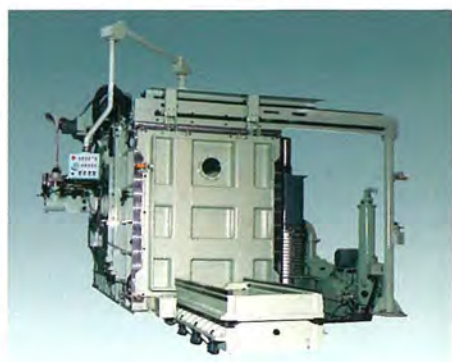
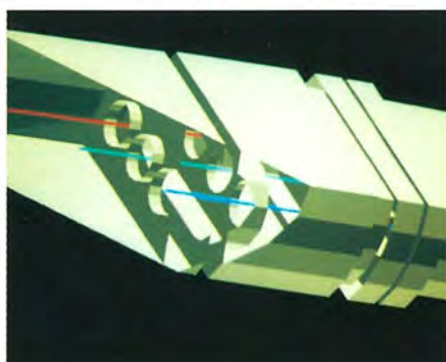
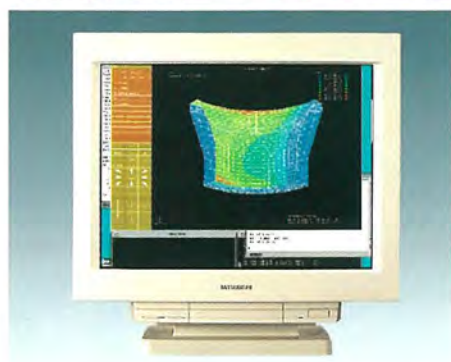


# MITSUBISHI

## 三菱電機技報 Vol.68 No.2

特集 “荷電ビーム機器とシミュレーション”

'94 **2**



## 特集 “荷電ビーム機器とシミュレーション”

### 目次

#### 特集論文

荷電ビーム機器とシミュレーションに寄せて .....	1
平尾泰男	
荷電ビーム機器とシミュレーション .....	2
岩本雅民・森川鐵也・奥田莊一郎	
シンクロトロン放射光装置 .....	6
田中博文・中西哲也・松田哲也・竹内敏恵・奥田莊一郎	
日本電信電話(株) LSI 研究所納め放射光装置用電子線形加速器 .....	11
太田完治・木村勝一・福本信太郎・小野寺俊男	
線形電子加速器 .....	17
西原 進・花川和之・木村勝一・森口勇介・田中常稔	
大電力クライストロン .....	22
林 和孝・家喜洋司・菊永敏之	
大電力ミリ波ジャイロトロン .....	28
菊永敏之・下妻 隆・浅野啓行・八十島義行・塚本忠則	
重イオンビームモニタ .....	33
取越正己・溝端正隆・三田村正則・上田孝寿・小川博嗣・山田 聡	
高解像度ブラウン管 .....	38
中田修平・伊藤英也・中川隆文・林 圭一・伊藤順子・奥田莊一郎	
電子・イオンビーム加工装置 .....	42
庄野一弘・尾崎敏之・久岡 靖・石見泰造・村上英信・荒川及蔵	
クラスタイオンビームによる高カバレッジバリヤ膜形成 .....	47
石井宏之・橋本陽一・山西健一郎	

#### 普通論文

“MELFANET 1000” による商品受注自動化システム .....	52
浜川一衛・朝倉耕一・粟生田悦子・岡田康裕・只野裕次	
鉄道用車両の車軸超音波自動探傷装置 .....	57
森田徳孝・今井幸夫・安原託男・海江田俊昭・植田可教	
オフィスコンピュータ “MELCOM80” ネットワークシステム .....	62
本田和人・渡辺 浩・桜田 博・桂嶋由彦・三島康徳	
オフィスコンピュータ “MELCOM80” CAFIS システム .....	66
宮崎茂雄・茂木武士・中川智明・神戸 健・長井秀憲	

#### 特許と新案

「水平偏向回路」「カラー陰極線管」 .....	71
「投射型陰極線管」 .....	72

#### スポットライト

21型カラーディスプレイモニター “RD21Z” .....	70
マルチプロトコルルータ “MELNET R2000” .....	(表 3)

#### 表紙

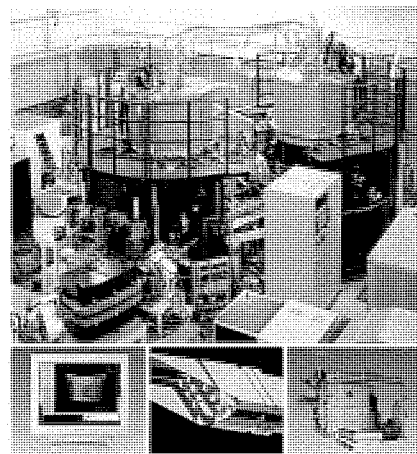
##### 荷電ビーム機器とシミュレーション

上は当社中央研究所で稼働を始めた超電導小型 SR リングの全景である。高エネルギーの電子ビームを蓄積し、左右 2 個の超電導磁石が発生する高磁場で電子を曲げて、シンクロトロン放射光を発生する。

右下は超精密溶接から厚肉溶接まで幅広い用途にこたえる汎用タイプの個別生産用電子ビーム溶接機である。

左下は新発売の 21 インチ ディスプレイ端末 RD21Z である。画質の良い展開マスク方式ブラウン管を開発し、これを搭載した。ディスプレイ端末の画面にはブラウン管用の偏向ヨーク、また中央下には電子銃のシミュレーションを表示している。

これら荷電ビーム機器の開発には、シミュレーション技術が不可欠である。



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

## 荷電ビーム機器とシミュレーション

岩本雅民・森川鐵也・奥田莊一郎

三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.2～5 (1994)

ブラウン管、加工機、加速器、電磁波源など荷電ビームを用いた機器の開発や設計にコンピュータシミュレーションが有効である。シミュレーションの誤差の原因として、ビーム発生源、電極配置誤差及び離散誤差などがあり、結果の精度を保証できる手法の開発が必要である。実験が困難な機種では感度解析や数値実験によるシミュレーションが早くから重要な設計手段であったが、実験が容易な機種でもシミュレーションが実用になる水準に達しつつある。

## シンクロトロン放射光装置

田中博文・中西哲也・松田哲也・竹内敏恵・奥田莊一郎

三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.6～10 (1994)

シンクロトロン放射光(SR)発生装置を当社中央研究所で開発した。SRリングには超電導偏向電磁石を用い、装置の小型化と低電力を実現している。超電導電磁石は液体ヘリウム消費量を世界最少に低減し、世界初の永久電流モードで動いている。装置開発に磁界及びビームのコンピュータシミュレーションが不可欠であった。シミュレーションの結果どおりに装置が運転を開始し、蓄積電流は250mAを早期に達成した。現在、SR光を応用研究に供給している。

## 日本電信電話(株) LSI 研究所納め 放射光装置用電子線形加速器

太田完治・木村勝一・福本信太郎・小野寺俊男

三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.11～16 (1994)

次世代の超 LSI 製造用光源として、シンクロトロン放射光が有望視されている。NTT は、X 線リソグラフィ技術開発専用に小型加速器(シンクロトロン)を建設した。三菱電機(株)は、この加速器システムの入射用電子線形加速器を担当した。入射用電子線形加速器に求められる性能は、小型、大電流、低エミッタンス、低エネルギー分散、安定動作である。本稿では、NTT に納めた電子線形加速器について紹介する。

## 線形電子加速器

西原 進・花川和之・木村勝一・森口勇介・田中常稔

三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.17～21 (1994)

線形電子加速器の加速管を設計するために、シミュレーションコードを開発した。このコードを利用して医療用や研究用の線形電子加速器、RF 電子銃などが開発されているので、その詳細を報告する。

また、線形電子加速器に使われている他の機器の設計にもいろいろなシミュレーションコードが使われているので、その紹介も行う。

## 大電力クライストロン

林 和孝・家喜洋司・菊永敏之

三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.22～27 (1994)

シミュレーションを用いた設計と試作を行い、線形加速器用の S バンド大電力パルスクライストロンを開発している。60MW 出力クライストロンを開発し、62.5MW の出力(パルス幅 2 $\mu$ s)を得た。また、現在の標準機種である 30MW クライストロンを改良し、安定化と高出力化が達成できた。改良品 PV3030A3 は、パルス幅 4 $\mu$ s で 40MW 以上の実力があることを確認した。これら成果を統合し、次世代の標準機種として、コンパクトで高出力な 50MW (60MW 級)クライストロンを開発している。

## 大電力ミリ波ジャイロトロン

菊永敏之・下妻 隆・浅野啓行・八十島義行・塚本忠則

三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.28～32 (1994)

ジャイロトロン(Gyrottron)は、ミリ波領域において数百kWの大電力を高効率(～40%)で発生できる電子管である。ジャイロトロンの電子銃と空洞共振器の設計には、電子の相対論的な運動方程式を解くシミュレーション技術が重要である。電子銃の設計では、良質の電子ビームを得るために、電子ビーム軌道と速度分散が計算される。空洞共振器の設計では、高周波電磁界と電子ビームとの相互作用が計算される。適用例である 48GHz ジャイロトロンの実験結果についても述べた。

## 重イオンビームモニタ

取越正己・溝端正隆・三田村正則・上田孝寿・小川博嗣・山田 聡

三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.33～37 (1994)

微弱な重イオンビーム監視用のビームプロファイルモニタとビーム強度モニタを製作した。ビームの形状を測定するためのプロファイルモニタは信号増幅機能を持ち、試作機による陽子ビーム照射試験で5,000倍の増幅率を持つことを確認した。また、ビームの強度測定用のモニタは、10pA から 1 nA の陽子ビームに対して安定な動作特性を示した。これらは放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置のビームモニタに使用される。

## 高解像度ブラウン管

中田修平・伊藤英也・中川隆文・林 圭一・伊藤順子・奥田莊一郎

三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.38～41 (1994)

ブラウン管の技術革新にシミュレーションが用いられた例として、偏向ヨークとマスクのシミュレーション技術について論じる。フリーエ展開を用いた表面磁荷法プログラムを開発し、高速で精度の高い計算を行い、巻線分布や磁界補正用磁性片の設計を可能にした。マスクの温度ドリフト及び自重変形問題を解決するために構造解析モデルを開発し、従来のシャドウマスクに代わる展張マスクを開発した。これにより、展張マスク搭載の高画質ブラウン管を製品化した。

## 電子・イオンビーム加工装置

庄野一弘・尾崎敏之・久岡 靖・石見泰造・村上英信・荒川及蔵

三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.42～46 (1994)

荷電粒子ビームの軌道シミュレーション技術は、電子・イオンビーム加工装置の効率的な開発に不可欠である。我々が独自に開発したシミュレーション技術は、ビーム発生部や輸送部の基本特性解析や、光学系設計時の適正な公差の設定などに威力を発揮している。これらの技術を大出力電子ビーム溶接機のビーム光学系設計に適用し、深い溶け込みの得られる、長焦点のビーム特性を実現することができた。

## クラスタイオンビームによる高カバレッジバリヤ膜形成

石井宏之・橋本陽一・山西健一郎

三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.47～51 (1994)

高アスペクト比を持つ先端的な LSI のコンタクトホール底部へのバリヤ膜形成に対し、従来スパッタ法の10倍以上のカバレッジ率が得られる ICB ( Ionized Cluster Beam ) 技術を開発した。膜たい(堆)積シミュレーションに基づき、高いカバレッジ率の確保に必要な物理成膜のプロセス要件を明らかにするとともに、成膜中にイオン照射を重ねる反応性 ICB 技術により、必要な膜質を確保できることも明らかにした。

# Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.28~32 (1994)

## A High-Power Millimeter-Wave Gyrotron

by Toshiyuki Kikunaga, Takashi Shimozuma, Hiroyuki Asano, Yoshiyuki Yasojima  
& Tadanori Tsukamoto

The gyrotron is an electron tube capable of generating large outputs of several hundred kilowatts in the millimeter-wave range with high efficiency (roughly 40%). In order to design the electron gun and cavity resonator for a gyrotron, simulation technology to solve the relativistic equation of electron motion is needed. In designing the electron gun, the electron-beam path and velocity dispersion are calculated in order to obtain a good-quality electron beam. In designing the cavity resonator, interaction between the high-frequency electromagnetic field and electron beam is calculated. Experimental results for the case of a 48GHz gyrotron are also described.

Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.2~5 (1994)

## Charged Particle-Beam Equipment and Its Simulation

by Masatami Iwamoto, Tetsuya Morikawa & Soichiro Okuda

Computer simulation techniques are useful for the development and design of CRTs, machine tools, accelerators, electromagnetic radiation sources and other devices employing charged beams. Simulations are subject to errors associated with the beam source and electrode positions, as well as discretization, and methods must be developed to ensure accurate results. Simulations based on sensitivity analysis and numerical experiments have long been an important tool in the development of equipment for which actual experiments are not easily performed, but simulations are becoming more viable, even in the case of equipment which lends itself to experiments.

Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.33~37 (1994)

## A Heavy Ion-Beam Monitor

by Masami Torikoshi, Masataka Mizobata, Masanori Mitamura, Koju Ueda,  
Hirotugu Ogawa & Satoru Yamada

A beam-profile monitor and beam-intensity monitor for use in monitoring low intensity heavy-ion beams have been constructed. The profile monitor, used in measuring beam shapes, amplifies signal amplitude; the prototype was confirmed to provide 5,000-fold amplification in experiments using a proton beam. The beam-intensity monitor provided stable operation for beam intensities from 10pA~1nA. Such instruments are used as beam monitors in the heavy-ion accelerator used for cancer therapy at the National Institute of Radiological Sciences.

Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.6~10 (1994)

## Synchrotron Radiation Source Equipment

by Hirofumi Tanaka, Tetsuya Nakanishi, Tetsuya Matsuda, Toshie Takeuchi  
& Soichiro Okuda

The Central Research Laboratory has developed new synchrotron radiation (SR) source equipment. A compact SR ring with low energy consumption has been produced through the incorporation of a superconducting bending magnet. The superconducting magnet employed has the lowest helium consumption in the world as well as being the first in the world to operate in a perpetual current mode. The use of magnetic field simulation and beam simulation were key technologies in the development of this compact ring. The commissioning of the SR ring has proven to be successful, operating the same as simulation predictions. Maximum stored current quickly reaches 250mA, and the ring is routinely being used to supply SR for application experiments.

Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.38~41 (1994)

## High-Resolution CRTs

by Shuhei Nakata, Hideya Ito, Takafumi Nakagawa, Keiichi Hayashi, Junko Ito  
& Soichiro Okuda

Simulation techniques used in designing deflection yokes and masks are discussed as examples of the use of simulations for technical innovations in CRTs. A surface magnetic charge program has been developed using Fourier expansions. It performs highly accurate calculations at high speed, enabling the design of coil distributions and magnetic plates for magnetic field correction. In order to resolve the problems of mask temperature drift and deformation of the mask under its own weight, a structural analysis model was developed, and a tension mask was developed to replace conventional shadow masks. CRTs offering high image quality through the use of tension masks have been commercialized.

Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.11~16 (1994)

## A Linear Electron-Beam Accelerator for Synchrotron Radiation Emission Delivered to the NTT LSI Research Laboratory

by Kanji Ota, Masakazu Kimura, Shintaro Fukumoto & Toshio Onodera

Synchrotron radiation is seen as a promising source of electromagnetic radiation for use in the manufacture of next-generation VLSIs. Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT) has constructed a small accelerator (synchrotron) facility for use exclusively in the development of X-ray lithography techniques. Mitsubishi Electric was responsible for the system's incident electron-beam accelerator. The performance demanded of an incident electron-beam accelerator includes small physical size, stable operation, large current capacity, low emittance and low-energy beam dispersion. The article describes the linear electron-beam accelerator delivered to NTT, which meets these demands by incorporating the technology required for such a system.

Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.42~46 (1994)

## Electron and Ion-Beam Processing Machines

by Kazuhiro Shono, Toshiyuki Ozeki, Yasushi Hisaoka, Taizo Iwami, Hidenobu Murakami  
& Kyuzo Arakawa

Techniques for the simulation of charged-particle trajectories are indispensable for the efficient development of electron and ion-beam processing equipment. The simulation techniques developed independently by the authors are particularly effective for analysis of the basic characteristics of the beam emission and transport units, and for the determination of an appropriate tolerance in the optical system design. These techniques were employed in the design of the beam optical system of high-output electron-beam welding machines, making possible a beam characteristic with a long focal length and deep welding penetration.

Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.17~21 (1994)

## A Linear Electron Accelerator

by Susumu Nishihara, Kazushi Hanakawa, Masakazu Kimura, Yusuke Moriguchi  
& Tsunetoshi Tanaka

Simulation code was developed for use in designing the accelerator tube of a linear electron accelerator. This code is currently being used to develop linear accelerators, RF electron guns and other devices for clinical and research use. The details of this code as well as the simulation code used in the design of other kinds of equipment employing linear electron accelerators are described in this article.

Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.47~51 (1994)

## High-Coverage Barrier-Film Formation by an Ionized Cluster Beam

by Hiroyuki Ishii, Yoichi Hashimoto & Ken'ichiro Yamanishi

An ionized cluster beam (ICB) technique was developed which improves by ten times or more the coverage of traditional sputtering methods used in the formation of a barrier film at the bottom of advanced LSI contact holes with a high aspect ratio. The conditions for film formation yielding high coverage were elucidated using film-deposition simulations. A reactive ICB technique combining ion irradiation during film deposition was found to ensure the required film quality.

Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.22~27 (1994)

## A High-Power Klystron

by Kazutaka Hayashi, Hiroshi Iyeki & Toshiyuki Kikunaga

Design and trial fabrication based on simulations are now being performed as part of the development of an S-band high-power pulse klystron for use in linear accelerators. A 60MW output klystron was developed, and an output of 62.5MW (pulse width 2μs) was obtained. In parallel with this work, the 30MW klystrons currently ranked as standard equipment have been improved, attaining stabler operation and higher output. A pulse width of 4μs and an output of over 40MW were confirmed for the revised model PV3030A3. These results are being consolidated in the development of a compact, high output 50MW klystron (60MW class) that will serve as a standard device in the coming generation.

## アブストラクト

<p>“MELFANET 1000”による商品受注自動化システム          渋谷一衛・朝倉耕一・粟生田悦子・岡田康裕・只野裕次          三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.52～56 (1994)</p> <p>FAX-OCR機能を付加したFAX情報集配信装置“MELFANET”で商品受注自動化システムを構築した。このシステムは、家電販売店のファクシミリから商品の発注・在庫照会を直接行えるシステムであり、㈱三菱電機ライフテック関越に納入し、平成5年8月から稼働している。</p> <p>受注処理の自動化によって受注要員の省人化を図るとともに、休日対応やクイックレスポンスなど販売店へのサービス性向上を実現している。</p>	<p>オフィスコンピュータ“MELCOM80”          ネットワークシステム          本田和人・渡辺 浩・桜田 博・桂嶋由彦・三島康徳          三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.62～65 (1994)</p> <p>オフィスコンピュータ“MELCOM80 GSファミリー”では、当社計算機同士、又は他社計算機と接続するための豊富なネットワーク機能を提供している。また、オープン化・マルチベンダ化に対応するために、TCP/IP、OSIのネットワークサポート機能を強化してきている。</p> <p>さらに、ネットワークシステムの大規模化・複雑化に対応して、運用管理システムを提供し、システムの運用・操作性の向上を図っている。</p>
<p>鉄道用車両の車軸超音波自動探傷装置          森田徳孝・今井幸夫・安原託男・海江田俊昭・植田可教          三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.57～61 (1994)</p> <p>従来、熟練を要していた鉄道用車両の車軸超音波探傷作業を、簡単なキー操作だけで可能にした車軸超音波自動探傷装置を開発した。この装置は、車軸端面のセンター穴を空中超音波計測によって検出し、そこを基準点として探触子を実装している各ヘッドをロボット制御で所定位置に接触させ、各ヘッドをステップ回転させながら車軸の車輪圧入部を超音波によって自動的に検査する装置である。</p> <p>本稿では、装置の概要、特長及び実際の検査例について紹介する。</p>	<p>オフィスコンピュータ“MELCOM80”CAFISシステム          宮崎茂雄・茂木武士・中川智明・神戸 健・長井秀憲          三菱電機技報 Vol.68・No.2・p.66～69 (1994)</p> <p>CAFISとはNTTデータ通信㈱のクレジットカード取引用情報ネットワークで、小売店のPOS端末とクレジット会社のコンピュータを中継してクレジットカード販売情報の即時処理を可能とする。当社のオフィスコンピュータ“MELCOM80”では、CAFISと接続するためのソフトウェア製品を開発した。この製品は、ますます増えるクレジットカードによる販売業務の自動化・効率化に有効である。</p> <p>本稿では、製品の概要と適用事例について紹介する。</p>

# Abstracts

**Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.62~65 (1994)**

## A Network System for the MELCOM80 Series of Small-Business Computers

by Kazuto Honda, Hiroshi Watanabe, Hiroshi Sakurada, Yoshihiko Katsurashima & Yasunori Mishima

The MELCOM80/GS family of small-business computers offers a wide range of network functions for connection to other Mitsubishi Electric systems and systems of other manufacturers. In order to provide open specifications and cope with multiple vendor products, it also offers enhanced transmission control protocol, internet protocol and open systems interconnection network support functions. A network management system is also provided to cope with the enlarged scale and greater complexity of network systems, for improved system operation and management.

**Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.52~56 (1994)**

## An Automated Product Ordering System for the MELFANET 1000

by Kazuo Shibukawa, Koichi Asakura, Etsuko Aouda, Yasuhiro Okada & Yuji Tadano

The MELFANET integrated fax information system has been complemented with fax OCR functions to construct an automated product ordering system. This system is capable of directly placing product orders and checking stock based on faxes from electrical appliance vendors. It has been delivered to Mitsubishi Electric Lifetech Kan-Etsu Co., Ltd. and has been in operation since August 1993. Automation of order processing enables reduction of the staff concerned, and also enables improved service to vendors, including reception of orders during holidays and faster response to orders.

**Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.66~69 (1994)**

## The CAFIS System and MELCOM80 Series Small-Business Computers

by Shigeo Miyazaki, Takeshi Mogi, Tomoaki Nakagawa, Takeshi Kanbe & Hidenori Nagai

The Credit and Finance Information System (CAFIS) is the credit card information network of NTT Data Communications Systems Corporation, and connects the POS terminals of retailers with the computers of credit agencies to enable immediate processing of credit card sales information. Software products have been developed enabling the Mitsubishi Electric MELCOM80 series of small-business computers to connect with CAFIS. These products will provide enhanced automation and efficiency in processing increasingly frequent credit card sales. The article introduces these new products with examples of their use.

**Mitsubishi Denki Giho: Vol.68, No.2, pp.57~61 (1994)**

## Automatic Ultrasonic Inspection System for Rolling-Stock Axles

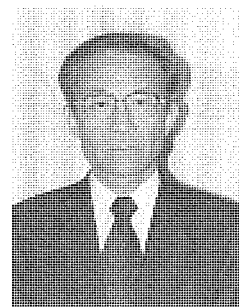
by Noritaka Morita, Yukio Imai, Takuo Yasuhara, Toshiaki Kaieda & Yoshinori Ueda

An ultrasonic inspection system has been developed to automatically detect flaws in rolling stock axles using simple operation by keyed input, a task previously requiring skillful manual labor. The system uses ultrasonic measurement to find the axle location, detecting the center hole in the end surfaces of the rolling-stock axle, and uses the original position to locate six heads mounted with probes at specified positions under robot control. The heads are then rotated and positioned in step to perform automatic ultrasonic inspections of the axle. The article gives a summary of the system, describing its features and practical examples of inspection.

## 荷電ビーム機器とシミュレーション特集に寄せて

科学技術庁 放射線医学総合研究所

所長 理学博士 平尾 泰男



かつてトランジスタが発明され真空管に次々に置き代わっていったとき、真空管などの荷電ビーム機器は半導体などの固体素子にとって代われ、やがて消滅すると思われた。そのなかで、四極管やクライストロンなど大出力真空管は高性能化の努力が続けられ、独自の領域を拡張して生き残り、また、ブラウン管もあと数年で消滅するといわれ続けながら、依然として表示素子の主役を保持している。

荷電ビーム機器の代表は加速器である。加速器は原子核の人工破壊に始まり素粒子の発見など最先端の物理学の実験装置として開発され、自然科学の根幹にかかわる知識を形成する上で計り知れない貢献を果たしてきた。それとともに、成熟した加速器によって加速されたビームが他の様々な分野で役立つことが次々と実証されて、応用を目的とした大型加速器の建設が、ここ数年盛んに行われるようになった。

その一つはイオンを加速して医療を行うための加速器で、放射線医学総合研究所でHIMACが稼働を開始している。イオンはその種類とエネルギーによって決まる深さの細胞を破壊し、途中の細胞には大きな損傷を与えないため、がん(癌)の治療などに有効である。

今一つは、加速器から放射されるシンクロトロン放射光(Synchrotron Radiation, 以下“SR”という。)を利用するための施設である。SR光は電子の高エネルギー加速には邪魔物であったが、超LSIの製造や、物質の構造解析、広範な研究や応用の分野で活用できることが分かったため、その目的の装置開発や建設が盛んになった。科学技術庁が播磨科学公園都市に建設中の大型放射光施設を始め、数多くの研究機関で稼働しており、日本の企業でも幾つかの小型SR装置が稼働を始めている。

加速器の建設が難しいのは、失敗が許されないことである。建設に多額の費用と長い時間がかかり、一度設置されるとやり直しが困難である。そのため、設計段階で入念な

検討が必要になる。一方、使用目的に応じて新規技術を盛り込まなければならない場合には、その成否予測が難しくなる。これに対処するために、従来は要素機器の仕様を必要以上に厳しくし、さらに、調整に長い時間をかけることで何とか稼働にこぎつけていた。

これに対して近年では、コンピュータ及びその利用技術が進歩し、加速器の設計にシミュレーションが使えるようになった。特に、電磁石の配置や仕様を決めるためには、コンピュータシミュレーションが唯一の手段である。シミュレーションは大型加速器の設計だけでなく、産業用の小型加速器の開発にも威力を発揮している。製作仕様をできるだけ合理化してコストの低減を図るだけでなく、調整作業を支援することによって調整期間を短縮し、製品としての納期を確定できる。現在ではコンピュータシミュレーションが加速器の最も重要な要素技術となっている、ということができる。そもそも高速大型コンピュータの開発に最初の火を点じたのは、大型加速器の研究所であった。

シミュレーションを始めとして、加速器で育てられた先端技術がブラウン管などの荷電ビーム機器に転用された結果、新製品が創出された例がある。また逆に、電子ビーム溶接機や高出力クライストロンなど荷電ビーム機器の進歩によって、加速器の性能が一層高められている。

このような技術の共有ないし転用が効果的に行えるのは、多種多様な分野を持つ総合電機メーカーの強みであろう。三菱電機(株)は従来から加速器関連の技術を大切にされてきたが、その重要性に対する認識は今後ますます向上することであろう。

近い将来には、加速器によって製造されたLSIがコンピュータに使われ、また次世代の加速器の設計に役立つ、というような連鎖が次々に起きることが予想される。このような相乗効果によって、技術革新が更に加速されることを期待したい。

## 荷電ビーム機器とシミュレーション

岩本雅民\*  
森川鐵也\*  
奥田荘一郎\*\*

## 1. ま え が き

電子やイオンなどの荷電ビームは、電界及び磁界で容易に制御でき、また出力を高められるため、様々な分野で用いられている。この特集では荷電ビームを用いた機器を紹介する。表1に主な用途と機器名を掲げた。

荷電ビーム機器で最も身近なものは、テレビジョン受像機に用いられているブラウン管である。液晶パネルなどの迫り上げを受けてはいるものの、高画質と低価格で依然として表示装置の主役の座にある。工業分野では、溶接や薄膜形成などに荷電ビームが多く用いられている。ビームの性質を生かした独特の先端加工を可能にしている。この特集ではイオン・電子ビーム加工機とクラスティオンビームを取り上げた。

ビームを光速付近まで加速すると新たな現象が出現する。ビーム加速器は素粒子実験のために開発されてきたが、最近応用分野で注目を集めている。一つは加速器から放出される電磁波(シンクロトロン放射光)の利用であり、もう一つはイオンビームを用いた治療である。この特集では電子線形加速器、シンクロトロン放射光装置及びイオン加速器を紹介する。これら加速器やプラズマ加熱用に高出力の電磁波発生源が必要である。マイクロ波源としてクライストロン、及びミリ波源としてジャイロトロンを取り上げた。

荷電ビーム機器の歴史は古く、性能向上のための開発が間断なく行われてきた。性能向上要求が極限に達してきたため、既成技術の限界を打ち破る必要が生じている。この限界を打ち破るためにコンピュータシミュレーションが登場した。荷電ビームの運動は電磁気の法則に従っているため、シミュレーションを適用するのに適している。

コンピュータシミュレーションが盛んになった原因として、まず、コンピュータ自身が手軽に利用できるようになったことが挙げられる。図1は筆者らの周辺の計算機環境の推移で

ある<sup>(1)</sup>。実線は性能(計算速度)対価格比、また破線は一人当たりのコンピュータ性能の相対値を示す。10年間で性能対価格比が約1,000倍になったのに対応して、一人当たりのコンピュータ性能もちょうど1,000倍に向上している。これは年間平均伸び率が2倍であることに相当する。

このような外的要因はもちろん大きいですが、それ以上に重要な要因はシミュレーションが実際に役に立つということが立証されたことにある。それでは、シミュレーションはどのようにして実際に研究開発に用いられたのであろうか。それを紹介するのがこの特集の目的である。

この論文では、まずシミュレーション手法の使い分けを紹介し、実際の現象を模擬するための方策を論じ、各機器の開発に役立てる方法を述べ、今後の方向について論じる。

## 2. シミュレーション手法の選択

この章では実際の機器にシミュレーションを適用する際の手法の選択を紹介する。考慮しなければならない要素として、空間電荷効果、次元、時間特性及び空間分割法がある。

## 2.1 基本方程式と空間電荷効果

荷電ビームの基本方程式は、粒子の運動方程式と電磁界方程式である。荷電粒子はそれ自身が電荷を持っているため、電磁界を発生し、他の粒子の運動に影響する。これを空間電荷効果と呼ぶ。一般には運動方程式と電磁界方程式を連立して解かなければならないが、現在のコンピュータの能力でもかなりの計算時間を要する。

空間電荷効果は粒子密度が低いほど、又は加速されるほど弱くなる。空間電荷効果が無視できる場合には運動方程式は電磁界方程式と分離され、解析は格段に容易になる。したが

表1. この特集の荷電ビーム機器

用 途	機 器 名
表示装置	ブラウン管
加 工	電子・イオンビーム加工機 クラスティオンビーム
加 速 器	電子線形加速器
医 療	イオン加速器
微細加工	シンクロトロン放射光装置
電磁波源	クライストロン ジャイロトロン

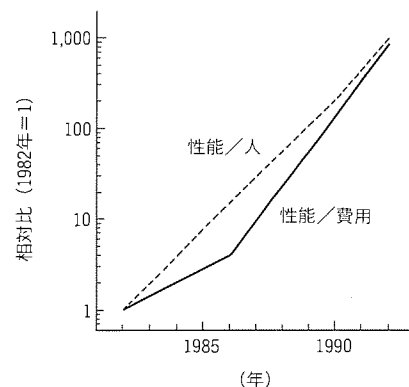


図1. コンピュータ環境の推移



って、できるだけ空間効果を見逃せる領域を探ることが望ましい。ブラウン管の電子銃では、電子レンズ部を電子源から切り離してシミュレーションの実用化に成功している<sup>(2)</sup>。

## 2.2 次元

機器構成が二次元及び回転対称の場合には方程式の次元が下がって単純になる。プログラムの開発が盛んに行われた結果、これら二次元及び回転対称問題は手軽に解けるようになった。

解析技術としては三次元問題に開発努力が注がれ、例えば電子レンズでは三次元手法が実用的になっている。

## 2.3 時間変化

ビームに及ぼす電磁界の時間変化によって解法は異なる。電界及び磁界に時間変化がない場合には電界と磁界に関する方程式は分離できる。このような定常場は、ほぼシミュレーションが可能になっている。

時間的に変動するいわゆる過渡解析は手法を開発中である。成功例として、加速器中の電子が発する電磁界が真空容器で反射し、他の電子の運動に影響する現象の解析例がある<sup>(3)</sup>。

## 2.4 空間分割法

コンピュータで電磁界を求めるために空間を分割する。空間分割には領域分割法と境界分割法とがある。

領域分割法は有限要素法に代表されるように、考慮している領域全体を分割する方法である。この方法は計算速度が早く、空間電荷効果を考慮できる長所がある反面、空間分割のための入力数が多く、広い領域では計算の精度が悪いという欠点がある。

境界分割法は表面電荷法に代表されるように、電極や磁性体などの表面(境界面)だけを分割する方法である。この方法の長所と短所はちょうど領域分割法の裏返しになっている。すなわち、計算速度が遅く、空間電荷効果を考慮しにくいのが欠点であるが、入力が容易で広い領域でも計算の精度が落ちないのが長所である。

ビームシミュレーションでは、以上のような特徴を考慮しながら空間分割法を選択する。ブラウン管の場合、電子源では空間電荷効果を考慮しなければならないので領域分割法が用いられる。一方、電子レンズ部や偏向磁界作用のシミュレーションでは、高精度計算が可能な境界分割法を用いるほうが有利である。以上述べたような比較を表2にまとめた。

この両者を領域によって使い分け組み合わせれば、双方の長所を兼ね備えることができる。このような併用法<sup>(4)</sup>の研究

表2. 空間分割法の比較

項目	領域分割法	境界分割法
計算速度	早い	遅い
空間電荷効果	考慮できる	考慮しにくい
入力数	多い	少ない
広領域の精度	悪い	良い
ビームシミュレーション	電子源 イオン	電子レンズ 偏向ヨーク

が行われており、今後の発展が期待される。

## 3. 誤差と対策

ビームシミュレーションは、新機種の開発などに用いられる。シミュレーションの結果をそのまま新機種の設計に用いることができれば、試作の費用と時間が節減できる。このような理想的な例として、ブラウン管の四極形電子銃の開発が報告されている<sup>(5)</sup>。

しかしながら、いつでもシミュレーションどおりの結果が現実に得られるわけではない。この章ではシミュレーションが現象と異なる原因とその対策について論じる。シミュレーションと現実の食い違いは、現象を方程式化する過程と、方程式を数値解析する過程とに分けられる。

### 3.1 現象の定式化

シミュレーションでは現象を単純化するが、現実の物理は複雑である。これが結果の差異となって現れる。複雑化する要因としてビームの発生状態、電極の配置誤差、及び粒子間の相互作用などがある。

ビームは熱せられた電極や細線などから発生する。発生の機構に関して古くから多くの研究が行われているが、いまだに十分に解明されていない。シミュレーションではこの未知な部分を単純化して定式化しているに過ぎない。

ビームの運動を制御する電磁界は、電極や磁石などで発生する。電極や磁石を構成する部品の加工誤差や組立誤差があるため、必ずしも設計どおりの配置にはなっていない。これによって現実のビーム軌道は理想値からずれる。電磁界に対称性を仮定した計算ではこのような誤差が非対称成分をもたらす、主要な誤差となって現れる。このような、非対称誤差を解析した例は、この特集のビーム加工機に関する論文で紹介される。

一般には、ビームを構成する荷電粒子同士、又は雰囲気中の粒子との間での相互作用が存在している。2.1節で述べた空間電荷効果も相互作用の一種である。

以上のような誤差要因を克服するために、現象を観測しながらシミュレーションの基本方程式や境界条件を改良していく。この過程は、仮説を実験で検証するという科学的探求そのもので、高度な創意工夫を要求する。このようなモデル化がシミュレーション研究で最も重要な部分である。

### 3.2 数値解析誤差

与えられた方程式の解に対して、数値解は近似解である。この誤差は論理的に追求すれば評価が可能である。

最もよく知られているのが、離散幅の粗さによる打ち切り誤差である。これに対しては、ユーザーが適当に刻み幅を変えて解の収束性を観察すれば傾向をつかむことができる。近年では誤差の事後評価や埋込み法によって精度を保証するアルゴリズムが開発されている<sup>(6)</sup>が、まだ万能ではない。

あまり認識されていない数値誤差に、丸め誤差がある。こ

れはコンピュータの数値表現が有限けたで打ち切られていることに起因するものである。刻み幅が小さすぎて積算回数が増えたとこの誤差が大きくなる。また、極めて近い数値同士の引き算を行うと有効けたが失われる。このけた落ちは、領域分割法で起こりやすいが、境界分割法でも現れる。

表面電荷法のけた落ち現象の例を図2<sup>(7)</sup>に示す。三角形要素に様に分布した電荷が作る電界の計算結果である。普通にコーディングを行うと、図中実線で示したように真の値から外れ、真の値を中心に振動する。これに対してけた落ち防止対策を施すと、図2に破線で示されているように真の値を与える。

これら打ち切り誤差や丸め誤差の性質を積極的に利用したアルゴリズムも研究されている。補外法<sup>(8)</sup>がその一例で、高精度な数値解を求めることができる。このような数値解法上の対策を確立することが望ましい。

#### 4. シミュレーションの活用

前章で述べたような様々な要因によって、シミュレーションと現象の間には差異が生ずる。この差異を認識しながら、シミュレーションを設計にどう生かすかが活用のかぎ(鍵)になる。この章ではビームシミュレーションの活用例を紹介する。

##### 4.1 感度解析

シミュレーションを絶対値として現象に合致させるのは困難で、可能であるとしてもかなりの試行期間を要する。しかしながら、相対値であれば現象に合わせることは比較的容易である。いま、開発過程で試作品の評価を行ったとする。ここで電極寸法などの各変数をわずかに変えたときの各評価値の変化を計算する。すなわち、各変数の感度を求める。この感度行列から、評価値を仕様値に近付けるための変数の変化値が求められる。これによって電子レンズの開発に成功した例<sup>(9)</sup>がある。

定量的には合わない場合でも、改良の方向(寸法を増やすか減らすか)であればシミュレーションで分かる。実際の開発にはこのような情報が貴重である。

##### 4.2 数値実験

実際の実験では、ある一つの条件を変えようとしても他の

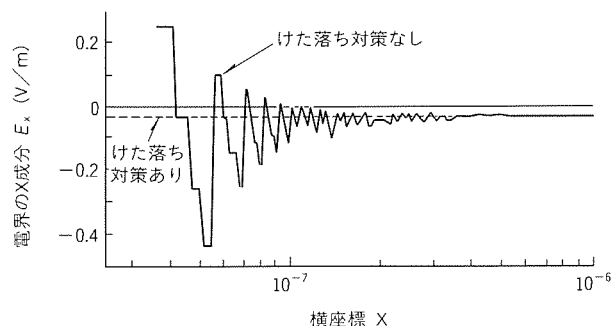


図2. 境界分割法のけた落ち現象

条件も連動して変わることが多く、純粋な要因追求は難しい。それに対して、シミュレーションであれば、単独の要因だけを変化した純粋な実験が可能である。

当社のシンクロトロン加速器の例を紹介する。従来のシンクロトロンでは、ビーム入射から最高エネルギーに到達できるまでには数か月を要していた。当社中央研究所では実際のビーム調整が始まる以前に様々な初期故障を入力してそのとき起こる現象を洗い出し、これらに対する解決法をコンピュータ上で模擬した。その結果、実際にビームを入射してからわずか3日間でビームを最高エネルギーまで加速することに成功した<sup>(9)</sup>。これは、シミュレーションによって初期調整の知識ベースができていた成果である。

加速器は大規模な装置であるため、製作した後に不具合があっても簡単にやり直すわけにはいかない。したがって、設計の段階で十分な検討が必要で、その手段はシミュレーションしかない。

##### 4.3 シミュレーションの有用性

シミュレーションの有用性は対象になる機種によって大きく異なる。高度な技法を適用してもなかなかシミュレーションが使えない機種もある一方、単純な技法で十分に開発ツールとして通用する機種もある。

例えば、ブラウン管の要素部品の中で、電子銃と偏向ヨークを比較する。両者のシミュレーションは電界と磁界の違いがあるだけで、結果の精度などはほとんど同等である。ところが電子銃ではシミュレーションが早くから設計の主要な道具になっていた一方、偏向ヨークではようやく最近になってシミュレーションが役立ち始めた。

この差は、実験の困難さにある。電子銃の性能を評価するためには、試作品をガラスバルブの中に入れ、真空中に封じてからビームを出さなければならない。一方、偏向ヨークはガラスバルブの外側にあるので、いつでも好きなだけいじることができる。このため、技能だけで高い性能に到達させることが可能である。

逆に、偏向ヨークのシミュレーションが有用になったということは、シミュレーションの水準がかなり上がった結果である。その一端についてはこの特集の論文で紹介する。

#### 5. 課題と今後

この章では荷電ビーム機器シミュレーションの課題と今後の方向を論じる。

併用法などのシミュレーション技法の進化とコンピュータの性能向上を更に促進し、今まで解けなかった問題を解決可能にする。

従来のシミュレーションでは計算することで精一杯で、計算結果の精度について考察する余裕がなかった。今後のシミュレーションは精度の要求が高まる。これに呼応して、数値計算の専門家が強力なサブルーチンパッケージやコンパイラ

などのレベルで誤差対策を強化し、数値計算の品質保証を行ってくれることを期待したい。しかしながら、最終的にはプログラマやユーザーの判断が残るので、数値解析の基礎教育の充実が望まれる。

この特集ではブラウン管、加工機、加速器、及び電磁波源など多種の荷電ビーム機器を論じている。これらの機器の開発・製造には各々固有の技術が必要であるが、シミュレーション技術には共通点が多い。このような認識で、ビームシミュレーション技術の研究会<sup>(10)</sup>が1992年に開かれ、異機種間の情報交換が始まった。このような交流を刺激にして、新たな技術革新が行われることを期待したい。

## 6. む す び

荷電ビーム機器のシミュレーション技術について論じた。技法の開発によって、三次元構成ないしは過渡的な問題が解けるようになりつつある。シミュレーションの誤差の原因として、ビーム発生源、電極配置誤差及び離散誤差などが挙げられる。これらの誤差を考慮した感度解析ないしは数値実験によるシミュレーションが実用的である。加速器や電子銃など実験が困難な機種ではシミュレーションが早くから重要な設計手段であったが、実験が容易な機種でもシミュレーションが実用に供せられる水準に達しつつある。

今後、シミュレーションの適用範囲を拡大するとともに、結果の精度を保証できる手法の開発が必要である。

## 参 考 文 献

- (1) 奥田荘一郎：電気工学研究とシミュレーション，研究開発マネジメント，**20**，No.10，30～40（1992）
- (2) Okuda, S., Ikegami, K., Oono, K., Yanai, K., Yamane, H., Yoshida, T., Nosaka, E., Nakani-

shi, H.: Practical Design of a CRT Electron Gun, Proceedings of Society for Information Display, **31**, 171～178（1990）

- (3) Tsukishima, C., Nakata, S.: Wake Field Computation by Threedimensional Finite Element Method, in Proceedings of International Symposium of Application of Electromagnetic Forces, Sendai, Japan（1991）
- (4) 中田修平，中川隆文：併用法による三次元渦電流解析，第11回計算電気・電子シンポジウム，162～164，日本シミュレーション学会（1990）
- (5) Yamane, H., Ishida, R., Nakanishi, H., Ikegami, K., Okuda, S.: An In-line Color CRT with Dynamic Beam Shaping for Data Display, Proceedings of the Society for Information Display, **29**, No.1, 41～45（1988）
- (6) 三井武友：数値解析入門，数理科学ライブラリー7，朝倉書店（1985）
- (7) 奥田荘一郎，中西寿夫：三次元電子レンズのシミュレーション，シミュレーション，日本シミュレーション学会，**9**，No.2，63～70（1990）
- (8) 奥田荘一郎，中川隆文，池上和律，大寺廣樹：補外法による三次元電磁界解析法：第11回計算電気・電子工学シンポジウム，日本シミュレーション学会，347～351（1990）
- (9) 中西哲也，奥田荘一郎，中村史朗，山田忠利，岩本雅民：シンクロトロン放射光装置の研究試作，三菱電機技報，**65**，No.11，1080～1085（1991）
- (10) 裏 克己：荷電粒子光学シンポジウム第119回研究会資料，日本学術振興会，筑波（1992）

# シンクロトロン放射光装置

田中博文\* 竹内敏恵\*  
中西哲也\*\* 奥田荘一郎\*\*  
松田哲也\*

## 1. ま え が き

光の速度に近くなるまで電子を加速し、これを磁界で曲げるとシンクロトロン放射光 (Synchrotron Radiation, 以下“SR”という。) と呼ばれる電磁波を発生する。SR は指向性が良く、輝度が高いため、先端分野への応用が試みられている。産業用途では次世代超 LSI 転写、及び原子レベルの材料分析などが注目されている。SR を発生させるためには従来大きな円形加速器が必要であったが、産業に応用するために光源を小型化する必要がある。このため、近年小型 SR 光源の開発競争が行われている。

当社は総合電機メーカーとして初の小型 SR 光源の開発を行ってきた<sup>(1)</sup>。この開発が完了し、SR 光源の運転を開始したので紹介する。

開発を成功に導くかぎ (鍵) となった技術がシミュレーションである。SR 装置を製作した後に改造することは非常に困難であるため、設計の段階で十分な検討が必要である。特に、今回のように小型化を目的とした新技術を導入する場合、それを実験的に検証することができない。したがって、コンピュータシミュレーションが設計段階の唯一のよりどころとなる。

この論文では超電導偏向電磁石の開発用に行った磁界シミュレーションと、SR リング設計の基礎となったビームシミュレーションの研究について論じる。また、現在の稼働状況と今後の展開について紹介する。

## 2. SR装置の構成

SR 装置は、当社中央研究所の“西部基礎研究棟”と呼ばれる建屋内にある。この研究棟は、21 世紀に実用化する技術の先行研究を行うため、平成元年にしゅん (竣) 工したものである。SR 装置の構成<sup>(2)</sup>を鳥かん (瞰) 的に図 1 に示す。電子ビームは線形加速器 (ライナック) で予備加速され、シンクロトロンで更に加速された後、SR リングに蓄えられ、SR 光を発生する。SR 光は利用ポートによって放射線遮へい (蔽)

壁を隔てた隣室に導かれる。

SR リングの全景を図 2 に、また平面構成を図 3 に示す。直線部からの入射が容易なレーストラック形状を採用した。産業用としてできるだけ小型化するために以下のような工夫をした。

- (1) 超電導電磁石を用い、高磁場でビームを偏向して軌道曲率半径を 60cm に抑えた。
- (2) 従来のリングではビーム集束のために直線部の四極電磁石が 4 個 (2 対) 必要であったが、四極磁界 (磁場勾配  $n$  値) を偏向電磁石に持たせ、直線部の四極電磁石の数を 2 個 (1 対) に減らした。
- (3) キッカ<sup>(3)</sup>及びセプタム<sup>(4)</sup>などビーム入射用電磁石を大出力化し、ビーム進行方向の空間を縮小した。

この結果、軌道周長はレーストラック形としては世界最小の 9.2m を達成した。

## 3. 超電導偏向電磁石

小型 SR 装置の要素部品の中で最も重要なのが超電導偏向電磁石である。当社で開発した SR リングでは 2 台の超電導偏向電磁石<sup>(5)</sup>を用いており、その外観を図 4 に示す。上に見えるのが液体ヘリウムを貯蔵するタンク、下にあるのが鉄の磁気遮蔽体及び真空チェンバの出口である。本節ではこの電磁石の特長と、その設計に用いられた磁界シミュレーションについて論じる。

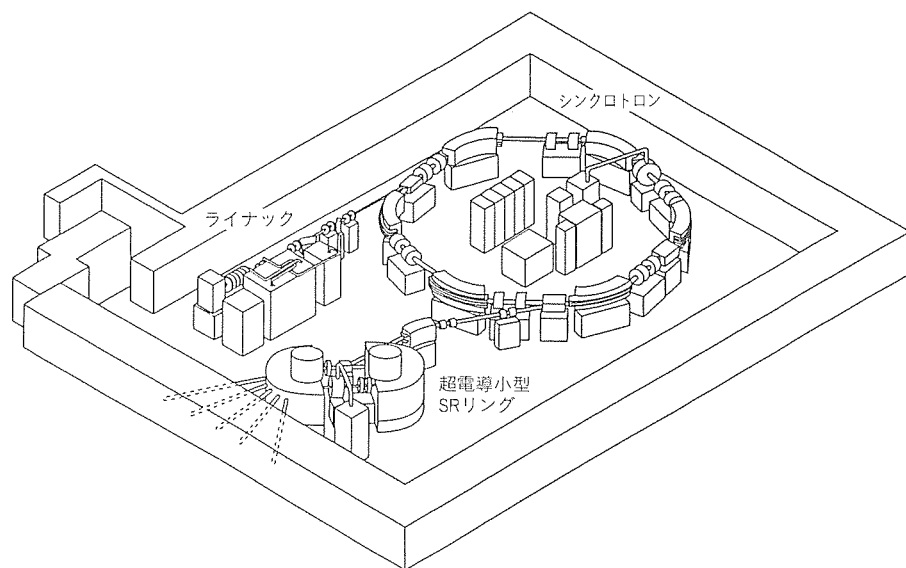


図 1. 三菱電機SR装置の構成

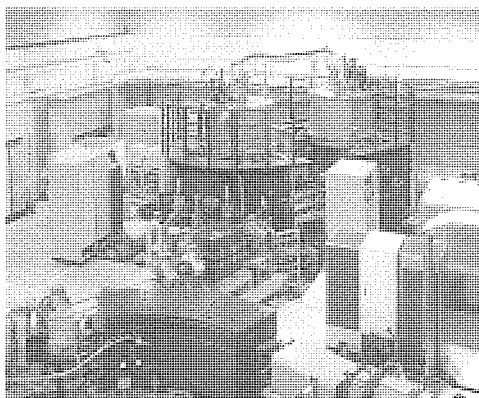


図 2. 超電導小型SRリングの全景

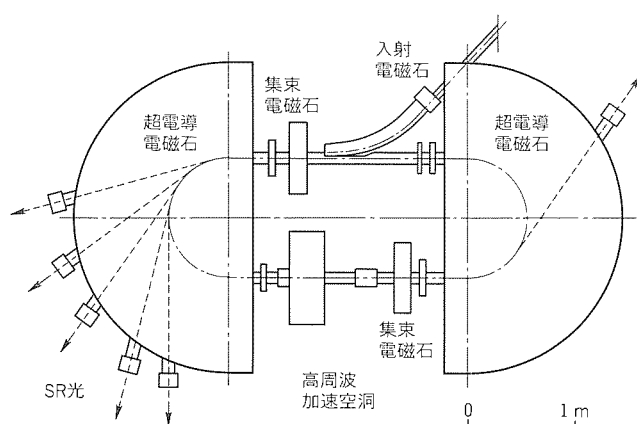


図 3. 超電導小型SRリングの平面図

### 3.1 特 長

開発した超電導電磁石の特長は以下のようにまとめられる。

- (1) 断熱構造を強化し、液体ヘリウムの消費を抑える設計をした。現在の時点で液体ヘリウム消費量は2台で毎時3ℓである。これはSRリング用超電導電磁石の消費量としては世界最少であり、これによって大型のヘリウム液化機を不要にした。
- (2) SRリング用として世界で初めて永久電流方式の運転に成功した。この方式では電流減衰率が少ない(毎時 $2 \times 10^{-11}$ )ため、最初に電流を注入した後は電源を切り離している。このように省電力、高安定度という超電導の利点を最大限生かすことができ、永久磁石と同様の取扱いやすさを実現した。
- (3) ビーム通過位置では強い磁界を発生するが、磁気遮蔽を設置し、外部への漏れ磁界を低減した。リングから3m離れれば地磁気並みの磁界になるよう抑えてあるため、例えばリング近くでのSR光利用が可能である。

以上をまとめると、この超電導電磁石は取扱いが容易で本格的な産業用に近いといえる。

### 3.2 磁界シミュレーション

磁界シミュレーションは電磁石の設計に不可欠であり、次節のビームシミュレーションを通じてSRリング全体の設計の鍵になる。

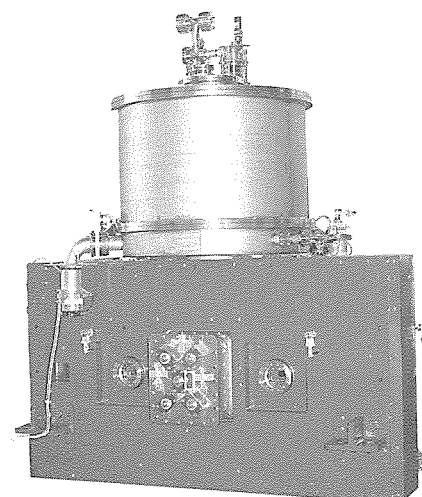


図 4. 超電導偏向電磁石の外観

SRリングのビームは広がりを持っているため、ビームが通過する広い領域で高精度の磁界を発生する必要がある。このような磁界を形成するために巻線(コイル)の形状は複雑になる。図5にコイル形状を示す。偏向用の上下方向(2極)磁界を発生する主コイルのほかに、磁界補正用の4極及び6極コイルを配している。また、端部の磁界を整形するために主コイルは端部を跳ね上げている。

このような複雑な巻線形状のモデル化には三次元の磁界解析が必要である。また、遮蔽用の鉄の磁気飽和効果を考慮する必要がある。このような非線形三次元磁界は最も解析困難な問題に属するが、高精度の解が得られる方法として二ポテンシャル法<sup>(6)</sup>を採用した。

シミュレーションの結果に基づいた設計を行い、当社神戸製作所で製造と組立を行った。真空チェンバの中の磁界を測定する装置を開発し、シミュレーション結果の検証を行った。計算値と比較した実測値<sup>(7)</sup>を図6に示す。シミュレーションの予測どおりの実測値が得られている。

## 4. ビームシミュレーション

加速器にとってビームシミュレーションは重要な技術であり、ビーム軌道を追跡するという意味から、特にビームトラッキング(Beam Tracking)と呼ばれている。ビームトラッキングの概念を図7に示す。円形加速器中の電子ビームは、偏向電磁石で曲げられ、四極電磁石で集束されながら、真空中のビームダクト中を回転する。図では2回転までのビーム軌道をえが(描)いている。偏向電磁石の漏れ磁場や、多極成分の誤差磁場により電子は理想的な軌道(設計軌道)から少しずつずれ、誤差磁場がある許容値を越えるとビームダクトに衝突して失われる。ビームトラッキングは上記の誤差磁場の許容値や、磁石配置が適切であるかを予測する技術である。

超電導小型SRリングのシミュレーションを行うには従来



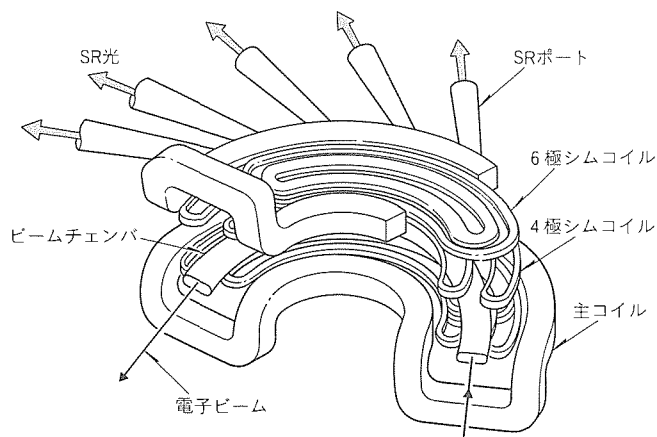


図5. 超電導偏向電磁石のコイル形状

と異なるシミュレーション手法が必要となる。それは下記の理由による。

- (1) 従来の円形加速器のシミュレーションでは、偏向電磁石の曲率半径  $\rho$  が振動の振幅  $x$  より十分大きいとして、近似を行っていた ( $x/\rho$  の高次の項を切り捨てていた)。しかしながら  $\rho$  の小さい小型リングではその近似は適切ではない。
- (2) 従来の円形加速器のシミュレーションでは、偏向磁界はビーム進行方向 ( $s$  方向) に均一であるとしていた。また、 $s$  方向の磁場成分  $B_s$  を考慮することができなかった。しかし、超電導偏向電磁石は、漏れ磁場が大きい磁場分布 ( $B_y$ ) が不均一であり、かつ  $B_s$  も大きいので、それらの影響を考慮する必要がある。

そこで、筆者らはトラッキングに数値積分法を適用し、シミュレーションコード PROVIDENCE<sup>(8)</sup>を開発した。数値積分法は、 $x/\rho$  の高次項及び三次元磁場分布を考慮したモデル化が可能である。

#### 4.1 定式化とアルゴリズム

電子はある一定の閉軌道 (Closed Orbit) の周辺を振動しながら、超電導小型蓄積リング中を回転する。図7に併記された座標系 ( $s, x, y$ ) における電子の運動方程式を変形し、次式<sup>(9)</sup>を導出した。

$$x'' = C \left( -y' B_s - \frac{x' y'}{a} B_x + \frac{x'^2 + a^2}{a} B_y \right) + \frac{2x'^2 + a^2}{\rho a} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$y'' = C \left( x' B_s + \frac{x' y'}{a} B_y - \frac{y'^2 + a^2}{a} B_x \right) + \frac{2x' y'}{\rho a} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $a$  と  $C$  は次式

$$a \equiv 1 + \frac{x}{\rho} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C \equiv \frac{e}{mv} \sqrt{x'^2 + y'^2 + \left(1 + \frac{x}{\rho}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

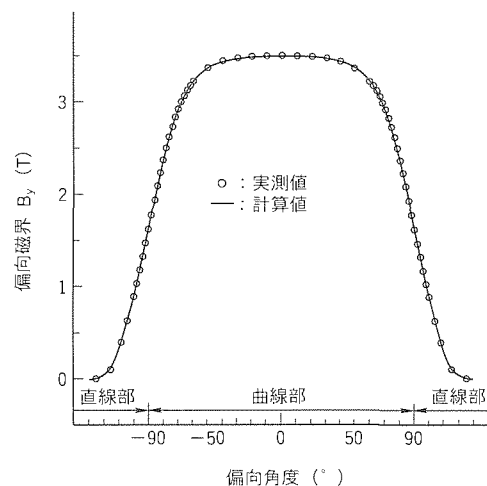


図6. 超電導偏向電磁石の磁界分布

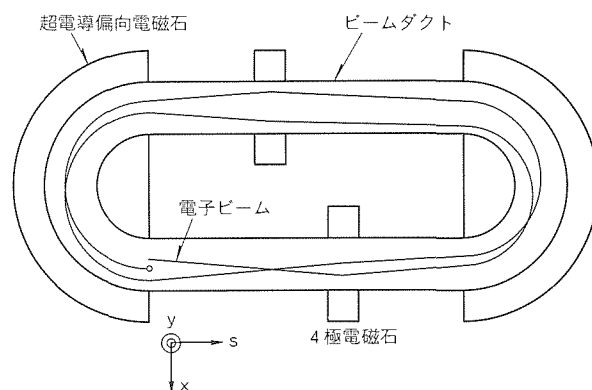


図7. ビームトラッキングの概念図

また、 $'$  は  $d/ds$  を表す。時間変数  $t$  を消去できた結果、解の高速化を達成した。

##### 4.1.1 三次元磁界

偏向電磁石の磁束密度  $B_x, B_y, B_s$  は、三次元の磁場データを多極展開し、展開係数を上記運動方程式に代入することで計算する。三次元磁場データは前節で述べた磁界シミュレーションの計算結果を用いる。電磁界方程式を満たすような三次元多極展開<sup>(10)</sup>を新たに導出している。

##### 4.1.2 数値積分手法と計算精度

数値積分は、計算精度と計算時間を考慮し、軌道方程式 (1), (2) に最適なルンゲ・クッタ・バーナ法を用いた。また、この方程式系の場合、このルンゲ・クッタ・バーナ法とアダムス・モルトン法とは、誤差の集積の方向 (誤差の符号) が逆である<sup>(11)</sup>ことを発見した。これにより、二つの手法で計算を行うことで、計算誤差の評価が可能である。

#### 4.2 シミュレーション結果

本節では超電導小型 SR リングのビームトラッキングを行った結果として位相平面図、及び安定ビーム周回領域を論じる。前節の最後に述べた方法で実際の計算誤差を見積もった結果、1,000 周したときの電子の位置の計算誤差は  $1 \times 10^{-6}$  mm 以下であることが確かめられている。

#### 4.2.1 位相平面図

位相平面図とは、ある位置で周回ごとのビーム位置と発散角（設計軌道からの傾き）をプロットしたもので、多極磁界のないリングではだ（楕）円になることが知られている。

図8に偏向電磁石中心位置での鉛直方向（y 方向）の位相平面図（10,000 回転）を示す。超電導電磁石の多極磁界のためにプロット点は楕円が変形してこのような図形を形成する。この図形の横方向の幅がビーム通路の幅になる。多極磁界が強いほどこの幅が大きくなり、真空チェンバの幅を越えればビームはそこで消滅する。

#### 4.2.2 安定ビーム周回領域

位相平面図の幅が真空チェンバよりも小さな電子ビームの初期位置を安定ビーム周回領域と呼ぶ。図9に偏向電磁石中心位置での安定ビーム周回領域の計算結果<sup>(12)</sup>を示す。

図中の10 $\sigma$ はビームの太さ $\sigma$ の10倍で、磁石が理想的に設置された場合にビームが長時間安定に回転するために必要な領域、また、必要良磁場領域は磁石の設置誤差が原因で生じる軌道の広がりを考慮したビーム通過領域である。これら

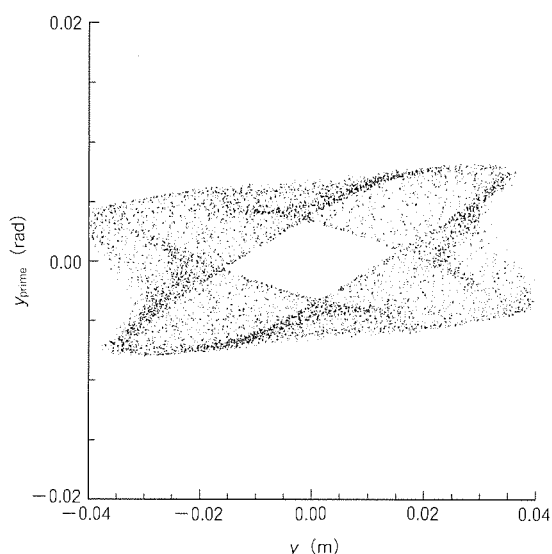


図8．位相平面図

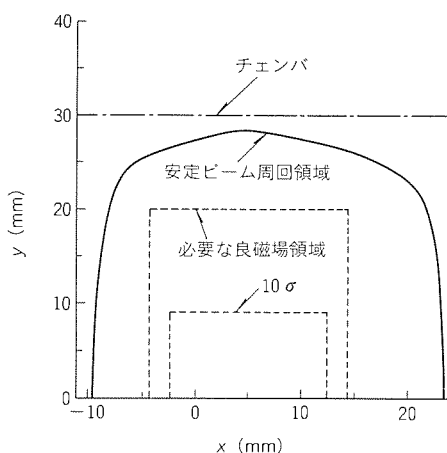


図9．安定ビーム周回領域

ビーム通過領域は安定領域内に入っているため、余裕のある設計値が得られていることが分かる。

### 5. SR装置の状況

超電導小型SRリングは、1993年6月に入射蓄積実験を開始した。超電導偏向電磁石の主コイル及び補助コイルはビームトラッキングにより決定した最適パラメータに固定し、入射に用いるパルス電磁石の出力やタイミングを調整することで初期ビーム調整を行った。その結果、6月中にビーム蓄積に成功し、放射光を観測した。その後、入射軌道及び平衡軌道の調整を行い、蓄積電流値250mAを達成している。図10に超電導小型蓄積リングからの放射光を示す。

現在、SRリングの初期調整を完了し、SR光利用ラインへ放射光を供給する定常運転を行っている。現在の超電導小型SRリングのビーム性能を表1に示す。

### 6. む す び

当社中央研究所のシンクロトロン放射光装置が西部基礎研究棟で稼働を開始した。永久電流方式でヘリウム消費量の少ない超電導電磁石を用いているため、偏向磁界のことを気にせず運転が行われている。このSR装置の開発によって産業用小型SR装置を一般ユーザーへ販売するための技術を確認した。現在、定常運転によってSR利用研究にSR光を供給している。

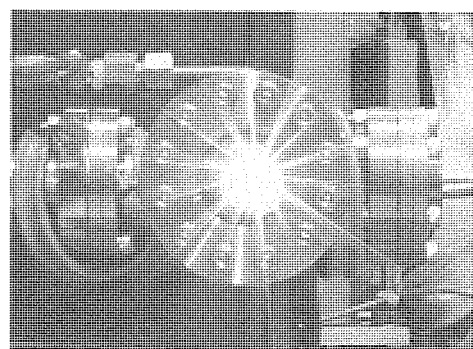


図10．超電導小型SRリングのSR光

表1．超電導小型SRリングのビーム性能

エネルギー	$E$	600MeV
最大蓄積電流	$I$	250mA
周 長	$C$	9.2m
偏 向 磁 場	$B$	3.5T
偏向磁場勾配	$n$	0.16
曲 率 半 径	$\rho$	0.593m
加速周波数	$f_{RF}$	130MHz
ハーモニック数	$h$	4
チューン	$\nu_x$	1.35
	$\nu_y$	0.43
クロマチシティ	$\xi_x$	-0.56
	$\xi_y$	-1.14
強度最大波長	$\lambda_p$	0.69nm

開発成功の鍵は、磁界及びビームのコンピュータシミュレーションである。コンピュータシミュレーションによる加速器の設計及び数値実験の寄与の有効性<sup>(13)</sup>は、当社が受注した(株)ソルテックの常電導小型 SR 装置<sup>(14)</sup>及び放射線医学総合研究所の重イオン加速器の早期稼働でも実証されたものである。

今後、この技術を用いて小型 SR 装置、イオン加速器などが広く普及し、技術革新が広がることが期待される。

# 参考文献

- (1) 中西哲也, 奥田莊一郎, 中村史朗, 山田忠利, 岩本雅民: シンクロトン放射光装置の研究試作, 三菱電機技報, **65**, No.11, 1080~1085 (1991)
- (2) 山田忠利: 三菱電機の超電導小型 SR リング, 日本放射光学会誌, **6**, No.4, 77~83 (1993)
- (3) 築島千尋, 中田修平: 蓄積リング用パルス電磁石の開発と真空ダクトによる発生磁界の遮蔽効果, 電気学会論文誌, **113-B**, No.8, 924~930 (1993)
- (4) 中田修平, 築島千尋, 中西哲也, 小寺溢男, 水田典幸: 一体成形方式によるセプトム電磁石の大出力化, 電気学会論文誌, **113-D**, No.7, 901~909 (1993)
- (5) Yamamoto, S., Kawaguchi, T., Matsuda, T., Takeuchi, T., Koder, I., Amano, T., Morita, M., Yokoyama, S., Shimohata, K., Nakamura, S., Yamada, T., Iwamoto, M.: Superconducting Bending Magnets for Compact Synchrotron Radiation Source, IEEE Transaction on Magnetics, **3**, 821~824 (1993)
- (6) Simkin, J., Trowbridge, C. W.: On the Use of the Total Scalar Potential in the Numerical Solution of Field Problems in Electromagnetics, Interna-

tional Journal for Numerical Methods in Engineering, **14** (1979)

- (7) 松田哲也, 竹内敏恵, 宇田正夫, 山本俊二, 小寺溢男, 川口武男, 大石紀夫, 中村史朗, 山田忠利: 小型 SR リング用超電導電磁石の磁界評価, 電気学会超電導応用研究会資料集, ASC-94-4 (1994)
- (8) Tanaka, H., Nakanishi, T., Okuda, S.: Beam Tracking of a Small Storage Ring, Proceedings of the 7th Symposium Accelerator Science and Technology, Osaka, 287~289 (1989)
- (9) Tanaka, H., Nakanishi, T.: Beam Tracking of a Small Storage Ring, Proceedings of the 2nd European Particle Accelerator Conference, Nice, France, **2**, 1679~1681 (1990)
- (10) 田中博文, 中西哲也: 小型 SR 装置中の電子ビームの新しいシミュレーション手法, 日本シミュレーション学会第14回計算電気電子工学シンポジウム, 東京, 43~48 (1993)
- (11) Tanaka, H.: Beam Tracking of a Compact Storage Ring(2), Proceedings of the 9th Symposium Accelerator Science and Technology, Tsukuba, 287~289 (1993)
- (12) Tanaka, H., Nakanishi, T.: A Beam Tracking of a Compact Storage Ring using Superconducting Bending Magnets, Review of Scientific Instruments, **63**, No.1, 777~780 (1992)
- (13) 奥田莊一郎: 電気工学研究とシミュレーション, 研究開発マネジメント, **20**, No.10, 30~40 (1992)
- (14) 中村史朗, 岡田浩一: ソルテック 1 GeV 放射光源施設, 日本放射光学会誌, **2**, No.3, 17~32 (1990)

# 日本電信電話(株)LSI 研究所納め 放射光装置用電子線形加速器

太田完治\*

小野寺俊男<sup>+</sup>

木村勝一\*\*

福本信太郎\*\*\*

## 1. ま え が き

次世代の1Gビットクラス以上のLSI素子製造(2000年ごろ)には、X線領域の光源を使用するのが最適と考えられている。この光源には、電子のシンクロトロン放射光(Synchrotron Radiation:SR)が用いられる。日本電信電話(株)(NTT)では、この半導体製造技術を開発するため、常伝導電子加速・蓄積リングNAR(800MeV)と超伝導電子加速・蓄積リングSuper-ALIS(600MeV)を建設し、それぞれ昭和63年5月、平成元年2月に放射光の取り出しに成功した<sup>(1)</sup>。X線リソグラフィ技術開発を目的として、民間で専用小型加速器を建設したのは、世界最初であった。その後、国内では(株)ソルテック、住友電気工業(株)、三菱電機(株)等、海外では、IBM社等が、自社加速器を保有することになった<sup>(2)</sup>。NTTの放射光装置施設は、上記の2リングと、これらに電子を供給する入射用電子線形加速器(15MeV)とからなる。三菱電機(株)はこの入射用電子線形加速器を担当した。

LSI製造に用いられる商用としての放射光発生装置に求められる性能は、小型で運転が安定していることである。これに伴い、入射ビームに要求される性能<sup>(3)(4)</sup>は、①大電流、②低エミッタンス、③低エネルギー分散、④低エネルギー安定加速の4条件を同時に満足することである(表1)。しかし、当時(1985)の線形加速器の実績では、上記の4条件を同時に満足するものではなく、特に大電流/低エミッタンス、大電流/低エネルギー分散の実現は非常に困難とされていた。そこで、前者の解決手段として、電子銃、ダブルプリバンチャ、定在波加速管のシステム構成を採用した。後者の問題の解決には、エネルギー圧縮装置(Energy Compressing Sys-

tem: ECS)<sup>(5)(6)</sup>を全体システムに加え、それぞれの最適パラメータをビームシミュレーションによって決定し、採用した。

本稿では、SR装置入射用としての電子線形加速器の構成、シミュレーション、ビーム性能試験結果について紹介する。

## 2. 機 器 構 成

NTT LSI 研究所(当時厚木研究所)納め電子線形加速器システムの概略を図1に示す。入射系のシステムは、①ビーム発生から目的エネルギーまで加速するための加速部、②低エネルギー分散を実現するためのエネルギー圧縮部、③ビームエネルギー/分散を測定するためのエネルギー分析部、④加速管へ高周波(Radio Frequency: RF)電力を供給するための高周波源部、⑤真空系部、⑥ビーム軌道制御のためのモニタ及び入射系全体を制御するための制御部、及び⑦電源部からなる。

### 2.1 加 速 部

大電流かつ低エミッタンスビームを実現するために、加速部には①大電流電子銃、②二つのプリバンチャ(ダブルプリバンチャ)、③定在波型加速空洞を用いた。全長3.4mである。

入射器出口でのビームエミッタンスは、電子銃から電子が放出される際のエミッタンスと、加速管内のエミッタンス成長によって決まる。一般に、ビームを大電流にするとその空間電荷効果により、エミッタンスは大きく(悪く)なる。電子銃のエミッタンスは電流-電圧が一定であれば、その構造寸法で最適化することが可能である。しかし、この後に続く加速管内でのエミッタンス成長を何らかの方法によって抑え

表1. SR装置入射用電子線形加速器のビーム性能(設計パラメータ)

機 器 項 目	電 子 銃	プリバンチャ # 1	プリバンチャ # 2	定在波型加速管	機能分担
エネルギー	<100keV	—	—	13MeV	定在波型加速管
エネルギー分散 $\Delta E/E$	<±1%	—	<±10%	<±2%	プリバンチャ (定在波型加速管)
ビーム位相幅	360°	—	60°	8°	—
ビーム径	<8mm	—	<4mm	<4mm	電子銃 Q-トリプレット
角度分散	<3mrad.	—	—	<±0.4mrad.	電子銃 (プリバンチャ)
電 流 値	>1.0A	>400mA	>330mA	>280mA	電子銃プリバンチャ
パルス幅	>5μs	—	—	>4.5μs	グリッドパルス

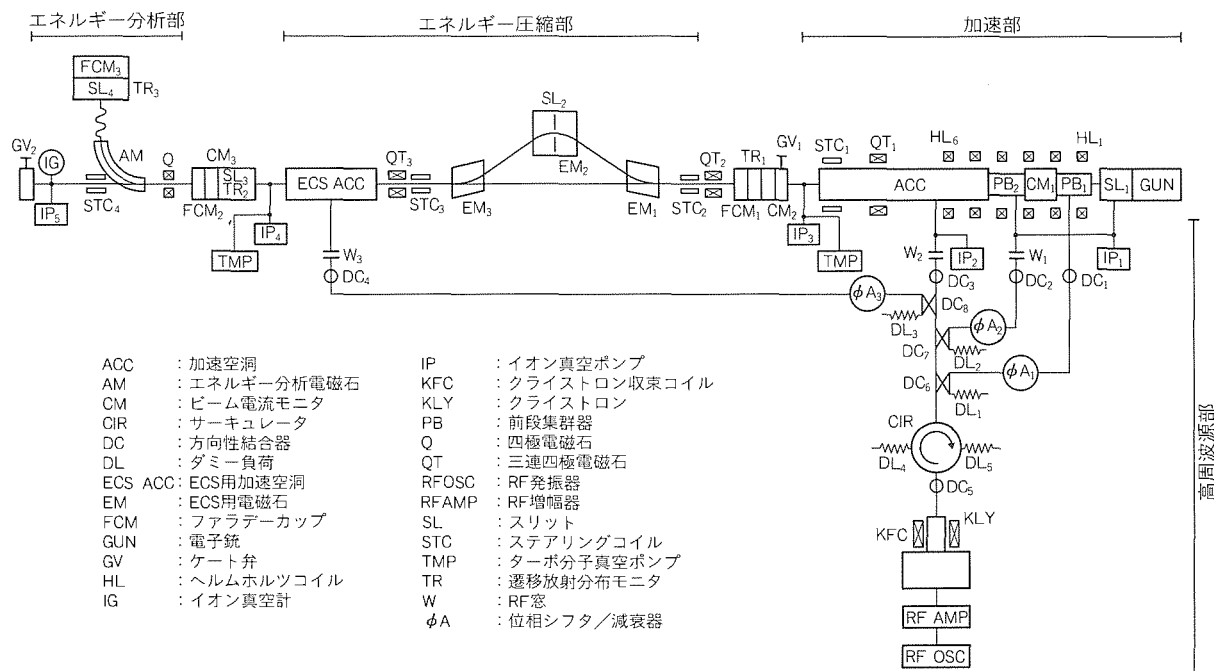


図1. NTT電子線形加速器のブロック図

表2. 電子銃の実測性能

電子銃カソード電圧	-90kV
グリッド電圧	1.5kV
カソード径	8 mm
パービアン	$I = 5.6 \times 10^{-8} V^{3/2}$
ヒータ電力	8V, 3A
エミッタンス	20 $\pi$ mm · mrad 電圧90kV, エミッション電流850mA
ビーム径	3 mm

ることができるのなら、電子銃で大電流を引き出すことが可能となる。今回は、電流をできるかぎり大きく取るという電子銃の設計を行った。電子銃の性能を表2に示す。

電子銃で90 keV にまで加速された電子は、ダブル(2段)プリバンチャ(2,856 MHz)に入る。プリバンチャは電子銃から出たビームを密度変調させるものであるが、1個の場合は図2のように、連続ビーム(RFの位相で入射幅180°)を出射幅(例えば)30°の領域内にビームを集群することができる。さらに、もう1個バンチャを重ねて、ダブルプリバンチャにすると、さらに密度変調がかかり、図3のように出射幅を数度の間にビームをバンチャ(集め)させることができる。

したがって、主加速管入口で数度の範囲内のRF位相にビームを入れることができる。2個のプリバンチャにしたときは、1個のプリバンチャのときに比べて、加速管出口でのビーム透過率は若干良くなる程度であるが、加速高周波電界の初期条件がそろうため、主加速管の初期位相にうまく合わせてやると、エネルギースペクトルの広がりは大幅に狭い方向に改善される。ここで、“プリ”とは主加速管の前段という意味である。表3にダブルプリバンチャの性能を示す。

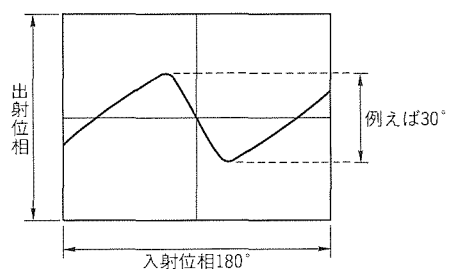


図2. 第1段プリバンチャでのビーム出射位相

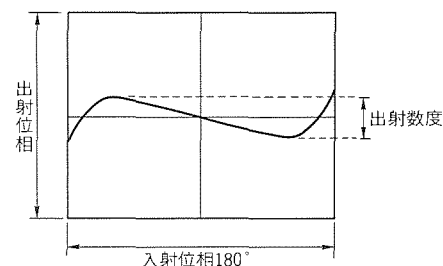


図3. 第2段プリバンチャでのビーム出射位相

ダブルプリバンチャで密度変調を受けた電子ビームは主加速管に入る。主加速管は定在波型加速空洞を32個連ねたものである。各空洞間の高周波の結合はサイドカップル空洞にて行う。高周波の運転モードは $\pi/2$ モードである。

一般に、電子線形加速器に使用される加速管には、定在波(Standing Wave: SW)型と進行波(Traveling Wave: TW)型とがある。図4に両方式の代表的な例を示す。定在波の特徴は次のとおりである。

(1) 定在波加速管は高電界型であり、進行波型に比べて加速管単位長さ当たりのエネルギー利得が大きくできるので、同

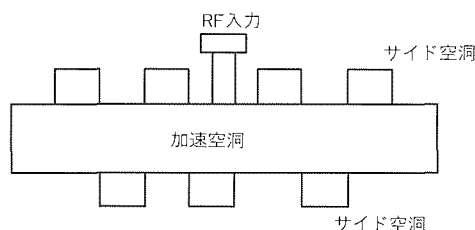


表 3. ダブルプリバンチャの実測性能

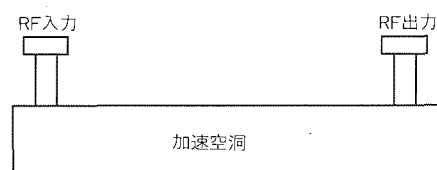
	設計値	実測値
ビームエネルギー (keV)	100	90
ピーク電流 (A)	0.33~1	0.45
ドリフトチューブ(半径) (mm)	19	19
ビーム半径 (mm)	2	2
プリバンチャ # 1		
ギャップ電圧 (kV)	5	2.9
プリバンチャ # 2		
ギャップ電圧 (kV)	15	18.3
バンチング効率 (%)	75	71

表 4. 加速管の設計パラメータ

	加速管 (主加速管)	ECS加速管
加速方式	2,856MHz, 定在波型, $\pi/2$ モード	同 左
空洞構成	空洞数32 バンチャ 1 レギュラ 31	空洞数 4 レギュラ 4
加速特性		
入射エネルギー (keV)	90	15
出力エネルギー (MeV)	15	15
最大入射電力 (MW)	8	1
加速電流 (mA)	300	300



(a) 定在波型加速管



(b) 進行波型加速管

図 4. 定在波型/進行波型加速管の例

じエネルギーに加速するのに加速管を小型化できる。

(2) 今回の加速電流は通常値より大きく、加速管内で起こるエミッタンス成長を抑えるには、特に低いエネルギーの段階で、高電界加速が必要である。この高電界加速が定在波型は可能である。

表 4 に加速管 (主加速管と ECS 加速管) の設計パラメータを示す。主加速管を出た電子ビームは 15 MeV まで加速されている。

## 2.2 低エミッタンス化

電子銃を出たビームは空間電荷効果により、横方向 (ビーム進行方向 (=縦方向 =  $z$  方向) に対して垂直な面内の方向 (=  $r$  方向)) に広がろうとする (正の半径方向の力)。一方、電子が空間を飛ぶと電流となり、その周りの空間に磁場を誘起する。この誘起された磁場と、電子ビーム電流とが相互作用して、ビームを締め付けようとするピンチ力 (負の半径方向の力) が発生する。したがって、電子ビームは空間電荷による広がろうとする力と、自己ピンチによる締まろうとする力の互いに反対方向の二つの力を同時に受けることになる。しかし、ピンチ力は電子の速さが小さいときにはほとんど効果がなく、高速になるにつれてその効果が利くようになり、光の速さになったとき、空間電荷効果と相殺し、ビームが空間電荷効果で広がることはなくなる。

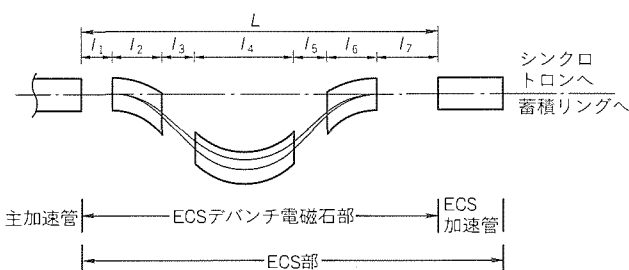


図 5. ECS偏向電磁石群

電子銃内や、ダブルプリバンチャ、主加速管の初段空洞近辺の、電子の速さがまだ低速の領域では、空間電荷効果によるビームの広がりが重大な問題となる。特に、ダブルプリバンチャで、縦方向に電子を圧縮すると、空間電荷密度は更に上がり、横方向にビームは広がってしまう。そこで、この低速領域にソレノイドコイル (6 個) を設け、ビーム軸上に縦方向の一樣磁場を作り、この磁力線に電子を捕そく (捉) させ、ビームが横方向に広がることを抑制した。

一方、加速管内のエミッタンス成長については、加速管内に発生する径方向電界により、電子は発散力を受けてエミッタンスがますます大きくなる。この径方向電界は加速管が軸対象であるため、軸上でゼロであり、軸から外れるにつれ電界強度が大きくなる。したがって、ビーム発散を抑えるには、ビームをできるだけ加速管の軸上にかつ軸と平行に主加速管へ入射する必要がある。しかし、実際のビームは、有限面積の断面を持つため、ビーム発散を抑えるには、主加速管への入射ビームの断面径をできるだけ小さくする必要がある。この意味からも、電子銃、ダブルプリバンチャ領域にソレノイド磁場を設けたことは、ビーム径を広げず、かつ軸に平行に入射することができるので、主加速管内でのビーム発散を抑えることに寄与している。

さらに、加速管内での厳密なビームの発散量を知り、ビーム発散問題の解決策を見付けるには、軸上のビームダイナミックスの解析とともに、加速管の軸を外れたところでのビームダイナミックスの解析が必要となる。

## 2.3 エネルギー圧縮部

主加速管で 15 MeV にまで加速された電子のエネルギースペクトルには、広がりがある。下流シンクロトロンでの

表 5. ECS磁石の定格

名 称 項 目		ECS電磁石		Q-トリプレット, シングル *1		分析磁石
		EM <sub>1</sub> , EM <sub>3</sub>	EM <sub>2</sub>	QF	QD	AM
最大磁場強度		3,448 Gauss	3,448 Gauss	5T/m	5T/m	1,335 Gauss
最大起磁力 (AT／極)		4,320	4,320	720	720	1,700
抵抗 (R75) (Ω)		1.68	1.68	1.01	1.44	2.05
コ イ ル	ターン数*2 (ターン)	540± 2	540±27	200± 1	200± 9	210
	電 流 (A)	8	8	3.6	3.6	8.1
	電 圧 (V)	13.4	17.8	3.6	5.2	16.6
	冷却方式	自然空冷	自然空冷	自然空冷	自然空冷	自然空冷
磁  極	磁極間距離 (mm)	30	30	φ36	φ36	30
	磁極長*3 (mm)	80	180	40	80	785
	材 質	S10C	S10C	SS400	SS400	S10C
	構 造	ソリッド	ソリッド	ソリッド	ソリッド	ソリッド
質 量 (kg)		120	210	15	30	380
台 数 (台)		2	1	5	5	1

\*1 Q-トリプレットはQF-QD-QFの構成である。Q-シングルはQFと同様である。

\*2 補正巻線によってターン数は増減できる (その他の値は主巻線のターン数での値)。

\*3 有効長ではなく、機械的長さである (AMについては軌道方向に沿う長さ)。

電子蓄積・加速効率、及び蓄積リング状態での電子寿命を長くするには、入射系出口での電子エネルギースペクトルの広がりのできる限り小さくした方がよい。

この目的を達成するために導入されたのが、エネルギー圧縮システム (ECS) である (図 5)。主加速管出口でのエネルギー (速さ) の違う電子を一樣な垂直磁場内に通すと、エネルギーの大きな電子は大きな回転半径の軌道を描き、小さなエネルギーの電子は小さな回転半径の軌道を描くので、磁場領域の入口で同時であったとしても、出口では到達時間の差となって現れる。これを ECS 加速管に入れてやると、この時間差は加速高周波の位相差に相当するので、入射位相をうまく選ぶことにより、基準より大きなエネルギーを持つ電子は減速でき、基準より小さなエネルギー電子は加速することができる。そして、電子群全体のエネルギーを基準値にそろえることが可能となる。

ECS は電子群を時間分解する磁石系と時間分解された電子群をモノエネルギーにそろえるエネルギー補正用の加速管 (図 1 の ECS ACC) からなっている。磁石系は 3 台の ECS 偏向電磁石 (EM<sub>1</sub>~EM<sub>3</sub>)、2 組の Q-トリプレット (3 連の 4 極電磁石) (QT<sub>2</sub>, QT<sub>3</sub>)、Q-シングル (Q)、3 組のステアリング電磁石 (STC<sub>2</sub>~STC<sub>4</sub>) からなっている。表 5 に各電磁石の定格値を示す。ECS 加速管の性能は表 4 に示す。EM<sub>1</sub>, EM<sub>3</sub> と EM<sub>2</sub> とは磁極が反転しており、磁極長は EM<sub>2</sub> の半分である。理想状態では、これら 3 電磁石を 1 台の電源で直列結線し励磁すればよいが、漏れ磁場の影響が予測できないので、それぞれ別電源とし、励磁量を変化させ調整することにした。

QT<sub>2</sub>, QT<sub>3</sub> は主加速管の出口と ECS 系入口との取り合い点でのビームパラメータの整合をとるために設けられている。また、STC<sub>2</sub>~STC<sub>4</sub> はビームの軌道補正用に設置されている。

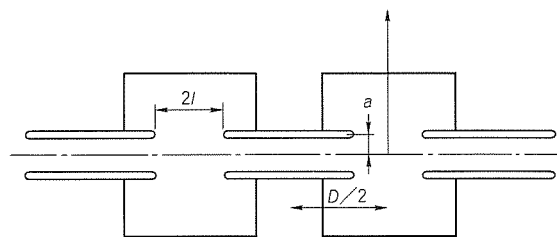


図 6. Kosmahlの加速空洞モデル

## 2.4 高周波源部

RF 供給装置は、プリバンチャ # 1, # 2, 主加速管及び ECS 加速管へ 2,856.56 MHz のマイクロ波電力を供給する。三菱電機製大電力クライストロン (PV-2012 S, 最大出力 10MW) を使用し、導波管, 位相・減衰器, 方向性結合器, RF 窓, サーキュレータ等の機器を通して、各空洞に高周波を供給している。このクライストロン入力は、シンセサイザ及び TWT アンプで作られた RF 源にパルス変調を加えたものである。RF 源として上記システムを選択した理由は、出力ビームの性能再現性を要求されたためである。パルスごとの性能再現性実現のために、パルスごとの RF 位相及び電力の安定度を達成する必要があった。同様の理由で、クライストロンの高圧電源も、パルス内のリップルを含めた安定度まで厳しい規格 (<±0.5%) の達成が必要であった。

## 3. 軸外運動解析 (三次元シミュレーション)

加速空洞内を運動する電子の挙動を厳密に解析するには、加速空洞内の高周波電磁場の正確な関数の形 (解) が必要である。Kosmahl は軸対称な加速電極ギャップ (2l), 加速電極半径 (a) 及び電極ピッチ (D) を用いて、モデル化した電極 (図 6) の作る電磁場の電界を級数解の形で解析的に求めた<sup>(7)</sup>。筆者等はこれを発展させて、さらに磁界の級数解を求め、高周波電磁場の解析的級数解を得た。

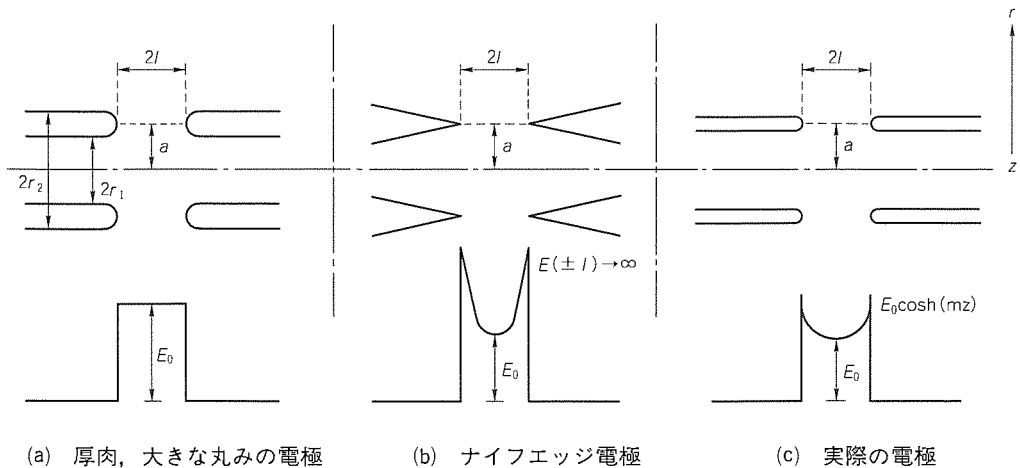


図 7. 三つの異なった電極端形状での電界

表 6. SR装置入射用線形加速器の性能

	設計値	実測値
エネルギー (MeV)	>13	15
パルス幅 (μs)	>2.0	2.0
ビーム電流 (mA)	>250	270
エネルギー幅 (%)	<1(半値幅)	1(半値幅)
ビームサイズ (mm)	<φ4.0	φ3.0
ビーム発散角 (mrad)	<0.5	1.4
エミッタンス (πmrad)	<1×10 <sup>-6</sup>	<2.1×10 <sup>-6</sup>
パルス繰り返し (Hz)	3 max.	3 max.

ここで、 $m$  は電極ギャップの電磁場形状 (図 7) を示すパラメータであるが、今回の加速空洞の場合は、空洞に高周波を入れ、軸上の電界強度 ( $E_z$ ) を測定して、その電界分布から Kosmahl の  $m$  を決定した。この  $m$  を用いて、軸外の電磁場を決定した。

電子は電磁場の存在のもとで、ローレンツ力を受ける。その軌道方程式は次式である。

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m_{eo}}{\sqrt{1 - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})/c^2}} \mathbf{v} \right) = -e (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

ここで、 $m_{eo}$ ：電子の静止質量、 $e$ ：電子の素電荷量、 $\mathbf{v}$ ：電子の速度、 $c$ ：真空中での光の速さ、 $\mathbf{E}$ ：高周波電磁場の電界、 $\mathbf{B}$ ：高周波電磁場の磁場、 $\mathbf{r}$ ：電子の位置、 $t$ ：実験室での時間である。高周波電磁場は Kosmahl の表現に従う。

開発したコードは、この運動方程式を主加速管入口での電子の初期位置と初期速度を与えて、加速空洞 32 個 (33 個のドリフト部を含む。) 内での運動を解き、主加速管出口での電子の位置と速度を求めるものである。このコードでは単一荷電粒子モデルを用いているので、電子の集団効果 (空間電荷の効果) は考慮されていない。さらに、電子の運動が誘起する電磁場も考慮していない。

低エミッタンス化のデータサーベイは、次のようにして行った。主加速管での電子の初期条件、すなわち位置 ( $r_0$ )、初期速度 ( $v_z, v_r, v_e$ ) 及び電磁場の初期位相をパラメータにし、主加速管出口での電子エネルギー、位置、速度 (エミ

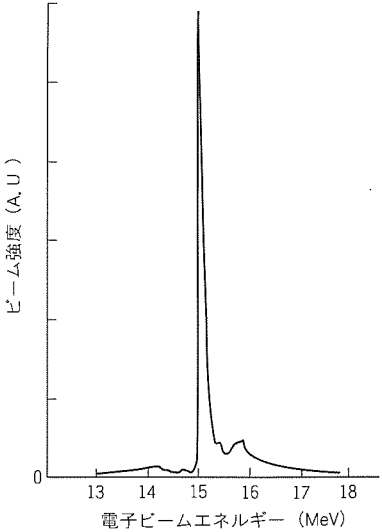


図 8. ECS の後のエネルギースペクトル分布<sup>(8)</sup>

ッタンス) を見ながら、設計仕様範囲内に入る初期条件を捜した。

4. 試験結果

表 6 に電子線形加速器の性能 (試験結果) を示す。電流は 270 mA (設計値 250 mA) エネルギースペクトル幅 1 % ビームサイズ φ 3 mm を達成することができた。図 8 に ECS を通った後のエネルギースペクトルを示す。半値幅で 1 % である<sup>(8)</sup>。

ビームエミッタンスについては、設計目標値 (1 π mm・mrad) を達成することはできなかったが、当時としては、1 けたエミッタンスを改善することができ、小型放射光加速器 (シンクロトロン) の入射器としての技術を確認した。この技術をもって、NTT の後に続いた ㈱ ソルテック (40 MeV)、三菱電機 ㈱ 中央研究所 (20 MeV) に、高性能小型入射器を納めることができた。

5. む す び

放射光利用目的 (特に、半導体製造 X 線リソグラフィ) に、

専用の小型加速器が今後国内外で多く建設される予定であるが、この小型シンクロトロンの入射器として高性能電子線形加速器に求められる性能 (① 小型, ② 大電流, ③ 低エミッタンス, ④ 低エネルギー分散, ⑤ 安定動作) を、今回一つ一つ解決する技術を確立した。

定在波加速管内の電磁場の解析に当たり、電子顕微鏡の電磁場解析の手法<sup>(9)</sup>を御指導いただいた長岡技術科学大学の松田甚一教授に深く感謝の意を表す。また、電子線形加速器の技術的検討に対し御指導をいただいた日本電信電話(株)LSI研究所 SR 装置建設チーム各位に深く感謝の意を表す。

#### 参 考 文 献

- (1) 中島雅之, 山田浩治, 井戸 敏, 細川照夫: NTT SO R施設, 真空, **34**, No.9, 693~698 (1991)
- (2) 例えば“小型シンクロトロン放射光施設とその利用 (I)” 第一回セミナー資料, (株)大阪ニュークリアサイエンス協会, (財)大阪科学技術センター共催, 2~4 (1988-9)
- (3) 細川照夫, 井戸 敏, 中田稷治, 中島雅之, 山田浩治: 超電導蓄積リング Super-ALIS, NTT R & D, **39**, No.4, 543~552 (1990)
- (4) 塩田 勝: 放射光装置用高性能ライナック, 三菱電機技報, **65**, No.11, 1086~1089 (1991)
- (5) Herminghaus, H., Kaiser, K. H.: Design, Con-

struction and Performance of the Energy Compressing System of the MAINZ 300MeV Electron Linac, Nuclear Instruments and Methods, **113**, 189~194 (1973)

- (6) Sugawara, M., Ichinohe, T., Urasawa, S., Oyamada, M., Kubota, T., Kurihara, A., Konno, O., Shibasaki, Y., Terasawa, T., Nakahara, K., Nemoto, S., Muto, M., Shoda, K., Torizuka, Y.: Performance of an Energy Compressing System for the Tohoku 300MeV Linac, Nuclear Instruments and Methods, **153**, 343~346 (1978)
- (7) Kosmahl, H. G., Branch, M. Jr.: Generalized Representation of Electric Fields in Interaction Gaps of Klystrons and Traveling Wave Tubes, IEEE Trans, Electron Devices, **ED-20**, No.7, 621~629 (1973)
- (8) Hosokawa, T., Kitayama, T., Hayasaka, T., Ido, S., Uno, Y., Shibayama, A., Nakata, J., Nishimura, K., Nakajima, M.: Injector Linac for Super-ALIS, Proc. of the 1989 IEEE Particle Accelerator Conference, **3**, 1459~1461 (1989)
- (9) 加藤和夫, 舟橋 毅, 松田甚一: 高周波電子レンズによる球面収差および色収差補正, 電子通信学会論文誌, **J69-C**, No.3, 304~311 (1986)



# 線形電子加速器

西原 進\* 森口勇介\*\*  
花川和之\*\* 田中常稔\*\*  
木村勝一\*\*

## 1. ま え が き

最近の電子ビームを使った応用には顕著なものがある。これには、体内のしゅよう(腫瘍)を撲滅するため X 線や電子ビームを照射するための医療用線形電子加速器の進歩、放射光、自由電子レーザー等のように高輝度ビームを発生させる線形電子加速器(以下“ライナック”という。)の進歩が不可欠であった。このように利用技術の発達に伴い、加速器の高性能化が要求されている。また、加速器の開発のための計算コードも世界的に整備されつつある<sup>(1)-(4)</sup>。

筆者らはライナックの加速管を開発するために、パーソナルコンピュータで計算できるように二次元のコードを開発して使用しているのでその報告を行う。このコードは、多くの計算コードが大型計算機で長時間の CPU (Central Processing Unit) 時間を必要とするのに対し、パーソナルコンピュータで簡単に計算できるものである。また、空洞中での電界分布を正確に取り入れ、空間電荷を考慮したので、低エネルギーでの電子の運動を正確に計算できるようになった。

また、電磁石、電子銃、照射ビームの平坦(坦)化システムの設計などにもシミュレーションコードが広く使われており、実際の試験結果と比較されている。

## 2. 原 理

磁石の設計などに用いられる静磁場中での電子ビームのシミュレーションについてはよく知られており、ここでは特に加速管について述べる。

ライナックの電子銃から加速管に入射される電子は、マイクロ波の全位相角に対して一様に分布している。したがって、電子が入射されてから光速に達するまでの間に、

- (1) マイクロ波の位相速度を、電子の入射速度に応じた低い速度から光速まで連続的に変化させる。
  - (2) マイクロ波の加速電場にとらえられる電子を増加させる。
  - (3) 広い位相角で入射された電子を、位相及びエネルギーについて、できるだけ狭い幅に集める。
- といった働きをするつなぎの部分が必要である。この部分の加速管をバンチャと呼んでいる。

最初に進行波加速管内の電子の運動を調べてみる。ビーム電流が少ない場合(100 mA ぐらいまで)、電子の運動方程式は、

$$\frac{d(mc^2)}{dz} = -eE_z \sin \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $m = m_0 / \sqrt{1 - \beta_e^2}$ 、 $\beta_e = v_e / c$ である。ここで、 $\gamma = m / m_0 = 1 / \sqrt{1 - \beta_e^2}$ とおき、軸方向には自由空間波長 $\lambda_0$ を単位とする座標 $\xi$ を導入すれば式(1)は、

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = -\alpha \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\alpha = eE\lambda_0 / m_0 c^2$ である。また、電子のマイクロ波に対する位相を表す関係は、 $\theta = \omega_z / v_p - \omega_e / v_e$ から

$$\frac{d\theta}{d\xi} = 2\pi \left( \frac{1}{\beta_\omega} - \frac{1}{\beta_e} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

と書くことができる。ただし、 $\beta_\omega = v_p / c$ である。式(2)と式(3)を同時に解けば、軸に沿ったエネルギーと位相の様子を知ることができる。実際には $\alpha(\xi)$ と $\beta(\xi)$ に適当な形を与えて、いろいろな位相で入射される電子に対して数値計算を行う。つまり、電子の軌道シミュレーションを行うわけである。以上が進行波加速管中の電子の軌道シミュレーションである。

このシミュレーションでは単一粒子が軸上を運動すると仮定しているが、実際には、ビームは有限の径があり、電流密度が高くなると、空間電荷によるクーロン力によってビームが広がってくる。

一方、定在波加速管での電子の軌道シミュレーションには、電磁場が空間中に局在し、時間的に励振していることにより、新たな座標 $\xi$ を導入せず、円筒座標系( $r, \phi, z$ )のまま運動方程式からシミュレーションを行う。電磁場中の運動方程式は、

$$\frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

円筒座標系で、速度を

$$\mathbf{v} = u_z \cdot \hat{z} + u_r \cdot \hat{r} + u_\phi \cdot \hat{\phi} \quad \dots\dots\dots (5)$$

とすると、 $z$ 軸方向の運動方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dt^2} = & \frac{e}{m_0} \sqrt{1 - v^2/c^2} [-E_z (1 - 1/c^2 (\frac{dz}{dt})^2) \\ & + 1/c^2 \frac{dz}{dt} \cdot \frac{dr}{dt} E_r] \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

径方向の運動方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} = & \frac{e}{m_0} \sqrt{1 - v^2/c^2} [-E_r (1 - 1/c^2 (\frac{dr}{dt})^2) \\ & + 1/c^2 \frac{dz}{dt} \cdot \frac{dr}{dt}] \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$



ここで  $E_r$  は加速管で発生する  $r$  方向の電場と前述したビームの空間電荷で発生する電場の合成電界となる。

$$E_r = E_{r_0} + \frac{I_0}{2 \pi \epsilon_0 r \dot{z}} \left(1 - \frac{\dot{z}^2}{c^2}\right) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $I_0$  はビーム電流値である。

このような空間電荷を入れた軌道計算を行うためには、加速空洞内での電界強度分布を求めなければならない。加速空洞内の電界強度分布は、SUPERFISH コードによって計算された<sup>(2)</sup>。この電界強度分布と空間電荷の効果を考慮した運動方程式を解くことにより、正確な軌道シミュレーションが可能になった。

このシミュレーションによる効果をまとめると次になる。

(1) 空洞の軸方向電磁場を精度良く入力できシミュレーションに生かせるため、低エネルギーの入射電子の加速バンチング特性を正確にシミュレーションできるようになった。これにより、医療用ライナックで用いられている低エネルギー電子銃からの加速特性を正確にシミュレーションできる。

(2) 径方向の軌道計算ができることから、低エネルギーでの加速管中でのビーム透過性能を位相と径方向を併せて予測できるようになった。また、任意のビーム量のシミュレーションが可能となった。特に低エネルギーでのビーム特性が計算できるようになった。

### 3. 应用

### 3.1 医療用ライナック

高エネルギー X 線や電子線を使って、体内の腫瘍を撲滅するための医療用ライナックは、人体に適用するために実際にがん(癌)患部を照射する主線錘以外の放射線が患者に影響を与えないように、加速管の周囲は鉛などで厳重にシールド

ドされている。IEC 規格によれば電子線軸から 1 m の距離における漏えい線量は、主線錘の 0.1 % 以下であることが要求されている<sup>(5)</sup>。加速管から発生する X 線は、電子銃から加速管に入射した電子のうち加速位相から外れた電子が空洞の内壁に衝突して発生するものである。X 線のシールドに使われる鉛の重さが重くなると機械的な仕様が厳しくなり、装置が大きくなってしまう。

このために、加速管の内壁にできるだけ電子が当たらないような加速管の開発が必要になっている。現在では、上記で開発した計算コードを用いて最適化を行ってシールドを最小限にしている。

また、医療用ライナックでは、図1に示すように患者を固定してガントリーを回転させて照射するために、長い加速管を用いる場合には電子ビームを270°偏向させて、アクロマチックな電子ビームを得ている。このような偏向電磁石の設計にも静磁場中での電子のシミュレーションコードが用いられている。

### 3.2 研究用ライナック

医療用ライナックでは装置を小型化するために、電子銃と加速管を直接結合するが、研究用ライナックでは、電子銃からの電子を効率良く加速管で加速するために、電子銃と加速管の間にサブハーモニックバンチャやプリバンチャと呼ばれる位相バンチング装置を配置している。プリバンチャ内でビームは、ギャップ電圧で速度変調され、バンチャ入口までの距離を走行した後バンチビームとなる。

また、サブハーモニックバンチャでは、電子銃で発生したビームのパルス幅が、サブハーモニック周波数の約 $1/2$ 周期内にあれば、ビームは速度変調され、ある距離を走行した後パルス幅は圧縮される。これらにより、電子銃で発生させ

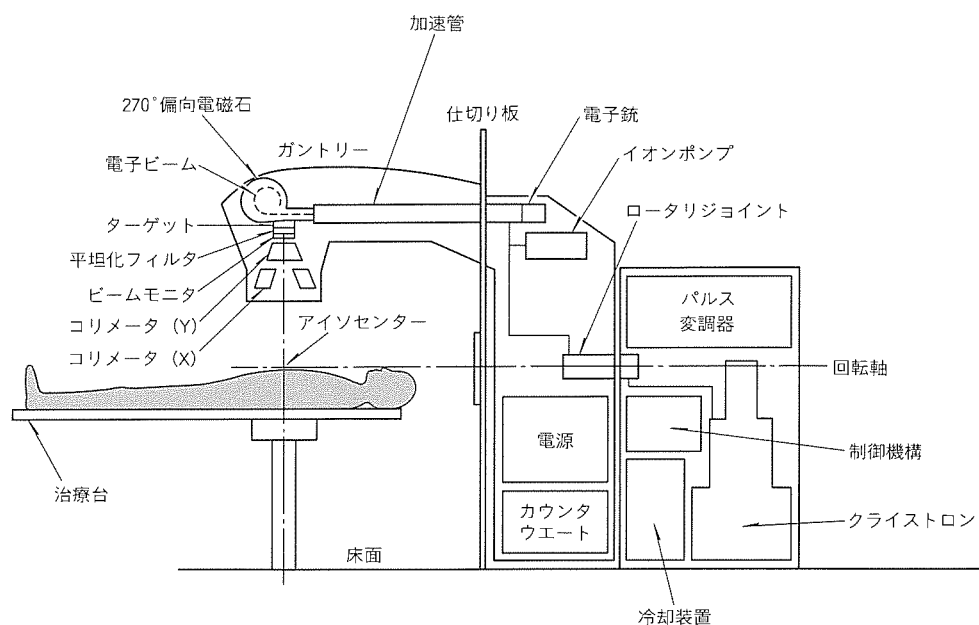


図1. 医療用ライナックのブロックダイヤグラム

る電流値をできる限り抑えて、空間電荷によるビーム性能の悪化を防いで、高品質の電子ビームを得ている。

サブハーモニックバンチャやプリバンチャでは、電子ビームに速度変調を与え、軸方向にバンチングするとき、空間電荷の影響で軸方向にデバンチする。これらの設計では、この効果を取り入れたシミュレーションを別に行って、ビームを効果的にバンチするように、ギャップの相対位置、各ギャップにおける RF 電圧と位相に関して最適値を求めている。

### 3.3 RF 電子銃

高品質の電子ビームを得るためには、低エネルギー領域で

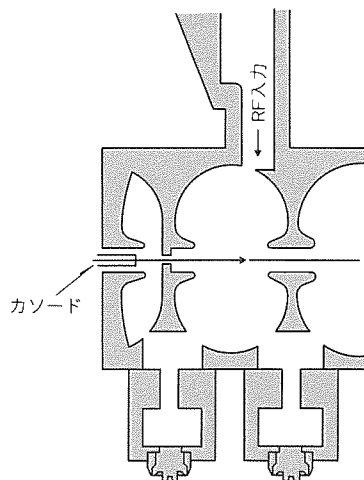


図2. RF電子銃空洞の断面

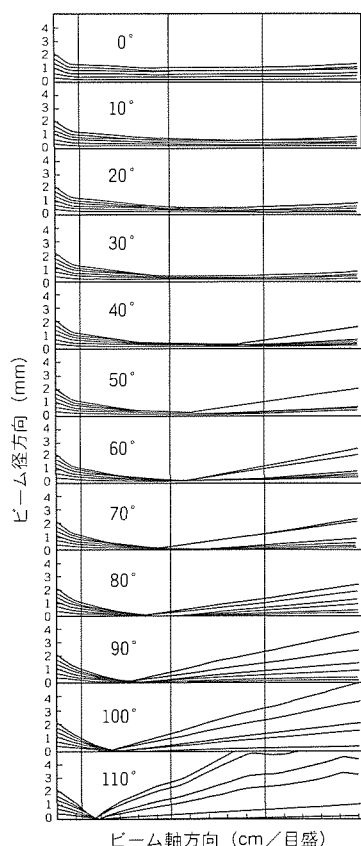


図3. 軌道シミュレーション結果

空間電荷効果により、ビーム性能 (特にエミッタンス) が悪化する前に光速に近い速度まで電子を加速することが望ましい。しかし、アノードとカソード間に高電圧 (数十～数百 kV) の直流又はパルス電圧を印加して、電子を引き出す従来の電子銃では、まだ電子の速さは光速に比べて遅く、後段に配置して光速まで加速する加速管まで輸送する間に空間電荷によってビーム性能が悪化していた。これを除くため、最近では、より高い電界強度の得られるマイクロ波を利用して、空洞中に配置したカソードからの自由電子を光速に近いエネルギーまで、すぐ加速することのできる RF 電子銃の開発が主流となっている。

RF 電子銃は、当社が最初に提案していたものであるが<sup>(6)</sup>、光陰極と短パルスレーザを組み合わせたシステムなど最近の進歩には目覚ましいものがある<sup>(7)</sup>。図2は、4空洞からなる加速管の第1空洞目に RF 電子銃を配置した例であり、第2空洞がバンチャ (カップラ) 空洞、第3、4空洞がレギュラ空洞である。カソードは  $\text{LaB}_6$  を用いた直熱型である。図3はこの加速管を用いたときの各入射位相に対する軌道計算結

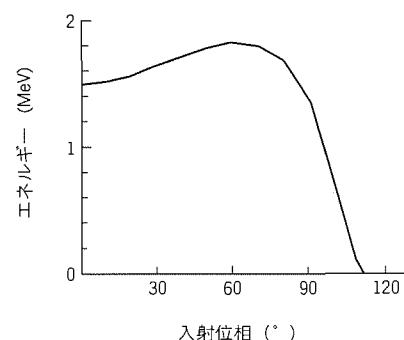


図4. 入射位相に対するエネルギー分布

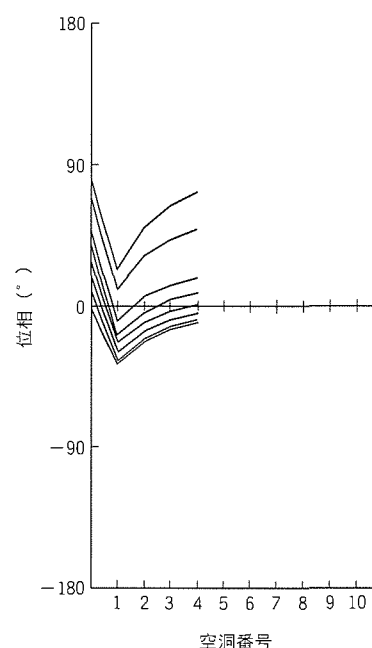


図5. 空洞ごとの位相変化

果を示す。

RF 電子銃空洞は、空間電荷効果によるビームの発散を防ぐために集束力が働くように設計されている。このシミュレーションにより、各入射位相に対する出力ビームのエネルギー、位相、位置、発散角などが計算される。図4は入射位相に対するエネルギー分布、図5は空洞ごとの位相変化を示す。

図6は単空洞のRF電子銃から出た電子の入射位相に対するエネルギー分布を示している。

### 3.4 磁場中での軌道計算

以上では、加速管中の軌道シミュレーションについて主に述べたが、次に磁場中を電子を通過させてビームの時間幅をバンチングする場合について述べる。図6に示したように、単空洞のRF電子銃から引き出された電子ビームは、マイ

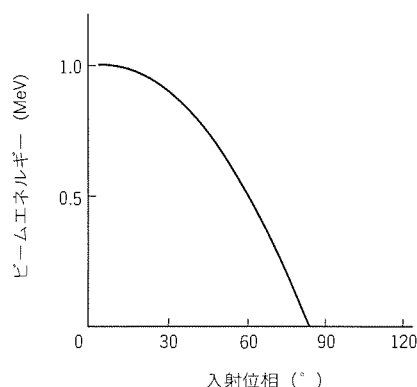
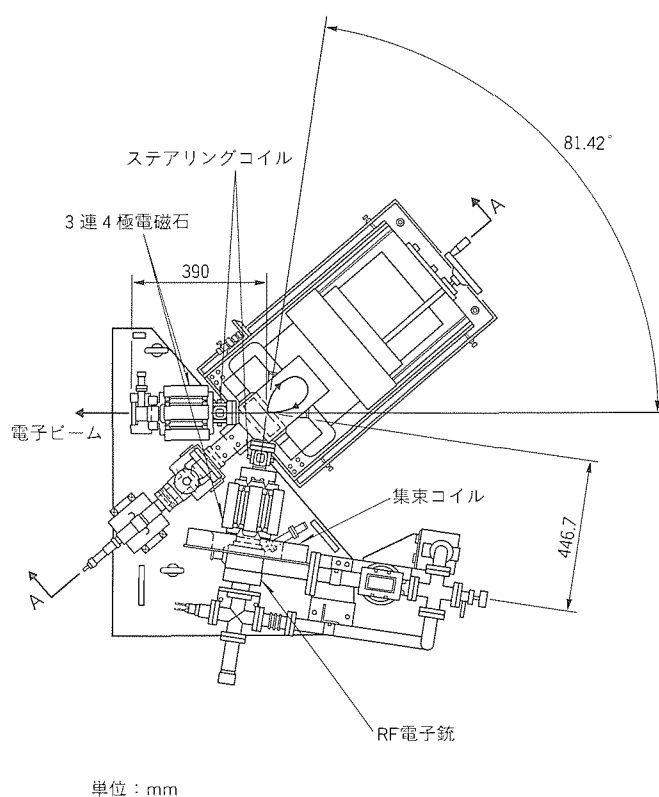


図6. 単空洞RF電子銃の入射位相に対するエネルギー分布



単位：mm

クロ波の加速位相のみによって加速されるので、それ自体バンチングされているが、このパルス幅は約  $80 \times 10^{-12}$  秒 (80 ps) であり、エネルギーは0～最大エネルギーまで分布している。このため、この電子ビームはそのまま後段の加速管に入射させて高エネルギーまで加速させても、得られるビームの性能は良くならない。良い性能の電子ビームを得るために、RF電子銃と加速管の間にエネルギー分析用のスリットとパルス幅を圧縮するためのマグネチックバンチングシステム(図7)を配置した。これはアルファ電磁石と呼ばれる電子ビームを  $278.58^\circ$  偏向させる磁石とスリットから構成されている。

図8はアルファ電磁石の断面を示す。この磁石は四極電磁石を半分にした形状をしており、入射角を  $40.71^\circ$  にとると、アクロマチックなビームが得られる。磁石中では、電子ビームは図9に示すように高いエネルギーの電子は軌道の曲率半径が大きくなり、低いエネルギーの電子は小さくなる。このため、高エネルギーの電子は低エネルギーの電子に比べて軌道長が長くなり、磁石中の走行時間が長くなる。これにより、様々なエネルギーの電子を含むビームのパルス幅は圧縮される(バンチング作用)。

一方、自由空間中ではエネルギーの異なった電子を含むビームは、高いエネルギーの電子は早く進み、低いエネルギーの電子は遅く進み、全体的にパルス幅は長くなってしま(デバンチング作用)。

これらの性質を利用して、アルファ電磁石中の電子の軌道長と自由空間長の電子の軌道長を適当にとると電子ビームのパルス幅を短くすることができる。

以上に示したように、RF電子銃から出た電子ビームはドリフトスペース、アルファ電磁石、ドリフトスペースの組合

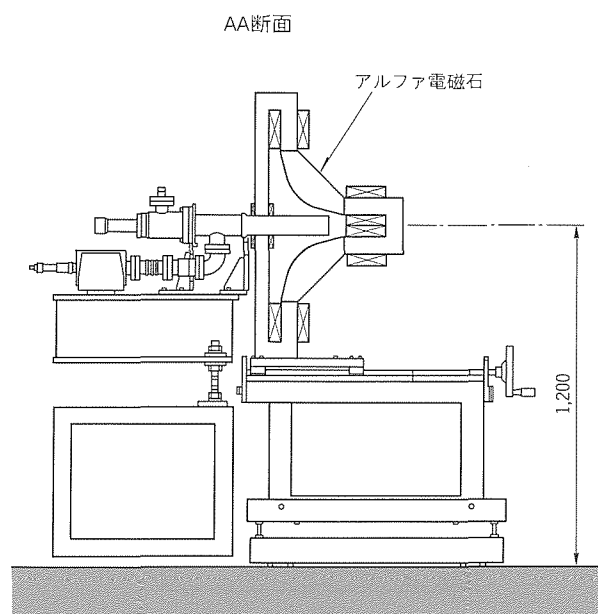


図7. マグネチックバンチングシステム

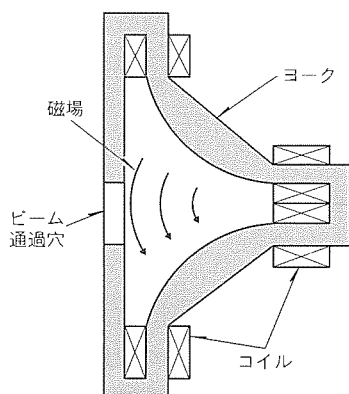


図 8. アルファ電磁石の断面

せて加速管まで輸送される。

このマグネチックバンチングシステムにより、3～5 ps のパルス幅の電子ビームが得られている。

#### 4. む す び

加速管の設計をするために、電子ビームの軌道シミュレーションコードを開発した。これを用いて医療用ライナック、研究用ライナック、RF 電子銃などの設計を行って、良い試験結果を得た。

また、この報告では加速管、電磁石の設計について主に述べたが、電子銃の設計、照射ビームの平坦化の設計、ビームモニタの設計などにもシミュレーションコードが用いられており、ライナックの設計に有用である。

#### 参 考 文 献

- (1) Herrmannsfeldt, W. B. : EGUN - an Electron Optics and Gun Design Program, SLAC-Report-331 (1988-10)
- (2) Halbach, K., Holsinger, R. F. : SUPERFISH-A Computer Program for Evaluation of RF Cavi-

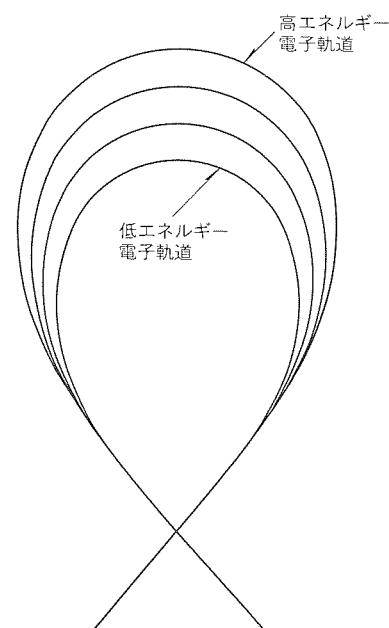


図 9. アルファ電磁石中での電子軌道

ties with Cylindrical Symmetry, Particle Accelerators, **7**, 213 (1976)

- (3) Thomas, W. : On the Numerical Solution of Maxwell's Equations and Applications in the Field of Accelerator Physics, Particle Accelerators, **15**, 245 ~ 297 (1984)
- (4) Hopkins, D. B. : URMEL Studies of Cavity Structure-Interim Report, LBL Internal Notes BES 4, ESG Tech Note-74.
- (5) IEC : International Electrotechnical Commission 601-2-1 Amendment No. 2 (1990)
- (6) 美濃和芳文, 沢田 進 : 特許公報 昭58-20120 (1983)
- (7) Travier, C. : RF Guns : Bright Injectors for FEL, Nucl. Instr. and Meth., A304, 285 (1991)

# 大電力クライストロン

林 和孝\*  
家喜洋司\*  
菊永敏之\*\*

## 1. ま え が き

クライストロンは、マグネトロンに比べて、高出力・長寿命であり、さらに出力や周波数の調整が容易であるなどの特長を持つ。このため、特に大出力のマイクロ波を必要とするレーダや線形加速器システムには、大電力のパルスクライストロンが欠かせない。当社では、1965年に初めてSバンドの電子線形加速器用パルスクライストロンを開発納入して以来、国内の電子線形加速器の歩みとともに、パルスクライストロンを製作・供給してきた。三菱パルスクライストロンの特性を表1に示す。電子線形加速器用のうち、5～7MWクラスのせん(尖)頭出力を持つものは、主に工業・医療用として、それ以上の出力を持つものは、研究用として使用されている。特に、30MWクラスのクライストロンは、研究用線形加速器のクライストロン標準機種として、国内では最も多く使用されている。

クライストロンの新規開発には、開発設計・試作にかなりの時間と費用がかかる。しかし、シミュレーション技法の発達により、開発試作コストの削減が期待できることや、線形加速器の増強計画の具体化など、大電力クライストロンの開発が活発になってきた。Sバンド大電力パルスクライストロンでは、米国のSLAC (Stanford Linear Accelerator Center) の50MWクライストロン(現在67MWで使用されている。)<sup>(1)</sup>やSLACを中心とした150MWクライストロン開発<sup>(2)</sup>や(株)東芝の100MWクライストロン<sup>(3)</sup>がある。今後の加速器システムの動向を考慮して、60MWに目標をおいたクライストロンの開発を行った。電子銃の耐電圧向上と、出力窓の空洞の耐電力向上が大電力化の開発課題であった。30MWクライストロン(PV3030A:表2)と同じ平均出力を想定し、60MWの大出力ながら、単一出力窓のクライスト

ロンを目標とした(表2)。並行して、安定化と高出力化を目指し、30MWクライストロンの改良を施してきた。

このような状況の中、高エネルギー物理学研究所(KEK)放射光入射器の増強計画では、現在48本使用されているPV3030Aに代わって、次世代の大電力クライストロンが61本使われる予定である<sup>(4)</sup>。この次世代クライストロンとしては、外径寸法や集束磁界などに制約があるため、新たに50MW出力(60MW級)でコンパクトな大電力クライストロンを開発中である。

この論文では、研究用電子線形加速器向けのSバンド大電力パルスクライストロンの開発と現状を論ずる。始めに、クライストロン構造とシミュレーションについて簡単に述べた後、60MWクライストロンの開発と30MWクライストロンの改良の結果を示し、それら技術の統合として次世代クライストロンについて述べる。

## 2. クライストロンの構造とシミュレーション

図1に、クライストロンの構造を示す。クライストロンは、電子ビームを放射する電子銃、マイクロ波の増幅を行う本体空洞部、マイクロ波を取り出す出力窓及び電子ビームを捕捉するコレクタ等によって構成される電子管である。電子銃(二極管構造)から放出・加速された電子ビームは、集束コイルの作る磁界によって集束され、ドリフトチューブ内を通過し、コレクタに捕捉される。この間、入力空洞部で、入力されたマイクロ波電界により、速度変調を受けた電子ビームは、ドリフトチューブ内を走るうちに、集群(密度変調)を生ずる。この集群は、中間空洞と電子ビームが相互作用することによって効率良く行われ、集群の最大となる出力空洞部でビームのエネルギーは、マイクロ波エネルギーとして取り

表2. クライストロン特性目標値

	PV3030A 現状仕様	60MW クライストロン (目標値)
周波数 (MHz)	2,856	2,856
ピーク出力 (MW)	33	60以上
デューティ	0.0004	0.0002
効 率 (%)	44	45
飽和利得 (dB)	51	53
ビーム電圧 (kV)	265	350
ビーム電流 (A)	285	414
パルス幅 (μs)	4	2

表1. 三菱パルスクライストロンの特性

管 種 ファミリー	周 波 数 (MHz)	尖頭出力 (MW)	平均出力 (kW)	用 途
PV2012	2,856, 2,988	5, 7, 10	10	医療・工業・研究 用線形加速器
PV2014	2,856	25	30	研究用線形加速器
PV3105	S-バンド	～5	～10	レーダ用
PV3030	2,856	33	12	研究用線形加速器
PV3035	2,856	35	14	研究用線形加速器
PV9004	9,300	4	4	工業用線形加速器



出される。

シミュレーション技術の発展の恩恵を受けて、クライストロンの開発環境は変わりつつある。各構成部分のシミュレーションの進展とともに、それらが有機的に結合してきた。電子銃では電子ビーム発生とビーム軌道のシミュレーションを行う。軸対称二次元の電極形状を持つ電子銃を前提にして、空間電荷制限領域での電子発生を扱い、空間電荷効果を空間電位に考慮して、相対論効果、外部及び自己磁界をビーム運動に反映させなくてはならない。この計算には、EGUN<sup>(5)</sup>が有名で、同様な機能を持つメッシュ密度の変更の可能なコードも併用する。ビーム電圧の安定印加には、電極表面や絶縁部分の電界強度を抑えるような形状に設計しなくてはならない。この目的には、表面電荷法を利用した静電界解析コードが利用される。集束コイルの設計も重要である。クライストロンの特性は空洞パラメータに加え、電子ビームの軌道に密接につながっているため、磁界分布によって、利得や効率が大きく変化する。電子銃で得られた電子流を乱すことなく、必要なビーム径で本体部を通り抜けるよう集束させるため、集束磁界分布計算とビーム軌道計算が重要である。さらに、本体空洞部での集束のシミュレーションを行い、クライストロン特性を解析する。従来から、ディスクモデル(又はリングモデル)が使われているが、集束が深くなる大電力クライストロンでは、これらのシミュレーションは限界があった。これに対し、より現実に近い計算モデルである2.5次元PIC(Particle in Cell)モデルによるFCIコード<sup>(6)</sup>は、クライス

トロン特性を求める非常に有効なシミュレーションツールである。そのほか、出力窓の特性を求める計算や、コレクタの熱計算によって、クライストロンの設計を行う。

### 3. 60MWクライストロンの開発

#### 3.1 電子銃

設計パービアンスは $2.0 \mu A V^{-3/2}$ にした。カソードは、直径85mm、低温動作が可能なSc入りの含浸型カソードを用いた。電子銃のシミュレーション結果を図2、図3に示す。シミュレーション結果の評価は容易でない。例えば、カソード表面は必ずしも理想的な電子放出状態ではないし、ビーム半径やプロファイルの測定は困難である。シミュレーションに用いている計算モデル(単純化・理想化したモデル)と現実の電子銃の違いについての見極めが重要である。また、シミュレーションできない項目の早期検証が大切である。シミュレーション結果確認と、カソードヒータ特性の検証や耐電圧評価等のため、電子銃部の試作・評価が行われた。

#### 3.2 本体空洞部

電子銃から本体部の磁界分布を含めたビーム軌道計算を行い、その磁界分布を作る集束コイル設計を行った。本体空洞部は、五つの空洞から構成した。利得と出力を稼ぐためには、乱れの少ない太い電子ビームを作る必要がある。さらに、集束してもビーム径が広がらないような磁界分布の設定が必要である。図4に集束のシミュレーションを行った計算例を示す。シナリオどおりの集束を得るためには、空洞部で放電現

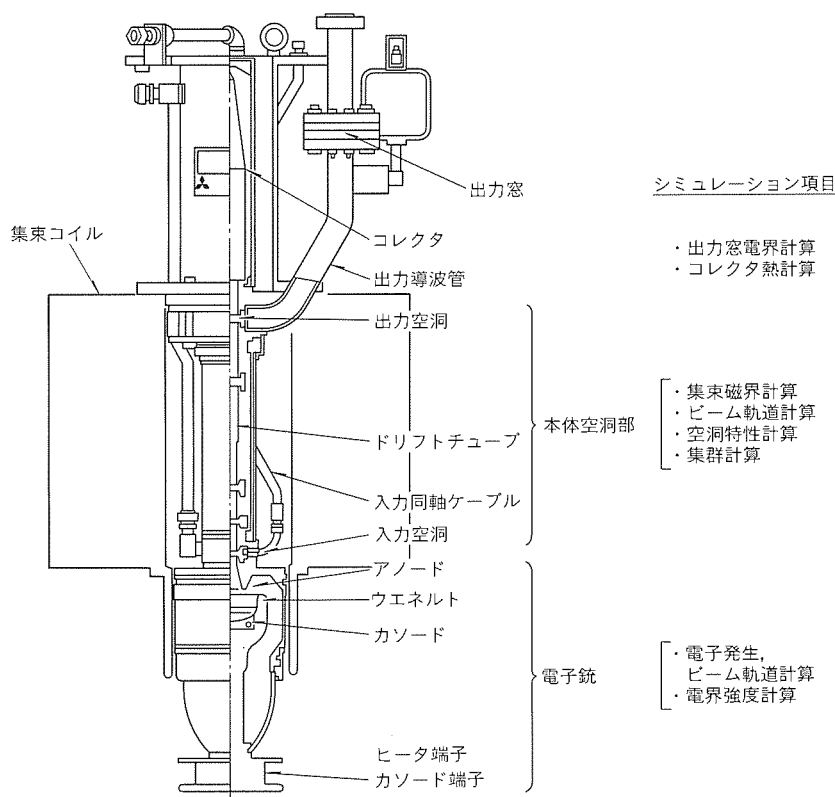


図1. クライストロンの構造

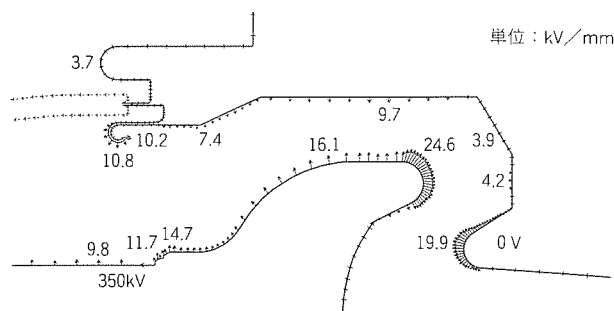


図2. 電子銃ビームシミュレーション

象が発生しないよう注意が必要である。例えば、サイクロトロン周波数が使用周波数 (2,856 MHz) の半分である磁界強度 (51 mT) 近辺では、マルチパクタ条件が成立し、図5のように空洞のノーズ先端部で起こる一面性のマルチパクタ放電を生ずる。さらに、サイクロトロン周波数と使用周波数が一致する磁界強度 (102 mT) 近辺では、電子サイクロトロン共鳴条件が成立し、放電現象を生ずることがある。これら空洞部のマイクロ波放電は、利得の減少や不安定現象を引き起こす。これを避けるために、磁界強度の選定や、空洞ノーズ部位の形状工夫が必要である<sup>(7)</sup>。

### 3.3 出力窓

大電力化の中で出力窓の耐電力向上が、最も困難である。図6に示されるようなピルボックス型マイクロ波窓は、広帯域でマイクロ波反射が少なく、電界緩和ができ、機械的に信頼性が高い等の特長を持つため、大電力マイクロ波窓として広く採用されている。しかし、窓の耐電力設計は、経験やカットアンドトライで行われており、マイクロ波放電による破壊の根本的な解決には至っていない。このため、その基礎である窓内部の電界についての検討を始めるために、新井らの解析的手段<sup>(8)</sup>を用いてピルボックス型のマイクロ波窓について計算・検討した。

窓の寸法は、セラミックス直径84.7 mm、厚さ3.2 mm、ピルボックス長29 mm、方形導波管はWRJ-3である。周波数を変化させたときのVSWRの測定値と計算値を図7に示す。現実の窓では、方形・円形導波管変換部の面取りのために、ピルボックス長は実効的に長くなり、VSWR測定値は計算値とずれてくる。動作周波数 $f_0$ 付近でのVSWRは低く、マイクロ波は反射することなく伝送される。周波数 $f_1$ ,  $f_2$ ではVSWRの急激な変化が見られる。さらに、ピルボックス長と周波数を変化させたときのVSWR計算値を図8に示す。VSWRが急激に変化している所では、ゴーストモードと呼ばれるセラミックスに寄生するモードが生じている。ゴーストモード共振時にはセラミックス部に強い電界が生ずるため、マイクロ波放電を避けることができない。使用周波数帯が、ゴーストモードを必ず避けるよう窓の寸法を選んだ。

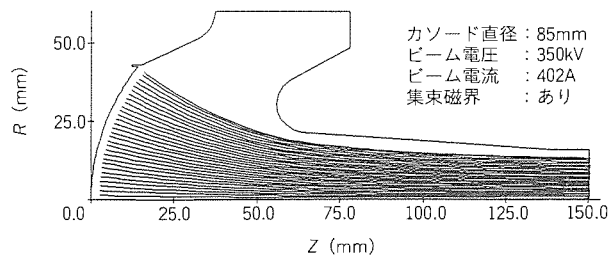


図3. 電子銃電極表面電界強度

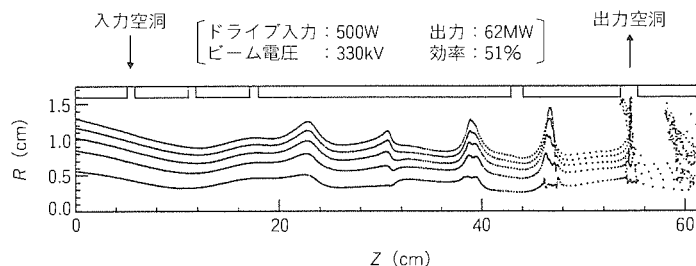


図4. 集群シミュレーション (スナップショット図)

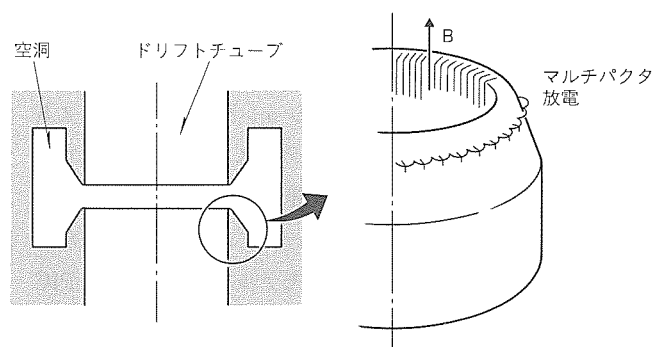


図5. 空洞ノーズ部のマルチパクタ放電 (模式図)

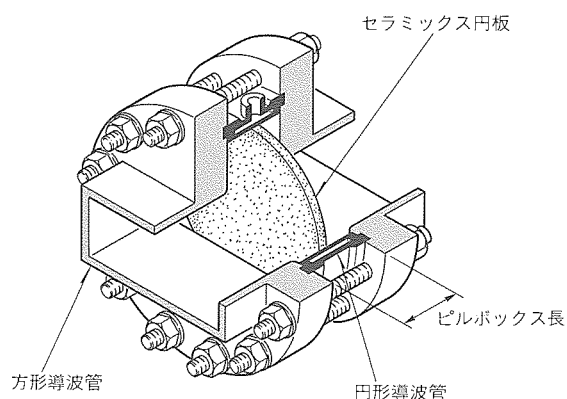


図6. ピルボックス型窓

これら解析と併せて、ち(緻)密で誘電損失の少ない高純度アルミナ (日本特殊陶業(株) HA 997) を使ったマイクロ波窓を試作し、ろう接の検証とチタン薄膜のコーティングによるマルチパクタ放電の抑制効果の検証、レゾナントリング試験による耐電力の検証を行った。ピルボックス窓のマイクロ波損失量の評価やマイクロ波放電のメカニズムの究明を行い、マイクロ波出力窓の耐電力の向上を目指す。

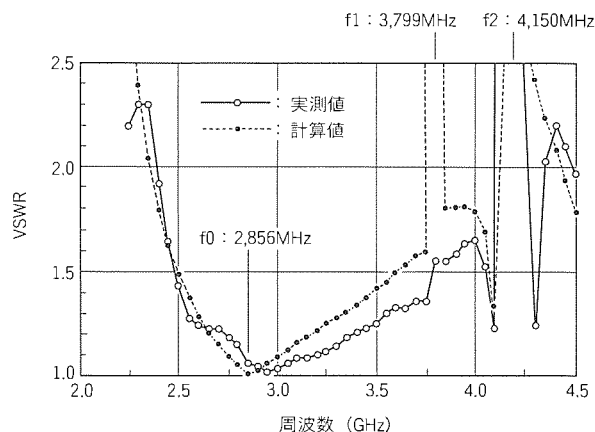


図7. 窓のVSWR (実測値と計算値)

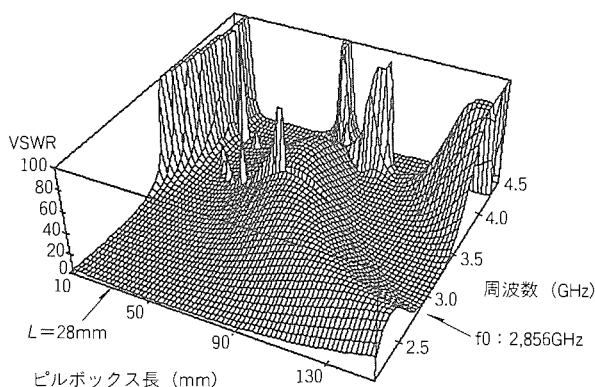


図8. ピルボックス長と周波数を変化させたときのVSWR (計算値)

### 3.4 試験結果

試験の結果、ビーム電圧347 kVで尖頭出力62.4 MWを得た。図9にビーム電圧に対する出力特性を示す。このとき、パルス幅2  $\mu$ s 繰り返しは20 pps、パービアンスは $2.04 \mu$  A  $V^{-3/2}$ で、効率は43%であった。利得は51.4 dBで、空洞部の異常現象は見られなかった。

## 4. 30MWクライストロンの改良

30 MW クライストロンの改良は、高電圧印加時の安定動作、高出力化を目的に、構造的な改良と工程や材料の改良が行われた。構造的改良は次の3ステップで実施された。①含浸型カソードの採用。②低電界型電子銃の採用。③電子銃絶縁がい(碍)子の大型化と、出力窓の改良。これらは、外径寸法の制約の中での変更であり、従来のクライストロンと互換性が保たれた。

### 4.1 安定化のための改良

電子銃電極間の真空放電によって耐電圧劣化を起し、高電圧印加時に安定動作できなくなることが問題であった。対策のうち、特に重要なのは、含浸型カソードの採用、真空雰囲気での加熱排気(二重真空排気装置)と真空溶解の素材の使用であった。後者二つは、真空放電に伴うガス放出(真空放電の原因でもある。)の低減に著しく寄与した。含浸型カ

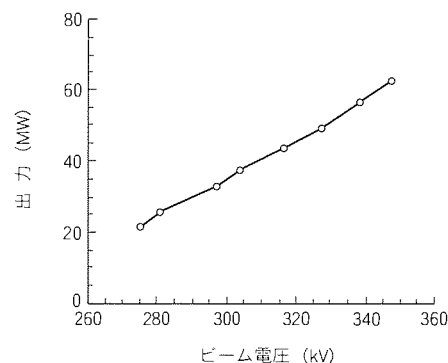


図9. ビーム電圧と出力 (60MWクライストロン)

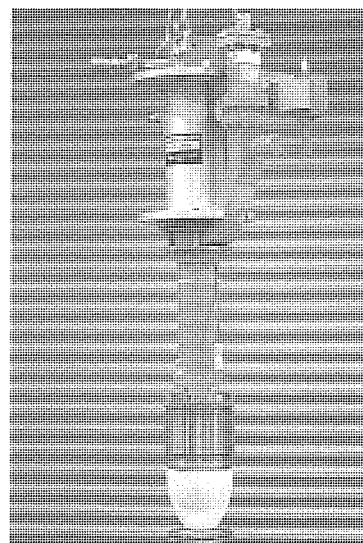


図10. PV3030A3の外観

ソードは、従来の酸化物カソードに比べ、製造工程のバリウム(カソード物質)の蒸発量がけた違いに少ない。これらのため、長時間運転後の電子銃電極表面は、従来のものに比較すると、放電痕やバリウム付着等が少なく、かなり清浄になった。これらの改良は、クライストロンの長期安定動作に劇的な効果をもたらし、高出力化のための改造や60 MW クライストロンの開発を始める基となった。

### 4.2 高出力化のための改良

構造的改良の二つ目である低電界型電子銃とは、電極表面形状を滑らかにしてウェネルト電極とアノード電極の電界強度を従来比でそれぞれ、11%と26%減少させた電子銃である。このため、より高い電圧の印加が可能となった。計算機シミュレーションの結果、集束磁界分布の変更と印加電圧の上昇によって高出力化が予測され、実際の短パルス高電圧試験によって高出力化が確認できた<sup>9)</sup>。高出力化で問題となるのは、電子銃の耐電圧と出力窓の耐電力である。このため、構造的改良の三つ目として絶縁碍子を約15%大きくし、前章で述べた出力窓を採用し、PV-3030A3の型名で製品化した。従来の試験規格(33 MW 出力等)を満足し、かつ、40 MW 以上の出力を確認した後に出荷している。外観は図10

に示す。図11にビーム電圧に対する出力特性、図12に磁界分布を示す。さらに、このクライストロンは、51.5MW (マイクロ波パルス幅  $4\mu\text{s}$ ) のピーク出力値が確認された<sup>(9)</sup>後、実際の加速器運転に使用されている。

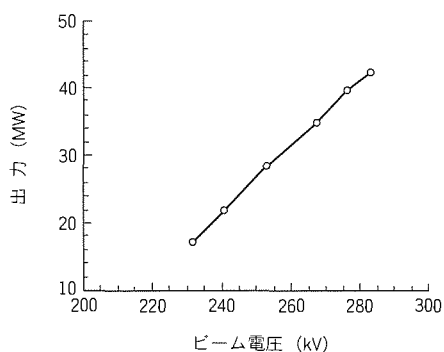


図11. ビーム電圧と出力 (PV3030A3)

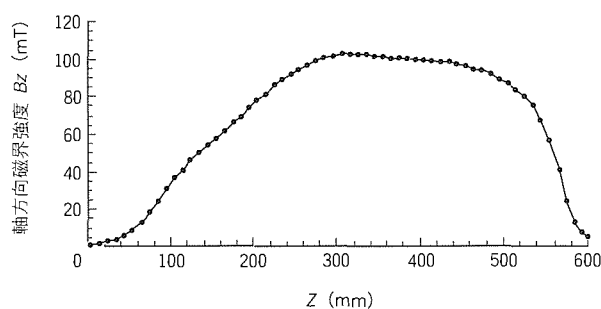


図12. 磁界分布 (PV3030A3)

## 5. 次世代クライストロン

KEK の放射光入射器の増強計画のために必要なクライストロンは、ピーク 50MW 出力 (60MW 級) で、現存の KEK の設備を最大限に活用するため、外径寸法や集束磁界などに制約がある。

これに対して、60MW クライストロンは、全長や磁界の制約によって適合しない。また、30MW クライストロンでは、改良により、50MW を超える出力を確認しているが、カソード電流密度や電界強度に余裕がなくなるため、寿命や動作安定性の保証が難しく、実用 40MW レベルであると考えられる。このため、両方のクライストロンの技術を統合して、この 50MW (60MW 級) クライストロンの開発をしている。以下にその構成を示す。

- 電子銃 : 60MW クライストロンとほぼ同じ形状で、耐電圧を確保する。カソード直径は 85mm で、表面電界強度緩和とビーム集束状況に合わせ、電極形状を最適化する。
- 本体空洞部 : 30MW クライストロンと同じ。
- 磁界分布 : 30MW クライストロンを基に改良する。
- 出力窓 : 60MW クライストロンと同じ。

大出力ながら単一出力窓で、図13に示すように全長が長くないのが特長である。特に、集束コイルが長くないため、クライストロン交換時のつ(吊)り上げ高さがかなり低くて

\*印は集束コイル高さ

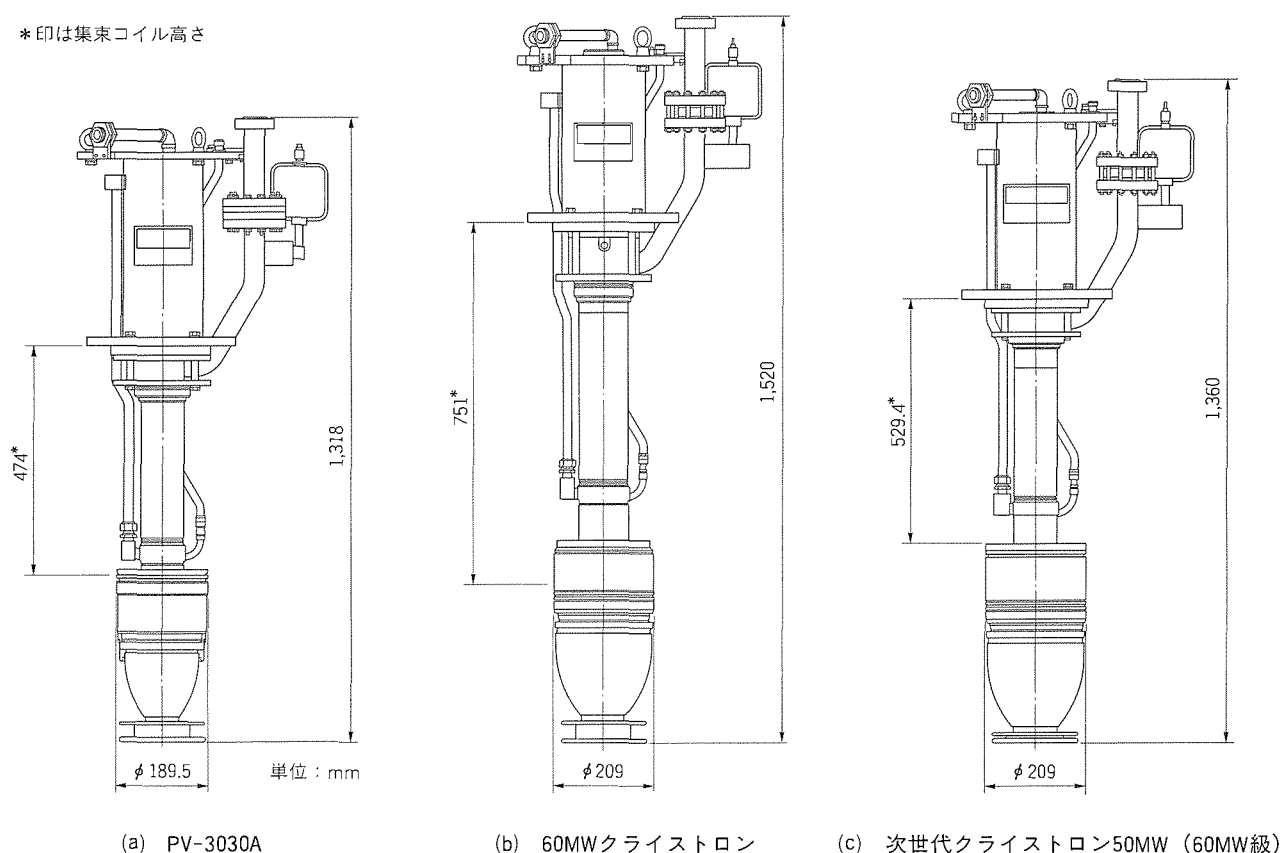


図13. クライストロン外形

すむ。改良や開発成果を取り込んだ各構成部品をモジュールとして標準化し、それらを用いて構成した、コンパクトながら大出力のクライストロンを次世代の標準機種と位置付けている。

## 6. む す び

電子線形加速器用の大電力クライストロンの開発の概要を述べた。60 MW クライストロンの開発を行い、62.5 MW の出力 (パルス幅 2  $\mu$ s) を得た。並行して、現在の標準機種である 30 MW クライストロンを改良し、安定化と高出力化が達成できた。改良品の PV-3030 A 3 は、パルス幅 4  $\mu$ s で 40 MW 以上の実力があることを確認した。シミュレーション技法の活用と部分試作との組合せで、試作費用と期間の短縮が可能になった。これらの開発は、線形加速器用の大電力クライストロンに対する需要、シミュレーション技法の発達、及び開発に対する理解と支援によってなされた。これら成果を統合し、次世代の標準機種として、コンパクトで高出力な 50 MW (60 MW 級) クライストロンを開発している。

シミュレーション、窓改良や 30 MW クライストロン改良など、この開発に御助言・御指導いただいた高エネルギー物理学研究所放射光入射器グループの各位に深く感謝する。

## 参 考 文 献

- (1) Lee, T. G., Lebacqz, J. V., Konrad, G. T.: A Fifty Megawatt Klystron for Stanford Linear Collider, IEEE IEDM Tech. Digest (1983)
- (2) Lee, T. G., Konrad, G. T., Okazaki, Y., Watanabe, M., Yonezawa, H.: The Design and Performance of a 150 MW Klystron at S Band,

IEEE Trans. on Plasma Science, PS-13, No.6, 545(1985)

- (3) Yonezawa, H., Miyake, S., Gonpei, K., Ohya, K., Okamoto, T.: Development of a 100 MW S-band Pulse Klystron, XIV International Conference on High Energy Accelerators (Tukuba) (1989)
- (4) 佐藤 勇: 放射光入射器グループ: PF 入射器のエネルギー増強計画, 第 18 回リニアック技術研究会予稿集 (1993)
- (5) Herrmannsfeldt, W. B.: EGUN-an Electron Optics and Gun Design Program, SLAC-PUB-331 (1988)
- (6) Shintake, T.: High-power Klystron Simulations using FCI-Field Charge Interaction Code, KEK Report 90-3 (1990-5)
- (7) 林 和孝, 菊永敏之, 家喜洋司: クライストロン空洞マルチパクタ, 第 18 回リニアック技術研究会予稿集 (1993)
- (8) Arai, H., Goto, N., Ikeda, Y., Imai, T.: An Analysis of a Vacuum Window for Lower Hybrid Heating, IEEE Trans. on Plasma Science, PS-14, No.6, 947~954 (1986)
- (9) Fukuda, S., Anami, S., Saito, Y., Michizono, S., Nakao, K., Sato, I.: Upgrade of an RF Source of the Linac for the B-Factory Project, 1993 Particle Accelerator Conference (Washington D. C.) (1993)

## 大電力ミリ波ジャイロトロン

菊永敏之\* 八十島義行\*  
下妻 隆\*\* 塚本忠則†  
浅野啓行\*\*\*

## 1. ま え が き

静磁界内に置かれた空洞共振器中を弱相対論的速度で旋回運動する電子ビームは、サイクロトロン共鳴条件下において高周波電磁界と相互作用を行い誘導放射(サイクロトロン共鳴メーザ)を行う。特に、カットオフ周波数付近で起こるサイクロトロン共鳴メーザは、1974年にソ連の研究者によってジャイロトロンと名付けられた。電子管の一種であるジャイロトロンは従来のマイクロ波管とは異なり、高周波数領域においても電子ビームと高周波回路の寸法を大きくとることができるため、ミリ波領域で数百kWの大電力を高効率(～40%)で発生できるという特長がある。

ジャイロトロンは、核融合プラズマの高周波加熱用ミリ波源として期待されており、現在では100GHz帯で単管出力1MW級の実用管開発が精力的に行われている。当社においても1989年に120GHz、200kW、100ms級ジャイロトロンの開発を完了し、現在は出力1MWのジャイロトロンの研究開発を行っている。

本稿では、ジャイロトロンの主要コンポーネントである電子銃と共振空洞の設計において重要な粒子シミュレーション技術について述べる。

## 2. ジャイロトロンの構造と動作原理

図1はジャイロトロンの構造を示す概略図である。ジャイロトロンは中空状電子ビームを発生する電子銃、この電子ビームと高周波電磁界とが相互作用する共振空洞、相互作用を終えた電子ビームを回収するコレクタ、発生した電磁波(マイクロ波からミリ波領域)を取り出す出力窓の四つの主要部分から構成され、さらに超電導コイル、又は常電導コイルによって軸方向磁界が印加されている。

一般的に共振空洞は円筒型、又はピアダる(樽)型の開放空洞共振器であり、ら(螺)旋運動する電子ビームは、横方向電界を持つ共振器の固有モードの高周波電磁界と相互作用し、エネルギーの授受を行う。電子から高周波電磁界への正味のエネルギーの流れを起こし、発振に至らせるためには、電子の集団がサイクロ

ロン軌道において減速位相に入る位相バンチングを起こさねばならない。この条件は、固有モードの共振角周波数を $\omega$ とすると、次式で与えられる。

$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} \geq s \omega_c \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $k_{\parallel}$ :固有モードの軸方向波数、 $v_{\parallel}$ :電子の軸方向速度、 $s$ :高調波次数、 $\omega_c = eB_0 / \gamma m_0$ :電子サイクロトロン角周波数、 $e$ :電子の電荷、 $m_0$ :電子の静止質量、 $B_0$ :磁束密度、 $\gamma$ :相対論的係数である。以下、説明のない文字は同一の物理量を表すものとする。

## 3. ジャイロトロンの設計におけるシミュレーション技術と適用例

## 3.1 電 子 銃

ジャイロトロンでは、電子ビームと高周波電界との結合を効率良く行うために、中空状の電子ビームを用いる。このような電子ビームを形成するために、通常マグネトロン入射型電子銃(Magnetron Injection Gun, 以下“MIG”という。)と呼ばれる電子銃を用いる。図2にその構造を示す。典型的には、管軸方向に印加された磁界中に、電子を放出するカソード、電子を引き出すための第1アノード、引き出された電子ビームを最終エネルギーまで加速するための第2アノードから構成される。カソードは、特に電子を放出するための円環状のエミッションベルトを備えており、これによって、熱電子放出された電子は中空状のビームを形成する。電子は、カソードと第1アノード間の電界により、カソードから引き

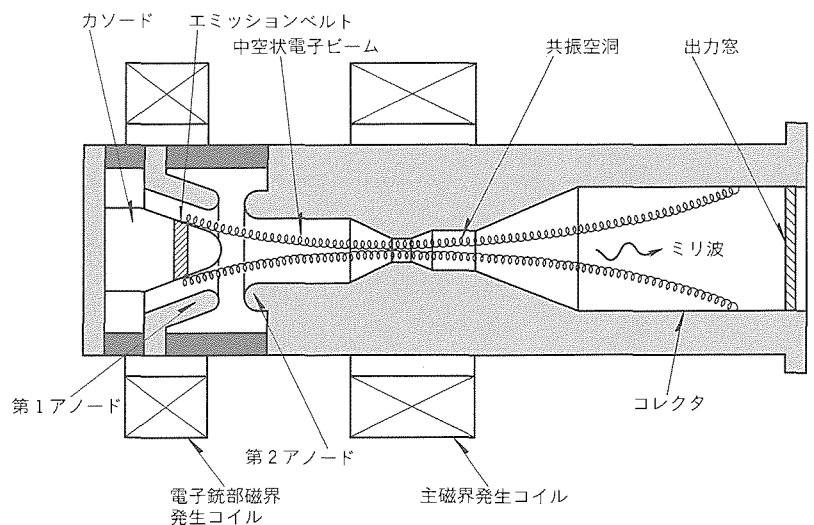


図1. ジャイロトロンの構造

出され、軸方向磁界との作用により、磁界と垂直方向の初期速度を得る。また、パルス動作を行うときには、第1アノードの電圧をオン・オフすることによって、電子の引き出しを制御する。このような電極、磁界配置によって生成された電磁界中における電子の運動が、マグネトロンにおけるのと同様であるため、このような名前で呼ばれている。

半径  $r_c$  のエミッションベルトから放出された電子は、管軸方向磁界  $B_z$  によって旋回運動をしながら、電界の軸方向成分  $E_z$  によって軸方向に加速され、空洞領域方向に引き出される。空洞領域に向かって磁界強度が徐々に増加しているため、電子は磁界と垂直方向の速度  $v_\perp$  を増しながら、その平均半径（ビーム半径）を小さくしていく。最終的に空洞領域では、エミッションベルトの半径  $r_c$  と、空洞領域と電子銃領域の磁界強度比（ミラー比という。） $F_m$  でおおよそ決められるビーム半径  $r_b$  を持ち、十分な  $v_\perp$  を持った電子ビームが形成される。ジャイロトロンではこの  $v_\perp$  成分が電磁波のエネルギーに変換される。

電子銃領域の諸量は、空洞領域での最終的な電子ビーム諸量の決定を左右する。そこで、電子銃の詳細設計に先立って、空洞領域における電子ビーム諸パラメータ（例えば、ビーム半径  $r_b$ 、電子エネルギー  $E$ 、速度比  $\alpha = v_\perp / v_\parallel$  など）を

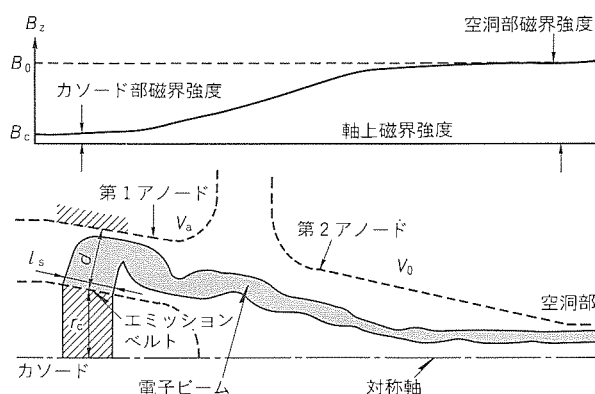


図2. マグネトロン入射型電子銃の構造

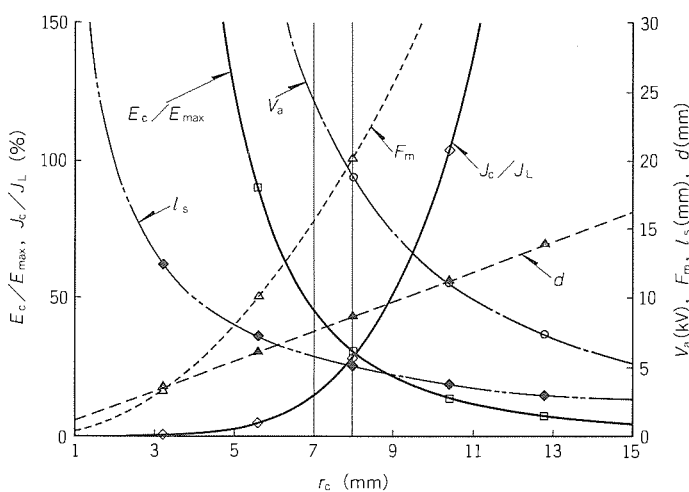


図3. カソード半径に対する諸量の関係

所望の値にするために、幾つかの妥当な仮定に基づいた設計のためのトレードオフ方程式を解き、計算機シミュレーションの初期値として電子銃領域の諸量を決定しておく必要がある。また、適切な初期値を選ぶことは設計に掛かる時間を短縮する意味でも重要である。

### 3.1.1 シミュレーションのための初期値の決定

ジャイロトロン電子銃を設計するためのトレードオフ方程式は、要求される電子ビーム性能を満たすように、電子銃領域の諸パラメータを決定するための近似式であり、電子の角運動量保存、断熱近似に基づく電子軌道、弱い空間電荷効果の仮定に基づいて導出される。

それらの方程式によれば、MIG の設計に当たって、次の五つの重要なパラメータを与える必要がある。

- (1) ビームパワー .....  $V_b \times I_b$   
(ビーム電圧:  $V_b$ , ビーム電流:  $I_b$  とする)
- (2) 電子のエネルギー (相対論的係数) .....  $\gamma$
- (3) サイクロトロン角周波数 (又は磁界強度) .....  $\omega_c$
- (4) 中空ビームの半径 .....  $r_b$
- (5) 磁界に垂直方向と平行方向の速度比 .....  $\alpha$

これらの既定値に対して、決定すべき電子銃領域のパラメータとして次のものが挙げられる。

- (a) 平均のカソード半径 .....  $r_c$
- (b) カソードでの電流密度 .....  $J_c$
- (c) カソード面の傾斜角 .....  $\phi_c$
- (d) カソードと第1アノード間の距離 .....  $D_F$   
(カソード領域でのラーマー直径で規格化した量)

上記パラメータのうち最も重要なものはカソード半径  $r_c$  である。角運動量保存と断熱近似を使うとこれらの諸量の間の関係式が得られ、上記の五つの諸量を与えることによって、例えばカソード半径を変数として、電子銃領域の諸量（ミラー比  $F_m$ 、第1アノード電圧  $V_a$ 、カソード-第1アノード間距離  $d$ 、電子放出帯幅  $l_s$  など）が計算される。

図3は、当社が1991年に京都大学理学部に納入した周波数48GHz、TE<sub>02</sub>モード、出力200kW、パルス幅30msのジャイロトロンについて、それらの量を計算した例である。ここで、 $E_c/E_{max}$  は真空中での最大絶縁破壊電圧 ( $10^7$  V/m) で規格化されたカソード表面上での電界強度を、 $J_c/J_L$  はラングミュア制限電流  $J_L$  で規格化したカソードの電流密度である。この図において注目すべき量は、電界強度  $E_c/E_{max}$  と電流密度  $J_c/J_L$  である。電界強度  $E_c/E_{max}$  は絶縁破壊防止の観点から50%以下に、また電流密度  $J_c/J_L$  はカソードが十分温度制限領域で動作できるように20%以下に抑えるのが望ましい。そのような条件で判断するとカソード半径は、およそ7.5mm程度が適当であることが分かる。このとき、他の諸量は、ミラー比  $F_m = 18$ 、アノード電圧  $V_a = 21$  kV、カソード-アノード間距離  $d = 8$  mm、



エミッションベルト幅  $l_s = 5.3\text{mm}$  となる。

### 3.1.2 電子ビーム軌道のシミュレーション

計算機シミュレーションによるジャイロトロン用電子銃の設計で重要な点は、与えられた電極配置及び磁界分布において、電子自体の持つ空間電荷の作用を考慮しつつ電子ビームの軌道と速度分散を検討できることである。

一般に、電子の軌道を解析するためには、次のような相対論的な運動方程式を数値的に解く必要がある。

$$\frac{d}{dt} (m_0 \gamma \mathbf{v}) = -e [\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\mathbf{v}$  は電子の速度ベクトル、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$  はそれぞれ電界と磁界ベクトルである。大電流ビームでは、この電界と磁界には、電子ビーム自体の空間電荷が作る電界（空間電荷効果）と、電流が作る磁界（自己磁界の効果）を含める必要がある。

図4に計算機による電子軌道解析プログラムの流れを示す。プログラムは大きく分けて電界を計算する部分と、軌道を計算する部分から構成される。電界や磁界の解析法は通常の単独での解析法と同様である。ただし、電子ビーム自体による空間電荷が作る電界や、その電流が作る自己磁界の影響を電界解析のなかに組み込んでいかなければならないので、繰り返し計算を行っている。以下にその方法を流れ図に従って説明する。

まず、電界解析のための境界条件と電子の出発条件、それ

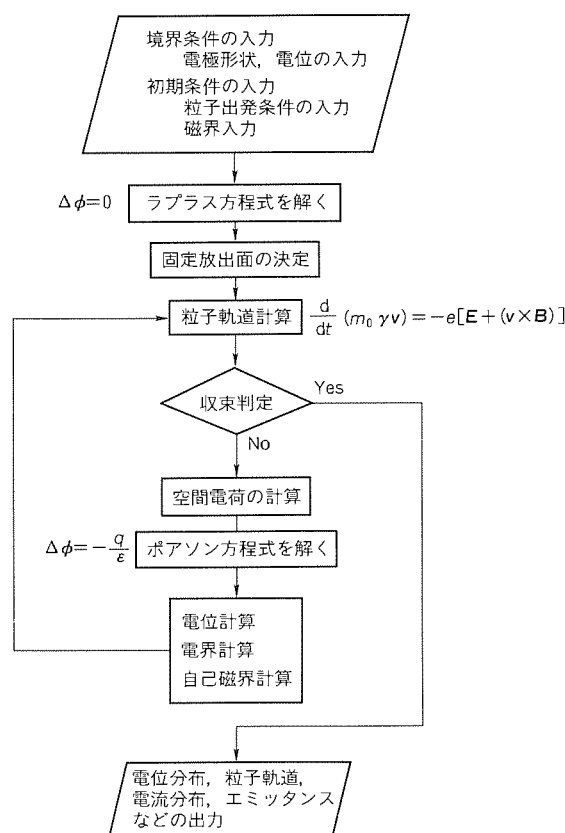


図4. 電子軌道解析プログラムの流れ

に磁界データを入力する（通常、磁界解析は行わずデータとして与える）。次に空間電荷を考慮せずに電界を求める。すなわち、ラプラスの方程式を差分法や有限要素法に基づいて数値的に解く。そのようにして得られた電磁界分布を基に、必要があればビームの引き出し条件を決定する。初期速度や電流密度、出発位置などの条件が求まると個々の電子の軌道計算が可能となる。運動方程式を数値的に解くには、常微分方程式の初期値問題を解くためのルンゲ・クッタ法などを用いる。求まった電子軌道と電流密度、電子速度から空間電荷密度分布を計算し、この電荷密度を考慮して、今度はポアソン方程式を解く。こうして得られた電界中で再度軌道計算を行う。このような繰り返し計算を行って、最終的には電子軌道や、空間電荷密度の収束を見て計算を中止する。最後は電流密度や速度分布、エミッタンスなどを求めて出力する。

解析例として、図5に48GHz ジャイロトロンで用いた電子銃形状における電子ビーム軌道の計算結果を示す。ビーム電圧  $V_b = 80\text{kV}$ 、アノード電圧  $V_a = 23\text{kV}$  のとき、速度比  $\alpha = 1.8$  で磁界方向速度成分が 4.6% の良質な電子ビームが形成されている。

### 3.2 空洞共振器における発振効率の計算

#### 3.2.1 計算モデル

所定の発振出力を最高効率で得るための発振効率の計算が、空洞共振器設計上重要である。図6は発振効率の計算モデルとして、空洞共振器内での電子の軌道を示したものである。(a)は半径  $r_w$ 、長さ  $L$  の共振器を側面から見た図で、軸方向に磁束密度  $B_0$  の静磁界が印加され、電子は螺旋運動しながら左から右へ進行する。(b)は共振器の断面でラーマー半径  $r_L$  の電子が半径  $r_b$  の電子ビームを形成し、電子ビームの厚さは無視されている。電子ビームを高周波電磁界と強く相互作用させるためには、電界の強い位置に電子ビームを入射する必要がある、この図では  $\text{TE}_{01}$  モードを想定して、方位角方向電界  $E_\theta$  の  $r$  方向のピークに電子ビームが入射するようにえが（描）いてある。

図では電子の個数は8個であるが、実際の計算では通常24～36個の電子（代表電子という）を高周波電磁界に対する加速・減速位相にそれぞれ位相的に等間隔に配置し、式(2)の電子の相対論的運動方程式を解くことによって発振効率を計算する。

#### 3.2.2 基本式と計算方法

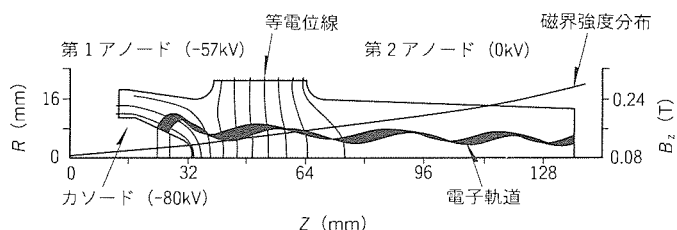
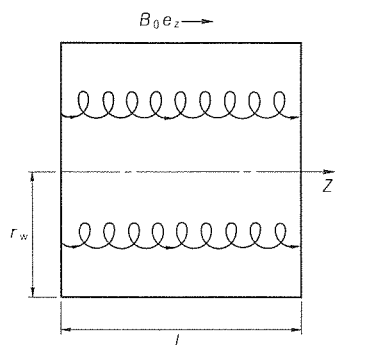
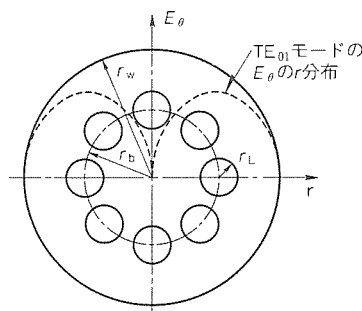


図5. 電子ビーム軌道



(a) 共振器内の側面



(b) 共振器内の断面

図 6. 空洞共振器内での電子の軌道 (計算モデル)

外部 Q 値が  $Q$  の空洞共振器から放出される電磁波の出力を  $P_{out}$ , 蓄えられているエネルギーを  $W$  とし, 共振器内の高周波振動を定常状態に維持するのに必要な電子ビームの加速電圧を  $V_b$ , 電流を  $I_b$  とすると,

$$P_{out} = \omega W / Q$$

$$= \eta V_b I_b \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta = \langle \delta \gamma \rangle / (\gamma_0 - 1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで,  $\langle \delta \gamma \rangle$  は空洞通過前後での電子のエネルギー変化を平均したものである。計算では代表電子について平均し, これを電子の初期運動エネルギー  $\gamma_0 - 1$  で割ったものが, 電子ビームが持っていた運動エネルギーの高周波電磁界のエネルギーへの変換効率, すなわち発振効率  $\eta$  を与えるとしている。

空洞共振器内の共振モード  $TE_{m,n,1}$  の電磁界成分は, 次式で与えられる。

$$E_r = - \frac{m E_{\theta 0}}{r k_{\perp}} J_m(k_{\perp} r) \cdot \sin k_{\parallel} z \cos(m \theta - \omega t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$E_{\theta} = E_{\theta 0} J'_m(k_{\perp} r) \sin k_{\parallel} z \sin(m \theta - \omega t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$B_r = E_{\theta 0} \frac{k_{\parallel}}{\omega} J'_m(k_{\perp} r) \cdot \cos k_{\parallel} z \cos(m \theta - \omega t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$B_{\theta} = - \frac{m E_{\theta 0}}{\omega r} \frac{k_{\parallel}}{k_{\perp}} J_m(k_{\perp} r) \cdot \cos k_{\parallel} z \sin(m \theta - \omega t) \quad \dots\dots\dots (8)$$

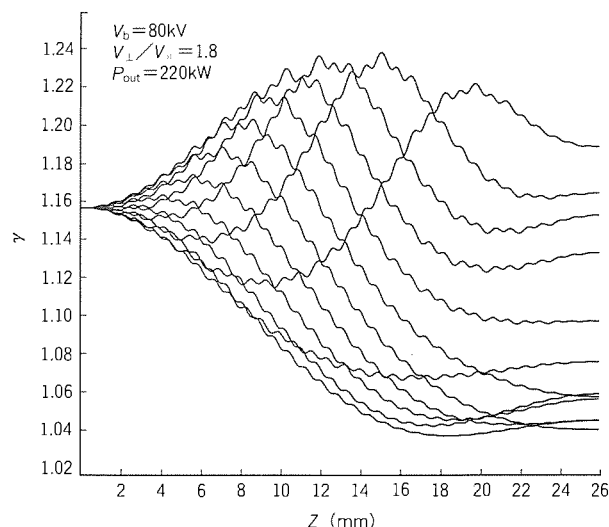


図 7. 空洞共振器内での個々の代表電子の運動エネルギーの変化

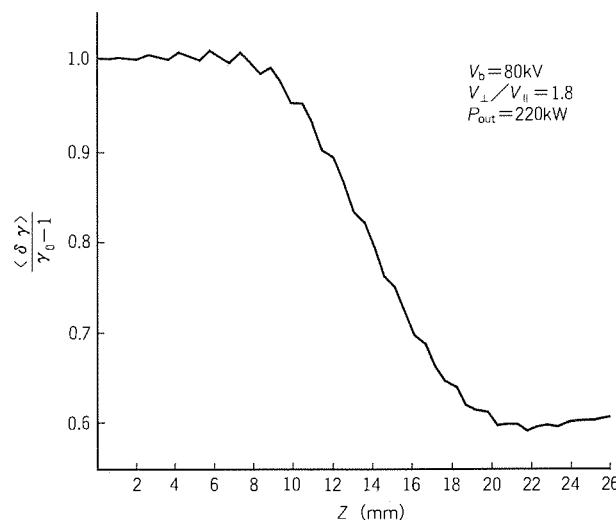


図 8. 空洞共振器内での代表電子について平均した運動エネルギーの変化

$$B_z = E_{\theta 0} \frac{k_{\perp}}{\omega} J_m(k_{\perp} r) \cdot \sin k_{\parallel} z \cos(m \theta - \omega t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし,  $k_{\parallel} = \pi / L$ ,  $k_{\perp} = \chi'_{mn} / r_w$ ,  $\chi'_{mn}$ : ベッセル関数  $J'_m(x) = 0$  の  $0$  を除く  $n$  番目の根,  $\omega = (k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2)^{1/2} c$ ,  $c$ : 光速であり, 高周波電磁界の  $z$  方向分布は正弦分布を仮定している。上式を用いて  $W$  を計算すると,

$$W = \frac{\pi \epsilon_0 E_{\theta 0}^2}{4} L r_w \left[ 1 - \frac{m^2}{(k_{\perp} r_w)^2} \right] \cdot J_m^2(k_{\perp} r_w) \quad \dots\dots\dots (10)$$

これらの式から, 出力  $P_{out}$  が得られている場合の空洞共振器内の電磁界分布が求まる。静磁界  $B_0$  に加えて, この高周波電磁界が存在する中を通過する代表電子の平均のエネルギー変化を計算すれば, 式(4)から  $\eta$  が計算できる。共振空洞の長さ  $L$  や  $Q$  値は, これらの計算を繰り返し行い, 出力

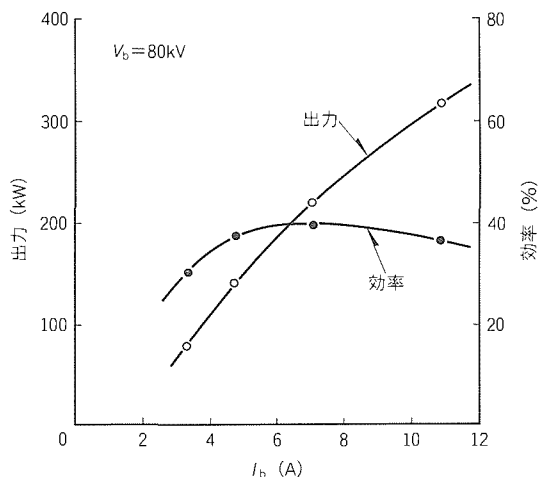


図9. 48GHzジャイロトロンのビーム電流に対する出力と効率（計算値）

表1. 48GHz, 200kWジャイロトロン設計パラメータ

周波数	48GHz
発振モード	TE <sub>02</sub> モード
電子ビーム電圧	80kV
電子ビーム電流	6.5A
出力	200kW
効率	~40%

や電子ビームの設計パラメータに対して $\eta$ が最大となるように設計される。

### 3.2.3 計算例

前節の計算例と同一の48GHz ジャイロトンについての効率計算例を示す。図7は長さ26mm,  $Q = 365$ の空洞共振器中に,  $V_b = 80\text{ kV}$ ,  $v_{\parallel}/v_{\perp} = 1.8$ の電子ビームが入射し, 220 kW の出力を得ているとした場合, 空洞通過中の個々の代表電子の運動エネルギーの変化を示した図である。横軸の $z = 0$ は共振器入口,  $z = 26\text{ mm}$ は出口に一致する。静磁界 $B_0$ は均一で最適化されている。実際の計算では36個の代表電子を配置して計算しているが, この図ではそのうちの12個についてグラフにしている。高周波電磁界によって加速されている電子もあるが, 多くは減速位相に入り, 空洞中を進行するにつれてエネルギーを失っていく様子が分かる。図8はそれらの運動エネルギーの変化を全代表電子について平均したグラフであり, 全体として電子の運動エネルギーは徐々に減少し, 空洞の出口付近で最もエネルギーを失っている。このとき, 電子の初期運動エネルギーの39.5%が失われており, これが発振効率 $\eta$ である。

図9はビーム電流 $I_b$ を変えたときの出力と効率を示したグラフである。このグラフの作成に当たっては, 式(3)を利用し, 与えられた $P_{\text{out}}$ を達成するために必要な $I_b$ を $V_b$ と $\eta$ から計算している。

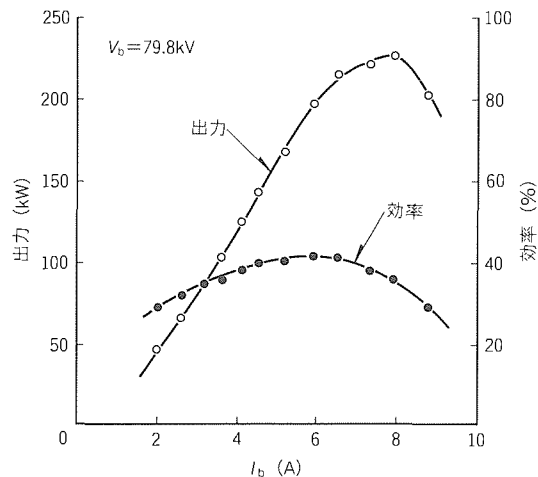


図10. 48GHzジャイロトロンビーム電流に対する出力と効率（実験値）

### 3.3 48GHz, 200kWジャイロトロン動作例

表1はこれまで計算例として用いてきたジャイロトロン設計パラメータである。電子銃, 空洞共振器の設計に当たっては, この章で記したシミュレーション技術を活用した。図10はビーム電圧 $V_b = 79.8\text{ kV}$ で, ビーム電流 $I_b$ を変えたときの出力と効率を示したグラフである。発振周波数は48.0 GHz, モードパターンはTE<sub>02</sub>モードであることが確認され, 所定の発振が得られた。 $I_b = 7.9\text{ A}$ で最大出力227 kWが効率36%で得られた。この実験は納入先で行われたものであり, 実験データを提供していただいた京都大学理学部嘩道恭助教授の御好意に感謝する。

## 4. むすび

サイクロトン共鳴メーザの原理を利用した電子管であるジャイロトロン構造, 動作原理, 及び設計に必要なシミュレーション技術とその適用例について述べた。ジャイロトロンはミリ波領域で, 数百 kW の大電力が発生できるという従来のマイクロ波電子管を越える動作領域を持っている。現在のところ用途は核融合分野に限られているが, 今後新しい応用分野が開けてくることを期待したい。

## 参考文献

- (1) Baird, J. M., Lawson, W. : Magnetron Injection Gun (MIG) Design for Gyrotron Application, Int. J. Electronics, **61**, No.6, 953~967 (1986)
- (2) Chu, K. R., Read, M. E., Ganguly, A. K. : Methods of Efficiency Enhancement and Scaling for the Gyrotron Oscillator, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, **MTT-28**, No.4, 318~325 (1980)

# 重イオンビームモニタ

取越正己\* 上田孝寿\*\*\*  
溝端正隆\*\* 小川博嗣+  
三田村正則\*\* 山田 聡++

## 1. ま え が き

がんの放射線治療は、臓器や体の形を余り損なわない治療法として、その重要性はますます高まりつつある。特に重粒子線と呼ばれる炭素・ネオン・アルゴン等のイオンを用いた治療は、治療効果が大さい、正常組織への障害が少ない等の特長のために、優れた治療方法の一つに数えられている。

放射線医学総合研究所では、重粒子線がん治療装置 (HIMAC) を用いて、1994 年から重粒子線照射によるがん治療が行われる。

HIMAC とは、イオンを加速し、がん患部に照射治療するための装置である。65m × 120m の広さを持ち、重イオン源・入射器・主加速器 (シンクロトロン)・ビーム輸送ライン・治療照射室からなる。重イオン源でイオン化された原子は、入射器で 6 MeV/核子 (光速の約 11%) に加速され、次の主加速器では最高 800 MeV (光速の約 84%) まで加速された後、ビーム輸送ラインを経て治療照射室まで導かれ、患部に照射される。この様子を模式的に図 1 に示す。

加速器から治療照射室までの数十 ~ 100m のビーム輸送を円滑に行うために、ビームモニタが輸送ラインに沿って配置されている。ビームモニタは、ビームを見るための「目」に相当し、ビームプロファイル・位置・強度を測定する。

重粒子線のビーム強度は最大数十 nA と弱いため、信号を増幅する機能を持つモニタが必要とされた。この論文では、HIMAC の高エネルギービーム輸送ライン (HEBT 系) に

使用されている増幅機能を持つビームモニタの概要・特徴・動作特性等について報告する。

## 2. ビームモニタの概要

HEBT 系に使用されているビームモニタは、ビームのプロファイル・位置を測定するビームプロファイルモニタ及びビーム強度を測定するビーム強度モニタの 2 種類である。

ビームプロファイルモニタは 29 台配置し、そのうちの 8 台にビーム強度モニタを併置した。

### 2.1 ビームモニタの役割

ビーム輸送では、輸送ラインに沿ってまずビームを通すことが重要な調整となる。このために、ビームプロファイルモニタによって実ビーム軌道の位置を測定し、ビームが正しくビーム軌道にあるかを見る。理想のビーム軌道との間にズレがある場合、ビームモニタの上流側に置かれたステアリング電磁石を用いて、実ビーム軌道を上下・左右に曲げることによって補正し、理想の軌道に合わせるように調整する。

さらに、ビームのプロファイルとその大きさを測定し、理想のビームに合わせるように 4 極電磁石の励磁電流を調整する。4 極電磁石はビーム光学系では凹レンズや凸レンズの機能を果たすため、その励磁電流を調整することにより、ビームのプロファイルや大きさを変えることができる。

ビーム強度モニタは、シンクロトロンから取り出されたビームが治療室に到達するまでの間に、ビーム強度の低下がないことを確認するために使用される。ビーム強度が低下した場合、ビームの一部が真空ダクトに衝突している等の原因が考えられる。この場合には上流側の電磁石の調整により、ビーム軌道の補正を行う。

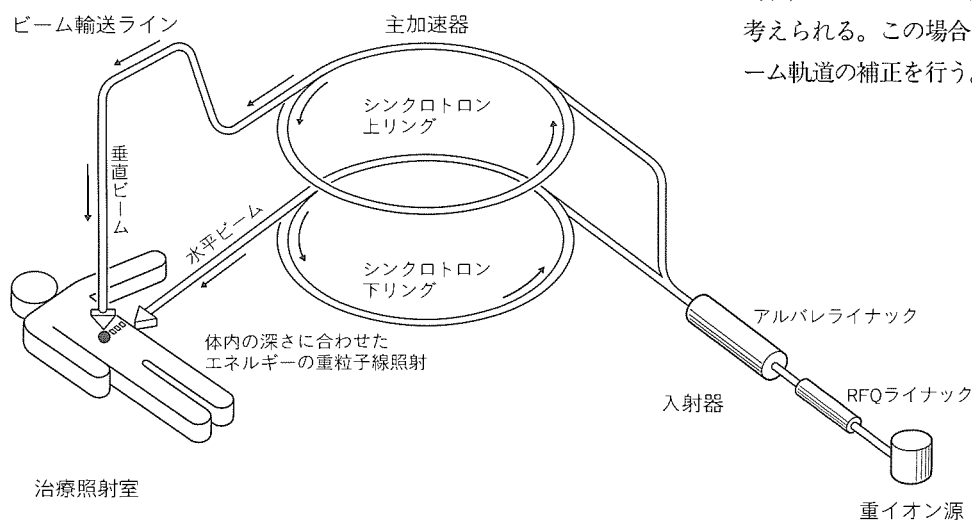


図 1. HIMACの構成とビーム照射

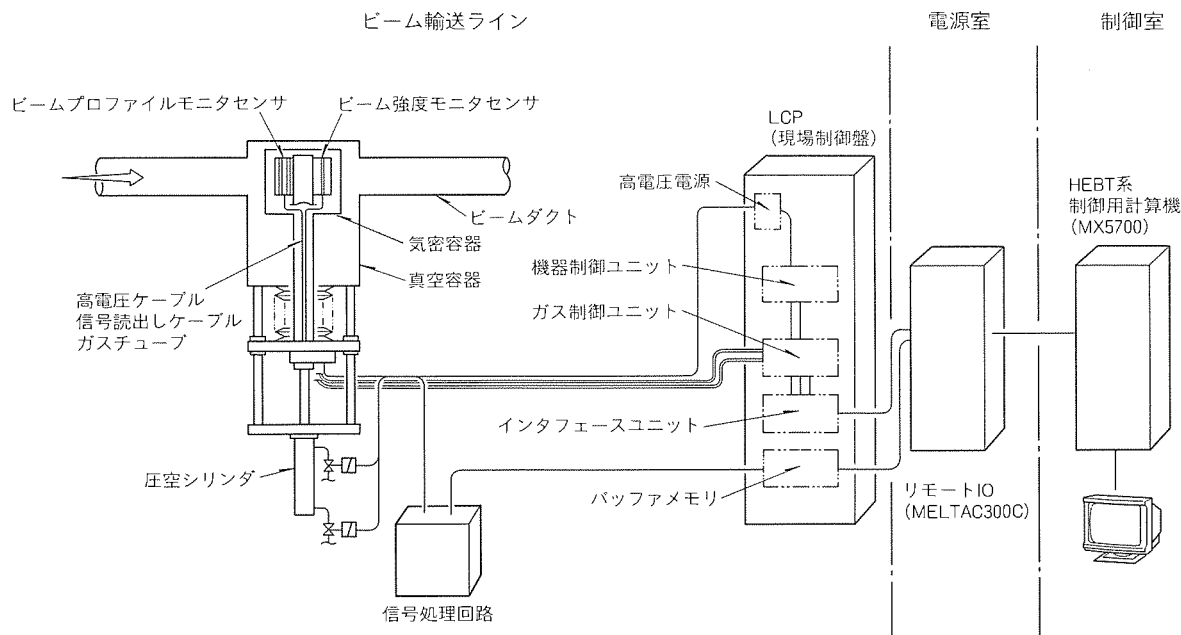


図2. ビームモニタの構成

## 2.2 構成

ビームモニタは、ビームライン中に設けられたセンサ部、センサ部を制御するための制御系、計測データ処理するための信号処理系、データを制御室に通信し、画面表示する上位計算機系に分けることができる。図2に構成を示す。

センサはビーム計測時のみビームライン中に入れられ、直接ビーム照射を受ける。また、センサにはガスが供給され、計測時にはその電極に高電圧を印加する。これら駆動・ガス供給・高電圧印加等の制御は、制御室又は現場のいずれでも行える。図中のLCPはこれらの現場制御を可能とする制御盤であるとともに、制御室との信号の授受を行うためのインタフェース機能を持つ。

計測データはLCPを経て制御室に運ばれ画面表示される。

## 2.3 特徴

ビームモニタはいずれも、陽・陰極で構成されるセンサ内のガスがビームによりイオン化されて生ずる電離電流を検出する方式である。検出される電流は、電極に印加する電圧によって変化し、図3に示すような依存性を持つ<sup>(1)</sup>。図中の領域IIをイオン化領域と呼び、IIIを比例領域と呼ぶ。

イオン化領域では、ビーム強度に比例した電離電流が得られ、その比例係数は電極への印加電圧によらず一定となる。このためビーム強度を得る上で有効な領域である。

比例領域では、ビームによって生じた電離電流はセンサ内で増幅され、より大きな電離電流として出力される。増幅率は印加電圧によって変えられるため、強度の小さいビームから大強度ビームまで、広いビーム強度範囲を測定する上で有効な領域である。したがって、小さい強度のビームが対象となるビームプロファイルの測定への適用が可能である。

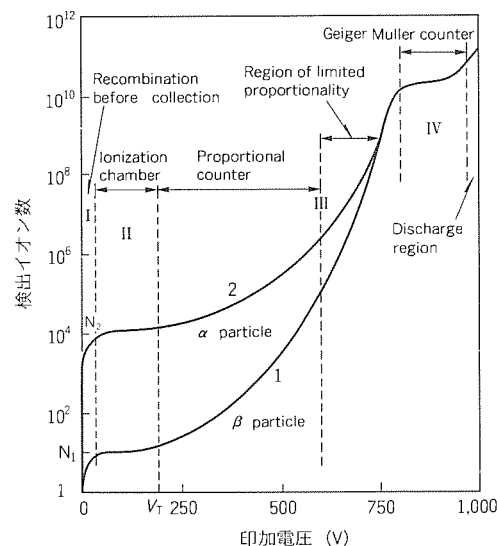


図3. 円筒型電離電流計の増幅率の印加電圧依存性

## 3. ビームプロファイルモニタ

このセンサは比例領域で動作するため、電離電流を増幅できる。増幅率は一般的に $10^3 \sim 10^6$ 倍と報告されている<sup>(1)</sup>が、このモニタでは約5,000倍の増幅率を得ることを開発目標とした。これは電離電流がワイヤ1本当たり最小約0.2pAと予想され、これを十分測定可能な1nA程度まで増幅するために必要な値として設定した。

センサガスは不燃性ガスを使用するという条件から、アルゴン-二酸化炭素（20%）の混合ガスを採用した。

ビームプロファイルモニタでは、多線比例計数管と呼ばれる検出器をセンサとして採用している。

多線比例計数管は陽極面と陰極面を交互に重ね合わせた、図4に示すような積層構造を持つ。陽極は2面構成で、それ

それぞれの面は32本の直径 $20\mu\text{m}$ のワイヤから構成される。各面のワイヤは互いに直角に交差するように組まれ、ビームのX方向、Y方向へ投影したプロファイルを測定できる。センサの外形を図5に示す。また、センサの主な仕様を表1に示す。

#### 4. ビーム強度モニタ

このセンサはイオン化領域で使用されるため、増幅率は1で、増幅率は印加電圧によらない。また、増幅率1で測定するため、強度の小さいビームの測定は難しくなる。このため、

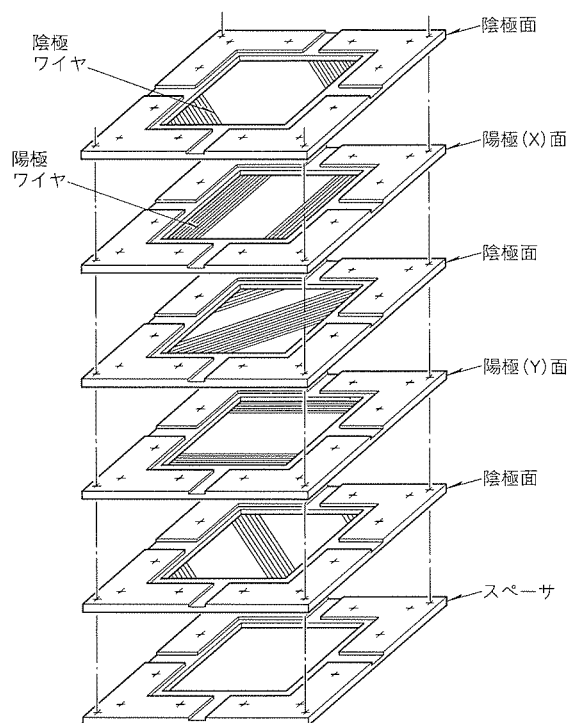


図4. ビームプロファイルモニタセンサの構造

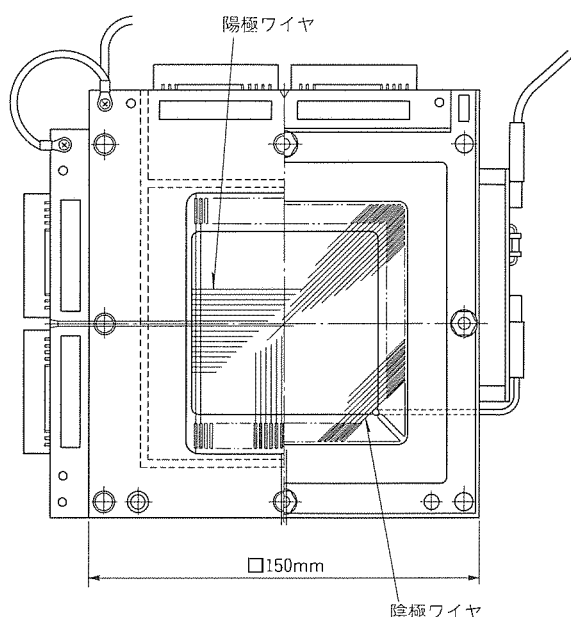


図5. ビームプロファイルモニタセンサ平面図

測定対象とするビーム強度は $1 \times 10^8$ pps以上とした。

センサとして、平行平板型電離箱を採用した。これはプロファイルモニタと同様に積層構造を持ち、1枚の銅の陽極面を2枚の多数のワイヤで構成された陰極面が挟み込む構造である。センサ外形を図6に、主な仕様を表2に示す。

#### 5. 計測データの処理

ビームプロファイルモニタセンサからの信号は、信号処理回路内で電荷積分され、電圧変換される。また、ビーム強度モニタセンサからの電流出力はOPアンプによって電圧変換される。これらは11ビットのデジタル信号に変換され、送信される。信号処理系のブロック図を図7に示す。

デジタル信号は信号処理回路から約30m離れたLCPまでRS-422伝送ラインで送信され、LCP内部のバッファメモリに一時書き込まれる。その後、インタフェース(MELTAC300C)を介して上位計算機(MX5700)に通信され、2秒ごとに新たに画面表示される。

表1. ビームプロファイルモニタセンサの主な仕様

陽極面数	2面(X面、Y面)
陽極面有効照射領域	64×64(mm)
陽極ワイヤ間隔	2mm
陽極-陰極間隔	4mm
ワイヤ径	陽極ワイヤ 20 $\mu\text{m}$ 陰極ワイヤ 50 $\mu\text{m}$
陽極ワイヤ数	32本/X面、Y面
ワイヤ材質	陽極ワイヤ: 金蒸着タングステン (Au plated W) 陰極ワイヤ: 金蒸着ベリリウム-銅 (Au plated Be-Cu)
測定対象とするビーム強度 (Heビーム換算強度)	$1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^{11}$ pps
増幅率目標値	5,000倍

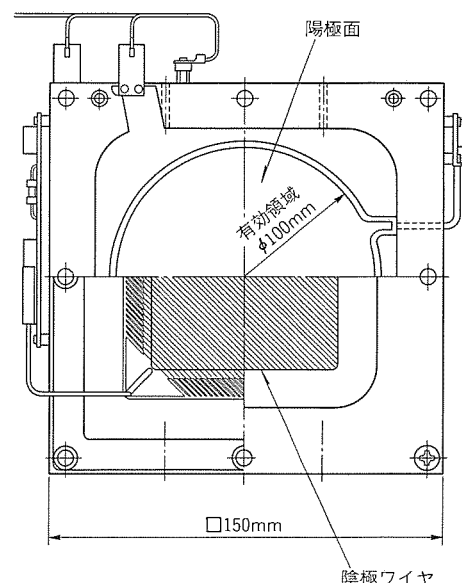


図6. ビーム強度モニタセンサ平面図

## 6. ビームモニタの動作特性

試作機により、動作特性の確認のための検証試験を行った。検証試験は、X線及び放射線医学総合研究所のサイクロトロンから得られる70 MeVの陽子ビームをセンサに照射して、プロファイル・強度を測定した。製品に対しては、工場内総合試験としてX線を照射し、動作特性を確認した。

### 6.1 ビームプロファイルモニタ試験結果とその特性

プロファイル及び増幅率を測定した。陽子ビーム照射試験は、放射線医学総合研究所サイクロトロンのC6ラインに組み込んだ試作機を用いて実施した。図8は試作機を示す。

#### (1) プロファイル測定

図9には陽子ビームのビームプロファイルの測定例を示す。図中の左からそれぞれX方向、Y方向へ投影されたビームの密度分布を示す。この例ではビームはX方向に約7 mm、Y方向に約6 mmの半値幅を持つ、ほぼ円形の断面形状であることが分かる。

図10にはX線のプロファイルの例を示す。陽子ビームに比べ、ビームの広がり大きいことが分かる。

#### (2) 増幅率の測定

図11に陽子ビーム照射及びX線照射で得られた増幅率の測定結果をまとめて示す。

陽子ビーム試験では、最小ビーム強度として約0.1 pAの微弱なビームを照射した。これは800 MeV/核子のHeビームに換算すると、毎秒数十万個のビーム強度に相当し、通常の方法ではプロファイル測定の難しい領域である。

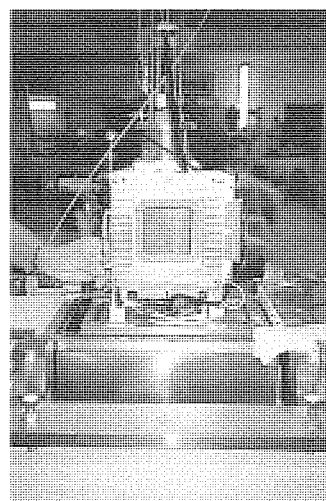


図8. ビームプロファイルモニタの試作機

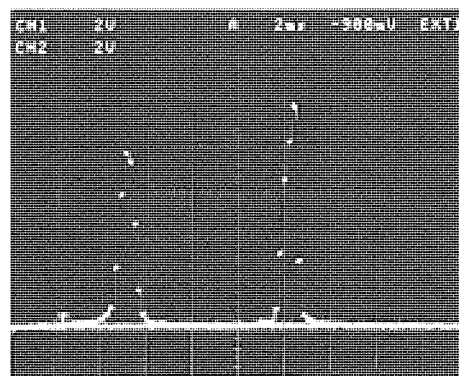


図9. 陽子ビームプロファイルの測定例

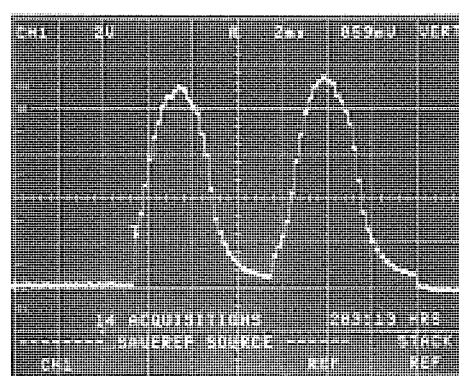


図10. X線ビームプロファイルの測定例

比例領域の増幅率は、Diethornの式<sup>(2)</sup>でよく表されることが報告されている。図中に示す実線は、試作機(黒の三角)の実測値に合うように式中のパラメータを最適化した結果である。製品の連続の測定結果は、この最適化された曲線で統一的に表すことができる。これは試作機及び製品の動作特性がよくそろっていることを示している。

### 6.2 ビーム強度モニタ試験結果とその特性

ここでは、試作機で行ったX線及び陽子ビームの照射試験結果を示す。

#### (1) イオン化領域の出力特性

イオン化領域の出力特性は、プラトーカーブと呼ばれ、センサへの印加電圧と電離電流の検出効率を知る上で基本的な

表2. ビーム強度モニタセンサの主な仕様

陽極面数	2面(表面、裏面)
陽極面有効照射領域	φ100mm
陽極-陰極間隔	7.5mm
陰極ワイヤ径	50 μm
陽極材質	銅ラミネートのエポキシ板(G-10)
陰極ワイヤ材質	金蒸着ベリリウム-銅 (Au plated Be-Cu)
測定対象とするビーム強度 (Heビーム換算強度)	$1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^{10}$ pps

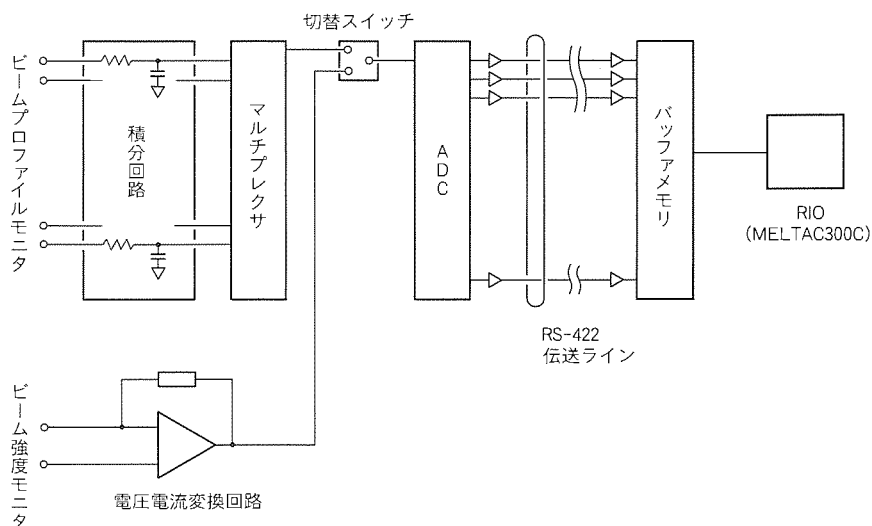


図7. 信号処理系ブロック図



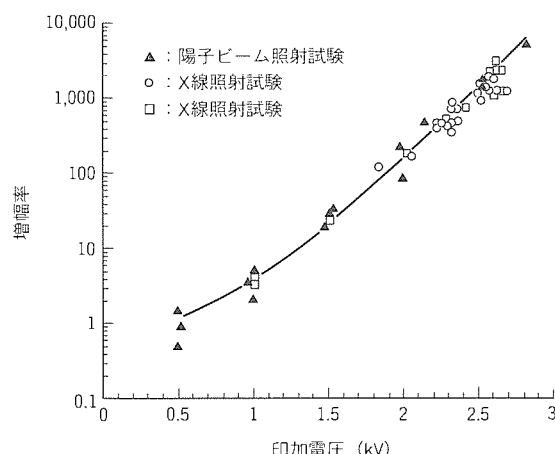


図11. ビームプロファイルモニタの増幅率の実測値と計算値

特性である。図12に陽子ビーム照射で得られたプラトーカーブを黒丸で示す。この測定では、印加電圧約230V以上で安定な出力領域が得られていることが分かる。白丸はビーム強度0.12nA, 平均ビーム径20mmとしたときの計算結果<sup>(3)</sup>であり、測定結果をほぼ再現できる。

## (2) 強度モニタ出力の測定

電離電流出力値とビーム強度の相関を図13に示す。測定したビーム強度は800 MeVのHeビームに換算すると $2.8 \times 10^6 \sim 3.3 \times 10^9$ 個/秒に相当する。図中の破線は計算値を示す。計算では電離電流は100%検出されるとした。測定値と計算値とは、ビーム強度10pA以上の領域は、 $\pm 10\%$ 以内で一致している。

## 6.3 ま と め

- (1) ビームプロファイルモニタの信号増幅率は、印加電圧約2.8kVで5,000を得た。
- (2) 増幅率は試作機・実機共にほぼ同じ印加電圧依存性を持ち、動作特性が共によくそろっていることを確認した。
- (3) 強度モニタでは、広い印加電圧領域で安定にビーム強度が測定できることを確認した。

## 7. む す び

放射線医学総合研究所 HIMAC 向けのビームモニタの開発と、製品の試験結果に基づいて、その動作特性について報告した。幅広いビーム強度範囲で十分な感度を持ち、開発目標及び仕様値を満足するモニタを得た。

今回開発製作したビームモニタは、重粒子加速器等大きなビーム強度が期待できない加速器には、なくてはならない機器といえる

今後は、医療分野等においても陽子加速器や重粒子加速器

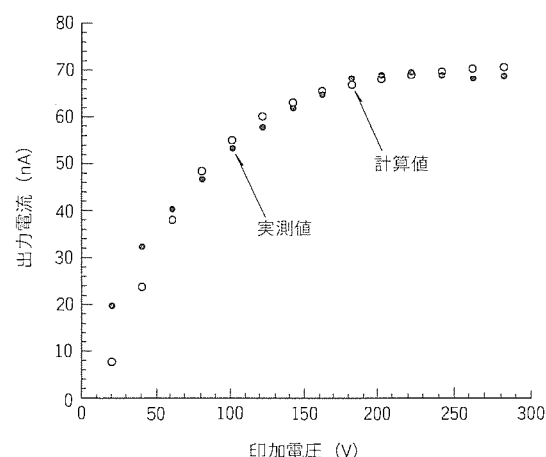


図12. ビーム強度モニタのプラトー曲線の実測値と計算値

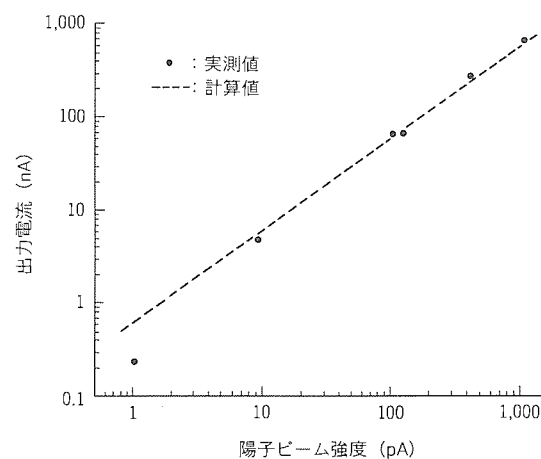


図13. ビーム強度モニタの出力電流値の陽子ビーム強度依存性

が増えてくることが期待され、このビームモニタが活躍できる場が広がるものと思われる。

ビームモニタの検証試験では、放射線医学総合研究所サイクロトロンスタッフの方々に多くの御助力をいただき感謝する。

## 参 考 文 献

- (1) Sauli, F.: Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chamber, CERN 77-09, 3 (1977-5)
- (2) 木村逸郎, 坂井英次 訳: 放射線ハンドブック, 日刊工業新聞
- (3) Boag, J. W., Attix, F. H., Rosech, W. C., Edt.: Radiation Dosimetry, 11, Academic Press, New York (1966)

# 高解像度ブラウン管

中田修平\* 林 圭一+  
伊藤英也\*\* 伊藤順子\*\*\*  
中川隆文\*\*\* 奥田荘一郎\*

## 1. ま え が き

ブラウン管 (以下“CRT” (Cathode Ray Tube) という。) は安価でかつ表示性能に優れているため、長年の間表示素子の主役の座にある。マルチメディアやハイビジョンなどの新たな需要が続々と出現し、CRT の画質向上や表示量増大に対する要求はとどまるところがない。

この要求にこたえるために、CRT の技術革新が絶え間なく行われてきた。CRT のように歴史が古く、技術的に成熟している機種に技術革新に当たっては従来の常識を打ち破る必要がある。

そのような新しい発想を促し、また検証する手段としてコンピュータシミュレーションが登場した。CRT の開発に適用する有効性が立証された結果、今では不可欠な技術と認められている。

カラー CRT の構造と動作原理を図 1 に示す。電子銃で生成された 3 本の電子ビームがマスクで交差し、蛍光体に当たって赤、青、緑の 3 原色を発生する。電子ビームは、偏向ヨークで曲げられて画面を順次掃引する。全体は真空中に保たれるよう、ガラスバルブ中に封じられている。

CRT の要素部品のうち、電子銃のシミュレーションに関しては以前に紹介した<sup>(1)</sup>。この論文では、偏向ヨークとマスクの開発に用いられるシミュレーション技術を論じる。また、これらの技術を用いて平成 5 年に開発した高解像度 CRT を紹介する。

## 2. 偏向ヨーク

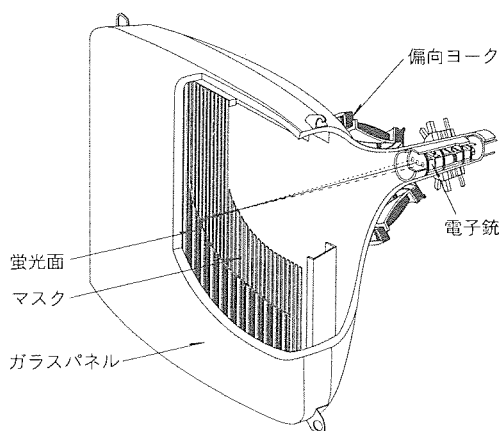


図 1. カラー CRT の構造と動作原理

偏向ヨークは、水平及び垂直方向の磁界を発生して、電子銃から出てくる電子ビームを画面の各点に偏向するための装置である。図 2 は、偏向ヨークの形状を示しており、垂直偏向用巻線 (コイル)、水平 (偏向用) コイル及びフェライトコアによって構成されている。図では、水平コイルはサドル状に巻かれており、垂直コイルはフェライトコアの周りをトロイダルに巻かれている。高解像度 CRT 用のものは垂直コイルもサドル状に巻く場合が多い。これらの水平コイル及び垂直コイルによって、電子ビームを垂直及び水平に偏向する磁界を発生する。

偏向ヨークは電子ビームをスクリーン上に偏向するだけでなく、3 本のビームをスクリーン上の一点に集める作用 (コンバーゼンス作用) と、水平走査線のひずみを取るという二つの作用を持っている。

これら多数の要求を満たす偏向ヨークを実現するために、巻線を複雑に分布させる。また、フェライトコアのほかに磁性片を用いて局所的な磁界を制御する。これら巻線や磁性片の配置は熟練した技術者が経験を頼りに求めてきたが、CRT の画質が向上するに伴って偏向ヨークの極限設計が求められるようになった。もはや人間の能力では追いつけなくなってきたため、コンピュータシミュレーションが必要になっている。

この章では最近開発したシミュレーション手法と、その適用例を紹介する。

### 2.1 従来の解法

偏向ヨークのシミュレーションは、発生する磁界を求める部分とそれを用いて電子の軌道を計算する部分に分かれる。厳しい仕様に見合う偏向磁界を実現するためには巻線分布が複雑になる。これをいかにモデル化して磁界計算を行うかがかぎ (鍵) となる。

このモデル化は、差分法による解法<sup>(2)</sup>で初めて成功した。このプログラムは三次元問題を二次元的に扱うことによって、当時のコンピュータ能力で実用的な速度を獲得した。

しかしながら差分法を用いているため、解の精度に限界があるという欠点があった。また、偏向ヨークの局所磁界補正に用いられる磁性片は軸対称ではないた

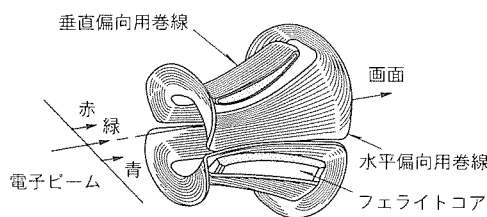


図 2. 偏向ヨークの構造

め、解析することができなかった。コンピュータの能力が上がるにつれて複雑な計算が可能になってきたことから、差分法に代わる高精度な計算法が求められていた。

## 2.2 新しい解法

一般に、差分法のような領域分割法よりも境界要素法の方が高精度の解が得られることが知られている。そこで、境界要素法の一つである表面磁荷法<sup>(3)</sup>を採用した。

表面磁荷法などの境界要素法は計算時間がかかることが欠点で、特に三次元解法では現在のコンピュータ能力をもってしても実用は難しい。そこで筆者らは偏向ヨークのコアが中心軸周りの回転対称であることを考慮して、変数を軸の周方向にフーリエ展開し、三次元問題を二次元並みの速度で解くことに成功した。そのアルゴリズムは以下のとおりである。

表面磁荷法は、磁性体表面に仮想的な磁荷を配置して、境界面での連続の条件を満足させるように分布を決定する。表面磁荷を周方向にフーリエ展開する ( $\sigma = \sum_n \sigma^{(n)} \cos(n\theta)$ ) と次の式が得られる。

$$\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\chi}\right) \sigma_i^{(n)} = \sum_{j \neq i} \int_j dS_j \sigma_j^{(n)} \nabla_i G^{(n)} \cdot \mathbf{n}_i + \mathbf{H}_{\text{ext}}^{(n)} \cdot \mathbf{n}_i \dots\dots\dots (1)$$

上式において  $i, j$  は境界面上の要素番号を示しており、右辺第一項の積分は  $j$  番目の表面要素上の面積分を表している。また、右辺第一項は自分自身以外の表面磁荷の作る磁界であり、第二項は外部の磁界を表している。また、 $\mathbf{n}_i$  は  $i$  番目の表面要素の法線ベクトルを示している。さらに、 $\chi$  は比透磁率から 1 を引いた値 ( $\mu_s - 1$ ) である。

右辺第一項に現れるグリーン関数  $G$  は、第二種のルジャンドル関数  $Q$  を用いて次のように表すことができる。

$$G^{(n)} = \frac{2}{4\pi^2 \sqrt{rr_s}} Q_{n-\frac{1}{2}} \left( 1 + \frac{(r-r_s)^2 + (z-z_s)^2}{2rr_s} \right) \dots\dots\dots (2)$$

また、第二項は周方向に  $n$  次のコサイン分布を持つ電流

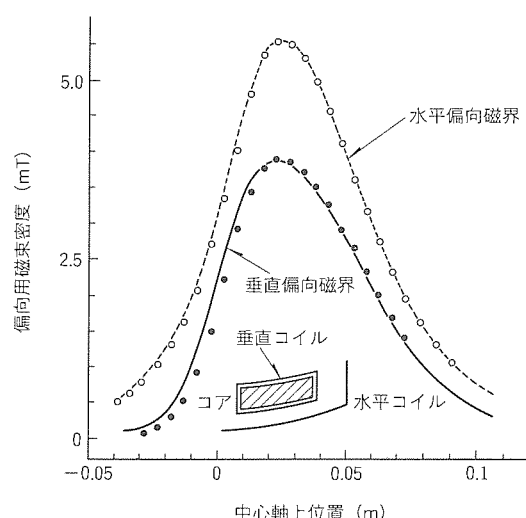


図 3. 偏向ヨーク軸上の磁界分布の実測との比較

の作る磁界を表している。

上記の連立一次方程式を解くことにより、フーリエ変換された表面磁荷の分布を得ることができ、結果として空間中の磁界分布を計算することが可能となる。

磁界を求めた後の軌道解析 (微分方程式の解法) は、4 次のルンゲ・クッタ法を用いている。荷電粒子の軌道計算を行うことによってコンバーゼンス特性及びひずみ特性を計算することが可能となる。

## 2.3 シミュレーション結果の検証

この節では新たに開発したシミュレーションの結果を実測と比較して検証した結果を示す。

### (1) 磁界解析結果

図 3 は、偏向ヨークの発生磁界の軸上分布の解析結果と実測との比較である。図において曲線は計算結果であり、また丸印はホール素子を用いた測定の結果である。図のように両者はよく一致していることが分かる。

### (2) 偏向特性

表 1 にフーリエ変換による磁界解析を用いた軌道計算の結果、得られる画面特性と実験の結果を示す。評価項目はラスターひずみ量及び 3 本のビームが画面に着地する位置のずれ (ミスコンバージェンス) 量である。表のように表面磁荷法軸対称系の場合、従来の差分法に比べてラスターひずみ量及び画面コーナでのビーム特性がより実測に近くなっている。

また、三次元計算で得られた値も併せて示す。計算時間がかかる三次元計算に劣らない精度が得られていることが分かる。

## 2.4 磁性片の解析

表面磁荷法では軸対称でない磁性体も簡単に考慮できる。適用例として、コンバーゼンス特性の改善のために垂直・水平偏向コイルの間に取り付ける薄い板の磁性片<sup>(4)</sup>を取り上げる。

薄板の磁性片の解析は困難であるが、境界要素法で扱える薄板要素を新たに開発した。計算と実測との対比を行った結果<sup>(4)</sup>を図 4 に示す。図のように、計算された磁界分布は実測値とよく一致しており、局所的な磁性片の効果をシミュレーションできることを実証した。

## 3. 展張マスク

マスクは色選別のために用いられる電極であり、電子ビー

表 1. 計算結果と実測値との比較

評価項目	実測値	磁荷法 軸対称	差分法 軸対称	スカラー法 三次元
ひずみ (%)	上 下 左 右	2.84 4.90	2.68 4.70	3.06 5.06
MC* (mm)	水平端 垂直端 コーナ	0.61 0.07 -0.57	0.73 0.13 -0.30	0.52 0.05 -1.43
				1.05 0.31 -0.50

注 \*MC: ミスコンバージェンス量

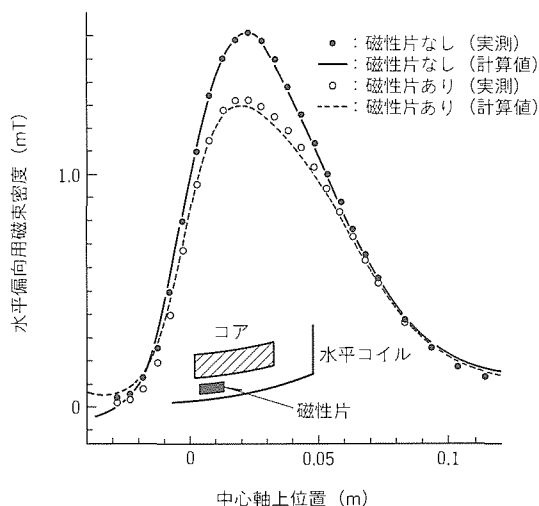


図4. 磁性片の影響の実測値との比較

ムが透過する多数のあな(孔)を持った金属で出来ている。従来、当社では丸形の孔を形成した金属シートを用いたシャドウマスク方式のものを採用してきた。しかし、この方式は文字や細線の視認性が悪く、電子ビームの衝突で発生する熱変形(ドローイング)や、走査線と孔配列との干渉しま(縞)(モアレ)などの問題があり、電子銃や偏向ヨークの性能を生かしきれなかった。そこで、CRT画面の縦方向に連続した孔(スリット)を形成する展張マスク(アパーチャグリル方式)の開発に着手した。

展張マスクではスリット孔を形成するために、グリルと呼ばれる多数の細条に張力を付加して形状を形成する。展張マスクの構造を図5に示す。フレームにあらかじめ加圧力を与えておき、アパーチャグリルを溶接する。溶接後フレームに与えていた加圧力を解放すると、元の形状に戻ろうとする反力でアパーチャグリルに張力が付加される。フレームにはCRTのガラス容器に位置決めするための支持構体に取り付けられている。また、グリルの振動減衰促進のためにダンパ線と呼ばれる制振部品が取り付けられている。

展張マスクの開発に当たっては、コンピュータシミュレーションが積極的に用いられた。その範囲はフレームの構造解析、加圧力最適化、熱変形解析、自重変形解析、振動解析等に及んでいる。この論文ではそのうち、熱変形解析及び自重変形解析について紹介する。

### 3.1 温度ドリフト

熱変形解析としては、温度ドリフトの解析を実施した。温度ドリフトとは、何らかの温度変化で電子ビームの着地位置が蛍光体からずれることである。

温度ドリフトには経時変化と環境温度ドリフトの二つがある。経時変化は、電子ビームがグリルに衝突して発熱し、展張マスクが温度上昇する現象であり、また、環境温度ドリフトはCRTを使用する環境の温度が変化した場合に発生する。

この二つの特性は、支持構体部にバイメタル作用を持たせ

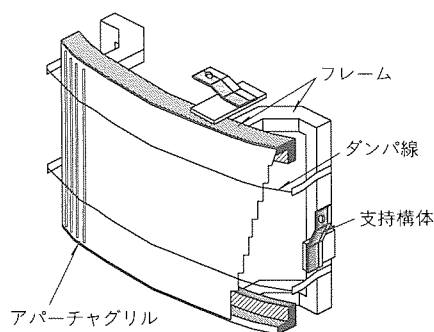


図5. 展張マスク構造

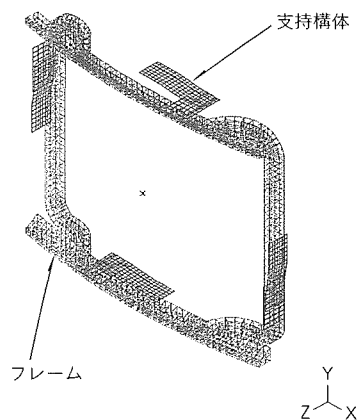


図6. 展張マスク解析モデル

ることで調整できるが、二つの特性が相反するものであるため、従来は実際の試作でトライアンドエラーを繰り返して最適形状を決定していた。

### 3.2 自重変形

自重変形とは、CRTの表示面を横向きにした状態から上向きにした場合に展張マスクが自重で変形して電子ビームが蛍光体からずれる現象である。一般にはCRTは画面横向きで使用されるが、その蛍光面製造工程では画面上向きの状態であり、自重変形が大きいとCRT完成時に電子ビームが蛍光体からズレた色純度の悪いものが出来る。このズレは蛍光面形成時の露光レンズ等の設計である程度補正できるが、非対称なズレが発生したり、ばらつきが発生すると補正できない。

シャドウマスク方式ではマスクの質量が軽いためあまり問題とされなかったが、展張マスクではフレームが張力を発生するために頑強な構造となっている。そのため、シャドウマスク方式の3~4倍の質量となっており、自重変形が大きな問題となる。

### 3.3 構造解析

図6に今回解析したモデルを示す。フレームはソリッド要素、また支持構体はシェル要素でモデル化した。アパーチャグリルはフレームに比べて非常に剛性が低く、フレームの変形に追随すると考えられるのでモデル化から省いた。

変形量の解析には有限要素法を用いた汎用の構造解析プロ

グラムを用い、結果の後処理用にフレームの変位を電子ビームの画面ズレ量に換算するためのプログラムを開発した。

各特性での実測値をもとにモデルの改良を行った結果、図7に示すように温度ドリフトでは実測値と解析値との誤差が数%程度まで予測できるようになった。自重変形特性に関しても全体の傾向を評価できるレベルに到達した。

この精度向上のためには、温度変化の実測、材料定数の実測などが必要であった。

また、支持構体がガラスに取り付いている状態をどのような拘束条件で表すのかも重要なポイントであった。実際には1個の支持構体は3点でガラスパネルに押し付けられているが、この状態をモデルで表現するために各方向の自由度を様々に変更し、実際に近い状態となるような拘束条件を選定した。

この解析の結果、温度ドリフト特性と自重変形特性は主に支持構体の仕様で決定されることが明らかになった。

### 3.4 支持構体の設計

解析で実際の特性が評価できることから、次に支持構体の仕様を変更した場合の温度ドリフト及び自重変形特性への影響をパラメータスタディした。その結果、支持構体の各寸法と温度ドリフト及び自重変形特性の間に成立する簡易式を導出した<sup>(5)</sup>。

実際の試作寸法はこの簡易式から有効範囲を求め、他の特性からの要求を考慮して逐次選定した。以上から支持構体の寸法の目安をつけ、最終的には展張マスク全体を構造解析したところ、目標とする特性が得られた。その後の実際のCRTでの特性評価でも目標値が得られていることが確認された。

## 4. 展張マスクCRT

展張マスクを用いたCRTは開発を完了し、高解像度ディスプレイモニター用として発売されている。外観を図8に、また、主な製品仕様を表2に示す。

特長は以下のとおりである。

- (1) シャドウマスク方式に対して文字などの視認性、色安定(ドーミング)特性、及びモアレ耐性に優れ、高画質である。
- (2) 電子銃及び偏向ヨークは、従来のシャドウマスク方式を用いているため、キャビネット後部構造、制御回路などは従来との互換性が保たれている。

## 5. む す び

CRT用偏向ヨーク及びマスクの開発設計に必要なシミュレーション技術に関して論じた。

偏向ヨークの磁界シミュレーションは、表面磁荷法を用い

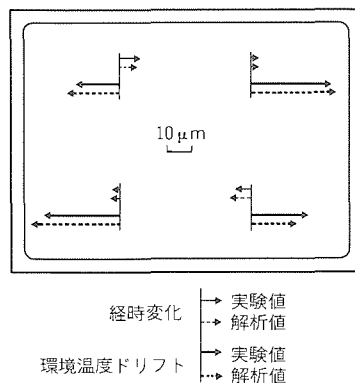


図7. 温度ドリフトの解析結果と  
実測値の比較

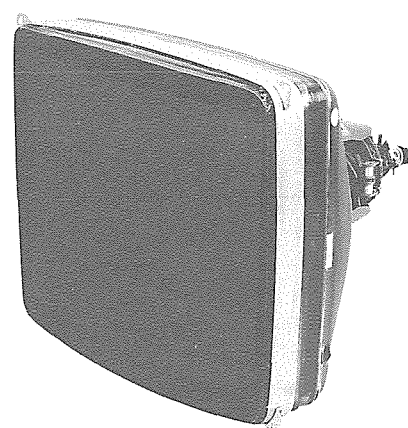


図8. 展張マスク方式高解像度CRT

表2. CRT(型名 M50KYZ17X01)の製品仕様

バルブ	21インチ, 90°偏向
ネック径	29.1mm
蛍光面	ストライプ, 0.31mmピッチ
マスク	展張タイプ(アパーチャグリル)
電子銃	NX-DBFタイプ
偏向ヨーク	サドル/サドル巻線タイプ

たプログラムを開発し、従来の差分法よりも精度を上げ、かつ磁性片の効果を解析することに成功した。フーリエ展開法を用いることにより、三次元問題を二次元並みの高速で計算することが可能である。シミュレーション結果の検証は、実際の偏向ヨークを搭載したCRTで行った。

有限要素法による構造シミュレーションによって温度ドリフト及び自重変形の対策手法を確立し、展張マスクを開発した。展張マスクを搭載した21インチCRTは、高画質で従来品と互換性のある製品として販売を開始している。

## 参考文献

- (1) 奥田莊一郎, 池上和律, 吉田直久, 山根久和, 柳井啓二: CRT用電子銃開発のためのコンピュータシミュレーション, 三菱電機技報, **65**, No. 6, 618~622 (1991)
- (2) 野村達衛: 回転曲面に分布する電流による磁界の計算法, 電気学会論文誌, **91**, No. 2, 155~163 (1971)
- (3) 中村史朗, 野村達衛, 岩本雅民: 変圧器漏れ磁界の三次元解析, 電気学会論文誌, **96**, No. 9, 23~30 (1976)
- (4) 中川隆文, 中田修平: CRTの色ずれ補正用磁性片の解析, 平成5年電気学会全国大会予稿集, 8-65 (1993)
- (5) Ito, H., Ito, J., Watanuki, H.: A Study of Suspension System in Tension Mask, Proceedings of the 13th International Display Research Conference, SID, Strasbourg, France, 581~583 (1993)

## 電子・イオンビーム加工装置

庄野一弘\* 石見泰造\*  
尾崎敏之\* 村上英信\*\*  
久岡 靖\* 荒川及蔵\*\*\*

## 1. ま え が き

電子・イオンビーム加工装置は、電子デバイス産業から自動車産業、重工業に至る広い分野で、露光・注入・表面改質・除去加工・溶接などの様々な用途に、研究用又は生産用として用いられている。これらの装置には加工の高精度化や高速化など常に高性能化の要求があり、新しい装置の開発が必要になる。種々の仕様の装置を必要とされる時期に開発するためには、開発の効率化が重要である。そこで、時間のかかる試作の繰り返しを避け、効率的な装置設計が行えるシミュレーション技術が大きな威力を発揮している。

当社でも様々なシミュレーションを開発し、加工装置の開発・設計に役立てているが、その中核をなすのが、ビーム光学系における荷電粒子ビームの軌道シミュレーション技術である。ビーム光学系はビームの性質に直接影響を与える重要な部分だが、シミュレーションとの親和性が高く、光学系の設計にはその使用が不可欠になっている。この論文では、これらのビーム光学系における軌道シミュレーション技術の概要と、その適用例を紹介する。

## 2. ビーム軌道シミュレーション技術

シミュレーションの対象として見た場合、ビーム光学系は次のような特徴を持つ。

- 支配方程式が明確である。
- 関与する物性定数が少ない。

これらの特徴から、他の対象に比べてシミュレーションに適しているといえる。そのため、レンズなどの基本形状の決定やレンズ群の最適制御条件設定などに、積極的にシミュレーションが用いられており、当社でも独自のシミュレーション開発を行っている。

軌道シミュレーションは、ビームの発生部や輸送部など、ビーム光学系全体を幾つかの部分に分けて実行することが多い。その理由として、

- 用いる計算技法が異なる。
- 着目する現象が分離でき、定性的理解がしやすい。

などが挙げられる。

そこで、上記分類に応じたシミュレーション技術及び適用例の紹介を行う。さらに、適正な公差のシミュレーションによる設定例を紹介する。最後に、シミュレーションを用いたビーム光学系の開発例を示す。

## 2.1 ビーム発生部

ビーム発生部では、ビーム電流量及びその変調特性、輝度などが重要な設計要項になる。加工装置の場合、発生部のメカニズムや電極構成も様々なものがあり、その各々で、用いるシミュレーション技法も異なるが、ここでは、一例として熱電子放出型電子銃を取り上げる。

典型的な電子ビーム発生部は、陰極・ウエネルト電極・陽極からなり、三極部と呼ばれる。熱電子放出型電子銃の場合、引き出される電流量は、陰極温度と陰極前面の電界強度に依存する。このとき、電流量を高速に制御するなどの目的から、温度よりも応答性に優れた電界のみによって電流が制御されるように、空間電荷制限領域で用いることが多い。したがって、シミュレーションでも空間電荷効果を考慮する必要がある。空間電荷効果とは、ビーム自身が作る電界によって、ビーム径が広がったり、ビームの電流密度が制限されてしまうなどの現象を指す。空間電荷効果を考慮する場合、電界分布を記述するポアソンの方程式

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

及び電子の運動方程式

$$m \frac{dv}{dt} = -e(E + v \times B) \quad \dots\dots\dots (2)$$

を連立して解く必要がある。しかし、電界が定まらなければ電子の軌道が定まらず、また、電子の軌道が定まらなければ電界が定まらないという相互依存の関係から、特別な場合を除いて直接解を求めるのは不可能であるため、反復法を用いることが多い(図1)。

反復法の流れは次のようになる。まず、ビームのない(空

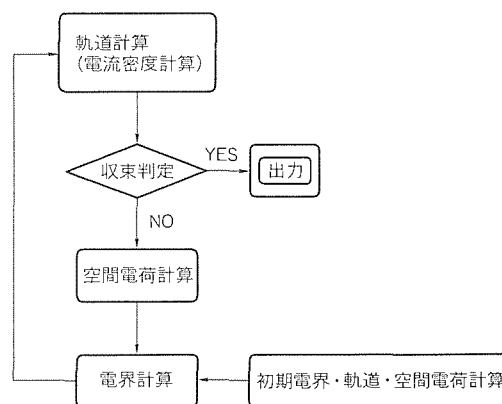


図1. 反復法

間電荷のない) 状態での電界を解き、得られた電界をもとに軌道計算を行う。その結果、電流の連続性から空間電荷密度分布が得られるので、再び空間電荷を含んだ電界の計算を行い、その電界のもとで軌道計算を行う。このときの軌道は、初回の空間電荷を含まない軌道とは異なっている。以下、電界計算→軌道計算→空間電荷密度分布計算のループを、電位や軌道が収束するまで繰り返し行う。計算が収束すれば、すなわち、連立方程式(1), (2)の解が得られたことになる。

この軌道計算では、陰極面での放出電流密度分布を定めるために、二極管近似を導入する。二極管近似とは、陰極前面に仮想陽極面を設け、陰極との間を微小な二極管の集合と見なすものである。このとき一つの二極管に注目し、陰極と仮想陽極の間の電位差及び距離をそれぞれ  $V$ 、 $d$  とすると、その放出電流密度  $J$  は、以下のチャイルド・ラングミュアの式によって決定される。

$$J = \chi \frac{V^{3/2}}{d^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\chi = \frac{4 \epsilon_0}{9} \left( \frac{2e}{m} \right)^{1/2}$$

次に、このようなシミュレーション技術を用いた例として、大出力電子銃の電流量変調特性解析<sup>(1)</sup>を紹介する。

電源系をも含めた電子銃の設計において、ビーム電流の変調特性は重要な設計要項となる。例えば、ウエネルト電極の特性として、ウエネルト電源で得られる出力電圧以内にカットオフ電圧が収まること、また、ウエネルト電圧の変動に対するビーム電流の変動量がビームの要求仕様に収まることが必要である。そこで、大出力電子銃におけるビームの変調特性のウエネルト電圧依存性を計算し、実測と比較することでシミュレーションの定量性を検証した。

計算モデルは軸対称二次元とし、軌道計算にはルンゲ・クッタ法を用い、また熱初速度分布を考慮した。電界計算には、空間電荷効果を考慮するため、差分法を用いている。ただし、あらかじめ電子銃室全体を空間電荷のない状態、すなわち、

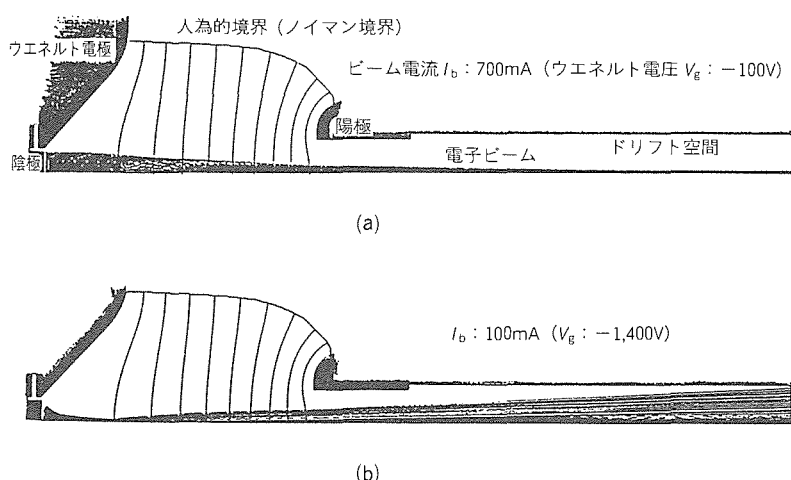


図 2. 三極部軌道計算例 (加速電圧  $V_a$ : 150kV)

ラプラス場で計算 (電荷重畳法) し、その結果をもとに人為的境界を設け、計算領域を縮小することで、計算時間の短縮を図っている。これはまた、計算機の記憶容量に制限がある場合の空間分解能の向上にも役立つ。

図 2 に、軌道の計算結果の一例を示す。このような計算をウエネルト電圧を変えながら繰り返すと、ビーム電流の変調特性が得られる。計算及び実測の結果を図 3 に示す。計算結果は実測とよく一致しており、カットオフ電圧を差し引いたウエネルト電圧の 2.5 乗にほぼ比例した電流変調特性になっている。このように、シミュレーションは定量的信頼性があり、ウエネルト電極を始めとする電子銃三極部の設計に活用されている。

## 2.2 ビーム輸送部

ビーム輸送部は、複数の集束レンズや偏向器、4 極子レンズ(スティグメータ) などからなるレンズ群で構成される。各々のレンズには電界型と磁界型があり、用途に適したものが選択される。電界型は静電界のクーロン力を利用するもので、CRT やイオンビーム加工機など、電子・イオン双方に用いられる。一方、磁界型は静磁界のローレンツ力を利用するもので、レンズ強度が  $e/m$  に比例するため、主に質量の小さい電子に対して用いられる。電子顕微鏡や電子ビーム加工機がその代表例である。

ほとんどのビーム加工機では、輸送系設計の主眼は、ビームの集束性の良否におかれる。集束性の向上を検討する場合、運動方程式を直接解くよりも、運動方程式を適切な数学的手段を用いて分解し、完全結像性を保証する線形方程式と、結像性を阻害する非線形効果の方程式とに分けて議論したほうが組織立った方針を立てやすい。この手法は古くから近軸理論として広く用いられており、線形部分を近軸軌道、非線形効果の部分を収差という。図 4 に、収差の有無による軌道の違いの一例を示す。

近軸計算では、光軸の回りに展開したポテンシャルのフー

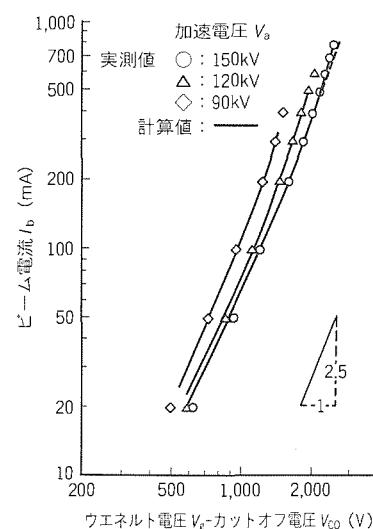
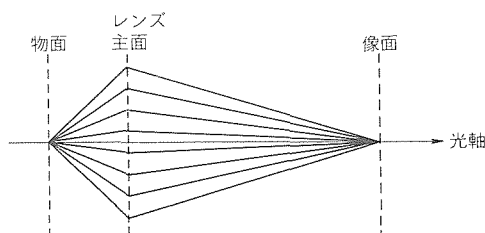
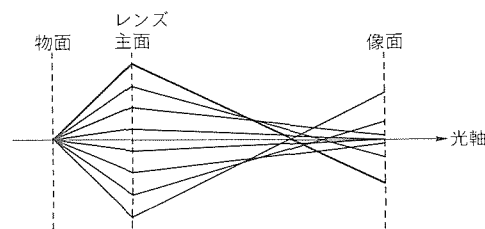


図 3. ビーム電流量の変調特性





(a) 収差のない場合



(b) 球面収差がある場合

図4. 収差の有無による軌道の違い

リエ展開成分を知ることが必要である。例えば、フーリエ展開の0次成分は集束レンズの、1次成分は偏向器の、2次成分は4極子レンズの主成分に相当する。

集束レンズの場合、近軸軌道方程式は次のようになる。

$$R'' + \frac{\phi'}{2\phi} R' + \left( \frac{\phi''}{4\phi} + \frac{eB^2}{8m\phi} \right) R = 0 \dots\dots (4)$$

ここで、 $\phi$  及び  $B$  は静電ポテンシャル及び磁束密度のフーリエ展開の0次成分、すなわち、光軸上の静電ポテンシャル及び磁束密度である。このとき、フーリエ展開成分をシミュレーションによって求める。また、収差も同様に、 $\phi$  及び  $B$  から計算される。

$\phi$  及び  $B$  を求める際、加工機では多くの場合、レンズ効果に比べて空間電荷効果は無視できるので、境界分割型計算法である表面電荷法／表面磁化法などを用いることができる。これらの手法は、領域分割型計算法に比べて精度も高く、計算時間も短い。

レンズの設計を行う際に設計の方針が立っていないければ、膨大な計算を試行錯誤的に行わなければならない、決して効率的とはいえない。このとき、レンズ形状と収差の関係が分かれば、設計の方針が立てやすい。次に、電極形状と収差の関係を解析した例として、アインツェルレンズにおける色収差の電極形状依存性解析<sup>(2)</sup>を紹介する。

アインツェルレンズとは電界レンズの一種で、3枚の電極から構成され、外側の2枚の電極電位が等しいものをいう。内側の電極と外側の電極の間で電圧を印加し、その電圧を変化させることでレンズ強度を変える。外側の電極を接地電位で利用できるため用途が広い。また、レンズの通過前後でビームのエネルギーが変化しないため、ビームの集束を加速や減速とは独立に行えるなどの利点を持つ。そのため、CRTやイオンビーム加工機などに広く用いられている。一般的

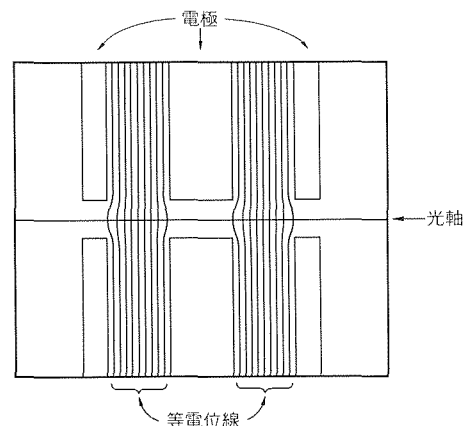


図5. アインツェルレンズ

アインツェルレンズの構成を、その等電位線とともに図5に示す。

アインツェルレンズは、色収差の電極形状依存性が明確に見出しにくいことが知られている。そこで、設計の指針を得るべく、電極形状依存性の定式化を試みた。

レンズの仕様として、倍率及び主面-像面間距離を固定するとき、色収差係数  $C_{c000}$  と焦点距離  $f$  の比がレンズの色収差特性の良否の指標となる。弱レンズ近似により、 $C_{c000}/f$  を解析的に導出すると次のようになる。

$$\frac{C_{c000}}{f} = 2 [1 - \gamma \varepsilon + o(\varepsilon^2)] \dots\dots\dots (5)$$

$$\gamma := \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \phi \phi'^2 dz}{\int_{-\infty}^{+\infty} \phi'^2 dz}$$

$$\varepsilon := \frac{\phi_m - \phi_0}{\phi_0}$$

ここで、 $\phi(z)$  はレンズの幾何形状のみから定まる関数で、レンズ界内で最大値1を持ち、無限遠で0に漸近する。また、 $\phi_0$  は入射ビームエネルギー、 $\phi_m$  はアインツェルレンズの軸上ポテンシャル  $\phi(z) = \phi_0 (1 + \varepsilon \phi(z))$  の極値である。

式(5)は、 $\gamma$  が色収差の電極形状依存性を表す可能性を示唆している。そこで、これを確認するために、二つの関数

$$\phi = \sqrt{[-z^2 + (1 - \nu) + \{z^2 - (1 - \nu)\}^2 + 4\nu]}/2 \dots\dots\dots (6)$$

$$\phi = (1 + z^2)^{-\nu} \dots\dots\dots (7)$$

を選び、 $\gamma$  をパラメータとして  $C_{c000}/f$  を数値的に計算した結果が図6である。これより、実用的なレンズ電圧範囲でも色収差の電極形状依存性は  $\gamma$  によって記述されることが分かり、色収差の低減に向けた効率的な設計の指針が得られる。

### 2.3 適正な公差の設定

実際にビーム光学系を製作する際、適正な公差の設定が重要になる。例えば、設計形状寸法に基づいて電極の加工・組立てを行っても、現実には工作誤差が生じる。ここで、誤差の管理を怠れば、誤差によって寄生ポテンシャルが生じ、そ

のために新たな寄生収差が発生し、ビームが細く絞れないなど、設計どおりのビームの性能は実現されなくなるおそれがある。逆に、ビームの性能低下を避けるため工作精度を必要以上に上げようとすると、不要な製造コストの上昇を招いてしまう。したがって、必要とされるビームの性能にかんがみ、適正な公差を定量的に把握しておくことが重要になり、ここでもシミュレーションが有用になる。

寄生収差を計算する場合、工作誤差の影響をどのように電磁界計算に反映させるかが問題となる。例えば境界分割型の計算法の場合、境界である電極形状の一部が変化すると、境界の分割自体も変わらざるを得ない。そのため、工作誤差の影響だけでなく、分割の違いに起因する誤差量を計算結果に含んでしまう。したがって、もともと微量である収差の計算に対して正確な評価ができなくなる。このような場合にも、計算精度を損なうことなく微小な電磁界の変化を評価できる計算手法として、スターロックの方法<sup>(3)</sup>が知られている。以下に、その方法を説明する。

電極表面  $r_s$  が工作誤差などにより  $r_s + \delta r$  にずれた場合、初期のポテンシャル分布を  $\Phi(r)$  とすると、寄生ポテンシャル  $\delta\Phi(r)$  は、摂動計算により、本来の電極表面  $r_s$  上で次の境界条件を満たすことが分かる。

$$\delta\Phi(r_s) = -\delta r \cdot \nabla\Phi(r_s) + o(\delta r^2) \dots\dots\dots (8)$$

したがって、 $\nabla\Phi(r_s)$  があらかじめ計算されていれば、誤差量  $\delta r$  を与えることにより、 $\delta\Phi(r)$  の満たすべき境界条件が上式によって確定する。その境界条件の下で再度ポテンシャル計算を行えば、 $\delta\Phi(r)$  だけを全空間にわたって独立に知ることができる。したがって、寄生ポテンシャルに起因する寄生収差を精度良く評価することができる。

次に、この手法を用いた8極静電偏向器における設計公差の設定<sup>(4)</sup>を紹介する。

8極静電偏向器とは、X方向偏向とY方向偏向を同一空間内で行うクロスフィールド型静電偏向器の一種であり、8個の合同形状の電極で構成されている。4極偏向器に比べ偏

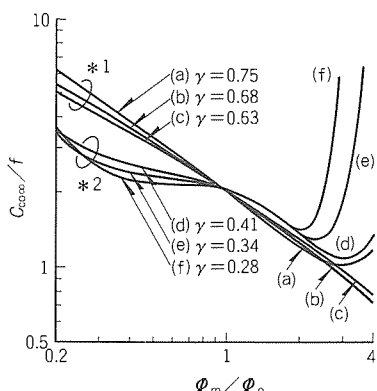


図6.  $\gamma$ による電極形状効果の違い  
\*1: (a)(b)(c)はそれぞれ式(7)で  $\nu=1/4, 1/2, 1$ としたもの。  
\*2: (d)(e)(f)はそれぞれ式(6)で  $\nu=10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ としたもの。

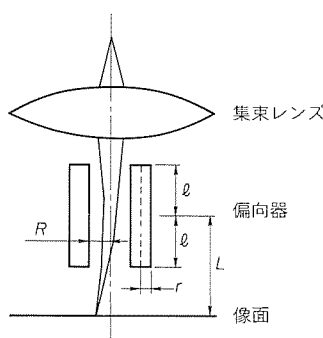


図7. 静電偏向器の構成

向電界の一様性に優れているため、大面積偏向に用いられる。

8極静電偏向器は、その構成上、軸対称レンズなどに比べて精度良く組み立てることが難しい。そのため、必要以上に厳しい公差を設定すると、コストの上昇を招きやすい典型的な例である。そこで、8極静電偏向器の適正な設計公差の導出を試みる。

図7に、静電偏向器を含んだ光学系の構成を示す。ポテンシャル分布にく(矩)形近似を用いると、主要な寄生収差は次式で表される3項である。

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{\delta r}{R} \cdot |\Psi_1|_{\max} \cdot \frac{V}{\Phi_0} \times \ell \cdot L && \text{(歪曲)}, \\ N &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\delta r}{R^2} \cdot |\Psi_2|_{\max} \cdot \frac{V}{\Phi_0} \times \ell \cdot (\ell^2 + 3 \cdot L^2) && \text{(非点)}, \\ C &= 3 \cdot \frac{\delta r}{R^3} \cdot |\Psi_3|_{\max} \cdot \frac{V}{\Phi_0} \times \ell \cdot L \cdot (\ell^2 + L^2) && \text{(四重コマ)}, \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

上式において、 $D$ 、 $N$ 、 $C$ はそれぞれわい(歪)曲、非点、四重コマ収差の係数、 $\Phi_0$ は入射ビームのエネルギー、 $V$ は偏向電圧、 $R$ は光軸と電極表面までの距離、 $2\ell$ は偏向器長、 $L$ は偏向器中心から像面までの距離、 $r$ は電極半径である。また、 $|\Psi_m|_{\max}$  ( $m=1, 2, 3$ )は、寄生ポテンシャルをフーリエ展開したときの  $m$  次成分  $\Psi_m$  の最大値である。ここで、スターロックの方法を用いて、 $|\Psi_m|_{\max}$  の値をシミュレーションによって求める。例えば、 $r/R=0.4$  とした場合の  $|\Psi_1|_{\max}$ 、 $|\Psi_2|_{\max}$ 、 $|\Psi_3|_{\max}$  の値は、それぞれ 1.12、4.12、29.5 となる。したがって、各収差係数  $D$ 、 $N$ 、 $C$  の許容値及び、パラメータ  $R$ 、 $V$ 、 $L$ 、 $\ell$ 、 $\Phi_0$  の値が決まれば、そのときの  $\delta r$  の値が最大許容工作誤差、つまり設計公差の値となる。このような手法は、部品の加工誤差、組立誤差の双方に適用でき、適正な公差の設定が可能である。

### 3. シミュレーションを用いたビーム光学系開発

これまで述べてきたような手法を用いて、我々は様々な装置におけるビーム光学系の開発を行ってきた。その一例として、シミュレーションを適用した報告例の少ない大出力電子ビーム溶接機のビーム光学系開発を紹介する。

大出力電子ビーム溶接機は、300mmにも及ぶ厚板の深い溶け込み溶接に用いられるため、長焦点のビームが得られる光学系が要求される。ビームを長焦点にするには、ビームの輝度、レンズの収差及び倍率を最適化する必要がある。このような設計要件を加味しながら、シミュレーションを用いてビーム光学系の設計・製作を行った。そ

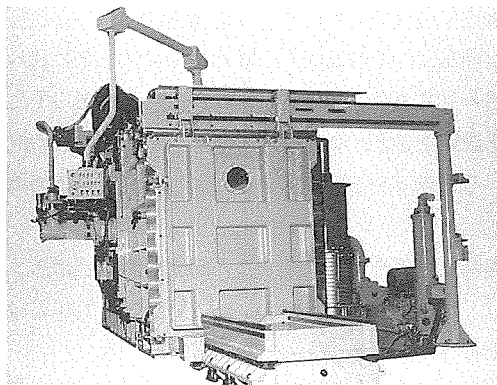


図8. 電子ビーム溶接機の外観

の光学系が搭載された大出力電子ビーム溶接機の外観を図8に、またビーム光学系構成を図9に示す。

ここで、計算どおりのビームが得られていることを確認するため、ビームプロファイルの実測<sup>(1)</sup>を行った。測定は、設計上のビームの集束点で実施した。第二集束レンズの強度を変えた場合の実測及び計算結果を図10に示す。両者はかなりよい一致を示しており、また第二集束レンズの強度変化に対し、プロファイルは小さな変化しか示していないことが分かる。このように、シミュレーションを用いれば、意図したおりのビームが実際の装置で得られる。

以上のように、シミュレーションを活用することで、高性能なビーム光学系を効率良く開発することができる。

#### 4. む す び

電子・イオンビーム加工装置の開発に用いるビーム光学系軌道シミュレーションの現状を、その適用例とともに紹介した。我々の開発したシミュレーションを用いることで、目的とするビーム特性の得られるビーム光学系を実現でき、高性能な加工装置の効率的な開発に大いに役立っている。

この論文では二次元シミュレーションを紹介したが、最近では三次元シミュレーションも実用に供されるようになってきている。三次元の最大の課題であった計算時間の短縮も、計算機の目覚ましい演算能力の向上により、着実に進んでいる。計算時間が現在の二次元のものと同程度まで短くなれば、三次元シミュレーションの活躍の場は広い。例えば、スリットからビームの引き出しを行うイオン源などのように、もともと軸対称形状を用いていない装置の最適設計や制御の最適条件の設定に用いることができる。また、従来の形にとらわれない自由な発想の装置開発にも役立つであろう。

シミュレーションがこれまでにない新しい電子・イオンビーム加工装置の誕生に寄与することを期待したい。

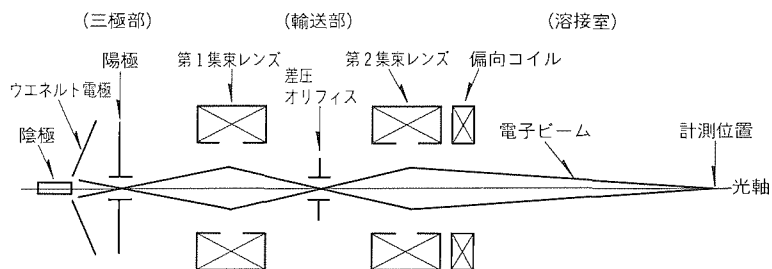


図9. 電子ビーム溶接機のビーム光学系構成

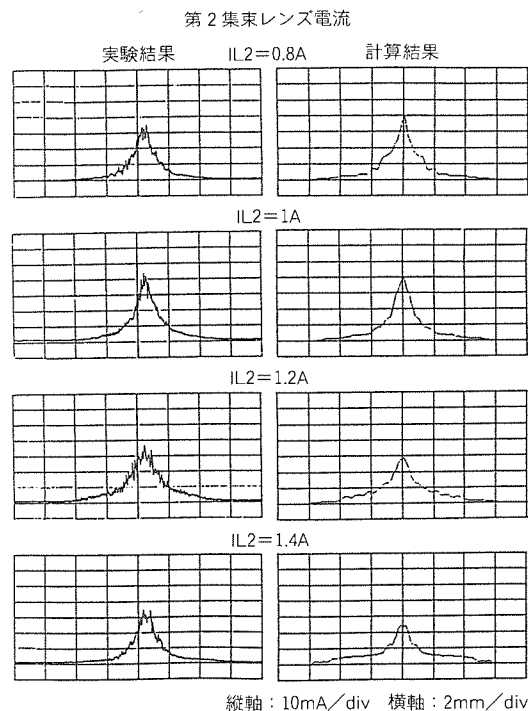


図10. ビームプロファイルの計算と実測の比較

#### 参 考 文 献

- (1) 櫻井光一, 村上英信, 山根義雄, 山本吉廣: 大出力 EB W 用電子銃のビーム軌道解析, 高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-46-91 (1991)
- (2) 久岡 靖, 尾崎敏之, 村上英信: アインツェルレンズにおける色収差の電極形状依存性, 日本学術振興会荷電粒子ビームの工業への応用第132委員会 荷電粒子光学シンポジウム第119回研究会資料, 55 ~ 58 (1991)
- (3) Sturrock, P. A.: Phil. Trans., A243, 387 (1951)
- (4) Ozaki, T., Hisaoka, H. Y., Murakami, H.: Approximation Formula for Parastic Aberrations due to Mechanical Defects of an Electrostatic Deflector, Microelectronic Engineering, 21, 217 ~ 220 (1993)

# クラスティオンビームによる 高カバレッジバリヤ膜形成

石井宏之\*  
橋本陽一\*  
山西健一郎\*

## 1. ま え が き

原子、分子を加工の単位とする成膜技術の分野では、微視的な視点からの現象解明とその制御が基本となる。近年のコンピュータの飛躍的な進歩に伴い、これらの粒子の振舞いを微視的に計算することが可能になり、膜の構造（原子配列）や基板との界面における安定構造計算など、多数の研究結果が報告されている<sup>(1)(2)</sup>。

本稿では、微細化・立体化の進む半導体へのバリヤ膜形成技術を取り上げ、開発した膜のたい（堆）積形状シミュレーションの概要と、これを適用した ICB プロセス及び装置について述べる。

## 2. シミュレーション

### 2.1 デバイスの構造及びバリヤ膜に対する要求

図1にメモリデバイスの断面模式図を示す。高集積化が進む先端的なメモリデバイスでは、必要なメモリ容量を確保するためにその構造が立体化してきている。このため、配線層とシリコン基板を電気的に接続するコンタクトホールは、より細くなるうえ深くなって、そのアスペクト比（ホールの直径に対する深さの比）は格段に大きくなってきている。このコンタクトホールの底部には、窒化チタン（TiN）などの拡散防止用バリヤ膜が必要であるが、例えば次世代DRAMではアスペクト比が4となり、従来のスパッタ成膜法では必要なボトムカバレッジ率（平たん部の膜厚に対するコンタクト

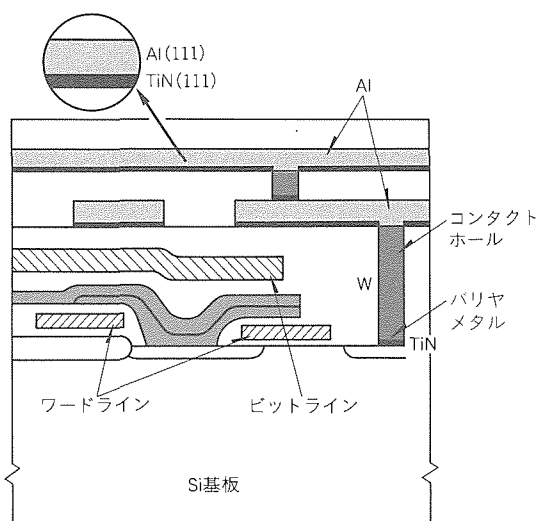


図1. メモリデバイスの断面模式図

ホール底部の膜厚の比)の確保が困難になってきている。またこの際、バリヤ膜の膜質面では、この上に形成する配線膜の耐マイグレーション性を確保するため、結晶配向を(111)に制御することも必要となる。そこで、このようなバリヤ膜に対する要求を念頭において、ボトムカバレッジ率確保に必要なプロセス要件を明らかにするために物理成膜における膜堆積形状シミュレーション技術を開発した。

### 2.2 シミュレーションモデル

図2に物理成膜プロセスの概念を示す。物理成膜プロセスは、大きく次の三つのステップに分けることができる<sup>(3)</sup>。

- (1) 熱やスパッタによる粒子の発生
- (2) 蒸発源から基板への粒子の輸送
- (3) 基板上での粒子の堆積による膜成長

それぞれのステップにおいて、コンタクトホールへのカバレッジ性に影響を及ぼす因子を表1に示す。表中で、発生粒子の出射角度分布とは、図2の右下に示すように、蒸発源の任意の一点から粒子が蒸発する際の蒸発方向と基板の法線との角度の分布を表し、これが広いと粒子はあらゆる方向へ飛び出すことになり、狭いと粒子は基板の法線方向に優先的に飛び出すことになる。また、付着確率は、基板上又は膜上に到達した粒子が反射や再蒸発することなく堆積して膜を形成する確率を表す。さらに、表面マイグレーションは、基板上に到達した粒子が表面上を移動する現象である。

表1には、計算上の取扱いについても示しておいた。付着確率は1とし<sup>(1)</sup>、表面マイグレーションは全く起こらないとした。残る因子は計算パラメータとして取り扱った。

それらの因子のうち、粒子同士の衝突・散乱を無視すれば、

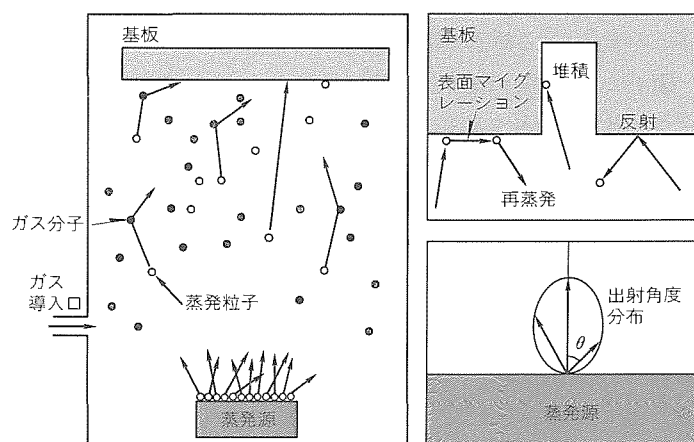


図2. 物理成膜の原理

表 1. 成膜因子とシミュレーション中での取扱い

ステップ	因 子	シミュレーション中での取扱い
粒子発生	出射角度分布	$f(\theta) = \cos^n \theta$ の形で近似して $n$ を計算パラメータとする。
	蒸発源の大きさ	直径 $D$ (mm) を計算パラメータとする。
	蒸発源 - 基板間距離	$L$ (mm) を計算パラメータとする。
粒子輸送	粒子の衝突確率	$\lambda$ (mm) を粒子の平均自由行程として $g = 1 - \exp(-L/\lambda)$ で近似する。
膜 堆 積	付 着 確 率	1 に固定
	表面マイグレーション	起こらない。

すなわち超高真空中での成膜の場合、蒸発源における出射角度分布、及び蒸発源の大きさに対する蒸発源 - 基板間距離の比  $L/D$  がボトムカバレッジ率に及ぼす影響について定性的に考察することができる。図 3 に粒子の出射角度分布と  $L/D$  が基板中心に位置するホールのボトムカバレッジ率に及ぼす影響を示す。スパッタ法のように  $L/D$  の値が小さい場合(図 (a))、出射角度分布が広がれば、蒸発源の端部近傍から大きな出射角度を持った粒子が多数基板中心のホールに到達することになるが、これらは角度が大きいためホール底部まで到達できず、平坦な部やホールの側壁に堆積するため、ボトムカバレッジ率は低くなる。これに対し、出射角度分布が狭ければ、蒸発源端部から基板中心に到達する粒子の寄与が減少し、基板に対して垂直に入射する粒子の割合が増加するため、ボトムカバレッジ率は高くなる。また、図(b)に示すように  $L/D$  を大きくすると、出射角度分布が大きい場合でも基板中心のホールへ大きな角度を持って入射する粒子が少なくなるため、基板に対して垂直に入射する粒子の割合が増え、ボトムカバレッジ率は高くなる。

超高真空中での成膜であれば以上のように幾何学的にその傾向を考察することができるが、スパッタ法のように放電ガスを導入する成膜法や、TiN などの化合物膜形成のように窒素などの反応性ガスを導入する場合には、それらのガス分子との衝突による粒子の散乱を考慮しなければいけない。

図 4 にこの衝突・散乱を考慮にいたしたシミュレーションモデルと計算の流れを示す。まず、蒸発源の大きさ  $D$ 、蒸発源 - 基板間距離  $L$ 、成膜室の真空度(ガス圧力)  $P$ 、及び出射角度分布  $f(\theta)$  を入力する。ここで、出射角度分布  $f(\theta)$  は、次式に従うものとし、

$$f(\theta) = A \cdot \cos^n \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

べき数  $n$  を入力することにより、出射角度分布を規定するものとする。例えば、スパッタ法の場合は、ほぼ  $n = 1$  (余弦分布)<sup>(4)</sup>と考えるとよく、 $n$  が大きくなるにつれて出射角度分布は狭くなっていく。なお、式(1)中の  $A$  は規格化定数である。

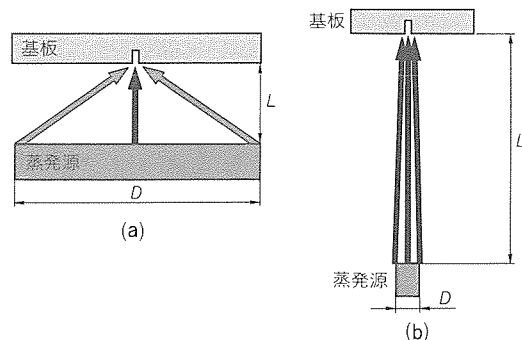


図 3. ボトムカバレッジ率に対する幾何学的考察

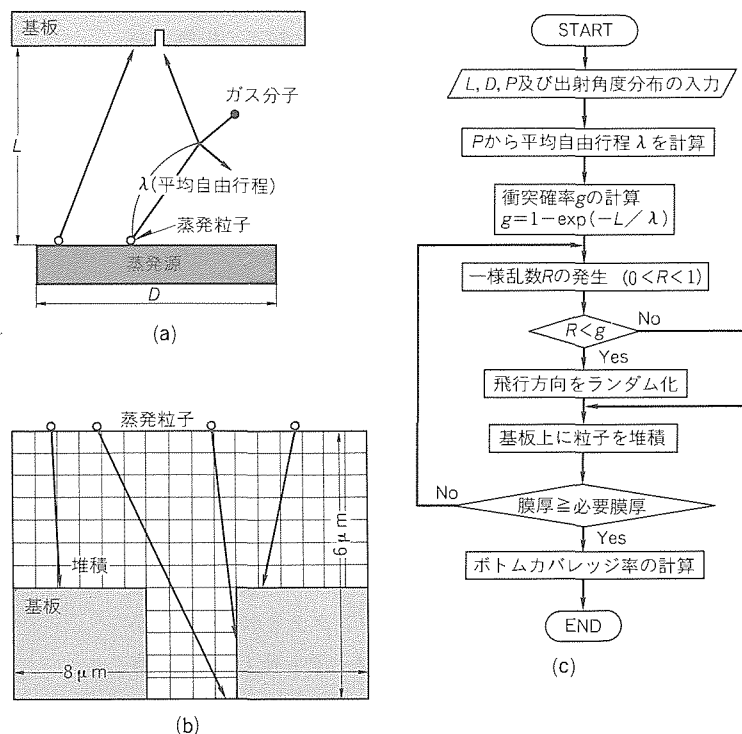


図 4. シミュレーションモデルとそのフロー

次に、粒子とガス分子との衝突に対しては、粒子が基板に到達するまでにガス分子と衝突する確率を  $g$  とし、次式で近似する<sup>(5)</sup>。

$$g = 1 - \exp(-L/\lambda) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\lambda$  は粒子の平均自由行程と呼ばれる距離であり、これは粒子がガス分子などの他の粒子に衝突することなく飛行することができる距離の平均値である。式(2)から求められる衝突確率  $g$  とコンピュータで発生させた一様乱数  $R$  ( $0 < R < 1$ ) との大小により、衝突の有無を各々の粒子について判断した。この判定により、衝突した粒子の飛行方向をランダム化して基板へ入射させた。

その後の基板上での粒子の堆積形状計算については、図 4 (b)に示すように、コンタクトホール 1 個を含む微小領域 ( $8 \times 6 \mu\text{m}$ ) を取り出し、メッシュ ( $0.02 \times 0.02 \mu\text{m}$ ) に切って計算を行った。通常の物理成膜における粒子の平均自由行程  $\lambda$  はこの微小領域の大きさに比べて十分長いので、この微小領域内での粒子の衝突・散乱は考慮しなくてよい。具体的に

は、個々の粒子を微小領域の上辺の任意の位置に発生させ、前段で計算した出射角度でメッシュ上を基板、又は既に堆積した膜に到達するまで移動させる。到達した位置のメッシュを膜と認識させることで形成される膜の形状をシミュレートすることができる。一つのメッシュを膜と認識させるのに、1メッシュ当たりには到達する粒子の個数を10個程度以上とすればそれ以上に増やしても堆積する膜形状にはほとんど変化がみられないことから、この論文では10個に統一して計算した。

以上の計算を膜厚が所定の値になるまで繰り返すことにより、コンタクトホール上への膜の堆積形状を求め、その形状をもとにしてボトムカバレッジ率の計算を行った。

## 2.3 シミュレーション結果

図5にボトムカバレッジ率に及ぼす粒子の出射角度分布と真空度(ガス圧力)の影響を示す。計算は大面積蒸発源、すなわちスパッタ法の幾何学的条件で行い、図中には現実にはスパッタ法での成膜可能な領域を示した。出射角度分布は $n=1$ (通常スパッタ法)、 $n=10$ 、 $n=\infty$ (平行ビーム)の3条件で行った。いずれの出射角度分布においても、真空度が高くなるほど(ガス圧が低くなるほど)ボトムカバレッジ率が向上していくことが分かる。しかし、スパッタ法のように出射角度分布が広い成膜法では、たとえ超高真空にして粒子の衝突を無くしても、ボトムカバレッジ率の向上はほとんど期待できないことが分かる。これに対し、出射角度分布の狭い成膜法を用いれば、真空度を高くし、粒子の衝突・散乱を抑制することによってボトムカバレッジ率を大幅に改善させることができると考えられる。しかし、現実には大面積で出射角度分布の狭い蒸発源は存在しない。

これに対して、蒸発源-基板間距離 $L$ を大きくして、さらに蒸発源の大きさ $D$ を小さくすれば、すなわち $L/D$ を大きくすれば、前述したように基板に対して見掛け上平行ビ

ームと同様の効果を得ることができると考えられる。このような $L/D$ の非常に大きな成膜法としてICB(Ionized Cluster Beam)法が挙げられる。ICB法は、蒸発源としてノズルを持つるつぼを用いており、指向性の高いビームを取り出すことができるため、成膜効率を高く保ったまま $L/D$ を大きくとることができる。また、高真空を保ったまま成膜することができるため、粒子の散乱を抑えることが容易であり、ボトムカバレッジ率の高い成膜法として非常に有望であると考えられる。

そこで、このICB法の可能性を定量的に検討するために、ICB法を用いた場合のボトムカバレッジ率の計算を行った。結果を図6に示す。横軸はホールのアスペクト比であり、スパッタ法の結果も同時に示した。なお、真空度はICB法で $1 \times 10^{-2}$  Pa、スパッタ法では1 Paとして計算した。スパッタ法では、アスペクト比の増大とともに急激にボトムカバレッジ率は低下するが、ICB法ではアスペクト比の増大に

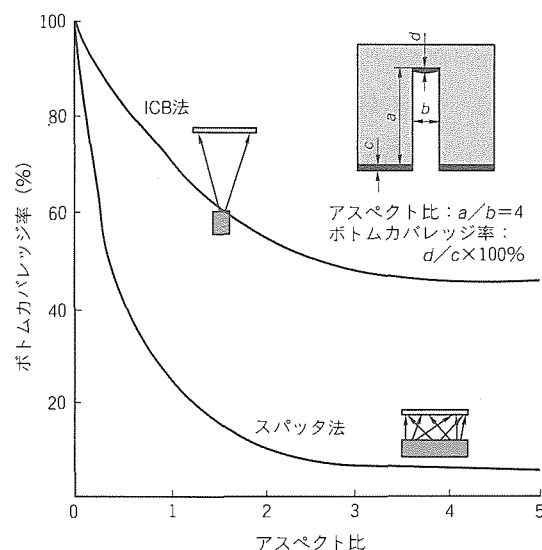


図6. ボトムカバレッジ率とアスペクト比の関係

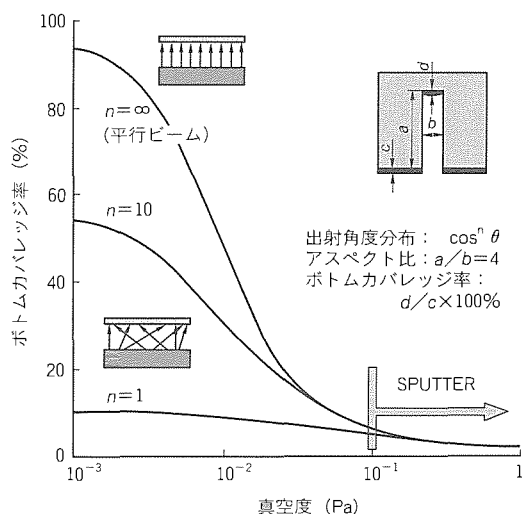


図5. ボトムカバレッジ率に及ぼす出射角度分布及び真空度の影響

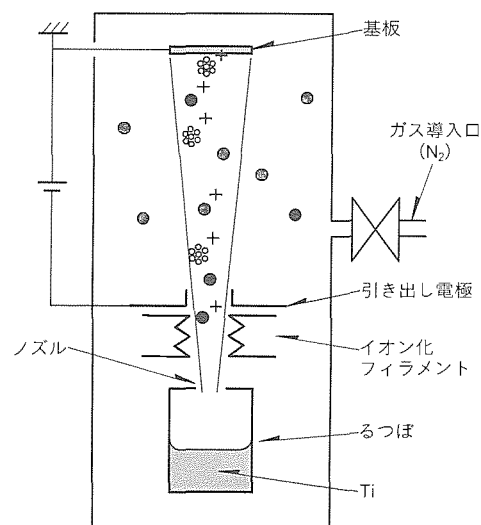


図7. ICB装置の原理

対して緩やかな低下を示し、アスペクト比が4を超えても40%程度のカバレッジ率を確保できることが示唆される。

### 3. 実験結果及び考察

次に、以上のICB法に関する計算結果をもとに、実験による検討を行った。図7にICB装置の原理を示す。電子線の照射によって加熱されたるつぼ中でTiが溶融・蒸発し、Ti蒸気によってるつぼ内圧は上昇する。ノズルから噴出したTi粒子は、断熱膨張してクラスタを形成する。Ti粒子はその後、るつぼ上に設置されたイオン化フィラメントからの電子線照射により、一部がイオン化して加速電極によって基板に向かって加速され、基板上で膜を形成する。今回取り上げたTiNのような化合物膜の形成では、成膜時に窒素などの反応性ガスを成膜室内に導入する。このとき、ガス分子もフィラメントからの電子線照射により、一部イオン化されて基板に入射し、基板表面でTi粒子と反応して化合物膜を形成する。

ボトムカバレッジ率の評価に当たって、ここではアスペクト比4のホールを持った酸化膜付きシリコンウェハを用い、ICB法によってTiN膜を形成した。実験に際して、基板温度は473K、加速電圧は1kVとした。前述のシミュレーション結果から、ボトムカバレッジ率を向上させるためには、できるだけ低いガス圧で成膜を行うことが要求される。ここでは十分なボトムカバレッジ率が得られると考えられる $1 \times 10^{-2}$ Paに固定して成膜を行った。コンタクトホール内の膜堆積形状は、ホール断面のSEM観察によって評価した。

図8に実験結果と計算結果を示す。ICB法とともにスパッタ法の結果も併せて示した。断面SEM像による評価から、スパッタ法では3%以下と極めて低いボトムカバレッジ率であるのに対して、ICB法ではその10倍以上の40%と非常に高いボトムカバレッジ率を達成していることが分かる。この

結果はシミュレーション結果とも比較的よい一致を示しており、ICB法が高ボトムカバレッジ成膜に適した成膜法であることを実験によっても示すことができた。

ところで、TiNは、先に述べたように、Tiの蒸気とイオン化した窒素ガスとの基板上での反応によって形成される。このため、低い窒素ガス圧では膜の組成がTiNにならない、又は膜の結晶性が所望の(111)方向にそろわないといったことが危く(惧)される。そこで、化合物膜の形成に有効であることが報告<sup>(6)</sup>されている成膜中のイオン照射に関して検討を加えるため、基板への入射イオン電流密度を変化させ、イオン電流が結晶性に及ぼす効果について調べた。膜の結晶性はX線回折装置によって評価した。図9にX線回折の結果を示す。ここでは、前述の、高いボトムカバレッジ率を示した真空度( $P = 1 \times 10^{-2}$ Pa)において、蒸着Ti量に対するイオン電流量( $J_{\text{ion}}/J_{\text{Ti}}$ )をパラメータとしたときの結晶性の変化を調べた。イオン照射がない場合は、Tiのピークのみが検出され、窒化がほとんど行われていないことが分かる。これに対し、イオンを照射すると、低い窒素ガス圧においてもTiNのピークが検出されるようになる。照射イオン量が少ないと(111)ピークとともに(200)ピークが明瞭に認められるが、イオン量を多くするに従い、(111)ピークのみになっていくことが分かる。このように、照射イオン量の増加によって安定な成長方位である(200)面<sup>(7)</sup>にかわって、(111)面の成長が優先されることが分かった。すなわち、これはイオンの効果によるものであると考えられ、ICB法では高いボトムカバレッジ率を得る低い窒素ガス圧条件下でも、TiNの結晶方向を(111)に制御できることが明らかになった。

以上、シミュレーション及び実験を通じて明らかになったプロセス要件をもとに、半導体バリア膜形成用ICB装置を

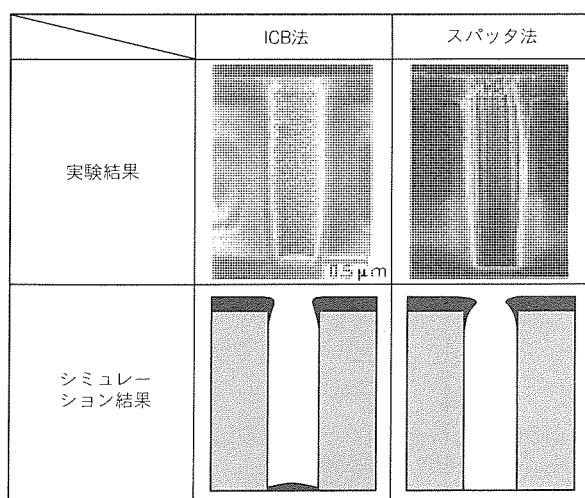


図8. 実験とシミュレーションによるカバレッジの比較 (アスペクト比4)

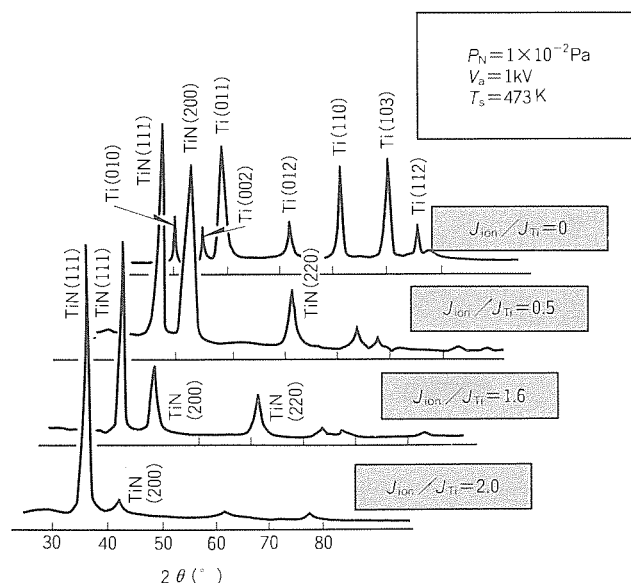


図9. TiN膜の結晶配向に及ぼすイオンの効果

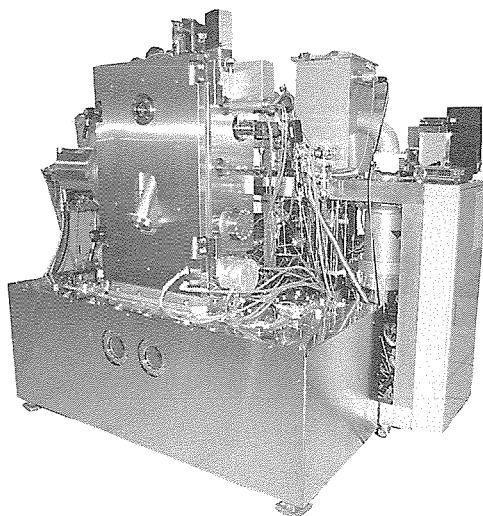


図10. 半導体バリヤ膜形成用ICB装置の外観

開発した。その外観を図10に示す。この装置は、基板の自動搬送システム及び蒸発源の自動交換システムを持ち、量産機能を備えたものである。

#### 4. む す び

高アスペクト比のコンタクトホールに対する膜堆積形状シミュレーションの概要と、これをもとに開発したバリヤ膜形成用ICB技術の概要について述べた。この中で、高いアスペクト比を持つコンタクトホール底部に対し、高いボトムカバレージ率でバリヤ膜を形成させるための必要条件は、①出射角度分布を狭くするか、又は蒸発源の大きさ $D$ に対する蒸発源-基板間距離 $L$ の比( $L/D$ )を小さくし、かつ、②平均自由行程 $\lambda$ が蒸発源-基板間距離 $L$ と同程度以上となるような高真空中で成膜を行う、ことであることを示した。

このシミュレーション結果に基づき、それらの必要条件を満たしたバリヤ膜形成ICB法により、従来スパッタ法の10倍以上のボトムカバレージ率を得ることができた。さらに、結晶方向を必要な(111)方向にそろえられることも併せて示した。今後の更なるメモリの大容量化に伴うアスペクト比の増大に対しても十分に対応できるものと考えている。

#### 参 考 文 献

- (1) Brett, M. J.: Structural Transitions in Ballistic Aggregation Simulation of Thin-film Growth, J. of Vac. Sci. Technol. A, **6**, No.3, 1749~1751 (1988)
- (2) 香山正憲, 山本良一: 金属・セラミック接合界面の結合状態計算, 日本金属学会会報, **29**, No.11, 893~901 (1990)
- (3) Bunshah, R. F., Deshpandey, C. V.: Evaporation Processes, MRS Bulletin, 33~39 (1988-12)
- (4) 早川 茂, 和佐清孝: 薄膜化技術, 共立出版, 78~81 (1982)
- (5) 堀越源一: 真空技術, 東京大学出版会, 8~12 (1976)
- (6) Takagi, T.: Role of Ions in Ion-based Film Formation, Thin Solid Films, **92**, 1~17 (1982)
- (7) Hilton, M. R., Narasimhan, L. R., Nakamura, S., Salmeron, M., Somorjai, G. A.: Composition, Morphology and Mechanical Properties of Plasma-assisted Chemically Vapor-deposited Ti N Films on M2 Tool Steel, Thin Solid Films, **139**, 247~260 (1986)



# “MELFANET 1000”による 商品受注自動化システム

洪川一衛\* 朝倉耕一\* 栗生田悦子\* 岡田康裕\*\* 只野裕次\*\*\*

## 1. ま え が き

ファクシミリは、送信元から入力した文書や図表・写真などのイメージデータを、そのまま送信先に出力できる情報通信機器である。見方を変えると、ファクシミリは、イメージスキャナという入力装置、モデムという通信制御装置、プリンタという印字装置をもつ端末であり、計算機の端末装置としての資質を備えている。このファクシミリのもつポテンシャルを十二分に引き出したFAX情報集配信装置“MELFANET 1000”による商品受注自動化システム(以下“本システム”という。)を開発し、第1号システムとして当社の商品販売会社である(株)三菱電機ライフテック関越に納入し、平成5年8月から稼働を開始した。

販売店からの商品注文は、指定の注文用紙(OCRシート)に形名・数量などの必要事項を記入し、販売店のファクシミリから本システムに注文用紙を送信する。本システム内で受注処理が自動的に行われ、その結果として、納期回答書が販売店のファクシミリに自動出力される仕組みである。

## 2. MELFANET 1000の構成と機能

### 2.1 システム構成

MELFANET 1000は、ファクシミリと計算機を接続するための通信機器で、本システムの中核を担っている。FAX情報集配信装置は、元来、多回線同報による通信効率向上や拠点間接続による通信費削減を目的として開発された装置である。ところが、最近ファクシミリとコンピュータシステムとの接続ニーズが高まり、ホストコンピュータ上で作成した帳票データを直接ファクシミリに配信したり、ファクシミリのダイヤルボタンからデータベース検索指示を行うシステム事例が増加している。

本システムでは、MELFANET 1000に新規開発のFAX-OCR装置を内蔵し、OCRシートに記入した手書き文字の文字認識処理を行うことにより、ファクシミリからホスト

コンピュータへのデータ入力を可能としている。また、ホストコンピュータで受注処理した結果を帳票データとしてMELFANET 1000が受け取り、イメージデータに変換した上で販売店のファクシミリへの配信を行っている。

また、文字認識処理を行うFAX-OCR装置は、入力装置としてファクシミリを使用することを前提として新規開発されたものであり、ファクシミリ画像特有の“かすれ”“つぶれ”に強いアルゴリズムを採用し、認識率の低下を防止している。

### 2.2 文字読取機能

既存のG3FAXを画像入力装置とするFAX-OCRは、イメージスキャナ入力のOCRに比べ、“つぶれ”“かすれ”など品質の悪い文字を入力対象とするため、下記の技術的課題があった。

#### (1) 低解像度画像に対する認識

手書き文字を認識する一般の帳票OCRは、8本/mm以上の解像度で入力された画像を認識する。これに対してFAX-OCRでは、図1に示すようなG3FAXから入力された7.7本/mm(ファインモード)又は、3.85本/mm(スタンダードモード)の解像度で入力された粗い画像を認識する必要がある。

#### (2) 2値・傾斜画像に対する認識

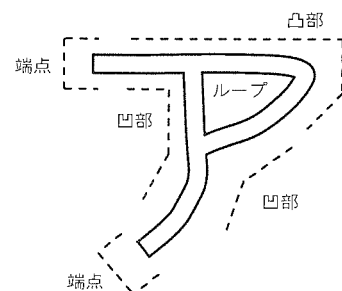


図2. 輪郭解析法の特徴抽出

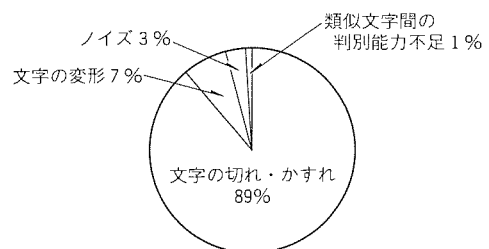


図3. 輪郭解析法における誤読・棄却原因



ファインモードでの画像    スタンダードモードでの画像  
(同一文字を入力)

図1. FAXから入力した画像の例

従来の帳票 OCR では、多値の画像を入力とし、アライナなどによって帳票の傾斜を防止する専用のイメージリードを採用している。これに対して FAX-OCR では、2 値で傾いて入力される画像を認識する必要がある。

上記のような特性をもつ FAX 入力画像に対して、従来の帳票 OCR で用いた方式をそのまま適用したのでは、十分な認識精度が得られない。そこで今回、従来の帳票 OCR で用いていた方式の改良を行い、FAX 入力画像に適した認識方式を開発した。

### 2.2.1 従来手法

当社の帳票 OCR (M 6560 イメージ OCR 装置など) の手書き文字認識には、輪郭解析法<sup>(1)</sup>を適用している。輪郭解析法では、まず図 2 に示すように文字パターンの輪郭を追跡し、端点・凸部・凹部・ループの位置・大きさ・方向・形状などを特徴として抽出する。次に、特徴抽出処理で抽出した特徴値と辞書に登録した基準パターンに対する特徴値との整合を行う。そして、階層的に順次候補文字を絞り込むことにより、文字の識別を行う。

この輪郭解析法は、文字の構造的な特徴を抽出するため、

- 文字の変形・位置ズレに対して柔軟な照合が可能
- 文字の局所的な特徴の抽出が可能 (ク, ワ, 7 などの類似文字の識別に有利)

などの特長がある。

しかし、反面では、

- 文字の切れ、かすれ、つぶれ、ノイズに弱い
- 認識辞書設計に多大な労力と時間が必要

などの問題点がある。

輪郭解析法を用いて、G3 FAX から入力した手書き数字

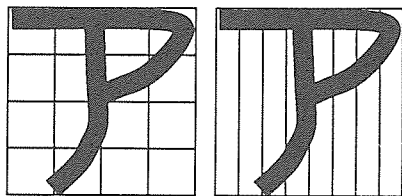


図 4. 領域分割の例

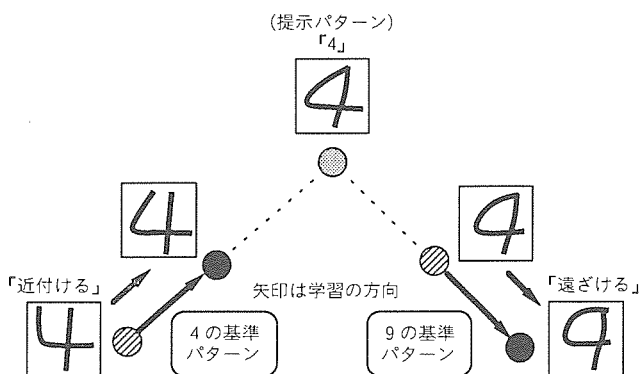


図 5. LVQ2の動作概要

に対して認識評価を行い、誤読・棄却の原因について分析した結果を図 3 に示す。この結果、画像に“切れ”“かすれ”がある文字に対策が必要であることが分かった。

### 2.2.2 改良手法(大局的特徴の利用)

画像に“切れ”“かすれ”がある文字の認識には、文字の局所的な特徴を用いるよりも、大局的な特徴を用いた方が有利である。このため、図 4 のように文字を幾つかの部分領域に分割し、各部分領域ごとに文字線の方向性、周辺領域の分布特性の特徴をとらえる大局的特徴整合法を用いた。

大局的特徴整合法の適用により、画像に“切れ”“かすれ”のある文字の認識が可能になった。

### 2.2.3 ニューラルネットワークによる認識辞書設計

前項で述べた大局的特徴整合法において、類似文字の識別能力を高めるため、基準パターン(認識辞書)設計にニューラルネットワークで用いられる学習法を適用した。具体的には、印刷漢字認識で効果が確認されている LVQ2 (Learning Vector Quantization2) 手法<sup>(2)</sup>を用いた。

図 5 に LVQ2 の学習 (文字を認識するための基準パターン作成) 時における動作概念を示す。あらかじめ用意した多数の文字パターンを一つずつ提示し、個々のカテゴリの基準パターンと距離計算を行い、正しい認識結果が得られない場合に基準パターンを変更する。基準パターンの変更は、次のように行う。

- (1) 正解の基準パターン (図 5 の場合“4 の基準パターン”) は、提示したパターンとの距離が小さくなる (類似する) ように変更する。
- (2) 間違った相手の基準パターン (図 5 の場合“9 の基準パターン”) は、提示したパターンとの距離が大きくなる (類似しない) ように変更する。

次に、文字の濃淡の分布を入力特徴としたときの手書き数字における学習結果の一例を図 6 に示す。内部が黒の正方形は文字線が存在しなければならない領域、内部が白の正方形は文字線が存在してはいけない領域を示し、正方形の大きさは白と黒それぞれの強さの度合いを示す。図において“3 の基準パターン”の左上の部分は内部が白の大きな正方形が存

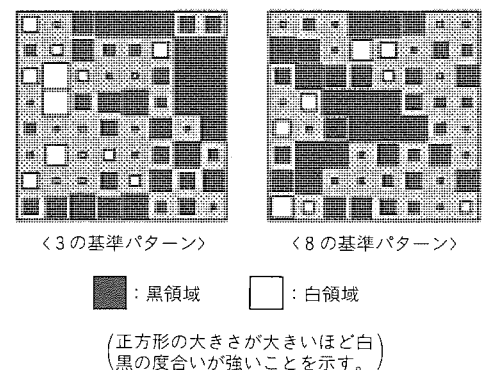


図 6. 学習後の基準パターン例

在し、“3”と“8”の違いを強調するように学習が行われていることが分かる。

この手法を大局的特徴の認識辞書作成に適用することにより、文字線の“切れ”“かすれ”の存在する類似文字同士の識別が可能になる。

## 2.2.4 輪郭解析法と大局的特徴整合法の併用

FAX-OCRでは、2.2.1項で述べた輪郭解析法と2.2.2項及び2.2.3項で述べた大局的特徴整合法の双方の特長を生かすため、二つの方式の併用を行った。これにより、変形した文字、類似した文字、文字線の“切れ”“かすれ”のある文字の認識が可能になった。図7に認識できる文字パターンの例を示す。

## 2.3 単語知識機能

OCRシートへの記入項目には、数量・金額といった数字を記入する項目のほかに、品名・製品コード・地名・店名など、記入される単語が限定されるケースがある。このように記入される単語が限定される場合、記入される単語をあらかじめ単語辞書に登録することによって認識精度を改善することができる。この処理を単語知識処理という。単語知識処理の概要を図8に示す。

単語知識処理では、1文字単位の認識候補文字を用いて、

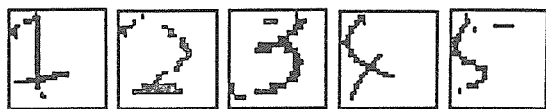


図7. 手書き数字認識で認識可能な文字の例

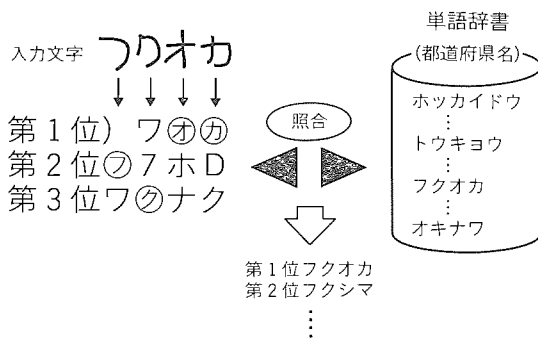


図8. 単語知識処理の概要

あらかじめ用意した単語辞書の各単語と照合を行う。具体的には、単語を構成する文字が認識候補文字中に存在するか否かを検定し、単語としての距離を算出する。そして、この距離が最も小さい(認識候補文字の上位の組合せで構成される)単語を認識結果として決定する。

さらに、類似した単語が多数存在する場合や単語辞書に存在しない単語が記入される場合において、記入された文字を単語辞書内の単語に強引に合わせてしまうといった単語知識処理による誤読を低減する目的で、下記の対策を行っている。

### (1) 棄却調整機能の付加

類似した単語の割合、誤記入の発生頻度などに応じて棄却の度合いを調整し、システムごとに最適な棄却設定ができるようにしている。

### (2) 誤読抑制処理の適用

単語を構成する文字が、1文字単位の認識候補文字中に存在せず認識候補文字と極端に字形の異なる文字である場合に、文字の置き換えを抑制する。これにより、単語辞書に登録された単語に類似した未登録単語が記入された場合の誤読を防止している。

## 3. 商品受注自動化システム

### 3.1 システム構成

システムの全体構成を図9に示す。システムは、三菱電機量販品販売物流情報システム“MOLDIS”のホストコンピュータ、(株)三菱電機ライフテック関越はゲートウェイ用“MELCOM80”と新たに設置したMELFANET 1000、販売店での既設のG3ファクシミリ、によって構成される。手書き文字認識は、MELFANET 1000に内蔵したFAX-OCR装置がその処理を行っている。

本システムは、MOLDISにおいて(株)三菱電機ライフテック関越の端末からキー入力していた部分を、販売店のファクシミリから指定の注文用紙(OCRシート)で入力する形態にしたものである。本システムを導入していない商品販売会社では、従来システムをそのまま使用しており、MOLDIS上で本システムと従来システムが同居している。

MELFANET 1000は、内蔵した新規開発のFAX-OCR装置がCORシートに記入した手書き文字の文字認識処理を

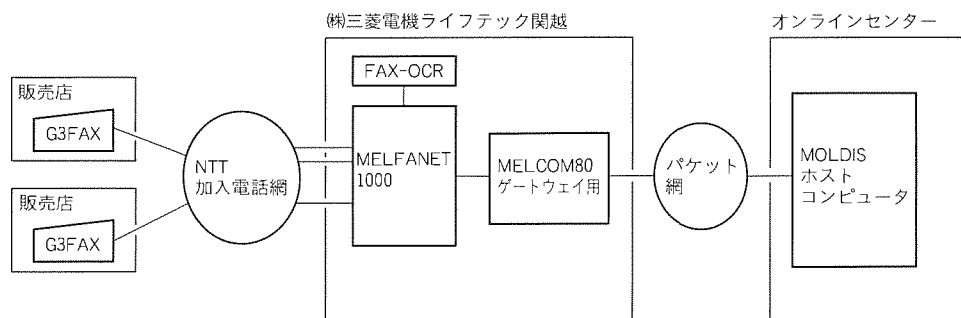


図9. FAX-OCR商品受注自動化システムの全体構成

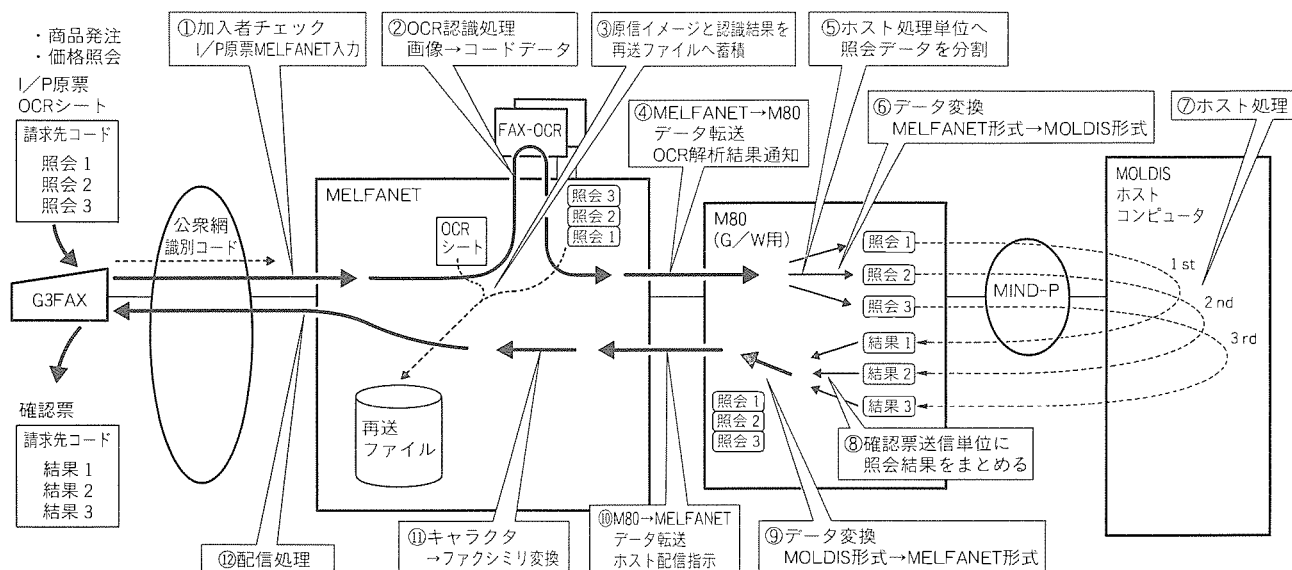


図10. 商品受注／在庫照会処理の流れ

行うことにより、ファクシミリからMOLDISホストコンピュータへのデータ入力を可能としている。また、MOLDISホストコンピュータで受注処理した結果を帳票データとしてMELFANET 1000が受け取り、イメージデータに変換した上で販売店のファクシミリへ配信を行っている。

MELCOM 80は、MOLDISにおいて商品販売会社側の端末システムとしてホストコンピュータと接続している。MELFANET 1000をMELCOM 80に接続することにより、MOLDIS側インタフェースを何ら変更することなく、従来の運用とFAX-OCRによる入力を併用することが可能となった。MELCOM 80との入出力データフォーマットを同一としたことで、MOLDISホストコンピュータにおけるFAX-OCR対応の開発分はなかった。

また本システムでは、販売店のファクシミリから受信した文字認識処理した結果、認識できない文字が存在した場合は、MELCOM 80に接続したコンソールから認識データの修正を行っている。これも従来の端末入力の方法と同様にできるように考慮した。

## 3.2 システム機能

### 3.2.1 受注／在庫照会

本システムは、販売店のファクシミリから、商品の注文及び在庫照会を行うことができる。一連の処理の流れを図10に示す。注文及び在庫照会は、必要事項を指定の注文用紙(OCRシート、図11)に記入しMELFANET 1000にファクシミリ送信する。MELFANET 1000は、受信したOCRシートのイメージデータを文字認識処理し、MELCOM 80経由でMOLDISホストコンピュータに処理要求を投入する。MOLDISホストコンピュータで処理された注文及び在庫照会の結果は、MELCOM 80経由でMELFANET 1000に転送され、キャラクタ→ファクシミリ変換の後、販売店のファクシミリに帳票イメージで印字出力される(図12)。

⑤

⑥

⑦

⑧

⑨

⑩

⑪

⑫

⑬

⑭

⑮

⑯

⑰

⑱

⑲

⑳

㉑

㉒

㉓

㉔

㉕

㉖

㉗

㉘

㉙

㉚

㉛

㉜

㉝

㉞

㉟

㊱

㊲

㊳

㊴

㊵

㊶

㊷

㊸

㊹

㊺

㊻

㊼

㊽

㊾

㊿

㋀

㋁

㋂

㋃

㋄

㋅

㋆

㋇

㋈

㋉

㋊

㋋

㋌

㋍

㋎

㋏

㋐

㋑

㋒

㋓

㋔

㋕

㋖

㋗

㋘

㋙

㋚

㋛

㋜

㋝

㋞

㋟

㋠

㋡

㋢

㋣

㋤

㋥

㋦

㋧

㋨

㋩

㋪

㋫

㋬

㋭

㋮

㋯

㋰

㋱

㋲

㋳

㋴

㋵

㋶

㋷

㋸

㋹

㋺

㋻

㋼

㋽

㋾

㋿

㌀

㌁

㌂

㌃

㌄

㌅

㌆

㌇

㌈

㌉

㌊

㌋

㌌

㌍

㌎

㌏

㌐

㌑

㌒

㌓

㌔

㌕

㌖

㌗

㌘

㌙

㌚

㌛

㌜

㌝

㌞

㌟

㌠

㌡

㌢

㌣

㌤

㌥

㌦

㌧

㌨

㌩

㌪

㌫

㌬

㌭

㌮

㌯

㌰

㌱

㌲

㌳

㌴

㌵

㌶

㌷

㌸

㌹

㌺

㌻

㌼

㌽

㌾

㌿

㍀

㍁

㍂

㍃

㍄

㍅

㍆

㍇

㍈

㍉

㍊

㍋

㍌

㍍

㍎

㍏

㍐

㍑

㍒

㍓

㍔

㍕

㍖

㍗

㍘

㍙

㍚

㍛

㍜

㍝

㍞

㍟

㍠

㍡

㍢

㍣

㍤

㍥

㍦

㍧

㍨

㍩

㍪

㍫

㍬

㍭

㍮

㍯

㍰

㞀

㞁

㞂

㞃

㞄

㞅

㞆

㞇

㞈

㞉

㞊

㞋

㞌

㞍

㞎

㞏

㞐

㞑

㞒

㞓

㞔

㞕

㞖

㞗

㞘

㞙

㞚

㞛

㞜

㞝

㞞

㞟

㞠

㞡

㞢

㞣

㞤

㞥

㞦

㞧

㞨

㞩

㞪

㞫

㞬

㞭

㞮

㞯

㞰

㞱

㞲

㞳

㞴

㞵

㞶

㞷

㞸

㞹

㞺

㞻

㞼

㞽

㞾

㞿

㟀

㟁

㟂

㟃

㟄

㟅

㟆

㟇

㟈

㟉

㟊

㟋

㟌

㟍

㟎

㟏

㟐

㟑

㟒

㟓

㟔

㟕

㟖

㟗

㟘

㟙

㟚

㟛

㟜

㟝

㟞

㟟

㟠

㟡

㟢

㟣

㟤

㟥

㟦

㟧

㟨

㟩

㟪

㟫

㟬

㟭

㟮

㟯

㟰

㟱

㟲

㟳

㟴

㟵

㟶

㟷

㟸

㟹

㟺

㟻

㟼

㟽

㟾

㟿

㠀

㠁

㠂

㠃

㠄

㠅

㠆

㠇

㠈

㠉

㠊

㠋

㠌

㠍

㠎

㠏

㠐

㠑

㠒

㠓

㠔

㠕

㠖

㠗

㠘

㠙

㠚

㠛

㠜

㠝

㠞

㠟

㠠

㠡

㠢

㠣

㠤

㠥

㠦

㠧

㠨

㠩

㠪

㠫

㠬

㠭

㠮

㠯

㠰

㠱

㠲

㠳

㠴

㠵

㠶

㠷

㠸

㠹

㠺

㠻

㠼

㠽

㠾

㠿

㡀

㡁

㡂

㡃

㡄

㡅

㡆

㡇

㡈

㡉

㡊

㡋

㡌

㡍

㡎

㡏

㡐

㡑

㡒

㡓

㡔

㡕

㡖

㡗

㡘

㡙

㡚

㡛

㡜

㡝

㡞

㡟

㡠

㡡

㡢

㡣

㡤

㡥

㡦

㡧

㡨

㡩

㡪

㡫

㡬

㡭

㡮

㡯

㡰

㡱

㡲

㡳

㡴

㡵

㡶

㡷

㡸

㡹

㡺

㡻

㡼

㡽

㡾

㡿

㢀

㢁

㢂

㢃

㢄

㢅

㢆

㢇

㢈

㢉

㢊

㢋

㢌

㢍

㢎

㢏

㢐

㢑

㢒

㢓

㢔

㢕

㢖

㢗

㢘

㢙

㢚

㢛

㢜

㢝

㢞

㢟

㢠

㢡

㢢

㢣

㢤

㢥

㢦

㢧

㢨

㢩

㢪

㢫

㢬

㢭

㢮

㢯

㢰

㢱

㢲

㢳

㢴

㢵

㢶

㢷

㢸

㢹

㢺

㢻

㢼

㢽

㢾

㢿

㣀

㣁

㣂

㣃

㣄

㣅

㣆

㣇

㣈

㣉

㣊

㣋

㣌

㣍

㣎

㣏

㣐

㣑

㣒

㣓

㣔

㣕

㣖

㣗

㣘

㣙

㣚

㣛

㣜

㣝

㣞

㣟

㣠

㣡

㣢

㣣

㣤

㣥

㣦

㣧

㣨

㣩

㣪

㣫

㣬

㣭

㣮

㣯

㣰

㣱

㣲

㣳

㣴

㣵

㣶

㣷

㣸

㣹

㣺

㣻

㣼

㣽

㣾

㣿

㤀

㤁

㤂

㤃

㤄

㤅

㤆

㤇

㤈

㤉

㤊

㤋

㤌

㤍

㤎

㤏

㤐

㤑

㤒

㤓

㤔

㤕

㤖

㤗

㤘

㤙

㤚

㤛

㤜

㤝

㤞

㤟

㤠

㤡

㤢

㤣

㤤

㤥

㤦

㤧

㤨

㤩

㤪

㤫

㤬

㤭

㤮

㤯

㤰

㤱

㤲

㤳

㤴

㤵

㤶

㤷

㤸

㤹

㤺

㤻

㤼

㤽

㤾

㤿

㥀

㥁

㥂

㥃

㥄

㥅

㥆

㥇

㥈

㥉

㥊

㥋

㥌

㥍

㥎

㥏

㥐

㥑

㥒

㥓

㥔

㥕

㥖

㥗

㥘

㥙

㥚

㥛

㥜

㥝

㥞

㥟

㥠

㥡

㥢

㥣

㥤

㥥

㥦

㥧

㥨

㥩

㥪

㥫

㥬

㥭

㥮

㥯

㥰

㥱

㥲

㥳

㥴

㥵

㥶

㥷

㥸

㥹

㥺

㥻

㥼

㥽

㥾

㥿

㦀

㦁

㦂

㦃

㦄

㦅

㦆

㦇

㦈

㦉

㦊

㦋

㦌

㦍

㦎

㦏

㦐

㦑

㦒

㦓

㦔

㦕

㦖

㦗

㦘

㦙

㦚

㦛

㦜

㦝

㦞

㦟

㦠

㦡

㦢

㦣

㦤

㦥

㦦

㦧

㦨

㦩

㦪

㦫

㦬

㦭

㦮

㦯

㦰

㦱

㦲

㦳

㦴

㦵

㦶

㦷

㦸

㦹

㦺

㦻

㦼

㦽

㦾

㦿

㧀

㧁

㧂

㧃

㧄

㧅

㧆

㧇

㧈

㧉

㧊

㧋

㧌

㧍

㧎

㧏

㧐

㧑

㧒

㧓

㧔

㧕

㧖

㧗

㧘

㧙

㧚

㧛

㧜

㧝

㧞

㧟

㧠

㧡

㧢

㧣

㧤

㧥

㧦

㧧

㧨

㧩

㧪

㧫

㧬

㧭

㧮

㧯

㧰

㧱

㧲

㧳

㧴

㧵

㧶

㧷

㧸

㧹

㧺

㧻

㧼

㧽

㧾

㧿

㨀

㨁

㨂

㨃

㨄

㨅

㨆

㨇

㨈

㨉

㨊

㨋

㨌

㨍

㨎

㨏

㨐

㨑

㨒

㨓

㨔

㨕

㨖

㨗

㨘

㨙

㨚

㨛

㨜

㨝

㨞

㨟

㨠

㨡

㨢

㨣

㨤

㨥

㨦

㨧

㨨

㨩

㨪

㨫

㨬

㨭

㨮

㨯

㨰

㨱

㨲

㨳

㨴

㨵

㨶

㨷

㨸

㨹

㨺

㨻

㨼

㨽

㨾

㨿

㩀

㩁

㩂

㩃

㩄

㩅

㩆

㩇

㩈

㩉

㩊

㩋

㩌

㩍

㩎

㩏

㩐

㩑

㩒

㩓

㩔

㩕

㩖

㩗

㩘

㩙

㩚

㩛

㩜

㩝

㩞

㩟

㩠

㩡

㩢

㩣

㩤

㩥

㩦

㩧

㩨

㩩

㩪

㩫

㩬

㩭

㩮

㩯

㩰

㩱

㩲

㩳

㩴

㩵

㩶

㩷

㩸

㩹

㩺

㩻

㩼

㩽

㩾

㩿

㪀

㪁

㪂

㪃

㪄

㪅

㪆

㪇

㪈

㪉

㪊

㪋

㪌

㪍

㪎

㪏

㪐

㪑

㪒

㪓

㪔

㪕

㪖

㪗

㪘

㪙

㪚

㪛

㪜

㪝

㪞

㪟

㪠

㪡

㪢

㪣

㪤

㪥

㪦

㪧

㪨

㪩

㪪

㪫

㪬

㪭

㪮

㪯

㪰

㪱

㪲

㪳

㪴

㪵

㪶

㪷

㪸

㪹

㪺

㪻

㪼

㪽

㪾

㪿

㫀

㫁

㫂

㫃

㫄

㫅

㫆

㫇

㫈

㫉

㫊

㫋

㫌

㫍

㫎

㫏

㫐

㫑

㫒

㫓

㫔

㫕

㫖

㫗

㫘

㫙

㫚

㫛

㫜

㫝

㫞

㫟

㫠

㫡

㫢

㫣

㫤

㫥

㫦

㫧

㫨

㫩

㫪

㫫

㫬

㫭

㫮

㫯

㫰

㫱

㫲

㫳

㫴

㫵

㫶

㫷

㫸

㫹

㫺

㫻

㫼

㫽

㫾

㫿

㬀

㬁

㬂

㬃

㬄

㬅

㬆

㬇

㬈

㬉

㬊

㬋

㬌

㬍

㬎

㬏

㬐

㬑

㬒

㬓

㬔

㬕

㬖

㬗

㬘

㬙

㬚

㬛

㬜

㬝

㬞

㬟

㬠

㬡

㬢

㬣

㬤

㬥

㬦

㬧

㬨

㬩

㬪

㬫

㬬

㬭

㬮

㬯

㬰

㬱

㬲

㬳

㬴

㬵

㬶

㬷

㬸

㬹

㬺

㬻

㬼

㬽

㬾

㬿

㭀

㭁

㭂

㭃

㭄

㭅

㭆

㭇

㭈

㭉

㭊

㭋

㭌

㭍

㭎

㭏

㭐

㭑

㭒

㭓

㭔

㭕

㭖

㭗

㭘

㭙

㭚

㭛

㭜

㭝

㭞

㭟

9000-011 93-07-23-17:41 FM 1888 93-07-23-20:47J 01/01

八重洲電機 K 様 受付 NO 1165003

FAX 注文確認票

ご注文ありがとうございます。  
次のとおり処理いたしましたので、ご確認ください。

MSO 支店より 送り先より  
00

ご注文NO 処理結果(区分)	商品名 出庫所名	形名 処理時間	数量	納入予定日
1. 235-C 引当 SO	電子レンジ 運田配	RR-S1-H 17:41	2	7月 8日
2. Z-9 引当 SO	冷蔵庫 運田配	MR-J48M-AH 17:41	1	7月 8日
3. 072248 注文残 SO	カミソリ 運田配	SM-D30VT-X 17:41	10	当ご注文品は在庫がありません。 納期は追ってご連絡します。
4. YAMAZAKI 引当 SO	クリーナー 運田配	TC-U6-A 17:41	1	7月 8日
5.				

株式会社三菱電機ライフテック関西

7/23/93 20:47 PAGE = 01

図12. 発注確認票

OM 80 に認識結果データを転送する。同時に、あらかじめ登録したセンターファクシミリに、エラー電文（認識結果と注文用紙イメージを対にしたもの）を出力する。エラー電文には電文番号が印字されており、オペレータは MELCOM 80 に電文番号を入力することで当該データを読み出し、エラー電文を見ながら注文内容を修正する。

### 3.2.4 再送ファイル出力

注文内容の最終的なチェックは、販売店の店員がシステムから送られてくる納期回答書を見て確認する。その際、注文内容に誤りがあった場合のクレームに対応するため、MELFANET 1000 内に受信した注文用紙のイメージデータを蓄積している。販売店から注文内容の問合せがあった場合は、納期回答書に印字されている電文番号を MELFANET 1000 のシステムコンソールから入力することで、注文用紙のイメージデータと認識結果がセンターファクシミリに出力される。

### 3.2.5 商品形名マスクの単語辞書登録

注文用紙に記入する商品形名の文字認識には、OCR 装置内の単語辞書による知識処理を施している。辞書データのメンテナンスは、MELCOM 80 上で管理している商品形名マスクを MELFANET 1000 にファイル転送し、当該データを OCR 装置にダウンロードすることにより行う。家電製品は、その商品サイクルが短く、年間を通じて数多くの新製品が登場するため、OCR 装置内の単語辞書はおおむね 1 か月に 1 度最新のものに更新している。

### 3.3 導入効果

本システムは、受注業務処理を自動化することにより、次

のような導入効果を上げている。

- (1) 迅速な納期回答と夜間・休日の受注受付時間帯拡大により、販売店への受注サービスが向上した。
- (2) 自動運転化により、商品販売会社における受注業務の効率化を実現した。

従来の商品販売会社における商品受注は、電話やファクシミリで注文を受け、オペレータが計算機の端末から注文内容をデータエントリしていた。この場合、何人もの受注要員を確保していたにもかかわらず、注文を受けてから販売店へ納期回答を返すまでに 30 分から 1 時間ほどかかってしまっていた。このことと対比すると、本システムは、販売店へのサービス性向上と受注業務の効率化で、非常に大きな効果を上げているものである。

## 4. む す び

以上、FAX-OCR による商品受注自動化システムの概要について述べた。

ファクシミリを使った情報システムにおいては、コンピュータとファクシミリを接続するために FAX 情報集配信装置の存在が重要である。MELFANET 1000 は、手軽な端末である G3 ファクシミリを用いた情報集配信システムのコンポーネントとして、あらゆる分野の業務システムに対応できるものである。

OCR の分野では、ここ数年、技術の進歩が著しく、FAX-OCR 装置も広くユーザーの要求を満たすことができるようになった。しかし、OCR 装置は、① 所定の文字枠内に文字を記入しなければならない、② 乱雑な文字は人間並みに読み取れないなど、まだ人間の認識能力より劣っている点も多い。この課題を解決するために我々は、一般の伝票フォーマットに対応できる技術、手書き漢字の高精度認識技術、誤読率ゼロを達成する技術などを開発することにより、ニーズにマッチした高性能な OCR の実現を目指すものである。

最後に、このシステム構築に当たり多大な御指導をいただいた関係者各位に感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) 上田秀敏, 下田安貴郎, 峯田照雄, 安藤純一, 前田陽二: 新形光学文字読取装置 (M 2483-N), 三菱電機技報, 55, No.8, 547~550 (1981)
- (2) 宮原景泰, 依田文夫: 複合 LVQ ニューラルネットワークによる印刷漢字認識方式の評価, 情報処理学会第 46 回全国大会, 7C-1 (1993)

# 鉄道用車両の車軸超音波自動探傷装置

森田徳孝\* 今井幸夫\* 安原託男\* 海江田俊昭\*\* 植田可教\*\*

## 1. ま え が き

鉄道用車両における走行中の車軸への負荷条件は厳しく、車軸の劣化は、車輪圧入時の残留応力が存在しているところに更に走行中に車輪を通してせん断応力が加わるため、車輪との圧入部の内外境界面に集中して起こり、この部分に表面から疲労クラックが発生する。この疲労クラックの検出法として、従来から超音波探傷装置が用いられている。

鉄道各社は車軸の健全性確保のため、この超音波探傷作業に多くの設備と要員を必要としてきた。

従来の車軸超音波探傷装置は、車軸を回転させながら検査を行う装置であり、設備も大型である。さらに、設備の操作、各車軸に対応する探傷条件の設定、及び傷の有無の判定を熟練した検査員が行ってきた。この操作は繁雑で、しかも、検査結果は検査員の力量に大きく左右され、さらに、限定された検査結果だけが検査の履歴として保管されてきた。このような鉄道用車両の車軸超音波検査の現状を改善するため、車軸超音波自動探傷装置の開発を行った。

この装置は、探傷機構装置に4軸のロボットを採用し、シーケンス制御によって車軸を固定した状態で検査を行い、多チャンネル型超音波探傷器のマイコンソフトウェア処理によって自動良否判定をして、パーソナルコンピュータで探傷条件の管理及び検査結果の保管を行い、膨大な検査結果の履歴の管理をできるようにした。

本稿では車軸超音波自動探傷装置の概要、特長及び実際の検査例について紹介する。

## 2. 従来の車軸超音波探傷装置

従来の車軸超音波探傷装置の一例として、斜角探傷装置の構成を図1に示す。従来の装置では、超音波探傷する前段階で車軸の洗浄・ショットブラスト・洗摩を行って超音波センサである探触子との接触面の仕上げを行い、相対的減衰度測定、垂直探傷及び斜角探傷へと一連の検査作業が実施される。検査員は、車軸の搬入作業、車軸の回転装置上への乗り上げ作業、車軸の回転作業、各ヘッドの接軸作業、探傷作業、車軸の搬出作業を操作ボタンの手動設定で行っている。一方、検査員は両側の探傷器の条件を手動設定し、ブラウン管の探傷図形を注視し、それぞれの検査結果を判断し、記録に残す探傷作業を行っている。このように、各操作、探傷条件設定及び検査結果の判断・記録はすべて検査員の手作業となっている。さらに、多種多様な車軸に対応するため、このような探傷装置が2～3台(垂直探傷・斜角探傷)検査ラインに設置されている。このため、検査作業は熟練を要する上、数名での共同作業となっており、従来の装置における検査の信頼性向上には限界があり、どうしても自動化が必要である。

## 3. 車軸超音波自動探傷装置

### 3.1 特 長

この装置は、これまで検査員の手作業に頼っていた検査作業を自動化したもので、従来の装置に対して次のような特長を持っている。

- (1) 探傷機構装置に4軸のロボットを採用し、シーケンス制御によって車軸を回転させない状態で検査を行う。
- (2) 探触子との接触面を車輪圧入部の外側(端面部・外ボス軸周部・ジャーナル部)に限定した。
- (3) 装置が小型である。

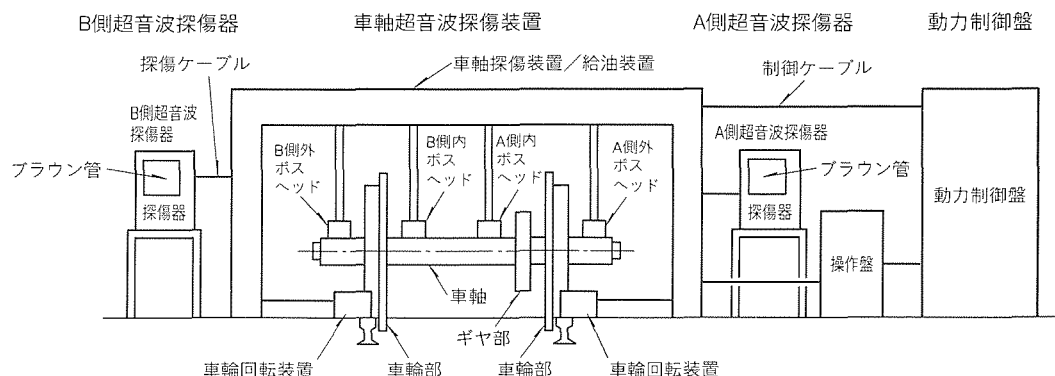


図1. 従来の車軸超音波探傷装置構成(斜角探傷)

- (4) 空中超音波計測によって車軸端面のセントラ穴を計測し、シーケンス制御で自動的に各ヘッドを車軸に接軸させる。
- (5) 感度校正機能を持ち、人工欠陥付き車軸(対比試験体)によって自動的に探傷条件を設定する。
- (6) パーソナルコンピュータは、各車軸に対応した探傷条件を保存できる。
- (7) 1本ごとに異種の車軸を検査することができる。
- (8) 多チャンネル型超音波探傷器を使用し、マイコンソフトウェア処理によって自動的に良否を判定することができる。
- (9) 車軸探傷における車輪圧入部に発生する雑エコーについて、あらかじめ位置指定することによって良否判定から除外できる機能を持つ。
- (10) パーソナルコンピュータに大量の検査結果データを保存できる。また、検査結果の履歴の管理も容易である。
- (11) 簡単な操作によって一連の検査作業が終了する。

## 3.2 車軸超音波自動探傷装置の概要

### 3.2.1 検査対象車軸

代表的車軸の例を図2に示す。また、この装置での検査対象車軸の一覧を表1に示す。検査時は、コロ軸受を外すか、又は、コロ軸受内輪だけを残して検査を行う。

### 3.2.2 構成

車軸超音波自動探傷装置の構成を図3に示す。主な構成品は、車軸探傷装置・給油装置・軸端ヘッド・ジャーナルヘッド・軸周ヘッド・探触子・測定制御装置・パーソナルコンピュータ等である。

### 3.2.3 主要性能・機能

#### (1) 車軸探傷装置

車軸探傷装置は、X-Y-Z-θテーブル・中継ボックス・基台から構成される。図4に外観を示す。主な性能は次のとおりである。

- (a) X軸有効ストローク 100mm ± 3mm

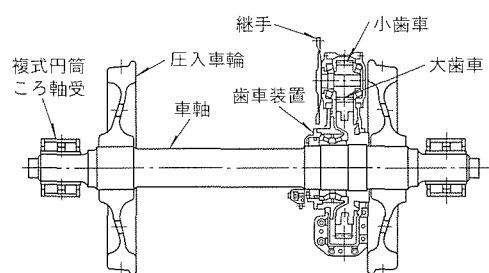


図2. 代表的車軸

表1. 検査対象車軸一覧

車 両 型 式	M車/T車 /PC車	車軸全長 (mm)	車軸端面 直径 (mm)	車輪圧入 部直径 (mm)	車軸型名	備 考
103系/107系/115系 /165系/185系	M車	1,920	85	188.5	ED46007	コロ軸受内輪有/無
211系	M車	1,930	85	199	EC43085	コロ軸受無
115系/165系/185系	T車	1,920	85	188	ED46014	コロ軸受内輪有/無
103系	T車	1,920	85	180	ED46010	コロ軸受内輪有/無
211系	T車	1,930	85	185	EC43086	コロ軸受無
カニ24	PC車	1,920	85	180	VC4514	コロ軸受内輪有/無
オハ50/マニ50	PC車	1,920	110	178	DD46385	コロ軸受内輪有/無
12系/14系/24系/ カヤ21	PC車	1,794	105	180	VC4510	コロ軸受無
ナロネ21	PC車	1,794	105	170	VC4501	コロ軸受無

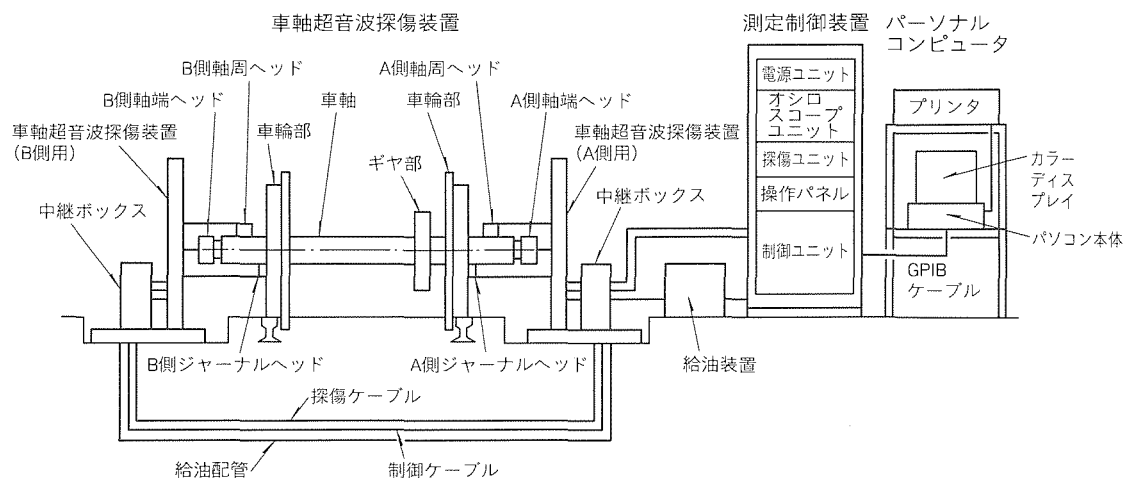


図3. 車軸超音波自動探傷装置構成

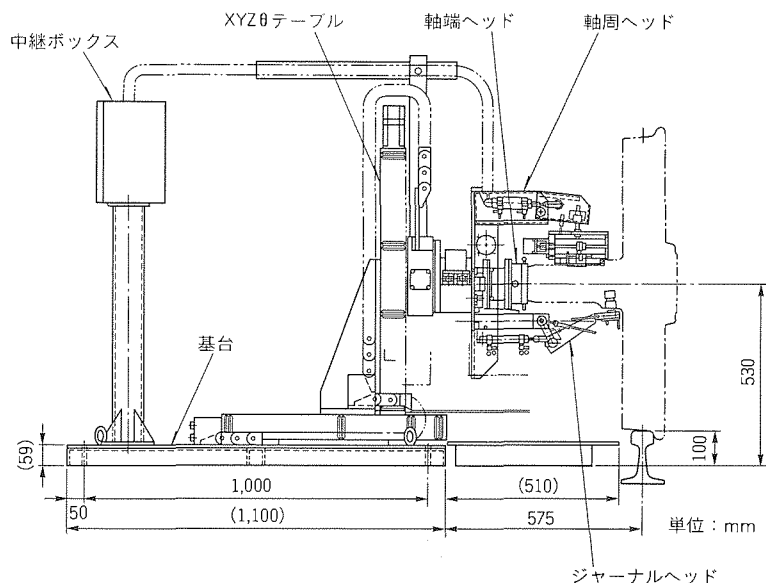


図 4. 車軸探傷装置外観

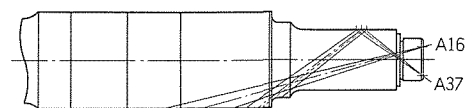


図 5. 超音波ビームパターン  
(軸端から探傷)

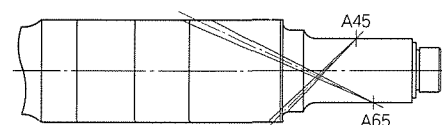


図 6. 超音波ビームパターン  
(軸周から探傷)

- (b) Y 軸有効ストローク 250mm ± 3mm
- (c) Z 軸有効ストローク 350mm ± 3mm
- (d) XYZ 軸分解能 0.005mm
- (e) XYZ 軸加減速時間 0.3s 以下
- (f) XYZ 軸最高速度 200mm/s
- (g) θ 軸回転ストローク 360° (±180°)
- (h) θ 軸分解能 0.36°
- (i) θ 軸測定ピッチ 10° ピッチ

#### (2) 給油装置

トロコイド形モータによる油循環装置であり、探触子と車軸との接触媒質である油を各ヘッド内に給油する。

#### (3) 軸端ヘッド

探触子 4 個及び空中超音波センサ 1 個を実装し、車軸探傷装置先端に取り付けられ、車軸探傷装置の X-Y-Z-θ 軸の動作によって接軸及び離軸動作を行う。

#### (4) ジャーナルヘッド

探触子 1 個を実装し、車軸探傷装置先端に取り付けられ、車軸探傷装置の X-Y-Z-θ 軸の動作及びエアシリンダの電磁開閉動作によって接軸及び離軸動作を行う。

#### (5) 軸周ヘッド

探触子 2 個を実装し、車軸探傷装置先端に取り付けられ、車軸探傷装置の X-Y-Z-θ 軸の動作及びエアシリンダの電磁開閉動作によって接軸及び離軸動作を行う。また、ステッピングモータを搭載し、探触子の位置をコントロールしている。

#### (6) 探触子

探触子の数は、車軸片側用として 8 個、両側で 16 個である。車輪圧入部及び歯車圧入部検査用の探触子試験周波数は 5 MHz、相対的減衰度測定用の探触子試験周波数は 2 MHz、空中超音波計測用の探触子試験周波数は 0.4 MHz であり、それぞれ専用のものを使用している。車輪圧入部検査用探触

子の超音波ビームパターンの代表例を図 5 及び図 6 に示す。図において、A16 とは探触子の屈折角 (鋼中屈折角) が 16° であることを示す。

#### (7) 測定制御装置

測定制御装置は、電源ユニット・オシロスコープユニット・探傷ユニット・操作パネル・制御ユニット・収容架から構成される。

- (a) 電源ユニットは、AC100V を入力し測定制御装置内の各ユニットへ供給する電源を出力する。
- (b) オシロスコープユニットは、オシロスコープを収納し、探傷ユニットからの探傷図形をモニタする機能を持つ。
- (c) 探傷ユニットは、多チャンネル型超音波探傷器本体を実装し、マイコンソフトウェア処理によって自動良否判定等を行う。主な性能は次のとおりである。
  - (i) チャンネル数 16 チャンネル
  - (ii) 測定範囲 10mm ~ 10m (鋼中縦波換算)
  - (iii) 音速設定範囲 300 ~ 9,999m/s
  - (iv) 送信方式 単発パルス, 時分割方式
  - (v) 試験周波数 5 MHz, 2 MHz, 0.4 MHz
  - (vi) 利得調整範囲 0 ~ 63.5dB (0.5dB 単位)
  - (vii) 外部インタフェース RS-232C, GPIB
  - (viii) 外部入出力 入力×32点, 出力×32点
  - (ix) CPU マイクロプロセッサ (80286)
  - (x) 測定ピッチ 0.2 ~ 2mm (車軸軸方向)
  - (xi) 測定ピッチ 10° ピッチ (車軸周方向)

(d) 操作パネルは、運転モード・測定開始等のスイッチによる動作制御の指令信号を出力する。また、装置の異常や動作状態の表示を行う。

(e) 制御ユニットは、シーケンサ・リレー・ステッピングモータ用ドライバ・電磁開閉器等で構成され、シーケンサ



は“MELSEC-A”シリーズを使用している。

#### (8) パーソナルコンピュータ

パーソナルコンピュータは、“MAXYDT 2”シリーズを使用し、ボードを拡張することにより GPIB (General Purpose Interface Bus) インタフェースを行う。

#### 3.2.4 操作・動作

車軸超音波自動探傷装置の操作は次のとおりである。また、各ヘッドの接軸状態を図7に示す。

- (1) 予約軸の登録 (検査員の手動設定)
- (2) 操作パネルの探傷モード選択 (検査員の手動設定)
- (3) 操作パネルの開始を選択 (検査員の手動設定)
- (4) シーケンス制御及びマイコンソフトウェア処理で、下記動作が自動で行われる。

- (a) 空中超音波計測による検査軸軸端センタ穴の検出
- (b) 軸周ヘッドの探触子をパルスモータ駆動で所定の位置に設定
- (c) 給油装置のポンプ起動 (各ヘッドへ給油)
- (d) 各ヘッド接軸
- (e) 探傷制御装置の探傷ユニットによって探傷データ採取
- (f) 各ヘッドを車軸周方向  $10^\circ$  ピッチで移動させ、同様の探傷データ採取 ( $\pm 180^\circ$  分のデータ)
- (g) 全データ採取後、探傷制御装置の探傷ユニットによって検査軸 1 本分の検査結果の良否判定及び各探触子個別の検査結果の良否判定
- (h) 良否判定結果及び全データ内容を探傷制御装置の探傷ユニットからパーソナルコンピュータへの伝送
- (i) 各ヘッド離軸及び初期待機位置への移動
- (j) 給油装置のポンプ停止

以上によって、一連の探傷作業は終了する。検査員が検査内容の詳細を確認する場合、パーソナルコンピュータを操作することによってグラフ表示及び数値表示が確認できる。

#### 3.2.5 マイコンソフトウェア処理

- (1) 探傷ユニットの主なマイコンソフトウェア処理は次のとおりである。

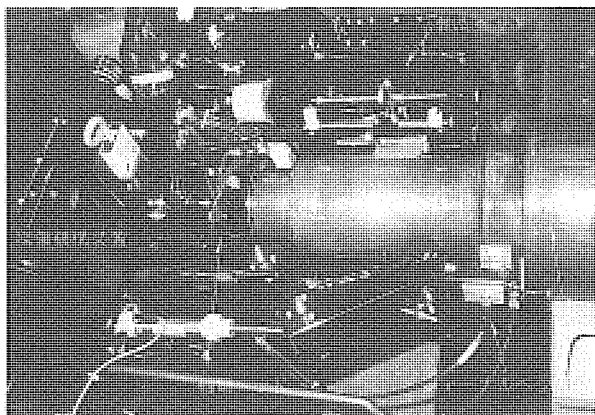
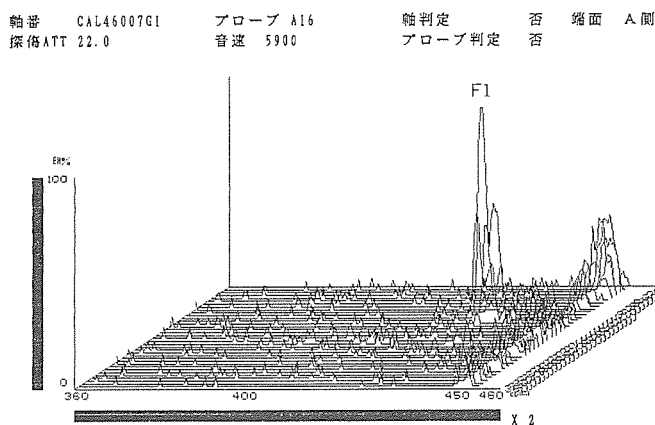
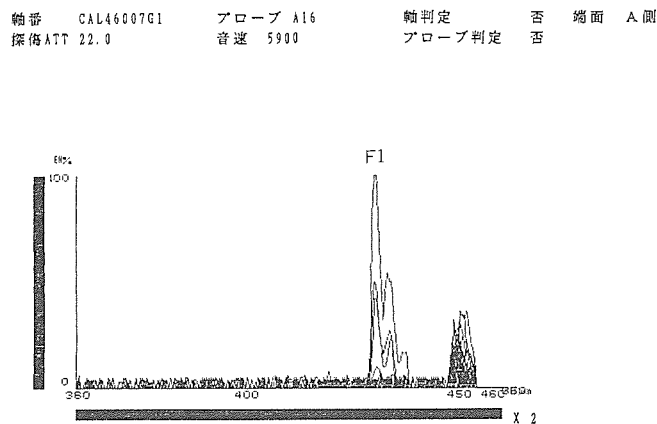


図7. 各ヘッドの接軸状態

- (a) 人工欠陥付き車軸を用い、各欠陥信号を目標レベルに自動調整する (感度校正処理)。
- (b) 感度校正を実施した人工欠陥付き車軸を用い、目標とする感度に調整されているかチェックを行う (感度チェック処理)。
- (c) 軸端ヘッドの左右・上下動作時に、空中超音波センサからの信号によって軸端センタ穴を検出し、軸中心と軸端ヘッド中心との位置合わせ信号 (基準点) を制御ユニットに伝送する (軸端センタ穴の検出及び基準点データ伝送)。
- (d) パーソナルコンピュータに設定されている各車軸対応の探傷条件を受信し、探傷部位の設定及び設定された部位のエコー信号を測定する。また、測定されたエコー信号の車軸端面からの距離計測を行う。これらの測定データからあらかじめ設定された判定レベル以上 (2 レベル設定可能) のエコー信号を判定し、さらに、あらかじめ位置指定された雑エコーのエコー信号を良否判定から除外し、最終的に 1 本ごとの車軸の良否判定を行う (探傷処理)。
- (2) パーソナルコンピュータの主なマイコンソフトウェア処理は次のとおりである。
  - (a) 予約軸の登録 (1 回当たり 8 本分登録可能) を行う。



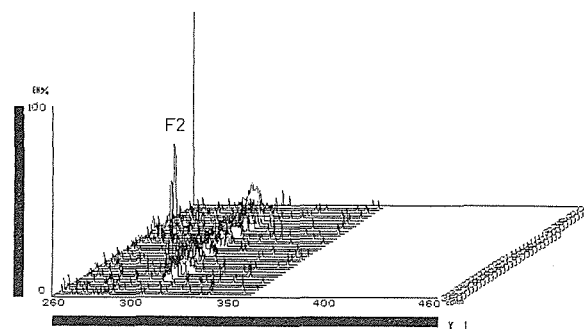
(a) 全角度表示



(b) 全角度重ね書き表示

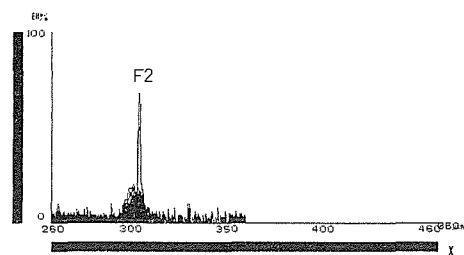
図8. 検査例 (軸端から探傷)

軸番 CAL46007G1      プローブ A45      軸判定      否      端面 A側  
 探傷ATT 18.0      音速 5900      プローブ判定      否



(a) 全角度表示

軸番 CAL46007G1      プローブ A45      軸判定      否      端面 A側  
 探傷ATT 18.0      音速 5900      プローブ判定      否



(b) 全角度重ね書き表示

図9. 検査例（軸周から探傷）

- (b) 各車軸に対応した探傷条件の設定及び保管を行う。
- (c) 車軸ごとの探傷結果の表示及び保管を行う。
- (d) 人工欠陥付き車軸に対応する条件設定、各探触子の感度校正及び感度チェック結果の表示を行う。

#### 4. 実際の検査例

実際の検査例を図8及び図9に示す。検査車軸は103系M車（モータ車）用の車軸で、車輪圧入部両端に3mm深さの人工欠陥（F1、F2スリット欠陥）が加工されている。

図8は軸端ヘッド内の探触子（A16）による検査結果である。図8（a）は検査データを三次元的に表示したものであり、図8（b）は検査データを二次元的に重ね書き表示したものである。

図9（a）及び図9（b）は、軸周ヘッド内の探触子（A45）に

よる検査結果である。図に示すように、人工欠陥について十分なSN比（欠陥信号とノイズレベルとの比）を確保でき、自動良否判定を行うことができた。

#### 5. むすび

車軸超音波自動探傷装置の概要、特長及び実際の検査例について述べた。この装置は、熟練した検査員が手動操作で行っていた車軸の検査作業を、自動化によって簡単なキー操作で可能にしたものである。将来、ラインの自動化及び検査結果の情報ネットワーク化が可能となれば、今後の車軸保守検査作業の信頼性向上に大きな期待がかけられる。

最後に、この装置の開発及び試験において終始ご指導いただいた関係者各位に、深く謝意を表する。

# オフィスコンピュータ“MELCOM80” ネットワークシステム

本田和人\* 渡辺 浩\* 桜田 博\* 桂嶋由彦\* 三島康徳\*

## 1. ま え が き

当社オフィスコンピュータ“MELCOM 80 GS ファミリー”（以下“GS ファミリー”という。）は企業の基幹系業務をこなすコンピュータとして広く利用されている。また最近では、情報系業務への利用へと用途が広がっており、情報システムが高度化・複雑化する中で、オフィスコンピュータのネットワーク機能はますます重要になってきている。

コンピュータ及び通信技術の進歩は著しく、GS ファミリーでは技術進歩に対応して、ネットワーク機能を強化し、レパートリの拡大を行ってきた。特に近年は、高速な通信媒体への対応、異機種接続を可能にするオープンなネットワーク機能の実現、大規模化への対応を目指し、機能強化を行ってきた。

本稿では、GS ファミリーのネットワークシステムの概要と主要プロトコルの特長、機能について述べる。

表1. GSファミリー ネットワークサポート一覧

ネット ワークアーキテクチャ	通信制御 装置	下 位 層	上 位 層
TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)	LANU*1	CSMA/CD	ファイル転送 (ftp: File Transfer Protocol) 遠隔コマンド (rsh: Remote Shell) 三菱フルスクリーン端末エミュレータ (ap-BIND) 他社パソコンとの連携処理 (SATELLITEJOIN)
OSI (Open Systems Interconnection)	MCCP*2 SCCP*3 ICCP*4 LANU	専用回線 (V, Xインタフェース) INSネット64 (Bチャネルパケット交換/回線交換) DDXパケット交換 (80年版) CSMA/CD	FTAM (File Transfer Access and Management) F手順*5
全銀協標準手順	SCCU*6 MCCP SCCP ICCP	専用回線 電話回線 DDX回線交換 INSネット64 (回線交換)	全銀協標準手順一次局 全銀協標準手順二次局
JCA標準手順	SCCU MCCP SCCP	専用回線 電話回線 DDX回線交換	JCA標準手順一次局 JCA標準手順二次局
CAFIS (Credit And Finance Information System)	SCCU MCCP SCCP	専用回線 (B改手順) DDXパケット交換 (80年版)	仕向けセンター機能 被仕向けセンター機能
MNA-P (Multi Shared Network Architecture-Packet)	MCCP SCCP ICCP LANU	専用回線 (V, X, Iインタフェース) INSネット64 (Bチャネルパケット交換/回線交換) DDXパケット交換 (76年版/80年版) CSMA/CD (MELNET B10LAN)	M4374ホスト機能 (TSSトランザクション, ファイル転送) M4374端末機能 (TSSトランザクション) 対等型ファイル転送 対等型アプリケーション・プログラム間通信 分散リレーショナルデータベース (DRDB) トランザクション処理システム (TP) 遠隔管理システム (DS-NET)
SNA (Systems Network Architecture)	MCCP SCCP ICCP LANU	専用回線 (V, Xインタフェース) 電話回線 INSネット64 (Bチャネルパケット交換) DDXパケット交換 (76年版/80年版) CSMA/CD (MELNET B10LAN)	二次局 3270エミュレータ (5370JS) ファイル転送 (FTRAN) アプリケーション・プログラム間通信 リモートジョブエントリ (5870JS) 一次局 3270パススルー (5370JSR) ファイル転送パススルー (5370JSR)

- 注 \*1 LANU: バス形LAN制御装置  
 \*2 MCCP: 多回線通信制御処理装置  
 \*3 SCCP: 単回線通信制御処理装置  
 \*4 ICCP: ISDN通信制御処理装置  
 \*5 F手順: 財団法人情報処理開発協会 産業情報化推進センターで開発検討された新手順  
 \*6 SCCU: 単回線通信制御装置

## 2. ネットワークシステム概要

GS ファミリーの最上位モデルとして、ディスク容量・メモリ容量・接続ワークステーション台数・接続プリンタ台数・接続回線数などで国産最大の諸元を持った最新鋭の GS 700/10 を、平成 5 年 6 月から出荷開始した。

GS 700/10 は、“より多くの情報を蓄え、更に速く処理し、もっとオープンな環境を”をコンセプトに、システムの超高速化・大容量化・高信頼化を実現している。

GS 700/10 のコンセプトの中で、ネットワークシステムでは、従来から取り組んできたマルチベンダにまたがる異機種間接続を可能にするオープンネットワークアーキテクチャを強化した。

GS ファミリーの主要なネットワーク機能を表 1 に示す。

### (1) TCP/IP<sup>(注1)</sup>

TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) は、LAN の標準プラットフォームである。TCP/IP を使えば、GS ファミリーでの基幹系業務処理とクライアント/サーバシステムでのオープンデータベース処理との連携によるグループワーク、TCP/IP 上の他社パソコン接続機能 (SATELLITEJOIN) を利用した大規模マルチベンダオンライントランザクション処理システムを構築できる。

### (2) OSI

OSI (Open Systems Interconnection) は、国際標準の通信プロトコルである。GS ファミリーの OSI は、INTAP (情報処理相互運用技術協会) 実装規約 V2.0 に準拠しており、異機種間接続を容易に行える。

### (3) 業界標準手順

GS ファミリーでは、異業種・異企業間での情報交換を行うための豊富な業界標準手順を提供している。表 1 に示した全銀協標準手順<sup>(注2)</sup>・JCA 標準手順<sup>(注3)</sup>・CAFIS (Credit And Finance Information System)<sup>(注4)</sup>に加え、ビジネスプロトコルとして、EIAJ (社) 日本電子機械工業会) トランスレータを提供している。EIAJ トランスレータは、EIAJ EDI (電子データ交換) 推進センターが定めたシンタックスルールに従っており、電子データ交換を可能にする。

### (4) MNA-P

MNA-P (Multi Shared Network Architecture - Packet) は、当社計算機間で相互接続を行うための主要なプロトコルの一つである。GS ファミリーの MNA-P は、

- (注 1) “TCP/IP”は、米国 Texas Instruments, Inc. の登録商標である。  
 (注 2) “全銀協標準手順”は、全国銀行協会連合会が制定した通信プロトコルである。  
 (注 3) “JCA標準手順”は、日本チェーンストア協会が制定した通信プロトコルである。  
 (注 4) “CAFIS”は、NTTデータ通信㈱が開発したクレジット情報データ通信システムである。

信頼性・高速性・経済性に優れたシステムを構築できるように、ISDN、スーパーデジタル専用線等への対応を図り、今では成熟したシステムとして、多くのユーザーで使用されている。

### (5) SNA<sup>(注5)</sup>

GS ファミリーの SNA (Systems Network Architecture) 接続機能は、ホスト計算機と接続する二次局機能と、3270 系端末と接続してホスト計算機とのパススルーを可能にする一次局機能を提供している。GS ファミリーの豊富な機能と使いやすさを利用することによって、より効率的な分散処理システムを可能にする。

### (6) ネットワーク運用管理システム

ネットワーク運用管理システムは、大規模化・複雑化したネットワークシステムを効率良く、容易に運用・管理することを目的に提供している。これにより、分散したシステムをホスト計算機で集中管理することができる。

## 3. TCP/IP

### 3.1 特 長

1983 年に ARPANET<sup>(注6)</sup>の通信プロトコルとして正式採用された TCP/IP は、LAN の事実上の標準接続手順であり、GS ファミリー上で TCP/IP 関連製品を強化していくことは、ユーザーのシステム構築に非常に有用である。

TCP/IP を用いることにより、GS ファミリーをパソコンや UNIX<sup>(注7)</sup>ワークステーションを始めとする様々なサブシステムと異機種間接続をしてデータ交換を行い、それぞれの特長を生かした処理を行うシステムを構築できる。TCP/IP は GS ファミリーをオープン環境に対応させていくために重要なプロトコルの一つである。

### 3.2 機 能

TCP/IP は GS ファミリー、パソコン、UNIX ワークステーションを接続するだけでなく、それと同時に接続された

(注 5) “SNA”は、米国 IBM Corp. のネットワークアーキテクチャである。

(注 6) “ARPANET”は、DOD (The Department of Defense : 米国国防総省) がプロトコルの実験をするために始めたネットワークである。

(注 7) “UNIX”は、UNIX System Laboratories, Inc. が開発し、ライセンスしているオペレーティングシステムである。

上位層	ftp	rsh	支援 ライ ブラ リ	端末エミ ュレータ、 ホスト 機能	トランザ クション 端末、ホ スト機能	ap-BIND 端末接続 機能	SATELLITE JOIN
トランス ポート層	TCP, UDP					TCP/IP接続	
ネット ワーク層	IP, ICMP						
下位層	CSMA/CD					LANU	

図 1. TCP/IP の機能と構成

システム間で高度な連携処理を可能にする。

TCP/IPの機能と構成を図1に示す。

#### (1) ap-BIND

端末エミュレータ ap-BIND は、GS ファミリーに TCP/IP-LAN で接続した当社クライアント・サーバコンピュータ “apricot” シリーズや “MAXY” シリーズのパソコンを、GS ファミリーのワークステーションやプリンタとして動作させる機能を提供する。MS-Windows<sup>(注8)</sup> 環境下で動作するために GS ファミリーの操作と同時にパソコン上で動作する他の OA ソフトウェアの操作を行うことができ、また、クリップボード<sup>(注9)</sup>を経由して、GS ファミリーとこれらの間でデータの移行を行うことができる。

#### (2) SATELLITEJOIN

SATELLITEJOIN の目的は、他社製パソコンを GS ファミリーの基幹端末として、データエントリやデータ照会等を行うためのソフトウェアである。SATELLITEJOIN には以下の特長がある。

- (a) MS-Windows の標準インタフェースを採用しており移植性に優れ、他社パソコン上でも動作できるためユーザーが既に持っている資産をそのまま活用することができる。
- (b) MS-Windows 上で動作するため、MS-Windows の優れた機能 (GUI (Graphical User Interface)、クリップボードによるデータ交換) をそのまま利用することができる。
- (c) GS ファミリーとパソコンの間では分散処理を行い画面の入出力や通信制御等はパソコン側で行うため、パソコンの能力を生かすとともに、GS ファミリーの負荷を軽減できる。このため、空いた CPU 時間で別の業務を行うことができる。

(注 8) “MS-Windows”は、米国Microsoft Corp. の登録商標である。

(注 9) “クリップボード”は、MS-Windowsのウインドウ間でデータのやり取りを行う際に使用する記憶領域である。

EDI通信基盤		F手順		DPS10*1 F手順システム	
応用層	FTAM (ファイル転送, 限定ファイル管理)			FTAM-M80	
	ACSE			DPS10 OASP/〇SSP システム	
プレゼンテーション層	カーネル				
セッション層	カーネル, 全二重				
トランスポート層	クラス0, 2	クラス 4			
ネットワーク層	X.25 (80年版+α)	CLNP, ES-IS		ICCP, MCCP, SCCP	LANU
データリンク層	HDLC-BA	LLC			
物理層	V,X,Iインタフェース	CSMA/CD			
適用回線		ISDN網(パケット交換, 回線交換), 専用線, X.25パケット交換網		LAN (CSMA/CD)	

注 \*1 GS ファミリーの OS

図 2. OSIの機能と構成

(d) 業務プログラム (アプリケーション) は、GS ファミリー上で PII, COBOL により作成する。GS ファミリーでのプログラム作成時に、パソコン側で表示するための入出力画面の情報も含めて自動的に作成される。このパソコン側の画面、帳票情報を使って表示するので、パソコン側でのプログラム作成は一切不要である。

## 4. OSI

### 4.1 特 長

OSI は “異なる情報処理システム間を接続して相互に情報交換やデータ処理を行うための国際標準” として、ISO (国際標準化機構) と CCITT (国際電信電話諮問委員会) が協調して開発しているネットワークアーキテクチャである。OSI を利用することで、他機種との接続を容易にし、拡張性、柔軟性の高いネットワークシステムを構築することができる。

GS ファミリーでは OSI の応用層機能として FTAM を提供している。そして、FTAM を利用した EDI の通信基盤であるファイル交換手順の “F 手順” をサポートしている。また、適用回線としては WAN, LAN 共に可能であり、それらを共存して使用可能である。

GS ファミリーの OSI は、INTAP 実装規約 V2.0 に準拠しており、FTAM (V2.0) の INTAP 適合性試験に合格している。

### 4.2 機 能

OSI の機能と構成を図 2 に示す。

#### (1) WAN の機能

適用回線として、パケット交換網 (P80), ISDN 網 (回線交換, パケット交換), 専用線を利用可能である。ネットワーク層は 80 年版 X.25 の機能を持ち、84 年版 X.25 の DTE ファシリティの機能も兼ね備えている。トランスポート層はクラス 0, 2 をサポートし、トランスポート接続の多重化が可能である。

#### (2) LAN の機能

CSMA/CD の LAN に接続可能である。ネットワーク層は CLNP (コネクションレス ネットワークプロトコル) をサポートし、経路情報をやりとりする ES-IS プロトコルもサポートしている。トランスポート層はクラス 4 をサポートしている。

#### (3) FTAM の機能

基本機能としてファイルの全体転送 (送信/受信) が可能であり、限定ファイル管理機能としてファイルの生成・削除・属性読出しが可能である。これらは要求側・応答側の両方が可能である。

## 5. ネットワーク運用管理システム

### 5.1 特 長

ネットワーク運用管理システムは、大規模・複雑化したネ

ットワークシステムを効率良く、容易に運用・管理することを目的としている(図3)。

このため、ネットワーク運用管理システムは各種の運用支援・情報採取機能をより強化・拡張し、さらに、自動情報採取機能を始めとする新たな管理機能を追加・統合することにより、ネットワークシステムの運用・操作性を向上させる。また、オペレータに代わってネットワーク運用管理システムが稼働状況も自動的に監視するので、システムの無人化がより強化される。

## 5.2 機 能

ネットワーク運用管理システムが提供する機能を次に示す。

### (1) ネットワーク情報採取機能

#### (a) 自動情報採取機能

ネットワークシステム運用中、発生する障害に対して関係する情報の採取及び障害発生時のホスト計算機への通知など、様々な処理を自動で行う。この機能は無人で動作するので、発生頻度の低い障害の再現時の情報採取に使用すると効果的である。また、万が一、ネットワークシステム自身が故障を検出した場合も動作する。

#### (b) 障害通知機能

ネットワークシステム内で発生した障害を、通信回線を經由して即時にホスト計算機へ通知する。また、回線そのものが故障した場合は、回線の故障の回復を待って、通知する機能も備えている。

#### (c) 採取情報管理機能

採取された情報は、あらかじめ指定されたネットワーク運用管理ディレクトリの下に順次格納され、自動的に管理される。オペレータは、採取情報管理機能を用いて、採取情報の一覧表示・削除・セーブ・リストア等の操作を行うことができる。

### (2) ホストによる集中管理機能の実現

ネットワークシステム内で障害がいつ、どの計算機で発生し情報を採取したのかといった運用管理ログを、ホストのファイル(NUKLOG)に記録する。この運用管理ログは計算機ごとに分類して表示したり、日時を指定して表示できるので、ホスト計算機側で容易に障害の発生を確認できる。また、

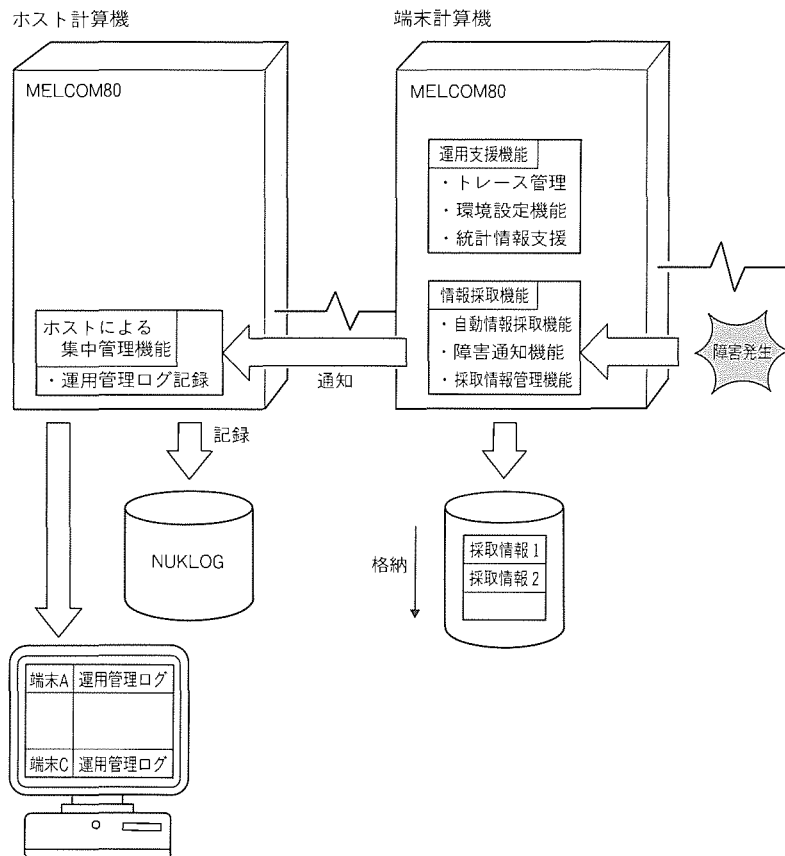


図3. ネットワーク運用システム概要

端末側計算機では自動的に障害の発生を通知するので、専門のオペレータも不要になり、運用コスト面の削減も図れる。

### (3) 運用支援機能

大規模なネットワークシステムの運用を支援するため、トレース管理機能、容易なネットワーク環境設定機能、統計情報支援機能などを提供する。

## 6. む す び

情報通信システムの基幹ともいえるネットワークにおいては、国際標準・業界標準の整備が進んでおり、マルチベンダ環境におけるネットワークシステム構築が求められている。また、情報システムの大規模化・大容量化に伴い、より高速な通信メディアの導入が必要となってきている。

これらの動向から、オープンネットワーク機能の更なる充実と新しい通信メディアへの対応が重要になると思われる。

GSファミリーでは、今後もエンドユーザーが使いやすいシステムを実現するために必要な機能の強化を図っていく。

# オフィスコンピュータ“MELCOM80”CAFISシステム

宮崎茂雄\* 茂木武士\* 中川智明\*\* 神戸 健\*\* 長井秀憲\*\*

## 1. ま え が き

現在、日本のクレジットカードの発行枚数は約2億枚に達しており、キャッシュレスでショッピングする消費者が非常に多くなっている。しかし、小売店にとってクレジットカードによる販売は、そのカードが不正に使用されていないかどうかの信用照会、売上伝票の作成やクレジット会社への売上報告が伴うため、現金販売に比べて手間が掛かってしまう。販売活動をより円滑にするためには、業務の自動化・効率化が必要である。

NTT データ通信(株)のCAFIS (Credit And Finance Information System: クレジット情報データ通信システム)はこれらのニーズに対応する情報ネットワークであり、多くの小売店やクレジット会社の端末やコンピュータが接続され、広く利用されている。

今回、当社のオフィスコンピュータ“MELCOM80/GSファミリー”(以下“MELCOM80”という。)でCAFISと接続するソフトウェア製品を開発した。

この論文では、製品の概要及び適用事例について述べる。

## 2. CAFIS

### 2.1 CAFISの概要

CAFIS は、小売店の CATT (Credit Authorization Terminal: クレジット専用端末) や POS (Point Of Sales) 端末やコンピュータと、クレジット会社のホストコンピュータとの間を中継して、クレジットカードによる取引情報の交換を可能にする。小売店では自社の端末、コンピュータをCAFISに接続することにより、複数のクレジット会社に対する信用照会処理や売上報告処理が即時に実現できる。クレジット会社もカード取引業務の自動化ができ、業務量の増大に容易に対処できる。

図1に示すようにCAFISは、メッセージ交換機能を果たすNTTデータ通信(株)の“CAFISセンター”と、POS端末とコンピュータから成る“仕向けセンター”、小売店の“CATT”、及びクレジット会社のホストコンピュータである“被仕向けセンター”によりネットワークが構成される。

接続用通信回線は通信量と費用の関係上、CAFISセンターとCATT間には電話回線、CAFISセンターと仕向けセンターにはDDX-P又は専用線、CAFISセンターと被仕向けセンターには専用線が用いられる。

### 2.2 CAFISの機能

CAFISの提供する主な機能は次のとおりである。

#### (1) CATT-被仕向けセンター間のサービス

##### (a) 各種データの中継

CATTからのクレジットカードの売上げ、与信、取消し、照会データをCAFISセンターを経由して被仕向けセンターに送信し、リアルタイムに処理を行う。

##### (b) CATT テーブル情報設定

センターで管理するCATTのテーブル情報(クレジットカードに関する情報)をダウンロードする。

#### (2) 仕向けセンター-被仕向けセンター間のサービス

各種データの中継を行う。すなわち、仕向けセンターからのクレジットカードの売上げ、与信、取消し、CDキャッシングデータや照会データを、CAFISセンターを経由して被仕向けセンターに送信し、リアルタイムに処理を行う。

#### (3) 代行売上業務

CAFISセンターが、被仕向けセンターの休止しているときに情報交換できるように被仕向け機能を代行する。

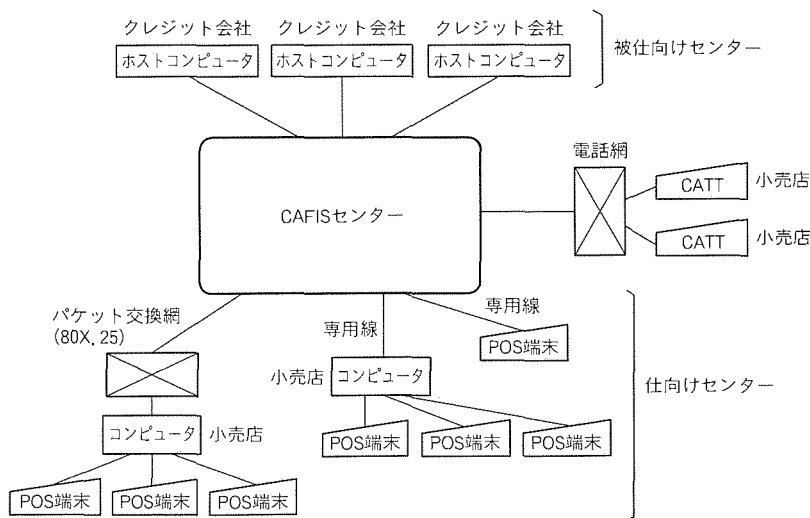


図1. CAFISの構成

### 3. MELCOM80 CAFISシステム

MELCOM80では、小売業やクレジット会社のユーザーがクレジットカード業務を効率良く行えるよう、次のソフトウェア製品を提供している。

- (1) CAFISシステム(パケット)
- (2) CAFISシステム(専用線)
- (3) アプリケーションシステム“SA-S3クレジット”

以下に各製品の概要と特長を述べる。

#### 3.1 CAFISシステム(パケット)

CAFISシステム(パケット)は、MELCOM80をCAFISセンターとNTTのパケット交換網であるDDX-P経由で接続して、MELCOM80を仕向けセンターとするための製品である。

CAFISシステム(パケット)は、アプリケーションプログラム(以下“APP”という)からのクレジットカード売上処理データ等をCAFISセンター経由でクレジットカード会社のホストコンピュータへ送信し、その処理結果(応答)をAPPへ返送するリアルタイム処理プログラムである(図2)。

CAFISシステム(パケット)はアプリケーションシステムSA-S3クレジット(後述)を組み合わせて小売業におけるクレジットカード業務処理が容易に構築できる。

以下に特長を示す。

- (1) CAFISセンターと接続するための通信プロトコルを実行しているため、ユーザーは通信プロトコルを意識せずにAPPを作成することができる。APPは、プロシジャコール型の支援ライブラリを用いて、簡単にクレジットカードの取引情報の送受信が行える(図3)。
- (2) CAFISセンターとの通信メッセージのログ採取機能、支援機能を備えているため、障害発生時等の解析が容易にでき、迅速に回復できる。

#### 3.2 CAFISシステム(専用線)

CAFISシステム(専用線)は、MELCOM80をCAFISセンターと専用線経由で接続して、MELCOM80を仕向けセンター又は被仕向けセンターとするための製品である。

CAFISシステム(専用線)は、

仕向けセンター又はCATTからのクレジットカードの売上要求等を、CAFISセンター経由で受信して各種要求に対するAPPへ振り分け、その処理結果を仕向けセンター又はCATTへ応答するリアルタイム処理プログラムである(図4)。

また、CAFISシステム(専用線)では、前述の仕向けセンターの機能も含んでおり、同時に使用できる。

CAFISシステム(専用線)は、CAFIS専用のオンライントランザクション処理システムとして、クレジット会社のクレジット業務の自動化に役立つ。

以下に特長を示す。

- (1) CAFISセンターと接続するための通信プロトコルを実行しているため、ユーザーは通信プロトコルを意識せずにAPPを作成することができる。APPは、支援ライブラリをCALLするだけで、クレジットカードの取引情報等の交換が行える(図5)。
- (2) CAFISシステム(専用線)では、被仕向けセンターとし

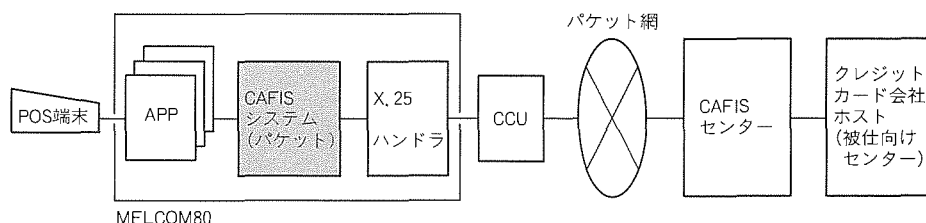


図2. CAFISシステム(パケット)の構成

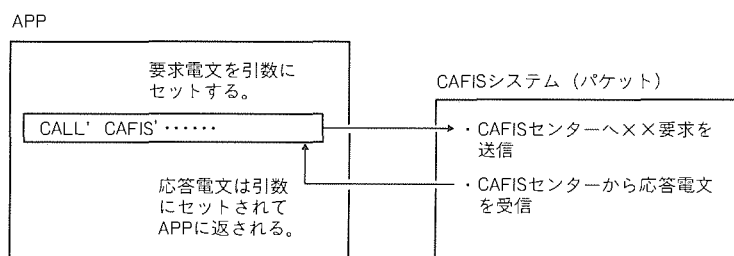


図3. 仕向けセンター用APPインターフェース

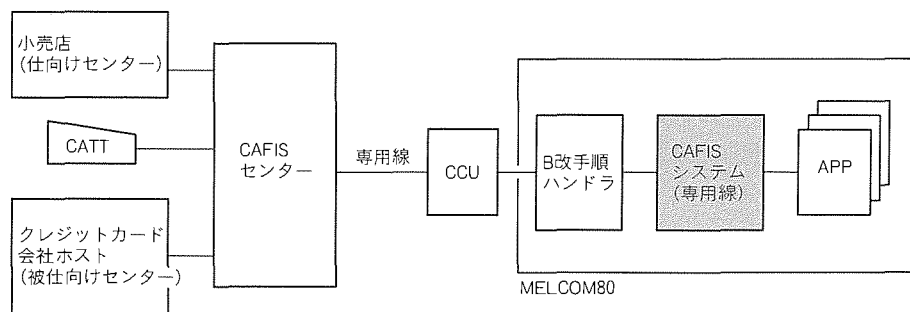


図4. CAFISシステム(専用線)の構成



て売上げ、与信、取消し、CD キャッシング、照会などの各種要求を受信すると、各種要求に対応した APP に電文を振り分ける。したがって、APP は一つの電文処理のみ行えばよく、容易に作成できる。

(3) 複数回線による CAFIS センターとの接続が可能であり、回線数を増やすことによって処理性能を上げることができる。また、一部の回線が障害になっても、残りの回線で縮退運転ができるので、システムの高信頼性が図れる。

(4) 仕向け機能と被仕向け機能とを同一回線で同時に実行でき、回線費用を削減できる。

(5) 実際に CAFIS センターと接続しなくても APP のデバッグができるよう、CAFIS センターのシミュレータを提供しており、APP が効率良く開発できる。

(6) CAFIS センターとの交信メッセージのログ採取機能・支援機能を備えているので、障害発生時等の解析が容易にでき、迅速に回復できる。

### 3.3 アプリケーションシステム SA-S3クレジット

アプリケーションシステム SA-S3 クレジットは、CAFIS システム上で動作する仕向けセンター用 APP パッケージである。

SA-S3 クレジットは POS 端末から入力したクレジットカードの情報をチェックした後、CAFIS センターに送り、その応答結果を POS に返すリアル処理と、販売業務完了後の集計業務用のバックヤード処理から構成される。

クレジットカードにはその小売店独自のハウスカードや1枚で複数のクレジット会社で扱える提携カードなど種類がいろいろあり、クレジットカードのフォーマットもクレジット会社ごとに異なるが、SA-S3 クレジットはクレジット会社ごとにプログラムがモジュール化されており、取り扱うカードの種類が増えても容易に対応できる構造になっている。

CAFIS システム、SA-S3 クレジットと当社の POS 端末と組み合わせることにより、APP の開発なしで小売業の現場でのクレジットカードによる取引業務システムが構築でき、かつ、効率良い運用が行える。

以下に SA-S3 クレジットの機能を示す。

#### (1) リアル処理機能

##### (a) カード判別機能

POS 端末から入力されたカード情報でクレジット会社コードの検索を行い、POS 端末に判別結果を応答する。

##### (b) チェックデジットチェック機能

入力したカード情報の会員番号のチェックデジットをクレジット会社指定の計算式で計算し、カードの正当性をチェックする。

#### (c) ネガティブチェック機能

仕向けセンターに送信する前に MELCOM80 上のネガティブファイルを検索することにより、ブラックリストチェックを行う。この機能によって無駄な仕向けセンターへの送信をなくし、応答性を良くしている。

#### (d) フロアリミットチェック機能

クレジット取引1回の利用限度額（フロアリミット）のチェックを行い、利用限度額内であれば仕向けセンターに送らずに売上処理を可能とする。

#### (e) CAFIS 要求電文編集/データ受渡し機能

入力したクレジットカードデータに、クレジット会社ごとの情報を付加し、CAFIS システムを介して CAFIS 送信を行う。そして、受信データの内容（コード）から、メッセージ等を編集して POS 端末に送信する。

#### (2) バックヤード処理の機能

##### (a) カウンタ交換と各種エラーリスト機能

CAFIS 接続終了時に各クレジット会社に対してカウンタ交換を行い、1日のクレジット売上げ/取消しの件数及び金額をチェックする。

##### (b) ネガティブファイルメンテナンス機能

クレジット各社から郵送されてくるネガ磁気テープを読み、MELCOM80 内のネガティブファイルをメンテナン

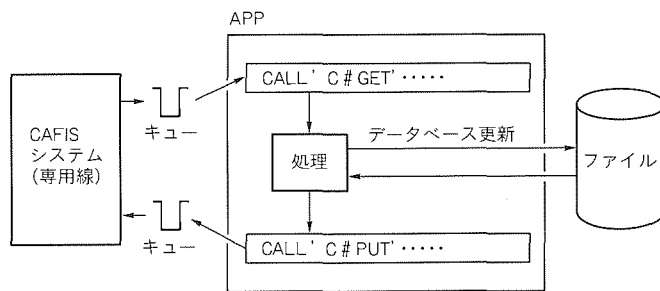


図5. 被仕向けセンター用APPインタフェース

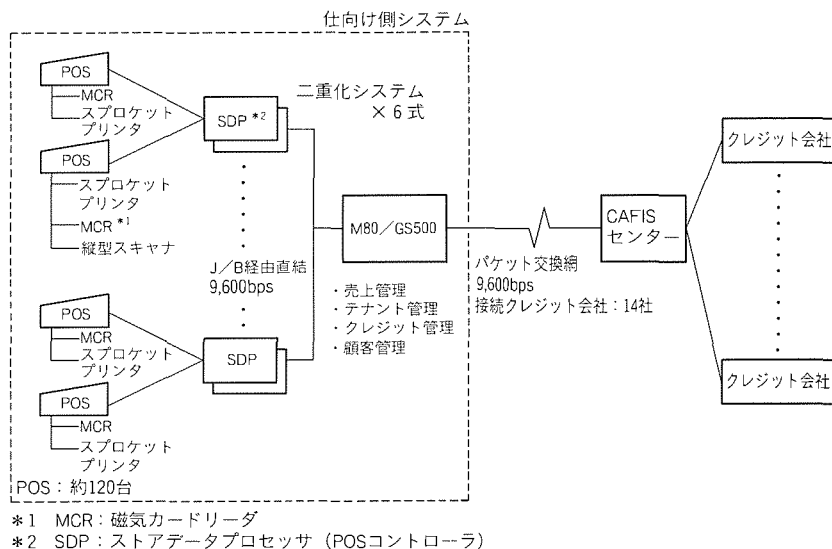


図6. ショッピングセンターシステム

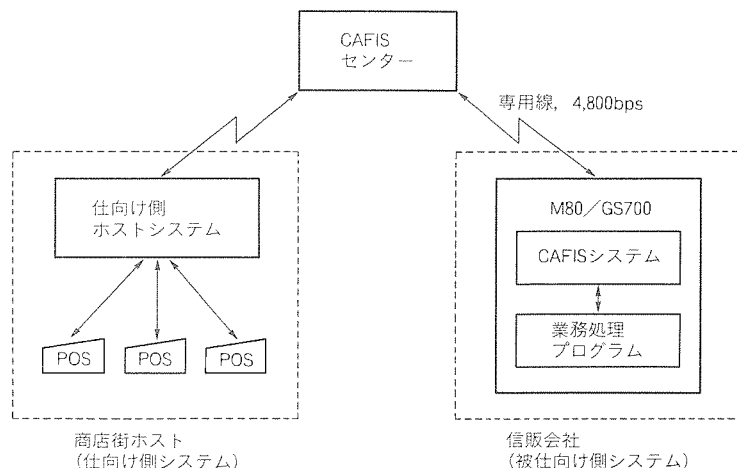
スする。また、電話等による緊急のメンテナンス要求には会話型メンテナンスプログラムが用意されている。

#### (c) 売上 MT 作成機能

MELCOM 80 に累積されたクレジット売上データをもとに、締切日に一括してクレジット会社に対する請求 MT を作成する。

#### (d) POS 端末クレジットデータ DLL (Down Line Loading) 機能

POS 端末でのカード判別及び取引種別入力に必要なクレジット各社のデータを MELCOM 80 側で設定し、営業時間外に POS 端末にダウンロードする。



### 4. 適用事例

#### 4.1 仕向けシステムの適用事例

あるショッピングセンターでは、売上管理・テナント管理・クレジット管理・顧客管理を四つの柱としてシステム構築を行っている。その中で特長的なのが、POS と連動した顧客管理システムである。顧客情報の収集を目的として自社ハウスカードを発行し、顧客データベースを構築し、きめ細かい顧客サービスを実現している。ただし、クレジットカードのユーザーはオフラインであったため、顧客管理が行えなかった。

CAFIS システム（パケット）と SA-S3 クレジットを追加導入することによって、従来のハウスカード処理とクレジットカード処理の統合ができ、より完全な顧客サービスが行えるようになった。さらに、信販会社と提携することにより、ハウスカードにクレジット機能を付加した提携カードを発行し、利便性を高めた（図 6）。

また、別のショッピングセンターでは銀行 POS システムを実現している。銀行 POS システムとは消費者が銀行が発行するキャッシュカードで買物し、その代金をその消費者の銀行口座から即日決済を行うシステムである。

銀行ホストコンピュータとは CAFIS センター経由で接続し、銀行が営業時間外であっても、CAFIS センターの代行機能を利用することで銀行 POS による取引が行える。

#### 4.2 被仕向けシステムの適用事例

クレジット会社のクレジットカード業務は、次の処理から構成される。

(1) 加盟店で顧客がクレジットカードを使用して買物を行うと、その売上は、インプリンタによるオフラインや、CA TT や、仕向けセンターから CAFIS センターを経由したオンラインでクレジット会社に通知される。オンラインで売上

図 7. クレジット社会システム

げが計上される場合には、クレジット会社内でリアルタイムに顧客の与信情報が検索され、売上げの可否が決定される。

(2) クレジット会社では加盟店、顧客ごとに計上された売上げを集計し、加盟店に支払いを行うとともに顧客に対して利用代金の請求を行う。

図 7 に、CAFIS 被仕向けシステムの適用事例を示す。

このシステムは MELCOM 80 CAFIS システム（専用線）を導入し、仕向けセンターと CAFIS センターのセンター間サービスを使用してクレジット業務を実施している。

この事例のクレジット会社では現在、サポートしている CAFIS の業務はセンター間の与信・売上げ・取消し・その他（カウンタ交換）であるが、将来 CATT からの売上計上、CD キャッシングも実施する計画である。

### 5. む す び

従来の特定企業グループの枠を越えて取引に関する情報を交換する EDI (Electronic Data Interchange: 電子データ交換) が注目を集めている。

今日、情報ネットワークの構築による企業間の情報交換の重要性がますます増えている。情報ネットワークは企業活動の合理化・効率化だけでなく、新しいビジネスチャンスの創出に役立つ。CAFIS で交換するクレジット情報は、小売店やクレジット会社の販売戦略に活用できる。

今回紹介した MELCOM 80 CAFIS システムのように、コンピュータによる業務処理と情報ネットワークサービスが連動して、より企業活動を戦略的に推進するシステムが求められるであろう。我々は今後もそのために役立つ製品を提供していく所存である。

# 21型カラーディスプレイ スポットライト モニター “RD21Z”

高性能化するコンピュータは、マンマシンインタフェースとしてのディスプレイモニターの役割をますます重要なものになっています。①高解像度化、②グラフィックユーザーインタフェース(GUI)対応、③人に優しく、④地球に優しくが、近年のディスプレイに対する市場ニーズです。

“RD21Z”は、これらのニーズを満たす新機種として開発されたアパーチャグリルCRTを搭載した21型オートトラッキング カラーディスプレイモニターです。

## 特 長

### 1. アパーチャグリルCRT搭載

アパーチャグリル方式は、高輝度・高コントラスト表示に適した方式です。NX-DBF電子銃による画面全域にわたるシャープなフォーカス性能とアパーチャグリルによる高コントラスト表示は、高解像度を要求されるCAD等のアプリケーションやグラフィックスユーザーインタフェースの表示に最適です。

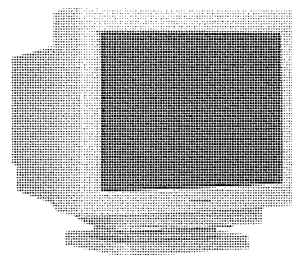
### 2. 人に優しく

#### ●エルゴノミクス

VDT作業における作業環境整備のため、ISOが中心となってディスプレイに求められる性能のガイドラインが制定されています。RD21Zはこのようなガイドラインの一つであるISO 9241の要求を満たしており、視認性の高い安定した画像を提供できます。

#### ●低漏えい(洩)電磁界

CRT表面の静電気やディスプレイからの漏洩電磁界についても、スウェーデンのMPR-IIの要求を満たしています。



RD21Z外観

### ●ユーザーフレンドリー

マイコン制御により、画面サイズ・位置・傾き・ひずみ・表示色をフロントコントロール部の押しボタンで調整できます。また、RD21Zの持つコンピュータとの通信機能と、オプションのMEGU(Mitsubishi Electric Graphics User interface)キットにより、画面にRD21Z専用のコントロールパネルを表示し、画面上のコントロールパネルをマウス等で操作することでディスプレイのあらゆる調整を行うことができます。

### 3. 地球に優しく

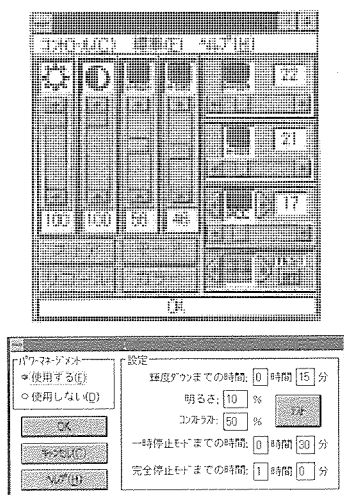
#### ●パワーマネジメント

コンピュータシステム未使用時に、ディスプレイの画面を消すとともに内部回路の電源も切り、自動的に消費電力を大きく節約する省エネ機能を持っています。

#### ●リサイクル

カートンボックスや取扱説明書は、リサイクルペーパーで製作するなど省資源に配慮した製品です。

## 仕様一覧表



【通常動作】：150W (最大)  
【一時停止モード】：30W以下  
【完全停止モード】：5W以下

MEGUキットのコントロールパネルからパワーマネジメントの設定ができます。また、VESA (Video Electronics Standard Association) が定めた標準パワーマネジメント機能を持つコンピュータと組み合わせても、同様の省エネ機能を実現できます。

### MEGUコントロールパネル表示

NO.	項目	仕様
1. CRT	サイズ	21" アパーチャグリル
	スクリーンピッチ (mm)	0.31 (アスペクト比0.59)
	蛍光体	B2 (短管光IEELU)
	CRT表面処理	静電防止 ARパネル
	透過率	29% (ダークフィールド)
	その他	ダイナミックビームフォーミング (DBF) 付き
2. 垂直周波数	水平周波数 (Hz)	30~85
	垂直周波数 (Hz)	30~152
3. 入力信号	ビデオ信号	アナログ
	同期信号	垂直同期信号 複合同期信号 セパレート同期信号
	入力インピーダンス	ビデオ信号 75Ω 同期信号 75Ω / 1.0kΩ
	同期信号	垂直同期信号 0.7V <sub>p-p</sub> 複合同期信号 同値 セパレート同期信号 1.5~5.0V <sub>p-p</sub>
4. 解像度	水平・垂直	1,000ドット×1,200ライン (最大)
5. 表示領域	水平 (mm)	280 (標準)
	垂直 (mm)	295 (標準)
6. 輝度	(cd/m <sup>2</sup> )	100 (全白・ブライテスト、コントラスト最大にて)
7. コネクタ	電源入力	2P IECプラグ、3P アダプタ
	信号入力	シールドD-SUB15P (メス)、BNC・5BNC8ピン (通信用コネクタ)
8. 環境条件	温度	5~40℃
	湿度	10~90% (結露のないこと)
9. 供給電源		AC100V±10%、50/60Hz
10. 消費電力	(W)	150 (最大)



# 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

## 水平偏向回路 (特許 第1469227号)

発明者 近藤耕一, 小舟英喜

この発明は、ディスプレイモニタ装置における水平偏向回路に関するものである。

従来のこの種の水平偏向回路としては図1に示すようなものがあつた。しかしこの回路によると、水平出力トランジスタがONの期間は電流が零より順次増加するので過渡的振動は生じないが、ダンパダイオードがONの期間は水平偏向コイルに流れる電流が急変するので振動を生じやすい。また、巻上げ巻線 $N_2$ と一次巻線 $N_1$ との巻数比を上げることができず、電源電圧 $E_b$ より大きな電圧を水平偏向コイルに加えることができなかった。

この発明は、上記の欠点を除去すべくなされたもので、図2に示すように、水平出力トランスの巻上げ巻線 $N_2$ にリング抑制回路を並列に接続する構成を採るものである。すなわち、走査期間後半の水平出力トランジスタON期間中にフローティング電源用コンデンサ(1)には、巻上げ巻線 $N_2$ に誘起した電圧が整流ダイオード(2)を通じて充電される。走査期間の前半には整流ダイオード(2)はフローティング電源用コンデンサ(1)を電源とするダンパの働きをしてリング

グを抑制する。また、直流電流バイパス抵抗(3)は巻上げ巻線 $N_2$ とフローティング電源用コンデンサ(1)の共振を下げる働きをし、緩衝抵抗(4)は整流ダイオード(2)のダンパダイオードとして働いている期間から抜け出るときの振動を防止するものである。

以上のように、この発明によれば、巻上げ巻線 $N_2$ に誘起した振動に対して有効なリング回路を設けることにより高い巻数比を得ることを可能にし、より低い電源電圧 $E_b$ で水平偏向コイルの偏向に必要な十分な電流を供給できる水平偏向出力回路を提供できる。

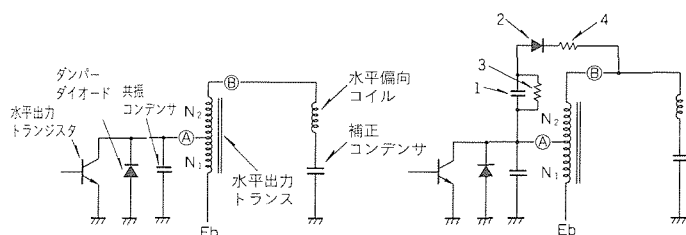


図1

図2

## カラー陰極線管 (特許 第1544916号)

発明者 野坂英荘

この発明は、インライン配列の電子銃を備えたカラー陰極線管に関するものである。

近年、陰極線管のネック部外径寸法が細径化され、電子銃からの電子ビームとネック部内壁との距離が接近してきたため、ネック部内壁の電位の影響を受けて電子ビームの方向がドリフトする(ずれる)現象が顕著になってきた。このために、シールド板を配設する方法が提案されているが、これによると耐電圧特性が悪化するという欠点があつた。

この発明は、上記の欠点を除去すべくなされたもので、図1に示すカラー陰極線管の主電子レンズ部に係る拡大図において、第3グリッド電極 $G_3$ 、第4グリッド電極 $G_4$ とで構成される主電子レンズ部の電極間隙を $d$ 、電子銃のインライン配列方向における主電子レンズ部の両サイド電極孔(10B)、(10R)と電極外周部(1)との間の電極平坦部(2)の寸法を $a$ 、ネック部内壁(3)と電極外周部(1)との間隙を $g$ とすると、各変数 $d$ 、 $a$ 、 $g$ を可変してドリフト量を

測定し、最適範囲を見出したものである。すなわち、ネック部の細径化に対応して $g \leq 1 \text{ mm}$ の場合について結果を示すと図2のようになる。この結果から、主電子レンズの構成において耐電圧特性を悪化させずにコンバージェンスドリフト量を軽減できる範囲は、図2の斜線部であることが判明した。つまり、 $0.8 \text{ mm} \leq d < 1.2a$ とする必要がある。

以上のように、この発明によれば、ネック部の細径化に対処して、耐電圧特性、コンバージェンスドリフト特性を許容レベルに維持しつつ電子銃のフォーカス特性を良好にできるインライン方式のカラー陰極線管を提供できる。

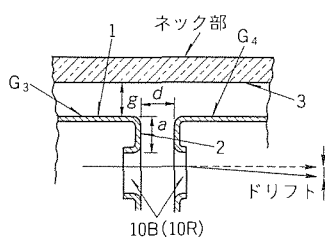


図1

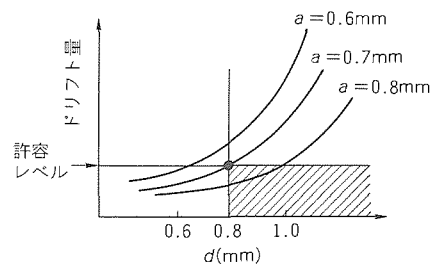


図2



# 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

## 投射型陰極線管 (特許 第1675648号)

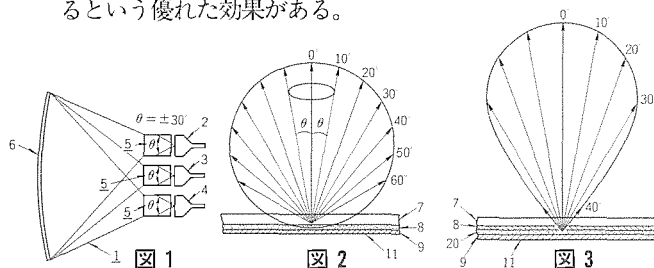
発明者 岩崎安男

この発明は、蛍光面上に映された映像を、蛍光面に対向配置された投射レンズを介して前方の映像スクリーンに拡大投射する投射型陰極線管に関するものである。

現在実用化されている投射型テレビジョンセット(1)では、図1に示すように、B(青色)、G(緑色)、R(赤色)の単色陰極線管(2)、(3)、(4)から単色映像を投射レンズユニット(5)を通して映像スクリーン(6)に投射しカラー映像を得ている。しかし、従来の単色陰極線管の蛍光面(10)からの発光分布は図2のように蛍光体層(8)がほぼ完全拡散面に近いため、蛍光面発光が投射レンズユニットに取り込まれる角度( $\pm 30^\circ$ )における集光率が低く、十分な明るさのスクリーン映像が得られないという欠点があった。この発明は、上記の欠点を除去すべくなされたもので、図3に示すように、取り込み角度内に発光

束を集中させるために、フェースプレート(7)と蛍光体層(8)の下層であってメタルバック層(9)の上層に干渉膜(20)を介挿し、発光点から $\pm 30^\circ$ の頂角の範囲に光束をできる限り集中するようにしたものである。なお、干渉膜としては反射特性に角度依存性のある多層干渉コーティングが用いられる。

以上のようにこの発明によれば、投射レンズユニットの見かけの集光率が向上し、投射映像の明るさが大幅に改善されるという優れた効果がある。



〈次号予定〉三菱電機技報 Vol. 68 No. 3 特集“先端半導体”——半導体事業35周年記念——

- 半導体事業35周年記念特集に寄せて
- VTR用ワンチップカラオケプロセッサ LSI
- 半導体の技術動向と展望 ●64M ビット DRAM
- 3V 動作10ビット50M サンプル/秒 CMOS D/A コンバータ
- ブロック消去可能な16M ビットフラッシュメモリ
- トレンチ MOS ゲート構造の600V 絶縁ゲートバイポーラトランジスタ
- 高速 Quad CAS 付き第三世代 4M DRAM
- 溶融再結晶法を用いた新型高効率薄膜多結晶シリコン太陽電池
- 高速1M ビット CMOS スタティック RAM
- 小型・高機能エアバック用半導体加速度センサ
- 超薄形パッケージ IC を搭載した大容量 IC メモリカード
- CMOS ゲートアレイ用自動レイアウト技術
- 高性能新16ビットマイクロコントローラ “M16 シリーズ”
- VLSI マスクデータ照査システム
- データリンク層通信プロトコルコントローラ内蔵 MCU
- 高誘電率薄膜技術
- システム提案型マイコン応用技術
- X 線リソグラフィ技術
- 12ビット 100kFLIPS フェージ推論プロセッサ
- ハーフミクロン対応ロジック用 CMOS LSI ウェーハプロセス
- 0.5 $\mu$ m CMOS セミカスタム IC
- ノンバイアス ECR プラズマによる微細加工技術
- 国際標準 JPEG 準拠のカラー画像圧縮・伸長 LSI
- 高機能・高信頼性パッケージ

〈訂正のお知らせ〉次のとおり訂正するとともにお詫びいたします。

Vol. 68 No. 1 p. 27 “原子法ウラン濃縮用レーザシステム”の記事の6行目  
誤「平成6年度から……」→ 正「平成5年度から……」

<p>三菱電機技報編集委員</p> <p>委員長 田岡恒雄</p> <p>委員 永田譲蔵 鈴木幹雄 都築鎮 大井房武 岩橋努 江頭英隆 福田哲也 松村恒男 畑谷正雄 才田敏和 鈴木軍士郎 鳥取浩</p> <p>幹事 長崎忠一</p> <p>2月号特集担当 奥田莊一郎</p>	<p>三菱電機技報68巻2号</p> <p>(無断転載を禁ず)</p> <p>1994年2月22日 印刷 1994年2月25日 発行</p> <p>編集兼発行人 長崎忠一</p> <p>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</p> <p>発行所 東京都港区新橋六丁目4番地9号 北海ビル新橋 (〒105) 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) 3437局2692</p> <p>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</p> <p>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)</p>
---	--



# スポットライト

## マルチプロトコルルータ “MELNET R2000”

コンピュータをつなぐ手順—プロトコル—は、一つではありません。それぞれの特長を生かしたネットワークが発達し、それらを相互に接続して業務を更に効率化させるのが現在のネットワークの課題です。

マルチプロトコルルータ“MELNET R2000”は複数のプロトコルを同時に処理する情報交換装置として、ダウンサイジング時代の情報通信インフラの中で、情報の流れの効率化や通信条件の管理による機密保持に威力を発揮します。

### 特 長

#### ●高性能コンパクト、そして大きな拡張性

CSMA/CDインタフェース2本を搭載した基本部だけで部門内のネットワークが構成できるとともに、最大2本搭載できるFDDIインタフェースによる構内バックボーンLAN、ISDNインタフェースによるリモート接続など多様なシステムをすべてR2000で構成することができます。オフィスの電話とコンピュータの配線を統合するよ(燃)り対配線システムと内蔵端末集線装置(HUB)で接続、ターミナルアダプタなしにISDN回線に接続できるというように基本部1台にすべてを集約するオールインワン設計です。

また、FDDIインタフェースに高速サーバコンピュータを直接接続し、多数のクライアントコンピュータとの通信において低速なCSMA/CD接続のボトルネックを解消できます。CSMA/CDを8本、通信回線を6本接続できるなどの大きな拡張性も備えています。

#### ●オープンなネットワークのためのマルチプロトコル

全世界と交信できるインターネットにも使われ、ほとんどのコンピュータが持っているTCP/IPプロトコル、オフィスにおけるグループウェア、電子メールのための標準NetWare(IPX)、ホストコンピュータとのオンライン接続に必要なトランスペアレントブリッジの処理機能を標準搭載しています。

他社/異業種との通信に需要が見込まれるOSIプロトコルもオプション提供します。

#### ●ネットワーク運用の信頼性を高める管理機能

各R2000は、標準ネットワーク管理プロトコルであるSNMPエージェント機能を搭載し、SNMP管理装置に運転状態や通過データ量などを報告して集中的に管理できます。

FDDIの伝送路折返し運用や光バイパススイッチによる障害機器切離しなど縮退運転への移行も管理装置に報告し、一見正常に見えているネットワークの早期修復が図れます。

R2000の専用ポートにノートパソコンを接続したり、SNMP管理装置からリモートログインすることにより運転条件の変更やプロトコルソフトウェアのメンテナンスをR2000と対話して行います。R2000の運転条件、プロトコルソフトウェアは不揮発のフラッシュメモリに書き込まれており、停電の後も自動的に運転を再開できます。

全ネットワークをすべてR2000で構築できることは、このような運用上の管理作業を統一化し、管理者の負担を軽減することになります。

MELNET R2000仕様

項 目	内 容	
中継機能	ルータ機能	TCP/IP IPX (NetWare) OSI (オプション)
	ブリッジ機能	MACアドレス学習 トランスペアレント トランスレーション スパンニングツリー
LANインタフェース	CSMA/CD (10Base5, 10BaseT選択) FDDI(DAS, SAS, SAC選択)	
端末直結インタフェース	10BaseT HUB(SNMP搭載)	
適用通信回線	専 用 線	一般専用線
	回線交換網	INSネット64 INSネット1500
	パケット交換網	DDXパケット交換
通信回線インタフェース	V.24/V.28 X.21/V.11	
ネットワーク管理機能	SNMP (MIB-I, MIB-II, 拡張MIB)	



正 面



背 面