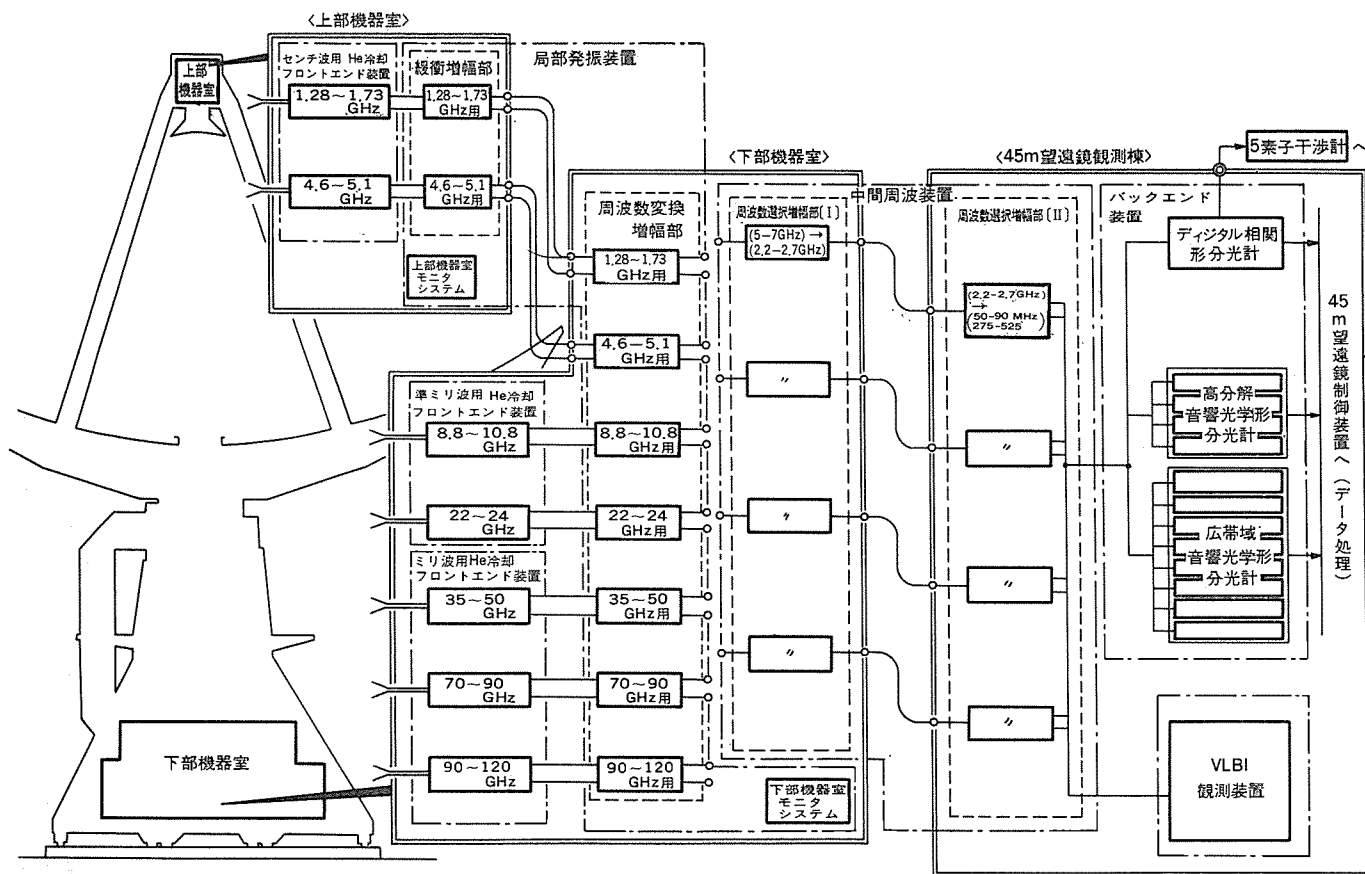


図 3. 45 m 電波望遠鏡受信観測装置構成

増加、操作の大幅な複雑化を招いている。また、電波望遠鏡という目的のためには、これらの制御・処理・ディスプレイが、有機的に連携に行われなければならない。従来は、ミニコンあるいは中形機によってアイテムごとに制御・処理などが行われていたが、それでは上記のような有機的な操作は不可能となってきた。

45 m 電波望遠鏡と5素子干渉計では各装置をそれぞれ3台のミニコンが担当し、それを中央にあるホストが総合的に有機的につなぎ、マシンインタフェースする方式をとっている。ハードウェアと同様に、ソフトウェアも膨大なものになり、現在制作が進められている。

3. 装置の構成と主要性能

この観測装置は、45 m 電波望遠鏡、10 m 5素子干渉計、受信観測装置、データ処理・制御装置及び共通設備で構成し、その主要構成は図2.である。

45 m 電波望遠鏡⁽⁸⁾で集光された宇宙電波(1~86 GHz)は受信観測装置で低雑音増幅され、電波強度、スペクトル、偏波及びそれらの時間変化などに処理し、データ処理・制御装置に送られ、そこで画像処理されてディスプレイ、プリント又は保存ライブラリなどに処理される。また、データ処理・制御装置からの制御信号により、45 m 電波望遠鏡が駆動・制御され、各装置の状態モニタ、フィードバック制御が行われる。一方、10 m 5素子干渉計⁽⁹⁾で得られた宇宙電波も受信観測装置で低雑音増幅され、周波数変換、相関分光、フーリエ成分に分解されてデータ処理・制御装置に送られ、画像処理されディスプレイ、プリント及び保存ライブラリなどに処理される。

受信観測装置は、45 m 電波望遠鏡受信観測装置(図3.)及び10 m 5素子干渉計受信観測装置(図4.)で構成し、主要性能は表3.である。45 m 電波望遠鏡受信観測装置はディックスイッチを内蔵したHe冷却低雑音増幅器(フロントエンド)、周波数切換・位相ロック・ドップ

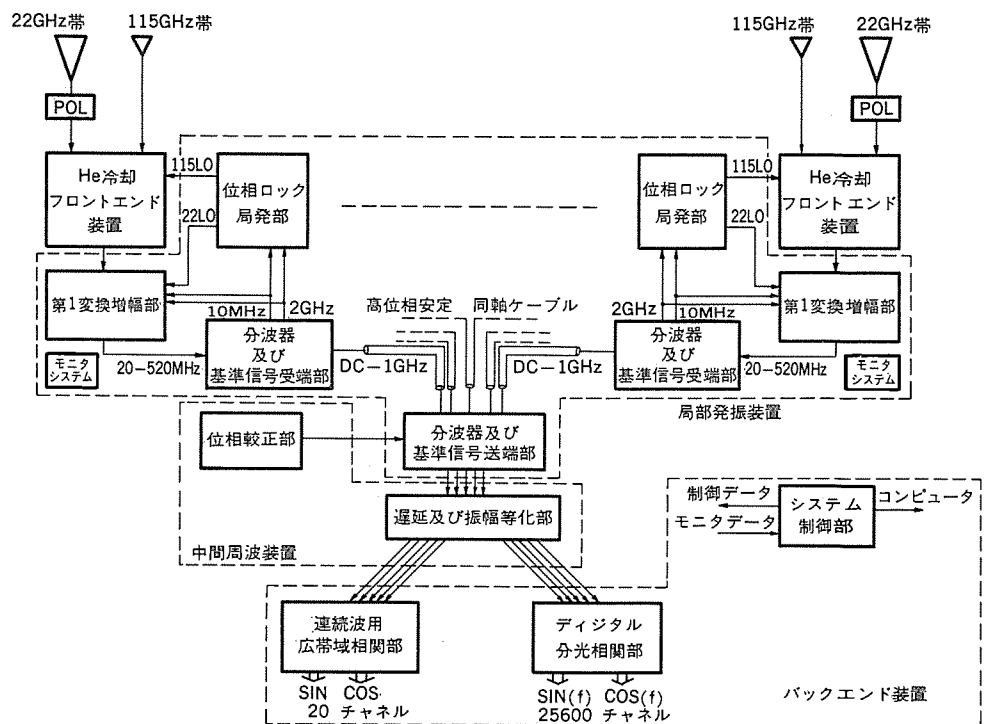


図4. 10 m 5素子干渉計受信観測装置構成

表3. 大型宇宙電波望遠鏡観測装置主要性能

項 目		45 m 電 波 望 遠 鏡		10 m 5 素 子 干 渉 計	
アンテナ系性能	アンテナ方式	変形クーデ形グレゴリアン		クーデ形カセグレン	
	アンテナマウント形式	高度・方位角方式		高度・方位角方式	
	駆動方式	アンチバックラッシュ電気駆動方式		アンチバックラッシュ電気駆動方式	
	制御方式	計算機制御及びマニュアル制御		計算機制御及びマニュアル制御	
	回転範囲	高度角9〜93°, 方位角±270°		高度角0〜93°, 方位角±270°	
	指向精度	0.005° RMS (再現性0.001° RMS)		0.005° RMS (再現性0.002° RMS)	
	耐風速 (非破壊)	瞬間最大 65 m/s		瞬間最大 60 m/s	
	使用周波数	1〜90 GHz		22〜115 GHz	
受信観測装置性能	開口能率	5 GHz : 65%, 22 GHz : 59%, 86 GHz : 20%		22 GHz : 63%, 115 GHz : 22%	
	雑音温度	5 GHz : 30 K, 22 GHz : 23 K, 86 GHz, 46 K		22 GHz : 20 K, 115 GHz : 74 K	
	サイドローレベル	CCIR 勧告レベルに準拠		CCIR 勧告レベルに準拠	
	使用周波数及び雑音温度	1.28〜1.73 GHz 35 K 4.6〜5.1 GHz 25 K 8.8〜10.8 GHz 35 K 22〜24 GHz 80 K 35〜50 GHz 270 K 70〜90 GHz 380 K 90〜120 GHz 600 K		22〜24 GHz 60 K 105〜117 GHz 600 K	
	周波数安定度	1×10 ⁻⁸ /日		1×10 ⁻⁸ /日	
	バックエンド特性	音響光学形 デジタル相関形 (広帯域) (高分散)		連続波用 デジタル分光 広帯域相関部 相関部	
	チャンネル数	16,384 ch 8,192 ch 4,096 ch		— 1,024 ch	
	分解能	280 kHz 40 kHz 最高 153 Hz		— 最高 5 kHz	
データ処理・制御装置	帯域幅	2,000 MHz 200 MHz 最高 40 MHz		250 MHz 最高 320 MHz	
	V L B I	NASA の MARK III に準拠		—	
	鏡面測定装置	レーザ測距測角機 測距精度 : 0.1 mm RMS, 測角精度 : 1 秒角		舟形ゲージ 測定精度 0.05 mm RMS	
	中央処理装置	内部演算機	32 ビット	小形計算機	16 ビット
	レジスタ構成	汎用レジスタ	汎用レジスタ	汎用レジスタ	汎用レジスタ
		16 語 × 4 組	8 語	8 語	8 語
	演算速度	FORTRAN ミックス	加減算	加減算	加減算
		約 1.6 μs	約 1.6 μs	0.75 μs	0.75 μs
主記憶	サイクル時間	430 ns	550 ns	550 ns	
	データ幅	8 バイト	16 ビット + 2 パリティ	16 ビット + 2 パリティ	16 ビット + 2 パリティ
容量	4 M バイト	512 K バイト	512 K バイト	512 K バイト	
	入出力	5 M バイト/秒 × 2	3 M バイト/秒	3 M バイト/秒	3 M バイト/秒

表 4. データ処理・制御装置の主要機能

45m 電波望遠鏡制御用計算機	10m 5 素子干渉計制御用計算機	中央データ処理・制御装置(計算機)
1. アンテナ鏡面測定及び調整 レーザ測距測角儀・パネル調整機構による測定データ処理及び鏡面修正 2. 天体の追尾 天体位置計算, 機差補正, 大気屈折補正, 天体追尾, 天球走査, ビームスイッチ 3. 受信機の制御 受信機各部の制御, 校正を観測データ集録と同期させる。 4. 観測データの集録と記録 受信装置からのデータ集録, 処理, 校正, スペクトル計算 etc. 5. 観測データのモニタ 6. 観測者との対人インタフェース 7. モニタ系制御 8. VLBI 観測 9. プログラム開発	1. アンテナ鏡面測定及び調整 舟形ゲージによる測定データ処理及び鏡面修正量計算 2. アンテナ系の追尾 天体位置計算, 機差補正, 大気屈折補正, 天体追尾, 天球走査ステーション補正 3. 受信機の制御 5 素子すべて実施 4. 観測データの集録 データ取込み, 並べ換え, 積分, 位相検波 5. 観測データの処理と記録 相関直校正, 二次元像合成, 観測ビーム合成 6. 観測モニタ 7. 観測者との対人インタフェース 8. モニタ系制御 9. プログラム開発	1. 像処理 利得・位相校正, 二次元空間内挿, 像合成, クリーン処理, 三次元画像処理 2. スペクトル処理 相関形スペクトル計, スペクトルのベースライン補正・校正 3. VLBI 処理 相関出力編集, 利得・位相校正, パラメータ推定・補正, 二次元分布推定 4. 観測バックアップ 電波望遠鏡・干渉計に直結した各処理制御装置にオンラインで結合して支援する。 5. プログラム開発 6. 保存ライブラリ 7. 一般科学計算, シミュレーション ・アンテナ熱変形, 重力変形などのシミュレーション ・電波源構造, 分子線放射機構の研究 ・装置の設計のシミュレーション

ラ ー 変化の追尾機能を有し, 計算機制御可能な局部発振装置, 周波数選択可能な中間周波装置, デジタル 相関形分光計, 高分解音響光学形分光計及び 広帯域音響光学形分光計より成る バックエンド 装置及び装置間インタフェース 機器で構成する。10m 5 素子干渉計受信装置は, He 冷却低雑音増幅器 (フロントエンド), 高位相安定局発, 周波数変換, 分波・基準信号送受の機能を有する局部発振装置, 位相校正, 遅延・振幅等化機能を有する中間周波装置及び連続波用広帯域相関部, デジタル分光相関部, システム 制御部より成る バックエンド 装置及び装置間インタフェース 機器で構成する。

データ 処理・制御装置は 45m 電波望遠鏡制御用計算機, 10m 5 素子干渉計制御用計算機及び中央データ処理・制御用計算機で構成している。前二者は観測運用面, ソフトウェアの互換性などの観点から同一構成がとられ, 各装置の モニタ系制御及び駆動制御用としてそれぞれに小形計算機を, 総合制御及びデータ処理・計算用として中形計算機, インテリジェント 機能を持った中継端末で構成している。中央データ処理・制御用計算機は計算機間結合装置により, 前二者の計算機と結合して観測の統括制御・データ処理を行い, 各観測室に配した TSS 端末から観測者が直接指令したり, 図形入出力装置により詳細な解析・校正を対話的に行ったり, 画像データなどの記憶, データの記録・再生などを行い得る大形計算機である。このデータ処理・制御装置の主要機能(処理項目)を表 4. に示す。

大型電波望遠鏡を短波長で使用可能な高精度を得るには精密な鏡面測定が不可欠であり, そのために 45m 電波望遠鏡用としてレーザ測距測角儀が, 10m 5 素子干渉計用として舟形ゲージが開発され, それぞれ鏡面誤差測定精度 0.1 mm RMS, 0.05 mm RMS 以下を目標としている。

4. 測定結果

この観測装置の特性測定のために, 45m 電波望遠鏡用に野辺山宇宙電波観測所から約 10 km 離れた赤岳山頂(海拔 2,900 m)に, 10m 5 素子干渉計用に約 1.9 km 離れた飯盛山山頂に, それぞれコリメーション装置を設置した。これらのコリメーション装置を用いて測定した結果の一例として, 45m 電波望遠鏡の広角パターン(22 GHz)を図 5. に, 5 素子干渉計用 10m アンテナの放射パターン(115 GHz)を

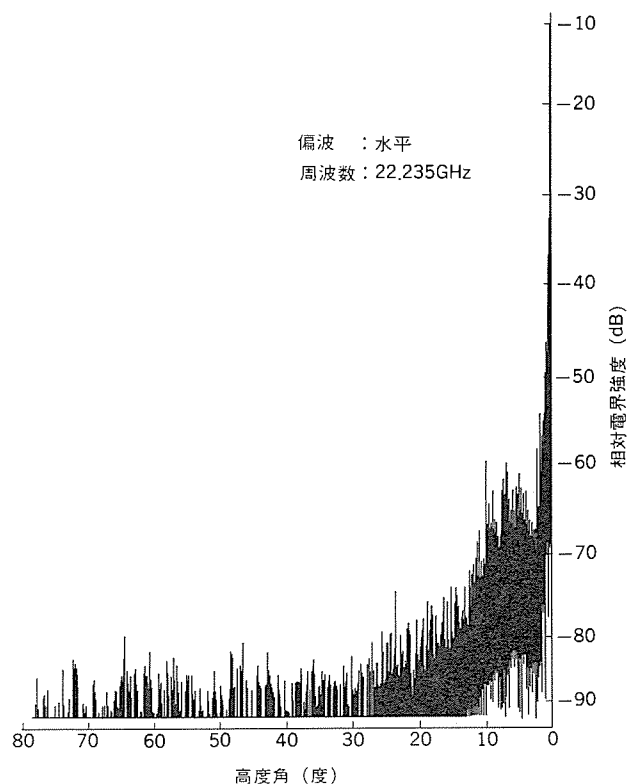


図 5. 45m 電波望遠鏡の広角パターン (22 GHz)

図 6. に示す。

この装置の試験観測結果の一例として, 図 7. に オリオン 原始星の一酸化けい素 (SiO) メーザスペクトルと H^{13}CN , SO などのスペクトルを高分解音響光学形分光計を用いて同時に マッピング した結果を, 図 8. に SiO メーザ電波源(WHya)を用いて 45m 電波望遠鏡の放射パターン(86 GHz) の測定結果を示す。

これらの観測は, 電波望遠鏡の総合的動作チェックを目的としたものであるが, それぞれに新しい結果を含んでいるものであり, 従来の望遠鏡では絶対的に得ることが出来なかったものである。

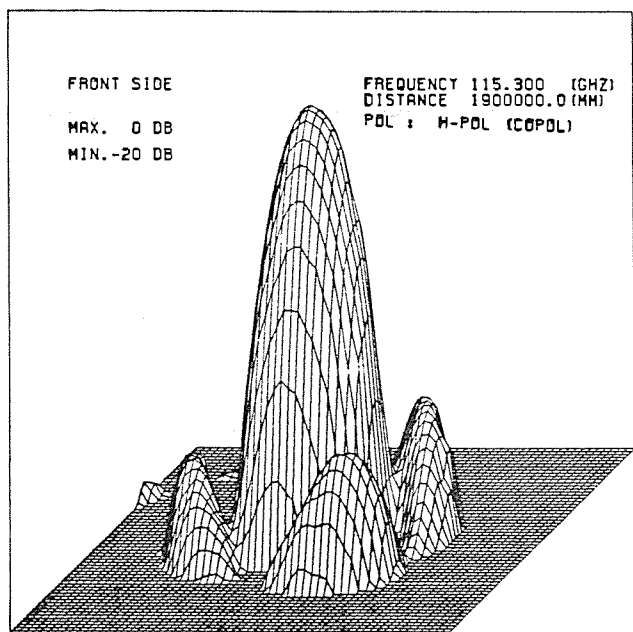


図 6. 5 素子干渉計用 10 m²アンテナの放射パターン (115 GHz)

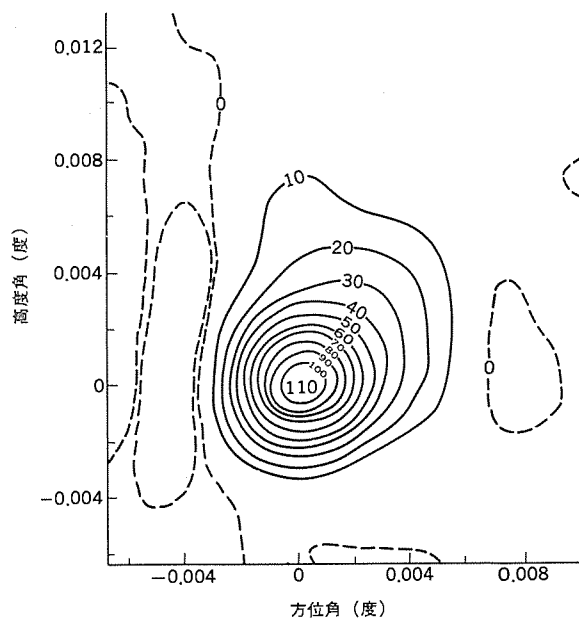


図 8. 45 m 電波望遠鏡の放射パターン (86 GHz)

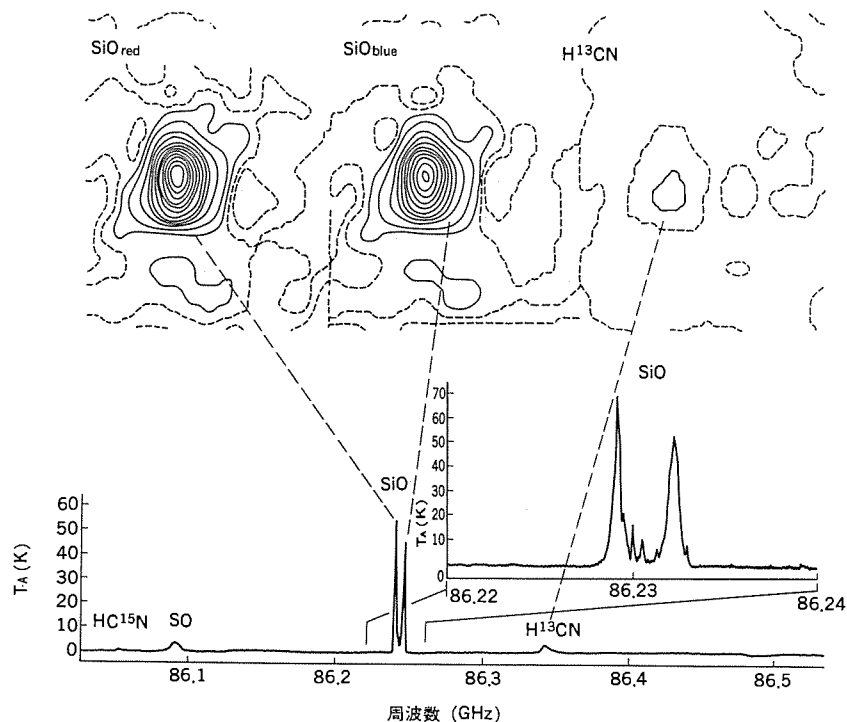


図 7. オリオン電波源の周波数スペクトル (86 GHz)

5. む す び

大型宇宙電波望遠鏡観測装置のうち、45 m 電波望遠鏡はすべての機器が整い、昭和 57 年 1 月より試験観測に入り、10 m 5 素子干渉計は昭和 57 年度装備される受信観測装置などとの組合せによる試験観測に入る予定である。

この観測装置に期待される成果としては、新しい分子の発見、宇

宙、特に銀河系外での同位元素量の問題、星の誕生の問題など多岐にわたるが、それらを達成させ更に発展して行くためには、アンテナの一層の精度向上、特に指向精度向上、受信機の改良、ソフトウェアシステムのグレードアップなどの仕事が山積されている。また、見方を変えれば、機械工学、電子工学、情報工学などの立場から、このような最先端ぎりぎりの性能に挑戦すること自体大いに興味あることと言えよう。各方面からの御支援を期待する次第である。

この観測装置の開発・製作に当たり、有益な御意見、御指導を賜った各界の関係各位に深謝の意を表す。また、この装置の開発・製作に参加した各メーカーが最先端技術に挑戦し、世界に誇り得る装置を作り上げたことに深謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) S. Hoerner : J of the Structural Division, ASCE, 93, No. ST 5 (1967)
- (2) 水沢 : 電子通信学会論文誌B, 52-B, 2, P. 78~85 (昭43-2)
- (3) 別段ほか : 電子通信学会アンテナ伝播研究会資料, AP-73-29 (昭48-6)
- (4) E. G. Bowen et al : PIEE, Australia, P. 96~105 (1963-2)
- (5) N. Kaifu : NRO Tech. Report No. 5 (1981)
- (6) 森本ほか : 三菱電機技報, 56, No. 7, P. 17 (昭 57)
- (7) 田嶋ほか : 三菱電機技報, 56, No. 7, P. 31 (昭 57)
- (8) 赤羽ほか : 三菱電機技報, 56, No. 7, P. 12 (昭 57)
- (9) 田中ほか : 三菱電機技報, 56, No. 7, P. 21 (昭 57)

45m電波望遠鏡

赤羽 賢 司*・片 木 孝 至**・石 井 康 一***・滝 沢 幸 彦***・尾 形 良 征***

1. ま え が き

45 m 電波望遠鏡は、受信装置・データ処理装置などとともに、45 m 電波望遠鏡観測装置を構成し、可視光では見ることのできない宇宙を電波で観測し、宇宙の「なぜ」を解明しようとする目的をもっている。宇宙からの電波は、非常に広い波長域にわたっているが、この望遠鏡では、電波天文用として国際的に保護されている周波数帯のうち、1.4, 1.6, 2.7, 5, 10, 15, 22, 30, 40 の各 GHz 帯及び 86 GHz 帯以上が使用可能周波数帯として要求された。特に 86 GHz 帯以上の短波長域においては、世界でも類のない高集光力を要求された。したがってこの望遠鏡の仕様条件は、極めて厳しい要素をもっており、短波長域における高集光力を得るための高鏡面精度・高指向精度、広い波長領域に対する汎用性などの性能・機能が要求された。

望遠鏡の設計・製作に当たり、ビーム伝送技術を適用したクーデ光学系を世界に先がけて採用し、ホモロジー理論を応用した主鏡設計法、マスタリメータを用いた駆動制御システム、高精度パネルの製造法・コリメータなどの開発を行い、要求条件を十分満たす大型高精度電波望遠鏡を設計・製作した。以下にその主要な特性を述べる。

2. 装置の概要

45 m 電波望遠鏡は、直径 45 m の主鏡、主鏡架台、コリメータタワーな

どからなる機械構造系、主鏡で集められた電波を受信機まで導く放射給電系及び駆動制御系で構成しており、外観を図 1. に構造を図 2. に示す。次に主な特長を挙げる⁽¹⁾。

(1) 10 GHz 帯以上の周波数帯にビーム伝送技術を応用したクーデ光学系を電波望遠鏡として世界で初めて採用し、5 GHz 帯以下の周波数帯に一次焦点を用いる光学系とし、周波数切換えを容易にし、

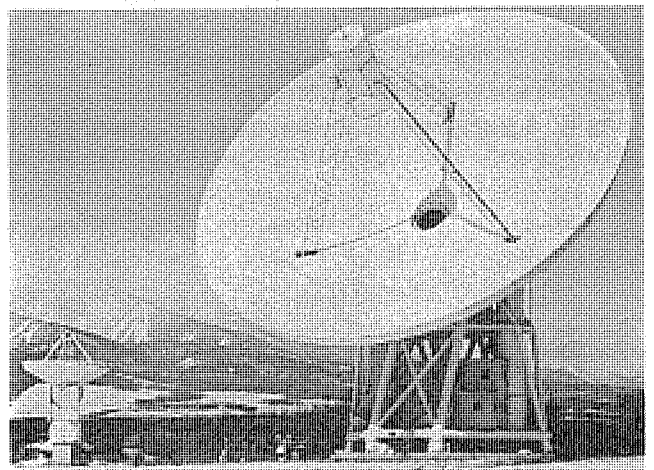


図 1. 45 m 電波望遠鏡

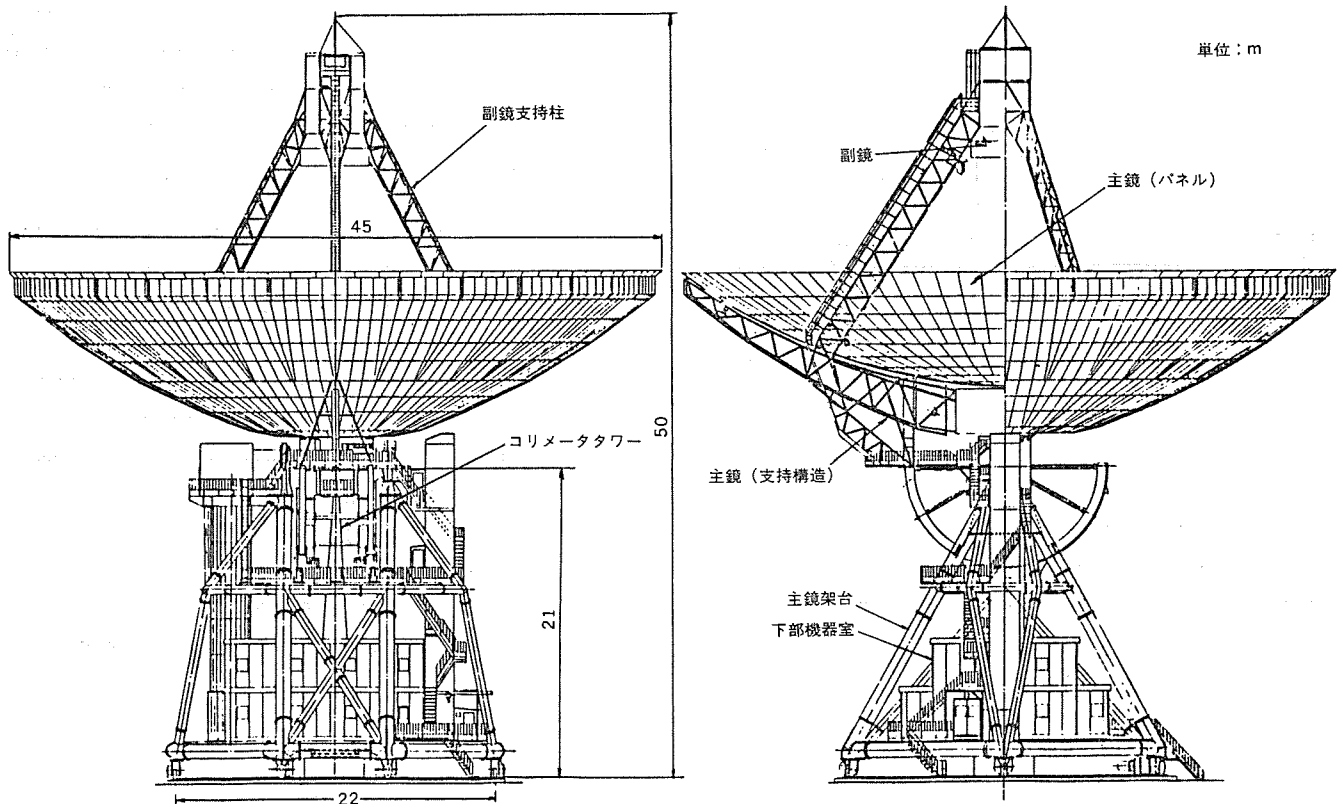


図 2. 45 m 電波望遠鏡外観構造

汎用性の拡大を図った。

(2) 高指向精度を得るために、小形軽量の コリメータを開発し、これを角度検出器又はマスタコリメータとして用いる駆動制御方式を採用した。

(3) 望遠鏡が姿勢を変えることによって生ずる自重変形による鏡面誤差を抑えるために、ホモロジー理論を主鏡骨組に適用し、軽量化と精度の向上を図った。

(4) 鏡面パネル設定の高精度化、作業の効率化のために、計算機制御による鏡面測定・鏡面設定システムを開発しこれを利用した。

表 1. 45 m 電波望遠鏡の主要性能、諸元

項 目	性 能・諸 元	備 考
45 m 電波望遠鏡	アンテナ方式	グレゴリー変形クーデ焦点 10 GHz 以上 一次焦点 1.4~5 GHz
	架台形式	高度方位角方式(EL/Az方式)
	周波数帯	1.4~86 GHz 以上
	制御方式	計算機制御及びマニュアル制御
	角度検出方式	マスタコリメータ方式
	主鏡口径	45 m
	副鏡口径	4 m
	EL軸までの地上高	約 21 m
	全高(天頂格納位置)	約 50 m
	Azトラック径	22 m
主要諸元	下部機器室延床面積	約 360 m ² 一階:225 m ² 二階:135 m ²
	重 量	仰角回転部重量 約 350 t Az レール上全重量 約 700 t
電気性能	集光率	一次焦点 5 GHz : 65 % クーデ焦点 22 GHz : 59 % 86 GHz : 20 %
	雑音温度* (ホーン出力端)	23 K 以下 (EL: 20° 以上 22 GHz)
機 械 性 能	主鏡鏡面精度	0.2 mm RMS 以下
	指向精度	再現性の誤差 0.001° 以下 絶対値の誤差 0.005° 以下
	角度検出誤差	0.0005° 以下
	回転範囲	高度角 +9°~+93° 方位角 ±270° (南中心)
駆 動 性 能	駆動方式	高度角 バックラッシュ止歯車駆動 (電気駆動) 方位角 バックラッシュ止レール車輪駆動 (電気駆動)
	駆動電動機容量	高度角 11 kW×4 方位角 22 kW×2
	最大駆動速度	0.5°/s 以上
	精密観測	夜間、平均風速 7 m/s まで
運 用 条 件	退避駆動	平均風速 20 m/s まで 積雪: 主鏡面の全面またはその 1 部に 30 cm (比重 0.2)
	非破壊	EL 90° にて 瞬間最大風速 65 m/s (地上高 50 m) まで 任意の EL 角度にて 平均風速 20 m/s まで 地震震度 0.2 G まで(地盤震度) 積雪: 主鏡面の全面またはその 1 部に 30 cm (比重 0.2)

注 * 大気の大気放射及び宇宙電波バックグラウンドを含まず。

(5) 高精度、軽量化のためにサンドイッチパネルを開発し、これを主・副鏡の鏡面パネルに採用した。

(6) クーデ光学系を形成する複数の反射鏡のうち 1 枚を可動反射鏡とし、望遠鏡に必要なビームスイッチング装置としての機能を得た。

上記により設計したこの望遠鏡の主要性能・諸元を表 1. に示す。

3. 装置の設計

3.1 放射給電系

主、副鏡の設計は、一次焦点を用いたフロントフィード方式及びホモロジーとの兼合いから、回転 2 次曲面で構成したクーデ形 (ビーム伝送系) 給電 グレゴリアンアンテナ形式を採用した (図 3.)。また、高能率、低サイドローブ特性の観点から、最適の開口分布を得よう、主、副鏡及び一次放射系の設計を行った。

1~5 GHz 帯は、主鏡の一次焦点を用いたフロントフィード方式である。これらの各周波数帯のホーンには、軸対称なビームを励振するように開発したチョーク付ホーンを採用した。また一次焦点系のビームスイッチは、各周波数帯で二組のホーンと給電装置を用いて、電氣的に切替える方式により行った。

10~86 GHz 帯はクーデ焦点を用いた。図 4. に示すクーデ光学系フィード方式とし、将来、周波数選択形反射板を用いることにより多周波帯同時観測が可能な設計を行った。またビーム伝送系は合計 16 枚の反射鏡で構成し、その設計では、各反射鏡の形状、給電ホーンの形状、寸法を選定することによって超広帯域設計を行うとともに、ビーム伝送系で発生する不要交差偏波を互いに相殺するよう反射鏡の設計⁽²⁾を行った。また各反射鏡は、ミリ波での伝送効率を高めるため、高精度の鏡面が必要であり、大きな面積の #1 から #5 反射鏡に対してサンドイッチ構造の反射鏡を開発し、その他の反射鏡に対しては、特殊アルミニウム鋳物の機械加工を採用することにより、平

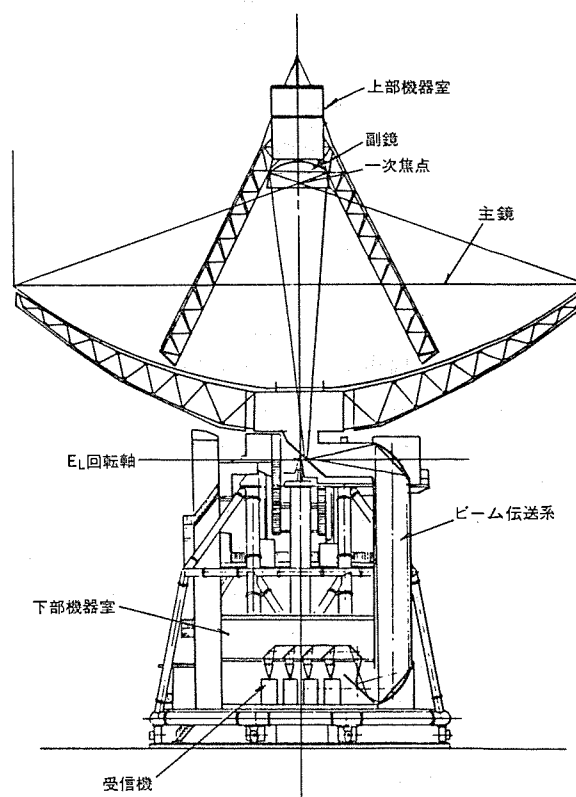


図 3. クーデ光学系概念図

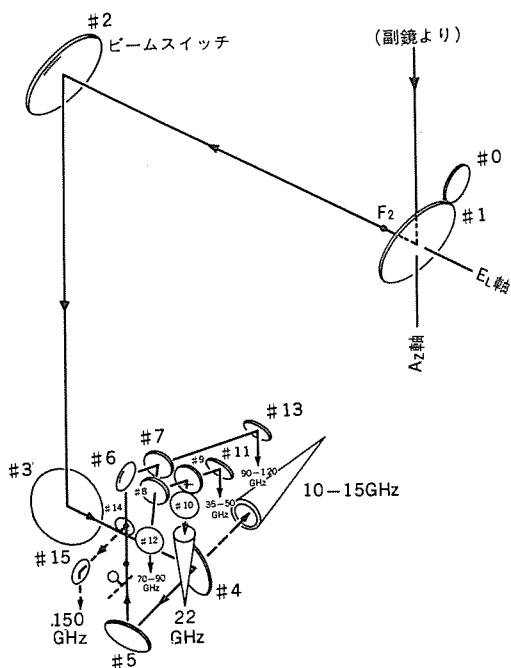


図 4. クーデ光学系のビーム伝送路

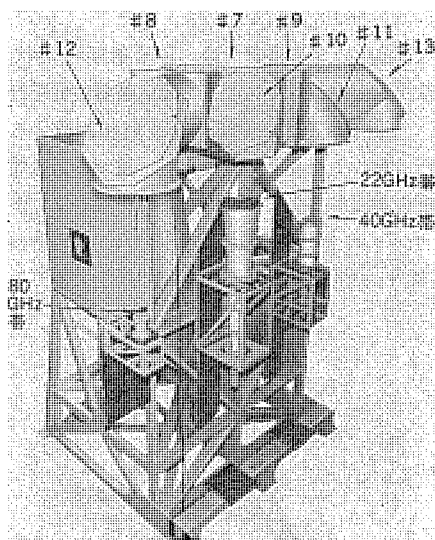


図 5. 22 GHz 帯以上の給電ホーンの配置

均鏡面精度 0.03 mm RMS を実現した。

各周波数の切換えは図 4. において #4, #7, #8, #9 の各反射鏡で行い、特に #4 反射鏡は回転機構を有し、10～15 GHz 帯と 22 GHz 帯以上の切換え用である。22 GHz 帯以上の給電ホーンの配置を図 5. に示す。

クーデ焦点使用時のビームスイッチは図 6. において、#2 反射鏡をアンテナ高度角に応じて X, Y 軸まわりに回転させ、制御する構造を開発し、ビームスイッチ用反射鏡と組合せて行う方式を採用した。

10～40 GHz 帯の各ホーンは、広帯域にわたって交差偏波特性が良好でかつ低サイドローブ、軸対称ビーム特性を有するコルゲートホーンを採用し、80 GHz 帯においてはデュアルモードホーンを採用して軸対称なビームを励振しよう設計した。

給電装置は 86 GHz 帯を除いて、ロータリジョイント、90° 位相差板、偏分波器より構成しており、90° 位相差板と偏分波器との相対位置（回転）を選定することにより、左、右旋円偏波又は 2 直交直線偏

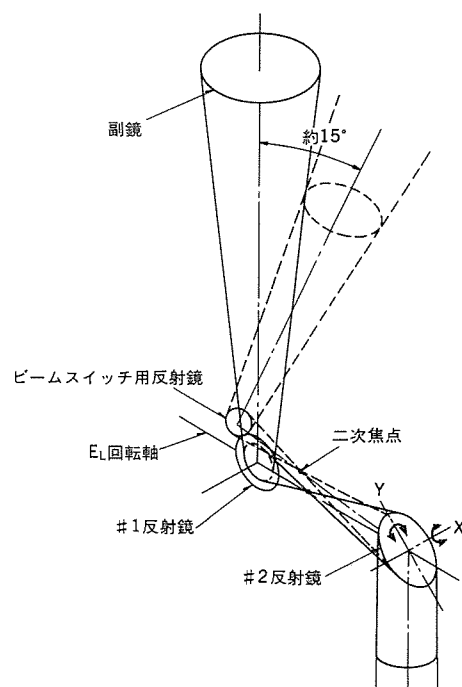


図 6. ビームスイッチ概念図

波の信号を受信できる。86 GHz 帯給電装置はセプタム形偏分波器を用いて 2 直交直線偏波の信号を対象とする設計を行った。

3. 2 機械構造系

機械構造系は、図 2. に示すように主鏡、副鏡、主鏡架台、コリメータタワーなどで構成しており、短波長での高集光力を得るために鏡面精度、指向精度の高精度化に留意した設計としている。

主鏡は直径 45 m の主鏡面とその支持構造、直径 4 m の副鏡とその支持柱、日除けで構成した。

主鏡面は平均 1.3 m×2.5 m の大きさのパネル 600 枚を支持構造に取付ける構造とし、高精度パネルを得るために軽量かつ剛性の高いサンドイッチ構造のパネルを採用した。600 枚のパネルのうち中心部 330 枚は、熱変形による鏡面精度の劣化を防ぐため熱特性の良い CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) サンドイッチパネルを採用した。

支持構造は、中心部に十分剛性の高いセンターハブを設け、そこから 30 本の放射状リブを回転対称に張り出し骨組を形成する構造を採用した。骨組構造は、望遠鏡が傾いても鏡面がいつもある理想的なパラボラ面を作るホモガス構造とし、自重変形による鏡面精度の劣化を十分小さく抑えた設計とした⁽³⁾⁽⁴⁾。

鏡面パネルは、図 7. に示すようにパネル支持機構を介して骨組構造に取付ける構造を採用した。パネル支持機構は、モータ駆動できる調整機構、パネルを精度良く取付けるための支持金具、鏡面測定のためのコーナキューブからなり、鏡面測定システム⁽⁵⁾で測定したデータを用いて計算機制御で調整機構を駆動することにより、地上から鏡面の設定を変えられるように設計している。支持金具は、パネル設定を高精度で行えるように差動ねじを用いた微調機構を有するとともに、パネルと骨組構造間の熱変形差を吸収できる構造を採用した。

骨組構造の裏面には日除けパネルを設け、主鏡パネル裏面及び日除けパネルに断熱材を装着した構造とし、内部の空気をファンによりかくはん(攪拌)することにより直射日光による骨組構造の局部的な変形を防ぐ設計とした。

副鏡は、高精度鏡面を得るために中央部に特殊アルミニウム鋳物を

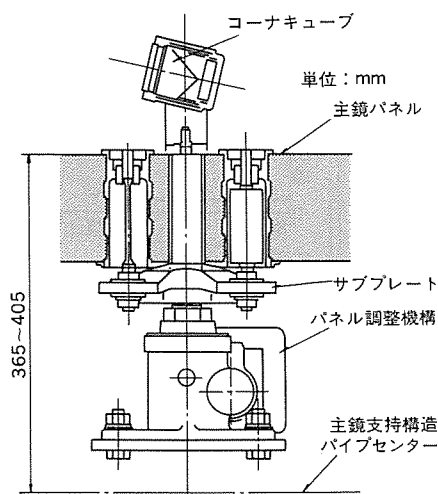


図 7. パネル支持機構

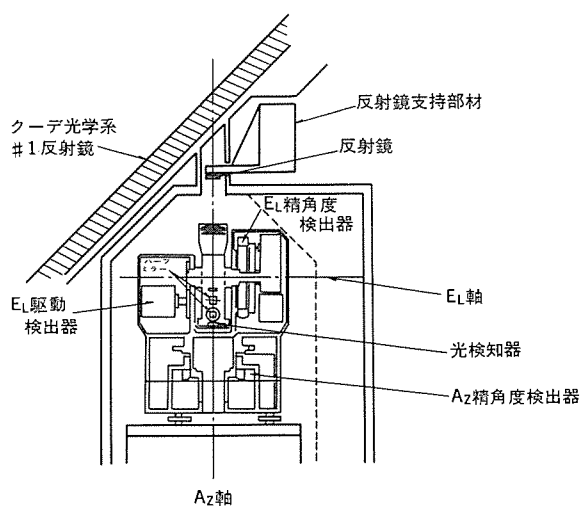


図 8. コリメータ

用いた剛性の高い中心リングを設け、12本の放射状リブを張り出し、サンドイッチパネル12枚を取付けた構造を採用し、裏面及び側面に日除けを設け、局部的な熱変形を防止する設計とした。

主鏡がホモガス構造となっており、焦点が望遠鏡の傾きに従って動くので、副鏡は移動機構を介して支持柱に固定する構造とし、主鏡の仰角変化に応じて副鏡をプログラム制御により動かし、ピント合わせができる設計とした。

副鏡支持柱は、鏡面精度への影響をなくすために、主鏡骨組とは独立にセンターハブに取付ける構造を採用した。支持柱の上部は、上部機器室と下部にホーン台車を設け、一次焦点使用時の受信機を収納するとともに、一次焦点ホーンを副鏡中央部の開口からせり出せる構造とした。支持柱のうち電波通路に置かれる部分は、3本構成の三角形断面をもつトラス構造とし、支持柱によるブロッキングを最少にする設計とした。

主鏡架台は、耐風性、耐震性、指向精度などからの機械的所要強度、剛性を満たすために直径22mの円形レール上に6車輪で置かれるタワー構造形式を採用するとともに、その内部に延床面積360m²の広い下部機器室を設け、受信機など観測用機器を収納できる構造とした。タワー構造は鋼パイプ溶接構造を採用し、高剛性軽量化、耐錆性の向上を図るとともに、特に接合部、継手などは最適な形状方式とし、効率化に留意した設計とした。

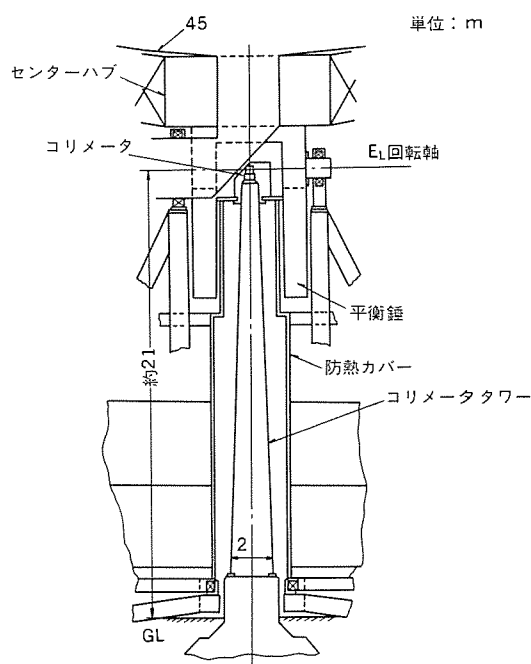


図 9. コリメータタワー

コリメータは、図8.に示すように構造的に極めて安定なAz-EL形マウントとし、マグネスケールを用いた角度検出器、軸受として高精度ローラ、アンチバックラッシュ駆動などを採用し、小形化・高精度を図った設計とした。

コリメータタワーは、図9.に示すように主鏡架台中心を貫通しており、外気と接触する部分に断熱材を装置したカバーを設け、風・日射などの外乱を受けてもタワー上面が安定して水平に保てるような二重構造を採用した。また、設置場所の地盤の常時微動に対しても共振しないように、設置場所の地盤の常時微動の実測値からタワーの固有振動数は、6Hz以上となるように設計した。

3.3 駆動制御系

駆動制御系は主鏡駆動制御、副鏡駆動制御、偏波駆動制御、主鏡パネル駆動制御及び受信機関係制御を含み、プログラムモード、マニュアルモードなどにより機器を駆動制御するに必要な機能を有している。

主鏡駆動制御系はサイリスタレオナード方式の駆動電力増幅器、粗角度検出用として1X、128Xシンクロ角度検出部、精角度検出用として22ビットAz/EL形コリメータ及びその駆動制御部などで構成し、指向精度0.005°(再現性0.001°)RMSを得るよう設計した。

副鏡駆動制御系は主鏡のホモガス構造に対処するもので、副鏡の鏡軸方向、天地面内平行移動、回転を駆動制御し、バイナリ12ビット相当の信号の授受を計算機と行いながら制御できる。

偏波制御系は放射給電系に設けられた偏波変換器を最大10°/sの速度で駆動し、偏波回転角度を±0.1°以内に検出できる。

主鏡パネル駆動制御系は主鏡パネル600枚の各支持点に取付けられた693個のモータを計算機の指令により駆動制御するもので、各パネルの法線方向変位を70μmの精度で検出できる機能を有している。

4. 電波源の観測

45m電波望遠鏡の電波源による試験観測は、昭和56年9月末より開始された。これに先立って、5GHz帯及び22GHz帯の電気試験調整が、10km西の赤岳(八ヶ岳)山頂に置かれたコリメーション装置を用いて行われ、所期性能を確認している。

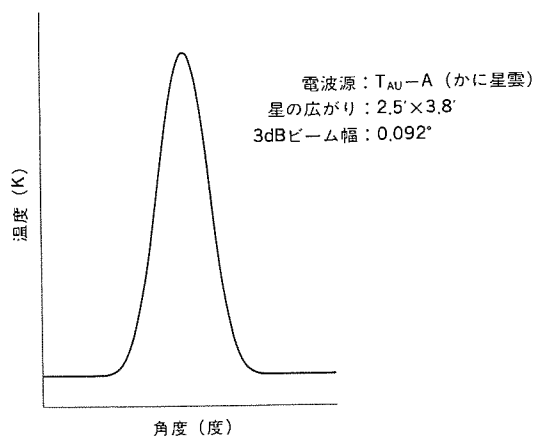


図 10. ドリフトスキャンによるパターン (4.8 GHz)

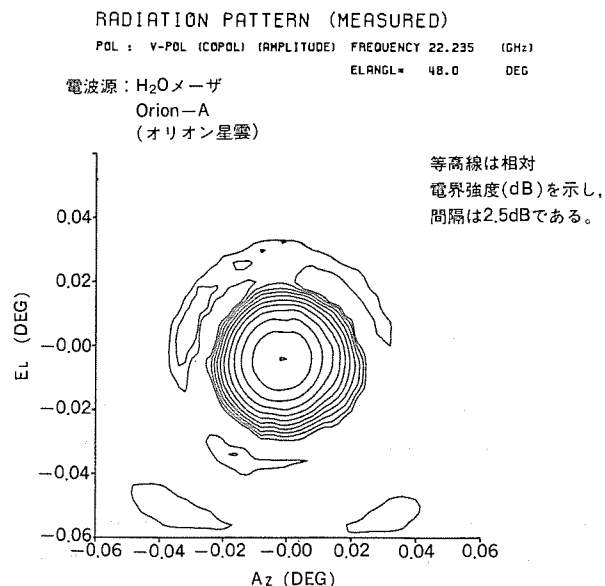


図 11. H₂O メーザ電波源による二次元パターン (22.2 GHz)

電波源による観測は、一次焦点系の 5 GHz 帯、クーデ焦点系の 22 GHz 帯、86 GHz 帯の順で行った。5 GHz 帯では、CasA, TauA 及び CygA を用いて、利得・雑音温度の測定を行った。また、ドリフトスキャンによるパターンの測定結果例を図 10. に示す。22 GHz 帯では、電波が極めて強い H₂O メーザ電波源と木星を用い、二次元パターンと利得を測定した。数多くの H₂O メーザ源の中でも電波の強い、オリオン星雲、W 49 (Westerhout カタログ No. 49) からのスペクトルを観測している。特にオリオン星雲のそれは強く 45 m 電波望遠鏡を用いると約 25 dB のダイナミックレンジがとれる (図 11.)。この周波数帯では、特に大気の水蒸気による吸収が利得、雑音温度の評価にとって問題となる。このため利得測定時には、常に大気吸収係数を sec Z (天空の雑音温度をアンテナの EL 角を変えて測定する方法) により求め、利得、雑音温度の補正を行った。86 GHz 帯では、電波の強い SiO メーザ電波源 (WHya, オリオン星雲) を用い、周波数スペクトルを測定した。東京天文台が開発したフロントエンド及び音響分光計を用いて測定した結果を図 12. に示す。また、図 13. に示すように、我々に身近な太陽を 86 GHz、22 GHz で電波写真を撮り、ほ

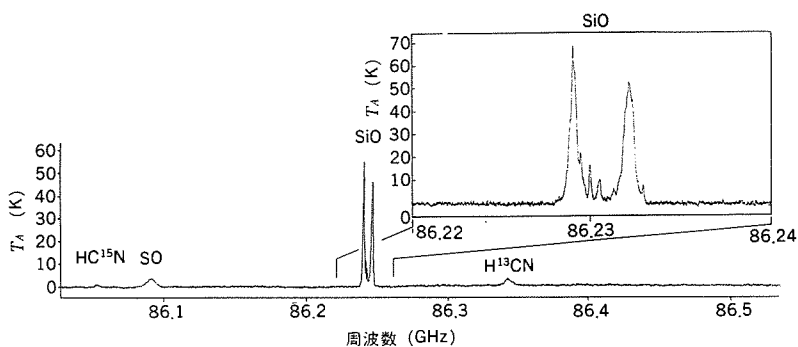


図 12. SiO メーザ電波源の周波数スペクトル (86 GHz)

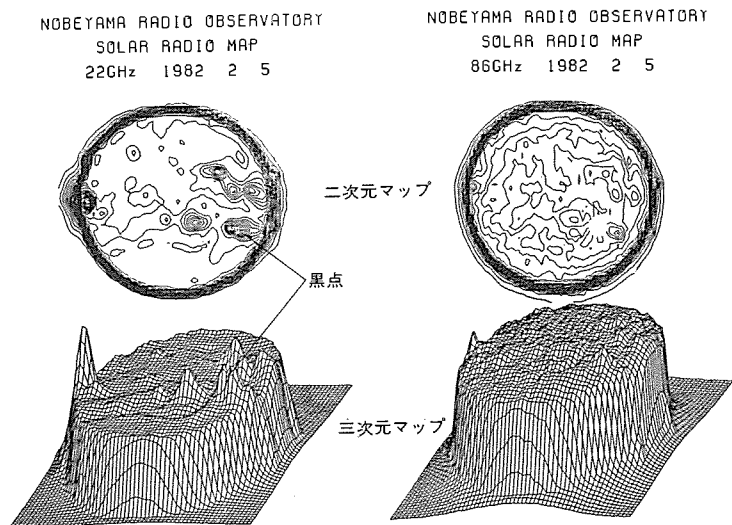


図 13. 太陽の電波写真
(野辺山宇宙電波観測所にて 1982 年 2 月 5 日撮影)

ば所期の性能が得られた。

5. む す び

以上、我が国初の本格的な大型宇宙電波望遠鏡観測装置の一部として、東京大学東京天文台野辺山宇宙電波観測所に建設された 45 m 電波望遠鏡の設計上の特長及び特性試験結果の概要を述べた。この望遠鏡は、昭和 56 年 12 月末に東京天文台の総合試験に合格、引続き別途用意された受信機・計算機などと組合せて試験観測を行い、昭和 57 年 4 月から運用が開始された。

この望遠鏡の開発・設計製作にあたって有益な御指導をいただいた田中教授 (元東京大学東京天文台教授) 及び東京天文台の関係各位並びに、この装置の製作に御協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) Nobeyama Radio observatory Technical Report No. 6
- (2) 水沢ほか：三菱電機技報, 49, No. 11, p. 729 (昭 50)
- (3) 塚田ほか：天文月報 66, No. 6, 149 (昭 48)
- (4) 森本ほか：三菱電機技報, 56, No. 7, p. 17 (昭 57)
- (5) Nobeyama Radio observatory Technical Report No. 5

大型アンテナのホモロジー設計

森本雅樹*・海部宣男**・滝沢幸彦***・青木克比古***・榊原 修***

1. ま え が き

45 m 電波望遠鏡は特に 1 cm～3 mm の短波長領域で最高の集光力と分解能を持つように、その主鏡面には理想的回転放物面からのずれが 0.2 mm RMS 以下という高精度の鏡面が要求される。

一般に鏡面精度は自重・風・熱などによる弾性変形、鏡面の製作・設定・測定などの誤差によって影響され、特に全天指向形の大口徑電波望遠鏡アンテナでは自重による弾性変形の寄与が最も大きく、従来のアンテナの設計手法である剛構造では高鏡面精度の実現は非常にむずかしい。

この 45 m 電波望遠鏡アンテナでは高鏡面精度の主鏡面を実現する手段として、放物面の自重変形が「変形しても常に放物面形を保つ」とみなせれば高い鏡面精度が維持できるはずであるという“ホモロジーの概念”を導入している。ここでは、このアンテナの設計に導入したホモガス構造の設計概念及び解析結果と実測結果を述べるとともに、計算機制御による鏡面設定/測定システムについて述べる。また主鏡面のホモロジー変形に対する副鏡のピント合わせについても述べる。

2. ホモガス構造

2.1 ホモロジー理論

2.1.1 鏡面精度の定義

パラボラの性質上、パラボラ上のすべての点で図 1. に示す ABF の光路長は一定である。今、B 点が B' 点に偏位した状態を考えると光路長に差が生じ、この領域からの反射電波のみ位相差が発生し集光力が低下する。同じ光路長さでも、電波の波長が短いほど、位相差は大きくなり集光力の低下も著しい。鏡面精度は、鏡面全域での光路長さの半値の標準偏差で定義される⁽¹⁾。

2.1.2 ホモロジー理論

任意の高度角での主鏡の自重変形は、図 2.、図 3. に示す二つの変形モードの組合せで表される。変形後の鏡面が、変形前の鏡面に対して、

(a) 図 2. の荷重条件に対し、

(i) 鏡面が鏡軸方向に h_1 だけ剛体的に移動した。

(ii) 鏡面の焦点距離が h_2 だけ変化した。

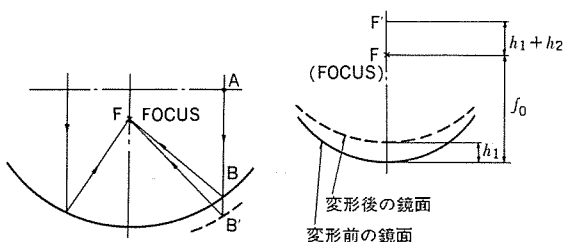


図 1. 鏡面誤差

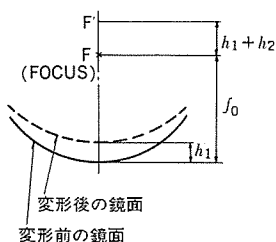


図 2. 対称モード変形

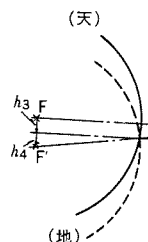


図 3. 逆対称モード変形

(b) 図 3. の荷重条件に対し、

(i) 鏡面が天地方向に h_3 だけ剛体的に移動した。

(ii) 鏡面が天地面内で h_4/f_0 だけ剛体的に回転した。

と見なせるような変形モードであれば、自重変形による鏡面誤差は発生しない⁽¹⁾⁽²⁾。 $h_1 \sim h_4$ をホモガスパラメータと称し、以上がホモロジー理論の基本的な考え方である。

自重変形に対して、以上に述べたような変形モードになるためには主鏡の構造が、重量的にも、剛性的にも円周方向に差異の無い回転対称構造であることが必要である⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。このことは図 2. の荷重条件に対し同一円周上の鏡面の変位量が、同一でなければならないことから容易に理解できる。

2.2 ホモガス構造の設計

2.2.1 主鏡の構成

主鏡は図 4. に示すように、電波を反射集光させる主鏡パネル（台形パネル 600 枚でパラボラ面を形成）と、これを支える主鏡骨組及び、骨組を中央で束ねるセンターハブで構成している。このほかに日射による熱変形を防ぐため、主鏡骨組の背面に日除けパネルが取り付けられている。主鏡骨組は、センターハブより放射状に伸びた 30 本のリブと、このリブ同志を円周方向に継ぎ合うリング材で構成している。

2.2.2 設計手順

自重変形による鏡面誤差は、大きく二つに分けられる。

(1) 計算上のホモロジー誤差（理想化された解析モデルでの誤差）

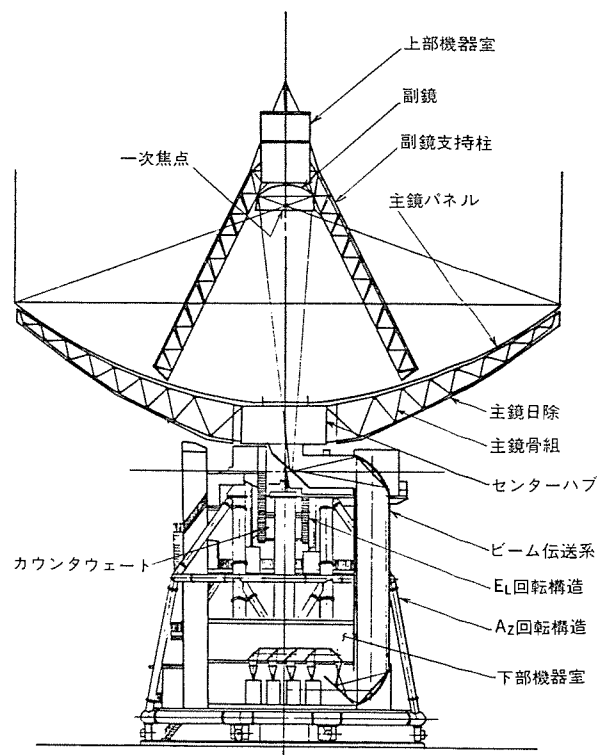


図 4. アンテナの構成

(2) 製作上の誤差による鏡面誤差

計算上のホモロジー誤差を解析するには、主鏡骨組とセンターハブとE_L回転構造を一体構造としてモデル化するのが理想的であるが、これでは計算時間が膨大になってしまう。主鏡骨組の剛性に比べセンターハブの剛性をはるかに大きいことを利用し、主鏡骨組とセンターハブ/E_L回転構造とに分けて解析し、接合点での境界条件を使って近似的に一体化する方法をとった。

(1) 主鏡骨組の解析では、まずセンターハブとの接合点が固定支持されているとし、主鏡パネル、日除パネルなどの荷重を加え自重変形と支持反力を求める。

(2) センターハブ/E_L回転構造の解析では、(1)で求めた主鏡骨組支持反力と、別途計算した副鏡支持柱支持反力を外力として作用させ自重変形を計算し、主鏡骨組支持点の変位を求める。

(3) (2)で求めた主鏡骨組支持点の変位を、強制変位として主鏡骨組に与え、(1)で求めた自重変形を加え合わせ、主鏡パネル支持点の変位より鏡面精度を計算する。

製作誤差による鏡面誤差については、主鏡骨組とセンターハブ/E_L回転構造と別個に解析した。

2.2.3 解析結果及び測定結果

自重変形による鏡面誤差が最小になるように、主鏡骨組構造とセンターハブ/E_L回転構造をトライアンドエラーで決めた。このようにして求

表 1. 主鏡各部の重量

(単位: t)

主鏡パネル	主鏡骨組	日除パネル	センターハブ	その他	合計	E _L 回転構造	カウンタウェイト
21	44	10	35	7	117	50	160

めた主鏡骨組と、センターハブ/E_L回転構造を図 5、図 6. に示す。

主鏡骨組の構造解析には、新しく開発した「級数展開法による立体骨組構造解析プログラム⁽⁴⁾」を使用し、詳細モデルでの解析は NA-STRAN を使用した。センターハブ/E_L回転構造の解析は、NASTRAN を使用した。各部の重量を表 1. に示す。

構造上の特長を以下に示す。

(1) 主鏡骨組

(a) 最外周のリング材接合部にスプリングフランジを使用し、対称モード変形を滑らかにした。

(b) リブ上とリング上の主鏡パネル支持点の変位差が小さくなるように、リング斜材の入れ方を工夫した。

(c) フランジ接合面のパイプ材外径位置に相当する部分に凸部を設け、この部分に十分な予圧をかけることにより、圧縮/引張り剛性差の無いフランジ接合にした。

(d) 部材の集中するジョイント部に半球と円筒を組合せた殻を使用し、ジョイント部での剛性低下を防いだ。

(e) 構造の回転対称性をくずさないよう、部材の選定、製造法を考慮した(図 7.)。

(2) センターハブ/E_L回転構造

センターハブ変形の影響は、図 8. に示すように 2 次、3 次モードが大きく、この変形モードを抑える必要がある。

(a) センターハブの折れ曲がり(2 次モード)を防ぐため、左右の E_L主軸の接合を図 9. 斜線部に示すようにセンターハブ内まで広げ、剛性を高めた。

(b) 副鏡支持柱の支持を図 10. に示すように、主鏡骨組支持点から離し主鏡骨組への影響を減少させた(3 次モード)。

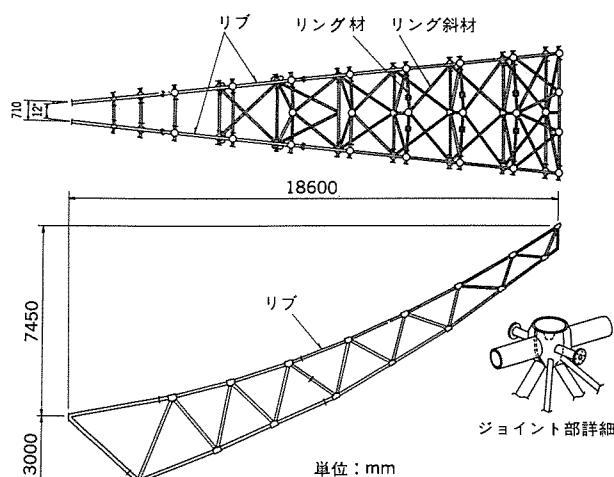


図 5. 主鏡骨組

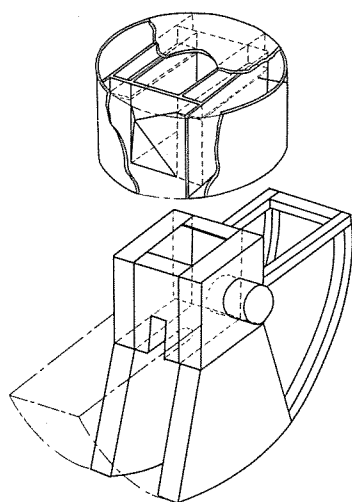
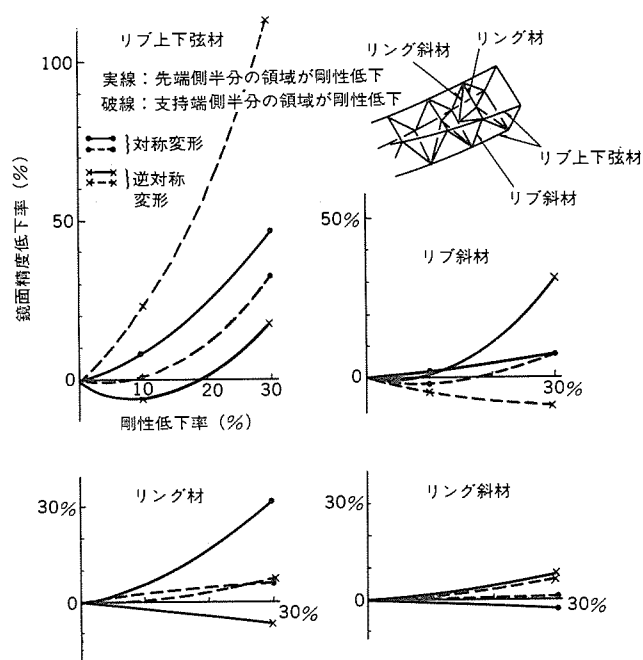


図 6. センターハブ/E_L回転構造



注 ジョイント部の剛性低下を部材の剛性低下に換算したときの剛性低下率

図 7. ジョイント部剛性と鏡面誤差

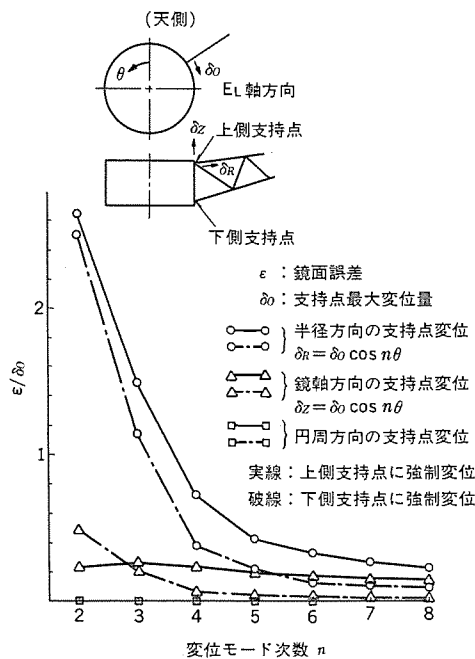


図 8. センターハブ変形による鏡面誤差

表 2. 自重変形による鏡面誤差 (センターハブの変形の影響を含む) (単位: mm RMS)

モード	FL 角度	9°	30°	50°	70°	90°	備 考
0 次		0.054	0.024	0	0.015	0.021	全鏡面
		0.062	0.027	0	0.018	0.024	20 mφ 内鏡面 ⁽¹⁾
		0.056	0.025	0	0.016	0.021	“ ⁽²⁾
1 次		0.029	0.019	0	0.025	0.055	全鏡面
		0.016	0.014	0	0.015	0.034	20 mφ 内鏡面 ⁽¹⁾
		0.03	0.002	0	0.004	0.010	“ ⁽²⁾
2 次		0.004	0.002	0	0.006	0.012	全鏡面 ⁽³⁾
		0.003	0.002	0	0.003	0.06	20 mφ 内鏡面
3 次		0.025	0.015	0	0.019	0.040	
		0.013	0.008	0	0.011	0.023	
4 次		0.006	0.004	0	0.001	0.002	
		0.008	0.005	0	0.002	0.004	
5 次		neg	neg	0	neg	0.001	
		0.001	neg	0	neg	0.001	
6 次		neg	neg	0	neg	neg	
		neg	neg	0	neg	neg	
高次モード総合 (RSS)		0.026	0.016	0	0.020	0.042	0 次, 1 次モード以外
		0.016	0.010	0	0.012	0.024	の鏡面誤差
総 合 (RSS)		0.067	0.035	0	0.035	0.072	全鏡面
		0.066	0.032	0	0.026	0.048	20 mφ 内鏡面 ⁽¹⁾
		0.058	0.027	0	0.020	0.034	“ ⁽²⁾

注 (1) 全鏡面に対する Best fit parabola からの鏡面誤差

(2) 20 mφ 内の鏡面に対する Best fit parabola からの鏡面誤差

(3) 高次モードについては

上段の値: 全鏡面に対する鏡面誤差

下段の値: 20 mφ 内鏡面に対する鏡面誤差を表す。

表 3. ホモガスパラメータ (単位: mm)

	ホモガスパラメータ				最大変形量
	h_1	h_2	h_3	h_4	
解 析 値	0.37	-18.75	-190.60	96.89	34.6
実 測 値	0.68	-19.78	-190.11	96.37	34.8

注 アンテナ高度角 90° を基準としたときの高度角 10° での変形量

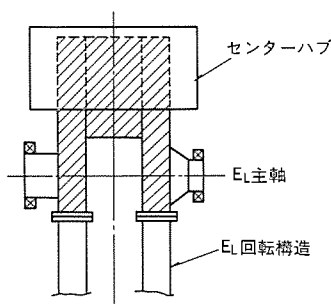


図 9. EL 主軸の構造

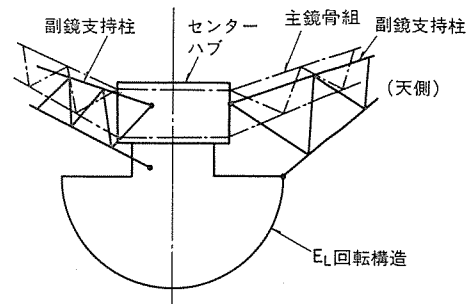


図 10. 副鏡支持柱の支持点

表 4. 鏡 面 誤 差 (単位: mm RMS)

誤 差 要 因	鏡面誤差	備 考
計算上のホモロジー誤差	0.07	
部材断面積誤差の影響	0.03	
節点位置誤差の影響	neg	誤差の標準偏差 ≤ 2 mm
ジョイント部剛性低下の影響	0.02	剛性低下率 < 20%
フランジ部剛性低下の影響	neg	特殊フランジ使用
重量誤差の影響	0.01	おもりにより重量調整
その他	0.05	
総 合	0.09 mm RSS	測定誤差含まず
実測値*	$\frac{0.34}{2}$	測定誤差 ≈ 0.2 mm RMS 含む

注 * 測定はアンテナ高度角 90° と 10° でを行い、この差から自重変形を求め鏡面誤差を計算した。高度角 90° と 10° に誤差を割り根れば誤差は表に示すように半分になる。

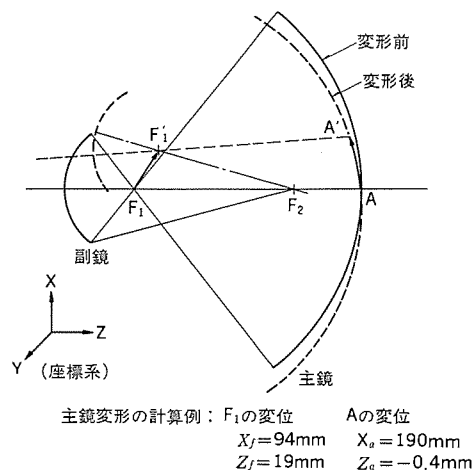


図 11. 主・副鏡のピント合わせ

計算上のホモロジー誤差解析結果を表 2. に示す。鏡面誤差実測結果と解析結果をまとめ表 3., 表 4. に示す。

2. 3 ホモロジー鏡面設計とピント合わせ

ホモロジー設計においては、主鏡の自重変形によって図 11. に示すように一次焦点 F_1 が F_1' に、頂点 A が A' に移る。この場合アンテナの特性を最適にする副鏡の設定は次のようになる。

- (1) 副鏡の中心軸 F_1F_2 を $F_1'F_2$ に合わせる。
- (2) 副鏡の焦点 F_1 を F_1' に一致させる ($F_1'F_2$ の距離が F_1F_2 と異なる場合、 F_1' の副鏡による像が F_2 になるようにわずかに移動させる)。

主・副鏡系が回転 2 次曲面系である場合、主鏡の重力変形による影響は以上の副鏡の最適位置設定によって補正しうる。これは一次

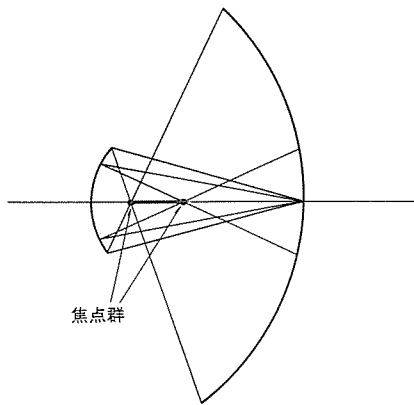


図 12. 修整鏡面の焦点

放射系の焦点 F_2 より出る球面波は変位された副鏡によって F_1' を中心とする球面波に変換され、 F_1' を焦点とする回転放物面鏡である主鏡に照射されるので、波面の収差が非常に小さくなるからである。

F_1/F_2 の距離が F_1/F_2 と異なる場合、収差を完全にとり切ることはできず、収差の2次成分は上記(2)の変位により補正できるが高次の成分が残留する。しかしながら図11のこのアンテナの変形の場合、残留する位相誤差に起因する利得低下量は86 GHzにおいて0.005 dB以下で非常に小さい。また主鏡の変形と副鏡の変位によって鏡面系は、いわゆるオフセットグレゴリアン形式となりかつ一次放射系の中心軸が副鏡の中心からずれるためアンテナ開口の振幅分布が非対称となる。この振幅分布の非対称性による利得低下は、いずれも86 GHzにおいて0.001 dB以下となり、無視しうるほど小さい。

これに対し鏡面修整形のアンテナの場合、図12.に示すように主鏡、副鏡の焦点は中心軸上に分布し各点には主鏡、副鏡の帯状の微小部分が対応する。したがって変形をうけた場合、主鏡、副鏡は焦線の位置、傾きともに変化してその最適位置が一義的に定まらず、最適位置と異なる部分では位相誤差を生じ、かつ各焦点に対応する鏡面系の各点が変わるので鏡面修整の法則からはずれることになる。そのためこのアンテナの主・副反射鏡系を鏡面修整形とすることは、アンテナの短波長領域への適用を考えた場合、前述の理由により利得低下が大きく得策でない。以上の結果から、45 m 電波望遠鏡アンテナの主鏡は鏡面修整せず、焦点距離16 mの回転放物面とした。

3. 鏡面測定／鏡面設定システム

主鏡パネルは、図13.に示すようにパネル調整機構と呼ぶ電動式高精度ジャッキを介して主鏡骨組に固定しており、このパネル調整機構先端には鏡面測定のターゲットであるコーナキューブ(プリズム)を取付けている。

鏡面測定は、測距(光波距離計)、測角(高度角と方位角)方式のレーザ測距測角儀を使って行っている⁽⁵⁾。測定点は696点であり、測定は計算機制御により自動化している。測定結果は磁気テープに出力する。この磁気テープを新しく作った専用プログラムに入力すると、レーザ測距測角儀とコーナキューブ固有の誤差が補正され、鏡面精度と鏡面誤差を修正するのに必要な主鏡パネルの移動量が磁気テープに出力する。鏡面設定は、この磁気テープを使って、計算機制御によりパネル調整機構を駆動することにより行っている。このシステムの概念図を図13.に示す。

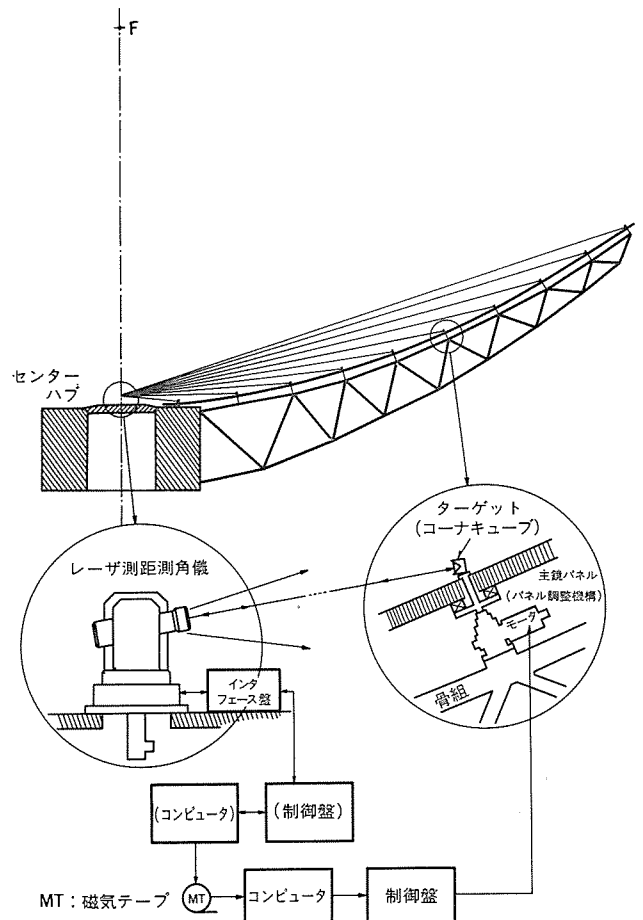


図 13. 鏡面測定／鏡面設定システム概念図

4. む す び

大口径、高鏡面精度の全天指向型アンテナを実現するためには、ホモロガス構造は不可欠であり、この装置が、どこまでの性能を出せるかが大きな試金石となる。

86 GHz帯での試験観測も始まり、放射パターンなどのデータから鏡面精度やピント合わせに必要な副鏡のベスト位置などが、総合的に評価される段階にきている。これについては、後日報告したいと考えている。

最後に、この装置の開発設計、製作にあたり多くの御支援、御協力をいただいた東京天文台赤羽教授及び関係各位に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) P. D. Karacher : Trudy Fiz. Inst. Akad. Nauk SSSR, 17 (1962)
- (2) S. Hoerner : J. of the Structural Division, ASCE, 93, No. ST 5 (1967)
- (3) S. Hoerner : Astorion. J. 72. 35 (1967)
- (4) 塚田ほか : 三菱電機技報, 46, No. 2, P. 219 (昭47)
- (5) N. Kaifu : Nobeyama Radio Observatory Technical Report No 5

10m5素子干渉計

田中 春夫*・倉藤 康**・岡野 弘志**・佐藤 巧**・文田 次哉**

1. ま え が き

45 m 電波望遠鏡が、その大口径と高鏡面精度を利用して、高集光能力を発揮するものであるのに対して、この論文で紹介する 10 m 5 素子干渉計は、5 基の直径 10 m のアンテナを東西約 560 m、南北約 520 m の基線上に移動させて、種々の配置における干渉観測を行うことにより、直径 670 m までの開口合成による高分解能電波観測を行うものである。

このアンテナは観測周波数が 22 GHz 帯から 115 GHz 帯といわれるミリ波帯であるために、極めて高い鏡面精度と機械的精度とを必要とする。更に各アンテナ間の位相差の測定が主眼であるために、各アンテナの位置についても、正確さと安定性が要求されるところに特徴がある。このためアンテナは観測プログラムに従って、あらかじめ定められた 30 箇所のステーションに精度良く配置されるが、ステーション間の移動は、専用軌道上を走行する移動台車により行われる。図 1. に 5 箇所のステーションに展開した 5 素子干渉計を示す。

以下にこの装置の概要を紹介する。なお、この干渉計アンテナの実測性能についてはこの特集の掲載論文「5 素子干渉計用 10 m アンテナ」に述べている。

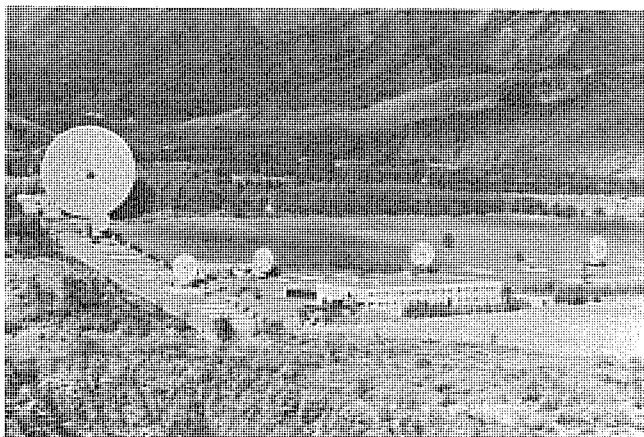


図 1. ステーションに展開した 5 素子干渉計

2. 装置の概要

この装置は 10 m (素子) アンテナ 5 基、移動台車 1 式、鏡面測定装置 (舟形ゲージ) 1 式、駆動制御装置 1 式、ステーション 1 式 (30 箇所)、軌道 (横行及び縦行) などで構成する。主要性能諸元を表 1. に示す。

2.1 素子アンテナ

(1) 素子アンテナ

10 m 干渉計の素子アンテナは直径 10 m のパラボラ主鏡を持ったアンテナであり、その概略構造は図 2. のとおりである。架台形式は Az (方位角)/E_L (高度角) 方式で、電波光学系はカセグレン形クーデ方式である。この方式は低雑音増幅器などの電子機器を固定部である機

表 1. 10 m 5 素子干渉計の主要性能諸元

	項 目	性 能, 諸 元	備 考
総合性能	総合相対位相安定度	5°/12 h 以下 (22 GHz)	大気の影響を含まず
	総合相対位置安定度	0.1 mm/12 h 以下 (夜間無風時)	地盤の変動含まず
素子アンテナ	アンテナ方式	カセグレン変形クーデ焦点	
	架台方式	高度角, 方位角方式 (E _L /Az 方式)	
	周波数帯	22 GHz~115 GHz	
	主鏡口径	10 m	
	重量	約 35 t	
移動機構性能諸元	駆動方式	移動台車によるステーション引込方式	縦行台車/横行台車
	移動台車の駆動制御方式	電気駆動及び手動ハンドル駆動	
	走行速度	横行速度	最大 3.6 km/h
		縦行速度	最大 1.8 km/h
	重量	横行台車	約 25 t
		縦行台車	約 10 t
	レールスパン	横行レール	4 m
		縦行レール	3 m
	ステーションへの設置誤差		0.1 mm 以下
ステーション性能諸元	ステーション数	東西 17 南北 13	
	ステーションの設置誤差	全基線にわたり 2 mm 以下	
運用条件	精密観測	夜間 平均風速 7 m/s まで	外気温: -25°~+35°C 相対湿度: 0~100%
	移動台車上での非転倒最大風速	20 m/s (平均風速)	高度角 90° の状態にて
	非破壊	瞬間最大風速 65 m/s (地上高 50 m にて) まで 積雪: 全鏡面又はその一部に 30 cm	高度角 90° の格納位置にて

器室に置くことができること、アンテナの回転に伴うケーブルの位相誤差を取除けること、広い帯域にわたって効率のよい伝送 (主鏡→ホーン) ができること、など数々の利点のある方式である。

素子アンテナが通常のアンテナと特に異なる点としては、Az 軸と E_L 軸が正確 (0.2 mm 以内) に一点に交わること、この交点の各素子アンテナ間の相対位置が極めて安定であること、などがある。このため設計にあたっては特に機械的に高精度ということのほか、交点の安定ということの阻害要因となる熱に対する対策を行っており、また約 30 箇所において温度のモニタを実施している。以下に素子アンテナ構造の特長を述べる。

(a) 主鏡及び副鏡

主鏡は 36 枚のアルミサンドイッチパネルと主鏡骨組からなる放物面鏡で、

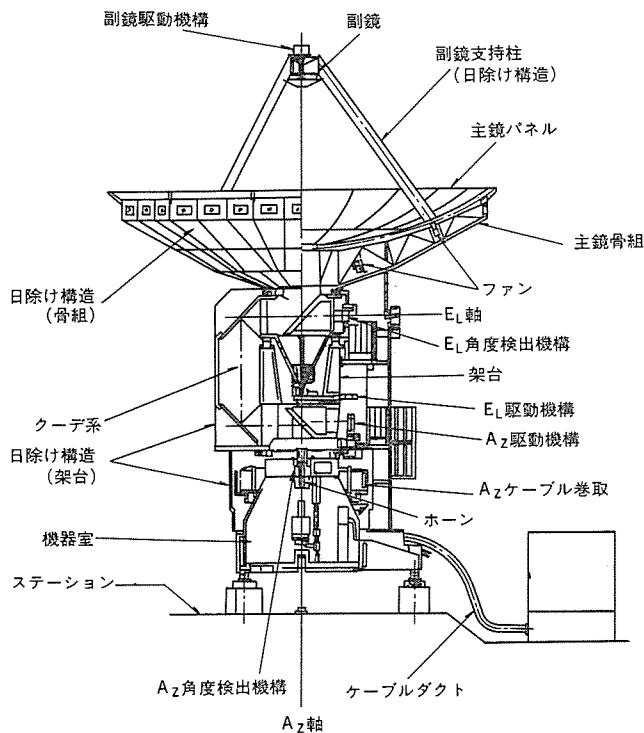


図 2. 素子アンテナ概観図

鏡面精度は 0.2 mm RMS 以下である。主鏡の熱変形を最小に抑えるために主鏡骨組背面を日除け構造により完全にカバーするとともに、名骨組の温度を均一とするためにカバー内にはファンを設けて空気を強制換気している。

副鏡はアルミニウム製直径約 1 m の双曲面鏡 (鏡面精度 0.03 mm RMS) で、4 本の支持柱にて主鏡骨組で支持している。また副鏡は鏡軸方向に電動で調整され、0.1 mm の精度で設定が可能である。

支持柱は熱変形 (4 本の支持柱間の温度差) を最小にするため表面に日除け構造が設けられ、内面はファンにより空気が貫流している。なおファンの効果の一例として昭和 56 年 5 月のデータによると支持柱間の温度差が 2°C あったものが送風開始後 5 分で 0.7°C 差、10 分で 0.5°C 差まで下がっている。

(b) 架台

架台の回転部は E_L 軸受部に複列円すい (錐) ころ軸受を、 A_z 軸受部に 3 ローラ軸受を使用したいわゆる U ビームタイプのもので、 A_z 軸、 E_L 軸の直交度 0.002°、一致度 0.2 mm を満足する。また A_z 及び E_L 角度検出機構には、検出精度 0.001° RMS を満足するために新たに開発した軸直結マルチボールシンクロ電機 (20 ビット相当) を採用しており、 A_z 軸ではホーンがマルチボールシンクロ電機内部を貫通する構造となっている。太陽熱による熱変形に対する対策としては架台全体を日除け構造で覆うとともに架台下部にファンを多数設け、下方より空気を取り入れ上方へ抜く方法で強制換気を行って架台の不均一な温度上昇を抑えている。

架台の固定部は機器室及び脚部からなっている。機器室は外壁が二重構造で、内部は空調装置により設定温度 $\pm 2^\circ\text{C}$ にコントロールしており、ホーン、給電装置、 A_z ケーブル巻取装置、 A_z 角度検出機構、駆動制御架、低雑音増幅器などの機器を収容している。

脚部は 120° ほどの 3 点で素子アンテナをステーションに固定するので、固定機構 (後述) の一部をなしている。構造は熱膨張によ

る素子アンテナ中心の移動がないように中心に対して対称とするとともに、日除け構造をも有している。

駆動機構は遊星歯車減速機と終段歯車からなり、総減速比は約 20,000 である。 A_z/E_L 各駆動機構とも 2 個のモータと 2 系列の歯車列を有し、アンチバックラッシュ駆動を行っている。モータ出力は 800 W で、電気駆動可能角度範囲は A_z が $\pm 300^\circ$ 、 E_L が $-2^\circ \sim +182^\circ$ (観測は $0 \sim 90^\circ$) である。

(c) クーデ系

クーデ系は集束ビーム伝送用曲面反射鏡、平面反射鏡、支持調整機構からなり、副鏡で集束した電波を E_L 回転軸まわりの第 1 集束反射鏡 (平面鏡) を介して第 2、第 3 集束反射鏡 (曲面鏡) を経て第 4 集束反射鏡 (平面鏡) に導き、ホーンに伝送する。

4 枚の反射鏡は CFRP 製サンドイッチ構造であるが、反射鏡に CFRP サンドイッチ構造を採用したのは主として熱膨張率の低さと、高鏡面精度 (0.03 mm RMS) によるものである。クーデ系全体は断熱カバーにより覆われており、支持構造に直射日光があたらない構造とするとともに温度分布の均一化を図るためにファンを備えている。

(2) アンテナ固定機構

この干涉計では、アンテナ自身の正確な位置決めが必要で、アンテナの代表点である A_z 軸と E_L 軸の交点を各ステーションの基準点に精度良く (0.1 mm 以内) 合わせて設置しなければならない。このために設けたのが図 3. に示す固定機構で、アンテナ下部に設けた位置決めブロックと位置方位検出機構、及びステーションに設けた固定ブロックで構成しており、位置決めブロックが固定ブロックに正しくかん合することによって正確な位置決めが行われるとともに、位置方位検出機構により基準位置からのずれが正確に検出される。

位置方位検出機構は、アンテナ中央下部に設けた位置検出装置 (水

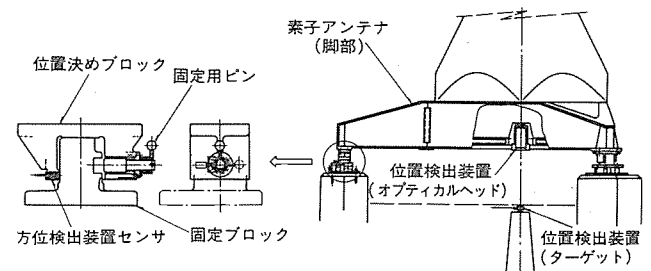


図 3. アンテナ固定機構

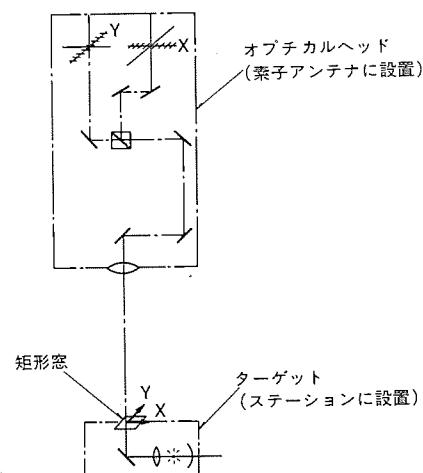


図 4. 位置検出の原理

平面内の変位を測定する)とアンテナ脚部に設けた方位検出装置(ステーション中心位置まわりの回転角度を測定)で構成する。

(a) 位置検出装置

図4.に示すように、ステーション中心に設けたターゲットは球面鏡の中心でかつ凸レンズの焦点である位置に光源を有しており、この光源から出る光は平行光線となって(矩)形窓を通過する。この矩形窓の縁がオプティカルヘッドの光電変換素子上で、鮮明な明暗の境界として検知される。この境界位置の変化がアンテナ中心の移動

量であり、この装置は $10\mu\text{m}$ の分解能で検出する。

(b) 方位検出装置

アンテナ脚部3箇所において、位置決めブロックと固定ブロックのすきまを計測することによりアンテナの回転角度を検出するものである。この計測センサは渦電流式のもので、センサと固定ブロックの間の距離に応じてセンサコイルのインダクタンスが変化することを利用したもので、 $10\mu\text{m}$ の精度で距離を検出することができ、これはアンテナの回転角に換算すると1秒角の精度に相当する。

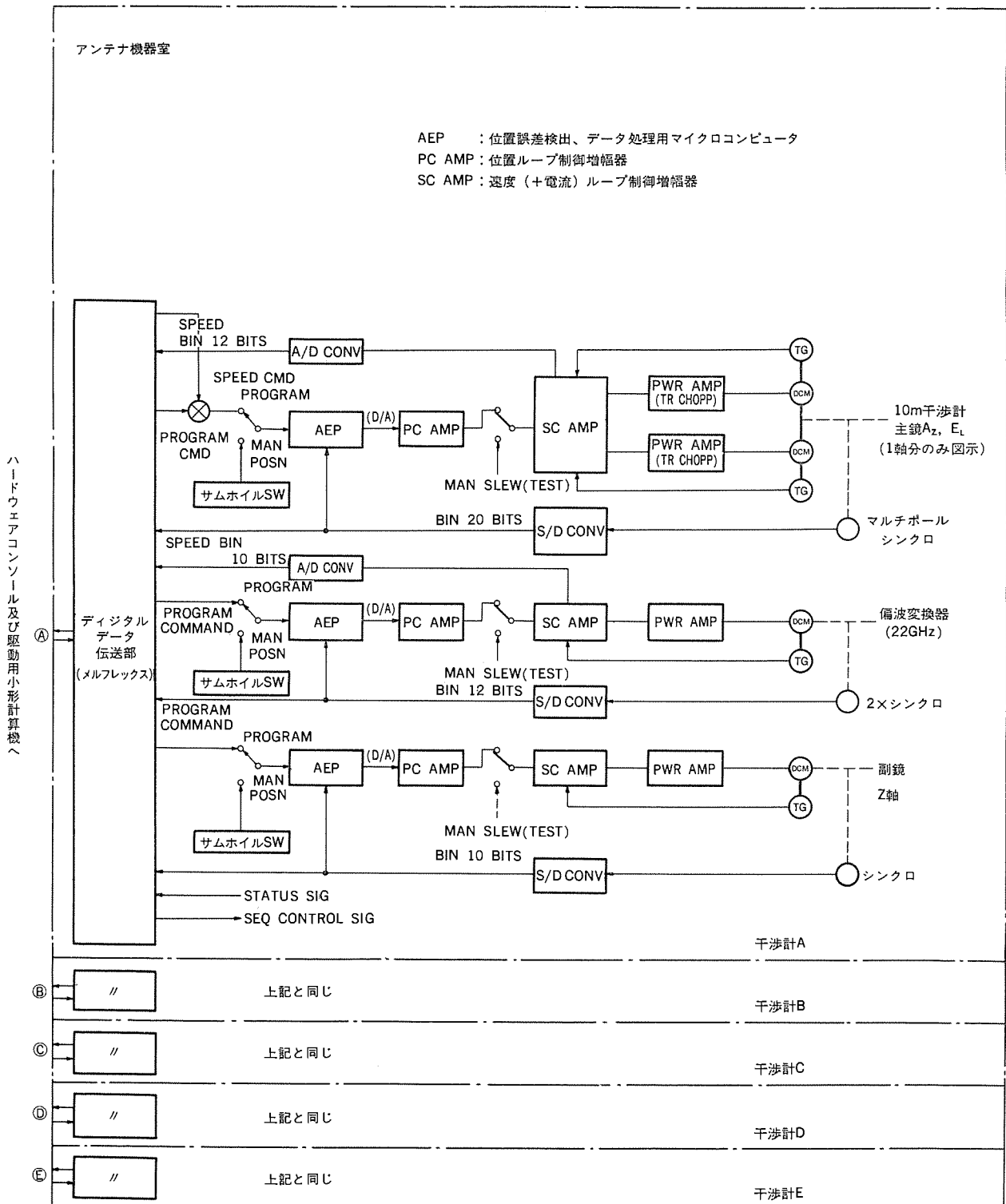


図5. 駆動制御系ブロック図

アンテナ 固定機構の機能としては、上記の位置方位検出ということのほか、強風時あるいは地震時にアンテナを安全に保持する必要がある。このために図 3. に示すようなピンが位置決めブロックから固定ブロックに挿入している。

2. 2 駆動制御装置

素子アンテナの駆動制御系は図 5. のブロック図に示すように、主鏡 (Az 及び E_L の 2 系統)、副鏡及び偏波変換器の 3 系統である。5 基のアンテナはすべて同一仕様であり、上記 3 系統はそれぞれ位置ループ、速度ループ (主鏡については更に電流ループ) で構成するサーボ系と、データ処理・コントロールモード切換制御・表示などを行うマイクロコンピュータ回路とを備えており、すべて素子アンテナ下部の機器室内に納めている。またマンマシンインタフェースとしての制御・表示を行うハードウェアコンソールは数百 m 離れた観測棟に設置しており、通常はここからリモートコントロールされる。以下に各駆動制御系について述べる。

(1) 主鏡駆動制御系

主鏡の方位角 (Az) 及び仰角 (E_L) を駆動制御するもので、 Az , E_L とともに同一仕様である。電力増幅器としてはトランジスタチョップ増幅器を、駆動モータとしては 750 W の直流サーボモータを使用している。なお Az , E_L とともに 2 個のモータと 2 系列の歯車列を持ったアンチバックラッシュ駆動系である。

図 5. において、電力関係を除くすべての信号はデジタルデータ伝送部を通して観測棟のハードウェアコンソール及び駆動用小形計算機とインタフェースしている。

観測棟からのプログラム角度指令値、速度指令値及びマルチポールシンクロ電機からの主鏡実角度などは、マイクロコンピュータ (AEP) で誤差演算及びデータ処理した後 D/A 変換され、位置誤差として位置ループ制御増幅器 (PC AMP) へ出力される。この出力は速度ループ制御増幅器 (SC AMP)、電力増幅器 (PWR AMP) を通った後、主鏡駆動モータに入力されて主鏡位置を制御する。なお SC AMP 内には電流ループが内蔵しており、アンチバックラッシュ駆動時のプリトルクを適当に保ち、また同時に過大な突入電流を制限している。

機器室内からの主鏡制御 (ローカルモード) のために、角度指令用のサムホイールスイッチ (サムホイール SW) 及び速度指令用ポテンシオメータ (MAN SLEW) が機器室内に設けており、手動操作が可能である。

(2) 副鏡及び偏波変換器駆動制御系

副鏡駆動制御系は副鏡の鏡軸方向の駆動制御を行い、偏波変換器駆動制御系は偏波追尾を行うものである。

両駆動制御系とも主鏡駆動制御系に比べて負荷が小さいので、電力増幅器としてハイブリッド IC による直流電力増幅器を採用している。また駆動モータも小形直流サーボモータの単独駆動で、主鏡駆動制御系と比べると簡素化しているが、その他の制御は主鏡駆動制御系と同一で、使用しているハードウェアについてもほとんど互換制を持たせている。

(3) マイクロコンピュータ

この駆動制御装置は、各種の雑音防止回路、暴走監視回路 (ウォッチドッグタイマ) の採用により、信頼性の高い動作、ハードウェアの共通化、装置の小形化といった数々のメリットを得ている。

2. 3 鏡面測定装置 (舟形ゲージ)

この測定装置は素子アンテナの鏡面精度が 0.2 mm RMS 以下と極めて高いために、通常の range-angle 法に代わり開発されたもので、0.05 mm RMS の精度で鏡面を測定することができる。構造は図 6. に示すとおりで、舟形棒、変位センサ、トランスデューサ、変位計などで

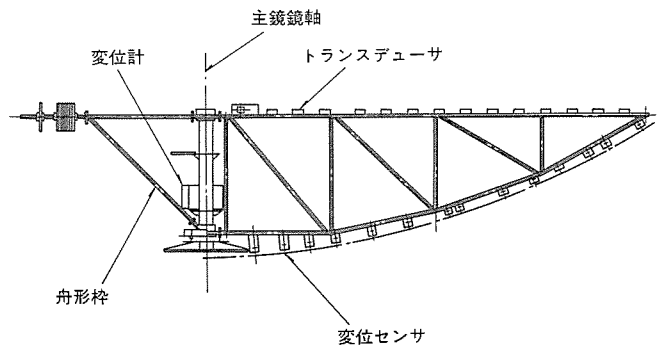


図 6. 舟形ゲージ 概観図

構成している。舟形棒は垂直軸まわりに 360° 回転することができ、半径方向に 14 個取付けた変位センサにより鏡面の凹凸を検出し、トランスデューサ、変位計を介してデジタル信号を計算機システムへ送る。

この装置の精度を決定する要素には変位センサ自身の精度 (0.01 mm RMS) のほかに、舟形棒の回転精度、変位センサの取付位置精度 (半径方向及び上下方向) などがあるが、後 2 者の精度が大きく影響するので、この装置のこう (較) 正にはレーザ干渉計を使用して精度の確保を行っている。この装置を使用して実測した素子アンテナの鏡面精度は 0.15 mm RMS である。

2. 4 移動台車

素子アンテナは観測スケジュールに従って数日に一度移動させるが、このために使用するのが移動台車であり、素子アンテナ (重量約 35 t) を積載して東西約 600 m (こう (勾) 配 4/1,000)、南北約 550 m (勾配 8/1,000) の専用軌道上を走行し、素子アンテナを図 7. に示す 30 箇所のステーションに移動・設置する。東西軌道と南北軌道の交点にはターンテーブルが設けられ、移動台車が東西軌道から南北軌道へ、あるいはその逆方向に移動できる。

移動台車は横行 (親) 台車、縦行 (子) 台車、電源装置、油圧装置などで構成する。図 8. にステーションで素子アンテナを設置中の移動台車を示す。

(1) 横行 (親) 台車

横行台車は素子アンテナを積載した縦行 (子) 台車、電源装置及び油圧装置などを積載してステーション間を走行するもので、ステーション入口に到達すると、レベル機構 (4 本の油圧ジャッキ) の作動によりステーション側レール (縦行レール) と横行台車上の縦行台車用レールのレベル合わせを行い、縦行台車がステーションへ移行できるようにする。

(2) 縦行 (子) 台車

縦行台車はステーション上の縦行レールを走行し、素子アンテナを固定ブロック上に設置、あるいは固定ブロックより撤去するもので、設置時にアンテナ位置を調整するためのアンテナ位置・方位調整装置を有している。アンテナ位置・方位調整装置は積載したアンテナの水平面内での位置及び方位角の調整が可能で、前述のアンテナ固定機構と協調してアンテナを正しい位置に設置する。なお縦行台車はアンテナの設置を完了すると横行台車に戻り、他の作業に入ることが可能である。

(3) 電源装置

電源装置は横行/縦行台車駆動モータ (AC 15 kW/7.5 kW)、油圧装置などの電源であるばかりでなく、移動中にも通電が必要な受信機関係の電源をも兼ねたもので、水冷 4 サイクルのディーゼル発電機である。出力は AC 200 V 3 φ で 50 kVA、AC 100 V 1 φ で 2 kVA であり、定格出力時には 10 時間以上の連続運転が可能な燃料タンク

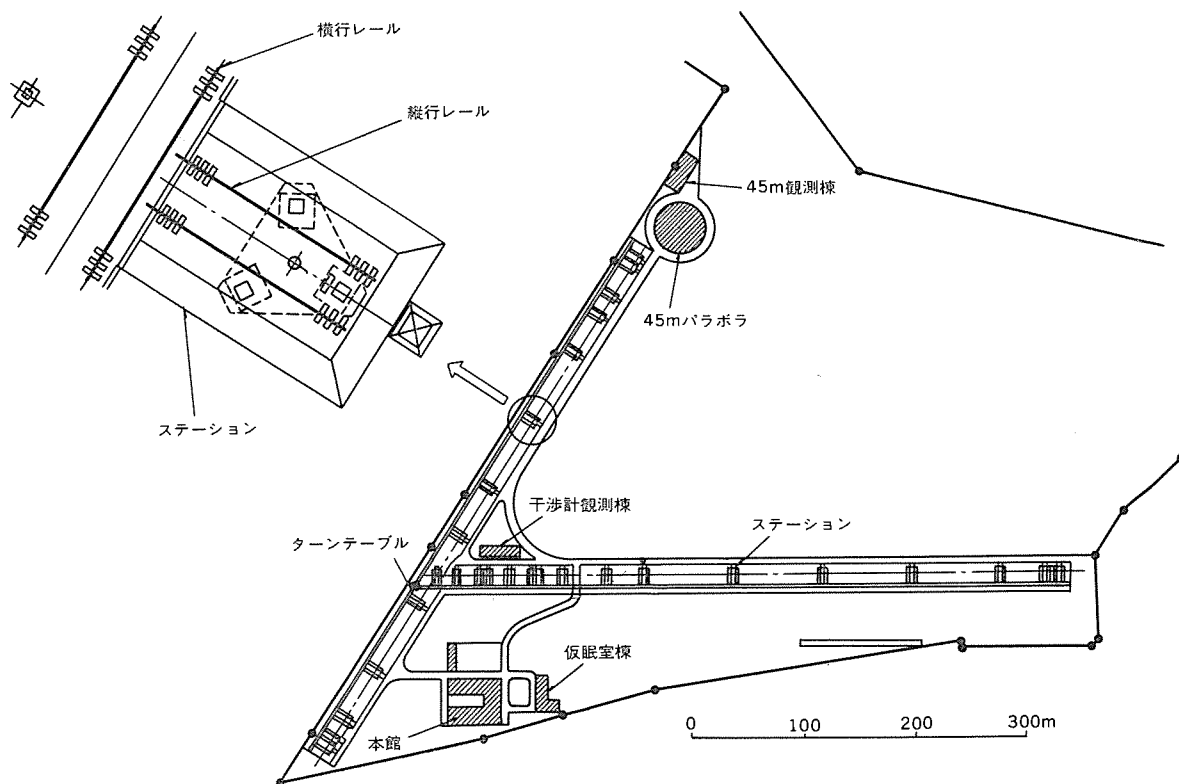


図 7. ステーション 配置図

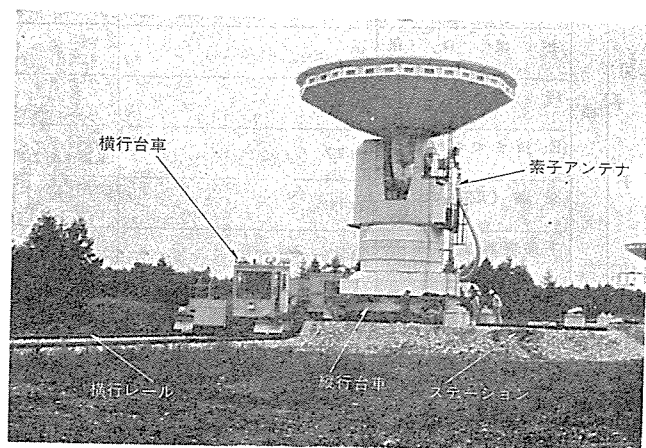


図 8. 移動台車

を有しており、燃料の補給なしに5基の素子アンテナの配置がえが可能である。

縦行台車及びアンテナ（受信機を含む）への電力供給は横行台車に設けられたケーブル巻取装置を介して行われる。

(4) 油圧装置

油圧装置は横行台車のレベル機構、縦行台車のジャッキ機構及びアンテナ位置・方位調整装置の油圧シリンダ及び油圧発生装置などで構成する。使用最高圧力は 200 kg/cm^2 である。アンテナ位置・方位調整装置の油圧シリンダは最小 0.03 mm のストロークの調整が可能で、これは位置で 0.03 mm 、方位で 0.002° の精度に相当する。

3. む す び

10 m 5 素子干渉計は昭和56年度に素子アンテナ、駆動制御装置、移動台車、ステーションなどの諸設備の据付調整が完了し、いよいよ昭和57年度は当年度に準備される受信装置、データ処理装置との組合せによる試験観測に入るところまでできた。

この干渉計の開発・製作に当たり、御協力をいただいた東京天文台をはじめとする関係各位に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 田中：天文月報，71，No. 5 (昭53)
- (2) M. Ishiguro：Nobeyama Radio Observatory Technical Report, No. 7 (1981)

5素子干渉計用10mアンテナ

石黒正人*・別段信一**・河村英四郎**・増田剛徳**・蛭子井 貴***

1. ま え が き

この干渉計用 10 m アンテナは、野辺山宇宙電波観測所納め 5 素子干渉計の素子アンテナであり、22 GHz 帯と 115 GHz 帯で使用するアンテナである。ミリ波帯での最高の分解能を有する干渉計を得るために、高い鏡面精度、高い測角精度及び 5 個の素子アンテナの相対位相変化を少なくするように設計している。更に、受信装置などの観測機器が高度角・方位角回転に伴う誤差を受けないようカセグレンクーデ形すなわち 4 回反射集束ビーム給電方式を採用し、観測能率の向上と干渉計としての総合位相安定度の向上を図っている。また干渉計としては、アンテナ位置すなわちアンテナの回転中心である高度角・方位角回転軸の交点が、アンテナの回転に対しても変動しないことが必要で、クーデ形一次放射系内にある交点を 0.2 mm 以内に保持できるように設計している。

このアンテナは 22 GHz 帯と 115 GHz 帯で切換使用されるので、集束ビーム給電系を超広帯域設計し、給電ホーンのものど(喉)元部の複モード発生器のみを交換することにより両周波数帯変換ができるように設計し、また給電装置は 45 m 電波望遠鏡⁽¹⁾と組合せて 6 素子干渉計として使用できるように設計している。

このアンテナの概要については別論文「10 m 5 素子干渉計」⁽²⁾で述べているので、本稿は電氣的設計及び性能を主に述べる。

2. 装置の設計

このアンテナの外観及び主要性能・諸元はそれぞれ図 1.、表 1. に、アンテナの電氣的概略構成を図 2. に示す。このアンテナの電氣的設計・諸元を以下に述べる。

2.1 放射給電系の設計

このアンテナの放射給電系の設計に際しては、

(1) 周波数 22 GHz 帯と 115 GHz 帯で使用でき、将来更に高い周波数帯への変更も可能なこと。

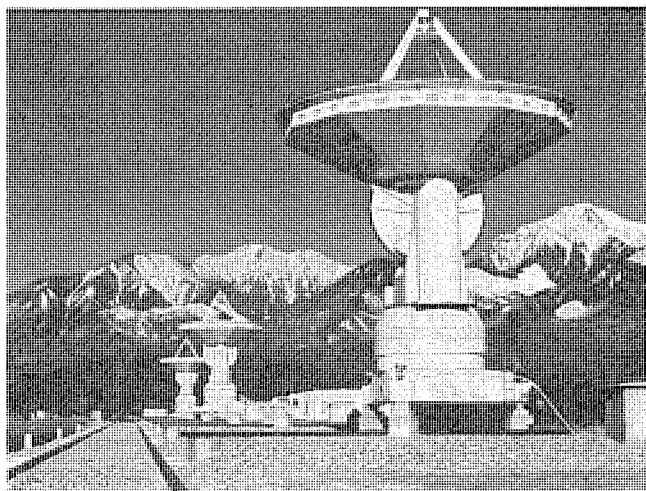


図 1. 5 素子干渉計用 10 m アンテナの外観

- (2) 集光能力が大きく、雑音温度が低いこと。
- (3) 主ビームの軸対称性・偏波特性が良好なこと。
- (4) 周波数切換えが容易で、保守・運用に便利なこと。

などの条件を考慮した。すなわち、アンテナ方式は 4 回反射集束ビーム給電(クーデ形)カセグレンアンテナとし、4 回反射集束ビーム給電系を超広帯域設計⁽³⁾し、集束反射鏡の組合せにより交差偏波成分の相殺⁽⁴⁾を図り、更に給電ホーンに複モードホーンを採用して周波数変更を

表 1. 10 m 干渉計用アンテナの主要性能・諸元

	項 目	性 能, 諸 元	備 考
素子元	アンテナ方式	カセグレン変形クーデ焦点	
	架台形式	高度角, 方位角方式(E _L /A _z 方式)	
	周波数帯 (GHz)	22~115	
	制御方式	計算機制御及びマニュアル制御	
	角度検出方式	軸直結マルチボールシンクロ電機	
	主鏡口径 (m)	10	
	副鏡口径 (m)	約 1	
	E _L 軸までの地上高 (m)	約 7.7	コンクリート基礎上面より
	全高 (天頂格納位置) (m)	約 14.5	
	下部機器室床面積 (m ²)	13	天井高: 2.2m
アンテナ機械性能	重 量 (t)	約 35	
	電気性能	集光能率(ホーン出力端)	22 GHz: 60% 以上, 115 GHz: 22% 以上
		雑音温度*(ホーン出力端)	22 GHz: 20 K 以下, 115 GHz: 74 K 以下 (E _L : 20° 以上)
	指向精度	主鏡鏡面精度 (RMS 値) (mm)	0.2 以下
		再現性の誤差 (°)	0.002 以下
		絶対値の誤差 (°)	0.005 以下
		角度検出誤差 (°)	0.0009 以下
	回転範囲	高 度 角 (°)	-0~+180 (但し, 観測時は -0~+93°)
		方 位 角 (°)	600
	駆動方式	駆 動 方 式	両軸ともバックラッシュ止歯車駆動 (トランジスタチョッパ制御駆動及び手動ハンドル駆動)
		両 軸 の 一 致 度 (mm)	0.2 以下
		最 大 駆 動 速 度 (°/s)	0.5
干渉計	総合性能	総合相対位相安定度 (°/12 h)	5 以下 (22 GHz)
		総合相対位置安定度 (mm/12 h)	0.1 以下 (夜間無風時)

注 * 大気の大気放射及び宇宙電波バックグラウンドを含まず。

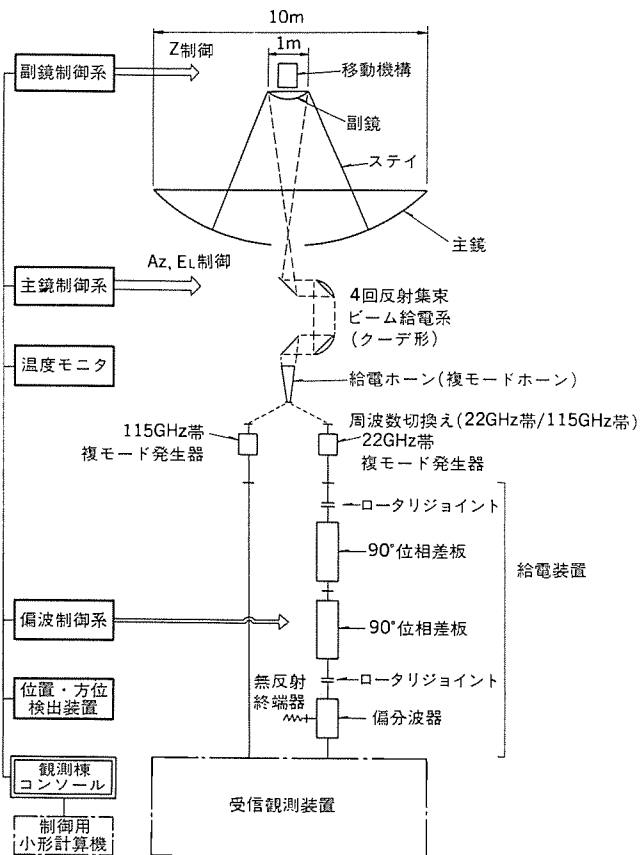


図 2. 10 m アンテナの電気的構成

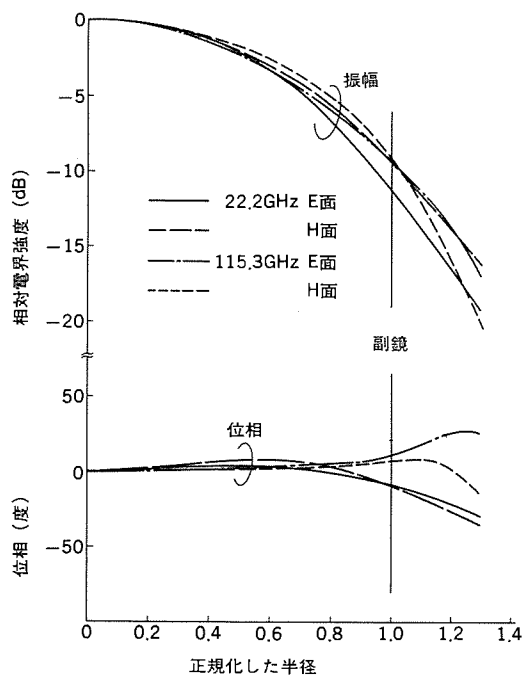


図 3. 一次放射パターン (計算値)

容易にするとともに、主ビームの軸対称性・偏波特性を良好なものとした。また、主・副鏡はミリ波帯での集光能力、機械的変形に伴う各種収差及び将来の周波数帯変更を勘案し、パラボラ-ハイパボラの2次曲面鏡構成とし、低雑音特性・良好な広角指向特性を得るために、各反射鏡エッジレベルを可及的に低く抑えている。4回反射集束ビーム給電系は2枚の準放物面鏡と2枚の平面鏡で構成し、各反射鏡直径

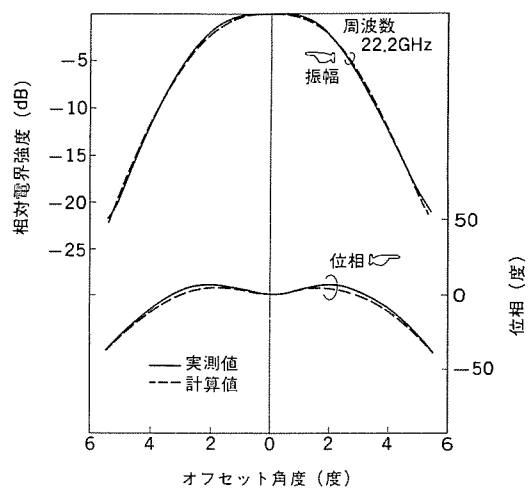


図 4. 一次放射パターン (実測値)

表 2. 10 m アンテナの電気的設計性能

項 目		周 波 数		備 考
		22.2 GHz	115.3 GHz	
一 次 ホ ー ン の 損 失 (dB)		0.09	0.38	
スビルオーバー電力 (dB)	ビーム伝送系	0.03	0.01	
	副 鏡	0.42	0.40	
	主 鏡	0.05	0.05	
ブ ロ ッ キ ン グ 電 力 (dB)		0.39	0.39	
鏡面精度 (dB)	ビーム伝送系	0.01	0.37	0.03 mm RMS
	副 鏡	0.01	0.09	0.03 mm RMS
	主 鏡	0.15	4.06	0.2 mm RMS
開口分布 (dB)	振 幅 分 布	0.48	0.40	
	位 相 分 布	0.03	0.03	
	設 定 誤 差	0.05	0.20	
CFRP 反射板の反射損失 (dB)		0.16	0.16	集束反射鏡 4 枚
開口効率	(dB)	1.92	6.54	
	(%)	64.3	22.2	
利 得 (ホーン出口) (dB)		65.4	75.1	
雑 音 温 度* (ホーン出口) (K)		20	74	E _L 20° 以上
給電装置	使用可能帯域幅 (GHz)		21.0~22.3	113.7~115.7
	楕円偏波率	円 偏 波 (dB)	0.3 以下	
		直 線 偏 波 (dB)	30 以上	25 以上
	VSWR		1.2 以下	1.5
	挿入損失 (dB)		0.5 以下	

注 * 大気放射及び宇宙バックグラウンドを含まない。

と間隔とを十分大きくし、各伝送区間のフーネル数を最低6以上にし、超広帯域にわたり副反射鏡（以下副鏡）上の電界分布の周波数変化を小さくし、残留交差偏波成分を-40 dB以下となるように設計した。

図 3. に副鏡位置における一次放射 パターンの設計値を、図 4. に実測 パターンを示す。また各集束反射鏡は熱変形を可及的に小さくするため、CFRP 製 ハニカム で製造し、ミリ波帯での電波の反射を良好にするため反射面のみを厚さ 15 μm 以上 メタライズし、22 GHz 帯と 115 GHz 帯で 99% 以上の反射率を実現した。給電ホーンに使用した複モードホーンはフレア角変形形で両周波数帯域とも理論値と良く一致したパターンが得られた。

給電装置は図 2. に示すように、22 GHz 帯は任意の直線偏波、円偏波に対処でき、115 GHz 帯は直線偏波専用である。22 GHz 帯の給電装置は 45 m 電波望遠鏡と組合せ、6 素子干渉計として使用することを考慮し、45 m 用給電装置と同一設計としている。

以上により アンテナ の電気的設計性能を表 2. に示す。

2.2 駆動制御系の設計

素子アンテナの駆動制御系は図 2. に示すように、主反射鏡（以下主鏡）制御系、副鏡制御系及び偏波制御系で構成し、アンテナの状態表示として、主鏡、副鏡支柱などの温度モニタ、アンテナの位置・方位検出装置、X-Y 傾斜計などを付加している。これらの概要については「10 m 5 素子干渉計」⁽²⁾に述べているので、非常に高精度 (0.002° RMS) が要求される主鏡制御系の設計について述べる。

高い指向精度を実現するために、次の点に留意して制御系の設計を行った。

- (1) 駆動機械系の剛性を高くとるべく各部の剛性配分を行い、機械共振周波数を高くする。
- (2) 駆動歯車に誤差の小さいものを選択し、駆動歯車系のバックラッシュを相殺できるアンチバックラッシュ駆動方式とする。
- (3) 駆動モータはトルク制御が容易な直流モータとし、フリクションが小さく、低速性能が良好なものを選択する。
- (4) 速度フィードバック用 タコゼネレータ はリップルが小さく、低速域での直線性の優れたものを使用する。
- (5) 駆動増幅器は応答が速く、無駄時間の少ないトランジスタチョッパ方式とする。
- (6) 角度検出器は結合ギヤが不要な軸直結形で、保守性が良く、雑音の影響が少ないマルチポールシンクロ方式とする。

特に、方位軸 (Az 軸) の回転中心は集束ビーム給電系の給電ホーンが据付けられるので、内径 300 mm 以上、外径 480 mm 以下のドーナツ形構造のマルチポールシンクロを採用した。このマルチポールシンクロはドーナツ形のステータに 1 X 及び 128 X の 2 系統の巻線を挿入した多極シンクロであり、構造上発生する高調波成分誤差、軸の偏心、真円度などの加工誤差やベアリングのフレなどによる横軸磁束誤差及び二次巻線の三相不平衡誤差などのシンクロ固有の誤差を可及的に小さく抑え、更にシンクロ信号をデジタル信号に変換する段階で再現性のある誤差成分を補正する方式を採用した。図 5. にこのマルチポールシンクロの外観を示す。このシンクロの総合検出精度は 4 秒角 P-P を実現している。

3. 測定結果

以上の設計により製作したアンテナの主要電気性能の測定結果について述べる。

主鏡の鏡面は非接触形プローブを半径方向に 14 箇所配した舟形ゲージ鏡面測定装置を用いて調整し、高度角変化はアライメントテレスコープを用いたたわみ測定結果と組合せ、各高度角度における鏡面精度は計算機で求められる。鏡面精度は舟形ゲージにより 1,008 点測定し、全号機 (5 台) と全高度角度に対し 0.15 mm RMS 以下を実現し得た。測定した鏡面誤差分布例を図 6. に示す。また、4 回反射集束ビーム給電系の集束反射鏡の鏡面精度はすべて (20 枚)

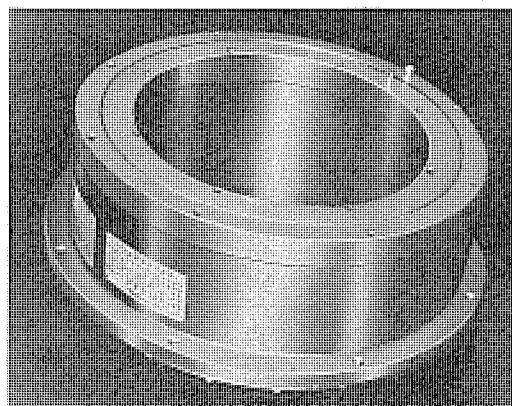


図 5. マルチポールシンクロの外観

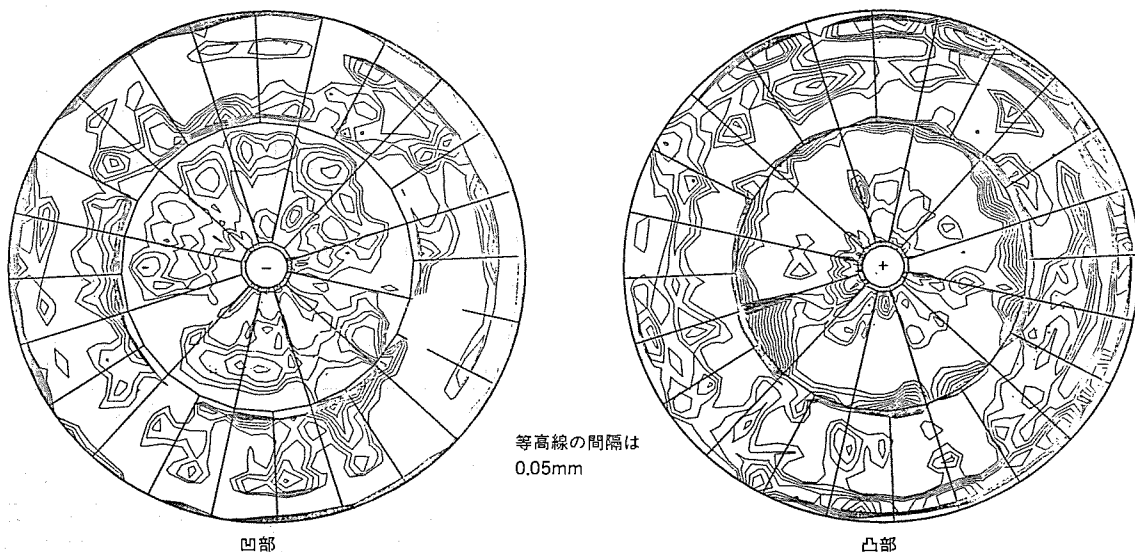


図 6. 主鏡鏡面誤差分布

0.03 mm RMS 以下, 設定精度は平行移動 0.5 mm 以下, 回転 0.01° 以下を得た。副鏡の鏡面精度は 5 台とも 0.018 mm RMS 以下である。

アンテナ利得, 放射パターンは, 約 1.9 km 離れた飯盛山山頂付近に設置したコリメーション装置を用いて行った。このテストレンジではニヤーフィールドによる被測定アンテナ開口面上の位相誤差が 115 GHz で約 900 度あり, 副鏡をアンテナ軸方向に移動してこの位相誤差を補正しても, 放物面と球面との差異による位相補正残差が 115 GHz で約 70 度となる。この位相補正残差が被測定アンテナの鏡面誤差による位相残差などに加算され, アンテナ放射特性に影響を与えるので, 図 6. に例示した鏡面誤差分布と位相補正残差を計算機で, ビームモード展開を用いた解析手法⁽⁵⁾を用いて補正する手法を用いた。干渉計の

素子アンテナとしては主ビームの回転対称性が重要であるため, 近軸放射パターンはマッピングを行い評価した。この測定では被測定アンテナの指向角度設定, 放射パターンの測定データの計算機への取込みなどすべて自動測定を行い, 測定時間の短縮, 機械的精度を考慮したデータ解析, 評価の便を図った。

図 7. に 115 GHz 帯で実測した放射パターンと一次放射パターン, 鏡面誤差分布の測定値及び位相補正残差などより計算した放射パターンとの比較を示す。実測値と計算値との一致度はかなり良く, ビームモード展開を用いた解析手法で近軸放射パターン予測が得られると考えられる。これにより, ニヤーフィールド位相誤差を計算上除去することにより, ファーフィールド放射特性を求め性能評価を行った。また広角放射パターンの実測例を図 8. に示す。

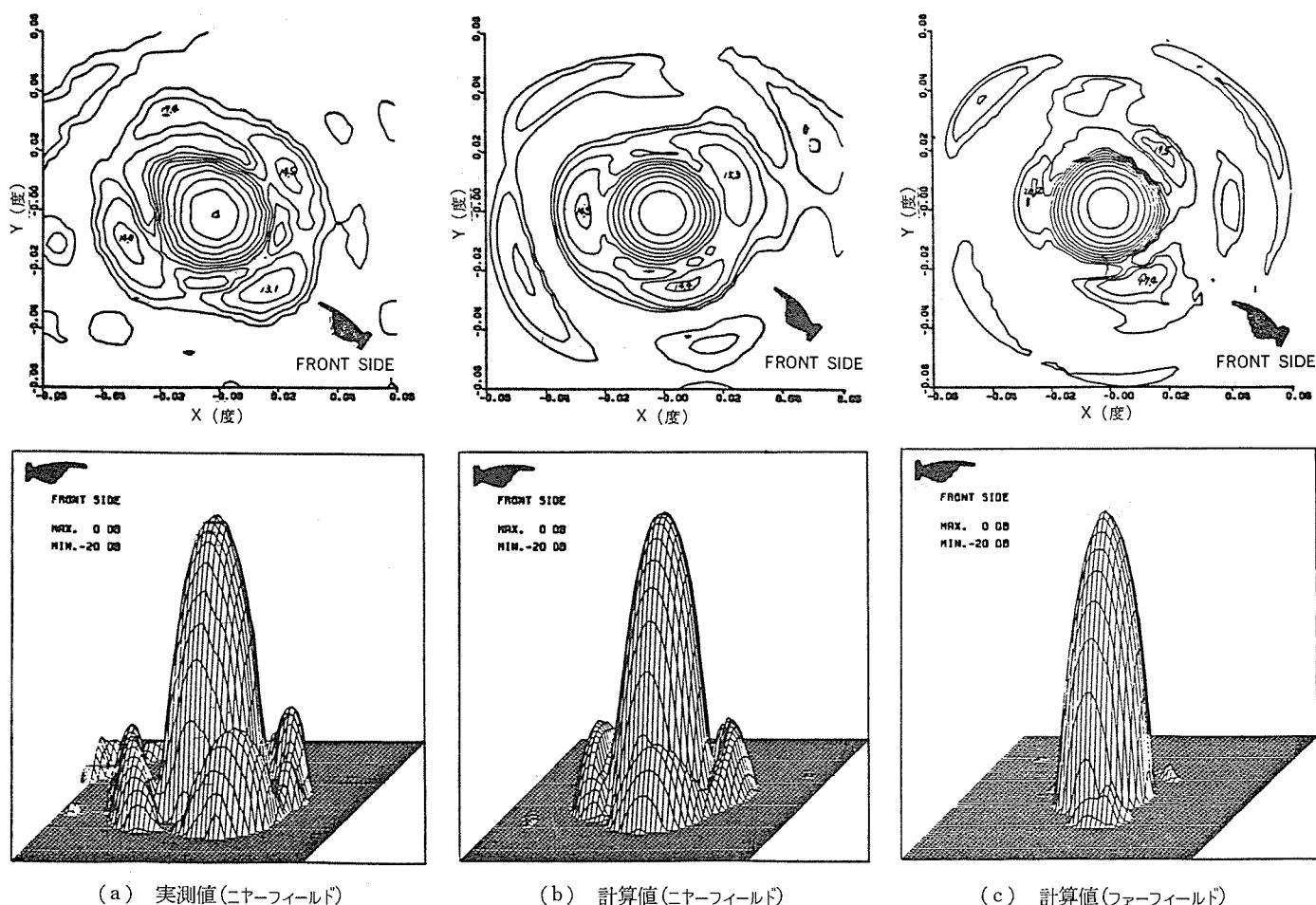


図 7. 115 GHz の放射パターン

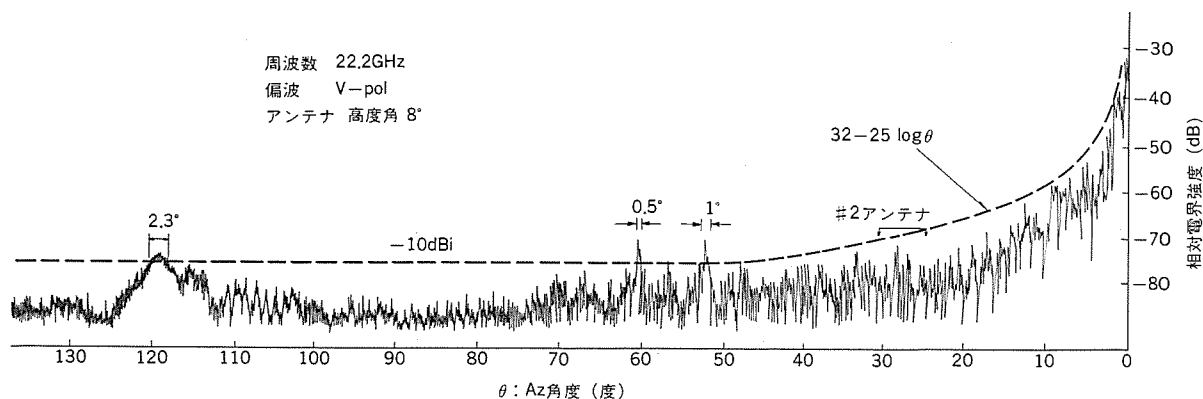


図 8. 広角放射パターン

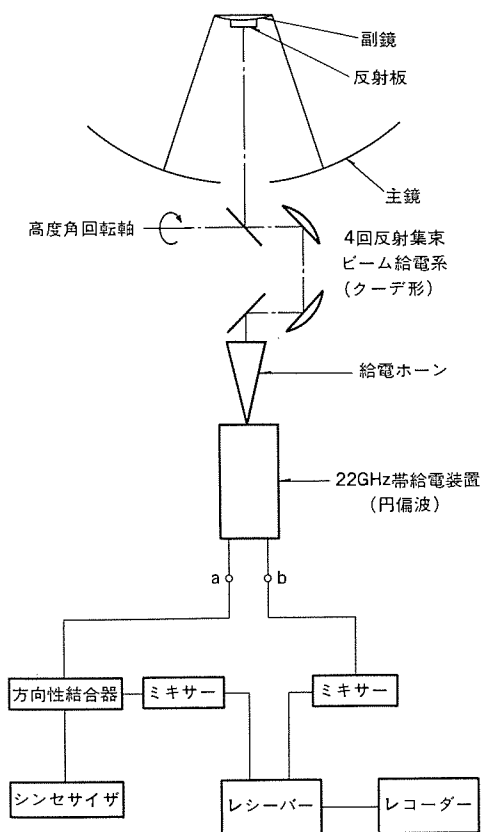


図 9. 位相安定度の測定回路

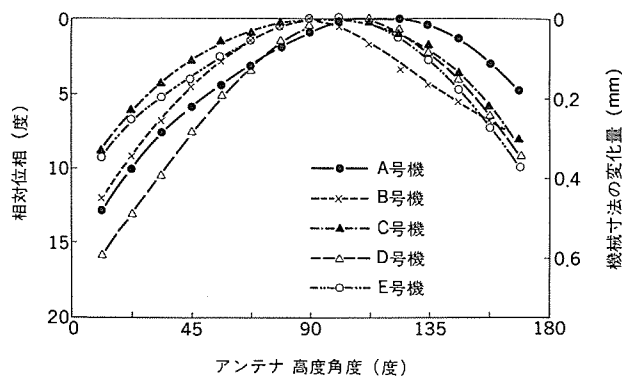


図 10. アンテナの高度角回転に伴う位相変化

アンテナ利得測定はこのコリメーション装置を用いたスパンロス法により行い、伝搬路中の水蒸気や酸素などによる吸収損失は測定時の気温、大気圧などを参考文献(6)記載の計算法に代入して求めるとともに、ニャーフィールド位相誤差の補正は上述の放射パターン計算手法と同じ方法で行った。これらの結果、全号機とも表 1. に示す設計性能を十分満たしていることが確認された。

次に 5 素子干渉計として重要な位相安定度の測定を図 9. に示す方法で行った。副鏡に平面板を装着し、円偏波励振時反射波が直交端子に現れることを利用してブリッジを組む手法で測定し、図 10. の結果を得た。全号機とも、アンテナの高度角回転に伴うわずかな機械的変位による透過位相変化、すなわち相対位相安定度は 22.2 GHz において 2.5° RMS (伝送距離変化 0.09 mm RMS 相当) 以下であり、

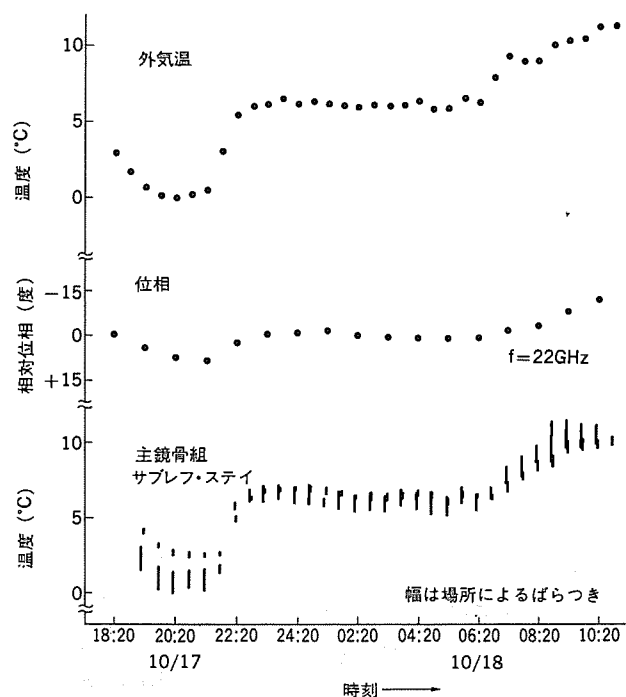


図 11. アンテナの温度変化と位相変化

環境温度の変化に伴う透過位相量の変化と各部に設けてある温度センサによる測定結果は図 11. に示すように良く一致しており、透過位相量の測定法の妥当性及び温度センサの測定結果による透過位相量変化の補正が可能であることを示している。

4. む す び

この干渉計用 10 m アンテナは素子アンテナとしての現地総合調整試験を昭和 56 年 12 月末に完了し、昭和 57 年度装備される低雑音受信器などの電子機器との組合せによる試験観測が今後実施され、ミリ波帯での高精度 5 素子干渉計が完成されるものと期待されている。

この干渉計用アンテナの開発・製作に当たり、御指導を賜った田中教授(元東京大学東京天文台教授)並びに東京天文台の関係各位に深謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 赤羽ほか：45 m 電波望遠鏡，三菱電機技報，56，No. 7 (昭 57)
- (2) 田中ほか：10 m 5 素子干渉計，三菱電機技報，56，No. 7 (昭 57)
- (3) 水沢，別段：カセグレンアンテナ用集束ビーム形一次放射系の広帯域設計，電子通信学会全国大会，594，3 (昭 48)
- (4) M. Mizusawa et al : A Beam-Waveguide Feed Having a Symmetric Beam for Cassegrain Antenna, IEEE Trans. AP-21, 884 (1973)
- (5) 片木ほか：集束ビーム給電系のビームモード展開による設計法，信学技報，AP 81-5 (昭 56)
- (6) M. L. Meeks : Methods of Experimental Physics, Vol. 12, Achademic Press, N. Y.

電波望遠鏡用CFRP製反射パネル

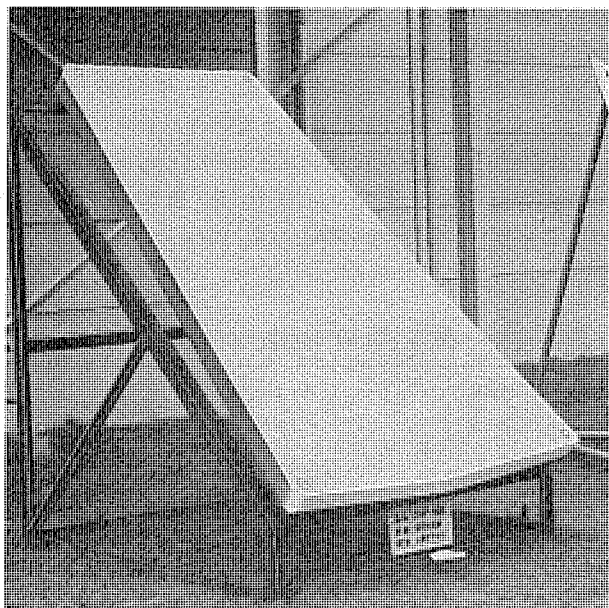
田 嶋 尚 志*・大 段 永 治**・村 山 邦 彦***・島 本 幸 三***・高 橋 一 郎+

1. ま え が き

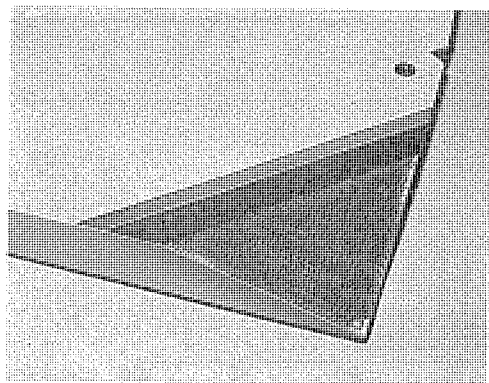
45 m 電波望遠鏡は、ミリ波領域までの宇宙電波を観測するもので、そのパラボラアンテナ部は屋外に設置される。したがって、これに使用する反射パネルは、電気的特性を満たすために高度の鏡面精度を持たなければならないとともに、厳しい使用環境に対して強度耐久性が要求され、気温変動に対しても精度を維持しなければならない。

従来、大型パラボラアンテナの反射パネル材は、一般にアルミニウムが用いられているが、熱膨張係数が小さく、比弾性率が大きいなどの優れた特性を持つ炭素繊維強化プラスチック（以下 CFRP と称す）を使った反射パネルが強く望まれていた。

図 1. (a), (b) に示すこの反射パネルは、CFRP 積層材を表皮材とし、アルミニウムハニカムを心材とするサンドイッチ構造体の表面に、



(a) 反射パネル



(b) 反射パネルの切欠き断面

図 1. CFRP 製反射パネル

電氣的反射面及び表面保護層を形成したものである。本稿では、この反射パネルの概要を紹介するとともに、設置場所の環境を模擬した促進試験による耐久性評価の結果について述べる。

2. 反射パネルに要求される基本條件

反射パネルに対し使用環境条件などから、下記の条件が要求される。

- (1) 耐風速：最大瞬間風速 65 m/s
- (2) 温度範囲：-30～+60℃
- (3) 湿度範囲：最高 100 % RH
- (4) 積雪量：最高 30 cm
- (5) 鏡面精度：反射パネル単体で 0.10 mm RMS 以下

ただし、全反射パネル平均で 0.08 mm RMS 以下

- (6) 曲げ剛性： 2.2×10^7 kgmm²/mm 以上
- (7) 熱膨張係数： 6×10^{-6} °C⁻¹ 以下 (CFRP 積層材に対して)

3. 反射パネルの製造

軽量化のために、サンドイッチ構造を採用し、構造物としての信頼性、精度安定性、製作容易などの面から、表皮材は CFRP 積層材を、心材はアルミニウムハニカムを採用した。製造工程を図 2. に示す。

3.1 成形方式

反射パネルは強化プラスチック成形品としては比較的寸法が大きく、高品質、量産性などを要求されることから、真空バグ/オートクレーブ成形法により、プリプレグとハニカムコアを用いて、1工程でサンドイッチ構造を得る方法を採用した。

3.2 成形条件

- (1) 直射日光の熱に対する安定法、成形時の低熱変形性のために、中温硬化、いわゆる 250°F 硬化を採用した。

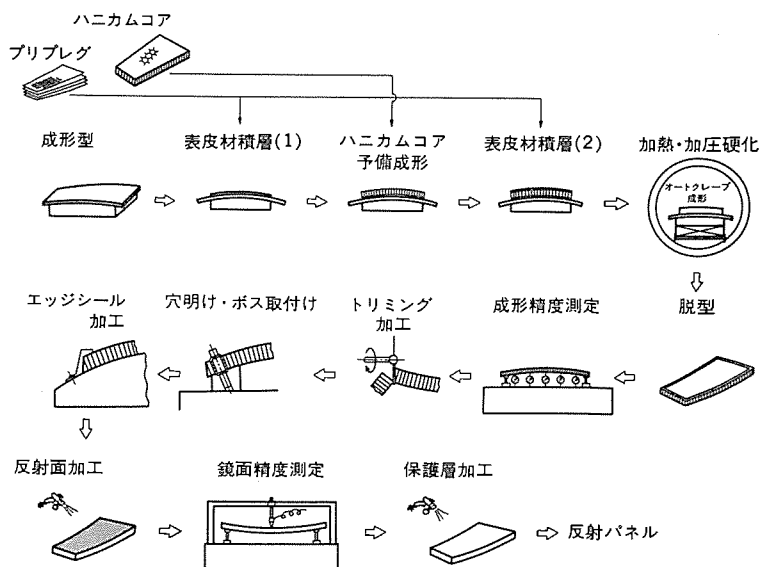


図 2. CFRP 製反射パネルの製造工程

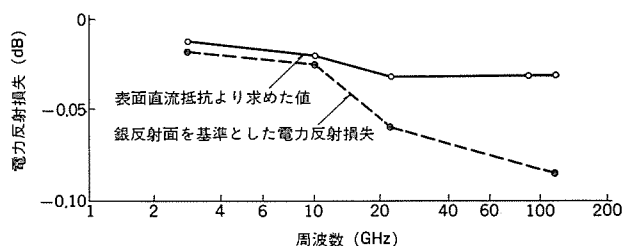


図 3. 電氣的反射面の電力反射損失

(2) 表皮材の特性のばらつきを小さくするために、プリプレグの樹脂含浸量を積層材の形成に必要な最小限とし、また成形時に樹脂の流出を少なくするよう高粘度の特殊変性エポキシ樹脂を採用した。

(3) 成形時に際し、サンドイッチ構成材の上下表皮に温度差を生じないように、加熱温度を微調整した。

(4) 反射パネルの電氣的反射面の形成を二次加工の表面処理によって行った。

3.3 電氣的反射面

CFRP 積層材もそれ自身電波反射機能を有しているが、ミリ波電波の反射面として更に表面平滑性及び導電性の優れた加工性良好な形成材の開発を必要とした。そこで、適切な粒径と形状を持つ銀粉末を、付着力の高い樹脂系バインダに適量配合し、硬化皮膜状態で銀粉末粒子間の接触が十分に保たれる導電性塗料を開発した。更に、反射パネル構造体の表皮材との密着性が高く、しかも熱的変化の少ない、樹脂系バインダと充てん剤からなるパテ材を開発した。この電氣的反射面の電力反射損失の実測値を図 3. に示す。

3.4 表面保護層

表面保護層は、反射パネルの全表面を被覆し、使用環境から反射パネル構造体を保護する重要な機能材である。したがって耐候性、耐水性の優れたアクリルウレタン系塗料のトップコート材を選定し、密着性向上のため適正なプライマーを開発した。

4. 反射パネルの性能

4.1 製品特性

反射パネルの測定した特性結果を次に示す。

- (1) 耐風速：瞬間風速 65 m/s 相当の分布荷重に対して、異状がない。
- (2) 鏡面精度：図 4. に示す⁽¹⁾。
- (3) 曲げ剛性： $2.41 \times 10^7 \text{ kgmm}^2/\text{mm}$
- (4) 熱膨張係数： $3.4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (CFRP 積層材)
- (5) 電氣的特性：電力反射損失 0.5 % 以下 (115 GHz において)

(6) 重量：約 8 kg/m^2

4.2 環境耐久性

4.2.1 CFRP 構造体

CFRP 積層板及び反射パネル構造体モデルについて、次に示す各種耐久性試験を実施した。

- (a) ヒートサイクル試験 ($-30^\circ\text{C} \leftrightarrow +60^\circ\text{C}$)
- (b) 熱劣化試験 (100°C , 120°C , 140°C)
- (c) 湿熱劣化試験 (60°C , 70°C , 80°C で 90 % RH)
- (d) ウェザーメータ試験

上記の耐久性試験後、CFRP 積層板は曲げ試験に供し、縦弾性係数 $E(\text{kg/mm}^2)$ と曲げ破壊応力 $\sigma_B(\text{kg/mm}^2)$ の経時変化を測定した。反射パネル構造体は曲げ試験と接着試験に供し、曲げ剛性 $G_b(\text{kg/mm})$ 、曲げ破壊荷重 $P_b(\text{kg})$ 、CFRP 表皮材とアルミニウムハニカム心材の接着強度 $\sigma_A(\text{kg/cm}^2)$ の経時変化を測定した。

(1) ヒートサイクル試験

電波望遠鏡が設置される長野県野辺山の気象データ⁽²⁾によると、年間最高気温は 24°C 、最低気温は -12°C であった。1 日の気温変化幅は季節に関係なく約 10°C であり、夏季の直射光による昇温が約 20°C であることから、1 日の温度変化幅は最大 30°C とみなせる。最高温度、最低温度、温度変化幅のいずれも使用環境より厳しくするよう、この試験条件を $+60^\circ\text{C} \leftrightarrow -30^\circ\text{C}$ とした。この試験を一種の熱疲労試験とみなすと、試料の物性変化は式(1)で表される。

$$P = A - B \log N \dots\dots\dots (1)$$

P : 物性, N : ヒートサイクル数, A, B : 定数

表 1. に示すように、CFRP 積層板は 3,000 サイクル後も、 E と σ_B の低下はなかった。反射パネル構造体は 3,000 サイクル後、 G_b はほとんど低下しなかったが、 P_b と σ_A は低下した。図 5. に σ_A と $\log N$ のプロットを示すとおり直線関係となり、式(1)が成り立つことを

表 1. CFRP 積層板の耐久性

耐久性試験項目 評価項目	初期値	ヒートサイクル試験	熱劣化試験	湿熱劣化試験
		3,000 サイクル	140°C 3,000 h	80°C 90 % RH 3,000 h
$E (\text{kg/mm}^2)$	3,520	3,820	3,860	3,570
$\sigma_B (\text{kg/mm}^2)$	39.0	40.5	45.5	36.7

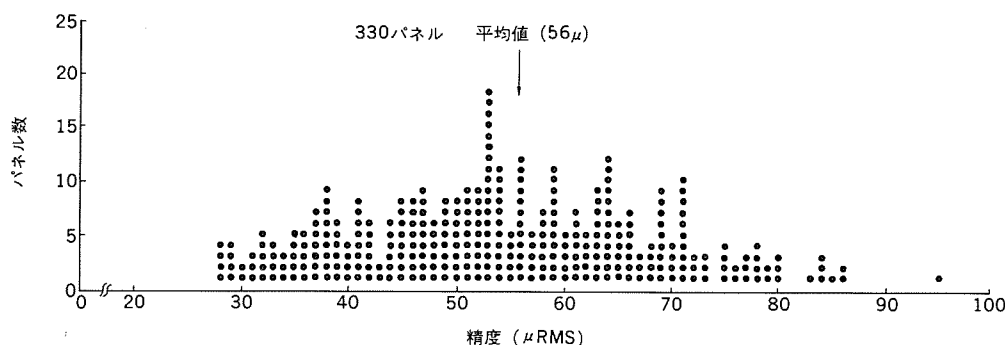


図 4. 反射パネルの鏡面精度

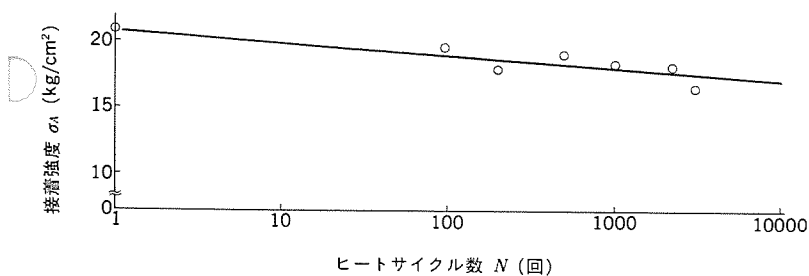


図 5. ヒートサイクル 試験による反射 パネル 構造体の接着強度変化

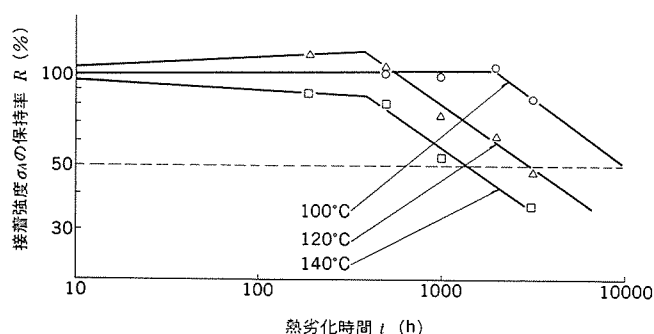


図 6. 熱劣化試験による反射 パネル 構造体の接着強度変化

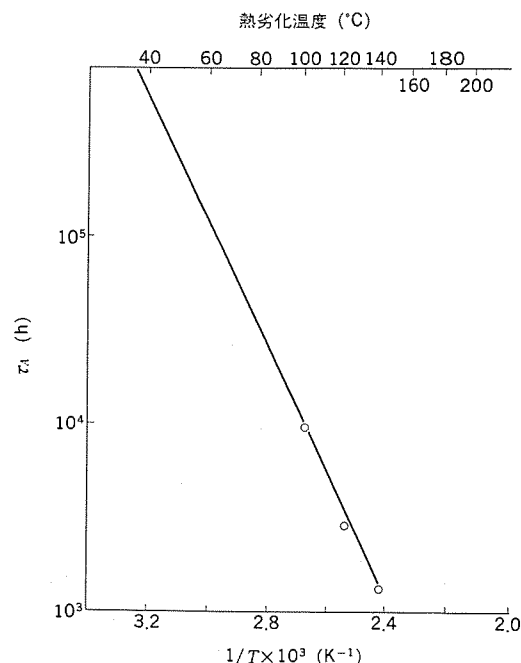


図 7. τ_A のアレニウスプロット

示している。図 5. より σ_A の低下を表す関係式として式(2)を得た。

$$\sigma_A = 20.9 - 0.961 \log N \quad \dots\dots\dots (2)$$

P_b の変化も σ_A と同様であり式(3)を得た。

$$P_b = 134 - 9.87 \log N \quad \dots\dots\dots (3)$$

疲労試験において、繊維強化 プラスチック や接着剤の物性値低下は、初期値の 70 % までは式(1)に従い、その後急激に低下すると言われている⁽³⁾⁽⁴⁾。つまり物性が初期値の 70 % になる点が疲労寿命点と考えられる。3,650 サイクル後の σ_A と P_b を式(2)、式(3)から求めて初期値と比較すると、初期値の 84 % と 74 % であり、寿命点に達していないと推定された。この結果は、CFRP 積層板、反射 パネル 構造体ともに耐 ヒートサイクル 性に優れていることを示している。

(2) 熱劣化試験

表 1. に示すとおり CFRP 積層板は、140°C で 3,000 h 後も、 E と σ_B が低下せず、耐熱性に優れている。反射 パネル 構造体は各温度とも G_b はほとんど低下しなかったが、 P_b と σ_A は低下した。図 6. に σ_A の保持率 $R = 100(\sigma_A / \sigma_{A_0}) \%$ (σ_{A_0} : σ_A の初期値) と熱劣化時間 t (h) の両対数 プロットを示す。 $R \sim t$ の曲線から、 R が 50 % になる時間、すなわち σ_A の半減値寿命 τ_A を求めた。図 7. に τ_A のアレニウスプロットを示し、 τ_A の温度依存性を現す式(4)を得た。

$$\log \tau_A = 3.36 \times 10^3 (1/T) - 5.03 \quad \dots\dots\dots (4)$$

T : 熱劣化温度 (K)

使用環境の最高温度は約 40°C とみなせるので、40°C における τ_A を求めると 5.07×10^5 h となり、反射 パネル 構造体の熱劣化寿命が非常に長いことを示している。図 6. より求めた反射 パネル 構造体の熱劣化の活性化エネルギー E_A は 15.3 kcal/mol であった。 P_b の変化も σ_A と同様であり、 P_b 変化から求めた熱劣化の活性化エネルギー E_b も 16.3 kcal/mol となり、 E_A と同様な値を得た。

反射 パネル 構造体の曲げ試験で CFRP 表皮材と アルミニウムハニカム コアの接着部に破壊が発生し、一方、接着試験における破壊形態が図 8. のようにフィレット部のぜい性破壊であることを示しているが、

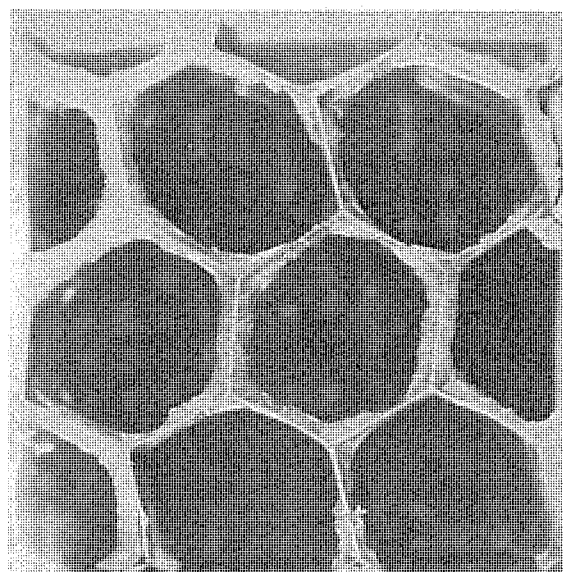


図 8. 接着試験における反射 パネル 構造体の破壊形態

反射 パネル 構造体の強度低下はこれらの接着剤の熱劣化に起因すると考えられる。このことは、 E_A 及び E_b がエポキシ樹脂の熱劣化の活性化エネルギーと同様であることから推定される。

(3) 湿熱劣化試験

表 1. に示すように、CFRP 積層板は 80°C、90 % RH、3,000 h の条件で、 E は低下せず σ_B は低下した。しかし σ_B の低下は 1,000 h 以後は少なく、経時変化曲線は初期値の 82 % に収束した。

反射 パネル 構造体は G_b の低下はなく P_b と σ_A は低下した。図 9. に σ_A の保持率 $R = 100(\sigma_A / \sigma_{A_0})$ と湿熱劣化時間 t の対数のプロットを示す。この図から R と $\log t$ は直線関係になり、式(5)を得た。

$$R = R_0 - C \log t \quad \dots\dots\dots (5)$$

R_0 : R の初期値 (=100 %), C : 劣化係数

表 2. に C の値を示す。また C の温度依存性を示すアレニウスの関

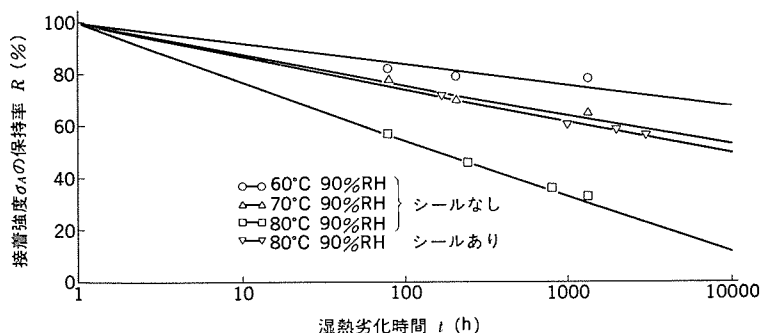


図 9. 湿熱劣化試験による反射パネル構造体の接着強度変化

表 2. 湿熱劣化試験における劣化係数

試料	シールなしパネル基体			シールしたパネル基体
	60°C 90% RH	70°C 90% RH	80°C 90% RH	80°C 90% RH
C	7.9	11.9	22.1	12.5

係式(6)が得られた。

$$\log C = 8.74 - 2.62 \times 10^3 (1/T) \quad (6)$$

式(5), (6) から 40°C, 90% RH の時の R と t の関係式(7)を得た。

$$R = 100 - 2.38 \log t \quad (7)$$

式(7)より σ_A の低下は非常に少ない。更に、反射パネル構造体の全面を防湿シールすれば、耐久性が向上することを表 2. が示している。

(4) ウェザーメータ試験

この試験は、紫外線、熱、水による複合環境耐久試験である。試験時間 3,000 h 後にも反射パネル構造体の G_b , P_b , σ_A のすべてに特性低下はなく、問題になる劣化を生じなかった。

以上の耐久試験の結果、CFRP 積層板及び反射パネル構造体は、使用環境に対し優れた耐久性を保持することが確認された。

4. 2. 2 表面処理

反射パネルの表面処理層は、厳しい外的環境に長期間さらされる。したがって、厳しい環境下でも十分安定した機能を維持しなければならない。そこで模擬パネルや試験片で暴露促進試験を行って耐久性を評価した。

まず、設置場所である野辺山の気象データ調査と雨水の水質分析を行い、その環境に即する適切な促進条件を設定して次の促進評価試験を行った。

- (a) ヒートサイクル試験 (−30°C↔60°C, 5,000 サイクル)
- (b) 湿熱劣化試験 (60°C, 90% RH 以上, 10,000 h)
- (c) ウェザーメータ試験 (60°C, 4,000 h)
- (d) 水噴霧試験 (設置場所の雨水と同質水を連続噴霧 3,000 h)
- (e) 上記各試験の複合サイクル試験 (20 サイクル)

上記の各試験条件は、紫外線エネルギー強度、熱的影響の 10 度則、その他促進倍率を適用すると、実用環境の約 20 年に匹敵することになる。

(1) 電気的反射面側表面処理

反射面側は直射日光があたり、また雨水や雪と接触するので、前記の各試験前後の表面皮膜の下記の特性変化を求めた。

- (a) 総合皮膜層としての付着性能、透湿度、吸水率
- (b) トップコートの表面観察、変色度、光沢度、分子構造変化
- (c) 導電性皮膜の電気的特性変化

まず、総合皮膜の付着性を 2 mm 角基盤目テープはく離試験で測定した結果を表 3. に示す。なお付着性能は日本塗料協会発行の標準判定写真に準拠した評価点数で表した。すべて付着性良好で表面皮膜層は長期にわたって安定した付着性を維持する。

次に、ウェザーメータ試験によるトップコートの表面変化について述べる。一般に有機物の表面は、酸素と紫外線エネルギーの相乗作用で分子が解重合を起こして酸化劣化する場合が多く、劣化した表面は光沢減少、変色、微小クラック発生などが現れる。そこで、ウェザーメータ照射前後のトップコート表面光沢率を、変角光沢計の 60 度鏡面光沢度で調べ、その変化を光沢保持率で求めた。また変色度は照射前後の色差 ΔE (Hunter 表示系による色差 (NBS 単位)) で求めた。これらの結果を図 10. に示すが、長時間の照射にもかかわらず、肉眼では識別不可能なほどほとんど変化がなかった。

次に、トップコート表面の分子構造変化を赤外線吸収スペクトル (以下 IR スペクトル) の吸収帯変化で求めた。酸化による $>C=O$ 基 (カーボニル基) の吸収帯 (波長約 5.8 μ) 増加を、変化の少ない $C-H$ 基 (アルカン基) の吸収帯 (波長約 3.4 μ) を基準として、Lambert-Beer の法則に基づく各々の吸光度 D を求め、 $D_{(5.8\mu)}/D_{(3.4\mu)}$ の変化で酸化劣化の進行度を調べた。その結果を図 11. に示すが酸化劣化の進行は極めて少なかった。

電気的反射面である導電性皮膜の電気的特性として、電極間距離 3 cm の表面直流抵抗の変化を初期値に対する変化値で求めた。その結果を図 12. に示すが、各促進試験後も変化はわずかであり、長期間安定して機能を保持することが確認できた。

表 3. パネル表面皮膜の付着性能

測定区分	耐久試験項目	初期	ヒートサイクル試験 5,000 サイクル	湿熱試験 10,000 h	ウェザーメータ照射 4,000 h	水噴霧試験 3,000 h	複合サイクル試験 20 サイクル
付着性能 (点)	反射面	8	10	8	10	10	10
	背面	8	8	10	—	10	10

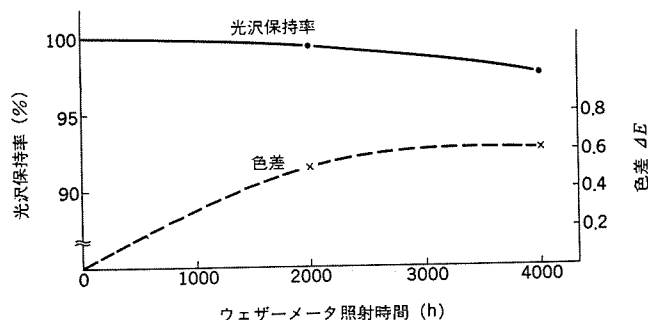


図 10. ウェザーメータ照射による反射面トップコートの光沢変化

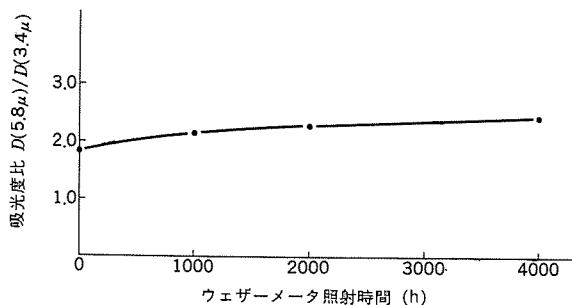


図 11. ウェザーメータと照射による反射面トップコート表面分子構造変化

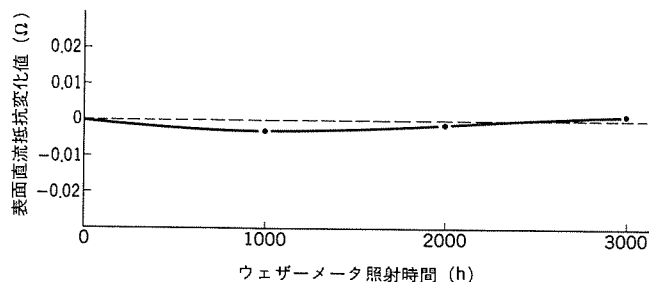
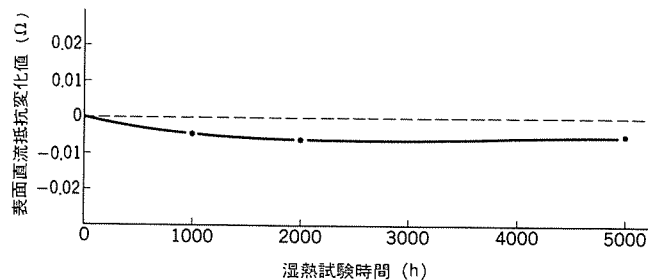
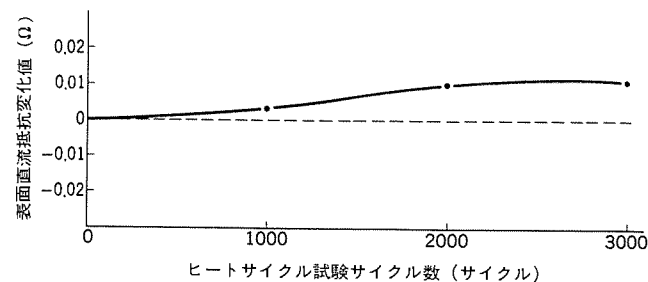


図 12. 各種耐久性試験による電波反射層の表面直流抵抗変化

(2) 背面側表面処理

反射パネルの背面側は直射日光、雪、雨などに直接触れないが、温度変化や雨水の影響を十分に受ける。そこで、ウェザーメータ試験を除いた各促進試験を行った後に、次の特性変化を調べた。

(a) 総合皮膜層としての付着性能、透湿性、吸水率

(b) 背面保護皮膜の表面観察

付着性能として、前述と同様ゴパン目テープはく離試験で調べた。結果は表 3. に示すとおり、いずれの促進試験後も付着性劣化は認められない。また、顕微鏡による表面状態の微少変化の観察でも、異常は見られなかった。更に、反射面側、背面側それぞれの総合皮膜層の吸水率、透湿度を測定したが、いずれも極めて少ないことを確認した。

以上の結果は、各表面処理層が厳しい環境においても、長期間にわたって十分にその機能を保持することを示唆している。

5. む す び

ミリ波電波を観測する電波望遠鏡に供するために、CFRP を応用した高性能反射パネルを完成した。これらの技術が、今後の高性能大型アンテナの開発に、寄与できれば幸いである。最後に、この製作に当たり、御指導をいただいた東京天文台の諸先生をはじめ、御支援御協力いただいた社内外の関係者各位に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) N. KAIFU: NOBEYAMA RADIO OBSERVATORY TECHNICAL REPORT No. 5, 「SURFACE MEASUREMENT OF NRO 45-M TELESCOPE」
- (2) 長野地方気象台: 長野県農業気象月報 (昭 49)
- (3) 元起: 工業材料, 16(1), 18 (昭 43)
- (4) 谷口: 工業化学雑誌, 67, 1944 (昭 39)

登録番号	名 称	発 明 者	登録番号	名 称	発 明 者
913944	電子写真法	大 西 勝	915336	寸法測定装置	稲 荷 隆 彦・亀 井 光 仁
913946	直流電気車の制御装置	甲 木 莞 爾・成 戸 昌 司	915337	半導体装置の製造方法	阿 部 東 彦・松 井 肇
913949	金属ハロゲン化物入り高圧水銀灯	{ 渡 部 勁 二・福 山 敬 二 土 橋 理 博・馬 場 景 一	915339	距離測定装置	稲 荷 隆 彦
913950	電気車の制御装置	永 岡 栄	915340	無効電力量計	戸 田 政 義
913951	電気車制御方法	永 岡 栄	915345	焼結機用風箱ダンパー自動制御装置	{ 出 川 保 男・木 田 泰 一 石 雅 彦
913963	巻上装置の非常用巻下制御装置	峰 松 吉 彦・鶴 丸 義 人	915347	熱輸送装置	光 岡 宏
913966	車両用 モニタ 装置	{ 六 藤 孝 雄・長 谷 川 博 一 丸 田 征 生・吉 村 元 由 吉 田 連	915349	ヒートパイプ	{ 西 山 槐・藤 井 雅 雄 大 串 哲 朗
913968	電源回路	尾 形 孝	915350	位置検出装置	西 岡 忠 臣
913969	多結晶シリコン層のパターンの縁を斜面状にする方法	榎 本 龍 弥・長 谷 川 克 彦	915351	半導体装置	鉄 野 治 雄
913971	半導体装置	園 部 幸 夫	915352	半導体発振装置	三 井 茂・堀 井 茂 樹
913983	半導体ウエハ編成群表示板	大 倉 五 作 雄	915355	磁気増幅器	{ 石 田 稔・石 井 敏 昭 神 戸 真 澄
913987	タービン 制御装置	{ 小 中 博 美・井 戸 上 貴 桜 井 弘 美・永 井 廣 武	915357	大出力炭酸ガスレーザ装置	小 林 宏 次・新 田 東 平
913988	半導体装置	鶴 史 雄	915362	浮上搬送装置	二 村 紘
913989	半導体装置	鉄 野 治 雄	915365	沸騰冷却装置	三 金 敏 雄
913990	半導体装置	鉄 野 治 雄	915366	沸騰冷却装置	鹿 野 義 郎
913993	沸騰冷却形半導体装置	木 村 好 男・光 岡 宏	915368	厚膜電着用水分散フニスの製造法	{ 柴 山 恭 一・小 野 博 佐 伯 英 夫・地 大 英 毅 藤 井 翼
913998	半導体装置の冷却能力低下検出器	鉄 野 治 雄	916413	被測定物体の位置・寸法測定装置	亀 井 光 仁
913999	リミット 装置	倉 藤 康	916957	耐熱薄葉材料	伊 藤 公 男・小 野 博
914000	シャドウマスク式カラーブラウン管	松 下 満	916960	自己復旧形電流制御装置	{ 落 合 温 之・原 田 辰 巳 西 樂 隆 司
914001	電気機器の冷却装置	小 林 凱・鹿 野 義 郎	916961	自己復旧形電流制限装置	{ 落 合 温 之・原 田 辰 巳 西 樂 隆 司
914002	半導体冷却装置	細 野 勇・鹿 野 義 郎	916962	送電線保護継電器の誤動作防止方式	三 上 一 郎
914010	オープン含有気体中のオープンを除去する装置	{ 上 田 和 宏・金 沢 正 博 前 田 満 雄・中 山 繁 樹	916967	クランチモートル	小 林 孝 生
914013	ドア 装置	福 島 務・伊 藤 拓 三	916973	所定成分導出装置	{ 高 田 信 治・前 田 耕 二 水 田 正 治
914017	高圧水銀ランプ用電極体の製造方法	{ 伊 藤 弘・今 井 純 菅 野 文 夫	916977	アンテナ 装置	宇 佐 見 一 雄
915302	温度制御圧延方法	小 林 健 三・浜 崎 芳 治	916978	制御用演算機	芥 和 弘
915304	自動洗たく機	広 岡 博・吉 井 有 時	916981	メータなどの指針追尾方式	芥 和 弘
915305	事故点標定装置	前 田 耕 二	917002	ワイヤラップ用線材捲回装置	鈴 木 俊 夫
915308	パラメトリック増幅器	武 富 大 児・白 幡 潔	917003	磁気ヘッドの製造方法	東 山 昇
915311	光干渉計	西 川 啓	917008	リニアモータ	岩 本 雅 民
915312	時刻パルス発信装置	林 正 之	917013	定電圧ダイオードの製造方法	{ 土 佐 雅 宣・早 坂 吉 昭 松 本 隆 夫
915313	タイムスイッチ等のカム装置	{ 林 正 之・山 根 満 徳 山 本 茂 之	917018	半導体装置の製造方法	西 海 宏
915315	表示装置	高 橋 賢 治	917019	信号伝送方式	大 川 清 人
915316	誘導加熱装置	藤 室 雅 司	917025	変圧器用気体検出装置	森 章 文・近 藤 博 之
915320	変流器二次開放防止装置	梶 田 保 雄	917026	水分散形ニスをを用いて電気泳動により被覆を施す方法	柴 山 恭 一・佐 藤 文 彦 柴 田 美 夫
915321	タイマー 制御時の偶数パルス発生回路	石 堂 道 治	917028	半導体装置の製造方法	{ 阿 部 東 彦・松 井 肇 森 田 洋 司
915331	誘導加熱の三相平衡回路	藤 室 雅 司	917029	直流電流増幅器	川 島 克 彦
915334	金属の熱加工法	{ 島 田 弥・近 藤 隆 星之内 進			

特許と新案

空気調和機 (実用新案 第1200767号)

考案者 渡辺 進・笠原文彦

この考案は冷房運転及び除湿運転を行う冷媒圧縮式の空気調和機に係り、特に除湿運転時に室内温度を上げたり下げたりせずに除湿を可能にしたものである。

一般にこの種、冷房と除湿が兼用できる空気調和機においては、室内側熱交換器の一部を、いわゆる再加熱器として運転し除湿を行うことは従来から公知である。

しかしこの場合室内側の熱交換器の温度条件が変化すると好ましい除湿運転ができない欠点があった。すなわち、外気温度が高い時には暖房ぎみとなり、また低い場合には冷房ぎみという矛盾した性能となっていた。

この考案は室外側送風機の回転数を連続的に変化させて制御することにより従来のものの欠点を除去することを目的とする。

その具体的実施例である空気調和機の冷媒回路図を図1.に示し、かつ、その作動を説明するグラフを図2.及び図3.に示す。すなわち、選択的に凝縮器あるいは冷却器として作用する第1の室内側熱交換器(4)と、この第1室内側熱交換器(4)と隣接するように配さ

れた第2室内側熱交換器(5)を備え、室外側熱交換器(2)の熱交換量を室外側熱交換器用の送風機(9)の回転数をセンサー(11)により検出した冷媒温度に応じて設定された値に速度制御器(10)により連続的に制御して、自動的に変えるものである。

このように構成することにより、除湿運転時には最適な除湿を行うに必要な室外側熱交換器の熱交換量をあらかじめ連続的に設定することが可能なため冷房ぎみ暖房ぎみでない最適な除湿を行うことができ、また冷房運転時には凝縮温度を一定に保つことができるものである。

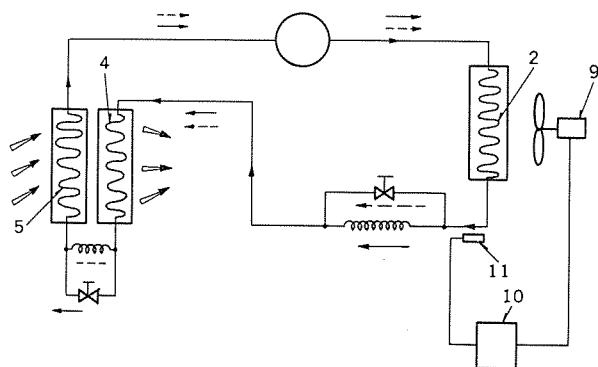


図1

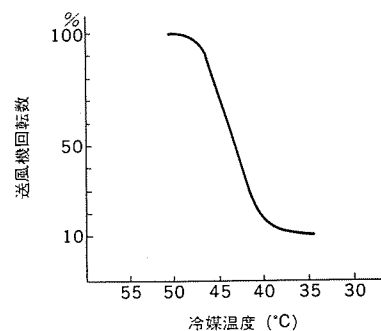


図2

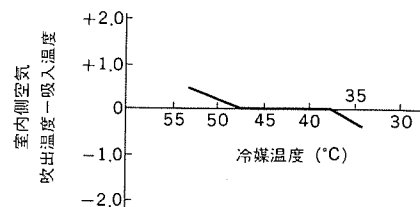


図3

ガス絶縁電気装置 (実用新案 第1361212号)

考案者 大沼昭栄・阿部 智

この考案は、降雪地方において建設費の低減を図ることができるようにしたガス絶縁電気装置に関するものである。

従来のガス絶縁電気装置は図1.に示すように、変圧器(1)とガス絶縁開閉装置(3)とを変圧器(1)から水平方向に突出したブッシング(2)で結合し、ガス絶縁開閉装置(3)を架台(5)で支持している。そして、架台(5)の上面及び側面を鉄板などでカバーし、内部にガス

絶縁開閉装置(3)を構成する各機器の操作室(6)が設けられている。この操作室(6)は、一方がトンネル(12)を介して監視所に連通され、他方が換気筒(7)を介して外部と連通され、操作室(6)に設けた換気扇(8)で換気が行われる。

従来のものは上記のように構成されているので、積雪(9)以上の高さを有する換気筒(7)が必要となるため、建設費が高くなるとい

特許と新案

う欠点があった。

この考案のものは図 2. に示すように、変圧器(1)とガス絶縁開閉装置(3)を構成する各機器とを接近させて相互間にて換気通路(13)を形成し、この換気通路(13)と接する側の操作室(6)の上部に換気穴(10)を設け、この換気穴(10)と組合せられた換気扇(8)を備えている。

したがって、外気に通じている換気通路(13)が換気穴(10)を介して操作室(6)及びトンネル(12)と連通され、換気扇(8)によって換気

が行われる。

この考案によれば、変圧器とガス絶縁開閉装置とを接近させて換気通路を形成し、変圧器の電力損失による変圧器側面の融雪効果により、換気通路内の積雪を防止して換気通路を形成するので、特別な換気筒を必要とせず、更に機器を接近して配置することによって、敷地も少なくすみ、建設費を節約することができる。

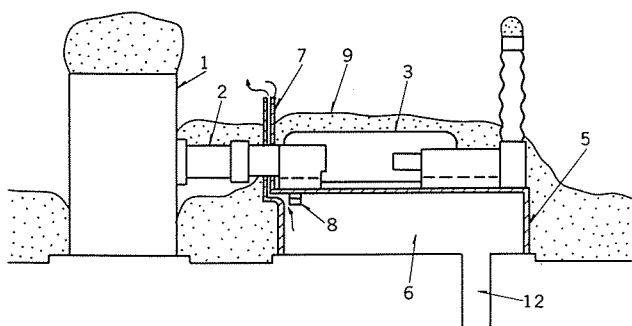


図 1

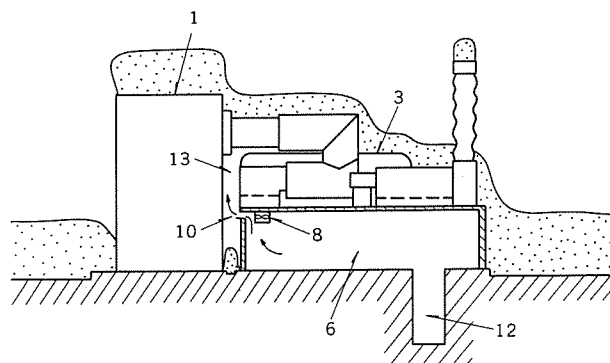


図 2

ロータリ式電動圧縮機 (実用新案 第 1209450 号)

考案者 標 博 雄

この考案は、圧縮により高温高圧となった吐出冷媒ガスをガスクーなしに冷却するようにしたロータリ式電動圧縮機の改良に関するものである。

一般に、ロータリ式電動圧縮機はケース内が高圧となるいわゆる高圧式であるため、圧縮機から吐出された高温高圧の吐出冷媒ガスは、ガスクーによって一旦冷却したのち、再びケース内に導入して電動機室を冷却するようになされている。

したがって、従来のロータリ式電動圧縮機にはガスクーを必要とするばかりでなく、このガスクーが騒音の発生源となる欠点がある。

この考案は、かかる点に着目してなされたもので、その一実施例について説明すれば次の通りである。

その具体例である配管図を図 1. に示し、かつ、その主要部分の拡大断面図を図 2. に示す。

すなわち、圧縮機(1)から吐出された高温高圧の冷媒ガスの吐出弁(19)、マフラー(24)を経て電動機室(25)に至る通路に設けられたベンチュリー管(23)の細径部(26)に、凝縮器(2)で冷却された液冷媒の1部を導く毛細管(28)を備え、上記ベンチュリー管(23)の細径部(26)内に液冷媒を噴出させ気化蒸発させることにより、この細径部(26)を通る高温冷媒ガスを冷却して電動機室に送り込むようにしたものである。

このような構成にすることにより、電動機の冷却を能率よくするばかりでなく、従来のようなガスクーを必要としないので、電動圧縮機の小型化と、原価低減に著しく貢献するものである。

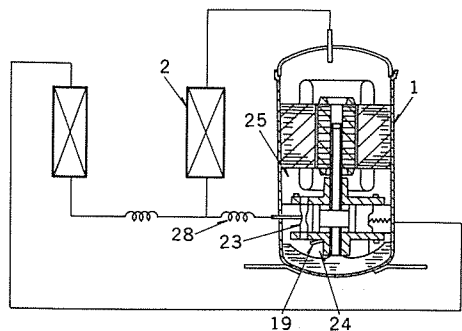


図 1

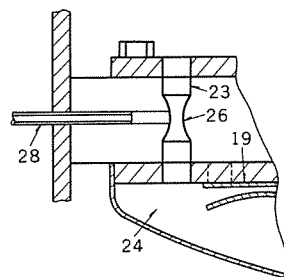


図 2

高速増殖実験炉「常陽」向け 原子炉停止中破損燃料位置検出実験装置の開発

土肥 明*・神代哲哉**・武田 淳**・佐藤 勲雄***・大戸 敏弘***

1. ま え が き

動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター内に設置されている高速増殖実験炉「常陽」は、昭和52年4月の臨界達成以後、現在に至るまで熱出力50 MWt及び75 MWtでの順調な運転経験を有している。なお「常陽」の設置目的は、将来の高速増殖発電プラント建設に備え、高速炉特有の技術課題の検証のほか各種材料の照射試験設備としての役割も果たすことにあり、高速増殖実験炉として高速炉プラントへの貴重な技術経験蓄積に大きく貢献している。図1.に「常陽」の原子炉縦断面図を示す。

本文では昭和52年より4年間にわたり、実験装置としてR&Dを進めた「常陽」向け破損燃料位置検出装置 (Failed Fuel Detection and Location, 以下FFDLと略す) の実機設計、製作及び現地総合機能試験に至る開発成果を報告する。

表 1. FFD & FFDL の代表的方式

方式名	方 法 名	検 出 の 方 法
FFD	カバーガス法 (CG 法)	破損時に放出される比較的短寿命のFPを静電的に捕集する。 破損時に放出されるFPをカバーガス中でγ線スペクトルを測定する。
	(1) プレシピテータ法	
	(2) γスペクトル法	
FFDL	冷却材監視法 (1) 遅発中性子法 (DN 法)	破損時に放出されるFPのうち遅発中性子を放出する核種をNa中で検出する。
	タギング法	燃料ビンの中に希ガス同位体を封入しておき破損時に、これが放出されることを利用し、質量分析器で検出する。
	セレクトバルブ法	燃料集合体ごと、又はグループごとにNaをサンプリングし溶存しているFPを検出する

tion) と破損した燃料の位置確認をも行う FFDL との 2 種類があり、これらの代表的な方式は表 1.⁽¹⁾ に示すものがある。

なお、表 1. に示される燃料健全性監視システムでの破損燃料検出原理は、あらかじめ燃料ピン内に封入された気体、又は燃焼により生成された核分裂生成物などが破損した燃料から冷却材 (ナトリウム)、又はカバーガス (アルゴン) 中に移行してくる現象を利用したものである。

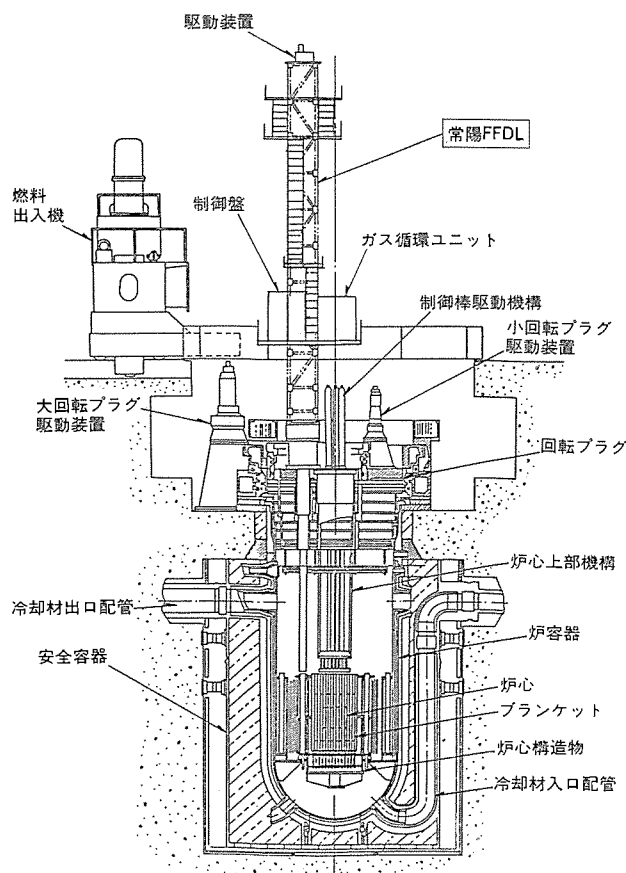


図 1. 「常陽」原子炉縦断面図

2. 常陽 FFDL 実験装置の開発目的

高速増殖炉における燃料健全性監視システムとしては大別して、炉心全体を監視して燃料破損の有無確認を行う FFD (Failed Fuel Detec-

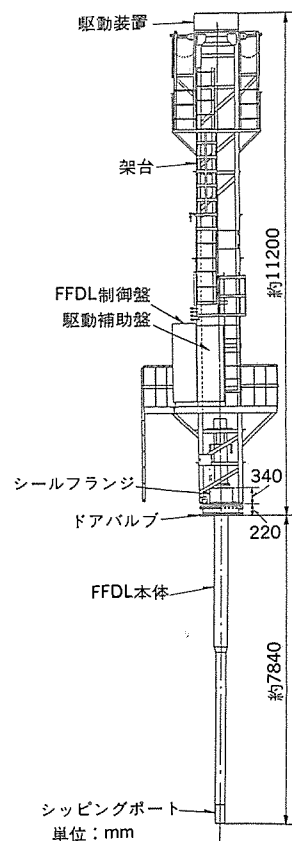


図 2. 常陽 FFDL 実験装置全体概略図

現在これらの検出方式は開発段階にあるため、その開発成果、原子炉構造及び他機器との配置などを十分検討した上で、実プラントへの採用可否を決定されるべきであると考えられている⁽¹⁾。

ここで、「常陽」向け FFDL 実験装置における開発目的として、下記仕様を満たす検出原理及び基本構造を採用することとした。

(1) 破損燃料検出原理として、各燃料集合体ごとの冷却材中に溶け込んでいる核分裂生成物をガスバブリングにより抽出する方式で、その放射能濃度を効率良く計測する シッピング 法であること。

(2) 原子炉停止中に測定でき、かつ原子炉上部機構との物理的干渉のない構造であること。

(3) 燃料交換機と同様に回転プラグを利用、すなわち燃料交換機孔より原子炉内へ挿入し、各燃料集合体ごとに位置決めできること。

なお、上記仕様は昭和 52 年度 R&D における設計検討テーマとしてその実現性を評価したものでもある。

3. 常陽 FFDL 実験装置の概要

この装置の全体概略図を図 2. に、また外観写真を図 3. に示す。

常陽 FFDL は我が国初の シッピング 方式で、回転プラグとこの装置の上下駆動との組合せにより、任意の位置の燃料集合体を計測する

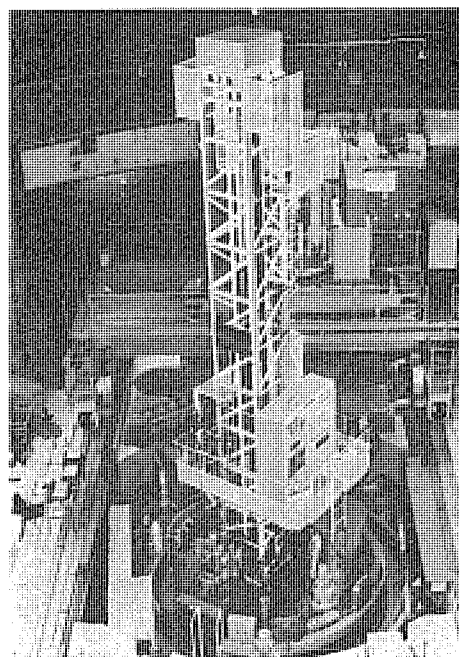


図 3. FFDL 実験装置全体外観

表 2. FFDL 実験装置の構成機器とその機能及び基本仕様

機 器 名	機 能	基 本 仕 様
FFDL 本 体	燃料集合体頂部に密着し、燃料集合体内の Na をサンプリングし蓄積するほか、サンプリングした Na をガス洗浄するための機能と原子炉内雰囲気とのシール及び遮蔽機能も有する。	形 式：回転プラグマウント直線運動方式 概 略 寸 法：165 φ/140 φ×各 4,000 mm(H) 概 略 重 量：800 kg (付属設備含む)
ド ア バ ル ブ 及 シ ー ル フ ラ ン ジ	ドアバルブ……原子炉上部の燃料交換機孔ドアバルブ上に設置され原子炉内外のシールバウンダリ機能と炉内 Na が付着した FFDL 本体先端部の格納のほか、原子炉内放射性雰囲気との遮蔽機能を有する。	形 式：軸封装置付手動開閉型 概 略 寸 法：1,000 mm(□)×220 mm(H) 概 略 重 量：1,400 kg
	シールフランジ……上記ドアバルブ上へ設置され、原子炉内外を上下駆動する FFDL 本体の軸封機能と FFDL 本体表面に付着した Na のかき落とし機能を有する。	形 式：偏心防止機構付ゴムシール方式 概 略 寸 法：600 mmφ×340 mm(H) 概 略 重 量：250 kg
	ペローズ……FFDL 本体上下運動とともに伸縮運動を行い、上記シールフランジの万一のトラブル対策として最終的なシールバウンダリを形成し、バックアップシール機能を有する。	形 式：伸縮自在溶接ペローズ方式 概 略 寸 法：525 mmφ×8,000 mm(H) 概 略 重 量：400 kg
駆 動 装 置 及 架 台	駆動装置……電動駆動によりワイヤロープでつり下げられた FFDL 本体を上下駆動する機能を有し、FFDL 本体位置の検出と過負荷防止機能も備えている。なお手動駆動もできる。	形 式：ワイヤロープ巻取方式、手動方式付き 概 略 寸 法：1,000 mm(□)×445 mm(H) 概 略 重 量：300 kg 電動機容量：1.5/0.4 kW AC 200 V 三相 駆 動 速 度：高速 2.8 m/min 低速 0.28 m/min
	架台……FFDL 本体の上下全ストロークにわたり、これを案内、位置決めするほか、各種付属設備を搭載し、FFDL 本体を格納する機能を有する。	形 式：形鋼溶接式架台 概 略 寸 法：基部 1,000 mm(□)×220 mm(H) 概 略 重 量：1,400 kg
ガス循環ユニット	FFDL 本体へのガス循環と原子炉内への排ガス機能を有し、放射線検出器への被計測ガスを供給する機能もある。	形 式：バルブユニット 概 略 寸 法：1,700mm(W)×800mm(D)×1,780 mm(H) 概 略 重 量：700 kg
FFDL 制 御 盤 及 駆 動 補 助 盤	FFDL 制御盤……FFDL 本体の駆動操作、ガス循環ユニット内バルブ類の開閉制御（自動）及び FFDL 本体内配管の予熱制御のほか、各種のインタロック機能を有する。	形 式：自立型鋼製閉鎖盤（両開き） 概 略 寸 法：1,800 mm(L)×550 mm(W)×1,900 mm(H) 概 略 重 量：870 kg 使用電源：210 V 三相、110 V 単相 50 Hz 概略負荷容量：6.7 kVA (210 V) 2.9 kVA (110 V)
	駆動補助盤……FFDL 本体の駆動操作を行う機能を有し、前述 FFDL 制御盤における駆動系の補助設備である。	形 式：自立型鋼製閉鎖盤 概 略 寸 法：800 mm(L)×533 mm(W)×1,900 mm(H) 概 略 重 量：150 kg 使用電源：210 V 三相、110 V 単相 50 Hz 概略負荷容量：1 kVA
放 射 線 検 出 器 及 放 射 線 計 測 盤	循環ガス中の放射能濃度を検出し、この検出信号を処理後、指示記録及びスペクトル表示する機能を有する。	検 出 器 形 式：検出器挿入形遮蔽構造物 概 略 寸 法：320 mm(□)×690 mm(L) 概 略 重 量：700 kg 計 測 盤 形 式：自立型鋼製閉鎖盤 概 略 寸 法：540 mm(W)×554 mm(D)×1,303 mm(H) 概 略 重 量：100 kg
FFDL 分 電 盤 及 ワ イ ヤ リ ン グ 設 備	FFDL 制御盤への入力電源を供給する機能を有する。	

ことが可能となっており，その構成と機能及び基本仕様を表 2. に示す。

4. 設計上の留意事項と開発試験

この装置の開発・設計にあたり，基本機能に係る技術課題及び高速炉特有の技術上の問題点などの留意事項と各々に対する開発試験内容について，以下に示す。

4.1 燃料集合体頂部への位置決め機能

この FFDL における重要な機能の一つとして，回転プラグ上より原子炉内炉心燃料頂部へ FFDL 本体案内管を挿入・位置決めする際，被計測対象の燃料集合体の軸心と FFDL 本体軸心との偏心などを吸収する必要がある。これは，炉心燃料集合体のすべてを正確に独立した計測を行うことが燃料破損の有無確認に直接結びつくこととなるためである。

FFDL として考慮すべき偏心量には，FFDL 本体案内管自体の偏心，回転プラグ位置決め精度，回転プラグ上面での平行度及び燃料集合体自体の偏心などが考えられるが，これらを総合した安全サイドの設計許容偏心量は燃料集合体理想軸心に対し，約 $\pm 16\text{ mm}$ と推定する。一方 FFDL 本体先端と燃料集合体との軸方向間隔も原子炉容器内の軸方向温度こう(勾)配及び各炉内構造物の製作精度などを考慮すると一定間隔でないこと，また FFDL 本体重量を直接，燃料集合体頂部へ負荷できないことなどを組合せると軸方向も約 50 mm (設計変位量)の吸収能が必要である。なお軸方向 50 mm の変位吸収量には，FFDL 本体が燃料集合体頂部へ着座したことを確認するのに必要な SHIPPING ポートばね反力相当の縮み代も含める必要がある。

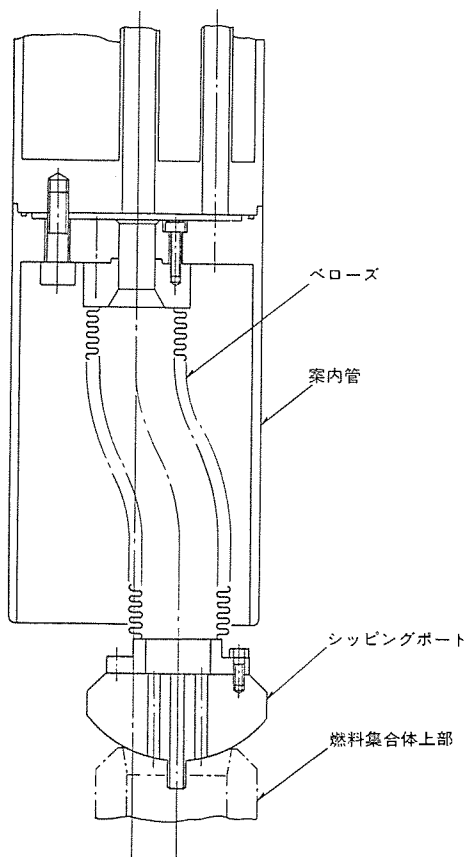


図 4. SHIPPING ポート構造図

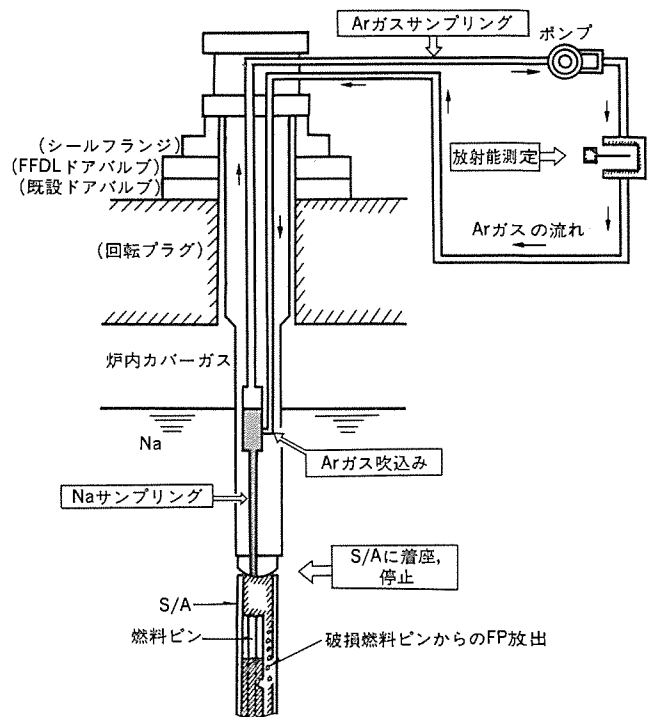


図 5. ガス循環系の機能

以上の設計条件を満足させるため，図 4. に示す SHIPPING ポートを開発した。この方式は，ばね定数が約 1 kg/mm のステンレス製ベローズと燃料頂部に密着しやすい半球形 SHIPPING ポートとを組合せたもので，常温大気中にて径方向偏心量 $\pm 25\text{ mm}$ ，軸方向圧縮量 70 mm における偏心吸収試験を行い，安定したばね定数の再現性を確認した。

4.2 ガス循環機能とナトリウムレベル変動幅

この装置におけるガス循環系の機能は，図 5. のように FFDL 本体内部のナトリウムタンク内に導入したナトリウム中へアルゴンガスを吹込み，バブリングすることでナトリウム中に溶けている核分裂生成物をアルゴンガスへ移行させることにある。ここで問題となるのが，ナトリウムタンク中へのアルゴンガス吹込量で，ナトリウム中に溶けている核分裂生成物を効率良く循環ガスへ移行させるために，できるだけ数多くの小径ガスバブルを発生させる必要があること，及びガスバブリング時に起こるナトリウムタンク内ナトリウムレベル変動を小さく抑え，FFDL 本体内部配管上部へのナトリウムペーパー上昇防止などの対策をとる必要があることである。

これらの要求条件を満たすため，模擬ナトリウムタンク内での水中ガスバブル実験でガスバブル機構を構成するアルゴンガス吹込ノズルの形状寸法を検討し，ステンレス製パンチングメタル二重円筒構造を選定した。また，ナトリウムタンク内のナトリウムレベル変動を小さく抑えるのに必要なガス循環流量は，実機のガス循環系と模擬ナトリウムタンクとを用いたアルコール中実験を行い，ガス循環流量 $3\sim 4\text{ l/min}$ にて $\pm 200\text{ mm}$ 以内の変動幅となることを確認した。なお FFDL 実機においては，ナトリウムタンク内にナトリウムレベル計を装着してその変動を監視し，ナトリウムレベルの異常上昇時にはガス循環ポンプ停止などのインタロックを設け，信頼性の向上を図った。

4.3 シール機能

FFDL 本体案内管は，原子炉上部の回転プラグより原子炉内へ挿入されるため，駆動時における原子炉内カバーガスの原子炉上部への漏

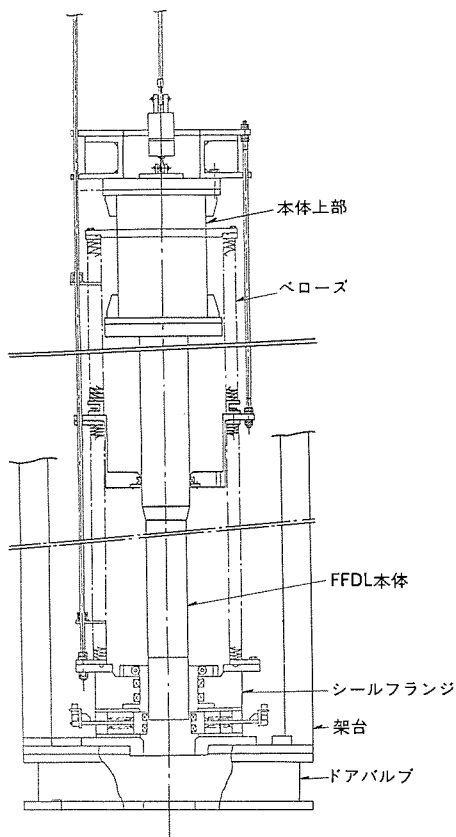


図 6. シールフランジとベローズシール構造

えいを防ぐ必要がある。従来この種の案内管まわりのシール方式としては、多段式V字形パッキンなどが用いられているが、この装置においては原子炉内部からの放射線遮へい(蔽)(ストリーミング対策)及び既設設備である燃料交換機孔及びホールドダウン機構との物理的干渉防止を考慮して、5Bと6Bサイズの段違い案内管を採用しているため、シール機能が特に重要な検討課題となっていた。

ここで段違い案内管に対するシール方式として、図6.に示すシールフランジとベローズシール構造を開発した。このシール方式の特長は、5B案内管には分割U字形パッキンのナトリウムスクレーパとラビリンスシールを設け、6B案内管には2段式U字形パッキンを下向き配置し、かつ各パッキン間にはガスパージ配管を設け、原子炉内カバーガスの案内管しゅう(摺)動時における原子炉上部への漏えい防止を図り、更にバックアップとしてシールフランジとFFDL本体間に溶接ベローズシールを設けたことである。なお上記U字形パッキンは、案内管駆動時の偏心量を吸収しうる形状とし、耐熱性及び耐ナトリウム性に優れた特殊配合のふっ素ゴム製としている。

これらの開発試験は常温大気中での駆動シール試験のほかに、ナトリウムベーパー雰囲気中での駆動及び耐久試験を実施し、Uパッキンなどの摩耗有無及びそのシール性に異常のないことを確認した。

4.4 ナトリウム対策

高速炉特有の問題点としては、機器・配管類におけるナトリウム対策があり、このFFDLにおいてもナトリウムによる配管類への熱応力、ナトリウムベーパー及びミストの付着とそれに伴う腐食などの問題が考えられ、以下に示す対策を施した。

(1) 配管・タンク類への熱応力防止策としては、スパイラル形状などで熱膨張を吸収しうる配管布設とし、また予熱ヒータ及びサーモカップル装着により炉内ナトリウム温度250℃との温度差をなくす予熱管理

を行うこととした。

(2) 配管・タンク類へのナトリウム付着防止策としては、上記予熱ヒータのほかに、FFDL本体案内管表面に硬質クロムめっき及びナトリウムのたまりにくい形状を採用した。なお、ナトリウム付着範囲の最も大きい5B案内管は、硬質クロムめっきだけでは十分なナトリウム付着防止とはならないこと及びナトリウム自体からの放射線被ばく(曝)防止を考慮して、シールフランジ内のナトリウムスクレーパとラビリンスにて強制的に案内管表面のナトリウムをかき落す構造としている。この方式によるナトリウムかき落し性は、模擬案内管を用いたナトリウム中駆動試験にて、そのかき落し効果を確認した後、実機試験に供した。

5. 現地総合機能試験

昭和56年1月及び8月、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターにて現地総合機能試験及び運転試験を実施した。なお運転試験は、原子炉停止直後におけるFFDL計測とFFDL運転要領の経験蓄積のため、実施したものである。

ここで、現地総合機能試験に関する試験項目及び試験内容を以下に示す。

(1) 駆動試験

FFDL本体を原子炉内ナトリウム中にて上下駆動する際、Uパッキン類との摺動抵抗、案内管自重及びシール性に異常がないかどうかを調べることで、評価項目はベローズ反力、Uパッキン及びナトリウムスクレーパ摺動抵抗とそのシール性などとした。

(2) ガス循環及び放射能濃度測定試験

FFDL本体内のナトリウムタンクへ任意の燃料集合体内部からの冷却材ナトリウムを吸い上げ、このナトリウム中へアルゴンガスを循環させ、放射線検出系にて循環ガス中の放射能濃度を測定し、炉内バックグラウンドレベルとの比較を行うもので、評価項目はガス循環時におけるナトリウムタンク内ナトリウムレベルの変動幅、放射線検出系の検出性能及び燃料1体あたりの自動計測時間の測定とした。

(3) 偏心試験及びアドレス確認試験

偏心試験は1体の燃料集合体を対象として、燃料集合体理想軸心から±10mmの範囲内で回転プラグを移動させFFDL本体軸心との偏心を与えた状態下における位置決め性能を評価した。またアドレス確認試験は任意の燃料集合体10体について、FFDL本体を密着・位置決めさせ、その位置決め性能の再現性評価を行った。

なお偏心及びアドレス確認試験は、いずれもFFDL本体先端部に

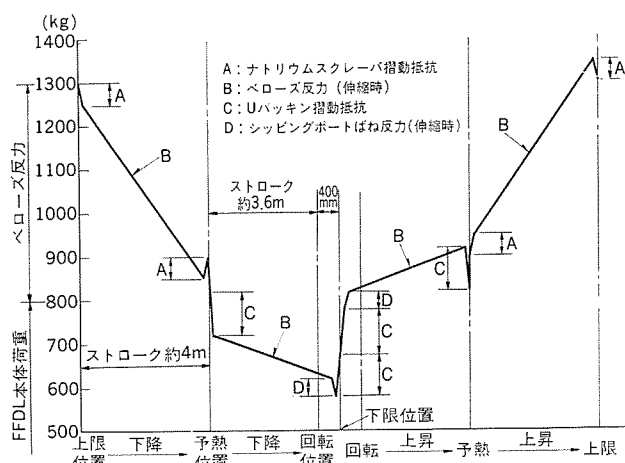


図 7. FFDL 駆動試験荷重変化

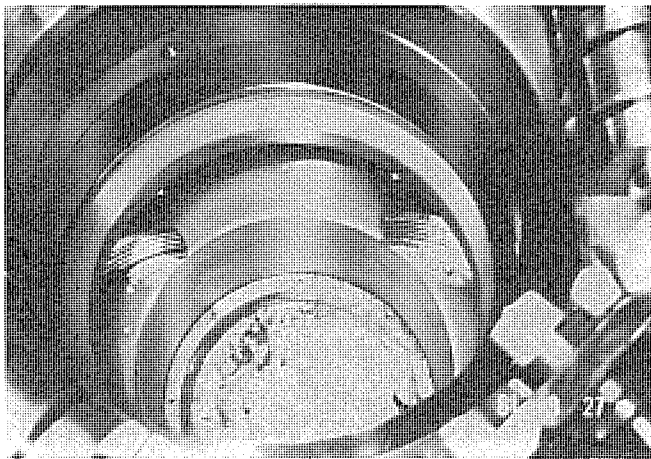


図 8. シールフランジ 内部外観

表 3. 現地総合機能試験結果

試験項目	試験結果	備考
駆動試験	下記データにて正常駆動できることを確認した。 (1) ベローズ合成ばね反力 : max 500 kg (2) U パッキン摺動抵抗 : 〃 100 kg (3) Na スクレーパ : 〃 50 kg (4) シッピングポートばね反力: 約 40~50 kg (5) U パッキン, Na スクレーパシール性* : 良好	* スクレーパは炉内 カバーガス圧 50 mm Aq を上回るシール圧 150~170 mmAq を確 認した。駆動試験時 における荷重変化を図 7. に示す。
ガス循環 及び放射 能濃度測 定試験	下記データにてガス循環及び放射能濃度測定機能を有することを確認した。 (1) ガス循環試験 ガス流量を 3.0~6.0 l/min とした場合, Na タ ンク中の Na レベルは ±150 mm 以内に調整 できる。 (2) 放射能濃度測定試験 循環ガス中の放射能レベルは炉内 Na のバック グラウンドと同等であった*。 また燃料 1 体あたりの自動計測時間は 28 分であ った。	* 検出器限界の Cs ¹³⁷ 換算で 1.29×10 ⁻⁴ µCi/cm ³ C ₀ ⁶⁰ 〃 5.31×10 ⁻⁵ µCi/cm ³ 以下であった。
偏心試験 及びアド レス確認 試験	(1) 偏心試験 FFDL 本体軸心と炉内燃料集合体軸心との偏 心量 -10.0 mm ~ +10.0 mm を与えた状態 下で, シッピングポート密着性能を確認でき た。 (2) アドレス確認試験 燃料集合体 10 体に関する位置決め性能を確認 できた。	シッピングポートの位 置決め, 性能はすべて シッピングポート用ベ ローズのばね反力値と その再現性確認による ものとした。
洗浄試験	FFDL 本体表面及びシッピングポート部への付 着 Na はアルコール洗浄にすべて除去できるこ とを確認した。 なお, FFDL 本体内部配管類からの Na ドレ ン量は約 5 g であった。 また Na 中試験後における V パッキン及び Na スクレーパの外観は摺動履歴などによる損傷 は全く認められなかった。	洗浄試験後におけるシ ールフランジ内部状況 を図 8. に示す。

設けた シッピングポート 部のばね反力にて燃料集合体頂部への着座確認とした。

(4) 洗浄試験

FFDL 本体表面及び シッピングポートベローズ 部などに付着した ナトリウム が予熱 ヒータ 及び シールフランジ 内 ナトリウムスクレーパ でどれ程 ドレン ある いはかき落しできるかを試験し, 併せて既設設備である洗浄槽内

における アルコール 洗浄要領の確認を行った。なお評価項目は, FFDL 本体表面及び ドアバルブ 上面の ナトリウム 受皿上における ナトリウム 付着量のほか, アルコール 洗浄後における各部の外観調査とした。

以上の現地総合機能試験結果をまとめて表 3. に示す。

6. 考 察

表 3. の総合機能試験結果より FFDL の性能に関する考察を以下に示す。

(1) 駆動特性に関しては, ベローズ反力, U パッキン摺動抵抗などの荷重記録及び駆動時における シール 性共, 異常なくその再現性も確認された。

(2) ガス循環及び放射能濃度測定試験においては, いずれの炉心燃料にも破損は認められず, バックグラウンドレベルと同等の放射能濃度であった。なお ガス循環時における プロセス量とナトリウムタンク内ナトリウムレベル変動幅, ナトリウム導入から計測完了, ナトリウム排出に至る FFDL 自動運転手順が確認され, ナトリウムレベル異常高での循環ポンプ停止などのインタロック機能の健全性も確認された。また今後の検討事項としては, 破損燃料の模擬となる放射性ガスなどを用いた FFDL 運転により, その放射線検出系の検出感度を詳細に評価する必要があると考えられ, 昭和 57 年度以降に上記の評価・検討を予定している。

(3) 偏心及びアドレス確認試験においては, FFDL 本体先端部に設けた シッピングポートの偏心吸収能及び燃料集合体頂部への位置決め性能が炉内ナトリウム中においても正常で, かつばね反力の再現性も有することを確認した。

(4) 洗浄試験後における FFDL 本体及び ドアバルブ 上面の ナトリウム受皿上での ナトリウム付着量は, 原子炉上部での FFDL 加熱放置から洗浄槽での アルコール 洗浄に至る洗浄手順により, 無視しうる量まで除去できることを確認した。なお, シールフランジ内ナトリウムスクレーパによるナトリウムかき落とし性能は, アルコール 洗浄前後の FFDL 本体表面及びシールフランジ内面におけるナトリウム残存量から十分な機能を有するものと判断され, 洗浄後のナトリウムスクレーパ及びラビリンス共, 外観上異常は認められなかった。

7. む す び

以上, 常陽 FFDL 実験装置の開発成果を述べたが, 今回のシッピング方式は今後更にその検出感度評価 R&D を実施し, 他のセレクトバルブ方式などとの技術比較を行う必要があると考えられ, これらの技術評価をふまえ, 今後建設予定の高速原型炉「もんじゅ」及び実証炉プラントへの適用推進を図る予定である。なお, 最後にこの装置の設計・製作から現地総合機能試験に至る開発過程において多大なる御協力を頂いた動力炉・核燃料事業団大洗工学センター 高速実験炉部原子炉第一課及び三菱電機(株)の関係各位に深く感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- (1) 西野ほか: 日本原子力学会誌, 22, 9

高電圧大容量変圧器の技術開発〔I〕

菅 寿郎*・渡辺次男*・石井敏次**・武智盛明*・玉置栄一*

1. ま え が き

我が国の送電網は、187～500 kV の有効接地系を基幹とした極めて信頼度の高いものとなっているが、変圧器が、その主要構成機器としてシステムの優れた運転実績に貢献していることは、論をまたないところである。変圧器は、成熟した機器といわれているが、優秀な特性を有する変圧器を生産するためには、絶えざる技術開発が必要であり、大形変圧器(外鉄形変圧器)を専門に担当している当社赤穂製作所では、ユーザーの適切な御指導と、関連する製作所及び研究所群との緊密な協力のもとに製品の改善に日夜努力を傾注している。

その技術開発の内容は、昭和51年及び52年に三菱電機技報で発表したが⁽¹⁾⁽²⁾、それから約5年を経過し、この間当社ではエネルギーコストの高騰その他の社会環境の変化に適応しつつ、信頼度の維持向上に加えて次のような項目について、ユーザーメリットの実現を目指し精力的に研究開発を進めてきた。

- (1) 低損失化
- (2) コンパクト化
- (3) 短絡強度、輸送性、耐震、流動帯電抑制など重要特性の開発
- (4) 部品、周辺機器、周辺ソフトウェアの開発

また、変圧器の類似機器で最近生産高が大幅に増加した分路リアクトルについても改良開発に力を注いでいるので、それも含めてここに、前記4項目についての最近の開発成果を紹介し参考に供したい。本稿では、主として項目(1)(2)について説明し、項目(3)(4)は〔II〕編(本号P. 49)で述べる。

2. 低損失化・コンパクト化の必要性

変圧器の低損失化の必要性については、ここで繰返すまでもない。変圧器は効率が99.8%にも達する高効率機器とはいえるものの、大容量器では数百～数千kWの損失を発生するので、その低減は変圧器の運転費用の大幅な削減につながる。またコンパクト化については、近來、開閉・保護機器、母線などがGIS化により急激にコンパクト化されたことに協調するためと、変圧器が地下変電所や建屋の中に収納されることが多くなり変圧器室のコスト低減のため、必要性が一段と高まってきている。

低損失化とコンパクト化は、元来無関係のものではなく互いに関連しあうもので、設計方針によっては、損失を犠牲にしてコンパクト化を図ることも可能である。しかしこのようなことは、多くの場合現在の社会的要請に反することであり、当社としては、この両方の要求を同時に満足させることを目標に開発を進めてきた。その柱となっているのは、絶縁開発と漂遊損低減対策であり、以下にこれらの開発状況と、それらを総合的に検証するモデル器について述べる。

3. 絶 縁 開 発

高電圧変圧器製作上の最大のポイントは、いかに信頼度の高い絶縁構成を合理的に設計するかであり、当社では最近急激な発展をみせて

いる電界解析技術を駆使して絶縁構成の理論的最適化を行い、それをモデルで検証するという絶縁開発手法を採用して、大きな成果を挙げた。

3.1 電界解析技術

電界解析は、これまで電子計算機を用いた二次元及び軸対称の種々の数値解析プログラムと抵抗紙模写のようなアナログ手法を共用して、それぞれの特徴をいかし、補完しあってコイル各部の電界を詳細に計算し最適な絶縁構成を決定してきた。

しかし、変圧器の高電圧大容量化、UHV変圧器の開発の進展に伴い、複雑かつコンパクトな絶縁構成が要求され、より大規模で高精度、かつ一般三次元問題も扱うことができるプログラムの必要性が高まった。

当社では、この要求にこたえるため、従来から使用している二次元及び軸対称の表面電荷法プログラム⁽³⁾及び二次要素有限要素法プログラムの拡張を行い、実器を対象とした大規模な複合絶縁電界計算が可能となっている。また二次元交流電界解析のほか、有限要素法による抵抗場すなわちAC/DC重畳電界・過渡直流電界プログラム、表面電荷法による一般三次元の複合媒質を解析できるプログラム⁽⁴⁾などを開発した。これらのプログラムに対しては、境界自動分割手法やXYプロットによる要素分割チェック、詳細な等電位マップのアウトプットなどを駆使して、インプット作業及びアウトプット解析作業の省力化・効率化を図っている。

このような開発による電界解析の質・量両面の発展により、数値解析面からの絶縁設計の合理化は大きく進展し、実規模モデルによる検証試験が厳選できるようになるなど、開発のスピードアップに貢献している。図1は二次要素有限要素法大規模プログラムによる複合

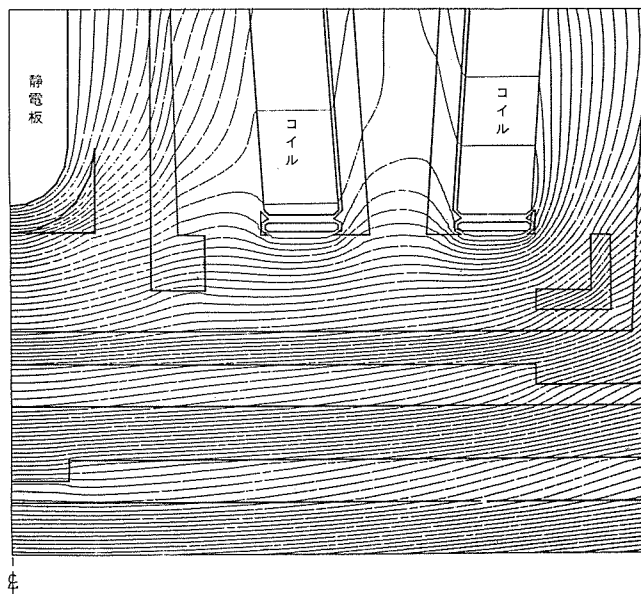


図1. 複合絶縁系の電界解析の例(外鉄形コイル線路端近傍の等電位線分布)

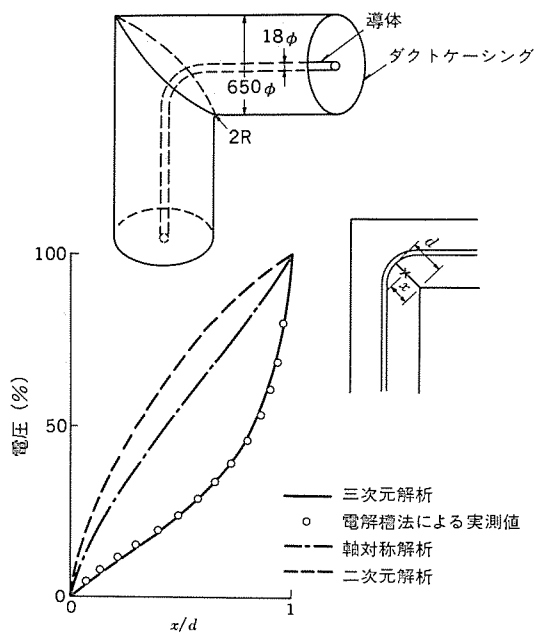
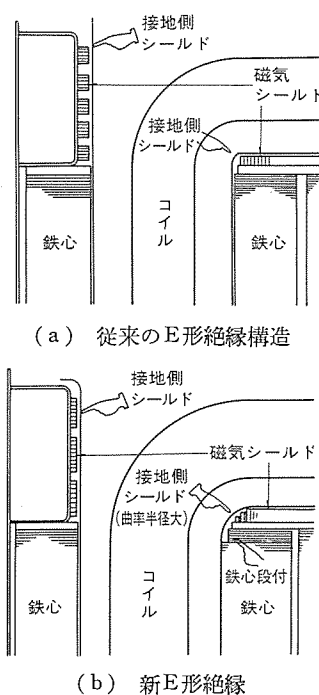
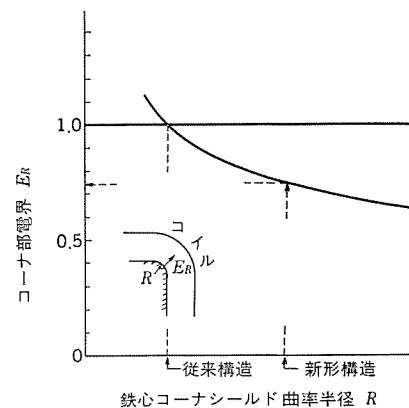


図 2. 三次元電界解析の結果と実測値，他の解析法との比較



(a) 従来のE形絶縁構造

(b) 新E形絶縁



(c) 鉄心コーナ部シールド曲率半径増大の効果

図 4. 新E形絶縁における接地部遮へい構造の改善

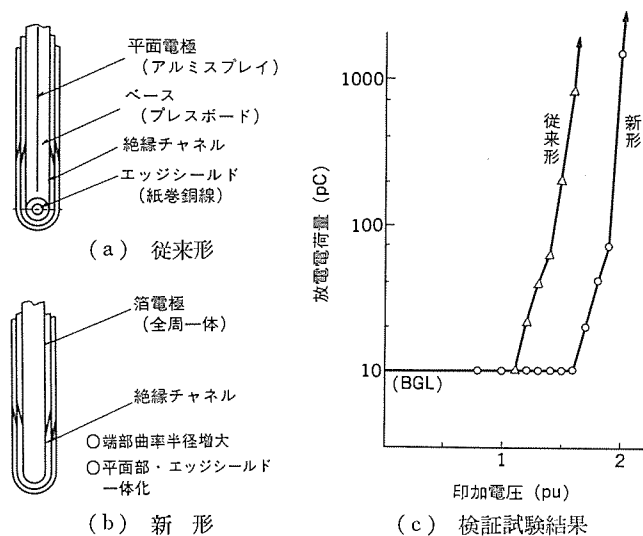


図 3. 静電板の構造比較とその検証試験結果

絶縁系の電界計算例，図 2. は三次元表面電荷法による円筒曲がりダクト内リード近傍の電界計算例を示す。

3. 2 絶縁構造の改善

当社では，昭和 40 年からこれまで E 形絶縁と呼ばれる絶縁構造⁽⁵⁾を使用し，極めて満足すべき実績を得てきたが，上記のよう電界解析の進歩により電極形状の最適化改適点の指摘が可能となったため，これらを実際の絶縁構造に反映して一段と合理化された新 E 形絶縁構造を開発した。以下にその改善点を述べる。

3. 2. 1 静電板の改良

静電板は，電界緩和，電位振動抑制の目的で外鉄形コイルの線路端に取付けられている電極であり，巻線の最高電位点にあるためその電極形状の適否は，コイル全体の部分放電開始電圧を左右する。従来の静電板は，図 3. (a) に示すようにインパルス電位振動抑制のための平面電極と，対地電界緩和のためのエッジシールドが別個のものであったため，平面電極のエッジ部の電界が部分放電開始電圧を支配していた。この点を改良するため，図 3. (b) に示すような新しい構造の静電板を開発し，電極をはく(箔)の巻付構造とすることによ

り，平面電極とエッジシールドを一体化し，同時に端部の曲率半径も増大して，部分放電開始電圧を向上させるようにした。モデル試験の結果，図 3. (c) に示すように部分放電開始電圧が従来品より 50% 以上向上し，電界解析の結果が裏づけられた。なお静電板は，変圧器によっては，漏れ磁束密度の高い場所に置かれることがあるので，それによって渦電流損が発生しないよう高い固有抵抗を有する金属箔材料を使用した。

3. 2. 2 接地部遮へい構造の改善

外鉄形変圧器の高電圧部に対向する接地電極は，鉄心，磁気シールドなど比較的シャープエッジを有する部分であるので，これらに電界が集中しないよう，遮へいをほどこす必要がある。従来の E 形絶縁においても，この目的で鉄心コーナ部や磁気シールド端面にシールド板を置いていたが，これらの電極形状を変更すれば電界を大幅に改善できることが分かり，図 4. に示すような構造変更を行った。すなわち鉄心端部は，従来，図(a)に示すような構造であったが，図(b)に示すように鉄心と磁気シールドの端部を段付きにすることにより，シールド板の曲率半径を増大したもので，この結果シールド面の電界は，図(c)に示すように従来の 3/4 程度に低減することができた。

3. 2. 3 ターン間絶縁の改善

ターン間絶縁に用いる絶縁紙の絶縁耐力を向上することは，銅線占積率を向上させて変圧器をコンパクト化するとともにコイルの冷却効果を高めるために，重要な課題である。当社では，現在市場で入手できる各種のコイル絶縁紙について，絶縁特性の調査を行った。その結果を図 5. に示す。これから分かるようにクラフト紙以外のものは，さして高い絶縁耐力を示さず，結局クラフト紙の薄紙化を図るべきであるという結論となった。この結果にもとづき，従来の 3/4 程度の厚さのクラフト紙の耐圧を検討した結果，図 6. に示すように，従来に比べ約 20% の耐電圧の向上が得られたので，この薄紙での導体紙巻作業が可能となるよう工場設備，環境を調整し，実器に適用できるようにした。

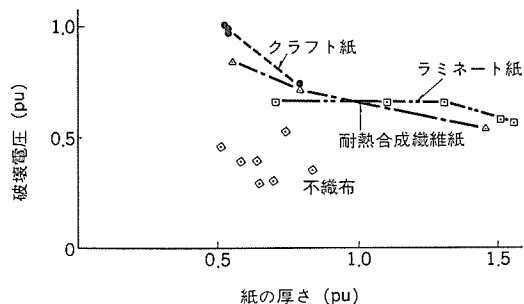


図 5. 各種絶縁紙の破壊電圧

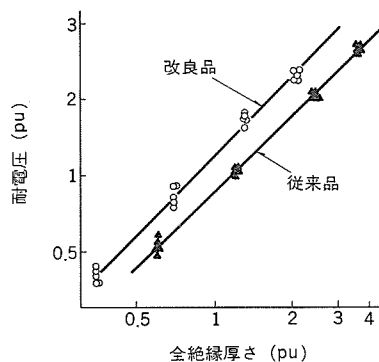


図 6. ターン間絶縁の薄紙化の効果

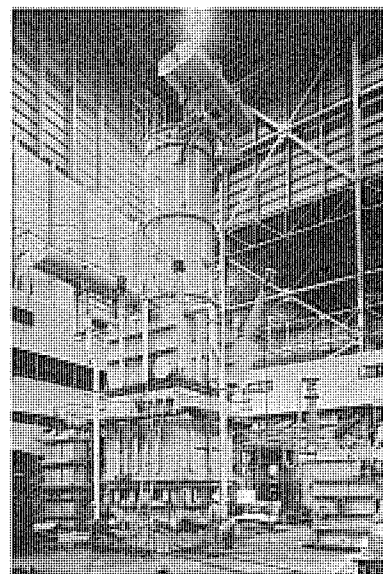


図 7. 絶縁モデル変圧器による $V-t$ 試験状況

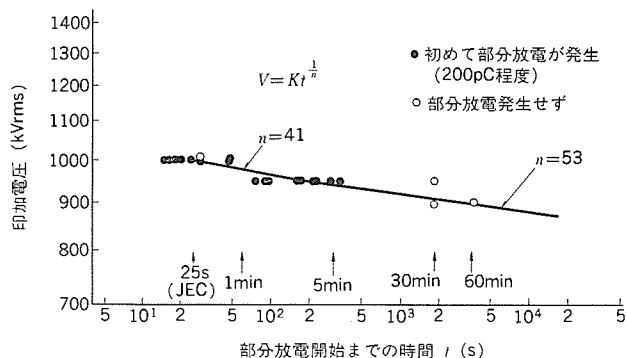


図 8. 変圧器の部分放電開始 $V-t$ 特性

を 1,000 kV 前後の領域で調査した⁽⁶⁾。

図 7. はモデル変圧器について、誘導試験法によって長時間部分放電 $V-t$ 特性を実測中の状況を示す。図 8. は、200 pC 程度の部分放電を基準として得られた $V-t$ 特性である。複合油浸絶縁系であるので、油ギャップのみの $V-t$ 特性の傾斜に比べ大きな n 値 ($V-t$ 特性の傾斜を示す係数) が認められ、基礎モデルなどで得られている特性とよく一致していることが明らかとなった。実規模のモデル変圧器で、1,000 kV の高電圧領域で $V-t$ 特性の傾斜を求めた例は極めて少なく、このデータを統計的に解析した結果は、絶縁信頼度の評価に貴重なデータとなった。

3. 3. 2 UHV 試作変圧器の長期課電試験

当社では、来るべき UHV 送電に備える開発計画の一環として、プロトタイプ変圧器を試作した⁽⁷⁾。その仕様は次のとおりである。

単相 100/100/30 MVA 1,200/ $\sqrt{3}$ /550/ $\sqrt{3}$ /63 kV
2,700/1,550/350 kV BIL

外鉄形 送油風冷式 連続定格

この変圧器は、工場内での試験を終了したのち、屋外で GIS 絶縁モデルと組合せ、UHV 絶縁の長期にわたる信頼性の検証を行うため、長期課電試験を行った。期間は昭和 55 年 5 月より 56 年 11 月、電圧は 1,440 kV/ $\sqrt{3}$ で、UHV 送電で予定されている 1,100 kV 運転電圧の 130% に相当する。電圧印加時間は延べ 12,000 時間で、この間、部分放電、油中可燃性ガス量を連続監視したほか、流動帯電特性についても定期的に測定を行った。また、GIS についても内部異常診断装置によって定期的にチェックを行ったが、いずれの項目も問題がなかった。図 9. はこの長期課電試験の実施状況を示す。

4. 漂遊損低減対策

大容量変圧器では、空間漏れ磁束密度が増加し、巻線やタンクその他の構造物に発生する漂遊損が、全損失にかなりの割合を占めるようになるので、損失低減の見地から漂遊損対策は重要な項目である。漂遊損解析の出発点となる空間漏れ磁束の解析では、当社が独自に開発した表面磁荷法による三次元用解析プログラムを中心として、解析精度はほぼ十分な域に達していると考えられる。したがって、本稿では漂遊損解析そのものに対する最近の当社の開発状況について説明したい。

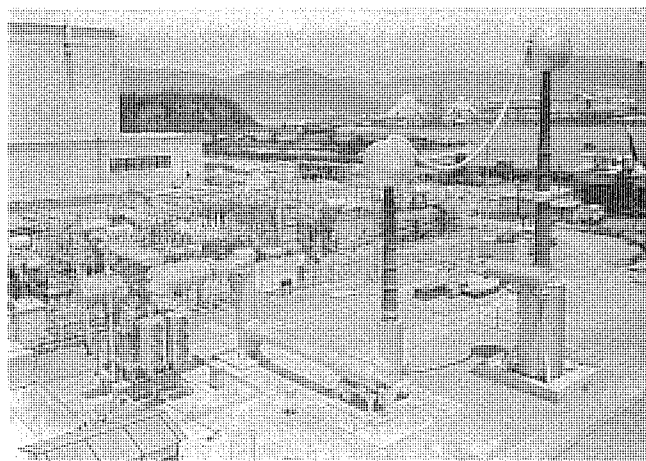


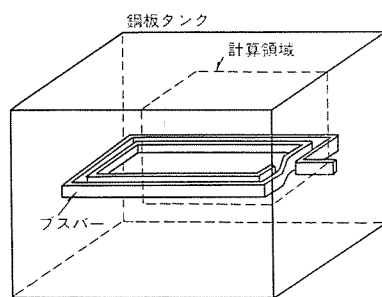
図 9. UHV プロトタイプ変圧器、GIS 絶縁モデルの長期課電試験

3. 3 絶縁耐力の長時間特性の検証

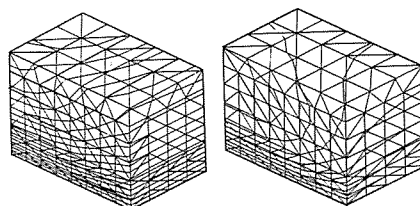
最近、絶縁耐力の評価に従来よりも長時間の絶縁試験を用いることが多くなってきた。これは部分放電試験法の発達とともに、変圧器を 1 分間耐圧よりも部分放電試験付き長時間耐圧試験 (30 分～2 時間) によって試験する方が、品質の検証により有効であるという考え方があるためで、我が国や諸外国の規格にも、そのような試験法が導入されつつある。したがって、絶縁開発を行う場合、絶縁構成の長時間耐圧や $V-t$ 特性を検証しておくことが重要となってくる。

3. 3. 1 高電圧モデル変圧器による $V-t$ 特性の検証

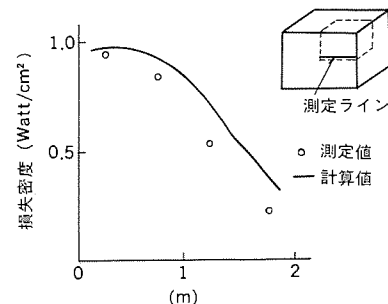
長時間耐圧試験の可否は、絶縁破壊というよりも部分放電が基準レベルを超えたか否かによって決められるため、絶縁構成の部分放電開始 $V-t$ 特性を求めておくことが重要である。当社では、超超高压級の絶縁モデル変圧器によって、実器相当の部分放電開始 $V-t$ 特性



(a) モデル形状



(b) 等電流ベクトルポテンシャル図



(c) 損失測定値と計算値の比較

図 10. 磁性薄板箱体の漂遊損解析の一例

4. 1 理論解析

4. 1. 1 コイル渦流損解析

コイル内渦流損については、これまで二次元漏れ磁束分布をもとに、並列コイル間の電流分担及び素線内渦流損を一貫して計算するプログラムを用いてルーチン計算し、コイルの最適設計に活用してきた。この実績をもとに、新しく前記三次元磁界プログラムと連結したコイル損失、温度分布計算プログラムを開発した。このプログラムは、素線内渦電流損のほか、並列素線間の循環電流損も考慮しうるもので、三次元磁界解析の適用と相まって、損失の推定精度が更に向上し、厳しい設計精度向上の要求に十分こたえることが可能となっている。

4. 1. 2 構造物漂遊損解析

巻線や大電流ブスバーの磁束によりタンクその他の構造物に発生する損失の解析の状況について述べると、まず非磁性タンクについては、有限要素法による立体的任意形状の薄板箱体渦電流損プログラムを数年前に完成したが、磁性鋼板構造物の場合は、磁気特性の非線形が加わるため依然として厳密な計算の困難な問題である。しかしながら当社では、従来使用してきた磁性非磁性導体の混在する二次元場の有限要素法、二次元積分方程式法、抵抗紙によるアナログ解法などのほかに、新たに立体的形状の磁性薄板箱体に対する平面三次元表面インピーダンス法^⑩などのプログラムを開発した。これにより、有限長あるいは曲がりのあるブスバーによるタンクの漂遊損解析が可能となった。

一方、精度の良い局部損失を求めるには、上記プログラムの結果を磁気ヒステリシスを考慮した鋼板素材損失計算プログラム^⑩にインプットすることにより、目的を達することができる。新たに開発したプログラムによる解析例を図 10. に示す。図(a)のような大電流ブスを内蔵した鋼板タンクについて計算したもので、図(c)に示すように計算値と実測値はよい一致を示している。

4. 1. 3 漂遊損測定

漂遊損測定関係では、通常の電圧・電流・電力・周波数のほか、磁界・磁束・渦電流・発生損失・温度等が主な測定項目である。部分モデル試験や実規模試験において、信頼度の高い測定を行うには、①モデルの物性値が温度・電流値などで変化すること、②多数の測定点を測定するので、試験中に電源電圧の変動などがある程度避けられないこと、などに対する配慮が必要となる。

これらに対する対策として、例えば発生損失の測定については、従来温度上昇法、サーチコイル法、電流プローブ法、ロスキコイル法などそれぞれの特徴をいかして使い分けてきたが、更に熱量計を用いて任意形状の導体の発生損失を測定する方法や、磁性鋼板表面の電界と磁界のベクトル積すなわちポインティングベクトルから内部損失を求める方法^⑪などを独自に開発し、部分モデルや実規模検証モデルに対して

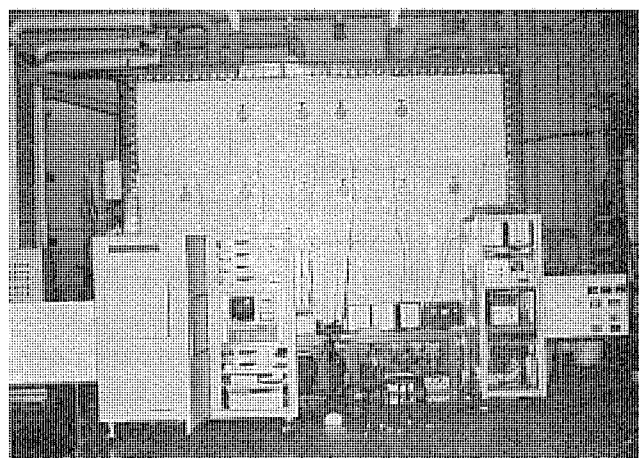


図 11. タンク壁に生ずる漂遊損の測定状況

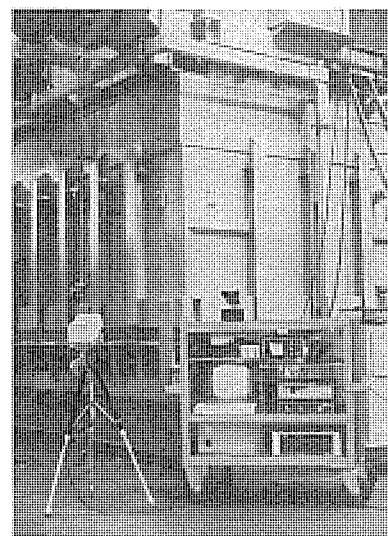


図 12. 赤外線サーモグラフィによる温度上昇の測定

使用している。更に、次回に述べる大形変圧器データ処理システムの一環として製作したデジタル計測自動解析装置により、各種センサ、多点切換器、増幅器類を組合せて、数百点にのぼる測定点を含む計測において温度変化、電圧変動などの無視し得ない現象の同時計測などに効果をあげている。また、赤外線サーモグラフィと付属データ処理システムを前記データ処理システムの中央処理室とオンラインで結合して、タンク鋼板などの温度上昇変化の高速測定結果から、その部分の発生損失を非接触で処理する方法なども開発した。

図 11. は、大電流ブスバーによりタンク壁に生ずる漂遊損のモデルタンクを用いた測定状況、図 12. は赤外線サーモグラフィを用いたタン

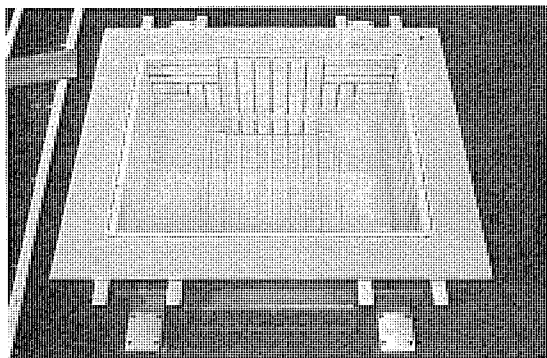


図 13. タンク漂遊損防止用磁気シールド

ク温度上昇の測定状況を示す。

4. 2 漂遊損の低減方法

これまでに述べたように漂遊損の解析が進んだため、漂遊損を減少する方法も、これに基づいて正確にたてることが可能となった。コイル内渦流損については、漏れ磁束分布が正確に把握でき、これに基づいて適正な分割導体を採用することにより、渦流損を低減できる。また構造物の漂遊損については、外鉄形ではコイルの大部分が鉄心という磁気遮へい物に覆われているため、構造物に入射する漏れ磁束は元来少ないのであるが、それでも鉄心外に出ているコイル部分や大電流リード・ブッシングなどによる漏れ磁束の影響があるので、その量に応じて磁気シールド、非磁性タンク、タンク非磁性割込み、導電シールドなどを適切に組合せて、構造物に発生する損失を最小に抑えるよう配慮している。図 13. はタンク漂遊損防止用に取付けた磁気シールドの例を示す。

5. 低損失化・コンパクト化検証用モデル変圧器

上記のような低損失化・コンパクト化の技術開発の総合的検証として、次のような定格を対象とした検証モデル変圧器を製作した。

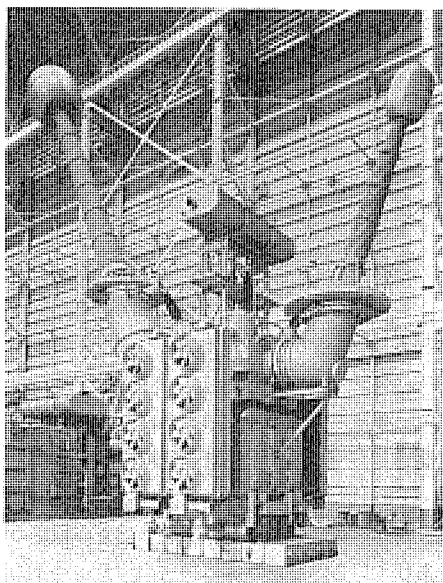


図 14. 低損失化・コンパクト化検証用モデル変圧器

表 1. 500 kV 1,500/3 MVA 変圧器の低損失化・コンパクト化の効果

変 圧 器		従 来 器	コンパクト器
外形・重量	床 面 積 (%)	100	76
	油 な し 重 量 (%)	100	76
	油 量 (%)	100	71
	総 重 量 (%)	100	76
輸 送	重 量 (%)	100	77
	長 さ (%)	100	71
損 失	無 負 荷 損 (%)	100	74
	負 荷 損 (%)	100	94

単相 50 Hz 単巻 外鉄形 送油風冷式 三次巻線付き
 一次 500 kV 1,500/3 MVA 1,550 kV BIL
 二次 275 kV 1,500/3 MVA 1,050 kV BIL

この定格では、コイルは 1/2 は容量のコイル 2 個並列の形となるので検証モデルとしては、その 1 個分すなわち 1/2 相分としたが、絶縁漏れ磁束密度などの見地からは実器と全く同様であり、完全な等価性を有するモデルとなっている。この変圧器には、前述のような絶縁面、漂遊損面の改善をすべて盛り込んだほか、タンク構造の改良や次回に述べる低補機損形冷却器を採用するなど、当社の最近の開発成果の総合的検証モデルとした。本器を、従来当社が納入している 1,500/3 MVA 器と比較すると表 1. のようになる。これから分かるように、据付スペースの縮減、輸送費の低減などのほか、損失低減による年間の電力費節減が数千円／バンクとなるなど、多くのユーザーメリットをもたらすものである。図 14. にこのモデル器の試験状況を示す。

6. む す び

当社大容量高電圧変圧器（外鉄形）の最近の技術開発のうち、主としてコンパクト化、低損失化につながる部分について紹介した。引き続き「Ⅱ」編でユーザーメリットに直結する他の開発成果について紹介する予定である。

参 考 文 献

- (1) 田村ほか：三菱電機技報，50，No. 12，P. 675（昭 51）
- (2) 田村ほか：三菱電機技報，51，No. 3，P. 220（昭 52）
- (3) 渋谷ほか：電気学会雑誌 A，99，No. 5，P. 200（昭 54）
- (4) 武智ほか：昭 56 電気学会全国大会，17
- (5) 村上ほか：三菱電機技報，41，No. 3，P. 409（昭 42）
- (6) 菅ほか：昭 56 電気関係学会関西支部連合大会 G 3-37
- (7) 田村ほか：三菱電機技報，53，No. 4，P. 304（昭 54）
- (8) 武智ほか：昭 57 電気学会全国大会，647
- (9) 博多ほか：昭 55 電気学会全国大会，591
- (10) 博多ほか：電気学会静止器研究会資料，TC-78-4（昭 53）

高電圧大容量変圧器の技術開発〔II〕

菅 寿郎*・渡辺 次男*・石井 敏次**・武智 盛明*・玉置 栄一*

1. ま え が き

〔I〕編に引き続き、当社大形（外鉄形）変圧器の技術開発について述べる。〔I〕編では当社の開発活動が、信頼度の維持向上に加えて、（1）低損失化、（2）コンパクト化、（3）短絡強度、輸送性、耐震、流動帯電抑制など重要特性の開発、（4）部品、周辺機器、周辺ソフトウェアの開発、の4項目について行われていることを述べ、その中の（1）（2）項についてその内容を説明した。本稿ではそれに引き続き、（3）（4）の分類に入る項目、及び最近需要が増加している分路リアクトルの開発状況について述べる。

2. 短絡強度関係の開発

変圧器の大容量化と系統容量の増大により、変圧器に短絡電流が流れたとき発生する電磁機械力は著るしく増大しており、これに耐えるように変圧器を設計することは、変圧器の信頼度にとって極めて重要な問題となってきた。

当社では古くからこの問題に着目しており、昭和33年には既実器の短絡試験を実施しているが、短絡電流耐力の一層の改善を図るため、昭和51年から56年にかけて、一連の開発研究を実施した。その内容は、理論解析、部分モデル実験、実規模モデル試験よりなり、実規模モデル試験は、一、二、三次の3回にわたって実施した。これらのモデルは、いずれも短絡電磁力的には600 MVA級のもので、一次はコイル破壊モードの観察など基礎研究用、二次は一次の結果より得られた改良点を織り込んだものとし、いずれも気中で行ったが、これらの集大成的試験として三次試験を油中で行った。

図1. はその実施状況を示すもので、昭和53年に新たに制定された JEC-204 の短絡強度試験法に準拠して行い、短絡後の電氣的試験では判定規準を十分満足しており、解体点検の結果からも構造の妥当性が確認でき、大容量外鉄形変圧器の短絡強度を検証することができた。この試験では、油中試験にもかかわらず、多数の振動・圧力・応力センサを使用し、特に油中通電部のひずみ（歪）及び振動測定に成功するなど、世界的にも最先端に行く試験内容とすることができた。

また、このような技術を評価されて KETRI (Korea Electrotechnology and Telecom-

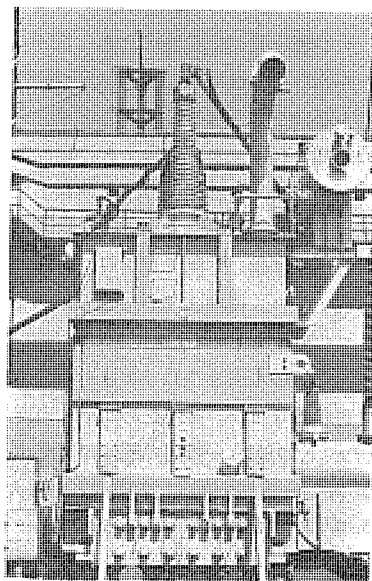


図1. 実規模モデル変圧器の短絡試験

munications Research Institute) に 18/24-48-72-96 kV (1,425 kV BIL) 短絡容量 1,000 MVA (バンク 3,000 MVA) 単相短絡試験用変圧器3台を昭和56年に製作納入した。

3. 輸送関係の開発

大形変圧器は一般に重量が大きく、工場から据付現地までの輸送が困難な製品であるので、輸送を容易にすることは大形変圧器の開発の中で、極めて重要なテーマである。輸送関係の開発は、①変圧器の小形軽量化、②分割輸送方法の開発、③新しい分解輸送方法の開発、④新しい輸送機器の開発、の四つに分類できると考えられる。

①については、絶縁の合理化や鉄心・タンクなど構造の改良に依存するものが多く、この方面に多大の努力が傾注されていることは〔I〕編で述べたとおりである。

②は1台の変圧器をいくつかのブロックに分けて輸送し現地で一体に組上げる方法で、特別三相方式や六分割構造がこれにあたる。分割輸送法は輸送重量軽減の有力な方法として広く採用され、現在ではほぼ確立した技術となっている。

③は工場で一度完成し試験した変圧器をいったん解体して輸送し、現地で再度組立てるものである。

④については、これまでに大形のシュナベル形貨車やトレーが多く製作されてきたが鉄道輸送、道路輸送とも制約条件が悪化しつつあり、新しい輸送機器の開発が望まれている。

この章では③④の分類に属するものについて、最近の当社の開発状況を紹介する。

3.1 CGPA 変圧器

これは分解輸送の新しい手法である。変圧器の分解輸送は、輸送重量低減の有力な手法であるが、現地での組立作業の複雑さ、特に現地でのコイルの乾燥に多大の費用と時間を要することから、昭和30年代以後は、ほとんど省みられなかった。しかし当社では、外鉄形変圧器の輸送重量の大きな部分を占める鉄心の構造が極めて簡単であることに着目し、コイル現地乾燥の問題さえ解決すれば分解輸送法に新しい分野を開拓しようとの観点からCGPA (Coil Group Packed Assembly) 変圧器を開発した⁴⁾。

これは関西電力(株)との共同研究で、変圧器を解体輸送するに当たりコイルを防湿フィルム (FEP 系材料) でパックし、現地での組立期間中にも吸湿しないようにして、現地据付けを簡単化したものである。種々の基礎研究を行った上で、総合的検証として550 kV 100 MVA 器を製作し、フィールドで1年半の長期課電試験を行ったのち工場へ持ち帰り、各種の特性が全く変化していないことを確認した。

この開発により、最大輸送重量はコイルの重量のみとなり、普通の輸送方法の1/3～1/5となるので、大形変圧器の輸送の問題は事実上解消された。なお、現地据付期間も鉄心組立作業が簡単なため、ほとんど増加しなかった。図2. は前記100 MVA 変圧器のパックされたコイルグループを示す。

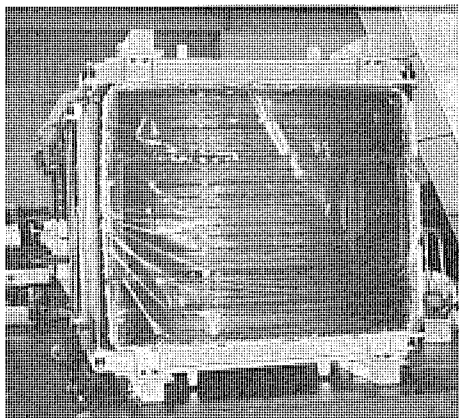


図 2. CGPA 変圧器の パック された コイルグループ

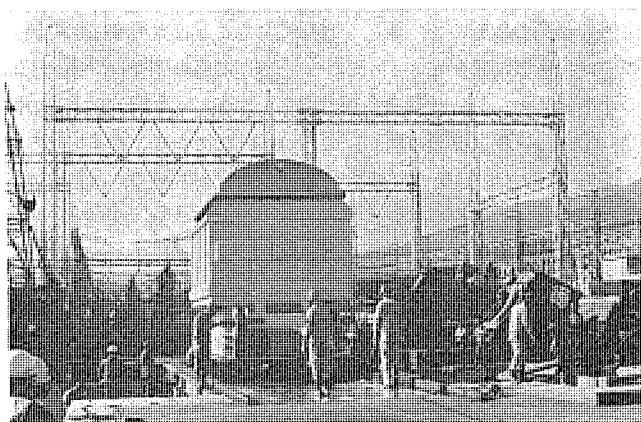


図 3. エアベアリング による変電所内変圧器搬送

3.2 エアベアリングによる発電所構内搬送⁽²⁾

変圧器は一般に貨車あるいはトレーラによって輸送するが、現地へ到着後、構内道路から据付基礎上までは“ころ引き”が多く用いられる。当社は赤穂製作所内において、大形変圧器の工場内搬送にエアベアリングを使用して好結果を得ているので、これを現地構内運搬に適用してみることにした。

エアベアリングはホーバークラフトと同様、空気圧を利用した重量物搬送装置であるが、後者が動圧形で空気の漏れ量や騒音が大きいのに対し、前者は静圧形で静粛であり、空気の漏れ量も極めて少ない特色がある。エアベアリングは比較的平滑な路面でないと使用できないが、発電所構内のような限られた範囲では一般に路面は良好であり、また悪い場合でも鉄板などで養生することにより、使用が可能である。

工場内に現地を模擬した路面条件を作り実験を行ったところ、 $2/1,000$ 程度の静摩擦係数が得られ、エアベアリングが十分使用できることが判明したので、東京電力(株)新富士変電所及び玉原発所において、変圧器の運搬に使用した。結果は非常に良好で、ころ引きに比べ大幅な時間削減ができた。そのほか、方向転換や位置ぎめが容易であるという利点もあるので、今後構内運搬の有力な手法として広く採用して行きたいと考えている。

図 3. は変電所内で、エアベアリングでの搬送中の変圧器を示す。またエアベアリングのほか、ころ台車(通称チルトンク類)を地下変電所内のころ引きに応用してよい結果を得ている。

3.3 変圧器横持装置の開発

大形変圧器は、しばしばシュナール形やガーダー形の貨車で輸送する

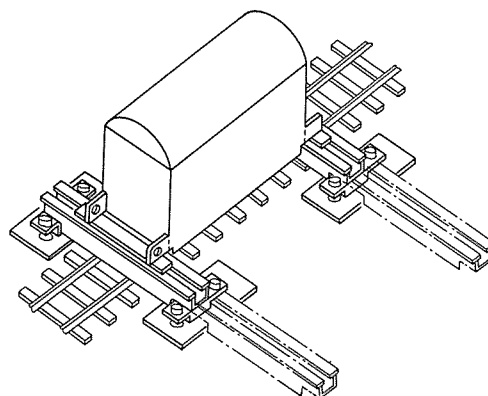


図 4. 変圧器横持装置



図 5. 変圧器横持装置の使用状況

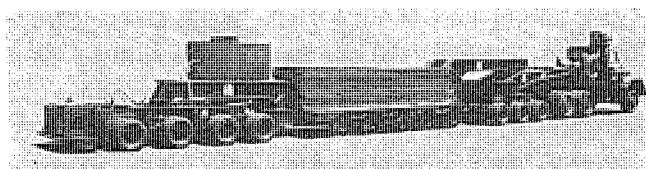


図 6. 補助車輪付きトレーラ

が、これを据付現地の近くで貨車からとり下ろす必要がある。これには重量物の横持ち、貨車の解体などの作業があり長時間を要するため、荷下しのできる場所は限定され変圧器輸送上の大きな問題となっていた。

その解決策として当社では、図 4. に示すような変圧器横持装置を開発した。貨車が荷下し場所へ到着すると、車両形設計の変圧器の下部つり(吊)耳と線路の間に固定受ばり(梁)を挿入し、あらかじめ準備された基礎に固定する。固定受梁の上面には移動受梁が乗っており、これは油圧ユニットを内蔵していて、これによって変圧器の重量を移動受梁に移す。貨車を解体したのち、移動受梁を線路と直角方向に移動して横持ちを完了する。移動受梁は、ころ台車が用いられており、移動はスムーズに行われる。

この装置を用いることにより作業時間が約 $1/2$ に短縮されたため、従来は側線に引き込んでからしか行えなかったこの作業が、本線上で可能となった。そのため荷下し場所の選択の自由度が高まり、輸送ルート短縮、費用の節減に貢献するものと期待されている。図 5. はこの装置を使用して横持ち中の大形変圧器を示す。

3.4 補助車輪付きトレーラの開発

大形変圧器は、据付場所の近くではトレーラ輸送をすることが多いが、トレーラによる道路輸送の場合、強度の弱い橋りょう(梁)や軟弱な地

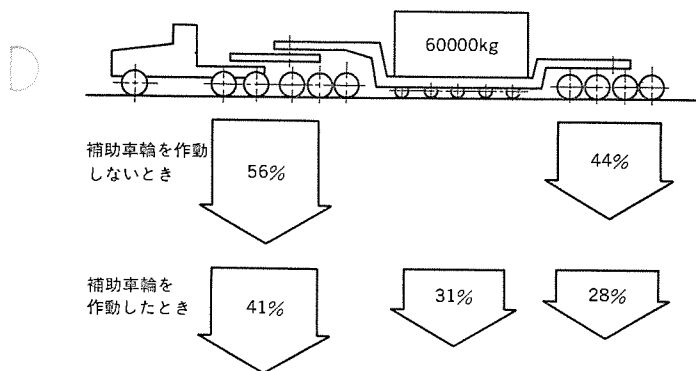


図 7. 補助車輪付きの荷重分布効果

盤などが問題となる。

この問題を解決する一つの手法として、図 6. に示すような補助車輪付き トレーを開発した。このトレーは、常時は補助車輪を上げて普通のトレーと同様に走行するが、橋梁などにさしかかった場合、油圧機構により補助車輪を下ろし、荷重を分布させて通過するものである。トレーの最大積載荷重は 80t であり、例えば 60t を積載した場合の荷重分布を、補助車輪を使用したときとしないときを比較すると図 7. のようになる。このように重量分布が大幅に改善されるので、橋梁の補強などを省略できる場合が増え、輸送費の縮減に貢献できる。

4. 耐震強度の改善

昭和 53 年の宮城県沖地震は変電設備に大きな被害をもたらし、大形変圧器についても耐震対策の重要性を再認識させた。変圧器で耐震上問題となるのはブッシングであり、当社では以前よりこの問題に着目し、耐震強度の向上を図るとともに大形加振機を使用した加振試験によって、耐震性能を検証している。

図 8. はブッシングの耐震強度試験の実施状況を示す。また変圧器の耐震特性は、ブッシング系の固有振動数が変圧器本体及び基礎地盤系の固有振動数に近いと、両者の連成振動を考慮した地震応答解析が必要である。このため当社では、変圧器地震応答解析プログラム (TERAP) を開発し、変圧器の耐震強度設計に使用している。このプログラムでは、ブッシング系と地盤系の減衰の大きさが著しく異なるこ

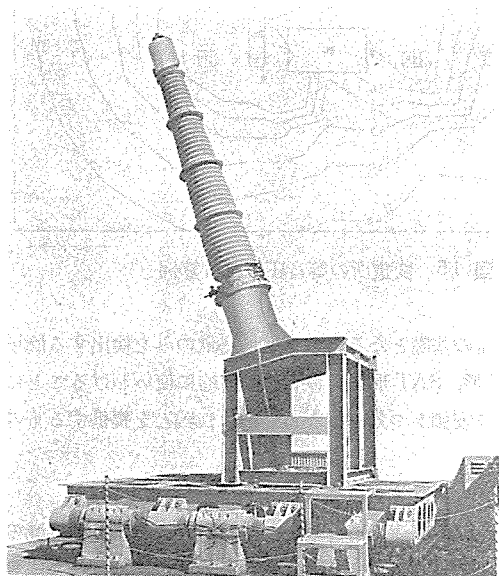


図 8. ブッシングの耐震強度試験

とを考慮して、これに適した直接積分による応答計算法を採用し、解析精度を向上させている。変圧器・ブッシング全体系の解析結果の一例を図 9. に示す。

これらの検討結果に基づき、ブッシングの頭部重量の低減、センターランプ 締付圧力や ブッシングフランジ 構造の再検討などを行い、変圧器の耐震特性の向上を図っている。

5. 流動帯電現象防止に関する開発

変圧器の高電圧大容量化とともに、絶縁物の乾燥や絶縁油精製の技術向上など、絶縁の信頼度を向上するための広汎な努力が払われてきたが、そのため一方では、従来はほとんど問題にならなかった流動帯電現象が、問題として取上げられるようになった。これは送油式の変圧器において、油が絶縁物やコイルの表面を流れる場合に、絶縁物が負に、油が正に帯電する現象であり、発生電荷の蓄積が著しい場合には油中で放電が発生し、変圧器が破壊に至る可能性のあるもので、大形変圧器設計上の大きな問題としてクローズアップされた。

当社では昭和 47 年ごろから、この現象について精力的な研究を行った結果、昭和 52 年ごろには、流動帯電を無視できるレベルに抑える油循環流路の設計基準を確立した⁽³⁾。一方材料面では、絶縁油の性状により流動帯電特性がかなり異なるという現象が発見され、絶縁油の選択あるいは流動帯電特性改善手法の確立が必要となったので、この方面の研究にも力を注いだ。稼働中の変圧器は、油中に導体の銅と微量の酸素が存在し、油温も比較的高いのでその中の絶縁油は、初期的な劣化を起こしやすい。新油の状態で帯電度が小さくても、初期劣化過程で増加する油もある。これを識別するために、図 10. に示すような絶縁油帯電度測定装置を開発した。これは絶縁油の帯電度、体積抵抗、誘電正接などが測定できるもので、絶縁油の初期劣化を模擬した制限酸化劣化試験で劣化させた油をこの装置で評価することにより、油の選別を行うものである。

図 11. はこのような方法で得られた 2 種類の油の帯電度特性の比較を示す。また単に選別を行うのみでなく、積極的に油の性状を改善する方法の研究も行い、種々の添加剤について検討した結果、1・2・3 ベンゾトリアゾール (以下 BTA と略す) と呼ばれる添加剤が、流動帯電防止に優れた効果のあることを見出した。BTA は広く使

用されている全く毒性のないもので、絶縁油の他の特性には全く影響を与えず、

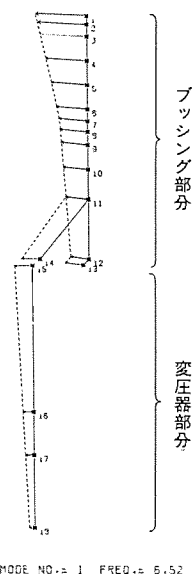


図 9. 変圧器・ブッシング系の耐震解析例

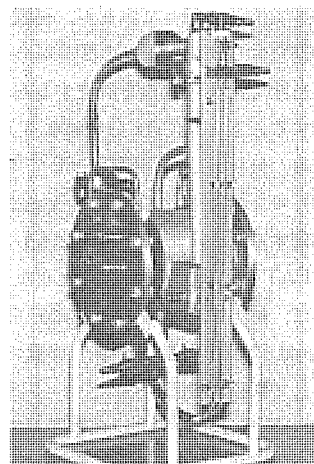


図 10. 絶縁油帯電度測定装置

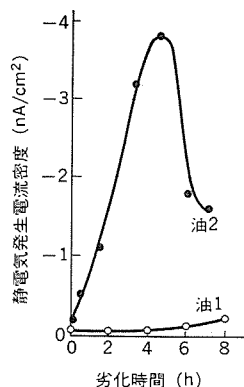


図 11. 絶縁油の帯電度の比較

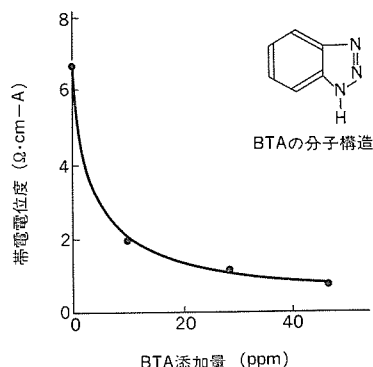


図 12. 帯電電位と BTA 添加量との関係

図 12. に示すように ppm オーダーの量の添加で帯電度を大幅に低下できるので、流動帯電問題の有力な解決策と考えられ、当社では、既に実器での採用を始めている。

6. 部品、周辺機器、周辺ソフトウェアの開発

6.1 省エネルギー冷却器

当社では、大形変圧器の冷却に多く用いられる送油風冷式冷却器について、EFP 形冷却器、超大形冷却器、低騒音 ファン、防音風洞など数多くの優れた製品を開発し、自社のみならず他の変圧器メーカーにも使用願っているが、最近のエネルギーコストの高騰への対応力を更に高めるため、補機損の極めて少ない省エネルギー冷却器を開発した。

これは、耐食性の優れた溶融亜鉛めっき鉄製プレートフィンを使用した EFP 形冷却器をベースに、冷却管径や配列、フィン形状などの最適化、高効率ポンプ・ファンの採用により、補機損を大幅に低減したもので、その外観を図 13. に示す。従来品との比較は表 1. に示すとおりで、補機損率は従来の約 1/2 に減少している。またこれを更に効率的に制御する装置として、可変周波数制御方式の開発も行っている。

6.2 自動油中ガス分析器のシリーズ化

変圧器の内部診断の手法として、油中ガス分析はもっとも有効な手段であり、世界的に広く行われている。この分析は、変圧器から油サンプルを少量採取し、脱ガス装置で油中に溶解しているガスを抽出しガスクロマトグラフで分析することによって変圧器の診断を行うものである。従来はガス抽出、ガスクロマトグラフの操作、結果の算定などをすべて手動で行っていたが、高級な分析技術者を必要とし、また個人差を生じやすいなどの問題があった。

当社ではこの問題を解決するために、全自動のガス分析装置を開発するとともに、ガス分析によるモニタリングシステムを更に高度化するため、分析センター設置用として FAT 形(全自動)、SAT 形(半自動)の2機種並びに現地モニタリング用として可燃性ガス総量だけを測定する TCG 形の3種類をシリーズ化した。

FAT 形は図 14. に示すようなもので、油サンプルを装てん(填)すれば、結果のプリントアウトまで完全に自動的に行うものである。サンプルは12個まで装填でき、多数のサンプルを処理する分析センター用として最適である。

SAT 形は、分析途中に若干の手動操作を入れることにより FAT 形を簡便化したもので、高級分析技術者を要しないこと、個人差がないことなどの点では FAT 形と同様の機能がある。TCG 形は、

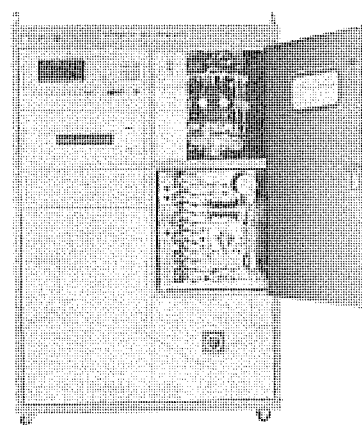
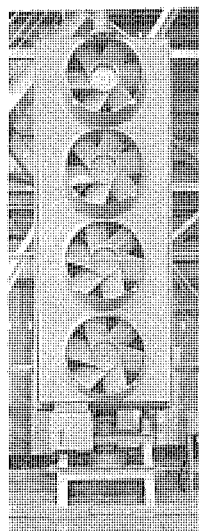


図 14. FAT 形自動油中ガス分析器

図 13. 省エネルギー冷却器

表 1. 省エネルギー冷却器と従来品の比較

項目	対象冷却器	従来形	省エネルギー形
外形寸法比 (幅×奥行×高さ)		1.0×1.0×1.0	1.1×0.9×1.0
冷却能力比 Q		1.00	1.15
循環油量比		1.00	0.45
補機損比 A		1.00	0.62
補機損比率=A/Q		1.00	0.53
騒音値		従来形に比べ2ホン減	

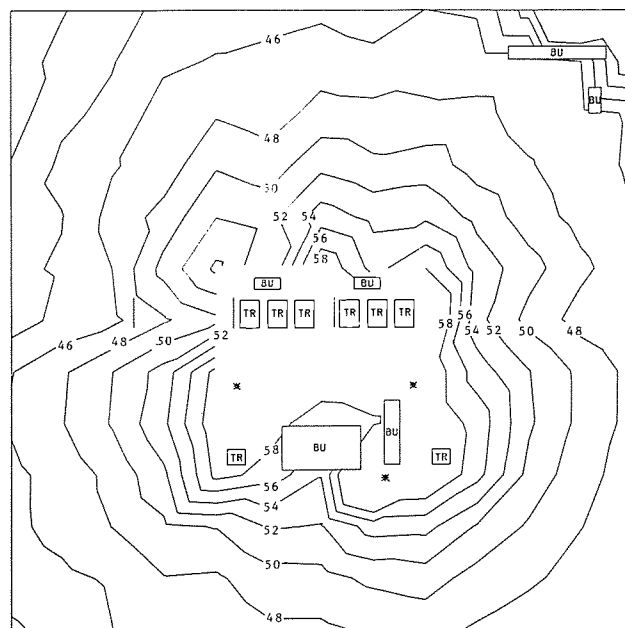


図 15. 変電所の等音圧分布計算例

現地において診断の基礎となる可燃性ガス総量のみを検出する簡単な装置で、FAT 形、SAT 形とあわせて機能的に使われることにより、全体として安価かつ効率的なガス分析システムを提供するものである。

6.3 変電所騒音分布計算プログラム

変電所のコンパクト化、周辺の市街地化のため、変圧器騒音の低減の要請は、増加する一途をたどり各種の低騒音対策が実施されているが、変電所の新增設にあたっては、機種個別の騒音対策とともに構

内の騒音分布を正確に予測し、全体として経済的で調和のとれた騒音対策をたてることが望ましい。

このため当社では、関西電力(株)と共同で、変電所騒音分布計算プログラムを開発した。これは従来の計算プログラム⁽⁴⁾に大幅な改良を加え、変圧器騒音については指向性が考慮でき、また建物や隔壁が複雑に配置されている場合でも等価音源法⁽⁵⁾により遮音効果が精度よく求められる。更に山などの地形変化による遮音及び反射が考慮でき、変電所の騒音分布が精度よく求められる。このプログラムによる変電所の等音圧分布の計算例を図15.に示す。

7. 分路リアクトルの開発状況

超超高压系統やケーブル系統の拡大により、分路リアクトルは高電圧大容量化の傾向が著しく、これに伴って信頼性向上とともに低損失、小形軽量、低騒音の要求が一層高まっている。当社では、超高压及び超超高压用を中心に、既に延べ1,000万kVA、約200台の分路リアクトルを納入しているが、今後上記の低損失などの要求事項がますます高度化するのにこたえるため、多岐にわたる研究開発に取り組んでいる。

7.1 低損失化、コンパクト化

分路リアクトルは、線路の負荷にかかわらず印加電圧の2乗に比例した損失を常時発生するので、高電圧大容量器では、省エネルギーの観点から低損失化が重要な課題である。当社がこの種の定格に標準的に採用している磁気シールド付空心形構造は、コイル巻数が少なく抵抗損が少なく、磁束の曲がり方が少なくコイル漂遊損が少なく、フリッジ磁束による鉄心損失の増大がない、など本質的に優れた特長を持っているが、最近では多層複合導体の開発、絶縁の合理化、フォームフィット構造の採用などによって、更に低損失化、コンパクト化を図っている。

7.2 振動・騒音の低減

分路リアクトルは、シールド鉄心に作用する磁気吸引力により大きな振動を生じやすく、振動騒音の低減は、大容量器の設計上重要な問題である。シールド鉄心の振動解析は、シールドがけい素鋼板の積層体で機械特性的にも異方性をもつこと、及び絶縁油に浸し(漬)されていることを考慮する必要があるが、従来これらの点を考慮した解析手法は実用化されていなかった。

当社では、振動低減のための構造開発とともに、振動解析技術の研究を進め、積層鉄心の異方性と絶縁油の付加効果を加味した有限要素法による新しい解析手法を開発した⁽⁶⁾。これによってシールド鉄心の固有周波数や振幅応答など振動特性の推定精度が向上し、適確な振動低減が行えるようになった。図16.にシールド鉄心の振動モード解析の例を示す。

一方構造設計の面では、巻線の中空部分に非磁性板を積層し、シールド鉄心を一体化することにより振動を大幅に低減しうる空げき(隙)内積層板付空心構造を開発し⁽⁷⁾、大容量器の振動低減に大きな効果をあげた。またこのような製品開発とともに、油入器の鉄心及びタンクの加振試験や振動計測など、製品の振動特性の試験技術についても独自の開発を行い、製品の品質保証や開発に役立てている。

7.3 実規模モデル試験

上記のような製品の改良開発にあたっては、磁界解析、熱流体解析、構造解析、振動解析などの検討とともに、要素モデル試験やスケールモデル・実規模モデルによる試験により検証を行っている。図17.は単相500/√3 kV 33.3 MVA 分路リアクトルの実規模モデルであり、

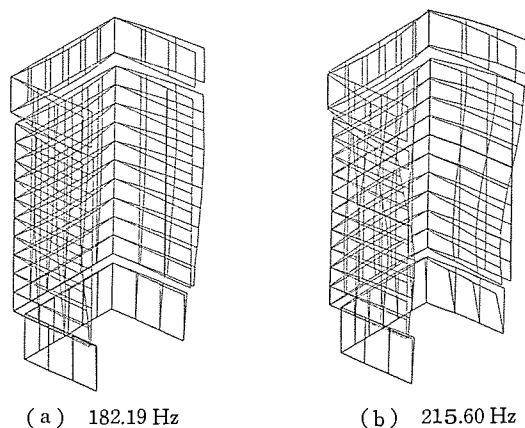


図16. シールド鉄心の振動モード解析の一例



図17. 500 kV 33.3 MVA 分路リアクトル 実規模モデル

サーチコイルや振動検出素子により、通電中のリアクトル内部の磁界、温度、振動の測定を行い特性の確認を行っている。

8. む す び

〔Ⅰ〕編、〔Ⅱ〕編の2回にわたり、当社大形変圧器と分路リアクトルに関する技術開発の進行状況の全般の概要を説明した。今後も、これらの機器に対するユーザーの要求はますます高度化するものと考えられ、当社としてはこれにこたえるため、一層研究開発に力を注ぎたいと考えている。

なお、紙面の都合で割愛せざるを得なかった開発項目の中にも、ユーザーメリットに結びつくものが数多くあることを付記して、本稿のむすびとしたい。

参 考 文 献

- (1) 松村ほか：三菱電機技報，54，No. 11，p. 785 (昭55)
- (2) 篠塚ほか：三菱電機技報，55，No. 4，p. 297 (昭56)
- (3) 菅 ほか：三菱電機技報，52，No. 12，p. 915 (昭53)
- (4) 田村：三菱電機技報，49，No. 7，p. 529 (昭50)
- (5) 湯沢ほか：音響学会誌，31，No. 9，p. 538 (昭50)
- (6) 森津ほか：昭57 電気学会全国大会，617
- (7) 菅 ほか：三菱電機技報，52，No. 6，p. 457 (昭53)

プラントコントローラ《MELPLAC-550》

大野 宣男*・石井 哲夫*・村川 利幸*・山中喜美雄*・藤井 信明*

1. ま え が き

鉄鋼をはじめとする産業プラントの制御システムは、高度なユーザーニーズと日進月歩で進歩する技術革新のもとにめざましい発展を遂げており、複雑高級化した最近のプラントでは、その死命を制御システムが握っているといっても過言ではない。

最近のプラントは省エネルギー、省力化、製品品質の向上に立脚した複雑な制御の要求があり、制御システムは高級な演算の遂行はもとより大形広域化しており、危険分散、機能分散、地域分散の意味から分散制御システムが必然となっている。また設備の稼働率を向上させるため、高信頼性の志向はもちろんであるが、MTTR（平均故障回復時間）の減少を目的とした保守性向上の要求も大きい。

当社では業界に先駆け、開発したシーケンス制御と算術演算制御を並列に処理できる高機能プラントコントローラ《MELPLAC-50》の豊富な実績を踏まえ、最近のこれら要求にこたえるべく最新の高速マイクロプロセッサ応用技術、マイクロプログラミング技術、高速光応用技術、多重伝送技術、マルチプロセッサ技術などの最先端技術を駆使することにより、高速高性能プラントコントローラ《MELPLAC-550》を完成し、最適分散制御システムを実現することができたので、ここにその概要について述べる。

2. 《MELPLAC-550》開発のねらい

プラントコントローラ《MELPLAC-550》の開発では、数多くの特長をねらったが、主として次の項目を開発の基本指針とした。

- (1) 高速・高性能制御装置の実現
- (2) CRT付プログラミングパネルの採用による保守性の向上
- (3) マルチCPU、データ伝送システムによる最適分散制御システムの実現
- (4) 故障検出、故障診断機能の充実

以下の章では、これらの開発のねらいの実現技術を軸に、《MELPLAC-550》システムについて述べる。

3. 高速・高性能制御装置

制御内容の高度化、複雑化と適用範囲の拡大とともに、ますます高速・高性能な制御装置が要求されている。《MELPLAC-550》は、これらの要求に対処すべく数々の新技術を開発した。《MELPLAC-550》の主仕様を表1に、制御盤実装例を図1に示す。以下、《MELPLAC-550》の高速・高性能化への実現手段及び特長について述べる。

3.1 高速化の実現

制御システムの高速化、大規模化とともに品質、精度の向上を目的として導入される制御装置には、高速性が不可欠となってきた。《MELPLAC-550》は、1命令24ビットの構成、プログラムメモリとデータメモリの分離、CPUはバイポーラマイクロプロセッサを用いたマイクロプログラム制御方式を採用した制御用高位言語の直接実行などにより高速化を図

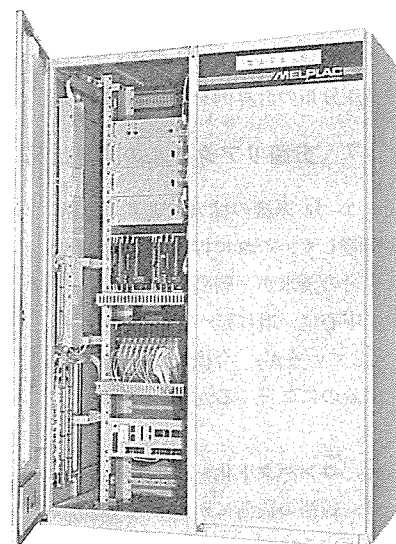


図1. 《MELPLAC-550》制御盤

表1. 《MELPLAC-550》主仕様

演算	演算方式	ソース指定によるワード/ビット処理制御
	ワード処理	2進並列、固定小数点演算、浮動小数点演算
	ビット処理	シーケンシャル演算
	制御方式	マイクロプログラミング方式
制御部	命令	65種
	制込制御レベル要因	制込要因自動判別方式 内部/外部 2レベル 内部レベル8点、外部レベル64点 max
	サブルーチン	4種ネスト処理まで可能
	インデックス修飾	インデックスレジスタ2ワード(X, Y)装備
主記憶部	データマ	max 254点 ・インクリメント 100ms/10ms ・時 限 値 max 1,638.3s/163.83s システムクロック 2点1ms単位 max 16,383ms IT可
	温度	0~50°C
	環境条件湿度	10~95% RH (湿球 35°C 以下、結露なし)
	電源	AC 100/110V +10%~-15% 50/60Hz
入出力部	プログラムメモリ	ワイヤメモリ又はCMOS ICメモリ
	データメモリ	max 16Kワード 1ワード=24ビット+パリティビット 8Kワード 1ワード=16ビット+パリティビット
システムデバック装置	入出力部	直接ソース指定方式
	システムデバック装置	CRT付プログラミングパネル(PP) カセット磁気テープ/プリンタ装置(MTPR)
システム構成(option)	システム構成(option)	・スタンドアロンシステム ・CPU Back UPシステム ・Multi-CPUシステム(CPU max×8台、コモンメモリ 8Kワード) ・リモートIOシステム ・データウェイシステム

り、更に制御専用のコントローラとして各種制御プラントに適用時の命令実行頻度を統計的に分析し、DDC(Direct Digital Controller)を実行する制御装置としての総合的な高速性を考慮している。

また、オンラインメンテナンス機能をもつプログラミングパネルとの情報処理、

カウンタ機能、機能プロセス入出力などは、CPUとは独立した専用の機能を有し、CPUの演算速度への影響を最小限に抑えCPU本来の処理機能の高速性を得ている。

割込機能は割込要求信号が、制御対象からの要求であるため割込処理の高速化が要求される。《MELPLAC-550》は、割込みの要因分析がファームウェア化されており、割込処理が容易で、かつ高速に行うことが可能である。

3.2 高性能化の実現

ここではCPUの持つ制御機能の高性能化と、多様なプロセス信号とのインタフェースが可能な新プロセス入出力システムについての高性能化について述べる。

(1) CPUの制御機能の高性能化

制御機能が拡大しソフトウェア負荷が増大している今日、その負荷の軽減が高性能化の評価ポイントの一つといえる。《MELPLAC-550》では、制御用高位言語の直接実行という形でこの要求を実現している。《MELPLAC-550》の言語体系は、《MELPLAC-50》の制御用高位言語を継承し、制御精度の向上、制御機能の高度化、制御対象の拡大などの要求に応ずるため、拡大制御機能を命令化し、制御用高位言語の拡大、拡充を図った。《MELPLAC-550》の命令一覧表を表2.に示し、以下、主な特長について述べる。

(a) 高精度算術演算の強化

転送命令、算術命令、比較命令、関数命令に関し浮動小数点演算が可能である。固定小数点データと浮動小数点データとの変換は、“XTF”“FTX”命令により相互に容易に変換できる。

(b) 関数演算機能の命令化

PID(比例・積分・微分)、リミッタ、傾斜信号発生などの関数演算のマイクロプログラム化は、プログラム効率、処理速度及び演算精度の向上に有効であるとともに、従来のアナログシステムと同一の感覚でプログラムの作成、保守が行える。

(c) データ処理、周辺機器専用命令

大量データの処理に有効な1命令で1ブロックのデータを転送する“BMV”命令、BCDコードとBINコードの相互変換のために“DTB”“BTD”命令が用意され、データ処理が容易にプログラムできる。また、周辺機器専用命令“HI”“BYE”により複雑な周辺機器の制御を簡略化している。

(2) プロセス入出力システムの高性能化

プロセス入出力(PIO)システムの高性能特性を評価する場合、多様な制御対象とCPUとの効率的なインタフェースが要求されるため、信頼性、保守性、経済性、機能の多様性などが評価のポイントとなる。《MELPLAC-550》のPIOシステムは、これらの向上を図り高性能化を実現している。ここでは、経済性並びに機能の多様性について述べる。

(a) 高密度実装による経済性の向上

大形カードを採用した基本カードは、実装単位を16点より32点とするとともに1台のカードフレームに、アナログ入出力、デジタル入出力を問わず、任意のPIOカードの混在実装を可能とし実装効率の向上、システム計画の容易さ、増設の容易さを実現した。

(b) 機能の多様性

《MELPLAC-550》のPIOカードは、デジタル入出力、アナログ入出力、パルス入力、表示出力、パルス駆動出力など、豊富な種類がプロセス信号に応じて選択できる。PIOカードの仕様を表3.に、外観例を図2.に示す。これらのほかに、従来CPUの機能を利用

表2. 《MELPLAC-550》命令一覧

分類	命 令	機 能	ワ ー ド 処 理	ビ ッ ト 処 理	浮動小数 点 演 算	制御演算
転 送	;	Load	○	○	○	—
	\$	Invert Load	○	○	○	—
	,	Conditional load	○	—	○	—
	→	Store	○	○	○	—
	SET	Set	—	○	—	—
	RST	Reset	○	○	○	—
送	LON	Latch On	○	○	○	—
	LOF	Latch Off	○	○	○	—
算 術	+	Add	○	—	○	—
	—	Subtract	○	—	○	—
	*	Multiply	○	—	○	—
	/	Divide	○	—	○	—
論 理	AND	Logical And	○	○	—	—
	ANI	Complement And	○	○	—	—
	OR	Logical Or	○	○	—	—
	ORI	Complement Or	○	○	—	—
	EOR	Exclusive Or	○	○	—	—
比 較	>	Compare Grater Than	○	—	○	—
	=	Compare Equal	○	—	—	—
	<	Compare Less Than	○	—	○	—
分 岐	B	Unconditional Branch	—	—	—	○
	BY	Branch if Yes	—	—	—	○
	BN	Branch if No	—	—	—	○
	CAL	Subroutine Call	—	—	—	○
	RTN	Subroutine Return	—	—	—	○
	TM	Interrupt Terminate	—	—	—	○
特 殊	CI	Common Interlock	—	○	—	—
	CIR	Common Interlock Reset	—	○	—	—
	PLS	Positive Differential	—	○	—	—
	SL	Shift Left	○	—	—	—
	SR	Shift Right	○	—	—	—
	SLD	Shift Left Double	○	—	—	—
	SRD	Shift Right Double	○	—	—	—
	INC	Increment Index	○	—	—	—
	NOP	No Operation	—	—	—	○
変 換	XTF	Fixed To Floating	—	—	○	—
	FTX	Floating To Fixed	—	—	○	—
関 数	SQRT	Square Root	—	—	○	—
	SIN	Sign	—	—	○	—
	COS	Cosign	—	—	○	—
	ATAN	Arc Tangent	—	—	○	—
	LOG	Logarithm	—	—	○	—
	EXP	Exponential	—	—	○	—
	DTB	BCD To Binary	○	—	—	—
	BTD	Binary To BCD	○	—	—	—
	ABS	Absolute	○	—	—	—
	LIMIT	Limiter	○	—	—	—
	DBND	Dead Band	○	—	—	—
	FGEN	Function Generator	○	—	—	—
転 送 (拡張)	TO	Transfer To Pointer	○	○	—	—
	FROM	Transfer From Pointer	○	○	—	—
	#	Move To	○	○	—	—
	##	Move From	○	○	—	—
	BMV	Block Move	○	—	—	—
積 分 形 関 数	PI	Integral	—	—	○	—
	PD	Differential	—	—	○	—
	LAG	Lag	—	—	○	—
	LDLG	Lead Lag	—	—	○	—
	PID	PID Control	—	—	○	—
	RAMP	Ramp Generator	—	—	○	—
周 辺 機 器	HI	Device Call	—	—	—	○
	BYE	Device Release	—	—	—	○
そ の 他	HD	Hardware Diagnostic	—	—	—	○
	PL	Program Load	—	—	—	○
	PS	Program Store	—	—	—	○

表 3. プロセス 入出力 カード 仕様

	名 称	仕 様	電 圧	電 流	実装点数	特 長	用 途
デ ィ ジ タ ル 入 力	P 11 A	割込入力	DC 48 V	15 mA	8(32)	ホトカブラ絶縁 チャタリング防止回路収納	32 点のうち 8 点が IT 他は DI として使用可
	P 12 A	AC 100 V 入力	AC 100 V	10 mA	32	トランス絶縁	センサ、プロセス一般
	P 15 B	DC 48 V 高速入力	DC 48 V	10 mA	32	ホトカブラ絶縁	データリンク プロセス一般
	P 15 D	DC 48 V 低速入力	DC 48 V	10 mA	32	ホトカブラ絶縁	プロセス一般
	P 16 B	DC 48 V 低速入力	DC 48 V	10 mA	64	16 点ごとサイクリック入力 ホトカブラ絶縁	プロセス一般
デ ィ ジ タ ル 出 力	PO 1 A	AC 無接点出力	AC 100/220 V	1 A	16	トライアック出力 トランス絶縁	AC 電磁弁 プロセス一般
	PO 2 A	DC 無接点出力	DC 24/100 V	2 A	16	サイリスタ出力, AC 電波要 トランス絶縁	DC 電磁弁
	PO 3 A	接点出力	110 V	AC 0.5 A DC 0.2 A	32		プロセス一般
	PO 4 A	OC 出力	DC 5/48 V	150 mA	32	オープンコレクタ出力 ホトカブラ絶縁	データリンク プロセス一般
	PO 8 A	LED 表示出力	DC 24 V	—	8 桁×2	ホトカブラ絶縁	7 セグメント専用 LED 表示器使用

仕 様	名 称	電 圧	電 流	絶縁抵抗	精 度	変 換	特 長
アナログ入力	PQ 2 A	-10~+10 V	1 mA max	250 kΩ	0.1 %	0——-10 V 4,095——+10 V	高抵抗絶縁 入力抵抗 10 kΩ 以上
アナログ出力	PQ 5 A	-10~+10 V	2 mA max	250 kΩ	0.1 %	0——-10 V 4,095——+10 V	高抵抗絶縁

	名 称	仕 様	電 圧	周 波 数	実装点数	特 長	用 途
カ ウ ン タ	PC 1 A	低速カウンタ	DC 24 V	max 4 kHz	8	・プログラマブルカウンタ ・1/2/4 倍計数切換可 ・倍長計数可能 ・CPU とは独立した計数機能	EW 形 PLG 測長, 位置計測
	PC 2 A	高速カウンタ	DC 24 V	max 40 kHz	2		MP 形 PLG MHP 形 PLG 測長, 速度計測

外線のワンタッチ着脱, プロセス入出力状態の全点表示, カード異常時のカード単位表示など配慮しているが, 以下《MELPLAC-550》の極めて大きな開発目的の一つである CRT 付プログラミングパネルによる保守性の向上について述べる。

4. 1 マンマシンシステム
人間と CPU 及びプロセスとの情報交換を円滑にする マンマシンシステムは, 保守性の向上に有効な手段である。《MELPLAC-550》は, プログラミング機器のマンマシンシステムとして図 3. に示す CRT 付プログラミングパネルを採用した。CRT 画面による同時情報量の増加は, 情報伝達効率を高め, 本来時間的に並列な制御動作の表示へ近づけることが可能となり, 従来のハードウェアによる制御表現と同じ感覚で取扱うことができプログラム の デバッグ, メンテナンス が効率良くできる。

また, プログラミングパネルと接続しプログラム及びデータの保

存, 交換, 照合を行う図 4. に示すカセット磁気テーププリンタ装置 (MTPR) を準備している。表 4. にプログラミングパネルの機能一覧を示す。

4. 2 プログラム作成とデバッグ

(1) プログラムの書き込み・読出し

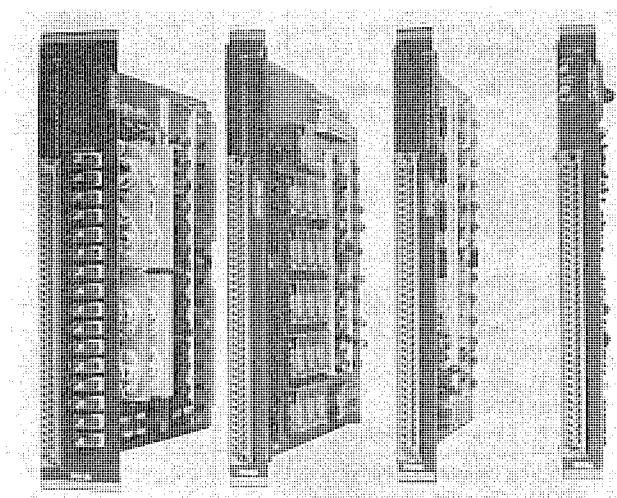


図 2. プロセス 入出力 カード

して処理していた制御の中・高速性を要求される伸び率制御, 油圧下制御などの機能 PIO カードを準備し CPU 負荷の軽減を考えている。

4. 保守性の向上

最近のプラントコントローラは, 稼働率向上の目的から保守性の向上が大きく要求される。6 章で述べる故障検出, 故障診断機能をはじめ, 《MELPLAC-550》では保守性の向上に数多くの配慮を行っている。例えばプロセス入出力システムでは, 外線ケーブルの直接つなぎ込みや

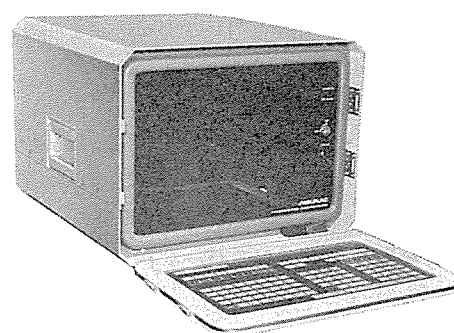


図 3. プログラミングパネル

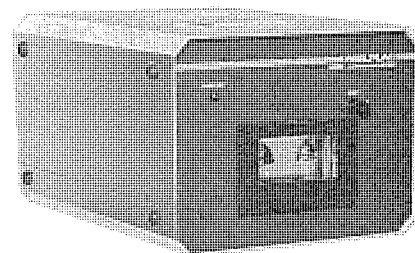


図 4. カセット 磁気 テーププリンタ 装置 (MTPR)

表 4. プログラミングパネル 機能一覧

オフライン機能	READ	プログラム、ソースの読出し
	WRITE	プログラムの作成、書換え、挿入、削除 ソースの書換え
	SEARCH	プログラムサーチ、ソースサーチ
	STEP	プログラムの1ステップごと実行
オンライン機能	MONITOR	プログラム及びソース No. をキーにした実行データ表示
	TRACE	演算結果、任意ソースの時系列表示
	TUNING	オンラインデータ書換え
	GUIDANCE	エラー発生時のメッセージ エラー要因のトラブルシューティング
その他	プログラミングパネル自己診断機能 カセット磁気テープ (MTPR) のコントロール	

《MELPLAC-550》は、プログラムをブロックに分割して、図面単位の各ブロックに“シートナンバ(シート No.)”と呼ぶ番号をつけ、それをキーにしてプログラムの読出し、書込みを行う。したがって、アドレスを意識することなくプログラムを扱うことが可能となった。

プログラムの書込みはシート No. を指定し、命令、ソースなどは制御用高位言語や10進数で直接書込むことができる。プログラムの修正は、指定したシート No. のプログラムを表示する CRT 画面上で、カーソルを修正位置まで移動して、書換え、挿入、削除などのキーを押すことにより行える。プログラムの挿入、削除の場合は、相対分岐命令の分岐先が自動的に修正される。

作成、修正されたプログラムは、本体の CPU 内に転送され、自動的に再配置しメモリを最小化している。更にメモリ使用容量を画面に表示する機能を備えている。

(2) プログラムデバッグ

プログラムデバッグ時に有効な機能として、プログラム・サーチ、ソース・サーチ、ステップ実行機能を備え、デバッグの効率化を図っている。

4. 3 オンラインメンテナンス機能

(1) オンラインモニタ

オンラインモニタには、プログラムシート No. をキーとしたプログラムモニタと、ソース No. をキーとしたソースモニタがあり、オンライン中の広範囲の命令実行結果を CRT 画面上に表示する機能である。図 5. に、プログラムの実行状態を CRT 画面にモニタ表示した例を示す。このモニタ表示は、制御対象の動きに応じて表示を逐次更新するが、任意の時点で瞬間の状態を凍結してモニタすることも可能である。また、インデックスを使用したプログラムは、モニタ時に指定されたインデックス値の演算結果がモニタできる。

(2) プログラムトレース、ソーストレース

プログラムトレースは、指定された命令の実行結果のアクキュレータやインデックスレジスタなどの状態を時系列表示する機能である。ソーストレースは、指定されたソースのデータを時系列表示する機能であり、複数データの同時表示

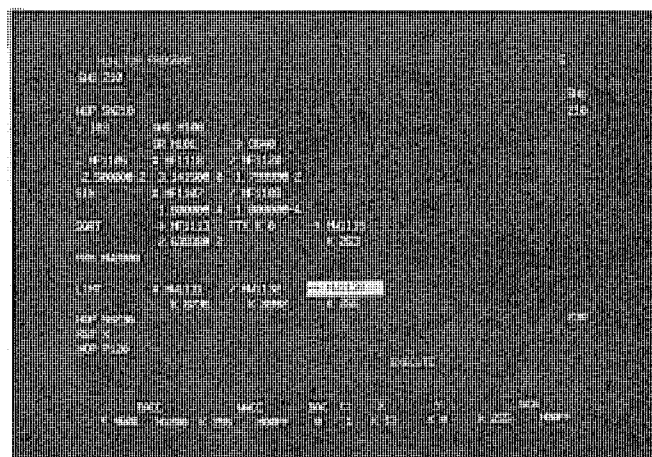


図 5. オンラインモニタ表示

が可能であるため制御対象の動きに応じて、データ間の相関関係の情報を得ることができる。

(3) チューニング

チューニングは、制御パラメータのオンライン設定機能であり、制御パラメータと制御結果が、同時に CRT 画面上に表示されるので、制御パラメータの変更によるシステムの状態の変化を確認しながらパラメータの設定が可能である。

5. システム指向

最近の制御システムは広範囲に分散しており、しかも高速高精度の演算が要求されている。したがって最新のプラントコントローラでは、次の機能の実現が必ず(須)の要件となっている。

- (1) 機能分散の融通性
- (2) 高速処理機能の実現
- (3) リソースの共有化
- (4) バックアップなどの信頼性向上対策

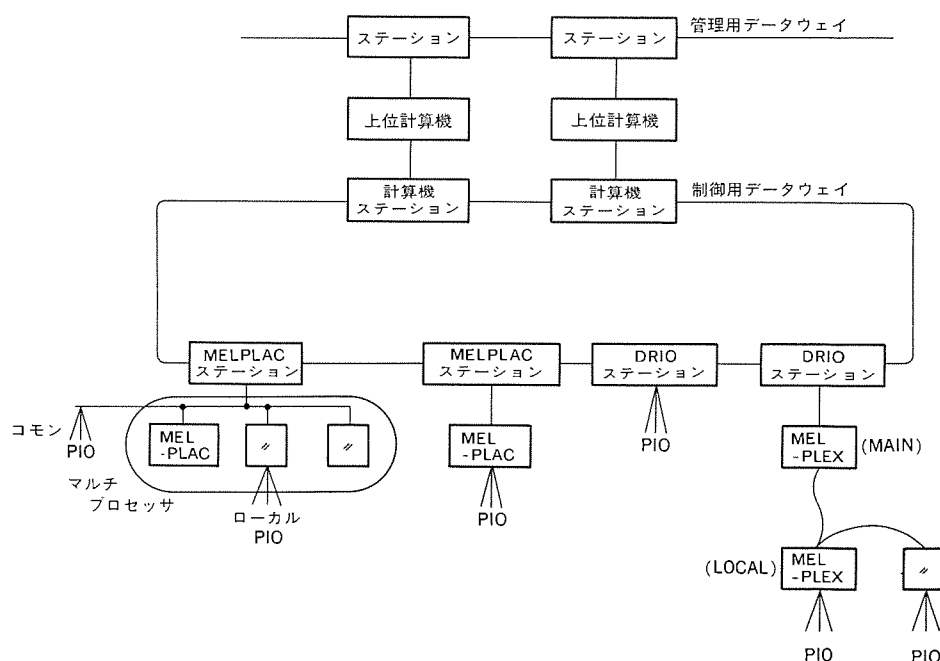


図 6. プラント制御システム

(3) プロセス信号のように広域に点在する情報を収集する情報支線系としての プロセス 信号伝送装置

《MELPLAC-550》では、使いやすさと高速性を主眼として、ソースアドレスによってコモン領域とローカル領域を分割する方式によりマルチプロセッサシステムを実現した。

などの特長を持つシステムが可能となった。

大規模プラント制御システムでは、分散化する制御装置間の情報を一元管理し、スムーズに伝達する手段としてのデータウェイの役割が高まってきた。これらの情報は、制御情報、管理情報、保守情報に分類でき、表 5. のように整理できる。表 5. から分かるようにこれらの情報は、データ量、要求伝送スピードなど異質の性格を持つもので、通信形態もそれぞれに最適な方式が要求される。

(2) 時分割チャネル多重方式, 光ファイバケーブルの使用, 簡単なプロトコルの採用

プロセス信号が多くなるにつれ、信号ケーブルの建設コスト及び保守コストに占める割合が増え、プロセス信号の多重伝送の重要性が増してきた。信号の多重伝送のポイントは、多重化により本質的に発生する信号の遅れを少なくするための高速化はもとより、所期の目的であ

情報種別	情 報 例	情 報 の 性 格
制 御 情 報	センサ フィードバック値 モータ速度リファレンス	少量（数ワード単位） 高速性を要求（数 ms のレスポンス）
管 理 情 報	上位計算機 設定値 処 理 実 績	大量（数十～数百ワード単位） 遅くても可（数十～数百 ms）
保 守 情 報	プログラムロード モ ニ タ	頻度少 大 量

システム仕様	ステーション数	max 127		
	ステーション間距離	max 2km (バイパス時4km)		
	総延長	max 256km		
	通信形態	方式	$N:N$ 通信	サイクリック通信
		用途		
容量	max 512ワード/ブロック	max 2Kワード		
伝送仕様	伝送速度	15.36 Mb/s		
	伝送路	光ファイバケーブル		
	伝送路構成	ループ状		
	多重化方式	時分割チャネル多重化方式		
	誤り制御	CRC検定による再送/2送送, 反転照合		
	バイパス機能	自動/リモート/手動		

例えば、リミットスイッチ など プラント に散在する センサ 類の入力を行う入力サイトローカルステーションでは、従来の経験に基づき分割単位を 1 ステーション 32 点とし、かつ配置の自由度を増すため密閉構造、自然冷却としている。また操作盤には、入出力カード 12 枚まで収納可能な密閉構造ユニットを採用し最適な分散構成を図る。

更にデータウェイ《MDWS-550 シリーズ》のプロセス信号伝送機能と合わせ、情報幹線／支線を密接に連絡し最適化を実現する。

《MELPLAC-550》の故障に対する考え方は、故障を発生させない

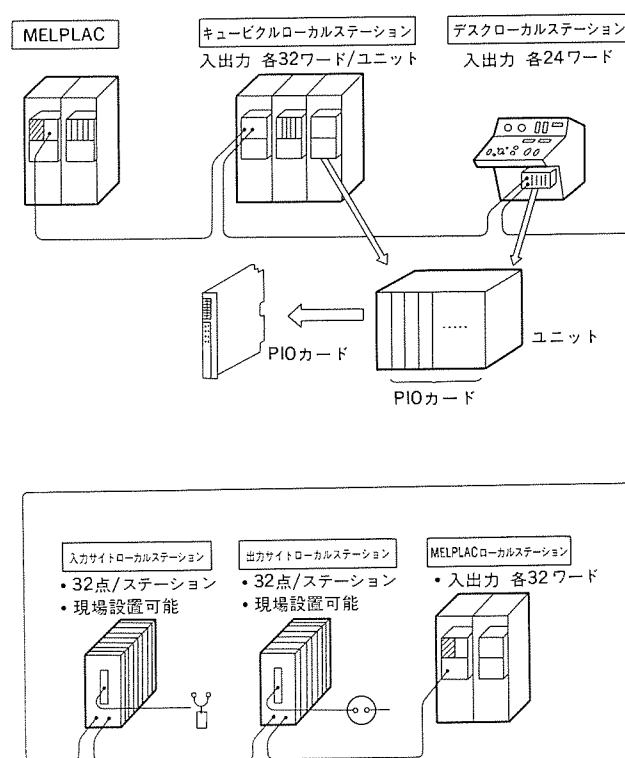


図 7. 《MELPLEX》 ローカルステーション

表 7. 《MELPLEX-510》主仕様

ローカルステーション数	128 台 (max)
ステーション間距離	2 km (max)
総 延 長	2 km (max)
通 信 形 態	1 : N 通信
信 号 伝 送 方 式	時分調多重伝送方式 (サイクリック伝送)
信 号 伝 送 数	入力 1,024 点, 出力 1,024 点
繰 返 し 伝 送 周 期	15 ms 以下
伝 送 路	3 心シールドケーブル
伝 送 路 構 成	マルチドロップ
誤 り 制 御	2 連送反転照合+パリティ

ことを第1の目的として部品選択, 使用基準, スクリーニング, エージングなどにより高信頼性を心掛けている。

しかし, 万一の故障発生に備えて, データウェイやマルチシステムによるバックアップ及びMTTRを短縮する方法を考慮している。ここではMTTRを短縮する対策の具体例について紹介する。

MTTRの短縮には故障部位の指摘を早急に行う必要がある。故障部位の指摘ができれば, 予備カードとの交換により容易に復旧できる。《MELPLAC-550》では, 故障部位指摘のための自己診断や故障表示など故障検出の充実もさることながら, 故障検出を補完するシステムにも各種配慮をしている。

6.1 エラーガイダンス

CPUで検出された各種エラーを故障発生部位と故障発生順序とともに記憶しておき, 主にハードウェア故障の原因を究明する。プログラミングパネルのCRT画面の表示例を図8に示す。

6.2 ブランチトレース, 割込トレース

ソフトウェアの故障解析には, 誤動作発生時のプログラム実行経路を知ることが重要課題であることが経験的に知られている。《MELPLAC-550》は分岐発生場所, 割込発生場所を記憶し, プログラミングパネルに表示することによりプログラム実行経路を確認することができる。

6.3 故障部位の追求

ハードウェアの故障の大部分は, カード単位についた故障表示ランプにより判断することができるが, プラント側のセンサ, 信号ケーブルなどプラント側に発生した故障については, 最終出力の誤動作という形で現象化される。《MELPLAC-550》では, プログラミングパネルの強力なモニタ機能及びトレース機能によって, 誤動作の原因がハードウェアであるかソフトウェアか, またプラント側であるか否かを容易に判定できる。

6.4 分散化システムにおける故障診断の配慮

制御システムが分散化するに従い, 広範囲に分散した制御装置の情報

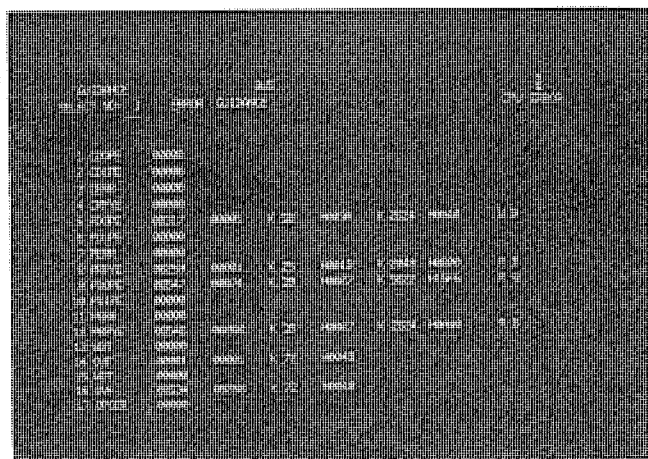


図 8. エラーガイダンス

を総合的に判断して故障診断を行わねばならず, 保守性を十分に考慮したシステムとせねばならない。すなわち, 分散化システムでは,

- (1) 故障情報の集中化
- (2) 故障の局在化と可視化
- (3) 故障情報の集積による故障発生部位の判定

を考慮する必要がある。《MELPLAC-550》システムにおけるこのような故障診断をデータウェイを例にとって解説する。

- (1) 故障診断用ステーションを設け全ステーションの状態を収集し一括表示する。
- (2) 故障診断用ステーションが収集したデータを定期的に検査を行いデータを蓄積する。
- (3) 機能ブロックごとに内部状態表示, 故障表示ランプを設けるなどの機能を持たせ, 分散化システムの保守に対処している。

7. む す び

最近のプラントコントローラの動向と, 最新のプラントコントローラである《MELPLAC-550》について述べた。紙面の都合で一部言い尽くせぬ部分もあることはお許し願いたい。

プラントコントローラはニーズとシーズの産物である。我々はエレクトロニクス技術の進歩によるシーズを追及し, 顧客のニーズを吸収し, 最適なDDCシステムの前進に全力を尽くしていきたい。

参 考 文 献

- (1) 千葉, 山内ほか: 三菱電機技報, 51, No. 3, p. 171 (昭52)
- (2) 真鍋, 山下ほか: 三菱電機技報, 51, No. 3, p. 176 (昭52)
- (3) 三品ほか: 三菱電機技報, 56, No. 6, p. 35 (昭57)

《MELPLAC-300》制御監視トータルシステム

片岡猪三郎*・重岡文昭*・江上憲位*・故島利美*・桜井治夫*

1. ま え が き

最近のエレクトロニクス技術及びソフトウェア技術のめざましい進歩は我々の社会システムに一大変革をもたらしている。一方、量から質への転換と高齢化する人的構造を背景にした生産工場では諸条件を踏まえた最適な設備投資、システム作りにより生産性の向上を追求することが急務である。

このような環境の中で“システムへの人のかかわり合い”に焦点を絞って製作した制御装置《MELPLAC-300》の概要について説明する。

2. 《MELPLAC-300》の基本設計思想

《MELPLAC-300》は電気制御を主体としながらも計測制御、データ制御の分野への適応をも兼ねた新しいDDC (Direct Digital Controller) 装置である。更に《MELPLAC-300》は電気制御装置として、他の計測制御装置及びデータ制御を担うコンピュータと有機的に結合できるネットワークを有し、完全な機能分散システムを構成できる。

図1.(a)が機能融合システムで《MELPLAC-300》のスタンダードの機能であり、図1.(b)は電気制御装置としての役割を有する《MELPLAC-300》と他の機能を分担する装置との機能分散システムの例である。また更には電気制御、計測制御、データ制御に《MELPLAC-300》3ユニットをそれぞれ機能分担させるセルフ・トータルシステムのネットワーク構成もできる。

このように《MELPLAC-300》は従来の《MELPLAC》シリーズをハードウェアの側面、ソフトウェアの側面から更に発展させたアドバンスドコントローラとして製品化したものであり以下その基本設計思想を述べる。

2.1 高信頼性・高保守性を追求

LSIから更にVLSIへと第4、5世代に突入したマイクロエレクトロニクスの発展により、ますますハードウェア的に高密度化と高速性が可能となった。その結果部品点数の大幅な削減を生み、物理的に信頼性向上へ貢献する。その反面高い専門性を要求され、その信頼性テスト及びその保守性に高度化が必要となる。そういう背景に立って《MELPLAC-300》は固有の信頼性向上はもちろん、システム上の信頼性向上を、保守の面では最終ユーザーが自身で万一の故障を発見で

き、更にはその故障の履歴も認識できるハードウェアシステムを提供するものである。

2.2 ソフトウェアの生産性向上を追求

ソフトウェアの危機が叫ばれて久しいが、ソフトウェアの需要が次第に高まり、その供給先であるソフトウェアエンジニアの不足はますます深刻化し、業界共通の最大の悩みとしてクローズアップされている。その対策として、①文章化、②プログラムのモジュール化、③プログラムの構造化、④高位言語化、とソフトウェア自身の現在の問題点をテーマに、その対策が各ソフトウェア製作部門で研究されており、ますますその技術範囲が拡大されているのが実情である。

ソフトウェアの改革はそれ自身今後も必要としても、現実、ソフトウェアのエンジニアが絶対的に不足している実態を緩和しなければならない。《MELPLAC-300》ではその現実を踏まえ、一般の素人(ソフトウェアでない)の人が取扱えることをねらって専用高位言語(POL)を開発した。それはソフトウェアの信頼性及び生産性向上の手段としてデータ中心の考え方を命令やハードウェア・アーキテクチャに埋込み、プログラムを単に入出力間のデータの流れとして捕える可視性(Visibility)の高い言語体系となっている。

2.3 システムの融通性・拡張性の向上を追求

今後ユーザー側の求めるコントローラは変遷の著しい時代とはいえず、将来にわたって十分使用価値が見いだされるものでなくてはならない。そのためには今後出現してくるであろう種々の機能ユニット、例えば強力なパワーを発揮するパーソナルコンピュータ及び各種OA機器などとの結び付きを当然要求してくる。しかもハードウェアのコストダウン化が図られ、機能分散化が進み、機能の結合度によりアレープロセッサ(完全結合)、マルチプロセッサ(密結合)、ローカルネットワーク(疎結合)としてのシステム作りが顕著になってくると思われる。

こうした予想される将来の環境に対し《MELPLAC-300》は、ソフトウェア指向形のアーキテクチャを有し、抽象データ形の採用による異なる機器間のデータリンク及びマイクロプログラム方式により、要求される処理に合ったコントローラの実現ができ融通性に富んだシステムを提供できる。

3. 《MELPLAC-300》の特長

2章の基本設計思想に基づいた《MELPLAC-300》の特長をまとめたものが表1.である。

また《MELPLAC-300》の代表的適用例を図2., 図3.に示す。図2.は《MELPLAC-300》をDDC装置として分散設置し、ブロックごとにオペレーションを介して計測監視し、更に上位コンピュータで全体の管理を行う階層システムの例である。図3.は《MELPLAC-300》及びCRT端末装置を2系統保有し、通常は系統ごとの運転及び監視設定を行いいずれかの系統故障時には正常系統がバックアップするシステムであり、更に系統内で中枢となるCPU、メモリのバックアップも備えたシステムの例である。

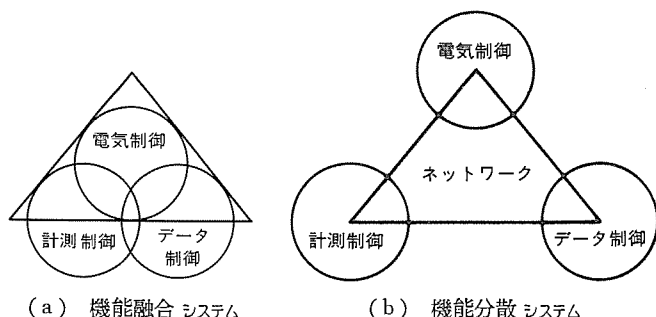


図1. システム構成

表 1. 《MELPLAC-300》の特長

基本思想	具体的項目	内 容
高 信 頼 性 高 保 守 性	ハードウェア固有の信頼性向上	LSIを駆使したシンプルなハード構成及び品質管理の強化
	バックアップシステムと並列運転	CPU,メモリの各ハードウェア対応のバックアップ及びCPUの8台マルチ運転
	故障診断の充実	ハードウェアユニット対応の故障表示
	故障内容の履歴	万一故障時の故障の経歴をCRT付プログラミングパネル(CRT-PP)で表示(エラーガイダンス)
	プロセス側の故障診断	CRT-PPを使ってオンラインの実行状態及びプロセス相互間のデータ履歴表示
ソフトウェア の生産性向上	シーケンス制御のソフトウェア	専用言語(POL)によりシーケンス図面対応の直接プログラミング、メンテナンス
	DDC (アナログ処理など) 制御のソフトウェア	専用言語(POL)によりフローチャートからの直接プログラミング、メンテナンス
	データ処理制御のソフトウェア	データの収集、分散、修飾、命令によるデータブロック転送、繰返し演算
	CRT-PPの機能活用	豊富なモードを使ったプログラム編集、プログラムフローの追跡、割込追跡など効果的なソフトデバッグ
	サポートソフトウェアシステム	オフライン上位コンピュータによるプログラムのチェック編集、自動作図
システム融通 性拡張性の向上	リモート入出力装置	配線工事の大幅削減、入出力の分散設置電気式/光式いずれも可能
	周辺機器と汎用言語の応用	プリンタ、タイプライタでのデータロギング、アラームロギング機能汎用BASIC言語による任意の画面表示
	データ伝送による分散処理機能	パーティライン伝送(狭域)、ループ伝送(広域)による1:N及びN:N通信 電気式/光式可能
	標準インタフェース	RS-232C, カレントループ

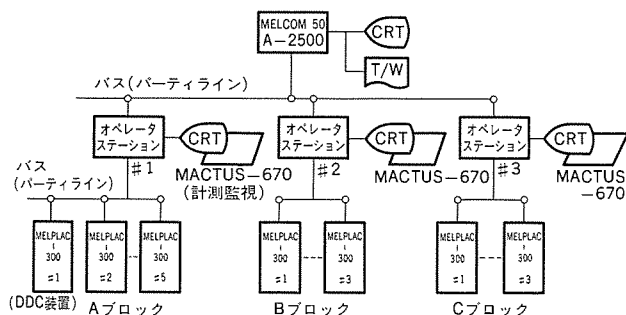


図 2. 狭域分散形 パネルレス 計測制御 システム

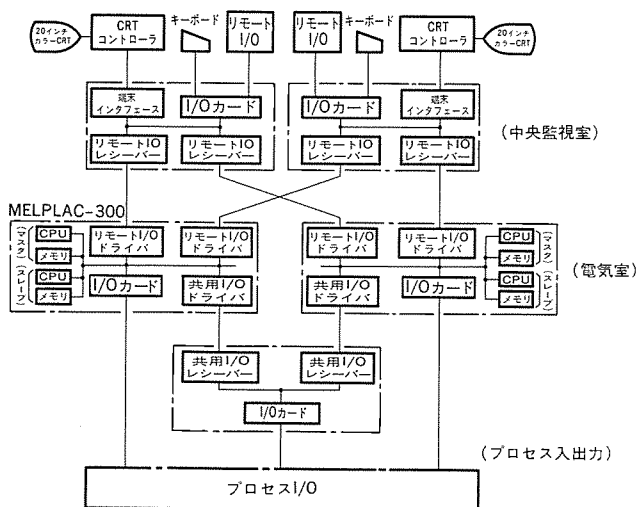


図 3. バックアップ 制御構成図

4. ハードウェア

《MELPLAC-300》のハードウェア構成を図 4. に、制御盤実装例を図 5. に示す。

4.1 CPU 部

高速ビットスライス形マイクロプロセッサを採用し、マイクロプログラミング方式による高速演算を行う。これはプラント制御向け高位言語によるビット演算、ワード演算の同時処理を行い、シーケンス演算、DDC演算はもちろんCRT監視システムをも構成できるコントローラの中核部であり、異常時の再試行機能を持っている。またタイマ150点、システムクロック2点を内部に実装している。

なお、CPU前面には、電源ON、クロックエラー、温度異常、アドレス、データのパリティエラー、無応答エラー、ロジックエラー、自己診断エラー、軽故障などCPUに関する状態がすべてランプ表示される。(図 6)

4.2 メモリ部

プログラム8Kワード、データ4Kワードのカード単位からなり、最大2枚（メモリのバックアップ構成時には4枚）まで実装できる。

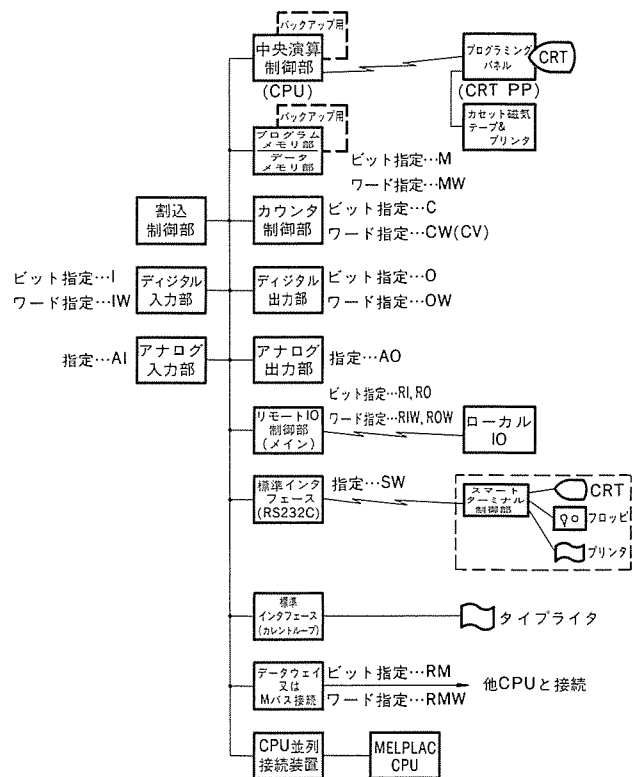


図 4. 《MELPLAC-300》ハードウェア構成

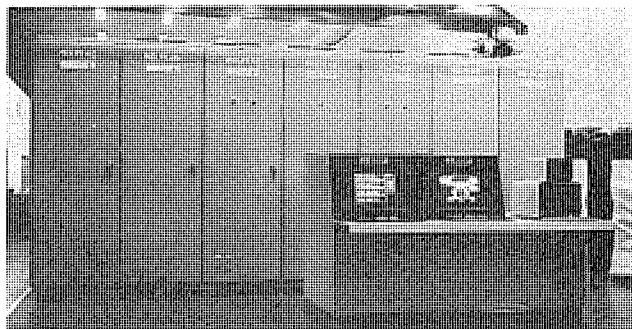


図 5. 制御盤構成

表 2. ハードウェア仕様

演算制御部	演算方式 ワード処理 ビット処理		ソース指定によるワード/ビット処理制御 2進並列、固定小数点演算、1ワード=16ビット シーケンシャル演算	
	制御方式 命 令		マイクロプログラミング方式 49種	
	演算速度		加減算 3 μ s(イミディエイト) 6 μ s(直接ソース) 乗除算 13~21 μ s ビット論理演算 6 μ s	
	割込制御 レベ 要 因		割込要因自動判別方式 3レベル 6点 (H/W異常処理) エラーレベル 2点 (システムクロック) ハイレベル 最小 10ms 8点 (周辺機器用) } ローレベル 16点 (カウンタ用) 32点 (入力用)	
	サブルーチン		4重ネスト処理まで可能	
	インデックス修飾		インデックスレジスタ、2ワード (X, Y) 装備	
	メモ リ	種 類	ICメモリ バッテリバックアップ 電圧低下検知	
		容 量	プログラムメモリ 最大 16Kワード(24+1パリティビット/ワード) データメモリ 最大 8Kワード(16+1パリティビット/ワード)	
	タイ マ	方 式	プリセットダウンカウンタ方式	
		点 数	150点 (CPU内蔵)	
周辺装置	デバ ッ グ 装 置	時 限 値	1,638.3s (約 27分) 最大	
		インクリメント	100ms	
	ロ ガ ー	方 式	比較回路付プリセット可逆カウンタ方式	
		点 数	256点最大	
	タイ プ ラ イ タ	16ビット	-32,768~+32,767	
		周 波 数	10kHz 最大	
	デバ ッ グ 装 置		CRT付プログラミングパネル、カセット磁気テープ プリント装置	
	モニタ(スマートターミナル)		CRT (12インチ, 20インチ, モノクロ/カラー)	
	ロ ガ ー	ブ リ ン タ	JIS 128文字, ASCII 96文字+キャラクタ 64, 80 /132文字/行	
		タイ プ ラ イ タ	136文字/行, 80文字印字/秒	
入出力仕様	デ ィ ジ タ ル 入 力	温 度	0~50°C	
		湿 度	10~90% RH (結露無し)	
	デ ィ ジ タ ル 出 力	電 源	AC 100/110V+10%~-15%, 50/60Hz	
		実 装 点 数	ワード	最大 256ワード (16ビット/ワード)
	ア ナ ロ グ 入 力	ビ ッ ト	最大 4,096点 (ワードと共通)	
		種 類 と 仕 様	プロセス入力カード一覧表参照	
	ア ナ ロ グ 出 力	実 装 点 数	ワード	最大 256ワード (16ビット/ワード)
		ビ ッ ト	最大 4,096点	
	割 込 入 力	種 類 と 仕 様	プロセス出力カード一覧表参照	
		実 装 点 数	最大 256点	
入出力仕様	ア ナ ロ グ 入 力	変 換 精 度	$\pm 0.3\%$ 高精度形 $\pm 0.1\%$	
		変 換 値	0~5V \rightarrow 12ビット 4~20mA \rightarrow 12ビット 10V \rightarrow 12ビット	
	ア ナ ロ グ 出 力	実 装 点 数	最大 256点	
		変 換 精 度	$\pm 0.3\%$	
	割 込 入 力	変 換 値	12ビット \rightarrow 0~5V 12ビット \rightarrow 4~20mA 12ビット \rightarrow 10V	
		点 数	最大 32点	
	割 込 入 力	機 能	割込要因自動判別方式	
		機 能	割込要因自動判別方式	

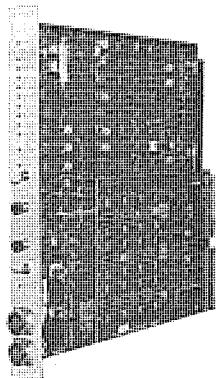


図 6. CPU 外観

CMOS RAMを採用し、電源 OFF 時の記憶保護はバッテリーで行っている。また RAM/ROM 切換機能、ROM 領域書込保護機能、パリティチェック機能、バッテリー電圧低下検出機能を持ち前面の表示ランプで確認できる。なおメモリ内容は、無通電状態でも1年以上保持できる。

4.3 割込入力部

シーケンス制御におけるサイクリック走査のほかに、外部要因によるプログラム優先制御が可能で、外部割込最大32点まで実装できる。割込要因に応じたプログラム先頭番地及びレジスタ類の退避は割込信号に基づきマイクロプログラムで処理する。なお、割込入力、カウンタ入力、アナログ入出力、デジタル入出力カードなどのプロセス入出力カードについては、カードごとにエラー状態が表示される。

4.4 カウンタ入力部

計数値、比較値、起動指令、ON信号とともにプログラムで読出設定できる可逆カウンタであり、また計数値、比較値はカスケード接続して16ビットから32ビットへ拡張することができる。そのうち16点は割込制御を行う。

4.5 アナログ入力部 (AI)

8点/カード、又は32点/カードのアナログ入力を取り込み、入力選択、A/D変換を行う。8点カードには1~5V、4~20mA、 ± 10 Vの標準的なアナログ入力のほかに測温抵抗体などのセンサ入力を直接取扱うことができる。なお、アナログ用電源は内蔵されている。

4.6 アナログ出力部 (AO)

アナログ用電源が内蔵されており、8点/カードのデータ保持器とD/A変換器で構成し、1~5V、4~20mA、 ± 10 Vの標準的なアナログ信号を出力する。

4.7 デジタル入力部 (DI)

リミットスイッチ、操作ディスクの押しボタンなど直接プロセス側から送られてくる信号を入力するもので各信号のON/OFF状態を前面のランプ表示で確認することができる。32点/カード 64点/カードにより従来に比べ実装密度が向上している。

4.8 デジタル出力部 (DO)

コンタクタ、バルブ操作、ランプ表示などプロセス側への制御信号を出力するもので各信号のON/OFF指令を前面のランプ表示で確認することができる。DIカードと同様実装密度が向上している。

4.9 リモート入出力部 (RIO)

最大12ステーションのリモート入出力を分散設置し、ケーブル費用及び配線工事費の大幅な削減が可能である。1ステーションあたり入出力共に64ワード(1,024点)まで実装でき、アナログとデジタルの混在が可能である。なおRIO遠隔部で使用するアナログ、デジタル入出力カードはCPU近接で使用するものと同一である。

4.10 データリンク

狭域ネットワークにはMバス接続、また広域及び高速応答性を要求されるネットワークにはループ接続のデータウェイにより1:N及びN:Nのデータリンクができる。

4.11 周辺インタフェース部

周辺機器との標準的なインタフェース(I/F)として、非同期式EIA RS 232C I/FカードとカレントループI/Fカードが準備されている。カレントループI/Fは比較的遠隔にあるタイプライタなどと接続する時使用し、その他はRS 232C I/Fを使用する。またRS 232C I/Fを通じてBASIC言語をサポートするCRT表示装置“スマートターミナル”と接続でき、すべて高位言語によるCRT制御監視システムを構成できる。な

表 3. データリンク仕様

	データウェイ	Mバス
伝送路形状	ループ形状	バス形状
ステーション間距離	2 km MAX	1 km MAX
総延長距離	256 km MAX	1 km MAX
伝送速度	光式の場合 15 Mb/s 電気式の場合 6 Mb/s	500 Kb/s
通信ステーション	120 台 MAX	8 台 MAX

お、前節の Mバス I/F、本節の周辺 I/F カードには、《MELPLAC-300》CPU の負荷の軽減と応答性の向上のためマイクロプロセッサを内蔵し、インテリジェント化されている。

5. マンマシンインタフェース装置

《MELPLAC-300》では マンマシンインタフェース装置として CRT 付プログラミングパネル (CRT-PP) 及びカセット磁気テーププリンタ装置 (MTPR) を準備している。

5.1 CRT 付プログラミングパネル (CRT-PP)

CRT-PP はプログラミング及びモニタリングなどを能動的に処理でき、かつオンラインの CRT 端末としてアプリケーションプログラムで使用できる専用のマンマシンインタフェース装置である。また計算機の知識を一切必要とせず現場でシステムデバッグ、メンテナンスの諸機能を能率的に行うことを目的とし、可搬性及び CPU とのオンライン着脱など操作性を配慮した装置である。CRT-PP は次の機能を実行する。

- (1) プログラム及びデータの読出し、書込み
- (2) プログラムのシングルステップ実行 (1 命令ごとの動作確認)
- (3) プログラムサーチ (任意のプログラムを連続実行する機能)
- (4) ソースサーチ (指定されたソースを含んでいるプログラムを探索する機能、索引)
- (5) プログラムインサート・デリート (プログラムを任意の位置に挿入及び任意のプログラムを削除できるプログラムの編集機能)
- (6) オンラインプログラムモニタ (オンラインでのプログラム及びそれに付随する各種データの監視機能)
- (7) オンラインソースモニタ (オンラインでの指定された任意のソースを含むプログラム及びそれに付随する各種データの監視機能)
- (8) オンラインプログラムトレース (オンライン時指定されたプログラム実行結果の軌跡表示機能)
- (9) オンラインソーストレース (オンラインでの指定された任意ソースのデータ内容の軌跡表示機能)
- (10) オンラインチューニング (オンラインで指定された出力ソースに任意のデータを書込む機能)
- (11) ガイダンス (割込み、分岐、システムエラーの履歴を表示し、システムのデバッグ及び故障復旧の効率を向上する機能、またメモリ使用状況表示、メモリクリアなどプログラムメンテナンスの効率を向上する機能)
- (12) オンラインユース (オンラインで CRT-PP をメンテナンスツールとしてではなく CRT 端末表示装置としてアプリケーションプログラムで使用する機能)

図 7. に CRT-PP の外観を示す。(図 8.)

5.2 カセット磁気テーププリンタ装置 (MTPR)

MTPR はプログラム及びデータを保持するメモリのハードコピーの機能を有し、プログラムとデータの保存、交換、修正、照合及びプログラム作成

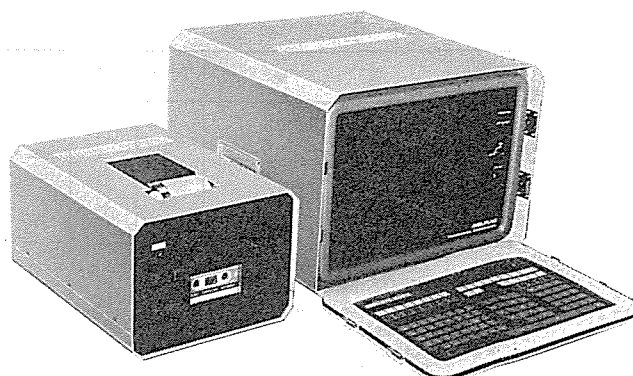


図 7. MTPR (左側), CRT-PP (右側)の外観

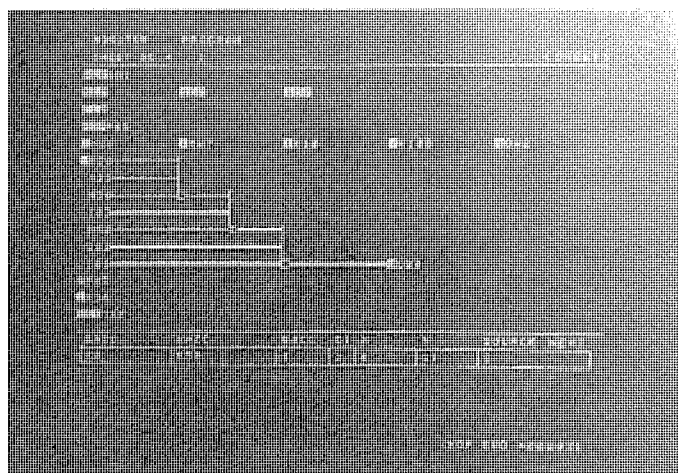


図 8. CRT-PP オンラインモニタ表示例

時の操作記録、データとプログラムの記録、保存に用いられる。またオンライン中では、アプリケーションプログラムにより MTPR は制御できログ用プリンタ及びオンラインデータの外部記憶装置として使用できる。図 7. に MTPR の外観を示す。

6. ソフトウェア

プラントコントローラ《MELPLAC-300》が制御監視機能を実行処理するためには、論理演算、算術演算及びこれらの混合とデータ処理機能を有効にかつ容易にプログラムできる必要がある。

6.1 制御向き高位言語の採用

一般の計算機は算術演算を主体に作られているため、シーケンス制御にそのまま使用する場合、プログラムのコントロールフローが複雑でかつデバッグが困難である。そのため計算機では高位言語の導入によりこの問題を回避しているが、実行時間やメモリ容量の犠牲のほかに言語プロセッサを抱えなくてはならない問題があった。

《MELPLAC-300》はその点を考慮し表 4. に示す命令を有し、1 ビットの論理演算 (ビット処理) と 16 ビットの算術演算 (ワード処理) の両者を備え、全く独立に処理できる。更に混合演算に有効に対処するため数値の大小の比較命令、数値情報を選択する条件ロード命令、プログラムの流れを選択する条件分岐命令などを設けることにより混合演算を単純なフローで実現できる。また監視機能は効率的なデータ転送命令、インデックス機能、周辺装置制御命令を設けることにより効率よくプログラミングできる。

命令に対してオペランド部はソースで表現しハードウェアとソフトウェアが 1 対 1 で結びつけられ、プログラム上の入出力情報を直接制御対象と

表 4. 命 令 一 覧

分 類	シンボル	機 能	ワード 処 理	ビット 処 理	制 御
転 送	;	Load	○	○	—
	\$	Invert Load	○	○	—
	,	Conditional Load	○	—	—
	SET	Set	—	○	—
	RST	Reset	○	○	—
	→	Store	○	○	—
	LON	Latch On	○	○	—
	LOF	Latch Off	○	○	—
	TO	Set Destination Pointer	○	○	—
	FROM	Set Source Pointer	○	○	—
	#	Gather	○	○	—
	##	Scatter	○	○	—
	BMV	Block Move	○	—	—
	PL	Program Load	○	—	—
	PS	Program Store	○	—	—
算 術 演 算	+	Add	○	—	—
	-	Subtract	○	—	—
	*	Multiply	○	—	—
	/	Divide	○	—	—
論 理 演 算	AND	Logical AND	○	○	—
	ANI	Complement AND	○	○	—
	OR	Logical OR	○	○	—
	ORI	Complement OR	○	○	—
	EOR	Exclusive OR	○	○	—
分 岐 ・ 比 較	B	Unconditional Branch	—	—	○
	BY	Branch if YES	—	—	○
	BN	Branch if NO	—	—	○
	CAL	Subroutine Call	—	—	○
	RTN	Subroutine Return	—	—	○
	>	Compare Greater than	○	—	—
	=	Compare Equal	○	—	—
	<	Compare Less than	○	—	—
特 殊 命 令	CI	Common Interlock	—	○	—
	CIR	Common Interlock Reset	—	○	—
	SL	Logical Shift Left	○	—	—
	SR	Logical Shift Right	○	—	—
	PLS	Positive Differential	—	○	—
	INC	Increase Index	—	—	○
	HI	Peripheral Occupation	○	—	—
	BYE	Peripheral End	○	—	—
	TM	Interrupt Terminate	—	—	○
	NOP	No Operation	—	—	○
	HD	Hardware Diagnostic	—	—	○
関 数 命 令	DTB	Decimal To Binary	○	—	—
	BTD	Binary To Decimal	○	—	—
	ABS	Absolute	○	—	—
	LIMIT	Limiter	○	—	—
	DBND	Dead Band	○	—	—
	FGEN	Function Generator	○	—	—

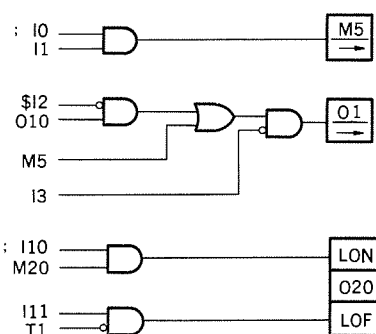
して容易に判断できるかたちとなっている。プロセス入力、プロセス出力、一時記憶（データメモリ）、タイマ、カウンタ、直接数値が一目りょう（瞭）然に判断できるシンボルとそのハードウェアの位置を示すナンバーによってソースを構成し、更にシンボルの変化により1ビットデータと16ビットデータを区別して取扱うことができる。

6.2 高位言語の直接実行

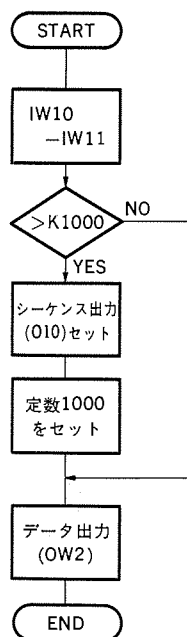
シーケンス制御やDDCを受持つ《MELPLAC-300》は現場で制御システムの運転、調整を行いながらプログラムのデバッグ、修正を行う必要がある。このため高位言語を直接機械語として実行できるアーキテクチャを採用している。

6.3 プロセスとの結合

計算機の入出力操作は、入出力プログラムやモニタなどのベシックソフトウェア及び計算機内で扱われるプロセス情報の名称及びアドレスなどの知識を必要とするが、《MELPLAC-300》では制御対象とソフトウェアアドレス（オペランド）が1対1に対応しているので入出力操作はメモリやその他のロード、ストアと全く同一の命令で実行できる方式とし



(a) シーケンス制御(論理記号方式)



プログラミング

; IW10-IW11>K1000 BN *3
SET O10
; K1000→OW2

(b) 算術演算

図 9. プログラミング例

た。

6.4 プログラミング例

(1) シーケンス制御のプログラミング例

図 9. にプログラミング例を示す。

7. む す び

以上《MELPLAC-300》の基本設計思想に基づくハードウェア、ソフトウェアの概略を述べた。究極は《MELPLAC-300》を通して人間（オペレータ）との間のアーキテクチャ及びソフトウェアでの大きな溝を解消すべく、メンテナンスギャップ及びセマンティックギャップをより小さくすることである。その結果、マイクロエレクトロニクスによる高付加価値化の傾向に対応して我々がハードウェアとソフトウェアの信頼性確保、及び保全性向上ができるものと信じ今後更にまい進したいと考えている。

参 考 文 献

- (1) 岩永, 片岡ほか: プラントコントローラ《MELPLAC》10, 三菱電機技報, 53, No. 2 (昭54)
- (2) Micro Computer Forecast Volume 2: Grostic Concept Inc.

電気クッキングヒーター“マイコンタッチコントロール式”

日比野浩一*・鳥山建夫*・岩松孝寿*

1. ま え が き

欧米においては、以前から厨房用に電気を使うことが主流となっている。我が国では、特に煮炊きの面でガスが中心的役割を果たしてきた。

近年、集合住宅などにおいては、エネルギーの選択に際して経済性、便利性のほか、特に安全性、無公害性、供給の安定性などが大きくクローズアップされ、それらの点を含めトータルな評価が要求されてきている。最近建物の機能を支えるエネルギーを電気でまとめた全電化、あるいは厨房電化のマンションの建設が活発化し注目を集めている。

このような要望にこたえるため、厨房の加熱調理器の中心であったガスコンロに代わるものとして、シーズヒーターを用いた電気の本格的な加熱調理器の電気クッキングヒーターを開発したのでここに紹介する。今回開発した商品の主なねらいは次のとおりである。

- ・ 将来を先取りした商品であること。
- ・ 操作性、清掃性に優れていること。
- ・ 安全性への配慮を重要視したこと。

2. 仕様と特長

この電気クッキングヒーターは、マイコン搭載のタッチ「キー」式で、従来この種の商品としては業界で初めてエレクトロニクス技術を応用し、キッチン全電化への「進火」とも言える新しい商品である。主にコンロ台の上にのせて、流し台やカウンタなどと同一レベル高さで使用できる。また、今話題のシステムキッチンへの組込みにも対応できる本格的なものである。

2.1 仕様

機種はトップヒーターが2口と3口の2機種で、共にグリルが付いたキャビネットタイプとした。仕様を表1に、3口機種CR-7300形の外観を図1に示す。

2.2 特長

(1) 操作性に優れ清掃しやすいタッチコントロール式

ヒーターの「入」「切」や「熱量調節」は、すべて前面パネルのタッチ「キー」を軽く押すだけで操作ができる。また前面は、ダイヤルやスイッチ類の凹凸を極力なくしたので清掃しやすい。

(2) 一目で火力が分かる熱量インジケータ付き

すべてのヒーターの火力は、10段階に比例制御ができる。その時の火力は、前面パネル上部のインジケータにその段階に応じた帯状の長さで発光表示され使用火力が一目で分かる。

(3) 配慮された安全装置

ガスの元栓に相当する電源スイッチと各ヒーターへの通電を制御するタッチ「キー」との二重スイッチ方式、火力を固定できるパネルロックスイッチや万一グリルを長時間空焼した場合に本体を異常加熱から守るグリル空焼防止サーモスタットを付け、安全面にも十分配慮した。

(4) 使いやすい引出し式ワイドグリル

ガスコンロなどの縦長のグリルより横幅を広くして魚を横に並べられる

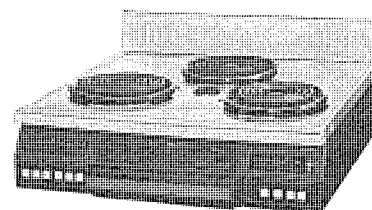


図1. CR-7300形クッキングヒーター外観

表1. 仕様

形 名 (タイプ)		CR-7200 形 (2口, キャビネットタイプ)	CR-7300 形 (3口, キャビネットタイプ)
電 源 電 圧 (V)		単相 200	
消 費 電 力 (kW)		3.5	4.5
ヒ ー タ ー 個 数		トップヒーター(2個)+グリル	トップヒーター(3個)+グリル
ヒーター形式及び、消費電力	左ヒーター	渦巻き形シーズヒーター, 直径 165 mm, 2 kW	
	右ヒーター	渦巻き形シーズヒーター, 直径 150 mm, 1.5 kW	
	中ヒーター	渦巻き形シーズヒーター 直径 150 mm, 1 kW	
	グリルヒーター	山形シーズヒーター, 1 kW	
熱量調節の範囲	方 式	マイコン, タッチコントロール式(「入」「切」及び10段比例制御)	
	左ヒーター	200 W~2 kW	
	右ヒーター	150 W~1.5 kW	
	中ヒーター	100 W~1 kW	
	グリルヒーター	100 W~1 kW, 温度過昇防止器付き	
ヒ ー タ ー 切 換 え		右ヒーターとグリルヒーターは切換え使用 (同時使用不可)	中ヒーターとグリルヒーターは切換え使用 (同時使用不可)
電 源 コ ー ド		クロロブレン平形コード 3心, 2.0 mm ² , 長さ 0.6 m	クロロブレンキャンブ タイヤコード 3心, 3.5 mm ² , 長さ 0.6 m
差 込 み プ ラ グ		250 V, 20 A, 3 極 (1 極 接地用) ㊦	250 V, 30 A, 3 極 (1 極 接地用) ㊦
大 き さ (mm)	外 形 寸 法	幅 600, 奥行 550×高さ 250 (バックガード高さ 90 を含む)	
	グリル内寸法	引出し式, 280(幅)×225(奥行)×95(高さ)	
重 量 (kg)		約 12	約 14

ようにし、魚全体の焼け具合を外から見る事ができるワイドグリルの採用と、操作性の良い引出し式で魚の反転、取出しを容易にした。

(5) 料理のレパートリも豊富

トップヒーターは、両機種とも 2 kW ヒーターを標準装備して、いた(炒)める、揚げるなどの強火料理から、おでん、シチューにいたるとろ火料理まで幅広くこなせる。

(6) プロパンガス並みの維持費

熱効率が 70 % 以上と高いので、維持費はプロパンガス並みである。表2に火力、維持費の比較を示す。

表 2. 維持費比較表

	火 力	湯 沸 か し 時 間	熱 効 率	単位当たり発熱量	単 価	消費熱量/月	維持費/月
電気クッキングヒーター	2 kW (左)	4 分 14 秒	約 70 %	860 kcal/kWh	30円/kWh	75 kWh	2,250 円
	1.5 kW (右)	5 分 38 秒				136.7 kWh	4,101 円
裸 電 気 コ ン ロ (標準タイプ)	0.8 kW	15 分 26 秒	約 48 %				
白 灯 油	2,300 kcal/h	3 分 52 秒	約 57 %	8,300 kcal/l	80円/l	9.55 l	1,176 円
都 市 ガ ス (13 A)	2,300 kcal/h	5 分 32 秒	約 40 %	11,000 kcal/m ³	従量料金 154.72 円/m ³ (基本料金 690 円)	10.26 m ³	1,587 円 (基本料金含まず)
プ ロ パ ン ガ ス				12,000 kcal/kg	247 円/kg	9.41 kg	2,324 円

注 (1) 湯沸かし時間の比較=水 1 L (15°C→100°C) アルミ製手鍋 20 cm 径使用。
 (2) 消費熱量は標準家族 4 人 (大人 2 人, 小人 2 人) に基づいたためやす。
 (3) 白灯油の維持費は予熱, モータなどの電気代を含む。
 (4) 単価は昭和 56 年 4 月現在関東地区。

3. 構造と機能

3.1 ヒーターの構造

ヒーターはすべてシースヒーターを使用している。特にトップヒーターは、

- ・ 高温状態で使用される (750~780°C)。
- ・ 高温状態から煮こぼれ汁がかかり急冷される。
- ・ 塩分, 水分に触れる。

などを考慮し, 特別に耐熱性, 耐食性の優れた高ニッケルクロム鋼のパイプを採用している。発熱線とパイプ間は酸化マグネシアの粉末で確実に電気絶縁し, ヒーターの端末部は絶縁抵抗が低下することのないように耐熱性の封口処理をしている。ヒーターの表面はなべ(鍋)などの底との接触面積を大きくするため平らに成形し, 高い熱効率が得られるようにした。ヒーターの断面構造を図 2. に, 図 3. にヒーターの表面温度特性を示す。

3.2 操作方法

CR-7300 形のパネルの配置と名称を図 4. に示す。

(1) ヒーターの切換え

家庭における煮炊きの料理と魚焼き料理とが同時に行われる頻度は, それほど多

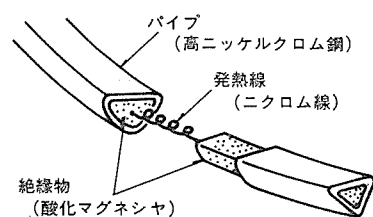
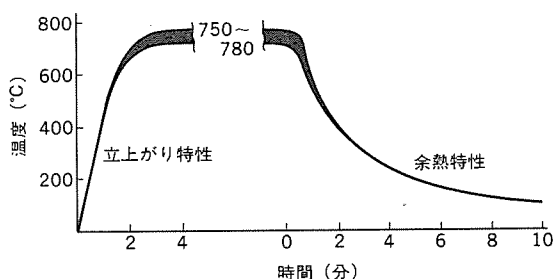


図 2. ヒーター 断面構造図



・ 煮炊きものをせずに通電した場合の表面温度 (室温 25°C)

図 3. ヒーターの表面温度特性

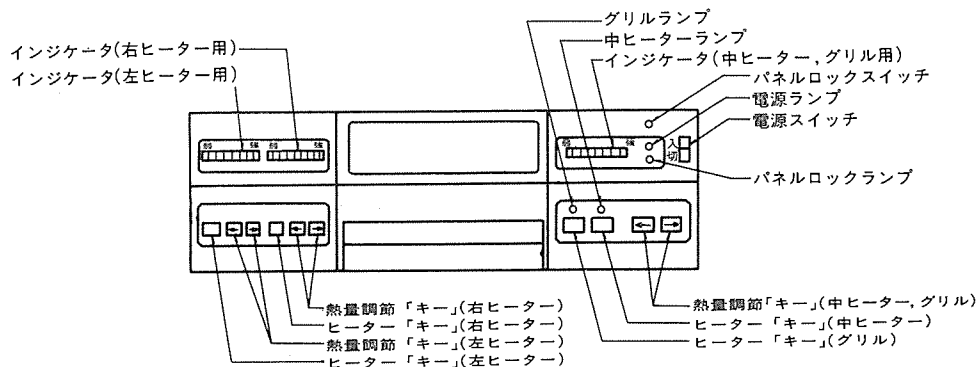


図 4. パネル部の配置と名称

くない。それは, 一般家庭の魚焼き料理の比率が, 調査によれば 30 % 程度と低いことによる。一方, すべてのヒーターが同時使用できるようにするためには, 契約電力もそれ相当にしておかなければならない。そのことは, 使用者にとっても大きなメリットにはならない。したがって各ヒーターを使用する場合の選定は次のようにした。

CR-7300 形 左ヒーター (2 kW)……常時使用可能
 右ヒーター (1.5 kW)……常時使用可能
 中ヒーター (1 kW)……切換え式 (いずれか一方を
 グリルヒーター (1 kW)……選択使用)

(2) スイッチ 操作

- (a) 電源スイッチ: ガスコンロの元栓に相当するスイッチで器体への電源を入・切する (シーソースイッチ)。
 (b) ヒーター 選択スイッチ: 使用するヒーター (左ヒーター・右ヒーター・グリルヒーター又は中ヒーター) (CR-7300) を選択する (タッチキースイッチ)。
 (c) ヒーター 切換えスイッチ: グリルヒーターとトップヒーター (右ヒーター CR-7300) とを切換える (タッチキースイッチ)。
 (d) 熱量調節スイッチ: 各ヒーターの火力を調節する (タッチキースイッチ)。
 (e) パネルロックスイッチ: (b)~(d) の各タッチキースイッチの操作を固定する (プッシュボタンスイッチ)。

(3) 熱量調節「キー」 ([↑] 火力 アップ, [↓] 火力 ダウン)

(a) キーを押し続けると, 約 0.5 秒 ステップ で連続して火力がアップ又はダウンする (インジケータは帯状の発光を延長したり又は縮小する)。また手で操返し押すごとにそれに応じて動作する。

(b) [↓] の「ダウンキー」は, 押し続けても最低 10 % の火力を保持する。

(c) 火力はすべてのヒーターとも 10 段階に比例制御できる。インジケータの目盛とヒーターの表面温度の関係を図 5. に示す。

(4) パネルロックスイッチ

このスイッチを押すとパネルロックランプが点灯し, すべてのタッチ「キー」がロックされる。再度スイッチを押すとロックが解除される。

3.3 インジケータ目盛と火力の関係

インジケータ目盛と火力の関係とその目盛に対する適した料理を図 6. に示す。

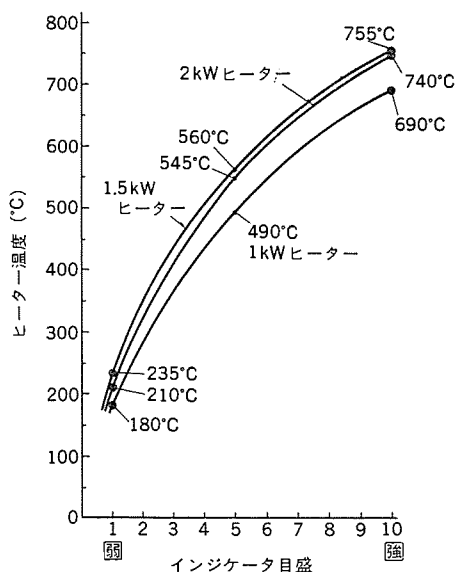


図 5. インジケータ 目盛と ヒーター 表面温度

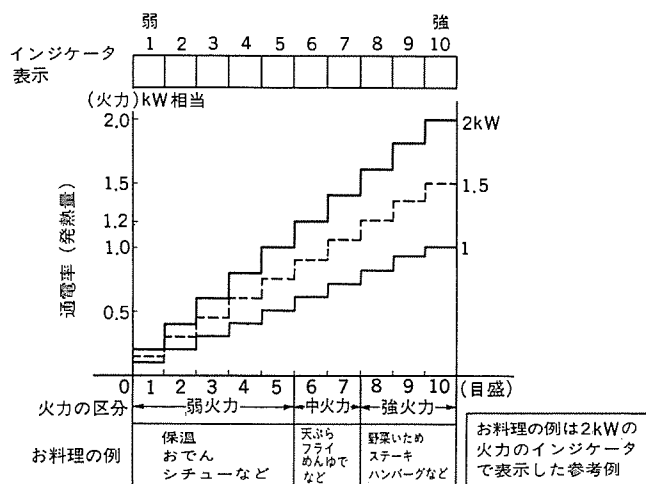


図 6. インジケータ 目盛と 火力の関係

4. 制 御 回 路

ヒーターの制御回路ブロックを図 7. に、動作フローを図 8. に示す。これに基づいて動作説明をする。

(1) 電源スイッチを「入」にする。——電源ランプが点灯する。電源部には電源ラインから侵入するノイズ、雷サージを吸収して制御回路の誤動作及び破壊を防止する保護回路を設けている。

(2) ヒーター「キー」を押す。——インジケータが全発光してヒーターに100%通電していることを示す。

(3) 熱量調節「キー」を押す。——インジケータの表示が押し時間によって発光又は消光して、ヒーターの通電率を示す。

この「キー」は一度押すと一段階ごとに通電率を変えることができ、連続して押すと約0.5秒ごとに通電率を変えることができる。表示部は、デューティ比1/4で発光ダイオードを駆動している。駆動部は、マイクロコンピュータによって指示された時間だけヒーターを電源電圧のゼロ点から駆動する部分である。瞬停保護部は、マイクロコンピュータの電源電圧を監視して電圧低下によりマイクロコンピュータが誤動作するのを防

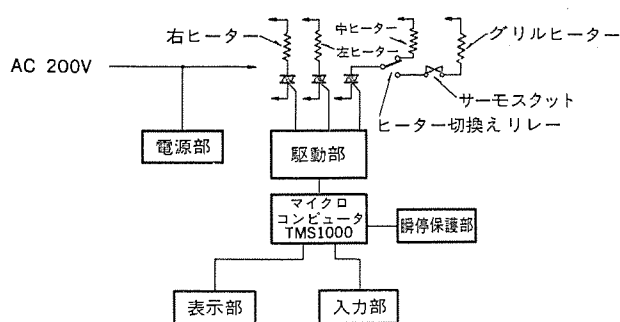


図 7. 制御回路 ブロック 図

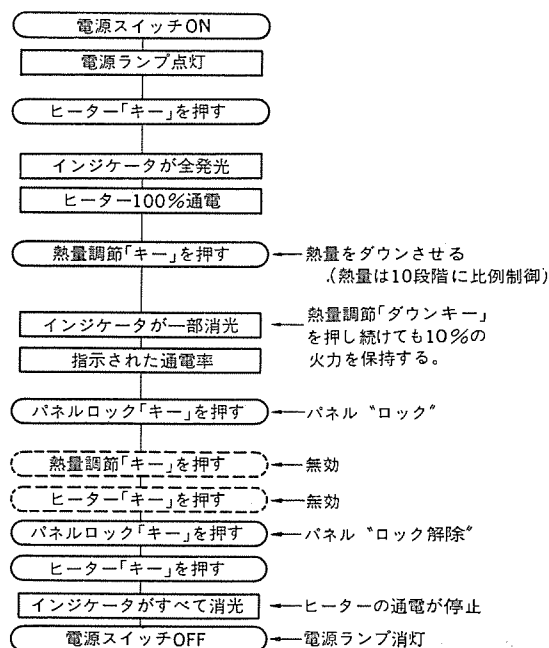


図 8. 動作 フロー

止する。

(4) パネルロックスイッチを押す。——このスイッチを押すとすべての「キー」入力作動はロックされ、パネルロックスイッチを押す前の状態を保持する。再度押すと「キー」入力行動のロックが解除される。

(5) ヒーター「キー」を再び押す。——インジケータの表示が消光してヒーターへの通電が停止したことを示す。

(6) 電源スイッチを「切」にする。——電源ランプが消灯する。なおグリルヒーターだけは、空焼による異常温度上昇を防止する目的でサーモスタットを設けている。

5. む す び

人間の安息の城である住宅の安全性は、何にもまして優先すべきものであり超高層住宅、老人及び身障者対象の住宅、その他特別な条件にある集合住宅などにも今後とも全電化住宅が建設されていくものと考えられる。一方生活の質的向上に伴いキッチンライフをより楽しいものにしたい欲望も高まりつつある。

今後、このような市場ニーズを適確にとらえ、機種系列の拡充と安全性、操作性について一層の向上を図ってゆく所存である。

冷蔵庫内箱用押出連動真空成形システムの開発

馬場 文明*・斉藤 勝**・大村 武**・柏 直**

1. ま え が き

電気機器のライフサイクルエネルギー節減に対しては、使用時の消費エネルギー節減が最も重要となるが、これに加えて、機器を構成する材料への投入エネルギー、機器の製造に投入するエネルギーの節減に対する取組みが重要である。特に家庭用電気品は、ライフサイクルエネルギーに占める材料投入エネルギー、機器製造エネルギーの比率が高く⁽¹⁾、生産台数が膨大な数量となるため、これらのエネルギー節減が非常に重要な開発課題となっている。

プラスチックは、材料特性、成形加工（生産）性、経済性のバランスに優れた材料として電気機器に広く使用されている。このため、電気機器のライフサイクルエネルギー節減に対しては、プラスチック材料の省資材化と成形加工の省エネルギー化が非常に大きな役割を占める。

したがって、プラスチック成形品の最適設計⁽²⁾、プラスチック材料の高機能化⁽³⁾、成形加工の省エネルギー化などの研究開発を積極的に進めている。ここでは、これらの開発の一端として、プラスチックの新しい省エネルギー成形加工法である押出連動真空成形システムの開発と、このシステムを冷蔵庫の内箱成形へ適用した例について紹介する。

2. 押出連動真空成形システム

2.1 プラスチックの真空成形加工

プラスチックの真空成形は、プラスチックの熱可塑性を利用した成形法で、シートを加熱軟化させ、軟らかい状態で型に沿って賦形させ、冷却して成形品を得る成形加工法である。すなわち真空成形では、加熱（軟化）、真空圧による賦形（変形）、冷却（固化）のプロセスで成形加工が行われる。

真空成形法は、大型の成形品を対象としたプラスチックの成形加工法として優れた特長を持ち、電気機器では冷蔵庫、映像・音響機器、照明器具などの構造部品成形に多用されている。真空成形法は、次に述べるように、他の成形法にない利点がある。

- (1) 成形圧力が低いため、設備や型の構造が簡単である。
- (2) 成形加工の過程で材料の延伸配向が起こる。そのため、材料の強度が大幅に向上する。
- (3) 素材としてシートを用いるため、板厚の均一な大型の成形品を短時間で成形することができる。
- (4) 複層シート、発泡シートなどの多種多様のプラスチックシートを成形加工することができる。

ところが従来の真空成形法では、次のような制約があるため、適用範囲が制限される。

- (1) 素材がシートに限定されるため、あらかじめシートの製造が必要である。このため真空成形品には、シート製造のエネルギーコストが加算される。
- (2) 最終製品を得るためには、成形品のトリミング（後仕上げ加工）が不可欠である。そのために、工程が煩雑になるとともに、スクラップ材が発生する。

- (3) シート加熱に放射加熱法を用いるため、温度制御の精度が低く、成形安定性に難点がある。

しかし、これらの課題はいずれも成形プロセスの改良、あるいは新しい真空成形プロセスの開発により改善することが可能と考えられ、これにより真空成形加工の省エネルギー、省資材化と適用範囲拡大を進めることができる。これらの課題に対して、非常に大きな効果を示す新しい真空成形プロセスが、次に紹介する押出連動真空成形プロセスである。

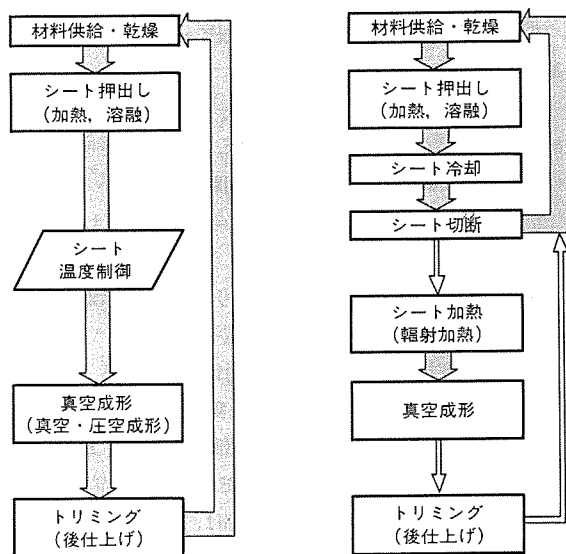
2.2 押出連動真空成形システムのプロセスとその特長

押出連動真空成形システムは、図1.(a)に示すように高温で押出したシートを真空成形温度に温度制御（冷却）した後、連続して真空成形とトリミングを行うプロセスで構成する。次に、各プロセスを順を追って説明する。

- (1) 一定の板厚、幅、速度でシートを連続して押出しする。
- (2) 押出した高温のシートを大気中で冷却（放熱）する。
- (3) シート温度が真空成形温度に到達すると、シートを成形ステーションに送り真空成形を行う。
- (4) 成形品をトリミングステーションに送り、後仕上げ加工を行う。
- (5) トリミングで発生したスクラップ材を細かく粉砕して、材料供給装置へもどす。

実際のシステムでは、これらの全プロセスが連動して同時に進行する。

この押出連動真空成形システムの最も大きな特長は、①シートの加熱軟化に従来の放射加熱に代えて、押出したシートの潜熱を利用する、②材料の移動系路が完全なクローズドシステムを構成する、の2点である。従来の真空成形法（図1.(b)）と比較すると、次の各項



(a) 押出連動真空成形

(b) 従来の真空成形

(実線) : 運動、自動 (点線) : 搬送、運搬

図1. 押出連動真空成形プロセスのブロックダイアグラム

が利点として挙げられる。

- (a) 従来法のシート冷却、切断、再加熱（放射加熱）プロセスを省くことができる。このため、成形加工時の消費エネルギーを著しく削減することが可能となる。
- (b) 全プロセスを連動（自動）化することが容易である。これにより、材料の汚染が起りにくく、材料の有効利用率が向上する。加えて無人運転による省力化ができる。
- (c) 従来、成形時間を制約していた放射加熱プロセスが無くなることにより、成形時間が短縮され生産性が向上する。

しかし、この新しいシステムを電気機器の部品成形に適用するに当たっては、次に述べる技術課題の取組みが品質と信頼性を確保する上で重要となる。

(1) 高精度シート温度制御

真空成形では、成形品材料強度が成形温度に依存する。このため、成形シート温度の制御に高い精度が要求される。

(2) 材料の劣化防止

押出されたシートは、成形するまで高温で保持する。プラスチックは、高温下で酸素と反応し（酸化）、物性が低下する。

そこで、このシステムを構成する全プロセスの基礎的な検討と解析を行い、システム開発への適用指針を得た。以下に、押出シート温度の時間変化を例にとって、その一部を紹介する。

2.3 押出シート温度の時間変化

押出ダイから大気中に押出された高温のシートは、対流と放射からなる熱損失により表面から冷却する。このシートの任意の位置、時間における温度変化は、次の熱方程式により与えられる。

$$\partial\theta/\partial t = \alpha \cdot \nabla^2\theta \dots\dots\dots (1)$$

θ : 温度, α : 温度拡散率

$$\nabla^2\theta = \frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} \quad (x, y, z \text{ は座標軸})$$

また、一般にシート押出しは次の条件を満足する（図2. 参照）。

- ① 材料は均一な温度 (T_i)、速度 (V) で押出し、シートの周囲温度 (T_f) は一定である。
- ② シート板厚 ($2S$) と幅 (W) は常に一定で、 $2S \ll W$ を満足する。

この結果、シート温度の時間変化 [$T(x, t)$] は、板厚 (x) 方向の一次元非定常熱伝導で近似することができる。ここでは、Dusinberre⁽⁴⁾の数値解法を用いて、以下の2式の解を得た。

(1) 樹脂固体内の一次元非定常熱伝導

樹脂内に任意の一定な間隔 (Δx) で熱的な格子を仮定し、ある格子点の温度を T_i とすると、時間 Δt 後の温度 T'_i は、熱移動量の計算により次式で求めることができる。

$$T'_i = [T_{i-1} + T_{i+1} + (A-2) \cdot T_i] / A \dots\dots\dots (2)$$

$$A = \Delta x \cdot \Delta x / (\alpha \cdot \Delta t)$$

T_{i-1} , T_{i+1} : T_i に隣り合う格子点の温度

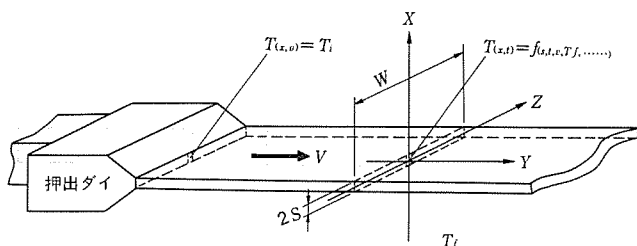


図2. シート押出しにおける各種パラメータ

(2) 樹脂表面の一次元非定常熱伝達

温度 T_f の空気と接触している樹脂表面の温度を T_s とすると、 Δt 後の温度 T'_s は、(1)項と同様に熱格子を設定して、熱放散と熱伝導による熱移動量から次式で与えられる。

$$T'_s = \{2 \cdot B \cdot T_f + [A - (2 + 2 \cdot B)] \cdot T_s + 2 \cdot T_c\} / A \dots\dots\dots (3)$$

ただし $A - (2 + 2 \cdot B) > 0$

$$B = H \cdot \Delta x / K, \quad H = H_c + H_r$$

T_c : 樹脂内部の格子点温度

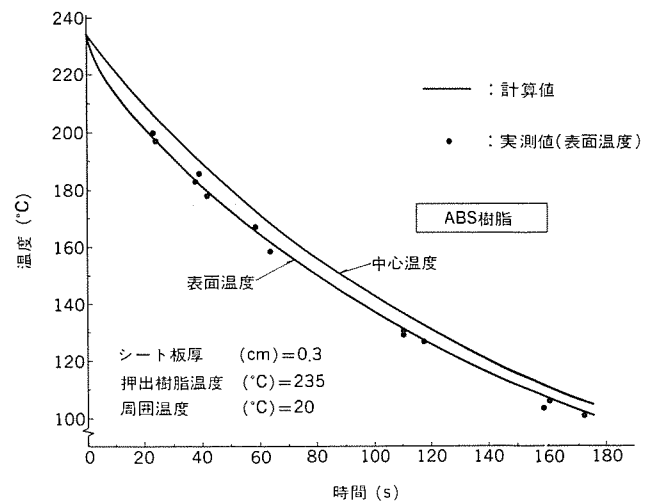
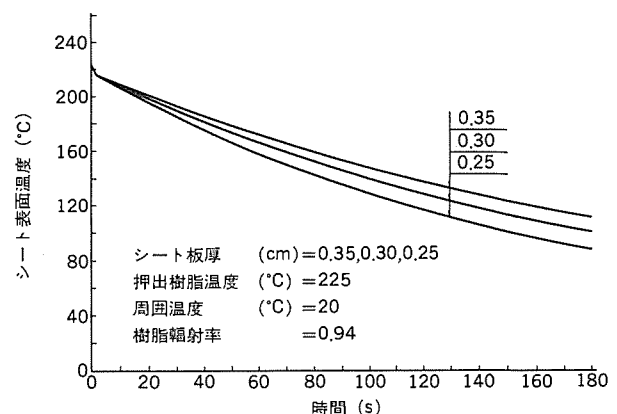
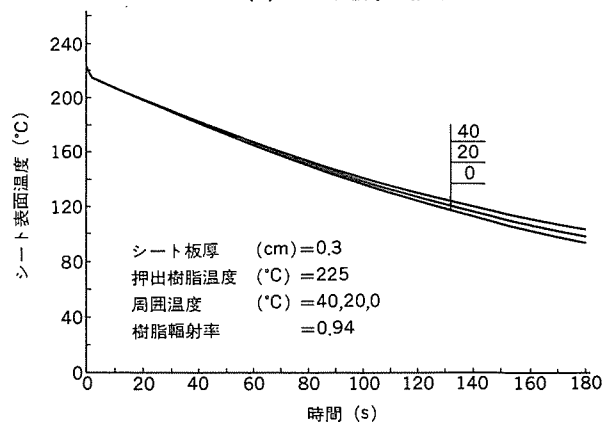


図3. 押出シート温度の時間依存性



(a) シート板厚の影響



(b) 周囲温度の影響

図4. 押出シート温度の時間変化に与える各種要因の影響（ABS樹脂）

K : 樹脂の熱伝導率

H_C : 対流熱伝達係数 H_R : 輻射熱伝達係数

以上の式(2), (3)に, 樹脂の熱定数, シート押出条件下での各熱伝達係数を与えて計算すると, シート温度の時間変化を得る。

図3. は, ABS (アクリロニトリル-ブタジエン-スチレン共重合体) 樹脂の押出テスト実測値と計算解の比較例を示す。両者は良く一致するとともに, シート表面と中心部の温度差が非常に小さいことが分かる。そこで, この数値計算法を用いて押出条件を変化させ, シート温度の時間変化をシミュレートした。この結果, シート温度の時間変化に対してシート板厚(図4. (a)), 押出樹脂温度, シート押出速度の影響が大きく, 周囲温度(同図(b)), 樹脂輻射率の影響の小さいことが判明した。

これらの結果をもとに, 冷蔵庫内箱を対象とした押出連動真空成形システムの設計を次のように実施した。

3. 冷蔵庫内箱用押出連動真空成形システムの開発

冷蔵庫の内箱は, 図5. に示すように断熱材(ウレタンフォーム), 外箱とサンドイッチ構造体を構成し冷蔵庫の強度を保持することから, 優れた機械的強度, 寸法精度, 耐環境性, 熱絶縁性などの厳しい特性が要求される。また, 食品と接触するため高度な衛生性が要求される。以上の点から, 冷蔵庫内箱には一般に ABS 樹脂の真空成形品が使用されている。

3.1 シート温度制御システムの開発

真空成形時の樹脂には, 適度な強度と大きな伸びが要求される。そのため, ABS 樹脂の真空成形温度範囲は一般に $135\sim 160^{\circ}\text{C}$ である^{(5)~(8)}。また, 内容積 $200\sim 300\text{ l}$ の冷蔵庫に使用される内箱の素材シート板厚は, $2.5\sim 3.5\text{ mm}$ である。この板厚範囲の ABS 樹脂押出シート温度の時間変化を, 押出条件を変化させて図6. に示す。図から, 押出連動真空成形システムで冷蔵庫内箱の成形を行うためには, 図中の破線内にシート温度を高精度に制御する温度制御システムが不可欠となることが分かる。

板厚 3 mm の ABS 樹脂シートを真空成形する場合を例にとり, 新しく開発したシート温度制御システムを紹介する。図7. は, 235°C で

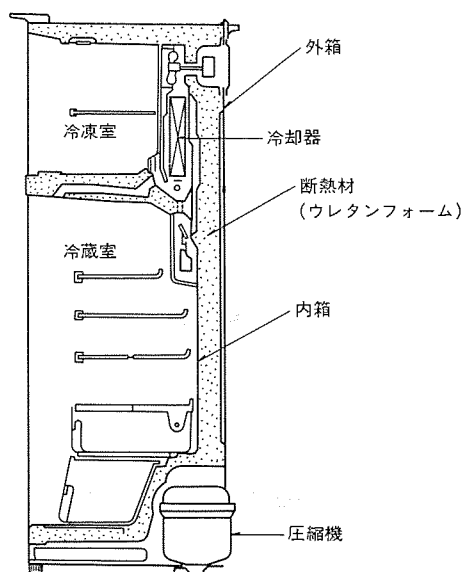


図5. 冷蔵庫箱体の断面構造 (2ドアファン式冷凍冷蔵庫)

押出されたシートの表面温度変化を示す。真空成形温度 150°C (図中実線), 成形サイクルタイム 30 秒 で成形を行うためには, 図中に表示したシートの局所的な冷却と加熱が温度制御システムに要求される。ところが, 前述したように押出連動真空成形システムでは押出シートが常に移動していることから, シート移動状態でこれらの温度制御を行わなければならない制約がある。そこで, 押出直後にシートを連続して所定レベルまで冷却した後, シート温度を加熱補正する制御システムを開発した。

図8. は, 冷蔵庫内箱成形を対象とした押出連動真空成形システム

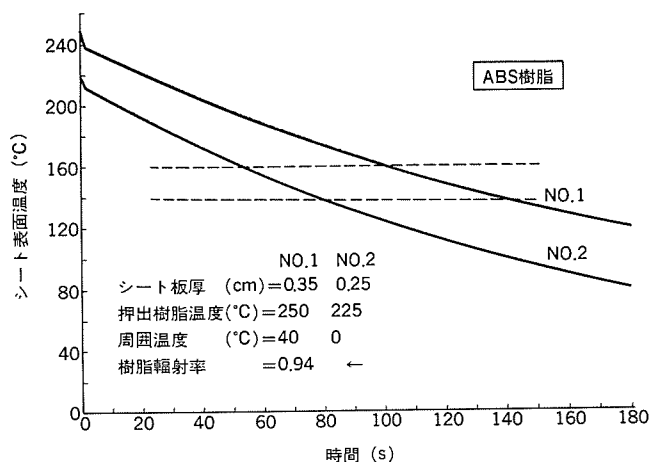


図6. 冷蔵庫内箱用押出シート温度の時間変化

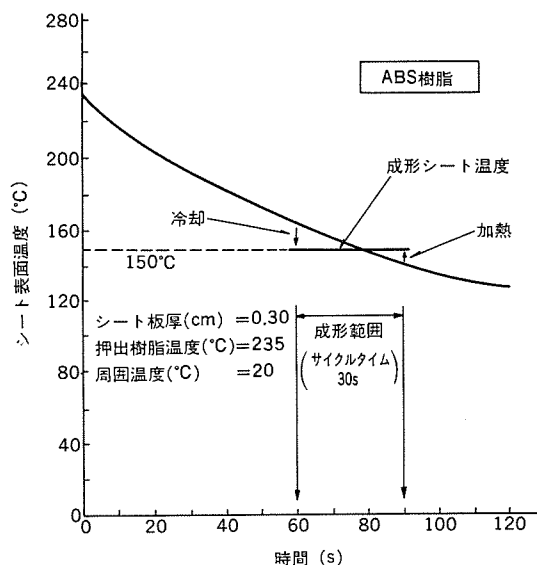


図7. 押出シート温度の時間変化と成形温度への制御

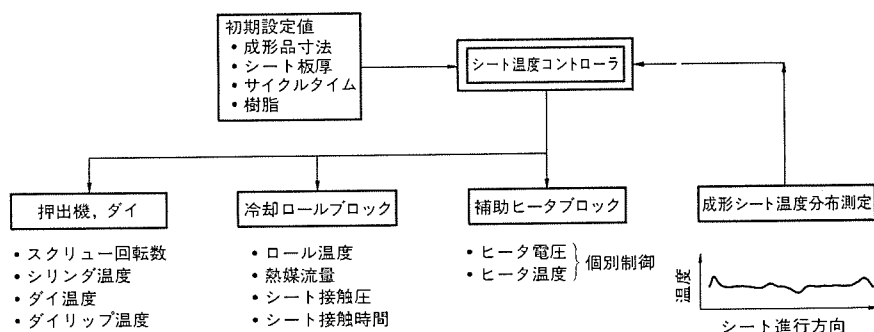


図8. シート温度制御システムのブロックダイアグラム

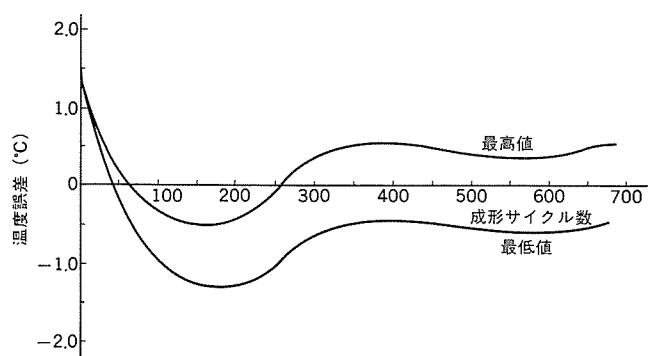


図 9. 成形シート温度の制御精度

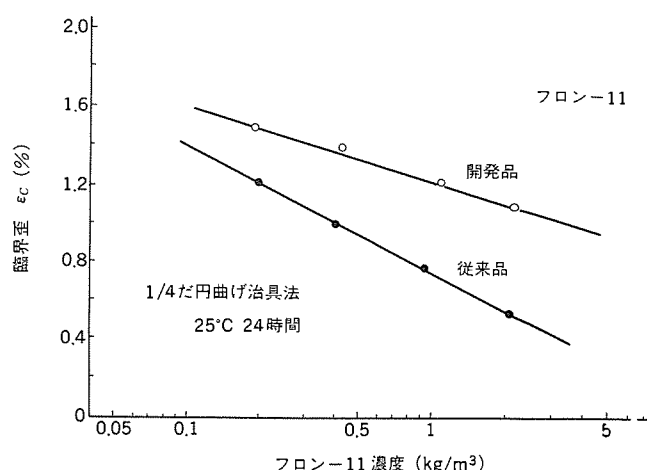


図 10. ABS樹脂のストレスクラッキング特性

- ・缶詰などの重量物落下、衝撃に耐えること。
- ・食品が付着した場合、簡単に清掃できること。
- ・油、酢などの薬品に侵されないこと。

内箱の信頼性向上には、以上の諸特性に加えて優れた成形加工性が求められる。このため、ABS樹脂の組成と物性の関係を十分に把握するとともに、内箱を対象とした新しいABS樹脂を開発し、冷蔵庫に組入れて信頼性を評価した。

図 10. は、耐薬品性の評価基準となるフロニン (R-11: モノクロトリフオロメタン) を用いたストレスクラッキング試験の結果を示す。開発品は、フロニン 11 の全濃度範囲においてクラックを発生する臨界ひずみ (歪) が高い数値を示し耐薬品性に優れている。この新しいABS樹脂による内箱は、冷蔵庫の実使用状態をはるかに越えた冷熱サイクル (50 \leftrightarrow -30°C 25 サイクル)、熱衝撃 (60 \rightarrow -30°C)、落錘衝撃 (ダート径 5 R で 34.3 J) などの厳しい実使用テストの全項目に、基準以上の優れた値を示している。

3. 4 冷蔵庫内箱成形ライン適用の効果

図 11. は、冷蔵庫内箱成形ラインで稼働中の押出連動真空成形システムの全景写真である。写真の左側から、材料供給、シート押出し、シート温度制御、真空成形、トリミングの各装置が連続して並び、材料は左から右に向かって移動する。この写真でみられるように、システム全体は材料供給から成形品取出しまでを自動化し、無人運転を行っている。押出連動真空成形システムの適用効果に関し、従来法と比

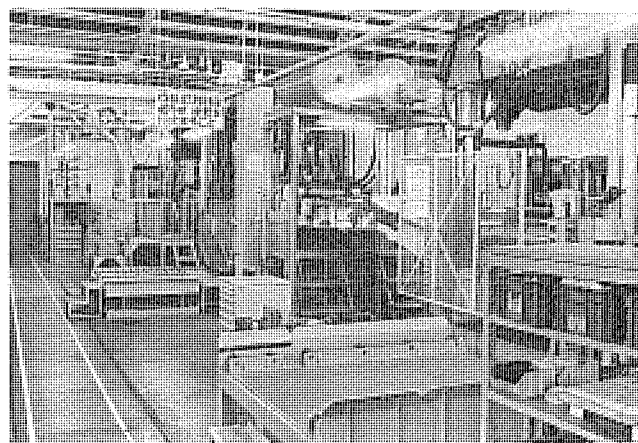


図 11. 冷蔵庫内箱成形ライン

のシート温度制御システムのブロックダイアグラムを示す。この温度制御システムは、複数の冷却ロール、放射加熱ヒータブロック、シート温度測定装置とこれらのコントローラで構成する。押出ダイから押出された高温のシートは、押出直後に冷却ロールにより表面が冷却する。その後、シート表面は内部からの熱伝導により温度が上昇し、放散熱量と伝導熱量のバランスを保持しながら徐々に冷却する。成形ステーション直前に設置されたヒータは、シート押出方向の温度補正と成形シート温度分布の高精度制御を行う。なお、これらの装置は、成形ステーション上に設置したシート温度モニタからの信号により成形サイクルごとに最適制御を行い、成形シート温度を常に設定値にコントロールする。

シート温度制御システムは、成形シートの温度分布を設定値に対して高精度で制御するとともに (図 9.), 押出連動真空成形システムの課題とされていた樹脂の劣化においても大きな効果を示す。すなわち、押出直後にシート表面温度を急激に低下することにより、樹脂が高温下で酸素と接触する時間を著しく短縮し、酸化劣化を防止する。

3. 2 真空成形方式

真空成形法は、使用する型の形状から雌 (凹) 型方式と雄 (凸) 型方式に大別できる。雌型方式は、類似対称形の凸型 (プラグ) を併用することにより、成形品の板厚を自由にコントロールできる利点がある。しかし、成形品のコーナ (R) 部の板厚が薄くなる、寸法精度が低い、設備が複雑で成形条件管理が煩雑になるなどの欠点がある。これに対して雄型方式は、板厚のコントロールに難点がある反面、寸法精度、成形品強度、寸法安定性に優れた特長を持つ。

冷蔵庫内箱は、成形品の形状に対応した板厚分布の精度が厳しく要求される。このため、従来の冷蔵庫内箱成形には雌型方式が一般に使用されている。しかし、雄型方式の欠点である板厚コントロールを自由に行うことが可能となれば、雄型の採用は前に述べた特長により、内箱の品質向上に大きな効果を示す。いままでは雄型方式が板厚コントロールを困難とした原因は、シートの不十分な温度制御によるところが多い。これに対して、押出連動真空成形システムに前述したシート温度制御システムを適用することにより、従来の真空成形法では得られないシート温度の高精度制御を可能とし、雄型方式による冷蔵庫内箱の真空成形を可能とした。雄型方式の採用は、冷蔵庫内箱の強度、寸法精度、寸法安定性を著しく改良し、信頼性向上に大きく寄与している。

3. 3 高性能 ABS 樹脂の開発

冷蔵庫内箱に使用される ABS 樹脂は、次のような厳しい特性を満足しなければならない。

- ・食品衛生の点で無害であること。
- ・無臭であること。

表 1. 押出連動真空成形システムの適用効果

	押出連動真空成形システム	従来の真空成形
成形消費エネルギー (MJ) (内箱1台当たり)	9.0~9.6	14.2~15.9
成形サイクルタイム (s)	27~30	53~58
材料有効利用率 (%)	99.4	92~95

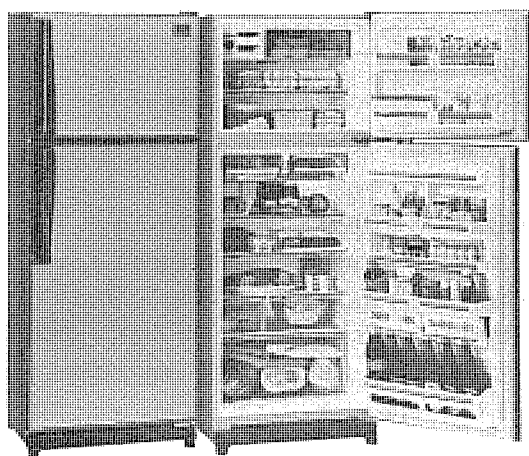


図 12. 2ドアファン式冷凍冷蔵庫 (MR-2452 G)

較したものを表 1. に示す。押出連動真空成形システムの適用により、冷蔵庫内箱1台当たりの成形消費エネルギーは約45%節減され、生産性は約2倍、材料有効利用率はほぼ限界の数値を示している。

このように押出連動真空成形システムは、冷蔵庫内箱の省エネルギー、省資材成形と生産性向上に大きな効果を示している。押出連動真空成形システムにより成形した内箱を採用した2ドアファン式冷凍冷蔵庫MR-2452 G (有効内容積245 l) の外観写真を図 12. に示す。

4. む す び

以上、プラスチック成形加工の省エネルギー・省資材化を目的に開発した

新しい押出連動真空成形システムと、その冷蔵庫内箱成形への適用について紹介した。押出連動真空成形システムは、成形消費エネルギーと生産性において従来の真空成形法をはるかに超える優れた成形加工法で、ここで紹介した冷蔵庫内箱をはじめ他の電気機器への幅広い適用が期待できる。

しかも、この新しい成形システムは、真空成形プロセスを他の成形加工プロセスに代えることにより、優れた特長を持つ新しい成形システムへの展開が容易に可能となる。例えば、真空成形プロセスに代えてマッパドメタルダイプロセスを採用することによりスタンピング加工が可能となり、大形の複雑な成形品に対して従来の成形加工法では得られない高い生産性とエネルギー節減が期待できる。また、このような新しい成形加工法の開発は、高性能複合樹脂などのプラスチック材料開発に対する新たな展開を可能とするであろう。

省エネルギー、省資材の取組みは、ますます重要となっている。これに対して、今後も更に材料部品加工技術の研究開発に取り組み、より優れた生産技術を開発していく考えである。

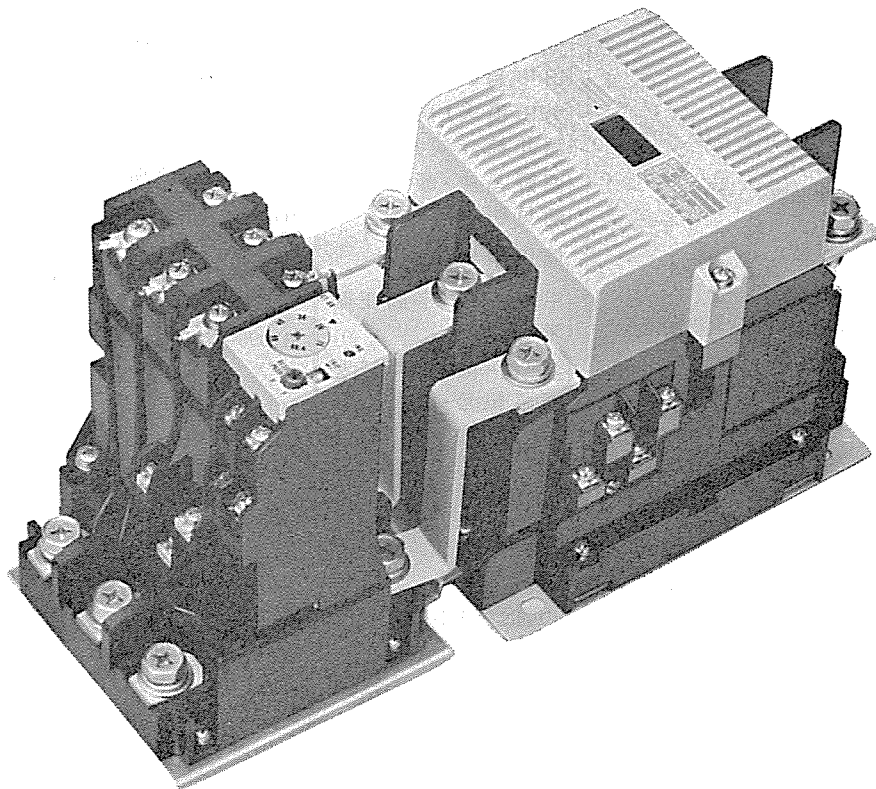
終わりに、押出連動真空成形システムの冷蔵庫内箱成形ライン適用にあたり、押出連動真空成形機の開発に多大な御協力をいただいた(株)浅野研究所殿と、高性能ABS樹脂の開発に積極的に御協力していただいた宇部サイコン(株)殿に対し、深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 科学技術庁資源調査会：衣食住のライフサイクルエネルギー、(昭54-10)
- (2) 村山、宮尾、小林：三菱電機技報、49, No. 2, P. 146 (昭50)
- (3) 飯阪ほか：三菱電機技報、53, No. 6, P. 459 (昭54)
- (4) G. M. Dusenberre : Trans of the ASME., P. 703 (1945)
- (5) プラスチック加工技術便覧、日刊工業新聞社 (昭44)
- (6) 古住：Plastic Age, 16, No. 8, 111 (昭45)
- (7) 安田：合成樹脂、14, No. 4, 199 (昭43)
- (8) ABS樹脂、高分子学会 (昭45)

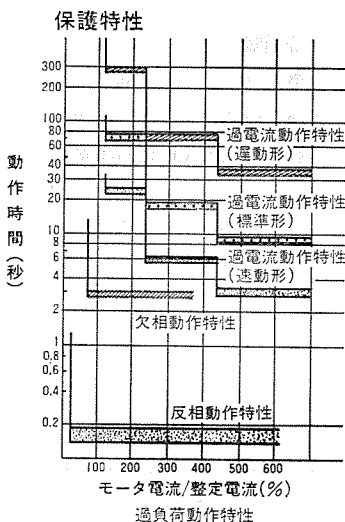
電子サーマル付MS-K形 三菱電磁開閉器

三菱電機では、このたびマイコンを搭載して、モータ保護の精度と信頼性を高め、更に多機能タイプをめざした“電子サーマル”と、57年4月から発売し好評をいただいております新形電磁接触器S-Kシリーズとを組み合わせることにより、まったく新しいタイプの電磁開閉器を誕生させました。



特長

●システムとしての信頼性向上
マイコンを搭載した静止形保護リレーの特長をいかした精度の高いモータ保護が可能です(過負荷、欠相、反相保護機能付)。また、過電流耐量が大きいため、配線用遮断器との保護協調が容易です。



●省エネルギーの徹底追求

電磁接触器コイルの消費電力を大幅に低減しています(従来品の1/5…当社比)。従ってシーケンサなどの出力で、直接に駆動できる範囲が大幅に広がりました。

●多用途に使えるワイドセレクションタイプ

単相モータから三相モータまで、更に水中モータからブローアまで、用途に合わせた保護が切換スイッチにより設定できます。

●メンテナンスの手間を改善

発光ダイオードの点滅状況で事故内容が判別できます。原因調査も容易で、復旧が早くなります。また、過電流状態を発光表示する機能により、精度の高い電流設定ができると同時に、起動時間の把握が簡単にできます。

仕様(開放形)

項目		機種	MSO-K100ET	MSO-K125ET	MSO-K150ET	MSO-K220ET	MSO-K300ET	MSO-K400ET
最大定格容量(kW) 3φモータ、AC3級		200～220V	25	30	37	55	75	90
		380～440V	50	55	75	110	150	150
		500～550V	55	55	90	132	160	200
電磁接触器の性能			AC3・1・1-0	AC3・1・1-0	AC3・1・1-0	AC3・1・1-0	AC3・1・1-0	AC3・1・1
電磁接触器の 特 性	コイル入力 (VA)	瞬 時	270	270	270	550	550	550
		常 時	27	27	27	45	56	56
		コイル消費電力 (W)	3.9	3.9	3.9	5.2	8	8
適用モータ保護リレー		形 名	ET-60	ET-150		ET-360		
		設定電流の可能範囲	2～60A	40～150A		110～360A		
モータ保護リレーの仕様、特性		保 護 機 能	1E(過負荷保護)、2E(荷負荷・欠相保護)、3E(過負荷・欠相・反相保護)の選択、動作時間は標準(約9秒)、速動(約3秒)、遅動(約36秒)の選択切換(時間は500～600%時の値)					
		過負荷検出	動作値: 整定電流の115%(±5%)、動作時間: 特性曲線参照					
		欠 相 検 出	動作値: 整定電流の70%以下、動作時間: 3秒±1秒					
		反 相 検 出	動作値: 整定電流の70%以下、動作時間: 0.5秒以下					
		接点構成	1a1b	定格 a/b AC220V 1/2A、550V 1/0.5A、DC110V 0.5A、220V 0.25A				

登録番号	名 称	発 明 者	登録番号	名 称	発 明 者
917035	超音波 メッキ 装置	石 橋 幹 史・利 藤 尚 武	917063	液体燃料燃焼装置	{ 上 村 武 司・水 田 和 幸 小 松 健 一 郎・西 江 正 治
917037	集積回路装置	吉 富 正 夫	917067	電着絶縁塗料の再生法	{ 柴 山 恭 一・佐 藤 文 彦 内 藤 守
917038	超電導 コイル 回路	{ 佐 藤 隆・福 原 勝 彦 田 中 光 雄	917071	排水の電解処理方法	{ 加 藤 強・棚 尾 涉 久 慈 陽 一
917043	プロジェクトン 溶接方法	{ 奥 田 滝 夫・稲 田 幹 夫 酒 井 純 一	917078	高周波加熱器用加熱箱の製造法	福 士 茂 憲・熊 田 泰 治
917046	誘導加熱装置	{ 関 野 昌 蔵・藤 室 雅 司 新 見 明 彦	917081	変圧器巻線の口出し装置	祖 開 克 二
917048	分配器	藺 田 幸 男	917095	移送体の磁気浮上装置	{ 地 蔵 吉 洋・山 田 忠 利 岩 本 雅 民・忍 正 寿
917052	同期電動機の揃速制御装置	{ 甲 木 莞 爾・宇 高 正 晴 米 畑 讓	917096	移送体の磁気浮上装置	{ 地 蔵 吉 洋・山 田 忠 利 岩 本 雅 民
917057	硬化性樹脂組成物	{ 西 崎 俊 一 郎・不 可 三 見 森 脇 紀 元・広 田 潔			

訂 正 Vol. 56 No. 6 に次のような誤りがありましたので、訂正しておわびいたします。

	正	誤
・ 58 (466) ページ左側「1. まえがき」上から7行目数階教階
・ 59 (467) ページ左側上から15行目取付個数取付個教
・ 59 (467) ページ左側「2.3 ステップリンクの強度」上から1行目薄鋼板薄網板
・ 60 (468) ページ右側下から8行目 (40m/min) (46m/min)

〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol. 56 No. 8 交通エレクトロニクス特集

特集論文

- ターミナルレーダ情報処理システム (ARTS)
- 高速道路トンネル内防災用通信設備
- マイクロ波による車両番号読取装置
- 東北・上越新幹線列車無線設備
- 日本国有鉄道の磁気浮上式鉄道における光伝送車上制御装置
- 阪神電気鉄道(株)納め電鉄変電所集中管理システム
- サイリスタ遮断器を用いた電鉄用静止形直流給電システム
- 熊本市交通局納め8200形インバータ電車
- 新方式高周波4象限チョッパシステム
- 車両補助電源用 GTO インバータ装置

普通論文

- サウジアラビア向け海水ポンプ用同期電動機
- 合成開口レーダの画像再生信号処理
- 制御用 CRT 画面作成支援システム“ピカソ”
- 機械構造設計の CAD/CAM システム《MELCAD-MD》
- 大形空調用高効率圧縮機“JH-E シリーズ”
- AE—S 形低圧気中遮断器

三菱電機技報編集委員

委員長	志 岐 守 哉	委 員	柴 田 謹 三
副委員長	大 谷 秀 雄	“	山 内 敦
“	三 浦 宏	“	柳 下 昌 平
常任委員	三 輪 進	“	立 川 清 兵 衛
“	峯 松 雅 登	“	徳 山 長
“	田 中 克 介	“	柴 山 恭 一
“	葛 野 信 一	“	早 瀬 通 明
“	井 上 通	“	荒 野 茜 也
“	阿 部 修	“	瀬 辺 国 昭
“	吉 田 太 郎	“	倉 橋 浩 一 郎
“	野 畑 昭 夫	“	小 原 英 一
“	的 場 徹	幹 事	諸 住 康 平
“	尾 形 善 弘	“	足 立 健 郎
		7号特集担当	立 川 清 兵 衛

三菱電機技報 56 巻 7 号

(無断転載を禁ず)	昭和 57 年 7 月 22 日 印刷 昭和 57 年 7 月 25 日 発行
編集兼発行人	諸 住 康 平
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) 菱電エンジニアリング株式会社内
発 売 元	「三菱電機技報社」Tel. (03) 218 局 2045 東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地 (〒 101) 株式会社 オーム社 Tel. (03) 233 局 0643(代), 振替口座東京 6-20018
定 価	1 部 500 円送料別 (年間予約は送料共 6,700 円)

8時間ビデオ 《ファンタス》55G(HV-55G形)



57年度の国内向けビデオの第一弾として、このたび三菱電機では、コンパクトな簡単ビデオ《ファンタス》55G(HV-55G)を新発売しました。画質、音質及び操作性能が大幅に向上されています。

特長

●基本性能を重視した設計

メカ精度の向上や徹底した回路の追求を行ない、ビデオの生命である画質及び音質を大幅に改善。放送画面に比べて、見劣りしない性能をもっています。

●コンパクトサイズ

横幅42.4cmと、オーディオコンポと同一サイズ。高さも12.5cmと薄形、スリムなビデオです。低消費電力(28W)、軽量(8.2kg)となっています。

●最長8時間の録画、再生

T-160のテープ使用により、最長8時間の録画、再生が可能です。しかも、8時間ビデオにふさわしく、ノイズバーロックで見易い9倍速スピードサーチ機能を備えています。更に、T-160テープでも早送り、巻戻し時間は約5分と、使い易い設計になっています。

●ワンタッチ、ダイレクト操作

従来機種同様、三菱独自の5DD採用により、すべての操作がワンタッチ。ダイレクトに操作できます。

●ファインエディティング(つなぎ撮り)

当社の従来機にはなかった標準、3倍の両モードにおける、ファインエディティング機能を搭載しています。録画中に不要な部分をカットでき、継ぎ目が乱れません。

●その他の特長

ポーズ、スピードサーチが手元でワンタッチ操作できるリモコン付きです。また、1日、1番組が予約録画できるタイマー付きです。