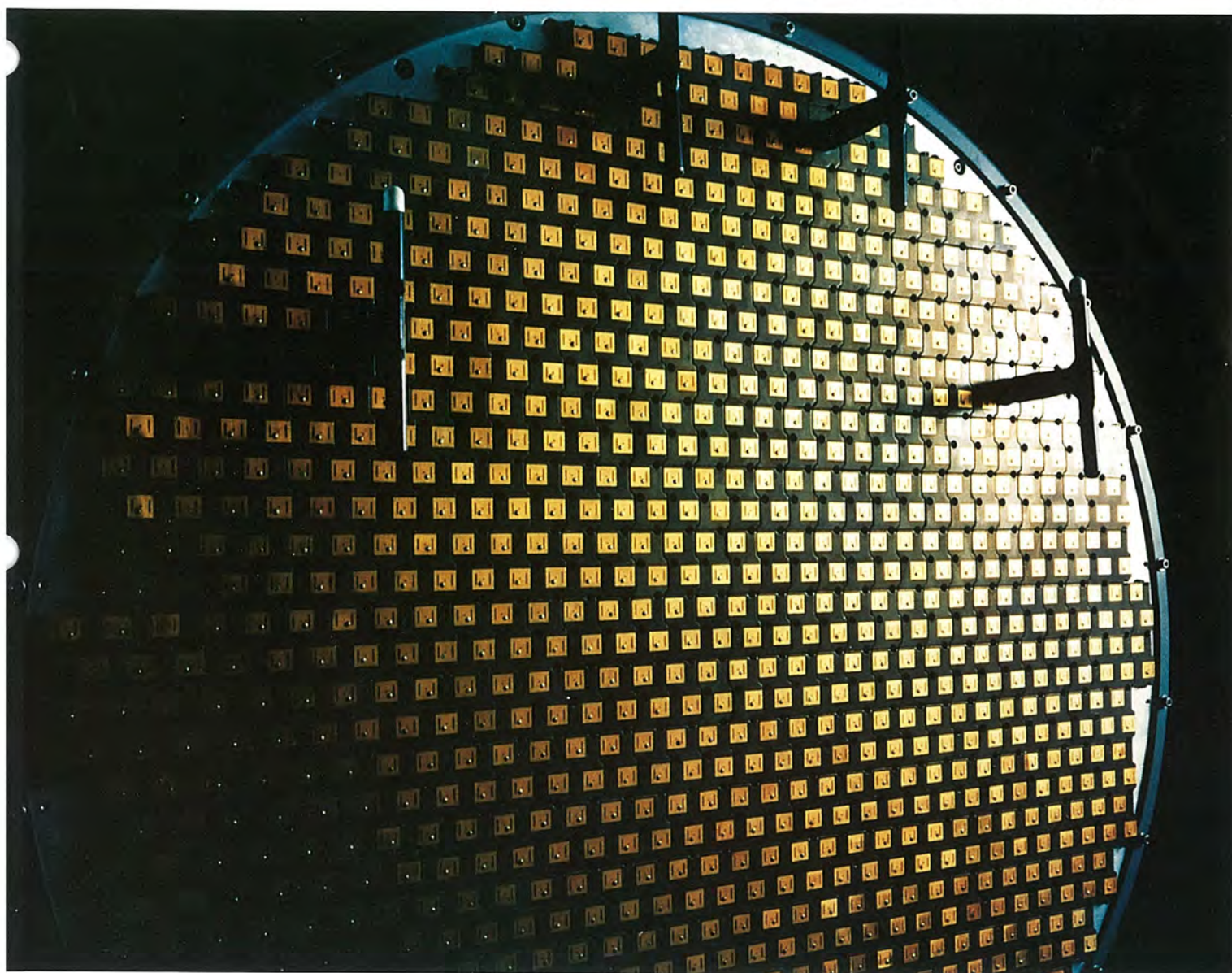


MITSUBISHI 三菱電機技報

MITSUBISHI DENKI GIHO Vol.66 No. 4

4
1992

アンテナ技術特集



アンテナ技術特集

目次

特集論文

アンテナ技術特集に寄せて.....	1
喜連川 隆	
アンテナ技術の現状と動向.....	3
片木孝至・折目晋啓	
科学衛星追跡用 S/X 帯共用 20m アンテナ.....	12
廣澤春任・市川 満・横山幸嗣・別段信一・尾市友紀・島脇 豊・村瀬文義	
電波ホログラフィによる 45m 電波望遠鏡の鏡面精度の評価.....	21
浮田信治・柴田克典・増田剛徳・出口博之・蛭子井 貴	
名古屋大学新 4 m 短ミリ波望遠鏡.....	27
福井康雄・別段信一・森 浩道・宮脇啓造・榊原 修	
NTT DYANET 用 30/20GHz 帯デュアルビームアンテナ.....	33
森広芳照・堀 俊和・青木克比古・吉川義彦・早川喜夫	
衛星通信受信用平面アンテナ.....	39
茶谷嘉之・原田 明・舟田雅彦・大塚昌孝	
マイクロ波中継回線用三枚反射鏡オフセットアンテナ.....	43
山田吉英・占野孝允・増島俊雄・比嘉盛男・宮林哲也・牧野 滋	
フェーズドアレーアンテナ技術.....	52
佐藤眞一・春山鉄男・菱沼 進・宮崎守泰	
GTD を応用したアンテナ解析技術.....	59
砂原米彦	
アンテナ計測評価技術.....	64
折目晋啓・白松邦昭・青木俊彦・井上正人・出口博之・片木孝至	
“アンテナ技術特集に寄せて”に関する主な発表論文.....	72

普通論文

残額印字式プリペイドカードシステム.....	73
外山 肇・小村 明・山田敬喜・岩井滋雄・荒巻 淳	
愛知県企業庁納め東三河水道事務所無線テレメータ設備.....	79
鈴木敏明・吉原秀樹・内藤茂之・三木次美	
三菱統合一元化 SE システム.....	87
神河達男・渡部徹雄・杉谷 穰・小宮山正洋・根本伸治	
溶接用炭酸ガスレーザ発振器.....	93
大谷昭博・西田 聡・葛本昌樹・水野正紀	
三菱インテリジェントビルシステム“マイバスインテグラ”.....	97
藤原誠司・八島耕司・保里康一・井上証策	
アクセスコントロールシステム.....	101
大森 正・宮田 実	
ダブルドライブスーパーバス方式スピーカーシステム.....	107
興野 登・大塚 功・高橋政典	

特許と新案

円偏波アレーアンテナ・アンテナ診断装置.....	111
半導体酸化装置.....	112

スポットライト

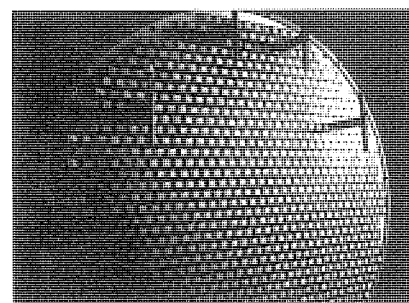
単 3 中性線欠相保護付き配線用遮断器.....	113
空転再粘着制御 VVVF インバータ装置.....	114
三菱衛星通信用受信器.....	(表 3)

表紙

レーダ用アクティブ フェーズドアレーアンテナ

次期レーダシステムを中心となるアクティブフェーズドアレーアンテナは、多数の素子アンテナから形成され、各素子アンテナには送受信機能及び移相器をもつモジュールが設けられている。各素子アンテナの励振位相を変化することによって、ビームを高速に走査したり、ビームの形状を変えることができる。

このため、このアンテナを用いるレーダは、同時に多数の目標を追尾したり、広い範囲を高速に搜索することができる。最新の半導体技術を応用することによってこのアンテナは実現した。



三菱電機技報に掲載の技術論文では、国際単位“SI”〔SI 第 2 段階(換算値方式)を基本〕を使用しています。ただし、保安上、安全上等の理由で、従来単位を使用している場合があります。

アブストラクト

アンテナ技術の現状と動向

片木孝至・折目晋啓

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 3～11

最近の15年間に当社が開発したアンテナを中心に、レーダ用アンテナ、衛星搭載用アンテナ、衛星通信地球局用アンテナ、電波天文アンテナ、移動体通信用アンテナ及びマイクロ波中継回線用アンテナ技術の現状と動向について概説した。その中でも、フェーズドアレーアンテナの技術革新は、マイクロ波半導体の発展に伴って著しいものがあり、その応用としてレーダ用のみでなく衛星搭載用、衛星通信地球局用、移動体通信用の分野に活用する試みがなされており、将来が期待される。

衛星通信受信用平面アンテナ

茶谷嘉之・原田 明・舟田雅彦・大塚昌孝

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 39～42

Superbird, JCSAT等の通信衛星受信を目的としたKu帯平面アンテナを開発した。このアンテナは、有効開口900mm×900mm、 G/T 約16 dBの性能をもっている。アンテナ形式としては、トリプレート給電マイクロストリップアレーアンテナであり、素子数約1,600、給電回路内にLNA (Low Noise Amplifier)を内蔵することによって高性能化を図っている。本稿では、CS受信用平面アンテナの設計・構成・性能について述べる。

科学衛星追跡用S/X帯共用20m アンテナ

廣澤春任・市川 満・横山幸嗣・別段信一・尾市友紀ほか

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 12～20

科学衛星の打上げ時の追尾及び衛星の追跡・管制及び観測データの取得に供される科学衛星追跡用S/X帯共用20m アンテナ設備を文部省宇宙科学研究所に納入したので報告する。

このアンテナは、①S/X帯で高い開口能率と低雑音特性をもち、②S/X帯の任意の偏波信号に対してモノパルス追尾可能、③直交2偏波信号同期受信可能、④強風下でも運用可能で、高い測角精度をもつ、などの特長がある。

マイクロ波中継回線用三枚反射鏡オフセットアンテナ

山田吉英・古野孝允・増島俊雄・比嘉盛男・宮林哲也・牧野 滋

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 43～51

従来のホーンリフレクタアンテナの後継として18種類の三枚反射鏡アンテナを考案し、新たに開発したビームモード展開の手法を用いて広角放射特性と交差偏波特性の最適化を図った。

開発したアンテナは、3m 開口と3.6m 開口の2機種であり、一次放射器に広帯域にわたって放射特性の良好なリング装荷形コルゲート円錐ホーンを採用することによって限界に近い電気性能を実現した。このアンテナは、現在、基幹回線に広く使用されている。

電波ホログラフィによる45m 電波望遠鏡の鏡面精度の評価

浮田信治・柴田克典・増田剛徳・出口博之・蛭子井 貴

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 21～26

国立天文台では、ミリ波帯やサブミリ波帯で高感度の観測を行うために、直径45m 電波望遠鏡の鏡面精度の改善を図っている。このため、電波ホログラフィによる鏡面誤差の評価方法を開発した。45m 電波望遠鏡は約1.2m×約2.2mの大きさからなる600枚の鏡面パネルから構成されている。実際のパネル配置に対応した鏡面誤差モデルに基づいて、鏡面パネルを調整した結果、鏡面誤差84 $\mu\text{m rms}$ (ϵ/D が 2×10^{-6})を達成することができた。

フェーズドアレーアンテナ技術

佐藤眞一・春山鉄男・菱沼 進・宮崎守泰

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 52～58

高速なビーム走査、指向性合成が容易なフェーズドアレーアンテナは、レーダ用、衛星・航空機搭載又は陸上移動体通信用などに有効である。

ここでは、フェーズドアレーアンテナの最新技術を明らかにするために、低サイドローブ化のための指向性合成法、パッチアレーの相互結合解析法、相互結合を積極的に利用した位相補正法、給電回路としての扇形分配回路及び直列給電分配回路、位相データ転送方式、曲面多層配線板などについて述べる。

名古屋大学新4m短ミリ波望遠鏡

福井康雄・別段信一・森 浩道・宮脇啓造・榊原 修

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 27～32

原始星の進化過程を解明するため、COスペクトル(115GHz)掃天観測専用の口径4m短ミリ波望遠鏡を開発した。この装置の特徴は、高精度(鏡面精度、高指向精度)望遠鏡かつ観測効率を向上させるために高速駆動が可能なことと、昼間でも高精度観測が行えるように熱変形が小さいCFRP材を主鏡面部の構造に採用した点にある。この装置には名古屋大学で開発された低雑音SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor)受信機が装備され、1992年から本格的な観測が開始される予定である。

GTDを応用したアンテナ解析技術

砂原米彦

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 59～63

移動体通信の発展に伴い、アンテナの設置場所や周囲環境の複雑化が進んでいる。そのため、アンテナ設計では構造物からの電波散乱解析技術が重要となる。ここではアンテナを設置している構造物の影響を含めたアンテナの放射特性解析法として、物体の散乱・回折の取扱いに有効なGTD(Geometrical Theory of Diffraction)を用いた計算法について述べる。また、当社で開発した分散型等価端部電磁流源を用いた任意形状物体のレーダ断面積の計算法についても述べる。

NTT DYANET用30/20GHz帯デュアルビームアンテナ

森広芳照・堀 俊和・青木克比古・吉川義彦・早川喜夫

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 33～38

NTTのDYANET用地球局アンテナとして、開口径4.2mの主・副・補助反射鏡(各ビーム2枚)・一次放射器(各ビーム1本)などから成るダブルトラサ形(20/30GHz帯)デュアルビームアンテナを設計・製作した。2枚の補助反射鏡の修整で高能率を得る一方、そのうち1枚を衛星追尾のため電動駆動させている。また、主反射鏡を垂直設備として融雪電力の節電を、反射鏡骨組をトラサ構造として軽量化を、全体を数ブロックに分割して現地工事の便を図った。

アンテナ計測評価技術

折目晋啓・白松邦昭・青木俊彦・井上正人・出口博之・片木孝至

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 64～71

複合化システムであるフェーズドアレーアンテナ及びメッシュ鏡面大型展開アンテナの合理的な計測評価技術と計測評価を具体的に実現する統合化計測システムの構築が要望されていた。

そこで、アンテナがもつ機能(位相変化)を利用し、測定評価する素子電界ベクトル回転法や試験装置がもつ機能(回転角変化)を利用して計測評価する重力変形分離測定法の開発を行い、アンテナの高性能化、評価の高精度化及び大幅な省力化を実現した。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 39~42 (1992)

A Planar Array Receiving Antenna for Communications Satellites

by Yoshiyuki Chatani, Akira Harada, Masahiko Funada & Masataka Otsuka

The corporation has developed a Ku-band planar antenna for receiving signals from Superbird, JCSAT and other communication satellites. The antenna has an effective aperture diameter of 900×900 mm, and a G/T of approximately 16dB. To achieve high performance, the antenna employs a microstrip-line array of 1,600 elements fed by a tri-plate line and the feed circuit has built-in, low-noise amplifiers. The article reports on the design, configuration, and performance.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 3~11 (1992)

Recent Progress in Antenna Technology

by Takashi Katagi & Nobutake Orime

The article surveys developments and trends in antenna technology over the past 15 years at Mitsubishi Electric, covering antennas for radar, satellites, earth stations, radiotelescopes, mobile communications and terrestrial microwave links. Development of microwave-band semiconductor devices has assisted in the advance of revolutionary phased array antenna technology. Phased array antennas have recently found applications as satellite on-board antennas, satellite communication and earth station antennas, and in mobile communication systems as well as radar.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 43~51 (1992)

Tri-Reflector Offset Antennas for Terrestrial Microwave Relay Links

by Yoshihide Yamada, Takayoshi Furuno, Toshio Masujima, Morio Higa, Tetsuya Miyabayashi & Shigeru Makino

As an alternative to conventional horn reflector configurations, 18 tri-reflector antenna designs were tested and optimized for wide-band radiation and cross-polarization characteristics using a newly developed beam mode expansion method. The results were employed to design two antennas with 3 and 3.6m diameter apertures for microwave relay links. The ring-loaded corrugated conical horns employed as the primary radiator feature excellent wide-band radiation characteristics and nearly ideal electrical performance. The antennas are being use extensively in microwave trunk circuits.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 12~20 (1992)

A 20-Meter S/X-Band Antenna for Tracking Scientific Satellites

by Haruto Hirose, Mitsuru Ichikawa, Koji Yokoyama, Shin'ichi Betsudan, Tomoki Dichi, Yutaka Shimawaki & Fumiyoshi Murase

The article reports on a 20m S/X-band antenna facility delivered to the Institute of Space and Astronautical Science under Japan's Ministry of Education, Science and Culture. The facility is designed to track satellites during launch and perform tracking, control, and data acquisition for orbiting satellites. The antenna features high aperture efficiency and low noise in the S and X bands, monopulse tracking capability using and desired polarization planes in both S and X bands, multiplex reception of two orthogonally polarized signals, ability to operate under high winds, and highly precise angular-measurement capability.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 52~58 (1992)

Phased Array Antenna Technology

by Shin'ichi Sato, Tetsuo Haruyama, Susumu Hishinuma & Moriyasu Miyazaki

Phased array antennas that implement electronic methods for high-speed beam scanning and pattern synthesis are effective in applications for radar, satellite and aircraft communications, and ground-based mobile communications. The article surveys new developments in this technology. Topics covered include low side-lobe level pattern synthesis methods, mutual coupling analysis of patch arrays and phase correction methods based on this analysis, feed circuits employing sectorial power dividers and sinuous suspended strip-line antenna feeds, phase data transfer methods, and curved multilayer boards.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 21~26 (1992)

Radio Holographic Metrology Used to Evaluate the Surface Accuracy of a 45-Meter Radio Telescope

by Nobuharu Ukita, Katsunori Shibata, Masanori Masuda, Hiroyuki Deguchi & Takashi Ebisui

To enable highly sensitive observations in the millimeter and submillimeter bands, a surface measurement method using radio holographic metrology has been developed to improve the performance of the National Astronomical Observatory's 45m radio telescope. The telescope's antenna surface consists of $600 \times 1.2 \times 2.2$ m panels. Adjustments using the best-fit panel model led to a surface accuracy of $84 \mu\text{m rms}$ ($\epsilon/D=2 \times 10^{-6}$).

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 59~63 (1992)

Geometric Theory of Diffraction Applied to Antenna Analysis

by Yonehiko Sunahara

The radiation patterns of antennas for mobile communications systems are frequently influenced by the geometry of adjacent structures, making it imperative to evaluate these effects. This report introduces a method for analysis of antenna radiation characteristics that employs the geometric theory of diffraction to evaluate the effects of such structures. It also describes an original method for calculating the radar cross section of any structure, regardless of shape.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 27~32 (1992)

A 4-Meter Submillimeter-Wave Radio Telescope for Nagoya University

by Yasuo Fukui, Shin'ichi Betsudan, Hiromichi Mori, Keizo Miyawaki & Dsamu Sakakibara

A 4m submillimeter-wave sky-survey radio telescope has been developed for the 115GHz-band CO spectra used in the study of protostar evolution. The radio telescope features high surface and pointing accuracy, a high-speed motor drive that boosts observation efficiency, and a low-thermal-expansion CFRP main reflector structure that allows high-precision observations during daylight hours. The telescope is coupled to a low-noise superconductor-insulator-superconductor (SIS) receiver developed at Nagoya University. Routine survey operations are scheduled to begin in 1992.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 64~71 (1992)

Antenna Measurement and Evaluation Techniques

by Nobutake Orime, Kuniaki Shiramatsu, Toshihiko Aoki, Masato Inoue, Hiroyuki Deguchi & Takashi Katagi

The authors have developed methodologies and apparatus for the evaluation of phased array antennas and large deployable mesh reflector antennas. The rotating field vector element method employ phase variation properties of the antenna elements, and the antenna rotation method eliminates gravitational effects. These systems contribute to the enhancement of antenna performance, more precise antenna evaluation and reduction in antenna evaluation work.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 33~38 (1992)

20 and 30GHz-Band Dual-Beam Antennas for NTT's DYANET System

by Yoshiteru Morihiro, Toshikazu Mori, Katsuhiko Aoki, Yoshihiko Yoshikawa & Yoshio Hayakawa

A double-torus dual-beam antenna has been designed and manufactured for the 20 and 30GHz bands. It is made up of a main reflector with a 4.2m aperture, a subreflector, and two auxiliary reflectors and a primary radiator for each beam. The two auxiliary reflectors are shaped for high efficiency. One of them is motor driven to enable satellite tracking. The surface of the offset main reflector is nearly vertical, which reduces the power required for de-icing. Its frame consists of a lightweight truss structure. The antenna is composed of several modules to enable easy on-site assembly.

アブストラクト

残額印字式プリペイドカードシステム

外山 肇・小村 明・山田敬喜・岩井滋雄・荒巻 淳

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 73～78

当社のプリペイドカードシステムは、高度な暗号技術を駆使したハイセキュリティ性、電話回線を利用してデータ伝送を可能としたオンライン性、プリペイドカードとスタンプカードの併用を可能とした多用途性などを基本としている。

さらに今般、利便性向上のためカード上に、未使用残高の印字を可能とした感熱破壊式のプリペイドカードシステムを開発した。

本稿では、開発ポイント、構成、機能などについて紹介する。

三菱インテリジェントビルシステム“マイバスインテグラ”

藤原誠司・八島耕司・保里康一・井上証策

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 97～100

三菱インテリジェントビルシステム“マイバスインテグラ”は、ビル管理機能・セキュリティ機能・情報通信機能を業界で初めて一体化したコンパクトタイプのインテリジェントビルシステムである。受変電、空調、昇降機などの諸設備を管理するビル設備管理システム、防犯監視等のセキュリティシステム、高度情報通信時代に対応する ISDN をサポートできるデジタル電子交換機を一体化することにより、省スペース、優れた経済性等を実現した。

愛知県企業庁納め東三河水道事務所無線テレメータ設備

鈴木敏明・吉原秀樹・内藤茂之・三木次美

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 79～86

東三河水道事務所管内の集中監視制御及び事務の効率化を図るために、無線テレメータ設備を納入した。このシステムは、4 浄水場・3 調整池・15 供給点のデータを事務所に集中して処理する情報伝送装置・情報処理装置を中核に、事務所及び4 浄水場からそれぞれ処理データのアクセスが行えるマンマシンインタフェース装置等からなる。事務所では各水量帳票、料金計算等がテレメータデータを用いてオンライン処理できるようになった。

アクセスコントロールシステム

大森 正・宮田 実

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 101～106

アクセスコントロールシステムとは、ビル内各部屋の人の出入りを管理する入退室管理機能を主体としたセキュリティシステムである。出入り可能な部屋や時間帯を個人ごとに設定し、ID カードの照合で扉を施解錠することによって通行を制限する。さらに、通行者の履歴を蓄積し必要に応じて検索する機能、無人になった部屋への侵入者を監視する機能、ビル管理システムを始めとした他システムとの連動機能を備えている。

三菱統合一元化 SE システム

神河達男・渡部徹雄・杉谷 稔・小宮山正洋・根木伸治

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 87～92

計算機応用技術を製造現場の末端まで活用しようとする試みは、情報の量・質の拡大を伴い、制御システムの高度化、高速化が加速された。一方、保守要員のワンマン／ノーマンオペレーション化のすう勢にあり、人材の投入が極端に抑制された結果、実際のシステムが必要とするハードウェア、ソフトウェアの保守技術を提供することが困難になりつつある。このため、ソフトウェアライフサイクルを一貫支援し、情報の一元管理をした三菱統合一元化 SE システムを開発した。

ダブルドライブスーパーバス方式スピーカーシステム

興野 登・大塚 功・高橋政典

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 107～110

本格的家庭用 AV シアター時代に向けて開発したダブルドライブスーパーバス方式スピーカーについて述べる。この方式は、パイプ状キャビネットの内部に二つの音響ポートを設けた新開発の低音再生方式で、超スリムな形状でありながら豊かな低音を再生する。また、高音用スピーカーと組み合わせることによって臨場感豊かな音場を作り出すことが可能である。この報告では、ダブルドライブスーパーバス方式の原理、特長及びスピーカーの音響特性について報告する。

溶接用炭酸ガスレーザ発振器

大谷昭博・西田 聡・葛本昌樹・水野正紀

三菱電機技報 Vol. 66・No. 4・P 93～96

当社では、溶接と表面改質の用途に適した炭酸ガスレーザ発振器 ML 6050C シリーズを発売した。ML6050C は低次マルチ、高次マルチ、PURE の3種類のビームモードの3機種から構成され、加工目的に応じた最適な発振器をユーザーに提供できるようにした。中でも、PURE モードは、シングルモードに近い非常に高い集光性を実現しており、これまで以上の低ひずみ・高速溶接が可能となった。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 97~100 (1992)

MIBASS Integra: The Mitsubishi Intelligent Building System

by Seiji Fujihara, Koji Yashima, Koichi Hori & Shosaku Inoue

MIBASS Integra is the industry's first compact intelligent building control system to integrate building management, security, and information communication functions. The system saves space and lowers costs by integrating a building management system for a power substation, air conditioning, elevators and other equipment, a security system for monitoring intruders and other functions, and a digital electronic exchange with ISDN support.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 73~78 (1992)

A Prepaid Card System with Remainder Printing Function

by Hajime Toyama, Akira Omura, Keiki Yamada, Shigeo Iwai & Kiyoshi Aramaki

The advantages of Mitsubishi's prepaid card system are based upon the cryptography technology incorporated for data security and online transactions over telephone circuits. The system can be adopted for multiple uses, including prepaid cards and the collection of trading stamps. A new development employed in the system is a destructive thermal print function, where a thermal printer is used to report the remaining value on the card. This function is considered essential for prepaid card systems to enter broader use. The article introduces development procedures, and configuration and functions of the system.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 101~106 (1992)

Access Control System

by Tadashi Omori & Minoru Miyata

The article introduces a security system for controlling entry to and exit from sensitive facilities. Data keyed to a magnetic strip ID card allows authorized sites and entry times to be set for each individual, which are checked each time the card is used to unlock a door. The basic function of the system is to log and reference the history of entry and exit data for rooms, buildings, etc. The system can be integrated with other systems to provide such services as meeting room reservations, monitoring unoccupied rooms for intruders and building management.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 79~86 (1992)

A Water Distribution Information System Delivered to Aichi Prefecture

by Toshiaki Suzuki, Hideaki Yoshihara, Shigeyuki Naito & Tsugumi Miki

The corporation has delivered central monitoring and wireless telemetering systems to the Higashi Mikawa Water Control Center. The monitoring system receives and processes status data from four filtration plants, three storage reservoirs, and 15 supply points, and provides user access to the processing results at the office and the four filtration plants. The telemetering system enables the office to log customer usage and perform fee computations online.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 107~110 (1992)

A Slim Dual-Drive Loudspeaker System with Enhanced Bass Response

by Noboru Kyono, Isao Otsuka & Masanori Takahashi

This report introduces a dual-drive loudspeaker system intended for home theater systems. A columnar cabinet with an elliptical cross section, two bass drivers, three internal chambers and three acoustic ports achieves powerful sound reproduction in the low-frequency range despite its slim appearance. A tweeter in the top of the cabinet extends reproduction to the highest frequency of the audible spectrum.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 87~92 (1992)

MELSUCSES: Mitsubishi Electric's Schematically and Universally Connected Systems Engineering System

by Tatsuo Kamikawa, Tetsuo Watabe, Minoru Sugitani, Masahiro Komiyama & Shinji Negi

The sophisticated and extensive control systems now being installed in many factories require hardware and software maintenance expertise that is increasingly difficult to provide. In answer to this problem, the corporation has developed the MELSUCSES system. This system is designed to provide integrated data management and support throughout the entire software life cycle, while employing a minimum amount of labor.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 4, pp. 93~96 (1992)

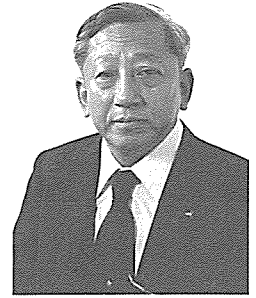
A Carbon-Dioxide Laser for Welding

by Akihiro Otani, Satoshi Nishida, Masaki Kuzumoto & Masanori Mizuno

The corporation is now marketing ML6050C Series carbon-dioxide lasers for welding and surface treatment applications. The series includes three different beam oscillation modes: low-order multimode, high-order multimode, and pure mode. The pure mode beam, which approaches single mode oscillation, provides a highly collimated beam for lower welding distortion and higher welding speeds than were previously possible.

アンテナ技術特集に寄せて

三菱電機株式会社 顧問
工学博士 喜連川 隆



電波を空間に放射したり、空間から電波を受けたりするものがアンテナで、1888年（明治21年）に H. R. Hertz が電波が光波と同じ性質を持つ電磁波であることを実証するのに用いたのがパラボラアンテナである。八木—宇田アンテナの発明は1916年（大正5年）であるが、当社は1930年代から無線通信機や電波兵器と共に種々のアンテナを作ってきたが、1925年3月創刊の三菱電機技報にアンテナが初めて出たのは1954年の第28巻臨時増刊号で、この年の4月に開通した日本電信電話(株)(NTT)の東名阪 4GHz 中継回線に当社が納入したパスレングスレンズアンテナもこれに解説してある。NTTの御指導のもとに当社のアンテナ技術は成長し、以下に記すようにアンテナに関する相談はほとんど三菱電機にくるようになった。

1956年には稚内のレードーム付き沿岸監視レーダを防衛庁に納入し、引き続き国産最初の潜水艦“おやしお”に潜望鏡式超広帯域無指向性及び指向性アンテナを納入し、また1964年には、富士山頂の開口径 5 m の 2.8GHz 気象用レーダアンテナを作り、正20面体系の直径 9 m 高さ 7 m のレードームの中に入れた。なお、ジェット戦闘機機首レードームも作った。また艦載、航空機搭載のコセカントスクエアアンテナや地上大型三次元レーダアンテナも開発した。これは方位角は回転式で、俯仰角は大型反射鏡 3 面のフェーズドアレー式で、後に航空管制にも用いられた。

列車用アンテナとしては、1960年に東京—大阪 6 時間半のビジネス特急に通信用円形スロットアンテナを納入し、東京オリンピックの1964年には東海道新幹線に VHF ブレードアンテナ及び VHF フラッシュマウント指向性切替え

アンテナを納入した。最近のものは東北新幹線のものと同様の漏洩同軸方式で、周波数はいずれも 400MHz 帯である。

航空機用アンテナとしては1963年に国産旅客機 YS-11の通信用ブレードアンテナ、テイルキャップアンテナや航法用の垂直尾翼埋込形スロットアンテナなどを納入した。最近は海事衛星インマルサットを使えるようになったが、我が国の旅客機搭載地球局は今のところ 1 機だけで、アンテナは 1.6GHz のプリント配線式のパッチのフェーズドアレーである。

自動車のアンテナについてもパトロールカーの高利得アンテナや自動車搭載の偏波ダイバーシチアンテナ及び基地局アンテナを1960年頃から開発してきた。自動車も宇宙開発事業団の ETS-V を使って 1.5～1.6GHz で通信実験をしているから、近く実用に供されるがアンテナはプリント基板式のフェーズドアレーである。

宇宙開発については当社が1955年頃から東京大学生産技術研究所の秋田道川ロケット実験場でレーダ追尾のお手伝いをしていた関係で、1965年から筆者が東京大学宇宙航空技術研究所の共同研究員として宇宙開発用アンテナの勉強をした。

宇宙局アンテナについては、当社が1973年に電離層観測衛星 ISS の契約者となり、1976年に打上げられた。引続き通信衛星さくら 1, 2, 3 号がそれぞれ、1977, 83, 88年に打上げられたが、アンテナは当社が作ったもので、カーボンファイバーを用いた軽量のホーンリフレクタアンテナで、30/20GHz は日本の主要部分、6/4GHz は日本全土を覆うようにビームを整形してある。1980年に打上げられたイ

ンテルサットVのグローバルビームアンテナも当社の作ったホーンアンテナを搭載している。現在は宇宙科学研究所のVSOP計画に用いる予定の直径10mのケーブルネット式展開アンテナを開発中である。

地球局アンテナについては、1960年に東京大学、国際電信電話(株)(KDD)及び三菱電機の3者で宇宙開発用大口径空中線の共同研究を始めた。初めはベル研究所のホーンリフレクタとJPLの低雑音パラボラのいずれがよからうとか、ベル研究所のホーンリフレクタとイギリスの深いパラボラのいずれかがよからうという話が出たが、パラボラアンテナはいずれも周波特性が悪くて使えない。ホーンリフレクタは雨天では使えないので筆者はカセグレンアンテナを推奨し、これに落ちついた。KDDは直径20mのカセグレンアンテナを茨城衛星通信実験所に設置した。1963年11月23日のアメリカからのテレビの受信公開実験に用いられたのがこのアンテナで、衛星通信にカセグレンアンテナを世界で最初に使ったのが日本である。東大は、直径18mの主反射鏡を持ち、4GHzではカセグレンアンテナ方式、VHFではパラボラアンテナ方式として働くトラッキングアンテナを鹿児島宇宙空間観測所に設置した。その後ドイツRaistingのカセグレンアンテナが出来たのが1964年の中頃であるが、最近では国際衛星通信地球局アンテナといえは世界中どこでもカセグレンアンテナで、日本がこれに先鞭をつけたことは大変喜ばしいことである。1981年に完成したKDD山口局の4枚反射鏡集束ビーム給電カセグレンアンテナは利得能率80%、楕円偏波率0.28dBで、30m級アンテナで当社推奨品である。1978年にNTTに納入した30/20GHzのものは直径11.5mのオフセットカセグレンで開口能率は80%以上である。

衛星通信用以外のものでも、世界に誇れるものが色々ある。1982年に完成した国立天文台野辺山宇宙電波観測所の電波望遠鏡は直径45mで給電系を切り替えることにより、8GHzから120GHz位まで使える。homology designになっているのが特徴で、我が国の通信衛星CSを用いて観測したところによると鏡面精度は93 μ mになっている。1984年

4月に完成した京都大学超高層電波研究センターのMUレーダのアンテナは46.5MHzの3素子八木アンテナをターニスタイルにしたものを9,000m²の所に475個並べたアレアンテナで、地球の大気圏の潮汐現象の観測などに用いられている。また、1984年10月に完成した宇宙科学研究所の直径64mのアンテナは2,300MHzで利得62.4dBで宇宙空間探査用人工惑星との交信用のアンテナで、西独Bonnの直径100m電波望遠鏡以外にこれより大きなものは数少ない。1986年にHalley彗星探査機“さきがけ”、“すいせい”の観測データの受信に成功した。惑星との通信以外にはVLBI(Very Long Baseline Interferometer)に使われ、前述のVSOP計画の地上の一局としても使用される。

以上、製作したアンテナを時系列に述べたが、アンテナ研究のおかげで、学位を貰った者が20名位IEEEのフェローも3名おり、その他学会の論文賞や業績賞等多数の者が受賞した。

筆者紹介

1941年 3月 大阪帝国大学理学部物理学科卒業
1941年 4月 三菱電機株式会社入社 本店研究部勤務
1971年 同社北伊丹製作所所長兼中央研究所技師長
1974年 同社中央研究所所長
1979年 同社常務取締役技術本部長兼開発本部長
1981年 同社顧問 現在に至る
その間
1959年 工学博士
1966年 電気通信学会アンテナ伝播研究会初代委員長
1967年 電子通信学会業績賞受賞
1971年 紫綬褒章受賞
1973年 IEEE AP-S Tokyo Chapter 初代委員長
1976年 IEEE Fellow
1978年 電子通信学会功績賞受賞
1982年 電子通信学会名誉員
1983年 計測自動制御学会名誉員
レーザ学会特別功績賞受賞
1984年 日本電機工業会永年功績賞受賞
1988年 勲三等瑞宝章受章
1992年 レーザ学会名誉員
著述
“Advanced Technology in Satellite Communication Antennas, Electrical and Mechanical Design”, Artech House (Boston-London), (Jan. 1990).

アンテナ技術の現状と動向

片木孝至*
折目晋啓**

1. ま え が き

西暦 1888 年ヘルツが電磁波の存在を示してから約 100 年の期間に、電磁波の空間伝搬特性を利用したシステムであるラジオ、TV 放送、地上マイクロ波中継回線、レーダ、衛星通信、電波天文及び移動体通信等が急速に進歩し、情報化社会が発展してきた。それに伴い、システムの顔といえるアンテナも急速に進歩した。ここでは、最近 15 年間に当社が開発したアンテナ及びアンテナ技術を中心として、この技術分野の現状と今後の動向について述べる。

2. レーダ用アンテナ

レーダ用のアンテナで技術革新の最も著しいものはフェーズドアレーアンテナである。フェーズドアレーアンテナは、配列された多くの素子アンテナの励振振幅位相を電子的に制御し、ビーム走査やビームの形状を変えることができるので、レーダの多機能性や多目標処理を可能にする。フェーズドアレーアンテナの研究は、世界的には 1940 年代から始められ、今日に至るまで約 50 年経過し、現在各方面で実用に供されるようになった。我が国における研究は、1960 年代に入ってからであるが、半導体の技術革新とともに、最近の 15 年間に著しい進歩を遂げた。

1970 年から 1980 年初頭にかけて、フェライト移相器やピンダイオード移相器を機能素子としたパッシブフェーズドアレーアンテナの開発が進められた。アンテナの形式としては、素子数が比較的少なくてすみ経済的な、エレベーションのみ

ビーム走査が可能なコーポレイト給電形又はアレー給電反射鏡形の一次元ビーム走査アンテナ等が主にその対象となった。図 1、図 2 にフィード形式の異なるフェーズドアレーアンテナの開発例を示す。

また、機能素子として非可逆又は可逆形の大電力フェライト移相器や駆動回路が開発された。非可逆型の導波管移相器としては、トロイドの貫通部に誘電体を埋め込んだり、グルーブ構造とすることで大電力特性を得ている。可逆型移相器としてはデュアルモード移相器が代表的である。一般的にフェラダー旋波子材料のせん(尖)頭電力を向上させるためには、フェライトに Ho 等の稀土類イオンが添加されるが、そのような材料は一般的に磁歪(歪)効果が大きい。フェライトに磁歪効果があると、移相器に外部応力が加わった場合に逆ビーデマン効果によって位相特性に非可逆性が生じ、可逆型移相器として動作しなくなる。これを解決する方法として、フェライトを軸方向に多分割し、再度接着層を介して一体化⁽¹⁾する方法がある。大電力デュアルモード移相器の外観を図 3 に示す。

なお、湾岸戦争で一躍有名になったミサイル迎撃用の PATRIOT System 又は AEGIS System 用のフェーズドアレーレーダはこの種のタイプを二次元化したものであるが、1965 年前後に開発に着手され、開発期間約 20 年を経て現在

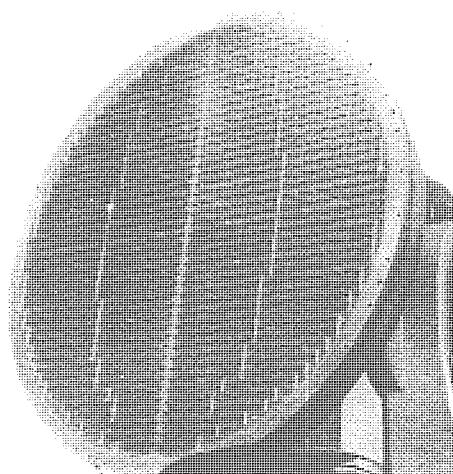


図 1. コーポレイト給電形パッシブフェーズドアレーアンテナ



図 2. アレー給電反射鏡形パッシブフェーズドアレーアンテナ

実用に供されている。

各素子に送信機能をもつアクティブフェーズドアレーアンテナの研究開発は、我が国では1970年代初頭から始められ、当初はインパットダイオードを用いた注入同期発信方式の開発を行い、周波数安定性、効率、冷却方式等の技術課題を明確にした。1980年初頭から世界に先駆け、ガリウムヒ（砒）素によるFET増幅器を用いた半導体モジュールの開発に取り組み、前記技術課題を解決することに成功するとともに、小型化等に対する技術課題を明確にした。その後、MMIC（モノリシックマイクロ波集積回路）を採用した半導体モジュールの開発を行い、航空機搭載が可能な薄型軽量化アクティブフェーズドアレーを実現することに成功し、輝かしい成果を挙げた。今後は、低価格化を実現するための技術開発が重要課題となるであろう。

技術的な内容では、間引きによる指向性合成の手法として従来から統計的手法が提案されているが、より低サイドローブ化の可能な指向性合成法として確定的素子間引き法⁽²⁾が開発された。素子の振幅を複数個にした場合も、上記理論は適用できる。また、非対称な素子配列のアレーのサイドローブ抑圧に効果的な指向性合成法として平面波合成法が提案され、特定方向へのナル点形成、ファンビーム等の任意の指向性合成が容易になった。素子アンテナ間の相互結合に関しては種々報告されているが、より実用的な近似式理論や多面アレーの面間結合解析法が提案され、今後の進展が期待できる。

アレーアンテナの給電系については、薄型化・低損失化のために、多層化プリント基板を用いた薄型給電回路や扇形電力分配器、斜めスロット薄型導波管分配器、ラジアル線路型分配器、サスペンデッド線路型方向性結合器等が報告されている。図4に扇形電力分配器を用いた薄型給電回路を示す。また、各移相器への位相データ設定時間を従来の方式の $1/\sqrt{(\text{素子数})}$ にできるデータ転送方式が開発⁽³⁾され、実用されている。

実装密度の極端に高いフェーズドアレーの冷却技術は、システム構成上、非常に重要な技術である。一例として、強制液冷方式のものでは超薄型冷却板を採用し、冷媒流通時には

内圧によって冷却板が膨らみ、発熱体に密着して接触熱抵抗を減じ、大きな伝熱性能をもつ方式が提案されている。

レーダ用アンテナでは、レードームがアンテナに及ぼす影響を評価することが必要になる。簡便な方法として立体レードームを、局部的に平板ドームとして透過係数を求め、この透過係数を光線で対応づけられるアンテナ開口面上の電界に乗じて、積分することによって立体レードームの透過後の放射パターンを求めたり、ボアサイトエラーの評価に適用した例が報告されている。また、イメージローブを評価するために、上記手法に反射波を考慮した例も報告されている。更に進んだ方法として、レードーム内側表面の入射波からレードーム外側表面の電磁界を求め、これを二次波源と考え積分する方法がある。物理現象とよく一致する結果が得られている。

各種レーダシステムを設計するには、対象物のレーダ散乱断面積を正確に知る必要がある。また、バイスタティックレーダのシステム設計をするには、同様に対象物のバイスタティック散乱断面積を知ることが不可欠である。多数の平面から構成される物体のレーダ散乱断面積は、各面のエッジからの入射方向への回折波の合成を、またバイスタティックレーダやマルチスタティックレーダの場合は受信アンテナの方向への回折波の合成を求めればよい。また、曲面を含む物体でも、それを平面で近似してレーダ散乱断面積を求めることができる。この場合、エッジは有限長の直線であるので等価端部電磁流法が有効である。

等価端部電磁流法は、1983年二次元の任意形状導体板に適用した例がF. A. SIKTAによって報告され、1985年三次元の任意形状物体に拡張する技術⁽⁴⁾が開発された。この解析法は物理現象とよく一致することがその後確かめられ、種々活用されるようになった。同様な方法を用いたバイスタティックレーダ散乱断面積に関する報告もされている。今後、凹

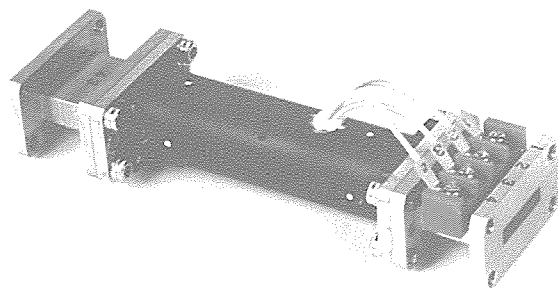


図3. 大電力デュアルモード移相器

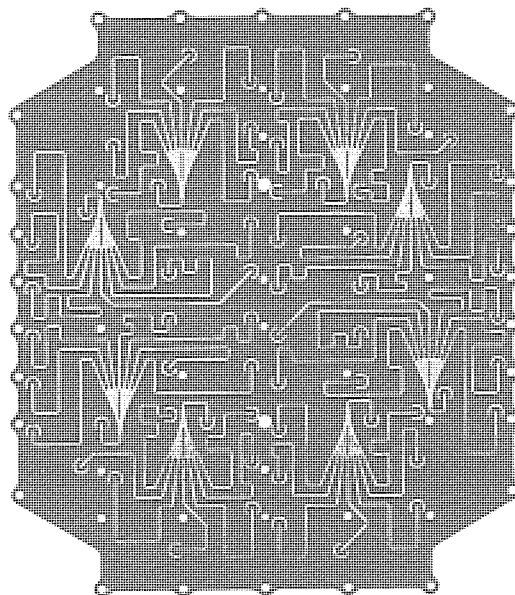


図4. 多層化薄型給電回路

部をもつ任意形状物体への拡張が課題である。

アクティブフェーズドアレー全体の計測法も、システム全体の成否に大きく影響する重要な技術である。計測は、供試アンテナを何ら変更することなく、アンテナがもつ性能を正確に明らかにするものでなければならない。

素子電界ベクトル回転法⁽⁵⁾はその条件を満足させるものである。また、上記計測を電波暗室内等のフレネル領域で行う際の手法⁽⁶⁾についても開発が行われ、その有効性が確認されている。レーダ用アンテナのビームの方向を正確に計測評価する方法として、供試アンテナに対向するアンテナをフェーズドアレーとして素子電界ベクトル回転法を適用し、両アンテナとも機械的に動かすことなくビーム軸を計測する方法が報告されている。これに関連し、最小ビーム走査間隔やビーム指向精度を向上させるための高ビット MMIC 移相器の開発結果も報告されている。

フェーズドアレーアンテナは素子の数が多いので、故障診断機能が必要である。アンテナの一部にピックアップアンテナを埋め込み、素子電界ベクトル回転法を適用し、故障した素子を検出するシステム⁽⁷⁾が提案されている。上記のような計測評価技術を支えるものに、電波暗室、スキャナ等の計測設備がある。大電力電波暗室のためにセラミック、ガラスファイバ及びカーボンファイバを積層した吸収体の開発が行われている。また、宇宙用等の大型アンテナ試験用として高さ 10 m 級のスキャナを含む近傍界測定システムの構築例の報告がある。

レーダシステムでは、海上を低空で飛行する目標物を追尾する際に、マルチパス現象（ミラー効果）によって生じる仰角追尾精度の劣化が問題で、種々の研究が行われている。これに対処するフェーズドアレーアンテナとして、中央部のサブアレーと周辺部のサブアレーの出力をハイブリッドで合成して Σ 信号と Δ 信号を得ることにより、 Δ/Σ 信号を角度に関して偶関数とするデュアルモノパルス方式が報告されている。シミュレーションによると、ビーム走査時でも良好な測角精度が得られている。

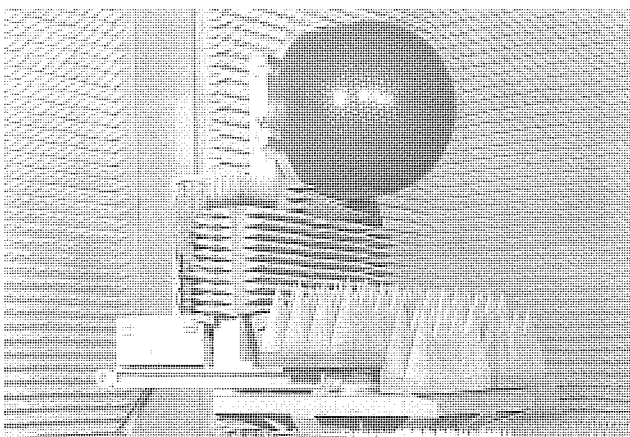


図 5. 試作したコンフォーマル アレーアンテナ

今後のレーダ用アンテナとしてコンフォーマルアレーやデジタルビームフォーミング（以下“DBF”という。）技術を採用したアレーアンテナがある。米国では 1986 年に Project Forecast 2 という計画が発表された。主要な計画の一つに Smart Skin がある。これは送受信素子を一層小型・軽量・薄膜化してアレーアンテナのみならず、信号処理及び信号解析部等も多層化して航空機などの機体の表面に埋め込んでしまおうというものである。この計画は 1993 年まで実施される。

コンフォーマルアレーの研究・開発に関しても、これらの動向と符号して将来の実用化を目的とした内容の発表が増え、試作規模も大型化している。これらの背景には、計算機技術・マイクロ波半導体技術・加工プロセス技術・精密工作技術の急速な発展がある。コンフォーマルアレーの指向性合成については、当初、計算機を利用した数値計算による研究が進められた。その後、任意形状のコンフォーマルアレーに対して主ビーム方向に直交する面に投影したときの素子密度を考慮した低サイドローブパターンの形成法、さらに放射パターンのサイドローブレベルが零点の位置によって決定されることに着目した指向性合成法（零点整合法）が報告⁽⁸⁾されている。試作したコンフォーマル アレーアンテナの外観を図 5 に示す。

DBF はアレーレーダのビーム合成をデジタル信号処理によって実現する。レーダ及び通信の分野への応用は 1970 年代から基礎的な理論について検討が始められてきたが、計算機技術・デジタル技術・マイクロ波半導体技術・集積回路技術の飛躍的発展により、1970 年代末から 1980 年代初頭にかけてようやく実現性が考えられるようになってきた。そして、1980 年代半ばから後半にかけ、平面アレーに DBF 技術を適用したオフライン DBF の試作結果が報告された。また、1980 年代後半から 1990 年代前半にかけ CMOS ゲートアレー

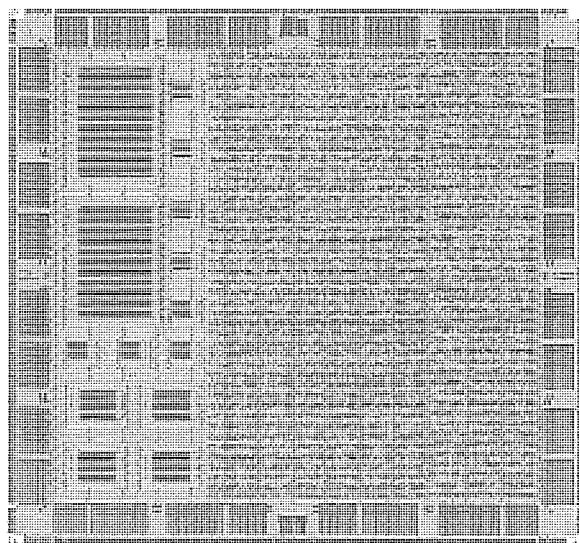


図 6. DBF 専用 LSI チップ

一等を使用した DBF 専用の LSI 及びそれらを用いたリアルタイムの DBF 処理装置の開発が進み、オンライン DBF アレーの試験結果が報告されるようになった。DBF 専用 LSI チップの外観写真を図 6 に示す。

さらに、コンフォーマルアレーに上記 DBF 技術を適用するシステムが考えられ、1989 年に初めて試作結果が報告⁽⁹⁾された。これはコンフォーマルの特徴である広角ビーム走査の容易性及び周囲環境との整合性と、DBF システムの特徴であるサイドローブ低減の容易性及びマルチビーム化の容易性など双方の特徴を生かした複合システムである。21 世紀での実用化を目指し、前記 Smart Skin 化も含め、急速に開発が進められている。

3. 衛星搭載用アンテナ

通信衛星の形式としては、日本の CS シリーズに見られるスピン安定方式に対し、箱型の衛星本体と太陽電池パドルからなる三軸安定方式が主流になっている。また、重い衛星が打上げ可能となり、従来の 500 kg から 1～2t 衛星が主流となり、それに搭載するアンテナの開口径も 2～3m 程度になっている。アンテナの形式も複雑で、直交偏波の利用やマルチビーム方式が採用され始めている。表 1 は、代表的な日本の通信衛星のアンテナの主要諸元を示す。

CS-3 のアンテナは開口径約 1m であり、ビーム数は 1 であるが、鏡面修整技術で Ka 帯において日本列島を効率良くカバーするビーム成形を行い、周波数共用給電技術で C 帯と Ka 帯を共用しているのが特徴である。

ETS-V のアンテナは開口径 1.5m のオフセットパラボラアンテナであり、ヘリカルアンテナを一次放射器とする 2 ビームのマルチビームアンテナである。アンテナ鏡面を CFRP のメッシュで製作し、アンテナ全体で 5.7 kg と軽量化した。

スーパーバードは図 7 に示すように、開口径 2.1m の Ku 帯アンテナと径 2m の Ka 帯アンテナを搭載している。アンテナ形式は両者ともオフセットパラボラである。Ku 帯アンテナはグリッドリフレクタによる直線偏波の偏波共用を行って周波数の有効利用を図り、さらにマルチホーンによるビーム成形を行い、日本列島を効率良くカバーしている。Ka 帯アンテナはマルチホーンと鏡面修整を用いた成形ビームアンテナであり、同じく日本列島を効率良くカバーしている。また、このアンテナは同じ一次放射器を用いて上記成形ビームのほか、スポットビームも形成している。成形ビームとスポットビームの分離は、帯域フィルタによって行っている。

ETS-VI は我が国最大の大型通信衛星であり、主な実験ミッションは、国内の固定通信と日本周辺の 200 海里をカバーする移動体通信である。これに用いるアンテナは径 2.5m と 3.5m の大型アンテナであり、アンテナ形式はオフセットカセグレン形式である。径 2.5m アンテナは Ka 帯の受信と C 帯の送受信を共用したアンテナであり、周波数選択板によって Ka 帯と C 帯を分波している。Ka 帯の一次放射器はクラ

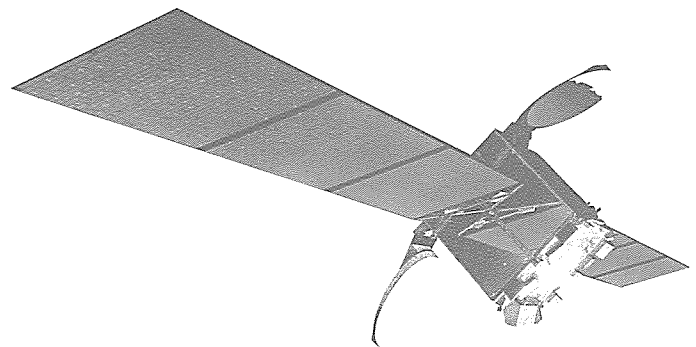


図 7. スーパーバード

表 1. 主要国内通信衛星のアンテナ

パラメータ	CS-3	ETS-V	スーパーバード	ETS-VI
衛星打上げ年月	1988- 2	1987- 8	1989- 6	1993年予定
衛星質量(kg)	550	550	1,500	2,000
姿勢制御方式	スピン安定方式	三軸安定方式	三軸安定方式	三軸安定方式
主要ミッション	C 帯 : 国内固定通信 Ka 帯 : 国内固定通信	L 帯 : 移動体通信実験	Ku 帯 : 国内固定通信 Ka 帯 : 国内固定通信	S 帯 : 衛星間通信 C 帯 : 国内固定通信 Ka 帯 : 国内固定通信 S 帯 : 移動体通信
アンテナ開口径(m)	0.95 (修整鏡面)	1.5	Ku 帯 : 2.1 Ka 帯 : 2 (修整鏡面)	S 帯 : 1.7 Ka/C 帯 : 2.5 Ka/S 帯 : 3.5
アンテナ形式	ホーンリフレクタ	オフセットパラボラ	Ku 帯 : オフセットパラボラ Ka 帯 : オフセットパラボラ	S 帯 : マルチビームフェーズドアレー Ka/C 帯 : オフセットカセグレン Ka/S 帯 : オフセットカセグレン
一次放射器	多周波共用ホーン	ヘリカル	Ku 帯 : クラスタホーン Ka 帯 : クラスタホーン	S 帯 (衛星間通信) : N/A Ka 帯 (受信) : クラスタホーン Ka 帯 (送信) : クラスタホーン C 帯 : ホーン S 帯 (移動体通信) : マイクロストリップ

スタホーン給電方式でマルチビームを実現している。C帯は送受共用のシングルホーンである。径3.5 m アンテナはKa帯の送信とS帯の送受信を共用したアンテナであり、同じく周波数選択板によってKa帯とS帯を分波している。Ka帯の一次放射器はクラスタホーン給電方式であり、マルチビームを実現している。S帯は送受共用のマイクロストリップアレーアンテナを用いた一次放射器であり、五つのサブアレーで5個のスポットビームを形成している。

今後の通信衛星技術の動向として、固定局間の通信は経済性向上の観点から衛星の大容量化、地球局の小型化が要求されている。このためのアンテナ技術としては、大型アンテナ、ビーム成形及びマルチビームアンテナ技術が更に重要になってくる。また、周波数資源と静止軌道の有効利用の観点から、周波数帯の共用技術や直交偏波共用技術も重要である。

固定通信に用いられる大型アンテナは、利用される周波数帯がC帯、Ku帯及びKa帯であるため、ほとんどソリッド鏡面を用いた反射鏡アンテナである。この鏡面の開口径はインテルサット-VIで最大3.2 m、ETS-VIで最大3.5 mである。これらのソリッド鏡面は展開方式を採用しており、折り畳まれて打ち上げられるが、ロケットのフェアリング寸法の制限から、今後ともこの程度の寸法が最大と思われる。

ビーム成形技術は、アンテナの放射パターンの形をサービスイリアの形に合わせて成形し、高利得を得る技術である。我が国ではCS及びBSシリーズで用いられており、前者は鏡面修整方式、後者はマルチホーン方式が採用されている。また、スーパーバードでは両方の方式を併用している。

インテルサット衛星では、アンテナの大型化とともに一次放射器のホーンアレーの素子数が増え、しかも覆域ごとに給電回路を搭載しているため、質量が増大している。この解決策として一つの給電回路で覆域が変化できるリコンフィギュラブルアンテナの開発が行われている¹⁰⁾。図8はこの目的のために開発した一次放射器と給電回路である。

マルチビーム技術は、我が国ではETS-VIで本格的に利用される。ビームの数はKa帯及びS帯とも5ビームであり、Ka帯では周波数の有効利用を図る目的で、次隣接ビームで

の同一周波数の利用及び同一ビーム内での偏波共用が行われている。将来的には、Ka帯では13ビームで日本をカバーすることが検討されている。また、マルチビームアンテナでは一般的にビーム偏向角が大きくなると、急激に特性が劣化する欠点があるが、特性劣化の少ない方式としてFFOC (Front Fed Offset Cassegrain) アンテナ方式が開発されている。このアンテナはビーム偏向角の大きいインテルサット衛星に有効である。

周波数帯の共用化技術は、CSシリーズでC帯とKa帯の送受で合計4周波数帯を共用した複雑な一次放射器が用いられている。一方、ETS-VIでは周波数選択板を用いることにより、C帯/Ka帯及びS帯/Ka帯の共用を行っている。前者の場合、単一ビームアンテナには適しているが、ホーンの寸法が大きくなることから、クラスタホーンを用いたマルチビームアンテナでは、後者の方式が適している。さらに、周波数選択板の機能と副反射鏡の機能を持たせた周波数選択鏡面が重要な開発要素になる。

偏波共用技術は、現在Ku帯でオフセットパラボラアンテナの鏡面としてグリッド鏡面を用いた方式が一般的に利用されており、スーパーバードのKu帯アンテナにも採用されている。これは、交差偏波特性の良いアンテナが容易に得られるためであるが、鏡面の製造には特殊な技術が要求される。一方、ETS-VIのKa帯では2枚鏡を用いて、交差偏波消去系の鏡面を構成し、グリッド鏡面を使用せずに偏波共用を実現している。今後とも、偏波共用アンテナはグリッド鏡面を用いたオフセットパラボラ方式と2枚鏡方式の両方式が用いられていくと思われる。

さらに、衛星通信は移動体通信分野での利用が活発化するのであろう。移動体通信では地球局側の設備は固定通信より小規模になり、現在の自動車電話や携帯電話程度になる。このため、衛星側のEIRP (実効放射電力) とG/T (利得対雑音温度比) を大きくしなければならず、衛星側のアンテナがますます大型化していく傾向にあり、径30 m程度の大型展開鏡面アンテナの構想がある。移動体通信衛星アンテナの他の

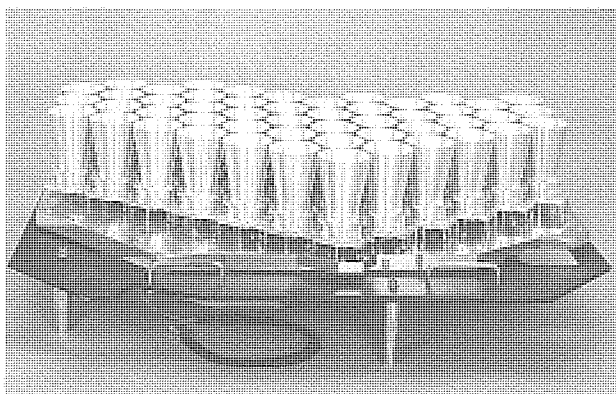


図8. リコンフィギュラブル ビームアンテナ用一次放射器



図9. SNG用車載局アンテナ

動向として、アクティブフェーズドアレーを利用した通信システムも検討されている。移動体通信衛星用のアクティブフェーズドアレーアンテナの一例として、ETS-VIの実験ミッション機器の一つに、Sバンド衛星間データ中継システム用のアンテナがある⁽¹¹⁾。アクティブフェーズドアレーは、ビーム方向の制御とビーム再形成が可能である等の利点が多いため、大型展開鏡面アンテナと並んで今後の重要な開発技術となっている。

4. 衛星通信地球局アンテナ及び電波天文アンテナ

衛星通信地球局では、衛星電力の増大によるアンテナの小口径化、衛星の位置保持精度の向上による衛星追尾機構の簡略化、マイクロ波半導体及び回路技術の進歩による送受信機の小型化により、地球局全体の小型化が進んできている。今後、衛星の姿勢制御精度の向上とともに、衛星搭載アンテナのマルチビーム化が進み、地球局のより一層の小型化が進むと考えられる。

図9は、SNG (Satellite News Gathering) 用車載局アンテナとして実用化されたオフセットグレゴリアンアンテナで、開口を1 m×2 m (1.4 m 相当) のだ(楕)円とすることにより、隣接衛星との電波干渉を4～5 dB 低減している。

図10は、地球局の経済化と高信頼性化を図るべく実用化されたデュアルビーム地球局アンテナであり、4°離角の2衛星に同時にアクセスできるものである。また、企業内通信、CATV 等の受信専用局としては、一般に開口径が75 cm～3.6 m 程度のオフセット形パラボラアンテナが使用されているが、パラボラアンテナよりも占有スペースを小さくでき、設置性・搬送性に優れた平面アンテナ⁽¹²⁾や、トーラス鏡面を用いた4ビームアンテナ等も開発されている。平面アンテナの外観を図11に、4ビームアンテナの外観を図12に示す。

一方、衛星放送受信用アンテナについても、BS-3の打上げによって一層小型化するとともに、平面アンテナの需要が次第に増している。BS 用平面アンテナとしては、放射素子としてパッチ、スロット、ヘリカルアンテナ等を用い、これ

らをトリプレート線路やラジアル線路で給電したものが実用化されている。特に、ラジアル線路形は高効率を達成でき、注目を浴びている。さらに、1台のアンテナでCSとBSの両方を受信可能なCS/BS 共用アンテナの開発も進められている。

衛星通信のもう一つの大きな用途は移動体衛星通信である。移動体としては、航空機・船舶・自動車などがあるが、現在実用になっているのはインマルサット衛星を用いた船舶通信用アンテナで、開口径1 m のパラボラアンテナを用いて衛星を機械的に衛星追尾するものである。ほかは実験段階であり、軽量薄形で電子的に衛星追尾が可能なフェーズドアレーが各方面で研究されている。

図13は、車載用平面可動ビームアンテナであり、自動車の動きに関係なくアンテナの主ビームを常に衛星の方向に向けることができるため安定した通信ができる。また、アンテナと給電回路とを一体化した多層薄形であるため、美観を損なわず自動車へ取り付けられる。



図11. 衛星通信受信用平面アンテナ(AF-10形)

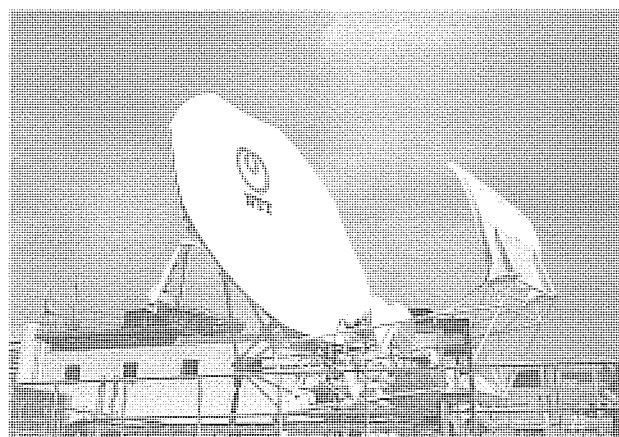


図10. デュアルビーム地球局アンテナ

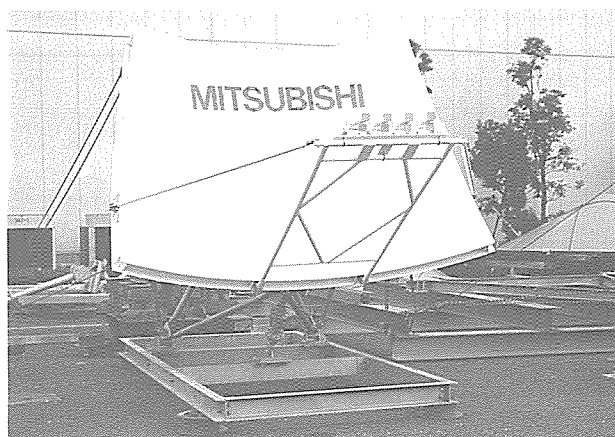


図12. 衛星通信用4ビームアンテナ

電波天文アンテナでは、アンテナを大口径にすることによる高分解能化、アンテナを複数周波数共用にすることによる複数周波数の同時観測化が進められている。また、観測時間を縮小するために、アンテナをマルチビーム化することも検討されている。アンテナの大口径化に対応して、一方では、衛星からの電波を用いた電波ホログラフィによって高精度で鏡面誤差を測定し、鏡面精度を向上する技術が実用化され効果を上げている。また、他方では、等価的に大口径なアンテナを得るために、アンテナを複数の素子アンテナで構成し、これらの素子で受信した信号を重ね合わせて有用な情報を得る干渉計 (Interferometry)、素子同士を結ぶ直線 (基線: Baseline) を地球規模に長くすることによって分解能を向上した VLBI (Very Long Baseline Interferometry) が実用化され、更に基線を長くするために一方の素子アンテナを衛星に搭載するスペース VLBI も計画されている。

VLBI 衛星用アンテナとしては、開口径 10m の展開メッシュアンテナの開発が行われている⁽¹³⁾。このアンテナの開発のポイントは、最高周波数 22GHz 帯で用いるための高密度メッシュの開発と目標 0.5mm rms 以下の鏡面精度を実現する点にある。試作結果によると、高密度メッシュの電気性能は 22GHz で、透過損失が約 -18dB 以下の性能が得られている。アンテナの複数周波数共用化については、ダブルフレアアイリス型 TM₁₁ モード発生器を設けることにより、X 帯でコルゲートホーン内で発生する HE₁₂ モードを打ち消す構造の S/X 帯共用広帯域コルゲートホーンや、金属板に周期的にく (矩) 形の穴を設けることにより、自由空間で S 帯の電波と X 帯の電波とを分離する大電力 FSR (Frequency Selective Reflector: 周波数選択鏡面) が実用化されている。

5. 移動体通信用アンテナ

移動体通信分野は、自動車電話・携帯電話を中心に、ここ 10 年ほどで急激な成長を遂げており、1990 年代には更にデジタル化、高度化へと進んでいくことが予想される。また、移動体通信を用いたカーナビゲーションシステムの研究・開

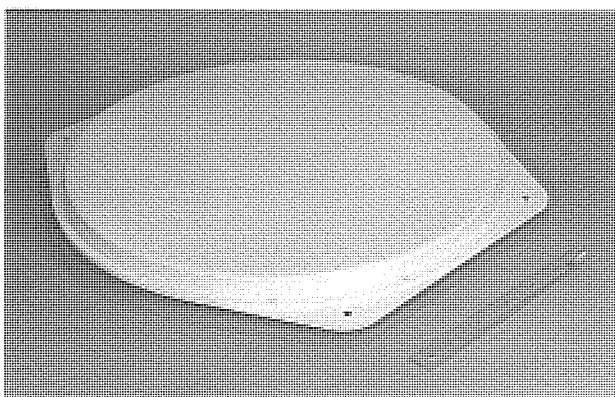


図13. 車載用平面可動ビームアンテナ

発も進められており、さらには衛星を用いた移動体通信など今後ますます大きな発展が見込まれる。

自動車電話は、1979 年に日本電信電話 (株) (NTT) によってサービスが開始されたが、加入者の増大による容量限界から、1988 年には大容量自動車電話方式が導入された。これは、無線チャンネル間隔の狭小化、無線ゾーンの小さゾーン化、ダイバーシチ受信等により、加入者容量の増大を図ったものである。この方式に対応するために、水平面ビーム幅を任意に設定でき、主ビームをふ (俯) 角方向に傾斜させる機能をもつビームチルト基地局アンテナが開発されている。また、1990 年には小さゾーン化に伴う基地局数の増大、デジタル化等に対応するため、広帯域化・軽量化・風圧荷重の低減を図った基地局アンテナも開発された。移動通信基地局用ビームチルトアンテナの外観を図 14 に示す。

一方、携帯電話においても小型化が進められ、1991 年に容量 150cm³ の超小型携帯機が登場した。これには 3/8 波長ホイップアンテナや板状逆 F 形アンテナが採用されている。

列車無線は、昭和 39 年に東海道新幹線に空間波方式が導入されて以来、新幹線を中心に実用化されている。東北・上越新幹線では、沿線に敷設した漏えい同軸ケーブル (Leaky Coaxial Cable: LCX) と車載アンテナとの間で通信を行う LCX 通信方式が採用されており、車載アンテナとしては、スロットアレーアンテナ (東北・上越) が車両側面のスカート部分に搭載されている。一方、東海道・山陽新幹線でも、1986 年に東京～新大阪間に LCX 方式が導入されている。東海道新幹線の車載アンテナとして小型・薄型化を図るため、

図 15 に示す一端短絡マイクロストリップアンテナを用いた 4 素子アレーアンテナが開発された。また、新大阪以西では、現在も空間波方式が用いられているが、車載アンテナとして 6 素子フェーズドアレーアンテナの開発により、放射ビームを前・後・左右方向に切り替えられる機能をもつとともに、従来のアンテナに比較して大幅な小型化を達成している⁽¹⁴⁾。

移動体通信を用いたカーナビゲーションシステムとしては、建設省を中心に開発が進められている路車間情報システム (Road Automobile Communication Sy-

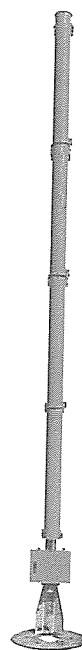


図14. 移動通信基地局用
ビームチルトアンテナ

stem : RACS), 警察庁による新自動車交通情報通信システム (Advanced Mobile Traffic Information and Communication System : AMTICS) 等が提案されている。RACS は、道路沿線に設置したビーコンと呼ばれる送信器から位置情報・渋滞情報等を送信し、これを車載アンテナによって受信することにより、カーナビゲーションを行うものである。主に都市部を中心にインフラが整備されるため、自立航法、GPS (Global Positioning System) 等との併用が考えられている。図16に試作したGPS/RACS 共用車載アンテナを示す。

一方、AMTICS は信号機等に取り付けたサインポストと呼ばれる送信機で位置情報を送信する方式であり、同時に車両からの反射波を受信することにより、車速測定・存在感知を行い、交通管制情報として使用する。したがって、サインポスト用のアンテナとしては、レーダとしての役割と通信用アンテナとしての役割の両方が要求される⁽¹⁵⁾。

6. マイクロ波中継回線用アンテナ

基幹回線である4, 5, 6GHz 帯を用いたマイクロ波中継回線では、昭和38年来高能率で良好な広角放射特性をもっているホーンリフレクタアンテナが使用されてきた。しかしながら、近年、ルートのかくそう (輻輳) 化と大容量デジタルマイクロ波無線中継方式の導入により、自ルート干渉、他ルート干渉による雑音を抑えるため、ホーンリフレクタアンテナに比較して交差偏波特性で15dB (ピークレベル) 以上、広角放射特性で10dB 以上の性能改善が要求された。

これを実現するアンテナとして、3枚反射鏡オフセットアンテナが研究され、鏡面修整形の3枚反射鏡オフセットアンテナが実用化⁽¹⁶⁾された。このアンテナは波動的な設計法により、鏡面系の最適化を図るとともに、鏡面修正によって非軸対称開口分布を実現している。また、周期性鏡面ひずみによるサイドローブ上昇を抑えるため、高精度金型を使用したプレス成形法を採用している。この結果、4, 5, 6GHz 帯にわたって良好な交差偏波特性と広角放射特性を実現した。

また、一次放射器としては、回転対称なビームをもち、交

差偏波成分が小さく、サイドローブの低いリング装荷形コルゲート円すい (錐) ホーンを採用することにより、マイクロ波中継回線用のアンテナとして、ほぼ限界に近い電気性能を実現した。このアンテナは上述したように高性能アンテナの故に、現在4, 5, 6GHz 帯の基幹回線に広く使用されている。図17にNTT 唐ヶ崎ネットワークセンターに設置された各種アンテナを示す。

デジタルマイクロ波無線中継方式では、ほとんどの区間にスペースダイバーシチを適用しているが、近年、新方式であるアングルダイバーシチ方式が検討され、実験結果が報告されている。この方式では、垂直方向に0.5° から1° 程度の角度差をもつ二つのビームを作り、この合成や切替えにより、スペースダイバーシチと同様な改善効果を期待しようとするものである。このシステムのアンテナとしては、3枚反射鏡からなる2ビームオフセットアンテナが試作されている。このアンテナはアンテナの前後方向に近接して2本の誘電体集束ホーンを配置し、スピルオーバー成分を低減する鏡面修整法を採用することにより、ビーム間隔1° の3枚反射鏡からなる2ビームオフセットアンテナを実現している。試作実験の結果、開口能率40% 以上、交差偏波ピークレベル-35dB, 30° 方向水平面内放射レベル-60dB 程度のものが得られている。

7. む す び

レーダ用アンテナ、衛星搭載用アンテナ、衛星通信地球局用アンテナ、電波天文アンテナ、移動体通信用アンテナ及びマイクロ波中継回線用アンテナの技術動向について概説した。

最近の15年間では、レーダ用として開発したフェーズドアレーアンテナの技術革新はマイクロ波半導体の発展に伴い著しいものがあつた。また、その応用として、衛星搭載用、衛星通信地球局用、移動体通信用及びマイクロ波中継回線用の分野に活用する試みがなされており、将来が期待される。その他、アンテナの計測評価技術もこの期間に大きく進展し、計測評価の高精度化、省力化を実現したことは見逃せない点

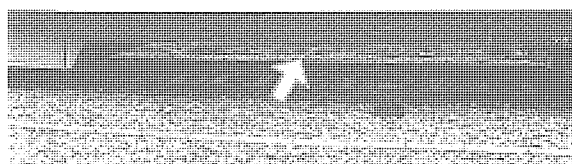
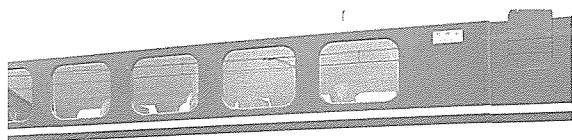


図15. 東海道新幹線列車用対 LCX アンテナ

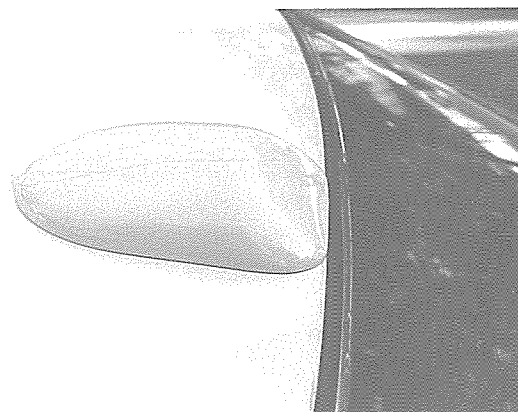


図16. GPS/RACS 共用車載アンテナ

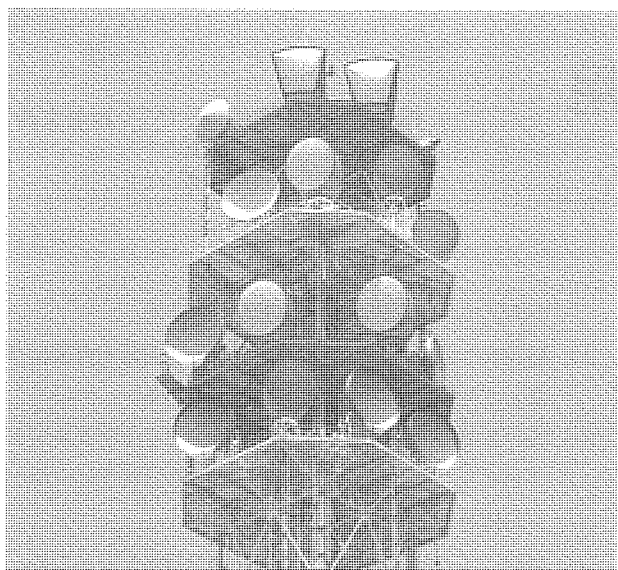


図17. NTT 唐ヶ崎ネットワークセンターの各種アンテナ

である。

次世代の多機能アンテナとしては、スマート化したコンフォーマルアレーアンテナ技術、平面アレーアンテナやフェーズドアレーアンテナの多周波共用及び偏波共用技術、デジタルビームフォーミング技術若しくはそれらを統合化したシステムが期待されている。これらを経済的に実現することが大きな課題であるが、アンテナとしては機能、性能以外に、今後は周辺環境との整合性が要求される。周辺環境に調和するようにスマート化した各種アンテナシステム（ビル壁面埋め込み、車載埋め込み、ポール埋め込み、マンホール埋め込み）の開発が社会的要求であると考えられる。それを実現するための新しい可能性の追求と実用化の努力が、今後一層必要である。

本稿に述べたような種々のアンテナ技術の研究開発については、宇宙開発事業団、宇宙通信(株)、国際電気通信衛星機構、国際電信電話(株)、第二電電(株)、東海旅客鉄道(株)、日本テレコム(株)、日本電信電話(株)、日本放送協会、東日本旅客鉄道(株)、防衛庁、文部省宇宙科学研究所、及び郵政省通信総合研究所の関係各位に日ごろ御指導いただいております。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 斉藤 淳, 折目晋啓, 仲 洋二, 武田文雄: 非可逆位相改善型デュアルモード移相器, '82年信学全大, No. 151
- (2) Numazaki, T., Mano, S., Katagi, T.: An Improved Thinning Method for Density Tapering of Planar Array Antennas, IEEE Trans., AP-35, No. 9 (1987)
- (3) 青木俊彦, 菱沼 進, 折目晋啓: フェーズドアレーアンテナの位相データ設定方式, '89信学全大, B-14
- (4) Sunahara, Y., Ebisui, T., Sato, S., Takeda, F.: An Approximate Method of the Backscattering from Polyhedron Structures, Proc. of ISAP '85, 223-5
- (5) 真野清司, 片木孝至: フェーズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法—素子電界ベクトル回転法—, 信学論(B), 65-B, No. 5, 555 (1982)
- (6) 吉川幸広, 折目晋啓, 片木孝至: 素子電界ベクトル回転法を用いたフレネル領域測定における遠方界評価, '86信学全大, No. 651
- (7) Ishii, R., Shiramatsu, K., Haruyama, T., Orime, N., Katagi, K.: A Built-in Correction Method of the Phase Distribution of a Phased Array Antenna, IEEE, APS-'90, 1144~1147
- (8) 針生健一, 千葉 勇, 真野清司: 平面波合成によるコンフォーマルアレーアンテナの低サイドローブパターンの形成, 信学技報, A・P 89-42 (1989-9)
- (9) Haruyama, T., Kojima, N., Chiba, I., Ohhashi, Y., Orime, N., Katagi, T.: Conformal Array Antenna with Digital Beam Forming, IEEE, AP-S, 982 ~ 985 (1989)
- (10) 内藤 出, 野口龍宏, 牧野 滋, 石田修己: 国際通信衛星搭載用サブアレー化方式リコンフィギュラブルビームアンテナ, '91信学春季全大, B-80
- (11) 大久保 茂, 伊藤猛男, 手代木 扶, 田中正人, 北原弘志, 赤石 明: 技術試験衛星VI型搭載Sバンド衛星間通信用アンテナの開発, 信学技報, A・P 88-82 (1988)
- (12) 茶谷嘉之, 原田 明, 舟田雅彦, 大塚昌孝: 衛星通信受信平面アンテナ, 三菱電機技報, 66, No. 4, 419~422 (1992)
- (13) Miura, K., Yamamoto, K., Tanizawa, K., Katagi, T.: Development of a Precision Large Deployable Antenna, Proc. of ISAP, 1B2-5 (1989)
- (14) 近藤幹雄, 佐々木 伸, 松本和臣, 沼崎 正, 茶谷嘉之, 真野清司, 武田文雄: 新幹線ビーム切替形列車アンテナ, 信学技報, A・P 85-32, 57~62 (1985)
- (15) 上高家耕一, 茶谷嘉之, 比嘉盛雄, 加藤博光, 折目晋啓, 片木孝至: マイクロ波車両感知器用成形ビームアンテナ, '90信学秋季全大, B-95 (1990)
- (16) 菊込正敬, 山田吉英: 鏡面修整オフセット3枚鏡アンテナの設計と特性, 信学論(B), J-71-B, No. 2, 277~284 (1988)

科学衛星追跡用 S / X 帯共用 20m アンテナ

廣澤春任* 別段信一*** 村瀬文義+
市川 満** 尾市友紀+
横山幸嗣** 島脇 豊+

1. ま え が き

科学衛星のロケットによる打上げ時の追跡、運用と観測データの取得及び衛星の維持・管理を目的とした科学衛星追跡用 S / X 帯共用 20 m アンテナを宇宙科学研究所に納入した⁽¹⁾⁽²⁾。このアンテナは平成元年 9 月、鹿児島県内之浦宇宙空間観測所に建設され、平成 2 年には、惑星探査軌道の精密標定及び制御・高効率データ伝送技術等の実験的研究を目的とした工学実験衛星“ひてん”の打上げに供され、平成 3 年には太陽フレア観測衛星“ようこう”の打上げに供され、現在、衛星“ようこう”の追跡・管制及びデータ伝送に供されている。この衛星の通信回線は、S 帯でのコマンド、テレメトリ、レンジング及びミッションデータ回線と、X 帯でのテレメトリ及びミッションデータ回線から構成されている。

ここでは、このアンテナ装置の概要、要求条件と方式検討、装置の設計及び現地での実測性能について報告する。

2. 装置の概要

このアンテナ装置は、科学衛星との間で S / X 帯にわたり通信系、追跡・管制系を構成し、衛星打上げ時のロケット追跡が必要であり、さらに鹿児島県内之浦宇宙空間観測所のロケット発射台を見通せるがけ(崖)の上に設置されるので強風時にも運用できることが必要である。

したがって、アンテナ装置に対する要求条件は、

- (1) S / X 帯で高い開口能率と低雑音特性をもつこと。
- (2) S / X 帯で任意の偏波をもつ信号に対し、高精度モノパルス追尾が可能であること。
- (3) 直交 2 偏波信号の同時受信が可能であること。
- (4) S 帯追尾系から X 帯追尾系へのスムーズな移行ができること。
- (5) 90 m / s の耐風性をもち、かつ 30 m / s の強風下でも運用可能で、高い測角精度をもつこと。

等があげられ、この条件を満足するアンテナとして、表 1 に示すアンテナを設計した。なお、測角精度の配分値は表 2 のとおりである。

図 1 にアンテナ装置の外観、図 2 に構成を示す。このアンテナ装置の特長は次のとおりである。

- (a) 交差偏波消去法を用いて設計した 4 枚反射鏡集束ビーム給電系を用い、鏡面修整によって高能率・低雑音特性を実現するとともに、円偏波時のビームシフトを極

力抑えて良好な測角精度を実現している。

- (b) 高次モード追尾及び偏波ダイバーシチ受信を可能にする S / X 帯共用給電装置を設置している。
- (c) S / X 帯の両帯域で良好な放射特性をもつダブルフレアアイリス型 TM₁₁ モード発生器付きコルゲートホーンを採用している⁽³⁾。
- (d) 日射による熱変形を抑えて高い測角精度を得るため、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 製副反射鏡支持柱を採用している。
- (e) 強風時でも Az 軸回りに高速、高加速度で高精度な駆動が確実に行えるよう 4 輪駆動方式を採用している。
- (f) 塩害・酸性風・亜硫酸ガス・ロケット噴煙・火山灰など厳しい環境条件に耐える重防食対策を施している。

3. 要求条件と方式検討

3.1 放射給電系

放射給電系に対する要求条件は以下のとおりである。

(1) 広帯域性

S / X 帯同時使用が可能であること。また、微弱な電波を受信するため S / X 帯の両帯域で高能率、低雑音特性をもつこと。特に強風地域での設置を考慮し、極力アンテナ開口径を抑えて所要の性能を得ること。

(2) 測角精度

低高度衛星及びロケットの追跡・補そくのため、S 帯追尾から X 帯追尾へスムーズに移行でき、全天指向型で所要の測角精度が得られること。

(3) 大電力送信

S 帯で 25 kW (CW) の高出力送信が可能であるとともに、将来の X 帯 5 kW (CW) 送信にも対応できること。

(4) 交差偏波特性

円偏波使用時に、ビームシフトが小さくなるよう交差偏波特性が良好なこと。

(5) 保守性

将来、研究用機器の増設及び保守・運用の利便などの観点から、送受信機・給電装置及びこれに直結される一次放射器は、Az / EL 回転を受けない場所に設置できること。

(6) 耐干渉性

地上回線等との干渉を低減し、都市雑音の影響を小さくするよう良好な広角指向性をもつこと。

以上の条件に対し、通常使用されている典型的な全天指向

型アンテナについて表3で比較を行った。その結果、このアンテナ装置の必要条件を満たすアンテナ方式として4枚反射鏡集束ビーミング給電系を用いた鏡面修整カセグレンアンテナを選定した。

表1. 科学衛星追跡用 S/X 帯共用 20m アンテナの主要性能諸元

(1) アンテナ形式	直径20m 4枚反射鏡集束ビーミング給電カセグレンアンテナ
(2) 駆動モード	プログラム, スレーブ, マニュアル, モノパルス自動追尾, コースティング
(3) 駆動角度範囲	Az: $\pm 270^\circ$ 以上 EL: $-1 \sim 91^\circ$
(4) 駆動速度・加速度	Az 最大速度 $5^\circ/\text{s}$ 以上, 加速度 $5^\circ/\text{s}^2$ 以上 EL 最大速度 $2.5^\circ/\text{s}$ 以上, 加速度 $2.5^\circ/\text{s}^2$ 以上 ただし, 瞬間最大風速 $20\text{m}/\text{s}$ において
(5) 周波数範囲	S 帯 送信 $2,025 \sim 2,120\text{MHz}$ 受信 $2,200 \sim 2,300\text{MHz}$ X 帯 受信 $8,400 \sim 8,500\text{MHz}$ ただし, $7,145 \sim 7,235\text{MHz}$ の送信を考慮した設計である。
(6) 偏波	S 帯 右旋円偏波/左旋円偏波(同時) X 帯 右旋円偏波/左旋円偏波(同時) ただし, 直線偏波でも追尾可能なこと。
(7) 静的精度	S 帯 追尾誤差 0.038°rms 以下 測角精度 $\pm 0.04^\circ$ 以上 指向誤差 $\pm 0.02^\circ$ 以下 X 帯 追尾誤差 0.005°rms 以下 測角精度 $\pm 0.012^\circ$ 以上 指向誤差 $\pm 0.01^\circ$ 以下 ただし, 瞬間最大風速 $20\text{m}/\text{s}$ において
(8) 動的精度	$C1 \cdot \dot{\theta} + C2 \cdot \ddot{\theta}$ $C1 \approx 0, C2 \approx 0.65\text{s}^2, \dot{\theta}$: 追尾対象の速度
(9) 利得 (給電装置入出力端で)	S 帯 送信 51.5dB 以上 (2.11GHz) 受信 52.2dB 以上 (2.29GHz) X 帯 受信 62.8dB 以上 (8.4GHz)
(10) だ円偏波率	S 帯 送信 2.0dB 以下 (円偏波時) 受信 2.0dB 以下 (°) X 帯 受信 2.0dB 以下 (°)
(11) VSWR	S 帯 送信 1.25 以下 (°) 受信 1.25 以下 (°) X 帯 受信 1.2 以下 (°)
(12) アンテナ雑音温度 EL $\geq 20^\circ$ (晴天時, 給電装置出力端で)	S 帯 41K 以下 X 帯 39K 以下
(13) 広角放射特性	CCIR 勧告580及び465-1に準じる。
(14) 耐電力	S 帯 CW 25kW 以上 X 帯 CW 5kW 以上
(15) 送受減結合量	S 帯 100dB 以上
(16) ビームアライメント	S 帯及びX帯について 送信, 受信, 左旋, 右旋の4ビーム中心のアライメントはそれぞれの受信帯電力半値幅の $\pm 3.5\%$ 以下 また, S 帯及びX帯の追尾用ナルシフトはそれぞれの4ビーム中心に対して, 各々の受信帯電力半値幅の X 帯 $\pm 3.5\%$ 以下 S 帯 $\pm 8.0\%$ 以下
(17) 主反射鏡鏡面精度	0.7mm rms (夜間, 瞬間最大風速 $5\text{m}/\text{s}$ 以下において)
(18) Az 軸 鉛直度	0.005° 以下
(19) Az 軸/EL 軸 直交度	0.005° 以下
(20) 機械系固有振動数	2.5Hz 以上
(21) 角度検出精度	Az $\pm 0.004^\circ$ 以上 EL $\pm 0.002^\circ$ 以上
(22) 耐風性	運用可能瞬間最大風速 $30\text{m}/\text{s}$ 以上 非破壊瞬間最大風速 $90\text{m}/\text{s}$ 以上

3.2 機械構造系

この装置に要求される瞬間最大風速 $90\text{m}/\text{s}$ の耐風性と強風下での高い測角精度の実現を条件に, 機械構造系の方式の検討を行った。

このアンテナ装置には, 放射給電系の検討から4枚反射鏡集束ビーミング給電方式が選定されている。また, この装置の設置場所の環境条件から, 高強度に加えて強風時にも運用できる高剛性が必要とされる。さらに, 高い測角精度の実現のために, 高い角度検出精度の達成, 日射による構造物の変形の低減等が必要となる。これら機械構造系への要求条件をもとに, マウント方式・角度検出方式について比較検討を行った。

3.2.1 マウント方式の検討

大型アンテナには, 一般的に Azimuth-Elevation 方式 (Az-EL 方式) と X-Y マウント方式が適用されるが, X-Y マウント方式を用いて4枚反射鏡集束ビーミング給電方式の放射系を構築するのは構造上困難であり, 高強度・高剛性を得るにも不利なため, Az-EL 方式を選定した。なお, このアンテナは測距にも使用されるので, 両軸が交点を持つマウント方式にしている。次に, Az-EL 方式のマウントには, ヨーク方式とタワー方式があり, この両方式の比較を表4に示す。

各比較項目のうち, 高剛性の確保の容易さが方式選定のかぎ(鍵)となるため, 以下に剛性についての比較を述べる。

ヨーク方式の場合, マウント下部に取り付けられる Az 旋回軸受の寸法が, 製作及び輸送上直径約 3m に制限され, 小さくなるため表3に示すように電波を EL 軸及びマウント内に通すことが必要となる。一般に周波数帯の高いアンテナでは, 電波の通径を小さくできるためヨーク方式は有効であるが, このアンテナの場合, S/X 帯共用電波通路となるため開口が大きくなりすぎ, 剛性確保の上で不利となる。

一方, タワー方式の場合は, マウント下部が広がるため, はり(梁)部材間を電波通路とすることができ, 剛性の確保が容易となる。

以上から, S/X 帯4枚反射鏡集束ビーミング給電方式で高剛性が必要なこの装置には, 剛性の確保が容易で経済的に優れたタワー方式が適しており, この方式を採用することとした。

3.2.2 角度検出方式の検討

このアンテナ装置の角度検出精度は, Az・

表2. 測角精度の配分値

単位: ($^{\circ}$) $\times 10^{-3}$ 3σ の値

No.	誤差要因	S 帯		X 帯		備考
		Az	EL	Az	EL	
1	風圧トルクによる誤差	6.0	1.2	6.0	1.2	瞬間最大風速 20m/s (計算による。)
2	太陽熱による変形誤差	(1.2)	(6.0)	(1.2)	(6.0)	風圧変形とは同時に発生しない。 (計算による。)
3	ビームシフトによる誤差	11.0	11.0	2.3	2.3	コリメーションで実測
4	角度設定誤差	=12.8 =6.4	=12.4 =5.6	=5.5 =5.0	=4.7 =4.0	ラジオスター追尾で実測
5	Az 鉛直度誤差					
6	Az/EL 直交度誤差					
7	SKEW ANGLE 誤差					
8	自重変形による誤差					
9	サーボ系ドリフト	1.0	1.0	0.3	0.3	実測
10	サーボ系角度不感域	0.6	0.6	0.6	0.6	実測
11	ナルシフトによる誤差	21.0	21.0	2.0	2.0	実測
12	熱雑音特性	10.5	10.5	2.4	2.4	実測及び計算 受信レベル-120dBm
13	追尾受信機による誤差	8.0	8.0	1.3	1.3	
各軸測角誤差		28.5	27.8	8.8	5.9	
総合測角誤差 (3σ)		39.8		10.6		

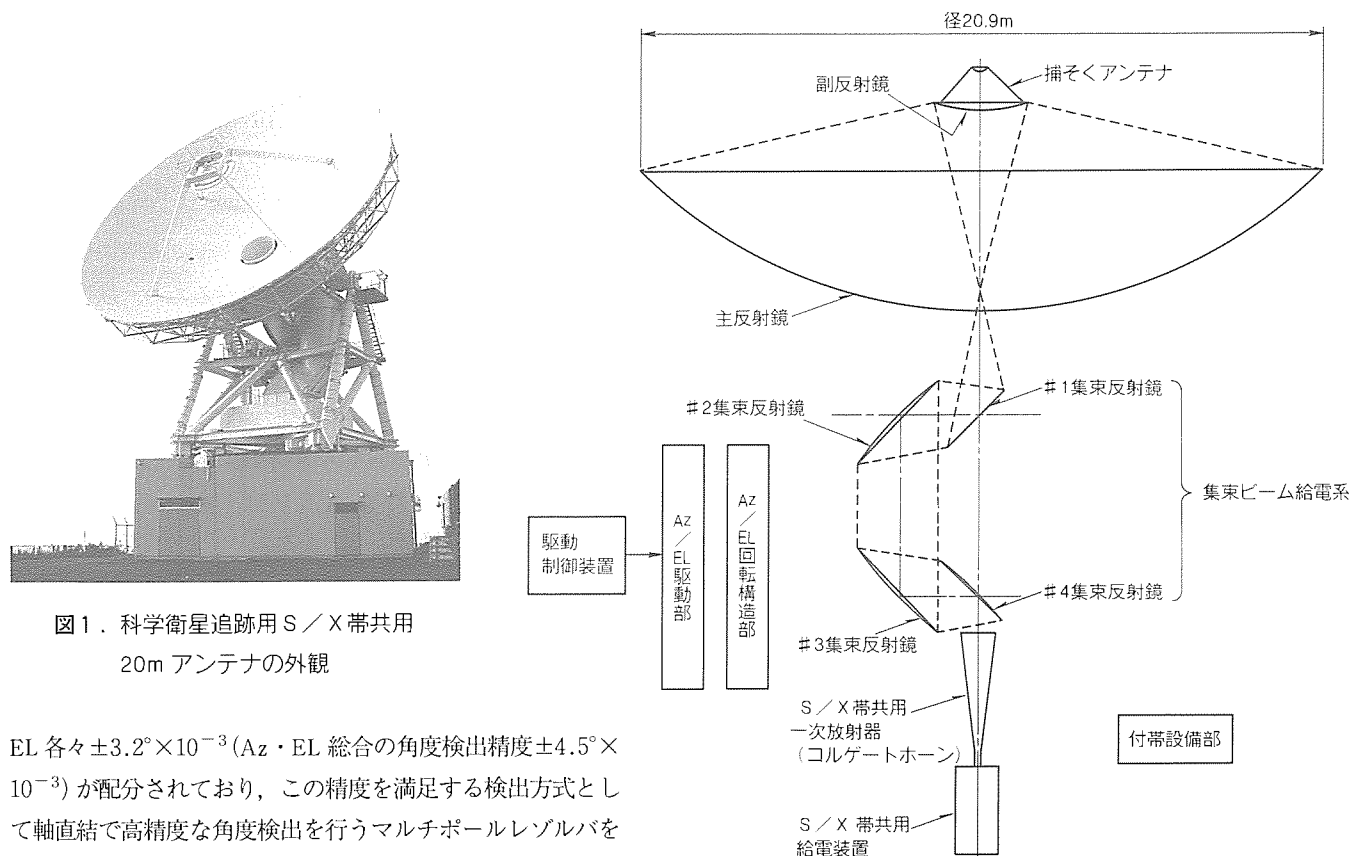


図1. 科学衛星追跡用 S/X 帯共用
20m アンテナの外観

図2. アンテナ装置の構成

EL 各々 $\pm 3.2^{\circ} \times 10^{-3}$ (Az・EL 総合の角度検出精度 $\pm 4.5^{\circ} \times 10^{-3}$) が配分されており、この精度を満足する検出方式として軸直結で高精度な角度検出を行うマルチボールレゾルバを用いる方式⁽⁴⁾がある。当社の実績として、検出精度 $\pm 2^{\circ} \times 10^{-3}$ を達成している。このアンテナ装置の EL 角度検出装置には、この方式が有効である。

一方、Az 角度検出装置にこの方式を用いる場合、マルチボールレゾルバ中央の中空部 (直径 300 mm) に放射系のホーンを通すことが必要となる。この位置のホーン直径を 300

mm 以下に抑えることは困難であるため、角度検出精度はやや低くなるが、以下に述べる歯車列とシンクロの組合せによる方式を検討した。この方式では、Az 旋回部の固定側に大

表 3. 各種アンテナ方式の比較

方式 条件	円錐ホーン給電 カセグレンアンテナ	円錐ホーンリフレクタ給電 カセグレンアンテナ	集束ビーム給電 カセグレンアンテナ
原理			
(1) 広帯域性	<ul style="list-style-type: none"> S/X 帯の周波数特性が大きく高能率化が困難。 S/X 共用給電装置が大きく機器室が大型化。 	同 左	<ul style="list-style-type: none"> S/X 帯にわたり、広帯域設計が可能。
(2) 測角精度	軸対称な鏡面で構成されるため、ビームシフトの発生は無視でき、測角精度は良好。	ホーンリフレクタの非対称性による交差偏波により大きなビームシフトが発生し測角精度が悪い。	<ul style="list-style-type: none"> 集束反射鏡の組合せで交差偏波を消去し、ビームシフトを抑えることができるので、所要の測角精度が得られる。
(3) 大電力送信	地上に置かれた送信機から機器室へ大電力伝送が必要だが、ロータリジョイントの耐電力性が問題。	同 左	ロータリジョイントが不用で、大電力送信に適す。
(4) 交差偏波特性	鏡面の非対称による交差偏波発生は無視でき、ビームシフトはほとんど発生しない。	ホーンリフレクタの非対称性による交差偏波が発生し、大きなビームシフトが発生。	集束反射鏡の組合せで交差偏波を消去でき、ビームシフトを抑えることが可能。
(5) 保守性	<ul style="list-style-type: none"> 低雑音増幅器、給電装置、一次放射器は Az/EL が回転し、保守運用性が悪い。 送信系導波管伝送路が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 低雑音増幅器、給電装置、一次放射器は、EL の回転を受けず、円錐ホーン給電より保守性は良い。 送信系導波管伝送路が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 送受信装置、給電装置、一次放射器が、Az/EL の回転を受けず保守運用性が良好。
(6) 耐干渉性	S/X 帯の周波数特性のため、主副反射鏡でのエッジレベルを十分低くできず、広角指向性が良くない。	同 左	周波数特性が小さいため、主副反射鏡エッジレベルを低くでき、所要の広角指向性が得られる。

歯車を、これにかみ合うピニオンを回転側に設け、さらにそのピニオン軸から歯車列を設けて、アンテナ装置の回転角度を増幅し、その回転角度をシンクロで検出する。この機構を Az 旋回部の互いに 180° 離れた位置に 2 個設け、この二つのデータを用いることにより、大歯車の設定誤差による角度誤差を相殺し、角度検出精度を上げている。角度検出精度は 30 m 級のアンテナで $\pm 5^\circ \times 10^{-3}$ 程度を得ている。このうち、歯車系のピッチ誤差などによる寄与分はその 50 % 程度であり、残りはマウントの弾性変形により生じている。この装置では、軸受付近の構造物の剛性を増して、弾性変形の寄与分を減らすことで、角度検出精度 $\pm 4^\circ \times 10^{-3}$ を達成することとした。これにより、 $EL \pm 2^\circ \times 10^{-3}$ 、 $Az \pm 4^\circ \times 10^{-3}$ とし、 $Az \cdot EL$ 総合の角度検出精度 $\pm 4.5^\circ \times 10^{-3}$ を満足するようにした。

4. 装置の設計

4.1 放射給電系

4.1.1 集束ビーム給電系

S/X 帯にわたり広帯域かつ低損失伝送を可能にするために、集束ビーム給電系の各反射鏡をお互いの近接領域に配置する必要がある。このアンテナのように直径が 20 m 程度の

アンテナでは、機械的制約により、集束反射鏡の大きさ (反射鏡径/波長) には制限がある。このため、# 2 集束反射鏡と # 3 集束反射鏡間の距離は、セクタギヤの配置スペースを確保しながら可能な限り短くし、# 1 集束反射鏡と # 2 集束反射鏡間及び # 3 集束反射鏡と # 4 集束反射鏡間の距離は、各々の反射鏡の干渉と # 2 集束反射鏡と # 3 集束反射鏡間のビームの妨害がないよう可能な限り短くして、S 帯で集束反射鏡径/波長=13~19 で各反射鏡エッジレベルを -25 dB 以下とする設計を行い、低損失化を図っている。

また、高い測角精度を得るため集束ビーム給電系は、

- (1) 円偏波使用時、S/X 帯の共軸性を良くするために、集束反射鏡 # 2、# 3、# 4 の組合せによって交差偏波を消去するよう設計し、発生量を S/X 帯共 -29.5 dB 以下とすることで、円偏波使用時のビームシフトをビーム幅に対して、S 帯及び X 帯で 2.5 % 以下とする。
- (2) S 帯では TE₂₁ モードによる直線偏波追尾を行うため、集束ビーム給電系で発生する TE₂₁ モードが追尾誤差信号に混入した場合、ナルシフトの原因となる。そのため、集束ビーム給電系での TE₂₁ モード発生量を -24 dB 以下に抑え、ナルシフトを 6.5 % 以下とする設計を行っている。

4.1.2 S/X 帯共用給電装置

S/X帯共用給電装置は、S帯及びX帯で任意の到来偏波に対して高次モードによる自動追尾機能及び偏波ダイバーシチ受信機能をもつよう図3に示す構成とした。

任意の到来偏波に対処できる高次モード追尾には、(TE₀₁+TM₀₁)モード若しくはTE₂₁モードを用いる方法があるが、前述のとおり集束ビーム給電系では、集束反射鏡で発生するTE₂₁モードが追尾誤差となるため、通常(TE₀₁+TM₀₁)モードの方式が用いられる。しかし、この給電装置のS帯追尾系では、

(1) TE₂₁モード結合器は、集中結合型でもS帯の所要全受信帯にわたり、ほぼ一様な結合度が得られる。

(2) S帯のTE₀₁モード結合器をホーンのと(喉)元に付けると、コルゲートホーンの入力内径が、X帯に対して約5波長以上のオーバーサイズになり、不要な高次モードが増加する。

(3) TM₀₁モード結合器は、集中結合型では帯域内で一様な結合度を得ることが困難であり、分布結合型では、X帯での不要高次モード発生により、放射特性が劣化する。

等の理由からTE₂₁モードを用いる方式を採用した。なお、X帯では所要の追尾精度を得るには、集束ビーム給電系で発生する交差偏波を-35dB以下とする必要があり、実現が困難なことから、(TE₀₁+TM₀₁)モードを採用した。

また、偏波ダイバーシチ受信が可能なようにS/X帯とも右旋、左旋成分を出力する構成としている。S/X帯共用給電装置(追尾系)の構成を図4に示す。なお、S/X帯分波器とX帯TE₀₁モード結合器の間には、コルゲートホーンの特性を向上させるため、ダブルフレアアイリス型TM₁₁モード発生器を設けている⁽³⁾。

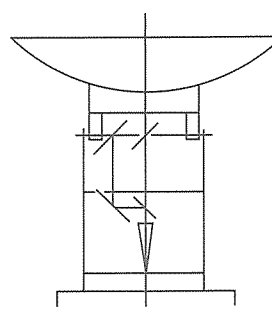
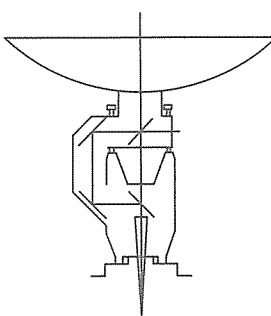
4.2 機械構造系

4.2.1 風荷重の算定

このアンテナ装置は、丘の上に設置される。設置場所の平面図を図5に示す。丘の形状は円すい(錐)形に近く、西側斜面が特に急しゅんである。この丘を東西の線で切断した断面を図6に示す。アンテナは丘の頂上にある敷地のほぼ中央

に設置される。このような設置条件での風速の変化及び風荷重に及ぼす地形の影響を調べるために、設置場所の地形の模型を用いて風洞実験を行った。模型の縮尺は1/100であり、アンテナ設置場所を中心とした半径240mの円内の標高310

表4. マウント形式の比較

特徴	方式	タワー方式	ヨーク方式
アンテナ装置の形状			
特徴	構造	梁部材の組合せ	板の溶接構造、EL主軸が大となる。
	形状	下部が広がっている。	Az旋回部で絞られる。
	基礎及び局舎	基礎規模は大	基礎規模は小。ただし、質量が中央に集中して局舎にかかるため、中央付近に柱が必要
	拡張性	一次放射器、給電部回りにスペースがとれる構造である。	マウントの板構造や局舎の柱により、一次放射器、給電部回りのスペースがとりにくい。
	保守性	下部が広く、アクセスが容易	多少困難
	熱シールド	多少困難	容易
	角度検出精度	車輪駆動の場合Az角度の検出精度が多少落ちる。	EL主軸の剛性が低いため、EL角度検出精度は多少落ちる。
	剛性の確保	容易	困難
経済性		—	タワー方式に比べて高くなる。

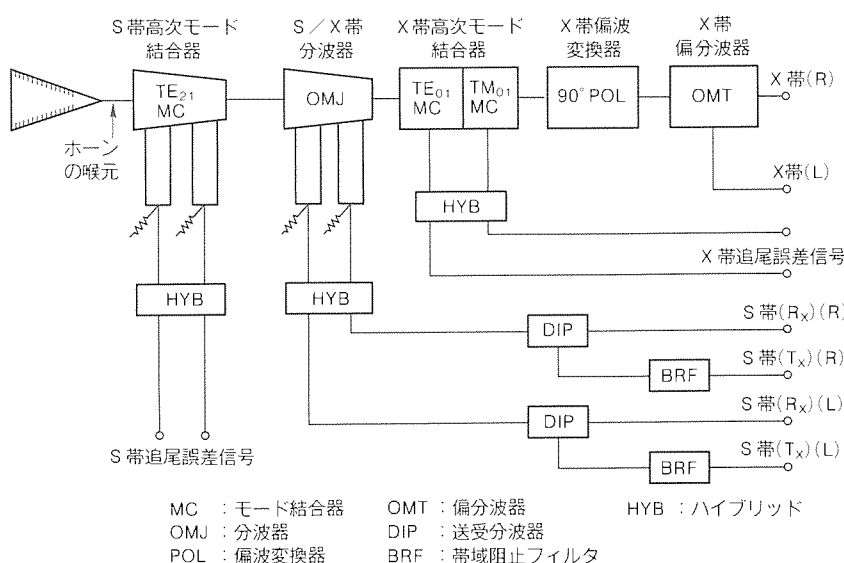


図3. S/X帯共用給電装置の構成

m の等高線 (図 5 中の太線で示した等高線) より高い部分をモデル化した。敷地内 2 か所 (図 5 中の①②の位置) の EL 軸と同じ高さに風速計を設定し、模型の風上での風速 20 m/s のときの丘の上での風速を測定した (図 7 参照)。地形による影響の最も大きい西風の場合の測定結果を図 8 に示す。風速計の支持値は①②とも $24 \sim 25 \text{ m/s}$ を示しており、地形により風速は $1.2 \sim 1.25$ 倍に増加していることが確認された。また、アンテナに加わる風荷重の最大値を平地の場合と丘の上の場合で比較すると、風速増加による風荷重の増加以外には大きな差がないことが確認された。

4.2.2 日射による熱変形の抑制

日射による熱変形を抑えて高い測角精度を得るため、このアンテナの副反射鏡支持柱の材料には、CFRP を採用した。この支持柱に用いた CFRP の線膨脹率は、一般の支持柱の材料として用いられる鉄の $1/20$ 程度である。表 5 にアンテナ各部の日射による誤差を示す。副反射鏡支持柱の誤差は、アンテナ斜め的前方から日射を受ける場合を想定し、日射のある場合とない場合の温度差を 10°C とした。なお、マウントの主要な梁部材には日除けカバーを取り付け、熱変形を抑えている。

4.2.3 捕そくアンテナ

このアンテナ装置には衛星の捕そく性能を上げるために、照準用の小アンテナが取り付けられている。取付場所として主反射鏡の外周、副反射鏡支持柱の上などを検討したが、保守を容易にするとともに、軽量化して姿勢の変化によるビームのずれを低減できるよう副反射鏡と捕そくアンテナを一体化し、副反射鏡裏面に取り付けることにした (図 9 参照)。

4.3 駆動制御系

このアンテナの駆動制御系は、図 10 に示すように、アンテナ駆動制御装置、プログラム制御装置、及びアンテナスレーブ装置などで構成

される。駆動制御系に要求される条件としては、このアンテナの運用条件であるロケット追跡、低高度周回衛星追尾及び強風時での運用を考慮して、

- 高速、高加速度で駆動できること。
- 強風時でも高い測角精度をもつこと。

等があげられ、駆動制御系としては、これらの条件を満たす

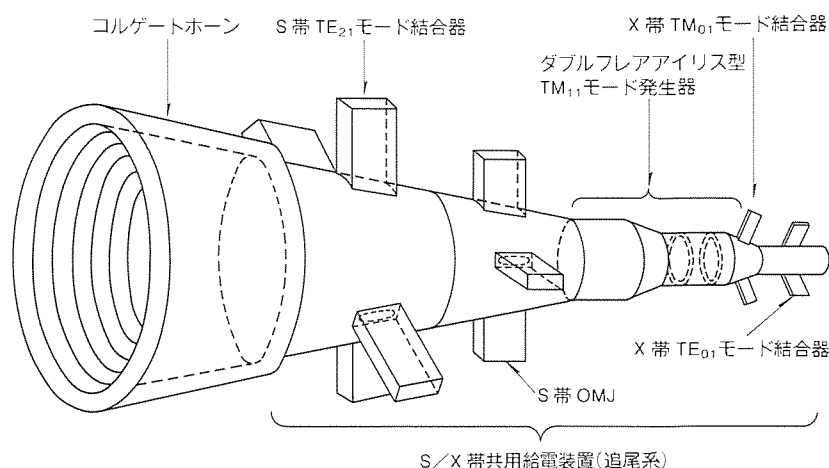


図 4. S/X 帯共用給電装置(追尾系)の構造

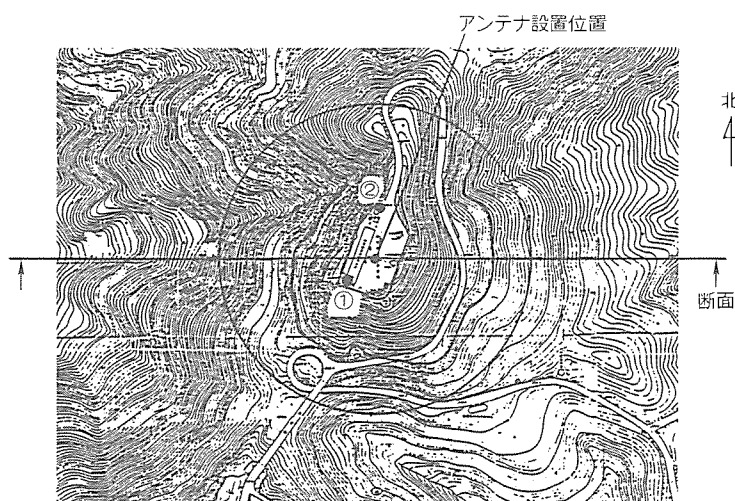


図 5. アンテナ装置設置場所の平面図

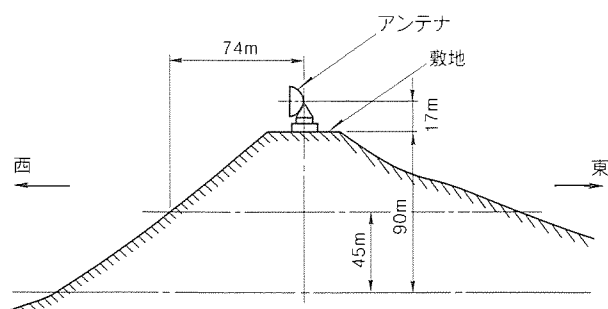


図 6. アンテナ装置設置場所の断面図

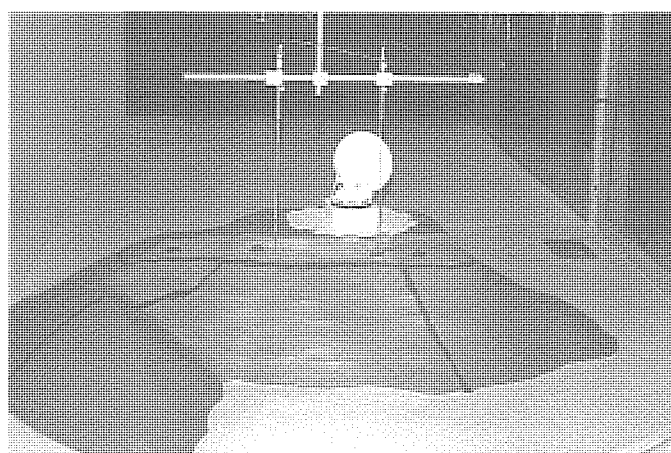


図 7. 風洞実験による風速測定

ために次のような手法を採用している。

- (1) 強風時でも Az 軸回りに高速、高加速度で高精度な駆動が確実にできるよう、Az 軸は 4 輪駆動方式とする⁽⁵⁾。
- (2) 高精度の角度検出を行うために、Az 軸の角度検出器として 1X/128X の複速シンクロを使用し、EL 軸の角度検出器として軸直結形のマルチボールレゾルバを使用する⁽⁴⁾。
- (3) アンテナ固有の再現性のある機械的誤差を補正する⁽⁴⁾ (器差補正)。
- (4) 機械系の剛性を高め、サーボ帯域を広くとる。

ここでは、主に 4 輪駆動方式と器差補正について述べる。

4.3.1 4 輪駆動方式

強風地域での使用及び高速、高加速度での衛星追尾を考慮し、アンテナの Az 回転駆動は 4 輪駆動方式を採用している。4 輪駆動方式の特徴は以下のとおりである。

- (1) 2 輪駆動方式に比べ、約 10 % 高い風速までアンテナを駆動することができる。
- (2) アンテナ構造物の 4 か所で制御するため、アンテナ駆動系の剛性が高くなり、追尾精度が向上する。

- (3) 1 台のモータ又は駆動電力増幅装置が故障した場合には、これを切り離し、正常な前 2 輪又は後ろ 2 輪の組合せで、2 輪によるアンチバックラッシュ駆動が可能である。
- (4) 風加重を 4 輪で分担するので、各車輪駆動モータの容量が小さくなり、EL 軸駆動モータと同一モータが使用でき、駆動電力増幅装置を含めて共通化ができるので、保守・予備品上も便利である。

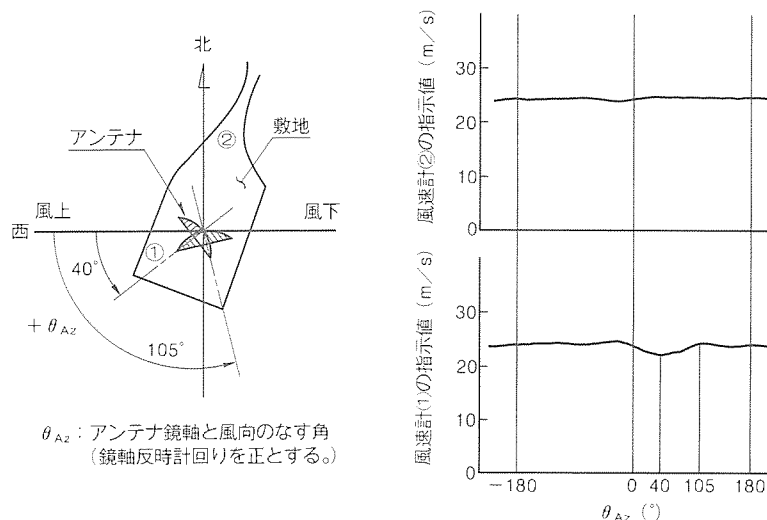


図 8. 地形による風速増加(実測結果)

表 5. アンテナ各部の日射による誤差(計算値)

	単位: (°) × 10 ⁻³	
	Az 軸回り	EL 軸回り
主反射鏡	4.0	4.0 *
副主反射鏡支持柱 (CFRP 製)	0.025 (0.54)	0.025 * (0.54)
Az 軸回転構造	1.7	0.9
合 計	5.7 (6.2)	4.9 * (5.4)

注 () 値は、鉄製の副反射鏡支持柱の場合を示す。

* : Az, EL 軸回りに誤差が同時に発生することはない。

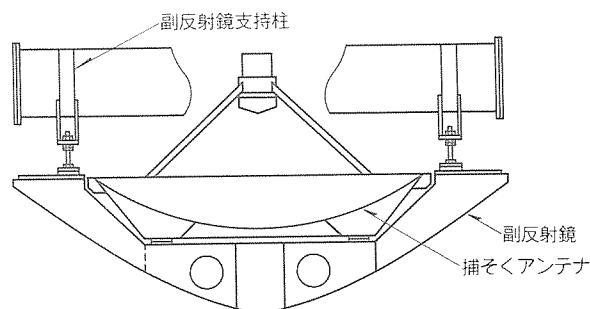


図 9. 捕そくアンテナの取付け

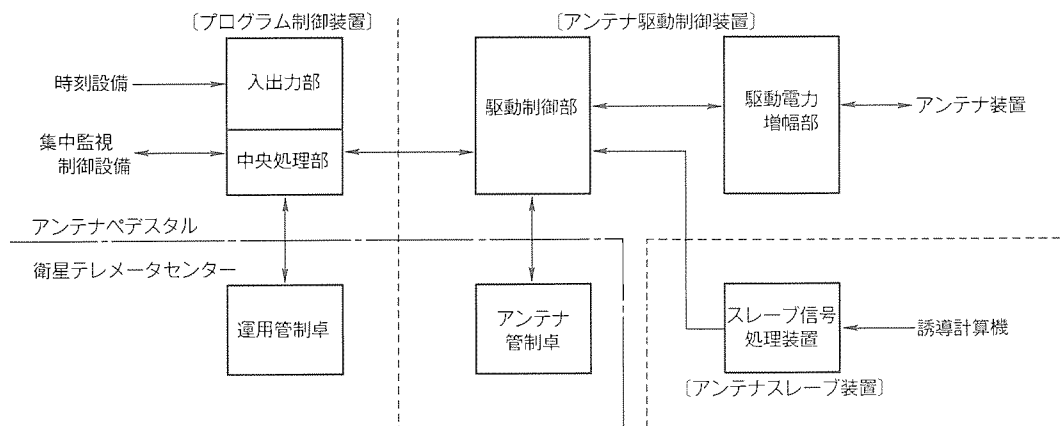


図10. 駆動制御系機能ブロック図

4.3.2 器差補正

Az/EL マウントのアンテナで考えられる器差要因としては、Az軸の鉛直度、Az 軸と EL 軸の直交度、EL 軸とビーム軸方向の直交度、自重変形、基準角度のズレなどがある。これらの再現性のある機械的誤差に対し、電波星の追尾により求めた最適な器差補正パラメータを用いて補正を行うことにより、測角精度の向上を図っている。具体的には、この器差補正処理はプログラム制御装置で行っており、プログラム追尾時、追尾指令データに器差補正量を重畳して駆動制御部に指令値として送出している。

5. 実測性能

以上の考えのもとに、設計製作したアンテナ装置の主要実測性能を表6に示す。アンテナ利得と雑音温度は、電波星 CasA を用いたラジオメータ法、広角指向特性と軸比は、約8.3km 離れたボアサイトアンテナを用いて測定した。アンテナの開口能率はS帯で74%以上、X帯で67%であり、設計性能を得ている。

図11には、S帯とX帯の広角指向特性を示す。いずれもCCIR 勧告値を満足していることが確認できた。図12には雑音温度の仰角特性を示す。また、S帯のビームアライメントの実測値は、図13に示すとおりビームシフト0.095°、ナルシフト0.024°であり、ビーム幅0.4°に対して、それぞれ2.4%、6.0%となっており、設計値に近い値が得られた。X帯についても、ビームシフト0.002°、ナルシフト0.001°で、ビーム幅0.11°に対して、それぞれ1.8%、0.9%となっており、良好な値が得られた。

ラジオスター追尾によって実測した総合指向誤差を図14に示す。S帯では設計値 Az: ±0.0128°以下、EL: ±0.0124°以下に対し、実測値 Az: ±0.0090°、EL: ±0.0090°、またX帯では設計値 Az: ±0.0055°以下、EL: ±0.0047°以下に対し、実測値 Az: ±0.0037°、EL: ±0.0038°が得られた。

測角精度は、設計値S帯: ±0.0398°以上、X帯: 0.0106°以上に対し、S帯: ±0.0322°、X帯: ±0.0086°が得られた。

6. む す び

科学衛星追跡用 S/X 帯共用アンテナの設計の概要について述べた。このアンテナ装置は“ようこう”を始め、今後の科学衛星の追跡・観測データの取得など宇宙研究業務の一環に供される。

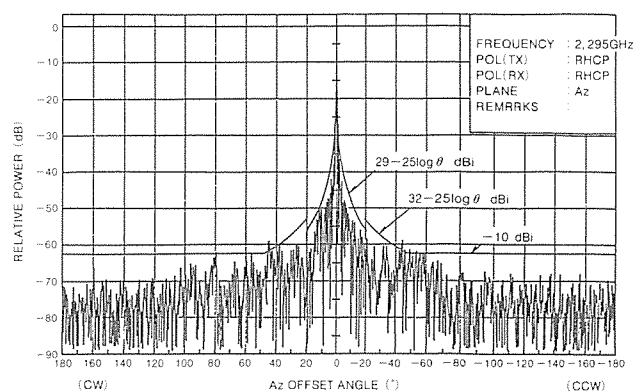
終わりに、この装置の設計・製作・据付け・調整に当たった宇宙科学研究所及び関係各位に深謝する次第である。

参 考 文 献

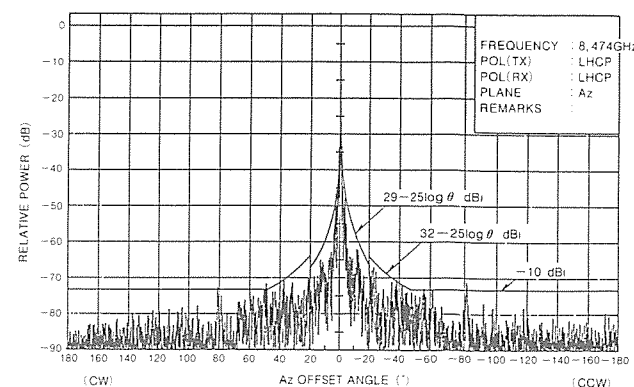
表6. アンテナの主要性能実測値

周波数帯	S 帯		X 帯
	(送信帯)	(受信帯)	(受信帯)
主要性能			
周波数	2,025~2,120 MHz	2,200~2,300 MHz	8,400~8,500 MHz
利 得 〔給電部出力端〕	51.8dB	52.4dB	63.4dB
開口能率 〔ホーン喉元〕 (測定周波数)	75 % (2,111MHz)	74 % (2,295MHz)	67 % (8,474MHz)
雑音温度 (EL=90°)	—	34K 以下	31K 以下
広角指向特性	$1^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$		29-25 log θ , dBi
	$20^\circ < \theta \leq 48^\circ$		32-25 log θ , dBi
	$48^\circ < \theta$		-10dBi
軸 比 (測角精度内)	0.5dB 以下	0.9dB 以下	1.1dB 以下
給電部損失	0.25dB (2,111MHz)	0.32dB (2,295MHz)	0.22dB (8,474MHz)

注 X帯は将来7,145~7,235MHzで送信可能な設計としている。



(a) S 帯



(b) X 帯

図11. 広角指向特性実測値

- (1) 林 友直, 広沢春任, 高野 忠, 市川 満, 横山幸嗣, 別段信一, 蛭子井 貴, 島脇 豊: 科学衛星追跡用 S/X 帯共用 20 m アンテナ, 1990 信学春季全大 B-56 (1990)

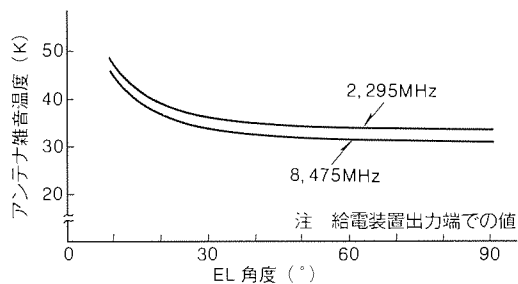


図12. アンテナ雑音温度実測値

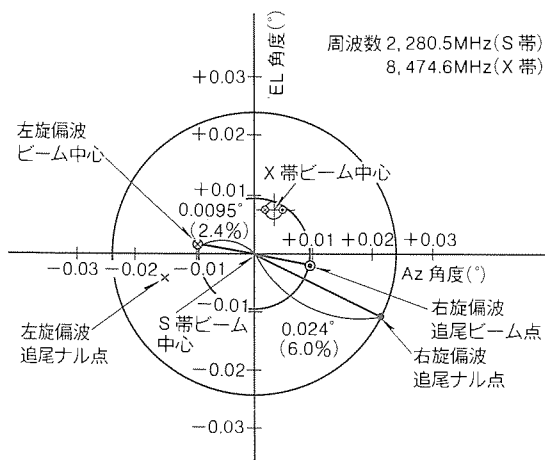
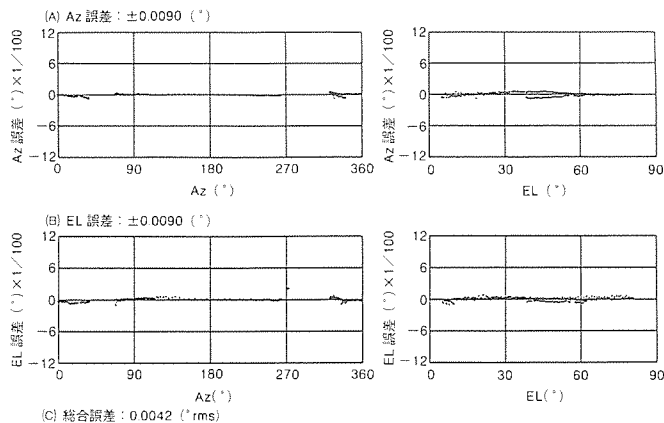


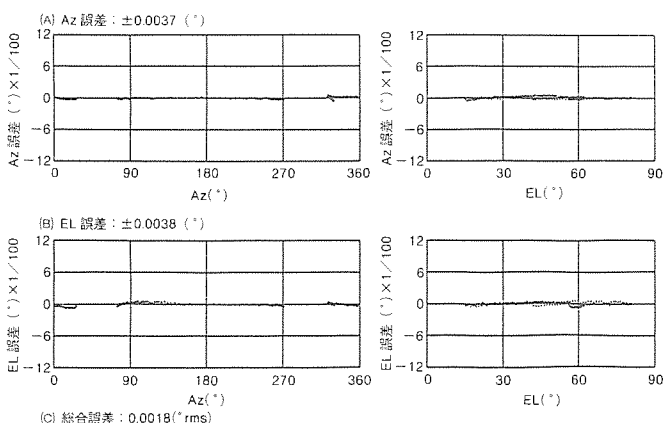
図13. ビームアライメント実測値

電波星名: CasA 周波数: 2.280GHz 偏波: RHCP



(a) S 帯

電波星名: TAU 周波数: 8.474GHz 偏波: RHCP



(b) X 帯

図14. ラジオスター追尾によって実測した総合指向誤差

- (2) 林 友直, 広沢春任, 高野 忠, 市川 満, 横山幸嗣, 別段信一, 蛭子井 貴, 島脇 豊: 科学衛星追跡用 S/X 帯共用 20 m アンテナ, 信学誌, A・P 90-37 (1990)
- (3) 市川 満, 横山幸嗣, 土谷牧夫, 山口 巧, 蛭子井 貴: S/X バンド共用広帯域コルゲートホーンの特性, 信学誌, A・P 89-22 (1989)
- (4) 広沢春任, 市川 満, 河村英四郎, 榎原 修, 伊藤富美夫: 大型アンテナの精密指向制御, 三菱電機技報, 59,

No. 9, 631~636 (1985)

- (5) 倉藤 康, 山口勝弘, 伊藤富美夫, 増田剛徳, 石田修己: イギリス電気通信公社向け C/Ku バンド共用アンテナ, 三菱電機技報, 59, No. 6, 431~436 (1985)

電波ホログラフィによる45m 電波望遠鏡の 鏡面精度の評価

浮田信治* 出口博之***
柴田克典* 蛭子井 貴***
増田剛徳**

1. ま え が き

電波天文の分野では、ミリ波帯やサブミリ波帯において高感度の観測ができるような鏡面精度の高い大口径の電波望遠鏡が要求されている⁽¹⁾⁽²⁾。このような鏡面精度の高いアンテナを実現するために、従来から用いられてきた専用ゲージや測距測角儀等による鏡面測定法よりも更に精密な測定法として、電波ホログラフィ法が開発されてきた^{(3)~(5)}。この方法は、アンテナの遠方における放射パターンの測定値からフーリエ変換を用いて開口面上の位相分布を求め、この分布から鏡面パネルの理想的な鏡面からのずれ量を算出して鏡面誤差を求めるものである。

筆者らは、この電波ホログラフィ法による鏡面測定装置を開発して、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の45m 電波望遠鏡の鏡面誤差の測定及び調整を行い、当初200 μm rms 程度であった鏡面精度を150 μm rms まで改善してきた^{(6)~(8)}。しかしながら、アンテナ鏡面を構成している600枚の鏡面パネル単体の鏡面精度が平均約60 μm であることを考えると、これらの調整は不十分なものであった。

これまでの測定データを分析した結果、さらに鏡面精度を向上させるためには、全体的な変形のみに着目して行われていた従来の鏡面調整の方法を改め、実際の鏡面パネルの支持構造、パネル調整機構の配置などの状況を考慮したデータ解析及び調整が必要であると判明した。そこで、被測定アンテナの実際のパネル配置に対応した鏡面誤差モデルを考え、電波ホログラフィによる鏡面誤差の評価法を新しく開発した^{(9)~(10)}。この鏡面誤差モデルに基づいて、45m 電波望遠鏡の鏡面パネルを調整した結果、鏡面誤差84 μm rms を達成することができた。

2. 鏡面誤差の測定方法

2.1 電波ホログラフィによる測定の原理

開口面アンテナの放射パターン $F(\theta_x, \theta_y)$ はその開口面上の電界分布 $E(X, Y)$ のフーリエ変換で表される。

$$F(\theta_x, \theta_y) = \iint E(X, Y) \exp[j2\pi\{(X/\lambda)\theta_x + (Y/\lambda)\theta_y\}] d(X/\lambda) d(Y/\lambda) \dots\dots (1)$$

ここで、 λ は、自由空間波長である。また、 X, Y は開口面上の直交座標で、 θ, ϕ を X, Y に直交する Z 軸を極軸とする極座標の角度成分とすると、

$$\left. \begin{aligned} \theta_x &= \sin \theta \cdot \cos \phi \\ \theta_y &= \sin \theta \cdot \sin \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

である。したがって、被測定アンテナの二次元放射パターン $F(\theta_x, \theta_y)$ を測定すれば、二次元の逆フーリエ変換によって開口面上の電界分布を求めることができる。

$$E(X, Y) = \iint F(\theta_x, \theta_y) \exp[-j2\pi\{(X/\lambda)\theta_x + (Y/\lambda)\theta_y\}] d\theta_x d\theta_y \dots\dots\dots (3)$$

この電界分布 $E(X, Y)$ の振幅分布から開口照度分布が、また、位相分布から各種の位相誤差^{(6)~(8)}を除去すれば鏡面誤差が、それぞれ得られる。これが電波ホログラフィによる測定の原理である。

この方法におけるデータサンプリングの間隔 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ の満たすべき条件、及び放射パターンの測定範囲 $2|\theta_x|_{\max}, 2|\theta_y|_{\max}$ と開口面上の空間分解能 $\Delta X, \Delta Y$ の関係は次式で与えられる。

$$\Delta\theta_x, \Delta\theta_y \leq \lambda/D \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} 2|\theta_x|_{\max}, 2|\theta_y|_{\max} \\ \geq \lambda/\Delta X, \lambda/\Delta Y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 D は被測定アンテナの開口面上における測定すべき領域の最大寸法である。この最大寸法 D は、放射パターンの測定範囲の打ち切りによるフーリエ変換の折り返し等の影

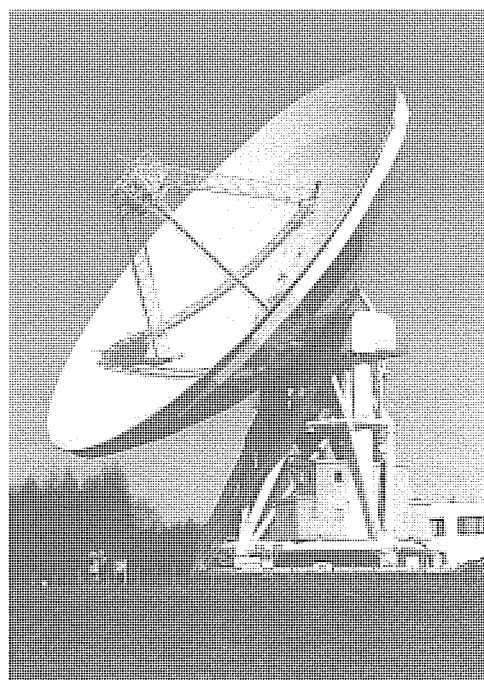


図1. 国立天文台野辺山宇宙電波観測所の45m 電波望遠鏡

響を避けるため、被測定アンテナの有効開口径より多少大きくする必要がある。また、空間分解能を上げるためには、式(5)から放射パターンの測定範囲を広げる必要がある。

一方、二次元放射パターンの測定結果から得られた開口面分布の位相分布の中には、大気による位相のゆらぎ、アンテナの指向誤差、受信電波のレベル変動などによって発生する位相誤差が含まれている^{(6)~(8)}。したがって、正確な測定を行うためには、これらの誤差もできるだけ少なくする必要がある。

2.2 測定システム

図1に示した、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の45m電波望遠鏡は、8~120GHzの広い周波数帯域で使用されるクーデ焦点型の大口径アンテナである。その鏡面は、約1.2m×約2.2mの大きさからなる600枚の鏡面パネルから構成されている。また、パネル調整用モータは、全部で693個あり、隣り合う3枚又は4枚のパネルのコーナ(パネル支持点)の背後に、それぞれ一つの割合で配置されている。鏡面は、これらのモータを計算機で制御することによって、約10μmのきざみで駆動させて調整することができる。

鏡面の測定システムの構成を図2に示す⁽⁸⁾。信号源としては、①衛星のビーコン電波が強いため、小口径の基準アンテナでも十分なS/Nが得られること、②主鏡の仰角が測定中はほぼ一定で、鏡面の重力変形の影響を最小限に抑えることができること、③アンテナ仰角が観測時の仰角のほぼ中央位置の50°付近であること、④建物などによる反射や低仰角時の大気による位相のゆらぎなどが抑えられること、などの利点があるため、静止衛星CS-3aからのビーコン波(周波数19.45GHz)を用いている。被測定アンテナは、主反射鏡(回転放物面鏡)の焦点位置に設けた一次焦点用ホーン(チョークホーン)で受信する、いわゆるパラボラアンテナとして使用している。また、基準アンテナは直径45cmのパラボラアンテナで、位相パターンを測定する際の位相の基準となる。この基準アンテナは、被測定アンテナの中央、すなわち焦点位置に設置され、大気による位相ゆらぎのアンテナ開口面上の平均値をとることによって、その位相ゆらぎの影響をできるだけ小さくしている。

一次焦点用ホーン及び基準アンテナで受信された信号は、焦点付近に設置された受信機で、周波数変換後に相関処理されて⁽⁶⁾計算機に伝送される。計算機内では、観測データから鏡面誤差を求め、さらにパネル調整用モータの駆動量を算出する各種のデータ処理が行われる⁽⁸⁾。

2.3 鏡面誤差モデル

電波ホログラフィ法で求めた鏡面誤差データが、有限の空間分解能しかないため、各パネル調整用モータの位置における駆動量は、開口面上の格子点の鏡面誤差データから何等かの方法で求める必要がある。従来の測定の空間分解能は約86cmであり、主に鏡面の全体的な変形のみに着目してパネ

ル調整用モータの駆動量を求めていた。つまりパネル支持点の近傍の4点の格子点の誤差から内挿によって求める方法(近傍4点内挿法)を用いていた。さらに、高い鏡面精度を達成するためには、全体的な変形だけでなく個々の鏡面パネルがどのように設定されているかを調べる必要がある。このため鏡面誤差モデルとして、パネル間の段差も調整できるようなパネル単体モデルを考え、空間分解能を43cmまでに上げ、各パネル内に格子点が10~15個入るようにした。これらのデータから調整用モータの駆動量、パネル間段差の調整量を推定することが可能になった。

鏡面誤差モデルを使った鏡面誤差の算出方法は、各パネル内の格子点に対して、全体の誤差が最小となるベストフィット面を求め、この面の傾き及び変位を各パネルの誤差とする方法である。パネル i ($i=1, 2, \dots, N$)の領域内を示す平面を

$$Q_i = a_i X + b_i Y + c_i \dots\dots\dots (6)$$

とおき、パネル i の領域内の格子点 j ($j=1, 2, \dots, M_i$)の位置を(X_j, Y_j)、鏡面誤差を P_{ij} とすると、格子点 j における Q_i の値 q_{ij} との差の二乗和 ϵ_i を、

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_i &= \sum_{j=1}^{M_i} (P_{ij} - q_{ij})^2 \\ q_{ij} &= a_i X_j + b_i Y_j + c_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

と定義し、 ϵ_i が最小になるように式(6)の係数を決定する。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \delta \epsilon_i / \delta a_i &= 0 \\ \delta \epsilon_i / \delta b_i &= 0 \\ \delta \epsilon_i / \delta c_i &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

から a_i, b_i, c_i が求められる。これより、すべての鏡面パネルに対する傾きや変位がそれぞれ求められ、所望の位置における鏡面誤差が推定できる。

2.4 鏡面誤差モデルの評価

2.4.1 シミュレーションの方法

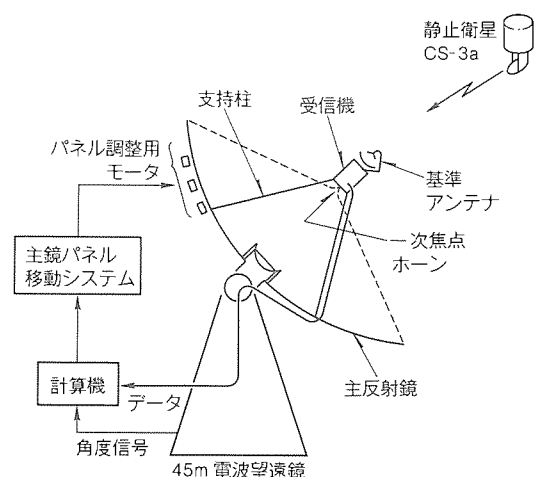


図2. 測定システムの構成

電波ホログラフィによる測定から得られる開口面上の位相分布の中には、鏡面誤差のほかにも各種の位相誤差及び測定範囲の打ち切りによる誤差などが含まれる。そこで、放射パターンの測定範囲の打ち切り誤差を考慮したシミュレーションを行い、鏡面誤差モデルの評価を行った。

シミュレーションの概要を図3に示す。シミュレーションの手順は次のようになる。

- (1) 既知の鏡面誤差を持つアンテナの放射パターンを計算によって求める。
- (2) この二次元放射パターンの計算値を測定する範囲内で求めて、測定値とみなす。
- (3) FFTにより、離散的な格子点での鏡面誤差を求める。
- (4) 鏡面誤差モデルを用いた処理によって所望の位置における鏡面誤差を求める。

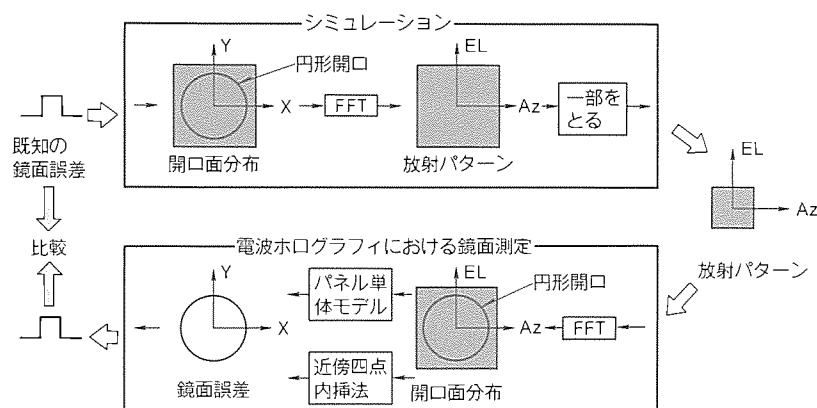
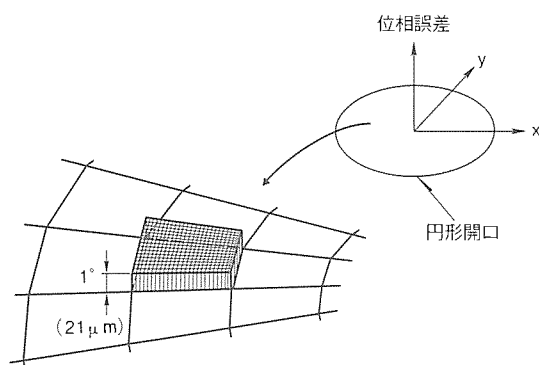


図3. シミュレーションの概要

表1. 計算条件

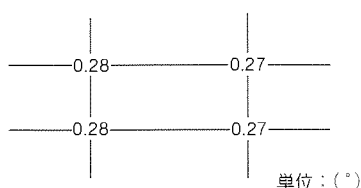
項目	値
開口径	45m
周波数	19.45GHz
測定範囲	2.0317°
測定間隔	0.0160°
データ数	128×128
開口面上の分解能	43cm



(a) パネル単体の凹凸モデル

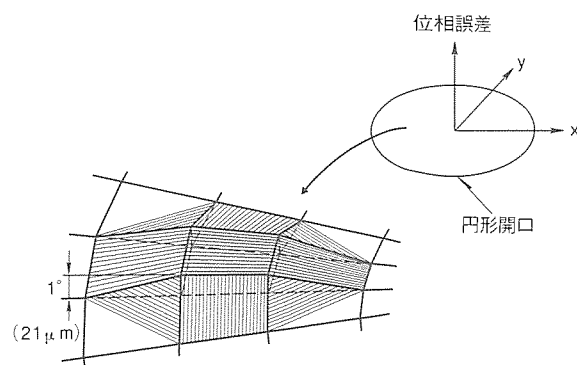
0.01	0.21	0.19	0.01
0.12	0.83	0.81	0.11
0.12	0.83	0.81	0.11
0.01	0.21	0.19	0.01

(b) パネル単体モデルによるシミュレーション結果



(c) 近傍4点内挿法によるシミュレーション結果

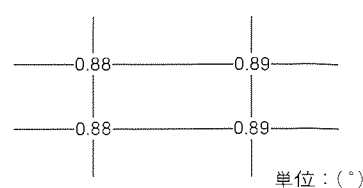
図4. パネル単体の凹凸モデルと既知の鏡面誤差として与えた場合のシミュレーション結果



(a) 複数パネルの凹凸モデル

0.87	1.00	0.98	0.87
0.99	1.00	1.00	0.99
0.99	1.00	1.00	0.99
0.87	1.00	0.98	0.87

(b) パネル単体モデルによるシミュレーション結果



(c) 近傍4点内挿法によるシミュレーション結果

図5. 複数パネルの凹凸モデルと既知の鏡面誤差として与えた場合のシミュレーション結果

(5) 得られた鏡面誤差と既知の鏡面誤差とを比較する。

2.4.2 シミュレーションの結果

45 m 電波望遠鏡を想定した場合の計算条件を表1に示す。既知の鏡面誤差としては、次のような基本的な二つのケースを与え、計算した。

(1) ケース1

図4(a)のようにパネル単体の凹凸を既知の鏡面誤差として与える。凹凸は開口面上の位相で 1° である。同図(b)(c)にパネル単体モデル及び近傍4点内挿法によって求めた結果を示す。図中において、実線は鏡面パネルの境界を示し、数値はパネルのコーナ(図中の・印)における位相を示す。

(2) ケース2

図5(a)のように複数のパネルの凹凸を既知の鏡面誤差として与える。同図(b)(c)にパネル単体モデル及び近傍4点内挿法によって求めた結果を示す。これより、近傍4点内挿法によって求めた場合は、設定値とのずれが大きくなって精度が悪いが、パネル単体モデルを用いた場合には、設定値によ

って近い結果が得られている。特に図4(a)のようにパネル間の段差が大きな場合、パネル単体モデルを用いて評価することが効果的であるといえる。

2.4.3 45 m 電波望遠鏡による実験

国立天文台野辺山宇宙電波観測所の45 m 電波望遠鏡による実験結果を示す。既知の鏡面誤差として、図6のようにあらかじめパネルAに -1 mm 、パネルBに 0.5 mm の凹凸を設定する。パネルA、Bの凹凸は鏡面全体に生じている鏡面誤差に比べて十分大きく設定している。図7にあらかじめ凹凸を設定した二つのパネルの周辺での開口面における二次元の位相分布の測定結果を示す。等高線は 0.1 mm 間隔で、プラス側とマイナス側について示す。同図からパネルA、Bの凹凸の様子がよく分かる。図8に -1 mm の凹を与えたパネルAの周辺について、パネル単体モデルを用いて求めたパネルのコーナの鏡面誤差の実験結果とシミュレーション結果の比較を示す。また、パネル間の段差についても、図9に両者の結果を示す。図中の数値はパネルAのコーナ(図中の・印)の値に対する隣り合うパネルのコーナ(図中の・印)の

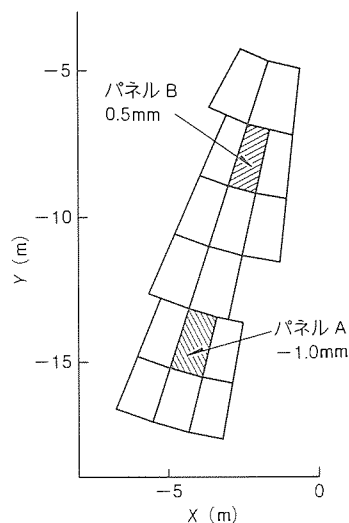


図6. パネルに段差を設定した45m 電波望遠鏡

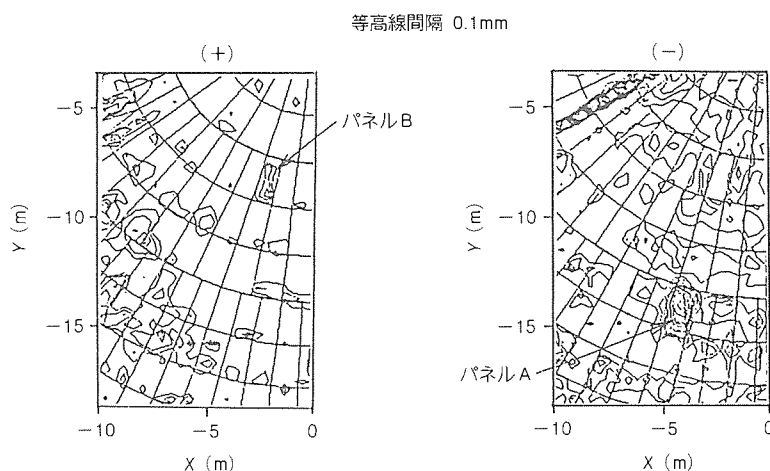


図7. パネル段差誤差の実験結果

0.03	• -0.10	-0.02
-0.40	• -0.86	-0.80
-0.27	• -0.72	-0.66
0.01	• -0.03	-0.18

(a) 実験結果

-0.01	• -0.10	-0.05
-0.18	• -0.81	-0.80
-0.21	• -0.83	-0.83
0.01	• -0.12	-0.13

単位: (mm)

(b) シミュレーション結果

図8. パネル単体モデルを用いた実験結果とシミュレーション結果の比較

0.88	• 0.75	0.75
0.46	• 0.00	0.00
0.45	• 0.00	0.00
0.74	• 0.69	0.48

(a) 実験結果

0.80	• 0.71	0.73
0.63	• 0.00	0.00
0.63	• 0.00	0.00
0.85	• 0.71	0.70

単位: (mm)

(b) シミュレーション結果

図9. パネルの段差

値, すなわちパネル段差を示す。実験結果とシミュレーション結果は比較的一致しているが, その差異としては, シミュレーションでは平面の偏位を考えているが, 実験ではパネルが変形している可能性があること, あらかじめ凹凸を設定するときの機械的な精度, 放射パターンの測定範囲の打ち切りによる誤差, などが考えられる。

3. 45 m 電波望遠鏡の鏡面調整

3.1 測定の条件

二次元放射パターンの測定周波数は 19.45 GHz, 測定範囲は 2.0317° , 測定間隔は 0.0160° , 測定点数は 128×128 であり, 開口面上の空間分解能は 43 cm となる。測定時間は 4 時間 46 分, 計算機によるデータ処理の時間は 30 分程度である。

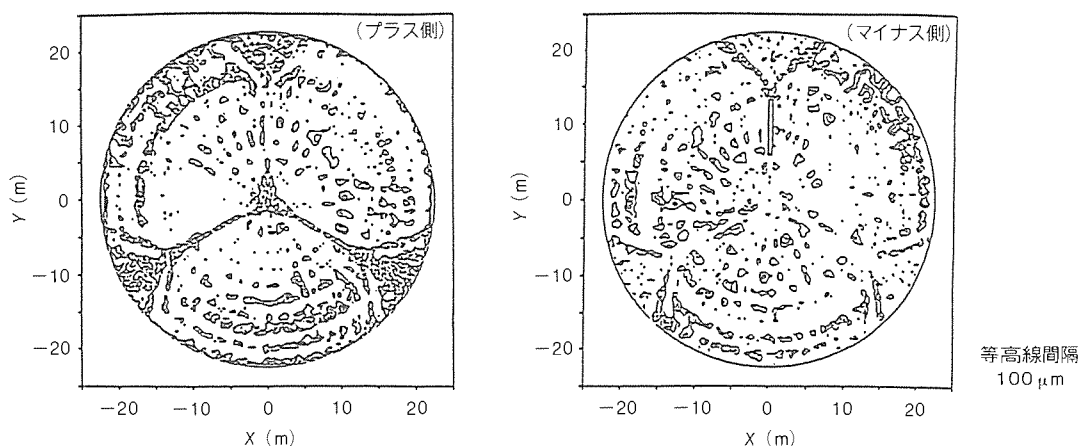
測定の環境条件としては, 大気のゆらぎが安定する真夜中で, 無風状態のときを選んだ。

3.2 鏡面誤差モデルに基づく鏡面調整結果

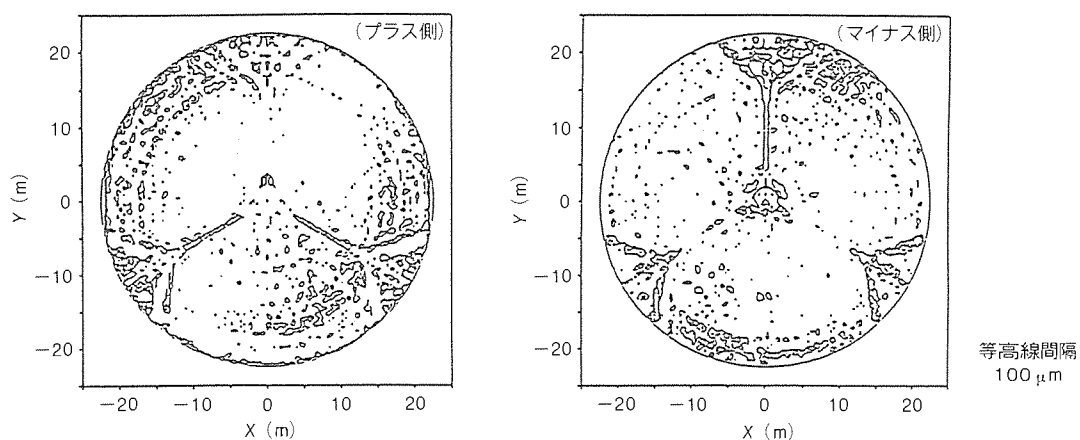
開口面上の電界分布の位相分布から指向誤差による位相傾斜, 一次放射器の設定誤差による位相誤差及び一次放射器単体の位相パターンによる誤差などを除去⁽⁸⁾して鏡面誤差が得られる。

これらの鏡面誤差データから, パネル単体モデルを用いて, 各パネル調整用モータの駆動量及びその位置におけるパネル段差を求め, 鏡面調整を行った。

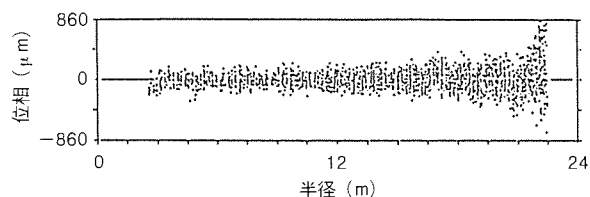
図 10 (a) にパネル段差調整前の鏡面誤差の二次元マップをプラス側とマイナス側について示す。等高線間隔は $100 \mu\text{m}$ であり, 3 回の測定結果の平均値の分布を示す。この二次元



(a) パネル段差調整前



(b) パネル段差調整後



(c) パネル段差調整後の半径方向分布

図10. 鏡面誤差の測定結果

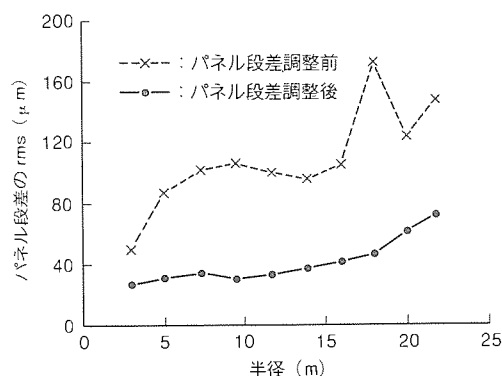


図11. パネル段差の半径方向分布

マップでは鏡面パネルに対応したパターンが見える。実際の鏡面とベストフィットのパラボラ面との差を2乗平均誤差で表した鏡面誤差は138 $\mu\text{m rms}$ であった。同図(b), (c)にパネル段差調整後の3回の測定結果の平均値の分布を示す。パネルの段差調整を行うことによって、鏡面パネルに対応したパターンがかなり消えていることが分かる。このような鏡面調整の結果、鏡面誤差を84 $\mu\text{m rms}$ とすることができた。なお、測定結果の再現性は約40 $\mu\text{m rms}$ であった。

また、パネル単体モデルを用いることによってパネル間の段差が得られ、図11にパネル段差調整前と後のパネル段差の分布を示す。パネル段差はパネル段差調整前で90 $\mu\text{m rms}$ であったが、パネル段差調整後で27 $\mu\text{m rms}$ にすることができた。

4. む す び

電波ホログラフィ法を用いて45 m 電波望遠鏡の鏡面誤差の測定、評価及び調整を行った結果、鏡面誤差を84 $\mu\text{m rms}$ とすることができ、周波数230 GHz の観測においても十分な感度が得られるようになった。また、このような大口径パラボラアンテナにおいても適切な鏡面誤差モデルを用いた電波ホログラフィのデータ解析法によって、精密な評価及び調整ができることを示した。

最後に御指導を賜った国立天文台野辺山宇宙電波観測所所長の石黒正人教授、現在光学赤外線天文学研究系所属の海部

宣男教授、また装置の開発、観測及びパネル段差調整に携わっていただいた関係各位に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 石黒正人：天体の計測技術〔Ⅱ〕電波，信学誌，73，No. 1，50～52 (1990)
- (2) 石黒正人：電波天文用アンテナ，平2信学会秋全大，SB-1-2 (1990)
- (3) Mayer, C. E., Davis, J. H., Peters, W. L., Vogel, W. J. : Electromagnetic Measurements of Large Reflector Antennas, IEEE Trans., IM-32, 1, 102～109 (1983)
- (4) Rahmat-Samii, Y. : Microwave Holography of Large Reflector Antennas Simulation Algorithms, IEEE Trans., AP-33, 11, 1194～1203 (1985)
- (5) 奥山利幸，福地 一，中村健治，岡本謙一：CS-2bを用いたホログラフィックアンテナ表面測定実験，信学技報，A・P85-75 (1985)
- (6) 石黒正人，林 左絵子，森田耕一郎，高橋敏一，海部宣男，増田剛徳，仰木一孝，近藤 寿：電波ホログラフィ法による高精度鏡面測定装置の開発，信学技報，A・P87-28 (1987)
- (7) 石黒正人，森田耕一郎，林 左絵子，増田剛徳，蛭子井貴，別段信一：電波ホログラフィ法を用いた鏡面精度測定に及ぼす開口照度分布の影響，信学技報，A・P87-29 (1987)
- (8) 石黒正人，森田耕一郎，林 左絵子，増田剛徳，蛭子井貴，別段信一：電波ホログラフィによる45 m 電波望遠鏡の鏡面精度測定，三菱電機技報，62，No. 5，69～74 (1988)
- (9) 出口博之，蛭子井 貴，増田剛徳，石田修己，石黒正人：電波ホログラフィによる鏡面誤差の評価法，平1信学会秋全大，B-69 (1989)
- (10) 出口博之，島脇 豊，蛭子井 貴，増田剛徳，石黒正人：電波ホログラフィにおける鏡面誤差モデルの最適化，平2信学会秋全大，B-113 (1990)

名古屋大学新 4 m 短ミリ波望遠鏡

福井康雄* 宮脇啓造***
別段信一** 榊原 修***
森 浩道***

1. ま え が き

新 4 m 短ミリ波望遠鏡の研究目的⁽¹⁾は、原始星の進化過程である星間ガスが自己重力で収縮始めてできるコアに星間ガスが降り積もり、質量的に成長する段階を全天にわたり、系統的に観測することにより、原始星の進化を解明することにある。このためには、CO スペクトル (115 GHz) の観測を効率良く行うことが必要となり、日射や風に対しても高精度鏡面と高指向精度を維持し、アンテナ雑音温度が低く、かつ高速駆動可能な電波望遠鏡が要求される。

この要求を実現するため、主鏡面部の構造部材に熱変形量が小さく、かつ軽量高剛性の CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) を採用した口径 4 m の短ミリ波望遠鏡を開発した。また、将来計画されている南半球への移設を考え、輸送時の分割単位は輸送限界可能な範囲で、必要最小限とし、かつ移設先での調整を極力少なくした設計とした。同設備は 1990 年 9 月に名古屋大学構内に据え付けられ、名古屋大学理学部で開発された低雑音 SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) 受信機と組み合わせられ、1991 年中に試験観測を完了し、1992 年から本観測が開始される予定である。

2. システム要求及び設計の基本方針

2.1 システム要求

前章で述べたように、この望遠鏡は高精度鏡面と高指向精度を持ち、かつ極度に効率化された掃天観測専用の望遠鏡でなければならない。このためには、下記のシステム要求を満足する望遠鏡を開発しなければならない。

- (1) 高鏡面精度と高指向精度を持つこと。特に、昼間の非均一な日射を受けた場合の鏡面精度の劣化が小さいこと。
- (2) ビーム伝送系は損失が小さく、かつ受信機が傾き変動をしない位置に設置できる系であること。
- (3) 高速駆動ができること。
- (4) 移設が容易にできること (掃天観測をするには、南半球での観測も必要となる)。

2.2 設計の基本方針

上記システム要求を実現するための設計方針の基本的な考え方を以下に示す。また、設計の基本方針の詳細を図 1 に示す。

(1) 日射による誤差対策

- 熱変形により、鏡面誤差と指向誤差が発生する主鏡及び副鏡支持柱^(注 1)に対しては、熱変形が小さく、かつ軽量高剛性の CFRP 材を使用する。
- 熱変形により、指向誤差を発生するマウントに対しては日除けを取り付け、直接構造部材に日射が当たるのを防ぎ、熱変形を抑制する。

(2) 高速駆動に対する対策

- 回転部を極力軽量化する (CFRP 製主鏡面部等)。
- 機械的な固有振動数を極力高くする。

(3) 移設性

- 分割を必要最小限にする。
- 移設後の調整が不要な構造にする。

(注 1) 副鏡支持柱が熱変形すると、副鏡の位置がズレ、集光力が低下したり、指向誤差が発生する。また、日射対策として日除けを付けると副鏡支持柱の外径が広がり、ブロッッキングが増加して集光力が低下するので、熱変形の小さい CFRP 材を使用した。

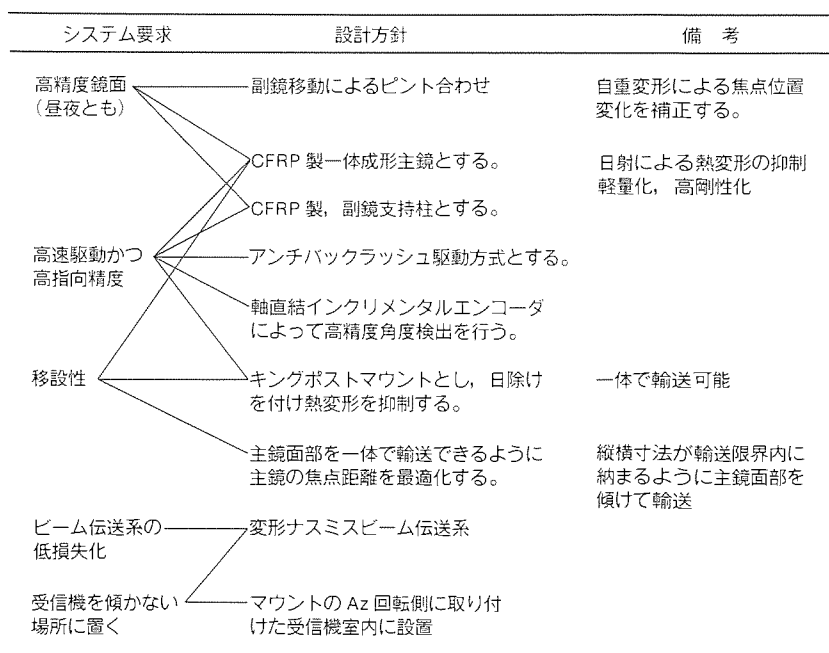


図 1. システム要求と設計基本方針

3. 主要性能・諸元

4 m 短ミリ波望遠鏡の外観を図2に、主要性能・諸元を表1に示す。

4. 各部の設計詳細

4.1 機械構造系の設計

望遠鏡全体を図3に示す。機械構造系は大きく次に示す単位に分割されており、下記の(1)～(3)については組立状態のまま通常陸上輸送ができる。移設時にはこの単位に分解して輸送する。

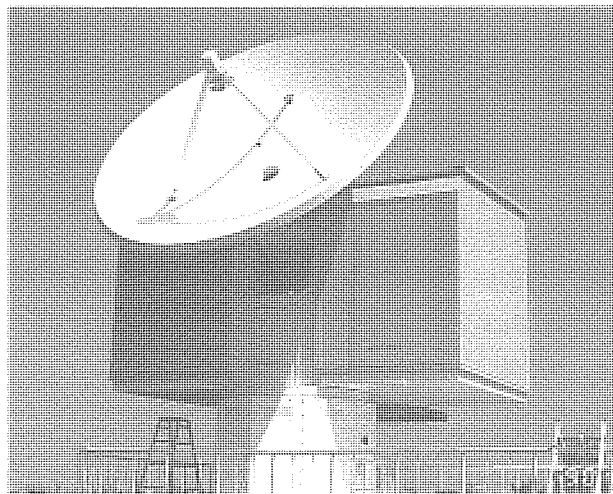


図2. 新4m短ミリ波望遠鏡

表1. 新4m短ミリ波望遠鏡の主要性能・諸元

1. アンテナ形式	通常カセグレン+ナスマス方式
2. マウント方式	方位角・高度角方式(Az/EL方式)
3. 主反射鏡直径	4 m
4. 主反射鏡質量	300kg
5. 鏡面精度	50 μ m rms 以下(夜間無風時)
6. 追尾方式	プログラムトラッキング
7. 指向精度	10" rms 以下
8. 駆動角度範囲	Az $\pm 270^\circ$ (連続, 真南基準) EL $+8 \sim +93^\circ$ (連続)
9. 最大駆動角速度	Az/EL 各軸とも $2.0^\circ/\text{s}$
最大駆動角加速度	Az/EL 各軸とも $2.0^\circ/\text{s}^2$
10. 駆動方式	両軸とも2モータアンチバッククラッシュ歯車駆動方式
11. 耐風性	運用可能平均風速 10m/s 退避駆動可能平均風速 20m/s 非破壊瞬間最大風速 65m/s ただし、平均風速は10分間平均風速とする
12. 周波数帯域	80~120GHz
13. 開口能率	50%以上 (115GHz)
14. 雑音温度	70K 以下(仰角 20° 以上)
15. 環境条件	外気温 $-15 \sim 35^\circ\text{C}$ (屋外機器) 相対湿度 0~100%
16. 総質量	4 t 以下

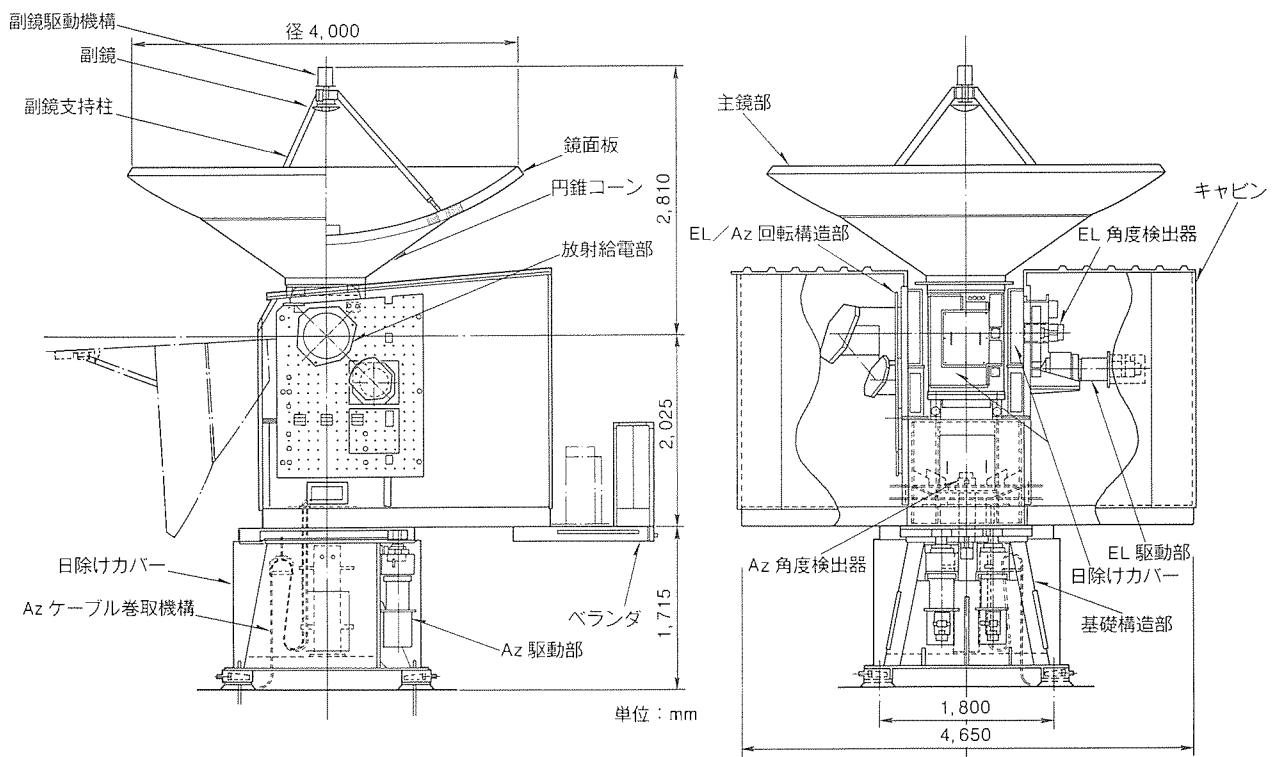


図3. 望遠鏡全体図

- (1) 主鏡部
- (2) EL/Az 回転構造部
- (3) 基礎構造部
- (4) キャビン (機器室)
- (5) その他 (日除けカバー, ベランダ)

以下に各部の詳細について説明する。

4.1.1 主 鏡 部

主鏡部は主鏡, 副鏡, 副鏡支持柱及び副鏡駆動機構によって構成される。主鏡部を輸送するときの状態を図4に示す。主鏡部の形状, 寸法は組立状態のままで陸上輸送できるように決められており, 口径は4m, 焦点距離は1.4mである。主鏡は日射や環境温度の変化に対し, 変形の小さいCFRP製であり, 図3に示すように鏡面パネルと円すい (錐) コーンで構成される。鏡面パネルは自重変形や風による変形を抑えるために, CFRP板の間にアルミハニカムを挟んだサンドイッチ構造である。また, 高精度鏡面を得るために, 鏡面パネルは次の工法で製作した。

- サンドイッチ構造の成形：型上で構造部材 (CFRP 表皮及びアルミハニカム) を成形。
- 精密型転写：CFRP 表皮と型の間に流動性のパテを入れて型面を転写。

また, 主鏡の各姿勢角に対する自重変形後の鏡面が回転放物面鏡を維持しやすくするため, 主鏡構造が回転対称性を満足するよう次の考慮をした⁽²⁾。なお, 軸対称な変形は副鏡を鏡軸方向に移動させピント合わせすることにより, 望遠鏡としての誤差を小さくすることが可能である⁽³⁾。

- 異方性のあるCFRP織物を45°ずつずらして順に積層し, 板としてほぼ等方性になるようにした。

- 異方性のあるアルミハニカムの形状を扇形にし, それを順に放射状に配置し, 鏡面パネルの面内剛性が軸対称になるようにした。

主鏡自身の自重変形, 日射による変形は小さいが, 主鏡は鉄製のEL回転構造に取り付けられるため, 主鏡鏡面は同構造の自重変形, 熱変形及び取付面の凹凸の影響を受ける。この影響を小さく抑えるため次の対策を実施した。

- (1) 鏡面パネルを円錐コーンで同一周上で支持し, 円錐コーンの変形による鏡面パネルの変形が単純なモードになるようにした。この変形モードに対しては副鏡移動によるピント合わせにより, 集光力の低下をかなり防ぐことが可能である。
- (2) 円錐コーンの板の局部的な曲げ剛性を鏡面パネルの剛性の約1/1,000にし, EL回転構造の変形を円錐コーンで吸収して鏡面パネルが変形しないようにした。また, 鏡面パネ

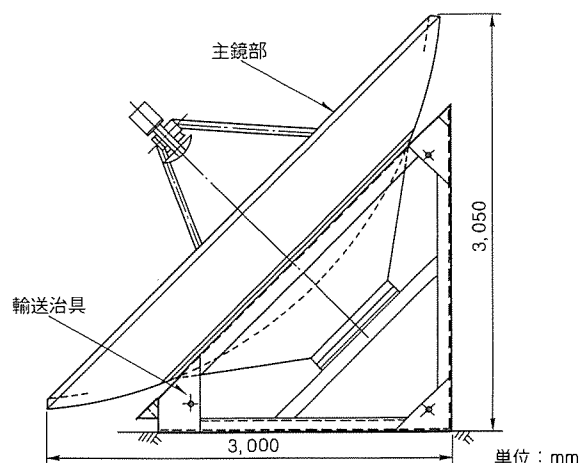


図4. 主鏡部を輸送するときの状態

表2. 鏡面誤差要因と誤差量

誤 差 要 因		誤差量	備 考
製作誤差	主鏡を天頂に向けて測定	48 μm rms	実測
組立誤差	主鏡取付部の凹凸 (平面度の悪さ) により生じる誤差 0.1mm のシムを主鏡底部に挟んで測定	6 μm rms	実測
	副鏡支持柱取り付け時に生じる誤差 取付部に 1 kgm のモーメントを想定	1 μm rms	FEM
自重変形による誤差	高度角 90°	2 μm rms	FEM
	高度角 0°	5 μm rms	FEM
風による変形誤差	7 m/s の正面風による変形誤差 主鏡外周部12等分点にそれぞれ 3 kg の錘を吊り測定	6 μm rms	実測
熱変形誤差	環境温度の変化により生じる変形誤差 50℃の温度差を想定	12 μm rms	FEM
	日射により生じる変形誤差 鏡面板の表裏に 5℃の温度差を想定*	14 μm rms	FEM

注 (1) rms : root mean square

(2) FEM : 有限要素法

(3) *印 類似のパネルの実測値

ルと円錐コーンとの接合部での剛性低下を防止するため、円錐コーンの傾斜角を鏡面パネルとの接合部の接線角にほぼ等しくし、接合部でのせん断力によって鏡面パネルが支持できる構造とした。

副鏡支持柱の主部材は、副鏡の位置・角度が環境温度、日射に対し、変化する量を小さく抑えるためCFRP製にした。また、支持柱の形状は、副鏡の姿勢変形を小さく抑え、電波のブロッキング率を小さくするため長円管にした。支持柱の支持点位置は、鏡面パネルで最も剛性の高い鏡面パネルと円錐コーン接合部とした。また、3本の支持柱を主鏡に組み込むとき、鏡面パネルが変形することを防ぐため、支持柱端部にユニバーサルジョイントを設け、支持柱と主鏡をピン結合した。

表2に鏡面誤差を生じさせる要因とその予想値又は実測値を示す。予想値は有限要素法(FEM)を用いた構造解析により求めた。また、実測法については5章で説明する。

4.1.2 EL/Az 回転構造部

EL/Az 回転構造部はEL駆動部及び放射給電部を取り付けた状態で輸送する。同構造の固有振動数は以下の理由によりできるだけ高くなるよう設計した(EL軸回りに15 Hz, Az軸回りに8 Hz)。

- (1) 観測する天体を切り替えるとき、望遠鏡を高速駆動した直後の振動継続を短くする。
- (2) 天体追尾時に望遠鏡を超微速度で駆動するとき、摩擦トルク変動や風トルクが変動しても滑らかに駆動できるようにするには制御系の制御帯域を高くとる必要があり、駆動時の共振を避けるため、機械的固有振動数を高くしなければならぬ。

4.2 放射給電系の設計

放射給電系に対するシステム要求を以下に示す。

- (1) 受信機を傾けることなく水平に設置できること。
- (2) 雑音温度を極力低減すること。
- (3) ヘリウム冷却された小型ホーンに対応できること。
- (4) Az/EL 軸の交点近傍にビームエースを持つこと(この位置に回転式ビームスイッチング装置が設置される。)
- (5) 2台の受信機に対し、ビームの切替えが可能なこと(将来の拡張計画)。

以上の要求を満足する系として、図5に示す放射給電系を設計した。星からの電波は、カセグレン鏡面系(M1, M2)のM3付近にある二次焦点に効率よく集束される。さらに、EL軸上のM3で反射されたビームは、M4とM5の回転二次曲面鏡で絞られ、2チャンネル受信器の中にある小型ホーンを経て、偏波分離器に導かれる。将来の受信機増設に対しては、図5に示すようにM4を垂直軸の回りに回転させる装置を付加することにより、ビーム切替えを行うことが可能である。主、副反射鏡は広い周波数範囲で使用されるため、鏡面修整を施さない通常カセグレンアンテナとした。

ビーム伝送系のミラーサイズはスピルオーバーの低減、及び将来のマルチビーム化を考慮して決めた。ちなみに80~120 GHzにおける各反射鏡のエッジレベルは-24 dB以下である。また、M4, M5の2枚の曲面鏡を組み合わせることによって交差偏波を打ち消しており、115 GHzにおいてビーム伝送系で発生する交差偏波のピークレベルは-27 dB以下である。ビーム伝送系で生じるビーム収束位置の周波数特性、主反射鏡の自重変形及び副鏡支持柱の自重変形による副鏡の位置ズレによる位相誤差は、副反射鏡を鏡軸方向に移動させることによって補正することができる。放射給電系としての電気性能は開口効率50%以上(115 GHz)、雑音温度70 K以

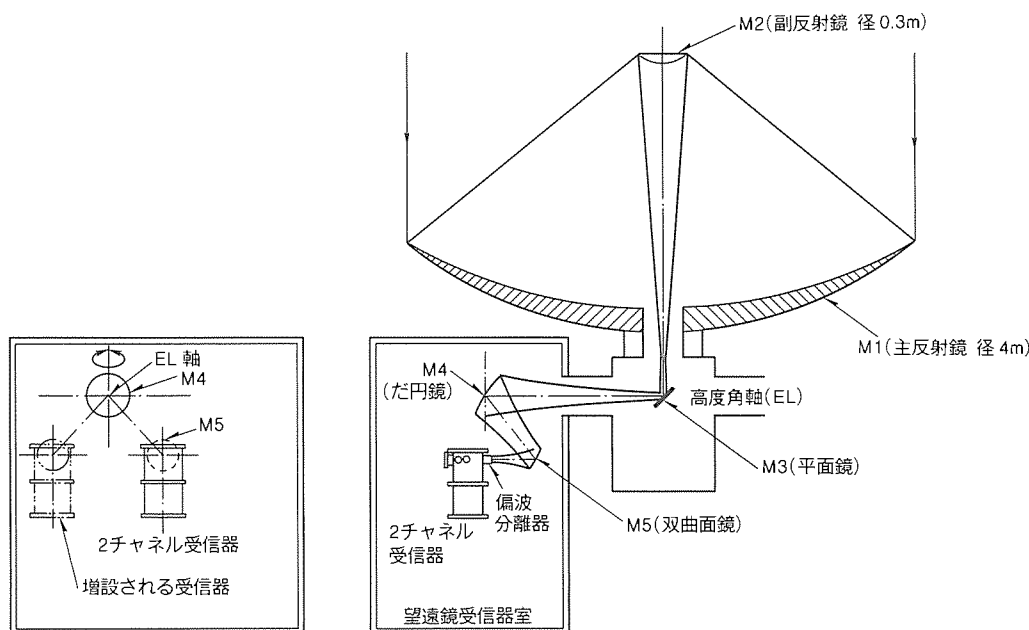


図5. 新4m短ミリ波望遠鏡放射給電系の構成

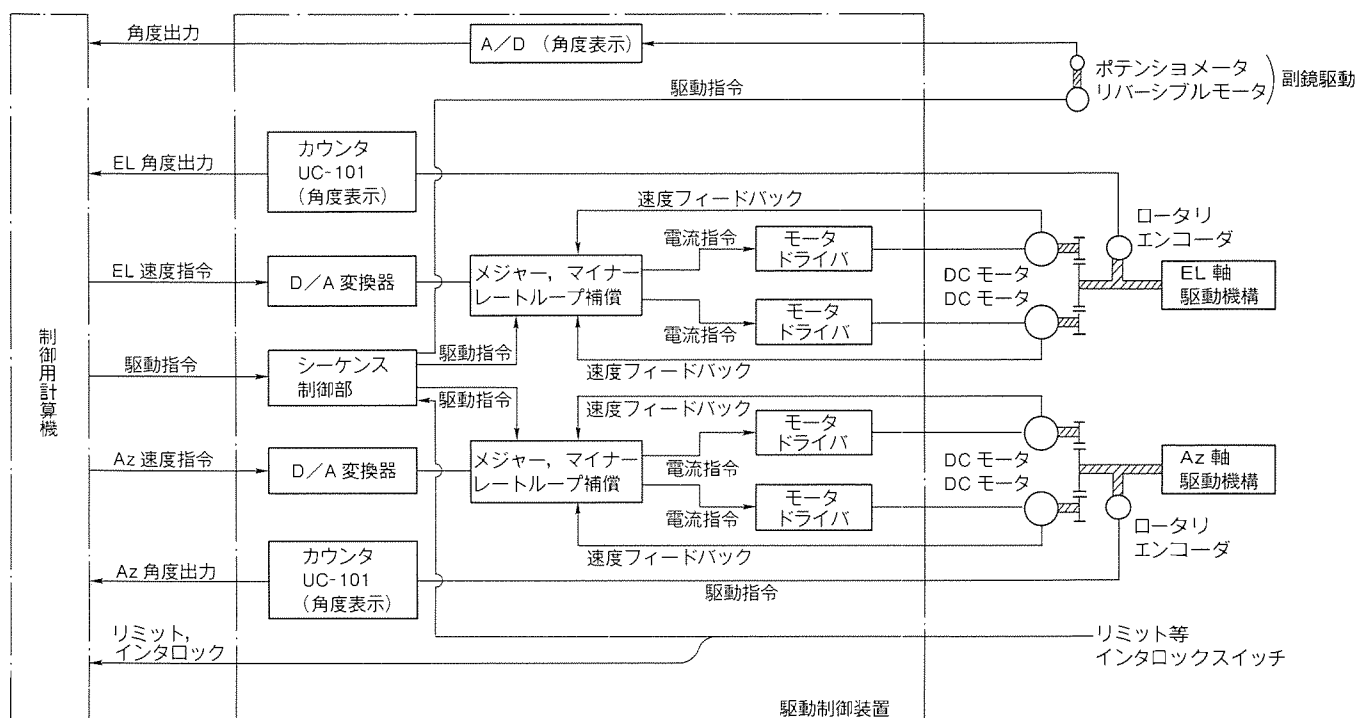


図 6 . 制御系ブロック図

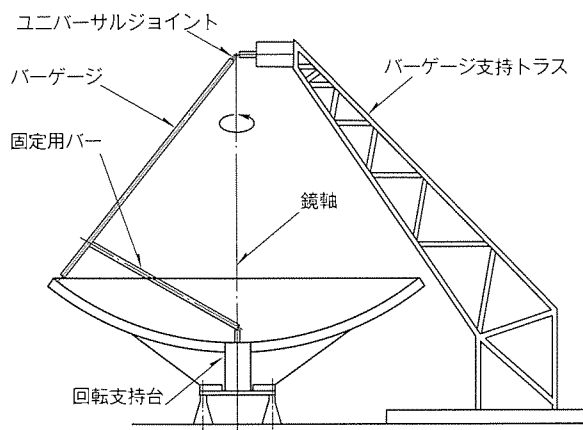


図 7 . 鏡面測定装置

- バージェージ先端には接触型変位計が取り付けられており、鏡面の深さを測定できる。
- バージェージはユニバーサルジョイントで支持トラスに回転結合されている。
- 固定用バーの一端はバーゲージに、他端は回転支持台に取り付けられており、バーゲージの先端は主鏡の一定半径上を鏡軸回りに回転する。
- 固定用バーには複数個のピン穴が設けられており、バーゲージと鏡軸とのなす角度を段階的に変えることができる(測定する半径を決める)。

下 (仰角 20° 以上) である。

4.3 制御系の設計

この望遠鏡の制御系に対する要求は以下のとおりである。

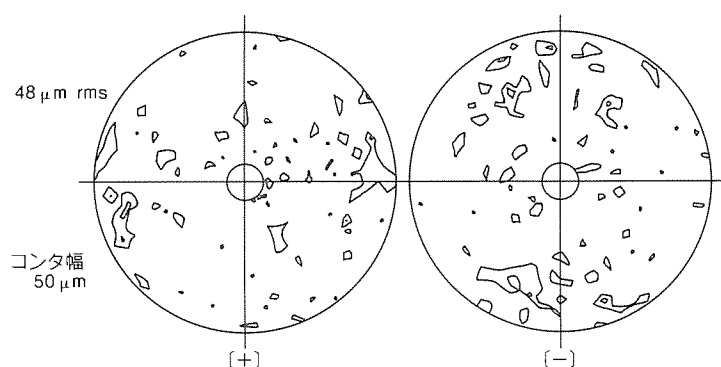
- (1) 制御用計算機から駆動制御系への指令信号 (名古屋大学担当) は速度指令信号とする。
- (2) 風等の外乱に対しても高い指向精度を保持できること。
- (3) 角度検出器にはインクリメンタル出力の光学式ロータリエンコーダを使用すること。

以上の要求を満足する制御系を設計した。制御系の構成、特徴について次に述べる。図 6 に制御系のブロック図を示す。制御用計算機からの速度指令信号 (16 ビットパラレル信号は、駆動制御装置内の D/A 変換器でアナログ信号に変換され、メジャー、マイナーレートループ補償回路に入力されるメジャーレートループ補償回路では、速度指令が急激に変化した

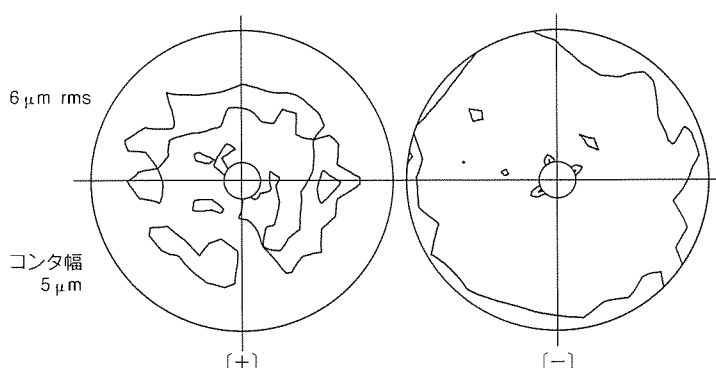
場合でも望遠鏡に過大な加速度が作用しないように、加速度の制限を行っている。

マイナーレートループ補償回路では、風等の外乱トルクが作用しても指令速度を保持するようモータの出力トルクを制御している。この望遠鏡では機械的固有振動数が高いので、メジャーレートループ、マイナーレートループの帯域をそれぞれ 14 rad/s 、 50 rad/s と高い値に設定して応答誤差を低減させた。角度検出精度を高めるため、角度検出器を望遠鏡の回転軸に直結させ、軸の回転を直接検出する方式を採用した。

受信機に対するノイズ対策として、モータ駆動用等の電力ケーブルにはシールド線を使用するとともに、EL 駆動装置と受信機をキャビン内の両サイドに設置し、距離を離す等の対策を行った。



(a) 主鏡を天頂に向けた状態の鏡面形状コンタマップ(主に製作誤差)



(b) 風が吹いたときの鏡面形状コンタマップ(外周部12等分点に 3 kg の錘を吊るし、正面からの風が吹いたときのシミュレーションを行った。)

図 8 . 鏡面誤差測定結果

5. 測定結果

図7に示すように、バーゲージで鏡面各点の深さを測定して鏡面誤差を算出した(半径方向に17点、円周方向に36又は72等分した点、合計約900点)。装置の詳細は図中に示す。測定時間内の温度変化は1℃以内に抑えた。この温度変化による測定値の再現誤差は10μm以下である。

測定は次に示した項目について実施した。代表例として(1)及び(2)のコンタマップを図8に示す。また、表2中にもFEMによる計算結果と併せて示した。

- (1) 主鏡を天頂に向けた状態(主に製作誤差) 48 μm rms
- (2) 主鏡外周部12等分点にそれぞれ3 kgの錘をつ(吊)るした状態(7 m/sの正面風が吹いた時を想定) 6 μm rms
- (3) 0.1 mmの厚さのシムを主鏡底部に挟んだ状態(主鏡取付部の凹凸0.1 mmを想定) 6 μm rms

6. むすび

新4 m短ミリ波望遠鏡の設計上の特徴・概要について述べた。冒頭に述べたように、この装置による本格的な観測は1992年から開始される予定であり、その成果が期待されている。

最後に、この装置の開発に当たり多くの御支援、御協力をいただいた元名古屋大学河鱈教授及び関係各位に深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 福井康雄, 河鱈公昭, 小川英夫: 星間ガス降着期における原始星の進化の観測的研究, 名古屋大学理学部 (1988-11)
- (2) Hoerner, S.: J. of the Structural Division, ASCE, 93, No. ST 5 (1967)
- (3) Kituregawa, T.: Satellite Communication Antennas, Artech House Boston, London (1990)

NTT DYANET 用30/20GHz 帯 デュアルビームアンテナ

森広芳照*
堀 俊和**
青木克比古***

吉川義彦***
早川喜夫***

1. ま え が き

衛星通信の需要の増大に伴い、地球局の低コスト化・小型化・高信頼化への要求がますます高まっている。特に、1台のアンテナで複数の静止衛星にアクセスできる複数ビーム形のアンテナが、設備共有によるコスト低減、設置面積の低減、衛星回線の二重化によるシステムの信頼性の向上などの観点から、最近各種地球局アンテナに採用されている。

日本電信電話(株)(NTT)が開発・実用化した共通(迂)回中継による衛星中継網方式⁽¹⁾(Dynamic Channel Assigning and Routing Satellite Aided Digital Networks: DYANET)に使用される地球局アンテナとして、二つのビームを持つ30/20GHz帯デュアルビームアンテナを設計・製作したので、その概要を報告する。

このアンテナの設計に対する要求条件は、

- (1) 静止軌道上4°離れた132°と136°のCS-3aとCS-3b(いずれの衛星も軌道位置安定度は $\pm 0.05^\circ$ 以内)を同時に指向でき、かつ駆動系の軽量化・簡素化を図ること。
- (2) 高能率・低雑音特性をもっていること。さらに、低サイドローブ特性をもっていること。
- (3) 設置面積の減少・自重の低減を図るとともに、現地での据付け・調整の簡素化を図ること。
- (4) 融雪用電力を節約できる鏡面構成とすること。
- (5) アンテナを傾けることなく日本各地に設置できること。などである。

ここで設計・製作したアンテナは、有効開口径4.2mの4枚反射鏡形式のダブルトラス オフセットアンテナで、その反射鏡系は二つのビームに共通の主・副反射鏡、及び一つのビームに対してそれぞれ2枚の補助反射鏡の合計6枚の反射鏡から構成されており、2枚の補助反射鏡を鏡面修整することにより、アンテナを傾けることなく所要の方向にビームを向け得るとともに、高能率特性をもっている。さらに、一次放射器にはコルゲート円すい(錐)ホーンを用いて低サイドローブ・低交差偏波特性を得ている。また、アンテナ全体ではなく1枚の補助反射鏡のみの限定駆動による衛星追尾を行うことにより、アンテナ駆動系の

軽量化・簡素化を図っている。さらに、主反射鏡を垂直設置とすることにより、設置面積の減少を図り、かつ主反射鏡鏡面に着雪しにくい構造とするとともに、主反射鏡及び副反射鏡骨組を簡素化したトラス構造として軽量化を図っている。また、アンテナ全体をできる限り少なく分割し(全部で4個のブロック)、各ブロックを輸送単位とし、工場内での仮組立調整後の分解を最小限にすることにより、現地の据付け・調整の簡易性を実現している。

このアンテナは昭和63年以降NTTのDYANET用地球局アンテナとして全国各地の約40か所の電報電話局に設置されている。ここでは、このアンテナの装置の概要、構成、設計及び実測性能について述べる。

2. 装置の概要

設計・製作した30/20GHz帯デュアルビームアンテナの外観を図1に、その構造を図2に示す。このアンテナは送受信共用であり、各帯域とも3.5GHzにわたりほぼ80%の開口能率を、広角指向特性についてはCCIR勧告値を十分満足する低サイドローブ特性をもっている。その機械構造系は、速度圧 $2,450\text{ N/m}^2$ [250 kg/m^2]の風圧に対して永久変形せず、速度圧 294 N/m^2 [30 kg/m^2]の風圧に対して追尾精度が 0.04°rms 以下となるような剛性をもっている。さらに、アンテナは補助反射鏡の駆動による自動追尾でAz, EL方向とも $\pm 0.3^\circ$ 、基礎架台部の方位角及び仰角調整機構による手でAz方向 $\pm 2^\circ$ 、EL方向 $\pm 5^\circ$ の角度範囲を駆動でき

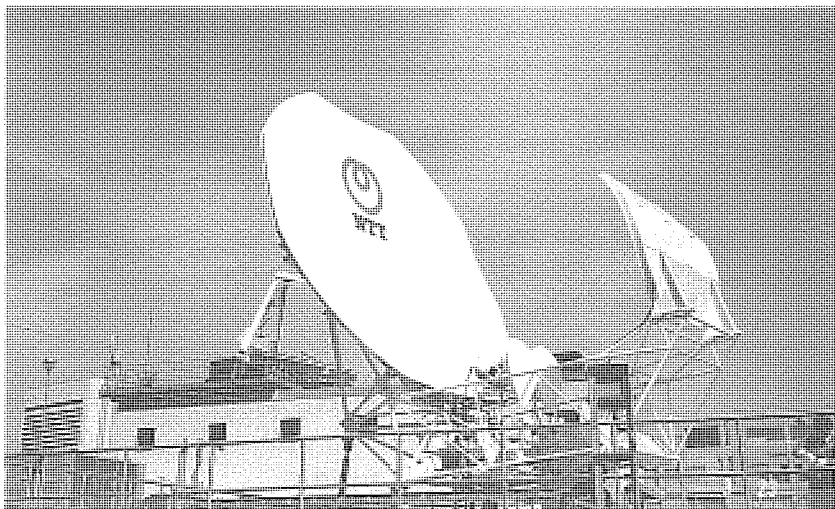


図1. 30/20GHz帯デュアルビームアンテナの外観

る機能をもっている。このアンテナの主要性能・諸元を表1に示す。

3. アンテナの構成と設計

3.1 アンテナの構成

トラス形反射鏡アンテナは、一つの地球局アンテナから

静止軌道の複数の衛星を同時にアクセスするアンテナとしてよく知られている⁽²⁾。しかしながら、従来のトラス形反射鏡アンテナは、ビーム偏向時の球面収差のために開口能率に限度がある。このような難点を解消するため、ダブルトラスの構成を採用した。図3に4枚反射鏡形式のダブルトラス オフセットアンテナの鏡面構成を示す。アンテナは二

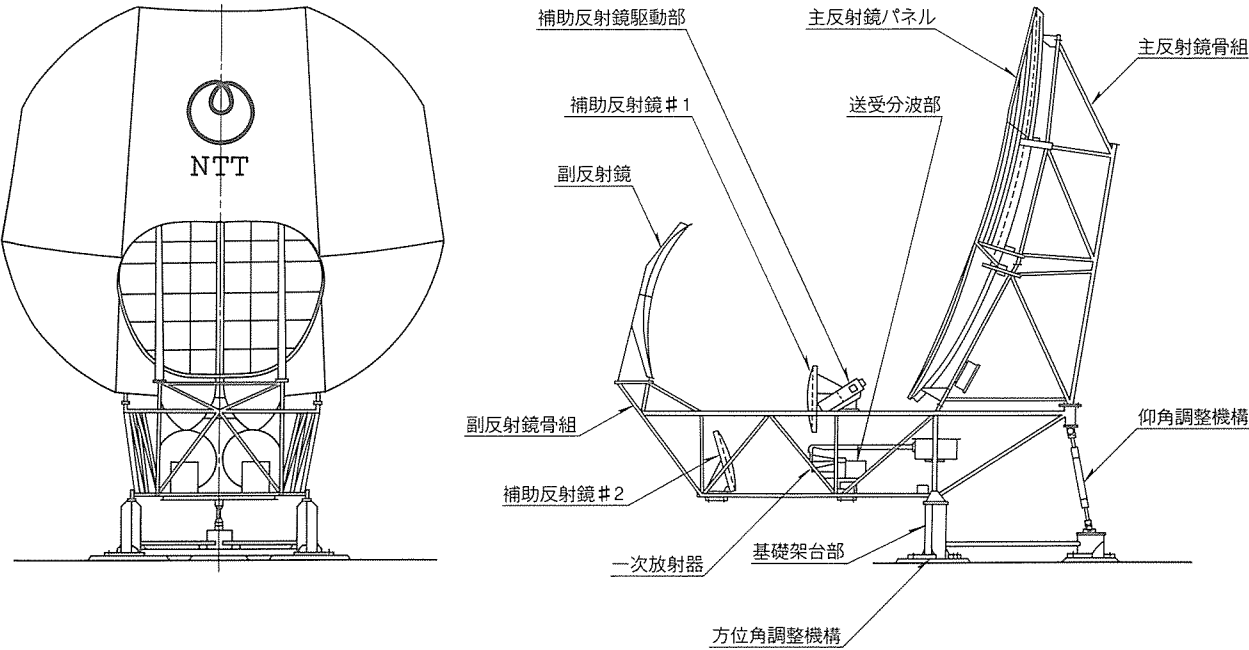


図2. 30/20GHz 帯デュアルビームアンテナの構造

表1. アンテナ主要性能・諸元

1. 一般	
アンテナ形式	4枚反射鏡形ダブルトラス オフセットアンテナ
鏡面修整	補助反射鏡#1及び#2による鏡面修整
アンテナ駆動方式	ステップモータによる補助反射鏡#1の限定駆動
ビーム駆動方向	Az, EL 方向
追尾方式	ビーコン受信によるステップトラック方式
着雪防止方式	シーズヒーターによる電熱方式
2. 機械構造・駆動系	
主反射鏡	有効開口径 4.2m
鏡面精度	主反射鏡 0.3mm rms 以下, 副反射鏡 0.2mm rms 以下, 補助反射鏡#1及び#2 0.15mm rms以下
駆動範囲	手動により, Az: ±2°, EL: 指定角度±5° 電動により, Az, EL とも±0.3°
耐風性	瞬間最大速度圧2,450N/m ² [250kg/m ²] の風圧で永久変形を生じない。 瞬間最大速度圧294N/m ² [30kg/m ²] の風圧で, 衛星の追尾精度0.04°rms 以下となるような剛性を持つ。
耐震性	水平加速度9.8m/s ² [1.0G], 垂直加速度4.9m/s ² [0.5G] の地震に対して永久変形を生じない。
質量	2.0t 以下 (仕様値), 1.8t (実測値)
消費電力	多雪用6.1kVA, 中雪用4.8kVA (発熱部)

3. 電気的性能

使用周波数	27.5～29.5GHz(送信)／17.7～19.7GHz 帯(受信), ビーコン波 19.45GHz
偏波	左旋円偏波(送信)／右旋円偏波(受信)
利得	送受分波部の入出端で, 送信29.25GHz において: 60.4dBi(仕様値)／61.4dBi(実測値) 受信19.45GHz において: 56.6dBi(仕様値)／57.7dBi(実測値)
開口能率	送信82%(実測値), 受信80%(実測値)
半値幅	送信0.15°, 受信0.23°(仕様値, 実測値のいずれも)
広角指向特性	送受信とも下記の CCIR 勧告値以下(仕様値, 実測値のいずれも) $29 - 25 \log \theta$, dBi ($1^\circ \leq \theta \leq 36^\circ$) -10 , dBi ($36^\circ \leq \theta$)
雑音温度特性	60K(仕様値)／45K(実測値), 晴天時, 仰角45°, 18.75GHz で

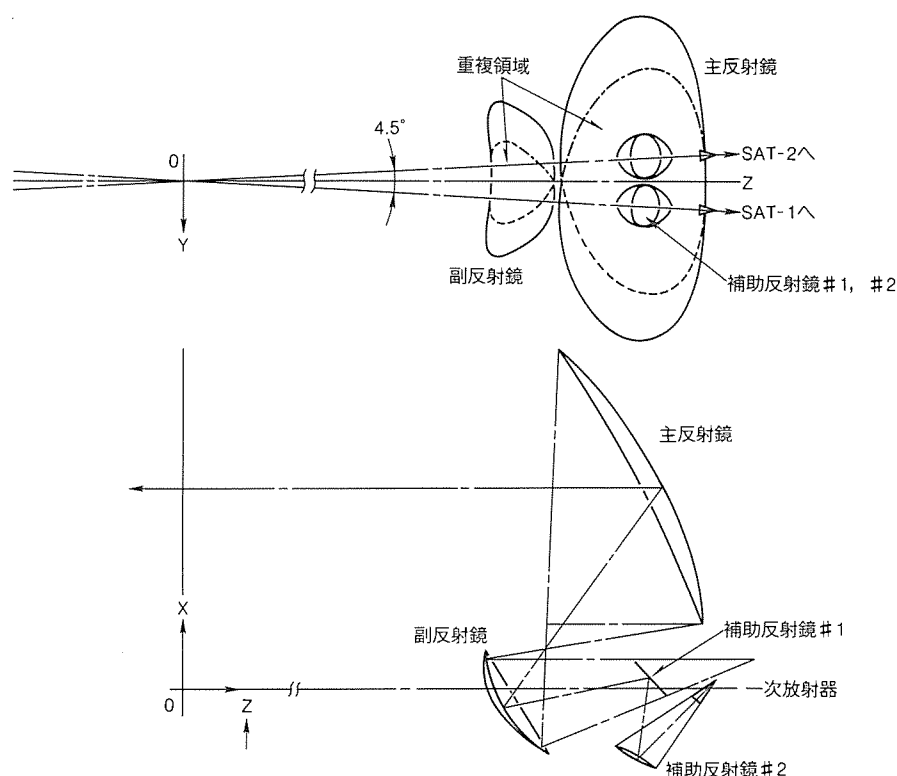


図3. 4枚反射鏡形式のダブルトーラス オフセットアンテナの鏡面構成

つの衛星方向のビームに対して共通の主・副反射鏡と各ビームに対して個別に設けられる補助反射鏡#1, 補助反射鏡#2及び一次放射器で構成される。

ここで, 主反射鏡及び副反射鏡は, 垂直断面内のいわゆる中心断面曲線がそれぞれ放物線及びだ(楕)円で, 水平断面曲線が回転軸を同じくする円弧のいわゆるダブルトーラス鏡面である。このダブルトーラス形式の採用により, 主反射鏡と同様に副反射鏡を二つのビームに対して共用できるため, 副反射鏡の近接配置の限界がなくなり, 従来のアンテナに比べ効率的な鏡面の構成が可能となった。さらに, 低サイドローブ特性・低雑音特性を得るためオフセット形式としている。また, 2枚の補助反射鏡#1, #2はビームを所要の方向に

向けたときのアンテナ開口面上での収差を補正し, かつ高能率開口分布となるよう鏡面修整された修整鏡面であり, 一次放射器は低サイドローブで交差偏波特性の優れたコルゲート円錐ホーンである。なお, アンテナ装置は以上の鏡面構成のほかに, 補助反射鏡駆動部, 送受分波部, 追尾駆動制御装置などから構成されている。

3.2 アンテナの設計

3.2.1 鏡面系の設計⁽³⁾

鏡面系は中心断面曲線において, 主・副反射鏡系を回転二次曲面鏡系のオフセットグレゴリアンアンテナとし, 補助反射鏡系を高能率・低雑音特性などを得るために所要の開口分布を得るよう鏡面修整系とする。一方, 水平断面曲線におい

て補助反射鏡の機械的な干渉を避けることと、主・副反射鏡の重複領域をできるだけ大きくし、地表からみて 4.5° 離れた対向する二つの衛星に主反射鏡からのビームが向かうようにトラスの回転半径を決める。

特に、通常のマルチビームアンテナでは、静止軌道の見掛けの傾きに応じて鏡面系全体を傾ける必要があるが、二つの補助鏡面系（L系、U系という。）をそれぞれ独立に、中心断面曲線内で所要のビームシフトを生ずるような開口位相分布となるよう鏡面修整を行うことにより、その欠点を解消できる。図4はL系とU系の補助鏡面系でのそれぞれの中心断面曲線とビームシフト α_1 と α_2 との関係を示す。したがって、主・副反射鏡系を所要利得・機械的条件などから求め、その鏡面系を共通にして所要の開口分布を得るようにL系、U系それぞれに①Snellの法則、②光路長一定の法則、③エネルギー保存の法則、を適用すればそれぞれの系での補助反射鏡#1、#2が求められる。

このように設計された鏡面系は、主反射鏡が高さ4.7m×幅5.1m（有効開口径4.2m）、副反射鏡が高さ1.9m×幅2.3m、補助反射鏡#1、#2とも高さ0.7m×幅0.8mなどとなっている。また、例えば札幌の場合 α_1 、 α_2 とも 0.3° と

する。

3.2.2 駆動系の設計

駆動系の設計の主眼はその簡素化であり、そのためには駆動部を少なくし、かつその駆動方向の範囲を最小限とし、また駆動量を小さくすることが望ましい。補助反射鏡による可動ビームのビーム方向はRay Trace法によって求められるが、このRay Trace法によって補助反射鏡#1を、直交する2方向（X軸及びY軸とする。）に沿って直線的に駆動することにより、ビーム方向がAz及びEL方向に変化し、所要の衛星追尾が可能であることが明らかになった。反射鏡駆動機構にはビームのAz、EL方向の角度変化に換算する目盛りを、対応するX軸、Y軸のそれぞれの軸に沿って設けている。Az、EL方向で $\pm 0.3^\circ$ のビーム偏位に対しX、Y軸の駆動量はほぼ $\pm 50\text{mm}$ である。また、反射鏡駆動機構は図5のブロック図に示すように衛星からのビーコン信号を用いたステップ追尾方式によって、追尾駆動制御装置により、常にビームを衛星方向に向けるよう制御される。

3.2.3 機械構造系の設計

主反射鏡は6分割のアルミニウム合金材のストレッチパネルで構成されており、パネル単体の鏡面精度は 0.15mm rms

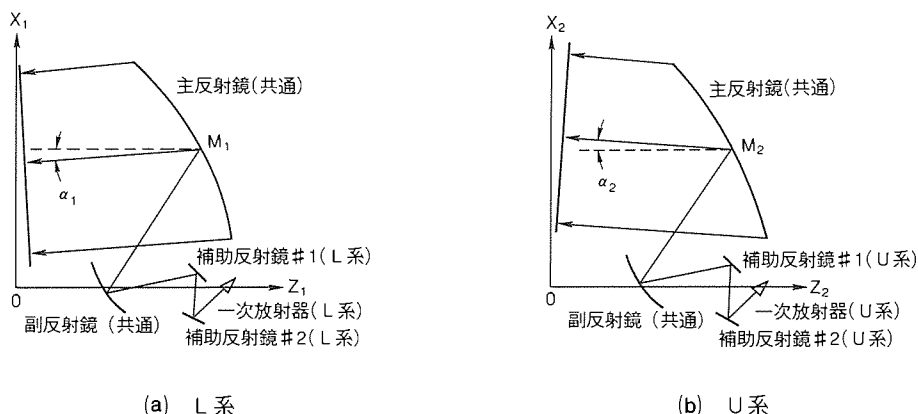


図4. L系、U系でのアンテナの中心断面曲線

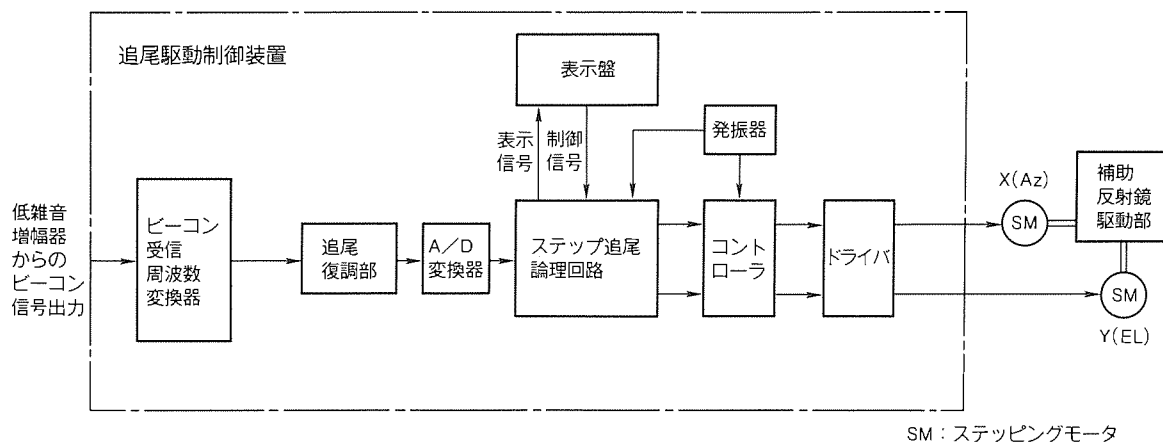


図5. 追尾・駆動系のブロック図

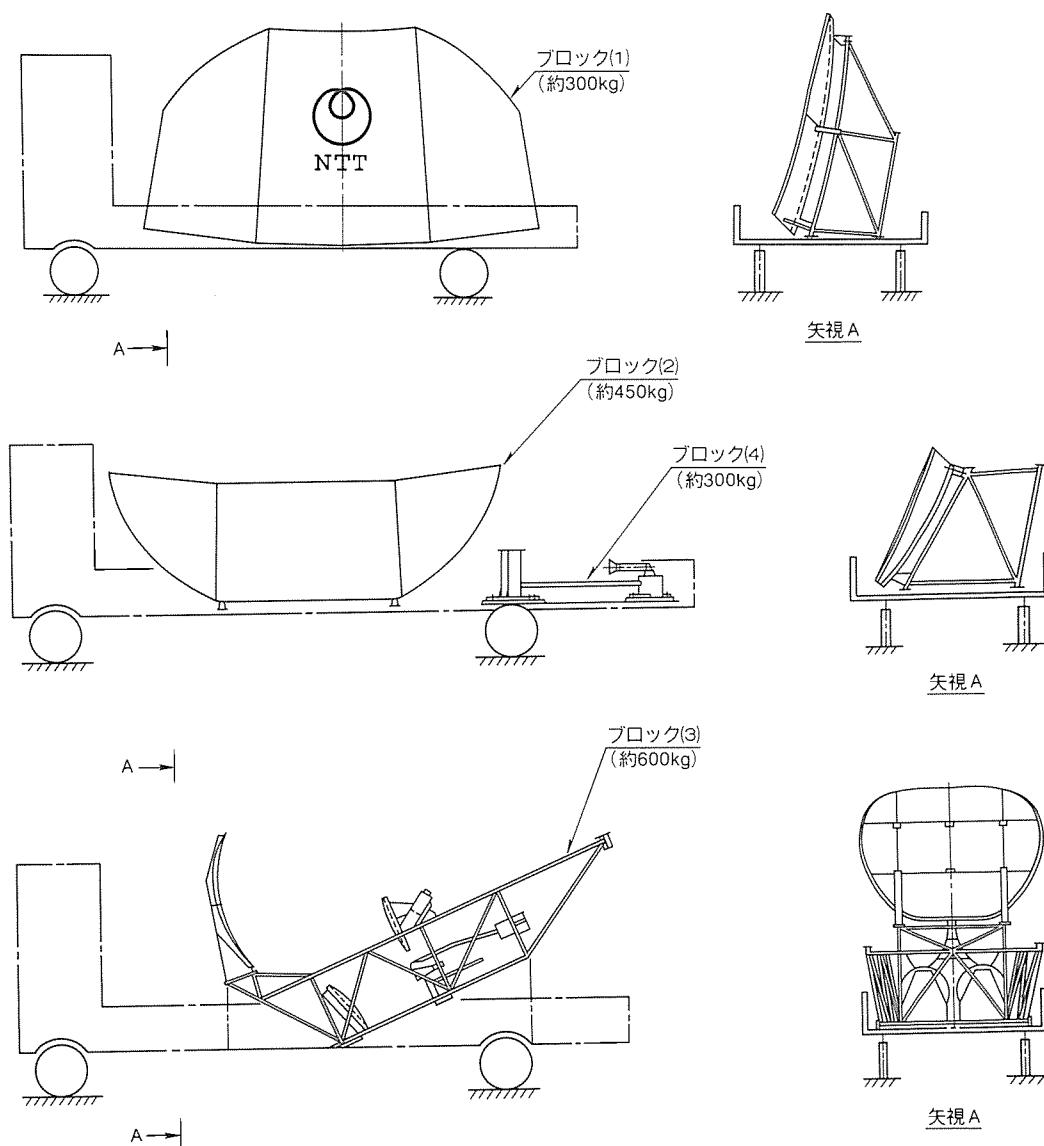


図 6 . アンテナの分割状態

であり、全体で0.3mm rms の高精度の鏡面となっている。この主反射鏡を支える骨組構造物には、所要の剛性を保ちつつ、構造の簡素化を図り、組立て・再現性を確保するため、できるだけ部品を減らし、徹底的に分割を少なくしたパイプ材によるトラス構造を採用した。

融雪電力節減の観点からこのアンテナは垂直設置すなわち主反射鏡を垂直に設置することが望ましいが、この方式は風荷重の観点からは受風面積が増えるため水平設置に比べれば不利となる。耐風性の設計条件は、瞬間最大速度圧 $2,450 \text{ N/m}^2$ (耐風速に換算すれば 60 m/s に相当) で永久変形しないこと及び瞬間最大速度圧 294 N/m^2 で所要の追尾精度を満足する剛性をもつことであり、これに対して、構造解析プログラム NASTRAN による計算、風洞実験による風圧係数の選定などにより、トラス構造の最適化・パネル支持構造の設計などを行い、要求条件を満たした。さらに、垂直設置によってシングルビームアンテナを2式用いる場合に比べ、設置

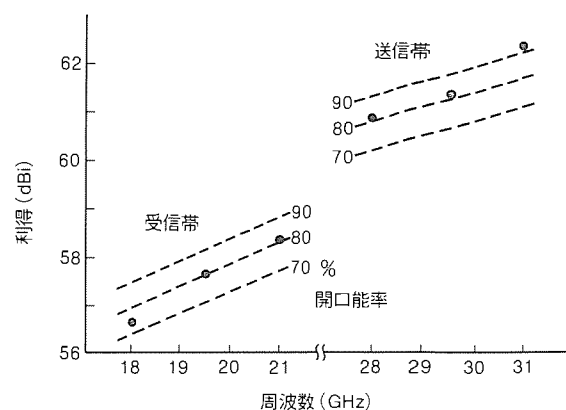


図 7 . 利得・開口能率の周波数特性(実測値)

面積を約 $3/5$ にできた。

また、現地での組立て・調整を簡素化するために、工場で仮組・調整したアンテナをできるだけ大きな単位で、かつ現

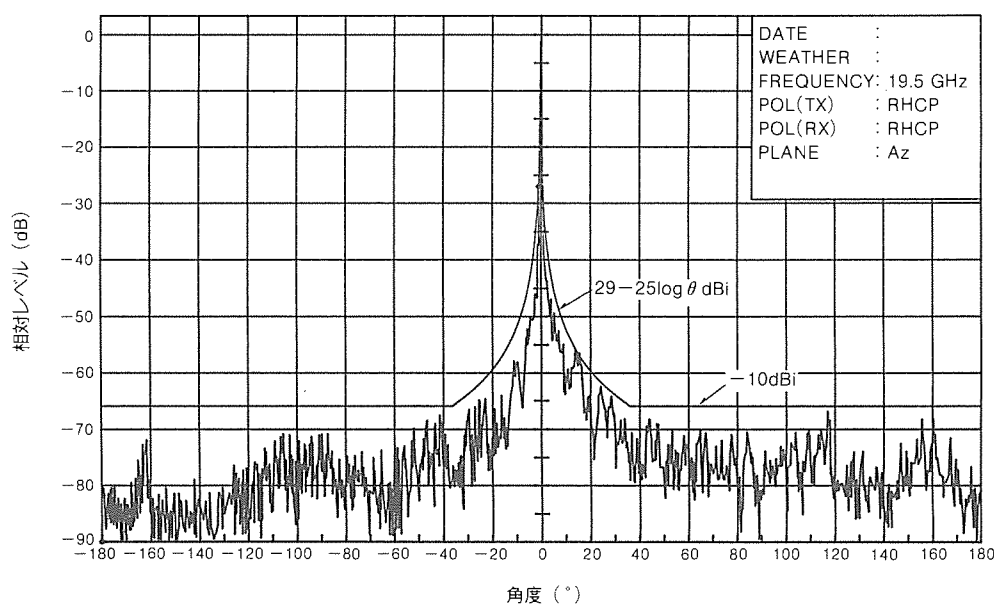


図 8 . 軌道面内広角指向特性(実測値)・・・19.5GHz

地での調整を不要のように分割することとし、分割部は位置決めピンを用いて現地組立時の再現性を得るようにした。このように設計したアンテナの分割状態を図 6 に示す。ここで、一つのブロックは 600 kg 以下である。

4. 実 測 性 能

コリメーション塔を用いてこのアンテナの各種の特性を測定した。図 7 は利得及び開口能率の周波数特性を示すが、送受分波部の入出力端での利得は 29.5 GHz (送信帯) で 61.4 dB, 19.5 GHz (受信帯) で 57.7 dB を得ている。図中の開口能率は有効開口に対する値であり、送・受信帯にわたり 80 % 程度の能率が得られている。また、ビーム方向からみた実開口に対する能率も 65 % 程度となっており、高能率修整の効果が明らかである。図 8 に 19.5 GHz での軌道面内の広角指向特性を示す。水平面内の広角指向特性とともに、CCIR 勧告値である次の値：

$$29-25 \log \theta \text{ dBi} \quad (1^\circ \leq \theta < 36^\circ)$$

$$-10 \text{ dBi} \quad (36^\circ \leq \theta)$$

を十分満たしており、低サイドローブ特性が得られている。また、地上回線との干渉も少ないことが期待できる。近軸指向特性も理論値とよく一致しており、3 dB 幅は、29.5 GHz で 0.15°, 19.5 GHz で 0.23° である。

5. む す び

NTT が実用化した DYANET 地球局アンテナ用 30/20 GHz 帯デュアルビームアンテナの装置の概要、構成と設計及び実測性能について述べた。この稿で述べたとおりアンテナは所期の性能を持っており、これまで三菱電機(株)は昭和 63 年から約 40 台のアンテナを納入している。なお、このオフセットダブルトラスタイプのアンテナは Ka (30/20 GHz) 帯に限らず Ku (14/12 GHz) 帯のデュアルビームアンテナにも適用できる。

最後に、このアンテナの設計・製造に当たり、御指導・御協力いただいた関係各位に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 森広芳照, 加藤修三, 大貫雅史: 衛星中継網方式—DYANET—, 信学会誌, 74, No. 5, 439~456 (1991)
- (2) Hyde, G., Kreutel, R. W., Smith, L. V.: The Unattended Earth Terminal Multiple-beam Torus Antenna, COMSAT Tech. Rev., 4, No. 2, 231~262 (1974)
- (3) 堀 俊和, 田中知明, 秋田明彦: デュアルビームを有する地球局アンテナの構成法と特性, 信学技報, SAT 88-93 (1989)

衛星通信受信用平面アンテナ

茶谷嘉之* 大塚昌孝**
原田 明*
舟田雅彦*

1. ま え が き

Superbird, JCSAT 等の民間通信衛星の打上げによって、我が国も本格的な衛星通信時代を迎えようとしている。衛星通信 (CS) は、同報性・広域性・多元接続性・回線設定の容易性・大容量伝送・高品質伝送等の利点を擁しており、現在は主に企業内ネットワーク、CATV 配信等の画像伝送に利用されている (図1)。

これらの衛星通信受信用アンテナとしては、地域・用途に応じて径0.75~3.6 m 程度のパラボラアンテナが主に使用されている。これに対し、最近衛星放送 (BS) 受信用として人気の高まっている平面アンテナは、省スペース・設置の容易性・移送性・着雪に強い、等の利点を持っており、CS 受信用としても平面アンテナを望む声が強くなってきている。

今回開発したCS 受信用平面アンテナは、トリプレート線路給電方形パッチアンテナを素子とする平面アレーアンテナであり、素子数約1,600、約900 mm×900 mmの開口を持っている。現状のCS は、BS に比較して衛星側の実効放射電力 (E.I.R.P) が低く、受信用アンテナとしては、BS 用の2倍以上の開口径が必要となる。平面アンテナは、開口が大きくなると給電損失が増加するため、高効率を実現できないという問題がある。この問題を克服するために、今回開発した

アンテナでは全体を6つのサブアレーに分割し、各サブアレーごとに低雑音増幅器 (LNA) を内蔵することによって、60 %以上の効率を実現している。本稿では、CS 受信用平面アンテナの設計、構成及び性能について述べる。

2. 平面アンテナの設計

現在、BS 受信用としては既に多くの平面アンテナが開発され、実用化されている。表1に現在実用化されている主な平面アンテナの分類を示す。表に示すように、これらは大きく分けてラジアルライン給電タイプとトリプレートライン給電タイプに分類することができる。

ラジアルライン給電タイプは、給電損失が非常に小さく、80 %以上の高効率を実現することも可能である⁽¹⁾⁽²⁾。これに対し、トリプレート給電タイプは給電損失はラジアルライン給電タイプより大きい、形状を自由に設定できるとともに比較的容易に一様分布を実現できる利点がある。また、通常は並列給電で使用されるため、広帯域特性が得られるという特徴がある⁽³⁾。

平面アンテナをCS 受信用に適用する場合、CS とBS の衛星側のE.I.R.Pのの違いから、BS 受信用の2倍以上の開口径が必要となる。また、所要帯域もBS の2.5 %に対し、4 %と広帯域性が要求される。ラジアルラインタイプは進行

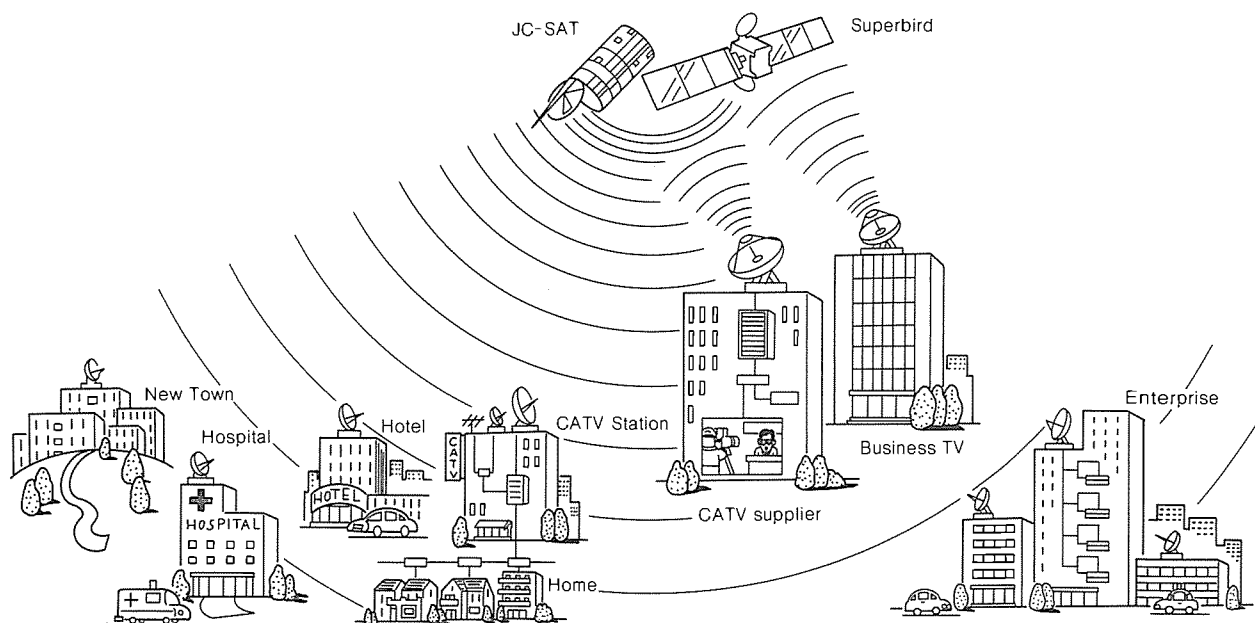


図1. 衛星通信の利用形態

波形アンテナであるため、アンテナ開口が大きくなるにつれて狭帯域となり、周波数特性の点で実現が困難となる。一方、トリプレートラインタイプはアンテナ開口が大きくなるにつれて給電損失が増大し、アンテナ効率が低下する。図2にアンテナ開口寸法とアンテナ効率及び G/T の関係を示す。図に示すように、16 dB 程度の G/T を得るためには、パラボラアンテナに比べ、はるかに大きなアンテナが必要となることが分かる。この点を改善するために、全体を複数のサブアレーに分割し、給電回路の途中にLNAを挿入することを考える。モデルを図3に示す。この場合、アンテナ G/T は次式で与えられる。

$$(G/T) = G_a / T_s \dots\dots\dots (1)$$

$$T_s = T_a + (L_1 - 1) T_0 + L_1 T_1 + \{ (L_2 - 1) T_0 + L_2 T_r \} L_1 / G_1 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- G_a : アンテナ利得 (給電損失を除く)
- T_a : アンテナ雑音温度
- L_1 : 給電損失 (サブアレー内)
- L_2 : 給電損失 (サブアレー間合成回路)
- G_1 : LNA の利得
- T_1 : LNA 雑音温度
- T_r : LNB 雑音温度
- T_0 : 周囲温度

式(2)に示すようにアンテナを分割することによってLNA以降の給電損失の雑音温度への寄与は $1/G_1$ に低減される。すなわち、分割数を増やして L_1 を小さくすることによって

G/T を大きくすることが可能である。アンテナ開口寸法、分割数に対する G/T の計算結果を図4に示す。ここで、LNAの利得を10 dB、雑音指数(NF)を1.2 dB、LNB (Low Noise Block Converter) のNFを1.4 dBと仮定している。

一方、北海道から九州の広範囲にわたって良好な受信性能を得るために、アンテナ G/T としては16 dB 以上が必要となる。ここでは、設計目標として $G/T=17$ dB とする。図4から、4分割の場合、アンテナ開口は約1 m 角、6分割で約900 mm 角、9分割で約850 mm 角となる。ここでは、経済性を考慮して900 mm 角6分割を選定した。

また、素子間隔を約0.9波長程度とし、6分割できるようにE面側の素子数を40素子、H面側の素子数を42素子に設定した。

3. アンテナの構成

このアンテナは、6つのサブアレー、6つのLNA、電力合成回路、LNBから構成される。アンテナの全体構成を図5に示す。

各サブアレーは、トリプレート線路給電方形パッチアンテナから構成され、素子数は約280素子である。放射素子の断面構造を図6に示す。放射素子及び給電回路は、ポリエステルフィルム基板上にエッチングによってプリントされて構成され、スペーサによって上下地導体の中央に保持される。

表1. 主なBS受信用平面アンテナの分類

給電方式	放射素子
トリプレートライン給電方式	方形パッチアンテナ
	円形パッチアンテナ
	環状スロットアンテナ
ラジアルライン給電方式	スロットアンテナ
	ヘリカルアンテナ

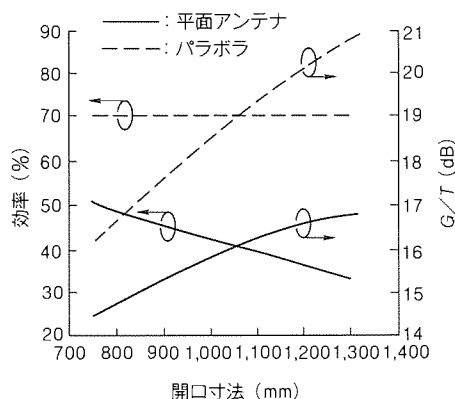


図2. アンテナ寸法に対するアンテナ効率, G/T

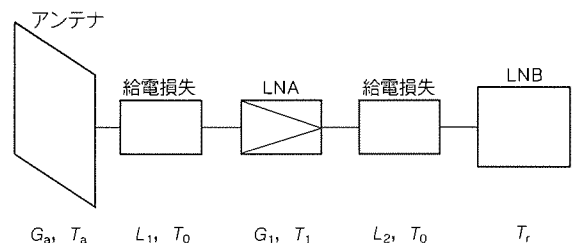


図3. アンテナ計算モデル

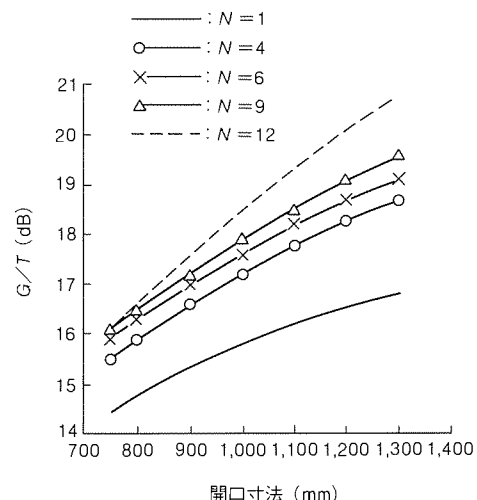


図4. アンテナ寸法, 分割数に対する G/T 計算値

LNA は、誘電体基板上に HEMT-FET 1 個を実装した MIC (Microwave Integrated Circuit) 構成で、寸法は約 20 mm 角である。LNA の主な性能を表 2 に、NF の実測値を図 7 に示す。

合成回路は、LNA の出力を同相合成するものであり、トリプレート線路によって構成される。合成回路も放射素子及び給電回路と同一基板上にプリントされている。

給電回路と LNA 間及び LNA と合成回路間の接続は、マイクロストリップトリプレート変換器を介して、同一面内で接続している。また、LNA への電流は LNB から直接供給しており、特別な外部電源等は必要としない構成となっている。

LNB は、合成回路出力を増幅するとともに IF 周波数に変換するもので、トリプレート導波管変換器を介して合成回路に直接接続されている。

開発した平面アンテナの外観を図 8 に示す。

4. 試験結果

CS 受信用平面アンテナの主要性能を表 3 に示す。また、12.5 GHz における H 面及び E 面の近軸放射パターンを図 9、図 10 に示す。近軸において設計値とよく一致したパターンが得られるとともに、正面方向における交差偏波識別度 40 dB 以上の性能が得られている。アンテナの G/T は帯域内で 16 dB 以上、12.5 GHz で 16.8 dB を得ている。アンテナ効率としては、合成回路の損失を除き、約 60 % の性能が得

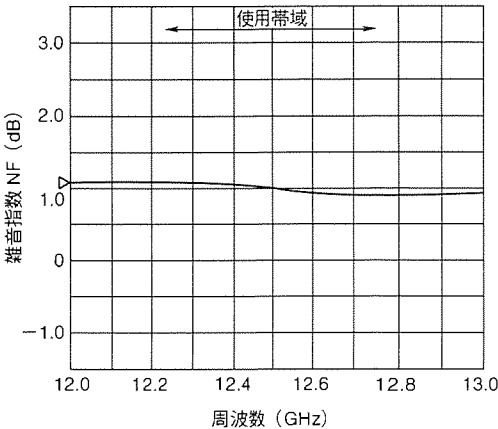


図 7. LNA NF 特性測定結果

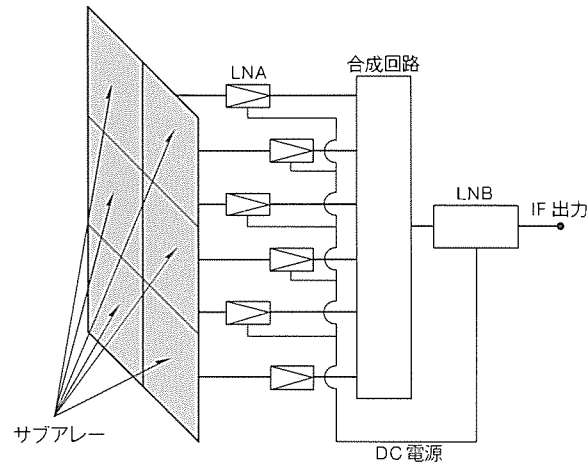


図 5. アンテナ構成ブロック図

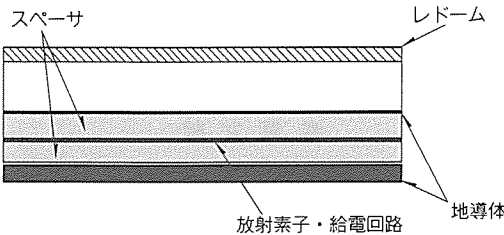


図 6. アンテナ断面構成

表 2. LNA の性能

項 目	性 能
周波数	12.25～12.75GHz
直線利得	10dB 以上
入出力 VSWR	1.2以下
雑音指数	1.2dB 以下
消費電力	50mW 以下



図 8. 衛星通信受信用平面アンテナの外観

表 3. CS 受信用平面アンテナ性能一覧

周 波 数	12.25～12.75GHz
偏 波	垂直又は水平偏波
利 得	≥47dB (LNA 利得込み)
出力 VSWR	≤1.7
G / T	≥16dB
交差偏波識別度	≥40dB
寸 法 (mm)	970 (W) × 970 (H) × 76 (D)
質 量	15kg
耐 風 速	50m/s

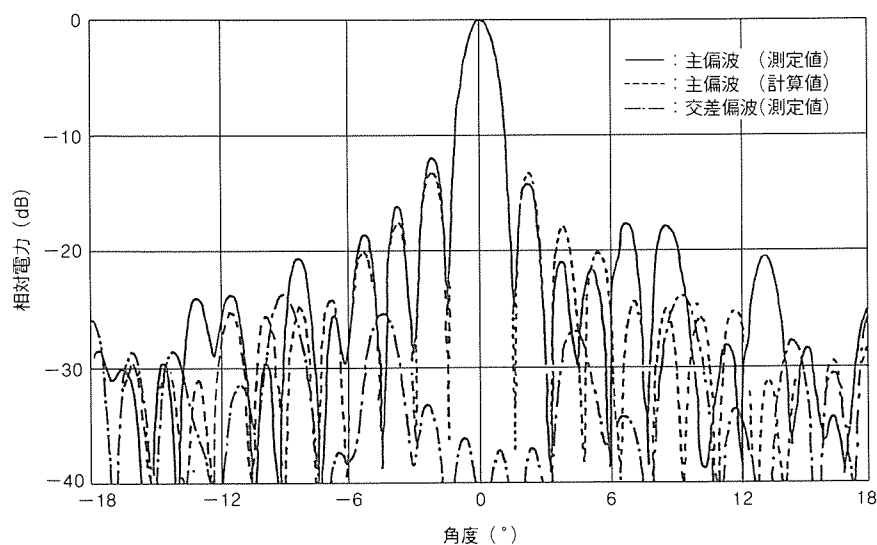


図9. H面近軸パターン測定結果(12.5GHz)

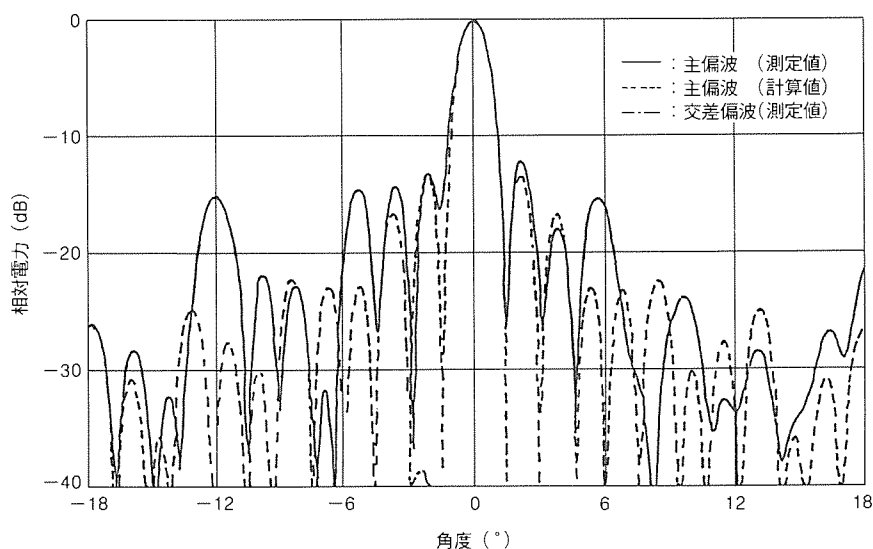


図10. E面近軸パターン測定結果(12.5GHz)

られている。

さらに、このアンテナを用いて北海道北見市及び九州鹿児島市で受信実験を行ったところ、いずれにおいても良好な受信映像が得られ、北海道～九州の範囲でこのアンテナを適用可能であることを確認した。

5. む す び

衛星通信受信用平面アンテナの概要、構成及び性能について述べた。また、受信実験の結果、北海道～九州の範囲でこのアンテナを適用できることを確認した。このアンテナは、設置が容易であり、また移送性に優れるため、建設現場等への一時設置には特に有効である。また、今後は更に小型化を

進めることとともに、偏波共用アンテナ、ビームチルト形アンテナの開発が要求される。

参 考 文 献

- (1) 高橋応明, 高田潤一, 安藤 真, 後藤尚久: 一層構造ラジアルラインスロットアンテナの特性, 信学技報, AP 90-129, 23～28 (1990)
- (2) 中野久松, 武田陽夫, 三牧宏彬, 山内潤治: 高効率超低姿勢ヘリカルアレーアンテナ, 信学秋全大, B-29 (1989)
- (3) 王丸謙治: プリントアンテナ, テレビジョン学会誌, 41, No. 1 (1987)

マイクロ波中継回線用 三枚反射鏡オフセットアンテナ

山田吉英* 比嘉盛男**
古野孝允** 宮林哲也***
増島俊雄** 牧野 滋+

1. ま え が き

4, 5, 6 GHz 帯を用いたマイクロ波中継回線では、ルート
のふくそう（輻輳）化とアナログ方式からデジタル方式へ
の移行のために、従来のホーンリフレクタアンテナ⁽¹⁾より
もルート間干渉及び異偏波干渉が小さくできるような広角放
射特性及び交差偏波特性の優れたアンテナが必要となった。
このアンテナは、ホーンリフレクタアンテナとの互換性を保
つため、垂直下方から給電する必要がある。また、デジタル
マイクロ波無線中継方式では、ほとんどの区間にスペース
ダイバーシチを適用するため、新たに副アンテナを既設の鉄
塔の中段に設置する必要がある、小型・軽量化も必要不可欠
である。

そこで以上の要求にこたえるため、三枚反射鏡で構成され
るオフセットアンテナの検討を行った^{(2)~(4)}。この構成
では、三枚の反射鏡を用いているため、設計に自由度があり、
設計パラメータの最適化によって、サイドローブ及び交差偏
波放射レベルの低減、高能率化・小
型化が可能となる。今回、開発した
アンテナは、回転二次曲面鏡から構
成される開口径3mのオフセットア
ンテナと主反射鏡及び副反射鏡を鏡
面修正した開口径3.6mのオフセッ
トアンテナの2機種である。

これらのアンテナは、いずれも幾
何光学的な鏡面系構成を基本として、
波動的な補正をかけて良好な広角放
射特性と交差偏波特性を実現したも
のである。

2機種のアンテナのマイクロ波中
継回線への適用は、基本的には次の
とおりとなっている。

- (1) 中継距離50kmの標準区間及
び端局には、利得の高い開口径3.6
m オフセットアンテナを使用する。
- (2) 中継距離50km以下の短距離
区間には、開口径3m オフセットア
ンテナを使用する。

ルートの輻輳化によって、短距離
区間でも良好な広角放射特性が要求

されるため、開口径3m オフセットアンテナは、開口径3.6
m オフセットアンテナとほぼ同等な広角放射特性を目標と
した。これらのアンテナは、高性能な電気性能及び機械性能
を持っているため、4, 5, 6 GHz 帯で使用するすべてのマイ
クロ波中継回線に広く使用されている。

本稿では、上述したオフセットアンテナの電気的、機械的
設計及び試作結果の概要について述べる。

2. 基本的考察

4, 5, 6 GHz 帯で使用される大容量デジタルマイクロ波
中継方式では1システム当たり300Mビットの伝送容量を持
ち、4, 5, 6 GHz 帯総合では従来のアナログ方式に比較して
約2倍の情報量の伝送が可能となった。このため、今回開発
するアンテナには次の要求を実現する必要があった。

- (1) 従来のホーンリフレクタアンテナに比較し、サイドロー
ブ、交差偏波ピークレベルで10dB以上の改善を図ること。
- (2) すべての区間にスペースダイバーシチを適用するため、

表1. アンテナの主要性能

項 目		アンテナ	開口径 3.6 m アンテナ	開口径 3 m アンテナ
構造 諸 元	開 口 径 (m)		3.6	3.0
	開口面積 (m ²)		10.2	7.07
	外形寸法 (m)		幅3.7×高さ5.6×奥行3.1	幅3.2×高さ4.9×奥行2.6
	質 量 (kg)		1,560	940
電 気 性 能	周波数帯域 (GHz)		4 (3.6~4.2), 5 (4.4~5.0), 6 (5.925~6.425)	
	利 得 (dB)	3.9GHz	40.7	39.0
		6.175GHz	44.8	43.1
	入力 VSWR	4.5GHz 帯	1.03以下	
		6GHz 帯	1.025以下	
	20° 方向 放射レベル (dB)	3.9GHz	-62	-60
		6.175GHz	-65	-63
	30° 方向 放射レベル (dB)	3.9GHz	-68	-65
		6.175GHz	-75	-72
	交差偏波識別度 (dB)	3.9GHz	45以上	43以上
		6.175GHz	45以上	43以上
機 械 性 能	方向調整角度 (°)		垂直: ±3 以内 水平: ±45 以内	
	耐 風 性 (kPa)		4.7 (風速87m/s 相当)	
	受風荷重 (at 4.7kPa) (N)		79,600	60,700
	耐 震 性 (m/s ²)		49 (5G に相当)	

副アンテナを既設の鉄塔中段に設置可能なように、小型・軽量化を図ること。

(3) 高精度な鏡面精度と組立精度を維持するため、工場で組立後分解なしに輸送できること。

以上の要求を満足する開口径3.6m、3m オフセットアンテナの主要性能を表1に、外観を図1に示す。

3. 電気設計

3.1 幾何光学的な交差偏波消去⁽²⁾

マイクロ波中継回線では、周波数有効利用の観点から直交二偏波が使用されるため、図2に示すように反射鏡の非対称性によって生じる交差偏波成分が問題となる。

この解決法として、交差偏波成分の発生が少ないコルゲート円すい(錐)ホーンや複モードホーンを一次放射器とする三枚反射鏡オフセットアンテナにおいて、それぞれの反射鏡で発生する交差偏波成分を互に打ち消し合う方法がある。一般に、一次放射器と回転放物面鏡である主反射鏡との間に任

意の個数の二次曲面鏡が介在した場合、等価パラボラ表示⁽⁵⁾が可能である。したがって、図3に示す三枚反射鏡オフセットアンテナは図4のような等価パラボラで表される。

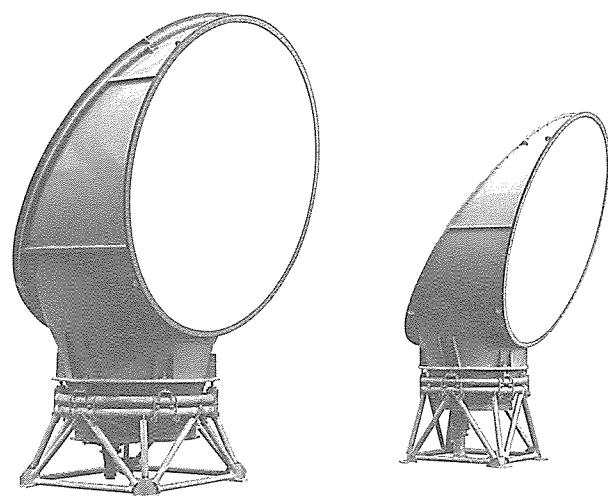
この等価パラボラにおいて、一次放射器の中心軸がパラボラの鏡軸に一致すれば、すなわち $\epsilon = 180^\circ$ となれば回転対称なパラボラとなり、交差偏波消去系となる。

幾何光学的に交差偏波消去可能な鏡面系は、図5に示すとおり、焦点位置の違い等から18種類に分類できる。

3.2 波動性を考慮したアンテナの設計

幾何光学的な交差偏波消去条件によって設計された三枚反射鏡オフセットアンテナは、4, 5, 6GHz帯では完全には交差偏波消去系とはならない。このため、特定の周波数での交差偏波成分を波動的に評価する必要がある。

ビームモード展開法⁽⁶⁾によると、放射パターンの主偏波の最大値を基準とした交差偏波成分の最大値 C (電界)は次式で与えられる。



(a) 開口径 3.6m

(b) 開口径 3m

図1. アンテナの外観

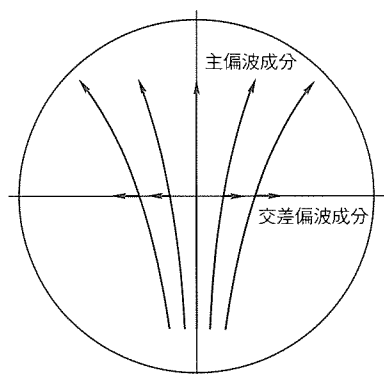


図2. オフセットアンテナの開口分布

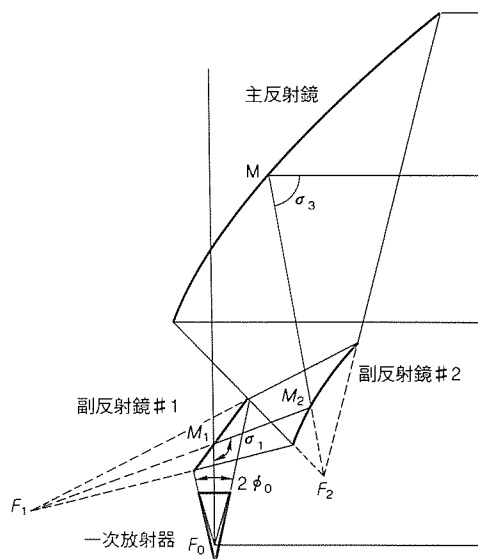


図3. 三枚反射鏡アンテナ

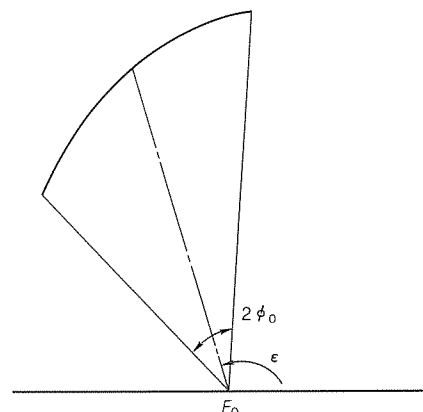


図4. 三枚反射鏡アンテナの等価パラボラ

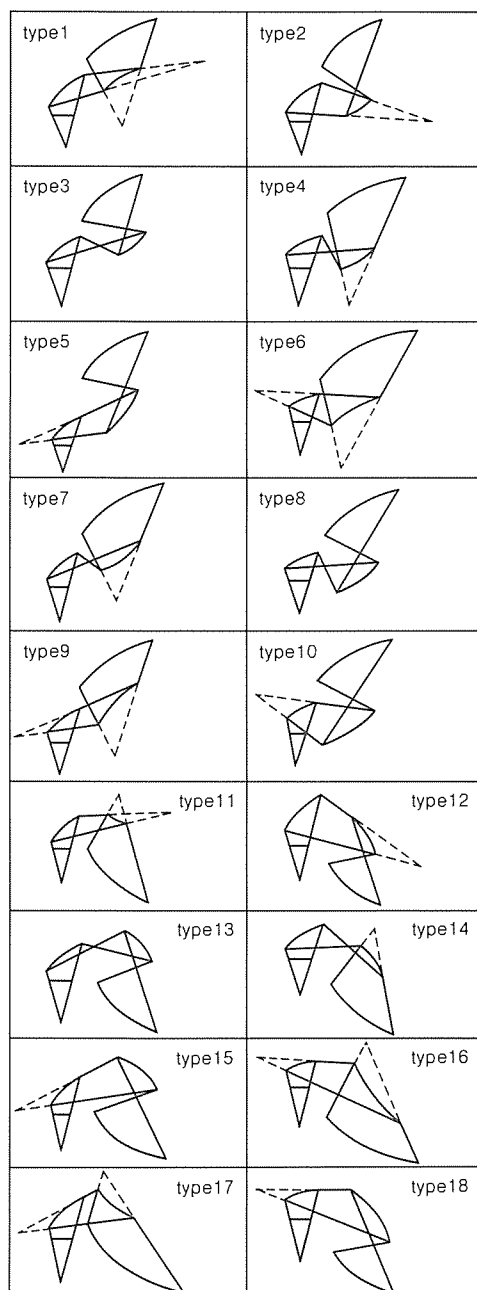


図5. 交差偏波消去条件を満足する三枚反射鏡アンテナ

$$C = \frac{1}{\sqrt{2}e} \left| \delta_1 e^{j\theta_1} \frac{\omega_1}{f_1} \tan \frac{\sigma_1}{2} + \delta_2 \frac{\omega_2}{f_2} \tan \frac{\sigma_2}{2} + \delta_3 e^{-j\theta_2} \frac{\omega_3}{f_3} \tan \frac{\sigma_3}{2} \right| \dots\dots (1)$$

ここで、図3の系に示すように f_1, f_2, f_3 は、副反射鏡#1、副反射鏡#2及び主反射鏡の焦点距離であり、 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ は、副反射鏡#1、副反射鏡#2及び主反射鏡上のビーム半径を示す。また、 $\sigma_i (i=1, 2, 3)$ は入射波及び反射波のなす角度であり、 δ_i は、主反射鏡が下向きするとき、 $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 1$ 、主反射鏡が上向きするとき $\delta_1 = 1, \delta_2 = \delta_3 = -1$ となる。

さらに、

$$\left. \begin{aligned} e^{j\theta_1} &= \frac{1}{u_1} (\epsilon_1 \sqrt{u_1^2 - 1} + j) \\ e^{-j\theta_2} &= \frac{1}{u_2} (\epsilon_2 \sqrt{u_2^2 - 1} - j) \\ u_1 &= \frac{\pi \omega_1 \omega_2}{\lambda d_1} \\ u_2 &= \frac{\pi \omega_2 \omega_3}{\lambda d_2} \\ \epsilon_1 &= \sin \left(\frac{1}{R'_1} + \frac{1}{d_1} \right) \\ \epsilon_2 &= \sin \left(\frac{1}{R'_2} + \frac{1}{d_2} \right) \\ \frac{1}{f_i} &= \frac{1}{R_i} - \frac{1}{R'_i} \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

であり、 λ は自由空間波長、 R_i, R'_i は各反射鏡の入射側及び反射側焦点と、中心光線と反射鏡との交点間の距離で光線の進行方向に焦点がある場合(－)の値をとる。また、 d_1 は中心光線に沿って測った副反射鏡間の距離、 d_2 は中心光線に沿って測った副反射鏡#2と主反射鏡との距離である。

表2. 目標性能

項目		アンテナ	開口径3.6m アンテナ	開口径3m アンテナ
電 気 的 性 能	利得 (dB)	3.6~4.2GHz	39+20log(f/3.9) dB 以上	40.3+20log(f/3.9) dB 以上
		4.4~5.0GHz	41+20log(f/4.7) dB 以上	42.0+20log(f/4.7) dB 以上
		5.925~6.425GHz	43+20log(f/6.175) dB 以上	44.3+20log(f/6.175) dB 以上
	放射パターン		5° ≤ θ ≤ 45.4° 45.4° ≤ θ	20.5~33.5log θ dBi 以下 -35dBi 以下
能	交差偏波ピーク値 (dB)		-30以下	-35以下
	V S W R		1.03以下	
構 造 的 制 限	開口径 (m)		3	3.6
	全 高 (m)		5 以下	6 以下
	奥 行 (m)		2.2以下	2.43以下
	質 量 (t)		1 以下	1.6 以下

表 3 . 各形式の特性

type	高 さ (m)	交差偏波ピーク値(dB)
1	6.1	-25
2	6.0	-31
3	5.6	-20
4	5.4	-26
5	6.0	-25
6	5.7	-23
7	6.0	-23
8	5.5	-19
9	6.1	-25
10	5.8	-32

式(1)、式(2)を用いて、アンテナの交差偏波特性を評価するが、目標値を満足していなければ、上記パラメータを用いて補正を加える。

交差偏波特性のほかに考慮しなければならない項目はエッジレベルとスピルオーバー損失であり、これは文献(7)の結果によって評価できる。

3.3 設計目標と鏡面系の選定

設計目標を表 2 に示す。図 5 の 18 種類の鏡面系の中から、表 2 の目標値を満足する鏡面系を選定するわけであるが、主反射鏡が上向きの形式は着雪による特性劣化のおそれがあるため除外する。残る 10 種類の基本形式に対し、間口径を 3.6 m として幾何光学的な交差偏波消去系となる鏡面系を求め、式(1)を用いて評価した結果を表 3 に示す。表の結果から、構造的制限である高さ 6 m 以下を満足する形式のうち、交差偏波ピークレベルの最も低い type 10 をこのアンテナの鏡面系として選定した。この鏡面系に対して、波動的な補正を行い、広角放射特性と交差偏波特性の最適化を図った。

最適設計を行った鏡面系を図 6 に示す。なお、間口径 3.6 m オフセットアンテナは、3.4 節で述べる鏡面修整後の鏡面系である。

3.4 鏡面修整による非軸対称開口分布の実現⁽⁴⁾

間口径 3 m のアンテナについては、鏡面系を非修整としたが、間口径 3.6 m については、広角放射特性と交差偏波特性の一層の向上を目的として、主反射鏡と副反射鏡 # 2 の鏡面修整を行うこととした。

鏡面修整は、3.3 節で求めた鏡面系において、副反射鏡 # 2 の一方の焦点に位相中心のある仮想的な一次放射器とで二枚反射鏡オフセットアンテナを考えて、

- (1) 光路長一定の法則
 - (2) 開口分布の非軸対称性
 - (3) エネルギーの保存則
- から導かれる条件のもとで、

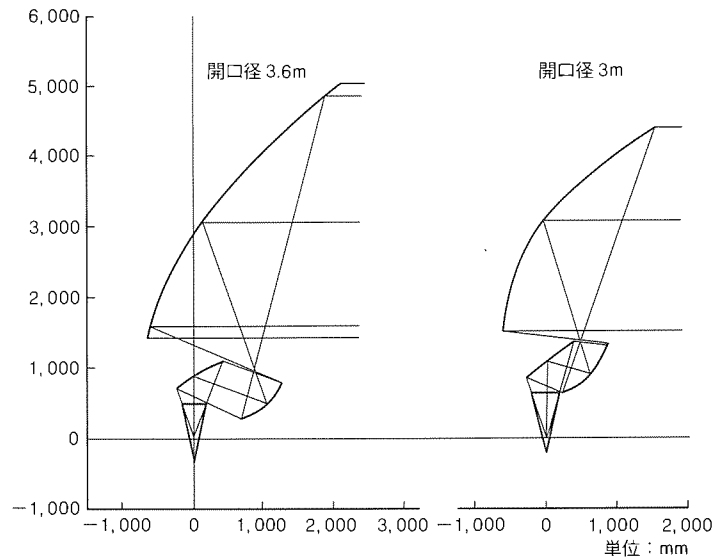
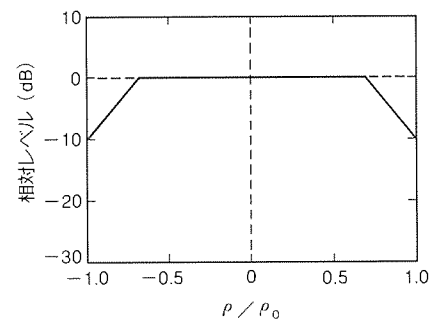
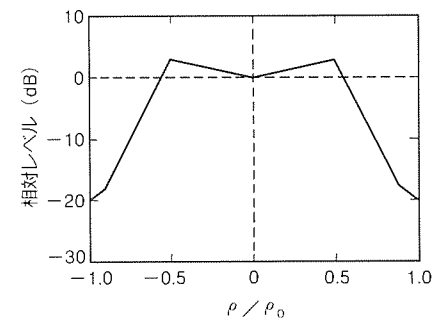


図 6 . アンテナの鏡面形状



(a) 垂直面内



(b) 水平面内

図 7 . 目標とした開口分布

(4) 副反射鏡での反射の法則

から導かれる偏微分方程式を数値積分することによって求める。鏡面修整の効果は、鏡面を修整して開口面分布を所望の分布形状に合成することによって放射特性を改善できる点にある。特に、マイクロ波中継用アンテナの場合、干渉対策上重要なのは水平面の広角放射特性であり、全立体角にわたって同じような低サイドローブ特性を要求されるわけではない。そこで低サイドローブ化の要求が激しい面内のみを低サイドローブ形状にし、それ以外の面を高効率形状にした開口分布を実現すれば、開口能率を維持したまま低サイドローブ化す

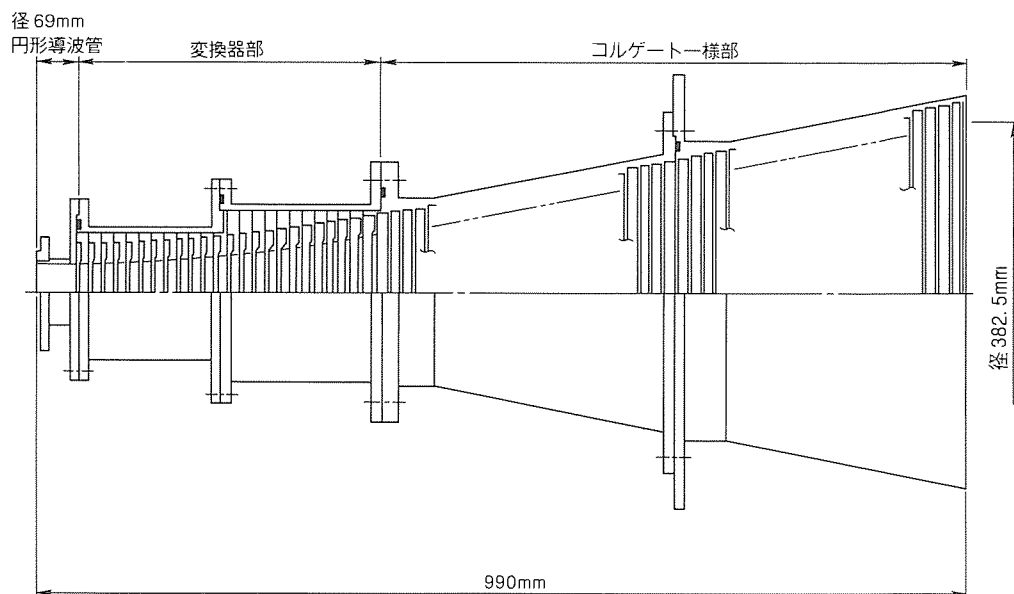


図8．コルゲート円錐ホーン

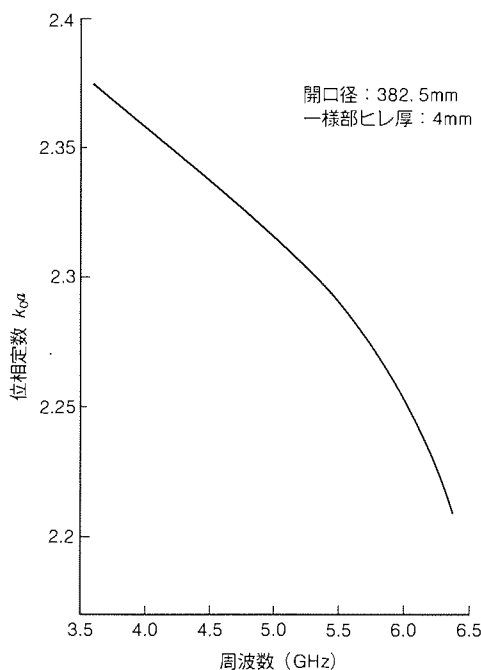


図9．コルゲート円錐ホーンの開口における k_0a の周波数特性

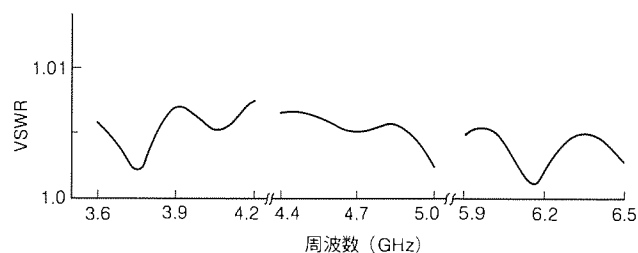


図10．コルゲート変換器部 VSWR (計算値)

(6) 上記性能を満足する周波数範囲が広い。

上記性能を満足する一次放射器として、リング装荷形コルゲート円錐ホーンを採用した⁽⁸⁾。設計した一次放射器の外観を図8に示す。コルゲート様部の段数は、35段、ヒレの厚さは4mmである。また、変換器部は、段数が25段のリング装荷形変換器で構成されており、高次モード波によってとじ込め共振が発生しないように、各部の寸法を決定している。図9に開口における k_0a (k_0 ：位相定数、 a ：金属ヒレの内半径) 特性、図10に VSWR 特性 (計算値) を示す。

3.6 鏡面ひずみの高次周期成分の低減

このアンテナの開発課程で鏡面ひずみの周期成分による広角放射特性の劣化が問題となった。反射鏡は従来からプレス成形で製作していたが、鏡面精度の要求値が0.3mm rmsと高精度であったため、最終的には手加工で精度出しを行った。このため、鏡面精度は0.3mm rmsを実現したが、300mm程度のピッチでタタキ成形によるひずみが発生した。この高次周期成分によるひずみによって広角放射特性が劣化することが解析及び実験結果によって明らかとなった⁽⁹⁾。

対策としては、4章の機構設計にも述べているように、プレス成形用金型を高精度に製作することによってプレス成形のみで鏡面精度0.3mm rmsを実現することができた。図

ることができる。目標とした開口分布を図7に示す。

3.5 一次放射器の選定と設計

このアンテナは、4、5、6GHz帯にわたって良好な広角放射特性と交差偏波特性が要求されるため、一次放射器には次の性能が必要とされる。

- (1) 主ビームが回転対称である。
- (2) 主ビーム幅の周波数変動が少ない。
- (3) 主ビーム内の電力が大である。
- (4) サイドローブが低くかつ VSWR が小さい。
- (5) 位相中心の周波数変動が少ない。

11にプレス成形品とタタキ成形品を用いたときの広角放射特性を示す。図から明らかなように、プレス成形品を用いたアンテナはタタキ成形品に比較し、水平面内 20° から 30° にかけて最大5dB程度改善されていることが分かる。

4. 機 構 設 計

4.1 機 械 性 能

アンテナは山間地や市街地ビル屋上の鉄塔など高所につ(吊)り上げた後、対向アンテナの方位と仰角に合わせて1

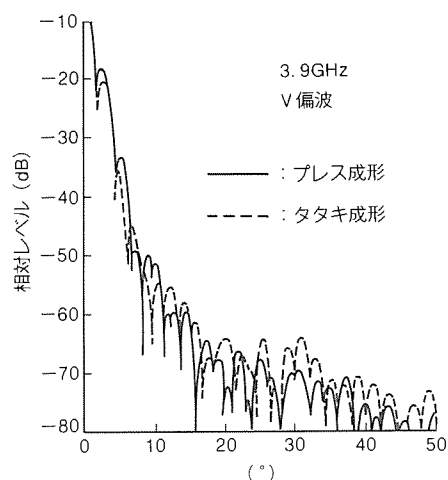


図11. 広角放射パターンの改善

／ 100° の精度で方向調整し、風圧力や地震力に対して長年にわたり通信回線を維持しなければならない。機械的には強度特性だけでなく、3枚の反射鏡と一次放射器の相対関係を精度よく保ち、給電導波管系の腐食を防ぐためにアンテナ全体を気密にするなど種々の条件を満足する必要がある。これらアンテナの組立てを、山間地やビル屋上など悪条件の下で行うことは、品質的にも工期的にも困難な状況にある。

このためオフセットアンテナは工場で全組立てを行い、分解することなくそのまま大型専用車両で輸送し、即座に鉄塔への吊り上げを実施できるようにした。寸法は小型化して既設の鉄塔の中段への設置を可能とし、質量も開口径3mで1,000kg以下、開口径3.6mで1,600kg以下を目標にした。また、方位角調整の範囲を従来の $\pm 3^{\circ}$ から $\pm 45^{\circ}$ に拡大して鉄塔上での設置自由度を高め、耐荷重に対しては速度圧4.7kPa(風速87m/s相当)の風圧力と水平加速度 49 m/s^2 (5G相当)の地震力に耐えることを目標にした。設計したアンテナの外形を図12に示す。

4.2 形 状 設 計

オフセットアンテナの形状は、電波の通過形状に波動的な配慮を加えたものが内法寸法の限界となり、設置・輸送上の制限が外法寸法の限界となる。鏡面系は二次曲面を基本形状としているので、オフセットアンテナのきょう(筐)体も二次曲面、とりわけ板金加工に適した可展開面である円筒や円錐面の集合で構成する。曲面の幾何剛性により補強部材はほ

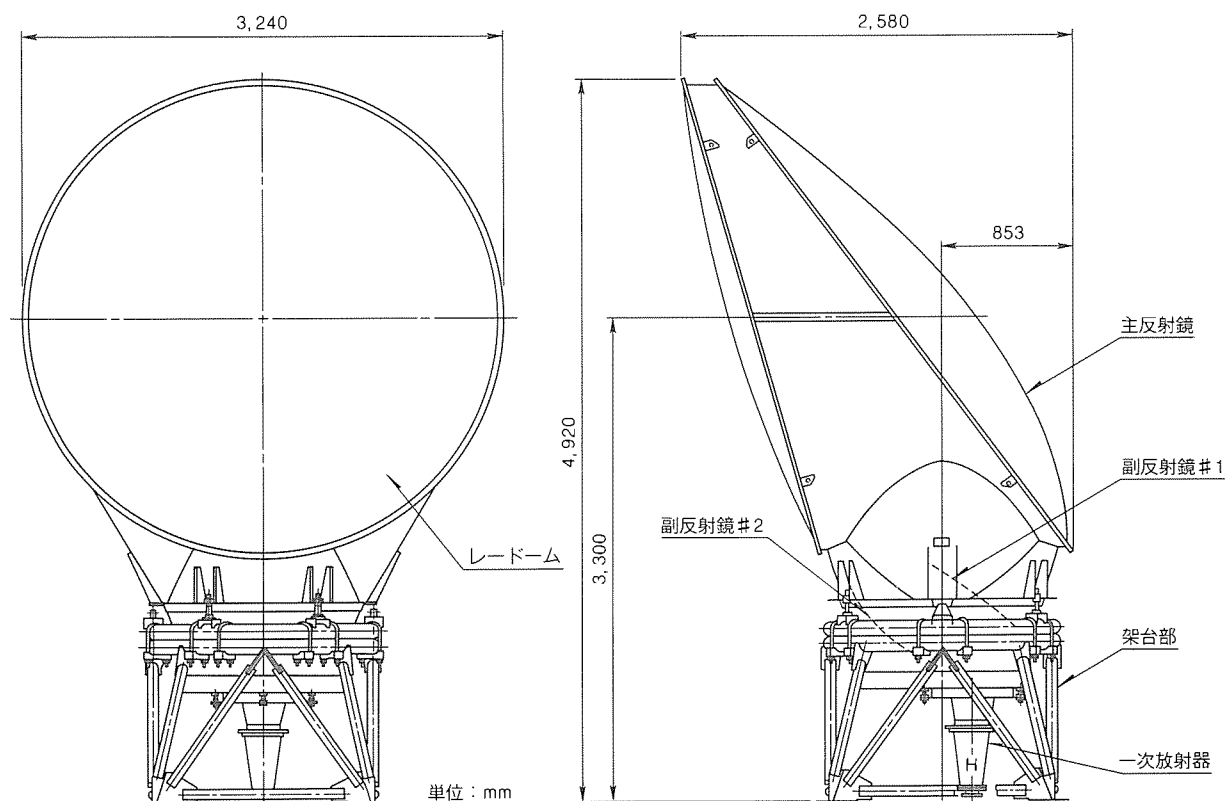


図12. アンテナの外形(開口径3m)

とんど必要としないが、相貫部分で曲率とその方向が急変することがないように設計する。

二次曲面鏡の形状設計は数式化できるため比較的容易であるが、離散的な数値で表現される修整鏡面では専用の座標処理プログラムを開発し、所望の点の座標を μm の精度で補間できるようにした。

4.3 強度設計

オフセットアンテナに作用する荷重は風圧力と地震力が代表的なものであるが、軽量化と低重心設計によって通常地震力は風圧力に比べ小さく、風圧力に対する検討を主に行う。オフセットアンテナの主構造である筐体は、電波をさえることのないよう、内部に補強部材を持たない薄肉シェルであり、また流線形であるため風圧力に対する検討では局部負圧を考慮する必要がある。強度設計に当たっては縮小モデルを用いた風洞試験を実施し、各風向に応じたアンテナ各部の圧力分布を求め、有限要素解析によって各部の強度を確認する。このほか、偏平シェルの弾性安定（風圧による座屈）が問題となる主反射鏡は座屈圧力を実験により確かめ、板厚の数十倍の変形をするレードームは大変形解析と実験によって強度を確認する。

4.4 生産設計

アンテナの放射特性の向上には $0.1\sim 0.3\text{ mm rms}$ の高精度鏡面が必要不可欠である。オフセットアンテナには従来手加工で成形していた鏡面にかえ、高精度金型を使用した FRP（ガラス繊維強化プラスチック）成形とプレス成形によ

る鏡面を採用した。この加工法では表 4 に示すとおり鏡面精度の向上はもちろん、広角放射特性に影響を及ぼす短い周期の不整も少なくなり、またプロセス管理によって安定した品質が得られるようになった。

二次曲面で構成されるオフセットアンテナの筐体各部品の展開形状は曲線の連続である。これら部品を素材から効率良く板取りし、板継溶接が最小となるよう素材設計を行う。溶接組立てでは治具による拘束溶接を行い、ひずみ取りを最小限にしている。

5. 試作実験

5.1 アンテナの構造

開口径 3 m オフセットアンテナの反射鏡は、FRP 成形品、開口径 3.6 m オフセットアンテナのそれはアルミ合金のプレス成形品であり、これらの成形法の採用によって、良好な鏡面精度が実現できている。その他のアンテナ構成品であるコルゲート円錐ホーンと筐体はアルミ合金、架台は鋼材で溶融亜鉛めっきで処理されている。また、レードームは、ガラス繊維強化テフロンを使用しており、筐体の内面には広角放射特性改善のために電波吸収体が張り付けされている。

5.2 利得・VSWR

利得及び VSWR の測定結果を表 5 に示す。VSWR は、ほとんどコルゲート円錐ホーンの性能によって決まり、全帯域にわたって 1.03 以下の性能が得られている。

5.3 近軸放射特性

表 4. 主反射鏡の鏡面精度

単位: mm rms

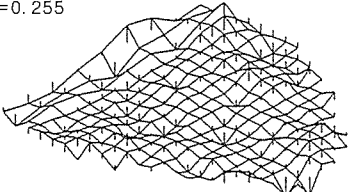
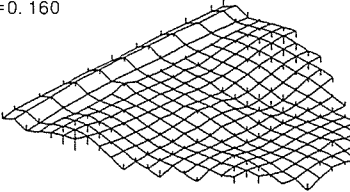
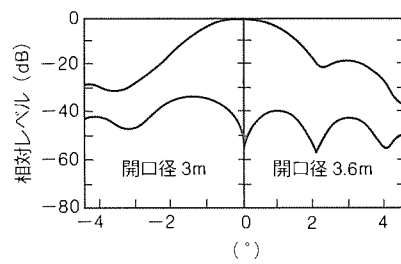
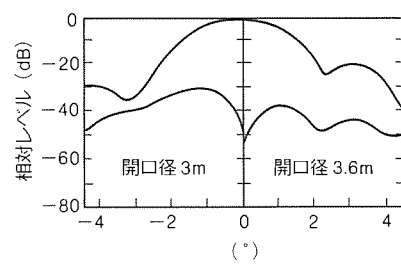
鏡面誤差	アルミニウム合金 手加工成形品	FRP 高精度金型成形品
	Precision Display : Mirror No. = T1 $\text{rms(in)} = 0.168$ $\text{rms(out)} = 0.255$ 	Precision Display : Mirror No. = 26 $\text{rms(in)} = 0.103$ $\text{rms(out)} = 0.160$ 

表 5. 利得・VSWR

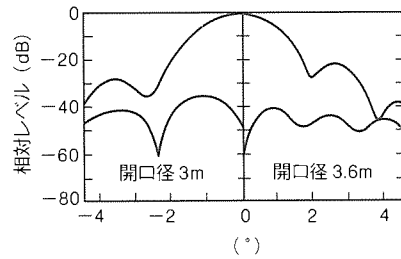
アンテナ		開口径 3.0m			開口径 3.6m		
		V 偏波	H 偏波	目標値	V 偏波	H 偏波	目標値
利得 (dB)	3.9GHz	39.0 (52.8%)	39.1 (54.1%)	39.0 (52.8%)	40.7 (54.4%)	40.7 (54.4%)	40.3 (49.3%)
	4.7GHz	41.0 (57.7%)	41.0 (57.7%)	41.0 (57.7%)	42.5 (56.6%)	42.7 (59.3%)	42.0 (50.4%)
	6.175GHz	43.2 (55.4%)	43.1 (54.2%)	43.0 (52.9%)	45.0 (58%)	44.8 (55.7%)	44.3 (49.6%)
V S W R		1.03以下					



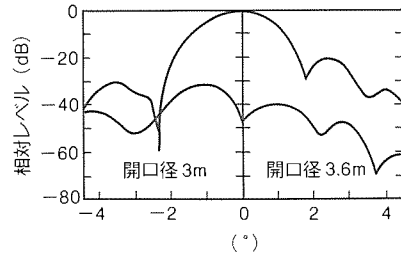
(a) 3.9GHz V偏波



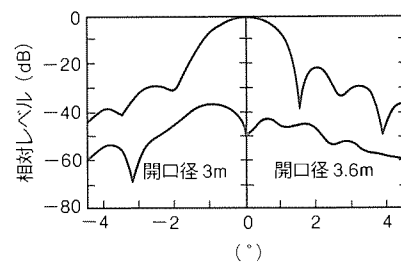
(b) 3.9GHz H偏波



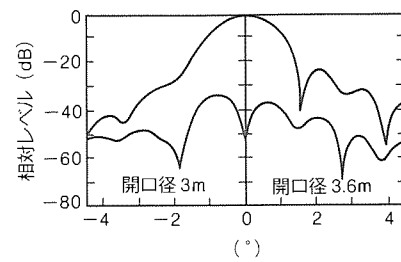
(c) 4.7GHz V偏波



(d) 4.7GHz H偏波

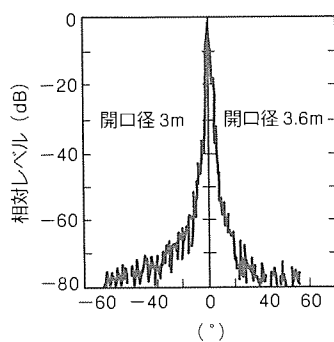


(e) 6.175GHz V偏波

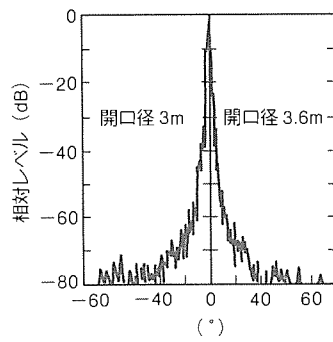


(f) 6.175GHz H偏波

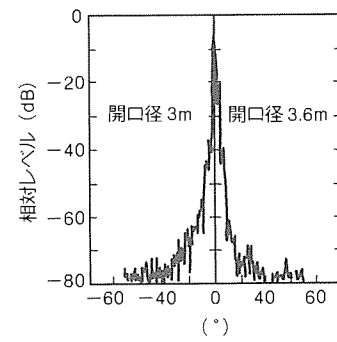
図13. 水平面内近軸放射パターン



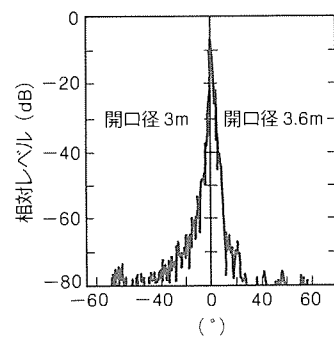
(a) 3.9GHz V偏波



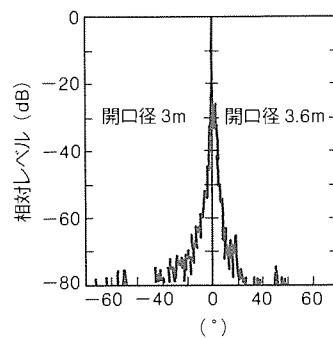
(b) 3.9GHz H偏波



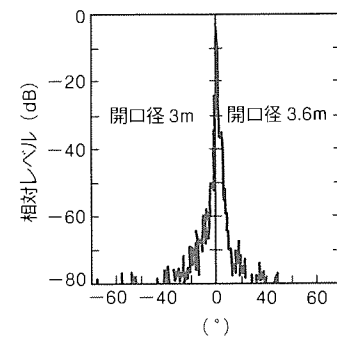
(c) 4.7GHz V偏波



(d) 4.7GHz H偏波



(e) 6.175GHz V偏波



(f) 6.175GHz H偏波

図14. 水平面内広角放射パターン

開口径3m及び3.6m オフセットアンテナの近軸放射パターンの測定結果を図13に示す。交差偏波の水平面内交差偏波ピークレベルは、開口径3m オフセットアンテナが目標値-30dB以下に対して3.9GHzで約-30dB、4.7GHzで約-32dB、6.175GHzで約-32dBである。また、開口径3.6m オフセットアンテナは目標値-35dB以下に対して3.9GHzで約-36dB、4.7GHzで約-38dB、6.175GHzで約-38dBであり、目標性能を満足している。

5.4 広角放射特性

開口径3m、3.6m オフセットアンテナの広角放射パターンを図14に示す。このアンテナには、その内部の散乱波に起因する広角放射特性の劣化を抑えるため、電波吸収体を筐体の内壁の有効な部分に取り付けた。鏡面精度についてもFRP成形やプレス成形を採用しているため、限界に近いといえる。したがって、要求利得から、これ以上反射鏡エッジレベルを下げられないことを考えると、広角放射特性はほぼ限界に近いと言えることができる。

6. む す び

三枚反射鏡を用いたオフセットアンテナ形式によって、4、5、6GHz帯共用可能で小型・軽量かつ広角放射特性及び交差偏波特性の優れたアンテナを実現した。ビームモード展開の応用によって、開口分布の変動や交差偏波ピークレベルなど計算に時間を要する特性も容易に得られ、繰り返しの多い多重反射鏡の最適化設計が容易となった。鏡面修整による非軸対称開口分布の実現とリング装荷形コルゲート円錐ホーンの採用、及びプレス成形やFRP成形による高精度な鏡面精度の実現によって、限界に近い広角放射特性が得られた。

参 考 文 献

(1) 大橋啓吾, 加藤修助, 沼野雄司, 森川 洋, 東野義夫,

喜連川 隆: ホーン・リフレクタ・アンテナ, 三菱電機, 36, No. 5, 601~607 (1962)

(2) 浦崎修治, 牧野 滋, 片木孝至: 交差偏波消去条件を満足する三枚反射鏡アンテナ, 信学論(B), J 67-B, No. 10, 1119~1125 (1984)

(3) 中嶋信生, 島貫義太郎, 阿部紘士, 古野孝允: 広角指向性と交差偏波特性の優れた4, 5, 6GHz帯共用オフセットアンテナ, 信学論(B), J 67-B, No. 2, 194~201 (1984)

(4) 苅込正敏, 山田吉英: 非軸対称開口分布の形成による放射特性の改善, 信学論(B), J-72-B-2, No. 10, 549~556 (1989)

(5) 水沢丕雄, 片木孝至: 多重反射鏡アンテナの等価パラボラ表示とその応用, 三菱電機技報, 49, No. 11, 729~732 (1975)

(6) 片木孝至, 浦崎修治, 蛭子井 貴, 別段信一: ビームモード展開による解析および設計法, 信学論(B), J 66-B, No. 3, 305~312 (1983)

(7) 別段信一, 片木孝至, 浦崎修治: 4枚反射鏡形集束ビーム給電系の設計法, 信学論(B), J 67-B, No. 6, 622~629 (1984)

(8) Takeda, F., Hashimoto, T.: Broadbanding of Corrugated Conical Horns by Means of the Ring-Loaded Corrugated Waveguide Structure, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, AP-24, No. 6, (1976)

(9) 苅込正敏, 山田吉英, 鹿子嶋憲一: 鏡面ひずみの高次周期成分を低減することにより広角指向性を改良した鏡面修整オフセット3枚鏡アンテナ, 信学論(B-II), J 73-B-II, No. 12, 852~859 (1990)

フェーズドアレーアンテナ技術

佐藤眞一* 宮崎守泰***
春山鉄男**
菱沼 進**

1. ま え が き

高速なビーム走査、指向性合成が容易なフェーズドアレーアンテナは、主にレーダ用アンテナとして開発され、実用化されてきた。しかし、近年、その多機能性、多様性のためにフェーズドアレーアンテナを衛星・航空機搭載用、陸上移動体用などの通信に使うための研究開発が盛んである⁽¹⁾。

フェーズドアレーアンテナは、各素子アンテナの励振振幅、位相を変えることにより、種々の放射特性を持ったアンテナを実現できる。また、目的、用途によって各素子アンテナを平面状、多面状又は曲面状に配列することができる。この場合、レーダや通信回線用などでは、SN比（信号対雑音比）又はDU比（希望電波対不要電波比）を向上させるために、移相器の位相を制御して低サイドローブ化を行うことが必要である。また、各素子アンテナ間の相互結合を考慮して所望の励振振幅、位相を設定することが重要である。

ここでは、まずフェーズドアレーアンテナの低サイドローブ化のための指向性合成法、素子アンテナとしてパッチアンテナを用いた場合の相互結合解析法、素子アンテナ間の相互結合を利用した位相補正法などについて述べる。次に、低損失、分配偏差が小さい扇形分配回路、結合器間隔のランダム化による広帯域な直列給電分配回路について述べ、さらに移相器の位相データを高速に転送する位相データ転送方式、また曲面状フェーズドアレーアンテナの素子アンテナに制御信号及び電源を供給する曲面多層配線板について述べる。

2. 低サイドローブ化の指向性合成法

2.1 確定的素子間引き法

ここでは、まず平面アレーの与えられた配列格子点と所望の放射パターンを得るための振幅分布に対して、励振素子の位置決定にあいまいさがなく確定的に素子の間引きを行う方法（累積重み間引き法）を述べる。

各位置 P_i での重み f_i を次式で定義する。

$$f_i = C \cdot f(P_i) \cdot \Delta S_i \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $f(P_i)$ は点 P_i での振幅分布関数値、 ΔS_i はアレー開口上の点 P_i の占有面積、 C は定数で f_i の最大値が1となるように定める。全素子位置の順序が与えられれば間引き関数 $T(P_i)$ は重み f_i の累積値を整数化して次式で与えられる。

$$T(P_i) = \left[\sum_{j=1}^i f_j + 0.5 \right] - \left[\sum_{j=1}^{i-1} f_j + 0.5 \right] \\ = 0 \text{ or } 1 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $[]$ はガウスの記号である。1又は0の値は図1に示すように、点 P_i の素子の励振又は非励振を表す。重みの累積値と励振素子数の累積値との差は常に0.5以下である。次に、直交する二つの面をZX、YZ面とし（Z軸：ブロードサイド方向）、それらの面内の放射パターンを累積重み間引き法を用いて最適化する場合を考える。まず、ZX、YZ面のパターンに対応する間引き関数 T_x 、 T_y を求める。次に、 T_x 、 T_y からX、Y軸上の理想分布 P_{xj} 、 P_{yk} を求める。 P_{xj} 、 P_{yk} はそれぞれX軸上の j 番目、Y軸上の k 番目の励振素子の数を表している。さらに、 T_x から得られるY軸上の分布

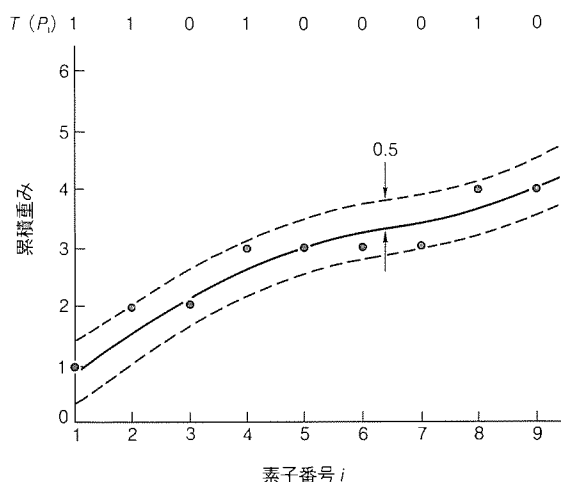


図1. 間引き関数 $T(P_i)$ と累積重み

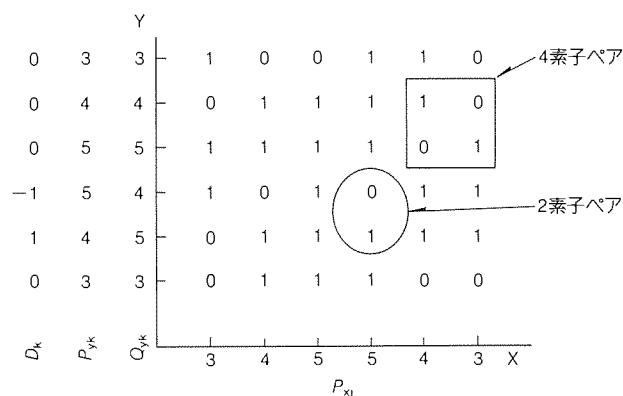


図2. 間引き関数の交換

Q_{yk} を求めると、 Q_{yk} と P_{yk} との差、すなわち、

$$D_k = Q_{yk} - P_{yk} \dots\dots\dots(3)$$

は Y 軸上の k 番目の領域の T_x と T_y の差を示す。 k に関する D_k の和は 0 で、 D_k がすべて 0 のときには T_x によって ZX, YZ 面の二つの面で所望のパターンが得られる。

D_{k1} が正のときには負の D_{k2} が存在し、図 2 に示すように同じ X 座標をもち間引き関数値がそれぞれ 1, 0 となる 2 素子ペアを見つけて k_1 行、 k_2 行で関数値の交換を行う。このとき、 D_{k1} 、 D_{k2} はそれぞれ 1 だけ減少及び増加する。この操作を繰り返すことによって間引き関数を理想値に近づけることができる。もし、そのようなペアが見付からない場合には、二組のペア (4 素子ペア) でそれぞれの関数値を交換する。

この 2 面整合法を直径 50 波長の円形アレーに適用して放射パターンを計算した結果を図 3 に示す。素子アンテナは点波源で、各素子は 0.5 波長間隔の四角形配列である。Skolnik ら⁽²⁾の統計的手法に比べてサイドローブレベルはかなり低いことが分かる。

素子の間引きを行う密度テーパアレーでは低サイドローブ

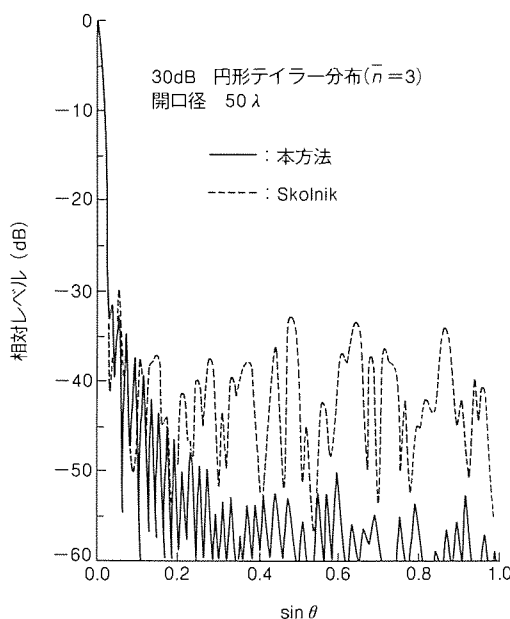


図 3. ZX, YZ 面内放射パターン計算値

表 1. 素子の振幅レベル複数化の効果

振幅レベル	励振素子数の比率 (%)	指向性利得 (dB)	サイドローブレベル (dB)	
			ZX 面	YZ 面
1	44	36.1	-37.5	-32.7
$1 : \frac{1}{2}$	73	37.8	-37.1	-32.9
$1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{4}$	96	38.2	-36.6	-35.0

特性が得られるが、指向性利得は素子数に比例するので、間引き素子数が増加するにつれて振幅テーパアレーに比べて指向性利得が低下する。この改善法として、素子の振幅レベルの複数化が有効と考えられる。この複数化によって設計の自由度が増えるとともに振幅テーパアレーに近づくために残存素子数が増加する。この複数の振幅レベルの素子からなる平面アレーに累積重み間引き法を適用して放射特性を計算した結果を表 1 に示す。円形平面アレーの直径は 20 波長で、素子配列は間隔 0.6 波長の正三角形配列、素子指向性は $\cos^{17} \theta$ である。重み f_i を決定する振幅分布関数は 35 dB ($n=5$) の円形テイラー分布とした。表 1 から、振幅レベルを複数化することによって指向性利得、サイドローブレベルが改善されることが分かる。また、振幅レベルを複数化することにより、消費電力は少なくてすむ。

この手法は四つの面内で最適化する 4 面整合法に発展できる⁽³⁾。

2.2 平面波合成法

平面波合成法とは、放射パターンのサイドローブ方向にピークを持つ放射パターンを適当な位相で重畳することにより、所望の放射パターンを得る方法である。この方法を用いることによって、主ビームの利得低下を最小に抑え、所望の低サイドローブ放射パターンが得られる。図 4 は 200 素子のリニアアレーアンテナで、この方法によって得られた低サイドローブ放射パターンである⁽⁴⁾。なお、この方法は低サイドローブ化ばかりではなく、所望の方向に零点を形成する場合にも応用できる⁽⁵⁾。

2.3 零点整合法

平面アレーアンテナの低サイドローブ化には確定的素子間引き法や平面波合成法が用いられるのに対して、任意形状のコンフォーマルアレーアンテナでは、少ない演算時間で所望の低サイドローブ放射パターンが得られる零点整合法が有

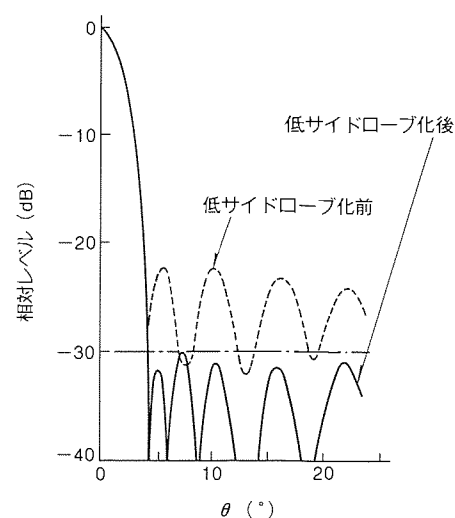


図 4. 平面波合成法による低サイドローブ放射パターン

効である。この方法は、低サイドローブ放射パターンとしてテイラー形の放射パターンを選び、この放射パターンのサイドローブレベルが放射パターンの零点の位置によって決定されることに着目した指向性合成法である。この方法では以下の手順によって低サイドローブ放射パターンを得る。

- (1) 主ビーム軸に直交する平面上に投影したアレーの励振分布が、テイラー分布になるように各素子の初期振幅分布を決める。
- (2) テイラー形の放射パターンの零点の位置を求める。
- (3) 初期振幅分布による放射パターンの零点の位置を、上記(2)で得られたテイラー形の放射パターンの零点の位置に合わせる。

以上の手順によって、図5に示すような球面アレーアンテナの低サイドローブ放射パターンが得られる⁽⁶⁾。

3. 相互結合解析法

3.1 多面アレー間の面間アイソレーション解析法

多面アレーアンテナを設計する場合、各部分のアレーアンテナの相互結合を定量的に把握する必要がある。ここでは、多面アレーアンテナを導体ウエッジを隔てた二つの直線偏波円形マイクロストリップアンテナ(MSA)アレーにモデル化し、部分アレーアンテナのビーム走査角度に対する面間アイソレーションの解析法を示す。

まず、二つの直線偏波円形MSAが同一平面上にある場合、MSAをキャビティモデルによる等価磁流で表し、起電力法を用いることによって相互アドミタンスは、次式のように解析的に閉じた形に表現することができる⁽⁷⁾。

$$Y_{21} = (C_1 \frac{1}{d} + C_2 \frac{1}{d^2}) e^{-jk_d} \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) + C_3 \frac{e^{-jk_d}}{d^2} \sin(\phi_1) \sin(\phi_2) \dots (4)$$

ただし

$$C_1 = \frac{\pi \bar{a}^2 k j}{2 \eta} \left\{ \frac{J_1(k_{11} \bar{a})}{J_1(k_{11} \rho_0)} \right\}^2 [J_0(k \bar{a}) - J_2(k \bar{a})]^2$$

$$C_2 = \frac{\pi \bar{a}^2 (k^2 \bar{a}^2 - 1) j}{2 \eta} \left\{ \frac{J_1(k_{11} \bar{a})}{J_1(k_{11} \rho_0)} \right\}^2 [J_0(k \bar{a})^2 - J_2(k \bar{a})^2]$$

$$C_3 = \frac{\pi \bar{a}^2}{\eta} \left\{ \frac{J_1(k_{11} \bar{a})}{J_1(k_{11} \rho_0)} \right\}^2 [J_0(k \bar{a})^2 + J_2(k \bar{a})^2]$$

$$\bar{a} = a \left\{ 1 + \frac{2h}{a \pi \epsilon_r} \left(\ln \frac{\pi a}{2h} + 1.7726 \right) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$n = 120 \pi, k_{11} = 1.84118 / \bar{a}; J'_1(k_{11} \bar{a}) = 0$$

ここに、 d は二つの直線偏波円形MSAの中心間距離、 k は真空中の波数、 a は円形MSAの半径、 J_0, J_1, J_2 はベッセル関数、 ϵ_r は誘電体の比誘電率であり、その他の量は図6に示してある。

次に、面間アイソレーション S_{ai} とは、一方のアレー内の1素子 i と他方のアレー A との相互結合と定義する。この

場合、導体ウエッジの影響は次のように考える。すなわち、着目している二つの直線偏波円形MSAが同一平面上に配列されるように導体ウエッジ部分で折り返し、一方のMSAから他方のMSAに入射する電界は途中で導体ウエッジがあるとして、GTD(幾何光学的回折理論)によるウエッジ回折波がMSAに入射するとする。相互アドミタンス Y_{21} が与えら

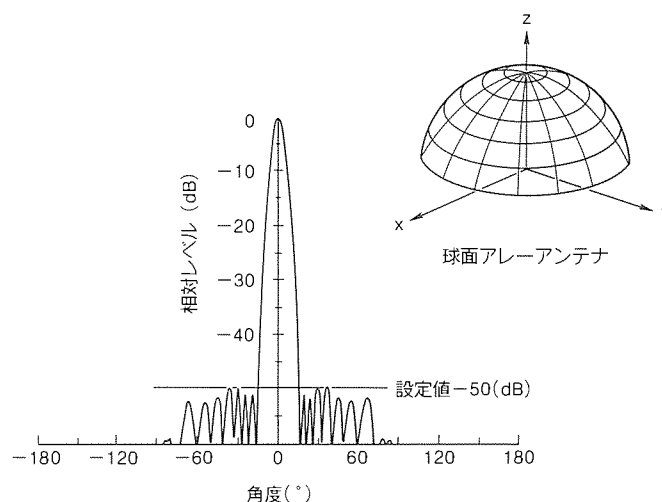


図5. 零点整合法による低サイドローブ放射パターン

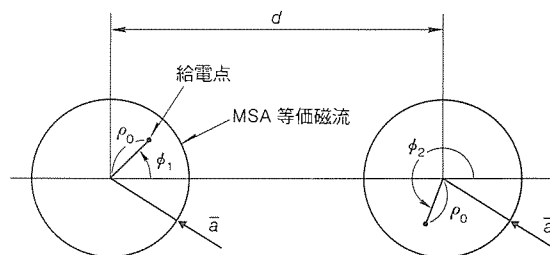


図6. 二つのMSA間相互結合解析モデル

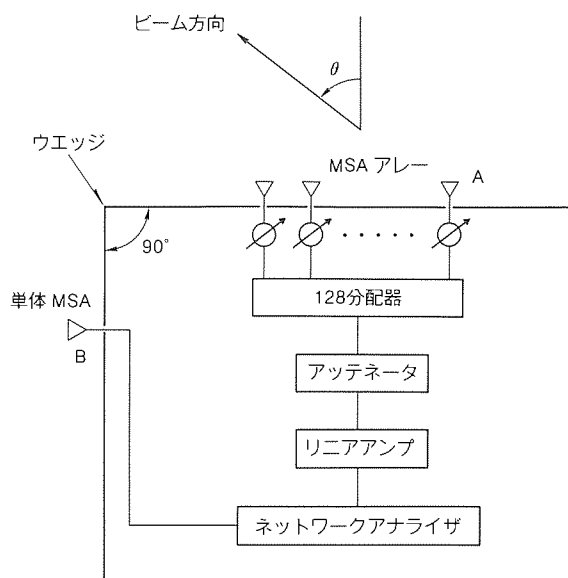


図7. 測定装置

れると相互結合 S_{21} は容易に求まり、アレー A の全素子の励振振幅位相を与えたときの S_{ai} が計算できる⁽⁸⁾。

図 7 に示す測定装置を用いて実験を行った。ただし、アレーアンテナ (A とする) は、平面アレーアンテナを確定的素子間引き法 (励振素子数 128) によって低サイドローブ化 (−25 dB) した直線偏波円形 MSA アレーである。導体ウエッジを隔てて単体の直線偏波円形 MSA (B とする) を配置し、面間アイソレーション S_{ab} をビーム走査角 θ を変化させて測定した。図 8 に計算値と実測値の比較を示す。両者はよく対応しており、この解析法の有効性が確認できる。

3.2 素子間相互結合を利用した位相補正法

素子間相互結合に対しては、従来、低減することや補正することを目的にして検討がなされてきた。しかし、逆にこの素子間相互結合を積極的に利用し、フェーズドアレーアンテナの位相補正に用いることができる⁽⁹⁾。

フェーズドアレーアンテナでは、移相器・給電回路・素子アンテナなどを故障などの理由で交換した場合や、経時変化によってアンテナから受信機 (又は送信機からアンテナ) までの透過位相が変化した場合、アンテナの放射パターン等が劣化する。素子間相互結合を利用したこの透過位相変化の補正法を次に示す。

- (1) 従来と同様に素子電界ベクトル回転法⁽¹⁰⁾により、アレー素子電界を測定する (図 9(a))。この測定値からフェーズドアレーの励振位相が決定される。
- (2) アレーアンテナ内にピックアップアンテナを設け、素子電界ベクトル回転法によって各素子アンテナから結合する電界を測定する (図 9(b))。
- (3) 上記 (1), (2) で測定した電界を、各素子アンテナごとに記憶しておく。
- (4) 透過位相の変化によって放射パターンが劣化し、励振位相データを補正する必要が生じた場合、ピックアップアンテナを用いて素子電界ベクトル回転法によって素子電界を測定する。このときの測定値と (2) で測定して記憶しておいた

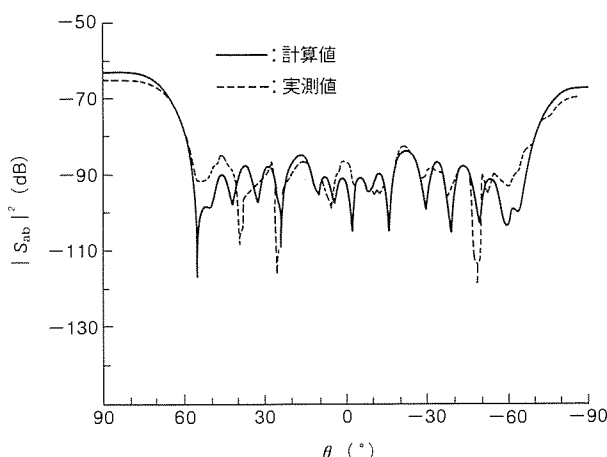


図 8. 計算値と実測値の比較

データの差から (1) で求めた励振位相を補正する。

図 10 は素子電界ベクトル回転法による測定値から励振位相を設定した場合の放射パターン、図 11 は透過位相が変化した場合の放射パターン、図 12 はここで示した方法によって励振位相を補正した場合の放射パターンである。図 10 ~ 12 からこの方法によって透過位相変化前の放射パターンが再現されていることが分かる。

4. 給電回路

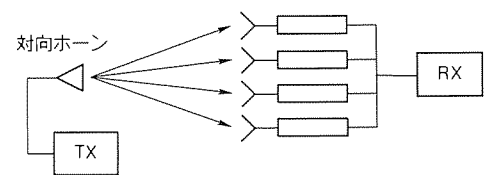
4.1 扇形分配回路

フェーズドアレーアンテナの給電回路の一つであるコーボレート給電回路では、2 分配器を多段接続する構成が一般的であるが、アンテナの素子数が増えると分配器数も増え、給電回路としての分配偏差や損失が増大する。扇形分配回路⁽¹¹⁾は入力線を扇状に広げた後、一挙に多数の出力線路に分割するものであり、この分配回路を用いることによって給電回路の分配偏差と損失の低減が可能となる。

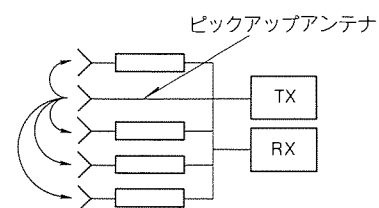
トリプレート線路で構成した X 帯扇形 6 分配回路の写真を図 13 に示す。入力線路を曲線テーパで扇状に広げた後、円弧の位置で入力線路と同じ幅の複数の出力線路に分割している。等しい出力線路幅で等分配とするため、出力線路間のスリット幅を広くとっている。また、出力端子間のアイソレーションを得るため、曲線テーパと出力線路との接界面から 1/8 波長及び 3/8 波長の位置に出力線路間抵抗、曲線テーパ部には抵抗付きスロットを設けている。性能は、比帯域 30 % で分配偏差が ± 0.25 dB、アイソレーションが 20 dB、入力端 VSWR が 1.2、出力端 VSWR が 1.5 である。

4.2 直列給電回路

フェーズドアレーアンテナのもう一つの給電回路である直列給電回路では、通常、長い線路に等間隔で方向性結合器が設けられるため、結合器間隔が半波長の整数倍になる周波数で反射が著しく増大するという問題がある。また、給電電力



(a) 遠方界測定



(b) ピックアップアンテナによる測定

図 9. 相互結合によるフェーズドアレーの補正法

が端から順次分配されるため、粗結合から密結合まで広い結合度範囲の結合器が必要である。低損失なサスペンデッド線路で構成した場合、中間結合度 $-5 \sim -9$ dB を得るのが難しい。これらの問題を解決するため、結合器間隔をランダム

化し⁽¹²⁾、中間結合度の結合器に非対称サスペンデッド線路形方向性結合器⁽¹³⁾を用いた直列給電回路を開発した。S帯で試作した10分配直列給電回路の写真を図14に示す。ランダム化による位相のずれは、結合器で分配した後に補正線路を設けて補正している。性能は、比帯域25%で入力端VSWRが1.5、各結合器のVSWRが1.13~1.05である。

5. データ転送技術

5.1 位相データ転送方式

フェーズドアレーアンテナでは、ビーム方向の切替時間間隔、アンテナ素子のコネクタピン数の制限、位相演算回路の規模などを考慮して位相データの転送方式が決定される⁽¹⁴⁾。

アンテナのビームを所望の方向に向けるには、式(5)によって位相データを計算して各アンテナ素子に設定すればよい。

$$\psi_{ij} = K \cdot B_x \cdot X_i + K \cdot B_y \cdot Y_j + C_{ij} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 ψ_{ij} は位相データ、 X_i 、 Y_j はアンテナ素子の座標、 B_x 、 B_y は所望のビーム方向の方向余弦、 K は定数、 C_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots$)は各アンテナ素子の補正データである。

したがって、式(5)のX座標に対する項(右辺第1項)と、Y座標に対する項(右辺第2項)を別々に計算し、X座標に対する項、Y座標に対する項と C_{ij} を図15に示すように各アンテナ素子に対応する制御回路内で、全アンテナ素子に対し並列に同時に加算することで位相データが計算される。

図16に示す $N = n \times n$ 素子配列のアンテナの場合、位相演算回数と位相データの転送時間は、全アンテナ素子の位相データを式(5)によって計算して転送する場合に比べ、 $1/\sqrt{N}$ に減らすことができることから、大型のフェーズドアレーアンテナの位相データの転送方式として用いられている。

5.2 曲面多層配線板

近年、移動体通信では、自動車や航空機等の搭載装置の空間を有効に利用するため、任意曲面上にアンテナ素子を実装するアンテナの開発が盛んに進められている。このため、アンテナ素子に制御信号及び電源を供給する曲面多層配線板が必要となる⁽¹⁵⁾。

図17は試作された11層の曲面多層配線板を示す。この配線板は、曲線のある直線の回

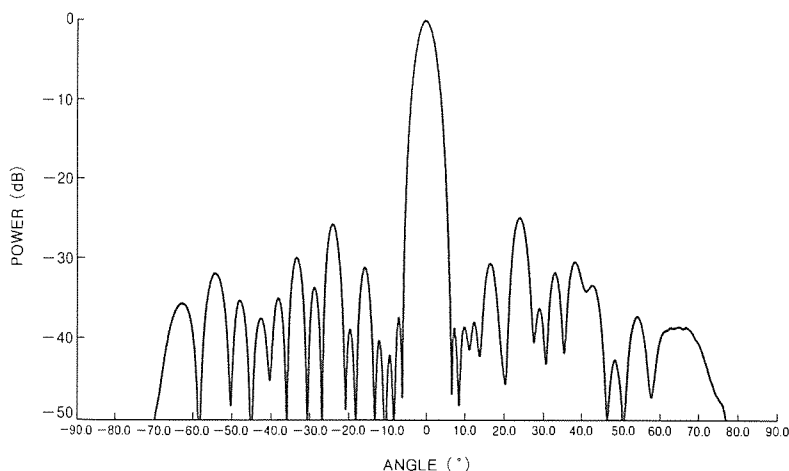


図10. 遠方界素子電界ベクトル回転法による放射パターン

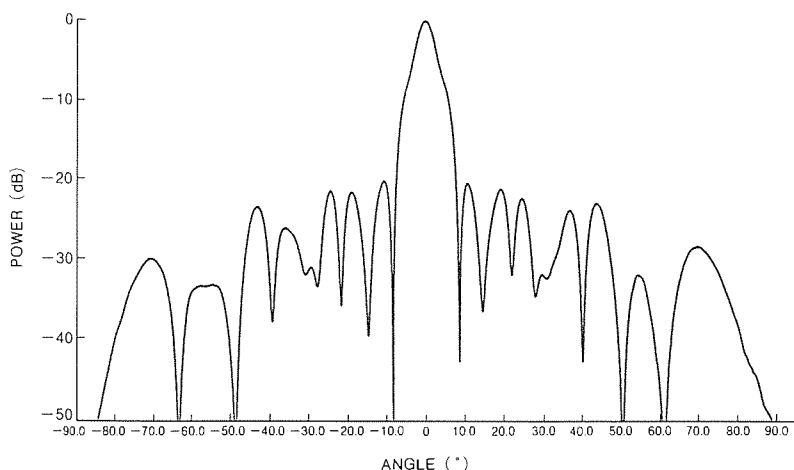


図11. 透過位相変化後の放射パターン

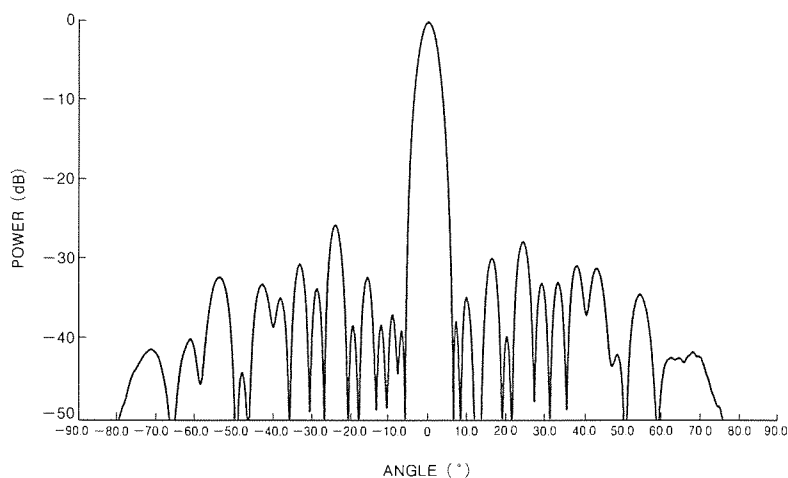


図12. 本方法による補正後の放射パターン

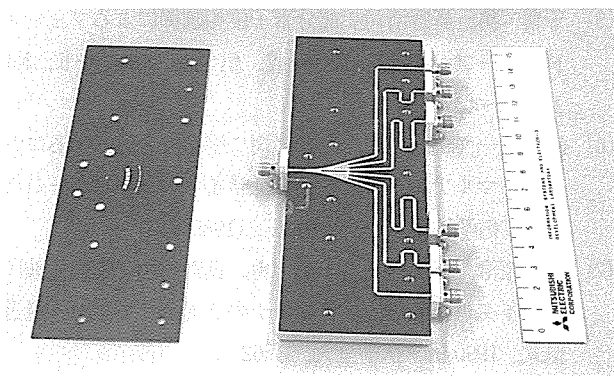


図13. X帯扇形6分配回路

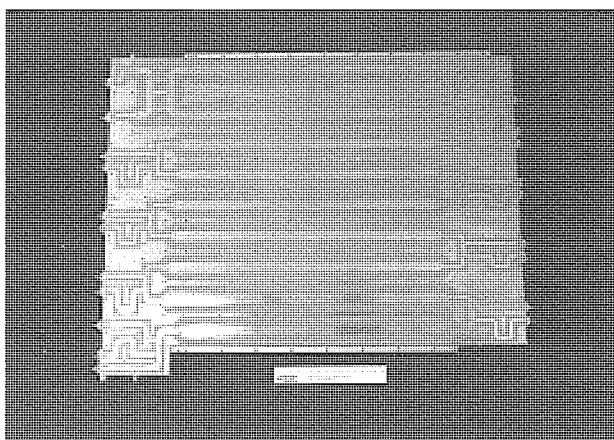


図14. S帯10分配直列給電回路

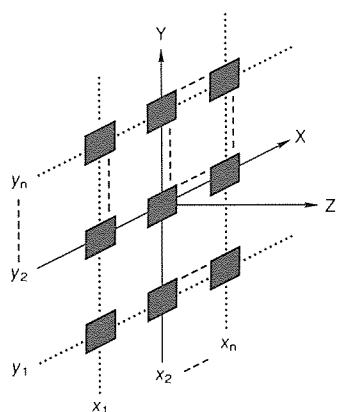


図15. フェーズドアレーアンテナの素子配列

りに回転して得られる回転面の一部で、制御信号層が5層、電源層が6層の計11層の曲面多層配線板である。この曲面多層板は図18に示すように、平面形状で内層パターンを形成し、プリプレグを挟んでヒートプレスによって曲面成形、積層を同時に行う。次に、曲面スルーホールを形成した後、感光剤を塗布し、レーザ露光によって直接曲面パターンニングを行うことで得られる。曲面への直接パターンニングは、5軸NCを用いて配線板の法線方向から照射して描画している。この配線板は、パターン幅0.3mm、2.54mmのICのピン

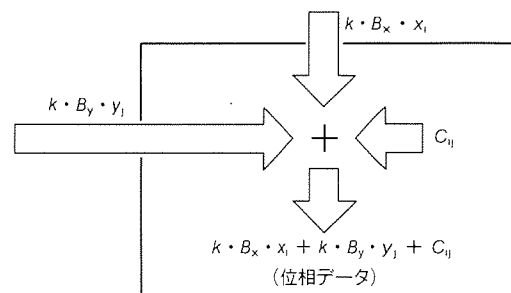


図16. 制御回路内部の動作

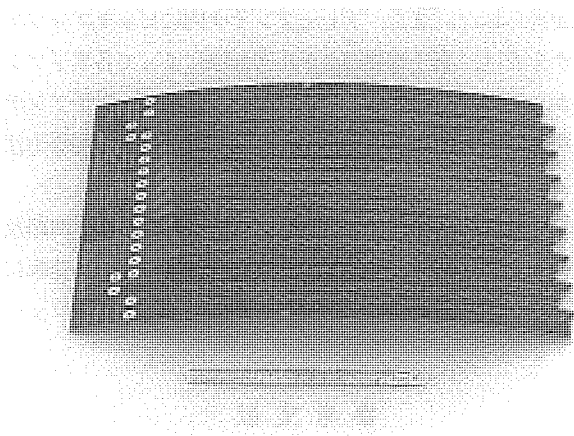


図17. 11層多層配線板

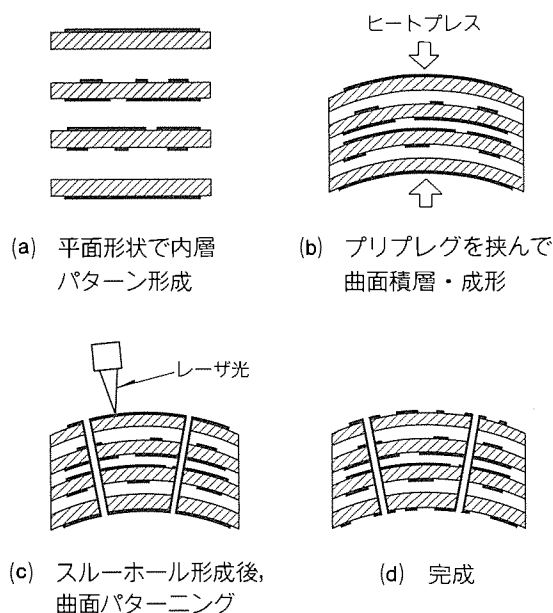


図18. 曲面成形・積層と曲面パターンニング

間に1本のパターンが走るJISのY級相当の多層配線板である。

6. む す び

フェーズドアレーアンテナを開発するためには種々の技術が必要であるが、ここでは基本的な電気的技術について述べ

た。まず、素子アンテナのON, OFFのみで低サイドローブ化のできる確定的素子間引き法及びその方法で励振振幅を多段階にすることにより、消費電力を少なく、サイドローブレベルを低く、利得を高くできることを示した。確定的素子間引き法及び平面波合成法は平面アレーアンテナの低サイドローブ化、零点整合法は任意形状コンフォーマルアレーアンテナの低サイドローブ化に有効である。また、多面アレー間の面間アイソレーション解析法として、起電力法とGTDを組み合わせた方法を示した。90°ウエッジを持つ2面アレーでの実測値と計算値を比較したところ非常によく対応した結果が得られた。また、アレーアンテナ内にピックアップアンテナを設け、素子電界ベクトル回転法によって各素子アンテナから結合する電界を測定した位相補正法は、素子アンテナ間相互結合を積極的に利用した方法であり、実用的な方法である。

本稿最後に、各素子アンテナに電力を供給する給電回路及び位相データ、電源を供給する多層配線板はプリント基板について示した。これらは、素子数の多い平面又は曲面フェーズドアレーアンテナに有効である。

参考文献

- (1) Ohmori, S. : Vehicle antennas for mobile satellite communications, IECE Trans., E74, No. 10, 3210 ~ 3221 (1991)
- (2) Skolnik, M. I., Sherman, J. W., Ogg, F. C. Jr. : Statistically designed density tapered array, IEEE Trans., AP-12, 408~417 (1964-3)
- (3) Numazaki, T., Mano, S., Katagi, T., Mizusawa, M. : An improved thinning method for density tapering of planar array antennas, IEEE Trans., AP-35, No. 9, 1066~1070 (1987)
- (4) 真野清司, 片木孝至 : ブロッキングのある線状波源のサイドローブ抑圧, 昭55信学総全大, 570 (1980)
- (5) 千葉 勇, 真野清司 : 部分素子位相制御によるフェーズドアレーアンテナの零点形成, 信学論, J74-B-II, No. 1, 35~42 (1991)
- (6) 針生健一, 千葉 勇, 真野清司 : 平面波合成によるコンフォーマルアレーアンテナの低サイドローブパターンの形成, 信学技報, A・P89-42 (1989-9)
- (7) 宮下裕章, 針生健一, 千葉 勇, 真野清司 : 直線偏波円形マイクロストリップアンテナの2素子間相互結合量近似式, 1990信学秋季全大, B-62
- (8) 宮下裕章, 砂原米彦, 石井隆司, 千葉 勇, 真野清司 : 多面アレーアンテナの面間アイソレーション解析, 信学技報, A・P90-62 (1990-9)
- (9) 石井隆司, 白松邦昭, 春山鉄男, 折目晋啓, 片木孝至 : フェーズドアレーアンテナの間引きを利用したビーム再形成のための最適位相補正法, 1989信学春季全大B-48
- (10) 真野清司, 片木孝至 : フェーズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法—素子電界ベクトル回転法—, 信学論(B), J65-B.5, 555~560 (1982-5)
- (11) Miyazaki, M., Ishida, O., Hashimoto, T. : A sectoral planar 6-way hybrid power divider with a resistive slot, European Microwave Conf., 307~310 (1989)
- (12) Takeuchi, N., Watanabe, S., Mizobuchi, A., Ishida, O. : A wideband 172 way suspended stripline beamforming network for frequency scanning array, IEEE AP-S Digest, 203~206 (1987)
- (13) 石田修己, 磯田陽次, 宮崎守泰, 竹内紀雄, 武田文雄 : 非対称サスペンデッド線路形方向性結合器, 昭61信学総全大, 733 (1986)
- (14) 青木俊彦, 菱沼 進, 折目晋啓 : フェーズドアレーアンテナの位相データ設定方式, 1989信学秋季全大, B-14
- (15) 菱沼 進, 佐藤正人, 田島和明, 松田淑男, 川津昭信, 足立栄之資 : 曲面多層配線板の試作, 1991信学春季全大, SC-7-5

GTD を応用したアンテナ解析技術

砂原米彦*

1. ま え が き

アンテナの放射特性は、そのアンテナが取り付けられている構造物や周囲構造物の影響を受け、アンテナ単体の放射特性とは違ったものになる。この傾向は低利得のアンテナほど強くなる。例えば、自動車無線などでは1/4波長モノポールアンテナなどの水平面内無指向性アンテナが用いられるが、アンテナが付いている自動車の屋根の影響を受けて垂直面内の主ビームは一般に10~40°上方を向き、水平方向の利得は主ビーム方向のそれから数dB低下する。

したがって、アンテナ設計では構造物からの電波散乱解析技術が重要なキー技術の一つとなる。任意形状の散乱体による電波散乱を解析する方法として、現在用いられているのはモーメント法などの数値解法とGTD (Geometrical Theory of Diffraction: 幾何光学的回折理論) などの漸近解法である。数値解法は散乱体の寸法が波長に比べてあまり大きくない場合に望ましい方法であり、漸近解法は寸法が大きい場合に望ましい方法である。この漸近解法の中でも上述したGTDはその概念が簡単であり、数学的表示式も簡潔なので散乱・回折界を解析的に決定する場合の最も有力な手法と考えられている。ここでは、GTDを応用したアンテナの放射特性や標的のレーダ断面積の計算法について述べる。

2. 構造物に取り付けたアンテナへの応用

2.1 放射パターン解析

図1に示すような導体板に取り付けられたアンテナの放射

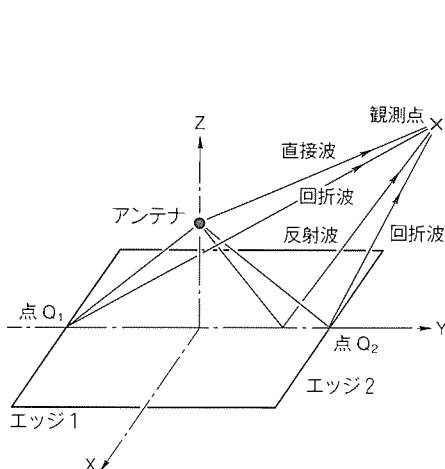


図1. 導体板に取り付けられたアンテナ

パターンをGTDを用いて求める。GTDでは全放射界は幾何光学項と回折項の和で表される。この幾何光学項とは幾何学的に決定される直接波及び散乱体からの反射波を示し、幾何光学によって容易に求められる。回折項とはエッジ回折波や表面回折波を示し、導体板のように平面で構成されている場合は、エッジ回折波のみとなる。このエッジ回折波は図2の座標系及び記号を用いると次式で与えられる⁽¹⁾。

$$\begin{pmatrix} E^d \cdot \hat{\beta} \\ E^d \cdot \hat{\phi} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} E_0^i \cdot \hat{\beta}' \\ E_0^i \cdot \hat{\phi}' \end{pmatrix} D_{s,h} \sqrt{\frac{\rho_i}{s(s+\rho_i)}} e^{-jks} \dots\dots\dots (1)$$

$$D_{s,h} = \frac{e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_0} \cdot \left\{ \frac{2 \sin(\pi/n) F[kLa(\phi - \phi')]}{\cos(\pi/n) - \cos[(\phi - \phi')/n]} \mp \left[\cot\left(\frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n}\right) F[kLa^+(\phi + \phi')] + \cot\left(\frac{\pi - (\phi + \phi')}{2n}\right) F[kLa^-(\phi + \phi')] \right] \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$F[X] = 2j\sqrt{X} e^{jX} \int_{\sqrt{X}}^{\infty} e^{-j\tau^2} d\tau \dots\dots\dots (3a)$$

$$a^+(Y) = 2 \cos^2\left(\frac{2n\pi - Y}{2}\right) \dots\dots\dots (3b)$$

$$a^-(Y) = 2 \cos^2\left(\frac{Y}{2}\right) \dots\dots\dots (3c)$$

$$L = \frac{s\rho_i}{s+\rho_i} \sin^2 \beta_0 \dots\dots\dots (3d)$$

ここで、波源は点波源を仮定し、エッジを構成する面は平

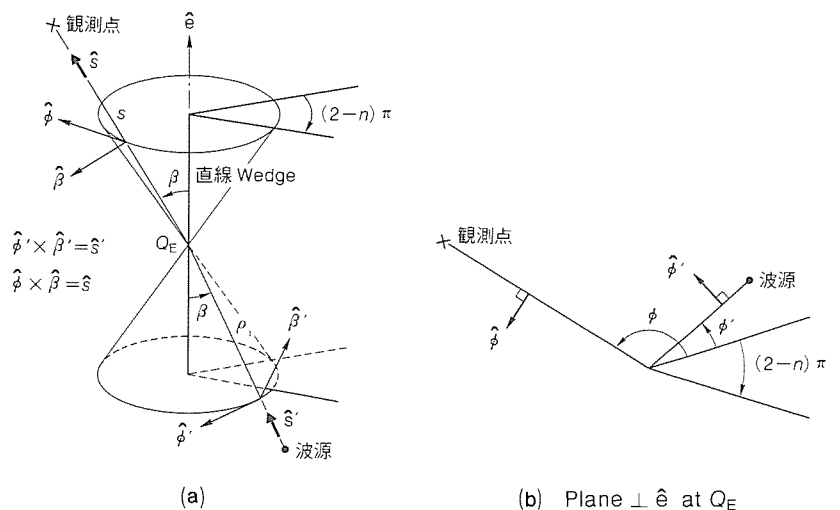


図2. エッジに設けた座標系

*電子システム研究所(工博)

面に限定している。 E_0^i は回折点に入射する入射電界であり、 ρ_i は波源から回折点までの距離を示している。回折点はエッジ上の点で波源からその点を経て観測点に至る距離が極値をとるような点である。図1で観測点が z - y 面内に在る場合、エッジ1、2と y 軸との交点 $Q_{1,2}$ が回折点となる。図3に式(1)~(3)を用いて計算した導体板上に置かれた微小ダイポールアンテナの放射パターンを測定値と比較して示す。測定には $\lambda/4$ モノポールアンテナを用いている。計算では $\theta=90^\circ$ での連続性を保つために二重回折波を考慮している。

この二重回折波とは、図1で波源から点 Q_1 、そして点 Q_2 を通して観測点へ到達するような2回エッジ回折する回折波を示す。この二重回折波は式(1)で求められる回折波を入射波としてもう一度式(1)を用いることによって求められる。図からGTDが全角度において有効であることが分かる。ここではGTDのエッジ回折波についてのみに述べたが、表面回折波も含めることにより、曲面形状を含む任意形状の構造物によるアンテナの放射パターンに及ぼす影響を評価することができる。しかし、構造物が複雑になってくると幾何学的に決定される反射点、エッジ回折点及び表面回折波の軌跡を求めることが困難となるためにGTDの適用は比較的単純な形状の構造物に限定される。

しかし、平面と直線エッジから成る多面体構造物に対する反射点及びエッジ回折点を求めることは容易である。したが

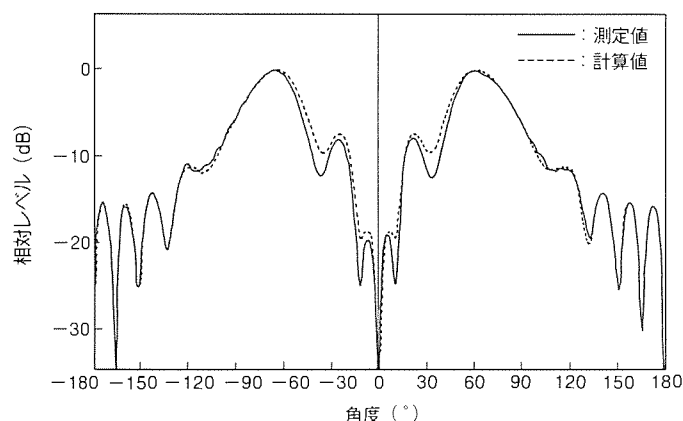


図3. 矩形導体板に取り付けられた微小ダイポールアンテナの放射パターン

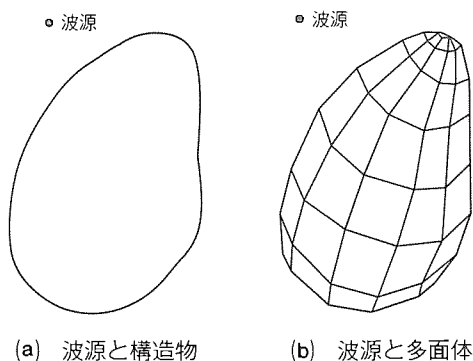


図4. 構造物の多面体による近似

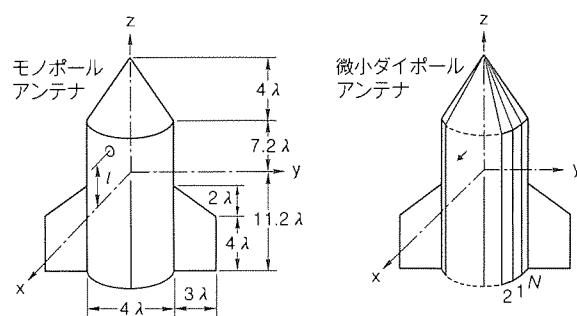
って、図4(a)に示す任意形状構造物を同図(b)に示すような多面体で近似してGTDを適用することが考えられる。図5(a)に示す導体板付き有限円筒上のモノポールアンテナを例に上述した多面体近似法の有効性を示す。図5(b)に示すような多面体近似を考え、アンテナとして微小ダイポールアンテナを仮定し、図6に示すようなアンテナと多面体の位置関係を考える。図7に $N=40$ としたときの計算値を測定値と比較して示す。

図から計算値と測定値は暗領域と明領域の境界付近を除く明領域でよく一致しているのが分かる。暗領域では直接波が存在しないため回折波が主要項となるため、エッジ回折波がとどかない領域で放射界は零となる。多面体近似法はこのような欠点を持つてはいるが、明領域での有効性はこの例から明らかであり、複雑な構造物に対して有効な計算法といえる。

2.2 簡易評価法

図8に示すようにアンテナの周囲に構造物がある場合、アンテナの放射界はこれら周囲構造物からの反射波や回折波の影響を受ける。これらの影響は2.1節で述べたように幾何光学及びGTDで評価すればよいが、ここではアンテナの直接波に対してどの程度の影響を与えるかを評価する簡易式を示す。反射波に関しては幾何光学から容易に求められるので、ここではエッジ回折波の簡易評価式を示す。波源と観測点はエッジに対して垂直な面内に在るとし、図9に示す座標系を考える。このとき、エッジ回折波 E^d は式(1)で与えられる。また、波源から観測点へ向かう直接波 E^i は、波源から観測方向へ距離 ρ_i の点Aでの入射電界 E_A^i を用いて

$$E^i = \begin{pmatrix} (E_A^i \cdot \hat{\beta}^n) \\ (E_A^i \cdot \hat{\phi}^n) \end{pmatrix} \frac{\rho_i}{s_0 + \rho_i} e^{-jk s_0} \dots\dots\dots (4)$$



(a) 導体板付き有限円筒 (b) 計算に用いた多面体モデル

図5. 一端に円錐を持つ導体板付き有限円筒とその多面体モデル

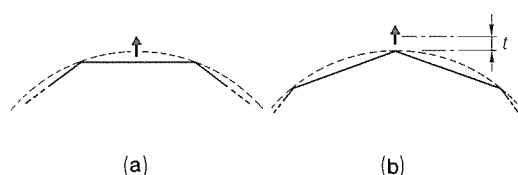
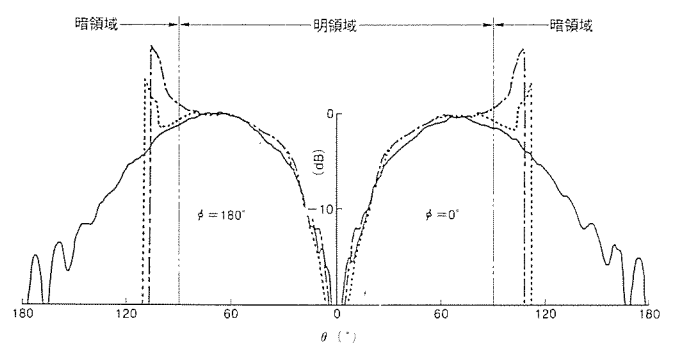
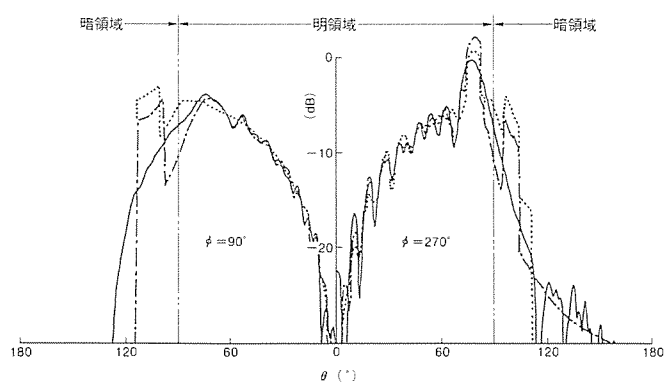


図6. 正N角柱と波源の位置($t=0.02\lambda$)



(a) x-y 面内パターン



(b) z-x 面内パターン

図 7. 導体板付き有限円筒上モノポールアンテナの放射パターン比較

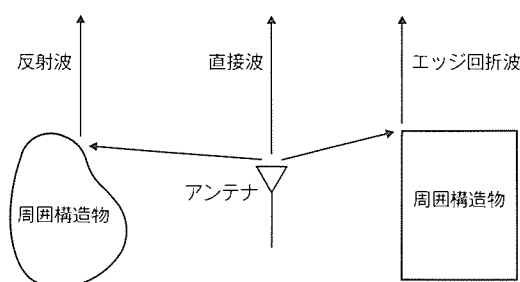


図 8. アンテナと周囲構造物

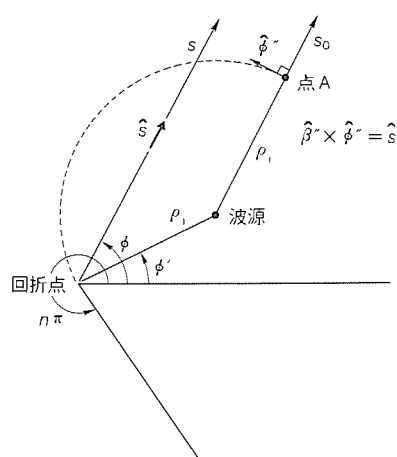


図9. 波源と回折点

で与えられる。したがって、直接波 E^i に対する E^d の比は

$$\frac{E^d}{E^i} = - \left(\frac{(E_0^i \cdot \hat{\beta}')}{(E_A^i \cdot \hat{\beta}'')} D_s \right) \frac{1}{\sqrt{\rho_i}} e^{-jk(s-s_0)} - \left(\frac{(E_0^i \cdot \hat{\phi}')}{(E_A^i \cdot \hat{\phi}'')} D_h \right) \frac{1}{\sqrt{\rho_i}} e^{-jk(s-s_0)} \quad (5)$$

となる。 $(E_0^i \cdot \hat{\beta}') / (E_A^i \cdot \hat{\beta}'')$, $(E_0^i \cdot \hat{\phi}') / (E_A^i \cdot \hat{\phi}'')$ は、波源の観測方向に対する回折点方向での相対利得であり、無指向性のときは1となる。

ここで、式(2)で与えられる $D_{s,h}$ は反射境界 (RB: $\phi + \phi' = \pi$) 及び影境界 (SB: $\phi - \phi' = \pi$) 付近以外では $F[\] = 1$ と近似できるので、次式に示すエッジ回折波簡易評価式が導出できる。

$$\frac{E^d}{E^i} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{(E_0^i \cdot \hat{\beta}')}{(E_A^i \cdot \hat{\beta}'')} G_s \right) \left(\frac{(E_0^i \cdot \hat{\phi}')}{(E_A^i \cdot \hat{\phi}'')} G_h \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_i/\lambda}} e^{-j\mathbf{k} \cdot (\mathbf{s}-\mathbf{s}_0)} e^{-j\pi/4} \dots\dots\dots (6)$$

$$G_{s,h} = \frac{\sin \pi/n}{n} \left\{ \frac{1}{\cos \pi/n - \cos\{(\phi - \phi')/n\}} \right. \\ \left. \mp \frac{1}{\cos \pi/n - \cos\{(\phi + \phi')/n\}} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで λ は波長である。上式から直接波に対するエッジ回折波は回折点までの波長で規格した距離の平方根の逆数に比例することが分かる。さらに、 $G_{s,h}$ は RB, SB から十分離れた領域では、 $|G_{s,h}| \leq 1$ とみなせるので無指向性を仮定すると式(6)から

$$E^d = E_1^d e^{jk \frac{a}{2} \sin \epsilon} + E_0^d e^{-jk \frac{a}{2} \sin \epsilon}$$

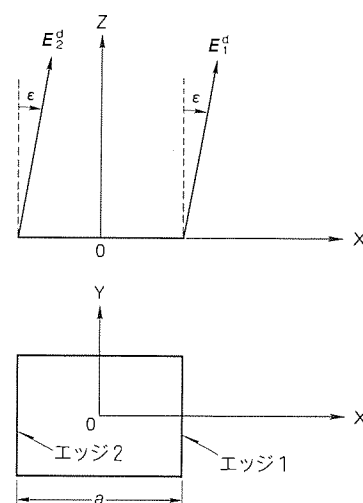


図10. 矩形状平板による回折

$$\left| \frac{E^d}{E^i} \right| \doteq \frac{1}{2\pi\sqrt{\rho_i/\lambda}} \dots\dots\dots (8)$$

を得る。例えば、波源からエッジまでの距離が250λのとき、

$$\left| \frac{E^d}{E^i} \right| \doteq 0.01$$

となり、エッジ回折波の強さは直接波の強さに対して約1/100であることが分かる。式(6)、(8)は周囲構造物からのエッジ回折波を概略評価するときに有効である。

3. レーダ断面積の解析への応用

多面体物体のレーダ断面積 (Radar Cross Section : RCS) は、各面のエッジからの入射方向への回折波の和を計算すれば求めることができる。また、曲面を含む物体でも、それを平面で近似して RCS を求めることが考えられる。この場合、エッジは有限長の直線であり、入射波も平面波のため等価端部電磁流法⁽²⁾⁽³⁾が有効となる。図2の座標系を用いると、一般的なエッジ上の等価端部電磁流は次式で表される。

$$I_e = j \frac{2(E_0^i \cdot \hat{\beta}') G_s}{k Z_0 \sin \beta_0} \dots\dots\dots (9a)$$

$$I_m = j \frac{2(E_0^i \cdot \hat{\phi}') G_h}{k \sin \beta_0} \dots\dots\dots (9b)$$

ここで k は波数、 Z_0 は空間の特性インピーダンスであり、 $G_{s,h}$ は式(7)で与えられている。有限長エッジからの回折波 E^d はエッジに沿って次の積分を行うことによって求められる。

$$E^d = -\frac{jk}{4\pi} \int \{ Z_0 I_e (\hat{s} \times \hat{e}) \times \hat{s} + I_m (\hat{e} \times \hat{s}) \} \frac{e^{-jks}}{s} dl \dots\dots\dots (10)$$

しかし、式(10)による回折波はRB、SBで回折係数 $G_{s,h}$ が発散するという問題がある。その解決方法として各面を多数

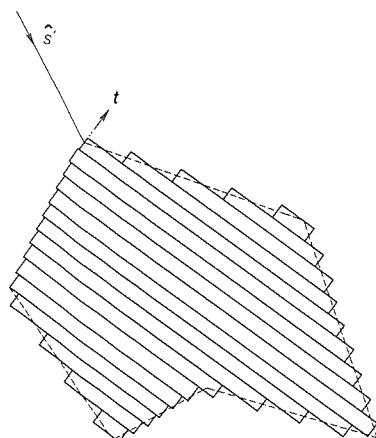


図11. 平板の矩形短冊モデル

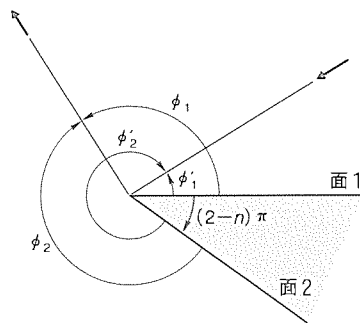


図12. $\phi'_1, \phi_1, \phi'_2, \phi_2$ の定義

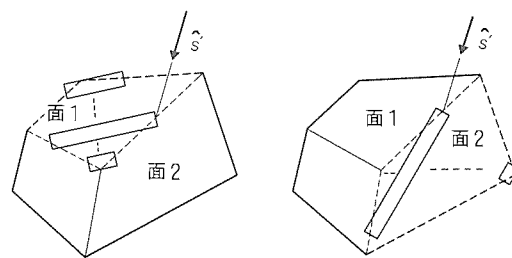


図13. 多面体のための矩形短冊モデル

のく(矩)形状の帯に分割する方法がある⁽⁴⁾。図10に示す矩形形状平板に垂直に平面波が入射した場合を考える。ZX 面内の回折波はエッジ1及び2からの回折波の和であるが、その相対位相を考慮すると、入射方向に対する回折波の進行方向の成す角 ϵ が小さいとき発散する回折波 $E_{1,2}^d$ は互いに打ち消し合い、 $\epsilon \rightarrow 0$ のとき回折波の和 E^d は有限の値をとる。さらに、この有限値は物理光学法によって求められる結果と一致する。ZX 面内で、Z 軸から離れた方向から入射した場合も同様に、エッジ1、2からの回折波の和はRB、SB上で発散しない。

任意形状の平板の場合、各エッジに直接等価端部電磁流法を適用すると、SB、RBにおいて合成回折波は発散するが、図11に示すように、入射波の進行方向に垂直なエッジを持つ多数の矩形短冊に分割し、そのエッジ上の等価波源からの回折波の合成を求めることによって、SB、RBにおいて物理光学法と一致する結果を得ることができる。この場合、式(9)の $I_{e,m}$ として次式を用いる。

$$I_e = j \frac{2(E_0^i \cdot \hat{t}) G_s}{k Z_0} (\hat{t} \cdot \hat{e}) \dots\dots\dots (11a)$$

$$I_m = j \frac{2(E_0^i \cdot (\hat{s} \times \hat{t})) G_h}{k} (\hat{t} \cdot \hat{e}) \dots\dots\dots (11b)$$

$$\hat{t} = (\hat{s}' \times \mathbf{n}) / |(\hat{s}' \times \mathbf{n})| \dots\dots\dots (11c)$$

ここで \mathbf{n} は平板の単位法線ベクトルである。したがって、導体板による回折波は式(10)の \hat{e} を \hat{t} におきかえ、エッジに沿った次の周回積分によって求められる。

$$E^d = -\frac{jk}{4\pi} \oint \{ Z_0 I_e (\hat{s} \times \hat{t}) \times \hat{s} + I_m (\hat{t} \times \hat{s}) \} \frac{e^{-jks}}{s} dl \dots\dots\dots (12)$$

次に多面体からの回折波を求めるため、回折係数をエッジを構成する2面について対称な形で表現する。図12のように $\phi_1, \phi_2, \phi'_1, \phi'_2$ を定義するとこれらの間には、 $\phi_1 - \phi'_1 = -(\phi_2 - \phi'_2)$ 、 $\phi_1 + \phi'_1 = 2n\pi - (\phi_2 + \phi'_2)$ の関係があり、式(7)の $G_{s,h}$ は次のように表される。

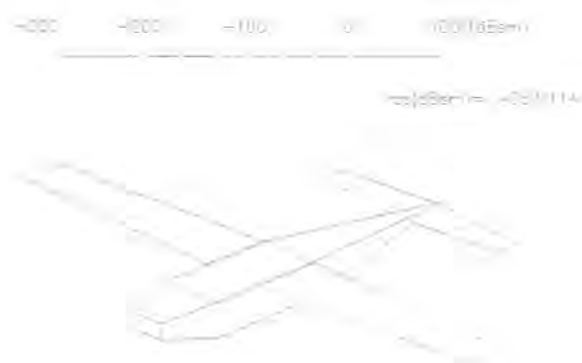


図14. セスナ機の各部分からの RCS カラー表示

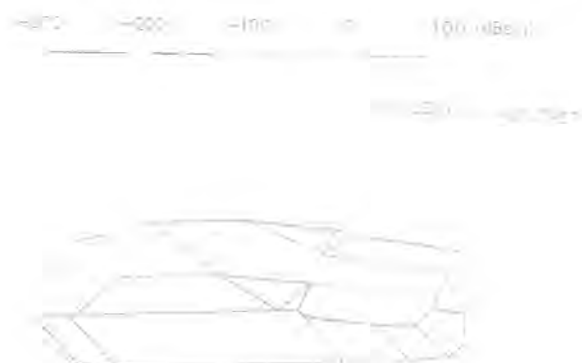


図15. 自動車の各部分からの RCS カラー表示

$$G_{s,h} = G_{s,h}^1 + G_{s,h}^2 \dots\dots\dots (13a)$$

$$G_{s,h}^1 = -\frac{1}{2n} \left[\cot \left| \frac{\pi - (\phi_1 + \phi'_1)}{2n} \right| \right. \\ \left. \mp \cot \left| \frac{\pi - (\phi_1 + \phi'_1)}{2n} \right| \right] \dots\dots\dots (13b)$$

$G_{s,h}^1$ の第2項は各面からの反射波の影響を示しており、それぞれのRBでのみ発散する。多面体を構成する各面について図13のような矩形短冊モデルを考え、式(9)の $G_{s,h}$ を $G_{s,h}^1$ で置きかえて等価端部電磁流 I_e^1 、 I_m^1 を定義し、式(11)、(12)を適用すると、各面のSB、RBにおいて発散現象がなくなり、全方向でのRCSが計算できる。また、この計算法の特長は各辺からの回折波の和としてRCSを求めているので、各部分からのRCSが容易に計算できることである。セスナ機及び自動車について各辺からの回折波の強さをカラー表示したものを図14及び図15に示す。

4. む す び

近年の移動体通信の発展に伴い、アンテナの設置場所や周囲環境の複雑化及びアンテナ性能への高機能化が進んでいる。したがって、このようなアンテナの設計、特性評価のために

GTDが適用される機会が今後ますます増加するものと考えられる。

参 考 文 献

- (1) Kouyoumjian, R. G., Pathak, P. H. : A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface, Proc. IEEE, **62**, 1438 ~ 1461 (1974)
- (2) Ryan, C. E., Peters, Leon : Evaluation of edge diffracted fields including equivalent currents for the caustic regions, IEEE Trans. Antennas & Propagation, **AP-17**, 292~299 (1969)
- (3) Ryan, C. E., Peters, L. : Correction to Evaluation of edge-diffracted fields including equivalent currents for the caustic regions, IEEE Trans. Antennas & Propagation, **AP-18**, No. 2, 275 (1970)
- (4) Sikta, F. A., Burnside, W. D., Chu, T. T., Peters, L. : First-order equivalent current and corner diffraction scattering from flat plate structures, IEEE Trans. Antennas & Propagation, **AP-31**, No. 4, 584 ~ 589 (1983)

アンテナ計測評価技術

折目晋啓* 井上正人*
白松邦昭* 出口博之**
青木俊彦* 片木孝至***

1. ま え が き

近年、アンテナがシステム化・複合化・大型化している。例えば、フェーズドアレーアンテナはアンテナ技術をベースとしてマイクロ波送受信技術、マイクロ波及びデジタル半導体技術、高密度実装技術、冷却技術、計算機技術等を複合化したシステムであり、また宇宙空間の無重力状態で使用されるメッシュ等を使用した大型展開アンテナもメッシュ鏡面形成、展開機構等々各種技術の複合体である。

これら複合技術から成り立つアンテナは当然のことながら各種誤差を内包しており、各種誤差の合理的な計測評価はシステム全体の成否に大きく影響する。合理的とはアンテナシステムを作りこんだ状態で、ハード的に変更することなく、アンテナが持つ機能又は試験装置の機能を利用してパラメータを変化させながら計測を行う。その計測結果に評価のためのアルゴリズムを適用し、誤差評価を精度良く行い、結果的には機能・性能を最大限に引き出すか、又はそのための指針を与えるという意味が込められている。

ここで紹介するフェーズドアレーアンテナと大型展開アンテナの計測評価技術は誤差抽出のためのアルゴリズム及びシステムへの適用の方法は異なるが、手段として当社独自の自動CAT (Computer Aided Testing) システムによって各種パラメータを変化させ、比較的多量のデータを取得し、計算機による処理をするという点では共通であり、その観点から両者を取り上げることにした。具体的にはフェーズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法、故障診断法及び電波軸計測法並びに、大型展開アンテナの鏡面誤差計測法について述べ、それらの計測に共通して必要なインフラとしての大型電波暗室、スキャナ、統合化計測システムの概要についても紹介する。

2. フェーズドアレーアンテナの計測評価

2.1 素子電界ベクトル回転法の原理

フェーズドアレーアンテナでは各素子アンテナに、設計に基づく励振振幅位相を与えて所望のビーム走査やパターン合成などを実現する。しかし、一般には素子アンテナの出来具合、素子間の結合や給電回路のばらつきによって、各素子の振幅と位相は所望の値からずれる。これを補正するためには、アレーの動作状態における各素子の振幅と位相を正確に測定する必要がある。その方法には各種の方法があるが、大規模

な装置を用いたり、アンテナに余分な機能を付加することなく実現する方法として、素子電界ベクトル回転法 (Rotating Element field Vector method : REV 法) がある⁽¹⁾。

これはフェーズドアレーアンテナの各素子に接続されている移相器に着目し、これを用いてアレー状態で一つの素子の位相を変化したときのアレーの合成電界の振幅の変化だけを測定し、その結果を計算機処理することによって、その素子の振幅と位相を求める方法である。したがって、この測定法は計算機で制御するフェーズドアレーアンテナシステムにソフトウェアだけを追加することで、実現することができる。また、アレーの合成電界の振幅を測定するだけであり、通常のフェーズドアレーアンテナの動作状態と同じであるので、誤差の少ない測定法といえる。

アレーアンテナのある方向における合成電界ベクトルは、図1のように各素子の電界ベクトルの合成で表すことができる。ここで移相器を用いて一つの素子の位相を変化させると、図のようにその素子の電界ベクトルの回転に伴って合成電界ベクトルが変化する。そのときの合成電力の変化は余弦的に変化する。この変化から、その素子の振幅と位相を求めるのが、この測定法の原理である。

図1で初期状態での合成電界ベクトルの振幅と位相を E_0 , ϕ_0 , 着目する第 n 番目の素子の電界ベクトルの振幅と位相を E_n , ϕ_n とする。この第 n 番目の位相を Δ だけ変化させたときの合成電界は次式で表せられる。

$$\vec{E} = (E_0 e^{j\phi_0} - E_n e^{j\phi_n}) + E_n e^{j(\phi_n + \Delta)} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、第 n 番目の相対振幅と相対位相を、

$$k = E_n / E_0, \quad X = \phi_n - \phi_0 \dots\dots\dots (2)$$

とおくと相対電力 Q は次式となる。

$$Q = |\vec{E}|^2 / E_0^2 = (Y^2 + k^2) + 2kY \cos(\Delta + \Delta_0) \dots\dots (3)$$

ただし、

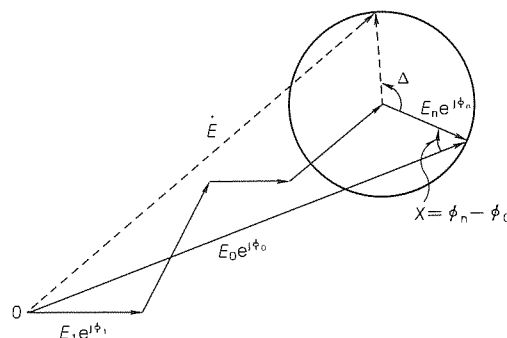


図1. 素子電界ベクトルと合成ベクトル

$$Y^2 = (\cos X - k)^2 + \sin^2 X \dots\dots\dots (4)$$

$$\tan \Delta_0 = \sin X / (\cos X - k) \dots\dots\dots (5)$$

すなわち、一つの素子の位相変化により、合成電力 Q は式(3)のように余弦的に変化する。その最大と最小の比を r とすれば、 r は以下の式で与えられる。

$$r = \pm (Y+k) \diagup (Y-k), \quad \Gamma = (r-1) \diagup (r+1) \quad \cdots (6)$$

$-\Delta_0$ は最大値を与える位相変化量であり、これらの式から第 n 番目の素子の相対振幅 k と相対位相 X が 2 組求められる。

$$k_1 = \Gamma / \sqrt{1 + 2\Gamma \cos \Delta_0 + \Gamma^2} \dots\dots\dots (7)$$

$$X_1 = \tan^{-1} (\sin \Delta_0 / (\cos \Delta_0 + F)) \dots\dots\dots (8)$$

$$k_2 = 1/\sqrt{1 + 2\Gamma_{\text{cos}}\Delta_0 + \Gamma^2} \dots\dots\dots (9)$$

$$X_2 = \tan^{-1} (\sin \Delta_0 / (\cos \Delta_0 + 1/\Gamma)) \dots\dots\dots (10)$$

この二つの解の判定は幾つかあるが、初期位相分布の与え方によって分離する方法を用いることが多い。

以上のように、第 n 番目の素子の位相を変化させたときのアレー合成電力 Q の変化を測定し、 Q の最大値を与える位相 $-\Delta_0$ と、 Q の最大値と最小値の比 r を求めれば、その素子の相対振幅と相対位相を知ることができる。これをすべての素子に対して行えば、各素子の相対振幅と相対位相が求められる。その結果、相対振幅位相の設計値からの誤差が求められ、その誤差を補正することにより、理想状態に近づけることができる。

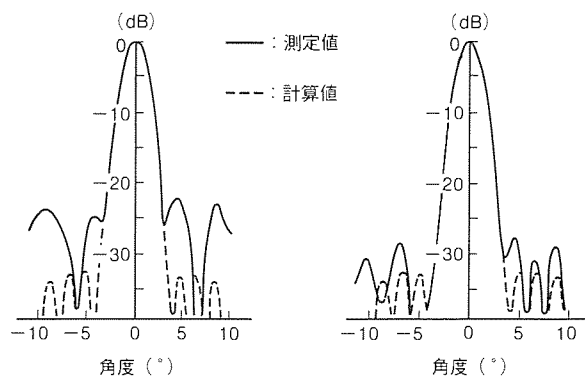
この測定法を用いて、実験的にその有効性を明らかにした結果を示す。ここでは、周波数を 10 GHz 帯で 32 素子のリニアアレーを用い、従来のピックアップ法（プローブによる素子振幅位相の検出法）及びこの測定法に基づき等位相となるように位相設定した場合の放射パターン測定値の比較を図 2 (a), (b) に示す。図中、破線は理想的な振幅位相分布での計算値である。図からサイドローブレベルは、ピックアップ法に比べて、この測定法が計算値に近い値となっている。これは、この測定法による位相設定の精度が高いことを示している。

2.2 計測装置

2.2.1 計測システム

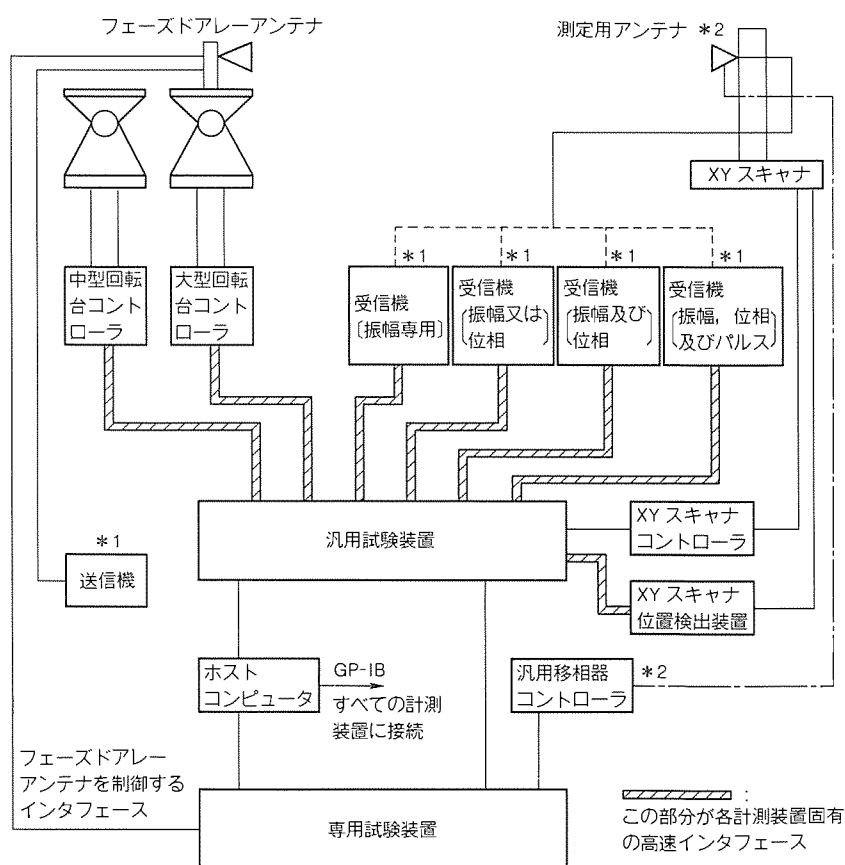
計測システムは、図3に示すように

回転台、受信機、XY スキャナ等の各種計測装置と、この各計測装置との高速インタフェースを持つ汎用試験装置、フェーズドアレイアンテナを制御する専用試験装置、及びホストコンピュータから構成され、連続自動試験が可能である。汎用試験装置と専用試験装置は、ホストコンピュータからのコマンドによって各計測処理を自動的に行い、各計測装置のイニシャル処理だけに GP-IB を使用している。そして、冗



(a) ピックアップ法 (b) REV 法

図2. ピックアップ法とREV 法に基づいた
位相設定による放射パターン



*1 受信機，送信機は，送信試験，受信試験によって入れ代わる。

*2 電波軸計測法の場合、汎用移相器コントローラで制御できるフェーズドアレイアンテナを用いる。

図3. 計測システムの構成ブロック図

長性も考慮して複数の同種の計測装置を持ち選択使用できる。

以下に、この計測システムの主な特長をまとめる。

- (1) 高スピード自動計測が可能である(各計測装置の高速インタフェースを使用しているため、GP-IB のみのシステムに比較し、3～30 倍の高速計測が可能である。)
- (2) 各計測処理に適した計測装置の選択が容易である(図3の計測装置がすべて使用可能であり、計測装置の選択はホストコンピュータでデータを指定するだけである。)
- (3) 機種変更時の計測システムの再構築が容易である(機種変更に伴うフェーズドアレーアンテナとのインタフェース関連の変更以外は、ソフトウェアのパラメータの変更だけで対応できる。)

2.2.2 大型電波暗室

大型電波暗室は、製品の大型化に対応するために高さ16 m、幅16 m、長さ27 mの規模である。図4に大型電波暗室の吸収体配置を示す。

この大型電波暗室は、不要反射の少ない領域(クワイエットゾーン)が直径6 mの球である。その反射特性は、2 GHz以上で-40 dB以下であり、直径6 m級の大口径アンテナの試験も可能である。また、電波暗室内における大電力放射試験を可能にする大電力用電波吸収体を開発し⁽²⁾、電波暗室中央部の円形部分(直径約10 m)に数千本配置してある。この大電力用電波吸収体は、熱に耐える新素材を積層して構成しており、耐電力試験の結果として、電力密度(CW波)0.8 W/cm²まで問題なく使用できる。反射特性は、従来のポリウレタン等を主材料とした吸収体と同程度であり、2 GHz以上で-40 dB以下である。

2.2.3 スキャナ装置

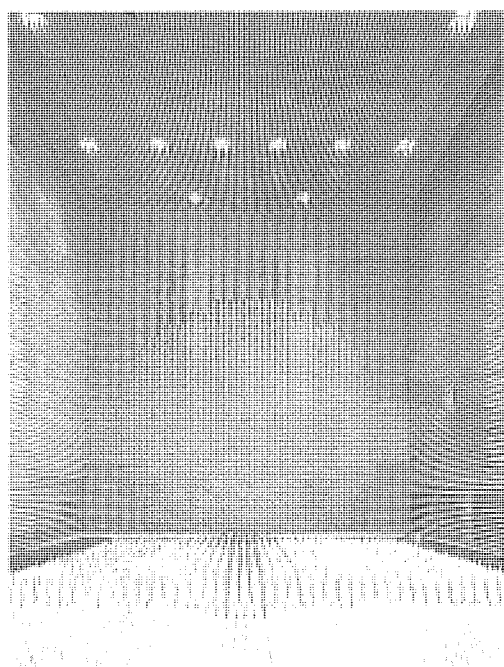


図4. 大型電波暗室の吸収体配置

スキャナ装置⁽³⁾は、フェーズドアレーアンテナ測定システム及びアンテナ近傍界測定システム(NFAMシステム)に用いられる。図5はスキャナ装置の外観で、X-Y平面走査方式の世界でも有数のタワー形スキャナであり、有効走査範囲は12.7 m×8 mである。

平面度についてはX-Y面内におけるプローブのZ軸方向のP-P値として、12.7 m×8 mの範囲で0.24 mm以下であった。

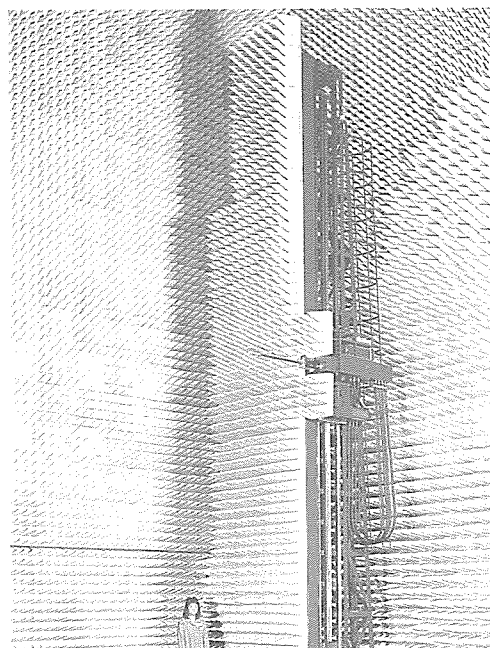
スキャナ装置本体は大型電波暗室内に設置され、隣接する計測室にスキャナ装置のコントローラ、受信機、ホストコンピュータ、汎用試験装置などが置かれ、NFAMシステムとしても構成されている。

2.3 応用例

素子電界ベクトル回転法は各種の測定に応用されており、その代表例について述べる⁽⁴⁾。

2.3.1 フレネル及びニアフィールド領域の測定

大型のフェーズドアレーアンテナの遠方界を測定するには、大きな測定距離が必要である。アレーアンテナ全体では遠方界が得られないが、素子アンテナ単体としては遠方界が得られる領域での測定を考える。図6に示すように、中央の素子及び他の素子とピックアップアンテナとの距離(R と R_i)、素子アンテナの指向性($g(\theta)$)、ピックアップアンテナの指向性($f(\theta)$)、等の補正が必要である。補正方法としては、近距離で素子電界ベクトル回転法によって測定した各素子の



寸 法		走査方法	有効走査範囲	
高さ	10.3m	X-Y平面走査	高さ	8m
幅	15.9m		幅	12.7m

図5. スキャナ装置の外観

相対振幅位相と、遠方界における各素子の相対振幅位相の差を求め補正を行う。素子パターンが既知の場合に、計算によって遠方界を求めることができる⁽⁵⁾。

次に、素子パターンが未知の場合はピックアップアンテナと供試アンテナとの角 θ を変えて素子電界ベクトル回転法によって、それぞれの角度における各素子の振幅と位相を測定する。それらに上記の補正を行い、素子パターンを求めて放射パターンを得ることができる。しかし、アレー全体でなめらかなパターンを得るためには細かい角度きざみで各素子の振幅と位相を測定して、そのデータからアレーパターンを合成する必要がある、試験時間がかかる。そこで、ある角度きざみごとに各素子の振幅と位相を測定して、素子パターンにおいてスプライン関数で、補間を行って評価を行った。その結果、角度きざみ 10° 程度で素子パターンの補間を行っても、アレー全体の実測パターンと計算パターンがよく一致することが分かった(図7)⁽⁶⁾。

さらに、近い距離の場合にピックアップアンテナを走査して測定することになる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。この場合はピックアップアンテナの位置による補正が必要になる。図8の測定系でピックアップアンテナを走査して、素子電界ベクトル回転法で各素子の振幅と位相を測定する。そして、初期に位相を設定した状態での合成電界を、ピックアップアンテナを走査させて測定した結果を用いて素子位置間の補正を行い、設定位相を求めることができ、その測定結果を図9に示す。

上記の測定では、ピックアップアンテナの移動に伴う初期合成電界の位相の変化を位相振幅受信機を用いて測定する必要がある。そこで、この合成電界の位置による変化をアレー

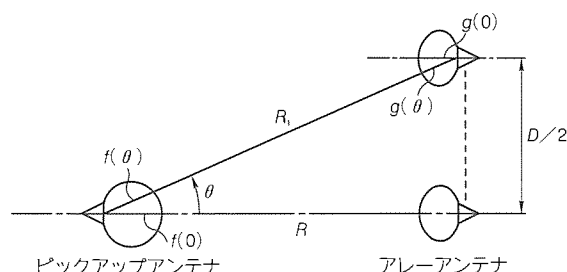


図6. アンテナ配置

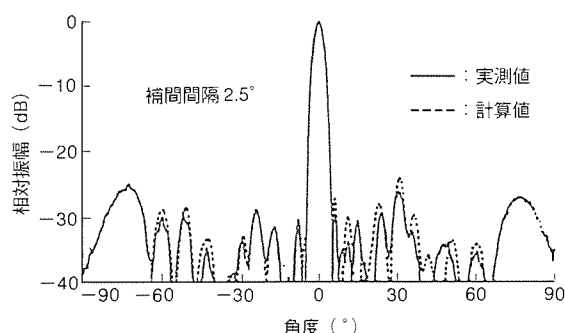


図7. 放射パターン(フレネル領域)

プローブを用いて振幅だけ測定して、各素子の振幅と位相を求めることができる方法にアレープローブ法がある⁽⁹⁾。この方法はピックアップアンテナを2素子のアレーアンテナの構成とし、その素子に移相器を接続し、ピックアップアンテナを移動させながら位相を変化させて素子電界ベクトル回転法によって測定を行い、初期合成電界の振幅と位相を求める。そして、それぞれの位置で求めた各素子の振幅と位相を用いて、スプライン補間法によって素子パターンを求め、アレー全体の放射パターンを得ることができる。これらの測定においてデジタル移相器の移相量誤差と損失変動の影響で求める素子の位相と振幅に誤差が生じる。そこで、その移相器の特性を考慮して補正を行い、より正確な素子の振幅と位相を得ることが可能である⁽¹⁰⁾。

2.3.2 素子の故障診断

フェーズドアレーアンテナでは素子が故障した場合、診断を行って素子の交換を行う必要がある。素子電界ベクトル回転法で求めた振幅を用いて素子の故障判定ができる。外的な条件から測定データに誤差が混入することがあるので、ビーム方向、周波数、初期状態の条件を変化させたときのデータの平均を用いることによって、精度を向上させることができる。この方法はピックアップアンテナが被測定アンテナと対向したところにある必要はなく、アンテナの中にピックアップアンテナを組み込み、素子間の相互結合を利用することによって、機器に搭載した状態で故障診断ができる⁽¹¹⁾。

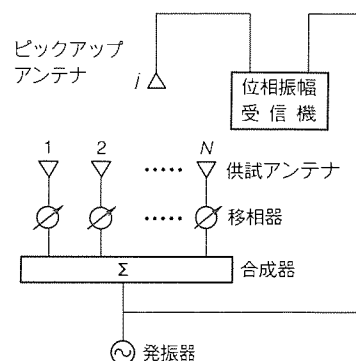


図8. アレー指向性の近傍界測定

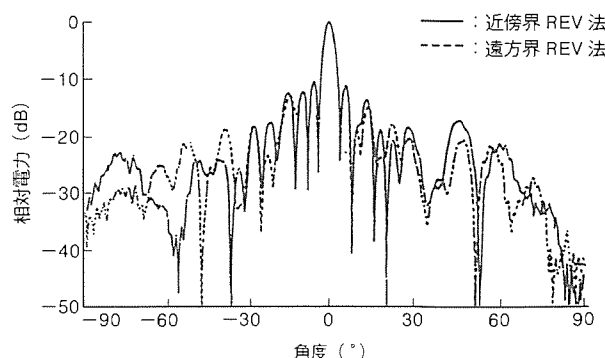


図9. 近傍界測定と遠方界測定の比較

2.3.3 電波軸計測法

素子電界ベクトル回転法を用いると二次元放射パターンを、被測定用アンテナも試験用アンテナも動かさないで測定することができる。すなわち、試験用のアンテナにフェーズドアレーアンテナを用い、これに素子電界ベクトル回転法を適用して、各素子アンテナが対向する方向の被測定用アンテナの放射パターンレベルを測定する方法である。この方法はモノパルスアンテナの差パターンのナル点角度（電波軸）を求めるなどの限定された狭い角度範囲内の精密測定法として有用であり、測定データを処理して周囲反射の影響を除去するアルゴリズムと組み合わせることにより、測定精度が 0.01° 以下の高精度測定が可能となる。

(1) 本計測法の原理⁽¹²⁾

測定系のブロック図を図10に示す。被測定用アンテナは Σ 信号、 ΔA_z 信号、 ΔEL 信号用の3出力端子を持つ二次元モノパルスアンテナ、試験用アレーアンテナは数十素子のプラナーアレーアンテナである。

測定の概念を図11を用いて説明する。まず、試験用アレーアンテナの移相器を制御し、素子電界ベクトル回転法によって各素子アンテナと対向する方向の被測定用アンテナの Σ パターン電界と素子アンテナの放射電界との積を求めて、これを校正值とする。次に同様に被測定用アンテナの ΔA_z （又は ΔEL ）パターン電界と素子アンテナの放射電界との積を求め、これを校正值で除すことによって、試験用アレーアンテナの各素子パターンのばらつき、励振振幅、位相のばらつきを打ち消し、被測定用アンテナの Δ/Σ パターンを得ることができる。

以上の手順によって得られたモノパルスパターンの実測値は図12に示すような形状をしており、二次元的なナルの軌跡（ナル線）はうねりを持っている。

このうねりは測定時の周囲反射の影響によって生じているものであり、モノパルスアンテナ本来の電波軸角度の評価を困難にしている。したがって、高精度測定のためにはこの影響を除去することが必要であるが、実際の電波環境（無響特性）の改善には限界があるので、データ処理によって補正を可能とするための近似を行う。この近似は試験用アレーアンテナの各素子で受信されるモノパルス Δ/Σ パターン電界を理論式として与え、得られた実測値の最小二乗近似によって上記理論式の係数を求めるといものである⁽¹³⁾。この処理により、 ΔA_z パターン、 ΔEL パターンの両方についてナル線が得られ、この交点としてナル点角度

（電波軸角度）を知ることができる。

(2) 測定例

測定の精度を確認するために、被測定用アンテナをXYスキヤナに搭載して移動させることでナル点角度方向の変化を模擬し、この計測法による実測値（近似処理による補正後）と比較した。この結果、計測法のナル点検出精度は 0.01° 以内にあり、反射波の影響が十分低減されていることが確認できた⁽¹³⁾。最後に、この方法を用いて実際のアクティブフェーズドアレーアンテナを供試アンテナとし、モノパルスパターンの微小走査特性を測定した結果を図13に示す。

$30 \pm 0.05^\circ$ の範囲を 0.005° きざみでビーム走査指令を与えたときのビーム走査角（ナル点角度）を測定したものであるが、理論値と実測値とは誤差 0.005° rms 以内で一致している。なお、特性が階段状になっているが、これは被測定用アンテナに用いられている移相器がデジタル移相器であることによる量子化効果の現れである⁽¹⁴⁾。

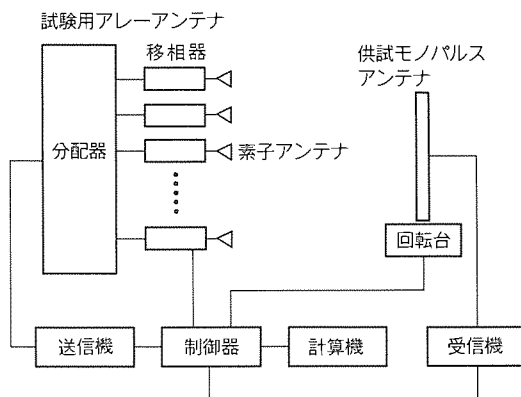


図10. 素子電界ベクトル回転法を応用した電波軸測定系のブロック図

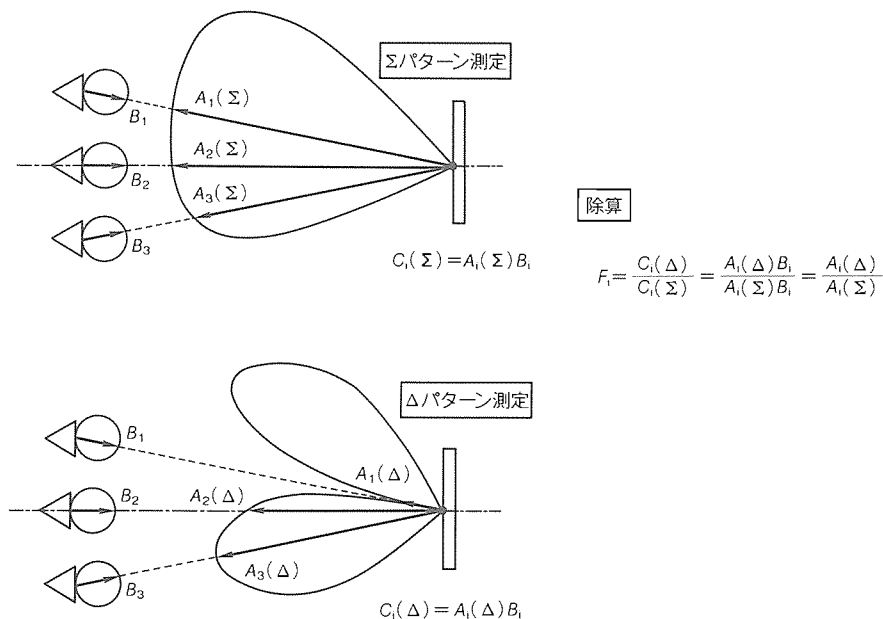


図11. 素子電界ベクトル回転法を応用した電波軸測定原理の概念

3. 大型展開アンテナの鏡面誤差の計測評価

大型展開アンテナのような衛星搭載用アンテナ⁽¹⁵⁾は、宇宙空間で使用されるために、無重力状態におけるアンテナの鏡面誤差及び電気特性の評価が必要となる⁽¹⁶⁾。ここでは、このようなアンテナの鏡面誤差の計測評価について示す。

3.1 測定法の原理

3.1.1 近傍界測定法

アンテナの開口分布の状態は、2.2.3項で述べたスキャナ装置等を利用してアンテナ近傍における電界分布を測定し、平面波展開などの演算処理をすることによって知ることができる⁽¹⁷⁾。近傍界測定法は、遠方界における放射特性を求める場合⁽¹⁸⁾だけでなく、アレーアンテナの励振分布⁽¹⁹⁾や反射鏡アンテナの鏡面誤差⁽¹⁶⁾を求めるためにも有効である。カセグレンアンテナ等の開口分布を測定する場合、反射鏡による本来の反射波に、一次ホーンの直接波が干渉して測定誤差となる。平面走査装置を用いて測定した近傍界の電界分布を、フーリエ変換を用いて異なる位置における平面内の電界分布に変換することによって、一次ホーンからの直接波を分離できる⁽²⁰⁾。この方法で、鏡面誤差を精度良く測定できる。

3.1.2 重力変形分離測定法

衛星搭載用アンテナを地上で評価する場合、重力による影響を受ける。ここでは、地上で無重力状態の評価が可能な重力変形分離測定法について示す。図14の座標系において、点 $P(r, \theta)$ における鏡面誤差がアンテナの回転角 ϕ に関して連続的に与えられる場合、鏡面誤差は ϕ に関するフーリエ級数で展開できる。アンテナの各点で同様に展開すると、鏡面誤差 $f(r, \theta, \phi)$ は次のようになる。

$$f(r, \theta, \phi) = a_0(r, \theta) + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n(r, \theta) \cos n\phi + b_n(r, \theta) \sin n\phi] \dots \dots \dots (22)$$

実際の測定では鏡面誤差が回転角に関して連続的ではなく離散的に得られ、式(22)の展開項数を有限項で打ち切る必要がある。アンテナの回転角を $0 \sim 2\pi$ の間で等角度にとり、直交性から式(22)の各係数が決定される。

この方法で、回転角によって変化しないアンテナ固有の鏡面誤差 $a_0(r, \theta)$ と測定系に固定した座標系に依存する鏡面誤差を分離できる。鏡面が回転対称である場合、重力による変形を線形とすると、鏡面の法線方向の変位の z 方向成分 δ は次のようになる。

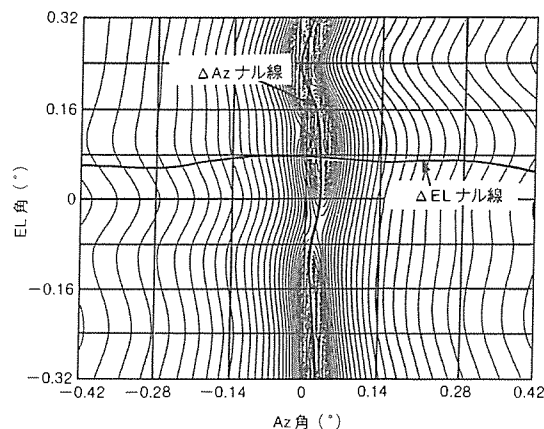
$$\delta = F(r, \theta) \cos \phi \dots \dots \dots (23)$$

したがって、重力による変形は、式(22)の $a_1(r, \theta) \cos \phi$ の項に対応させることができる⁽²¹⁾。

3.2 測定装置

図14のように、主ビームを軸としてアンテナを回転する回転台に被測定アンテナの開口を垂直に設定する。平面スキャナでプローブを走査してアンテナの近傍の二次元電界分布(振幅、位相)を測定し、演算処理によって適当な位置における平面内の電界分布に変換して鏡面誤差を求める。アンテナのビーム軸を中心として順次回転させた各状態で同様に測定する。各状態での測定データから、鏡面上の各点におけるフーリエ係数を求める。

3.3 測定結果



注 パターンの等高線表示は ΔAz パターンのみ

図12. 素子電界ベクトル回転法によるモノパルスパターン実測値(誤差補正前)

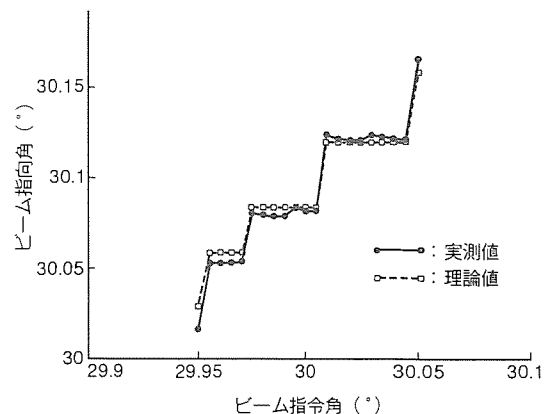


図13. 素子電界ベクトル回転法を応用した電波軸測定実施例

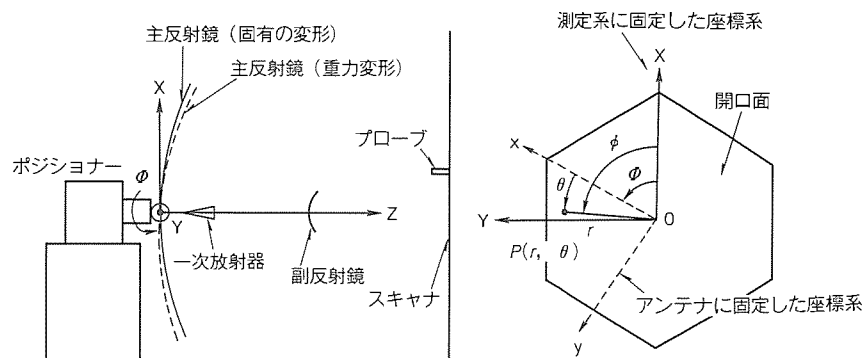


図14. 測定系

図15に示す軸対称形カセグレンアンテナ（開口2.5 m）を測定した結果を示す。測定条件は、周波数10 GHz、垂直偏波、測定範囲4,020 mm×3,540 mm、測定ピッチ30 mmである。図16、図17に測定電界分布とホーン開口に位置変換した電界分布の振幅、位相を示す。図から同心円状の分布が消え、ホーンの直接波、副反射鏡のエッジからの回折波が中心付近に集束し、ホーンからの直接波が分離されたことが確認できる。図18にアンテナを30°ずつ回転させ、計12回の

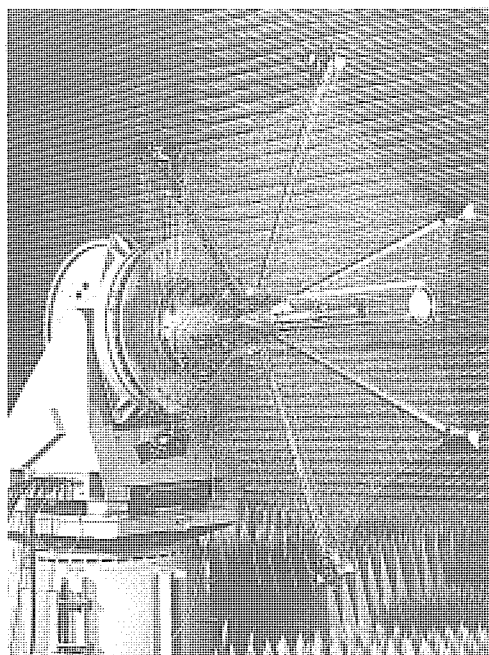
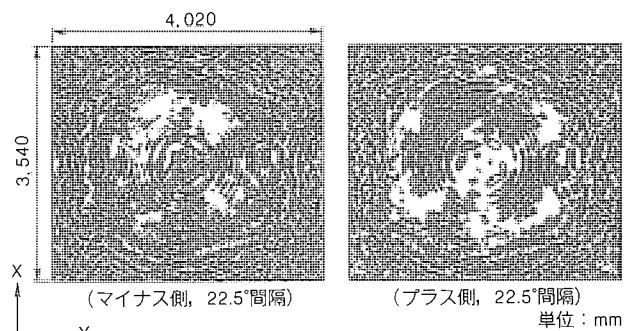
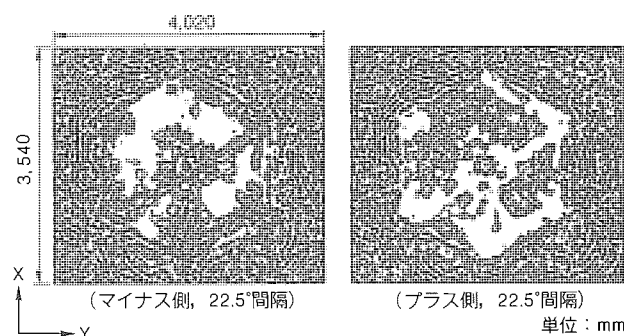


図15. アンテナの外観

測定から得られたフーリエ係数 a_0 、 a_1 の分布を示す。 a_0 はアンテナ固有の鏡面誤差であり、 a_1 は重力による変形量に対応する。図から鏡面のメッシュのたわみの様子がよく分かる。また、図19にセオドライトによる測定から同様にして得られた a_0 の分布を示す⁽²²⁾。これにより、両者は比較的良好に一致しており、分離評価が可能であることを確認できた。

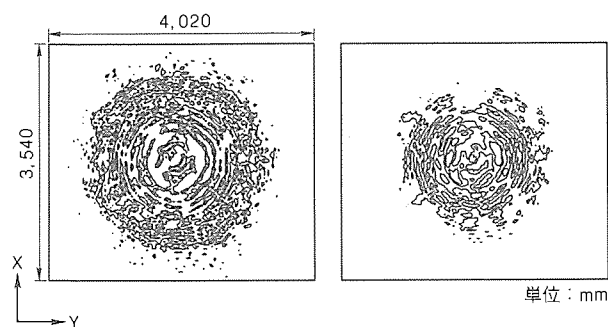


(a) 測定結果

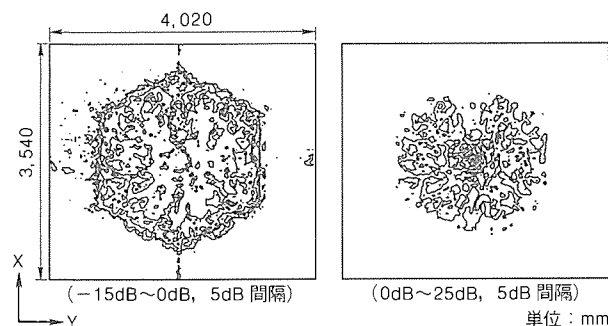


(b) ホーン開口に位置変換した結果

図17. 位相分布

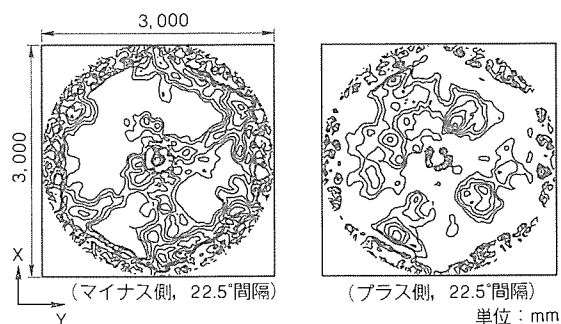


(a) 測定結果

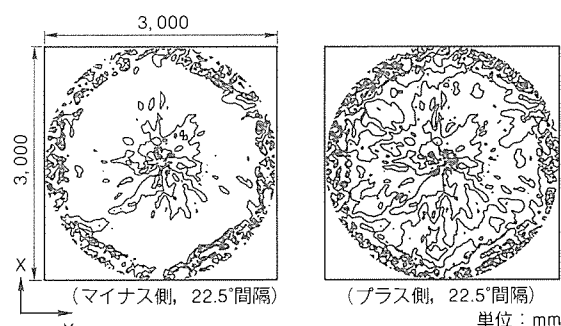


(b) ホーン開口に位置変換した結果

図16. 振幅分布



(a) $a_0(r, \theta)$ [アンテナ固有の鏡面誤差]



(b) $a_1(r, \theta)$ [重力変形に対応する係数]

図18. フーリエ係数

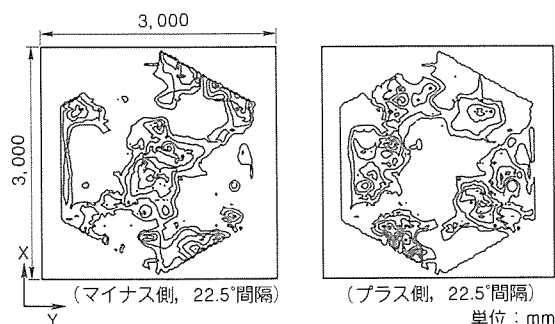


図19. セオドライトによる測定から得られた
アンテナ固有の鏡面誤差

4. む す び

フェーズドアレーアンテナ及び大型展開アンテナの計測評価技術及び計測ツールとしてのインフラを含む統合化計測システムの概要について紹介した。

これらの技術、インフラの蓄積、構築にはかなり長い歳月を必要としたが、実用できるものが構築できた。

終わりに、この技術開発及びインフラ構築の設計開発に際しなみなみならぬ御指導、御協力いただいた関係者に深謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) Mano, S., Katagi, T. : A Method for Measuring Amplitude and Phase of Each Radiating Element of a Phased Array Antenna, Trans IECE, Japan, J 65-B, No. 5 (1982)
- (2) 宇田川重雄, 春山鉄男, 折目晋啓, 大沢 茂: 大電力用電波吸収体の開発, 平成元年秋季信学全大, B-98
- (3) 宇田川重雄, 春山鉄男, 青木俊彦, 折目晋啓, 片木孝至: アンテナの近傍界測定システムの構成, 昭和63年秋季信学全大, B-73
- (4) 白松邦昭, 千葉 勇, 堤 隆, 折目晋啓, 真野清司, 片木孝至: 素子電界ベクトルの回転法のフェーズドアレーアンテナへの応用, 昭和62年信学全大, S 8-5
- (5) 白松邦昭, 北島耕一, 折目晋啓, 真野清司, 片木孝至: フェーズドアレーアンテナの近距離測定, 昭和59年信学全大, 734
- (6) 吉川幸広, 白松邦昭, 折目晋啓, 片木孝至: 素子電界ベクトル回転法を用いたフレネル領域による遠方界評価, 信学技報, AP 86-28
- (7) 千葉 勇, 白松邦昭, 近岡 繁, 折目晋啓, 真野清司, 片木孝至: 素子電界ベクトル回転法を用いたフェーズドアレーの近傍界測定法, 昭和59年信学全大光電波, 62
- (8) 千葉 勇, 真野清司, 片木孝至: 素子電界ベクトル回転法を用いたフェーズドアレーの近傍界測定法による遠方界評価, 昭和59年信学全大光電波, 63
- (9) 千葉 勇, 針生健一, 佐藤真一, 真野清司: アレーブローブ法によるフェーズドアレーのアレー素子指向性の近傍界測定, 信学技報, AP 89-9
- (10) 千葉 勇, 真野清司, 片木孝至: 素子電界ベクトル回転法における移相器の移相量誤差・損失変動の補正法, 昭和60年信学全大, 727
- (11) Ishii, R., Shiramatsu, K., Haruyama, T., Orime, N., Katagi, T. : A Built-In Correction Method of the Phase Distribution of a Phased Array Antenna, 1991 IEEE Antennas and Propagation, International Symposium Digest, 1144~1147
- (12) 田島 実, 井上正人, 折目晋啓, 片木孝至, 内野信二郎: モノパルスアンテナの2次元差パターン計測法, 平成2年信学全大, B-84
- (13) 針生健一, 千葉 勇, 鈴木龍彦, 片木孝至: 最適近似2次元差パターンによるナル点検出アルゴリズム, 平成3年信学全大, B-35
- (14) 鈴木龍彦, 津田喜秋, 田島 実, 内野信二郎, 井上正人, 片木孝至: モノパルスアンテナのNULL点測定システム, 平成3年信学全大, B-36
- (15) Miura, K., Yamamoto, K., Tanizawa, K., Tamai, Y., Ebisui, T., Katagi, T. : Development of a Precision Large Deployable Antenna, Proc. of ISAP '89, 1, 69~72 (1989)
- (16) 中条 渉, 伊藤猛男, 堀 義明, 手代木 扶: 近傍界測定技術を用いた衛星用メッシュ展開アンテナの鏡面精度測定, 信学技報 A・P 86-86, 81~86 (1986)
- (17) 蛭子井 貴, 中原新太郎, 佐藤真一, 真野清司: 近傍界測定法によるホーンアンテナの開口分布の測定, 昭和61年信学総全大, 650 (1986)
- (18) 手代木 扶: Near-Field Antenna Measurementの現状, 信学技報 A・P 78-14, 67~74 (1978)
- (19) 大久保 茂, 伊藤猛男, 堀 義明, 手代木 扶: 平面近傍界測定法によるアンテナの開口面分布の診断, 信学技報 A・P 87-33, 103~108 (1987)
- (20) 玉井保男, 出口博之, 蛭子井 貴, 片木孝至, 高野 忠: 近傍界の位置変換による反射鏡アンテナの開口分布の評価, 1991 信学春季全大, B-76 (1991)
- (21) 出口博之, 蛭子井 貴, 片木孝至, 三浦公亮, 高野 忠: 衛星搭載用アンテナの重力変形分離測定法, 1991 信学春季全大, B-77 (1991)
- (22) 田畑真毅, 出口博之, 井上登志夫, 三浦公亮, 高野 忠: 展開メッシュアンテナ鏡面変形の試験評価, 第35回宇宙科学技術連合講演会, 277~278 (1991)

“アンテナ技術特集に寄せて”
に関する主な発表論文

- (1) 喜連川 隆：マイクロ波アンテナとその諸問題，三菱電機技報，28，No. 12（臨時増刊），15～27（1954）
- (2) 尾島学二，喜連川 隆，信岡正祐，有田不二男：レイドームの設計および計測法と新製品の紹介，三菱電機技報，31，No. 7（臨時増刊），588～596（1957）
- (3) 喜連川 隆，信岡正祐，有田不二男，武市吉博：広帯域無指向性誘電体アンテナ，三菱電機技報，32，No. 7（エレクトロニクス特集），778～782（1958）
- (4) 喜連川 隆，森川 洋：富士山気象レーダ；レードーム，三菱電機技報，39，No. 4，561～567（1965）
- (5) 尾島学二，石黒克己，前田祐雄，喜連川 隆：ジェット機機首レードーム，三菱電機技報，34，No. 7，898～908（1964）
- (6) 玉真哲雄：三次元レーダについて（その一），三菱電機技報，45，No. 10，1373～1387（1971）；三次元レーダについて（その二），三菱電機技報，45，No. 11，1526～1541（1971）
- (7) 喜連川 隆，武市吉博，水沢丕雄，奥村 徹：列車用400 Mc 帯環状スロットアンテナ，三菱電機技報，35，No. 8，1195～1198（1961）
- (8) 喜連川 隆，武市吉博，水沢丕雄，阿部 修，大林愛弘：東海道新幹線400 Mc 帯指向性埋込み形アンテナ，三菱電機技報，38，No. 3，488～491（1964）
- (9) 岸本利彦，武市吉博，横山保憲，小野 誠，沼崎 正：全国新幹線網漏えい同軸通信方式用400 MHz 帯列車アンテナの試作，三菱電機技報，48，No. 7，836～840（1974）
- (10) 喜連川 隆，武市吉博：高速航空機用埋込み形アンテナと諸問題，三菱電機技報，34，No. 7，898～908（1960）
- (11) 喜連川 隆，武市吉博，水沢丕雄，平岡敏也，浜口道雄，大林愛弘：航空機用VHF 帯小型広帯域ブレードアンテナ，三菱電機技報，36，No. 3，436～440（1962）
- (12) 喜連川 隆，武市吉博，水沢丕雄，小野 誠：航空機用VHF 帯1/8 波長広帯域ブレードアンテナ，三菱電機技報，39，No. 8，1013～1015（1965）
- (13) 喜連川 隆，武市吉博，水沢丕雄，平岡敏也，浜口道雄，太田堯久：航空機用VHF 垂直尾翼埋込み形アンテナ，三菱電機技報，35，No. 12，1679～1684（1961）
- (14) 喜連川 隆，武市吉博，水沢丕雄，桂川 弘，大林愛弘：自動車用400 MHz 帯高利得アンテナ，三菱電機技報，37，No. 4，539～542（1963）
- (15) 喜連川 隆，武市吉博，小野 誠，川上 昭：自動車用ユニポール・ループ複合アンテナ，信学会アンテナ研資（1965）
- (16) 山田吉英，奈良武治，亀尾秀司，茶谷嘉之，阿部 久：ビーム幅可変コーナリフレクタアンテナ，昭61 信学会全大，694（1986）
- (17) 船川謙司，中橋信弘，梶川 実，渡辺 優，遠藤義昭，角谷桂一，岡田東亜，川上国彦，別段信一：電離層観測衛星管制施設，三菱電機技報，47，No. 3，281～291（1973）
- (18) 進士昌明，島田禎晉，片木孝至，武田文雄，橋本 勉，小野 誠，武市吉博，近藤五郎：国内通信衛星用整形ビームホーンリフレクタアンテナシステムの試作，信学論，57-B，No. 6，353～360（1974）
- (19) 蛭子井 貴，片木孝至，水沢丕雄：フレアアイリス形円偏波複モードホーンアンテナ，信学論，62-B，No. 12，1109～1115（1979）
- (20) Miura, K., Yamamoto, K., Tanizawa, K., Tamai, Y., Ebisui, T., Katagi, T. : Development of a Precision Large Deployable Antenna, Proc. ISAP '89, 1B3-1（1989）
- (21) 喜連川 隆：宇宙通信用アンテナ，信学誌，47，No. 10，1523～1532（1964）
- (22) 山口衛星通信所第2 施設の速報，国際通信の研究，No. 110，641（1981）
- (23) 島田禎晉，小山正樹，進士昌明，森川 洋，西村昭三，竹内政和，塚田憲三，別段信一，水沢丕雄，橋本 勉：横須賀衛星通信実験所用アンテナ系，三菱電機技報，48，No. 7，819～829（1974）
- (24) 赤羽賢司，片木孝至，石井康一，滝沢幸彦，尾形良征：45 m 電波望遠鏡，三菱電機技報，56，No. 7，494～498（1982）
- (25) 北條博史，佐藤 亨，深尾昌一郎，木村磐根，徳丸 仁：MU レーダアレイアンテナの放射特性，信学技報，A. P81-52，（1981）
- (26) 林 友直，広沢春任，別段信一，倉藤 康，岡田東亜：深宇宙探査用大型アンテナ設備，三菱電機技報，59，No. 9，620～624（1985）
- (27) 喜連川 隆：衛星通信用アンテナの進歩，国際衛星通信時代，22（1990）

残額印字式プリペイドカードシステム

外山 肇* 小村 明** 山田敬喜*** 岩井滋雄+ 荒巻 淳+

1. ま え が き

プリペイドカードとは、テレホンカードに代表される“代金前払い式カード”のことである。テレホンカードの爆発的普及により、その利便性が示されたプリペイドカードは、他の業界にも広がりを見せ、現在では交通機関の切符購入用カード（オレンジカードなど）や百貨店、スーパーマーケットなどのショッピング用カードに至るまで、多くの業界で新しい決済の手段として着実に普及し始めている。

三菱電機(株)では、このニーズにこたえるべく、平成元年に(株)コムネスと共同でショッピング用のパンチ式（残額の目安としてカードにパンチ孔をあける。）プリペイドカードシステムを開発し、全国のユーザーへ多数納入してきた。

最近では、カードの残額を正確に把握するためにカード自体にその残額を印字するシステムへのニーズが急速に高まっている。そのため、今般、残額印字式のプリペイドカードシステムを開発した。

このシステムの特長として

- 三菱電機(株)独自の情報セキュリティ技術を駆使した高度なセキュリティ性の実現
- システム全体にわたるオンライン化の実現
- プリペイドカード以外にスタンプカードにも対応可能
- 鮮明で耐環境性に優れた印字品質の実現

が挙げられ、スーパーマーケット、ホームセンターなどの物販業界をメインマーケットとしている。

本稿では、残額印字式プリペイドカードシステム開発のポイント、構成、機能などについて紹介する。

2. 開発のポイント

2.1 システム全般

(1) パンチ式システムとの互換性確保

パンチ式システム導入済のユーザーが、残額印字式への移行をスムーズに行えるようパンチ式システムとの互換性を確保する。すなわち、発行済のパンチ式カードが残額印字式端末機でも利用可能とする。

(2) スタンプカード機能の付加

スタンプサービスとは、利用者が利用代金に応じたスタンプ点数をスタンプ台帳などに蓄積していき、物品・サービス提供者が蓄積された点数相当のサービス又は商品を利用者に供与する仕組みのことである。このサービスは、流通業界で

顧客管理・顧客へのサービス向上の目的で以前から行われている。

この開発では、この仕組みをスタンプ台帳などの替わりに磁気カードを用いて実現する。

2.2 カード端末機

(1) 鮮明で耐環境性に優れた印字の実現

プリペイドカードへの印字は、正確な残額を把握するための鮮明な印字品質と、不正・偽造を防止するための優れた耐環境性が要求される。したがって、この開発ではこれらを満足する印字方式を実現する。

(2) コンパクトサイズの確保

端末機は店頭のレジ付近に設置されるため、コンパクトなサイズが要求される。そのため、端末機内部のリーダライタユニットはパンチ式と比較して大型化するが、端末機自体はその増加分を極力設置に影響の少ない高さ方向にとどめ、コンパクトなサイズ（130×425×281（mm））を確保する。

(3) メンテナンス性の向上

メンテナンス性の向上を図るため、次の対策を施す。

- 回路基板のプラグイン構造化
- ねじ止め箇所の削減
- 端末機内につまったカードの容易な取出しの実現
- ヘッドクリーニング機能のサポート
- 再印字、再パンチ機能などのサポート

3. 残額印字の各方式評価

3.1 印字方式の比較

カードへの印字方式として、以下の方式が考えられる。

(1) ドットインパクト方式

活字又はドットワイヤの機械的な衝撃力によってインクを転写する方式。

(2) 熱転写方式

熱溶解性インクを塗布したインクリボンと記録媒体を圧接し、加熱によって印字を定着させる方式。

(3) 感熱自己発色方式

記録媒体に発色染料が塗布されており、加熱によって染料自体が発色する方式。

(4) 感熱破壊方式

記録媒体磁気層の上に金属薄膜層（すず）が施されており、加熱によって金属薄膜層が破壊され、下地磁気面の色（黒）を露出させる方式。

なお、各方式の印字原理を図1に、比較表を表1に示す。

3.2 本開発での印字方式

プリペイドカードシステムに要求される印字特性としては、次の項目が挙げられる。

- 耐環境性に優れている。
- 印字が鮮明である。
- カード、装置が低コストである。
- 装置の小型化が可能である。
- カード裏面（磁気面）への印字が可能である。
（表面はフリーデザインとする。）
- インクリボンをなくし、保守を容易とする。

以上の項目のうち、特に耐環境性及び印字の鮮明さを重視し、この開発ではこれらに優れた感熱破壊方式を採用した。
 なお、製品化に当たっては、印字評価機による印字特性評

価を実施し、最適印字条件（印加エネルギーなど）の抽出を行った。図2に評価結果の一例を示す。

4. システムの構成と機能

4.1 全体システム構成

図3にこのシステムの全体システム構成を示す。このシステムは、カードの発行・利用にかかわるデータをホストコンピュータで一元管理するとともに、カード発行装置・データ収集装置でも効率的な分散処理が行える階層型のシステム構成としている。

4.2 各装置の構成と機能

4.2.1 ホストコンピュータ

ホストコンピュータは、カード発行データやカード利用データを収集し、これらを管理するとともに、カード発行者と

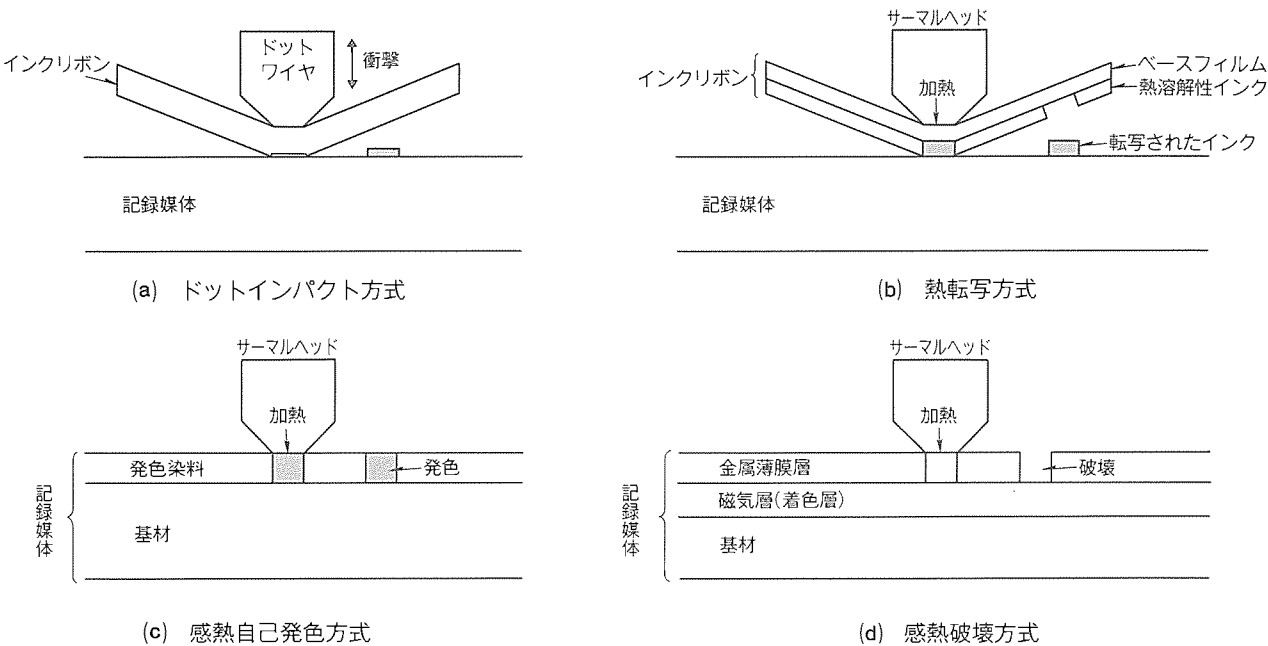


図1. 印字原理

表1. 印字方式の比較

	ドットインパクト方式	熱転写方式	感熱自己発色方式	感熱破壊方式
印字品質	普通	良い	良い	非常に良い
磁気面への印字	不可	可能	可能	可能
カードコスト	安い	普通	普通	やや高い
インクリボン	必要	必要	不要	不要
騒音	大きい	小さい	小さい	小さい
耐環境性	耐熱性	良好	悪い	非常に良い
	耐可塑性	良好	普通	非常に良い
	耐溶剤性	良好	普通	非常に良い
	耐光性	良好	普通	非常に良い
	耐湿性	良好	普通	非常に良い
主な利用分野	OA用プリンタ 事務伝票用機器	ワードプロセッサ カラープリンタ 定期券	ファクシミリ	プリペイドカード

物品・サービス提供者との決済処理などを行う機能を持っている。

システムの運用を依頼する場合は、ホストコンピュータとして(株)コムネス所有の汎用コンピュータ“MELCOM EX 830”を利用する。

なお、システム運用をカード発行者独自で行う場合には、“MELCOM EX830”の代わりに、AX パソコン“MAXY”を利用することも可能であり、中小規模のカード発行者がシステムを導入しやすいようにしている。

4.2.2 カード発行装置

カード発行装置は、AX パソコン“MAXY”，発行用端末機及びプリンタ装置から構成される。

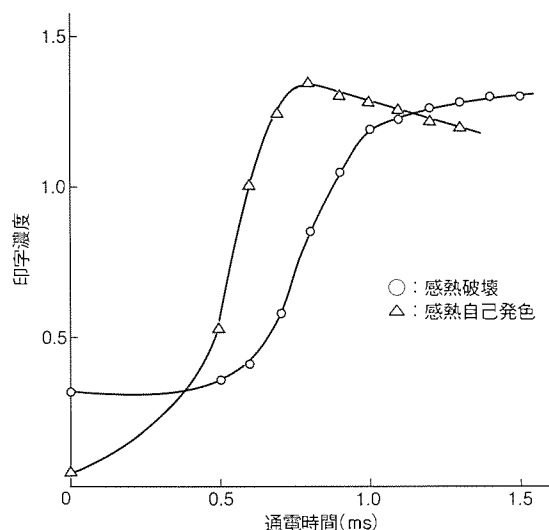


図 2. 通电時間と印字濃度の関係

発行用端末機には、連続式と手差し式の 2 機種があり、任意選択が可能である。連続式発行機の外観を図 4 に、主な仕様を表 2 に示す。

カード発行装置の主な機能は以下のとおりである。

- 発行するカードデータの登録
- カード発行 (磁気エンコード及び印字)
- カード発行データのプリント印字
- カード発行データのホストへの送信

4.2.3 データ収集装置

データ収集装置は、AX パソコン“MAXY”，通信処理装置 (最大 4 回線同時通信可能) 及びプリンタ装置から構成される。なお、データ収集装置 1 台につきカード端末機が最大 256 台接続可能である。

データ収集装置の主な機能は以下のとおりである。

- 接続するカード端末機の登録
- カード端末機への利用可能カードデータダウンロード
- カード端末機のカード利用データ収集
- 収集データのプリント印字
- 収集データのホストへの送信

4.2.4 カード端末機

今般開発したカード端末機“MCT 2250”は、単独で動作可能なようにキーボード・店員用表示部、ジャーナル印字部を備え、またデータ収集装置との通信のためのモデム、NCU を標準装備したスタンドアロン型の端末機である。さらにオプションで客用表示器や暗証番号入力器が接続可能である。カード端末機の外観を図 5 に、主な仕様を表 3 に示す。

カード端末機の主な機能は次のとおりである。

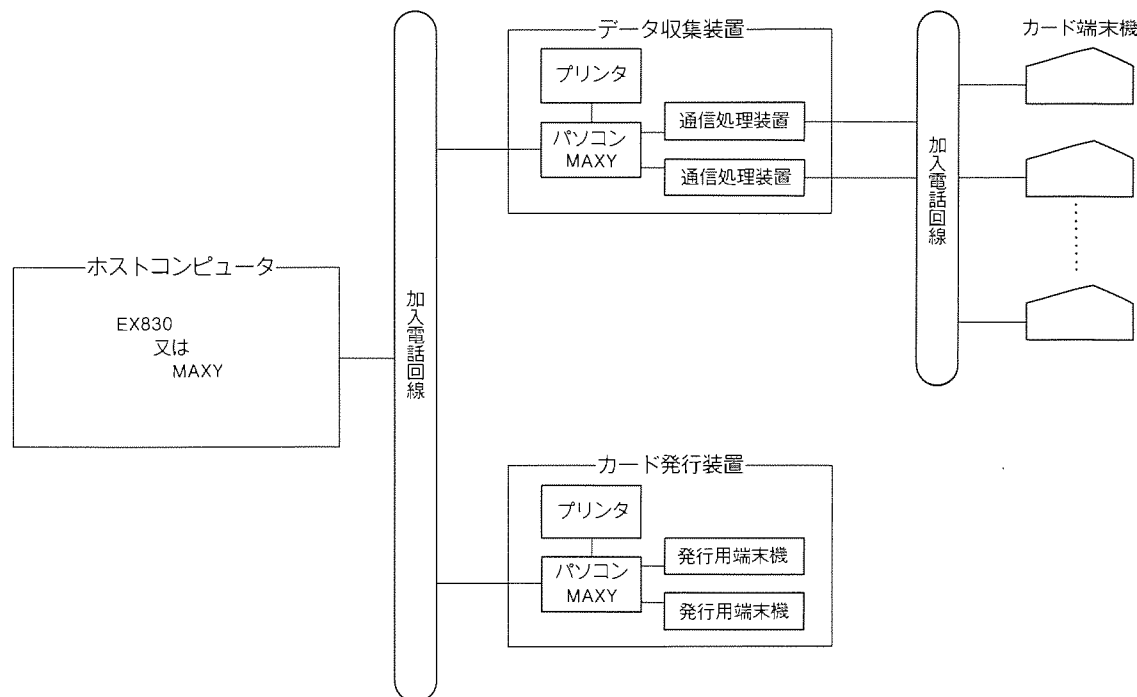


図 3. 全体システム構成

(1) 初期化機能

端末番号やデータ収集装置側電話番号を設定の上、データ収集装置と通信を行うことにより、利用可能なカード情報や事故カード情報がダウンロードされ、カード端末機が利用可能な状態となる。

(2) カード発行機能

カード端末機でカードの発行処理ができる発行モードを持っている。カード発行に際しては、利用可能金額やカード番号などの情報が既にエンコードされたカードを使用可能な状態にするとともに、発行日や発行端末機番号がカードに印字される。また、顧客番号を入力し、カード上に磁気エンコード及び印字することも可能である。

(3) プリペイドカード利用機能

基本機能は、利用代金を入力の上、プリペイドカードをカード端末機に挿入すると、カードの残額から利用代金分が引き落とされ、カード裏面に利用月日と新しい残額が印字されるものである。なお、1枚のカードには利用36回分まで印字が可能である。

利用が36回を超え印字エリアが不足した場合の対処方法として、以下2通りの方法をサポートし、ユーザーの選択が

可能である。

- (a) 残額を別の繰越専用カードに引き継ぐ方法
 - (b) 印字エリア不足以降は印字を行わずに、残額目安をパンチ孔のみで示す方法
- (4) スタンプカード利用機能

(a) スタンプ点数加算機能

利用代金に相当したスタンプ点数 (例えば100円につき1点) が利用前点数に加算され、かつ加算後点数に相当したマーク (*印) がカード裏面に印字される。なお、カードには満点点数が設定しており、点数が満点となるまで加算可能である。なお、加算点数が満点になると、カード裏面に“マンテン”と印字される。

スタンプ1点に相当する利用代金、印字するマーク1個に相当するスタンプ点数及び満点点数は、カードごとに任意設定が可能である。

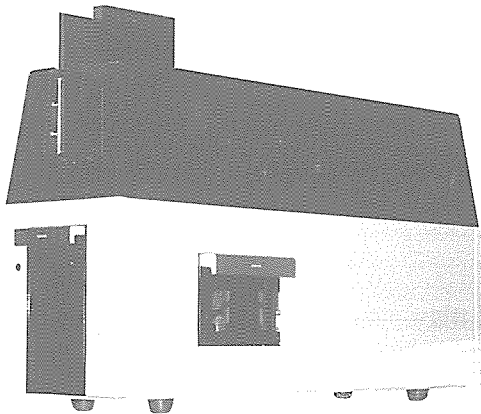


図4．連続式発行機の外観



図5．カード端末機の外観

表2．連続式発行機的主要仕様

制御部	CPU	16ビット マイクロプロセッサ
	ROM	256K バイト
	RAM	128K バイト (バッテリバックアップ付き)
表示部	電源	LED (緑)
	エラー	LED (赤)
リーダライタ	磁気エンコード	あり
	印字	あり (感熱破壊方式)
カード収納部	ホッパ容量	500枚
	OK ストッカ 容量	500枚 (エレベータ付き)
	NG ストッカ 容量	100枚
外部インタフェース	RS-232C	1 チャンネル
電源		AC100V ± 10%, 周波数50/60Hz
環境条件		温度 5 ~ 35℃, 湿度30 ~ 90% RH (結露なきこと)
外形寸法 (mm)		170 (W) × 580 (D) × 335 (H)

表 3 . カード端末機の主な仕様

本体	制御部	CPU ROM RAM	16ビット マイクロプロセッサ 256K バイト 128K バイト(バッテリーバックアップ付き)
	店員表示器	素 子 表示文字 表示文字数	LCD 英数字, かな, カナ, 特定漢字 7 文字×3 行(カード残額, 利用代金, 差引残額)
	キーボード	23キー	0～9, 小計, カード, 現金, 発行, 精算, 取消など
	キースイッチ	設 定 特 殊 通 常 集 計 発 信	スタンプ倍率の設定 ヘッドクリーニング, 再印字, 再パンチなど カード利用 カード利用データの集計 カード利用データの送信
	リーダライタ	印字方式 印字文字 印字文字数 パンチ	感熱破壊 英数字, カナ, 記号 27文字×20行 残額の目安をパンチ(最大11個)
	ジャーナル プリンタ	印字文字 印字文字数	英数字, カナ 24文字/行
	外部 インタフェース	RS-232C 公衆回線	1 チャンネル 1 チャンネル (NCU, モデム内蔵)
オプション	テンキーパッド	—	暗証番号入力用キー(0～9, *, 訂正)
	客用表示器	素 子 文字数 回転角度	LED(緑) 7 セグメント 7 数字 約300°
その他	電 源		AC100V±10%, 周波数50/60Hz
	環境条件		温度 5～35℃, 湿度30～90%RH(結露なきこと)
	本体外形寸法(mm)		130(W)×425(D)×281(H)

(b) スタンプ点数精算機能

“精算”キーを押下の上、満点となったスタンプカードを挿入すると精算処理が行われる。カード裏面には“セイサンズミ”と印字され、かつパンチ孔があげられるので、そのカードは再利用が不可能となる。

精算処理により、利用者には物品・サービス提供者から精算した点数相当分のサービス又は商品が供与される。

(5) データ集計機能

カード端末機ではカード発行・利用 1 件ごとの詳細データをメモリに記録しているので、集計操作を行うことにより、カード発行・プリペイド利用・スタンプ利用それぞれの集計データ(件数及び金額)がジャーナルに印字される。

(6) データ送信機能

送信操作を行うと、端末機内のメモリに蓄積されているデータ(最大1,000件)が加入電話回線を介してデータ収集装置に送信される。

(7) メンテナンス機能

カード処理中の停電などの影響によるバックアップ対策として、カードへの再印字・再パンチ・再ジャーナル印字機能を持っている。また、専用のクリーニングカードを用いるヘッドクリーニング機能も持っている。

4.2.5 カ ー ド

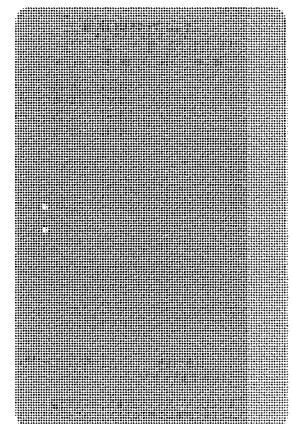
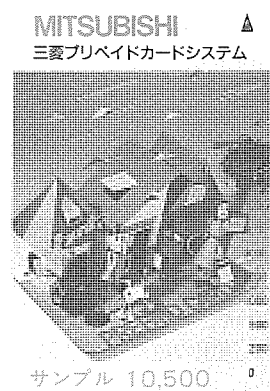


図 6 . カードへの印字例

表 4 . カードの主な仕様

材 質	乳白ポリエステル(厚さ188μm)	
形 状	短辺方向	54.0 mm
	長辺方向	85.6 mm
	厚さ	0.22 mm
	角	R3.0 mm
磁気特性	抗磁力	218×10 ³ A／m {2,750 Oe}
	角形比	0.8 以上
印字方式	感熱破壊方式	

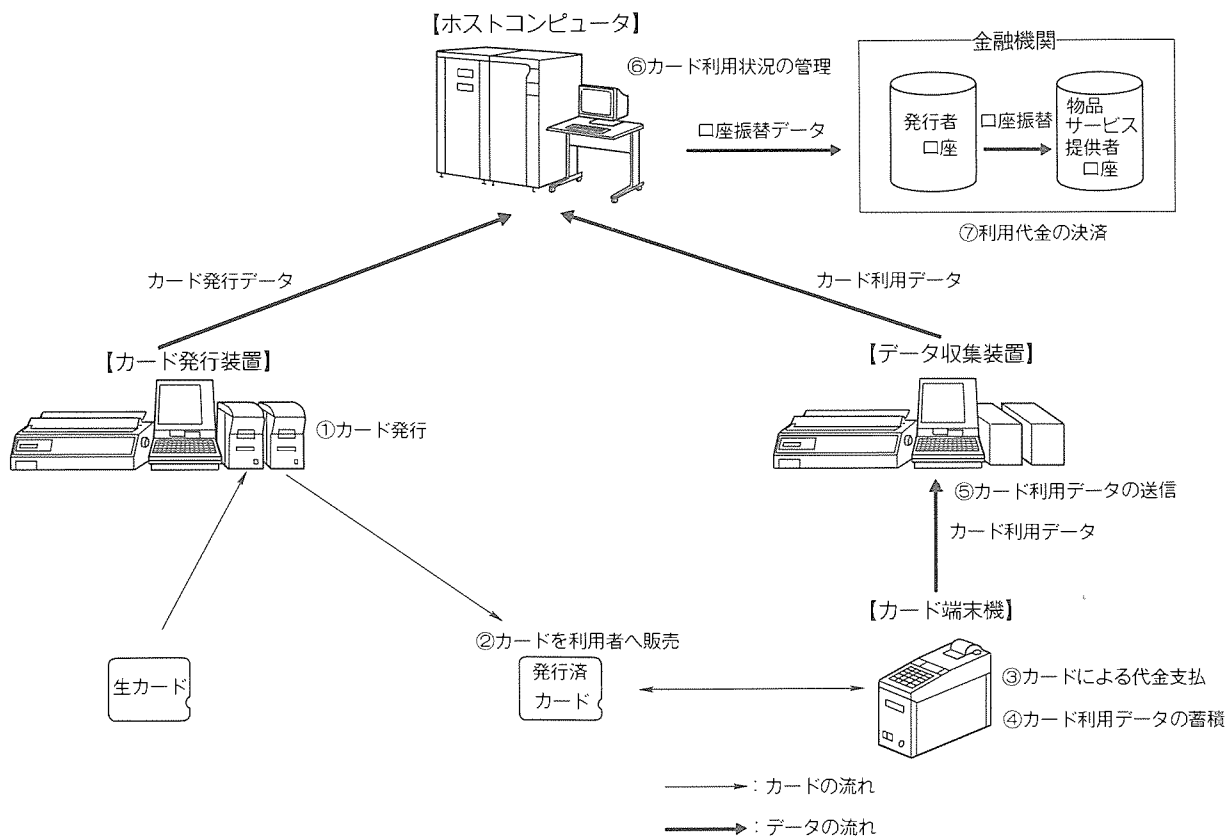


図7. システム運用の流れ

このシステムで使用されるカードは、耐久性に優れたポリエステル基材と、高保持力磁気記録層・感熱破壊印字のための金属薄膜層などで構成される。カードへの印字例を図6に、主な仕様を表4に示す。

5. システムの運用方法

プリペイドカードシステムの運用では、法制面（“前払式証票の規制等に関する法律”）で販売されたカードの未使用残高を把握することが義務づけられているため、カードの発行状況や利用状況を正確に管理する必要がある。このシステムでは、この観点から運用の効率化が図れるようシステム全体をオンライン化している。システム運用の流れを図7に示す。

図7に示すとおりプリペイドカードの運用では、カードの発行、利用データの収集や決済など様々な業務が発生するため、1ユーザーがすべての運用を行うことは困難となる場合も多い。そこで、(株)コムネスがシステム運用にかかわる業務を代行する運用サポート体制を提供している。これを利用することにより、ユーザーはカード端末機のみを導入するだけで手軽に運用を開始することが可能である。

残額印字式システムの第1号として、平成3年4月から青森県を拠点とするホームセンター・(株)サンデーが運用を開始した。(株)サンデーは当初、八戸市内の4店舗で試運用を行い、現在では東北県下21店舗に利用範囲を拡大している。なお、カードの発行や売上データの収集などの運用業務は(株)コムネスが代行している。

6. むすび

今回開発したシステムの納入先である物販業界は、激しい顧客争奪戦を繰り広げている。こうした中で、顧客へのサービス向上・顧客の固定化の観点から、プリペイドカードやスタンプカードは経営戦略上の大きなポイントとなっている。したがって、このシステムは経営戦略上又は販売促進用のツールとして、ますます広まっていくことが予想される。

さらに、今後の動向として、プリペイドカードやスタンプカード以外の新しいアプリケーションが生まれ、カードシステムはより多様化していくものと思われる。我々は今後も市場のニーズに応じたシステムづくりを更に推進していく所存である。

愛知県企業庁納め

東三河水道事務所無線テレメータ設備

鈴木敏明* 吉原秀樹* 内藤茂之* 三木次美*

1. ま え が き

水道事業は、水道法で飲用に適する、清浄にして豊富低廉な水を需要者に供給することが目的とされている。このため、水道事業体は水量・水質・水圧を維持できるように水道施設を運転管理している。

日本全体で水道を利用している人口は、平成元年度で総人口の94.4%，水道の給水量は約162億m³で年々増加している。水道は高普及時代を迎え、より安定で安心できるおいしい水の供給に向けた“高水準の水道”を目指している。また、水道事業は水道料金の収入で施設を建設し、経営していくという独立採算制を建前としている。このため、水道の建設単価や人件費の増大による水のコスト上昇に伴い、数年ごとに料金改定が実施される。このため、料金改定に伴う複雑な料金計算等の業務を効率化する要求が出てきている。

ここで紹介する愛知県企業庁東三河水道事務所納め無線テレメータ設備は、浄水場から水道用水供給点までの広域に散在する水道施設を、一元管理して収集したデータを基に、施

設の集中管理と事務所業務の効率化を図ったものである。

このシステムの特長は次のとおりである。

- (1) 調整池の緊急遮断弁の作動時に、調整池間の連絡管電動弁の連絡弁自動制御機能
- (2) 収集データを基にしたオンライン処理による事務所業務の効率化
- (3) 事務所から各浄水場へのデータオンラインサービスによる事務の合理化
- (4) バックアップ機能の充実によるシステムの信頼性向上
- (5) ユーザーメンテナンス機能及び高機能 CRT による操作性・保守性の向上

2. 東三河水道事務所の概要

東三河水道事務所は、水道用水供給事業体である愛知県企業庁の5箇所の水道事務所の一つである。愛知県の東部、東三河平野から渥美半島にわたる豊橋市を含む4市7町の受水団体に水道用水を供給している。平成2年度の給水人口は約67万人、年間総給水量は約5,300万m³、1日最大給水量は

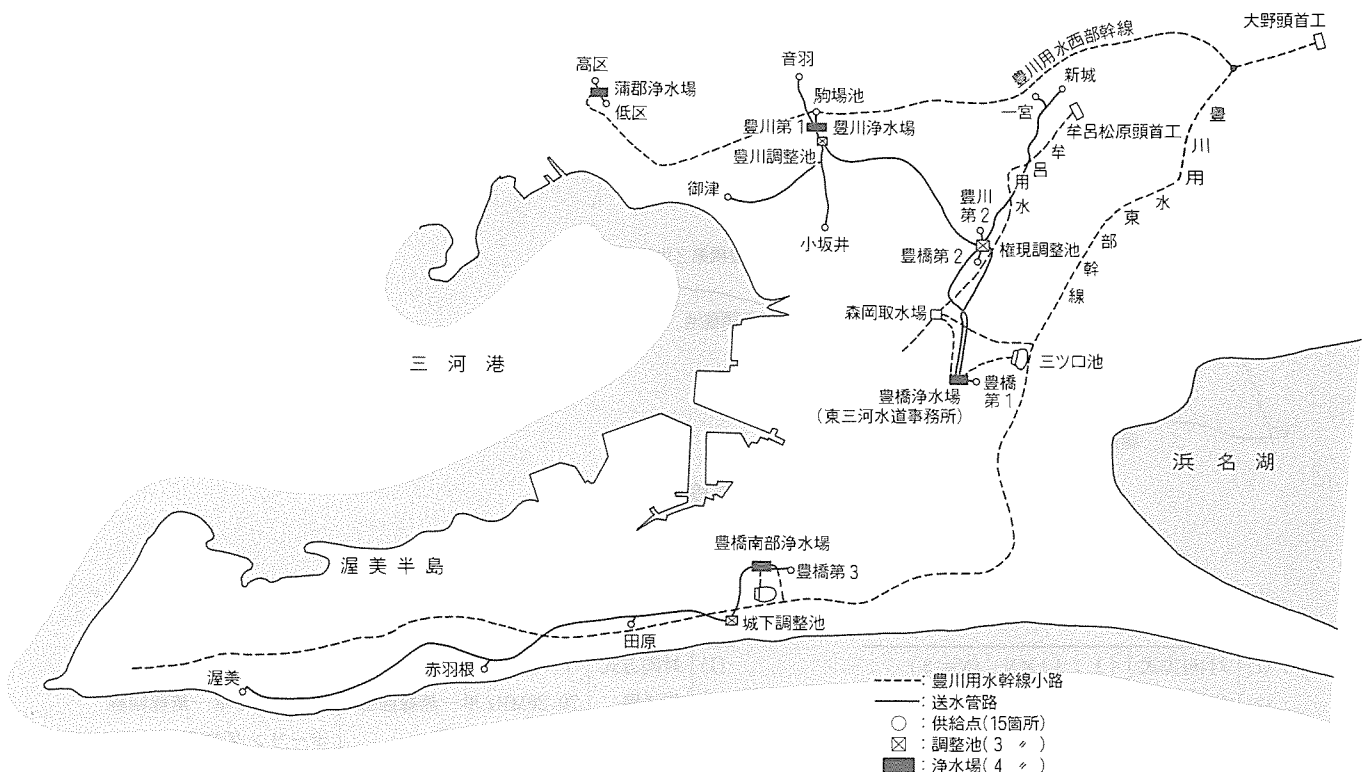


図1. 東三河水道管路

約20万m³である。

東三河水道事務所管内の施設として、4箇所の浄水場、3箇所の調整池、15箇所の供給点がある。4箇所の浄水場の施設能力合計は、1日最大給水量276,700m³である。その管路を図1に示す。

各施設は、豊川用水東部幹線・西部幹線及び牟呂用水を水源とする取水場・浄水場の水量・水質・水位の管理、及び管内の調整池の水位管理を各浄水場で行っている。供給点の給水量・水圧・水位は事務所で管理している。給水量は各浄水場でも管理データの一つとして取り扱っている。

3. システムの構成

(1) 回線構成

事務所と蒲郡・豊川・豊橋南部の3浄水場間をそれぞれ2GHzの多重無線回線で接続し、常時伝送方式で処理データの転送を行っている。

事務所及び豊橋南部浄水場と無線テレメータ子局（供給点、調整池）間は、70.26MHzの単一无線回線で結び、ポーリング方式でデータを収集している。回線構成を図2に、伝送方式を表1に示す。

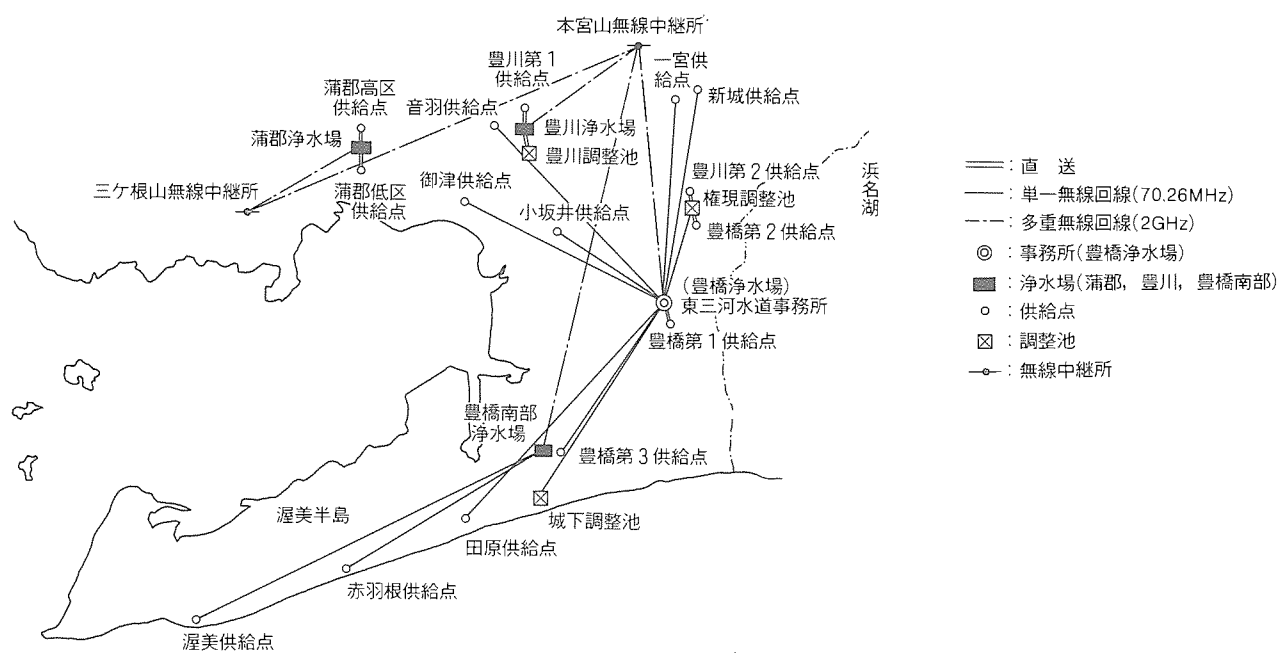


図2. 無線回線の構成

(2) ハードウェア構成

システム構成を図3に示す。各局ごとのハードウェア構成及び概略機能を表2に示す。

東三河水道事務所のシステム制御操作卓及び総合操作卓の外観を図4に、漢字プリンタ及びカラーハードコピー装置の外観を図5に示す。また、データ入出力の種類を表3に示す。

4. システムの特長

4.1 異常時の連絡弁自動制御

調整池は浄水場と供給点との間にあり、供給点に対する給水量の確保を行っている。また、調整池間で渇水・災害時等緊急時の水の融通を図るために、調整池間に連絡管及び連絡弁を設けている。大地震により、2箇所の調整池の緊急遮断弁が同時に動作したとき、事務所から2箇所の調整池の連絡弁に対して、同時に自動全閉制御を行う。これにより、調整池の二次災害防止と水の確保を図る。緊急遮断弁、連絡弁の位置を図6に示す。

4.2 事務所業務の効率化

これまで水道料金計算や各種水量帳票の作成用データとして、テレメータの収集データを使用し、手作業で計算機にイ

表1. 伝送方式

(a) 事務所と各浄水場

(1)	対向方式	(1 : 1) × N (N = 3)
(2)	伝送路	2GHz 多重無線回線
(3)	伝送方式	HDLC 方式 LAPB
(4)	符号方式	HDLC 方式準拠
(5)	伝送速度	9,600ビット/秒(全二重)

(b) 事務所と各 TM 子局 豊橋南部浄水場と TM 子局

(1)	対向方式	1 : N (N = 9)	1 : N (N = 2)
(2)	伝送路	70.26MHz 単一无線回線	70.26MHz 単一无線回線
(3)	伝送方式	ポーリング方式	ポーリング方式
(4)	符号方式	電気学会44ビット方式	電気学会44ビット方式
(5)	伝送速度	1,200ビット/秒	1,200ビット/秒

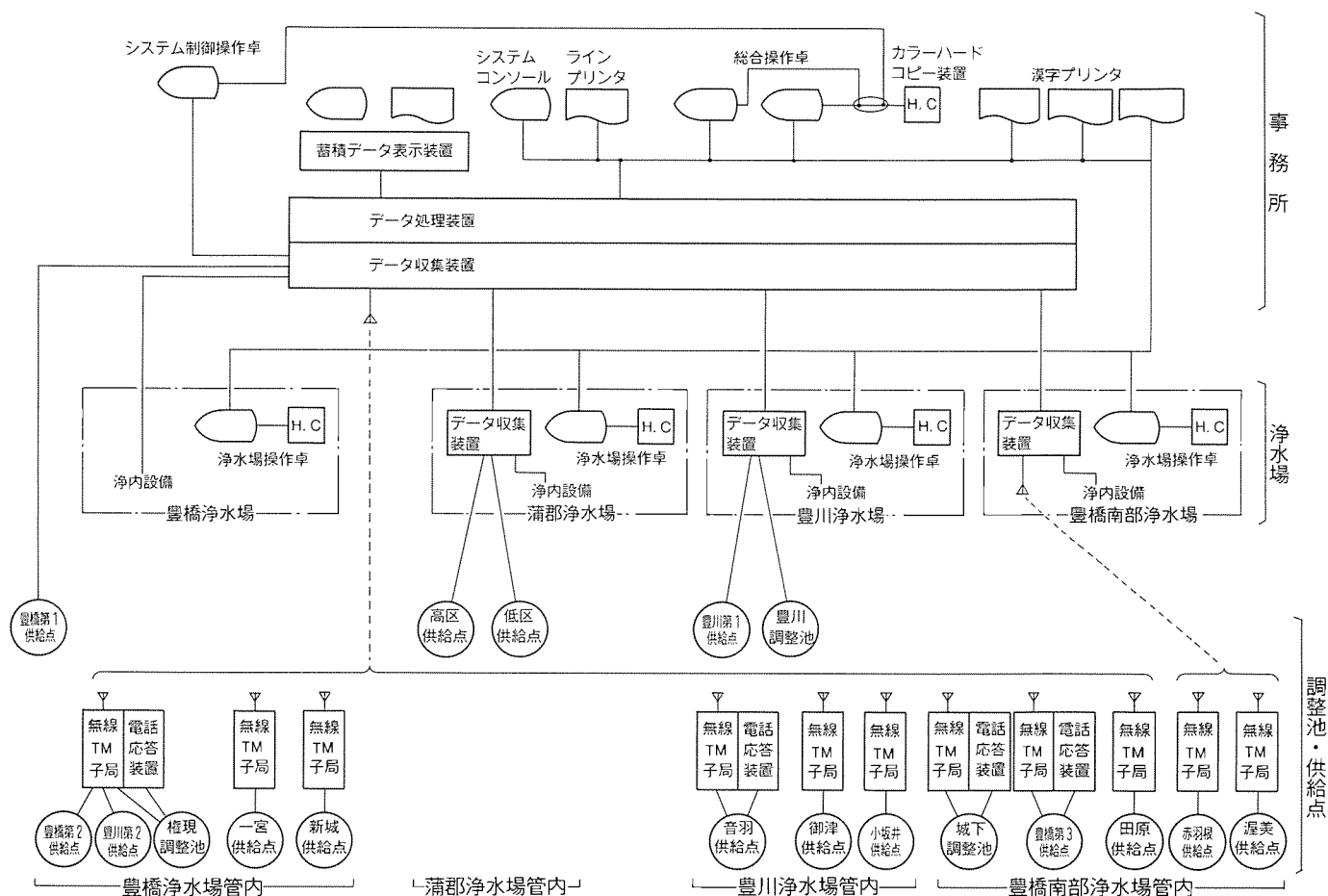


図3. システム構成

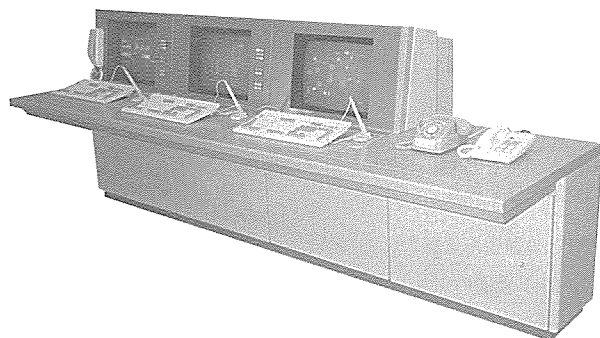


図4. 東三河水道事務所の操作卓

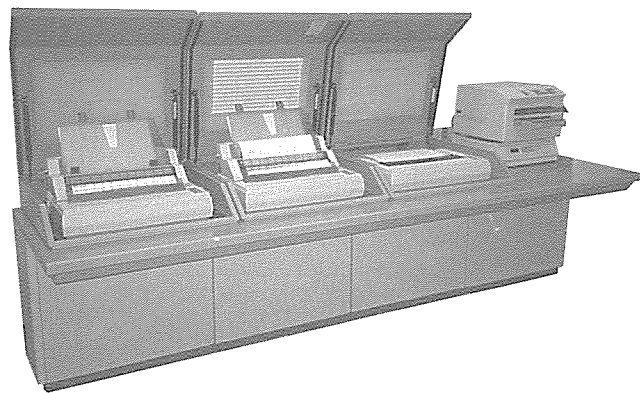


図5. 東三河水道事務所のプリンタ卓, ハードコピー装置

ンブットしていた。今回、収集データを基に複雑な水道料金計算及び各種水量帳票作成のオンライン処理の導入により、事務所業務の効率化を図ることができた。水道料金の計算式を図7に、基礎水量暫定表のCRT表示形式を図8に、調整基本料金のCRT表示形式を図9に示す。また、一例として月別給水量のデータ処理概念を図10に示す。

4.3 浄水場へのデータサービス

処理データを事務所から各浄水場へサービスすると同時に、浄水場からもデータファイル等をアクセスできる。これによ

り、電話とFAXによって毎日行っていた水量報告作業が、オンライン処理で行えるようになり、事務所及び各浄水場での事務作業の効率化を図ることができた。浄水場操作卓からのCRT表示画面種類を表4に示す。

4.4 高信頼度化

下記バックアップ機能により、システム全体としての信頼性向上を図った。

(1) 無線機及びコントローラの二重化

東三河水道事務所及び豊橋南部浄水場の無線機(送信機・

受信機)の二重化, 東三河水道事務所のデータ収集装置のCPU二重化による信頼性向上を図った。CRT画面のシステム監視制御を図11に示す。

(2) データ収集装置でのデータ保存

東三河水道事務所のデータ収集装置で, 水量・水質・水位等の計測データ, 及び給水量のカウント値の5分ごととデータ7日分をバックアップデータとして保存している。データ処理装置がダウンし復旧時に, 自動的にデータ収集装置から,

表2. ハードウェア構成及び概略機能

局 名	装 置 名	数 量	概 略 機 能 ・ 特 長
東三河水道事務所	データ収集装置	2 架	<ul style="list-style-type: none"> ・ MELFLEX320+MX1600 ・ 無線 TM 子局との通信 (ポーリング方式) ・ 3 浄水場との通信 (HDLC 方式 LAPB) ・ データ処理装置とのデータ転送 ・ システム制御操作卓との接続 ・ 豊橋浄水場及び豊橋第 1 供給点のデータ入出力 ・ 7 日分のデータ保存 (バックアップデータ)
	データ処理装置	1 架	<ul style="list-style-type: none"> ・ MX3000 II (主メモリ16M バイト) ・ 東三河水道事務所のデータ収集装置とのデータ転送 ・ 総合操作卓及び各浄水場操作卓との接続 ・ 監視制御データ処理 ・ 水道料金計算処理
	総合操作卓	2 台	<ul style="list-style-type: none"> ・ 20 インチ16色カラー CRT ・ 各種水量データの表示・修正操作 ・ CRT 表示文字数 カナ9,984字 (漢字2,496字) ・ 警報表示ランプ
	システム制御操作卓	1 台	<ul style="list-style-type: none"> ・ 20 インチ16色カラー CRT (総合操作卓用と同仕様) ・ テレメータシステム全体の運用管理 ・ バックアップデータ表示 ・ 警報表示ランプ ・ 無線 TM 子局との通話用電話
	カラーハードコピー装置	1 台	・ 総合操作卓, システム制御操作卓の CRT 画面のプリント
	漢字プリンタ	3 台	<ul style="list-style-type: none"> ・ アナウンス印字 ・ 水量日報及び各種水量月報印字 ・ 水道料金関係の印字
	蓄積データ表示装置	1 式	<ul style="list-style-type: none"> ・ MAXY (本体+14 インチ CRT+日本語プリンタ) ・ 瞬時データ・水量日報・月報・カウント値のデータファイル転送
	電源 (無停電電源装置)	1 台	・ 容量 5kVA
浄水場 (豊橋 蒲郡 豊川 豊橋南部)	データ収集装置*1	1 架*2	<ul style="list-style-type: none"> ・ MELFLEX320 ・ 東三河水道事務所のデータ収集装置との通信 (HDLC 方式 LAPB) ・ 自局のデータ入出力 ・ 無線 TM 子局 (赤羽根・渥美) との通信 (ポーリング方式)*3
	浄水場操作卓	1 台	<ul style="list-style-type: none"> ・ 20 インチ16色カラー CRT (総合操作卓用と同仕様) ・ 水量日報の表示・修正操作 ・ 警報表示ランプ ・ 無線 TM 子局との通信用電話*3
	カラーハードコピー装置	1 台	・ 浄水場操作卓 CRT 画面のプリント (事務所用と同仕様)
	電源 (無停電電源装置)	1 台	・ 容量 2kVA
調整池 (権現 城下)	無線 TM 子局	1 架	<ul style="list-style-type: none"> ・ MELFLEX220 ・ 東三河水道事務所のデータ収集装置との通信 (ポーリング方式) ・ 自局のデータ入出力
	電話応答装置	1 架	<ul style="list-style-type: none"> ・ NTT 加入回線による通話 ・ 水位の異常状態を加入電話にて通報 ・ 加入電話で現状水位の確認
供給点 (一宮・新城 音羽・御津 小坂井・田原 豊橋第 3 赤羽根・渥美)	無線 TM 子局	1 架	<ul style="list-style-type: none"> ・ MELFLEX220 ・ 自局のデータ入出力 ・ 東三河水道事務所のデータ収集装置との通信 (ポーリング方式)*4 ・ 豊橋南部浄水場のデータ収集装置との通信 (ポーリング方式)*5 ・ 電話応答装置内蔵 (権現調整池の電話応答装置と同仕様)*6

注 *1 豊橋浄水場には無い。

*2 豊橋南浄水場は 2 架

*3 豊橋南部浄水場のみ

*4 赤羽根・渥美以外の供給点

*5 赤羽根・渥美供給点のみ

*6 音羽・豊橋第 3 供給点のみ

表 3 . データ入出力の種類

局の種類	データ入出力の区別	データ項目
供給点	データ入力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水位, 水圧, 給水瞬時流量, 給水積算流量 ・ 弁開度, 弁開度設定値(制御がある局のみ) ・ 扉開, 商用断及び各種故障 ・ 調整弁の各種状態表示(制御がある局のみ)
	データ出力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 流量設定値(制御がある局のみ) ・ 制御切替信号(同上)
調整池	データ入力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水位 ・ 扉開, 商用断及び各種故障
浄水場	データ入力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水位, 水圧, 水質関係 ・ 取水・送水の瞬時流量, 積算流量 ・ 商用断及び各種故障
	データ出力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 供給点の給水瞬時流量及び水位・残塩 ・ 緊急遮断弁動作信号 ・ 調整池の水位オーバー信号

データ処理装置停止期間のデータをデータ処理装置へ転送する。データファイル概念を図 12 に示す。

(3) データ保存

5 分ごとデータ 40 日分, 時間データ 400 日分, 日データ 2 年分をデータ処理装置で保存している。蓄積データ表示装置で, データ処理装置内の各種データファイルを転送し, フロッピー上にデータを蓄積することで, 過去何年分ものデータを保存することができる。

(4) 水位情報の二重化

重要な水位情報は, 無線テレメータ子局装置のほかに, NTT 加入回線を利用した電話応答装置でも情報伝送している。異なる伝送

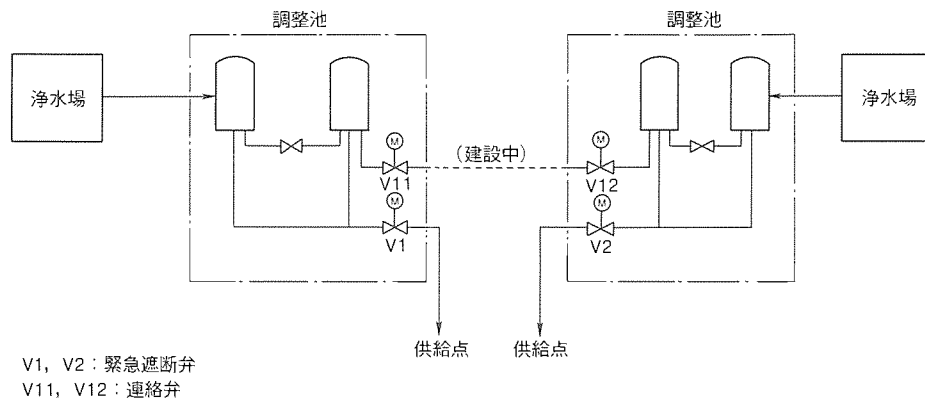
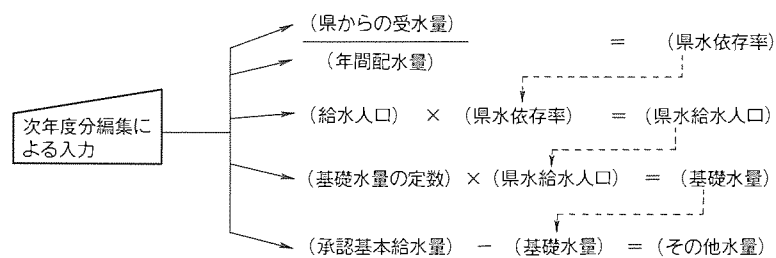
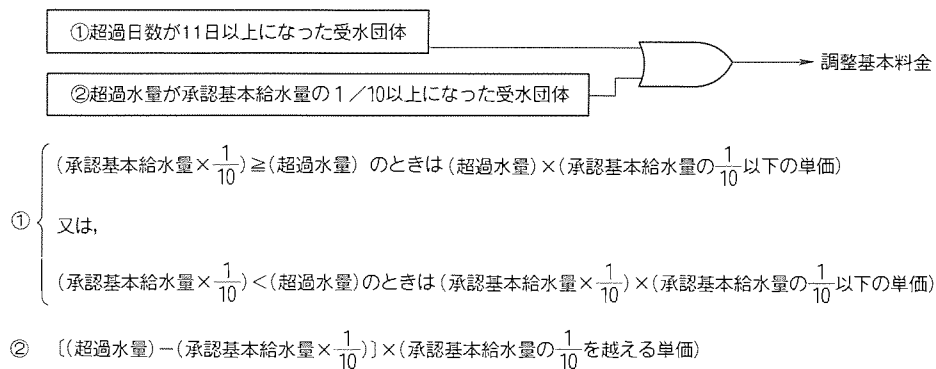


図 6 . 緊急遮断弁, 連絡弁の位置



(a) 水道料金 基礎水量暫定表の計算式



(b) 水道料金 調整基本料金の計算式

図 7 . 水道料金(基礎水量暫定表, 調整基本料金)の計算式

基盤水量算定表

平成 3 年度

基盤水量算定表

2 年度末見込

1991-07-12 (金) 17:28 8.2.2.1

受水団体名	既設配水量 1 m ³	県からの受水量 2 m ³	県水貯存率 2/1=3	給水人口 4 人	県水給水人口 3X4=5 人	承認基本給水量 6 m ³ /日	基盤水量 5x6.29=7m ³	その他水量 6-7=8 m ³
賀茂市								
足川市								
蒲城市								
新城市								
一宮町								
沼津町								
小坂井町								
御津町								
田原町								
赤羽根町								
流木町								
計								

☐ 作成

☐ 確認

☐ 修正

☐ 確認

☐ 検印

☐ 印字

☐ 見次

☐ 総合見次

検索の場合は、"検索"
年度区分形式の場合は、"作成"
年度、印字の場合は、"修正"
年度、検印の場合は、"修正" を押して下さい。

図 8. 基礎水量暫定表の CRT 表示形式

環境基本科主 平成 2年度 1991-07-12 (金) 17:27 82.7.1

区 分		豊橋市	豊川市	岡崎市	新城市	一宮町	春日町
基礎数値	一日最大給水量	㎡					
	超過水量	㎡					
	超過日数	日					
料 金	承認基本給水量の1/10 以下水量相当分	円					
	承認基本給水量の1/10 を超える水量相当分	円					
	計	円					

12

検索 確認 取消 前頁 次頁 戻る 総合検索

検索の場合は「検索」を押してください。

図 9. 調整基本料金の CRT 表示形式

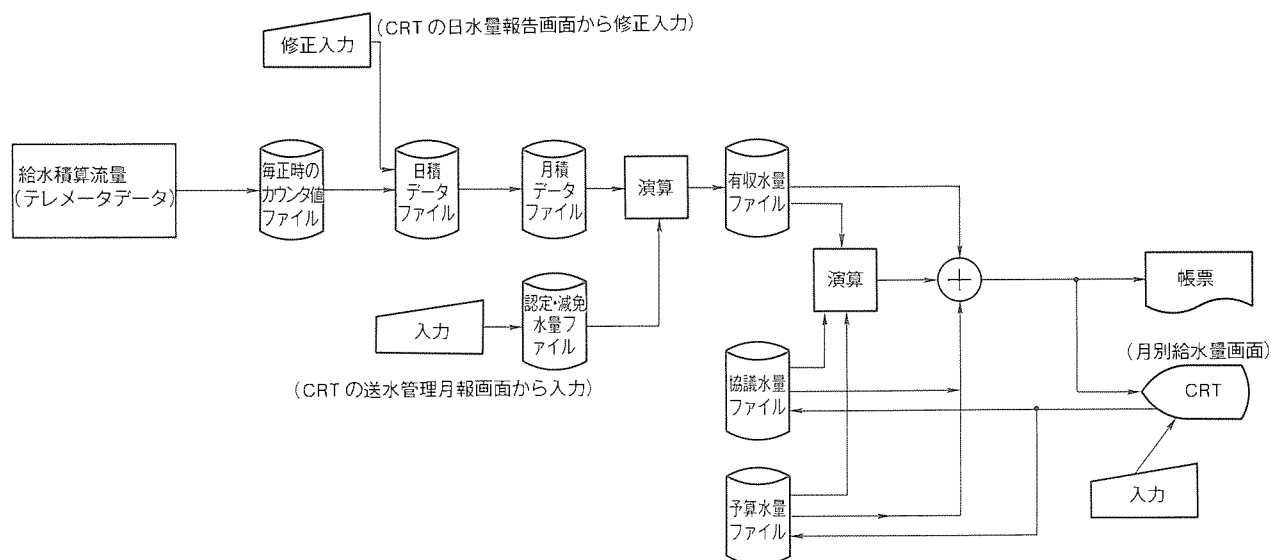


図10. 月別給水量のデータ処理概念

表4. 浄水場操作卓からのCRT表示画面種類

No.	CRT 画面名称	表示範囲		CRT 画面からの操作内容
		全局分	自局分	
1	全体水系図	○		——
2	全体水量リスト	○		——
3	浄水場水系図		○	——
4	時間水量表示		○	——
5	制御用水系図		○	制御操作
6	上下限警報設定表示		○	上下限設定値の設定操作
7	全体日水量報告	○		——
8	浄水場日水量報告		○	報告及び水量修正操作
9	データ検索	○		表示内容の設定操作
10	トレンドグラフ	○		表示内容の設定操作
11	障害リスト		○	——

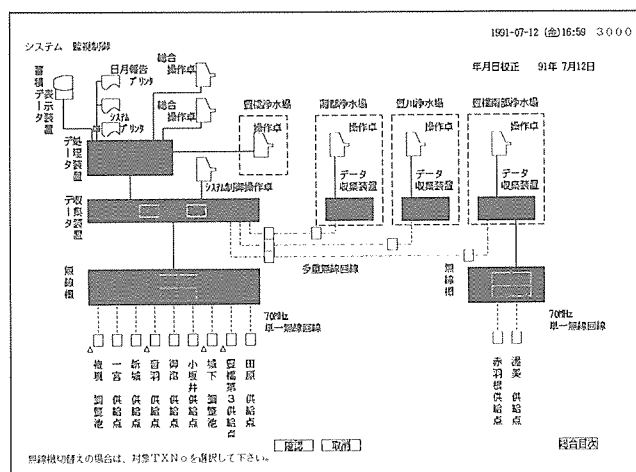


図11. CRT画面のシステム監視制御

路を利用した装置での二重化により、無線回線異常時でも、電話応答装置による水位情報の確保を図った。

4.5 操作性・メンテナンス性の向上

CRT 画面における下記項目の実施により、操作性・メンテナンス性の向上を図った。

- (1) スムーズスクロール機能

1 浄水場当たり 1 画面に納まらない水系図を、2 画面分の

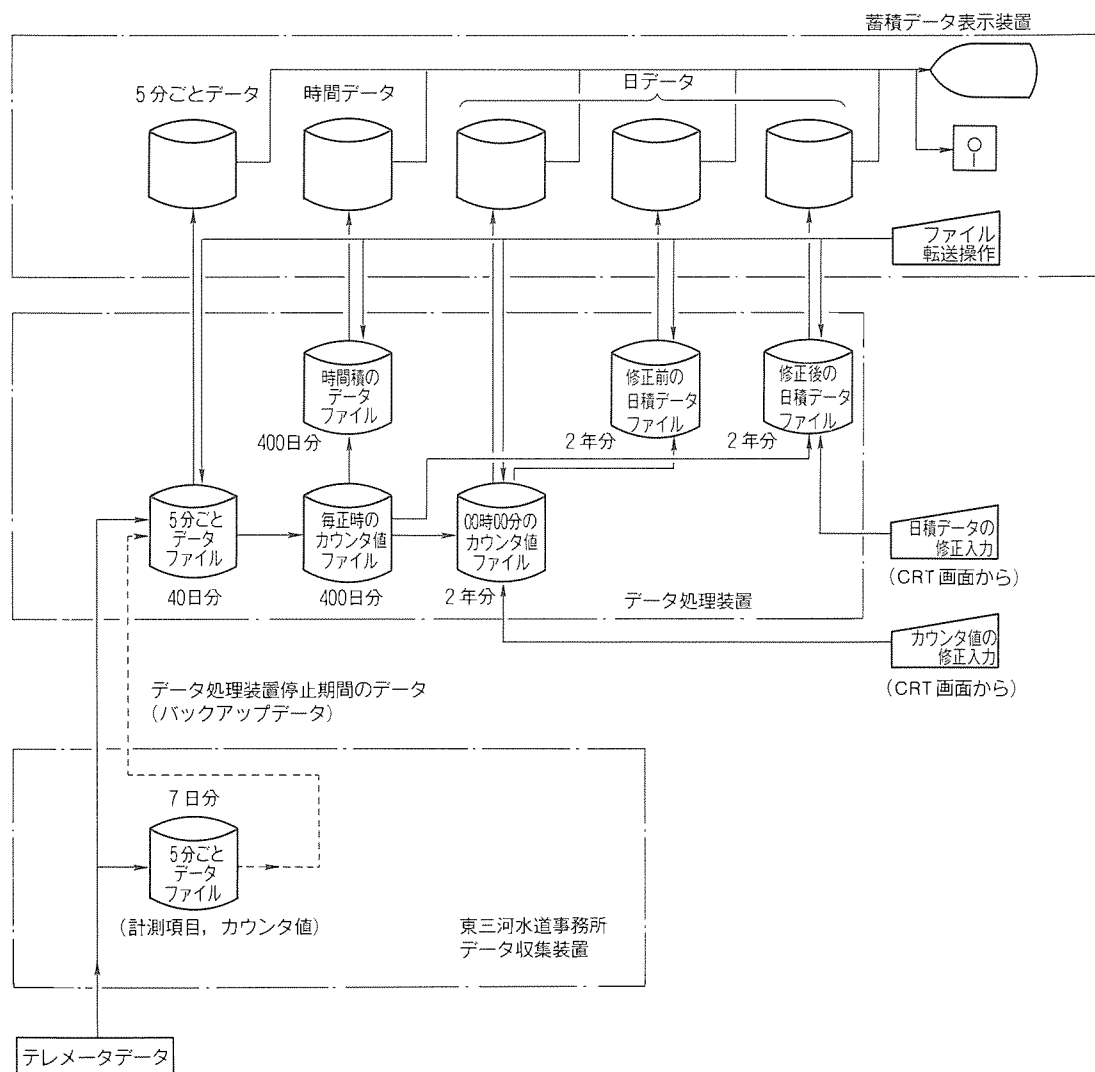


図12. データファイルの概念

表5. ユーザーメンテナンス機能一覧

項 目	内 容
項目の追加	(1) SV, アナログ, パルス, 制御の項目登録(変更) (2) 時間水量表示画面の表示項目追加(変更) (3) 受水障害検出項目の追加 (4) 水量積算値表示画面の表示項目追加(変更)
項目内容の変更	(1) アナログの単位, 乗率の変更 (2) アナログのスケール値変更 (3) アナログのCRT表示けた数の変更 (4) 水位の設備上限値表示の変更
警報の設定	(1) アナログの上下限值の設定 (2) 警報出力要・否の設定 (3) 警報出力を出す場所(事務所・4浄水場)の設定 (4) 故障の種類(重故障・軽故障・水質故障)の設定 (5) 警報発生時のアナウンス印字要・否の設定
帳票フォーマットの変更	(1) 日水量報告画面及び帳票の項目順・項目名変更 (2) 検針月報画面及び帳票の項目順・項目名変更 (3) 元号の変更
ポーリング収集の設定	(1) 休止局の設定 (2) 局ごとにおける収集時間の変更
その他	(1) オペレーションガイダンスの登録・設定 (2) 設定・変更の開始時間の設定

エリアに表現し、スムーズスクロール機能を使って、改ページすることなく任意のエリアを選定して見ることにより、監視制御しやすくした。

(2) 水量報告操作の簡略化

1 浄水場に関連する水量報告画面を2画面分で構成し、修正状態のままで改ページに移行できる。修正終了の確認操作で、2画面分を処理し操作の簡略化を図った。

(3) オペレーションガイダンス表示

CRTの1操作ごとに、次操作のガイダンスを表示することにより、操作員が容易に操作できるようにした。

(4) ユーザーメンテナンス

項目の変更及び各種の設定等を、操作員がCRTを使って対話形式で行えるメンテナンス機能を実装した。これにより、簡単な処理内容の変更は操作員が行えるようになった。

計測項目登録 (アナログ項目)

1991-07-12 (金) 17:02 9.0.0.1

設備浄水場		局		スケール		工 学 箇	デ タ 別	CRT 表示桁数	警 報 所	警 報 地 域	(方) 向	警 報 周 知	注 意 点	印 字
NO	タグ コード	場 所 (上段)	項 目 名 (下段)	L	H	単位	変換 率						NO	印字
A0101	1	豊能浄水場		0	500	m³/h	x 1	S	4	J	J		2	1
A0102	04	式留取水口時流量		0	400	m³/h	x 1	S	4	J	J		4	1
A0103	1	三ッ口池取水口時流量		0	100	m³/h	x 1	O	4	J	J		5	1
A0104	1	第1新設取水口時流量		0	100	m³/h	x 1	O	4	J	J		6	1
A0105	07	第2新設取水口時流量		0	150	m³	x 1	L	5	J	J		7	1
A0106	1	式留取水場水位		0	600	m	x 1	L	5	J	J		8	1
A0107	03	浄水場水位		0	100	度	x 1	W	3	S	S		9	1
A0108	04	式留取水場水量		0	140	m³	x 1	W	4	S	S		10	1
A0108	08	式留取水場PH												

03

☐ 校正
 ☐ 修正
 ☐ 削除
 ☐ 取消

☐ 前頁
☐ 次頁
☐ 目次
☐ 検索結果

修正の場合は“修正”を、他の局を検索の場合は、“検索”を押して下さい。

図13. 計測項目登録のCRT画面

ユーザーメンテナンス機能一覧を表5に示す。また、一例として計測項目登録のCRT画面を図13に示す。

(5) 次年度分帳票及び表の編集機能

次年度分の下記帳票及び表を、当年度のデータを基に CRT 画面上で簡単に編集できるようにした。また、該当するデータを表示する他の帳票・CRT 画面にも自動的に表示するようにした。これにより、CRT 画面上での帳票・表作成の簡素化を図った。

編集機能付きの帳票及び表の種類

- 帳票：月別給水量，基礎水量暫定表，基礎水量確定表，
基本料金調整基本料金算定表
- 表：承認基本給水量，料金関係

次年度分の帳票・表の編集手順を図14に示す。

5. む す び

水道事業における事務の効率化は、今後ますます要求されるものと思われる。本稿では、その一例として水道料金システムと集中管理システムを融合させ、事務処理のオンライン

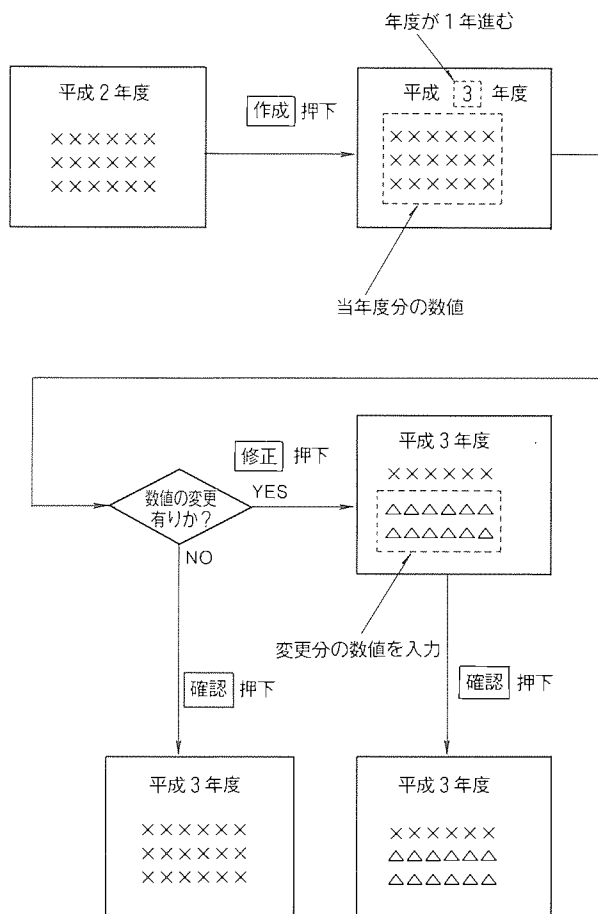


図14. 次年度分の帳票・表の編集手順

化によって事務の効率化を図ったシステムを紹介した。

このような水道施設の運用管理に不可欠な集中管理システムの充実、今後共より一層の努力をする所存である。

このシステムの設計・施工・調整に当たり、御指導及び御協力いただいた愛知県企業庁東三河水道事務所の関係各位に
対し、深い敬意と謝意を表する。

三菱統合一元化 SE システム

神河達男* 渡部徹雄* 杉谷 穰* 小宮山正洋** 根木伸治***

1. ま え が き

プラント設備における制御システムの中核を担うPC (Programmable Controller) に対する保守性向上要求は、年々高まりつつあり、設備全体の高稼働率を保证するために不可欠な要素となっている。近年における制御システムの規模拡大、メカニズムの複雑化、高性能化に伴い、保守技術の高度化が要求されている。

しかしながら、それらを要員の技術向上のみに依存するには限界があり、マンマシンインタフェースを含めた保守環境の整備が急務と言われてきた。特にソフトウェアの保守に関しては、その言語仕様についても設備提供メーカー独自の色彩が濃く、ユーザーの保守担当者にすれば固有の言語を操ることすら大きな悩みの種であった。その上、保守の一端としての小規模プログラミングであっても、制御技術の複雑化によって単にPC言語をマスタしただけでは所望の機能が実現できない状況が生じている。また、近未来では、ユーザーが自らの生産ノウハウを直接的に生かすべくメーカーの力に依存せず本格的に制御ソフトウェアを生産しようとする機運も生まれてくるものと予測される。

このような状況下にあって、我々メーカーとしてはどのような高レベルのCASE (Computer Aided Software Engineering) 的要素を盛り込んだ本格的ソフトウェア生産保守システムを提供すべきかという点につき種々の検討、試行を重ねてきた。幸いにもワークステーション等の小規模かつ高性能コンピュータの出現により、懸案であったテーマが具体的に実現可能となった。以下に、EWS上に搭載したソフトウェアライフサイクルを一貫支援し、情報の一元管理をしたソフトウェア統合一元化システム“MELSUCSES”を、某製鉄所に納入した事例を交えて紹介する。

2. 開発のねらい

2.1 エンジニアリング支援への要求課題

制御システムの高性能化、多様化によるPCシステムの大規模化と広域分散化、及び情報システムの複合化が指向されつつある。また、厳しい市場環境の中で設備の最適操業化、省力化をコストミニマムで実現することが必ず(須)課題として要求されている。このためメーカーのみならず市場ニーズは、以下のようなシステム開発におけるエンジニアリング支援を期待している。

- (1) ソフトウェアバグを排除した信頼性の高いアプリケーションソフトウェア生産技術の実現(図1)
- (2) ユーザーノウハウの蓄積、機密保持及びアプリケーションシステムの保守能力向上のため、ユーザー自身によるシステム構築とソフトウェア設計の容易性確立
- (3) システムの改造、保守の容易性とその際の稼働中システムへの影響の極小化
- (4) ソフトウェア設計、改造、試運転などの期間の短縮化
- (5) ソフトウェアの生産管理の充実

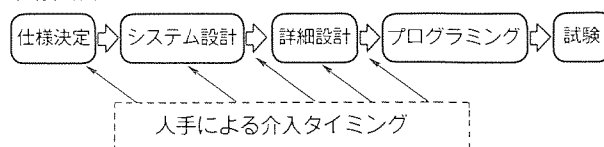
2.2 ソフトウェアモデルの設定

プラント設備という限定された制御システムに対する統合一元化SE(システムエンジニアリング)システムの在り方を明確にするために、そのソフトウェアモデルを設定し、特性を明らかにしなければならない。すなわち、制御対象を機械系・電機系の分野に限定し、PCソフトウェア固有の問題点としてとらえたとき、以下のような特性が挙げられる。

- (1) データの処理、加工が主目的ではなく、プロセスとのインタフェース、制御に必要な各種情報管理が主要な機能である。
- (2) 時間の経過とともに相互干渉しながら遷移しているプロセス及びPCの実行状態を記述する必要がある。
- (3) プロセスとのインタフェースが主となるため、オフラインテストが困難である。
- (4) フェイルセーフな信頼性が要求される。
- (5) プロセスとの応答性に対する要求が厳しい。
- (6) 一般に組み込み型ソフトウェアであり、標準化が難しい。

◎ 従 来

● 仕様書作成



◎ MELSUCSES

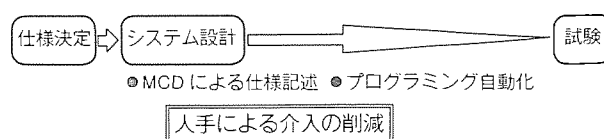


図1. ソフトウェア生産フロー

2.3 基本コンセプト

MELSUCSES 構築における基本コンセプトは、上級システムエンジニア並みの高品質ソフトウェアを効率良く生産するための生産手段を提供し、ソフトウェアライフサイクルの一貫支援を実現することであり、以下の方針を設定した。

(1) シングルアーキテクチャの確立

ハードウェアとソフトウェアを統合して、従来のソフトウェア生産における全作業環境を一つのハードウェアコンポーネント上で実現する。

(2) ソフトウェア生産体制の統一

PC のハードウェアを意識させない生産環境のオープン性を確立し、ソフトウェア生産プロセスを定義する。

(3) 生産性向上への言語面からのアプローチ

要求定義から、保守までのソフトウェアライフサイクル全般をサポート可能なマクロ言語の開発と、機械語への自動変換を実現する。

(4) 情報の一元管理

各生産フェーズでのエンジニアリングデータの効率的管理及び継承発展を考慮し、データベースで徹底した一次情報の一元管理を構築することにより、技術の蓄積と生産性の向上を図る。

(5) マンマシンインタフェースの高機能化

操作性の追及とヒューマンエラーに対する十分な配慮、及び応答性向上による情報伝達、認識の迅速化と的確化を図る。

3. システム構成

3.1 MCD

MELSUCSES システムでは、記述言語として、運転方案(要求仕様)記述言語であり、かつプログラミング言語でもある MCD (Macro Control Diagram) を採用している。MCD とは、特定機能を実現するための複数ステップの処理を一つの命令としてマクロ化し、これを視認性向上のため図形化して表現したものであり、その特長を以下に示す。

- (1) 統一された図形化シンボルの採用による要求仕様の明確化
- (2) 特定機能をマクロ化することによるバグの侵入防止
- (3) 機能の視覚化によるソフトウェア品質の向上
- (4) 記述ステップ数削減による生産性の向上
- (5) 視認性向上によるメンテナンス性の向上
- (6) 制御ノウハウをマクロ言語内に埋め込むことによるエンジニアリングの機械化

しかし、プラントの制御機能は多種多様にわたっており、1 種類の表現方法でプラントの全機能を記述することは困難である。したがって、MELSUCSES では制御機能種別ごとに 3 種類の MCD を用意している。

3.1.1 アルゴリズム MCD

制御を実現するに当たり、プログラムの処理手順(順序)

よりも算術演算処理等、データの流れ及び変換過程を重視する機能がある。このような場合は、データに着目して入力→変換→出力の一連のつながりを明確に表現しなければならず、以下のような特長を持つアルゴリズム MCD が適用される。

- (1) 制御機能に対する思想、実現方法が一目で確認可能
- (2) 従来から用いられてきた算術、論理表現をそのまま適用
- (3) 入出力データとその加工過程が明確に表現可能
- (4) パラメータ等の必要十分条件の設定を義務づけることにより、機能的品質の向上が可能

図 2 にアルゴリズム MCD の例を示す。

3.1.2 データフロー MCD

通信制御等の機能では、処理手順(順序)を明確に定義する必要がある。このような場合、その処理手順を階層的に詳細化し、処理とその扱う大量のデータの構造及び関係を明確に表現しなければならず、以下のような特長を持つデータフロー MCD が適用される。

- (1) 処理手順を明確にし、手続き重視の表現が可能
- (2) 取り扱われるデータの構造を明確にし、大量のデータを簡潔に表現可能
- (3) 処理手順とデータの関係が明確
- (4) 処理を階層的に表現し、その概要と詳細を一元表現可能

図 3 にデータフロー MCD の例を示す。

3.1.3 シーケンス MCD

機械設備をあらかじめ定義された順序どおりに動作させていくシーケンス制御(逐次制御)を表現する場合、シーケンス MCD が適用される。シーケンス MCD は、①機械の動作順序を定義するフロー部、②フロー部からの自動操作指令と手動操作指令をミキシングし、動作インタロックを考慮した動作指令を出力する出力表からなる。シーケンス MCD の特長として以下のような項目が挙げられる。

- (1) 機械動作順序の明確化
- (2) 自動フローに対する(a)起動条件、(b)運転条件、(c)スタ

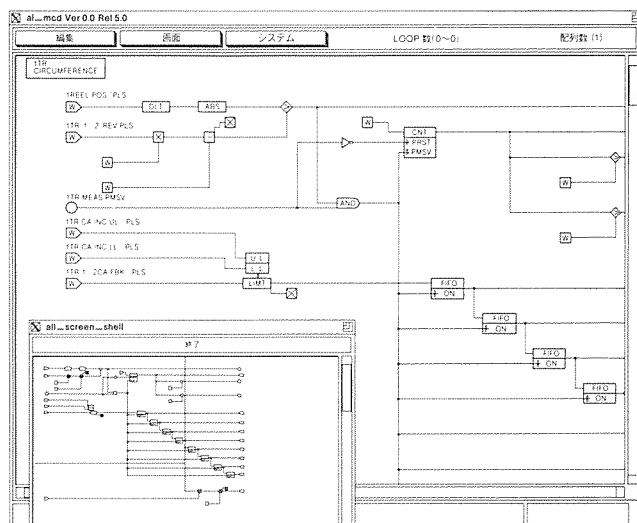


図 2. アルゴリズム MCD

ートタイミングの明確化

(3) 動作インタロックの一元表現

図4にシーケンス MCD の例を示す。

3.2 アーキテクチャ

統合化 SE システムに要求されることは、すべてのソフトウェアライフサイクルに対して、一貫したデータの流と最適な支援ツール群を提供することにある。これらを踏まえた上で、MELSUCSES 上のソフトウェアコンポーネントは、次のように構築されている(図5)。

3.2.1 リレーショナルデータベース

RDB (Relational Data Base) はプラント内に配置されている全設備の機械及び電気情報を一元管理している。RDB は、情報の管理フェーズを考慮し、以下3階層構造としている。

(1) プラント設備情報

主に各設備の機械諸元情報を持つ(タイプ、型名、製造番号等)。

(2) 操業情報

主に各設備の操作情報を持つ(電磁弁励磁動作、非常停止ゾーン、ロックスイッチ区分等)。

(3) 制御情報

主に各設備の電気諸元情報を持つ(物理変換レート、入出力アドレス等)。

各階層間はマスタキーワード(機器番号等)で属性管理されており、各階層の情報は、このマスタキーワードにより、検索し引き出すことが可能である。さらに、プラント設計の知識を埋め込むことにより、上流階層の情報から下流階層の情報を自動的に生成する機能も組み込んでいる。

3.2.2 MCD 周辺エディタ群

RDB 入力完了し、次段階のソフトウェア設計フェーズにて使用されるのがMCD 周辺エディタ群である。

MCD 周辺エディタ群では、以下の3点に重点をおいて開発が進められている。

- (a) トップダウン手法を埋め込むことにより、データの一元性を確保。
- (b) PC のハードウェアを意識させず、エンジニア及び保守員のプラント制御ノウハウのみを最大限に引き出す。
- (c) エンジニア及び保守員の思考活動を支援する、各フェーズに最適なユーザーインタフェースの実現。

これらのエディタ群でMCD を描画することにより、エンジニアの生産活動はすべて完了し、以降の作業(PC 言語への変換等)は、すべて機械的に処理される。

(1) 機能構成表エディタ

このエディタは、制御システムを機能に着目することによって分割し、木構造3階層に登録を行う手段であり、構造設計を行うフェーズである。ここで分割された最小単位(第3階層に相当)を“単一機能”と称し、このエディタで登録さ

れることによって初めてMCD 1シート分の記述エリアの割当てを受ける。また、3種類のMCD 言語の選択も“単一機能”単位で行われる。

(2) 機能間リンケージエディタ

“単一機能”単位に、制御機能に対する入出力情報を定義する手段であり、機能間リンケージ設計を行うフェーズである。機能に対する入出力は、外部入出力(プロセス入出力)と機能間インタフェースに分類できるが、このエディタでは外部入出力に関してはRDB リンケージし、機能間入力に関しては、他“単一機能”の出力とそれぞれマウスクリックによってリンケージするだけで定義可能としている。したがって、新たに情報に対するコメント付けを行う必要があるのは、他“単一機能”に対する出力情報のみである。定義された入出力情報は、自動的に下流のMCD エディタに継承されるとともに、MCD エディタ側で任意に入出力端の追加削除を行えない機構を設けることにより、制御システムの広域情報の一括管理を実現している。

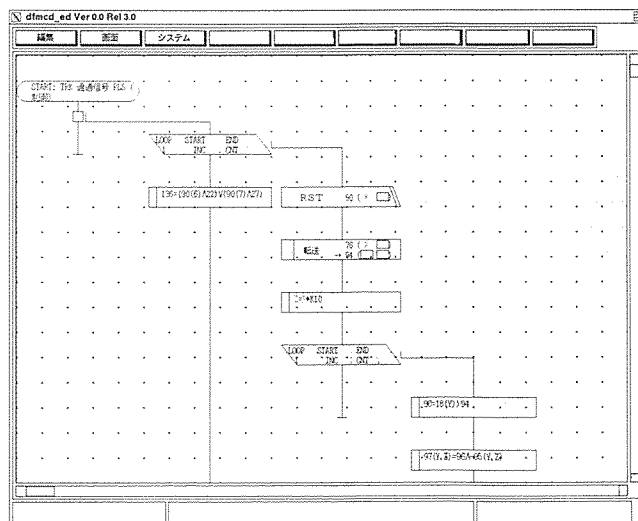


図3. データフロー MCD

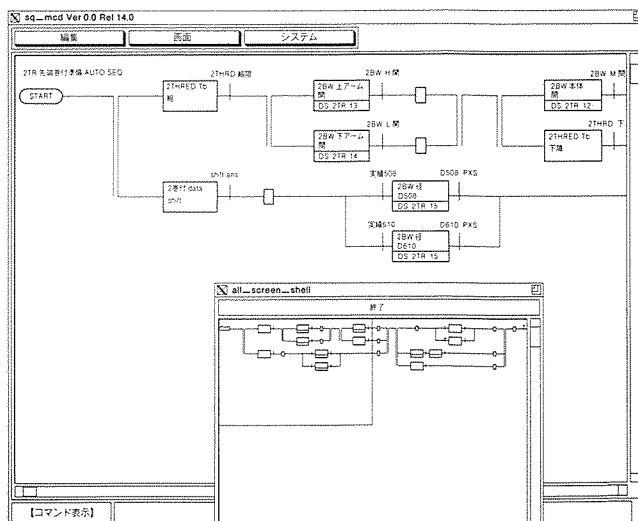


図4. シーケンス MCD

(3) MCD エディタ

機能間リンケージエディタから継承した入出力情報に基づき、“単一機能”ごとに制御機能の実現方法を記述する手段であり、詳細機能設計を行うフェーズである。MCD の種別に合わせて3種類のエディタが準備され、各エディタとも描画支援機能と編集機能を持っている。また、後述の解析機構で検出されたエラー箇所をMCD上にフィードバックさせることにより、デバッグ性の向上を図っている。さらに、“単一機能”単位で流用を可能とする機能を備えている。

(4) MCD 解析機構

MCD エディタからの描画レイアウト情報を総合的に解析し、ソフトウェアとして変換可能かを検査するとともに、PC間で互換性のある中間コードに展開する手段である。この段階で検出したMCDの記述エラーは、前述のようにMCD

エディタにフィードバック可能である。

3.2.3 言語変換機構

すべてのMCD記述が完了し、解析機構によって中間コードに展開し終わると、以下に示す言語変換機構によってPCの機械語に変換される。なお、言語変換機構は、PCごとに個別に開発することにより、あらゆる種類のハードウェアに対応可能となる。

(1) 実行形式設定ユーティリティ

3.2.2項で述べたように、MELSUCSESではPCのハードウェアを全く意識させず機能重視でMCDを描画しているため、PCに合った形に“単一機能”をグルーピング(モジュール化)しなくてはならない。このユーティリティは、“単一機能”の組合せによるモジュール化情報を生成し、次のトランスレータに対するガイダンスを行う機構である。

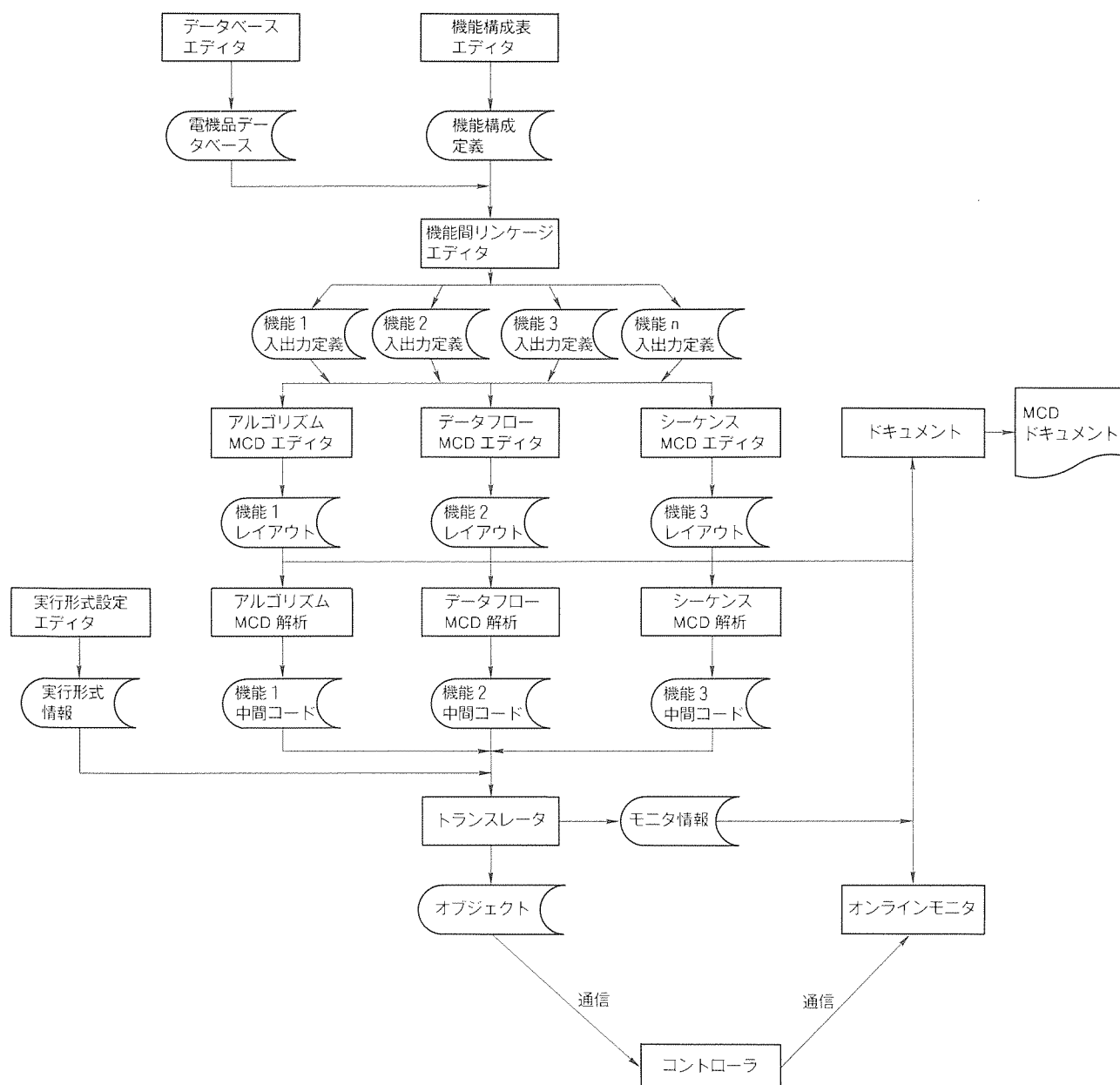


図5. ソフトウェアコンポーネント構成

4. 技術課題と解決策

このシステムを開発するに当たり、技術的に解決及び検討に多くの時間を割いた項目が数々存在する。ここでは、その中でも操作性を左右するマルチユーザー化と、機械的にソフトウェアを生成する際に不可避の言語変換効率の向上施策に関して述べる。

4.1 マルチユーザー化

このシステムでは、操作時のピーク負荷及びファイル規模増大に伴うシステム負荷を分散し、大規模プラントも効率的に設計・保守可能とするためマルチユーザー方式を採用している。本来ならばプラント制御の特異性を考慮し、極力ファイル数を削減し、かつシングルオペレータ方式によってデータの整合性を確保することが得策と考えられる。しかしこの方式では、先に述べたように高負荷時に致命的な欠点を持っており、このシステムでは、NFS (Network File System) を用いたマルチユーザー方式を導入すべく、システム設計段階から種々の検討を加えてきた。

マルチユーザー化を行うために必要な条件は、次のとおりである。

- (1) ファイルの最適分割設計がなされていること
- (2) 必要性が高くても、同一ファイルに書き込みを行う機構を複数存在させないこと
- (3) 相関関係を持つ機構間のデータ整合性が確保されていること
- (4) 機構間の排他処理が完全であること
- (5) ファイルに対する排他処理が完全であること

初期検討段階では、上記(5)が最重点との観点からプラントデータすべてをデータベース化する案も出されたが、データ処理や異常時の復旧性が悪く、かつ(5)しか満足しないという結論からファイル形式を採用した。そこで、各機構のファイル生成範囲と、参照による影響範囲を全システムにわたって洗い出し、機構間の排他制御を行うことにより、マルチオペレーション化を実現した。実際に稼働させてみると、この排他制御が作用して機構の起動が阻止される確率はほとんどなく、ユーザーはほぼ自由なマルチオペレーティングを行っている。また、機構起動単位にファイルを分散したことにより、立ち上がり応答時間も極めて短時間となり、信頼性及び操作性の高い作業環境を提供することが可能となった。

4.2 言語変換効率の向上

プラント制御をリアルタイムで行う PC では要求制御精度が厳しく、その対応策の一つとして PC の処理速度の高速化

を図っている。一方、マクロ言語適用によるソフトウェア自動生成システムでは、画一的に機械語へ変換するため冗長なプログラムとなるという欠点がある。つまり、マクロ言語を変換する際に無駄な機械語が発生し、それが処理速度の低下を招く一因となってくる。なおかつ、この開発の前提として PC は既存の機種を対象としたためメモリ容量の制限は大きな制約であった。個々のマクロ言語は本来内部処理として入力→処理→出力の順となっており、このマクロを複数個接続することによって制御機能を実現しているが、各マクロは入出力データとして中継データを持ち、この中継データを介してマクロ間のインタフェースを行っている。MELSUCSES では、この中継データに着目し、以下に示す最適化を行っている。

(1) インタフェースデータの削減

前段マクロの出力と後段マクロの入力が 1 : 1 で接続されて分岐がない場合、中継データを生成せず、前段マクロの出力データを後段マクロの入力データとして使用している。

(2) 複数算術マクロの統合化

算術演算マクロが連続する場合に、複数の算術演算マクロを統合化し、一つのマクロ言語に変換して最適化を行っている。

(3) 同一マクロの複数変換化

複数入力を持つマクロ言語では入力すべてを使用しない場合があり、その際同一変換形式では効率が悪く、したがって、入力使用数ごとに変換形式を持たせ最適化を行っている。

5. む す び

以上、MELSUCSES について述べてきた。このシステムを適用したことにより、ソフトウェア設計時間の短縮、ヒューマンエラーの撲滅といった効果を発揮しており、生産性・品質の向上が図れた。

また、顧客においても、顧客の保守担当者に対する負担軽減(言語の PC 指向の排除、容易な機能追加・改造)の実現により、ユーザーからも好評を博している。

このシステムは、開発当初の目標レベルとして、CASE 要素の重点的な盛り込みをねらっており、その目標は、ほぼ達成されたと評価している。しかしながら、マンマシンインタフェースを含めたユーザーサービスについては、今後其そのニーズにこたえるべく、きめ細かな情報収集を基に、十二分な対応が必要と考えている。

今後の開発方針は、先端技術の積極的活用による経験的作業の全面機械化及び創造的作業の支援を図ることである。

溶接用炭酸ガスレーザー発振器

大谷昭博* 西田 聡* 葛本昌樹** 水野正紀*

1. ま え が き

レーザー溶接は高エネルギー密度を持ち、大気中で非接触のエネルギー照射が可能である等の特徴から、主に自動車関係の部品の溶接加工に適用されており、近年、応用事例が急速に広がり始めている。これに伴ってレーザービームの特性向上、特に集光性の向上の要求が高まってきている。

レーザーを用いた表面改質には、表面焼入れ、表面溶融、クラディング、コーティング強化、合金化などがあり、製品への適用例が増えつつあるが、要求されるレーザービームのモード、集光性は溶接に用いられるものと異なる。

当社では、このたび溶接や表面改質用途に最適化されたビームを発生できる大出力炭酸ガスレーザー発振器 ML6050C シリーズを発売した。ML6050C は、低次マルチ、高次マルチ、PURE の3種類のビームモードを持つ3機種から構成され、加工目的(要求ビームモード、集光性)に応じた最適な発振器をユーザーに提供できるようにした。中でもPURE モードは、当社の発明によるがん新な共振器構成によってシングルモードに近い非常に高い集光性を実現しており、これまで以上に低ひずみ、高速溶接を追求することが可能となった。

ここでは、ML6050C シリーズの発振器性能を溶接性能とともに紹介する。

2. レーザ発振器 ML6050C シリーズの概要

大出力炭酸ガスレーザー発振器の市場は、自動車を中心とした量産部品の溶接・表面改質加工や鉄鋼の圧延ライン等への導入が拡大している。このような加工用途の多様化に伴い、溶接分野ではより低ひずみ・高速化の要求に応じた高集束ビームモード、突合せ溶接等のギャップ裕度が要求される溶接には適度なビームの広がりを持つビームモード、表面改質分野ではエネルギー分布が一様なビームモードと、それぞれの加工用途に適したビームモードと生産性向上のための高出力化を図った炭酸ガスレーザー発振器の出現が待望されていた。

高まる市場ニーズにこたえるため、当社で

は、広く溶接分野に適用されている低次マルチモードの“ML6050C-L”，表面改質に適した高次マルチモードの“ML6050C-H”，高速溶接時でも安定した深溶け込み溶接を実現できる高集束ビームモード(PURE)の“ML6050C-P”の3種類の大出力炭酸ガスレーザー発振器を完成させた。

ML6050C シリーズの仕様を表1に、外観を図1に示す。

“ML6050C-L”は、ML50Cの後継機種として低次マルチモードを出すことのできる定格出力5.5kWの炭酸ガスレーザー発振器であり、突合せ、重ね継手溶接に適し、当社従来機比の1.1倍の出力向上が図られ、より一層の生産性の向上を可能にしている。

“ML6050C-H”は、高次マルチモードを出すことのできる定格出力6kWの炭酸ガスレーザー発振器で、ビームスキャナ、インテグレーションミラー等の特殊光学系を用いることなく、均質なエネルギー分布を得ることができ、焼入れ、クラディング等の表面改質に適用できる。

“ML6050C-P”は、世界初のPURE共振器(Phase Unified Resonator)を採用、シングルモードに匹敵する高集束レーザービームを出すことのできる定格出力5kWの炭酸ガスレーザー発振器であり、高速、低ひずみ溶接に適している。この新型共振器PUREの開発には、東京電力(株)開発研究所と当社との共同開発によって行われた成果が盛り込まれている。

ML6050C シリーズでは出力安定度を±1%以下(従来機

表1. ML6050C シリーズの仕様

型 名		6050C-L	6050C-H	6050C-P
項 目				
発振励起方式		SD式三軸直交形		
共振器方式		安定型共振器	安定型共振器	位相整合共振器
性 能	定 格 出 力 (W)	5,500	6,000	5,000
	パルス出力	定格出力値(100~400Hz, デューティ50%)		
	設定周波数(Hz)	10~3,000		
	設定デューティ(%)	0~100		
	出力安定度(%)	±1%以下 出力制御時(対定格出力)		
能 率	ビームモード	低次マルチ	高次マルチ	PURE
	ビーム外径(mm)	約40	約42	約42
	発散角(全角)(mrad)	3以下	5以下	3以下
レーザーガス消費量(L/h)		約5.5(12時間封じきり運転, 6.67kPa [50Torr])		
電 源 入 力		AC 三相 200/220V 123kVA		
外 形	寸法(L×W×H)(mm)	3,700×600×1,800		
	質量(kg)	3,500		

*名古屋製作所 **同製作所(工博)

±2%)とし、溶接及び表面改質加工品質を更に安定化した。

また、発振器の設置スペースを当社従来機比で約70%に縮小するとともに防じん性を強化し、耐環境性を向上した。

さらに、レーザガス封じきり時間を従来の8時間から12時間に延長することにより、ランニングコスト(レーザガス)の低減を図っている。

3. 共振器技術

以下に各共振器構成の特徴を簡単に説明する。

3.1 安定型共振器

共振器構成としては最も単純で、図2に示すように全反射

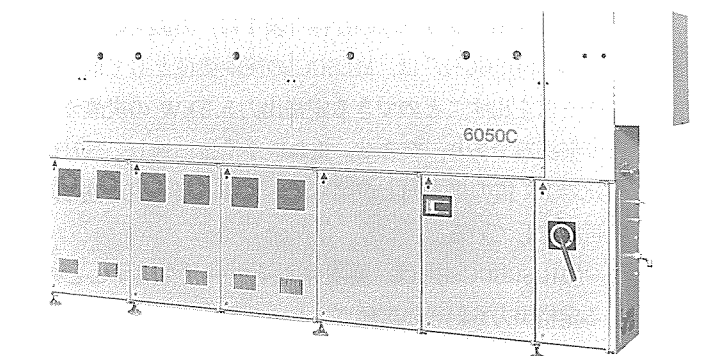


図1. 大出力炭酸ガスレーザ発振器 ML6050Cの外観

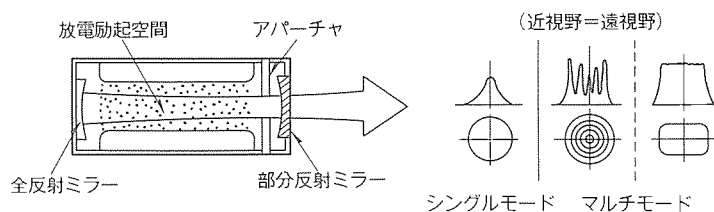


図2. 安定型共振器

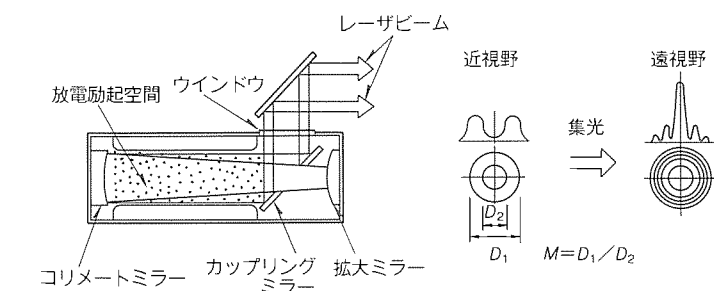


図3. 不安定型共振器

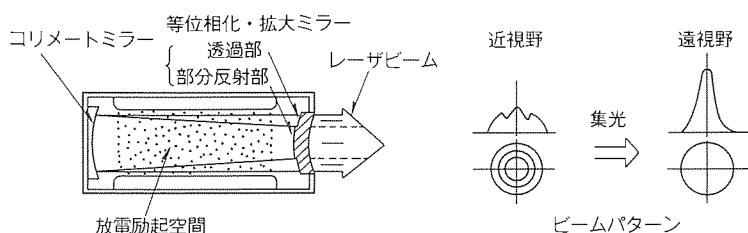


図4. 位相整合共振器

ミラーと部分反射ミラーによって構成され、ビームモードは各ミラーの曲率と共振器長、及びアパーチャ径で決まる。近視野(発振器出口付近)と遠視野(集光点又は無限遠方)でビームパターンが変わらない特徴があり、ビームの集光性はシングルモードが最も良く、次数が高くなると悪くなる。“ML6050C-L”と“ML6050C-H”はこのタイプの構成を採用している。

3.2 不安定型共振器(参考)

ML6050Cでは採用していない共振器技術であるが、PURE共振器と比較する上で構成を説明する。

図3に示すように、拡大ミラー、コリメートミラーとカップリングミラーによって構成されている。拡大ミラーとコリメートミラーの組合せにより、コリメートミラーからカップリングミラーに向かうビームは平行となり、周辺部をカップリングミラーで取り出すため、リング状のビームが出力される。レーザビームは、近視野ではリング状であるが遠視野では中心に集中した強度分布を持つビームパターンになるが、周辺部にフリッジと呼ばれる集光できない部分ができる。一般に拡大率 M 値($=D_1/D_2$, 図3右参照)を大きくすると遠視野でのエネルギーの集中度が高くなり、集光性は向上するが、発振のエネルギー効率が低下する。

この共振器方式は、集光性の比較的良好なビームを大断面積で取り出せるために大出力用に適しており、従来の大出力発振器はこの方式が採用されていた。

3.3 PURE(位相整合共振器)

図4に示すように、等位相化拡大ミラー(図5)とコリメートミラーで構成される。等位相化拡大ミラーは、中央部にある部分反射部と周辺部の透過部との二つの構成要素からなっており、ちょうど不安定型共振器の拡大ミラーとカップリングミラーを一体化させ、拡大ミラーに相当する部分を部分透過にした構造をしている。さらに、等位相化拡大ミラーの部分反射部を通過した光と透過部を通過した光は、位相を整合して合成されるよう

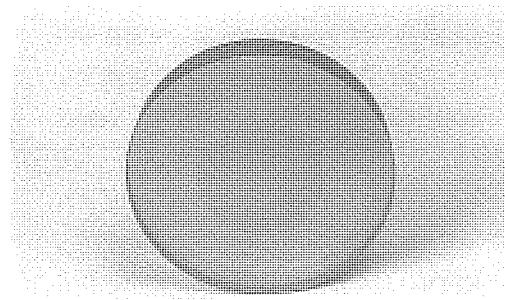


図5. 等位相化拡大ミラー

に設計されている。そのため出力されたビームは、近視野では均一位相で中づまりのビームパターンが得られるが、遠視野ではガウス状(シングルモード状)のビームパターンになり、不安定型共振器で見られたフリンジはほとんどなく、 M 値に換算するとほぼ無限大に相当する。図6に不安定型共振器(リングモード)の $M=1.5, 2.0, 3.0$ のもの、及びPUREの $M=1.5$ で部分反射部の透過率 $T_{\text{cnt}}=50\%$ から得られる遠視野のビームパターンをシミュレーションした結果を立体表示したものを示す。図7にはシングルモード(Gaussian TEM₀₀)とPUREの $M=1.5$ とリングモードの $M=2.0$ を断面で比較したものを示す。図8は同一共振器で同一の入力時の発振出力(図9の一点鎖線部、詳細は後述)によって容積を規格化している。

図7はビーム容積(レーザ出力)が一定となるように規格化している。不安定型共振器の $M=2.0$ は、PUREの $M=$

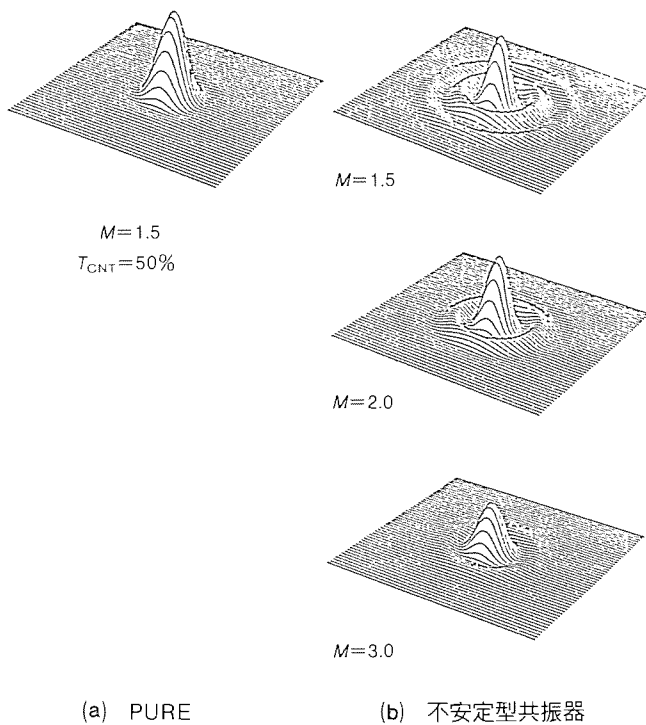


図6. PUREと不安定型共振器から出力されるビームの遠視野パターン比較

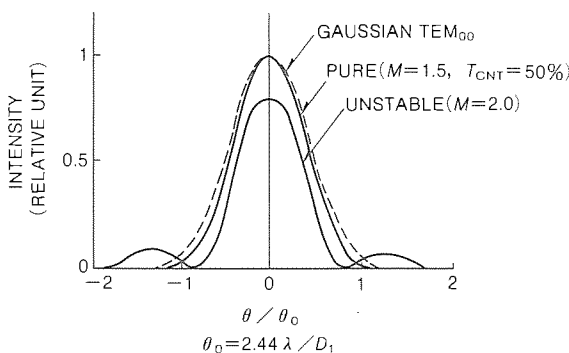
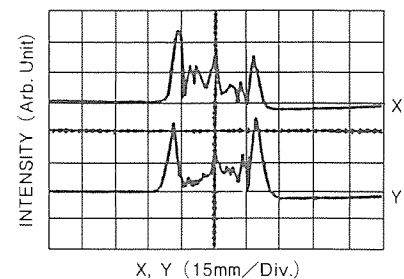
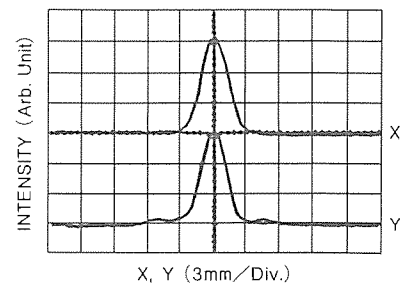


図7. 集光特性のモード比較(出典：(5))

1.5より大きなフリンジが見られ、軸上強度が低く、集光性が悪い。PUREモード($M=1.5$)はシングルモードと同等の集光性を示すことが分かる。図8には実際に回転ワイヤ法を用いてレーザビームを測定した結果を示す。近視野は等位相化拡大ミラーから0.5mの位置でのレーザビームパターンであり、中づまりの強度分布が得られている。遠視野は曲率半径10mの反射ミラーで集光したレーザビームパターンであり、シミュレーション予測どおりにガウス状に集光されていることが分かる。また、図9には、同一の発振器を用いた例による入出力特性をPURE($M=1.5$)と不安定型共振器($M=1.5, 2.0, 3.0$)において、シミュレーションによって比



(a) 近視野



(b) 遠視野

図8. PUREモード(近視野、遠視野)の実測ビームパターン(出典：(5))

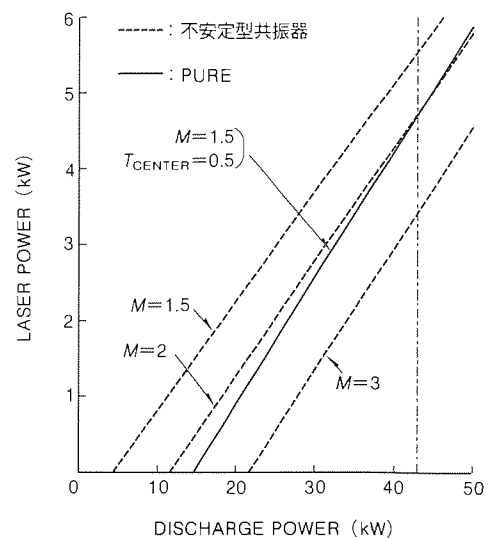


図9. PUREと不安定型共振器の入出力特性比較(出典：(5))


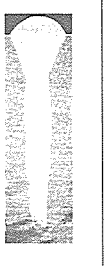

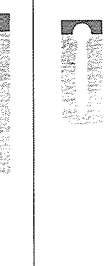


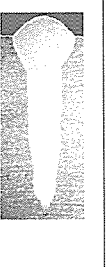



溶接速度	1m/min	2m/min	3m/min	5m/min	12m/min
6050C-P PURE モード 5kW					
溶け込み深さ	8.7mm	7.0mm	6.1mm	5.0mm	2.6mm
6050C-L 低次マルチモード 5kW					
溶け込み深さ	7.9mm	6.0mm	4.6mm	2.9mm	0.9mm

図10. PURE モードと低次マルチモードの溶接ビード形状比較

較したものを示す。入出力特性は不安定型共振器の $M=2.0$ と PURE の $M=1.5$ がほぼ同等である。PURE は実用化されている不安定型共振器と同等の入出力特性でレーザービームを取り出すことができる。

PURE は不安定型共振器と同様の大口徑ビームを、安定型共振器のシングルモードとほぼ同等の集光性で出力できる全く新しい概念の共振器方式である。

4. 溶 接 特 性

図10は、ML6050C の PURE モードと低次マルチモードによる溶接のビード形状比較を、図11には ML6050C の PURE モード、低次マルチモード及び従来機のリングモード (不安定型共振器 $M=2.0$) による溶接特性の比較を示したものである。

溶接特性は、PURE モードが一番深く溶け込み、低次マルチモードが一番溶け込みが浅い。溶接速度を例えば溶け込み深さ 3mm で比較すると、PURE モードは低次マルチモードの約 2 倍、リングモード ($M=2.0$) の約 1.6 倍の速度で溶接可能である。一方、溶接ビード形状は、溶け込み写真から分かるように PURE モードが深く細いのにに対して低次マルチモードは PURE モードに比べて浅く広がっている。したがって、ML6050C-L は、ねらい裕度やギャップ裕度を

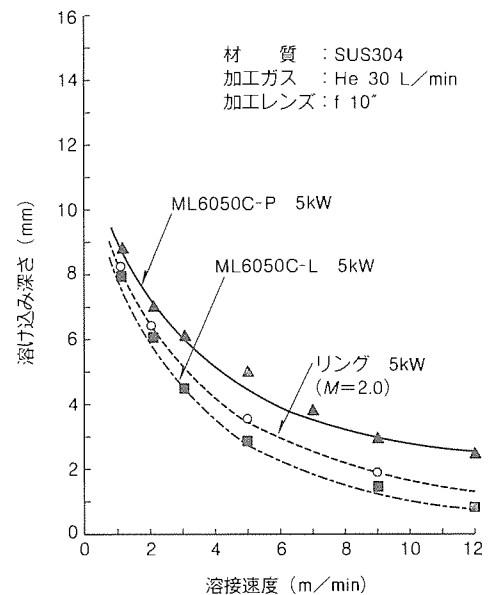


図11. 溶接特性比較

要求される突合せレーザー溶接や、継手強度の大きい重ねレーザー溶接に適し、ML6050C-P は高速レーザー溶接、深溶け込みレーザー溶接、局所加熱による低ひずみレーザー溶接に適している。

ML6050C-Hについては、この論文では省略するが、熱処理等の表面改質分野に適している。

5. む す び

以上、溶接用炭酸ガスレーザー発振器 ML6050C シリーズについて紹介した。ML6050C シリーズは、今回発売した3機種の中から用途によって最適なモードを提供できる。最近の炭酸ガスレーザー発振器の進歩は加工分野への応用進展に負うところが多く、加工現象からの良いフィードバックを受けて、今後の開発を進めていく所存である。

参 考 文 献

- (1) レーザー学会：レーザーハンドブック (1982)
- (2) 八木重典：CO₂レーザー，O plus E, No. 12 (1989)
- (3) 八木重典，安井公治：高集束のレーザー共振器，レーザー熱加工研究会 WG-89 (1989)
- (4) 金岡 優：最新機種の特徴と加工事例，金属プレス，No. 3 (1987)
- (5) Yagi, S., Yasui, K., Takenaka, Y., Kuzumoto, M., Tagasira, M. : SPIE, 1225, 357~363 (1990)

三菱インテリジェントビルシステム

“マイバスインテグラ”

藤原誠司* 八島耕司** 保里康一*** 井上証策***

1. ま え が き

ビルのインテリジェント化・高度情報化の進展に伴い、大規模ビルだけにとどまらず、中小規模ビルでもインテリジェントビルシステムの適用ニーズはますます高まっている。

中小規模ビルのインテリジェント化を構築するための基本構成要素は、ビル管理システム・セキュリティシステム・デジタル電子交換機である。

三菱インテリジェントビルシステムでは、従来、ビル管理システム・セキュリティシステム・デジタル電子交換機を別コンポーネントとしてシステム化してきた。今回、業界で初めて、これらのコンポーネントを一体化したコンパクトタイプのインテリジェントビルシステム“マイバスインテグラ”を開発した。これにより、省スペースで経済的な中小規模のインテリジェントビルシステムが容易に構築できる。

以下、このシステムの機能及び構成について述べる。

2. システムの概要

このシステムの構成概要を図1に、そのセンター装置の外観を図2に示す。

2.1 センター装置

図1に示すように、このシステムのセンター装置は、以下の3モジュールを一体化したものである。

(1) 警報、状態、計量及び計測の監視機能、オペレータの操作による遠方発停制御やスケジュールに従った発停制御等の

制御機能、設備や防犯異常時の遠隔発報機能、及び電力量等の計量値収集機能を持つビル管理モジュール。

(2) 磁気カードの操作によるかぎ(鍵)の施錠／解錠制御、及び侵入・火災監視が可能なセキュリティモジュール。

(3) 多種のサービス(例えばハンズフリー、通話料金表示等)が可能なデジタル電話機、世界標準インタフェースのISDN 端末等の内線収容とアナログ公衆網や専用網はもちろんデジタル公衆網である INS ネットと接続可能なデジタル電子交換モジュール。

2.2 システムの特長

これにより、以下の特長を持つインテリジェントビルシステムを実現した。

(1) 省スペース

各モジュールを一つのパッケージに収容することで、設置スペースを従来に比較して約54% (当社比、保守スペースを含む。)に削減したので、中小規模ビルへの設置が容易になった。

(2) 優れた経済性・高信頼性

各システムを個別に導入するよりも経済的かつ信頼性の高いインテリジェントビルシステムが構築できる。

(3) 保守性の向上

センター装置は裏面・側面からの保守を必要とせず、管理人室への設置が容易になった。さらに、ビル管理モジュールにおいて、ビルの仕様変更に伴うシステム変更の際、現地設定変更のみで対応できる範囲を広げたことで迅速な対応が可

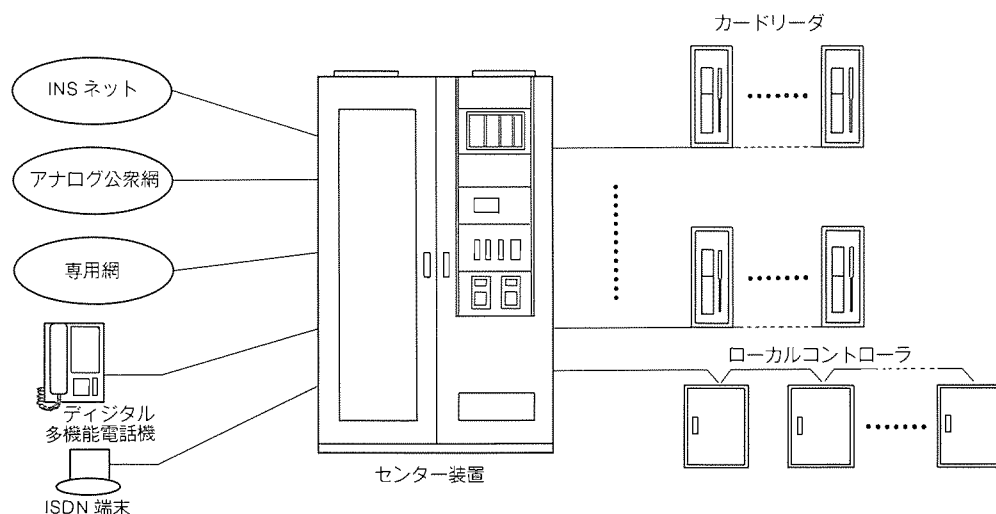


図1. システム構成の概要

能となった。

3. システムの構成

図3にマイバスインテグラのシステム構成、表1に各構成要素の外形寸法を示す。

このシステムは、管理室に設置されるセンター装置、各階のテナントに設置される電話機及びカードリーダー並びに各フロアに設置されるローカルコントローラ (LCP) から構成される。

テナント電話機は、各フロアに設置される電話中継配線盤 (IDF) と管理室に設置される電話主配線盤 (MDF) を経由してセンター装置のデジタル電子交換モジュールと接続され、テナント電話機間又はテナント電話機と公衆網や専用線を経由して他の電話機との通話・通信をする。

ローカルコントローラは、センター装置のビル管理モジュールと接続され、ビル管理モジュールの指示によって各設備の発停制御を行ったり、設備の状態を取り込みビル管理モジュールに通知するものである。

カードリーダーは、センター装置のセキュリティモジュールと接続され、磁気カードの操作情報の送出やセキュリティモジュールからの施錠指示に従った電気錠の制御等を行うものである。また、カードリーダーは、停電補償電源パネルによって停電補償される。

センター装置は、ビル管理、セキュリティのメインコントローラモジュールとデジタル電子交換モジュールから構成される。さらに、セキュリティモジュールとデジタル電子交換モジュールは、30分補償のバッテリーバックアップが、

セキュリティモジュールには、防犯等の異常の自動通報装置 (MOP) が標準で装備されている。また、設備の異常の自動通報装置とテナント電話機からの操作により、設備の制御が可能となるテレホンコントローラをセンター装置に内蔵している。

さらに、電気料金や電話料金などの集計を行い、請求書の発行を行う課金装置、ビル管理モジュールの設備の状態を表示するアナンシエータがオプションとしてセンター装置に接

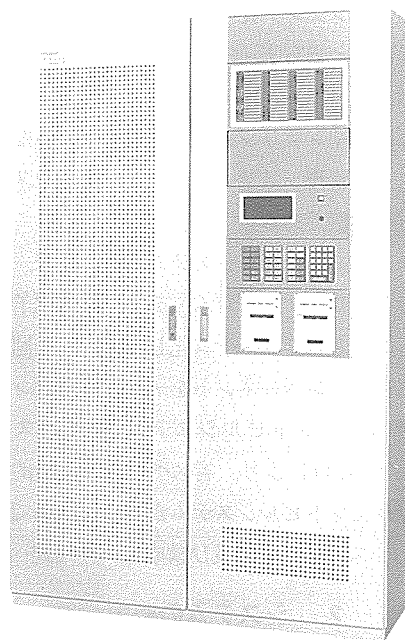


図2. センター装置の外観

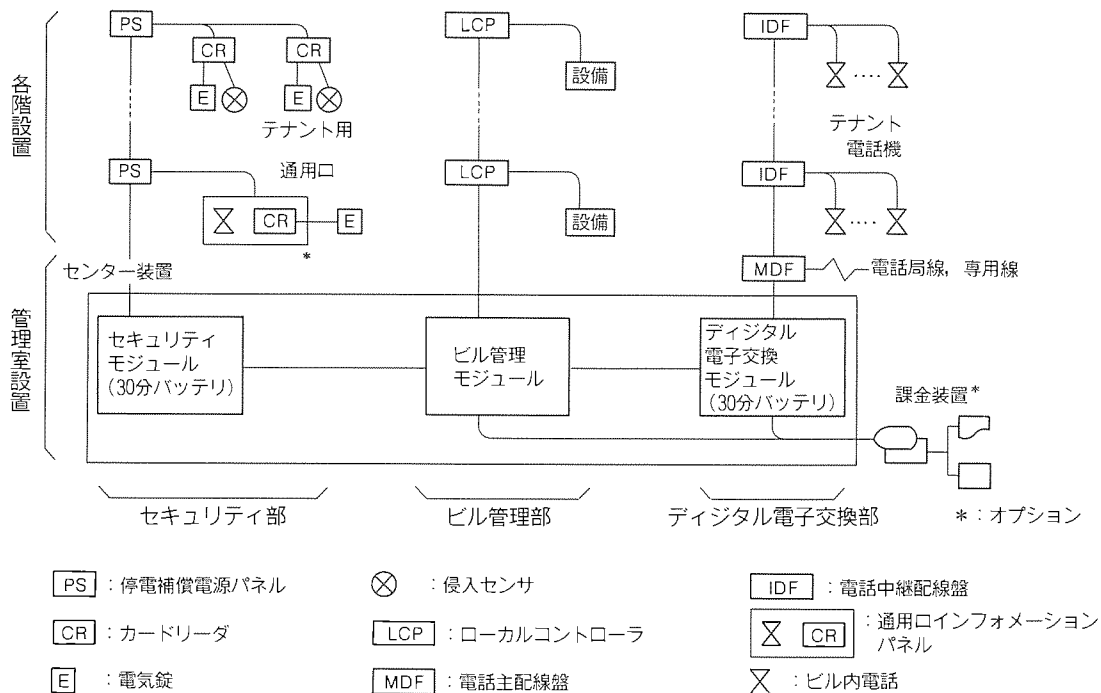


図3. システム構成

表1. システム構成要素の外形寸法

(単位: mm)

システム構成要素	寸 法
センター装置	W1,300×H2,000×D500(ベース含む)
ローカルコントローラ	W600×H900×D200
カードリーダー	W130×H330×D90
停電補償電源パネル	W600×H900×D200
通用口インフォメーション パネル*	W490×H400×D205
課金装置*	W1,400×H1,075×D1,300

注 * オプション

表2. システム容量

項 目	最大 容量
ビル管理 モジュール	接続可能なローカルコントローラの台数
	20台
セキュリティ モジュール	管理点数
	200点
セキュリティ モジュール	接続可能なカードリーダーの台数
	56台(そのうち、ビル通用口用カードリーダーは5台まで)
セキュリティ モジュール	カード発行枚数
	3,000枚
デジタル 電子交換 モジュール	局 線
	48回線
	専用線
	8回線
	アナログ内線
	32回線
	デジタル内線(音声専用)
デジタル 電子交換 モジュール	152回線
	デジタル内線(音声+データ)
	8回線(うち1回線は課金装置用)
	ISDN ベーシック局線
	2回線
デジタル 電子交換 モジュール	ISDN ベーシック内線
	4回線
デジタル 電子交換 モジュール	ISDN一次群局線
	2回線

表3. 主な機能概要

項 目	機 能
ビル管理機能	<ul style="list-style-type: none"> ・状態、警報、計測監視 ・遠方発停操作(キー操作による設備のオン・オフ制御) ・スケジュール発停制御(スケジュールによる設備のオン・オフ制御) ・設備の異常検出時に、電話回線を介したセンターへの自動通報機能 ・遠隔課金データ収集等
セキュリティ機能	<ul style="list-style-type: none"> ・各扉の施錠制御 ・侵入監視 ・火災、ガス漏れ監視等
デジタル電子交換機能	<ul style="list-style-type: none"> ・発信機能: 短縮ダイヤル, ダイレクトコール, 発信規制等 ・着信機能: ダイヤルイン, キャッチホン, 転送等 ・通話中機能: 保留, 転送等 ・デジタル多機能電話機能: ハンズフリー, 通話料金表示等 ・その他: トーキョーサービス, データ交換接続等
連動機能	<ul style="list-style-type: none"> ・多機能電話機によるビル通用口の通話と一時解錠機能等 ・警備連動機能(警備の入切による設備制御機能)等 ・多機能電話機による設備制御機能等 ・課金装置によるテナントの電気料金, 電話料金等の請求書発行機能

センター装置

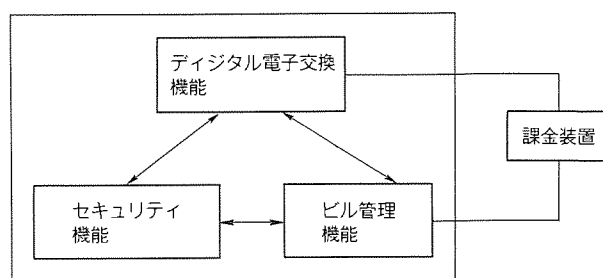


図4. システム機能の概略

続可能である。

4. システム機能

4.1 システム容量

このシステムは、1,000～5,000 m²の中小規模のビルを主ターゲットにしたインテリジェントビルシステムである。表2にこのシステムの最大システム容量を示す。

4.2 機 能

図4にシステム機能を、表3に主な機能を示す。このシステムは、ビル管理機能、セキュリティ機能、デジタル電子交換機能の各々の単体機能と統合機能に大別される。

4.2.1 ビル管理機能

主なビル管理機能には、①監視機能、②制御機能、③遠隔発報機能がある。

(1) 監視機能

設備機器の故障や異常を検出時、その内容を表示・印字する警報監視機能と、電流や温度等の計測値、電力量や水道メータ量等の計量値及び設備機器の運転状態を常時監視し、キーボード操作によってその内容を表示・印字する計測・計量値監視機能及び状態監視機能がある。また、計量値の1か月分の使用量をあらかじめ設定した日時に自動的に印字する自動検針機能等が可能である。

(2) 制御機能

各種制御対象設備に対して、キーボードの操作やあらかじめ設定した時間スケジュールに従って自動的に設備のオン・オフ制御をする遠方発停機能やスケジュール発停機能等がある。

(3) 遠隔発報機能

設備機器の故障や異常の検出時に、ビル設備の監視を行う三菱電機ビルテクノサービス(株)の情報センターへ自動通報する機能である。

(4) 遠隔課金データ収集機能

電話料金を除く請求書発行を代行するサービスのため、情報センターから遠隔で計量値を収集できる機能である。

4.2.2 セキュリティ機能

主なセキュリティ機能には、①各扉の施錠制御機能、②侵入監視機能、③防災監視機能がある。

(1) 各扉の施錠制御機能

テナント用扉の電気錠を、カードリーダーでカード操作することにより、施錠制御する機能と通用口扉の電気錠をスケジュールに従って施錠制御する機能がある。さらに、通用口扉の電気錠が施錠時、カードリーダーでカード操作することによって一時的に解錠できる機能がある。

(2) 侵入監視機能

テナント用扉の施錠中侵入監視し、侵入検知時に総合警備保障(株)のガードセンターへ自動通報する機能である。

(3) 防災監視機能

火災発生(火災センサーが作動)、ガス漏れ発生(ガス漏れセンサーが作動)した場合、及び非常ボタンが押された場合に警報発生を知らせ、総合警備保障(株)のガードセンターへ自動通報する機能である。

4.2.3 デジタル電子交換機能

これは、以下の接続サービスが可能で、主に表3に示す各種機能が可能である。内線端末として、①アナログ電話、②ハンズフリーや通話料金表示等が可能なデジタル多機能電話、③世界標準インタフェースのISDN 端末、また、ネットワークとして、①アナログ公衆網、②専用線、③デ

ジタル公衆網であるINS ネットに接続可能である。さらに、デジタル多機能電話からビル管理機能をアクセスでき、次に示すような連動機能が可能となる。

4.2.4 連動機能

上記三つの機能が連動し、以下の機能が可能である。

(1) 各テナントのデジタル多機能電話からの操作で、通用口の扉の一時的な解錠制御が可能である。

(2) 各テナント扉の施・解錠の状態に従って、照明等の設備のオフ・オン制御が可能である。

(3) 各テナントのデジタル多機能電話からの操作で、該当テナントの照明・空調等の設備のオン・オフ制御が可能である。

(4) 課金装置により、各テナントの電気料金、電話料金等を集計し、請求書発行ができる。

5. む す び

以上、三菱インテリジェントビルシステム“マイバスインテグラ”の概要について述べた。

このシステムは、今後ますます進展する中小規模ビルのインテリジェント化を容易に実現するために、極めて有用なものである。

今後、このシステムの更なる機能拡充を図っていく所存である。例えば、ビル管理モジュールやセキュリティモジュールがデジタル電子交換モジュールの通信制御サービスを利用することで、新しいサービスの実現等を目指すことにしている。

アクセスコントロールシステム

大森 正* 宮田 実*

1. ま え が き

近年、情報化社会の進展に対応して、オフィスビルへのコンピュータ設備が急速に普及している。官公庁、大企業などの一社占有ビルはもとより、テナントビルでもいわゆるコンピュータビルとして、大規模な計算機システムを装備するようになってきた。これに伴い、コンピュータ室・データ保管室、システム開発室など、部外者の立入りを厳しく制限し、高度なセキュリティ管理を実現できるシステムが必要となってきた。

当社ではビルのセキュリティシステムとして、部屋の戸締まり管理を主体とした三菱防犯用分散型キーレスシステムを開発し、販売してきた。今般、更に高度なセキュリティ管理へのニーズに対応するため、部屋の入退室管理を主体とした三菱アクセスコントロールシステムを開発した。

2. システムの特徴

このシステムの開発に際しては、特にきめ細かな運用が可能なセキュリティシステムを実現することに主眼をおいた。以下このシステムの特徴を説明する。

(1) 多様なセキュリティ運用に対応

このシステムはコンピュータ室などへの人の出入りを管理する機能を主体としている。しかしながら、テナントビルの持つオフィスやショッピングなど多様なエリアにも対応するため、戸締まり管理や侵入監視などの防犯機能も装備した。

(2) 多種の ID 端末に対応

個人を認証する照合端末 (ID 端末) として、これまで一般に磁気カードが使用されてきた。このシステムではこれに加えて、多目的利用可能な IC カード、ハンドフリーで操作できる非接触カードをビルの用途に応じて選択可能とした (IC カード及び非接触カード端末は開発中)。また、カードの盗用を防ぐため、テンキーによる暗証番号照合を付加できるようにした。さらに、指紋による照合も付加する計画である。

(3) 他システムとの連動

防犯用分散型キーレスシステムでは、部屋の戸締まり情報をビル管理システムに渡し、照明・空調設備などを連動制御してきた。このシステムでは更に、出退勤システムや会議室予約システムを構築できるようにした。

(4) 分散処理とホストバックアップ

部屋ごとに分散配置される ID 端末部には、ID 照合、電気

錠の制御、侵入検出、入退室情報記憶など、部屋単位で必要な機能を集約した。また、ビル管理システムとの通信、遠隔発報、火報連動、ID 登録データのバックアップなど、防犯監視や連動機能を伝送コントローラに収納した。すなわち、万一ホストコンピュータがダウンしても防犯監視に必要な最低限の機能はバックアップされる、いわゆるフェイルソフトの思想を取り入れた。

(5) ビルごと仕様の現地設定

部屋の用途やテナントの割当てなどビルの運用にまつわる仕様は、しゅん (竣) 工間際まで決まらないことが多い。また、竣工後もしばしば変更される。そこでこれらの仕様変動に柔軟かつ迅速に対応するため、ID 端末部などの動作仕様や接続数をホストコンピュータからの操作によって現地で設定できるようにした。

3. システム構成

このシステムは、ID 端末部、伝送コントローラ、ホストコンピュータ、電源盤を主要機器として構成される。さらに、必要に応じて IO コントローラや警報監視部を付加できるような構成した。このシステムの構成を図 1 に示す。以下各機器ごと、構成、動作、特徴などについて説明する。

3.1 ID 端末部

利用者とのユーザーインタフェースの機能を持つカードリーダー、テンキーと、ID 照合など ID 端末部の処理機能を持つ ID コントローラから構成される。表 1 に ID 端末部の機器仕様を示す。

3.1.1 カードリーダー

カードの読取り部と電気錠などの状態表示 LED とを実装した機器である。部屋の出入口横の壁面に設置するため、ビルの一般利用者にも目につきやすい機器である。そこで、特に樹脂成形のケースを採用し、ビルの内装と調和した見栄えの良い外観デザインを実現した。また、高密度実装技術を活用して、機能部品をすべて壁外のケース部に実装した。これにより、壁埋込み部は市販のスイッチボックスを使用可能とし、施工性の良い設置構造を実現した。

3.1.2 テンキー

暗証番号や機能操作を入力するシートキースイッチを実装した機器である。カードリーダーと同様に樹脂成形のケースに実装し、見栄え良く隣接できるように、カードリーダーと外形外観を合わせたデザインとした。また、カードリーダー単体の

場合とテンキー併設の場合とで同じスイッチボックスが使用できる構造とし、テンキーを容易に後付けできるようにした。図2にカードリーダーとテンキーの外観を示す。

3.1.3 ID コントローラ

ID 照合、電気錠制御、侵入検出、侵入センサや施解錠指令入力、警報・状態出力等の機能を壁掛け盤に収納した機器である。カードリーダー、テンキー、電気錠、侵入センサを2セットまで接続でき、1個の扉の入退室管理若しくは2個の別扉の入室管理ができる。各々のID コントローラはネットワークによって伝送コントローラに接続され、次のデータを送受信する。

- (1) 通行制御のタイプやテンキー照合の有無などID 端末部の動作を規定する機器属性データの受信
- (2) 個人ごとに設定する通行可能エリアや時間帯、個人番号、有効期限等のID 登録データの受信
- (3) 強制施解錠指令などの制御信号の受信
- (4) 通行異常や機器の異常などの警報信号、電気錠の施解錠状態などの状態信号の送信
- (5) カードリーダー操作者の個人番号や時刻などの通行記録データの送信

ID 照合の内容、電気錠の制御方式、接点入出力の動作などID コントローラの動作仕様は、伝送コントローラからダウンロードされる機器属性データによって規定される。これにより、ID コントローラを全く変更することなく機器属性データの設定だけで、多様な仕様に対応できるようにした。また、ホストコンピュータのダウンに備え、警報信号や通行記録データをID コントローラ内に記憶できるようにした。

3.2 伝送コントローラ

伝送コントローラは、各ID コントローラとホストコンピュータとの通信を制御する伝送制御部と、防犯監視や連動動作に必要な処理機能を持つバックアップ制御部とを収納したデスクサイドタイプの機器である。表2に伝送コントローラの機器仕様を示す。

3.2.1 伝送制御部

ID コントローラを接続する4チャンネルのネットワークインタフェース、ホストコンピュータを接続する通信インタフェース、バックアップ制御部との共用メモリインタフェースを備え、各々のインタフェースの通信プロトコルの違いを吸

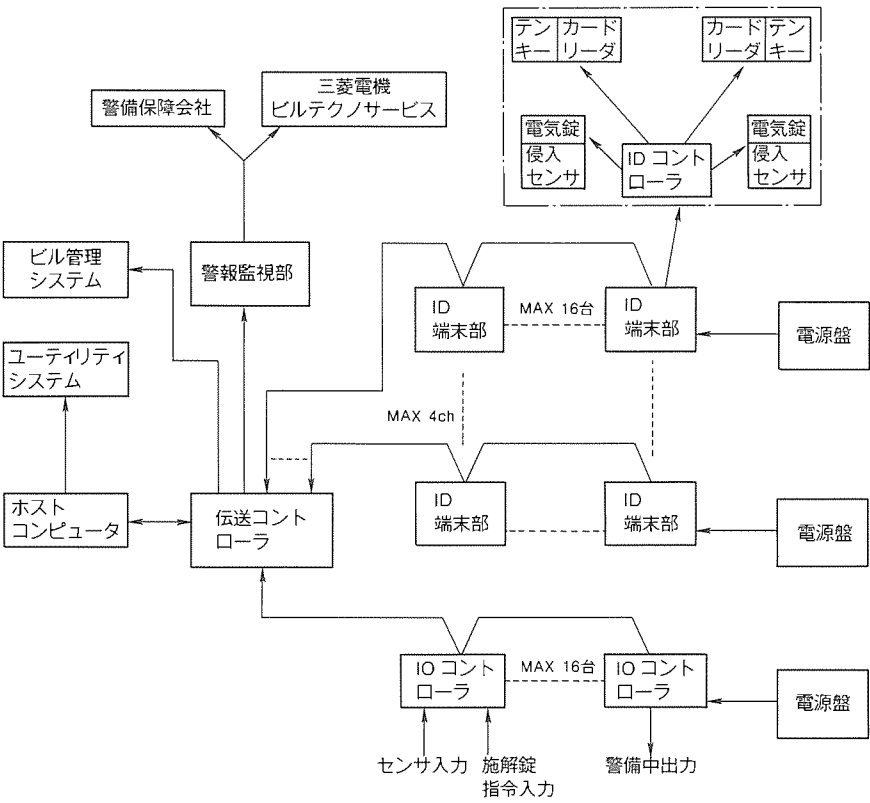


図1. アクセスコントロールシステムのシステム構成

表1. ID 端末部の機器仕様

項 目		仕 様
端 末	適用カード	JIS II 型磁気カード (IC カード、非接触カード端末開発中)
	表 示	2 色 LED 表示 最大 5 点
	操作キー	テンキー、機能キー×4
	基本外形(mm)	105(W)×120(H)×25(D)
I D コ ン ト ロ ー ラ	インタフェース	電気錠 I/F×2、移報出力×2、 センサ入力×2、施解錠指令入力×2、 端末 I/F×4 ch 伝送コントローラ I/F×1 ch
	C P U	16ビット CPU、1 M バイトメモリ
	電 源	DC24V 0.8A
	外 形(mm)	300(W)×400(H)×80(D)

収し、パケット単位でのデータ交換を可能とする伝送制御機能を持つ。ID コントローラインタフェースとホストコンピュータインタフェースには、各々専用のマイコンを搭載し、通信プロトコル処理を分担させた。これにより、処理性能と拡張性の向上を図った。

3.2.2 バックアップ制御部

データ処理用と伝送処理用との二つのマイコンを持つ制御プロセッサで、両マイコン間は共用メモリで接続している。この制御プロセッサによって次の処理を実行する。

- (1) エレベーターのサービス連動、強制施解錠信号のID コ

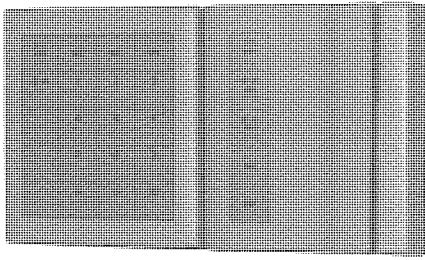


図 2. カードリーダーとテンキーの外観

ントローラへの割当て、ID コントローラ間の連動など
複数の ID 端末部にまたがる処理

- (2) ビル管理システムとの通信、警報監視部との通信、共用部の侵入検出、警備連動など防犯監視にかかわる処理
- (3) ID コントローラの機器属性情報や ID 登録情報のバックアップなどホストコンピュータを補完し、バックアップする処理

3.3 IO コントローラ

共用部のセンサ入力や警備入り切り信号出力など接点信号インタフェースを集約して収納した壁掛け盤である。伝送コントローラからの制御で動作し、様々な機能を発揮するが、その機能によって次の入出力インタフェースを用意した。

- (1) 火報連動などに使用する強制施錠信号の入力
- (2) 遠隔発報に使用する警報信号の出力
- (3) 警備連動などに使用する警備入り切り状態信号の出力
- (4) エレベーターとの連動に使用するサービス階カット指令信号の出力
- (5) 共用部などの侵入センサ信号の入力

伝送コントローラとはネットワークで接続し、対象機器の近くに分散設置できるようにした。表 3 に IO コントローラの機器仕様を示す。

3.4 警報監視部

ホストコンピュータによる警報監視を補完する機器である。夜間など監視員不在時に侵入警報を遠隔地で監視するため、加入回線による遠隔発報機能をもつ通信装置を用意した。また、ホストコンピュータダウン時に防犯監視を可能とするため、ランプによって警報を集約表示するアナウンスエータを用意した。これらは伝送コントローラに接続され、そこからの信号によって動作する。

3.5 電源盤

ID 端末部や IO コントローラに対し、所定の直流電源を供給する機器である。電源盤 1 台で、ID 端末部の場合は 6 台まで、IO コントローラの場合は 4 台まで電源を供給できる容量とした。また、オプションで停電バックアップ機能を備えたタイプも用意した。これらの仕様を表 4 に示す。

3.6 ホストコンピュータ

デスクトップのパソコン本体、プリンタ、カード発行機、ブザー装置などから構成されるコンピュータシステムである。

表 2. 伝送コントローラの機器仕様

項 目	仕 様
CPU	16ビット CPU×3 メモリ：3.5M バイト，FDD：1.44M バイト
インタフェース	ID コントローラ×4，ホストコンピュータ IO コントローラ×1，警報監視部×2
電 源	AC100V±10%，500VA
外 形(mm)	350(W)×620(H)×600(D)

表 3. IO コントローラの機器仕様

項 目	仕 様
C P U	16ビット CPU，メモリ：0.5M バイト
インタフェース	伝送コントローラ×1，DI/DO カード×4 (DI 16点/カード，DO 8点/カード)
電 源	DC24V 2.6A
外 形(mm)	400(W)×500(H)×200(D)

表 4. 電源盤の機器仕様

項 目	仕 様
電源出力	ID 端末部用：DC24V 16A 侵入センサ用：DC12V±10% 0.5A
電源入力	AC100V±10%，1.1kVA
外 形(mm)	400(W)×500(H)×200(D) 600(W)×900(H)×200(D) (停電補償付き)

オペレータのためのユーザーインタフェース機能に加え、仕様設定・カード発行・登録・監視・制御・管理運用などのデータ処理機能を備える。表 5 にホストコンピュータの機器仕様を示す。32 ビットのプロセッサを使用し、大容量の主記憶を実装するなど高性能なパソコンを採用しているが、さらにこのシステムのホストコンピュータとして必要な性能を引き出すため、次の点を強化した。

- (1) マルチタスク OS を採用して、カード発行・登録等オペレータ操作中でもリアルタイムで警報を表示できるようにした。
- (2) マイコン搭載の通信ボードを使用して、パソコンの通信プロトコルによる負荷を減らし、処理の高速化を図った。
- (3) データ処理用の流通ソフトを組み込み、検索性能等の向上を図った。
- (4) 画面制御用の流通ソフトを組み込み、オペレータの操作性向上を図った。

図 3 にホストコンピュータの外観を示す。

4. システム機能

このシステムは 3 章で述べた構成により、豊富な機能を実現している。システム仕様を表 6 に示す。以下、システムの持つ機能について説明する。

表5. ホストコンピュータの機器仕様

項 目	仕 様
C P U	32ビット CPU RAM : 13.6M バイト FDD : 1.44M バイト, HDD : 80M バイト 通信 I/F : RS-232C 同期式×2
表 示	14" カラー CRT
操 作	JIS 配列フルキーボード, マウス
プリンタ	136けた/行 漢字黒色印字
カード発行機	JIS II 型磁気カード (IC カード, 非排触カード開発中)
電 源	AC100V±10%, 1 kVA

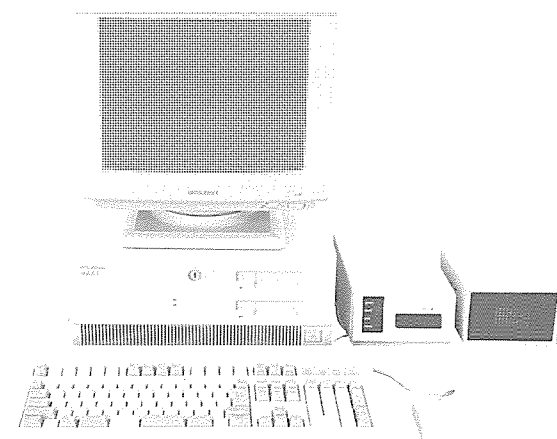


図3. ホストコンピュータの外観

4.1 仕様設定

対象となるビルの様態にこのシステムを適合させるため、諸々のパラメータを設定する機能である。現地調整段階で主に調整員が設定する端末動作仕様と、運用段階でシステムの管理者が設定する運用管理仕様とにレベル分けした。

4.1.1 端末動作仕様の設定

ビルごとに発生する仕様のうち、主に接続される ID 端末部の動作仕様 (機器属性) の設定機能である。ID 端末部ごと、ネットワーク上の物理的アドレス, ID 照合の内容, 各種制御の有無, 通行情報の送受有無などを設定する。ビルごとに固有なビル番号やシステム管理者の認証番号 (マネージャー番号) などこの段階で設定する。

4.1.2 運用管理仕様の設定

ビルごとに発生する仕様のうち、主にシステムの運用にかかわる仕様の設定機能である。パスワードとしてマネージャー番号を入力し、次の仕様を設定する。

- (1) システム全体の持つカレンダー時計の時刻を設定する。
- (2) 管理監視する部屋ごとに、対応する ID 端末部の機器番号, ビル管理システムとの連動で使用する管理番号など, いわゆる部屋情報を設定する。
- (3) 部屋ないし ID 端末部ごとに, 侵入, 通行異常などの警報の要否, 自動印字の要否を設定する。
- (4) オペレータの認証番号 (オペレータ番号) や許可する操作範囲を設定する。

4.2 登録・発行

利用者各個人の持つカードに所定の内容を書き込むとともに、対応する個人情報やアクセスレベル情報をシステムに登録する機能である。特にアクセスレベルについては、通行可能エリアや時間帯をパターン化し、きめ細かな運用ができるようにした。

4.2.1 アクセスレベルの登録

通行可能なエリア (部屋) や時間帯の組合せを、次の3段階の操作によって設定する。

- (1) まず、アクセスグループとして、所属などに応じて通行可能な部屋群のパターンを設定する。最大 64 パターン

表6. システム仕様

機能項目	仕 様
カード発行枚数	最大6,000枚
ID 端末部台数	最大64台 (端末数: 最大128台)
アクセスレベル	① 通行可能エリア: 最大64パターン ② 通行可能時間帯: 最大8パターン ③ ①と②の組合せ: 最大64パターン
操作レベル	マネージャー/オペレータ1/オペレータ2
監視	通行異常, 機器故障, 施解錠状態, 侵入
制御	強制施解錠, スケジュール施解錠
日報履歴	通行履歴, 警報履歴, 操作履歴
月報保存	記憶件数: 最大10万件, FDD への保存可能
連動制御	警備連動, エレベーターサービス連動, 火報連動, ITV 連動, テレホンコントロール連動
通行制御	入退室制御, キーレス制御, 防犯キーレス制御
遠隔発報	外部設置の通信装置による。
集約警報監視	外部設置のアナシエータによる。

まで設定可能

- (2) 次にアクセスタイムインターバルとして、業務などに応じて通行可能な時間帯のパターンを設定する。最大8パターンまで設定可能
- (3) さらに、アクセスグループとアクセスタイムインターバルを任意に組み合わせて、新たなパターン (アクセスカード) を設定する。最大64パターンまで設定可能

4.2.2 個人情報の登録

利用者個人ごとに、氏名, 個人番号, 所属, カードの有効期限, テンキー照合で使用する暗証番号などを登録する。あわせて、個人ごとにアクセスカードを登録して、前項で述べたアクセスレベルとの対応付けをとるようにした。

4.2.3 カード発行

カード照合に必要な個人番号などをカードに書き込む。紛失カードの盗用を防止するため再発行時に旧カードを無効にする機能、カード内容確認のためカードに対応する個人情報

を表示する機能を設けた。

4.3 監視

諸々の異常・故障・状態をホストコンピュータのCRT 画面に表示し、必要に応じてプリンタに印字する機能である。さらに、ホストコンピュータによる監視を補完するため、3.4 節で述べた警報監視部での警報監視機能を付加した。異常・故障については警報としてリアルタイムで表示・印字することとし、オペレータが警報監視以外の操作をしているときでも最新警報を警報フィールドに表示するようにした。また、運用管理仕様の設定機能により、運用上必要のない警報を抑止できるようにした。状態については、オペレータが部屋単位で照会し、その時の状態を表示するようにした。監視項目を次に示す。

- (1) セキュリティ警報として、ID 未照合戸開による通行異常、警備中侵入センサ動作による侵入警報、常閉扉の長時間解放異常、各機器の扉こじ開けによるタンパー異常などを監視する。
- (2) 機器故障として、電気錠の故障、各部の伝送エラーなどを監視する。
- (3) 状態として、ID 端末部の動作状態、電気錠の施解錠状態、警備入り切り状態、侵入の有無などを監視する。

4.4 制御

ホストコンピュータの操作により、各 ID 端末部に接続された電気錠や各部屋単位で持つ警備状態を制御する機能である。端末動作仕様の設定によって ID 端末部ごとに有効無効を可変し、ビルごとの仕様に対応できるようにした。

(1) 強制施解錠制御

ホストコンピュータの操作により、部屋単位で選択した電気錠を施錠又は解錠する。制御モードとして連続解錠、連続施錠、一時解錠の動作を選択できる。全部屋に対して連続解錠の制御をかけることにより、火災時などの一斉解錠の機能を実現した。

(2) スケジュール施解錠制御

あらかじめ設定した時間帯を部屋単位で選択した ID 端末部に割り当て、接続される電気錠をその時間帯だけ解錠する。時間帯はアクセスタイムインターバル(4.2.1 項参照)として設定されたパターンを使用することにした。ホストコンピュータのダウン時でもスケジュール制御が機能するように、パターンをあらかじめ ID 端末部にダウンロードするようにした。

(3) 警備入り切り制御

ホストコンピュータの操作により、選択した部屋の警備状態を入り切り制御する。警備状態を入りに制御することで、侵入センサを有効とし、侵入監視を開始する。ID 端末部が接続されている部屋に対しては、該当する ID コントローラを持つ警備状態に対して制御をかける。共用部など侵入センサだけが IO コントローラを経由して接続されているエリア

に対しては、定義されたエリアごとに伝送コントローラが持つ警備状態に対し制御をかける。

4.5 運用管理

ホストコンピュータにより、システムの設定状態を一覧したり、日単位で通行や警報の履歴を表示するなどシステムの運用を支援する機能である。操作によってプリンタに一覧表を印字する機能も設けた。

4.5.1 一覧表表示

4.1 節で述べた機器属性や部屋情報などの仕様設定の内容を一覧表にして表示する。このうち、端末動作仕様にかかわる機器属性については調整員だけが一覧できるように操作を制限した。また、4.2 節で述べたアクセスレベル情報や個人情報など登録情報を一覧表にして表示する機能も用意した。

4.5.2 日報履歴

ホストコンピュータに蓄積した次の履歴情報を日単位で表示する。

- (1) 入退室や警備入り切りのために行ったカードリーダの操作履歴を操作時刻・氏名・所属・部屋名称などとともに表示する。データ検索を容易にするため、個人別の表示機能と、部屋別の表示機能とを用意した。
- (2) 発生した警報を発生復帰時刻・場所・機器名称などとともに表示する。
- (3) ホストコンピュータで行った制御などの操作履歴を操作時刻、オペレータ氏名などとともに表示する。

4.5.3 月報保存

前項で述べた履歴情報は、ホストコンピュータのディスクに約 10 万件蓄積される。それを超えると順次古い物から破棄される。そこで月単位で履歴情報をフロッピーディスクに保存する月報保存の機能を設けた。履歴は個人別入退室、警報、操作に分けて別々に保存するようにした。

4.6 通行制御

カードリーダの操作によって扉を施解錠し、部屋の通行を制御する機能である。通行制御のタイプは、入退室制御とキーレス制御とに大別できる。このシステムでは機器属性を設定する際に、各部屋の用途に応じた ID 端末部の動作タイプとして、これらを設定することにした。また、必要に応じてテンキーを併設し、カード照合に加えて暗証番号の照合を AND 条件で付加できるようにした。

(1) 入退室制御

常時扉を施錠しておき、カード操作によって一時解錠して通行する制御である。主にコンピュータ室など部外者の入室を厳しく制限する部屋に適用する。侵入センサによる侵入監視を行う場合は、テンキーの機能キー操作で警備入り切りができるようにした。通用口も、前述のスケジュール制御と併用して、このタイプの通行制御で対応することにした。

(2) キーレス制御

カードを操作するごとに解錠と施錠とを繰り返す制御であ

る。通常の事務室などに適用する。すなわち、朝最初の入室者が解錠操作し、夜最後の退室者が施錠操作する。解錠中である昼間はカード操作することなくだれでも出入りできる。侵入監視を行う場合は施解錠と同期して警備入り切りをする。

(3) モード切替え

キーレス制御に設定した部屋に対して、テンキーの機能キー操作により、入退室制御モードに切り替える機能を設けた。これにより、夜間の残業時だけ扉を常閉にして安全を図るといった運用に対応した。

4.7 他システムとの連動

このシステムの持つカードリーダ操作情報、警報・状態信号を活用して、ビルの運用や管理に有効なシステムを実現するための機能である。諸々のシステムとのインタフェースを装備し、これらのシステムと連動できるようにした。

(1) 通信インタフェースの装備

侵入警報、電気錠の施解錠信号、警備入り切り状態、システム異常などの授受のため、ビル管理システムとの通信インタフェースを設けた。これにより、次項で述べる警備連動を始め、ビル管理システム側での警報・状態監視、通用口の施解錠制御などを可能とした。

操作者・操作時刻・操作内容などカードリーダの操作情報の授受のため、ユーティリティシステムとの通信インタフェースを設けた。これにより、出退勤管理システムや会議室予約システムの構築を容易にした。

(2) 警備連動

各部屋ごとに、警備入り切り状態をビル管理システムに出力し、各部屋ごとに設備機器を制御する。例えば、警備中の部屋の照明だけを消灯する処理が可能である。このシステムとの通信インタフェースを持たないビル管理システムにも対応できるよう、警備入り切り状態をIOコントローラの接点

からも出力するようにした。

(3) エレベーターサービス連動

警備入り切り状態をエレベーターに出力し、エレベーターのサービス階を制御する。すなわち、各部屋が警備中の間IOコントローラからサービス切り離し指令信号を出力し、無人となった階のエレベーターサービスを停止させる。また、サービス切離し中の階の部屋に属する人が通用口のカードリーダを操作したとき、その階のサービス切離し指令信号を一時的に解除し、エレベーターがその階に停止するように制御する。

(4) その他の連動機能

自火報盤からの火災信号をIOコントローラ経由で伝送コントローラに取り込み、あらかじめ設定した部屋の電気錠を解錠する。これにより、火災区域の避難路の確保などに対応した。

テレホンコントロール装置からの解錠指令信号をIDコントローラに取り込み、対応する電気錠を一時解錠する。これにより、カードを持たない外来者のために、施錠中の通用口を電話によって一時解錠するといった運用に対応した。

侵入検出時などに、侵入に対応したIDコントローラから警報信号を出力する。これにより、ITV装置を起動して侵入状況をモニターするといった運用に対応した。

5. む す び

以上、三菱アクセスコントロールシステムの概要を紹介した。このシステムは既にビル・工場などからの受注物件を始め、多くの引き合いをいただいている。

今後は、ますます多様化するニーズに対応すべく、システム規模の拡大と機能強化を図っていく計画である。

ダブルドライブスーパーバス方式 スピーカーシステム

興野 登* 大塚 功* 高橋政典**

1. ま え が き

AV 機器の普及、ビデオソフトの充実、家庭用 TV 画面の大型化等により、最近は本格的家庭用 AV シアター時代を迎えようとしている。家庭用 AV シアター用機器では、高画質・高音質が要求されるが、音を受け持つスピーカーシステムとしては、優れた音像定位と小容積キャビネットでの重低音再生が強く要求される。また、同時に画面の大型化に対応して、視覚的に違和感がなく、設置性の良いデザインが重要視される。そこで、大画面对応の低音再生方式として、音像定位、重低音再生及び設置性に優れたダブルドライブスーパーバス方式を新たに開発した。

2. 開 発 課 題

家庭用 AV シアター用スピーカーとして要求される音像定位、重低音再生及び設置性の良さを実現するために、ダブルドライブスーパーバス方式では、次の技術的課題を設定した。

- (1) 設置性及び省スペースを重視し、柱状キャビネットによる小容積重低音再生を実現する。
- (2) 明確な音像定位と臨場感を実現するため、キャビネット断面は回折効果を抑えた楕(橢)円形状とする。また、システムを2ウェイで構成し、音声帯域は全帯域用の一つのスピーカーユニットで再生する。
- (3) 低音用と高音用の音のつながりを考慮し、40 Hz から200 Hz までの広帯域・重低音再生を実現する。
- (4) 迫力ある重低音再生を行うための大音量再生を可能にする。

3. ダブルドライブスーパーバス方式

3.1 構 造

ダブルドライブスーパーバス方式は、上記課題を解決する手法として、キャビネット内部に小型で強力な低音用スピーカーユニットを2個配置した二重駆動方式を採用した。

図1(a)、(b)にダブルドライブスーパーバス方式の基本構造及び低音用ユニットの接続図を示す。図のようにダブルドライブスーパーバス方式では、並列接続された2個のユニット(SP.1, SP.2)を柱状キャビネット内に配置し、プッシュプルで動作させる。また、3個の音響ポート(PT.1~PT.3)をキャビネット内に配置し、低音用の再生周波数帯域をでき

るだけ高音域まで拡大する。

ここで二重駆動方式を採用したのは、ユニットを2個使用することによってシステムとしての許容入力を増大させ、大音量再生を可能にすること、及びユニット間の空気室を利用し、音圧周波数特性の平坦化を図ることをねらったためである。この方式は、従来当社で開発したDDSS方式^{(1)~(3)}を発展させたものである。

ダブルドライブスーパーバス方式の動作原理の概要は、次のとおりである。すなわち、図1において2個の低音用ユニットから発せられた音について、一方は音響ポート PT.1, PT.3 を通じて外部に放射され、他方は PT.2 を通じて外部に放射される。ここで PT.1, PT.3 を通じて外部に放射される音は、容積 V_1 , V_3 の空気室と音響ポート PT.1, PT.3 の作用により、音圧周波数特性上に共振周波数の異なる二つの山を生じる(共振周波数 f_{r1} , f_{r3})。一方、PT.2 を通じて外部に放射される音の共振周波数 (f_{r2}) は、あらかじめ上記音圧特性の山の間中に位置するように設計されている。これら三つの共振の山は、最終的に加算的に合成されて広帯域・重低音再生方式を実現することができる。

図2に低周波数域における音圧周波数特性の概念を示した。図において P1, P3 は容積 V_1 , V_3 の空気室と音響ポート PT.1, PT.3 の作用によって生ずる共振の山、P2 は容積 V_2 と音響ポート PT.2 によって生ずる共振の山を意味している。

3.2 等 価 回 路

図3(a)、(b)にダブルドライブスーパーバス方式の機械系

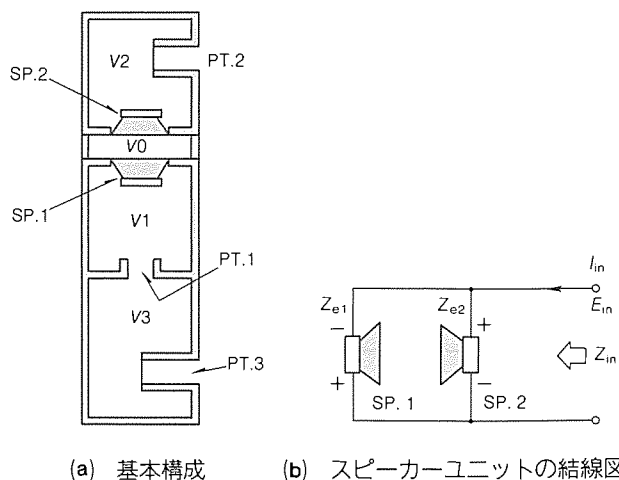


図1. ダブルドライブスーパーバス方式スピーカーの構成

等価回路を示す。使用した記号の意味は表1のとおりである。図(a)は同一の低音用ユニットを用いた場合の基本等価回路、図(b)は解析のために使用した簡略等価回路である。図(b)における機械インピーダンス Z_{s1} , Z_{L1} , ... は、図(a)の素子定数をまとめて表記したものである。

図(b)において振動速度 $v_{L1} \sim v_{L3}$, v_{s1} , v_{s2} に着目すると次のマトリクス方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} Z_{L3}+Z_{c3} & -Z_{c3} & & & 0 \\ -Z_{c3} & Z_{c1}+Z_{c3}+Z_{L1} & -Z_{c1} & & \\ & -Z_{c1} & Z_{c1}+Z_{s1}+Z_0 & -Z_0 & \\ 0 & & -Z_0 & Z_0+Z_{s2}+Z_{c2} & -Z_{c2} \\ & & & -Z_{c2} & Z_{L2}+Z_{c2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{L3} \\ v_{L1} \\ v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{L2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F1 \\ F2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ここで直接音放射に寄与する変数は振動速度 v_{L2} と v_{L3} であるから、上記マトリクス方程式から v_{L2} と v_{L3} とを求めることによって、最終的にスピーカーとしての放射音圧、位相、電気インピーダンス特性及び振動変位等を計算することができる。

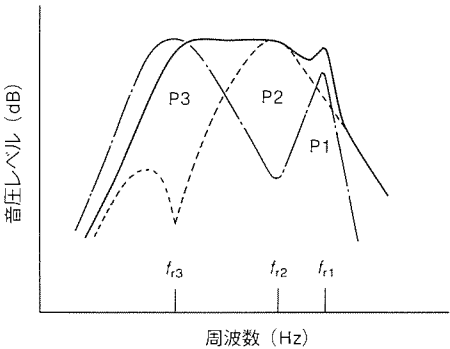
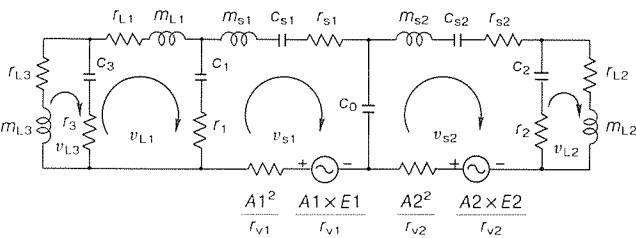
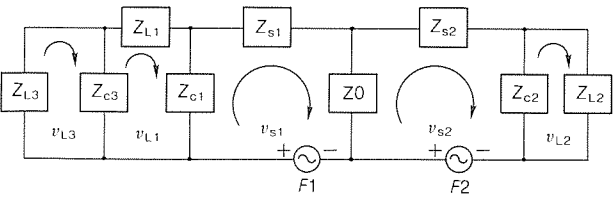


図2．低域特性の概念



(a) 基本等価回路



(b) 簡略等価回路

図3．ダブルドライブスーパーバス方式
スピーカーの機械系等価回路

図の等価回路において重要な音響定数は、電気インピーダンスが極小値を示す反共振周波数 f_{r1} , f_{r2} , f_{r3} である。これらはダブルドライブスーパーバス方式の再生周波数帯域を決定する重要な定数である。 f_{r1} , f_{r2} , f_{r3} を適正に設定することにより、音圧特性が平たんで、かつ広い再生周波数帯域を持つ小容積重低音再生の実現が可能となる。

4. 低域特性シミュレーション

図4(a)～(c)にダブルドライブスーパーバス方式での音圧周波数特性、位相特性、電気インピーダンス特性及び振動変位に関する振幅特性のシミュレーション例を示す。図においてP2, P3は音響ポートPT.2, PT.3からの放射音圧特性、PH2, PH3はその位相特性、P, PHは音響ポートPT.2, PT.3からの放射音の合成音圧特性と合成位相特性、 Z_{e1} , Z_{e2} は低音用ユニットSP.1, SP.2の電気インピーダンス特性、 Z_{in} は合成の電気インピーダンス特性、X1, X2はSP.1, SP.2の振幅特性を示す。

図(a), (b)から、ダブルドライブスーパーバス方式では反共振周波数 $f_{r3} \sim f_{r1}$ の広い周波数帯域をほぼ再生できることが分かる。位相特性PH2, PH3についてみると、 $f_{r3} \sim f_{r2}$ で同相、 $f_{r2} \sim f_{r1}$ でもその差約90°であり、音圧特性上の三つの山が加算的に合成されることが分かる。図(c)の振幅特性について特徴的なことは、反共振周波数 f_{r1} , f_{r2} , f_{r3} の位置で振幅がほぼ極小値を示すことである。このためスピーカーの許容入力が増大し、大音量再生が可能となる。

表1．使用記号の意味

記 号	意 味
SP.1, SP.2	第1, 第2のスピーカー
r_{v1} , r_{v2}	SP.1, SP.2の直流抵抗
m_{s1} , m_{s2}	〃 等価質量
m_{L1} , m_{L2} , m_{L3}	〃 等価質量
r_{L1} , r_{L2} , r_{L3}	〃 等価機械抵抗
A1, A2	〃 力係数
f_{r1} , f_{r2} , f_{r3}	音響ポートPT.1～PT.3に関する反共振周波数
V0	SP.1とSP.2間の容積
V1, V2, V3	キャビネット内部の分割された容積
r_1 , r_2 , r_3	V1～V3に関する等価機械抵抗
c_0 , c_1 , c_2 , c_3	V0～V3に関する等価コンプライアンス
Z_{L1} , Z_{s1} , ...	機械インピーダンス
F1, F2	SP.1, SP.2による駆動力
v_{L1} , v_{L2} , v_{L3}	音響ポートPT.1～PT.3に関する等価振動速度
v_{s1} , v_{s2}	SP.1, SP.2の振動速度
E1, E2	SP.1, SP.2への入力電圧
Z_{e1} , Z_{e2}	SP.1, SP.2の電気インピーダンス
E_{in} , I_{in}	総合入力電圧, 入力電流
Z_{in}	入力インピーダンス
X1, X2	SP.1, SP.2の変位(振幅)

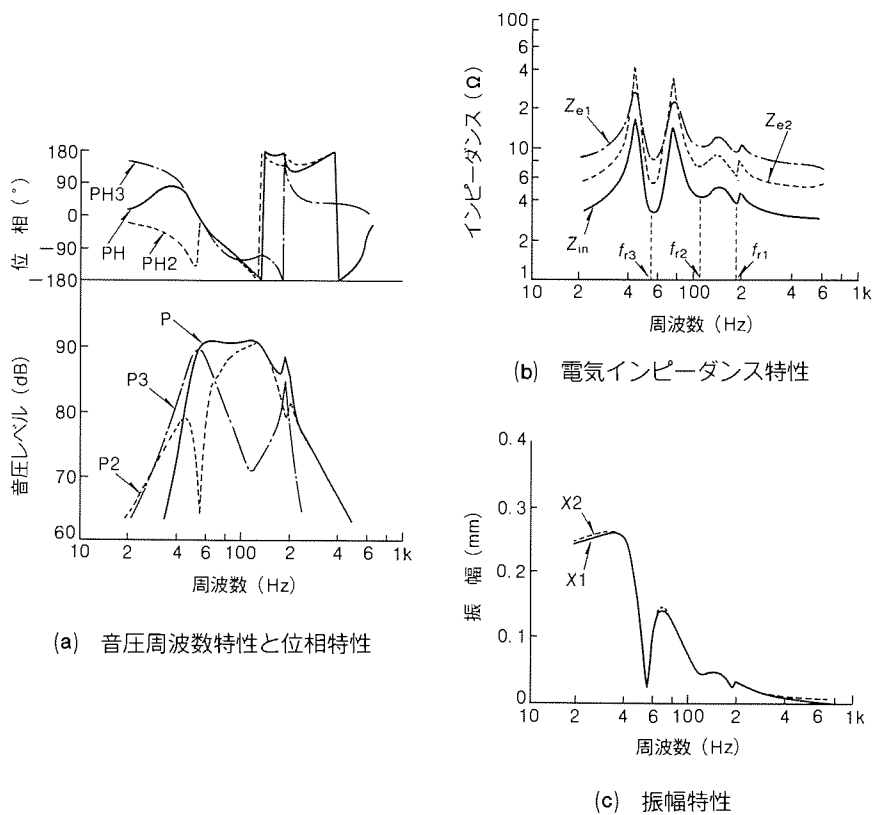


図4．特性シミュレーションの一例

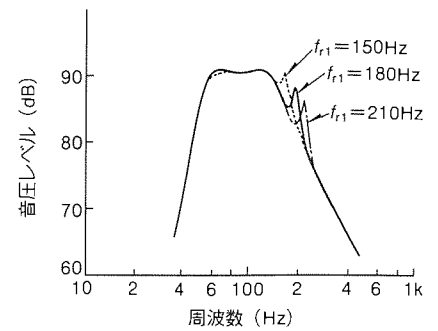


図5． f_{r1} を変化した場合の音圧周波数特性の変化

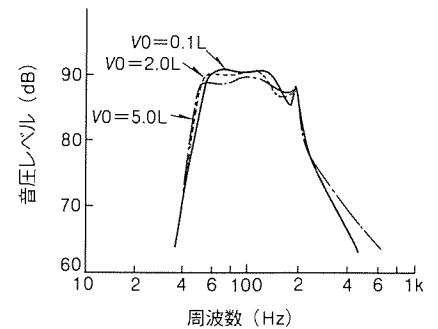


図6． V_0 を変化した場合の音圧周波数特性の変化

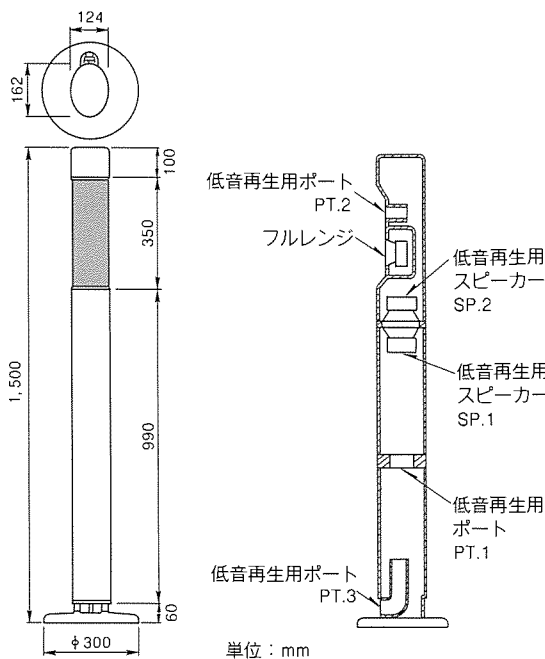


図7．DS-S1の外形と構成断面

図5、図6はダブルドライブスーパーバス方式の特性傾向のシミュレーション例を示したものである。図5は f_{r1} を変化させた場合の音圧特性変化を示したものであるが、 f_{r1} を増加させると再生帯域がより高い周波数まで拡大する反面、音圧レベルが低下する。反共振周波数 f_{r1} は容積 V_1 、 V_3 と音響ポートPT.1の等価質量によって定まるが、再生帯域の

表2．DS-S1の仕様

方 式	ダブルドライブスーパーバス方式 2ウェイ3スピーカー
ユニット構成	低音用……口径 10cm LCP コーン×2 フルレンジ…口径 8cm LCP ファイバコン
公称インピーダンス	6 Ω
出力音圧レベル	88dB/W/m
再生周波数帯域	40Hz～20kHz
最大入力	150W (EIAJ 規格)
クロスオーバー周波数	200Hz
外形寸法(mm)	124(W)×1,500(H)×162(D) ベース部 径130
質 量	15kg

拡大と音圧特性の平坦化を同時に実現するには、 f_{r1} を適正に設定することが重要であるといえる。

図6は二重駆動されたスピーカーユニット SP.1, SP.2間の空気室の容積 V_0 を変化させた場合の音圧特性の変化を示したものであるが、 V_0 を増加させると再生帯域がより低い周波数まで拡大されるとともに、音圧特性も平坦化されることが分かる。ただし、音圧レベルはやや減少する傾向を示す。

5. DS-S1の音響特性

上記シミュレーション結果を基に開発した柱状スピーカー

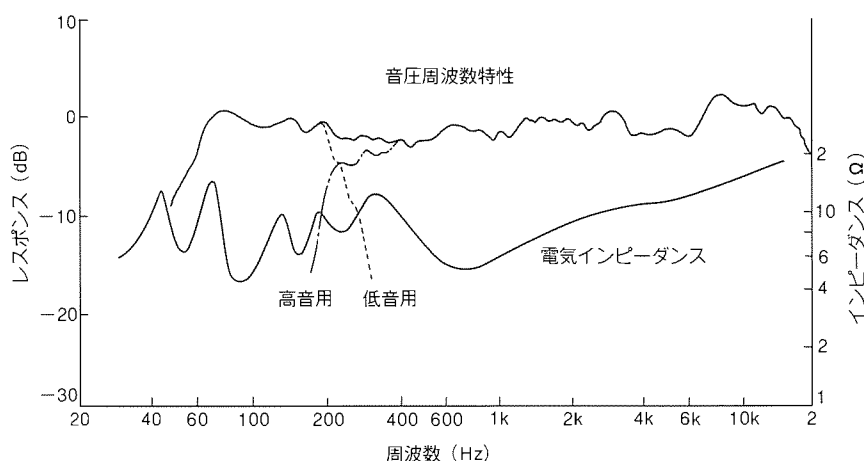


図8．DS-S1の音圧周波数特性と電気インピーダンス特性

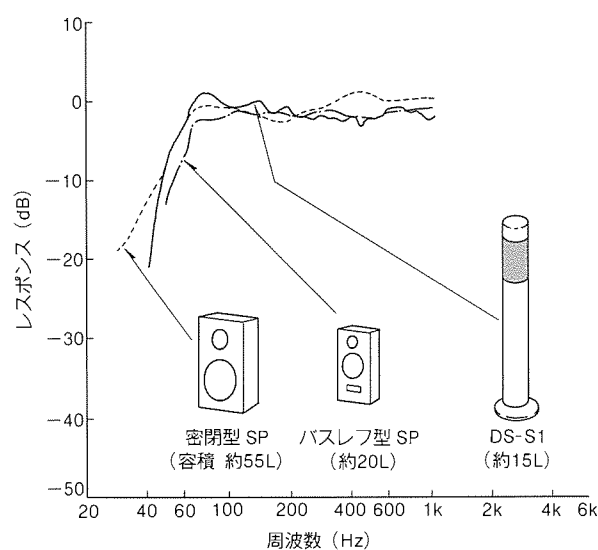


図9．従来方式スピーカーとDS-S1との音圧特性比較

システム DS-S1 の外形と構造断面を図7に示す。DS-S1 では80～120インチのスクリーンサイズに合わせ全高を1.5mに設計するとともに、音響ポートをキャビネットの上下に配置し、スクリーン全体から低音が放射されるように考慮した。DS-S1の概略仕様は表2のとおりである。

図8にDS-S1の音圧周波数特性と電気インピーダンス特性を示す。音圧周波数特性をみるとクロスオーバー周波数はほぼ200Hzとなっており、低音用と高音用の音のつながり、低音用の再生帯域の拡大などが適正に実現されていることが分かる。また、低音域の特性はシミュレーション結果を良く裏付けるものとなっている。

図9に低周波数域における従来のスピーカーシステムとDS-S1との音圧特性比較を示す。DS-S1では、15Lという小容積キャビネットにもかかわらず、従来のブックシェルフスピーカー並みの重低音再生が可能となった。DS-S1の外形を図10に示す。

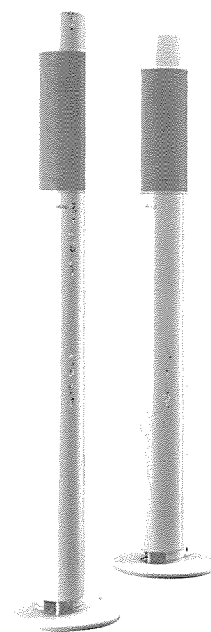


図10．ダブルドライブスーパーバス方式スピーカー DS-S1

6. む す び

ダブルドライブスーパーバス方式を開発することにより、15Lという小容積柱状キャビネットでの重低音再生可能なスピーカーシステム DS-S1を開発することができた。

DS-S1はインテリアにマッチしたスリムなデザインであると同時に、音像定位に優れ、小容積重低音再生が可能なことから、今後の本格的な家庭用AVシアター時代にふさわしいシステムであると考えている。

なお、DS-S1の放射音波は、ほぼ球面状をしていることがシミュレーションによって確認されており⁽⁴⁾、キャビネット断面を楕円形状とした効果が裏付けられている。

参 考 文 献

- (1) Kyouno, N., Fujiwara, S. : A Compound Loading Loudspeaker System-Simulation and Acoustic Characteristics in a Low Frequency Range, Presented at the 85th AES Convention, Los Angeles (1988-11)
- (2) 興野 登, 藤原 奨: ダブル駆動方式スピーカーシステムによる低音再生の検討, 電気音響研究会資料 EA-69 (1987)
- (3) 亀山格彦: ダブルドライブスピーカーシステムについて, JAS Journal, No. 3, 14～18 (1989)
- (4) 伊藤 実: 柱状スピーカーシステム, ダイアトーン DS-S1の技術詳細, ラジオ技術, No. 6, 145～149 (1991)



特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
特許営業グループ Tel(03)3218-2137

円偏波アレーアンテナ (特許 第1244321号)

この発明は、複数個の円偏波アンテナ素子を配列して成る円偏波アレーアンテナに関するものである。

従来の円偏波アレーアンテナ(2)は、図1に示すように、例えば素子アンテナとしてターンスタイルアンテナ(1)を用いるとき、90°の励振位相差を持つ2個のダイポールアンテナ(3,4)をすべて基準励振方向(X軸及びY軸)に一致させていた。このため、ターンスタイルアンテナ(1)が給電のアンバランスなどにより円偏波の軸比が悪い場合には、円偏波アレーアンテナ(2)全体としても、軸比の悪さはそのまま保存されるという欠点があった。

この発明は、図2のように、ターンスタイルアンテナ(1)の基準励振方向を、空間的にランダム又は規則に従って回転させて配置し、その空間的回転角に相当する位相量を給電位相で補償するように構成される。その結果、例えば右旋円偏波に対して各ターンスタイルアンテナ(1a, 1b, 1c...)の軸比が悪い場合でも、右旋円偏波成分は給電位相で補償され何ら影響を受けない一方、不要な左旋円偏波成分は、偏波回

発明者 水沢丕雄, 小野 誠, 真野清司
軸角がランダムに異なったものが合成されて相殺され、全体として軸比の良い右旋円偏波を得ることができる。

以上のようにこの発明によれば、素子アンテナの種類、配列及び送信受信を問わず、偏波特性の優れた円偏波アレーアンテナを提供できる。

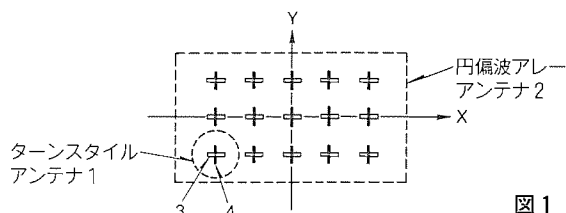


図1

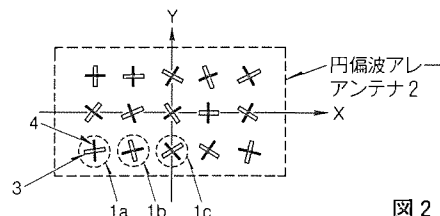


図2

アンテナ診断装置 (特許 第1553446号)

この発明は、いわゆるフェーズドアレーアンテナにおける各素子アンテナの励振振幅、位相の状態を診断する装置に関するものである。

従来この種のアンテナ診断装置は、図1に示すように、各素子アンテナ(1)にピックアッププローブ(3)を設け、これにより各素子アンテナ(1)の振幅と位相を診断していたが、プローブ自体の測定誤差等により正しい診断ができないという欠点があった。

この発明は、全素子アンテナを動作させた初期状態における合成電界ベクトルの振幅 E_0 、位相 Φ_0 に対し、第 n 番目の素子アンテナの相対振幅 E_n/E_0 、相対位相 $\Phi_n - \Phi_0$ は、第 n 番目の素子アンテナの位相を順次変化させたときの合成電力レベルを測定することから知ることができるという理論に基づき、以下のように構成される。すなわち、図2における対向アンテナから電波を送信し、全素子動作状態で、制御回路の動作に基づき各素子アンテナ(1)について可変移相器(2)により順次位相変化させ、同時に測定演算回路によりこのときの合

成電力レベルの変化を測定して各素子アンテナの振幅、位相を算出する。この結果を診断回路に送り込み、あらかじめ記憶されていた各可変移相器(2)の初期位相と比較することによって、各素子アンテナの位相の状態を診断することができる。

以上のように、この発明によればプローブを用いることなく、フェーズドアレーアンテナ本来の動作状態で測定するようにしたため、迅速かつ高精度にアンテナの振幅、位相の状態診断が可能となる。

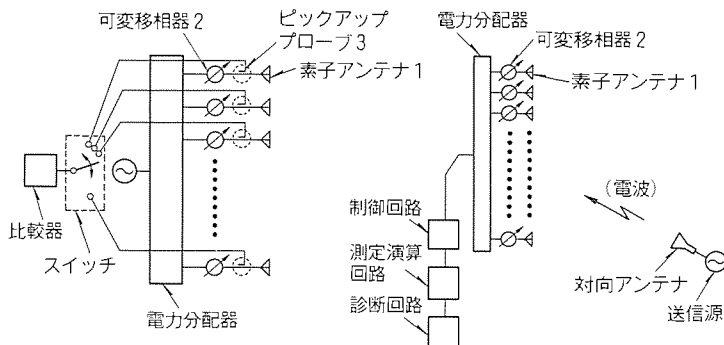


図1

図2



特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
特許営業グループ Tel (03) 3218-2137

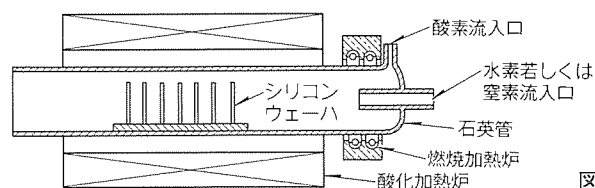
半導体酸化装置 (特許 第1169902号)

この発明は、半導体の表面に厚い酸化膜を形成する半導体酸化装置に関するものである。

半導体の酸化、例えばシリコンの表面に厚いシリコン酸化膜を生成させるには水蒸気雰囲気中で高温かつ長時間の酸化を施す必要があり、従来水を沸騰させて水蒸気を発生させていた。しかしこの沸騰水蒸気を得るためのボイラなどからの半導体への汚染の問題があり、この問題を避けるために、清浄な水素と酸素を燃焼化合させて得た水蒸気を使用することが考えられている。一方、高温でシリコンを酸化させるとシリコン基板表面に欠陥を発生させたり、基板を歪ませたり好ましくない影響がある。したがってできるだけ低温で酸化させる方法が開発されつつある。また水素と酸素の燃焼化合温度は600℃で、この温度以下の低温酸化の場合には従来のように酸化炉の中で水素と酸素の燃焼化合をさせることができない。

発明者 坪内夏朗, 阿部東彦, 西本章, 三好寛和
この発明は、このような点を解決するためになされたもので、図の実施例に示すように水蒸気の雰囲気中で半導体を加熱酸化させる加熱酸化炉とは別に、燃焼加熱炉を設ける。燃焼加熱炉は水素と酸素を燃焼化合させて水蒸気を発生するので、これを加熱酸化炉へ供給することにより、加熱酸化炉はその水蒸気の雰囲気中で、シリコンウェーハを低温酸化することができる。

以上のようにこの発明によれば、汚染が少なく、半導体基板表面に欠陥が生じたり、基板に歪みが生じることがなく、すぐれた半導体酸化膜が生成する装置が提供できる。



図

〈次号予定〉三菱電機技報 Vol. 66 No. 5 特集 “超電導の進展”

特集論文

- 超電導の将来
- 超電導線材
- 小型ヘリウム冷凍機技術
- 断熱技術
- 核融合炉用超電導マグネット
- 高エネルギー物理研究用超電導機器
- 高磁界超電導マグネット
- 超電導エネルギー貯蔵(SMES)
- 超電導発電機
- 超電導の交流応用
- MRI用超電導マグネット

- 磁気浮上式鉄道用超電導マグネット
- 産業装置用超電導マグネット
- 高温超電導デバイス
- 高温超電導膜のデバイス及び線材応用
- 高温超電導線材
- 高温超電導のエネルギー応用

普通論文

- 東京都防災情報システム
- 中部電力(株)豊根開閉所納め高信頼度形550kV GIS
- 新形550kV, 300kV ガス遮断器シリーズにおける小型化・高信頼度化技術

三菱電機技報編集委員

委員長	山田 郁夫
委員	小澤 文明
〃	福岡 正安
〃	谷 豊文
〃	風呂 功
〃	大原 啓治
〃	松村 恒男
〃	名取 直幸
〃	吉岡 猛
〃	鳥取 浩
〃	岡田 久雄
幹事	長崎 忠一
4月号特集担当	片木 孝至

三菱電機技報 66 巻 4 号

(無断転載を禁ず)

1992年 4月22日 印刷

1992年 4月25日 発行

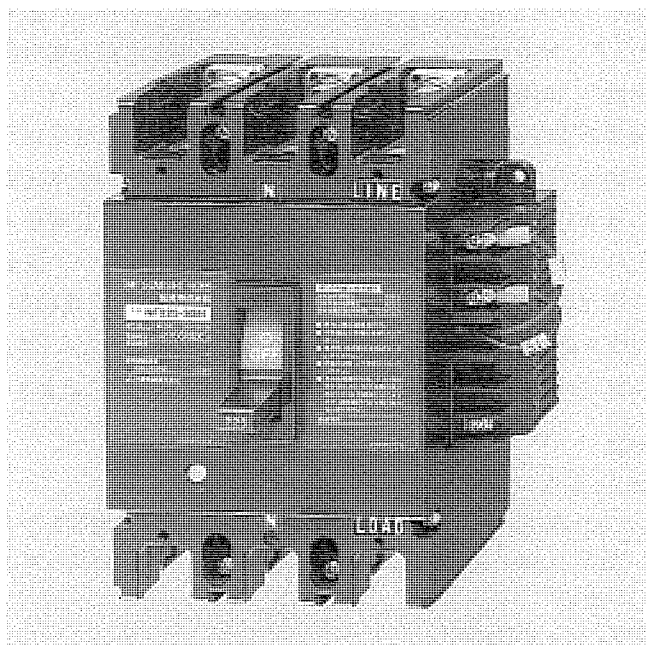
編集兼発行人	長 崎 忠 一
印刷所	千葉県市川市塩浜三丁目12番地 (〒272-01) 菱電印刷株式会社
発行所	東京都千代田区大手町二丁目6番地2号 日本ビル 6階 (〒100) 三菱電機エンジニアリング株式会社内 「三菱電機技報社」 Tel. (03) 3218局2806
発売元	東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 (〒101) 株式会社 オーム社 Tel. (03) 3233局0641代, 振替口座東京 6-20018
定 価	1部 721円 (本体 700円) 送料別 年間予約は送料共 9,373円 (本体 9,100円)

単3中性線欠相保護付き 配線用遮断器

単相3線式配線では、中性線が欠相すると100V回路の負荷機器に異常電圧が印加され、負荷機器が絶縁劣化や焼損する場合があります。これを防止するため、異常電圧を検出し回路を遮断する機能を備えた配線用遮断器を開発しました。

特長

- 単3中性線欠相による異常電圧から負荷機器を保護
単3中性線欠相による異常電圧が135Vを超えると0.5秒以内(0.1～0.5秒)で回路を遮断し、負荷機器の絶縁劣化、焼損を防ぎます。
- 1台で3機能
単3中性線欠相による異常電圧はもちろん、過負荷・短絡に対する保護もします。



仕様

形 名		NF100-CSN	NF100-SSN	NF225-CSN	NF225-SSN
相 線 式		1φ3W			
極 ・ 素 子 数		3P2E		3P3E	
定 格 電 圧 AC(V)		100/200			
定 格 電 流 (A)		60、75、100		125、150、175、200、225	
中性線欠相保護特性 注1	定 格 動 作 過 電 圧 AC(V)	135			
	定 格 不 動 作 過 電 圧 AC(V)	125			
	定 格 過 電 圧 動 作 時 間 (s) 以 内 注2	0.5			
	定 格 遮 断 電 流 (kA)	25	50	25	50
接 続 方 法 (表面形)		圧着端子用(バリア付)			
内部装置付き 付属 注3 注4	警 報 ス イ ッ チ (AL)	○			
	補 助 ス イ ッ チ (AX)	○			
	A L + A X	○			

注1. 欠相保護は外部モジュールつきとなります。(右極側)

注2. 過電圧慣性不動作時間は、0.1S以内です。

注3. AL、AXは左極側取付けです。

注4. 付属装置SHT、UVTは、製作出来ません。

使用例

〈過電圧検出リード線の接続〉

この遮断器には過電圧を検出するための過電圧検出リード線接続端子が付いています。この端子と中性線を右図のように接続して使用します。

過電圧検出リード線接続用端子

過電圧検出リード線

分電盤内での接続位置

過電圧検出リード線は分電盤内の単相3線回路の末端(負荷側)の中性線の導体へ接続します。接続点より電源側の中性線欠相による過電圧を検出します。

NV：分岐漏電遮断器

空転再粘着制御 VVVFインバータ装置

近年、鉄道車両としてインバータ車が普及してきていますが、その理由の一つに優れた粘着性能を実現して動力集中化を図り、車両製作費を低減することがあげられます。しかし、従来の空転再粘着制御方法では、期待粘着係数の設定は18%～19%で、20%の壁を越えることはなく、電動車/付随車比率も最大1:1でした。今回、帝都高速度交通営団に営業投入された05系東西線インバータ車は、VVVFインバータ装置に新方式「空転再粘着制御」を適用することにより、電動車/付随車比率を1:1.5とし、期待粘着係数が21%を越える(21.5%設定)初めての10両編成車両として、好評を博しています。



05系東西線インバータ車(ワイドドア車)



VVVFインバータ装置

特長

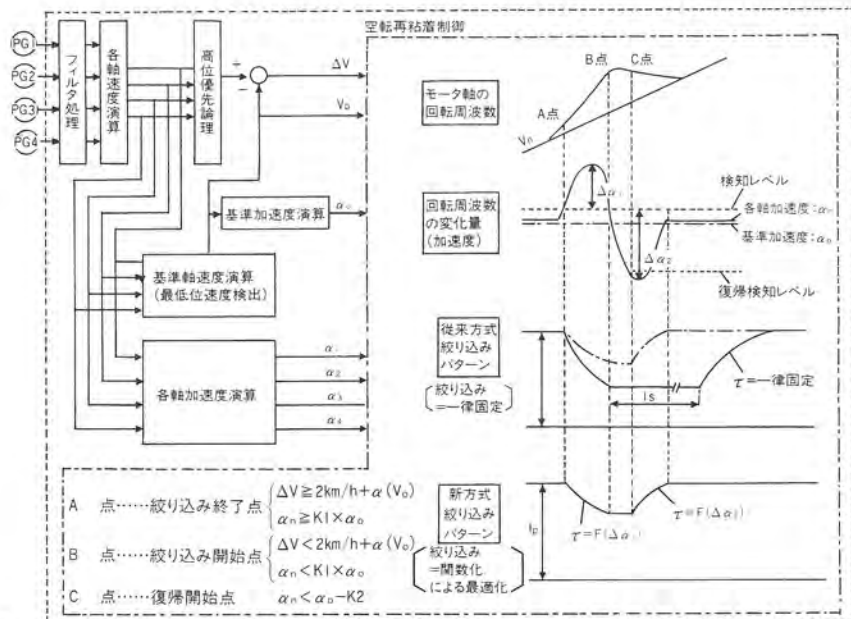
●空転検出方法

- (1) Δf_M 検出: 速度により検出レベルを補正し、検出精度を向上
- (2) $\Delta f_M / \Delta t$: 基準加速度の常時演算による最適検出レベルの設定

●空転再粘着制御方法

電流パターン絞り込み時定数の関数化による最適制御

空転再粘着制御 ブロック図



空転再粘着制御方式の

改善による粘着性能の向上



1.05系東西線インバータ車主要諸元

項目	内容
電気方式	直流1500V 架空線式
編成	4M6T (CT1x-M1'x-M2x-TCx-TC'x-T'x-Tx-M1'x-M2'x-CT2x)
車両性能	加速度: 3.0km/h/s (期待粘着係数: 21.5%) 減速度: 3.5km/h/s (常用最大)、5.0km/h/s (非常) 最高速度: 110km/h (地上)、70km/h (地下)
制御容量	200kW 誘導電動機 4台×2群 (永久並列接続) 最大1900kVA×2群
制御方式	VVVFインバータによる自動化減速制御方式 電力回生ブレーキ付、V/f一定、定トルク制御付
周波数制御範囲	1~200Hz (非同期→9→5→3→1パルスモード切換)
電圧制御範囲	AC 0~1400V