

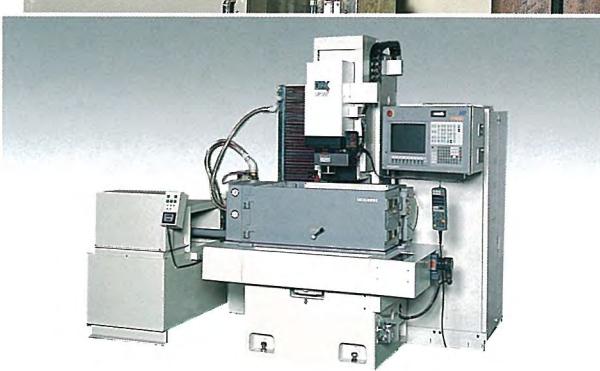
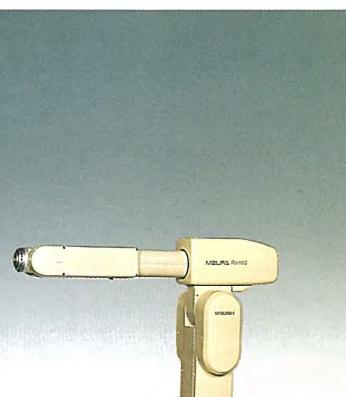
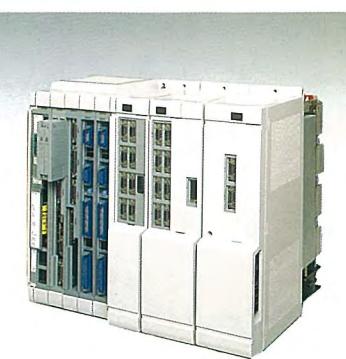
# MITSUBISHI

# 三菱電機技報

MITSUBISHI DENKI GIHO Vol.67 No.8

8  
1993

特集 “産業の高度化をリードするメカトロニクス”



## 特集 “産業の高度化をリードするメカトロニクス”

### 目 次

#### 特集論文

メカトロニクス特集に寄せて ..... 1
佐藤國彦
メカトロニクス技術の現状と展望 ..... 2
齋藤長男・萩原史朗
ワイヤ放電加工機の最新技術 ..... 6
弥富 剛・田中 誠・鈴木俊雄・真柄卓司
ワイヤ放電加工機の加工特性と加工技術 ..... 11
大泉敏郎・山田 久・中山芳郎・竹内浩志
形彫放電加工機の最新技術 ..... 15
新聞 勝・辛嶋利春・赤松浩二・佐藤達志
形彫り放電加工特性と加工技術 ..... 19
尾崎好雄・富沢文夫・河津秀俊・後藤昭弘
レーザ加工機の最新技術 ..... 24
藤本隆一・大山年郎・久保 学・長野 修・白須浩藏
厚板鋼板のレーザ切断特性と加工技術 ..... 31
金岡 優・村井 融・木谷 基
電子ビーム加工機の高信頼化技術 ..... 36
山本吉廣・三浦 明・金子秀巳・荒川及蔵・大田正雄
電子ビームの高機能化と加工への応用 ..... 42
石見泰造・山根義雄・丸山敏郎・山地 茂・野口 洋
産業用ロボット“MELFA”的最新技術と応用 ..... 47
森 俊二・寺内常雄・近藤 誠
新CNCシリーズとその最新技術“MELDAS-500シリーズ” ..... 53
吉田利夫・海野真人・小野茂昭・竹下虎男
金型・板金CAMの最新技術と応用 ..... 58
田中 豊・長谷川貢彦・大久保秀之・岩間俊樹・渡辺尚紀

#### 普通論文

##### 関西電力(株)奥多々良木変電所納め

500kV 300MVA 分解輸送方式変圧器“CGPA 変圧器” ..... 63
玉置栄一・富永雅久・丸岡俊雄・中塙昭治・佐久間 隆
24kV 用キューピカル形ガス絶縁開閉装置(C-GIS) ..... 68
片山 明・長谷川 裕・大河原正博・井上隆一
ハードウェア記述言語による ASIC 設計向けトップダウン CAD システム ..... 73
小野眞司・布上裕之・古茂田道夫・村上雅典・福水利之
長寿命宇宙用スターリング冷凍機 ..... 79
川尻和彦・久森洋一・大石 建・清田浩之・川田正国・五十田 穣
広帯域音響コーデック ..... 83
海老沢秀明・和田哲朗・内藤悠史
MOCVD 法による InP 埋込み成長技術 ..... 88
木村達也・大倉裕二・園田琢二

#### 特許と新案

廃水の処理方法、高周波加熱炉 ..... 95
融雪、凍結防止装置 ..... 96

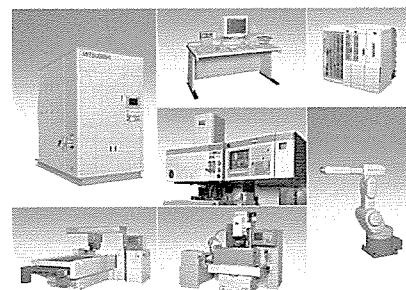
#### スポットライト

701系電車用走行風利用自冷式主変圧器 ..... 92
インテリジェントタイプ自走式ゴルフカート ..... 93
無電解ワイヤ放電加工電源 AEII ..... 94
三菱中容量 CVCF 装置 MELUPS 8700H ..... 97
1,000kV 外鉄形変圧器 0号器の完成 ..... 98
IGBT 応用各軸制御 VVVVF インバータ装置 ..... (表 3)

#### 表紙

##### 産業メカトロニクス製品

当社産業メカトロニクス関連製品は、幅広い製造業において加工・組立など物作りの原点を更に高度化し、厳しさを増す高精度・短納期・低コストの要求に対応している。これらの製品は、制御系のマイクロエレクトロニクス、電源系のパワーエレクトロニクスに機械技術を組み合わせたシステム製品である。写真は、電子ビーム加工機(左上)、レーザ加工機(左下)、金型生産支援システム(中央上)、ワイヤ放電加工機(中央)、形彫放電加工機(中央下)、数値制御装置(右上)、ロボット(右下)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

### メカトロニクス技術の現状と展望

齋藤長男・萩原史朗

三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.2~5 (1993)

メカトロニクス技術の進歩が我が国の高度成長を支えた柱の一つと位置づけ、バブル崩壊によるメカトロニクス市場動向の変化を整理し、現状の技術課題を浮き彫りにする。これらの技術課題に照らして、過去十数年間の技術開発を、放電加工機を具体例とし、概観する。さらに、本特集号に掲載されているメカトロニクス製品にかかる技術の現状と今後の展望の概要について述べる。また、21世紀に向けて省資源・地球環境保全等の見地から、メカトロニクス技術が担うべき役割に言及する。

### ワイヤ放電加工機の最新技術

弥富 剛・田中 誠・鈴木俊雄・真柄卓司

三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.6~10 (1993)

ワイヤ放電加工機への要求は、高精度・高品位加工、自動化・省力化など多岐にわたっている。高速無電解電源は、加工効率を落とさず、電解腐食を抑制した高品位加工ができ、超硬合金やチタンなどの特殊材料への使用を可能とした。また、ワイヤ自動供給装置では、消耗部品の交換性の向上など、保守性の改善によって使いやすさを追求した。これらにより、ワイヤ放電加工機の適用範囲を、金型加工にとどまらず大幅に拡大した。

### ワイヤ放電加工機の加工特性と加工技術

大泉敏郎・山田 久・中山芳郎・竹内浩志

三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.11~14 (1993)

無電解電源、浸せき(漬)加工技術、微細加工技術などの高品位加工技術の実用化により、ワイヤ放電加工機の加工品質は飛躍的に向上した。今後、ICリード加工用金型、精密金型、特殊部品加工など従来は研削加工等の熟練技術を要する加工に頼らなければならなかった領域や、機械加工では加工不可能な微細加工の領域などへ適用することにより、ワイヤ放電加工機は加工工程の自動化やコストダウンに大きく貢献するものと考えられる。

### 形彫放電加工機の最新技術

新開 勝・辛嶋利春・赤松浩二・佐藤達志

三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.15~18 (1993)

MFアダプタは、高精度に加工状態を識別する新センサの開発とこのセンサの信号を形彫放電加工機の適応制御に適用することにより、放電加工性能を格段に向上させた。

粉末混入放電加工は、シリコン微粉末を加工液に混入して放電加工するもので、集中放電を排除できることから仕上加工特性に優れている。従来比約40倍の大面積までの鏡面加工が可能であり、クラックのない高品質の仕上加工面を得ることができる。

### 形彫り放電加工特性と加工技術

尾崎好雄・富沢文夫・河津秀俊・後藤昭弘

三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.19~23 (1993)

形彫放電加工機の新技術が完成し、加工特性が著しく向上した。粉末混入放電加工機により、放電加工の今まで金型に使用できる高品位な加工面を生成することができるようになった。MFアダプタにより、だれが操作しても高速で、良好な加工ができるようになった。不燃性液放電加工機では、消防法の適用が不要で、火災の心配がなくなった。これらの放電加工機の新技術により、形彫放電加工機の用途拡大が期待される。

### レーザ加工機の最新技術

藤本隆一・大山年郎・久保 学・長野 修・白須浩藏

三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.24~30 (1993)

炭酸ガスレーザ加工機が生産現場に投入されてから10年以上が経過し、主として板金加工用途に急速に普及した。この背景には、レーザ加工の生産性・経済性が飛躍的に向上したことが挙げられる。現在においても、加工基本性能の向上のほか、低ランニングコスト化、省力・省人化と稼働率の向上、材料歩留り率の向上など生産性改善のための多くのニーズがある。本稿ではこれらのニーズに基づいた最新の炭酸ガスレーザ加工機の技術動向を紹介する。

### 厚板鋼板のレーザ切断特性と加工技術

金岡 優・村井 融・木谷 基

三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.31~35 (1993)

炭酸ガスレーザ加工機は、切断・溶接・熱処理の分野に広く応用されているが、本稿では軟鋼材の厚板切断性能の向上に貢献した最新の技術と応用例について紹介する。

大物加工用のレーザ加工機では、加工テーブルのあらゆる位置でビーム品質を一定に保つ技術が確立された。また、アシストガス条件では、厚板切断固有の加工部の酸素ガス純度を高く保つ技術について述べる。

### 電子ビーム加工機の高信頼化技術

山本吉廣・三浦 明・金子秀巳・荒川及藏・大田正雄

三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.36~41 (1993)

電子ビーム加工機の生産ラインでの安定化をねらった直線搬送式40kV電子ビーム加工機を製品化し、自動車部品の溶接・表面改質用として、平成4年度に11台納入した。40kV化による溶接品質の長期安定化、装置管理のAI化、低騒音スクロールポンプの採用など従来や他社にない要素を盛り込んでいる。

本稿では、人にやさしい、環境にマッチした電子ビーム加工機の安定化、自動化技術及び小型化を中心に紹介する。

### 電子ビームの高機能化と加工への応用

石見泰造・山根義雄・丸山敏郎・山地 茂・野口 洋

三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.42~46 (1993)

電子ビームの微細化と高速・高精度偏向位置決め技術を開発し、加工への適用を行った。偏向によるビーム制御性の良さは、特に精密加工分野において有効であり、小物部品の高速溶接や表面焼入れ、穴あけ、レジスト露光などで応用されている。偏向は位置誤差などを発生させるが、それらを低減する種々の補正系を開発し、加工からの要求精度向上へも対応している。その結果、偏向領域 □50mmにおいて位置精度±15μm、ビーム径35 ± 2 μmを得ている。

### 産業用ロボット“MELFA”的最新技術と応用

森 俊二・寺内常雄・近藤 誠

三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.47~52 (1993)

ロボットは、人手不足の解消手段として、多方面、多分野で積極的な導入が行われてきた。近年は、多品質少量生産により、高度に対応できるロボットのニーズが高まってきた。

本稿では、人との置き換えと周辺制御の容易化をコンセプトとした組立ハンドリングロボット“Nシリーズ”と、物流の自動化を先取りしたパレタイジングロボット“RH-Tシリーズ”的技術と応用について述べる。

# Abstracts

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 24~30 (1993)

## New Laser Processing Technology

by Ryuichi Fujimoto, Toshiro Dyama, Manabu Kubo, Osamu Nagano & Kozo Shirasu

In the decade since its introduction, CO<sub>2</sub> laser processing apparatus has become widely applied in manufacturing, primarily in metal processing. This success is due to dramatic improvements in the productivity and economy of laser processing. The article introduces new CO<sub>2</sub> laser processing technology that addresses the needs for better machining performance, lower operating costs, reduced labor and technical skill requirements, higher operating duty, and better yields.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 2~5 (1993)

## The Present Status and Future Trends in Mechatronics Technology

by Naga Saito & Shiro Hagihara

Progress in mechatronics technology is considered among the major supports to Japan's extended years of rapid industrial growth. The end of the "bubble economy" period has had a rationalizing effect on the mechatronics market and brought out key technical issues. The article examines these issues as it surveys the past decade of mechatronics development in relation to electric-discharge machines, a principal mechatronics application and the focus of this special issue. The role of mechatronics technology in conserving resources and protecting the environment as we approach the 21st century is also considered.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 31~35 (1993)

## Laser Cutting Characteristics and Processing Techniques for Thick Steel plate

by Masaru Kanaoka, Toru Murai & Motoe Kitani

Carbon-dioxide lasers are widely used in industrial cutting, welding and heat-treating applications. The article examines technical advances in the cutting of thick mild-steel plate. Technology has been developed for maintaining uniform beam characteristics over the entire surface of processing tables for large workpieces. Methods have also been developed to maintain high purity of the supplemental oxygen gas discharged in the vicinity of the thick-plate cutting head.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 6~10 (1993)

## Advanced Technology for Wire-Cut Electrical Discharge Machines

by Takeshi Yatomi, Makoto Tanaka, Toshio Suzuki & Takuji Magara

Wire-cut EDMs face demands for reduced manpower required for operation and performance improvements in such areas as precision, finish smoothness and automation. Recent high-speed EDMs with anti-electrolytic power supplies are capable of efficiently producing high-quality finishes while suppressing corrosion effects, and can process such special materials as superhard alloys and titanium. New automatic wire-feed units allow easy replacement of depleted articles for simpler equipment upkeep. With these advances, applications for wire-cut EDMs are extending from dies into general-machining applications.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 36~41 (1993)

## Highly Reliable Technology for Electron-Beam Machines

by Yoshihiro Yamamoto, Akira Miura, Hidemi Kaneko, Kyuzo Arakawa & Masao Ota

In 1992 Mitsubishi Electric delivered 11 new 40kV commercial electron-beam machines for automotive component welding and surface-treatment applications. The machines feature a linear transport that enables more reliable production-line performance. The high 40kV output enhances long-term welding uniformity, while AI control and a low-noise scroll compressor represent significant advances over previous and competitive equipment. The article reports on technologies for environmentally safe equipment with high output stability, automation features and compact dimensions.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 11~14 (1993)

## Characteristics and Application Engineering for Wire-Cut Electrical Discharge Machines

by Toshiro Dizumi, Hisashi Yamada, Yoshiro Nakayama & Hiroshi Takeuchi

The machining quality of wire-cut EDMs has improved markedly due to technological developments in anti-electrolytic power supplies, submerged machining, and mirror finishing. Wire-cut EDMs are now poised to generate substantial automation gains and cost savings in processing lines, where they can substitute for skilled machinists in producing high-precision dies (e.g., dies used to form IC lead frames) and special-purpose components, as well as producing micromachined components beyond the reach of mechanical processes.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 42~46 (1993)

## The Processing Applications of High Performance Electron-Beam Technology

by Taizo Iwami, Yoshi Yamane, Toshiro Maruyama, Shigeru Yamaji & Yo Noguchi

The corporation has developed technologies for finer electron beams and faster, more accurate deflection, and applied them to commercial processing. Improved beam-deflection control is useful for precision machining and suited to high-speed welding, case hardening, perforation on small workpieces, and photoresist exposure. In order to improve machining accuracy beam-deflection error is compensated by a number of correction systems. As a result, the positioning accuracy for a 50×50mm square is ±15µm and the beam diameter is 35±2µm.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 15~18 (1993)

## Advanced Technology for NC Die-Sinking Electrical Discharge Machines

by Masaru Shinkai, Toshiharu Karashima, Koji Akamatsu & Tatsushi Sato

The performance of die-sinking EDMs has been improved by use of the "Miracle Fuzzy" (MF) adapter, in which a highly precise sensor monitors conditions at the machining gap and provides feedback to an adaptive control system. Another recent innovation is a colloidal EDM process in which a suspension of extremely fine silicon powder in the dielectric fluid prevents localized discharge, with the effect of improving mirror-finishing characteristics. This allows mirror finishing of areas 40 times larger than previously possible and yields a high-quality crack-free surface.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 47~52 (1993)

## Recent Technology for MELFA Industrial Robots and Its Applications Therein

by Shunji Mori, Tsuneo Terauchi & Makoto Kondo

Robots have been introduced to replace manual operations in a wide variety of fields. Recently demand has been growing for robots suited to small-lot multivariant production. The article discusses recent technology developed for and its applications in the MELFA N Series assembly and handling robots. The MELFA industrial robots feature simplified peripheral control functions and are designed to replace human assembly workers. Also discussed are MELFA RH-T Series palletizing robots, which are designed to automate transport functions.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 19~23 (1993)

## Characteristics and Application Engineering of Die-Sinking Electrical Discharge Machines

by Yoshio Ozaki, Fumio Tomizawa, Hidetoshi Kawatsu & Akihiro Goto

With the maturing of several new technologies, the performance of die-sinking EDMs has improved markedly. A colloidal EDM process produces smooth finishes that allow processed dies to be used without additional processing. A "Miracle Fuzzy" (MF) adapter even enables inexperienced operators to achieve high-speed, quality finishing. Die-sinking EDMs using nonflammable dielectric fluid have also been developed, making them free of fire hazards. These new technologies will have the effect of expanding the applications of die-sinking EDMs.

## アブストラクト

新 CNC シリーズとその最新技術 “MELDAS-500シリーズ”  
吉田利夫・海野真人・小野茂昭・竹下虎男  
三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.53～57 (1993)

M500シリーズは、M300シリーズの高速・高精度、カスタム開放機能の充実等の特長を引き継ぎ、最新のマイクロプロセッサ、専用LSI等の採用により、基本性能を大幅向上させるとともにマンマシンインタフェースを充実させている。駆動系は低損失素子、ヒートパイプ冷却、大電流プリント基板等の採用により、低消費電力化及び小型化を実現すると同時に、制振制御、滑らかハイゲインサーボなど制御特性の向上を図っている。

### 金型・板金 CAM の最新技術と応用

田中 豊・長谷川貞彦・大久保秀之・岩間俊樹・渡辺尚紀  
三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.58～62 (1993)

金型・板金CAMとしてのMS-Xシリーズは、放電加工機、レーザ加工機、NC工作機械へのNCプログラムを供給するCAM機能を核に、各種の設計支援機能も備えた統合化システムである。

このシステムは、当社の汎用EWS、パソコン上に、ネットワーク環境を基盤に構築されており、ユーザーに対する徹底したオープンアーキテクチャを実現している。本稿ではシステムの現状及び応用事例を中心に、システムの特長と将来動向を報告する。

### 関西電力(株) 奥多々良木変電所納め

500kV 300MVA 分解輸送方式変圧器 “CGPA 変圧器”  
玉置栄一・富永雅久・丸岡俊雄・中塚昭治・佐久間 隆  
三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.63～67 (1993)

今回、関西電力(株)奥多々良木変電所に500kV 300MVA 分解輸送方式変圧器 “CGPA 変圧器”を納入した。本稿では、外鉄形変圧器の本質的な特徴を生かしたCGPA 変圧器の構造・工法及び既納の275kV CGPA 変圧器に比べて、今回新たに採用した現地組立用クリーンハウス・鉄心組立技術・品質確認方法について示した。また、CGPA 変圧器の適用効果及び通常の組立輸送変圧器との比較を示した。

### 24kV 用キューピカル形ガス絶縁開閉装置(C-GIS)

片山 明・長谷川 裕・大河原正博・井上隆一  
三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.68～72 (1993)

OA・FA化の進展と受電システムの多様化・複雑化により、中電圧受配電設備には、より高い信頼性、個々の設置に対する構成最適化・省スペース化が求められている。

収納機器の機能統合とモジュール化構造により、これらのニーズにこたえる新型24kV用C-GISを製品化した。このC-GISはVCBを収納し、また“MOF(計器用変圧変流器)バイパス方式”設備の構成には専用のモジュールを用いることにより、占有床面積を縮小している。

ハードウェア記述言語による  
ASIC 設計向けトップダウン CAD システム  
小野眞司・布上裕之・古茂田道夫・村上雅映・福水利之  
三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.73～78 (1993)

最近、ASICの大規模化に伴う設計の複雑化に反して、設計期間の短縮化の要求はますます強くなっている。当社では、世界最高レベルのASICデバイステクノロジーを有効に活用できるように、ハードウェア記述言語を用いた機能検証及び論理合成を行う新しい設計手法 “トップダウンデザイン”をサポートするトップダウン CAD システムを開発・実用化した。これにより、従来比30%以上の設計期間短縮が可能となった。

### 長寿命宇宙用スターリング冷凍機

川尻和彦・久森洋一・大石 建・清田浩之・川田正国・五十田 穣  
三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.79～82 (1993)

極軌道プラットフォーム(EOS-AM1)に搭載する赤外線素子(ASTER/SWIR)冷却用に、5万時間以上の寿命が期待できる高性能なスターリング冷凍機のBBM(基本性能検証用モデル)を開発した。この冷凍機では、長寿命を得るためサスペンションばねによるピストン支持機構やピストンのリニアモータ駆動制御を採用して、消費電力48Wで70Kにおける冷却能力1.2Wを実現し、世界最高レベルの冷却性能を達成した。本稿では、冷凍機の特長と基本的な冷却特性等について紹介する。

### 広帯域音響コーデック

海老沢秀明・和田哲朗・内藤悠史  
三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.83～87 (1993)

音響信号の高能率な伝送が可能な広帯域音響コーデックを開発した。符号化方式は国際規格に準拠しており、デジタル信号処理プロセッサを用いてこれを実現した。このコーデックは、20kHz帯域の音響信号を128kbps(1チャネル当たり)に圧縮して伝送でき、コンパクトディスクと同等の高い伝送品質をもっている。既にデジタルSNG(Satellite News Gathering)システムに適用しており、今後とも各種マルチメディア関連製品への適用が期待される。

### MOCVD 法による InP 埋込み成長技術

木村達也・大倉裕二・園田琢二  
三菱電機技報 Vol.67・No.8・p.88～91 (1993)

高均一な長波長半導体レーザ構造を作製するために、成長膜厚の均一性・制御性に優れた有機金属気相成長法(MOCVD法)を用いて、2インチp型InP基板上で、活性層に加えてInP埋込み層をも高均一に成長できる技術を開発した。また、埋込み再成長界面の汚染物を低減することにより、レーザの信頼性を向上した。

この技術は、今後の通信用半導体レーザの低価格化及びアレー化等の集積化に向けた基盤技術となる。

# Abstracts

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 73~78 (1993)

## A Top-Down CAD System Using Hardware Description Language for ASIC Design

by Shinji Ono, Hiroyuki Nunogami, Michio Komoda, Masateru Murakami & Toshiyuki Fukumizu

Tools are being developed to reduce the design time required for large ASICs. Mitsubishi Electric has developed and is using a top-down CAD system based on a hardware description language with function verification and logic synthesis capabilities. Using the system, ASICs can be designed 30% faster than previously possible.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 79~82 (1993)

## A Long Life Stirling-Cycle Refrigeration Unit for Use in Outer Space

by Kazuhiko Kawajiri, Yoichi Hisamori, Tatsuru Oishi, Hiroyuki Kiyota, Masakuni Kawada & Minoru Isoda

The corporation has developed the bread board model (BBM) of a Stirling-cycle refrigeration unit for the infrared sensor (ASTER/SWIR) to be carried aboard the polar-orbiting EOS-AM1 satellite. The long 50,000+ hour operating life was achieved by introducing a linear-motor piston drive and a leaf-spring piston-support mechanism. The cooler consumes 48W and provides 1.2W of cooling power at 70K, placing it as one of the most efficient refrigeration units in the world. The article introduces the cooler's features and basic characteristics.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 83~87 (1993)

## A Wideband Audio Codec

by Hideaki Ebisawa, Tetsuro Wada & Yushi Naito

A wideband audio codec has been developed to enable more efficient transmission of audio signals. Digital signal processors implement the coding algorithm, which complies with ISO standards. The codec encodes audio signals with a bandwidth of 20kHz in a 128kbps digital bit stream, maintaining CD-equivalent sound quality. The device is already in use in an experimental digital satellite news gathering (SNG) system, and multimedia applications are anticipated.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 88~91 (1993)

## The Use of Metal-Organic Chemical Vapor Deposition to Grow Buried InP Layers

by Tatsuya Kimura, Yuji Okura & Takuji Sonoda

The corporation has developed MOCVD technology to grow buried InP layers over the active layers of long-wavelength laser diodes. Applied to two-inch p-type InP substrates, the method realizes excellent uniformity and thickness control. Good control of impurities at the regrowth interface of the buried layer has raised laser reliability. The new technology will significantly lower the production costs of lasers diodes and be a key component in the development of diode arrays.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 53~57 (1993)

## New Technologies for MELDAS 500 Series Computerized Numeric Controllers

by Toshio Yoshida, Mahito Unno, Shigeaki Ono & Torao Takeshita

The speed and precision capabilities of the M500 Series CNC has been dramatically enhanced with the incorporation of the latest in high performance microprocessors, dedicated custom LSIs, and an upgraded man-machine interface. Highly efficient power devices, heat-plate cooling, and high-current PCBs have been introduced to lower power consumption and reduce equipment size. Motion control characteristics have also been greatly improved through the incorporation of a newly developed SHG servo control, reducing vibration and contouring error.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 58~62 (1993)

## Computer-Aided Manufacturing

by Yutaka Tanaka, Sadahiko Hasegawa, Hideyuki Okubo, Toshiki Iwama & Naoki Watanabe

The MS-X Series CAM system for die and sheet metal production is an integrated system consisting of a large variety of design support functions and the ability to convert design data into NC programs for EDMs, industrial lasers, and NC machine tools. The open-architecture system, which runs on Mitsubishi Electric's general-purpose workstations and personal computers, is designed to communicate via LANs. The article introduces the current status of the system, features, applications and development trends.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 63~67 (1993)

## A Three-Phase 500kV 300MVA Split-Transport-Type Transformer for the Okutataragi Substation of The Kansai Electric Power Co., Inc.

by Eiichi Tamaki, Masahisa Tominaga, Toshio Maruoka, Shoji Nakatsuka & Takashi Sakuma

A three-phase 500kV 300MVA split-transport-type transformer has been delivered to the Okutataragi Substation of The Kansai Electric Power Co., Inc.. The article describes the construction and manufacture of the shell-form coil group packed assembly (CGPA) transformer, which is basically suitable for split-transport (coil and core are transported separately and assembled on site). In addition to the technologies used for the previous 275kV CGPA transformer, the following new methods and technologies have been adopted for the 500kV CGPA transformer: on-site clean house, core assembly technology, and quality assurance methods. The advantages of CGPA transformers and differences in assembly and transport procedures are also discussed.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 67, No. 8, pp. 68~72 (1993)

## 24kV Cubicle Gas-Insulated Switchgear

by Akira Katayama, Hiroshi Hasegawa, Masahiro Ohgawara & Takakazu Inoue

Two recent tendencies are the ever increasing automation of offices and factories and the adoption of more varied and complicated substation facilities. As a consequence, medium-voltage equipment for substations face demands for higher reliability, space-saving construction, and optimized layouts. The corporation addresses these demands with a new line of modularized, integrated 24kV cubicle gas-insulated switchgear. The switchgear includes an integral vacuum circuit breaker. A special module implements a metering outfit (MOF) bypass system that reduces floor space requirements.

## メカトロニクス特集に寄せて

取締役  
FAシステム事業本部副本部長

佐藤 國彦



1970年代に、当時急速に発展中のパワーエレクトロニクス、電子制御と機械技術が結合し、メカトロニクスの分野が構築された。そのメカトロニクスに、幼児期にあった放電加工や電子ビーム加工、レーザ発振技術が加わり、機械加工と一緒に画す先端加工技術分野が拓けた。その非接触加工や電子的輪郭加工、現物合わせ加工などの特徴を生かしたメカトロニクスの先端加工技術は、飛躍的発展を遂げつつあった自動車、家電機器の量産化の一大決め手である金型加工を中心とした市場のニーズと融合して発展し続け、工作機業界において確固たる地位を築いた。

大量生産型部品製造法は、切削加工から塑性加工へ、次に塑性加工から無駄をなくした精密接合技術へと発展を促した。大量生産型産業の代表格である自動車部品製造法も、自動車部品のバンパーが鉄板から強化プラスチックスに、テールランプも三色一体のプラスチックに変わったように、切削加工から割り型・一体化金型による塑性加工へと変わり、この金型のマザーマシンもマニュアルからNC工作機械へと変わってきた。一方、電子機器産業も同様に、割り型から一体化金型・複合金型へと変わり、最近では、モールドスイッチやソケットのようにモールド型とプレス型を合体した複合組合せ加工へと変わっている。このような部品生産構造の変革の手段を手助けして発展してきたのが、メカトロニクス製品である。

この特集では、当社が製造している放電加工機、レーザ加工機、電子ビーム装置、ロボット及びこれらの頭脳であるNC装置等のメカトロニクス製品の最新技術を紹介する。

放電加工機は、1940年代に旧ソ連のラザレンコ夫婦によりこの世に生を受け、昭和30年代に異形形状の抜型が分割型とせざ一体型でできたため実用化された。当時はコンデンサ電源のため電極消耗が多く抜型しか適用できなかつたが、昭和40年代にトランジスタ電源が開発され、電極の低消耗と加工速度が大幅に改善され、プレス型、プラスチック金型等の底付け型にも応用が拡大してきた。昭和50年代に入り、NC化と結合した揺動加工などの機能改革があり、トータル加工速度が上昇した。近年では、多くの人手を要し困っていた大面積でも磨き作業が不要となる鏡面加工ができるシリコン粉末放電加工機も出現してきた。一方、昭和40年代には、0.03~0.3mmの黄銅線を電極として加工するワイヤ放電加工機が開発され、形彫放電加工機の欠点である電極製作の煩わしさを解消した。

ワイヤ放電加工機は、ここ十数年間に、NCによる輪郭制御、機械精度、ワイヤオートフィーダの機構、パワーエレクトロニクス等の進歩により、高速(十数倍)・高精度( $2 \sim 3 \mu\text{m}$ )・無人化が可能になり、金型製作に技術革新を巻き起こした。最近では、加工面に変質層やクラックがなく、さびも生じない無電解電源(AE電源)付きのワイヤ放電加工機も開発され、金型の高寿命化・高精度化を図り、IC金型など高精度・微細分野へと応用範囲が広がり、金型のマザーマシンとして金型業界に定着している。

1960年に米国のメイマンが発振させたルビーレーザに端を発し、レーザは加工分野にも応用され、1980年に日本で市販第一号の出現以来、CO<sub>2</sub>レーザが主流となっている。現在では、薄板の切断加工に主に応用されており、さらに、鋼材の板厚22mmまで加工できるようになり、厚板加工分野や長尺物や異形材へと応用範囲が広がってきている。さらに、レーザ溶接ロボットが出現し溶接分野にも拡大されつつあり、レーザ加工は原理的に高エネルギー密度を利用しているため、高範囲の切断・加工・穴あけ・溶接・熱処理膜のスライビングなど多岐にわたり、未来の発展性が大いに期待できる。

電子ビーム装置は、1974年市販第一号機出荷以来、自動車部品の大量生産ラインの組立溶接を中心に使われ、カーカーラや自動变速機の装備率向上に寄与している。今後、新たな適用分野として電子ビーム特有のビームの偏向技術や連続真空排気技術を生かして、センサや電子デバイスなど小型精密部品の高速加工へも適用が見込まれている。

今後、放電加工、レーザ加工、電子ビーム加工など、当時先端加工といわれ限定された用途に使われていた技術は、加工産業における中核技術に成長しつつあり、その発展とともに、多種の一般加工分野への拡大はもちろんのこと、加工中のオンライン計測制御、自動溶接組立等に進展し、従来技術、FA技術と結合し、加工・組立産業へと広く浸透していく時代が訪れる。当社は、このような時代に対応するため、電気技術と制御技術をよりステップアップし、更に計測制御技術を加えて、より高度な品質のメカトロニクス製品やシステムを開発していく所存である。

ユーザーの皆様の暖かい御指導と御支援をお願いいたします。

# メカトロニクス技術の現状と展望

齋藤長男\*  
萩原史朗\*\*

## 1. まえがき

メカトロニクス技術は機械技術とコンピュータを中心とする制御情報技術との融合により、加工装置・組立装置・搬送装置・保管装置(自動倉庫のようなもの)等の生産財の省力・省人化、無人化を実現した。これによって生産活動の高効率化を展開するとともに、古い機械技術を新しいものに変革した。我が国の工業国としての高度成長と繁栄も、これらのメカトロニクス技術の発展に起因するところが大きい。これらの特長は、機械技術それ自体の変革によるよりは、主体がCNC技術の進展に依存していたと見られる。

バブル経済の崩壊とともに襲ってきた長期的な景気の低迷は、従来の単なるCNC化とそれをベースとしたFMSに対して変革を迫っている。変革を必要とする背景として、次のようなことを挙げることができる。

- (1) 単なる加工装置のCNC化をベースとした自動化・無人化では、生産効率改善の限界が見られる。加工現象の根本に立脚した加工能力、加工品質の革新を必要とする。
- (2) 第二次産業人口の減少及び熟練技能者の老齢化と減少は、ハイテク化したメカトロニクス技術を一層必要とするが、使用する人にとって使いやすさが更に重要となる。
- (3) 従来のFMSを大上段に振りかざして押し進めていくと、非常に大きな設備投資となる。基本的には無理をした完全自動化を指向するよりは、人の介在した基本機能重視型のオートメーションが、無駄を省くという点からも望ましいとの認識が強くなっている。
- (4) 同時に、FMSのトップダウン的管理方式は、定常的な量産には適しているが、設計変更・仕様変更・機種変更・生産量変更等の変化には、必ずしもフレキシブルに対応できるとは限らない。

大掛かりな生産システムを構築するよりは、むしろセルレベルでそれぞれの基本機能(位置決め・加工・検査等)を自己完結型にセル化し、容易に組替えできる柔軟なシステムがより求められる時代となってきた。

(5) 従来の加工方法において困難な課題が存在していた分野に、この特集号の中核となる放電加工機等の加工機を巧妙な工夫のもとに転用拡大することによって、有効な用途が見い出される可能性が認識され始めている。

以上のような背景に基づく課題とその可能性に関して、現状と今後の展望について述べる。

## 2. メカトロニクス技術の過去十数年間の推移

過去十数年前から人口構成は高学歴化・高齢化し、第二次産業人口の減少が目立ち、少数の労働力を効果的に活用して、多品種少量生産においても生産性を向上させることが極めて重要であった。このため、作業形態を頭脳労働的に構成し、自動化・無人化を推進し、従来、長年の徒弟的熟練技能に依存していた高精度、高品質製品についても、CNC化をベースとした自動加工システムにより、これを実現する必要があった。これを具現化したメカトロニクス製品として、マシニングセンター、放電加工機、レーザ加工機等が挙げられる。

特に筆者一人が専門とする放電加工機分野でいえば、ワイヤ放電加工が最もそれを鮮明に実現している。ワイヤ放電加工機は、二十歳前後の若い作業者が1週間程度の研修後、しばらくして高精度の順送抜型や、プラスチックモールド金型、又は試作品等の加工を数μm程度の高精度で実現している。しかも、自動化についていえば、加工開始用の小穴をあらかじめあけておけば、夜間無人でワイヤを通し、仮にワイヤ断線があっても自動的に修復することができる。加工速度は十数年の間に十数倍(25→300mm<sup>3</sup>/min)に向上し、加工精度も10倍(±20→±1~2μm)に向上している。さらに、CNC化によって輪郭の自動加工を行うのみならず、切り落とされた中子の排除処理まで自動的に行うようになっている。ここまででは主にメカトロニクス技術の成果である。

しかしながら、ワイヤ放電加工機は水中での加工であるために電解作用が発生し、鋼板やタンクステンカーバイト焼結合金等に関する劣化層を生ずる欠点があった。この問題に関して三菱電機㈱は、超高周波電流波形を応用することによって、電解作用を抑制し、劣化層が実用的に無視できる新加工法を開発した<sup>(1)</sup>。これによって抜型やプラスチックモールド型の製作に革新を生み、型製作納期を1/10程度に、型製作費用を1/2~1/3とした。また、超硬合金製ICリードフレームの製作を可能とした。

このように加工技術の基本的な技術開発が行われることによって、革新的なメカトロニクス製品が生まれ、市場で高い評価を受けている。

次にこのような観点から形彫放電加工機を見ると、CNC化によるプログラム加工や、懸垂加工、適応制御加工などは大いに進展したけれども、放電加工本来の欠点である大面積になるとかに放電電力を小さくしても、仕上面あらさは精

細にならぬこと、加工表面にクラックやアークこん(痕)を含む好ましくない変質層を生ずることなどの本質的欠点は解決されないまま推移していた。

しかし、数年前に豊田工業大学で、上記のような本質的な欠点を解決する画期的研究成果が得られた<sup>(2)</sup>。すなわち、シリコン等の粉末を加工液中に混入して放電加工を行うと、加工面積が100cm<sup>2</sup>程度に広くなても鏡面加工が得られ、この加工面はクラックもアーク痕も生ぜず、耐食性が高く耐磨耗性も高い加工表面を得ることができる。三菱電機はこの技術を導入し、製品化した。

この技術開発は、形彫り放電加工技術の長年にわたる宿願を一举に解決したものである。すなわち、従来は放電加工後の表面には硬い変質層が残り、磨き作業に入る前に除去する必要があった。加工素材が耐熱材料の場合は、表面にクラックが生じやすく、そのため強度が劣化したり、腐食されやすくなる。この技術開発により、磨き作業は放電加工のみで達せられることが多く、また放電加工ができる形状であれば複雑な形状でも鏡面を得ることができる。すなわち、自動磨き装置では磨けない部分に対しても、同一の放電加工機で鏡面を実現することができる。また、導電性ファインセラミックや焼結タングステンカーバイト合金に対しても、クラックを生じない放電加工が可能となつた<sup>(3)</sup>。

このようなCNC化のみならず、加工の本質的革新を織り込んだ製品は、長期的な景気低迷の時期といえども、強い需要意欲に支えられている。

### 3. メカトロニクス技術の現状と今後の展望

三菱電機が製造・販売しているメカトロニクス製品の中で、この特集論文が対象としている7機種(ワイヤ放電加工機、形彫放電加工機、レーザ加工機、電子ビーム加工機、産業用ロボット、CNC、金型・板金CAM)に対し、各機種の区分、位置付け、ハードウェア構成、相互関連を図1に示す。

これらの機種にかかわる技術の現状と今後の展望について、以下に述べる。

#### 3.1 ワイヤ放電加工機

ワイヤ放電加工機も形彫放電加工機も、前述2章に示したように、根本的課題に関してはひとまず対応策がとられている。もちろん、その工業的成果は長期にわたって観察し、改良の必要はあるが、現在、産業界で高く評価されている。

従来、放電加工機は金型及び一部の試作品製作の分野にしか使用されていなかった。このことは高機能の放電加工機が自動車や電気製品の量産を支えたものであり、日本の工業力の発展のために誠に適切な用途であったのではあるが、今後は、放電加工の基本的な優れた加工特性を他の分野にも広く適応し、発展させることが必要である。

ワイヤ放電加工機の特長は高硬度材料(焼入鋼、焼結タンゲステンカーバイト、導電性ファインセラミックス等)及び難切削・難研削材料(チタン及び特殊な合金等)に対し、高精度加工が可能であり、形状が複雑であるほど機械的加工(切削、研削等)に比べ、その優位性が増す。

一例を焼入歯車加工にとれば(機械類の高負荷荷重に対応するため焼入硬化した歯車が増加していく。), 機械加工又は塑性加工可能な状態で歯形を加工し、その後焼入れを行うが、焼入れによってマルテンサイト変態を起こすため、2~4%程度の体積膨脹を起こす。高精度歯車を製作するためにには、その後、歯車研削を行うが、除去量が多いと研削と(砥)石の脱落や減寸等のため、研削精度は向上しない。したがって、焼入れした素材をワイヤ放電加工機で加工すれば、そのままでも焼入歯車として使用できる場合も多く、また、さらに歯車研削を必要とする場合でも、除去量が少なくて均一なので、超高精度の歯車が得られる。

また、難研削材料として、研削砥石が目づまりを起こして研削が困難となる特殊な合金がある。これらの合金に対し、ワイヤ放電加工が経済的加工速度を達成できる用途分野を開拓

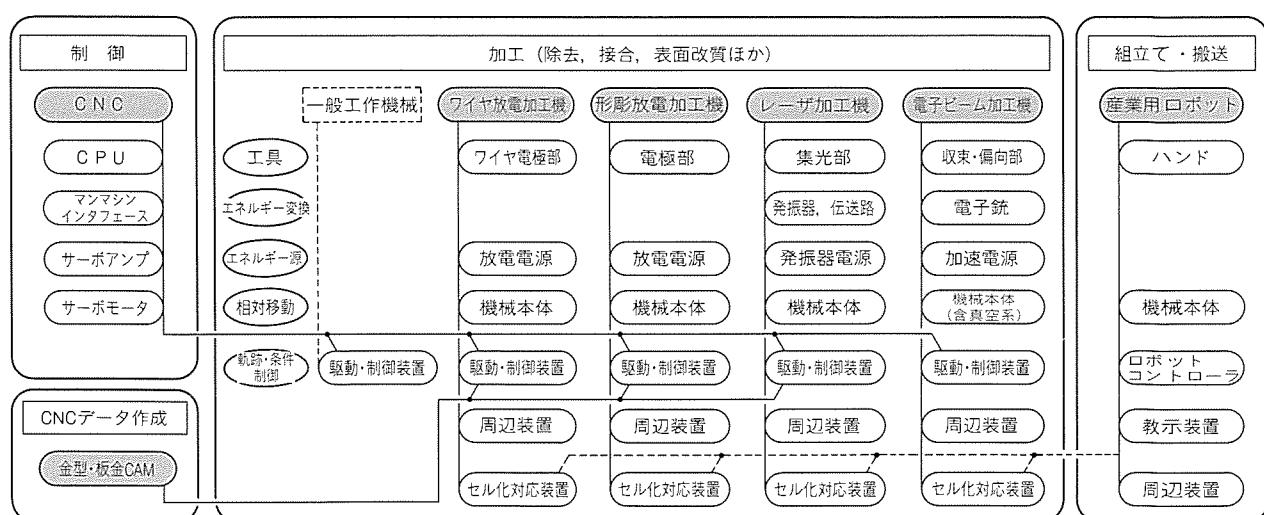


図1. 三菱電機メカトロニクス製品のハードウェア構成と相互関連

拓できるものと考える。

### 3.2 形彫放電加工機

シリコン電極及びシリコン粉末混入放電加工の研究開発から出発して、放電加工による金属材料の表面改質という概念を豊田工業大学が提唱している<sup>(4)~(6)</sup>。前述の2章に述べたようにクラックの発生しない鏡面を、放電加工のみによって得られる。この表面は耐食性・耐磨耗性にも優れている。このことから着想して、タンクステンカーバイトやチタンカーバイトなどの厚膜コーティングを金属表面にコーティングする技術を開発しつつある。この方法は、タンクステンカーバイトやコバルトなどの粉体を圧縮成形した電極を用いて、液中放電によって粉体物質を対象ワーク表面にたい(堆)積させるものである。厚膜のコーティングが可能であるとともに、溶射などに比べて密着力が著しく大きい。また、CVDやPVDに比較すれば、これらは一般的に500~1,000°C程度の平均温度上昇を必要とするため、無視できないほどの大きな寸法変化が避けられない。放電加工による処理では、放電点の短時間の高温は存在しても、平均温度は低く、寸法変化は極めて小さい。また、複雑形状に対しても、放電加工が容易に適応できるため、部分的な表面改質にも適応できる。

このように放電加工による表面処理・改質は、将来、金型、内燃機関、ガスタービン、原子力機器等の表面改質に活用される可能性が高い。放電加工の加工現象に基づく特質を表面改質、表面処理の分野に拡大転用することは、従来の表面改質、処理技術が果たし得なかった新しい改質技術の創造をなすものと期待される。すなわち、自動車の燃費を改善し、排気ガスの有害成分を低減する燃料噴射ノズルの微細加工や、内燃機関やガスタービンの高温部分のファインセラミックスによるコーティング、原子力機器ではステンレス溶接部の耐食性の革新的改良等に、放電加工による微細加工や表面改質が期待される。

### 3.3 レーザ加工機

CO<sub>2</sub>レーザ加工機の生産現場への導入は、1980年ごろ始まった。最初は試作板金(板厚3.2mm以下が主)の切断を中心とする用途分野であった。その後の市場構造の変化、すなわちニーズの多様化、製品のモデルチェンジ期間の短期化等を反映して、多品種少量生産形製品の板金部品を対象とする用途分野へと変遷した。現在の板金分野では、従来の抜型プレス、タレットパンチプレス等の代替加工機として、フレキシブルな型レス切断を可能とする必ず(須)の工作機械となっている。現在、5,000台以上のCO<sub>2</sub>レーザ加工機が国内の生産現場で稼働中と推定される。

また、ここ数年、厚板(板厚9~19mm程度)切断分野において、従来のガス切断機やプラズマ切断機の代替として、CO<sub>2</sub>レーザ加工機の導入が進んでいる。この傾向は厚板を多用する業界(建機・建材・橋りょう(梁)・造船ほか)の組立工法の変化、すなわち組立現場での部品への追加工レス化

(キット式組立法へ)を反映したものであり、その背景には技能者不足の中での組立合理化の目的があるものと推察される。

以上のように、切削用途分野が大幅に拡大してきた。しかしながら、この発展は、主に実需先導型の加工技術開発をベースとした展開であった。現在、加工現象の基礎に立ち返った加工技術の研究開発が進められている。今後の加工能力、加工品質の革新に期待したい。

さらに、レーザ溶接分野の現市場規模(CO<sub>2</sub>レーザ加工機国内市場の約10%)は大きくはない。しかしながら、主な用途分野である自動車関連産業において、レーザ溶接の根を下ろしつつある。今後、レーザ溶接を前提とした、設計の革新、生産工程の大幅変更等に期待を寄せたい。

### 3.4 電子ビーム加工機

電子ビーム加工機は、1970年ごろから使われ始め、自動車機構部品の低ひずみ(歪)溶接(溶込み深さ5mm以下)、重工業(原子力を含む)の超厚板(100mm級)のワンパス溶接等を主な用途として発展してきた。その間、溶接の安定化、ビームの高出力化、電極の長寿命化、溶接センサの付加、装置の信頼性向上、対象部品のハンドリング改善及び真空排気時間短縮等の多数の技術開発を行い、現在までに生産現場で必須の高品質溶接加工機としての位置付けを構築した。

また、最近では電極の更なる長寿命化(1,000時間)、溶接の高速化、溶込み深さの安定化等の加工機としての高性能化・高信頼性化を実現するとともに、小型化、低騒音化、装置管理のAI化による保守の容易化、加工条件設定・モニタ機能の充実化等によって人に親切な加工機を実現している。

電子ビーム加工機は、自動車や重工業の溶接用途分野を中心において発展してきた。さらに、電子ビームの微細スポット性、高速・高精度位置決め性能等の優れた特質が、今、見直されている。これらの特質を利用して、小物部品の高速溶接・表面改質、セラミックスの穴あけ、プリント基板配線パターンのマスクレスレジスト露光等の新しい用途分野への拡大発展が期待されている。

### 3.5 産業用ロボット

産業用ロボットはここ数年、人手不足解消の有効な手段として、多方面・多分野に積極的に導入され、ロボットの周囲に周辺装置を配置したスタンドアロン的セルシステムが構成されてきた。特に、多品種少量生産への対応力強化が求められ、例えば品種段取り替え時間やタクトタイムの短縮・システムの簡易化など総合的な生産管理体制の実現が求められてきた。組立てハンドリングロボットでは、コントローラにシーケンサ機能を内蔵し、治具など周辺装置のシーケンス制御も直接実行するとともに、上位システムのFAコントローラと光データリンクを介して接続し、ロボットハンドの交換、プログラムの変更など多品種少量生産ラインの段取り替えが自動的にできるシステムを容易に構成可能とした。

また、物流の自動化を目的としたパレタイジングロボットでは、タクトタイムの短縮を図るためパレタイズ作業で要求される動作範囲・動作速度・動作パターンなどを分析し、セルコントローラ、積付け計画ソフトウェア、ロボットハンド、コンベヤ等で構成される標準的なパレタイジングシステムを開発した。これらのロボットはいずれも操作性・信頼性・安全性などの向上等がきめ細かく図られているが、今後とも使いやすさを含めて様々な用途に対応した技術開発が必要となる。

### 3.6 CNC

前述の1章及び2章で示したように、現在までの我が国の工業国としての高度成長と反映を支えた柱の一つとして、生産財のCNC化が挙げられる。生産現場を熟練技能依存型から脱却させるとともに、省力化・省人化を実現することによって生産効率を大幅に改善した。

最新のCNCでは、従来の32ビットCNCで実現した高速・高精度化やカスタム開放機能の充実化等を、更に大幅に向上させている。また、制振制御、滑らかなハイゲイン制御等の新しいサーボ制御機能を付加し、機電一体として滑らかで高速の駆動制御を実現している。さらに、大幅な薄型化・軽量化を実現するとともに、マルチウインドウ表示を採用し、オンラインマニュアル機能やHELP機能を付加することにより、使い勝手を向上させている。さらにまた、加工機の無人運転の長時間化をCNC側からサポートするために、接続可能な外部ネットワークの種類を増加させている。

今後は、制御情報技術のますますの進展をベースとして、更なる性能向上、機能拡充・強化、操作の容易化等を推進し、新しい価値をCNCに付加していく必要があろう。

### 3.7 金型・板金CAM

既に述べたワイヤ放電加工機、形彫放電加工機、レーザ加工機のCNCデータを作成することを主な目的として、金型・板金CAMが開発製品化されている。このCAMの機能は対象ワークの加工図を作図(CAD機能)し、その図面上に加工経路を指定、種々の加工条件、加工ノウハウ等を追加(CAM機能)し、CNCへ入力するデータベースを生成することである。

複雑な形状の加工に対して、いかに速くCNCデータを生成するかが基本的な課題である。この課題に対し、それぞれの加工機対応で、金型部品図、レーザマクロ等のデータベースを組み込むとともに、展開パターン、自動ネスティング等の機能も追加し、大幅な時間短縮がなされている。

金型・板金CAMが実用化されて久しいが、単なる図面作成とNCデータ作成だけではなく、加工条件・加工ノウハウ等の組み込みに加え、外部ネットワークとの結合機器・加工セル管理機器としての役割や加工形状計測データに対する基準値としての役割等への拡大適応が望まれている。

## 4. むすび

過去十数年にわたり、生産財のメカトロニクス化(CNC化)が急速に進み、産業界に浸透した。このことが我が国の工業国としての発展の重要な要因であることは明白である。しかし、従来の技術を単にCNC化しただけでは、既に限界がきつつある。

生産財としての加工機では、加工現象そのものに根ざした加工の革新が必要である。加工の革新とCNC技術との融合が真にコストパフォーマンスの優れたメカトロニクス製品を形成する。このことが、三菱電機㈱のワイヤ放電加工、形彫り放電加工等に明確に見られる。このような先端技術の総合化は、これを使用する顧客との密接な情報交換を必要とする。三菱電機㈱名古屋製作所のFAコミュニケーションセンターは、その意味で重要な役割をもつ。

先端技術と優れたオペレータの組合せによって、真に性能の良い高効率なオートメーションが確立される。このことが熟練者不足、第二次産業人口減少を救うことになる。

この論文で述べた放電加工機等の加工機の用途を、他の加工手段では従来困難とされていた分野への拡大に挑戦することによって、革新的な技術が創造できると考えられる。

我が国の工業国としての力を維持発展し、生産の空洞化を防ぐためにも、革新的メカトロニクス技術の創造が必要で、また、人々による有効な活用によってこそ実現される。

21世紀に向けて、資源枯渇、地球環境悪化など、地球規模の問題が人々の日ごろの関心事となる。メカトロニクス技術は、その解決のために有効な役割を果たすものと考えている。

## 参考文献

- (1) 真柄卓司、山田 久、佐藤清侍、弥富 剛、小林和彦：非電解ワイヤ放電加工による加工面の高品質化、精密工学会誌、59, No. 7 (1993) [掲載決定]
- (2) 斎藤長男、毛利尚武：大面积放電加工における仕上面あらさの向上、精密工学会誌、57, No. 6, 22~26 (1991)
- (3) 斎藤長男、毛利尚武、佐伯秀樹、石黒輝雄：導電性ファインセラミックスの放電加工による強度変化とその回復に関する研究、精密工学会誌、59, No. 2, 115~120 (1993)
- (4) 鈴木正彦、毛利尚武、斎藤長男：放電加工による金属表面の改質、精密工学会誌、53, No. 2, 51~57 (1987)
- (5) 毛利尚武、斎藤長男、恒川好樹、糸山英教、宮川昭彦：放電加工による表面処理、精密工学会誌、59, No. 4, 93~98 (1993)
- (6) 諸石弘司、斎藤長男、毛利尚武、鈴木政幸：複合構造体電極法による放電表面処理、1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、241~242 (1993)

弥富 剛\* 真柄卓司\*\*  
田中 誠\*\*  
鈴木俊雄\*\*

# ワイヤ放電加工機の最新技術

## 1. まえがき

ワイヤ放電加工機は、導電性の材料であれば硬度に関係なく高精度な加工が可能なことから、金型加工には必要不可欠な設備として急速に発展してきた。また、切削加工の困難な材料や高価な材料の加工など、部品加工分野への適用も増加している。

近年、設備投資が抑制される中、ワイヤ放電加工機に対して、研削などの他の加工工程からの置き換えが可能な高精度・高品位加工、他の設備では加工できない微細加工への対応など、投資効果の高い設備としての要求が高まっている。また、労働時間短縮、熟練作業者不足、製品のコスト低減への対応として、自動化機能の拡充による無人化・省力化の推進、使いやすさの追求やランニングコストの低減も切望されている。

ここでは、これらの市場ニーズにこたえるべく製品化した、高速無電解電源 (Anti-Electrolysis Power Supply) "AE II" (図1)、新型ワイヤ自動供給装置 (Automatic Wire Feeder) "AF 2"を中心、ワイヤ放電加工機の最新技術について紹介する。

## 2. 高速無電解 "AE II" 電源

### 2.1 高速無電解 "AE II" 電源

従来のワイヤ放電加工電源は、数十～数百Vの直流バ尔斯電圧を発生し、正極性 (ワイヤ電極を一極、工作物を+極) 接続したワイヤ電極と工作物との間に印加して放電を発生させることによって加工を行うものである。一般には加工液として水を用いるため、放電加工と並行して電気分解によ

る腐食 (以下“電解”という) が起こる。したがって、工作物の加工面には、電解に起因する電解変質層が生成され、加工面品質が低下する。特に最近、金型材料として需要の伸びている超硬合金等の焼結材料の加工では、電解腐食によって結合材であるコバルトが選択的に溶出して WC (タンゲステンカーバイト) 粒子が欠落しやすくなり、金型としての寿命が低下するといった問題がある<sup>(1)</sup>。

従来、こうした電解に対しては、

- (1) 加工液であるイオン交換水の比抵抗を高める。
- (2) 仕上加工 (加工エネルギーの小さな加工) で、交流高周波電源を使用する。

などの方法により、加工物への影響を抑制してきた<sup>(2)(3)</sup>。

しかし、(1)の方法では、比抵抗維持のためにイオン交換樹脂の消費が増え、ランニングコストがアップする。また、(2)の方法では、仕上加工以前の荒加工において広範囲に電解が発生し、仕上加工だけでは電解変質層を除去しきれない場合がある。加工液に非導電性である油を使用する方法もあるが、火災の心配があるため長時間の連続無人加工が不可能であること、水を加工液とした場合に比較して加工速度が遅いといった短所がある。

"AE II" は、以上の問題点を解消し、荒加工から仕上加工まで、加工中の電解作用を抑制し、高品位な加工を可能とした高速無電解電源である。

### 2.2 電解抑制による金型品質の向上

#### (1) 工作物表面の電解腐食の防止

ワイヤ放電加工後の工作物の電解腐食の例を図2に示す。図は特に、加工液の比抵抗が低い条件において、従来電源による加工 (以下“従来加工”という) と高速無電解電源 "AE II" による加工 (以下“AE加工”という) により、仕上げた後の加工面を走査型電子顕微鏡 (SEM) によって観察したも

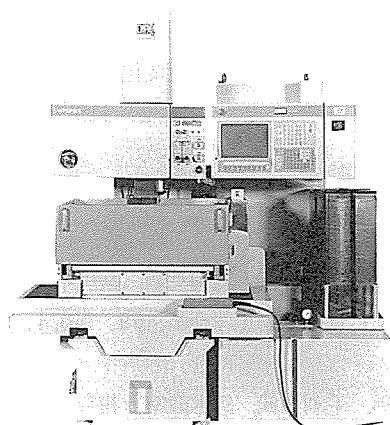


図1. 高速無電解電源 "AE II" 搭載DWC110SZ

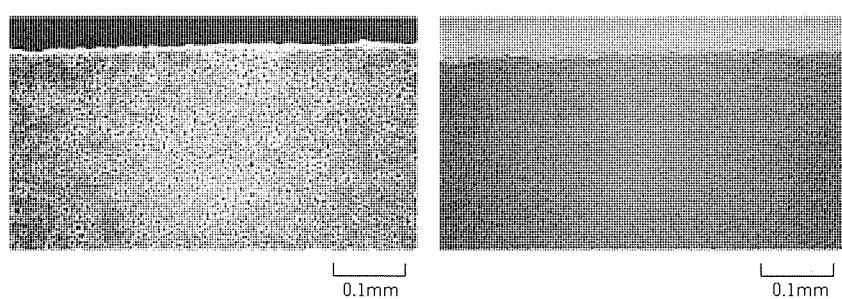


図2. 工作物表面の電解腐食 (工作物: SKD61, 加工液比抵抗:  $1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ )

のである。従来加工の場合、表面に電解による数  $\mu\text{m}$  程度の腐食こん(痕)が多数形成されているのに対し、AE 加工の場合には全く形成されていないことが分かる。

## (2) 加工変質層の低減

加工断面の変質層における硬さの低下は、金型の初期摩耗に大きく影響を及ぼす。従来加工・AE 加工について、ダイス鋼の仕上加工断面の硬さ変化を求めたものを図 3 に示す。図において、従来加工では加工面から約  $30 \mu\text{m}$  の深さまで硬度が低下しているのが分かる。それに対して AE 加工では硬度低下は  $5 \mu\text{m}$  以下となっており、この差は電解変質による軟化と考えられる。

## 2.3 陽極酸化の抑制

### (1) 鉄系材料の鏽の抑制

鉄系材料のワイヤ放電加工の問題として、さび(鏽)の発生が挙げられる。鏽の発生は電解作用と深い関係があり、陽極では酸化が進行しやすいことが知られている。高速無電解電源“AEII”では、こうした陽極酸化が進行しないため、鏽の発生が抑えられる。加工面における酸素含有量を X 線分析した結果を図 4 に示す。図において、従来加工の場合、加工面から約  $5 \mu\text{m}$  の深さまで酸素の含有量が増加しており、工作物表面に鏽の原因となる酸化層が形成されていることが分かる。一方、AE 加工の場合は、こうした酸化層が全く形成されていない。

### (2) 非鉄材料の酸化防止

チタン合金は最近航空機部品や医療部品などに使用されており、これまでワイヤ放電加工後の変色が問題となっていた。チタン合金について、従来電源と AEII 電源でスリットを加

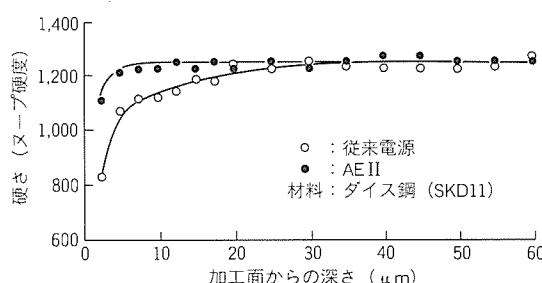


図 3. 仕上加工断面の硬さ変化

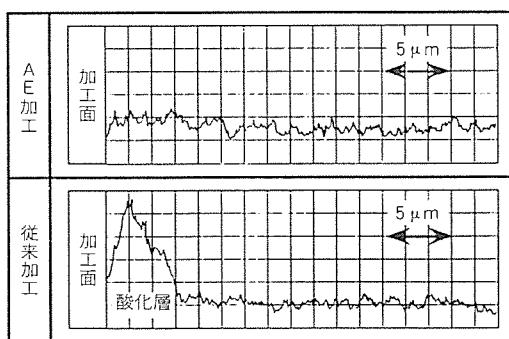


図 4. 工作物表面のX線分析(酸素含有量)

工して加工部分の状態を観察比較した結果を図 5 に示す。図において、従来加工では変色が発生したのに対し、AE 加工では変色は発生していない。したがって、今後、チタン合金を始め、酸化しやすい非鉄材料への適用が期待されている。

## 2.4 微細仕上げによる機械強度低下の抑制

加工面におけるマイクロクラックは、型の破損・異常摩耗につながることから、極力発生を防止する必要がある。高速無電解電源“AEII”では、エネルギーを均一化した特殊パルスにより、型寿命低下の原因となるマイクロクラックが極めて少ない、均一な微細仕上加工面(面あらさ  $1 \mu\text{m} R_{\max}$ )が得られる。

工作物表面のマイクロクラックの発生は機械強度の低下として現れる。図 6 にワイヤ放電加工をほどこした超硬材の抗折力試験方法と結果を示す。試験片は、2種類の超硬合金を使用し、図 6 に示すように引っ張り側と圧縮側になる部分を、それぞれ AE 加工、従来加工、油中加工について約  $1 \mu\text{m} R_{\max}$  に仕上げた。ここでの抗折力は研削によって仕上げた基準試験片の抗折力を 1 とした比率で示した。この結果から、AE 加工の場合、特に超硬合金 V4 (JIS 分類)において研削加工の約 83% の抗折力が得られた。一方、油中加工は抗折力の低下が 57% と最も大きい。これは、先に述べたマ

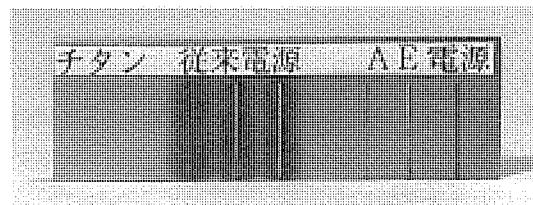
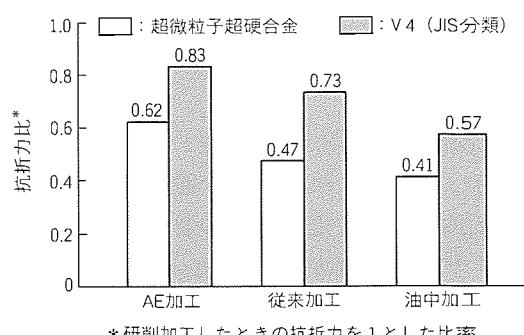
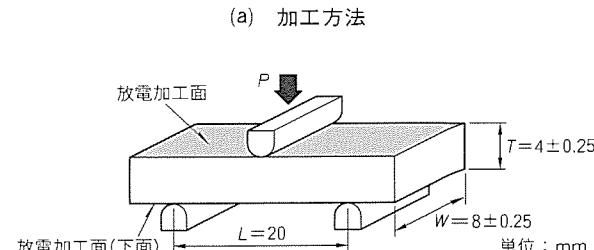


図 5. チタン合金加工における変色



\*研削加工したときの抗折力を 1 とした比率



(a) 加工方法

(b) 抗折力

図 6. 加工方法と抗折力

イクロクラックの影響によるものと考えられる。

## 2.5 高生産性・安全性

高速無電解電源“AEII”は従来電源と同一の加工速度での加工が可能であるので、加工時間の増加もなく、高い生産性を維持した高品位な微細加工が可能である。また、加工液に水を使用するため、油中加工のような火災の心配がない。したがって、夜間運転などの長時間加工も安心して行え、操作性・メンテナンス性も良好である。

## 2.6 経済性

先にも述べたが、従来電源では高品位な加工を行うために、加工液であるイオン交換水の比抵抗を高く一定に維持する必要がある。したがって、加工によって発生する大量のイオンを吸着処理するために大量のイオン交換樹脂が必要であった。

AE加工では、イオンの発生が従来加工に対して大幅に低減される。このため、イオン交換樹脂の寿命は従来に比較して約3倍に伸び、ランニングコストの削減が実現できる。また、加工機自身への電解によるダメージもないため、電解対策の保守管理も容易となる。

図7に従来加工とAE加工の、イオン交換樹脂に関する寿命比較と、ランニングコスト試算比較を示す。

## 3. ワイヤ自動供給装置“AF 2”

### 3.1 ワイヤ自動供給装置

ワイヤ自動供給装置は、供給リールから引き出されたワイヤ電極を、工作物の加工スタート穴を通して所定の経路に張架(以下“自動挿入”という。)、又は張架されているワイヤ電極を切断する装置である。

順送金型や多数個取り連続加工など、無人連続加工には不可欠である。また、ワイヤ電極は直径0.1～0.3mmと細く、手作業での張架が困難なことから、作業効率の向上を図る上でもワイヤ放電加工機の必ず(須)機能になっている。

### 3.2 切断・挿入方式

ワイヤ自動供給装置“AF 2”は“通電+引張り”による切断方式を採用している。これは、ワイヤ電極に通電することにより、内部抵抗によって発熱させつつ張力を掛け切断するもので、ワイヤ電極先端部が、ぱりのない円すい(錐)形状に切断が可能となる。したがって、工作物の上下でワイヤ電

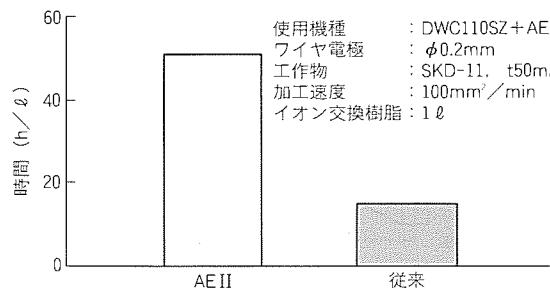


図7. イオン交換樹脂寿命

極をガイドするワイヤガイドとして、クリアランス5μmのダイヤモンドダイスの使用が可能となり、安定した高精度加工が実現できる。

自動挿入の際の、ワイヤガイド上部からワイヤガイド下部までのアシストとしてジェット水流を使用している。ジェット水流は工作物のスタート穴の形状に影響を受けないため、裏逃げがある場合や段付き形状での挿入も可能である。

### 3.3 挿入率の向上

#### (1) 再トライ機能

ワイヤ電極のカールやスタート穴の性状により、自動挿入ができないことがある。再トライ機能は、各種のセンサで自動挿入の失敗を検出し、繰り返し自動挿入を行う機能である。再トライの繰り返し回数は任意に設定でき、設定回数繰り返しても自動挿入が完了しない場合は、次のプログラムに移り加工を継続することもできる。また、加工が完了していないプログラムの記録・表示もでき、再加工も容易である。

#### (2) スタート穴サーチ機能

加工の微細化が進む中、工作物にあけられるスタート穴も小径化の傾向にある。AF 2は、工作物のスタート穴径が0.5mmまで自動挿入可能である。

このような微小さなスタート穴に対しては、ワイヤ電極の先端を挿入することは困難であり、これに対応する機能としてスタート穴サーチ機能がある。

自動挿入が開始され、ワイヤ電極の先端がスタート穴に入らなかった場合は、自動挿入動作をいったん停止し、決められたパターンでのサーチ動作を行う。その動作途中でスタート穴にワイヤ電極の先端が入ったことを検出すると自動挿入動作を再開する。所定のサーチ動作が終わっても、スタート穴が見付からなかった場合は前述の再トライ機能が働く。

また、直径0.2mm以下のワイヤ電極の場合は、ジェット水流の径を小さくすることも、微小さなスタート穴に自動挿入するには有効な手段である。

### 3.4 操作性の向上

#### 3.4.1 自己診断機能

自動挿入の失敗が多発するようになった場合、メンテナンスが必要になる。しかし、その失敗の原因を見付けることはユーザーでは一般的に困難であり、したがってメンテナンスの必要な箇所の特定もできず、全面的なメンテナンスを実施することになる。自己診断機能は、自動挿入の失敗による再トライへの移行モード、自動挿入の失敗位置、再トライの回数を検出し、そのデータを元にメンテナンスが必要な箇所とメンテナンス要領を専用画面にビジュアルに表示するものである。

この機能により、非熟練者であってもメンテナンスの必要な時期や箇所が容易に特定でき、必要最小限のメンテナンスが短時間で確実にできる。図8にAFメンテナンス画面を示す。

### 3.4.2 メンテナンスの簡易化

AF 2では、各部分のメンテナンス作業も大幅に簡易化されている。

ワイヤ電極に加工電流を供給する給電子は、ワイヤガイド上下とも、カバーの開閉のみでワンタッチで交換できる構造を採用し、交換に必要な時間を1/3(当社従来比)まで削減した。また、回転位置決めが容易なインデックスタイプで、メンテナンス時の取付けミスの防止もできる。さらに、ワイヤガイドに関係ない構造のため、その位置ずれも生じない。したがって、給電子の交換により、ワイヤ電極の垂直出しの必要がなく、長時間加工時にも加工をいったん停止させ、給電子が交換できるので、寿命を気にせず安心して加工ができる。インデックス給電子の写真を図9に示す。

使用するワイヤ電極の径を変更する場合、ダイヤモンドダイスの交換作業が必要になる。AF2では加工液の噴出ノズルを外すだけで簡単に交換作業ができる構造とし、交換に要する時間を約1/3に短縮した。したがって、加工の要求に合わせた最適なワイヤ電極径の使用が容易で、稼働効率の向上にも貢献する。

### 3.4.3 メンテナンス周期の延長

前述した構造の変更により、1回当たりのメンテナンスに要する時間は大幅に減少した。しかし、いくらメンテナンスが容易でも、頻度が高ければアイドル時間の削減は不可能で稼働率の向上は望めない。

そこで、AE2では様々な新材料を採用し、メンテナンス

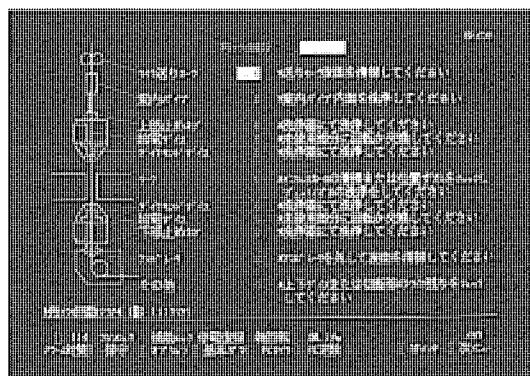


図8 AFメンテナンス画面

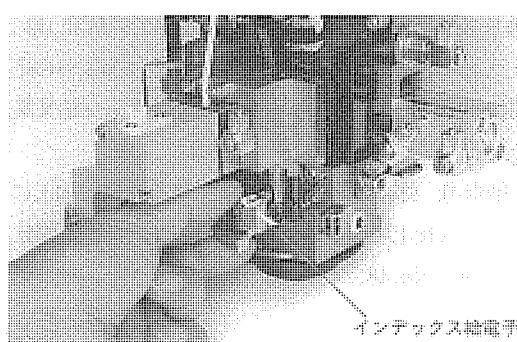


図9. インデックス給電子

周期の延長を図っている。使用した新材料と使用部分を表1に示す。これらの新材料の採用により、連続加工試験において、消耗品の交換を除き 400 h (一般的な 1か月の稼働時間に相当) メンテナンスなしでの稼働を確認した。

### 3.5 ランニングコストの低減

ワイヤ放電加工機の稼働に対する消耗品として給電子がある。前述したAF2のインデックス給電子は1個当たり最大24回まで無駄なく確実に使用でき、ランニングコストを当社従来比1/5まで低減した。

#### 4. 工作物の自動交換装置

#### 4.1 工作物の自動交換装置

マシニングセンターなど他の工作機械では既に工作物を自動で供給、排出するシステムが多数存在している。これまで、ワイヤ放電加工機の場合には、

- (1) 加工速度が遅く、工作物の交換に要する時間比率が小さく効果が出ない。
  - (2) 自動化に必要な周辺技術が不足しており工作物の自動交換は意味がない、

などの理由によって製品化への取組が見送られていた。これに対し、加工速度の向上や表2に示す自動化周辺技術の開発・信頼性の向上が急速に進み、この分野でも必要性が高まって いる。

工作物を自動で加工機に供給・排出する装置としては大きく分けて、工作物自身を交換するものと、工作物を積載したパレットを交換するものの2種類である。前者をオートワークチェンジャー (Automatic Work Changer : AWC) , 後者をオートパレットチェンジャー (Automatic Pallet Changer : APC) と呼び、工作物のサイズと種類によって分類している。小物でかつ、大きさが標準化されている工作

表 1. 新材料の適用例

セラミック	ジェットノズル ダイヤモンドダイス導入テーパ部 ダイヤモンドダイス給電子冷却穴
低摩擦無潤滑 Oリング	案内パイプ昇降シリンダ
エンジニアリング プラスチック	通電子ホルダ、検出センサ

表2. 自動化周辺技術への対応

課題	周辺装置・技術
加工後のスクラップの処理技術がない。	①自動スクラップ処理装置 ②自動拡大加工によるスクラップを出さない加工方法
ワイヤ自動供給装置の信頼性が低い。	新型ワイヤ自動供給装置“AF 2”
ワイヤ電極の供給量に限界がある。	①20kgワイヤ供給仕様 ②50kgワイヤ供給仕様
液面高さ設定	自動液面高さ設定機能

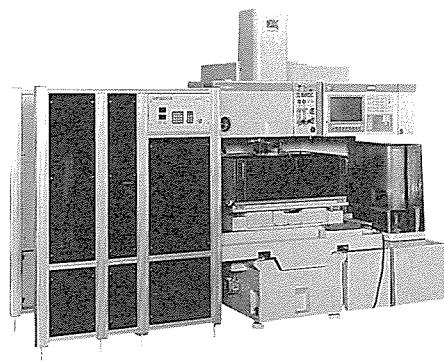


図10. オートワークチェンジャー外観

物で、比較的加工時間の短い場合には AWC が、大物か又は種類が多岐にわたっている工作物で、加工時間の長い場合には APC が適している。

これらの装置は、ユーザー個々の特殊仕様に合わせた形態になるため、ここでは、当社が実際に製品化したシステムを例にとって紹介する。

#### 4.2 A W C

図10は特殊位置決め治具を採用した AWC である。このシステムの特長は次のとおりである。

##### (1) 多品種生産に対応可能

- (a) 工作物を治具に取り付け、治具ごと交換する方式をとるので異なる形状の工作物の交換が可能である。
- (b) ID (Identification) 装置を治具に取り付けることができる所以、プログラム番号など、工作物の情報を確実に制御装置に対して入力ができるようになり、入力ミスによる失敗のない加工ができる。

##### (2) 高い交換精度 ( $5 \mu\text{m}$ 以下)

特殊位置決め治具により、高い交換精度を長時間維持できる。

##### (3) 高いフレキシビリティ

ストッカ上の任意の工作物を取り出して加工することができる所以、予定外の加工にも対応することができる。

##### (4) 簡単な操作

- (a) ストッカ上の工作物の指定は交換の M コードに続けてストッカの番号を指定するだけで行うことができる。
- (b) 自動運転はもちろん、単動運転、ボタン一つで搬入・搬出動作をするステップ運転も行うことができる。

##### (5) 幅広い適応範囲

- (a) 工作物取付治具の共通化により、短時間の段取りで形放電加工機と連続させて加工することもできる。
- (b) 防せい(錆)処理装置の装着により、錆やすい材料への適用も可能である。

#### 4.3 A P C

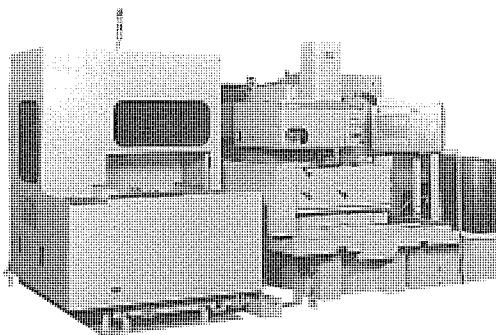


図11. オートパレットチェンジャー外観

工作物を加工液中で加工する浸せき(漬)加工機用として開発した APC のシステム外観を図11に示す。特長は次のとおりである。

##### (1) 高い交換精度

特殊治具によって高い交換精度を長時間維持できる。

##### (2) 操作性の向上

段取りステーションを加工機の左側面に配置し、ワークの段取りを前面から行うことができる。

##### (3) 幅広い適応範囲

- (a) 形放電加工機とパレットを共通化することも可能であり、連結して加工することもできる。
- (b) 防錆処理装置の装着により、錆やすい材料への適用也可能である。

## 5. むすび

以上、ワイヤ放電加工機の最新技術について述べた。これらの新技術は、既存分野におけるワイヤ放電加工機の生産性を大幅に向上するばかりか、新しい分野への適用や用途拡大へ道を開くものと考えられる。

今後もユーザー、メーカー一体となった新技術開発につとめ、金型産業はもとより、様々な製造現場への適用と生産性向上に向けて努力していく所存である。

## 参考文献

- (1) 増井清徳、曾根 匠：ワイヤ放電加工面の電解腐食、精密工学会誌、54、No.6、160～165（1988）
- (2) 増井清徳、曾根 匠：ワイヤ放電加工の研究（第5報）トランスキップラーの試作と微細仕上げ加工への応用、昭和59年精密機械学会春季大会学術講演会論文集、第1分冊、604、315～318（1984）
- (3) 真柄卓司、弥富 剛、小林和彦：ワイヤ放電加工における高精度仕上上の研究—交流高周波による亜鏡面仕上加工—24、No.48、45～63（1990）

# ワイヤ放電加工機の加工特性と加工技術

大泉敏郎\* 竹内浩志\*  
山田 久\*  
中山芳郎\*

## 1. まえがき

近年の金型業界では無人化・省力化の要求が強く、ワイヤ放電加工後の磨き工程等の削減や、研削加工等の熟練技術を要する加工工程のワイヤ放電加工への置き換えが重要な課題となっている。また、金型そのものの精密化や、高寿命化に対する型材質の変化により、従来の技術で対応が困難な領域が広がりつつある。このため、ユーザーのワイヤ放電加工機の加工性能向上に対する要求はますます高いものになってきている。こうした要求に対して当社では、工作物を加工液浸せき(漬)状態で加工することにより、複雑形状の加工物を高精度に加工可能とした浸漬加工技術の確立や、高速加工から仕上加工までのすべてを無電解化した無電解ワイヤ放電加工電源の開発<sup>(1)</sup>など、特に加工品質の面での大幅向上を実現している。

本稿では、ワイヤ放電加工の最新技術を高品位加工に応用した加工技術事例を中心に述べる。

## 2. 加工特性と加工技術の現状と今後の動向

### 2.1 ワイヤ放電加工の高品位加工への応用

ワイヤ放電加工の特長としては、

- 導電性物質であれば工作物の硬さに関係なく加工できる。
- ワイヤ径の制約を除けば、二次元形状であればどんな複雑な形状や微細な形状も加工できる。
- 特に熟練技術を必要とせず高精度な加工ができる。
- 加工液に水(イオン交換水)を使用するため、夜間の無人運転が可能である。

などが挙げられる。これらの理由により、ワイヤ放電加工は、特にプレス金型を中心に普及し、金型の高精度化加工工程の省人化に寄与してきた。以後、年々、加工速度、加工精度、加工面あらさの向上を遂げ、金型加工のみならず部品加工まで適用分野が広がっている。

一方、金型加工の最近の動向としては、

- 製品の精密化に伴い、型そのものの形状が複雑化・微細化している。
- 金型の高寿命化への対応として、

型材の超硬合金(WC-Co)の使用比率が高まっている。などが挙げられ、ますます金型が高品質化していく傾向にあると考えられる。そのため、加工によっては依然、研削加工に頼らざるを得なかったり、ワイヤ放電加工後の磨き作業を必要としている。

ここで、高品位加工に対する現状の問題点を以下にまとめると。

- (1) 加工液に水を使用するため、電解作用によって腐食が進行する。したがって、工作物には電解に起因する電解変質層が加工面に生成され加工面品質が低下する。特に最近、金型材料として需要の伸びているWC-Co等の焼結材料の加工では、結合材であるコバルトが電解腐食によって選択的に溶出してタンクステンカーバイド粒子が欠落しやすくなり、金型としての寿命が低下する。
- (2) 加工対象は主に鉄系材料や一部のWC-Coであったため、WC-Co、ダイヤモンド焼結体、導電性セラミックス等の材料の中には加工特性の悪いものがある。
- (3) ワイヤ放電加工は熱的エネルギーで加工を行うため、熱変形によって精度的に不安定となりやすい。
- (4) 段差形状や複雑形状の加工物を加工する際、加工液のかかりが悪く、加工が不安定になりやすい。

こうした加工特性上の改善すべき問題点に対して、当社では表1に示すように、無電解電源“AEII”，浸漬加工技術、極細線加工技術を始めとした高品位加工技術を実用化している。

### 2.2 適用分野の拡大

最近ではワイヤ放電加工の高品位加工技術の実用化により、

表1. 高品位ワイヤ放電加工技術の特長と適用分野

電 源	特 長	適 用 分 野
無電解電源 “AE II”	荒加工から仕上加工(最良面あらさ $1 \mu\text{mR}_{\max}$ )までのすべての領域 を無電解化。	●電子部品金型、精密プレス金型、 超硬金型等の高精度金型加工 ●航空機部品、医療機器等の微細部 品加工 ●その他超微細金型及び部品加工
超仕上加工用 “FS電源”	超仕上加工用。最良面あらさ $0.5 \mu\text{mR}_{\max}$ 。“FS電源”と併用で超微細加 工が可能。	ダイヤモンド焼結体、CBN焼結体 加工
特殊材加工電 源“G 4 HA”	特殊材料専用電源。	●高精度金型、部品加工 ●中空、裏逃げ形状加工 ●広角テーパ形状加工
浸漬加工技術	高精度な加工液温度制御、比抵抗制 御装置により、高精度加工が可能。 また、中空・裏逃げ・段差加工にお いて加工の安定性が向上。	●高精度金型、部品加工 ●中空、裏逃げ形状加工 ●広角テーパ形状加工
極細線ワイヤ	ワイヤ径 $25 \mu\text{m}$ まで実用化。“FS電 源”との併用で超微細加工を実現。	超微細金型及び部品加工

金型寿命の向上を実現したことに加え、従来は研削加工などの熟練技術に頼らざるを得なかつた高品質・微細形状の金型や部品加工への適用が進んでいる。高品位ワイヤ放電加工の主な適用分野と適用例を表2に示す。以下、最近のワイヤ放電加工における高品位加工事例を紹介する。

### 3. 半導体・電子部品用金型への適用

#### 3.1 ファインピッチICリード加工金型

ICリード加工用金型は、高精度・高品位な金型の代表的なものである。従来、この金型は研削加工により製作されていた。しかし、無電解電源“AEII”が開発され、ワイヤ放電加工機で加工されたものでも、研削加工に近い金型寿命が得られるようになった。また、ICの高集積化が進んでおり、リードピッチの小さなものでは、と(砥)石の製作が難しく、研削加工では非常に高いコストを必要とする。現在、ICリードピッチが0.4mm以下のものが製品化されており、このような領域でのICリード加工金型の製作はワイヤ放電加工

表2. 高品位ワイヤ放電加工の適用分野と適用例

適用分野	適用例
電子部品金型加工	ICリードフレーム用金型、ICリード加工金型、精密プラスチックモールド金型
特殊材料加工	ダイヤモンド焼結体、CBN焼結体、導電性セラミックス
超微細部品加工	化纖ノズル、微細形状プラスチックモールド金型、微細スリット部品

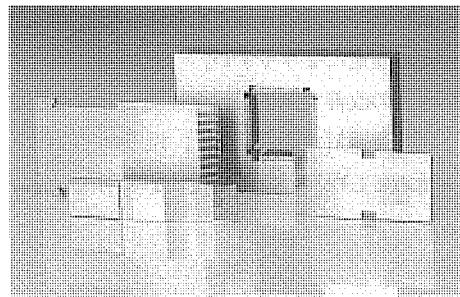


図1. ファインピッチのICリード加工用  
タイバーカットパンチ、ダイ

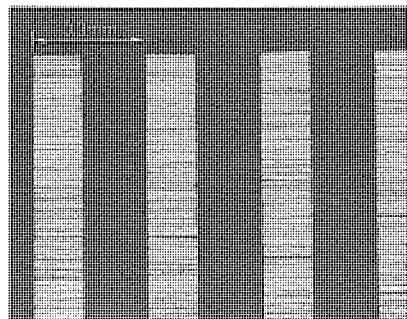


図2. ファインピッチタイバー  
カットパンチの拡大写真

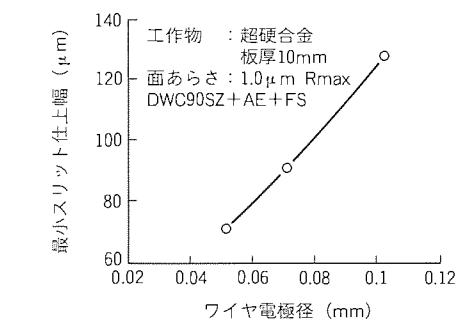


図3. ワイヤ電極径と最小スリット  
仕上幅の関係

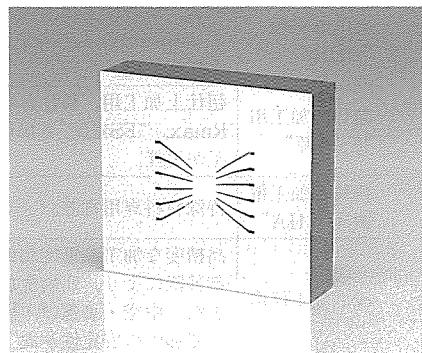


図4. ICリードフレーム用金型の加工例

による方が有利であるといえる。今後、更にファインピッチ化が進むと、リード加工金型の研削加工が不可能となるため、ワイヤ放電加工の適用が期待されている。

図1にファインピッチのICリード加工用タイバーカットパンチ、ダイの加工例を示す。また、図2にタイバーカットパンチの拡大写真を示す。図2から先端のエッジが研削で加工したものと同様、正確に仕上がってていることが分かる。この加工の詳細は次のとおりである。

使用機 : DWC90SZ-P+AEII

使用ワイヤ電極 :  $\phi 0.1\text{mm}$  黄銅ワイヤ

工作物 : WC-Co, 板厚1.2mm

リードピッチ : 0.3mm

加工面あらさ : 0.9~1.1  $\mu\text{mRmax}$

#### 3.2 多ピンICリードフレーム用金型

ICの集積度が高まり、リードフレームは多ピン化が進んでいる。そして、それを作る抜き型のダイ及びストリッパーのスリット幅、コーナRは小さくなっている。新たに開発された無電解電源“AEII”は従来電源に比べて、放電ギャップが狭い。そのため、無電解電源“AEII”は多ピンICリードフレーム用金型の製作にも十分適用できる。

図3に加工面あらさを1  $\mu\text{mRmax}$  に仕上げたときの、ワイヤ電極径と最小スリット幅の関係を示す。最小スリット幅は  $\phi 0.1\text{mm}$  ワイヤで約0.13mm,  $\phi 0.07\text{mm}$  ワイヤで約0.1mmである。

図4にICリードフレーム用金型の加工例を示す。また、図5にコーナ部分の拡大を示す。図からコーナ部分が正確に仕上がっていることが分かる。この加工の詳細は次のとおりである。

使用機 : DWC90SZ-P+AEII

使用ワイヤ電極 :  $\phi 0.07\text{mm}$   
黄銅ワイヤ

工作物 : WC-Co,

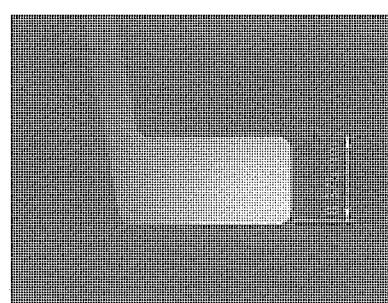


図5. ICリードフレーム用金型の  
コーナ部拡大

板厚 10mm

最小スリット幅 : 0.12 mm

加工面あらさ : 0.92  $\mu\text{mRmax}$ 

### 3.3 精密プラスチックモールド金型

プラスチックモールド金型製作にワイヤ放電加工機を用いる場合、工作物の固定方向を変えて複数の面を仕上げる多面加工を行うことが多い。従来、こうした多面の持ち換え加工を行うと、電解腐食やさび(錆)によって加工済みの面の品質が低下する場合があった。無電解電源“AEII”はこのような問題が発生しないため、特に長時間のプラスチックモールド金型の加工に効果がある。また、このような加工では浸漬加工により、安定した加工精度を得ることができる。図6にコネクタピンのモールド金型の加工例を示す。

使用機 : DWC110SZ+AEII

使用ワイヤ電極 :  $\phi 0.2\text{ mm}$  黄銅ワイヤ工作物 : NAK80(熱間金型用合金工具鋼),  
板厚 100mm加工面あらさ : 3.0  $\mu\text{mRmax}$ 

### 4. 特殊材加工への適用

ダイヤモンド焼結体の切削工具を製作する工程を図7に示す。この工程の中でワイヤ放電加工機が用いられる例として、

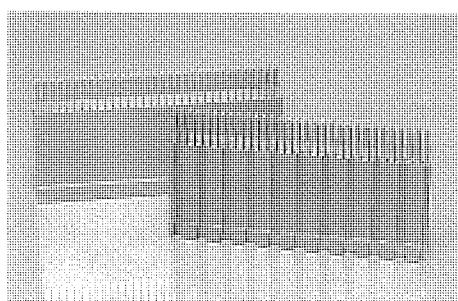


図6. コネクタピンのモールド金型の加工例

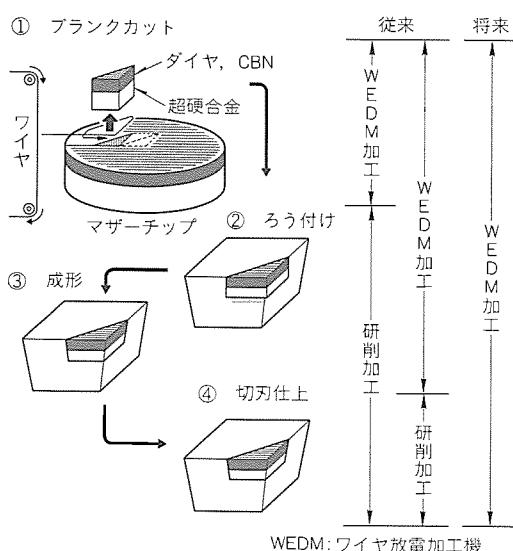


図7. ダイヤモンド焼結体切削工具の製作工程

①のブランク加工のみ、又は比較的加工性の良いものでは、③の成形までである。従来③、④は研削加工によって行われておらず、コスト面で高いものになっていたが、特殊材加工電源“G4 HA”的開発により、ワイヤ放電加工への置き換えが可能となった。

特殊材加工電源“G4 HA”的特長は次のようなものである。

(1) ダイヤモンド焼結体加工において、特に問題となる表面ダメージ層が減少する。図8に標準電源と特殊材加工電源“G4 HA”的加工部近傍の表面ダメージ層比較を示す。特殊材加工用電源“G4 HA”では粒子の欠落によるダメージ層がほとんどないことが分かる。また、加工中の電解作用がなく、バインダが脱落しないため、材料特性が変化せず常に安定した加工が行える。

(2) 粒子径の大きな難加工材料についても、安定した加工が可能である。

(3) ダイヤモンド焼結体、CBN(Cubic Boron Nitride)焼結体の加工速度が大幅に向上する。

実加工例を図9、図10に示し、表3に特殊材加工電源“G4 HA”的各種市販材料への適用と加工特性を示す。このように必要に応じた多様な加工が可能である。例えば、CBN焼結体を高速に加工するのがねらいであれば、2.5~3.5mm/minの高速加工が可能である。また、歩留りを良くし、高品位な加工がねらいであれば、加工速度を多少抑えて、面あらさの良い、ダメージ層の少ない加工ができる。また、仕上加工を行うことにより、粒子の細かいものは、面あらさが約1.0  $\mu\text{mRmax}$ で、ダメージ層のほとんどない状態まで仕上げることができるため、すべての工程をワイヤ放電加工で製

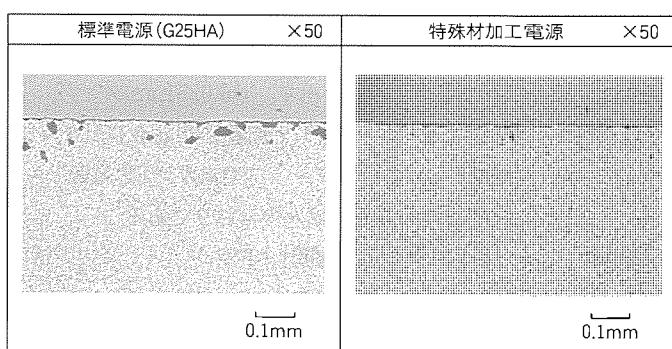


図8. 加工部近傍の表面ダメージ層比較

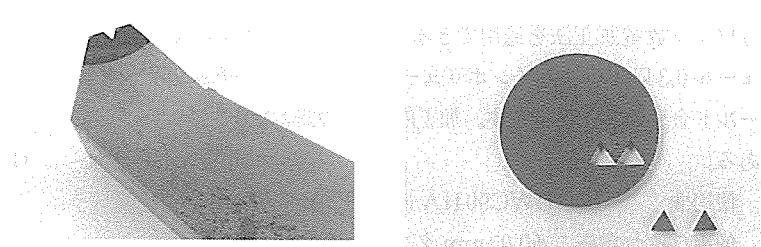


図9. ダイヤモンド焼結体  
切削工具の加工例

図10. CBN焼結体の加工例

表3. 特殊材加工電源“G4HA”の適用と加工特性

## (1) 適用

材質	ダイヤモンド焼結体			CBN焼結体
粒径	小	中	大	大
従来電源	○	×	×	×
特殊材加工電源“G4HA”	○	○	○	○

## (2) 加工性能／使用ワイヤ電極…Φ0.2mm黄銅ワイヤ ワーク板厚はすべて3.2mm

材質	ダイヤモンド焼結体			CBN焼結体
粒径	小	中	大	大
材料名	GE1300* GE1600 SYNDITE002* DX120* など	GE1500 SYNDITE010 DX140 など	SYNDITE025 DX160 DX180 など	BZN6731* など
最大加工	加工速度 (mm/min)	2.0~3.0	2.0~3.0	2.0~3.0
実用加工	加工速度 (mm/min)	0.5~1.0	0.5~1.0	1.5~2.0
	面あらさ (μmRmax)	5以下	8以下	10以下
仕上加工 (FS併用)	面あらさ (μmRmax)	20以下	50以下	—
	ダメージ層 (μm)	1以下	2以下(FSは不可)	5以下(FSは不可)
	ダメージ層 (μm)	5以下	10以下	30以下
				50以下

注 \* GE及びBZNはGE社, SYNDITEはDe Beers社, DXは東芝タンガロイ社, の商標名である。

作することができる。

## 5. 超微細加工への適用

## 5.1 微小スリット加工

超微細加工の基本は、どのぐらい狭い溝幅の加工ができるかである。このような加工には無電解電源“AE II”, “FS電源”が最適である。また、ワイヤ電極もできるだけ細い径

で、高い張力が必要となるため、タングステン等の材質を使用するのが有利である。

図11に微小スリット加工の例を示す。Φ0.025mm タングステンワイヤで加工したものであり、溝幅が30 μm に仕上がっている。片側2.5 μm の放電ギャップであり、“FS電源”のみで加工した。その他の諸条件は次のとおりである。

使用機 : DWC90 HA+AEII+FS

工作物 : SUS304, 板厚1 mm

加工面あらさ : 0.8~1.0 μmRmax

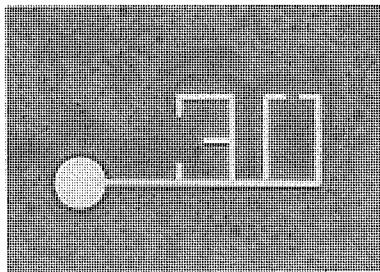


図11. 微小スリット加工例(溝幅30 μm)

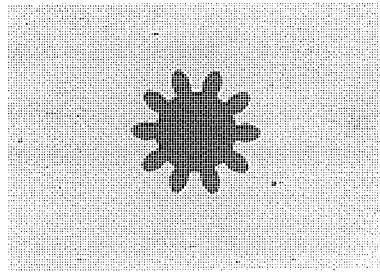


図12. 微細インボリュートギヤの加工例

## 5.2 微細形状プラスチックモールド金型

Φ0.03mm 極細線ワイヤと無電解電源“AE II”, “FS電源”を組み合わせて、微細形状プラスチックモールド金型へもワイヤ放電加工法を適用できるようになる。図12にモジュール0.3以下の微細インボリュートギヤのプラスチックモールド金型の加工例を示す。加工内容の詳細は次のとおりである。

使用機 : DWC90 HA+AEII+FS

使用ワイヤ電極 : Φ0.03mm タングステンワイヤ

工作物 : STAVAX(熱間金型用合金工具鋼),

板厚 1 mm  
加工面あらさ : 0.8~1.0 μmRmax  
モジュール : 0.2  
歯数 : 10  
外形 : 2.4 mm

## 6. むすび

以上、ワイヤ放電加工による高品位加工事例を中心に述べた。無電解加工の実用化によってワイヤ放電加工の高品位化は飛躍的に発展したものと考えられる。さらに、適用分野の一層の拡大が期待されるため、今後もアプリケーションの充実、ユーザーへの技術支援などを通じ、金型生産の効率化に貢献していきたい。

## 参考文献

- (1) 山田 久, 真柄卓司, 佐藤清侍, 弥富 剛, 伊藤彰康: 無電解電源“AE”搭載ワイヤ放電加工機, 三菱電機技報, 67, No.2, 183~186 (1993)

# 形彫放電加工機の最新技術

新開 勝\* 佐藤達志\*\*  
辛嶋利春\* 赤松浩二\*

## 1. まえがき

放電加工機は高硬度・難加工材、難加工形状の加工に適しており、また高い加工精度が得られるため金型加工のマザーマシンとして広く用いられている。金型は今後とも高品質を保ちながら高生産性を実現するのに重要な役割をもつものであり、放電加工機は金型の高精度化、短納期化、低価格化に貢献している。形彫り放電加工では加工の広い範囲にわたって安定な放電状態を維持し、効率の高い加工を行うために熟練作業者の操作が介在するのが現状であり、放電加工後の磨き工程でも自動化が遅れ、熟練度の高い作業を必要としている。昨今の熟練作業者不足は高品質な金型を製作する上で大きな問題となっている。

本稿では形彫放電加工機の最新技術として、新センサの開発によってファジー適応制御の加工性能を格段に向上させたMFアダプタと磨き工程における様々な問題を解決する粉末混入放電加工機“VPシリーズ”を紹介する。

## 2. 新適応制御“MFアダプタ”

### 2.1 MFアダプタの加工状態センサ

放電加工では被加工物を損傷するアーク放電を避けるために安定な加工状態を維持すること、加工ができるかぎり高速に行うことが同時に要求される。形彫り放電加工に用いる電極は多種多様であり、電極の形状や面積の変化や加工間げき(隙)に浮遊する加工くず(屑)の影響を受けて加工プロセスが複雑かつ急激に変化する。高性能の適応制御を実現するためには、放電状態を正確かつリアルタイムに検出する高性能センサが必要である。

図1は放電電圧波形の放電状態検出パラメータを示す。従来から放電状態を判定するパラメータとして放電電圧の無負

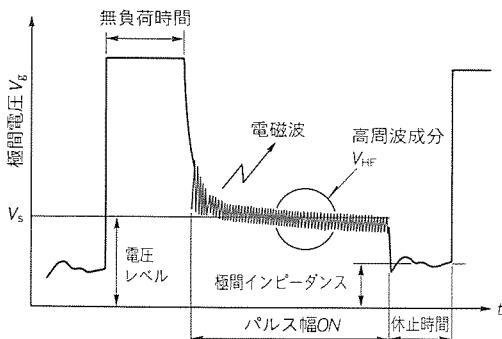


図1. 放電状態検出パラメータ

荷時間、極間から放射される電磁波、休止時間中に測定する極間インピーダンス、放電中の電圧レベルや高周波成分等が提案されている。今回これらのパラメータを詳細に評価した結果、放電電圧の高周波成分が放電パルス1発ごとの放電の良否を識別できる最も信頼性の高いパラメータであることが判明した。

形彫り放電加工の加工深さ推移グラフの例を図2に示す。図において(A)は加工が安定に進んでいる段階、(B)は加工が不安定になって加工速度が低下している段階、(C)は加工が極めて不安定で定常アークと呼ばれる集中放電に移行している段階である。放電電圧高周波成分の大きさ  $V_{HF}$  は放電電圧の分散値として次式で表される。

$$V_{HF} = \frac{\sum (V_g - V_s)^2}{ON}$$

図3は放電電圧高周波成分の大きさの分布を示す。放電電圧分散値に相当する値を測定する回路を製作し、その出力値を高周波成分の大きさとした。図3から放電電圧高周波成分は加工の進行とともに明確な三つの領域を推移することが分かる。すなわち安定に加工している(A)の段階では高周波成分の値は大きいaの領域に集中しており、加工が不安定な(B)の段階になると高周波成分の少ないbの領域の値が増える。(C)の段階になるとcの領域が増える。この結果からaの領域の放電パルスを正常放電パルス、bの領域の放電パルスを不良放電パルス、cの領域の放電パルスをアーク放電パルスと分類することができる。このように放電状態と放電電圧高周波成分は極めて高い相関をもっている。

図4は図2の加工中に計測した正常放電パルス及び不良放電パルスの累積数である。加工速度の低下する28分の時点から不良放電パルスが多発し、正常放電パルスが減少している。正常放電パルスの累積数が図2の加工深さ推移と同一の傾向を示していることから、加工は正常放電パルスによって

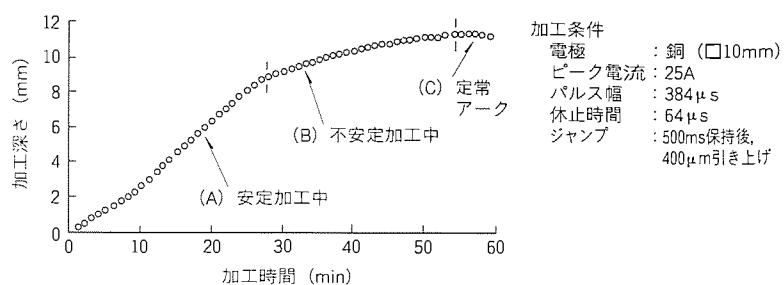


図2. 電極送り深さ推移

のみ進行し、不良放電パルスは加工に寄与していないことが判明した。上記のように、このセンサは放電パルス1発ごとに正常、不良放電パルスを確実に識別する性能をもっており、適応制御を行う上で安定加工の指標が明確になった。

## 2.2 高速休止制御

図3に示す結果から不良放電パルスb及びアーク放電パルスcが増加した加工状態を加工の不安定状態と判断するのが良いと考えられる。放電パルスの休止時間を制御することは、加工の安定性回復に速効性がある。休止時間を制御パラメータとして、加工状態が不安定になったときに放電パルスごとに適応制御を行う高速休止制御を開発した。詳細に観察すると、b及びcの放電パルスは安定に加工が進んでいるときでも数%の割合で発生している。そこでb及びcの放電パルスが2発連続したときに不安定と判断することとし、休止時間を2倍にし、正常放電パルスaが2個連続したときに復帰したと判断して休止時間を1/2に戻すという制御を行った。

図5は高速休止制御の効果を確認する加工結果を示す。加工④の高速休止制御を行わない場合には7mmの深さでアーケン（痕）ができ加工が進まなくなつたが、加工③の高速休止制御を行った場合には12mmの深さまで良好に加工できた。

## 2.3 ファジー適応制御

新加工状態センサを用いて高速休止制御を行うことにより、優れたアーケ回避効果が得られることができたが、休止を長くするだけでは最終的に加工速度の低下となる。特に加工深さが深くなる場合では高速休止制御だけでは十分な効果が望めず、ジャンプ動作の変更によって加工間隙の状態を改善する必要がある。また、あらかじめ設定した加工条件が緩い条件である場合は、加工条件を強くすることによって加工速度を上げることができる。そこで設定休止時間、ジャンプ条件を制御パラメータとして、マクロに判定した加工の安定

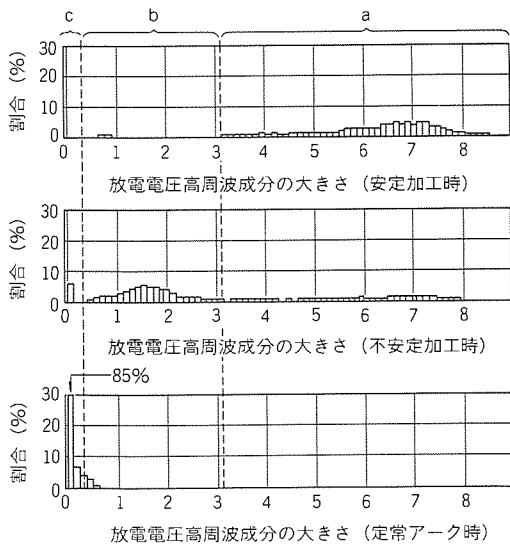


図3. 放電電圧高周波成分の大きさの推移

度に応じて適応制御を行う。加工状態が不安定と判断できる段階で高速休止制御を行っているので、高速休止制御の動作状況でマクロな加工状態を判断することができる。次に示す $\Delta OFF$ という状態量を導入する。

$$\Delta OFF = \log_2(\text{休止時間の平均値})$$

$$- \log_2(\text{設定休止時間})$$

$\Delta OFF$ が大きいときは加工が不安定であり、0に近ければ安定に加工しているといえる。この $\Delta OFF$ をメンバーシップ関数で表し、以下のルールをファジー適応制御に組み込んだ。

ルール1： $\Delta OFF$ が大ならば、非常に不安定

ルール2： $\Delta OFF$ が中ならば、不安定

ルール3： $\Delta OFF$ が小ならば、安定

このルールに基づき加工状態の安定・不安定を認識し、その結果に応じて加工条件の変更制御を行った。

## 2.4 加工結果

図5は以下の5通りの制御内容で加工を行った結果を示す。

加工①： $\Delta OFF$ ルールを追加したファジー適応制御

高速休止制御と $\Delta OFF$ ルールを追加したファジー適応制御で加工を行う。

加工②：ファジー適応制御

高速休止制御を行わない従来のファジー適応制御で加工を行う。

加工③：高速休止制御のみ

高速休止制御のみ使用して加工する。

加工④：固定条件1

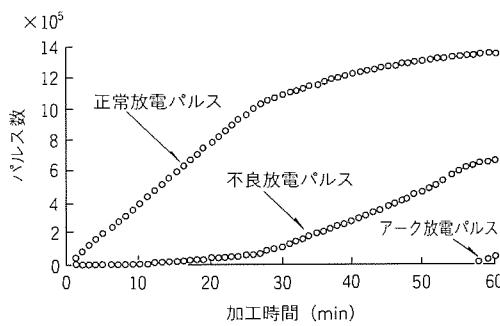


図4. 放電パルスの累積数

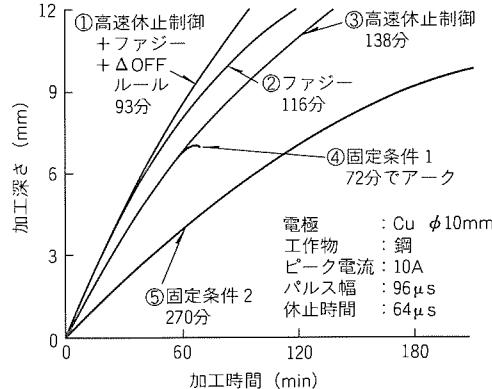


図5. 加工時間の比較

休止時間、ジャンプ条件を変更しないで加工を行う。

#### 加工⑤：固定条件2

アーカ痕ができない緩い加工条件(休止時間、ジャンプ条件)で加工する。

図5の結果から、MFアダプタによる適応制御の有効性が次のように確認された。

- (1) 新加工状態センサを用いて高速休止制御を行うことにより、優れたアーカ防止効果が得られた。
- (2) 熟練者のノウハウを取り入れたファジー適応制御でも十分高速加工が可能であるが、高速休止制御の情報をファジー適応制御のルールに取り込み、更に高速加工ができた。

### 3. 粉末混入放電加工機VPシリーズ

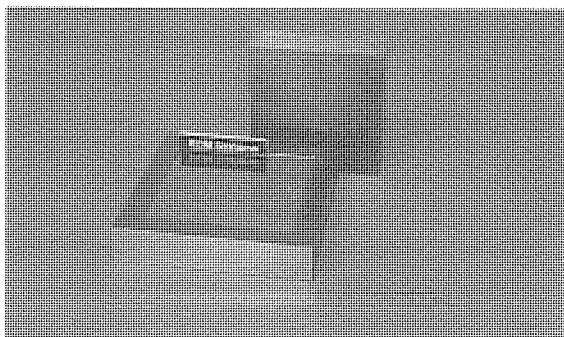
#### 3.1 粉末混入放電加工の特長

放電加工の仕上面はなし(梨)地面であり、10cm<sup>2</sup>程度の小面積に限って鏡面加工が可能であったため、金型製作では放電加工後に加工面を手磨きで仕上げる工程を含むのが通常であり、この手磨き作業は高度の熟練技能を必要としていた。

今回、従来比40倍もの大面積の鏡面加工を可能とする粉末混入放電加工機を製品化した。粉末混入放電加工は金属又は半導体の微粉末を混入した加工液で放電加工を行う加工方法である。荒・中加工は従来どおりの油加工液を用いて加工を行い、仕上加工で粉末混入放電加工に切り替える。粉末混入放電加工によって高品位な鏡面を高速に得ることができ、手磨き作業を大幅に削減することができるようになった。粉末混入放電加工による大面積鏡面加工の例を図6に示す。従来では全く不可能であった大面積に対しても全面均一な鏡面が得られ、磨き工程における様々な問題点を解決することができた。以下、粉末混入放電加工の加工原理及び粉末混入放電加工機VPシリーズで採用した新技術について紹介する。

#### 3.2 放電の分散性の向上

放電が加工面の一部に集中して発生すると加工面を荒らすため、仕上加工の面あらさ、面性状は放電の分散性に大きく依存する。豊田工業大学の斎藤長男教授、毛利尚武教授との共同研究で粉末混入放電加工では放電の分散性が向上すること



電極: Cu 150mm×150mm, 深さ0.4mm, 1本  
加工時間: 油加工9h, 粉末加工35h  
面あらさ: 1.3μmRmax

図6. 粉末混入放電加工による大面積鏡面加工例

が明らかになった<sup>(4)</sup>。図7に示す2分割した電極に取り付けた電流センサで放電電流を測定し、放電の分散現象を観察した。図8は放電電流の平均値を約20秒間測定した結果を示す。電極の定期的な引き上げ動作に応じて、1秒ごとに電流の平均値が0(A)を示す。油加工液による加工では放電の発生が一方の電極に集中しており、粉末混入加工液の場合には放電が二つの電極に分散して発生している。粉末混入放電加工では放電が分散するため、加工面あらさは放電痕単体の大きさで決まる本来の面あらさまで向上する。

#### 3.3 加工間隙距離の拡大

加工面あらさは加工間隙で形成される静電容量の大きさにも依存する。電源から供給する加工エネルギーを小さく設定しても、この静電容量に充電した電荷が放電時に急しゅん(峻)な電流として流れ、加工面を荒らすためである。静電容量は加工間隙距離に反比例して加工面積に比例するため、加工間隙が10μm程度になる仕上加工でかつ加工面積が大きい場合には特に影響が大きく、良質な加工面を得ることができなかった。

粉末混入放電加工では加工間隙距離が仕上加工でも50~100μm程度である。このため、加工間隙に形成される静電容量は小さく、最良面の得られる面積範囲が拡大し、大面積の鏡面加工が可能となった。加工間隙距離が拡大すると加工屑の排出が容易になるため、加工が極めて安定になり加工速度が大幅に向上する効果もある。

#### 3.4 電極極性と加工面性状<sup>(5)</sup>

放電加工面は1発1発の放電痕が重なり合って形成されるため、単発の放電痕の性状が加工面の性状を大きく支配する。図9は電極極性(+)(-)における工作物の放電痕の形状を示したものである。電極が(+)の場合の放電痕は中心の深いクレータを取り囲むように複数の小さなクレータが存在し、

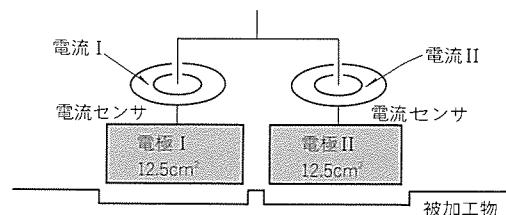


図7. 分割電極による放電分散の測定

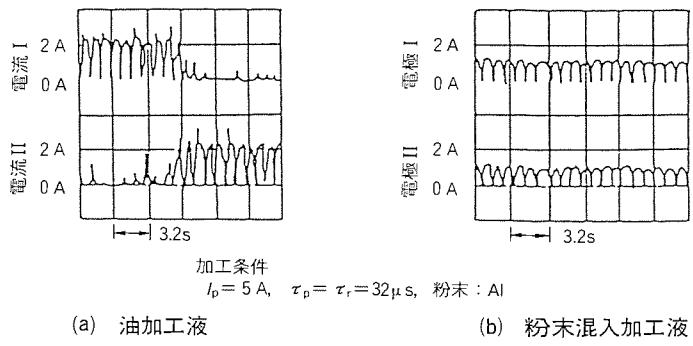


図8. 分割電極における平均電流

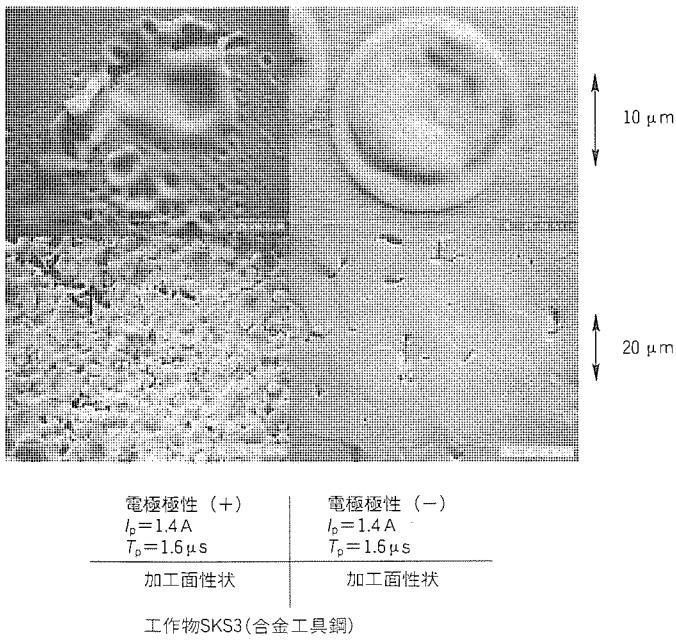


図9. 電極極性に対する放電痕の特徴

その形状は一様ではなく放電痕が重なり合った加工面は従来から知られている梨地面となる。これに対して、電極が(-)の場合には単一のクレータでしかも極めて平たん(坦)であるため、放電痕が重なり合った加工面においても平滑面、鏡面が得られることが明らかになった。

以上のように、粉末混入放電加工では放電が分散し、加工間隙距離が広がり、さらに電極極性を(-)に選択した効果が相乗的に発揮され、鏡面加工可能な面積の拡大、鏡面加工の加工速度向上、加工品質の向上等の各種特長が得られる。

### 3.5 VPシリーズの特長

図10は粉末混入放電加工機“VP35F”的外観である。粉末混入放電加工を加工機に適用するに当たり、以下の技術課題を解決した。

#### (1) 混入粉末の最適化

混入粉末の材質は加工液への分散性、入手性、安全性の点からシリコンを採用した。シリコンは比重が小さいため加工液中に均一に分散させることが比較的容易である。また、各種産業で大量に使用されているため入手性に優れ、消防法の危険物にも該当しない。シリコン粉末の諸元を最適化することにより、粉末混入放電加工の特長を一段と引き出すとともに安定した加工品質が得られるようになった。

#### (2) かくはん、洗浄、切替え等の自動化技術

粉末混入放電加工の特長を安定に発揮させるためには、面積が大きくかつ複雑な三次元形状の電極の場合にもその加工間隙に均一に粉末混入加工液を循環させる必要がある。シリコン粉末の加工液への分散性を高めるために効率的なかくはん装置を開発し、加工槽及び加工液タンクに設置した。

油加工液は荒・中加工領域の特性に優れ、粉末混入液は仕上加工領域の特性に優れるため、加工液を加工領域に対応して切り替える機能を装備した。これにより、荒加工領域から

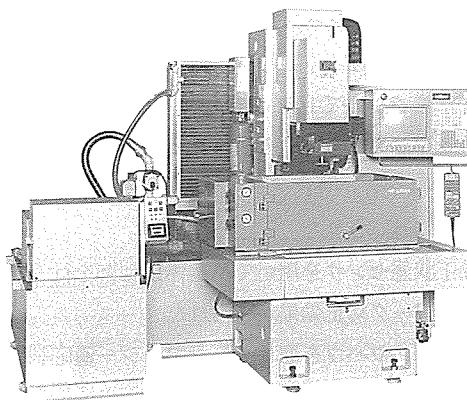


図10. 粉末混入放電加工機“VP35F”

鏡面加工までの連続加工が可能になった。2種類の加工液タンク及び加工液系統は洗浄工程を経て切り替えられるため、長期間にわたり加工性能を維持することが可能である。

#### (3) 耐汚泥部品、機構の採用

大量に粉末を含んだ加工液を長期間にわたり確実に開閉するため、シリンダバルブを採用して信頼性を確保した。また、加工槽内の凹凸を極力無くすことにより、粉末の堆積を防ぐような構造とした。

## 4. むすび

本稿では、新適応制御“MFアダプタ”と粉末混入放電加工機“VPシリーズ”について述べた。MFアダプタは熟練作業者を越えた加工性能を発揮する新適応制御機能であり、粉末混入放電加工は大面積の鏡面加工を可能とする革新的な技術である。今後も、その適応範囲の拡大とユーザーへの技術支援を通じて、更に高度化する金型生産現場の要求にこたえていく所存である。

## 参考文献

- 佐藤達志、今井祥人、赤松浩二、後藤明弘、尾崎好雄、小林和彦、弥富剛、森田温：放電パルス波形による放電状態の判別、第2回電気加工学会全国大会講演論文集、3～6（1992）
- 後藤明弘、赤松浩二、尾崎好雄、佐藤達志、今井祥人、小林和彦、弥富剛、森田温：形彫放電加工機のファジィ適応制御（第2報）、第2回電気加工学会全国大会講演論文集、61～64（1992）
- 森田温：形彫放電加工機のファジィ制御、電気加工技術（1989）
- 毛利尚武、斎藤長男、成宮久喜、河津秀俊、尾崎好雄、小林和彦、恒川好樹：粉末混入加工液による放電仕上げ加工、電気加工学会誌、25、No.49、47～60（1991）
- 高齋民生、小林和彦、井藤治彦、柳原敏充、斎藤長男：微小エネルギーによる放電加工の研究、電気加工学会誌、16、No.31、35～45（1982）

# 形彫り放電加工特性と加工技術

尾崎好雄\* 後藤昭弘\*  
富沢文夫\*\*  
河津秀俊\*

## 1. まえがき

形彫り放電加工機は三次元形状をもつ成形金型を加工するマザーマシンとして広く用いられている。特に加工精度、仕上面の点において非常に優れていることから、高精度自動加工機として位置付けられ発展を続けてきた。

しかしながら、一方ではユーザーニーズのますますの高度化により、形彫り放電加工機に次に挙げる要望が提起されている。

- (1) だれが操作しても高速で、確実に仕上がること。
- (2) 放電加工のままで金型に使用できる高品位な加工面を生成すること。
- (3) 火災の心配がなく、消防法の適用を受けないこと。

1番目の要望に対してMFアダプタが実現し、2番目の要望に対して粉末混入放電加工機が実現し、3番目の要望に対して不燃性液放電加工機が実現した。

本稿では、これら最新機種の加工特性と加工技術について述べる。

## 2. MFアダプタ

放電のパルスは、加工に寄与する正常パルスと、しみ・アークをつくる不良パルスに分類することができる。MFアダプタは、個々の放電パルスを解析して正常パルスと不良パルスを判別する高性能センサを搭載し、不良パルスの発生を抑えて正常パルスを多く発生させることにより、安定で高速な加工を実現する最新の適応制御である。

### 2.1 MFアダプタの特長

MFアダプタは従来機と比較して次のような特長がある。

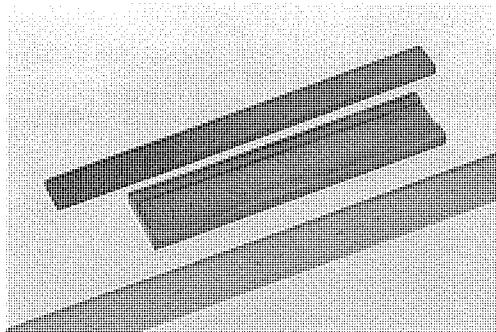


図1. 深リブ加工

### (1) 加工速度の向上

加工速度が平均して10~40%向上する。

### (2) 限界加工深さの向上

限界加工深さが従来の約2倍になる。

### (3) 磨き代の低減

磨き代が約20%削減され、しみ・むらのない高品質な加工面が得られる。

### (4) 極薄リブの加工速度向上

極薄リブ電極等のクリアランスの狭い加工においても、加工速度が30%向上する。

### (5) 食いつき部の消耗改善

食いつき部で加工面積が大きく変化し、電極が局部的に消耗する加工においても、ピーク電流やパルス幅等を制御することによって、局部的な電極の消耗が発生しない。

### 2.2 MFアダプタの加工事例

MFアダプタの加工事例を紹介する。

#### (1) 深リブ加工

図1は5mm×16mmの銅電極による深リブ加工を無噴流で行った結果である。形彫り放電加工では加工深さが深くなると加工くず(屑)の排出が悪くなり加工が不安定になるため、限界加工深さが存在する。この加工では熟練者でも深さ80mmが限界であったが、MFアダプタでは、150mmの深さまで安定に加工できた。

#### (2) 極薄リブ加工

図2は先端形状が20mm×0.6mmの極薄リブの加工結果である。このような極薄形状の銅電極でクリアランスの極めて狭い加工を行う場合、加工速度が遅くなる。MFアダプタ

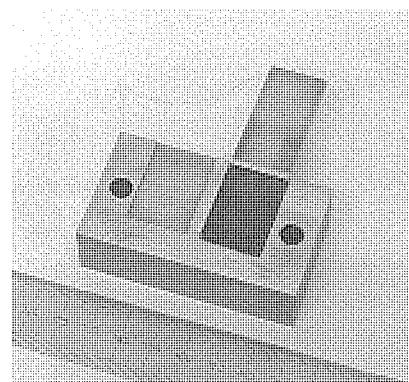


図2. 極薄リブ加工

タは放電の集中を防ぐことができるため、このような加工においても、加工速度が約30%向上した。

### (3) 下取りありの加工

工作物に下取りを行い、その残った部分を放電加工すると加工開始時に電極の食いつき部と呼ばれる小さな面積に放電が集中する。このため、その部分に消耗が集中して電極がえぐられてしまい、工作物にも転写されてしまう。従来は、食いつき時に細かく加工条件を変更する複雑なプログラムを作成したり、仕上げとして別の電極で再度加工する必要があった。図3は、図4に示すように下取りを行った工作物を加工した例である。食いつき部においても異常消耗することなく低消耗加工が実現でき、作業者が加工条件を変更する必要がなくなった。

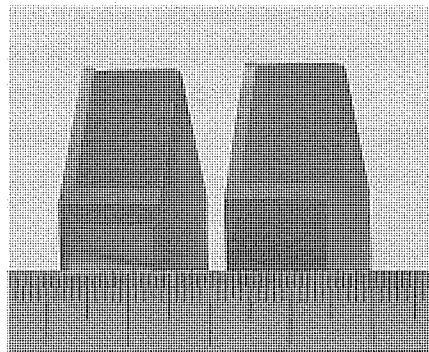
## 3. 粉末混入放電加工

加工液にシリコン微粉末を混入して放電加工する粉末混入放電加工法は、仕上加工特性を画期的に向上させる新加工法である。

### 3.1 粉末混入放電加工の加工特性

#### 3.1.1 鏡面加工面積の拡大

放電加工は加工面積が大きくなると面あらさが荒れる傾向にあるので、従来放電による鏡面加工は、 $10\text{cm}^2$ までが限界とされていた。粉末混入放電加工では、従来よりもはるかに



左が従来、右がMFアダプタ使用

図3. 下取りありの加工写真

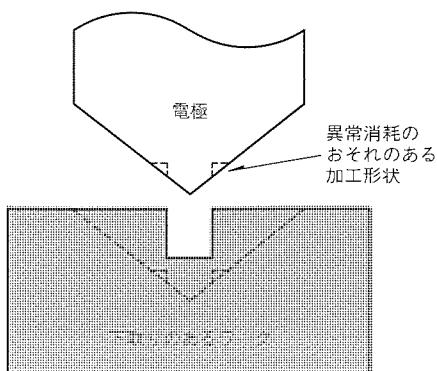


図4. 下取りありの加工図

大きな面積まで鏡面加工が可能となった。図5に、加工面積と面あらさの関係を、従来加工法と比較して示した。図中、TP回路はく(矩)形波電流回路、SF回路はコンデンサ放電回路、GM回路は鏡面用回路であり、粉末混入放電加工はTP回路を用いる。図において、小面積から $500\text{cm}^2$ を超える大面積まで、従来よりも面あらさが $1/2 \sim 1/5$ に向上していることが分かる。400 $\text{cm}^2$ 程度までは特に良好な鏡面となる。粉末混入放電加工という鏡面とは、面あらさ $1 \sim 3\text{ }\mu\text{m R}_{\max}$ の光沢面であり、#1000程度の砥石で磨いた面に相当する。これにより、放電後の磨き工程は大幅に削減される。

ここで従来グラファイト電極は軽量で切削しやすく、また高速かつ電極消耗の少ない放電加工が可能なことから普及してきたが、仕上領域の放電加工が困難とされており、プラスチック金型などへの普及に障害になっていた。粉末混入放電加工ではグラファイト電極でも鏡面加工が可能となり、プラスチック金型などへの適用も拡大することができる。この場合、電極消耗の少ないハイグレードなグラファイト電極が鏡面加工に適している。

#### 3.1.2 鏡面加工速度の向上

粉末混入放電加工により、仕上加工速度が大幅に向上する。図6は同一面あらさから、従来使用されている油放電加工と粉末混入放電加工で仕上げた場合の、加工時間に対する面あらさの推移を示している。例えば、 $10\text{ }\mu\text{m R}_{\max}$ まで仕上げる時間で比較すると、油放電加工2.5hに対して粉末混入放電加工0.5hであり、約5倍速いことが分かる。ここで両

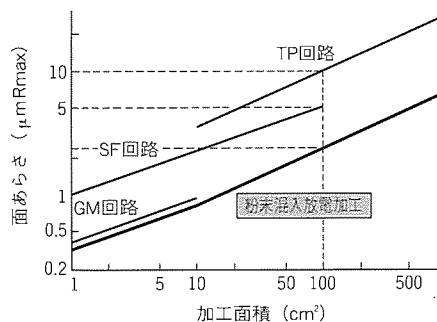


図5. 各種回路の適用範囲

電 極：グラファイト（イビデン製ED-3） $50\text{mm} \times 100\text{mm}$   
フ ー ク：SKD61（合金工具鋼）（焼入れ）  
電気条件：  
○  $I_b = 1 (5)$ ,  $\tau_p = 2.0$ , 油放電加工  
○  $I_b = -1 (3)$ ,  $\tau_p = 2.0$ , 粉末混入放電加工

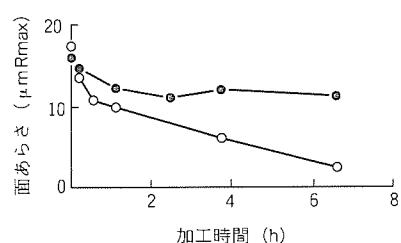


図6. 加工時間に対する面あらさの推移

加工方法の加工条件が異なっているが、従来油放電加工では、この面積を加工できる最小条件であり、これより小さい加工条件では、加工が不安定になり、逆に面が荒くなる。一方、粉末混入放電加工では、更に小さい加工条件にすることもできる。

### 3.1.3 加工面の品質向上

放電加工面にはクラックが存在することが知られている。これが型損傷の原因となり、手磨き等により除去するべきものとされてきた。図7は、加工表面の走査型電子顕微鏡(SEM)写真である。加工表面を観察すると、左側の従来使用されている油放電加工面にはクラックが存在するのに対し、右側の粉末混入放電加工面にはクラックが観察されなかった。粉末混入放電加工によって鏡面に仕上げればクラックは大幅に減少する。

また、粉末混入放電加工した面は、アノード分極試験法で、研削面及び油加工面に対して10倍の耐腐食性があり、表面が改質されていることを確認している。近年、成形材料として難燃性のプラスチックが使用されることがあるが、これは

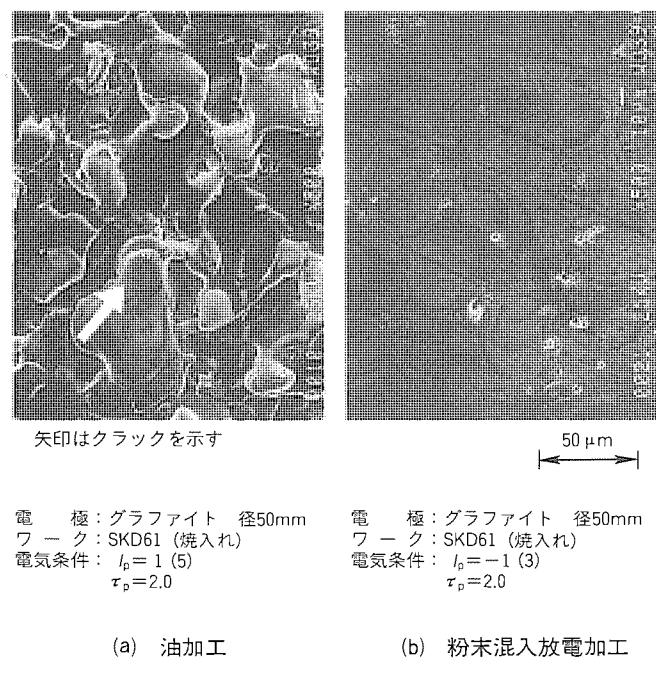


図7. 加工表面の比較

電極：グラファイト（イビデン製ED-3） 50mm×100mm  
 ワーク：SKD61（焼入れ）  
 電気条件：○  $I_p = 1(5)$ ,  $\tau_p = 2.0$ , 油加工  
 ○  $I_p = -1(3)$ ,  $\tau_p = 2.0$ , 粉末混入放電加工

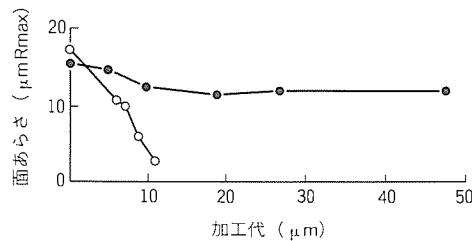


図8. 加工代に対する面あらさの推移

成形時に腐食性ガスを発生して金型寿命を著しく縮めることがある。このような成形材料に対し、粉末混入放電加工によつて型寿命が伸びた例がある。

### 3.2 粉末混入放電加工の加工技術

### 3.2.1 粉末混入放電加工への切替えについて

高精度な鏡面を得るには、荒領域は従来からの油放電加工、仕上領域は粉末混入放電加工を適用することが効果的である。図6の加工例を加工代に対する面あらさの推移として表したのが図8である。同一面あらさから約 $10\text{ }\mu\text{m}$  加工して、油加工の標準条件では $10\text{ }\mu\text{m}$  Rmaxにしかならなかつたのに対し、粉末混入放電加工の鏡面条件では約 $3\text{ }\mu\text{m}$  Rmaxまで仕上がった。これは粉末混入放電加工の方が油放電加工よりも少ない加工代で面が仕上がるることを表している。すなわち、粉末混入放電加工は形状精度を維持したまま仕上げることが可能であるといえる。そこで高精度に鏡面仕上げするには、油放電加工の低消耗条件で所望形状精度が得られるまで面あらさを細かくした後、粉末混入放電加工で仕上げるのが適当である。切替えの面あらさとしては $6\sim 15\text{ }\mu\text{m}$  Rmaxが実用的である。

### 3.2.2 リブの鏡面加工

金型のコア側に多数配置されるリブは、従来磨きに非常に苦労した形状である。そのため金型を分割し、各々を仕上げて組み付けていた。粉末混入放電加工によれば、割り型にす

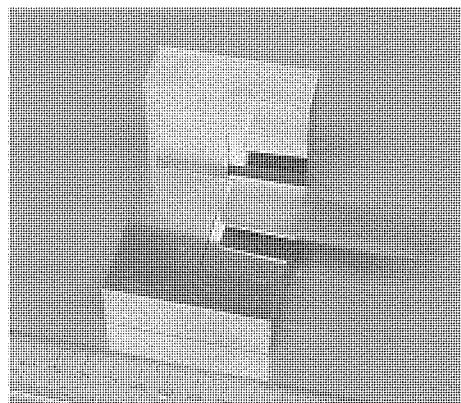


図9. リブ加工例

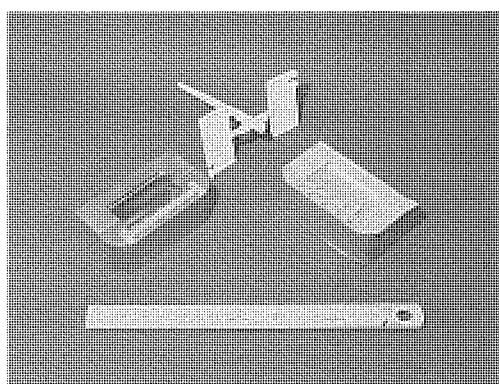


図10. 粉末混入放電加工面による成形例

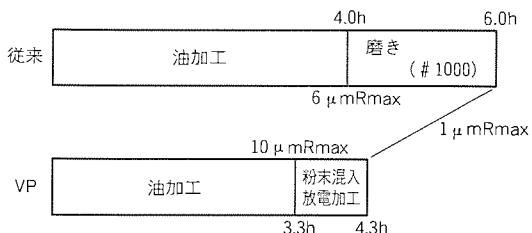


図11. 従来油放電加工と粉末混入放電加工との時間比較

ることなくリブを均一に鏡面とすることができます。図9はリブを鏡面加工した後、工作物を割って内部を見た写真であり、その諸条件、加工結果を以下に示す。

電極：先端 0.8mm, テーパ角 1°, 深さ 30mm

Cu 1本, 減寸量 0.15mm

加工時間：油 3.5h, 粉末 3.5h

面あらさ：0.9 μm Rmax

この結果、従来苦労しているリブの手磨き作業が省略できることが分かる。さらに、一つの電極に多数のリブを配置すれば、設計・電極製作・段取り・放電加工の各工数を大幅に削減できる。

### 3.2.3 粉末混入放電加工による実型加工例

粉末混入放電加工によって鏡面まで仕上げれば、手磨きせずに成形品の離型ができる。図10はフタ形状のプラ型の成形例である。粉末混入放電加工面のままで成形し、十分な品質の成形品が得られた。図11は従来の放電後に手磨きを行った場合と、粉末混入放電加工で仕上げた場合の加工時間を比較した図である。従来は6.0hかかり、そのうち2.0hは人手を要した。これに対して、粉末混入放電加工の場合は4.3hと28%工程を短縮するとともに、荒加工から最終仕上げまで自動で加工を行うことができた。また、粉末混入放電加工面に直接ショットブラスト処理しても、ショットブラスト装飾が均一に施された成形品が得られることを確認している。

図12は150 mm × 150 mm程度の大きさのCDプレーヤー部品のプラ型を粉末混入放電加工によって1.5 μm Rmaxまで仕上げたものである。従来は油放電加工で約 6 μm Rmaxまで仕上げ、以降 #250の砥石から磨いて最終ダイヤモンドペーストで0.1～0.2 μm Rmaxまで仕上げていた。粉末混入放電加工では直接 #1000の砥石から磨くことが可能になり、手磨き作業を大幅に削減することができた。また、手磨き作業において底面部はうねりがないようにすることが最も重要であり、従来法では、磨きの最初のステップである #250の荒砥石の工程に熟練を要した。粉末混入放電加工後は #1000の仕上砥石から磨くため、熟練を要することなく金型品質が安定する。

図13はこの金型の従来法と粉末混入放電加工法による加工工数の比較を示したものである。この加工例では総加工時間として 9h, 18%の工数が削減され、さらにこの時間がすべて有人作業時間の削減であるところに大きな意味をもつ。

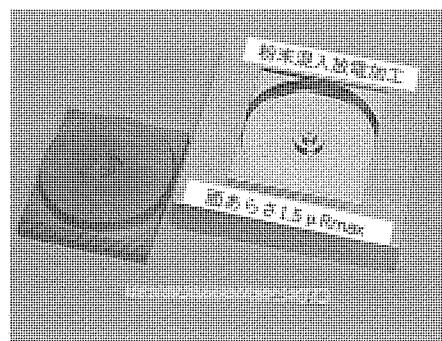


図12. CDプレーヤー部品金型加工例

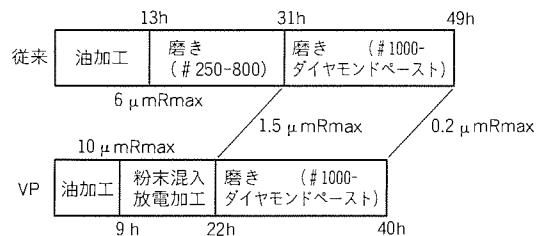


図13. CDプレーヤー部品金型の加工時間比較

## 4. 不燃性液放電加工

通常の形彫放電加工機が加工液として油(危険物四類第三石油)を使用するのに対して、水系の不燃性加工液を使用するものは不燃性液放電加工機と呼ばれる。不燃性液放電加工機は、消防法の火災予防条例による規制の対象とならないこと、最大加工速度 50～100 g/min の荒加工ができるところから鍛造金型や一部ダイカスト金型で用いられていたが、プラスチック金型や精密ダイカスト金型などの高精度を要求される分野では、面あらさ及び電極消耗の点で十分ではなく適用されていなかった。しかし、消防法による規制のない不燃性液放電加工機を、プラスチック金型などにも使用したいとの大きな要望はあった。ここでは、このような要望にこたえて開発した高精度加工対応の不燃性液放電加工機の加工特性を述べる。

### 4.1 不燃性加工液での放電加工

絶縁物である油中での放電加工と異なり、弱導電性の不燃性加工液の放電加工では、まず、電圧を印加すると電解電流  $I_c$  が流れ、次式で表される。

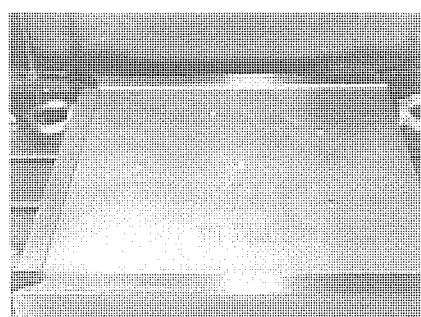
$$I_c = V \cdot S \cdot \rho / d$$

ここで、  $V$  は印加電圧 (V),  $S$  は電極面積 ( $\text{cm}^2$ ),  $\rho$  は加工液電気伝導度 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ),  $d$  は放電クリアランス (cm) である。電解電流  $I_c$  が大きくなると、極間電圧が低下し、放電を誘発できなくなり加工の継続が困難になる。したがって、加工液の電導度を小さくするようイオン交換樹脂によって脱イオン化処理を行う必要があり、低電導度を得る装置が装備される。

### 4.2 不燃性液放電加工の加工特性



(a) 通常加工終了後の加工面



(b) 特殊電源による加工終了後の加工面

図14. 加工終了後の加工面比較

加工によって有機物である加工液が分解し、タールを生成する。このタールは正常な放電の継続を阻害し、仕上がり面あらさを悪化させる。図14は従来の加工用電源と不燃性液加工用特殊電源との加工終了後における加工面の比較である。不燃性液加工用特殊電源では、電極及び工作物にタールが

表1. 従来加工用電源と不燃性液加工用特殊電源との加工性能比較

	加工時間 (h)	加工面あらさ ( $\mu\text{m Rz}$ )	電極消耗長さ (mm)
従来加工用電源	19	22.5	0.025
不燃性液加工用 特殊電源	12	19.5	0.030

注 加工面積  $1,000\text{cm}^2$ で、加工深さ 2mm加工

電極：グラファイト (ISO-63)

工作物：SKD61

付着しないように電圧・電流波形を制御する機能をもつ。表1は、加工性能の比較である。高精度の加工に適する加工性能を実現している。

## 5. むすび

本稿では、これらの最新の加工性能と加工技術について述べた。これらの技術は形彫放電加工機の3大技術革新といえる技術であり、ますます高度化する自動化機能とあいまって金型加工の工程を変革する技術であるといえ、形彫放電加工機の用途拡大が期待できる。

今後もユーザーニーズを先取りしながら、新技術に挑戦していきたい。

## 参考文献

- (1) 河津秀俊、小林和彦、尾崎好雄、齋藤長男、毛利尚武：粉末混入放電加工法による鏡面加工、1992年度関西地方定期学術講演会、31～36（1992）

# レーザ加工機の最新技術

藤本隆一\* 長野修\*  
大山年郎\* 白須浩藏\*\*  
久保学\*

## 1. まえがき

$\text{CO}_2$  レーザ加工機が生産現場に投入されてから 10 年以上が経過し、この間主として板金加工用途(切断・穴あけ)に急速に普及した。 $\text{CO}_2$  レーザ加工機は、抜型プレスに比べれば高価な金型が不要であり、タレットパンチプレスに比べても自由形状の切断に適し、振動や騒音の問題がない。厚板金属の切断ではガス切断やプラズマ切断に対しても、精度や仕上がりが優れている。普及の背景としては、さらに次に示す技術開発により、レーザ加工の生産性・経済性が飛躍的に向上したことが挙げられる。

- (1) 発振器・加工技術の進歩による加工安定性の向上
- (2) 加工機・制御系の性能向上による高速・高精度加工の実現と加工時間の短縮
- (3) 自動プログラミング装置の高速・高機能化による用途拡大と準備時間の短縮

現在においても、加工基本性能の向上のほか、低ランニングコスト化、自動化による省力・省人化と稼働率の向上、材料歩留り率の向上など生産性改善のための多くの課題がある。また、板金加工に加え、厚板切断や溶接・表面処理分野への適用も定着しつつある。

本稿では、これらのニーズに基づいた  $\text{CO}_2$  レーザ加工機の最新技術動向について紹介する。

## 2. $\text{CO}_2$ レーザ発振器<sup>(1)~(3)</sup>

### 2.1 製品系列と特長

当社では切断用途のレーザ発振器(出力 0.8 ~ 3 kW)から、溶接、表面処理用途のレーザ発振器(出力 5, 10 kW)まで、全 8 機種を製品化している(平成 5 年 6 月現在)。当社のレーザ発振器は、次の 3 項目で特長付けられる。

- (1) SD 励起三軸直交方式の採用による均質な放電と脈動の少ないガス流から得られる、安定なビームモードとく(矩)形波パルス出力
- (2) 高速パワーセンサによる出力制御方式の採用による、高い出力安定性( $\pm 1\%$ 以下)
- (3) ガス封じ切り運転方式の採用による、低廉なランニングコスト

### 2.2 切断用 $\text{CO}_2$ レーザ発振器

切断用途のレーザ発振器として、図 1(a)のように出力 0.8 kW から 3 kW までの 4 機種を製品化している。

F3 シリーズ(出力 0.8 ~ 1.6 kW の 3 機種)では、矩形状、高ピークのパルス出力が得られるとともに、集光性の優れたシングルモード(ML1508F3, ML2513F3)のビーム、及び厚板切断に適合した低次モード(ML3016F3)のビームが得られる。このため、高品質の切断と切断開始点の開孔加工(ピアシング)において、加工時間の短縮や低熱影響の加工が実現できる。また、ML3016C は、1 台の発振器でシングルモードと低次マルチモードの切替えが可能な、多目的用途の発振器であり、軟鋼薄板の切断(シングルモード)のほか、アルミニウム、ステンレス、軟鋼厚板の切断(低次マルチモード)や、軟鋼の溶接(低次マルチモード)に適用されている。

形名	出力 & 出力波形		SS400		SUS304		アルミニウム合金(A5052)	
	パルス	CW	高周波パルス(高速)	パルス(低速)	パルス(酸素切断)	パルス(無酸化切断)	パルス(エア切断)	
ML1508F3	MAX1,500W	MAX800W	t4 f=5"	t4 f=5"	t4 f=5"	t1 f=5"	t1 f=5"	
			t6	t9	t8	t2	t2	
ML2513F3	MAX2,500W	MAX1,300W	t9 f=7.5"	t12 f=7.5"	t9 f=7.5"	t3 f=7.5"	t3 f=7.5"	
ML3016F3	MAX3,000W	MAX1,600W	t12 f=7.5"	t12 f=7.5"	t9 f=7.5"	t3.5 f=7.5"	t4 f=7.5"	
ML3016C	マルチ	MAX3,000W	MAX3,000W	f=10"	f=10"	f=10"	f=10"	f=7.5"
	シングル	MAX1,600W	MAX1,600W	t6 f=10"	t9 f=10"	t8 f=10"	t2 f=10"	アルミニウム合金の加工はマルチにて実施

図 1.(a) レーザ発振器ラインアップ(切断用)

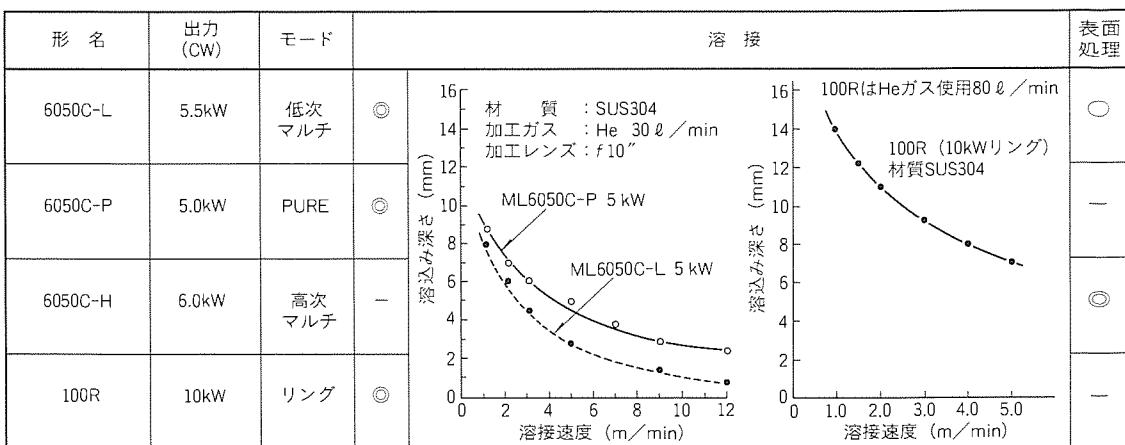


図1.(b) レーザ発振器ラインアップ(溶接・表面処理用)

### 2.3 溶接・表面処理用CO<sub>2</sub>レーザ発振器

溶接・表面処理等のように中・大出力を要する用途向けのレーザ発振器としては、図1(b)のように出力5kWクラスと10kWの4機種を製品化している。

溶接用のレーザ発振器としては、広く溶接分野に適用されている低次マルチモードの6050C-L、高速溶接時にも深い溶け込みが得られる、世界で初めて実現した高集束ビームモード(PURE)の6050C-P、大出力のリングモードの100Rの4機種をラインアップしている。表面処理用のレーザ発振器としては、均質なエネルギー分布が得られる高次マルチモードの6050C-Hがある。

### 2.4 CO<sub>2</sub>レーザ発振器の最新技術

レーザ発振器の設計上の最新技術として波動光学に基づく光学系設計シミュレーションを導入して、レーザ発振器の共振器部の設計に適用、上述した製品群に応用している。ここでは、その実施例として“HIT(Heat Insulated and Tolerable)共振器”及び“PURE(Phase Unified Resonator)共振器”を紹介する。

#### (1) HIT共振器

レーザ発振器の共振器部は、レーザビームによる熱負荷を軽減するため水冷されている。環境温度の変化等による共振器構造物温度と冷却水の相対的温度変化に対し、熱的な絶縁をすることで共振器を常に安定化した。ビームポインティング及びビームモードの安定性向上を図ることのできる共振器構造である。

#### (2) PURE共振器

レーザ発振器において集光性の最も優れたモードはシングルモードであるが、ビーム径や出力ミラーの耐光強度に制限があり、これまで大出力化が困難であった。等位相化拡大ミラーの適用と波動光学に基づくシミュレーションにより、シングルモードに匹敵する大出力高集束レーザビームを出力する共振方式を開発した。図2は、位相整合共振器(PURE)と一般の安定型共振器を対比して示したものである。PUREでは、近視野においてミラーに対する熱負荷集中の小さな、

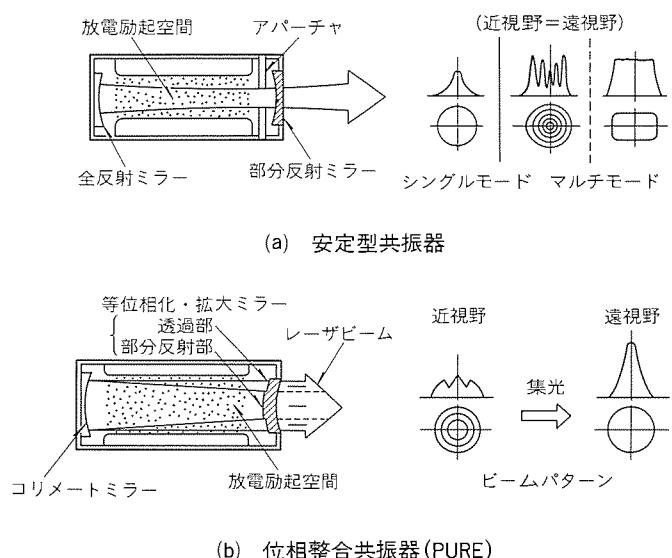


図2. PURE(位相整合共振器)

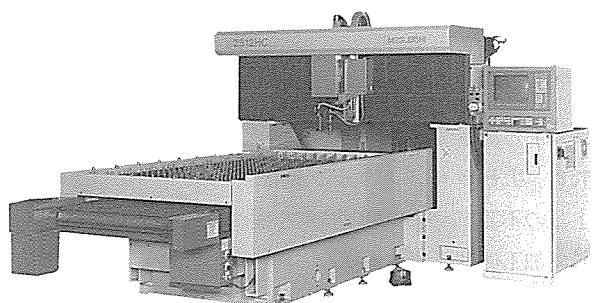


図3. HCシリーズ外観

均一位相で中詰まりのビームパターン、遠視野(焦点)ではシングルモード状のビームパターンが得られた。この“PURE共振器”は、溶接用レーザ発振器6050C-Pに採用されている。

### 3. 二次元レーザ加工機<sup>(4)</sup>

図3に標準の二次元レーザ加工機“HCシリーズ”的外観を示す。1軸ワーク移動、2軸光移動のハイブリッド型で、MELDAS(M330HM, 32ビット)をベースとしたレーザ

専用の制御装置を搭載している。

### 3.1 連続自動運転

稼働率向上のためには、まず加工機が停止しないで連続自動運転ができることが必要である。連続自動運転を構築するには、ワーク搬入／搬出装置等の周辺装置を含めたシステム化と加工機に対する下記項目が特に重要である。

- (1) 加工不良、異常発生の未然防止
- (2) アラーム発生時、アラームのレベルを判断し、加工継続可能であれば、加工を継続
- (3) 加工継続不可であれば、その情報を外部へ通報
- (4) 手動操作・調整の削減

ここでは、上記(1)～(4)に対応した具体的機能について述べる。

#### 3.1.1 メンテナンス画面

レーザ加工機には、光学部品(レンズ、ミラー)やレーザガスなど消耗及び劣化するものを使用しており、自動運転の途中に、加工不良や異常停止の原因となる場合がある。図4に示すように、重要なメンテナンス項目の時間経過が表示され、また警告レベルと停止レベルの2段階に分けて表示・制御される。ユーザーは、連続自動運転の前に、この画面で項目をチェックし、加工不良や異常停止を未然に防止することができる。

#### 3.1.2 不要アラーム抑制機能

運転中に発生するアラームでは、加工ヘッドのノズルとワーク間距離を一定に保つハイト(値)制御に関するものが最も多く、センサからの異常信号により、通常は加工停止する。しかし、この場合でも、一瞬ノズルとワークが接触した又はプラズマの発生で一瞬信号が異常となる等、加工継続できる場合がある。そこで、アラームのパターン判定機能を設け、不要アラームを無視し加工を継続させることを可能とした。アラームが発生しやすいワークの加工に対して非常に効果のある機能である。

#### 3.1.3 リトライ／スキップ機能

上記の不要アラーム抑制機能を働かせても、アラームが発生して加工停止せざるを得ない場合があるが、このようなとき、加工再開を自動的に行い運転を継続しようとするのがこ

の機能である。図5にリトライ機能の動作概要を示す。アラームが発生したその位置で加工再開を試みるのがオンポイントリトライである。設定回数以内で再開できればそのまま加工を継続するが、再開できない場合には、その位置をスキップし次の指定位置から加工再開を試みるのがスキップリトライである。なお、定尺材から製品を多数個取りしている場合は、次の製品から加工を継続することもできる。

#### 3.1.4 外部通報機能

オペレータ不在時に加工継続不可となった場合に、アラーム情報(停止)を電話回線を利用して通報できるインターフェースを備えている。この機能によって事務所等の遠隔地での監視が可能となる。

#### 3.1.5 焦点プリセット機能

対象ワークの板厚や材質により、レーザビーム焦点のワークにおける位置を変えて加工する必要がある。従来は加工対象が変わることに、手動で焦点位置変更を行っていたため、段取りに時間を要し、また異種材料が混在した連続自動運転ができなかった。この機能は、加工レンズの駆動機構(図6参照)をもち、あらかじめ加工条件データに焦点位置データを登録しておくことで、焦点を自動的に制御する。これによって調整作業が不要となり、前段取り時間の大縮短も可能となった。

#### 3.1.6 加工ガス圧無段階制御

この機能は、加工条件データに設定されたガス圧値に応じて加工ガス圧の自動制御を行うものである。図7にガス圧値を設定した加工条件データの例を示す。また、このガス圧値は操作ボードのダイアルやテンキーでユーザーが変更・追加等できる。この結果、毎回の手動調整が不要となり、調整のばらつきも少なくなった。

#### 3.1.7 安全対策

機器や環境等に対する安全対策も連続自動運転に必ず(須)の項目である。その中から、主なものを以下に示す。



図4. メンテナンス画面

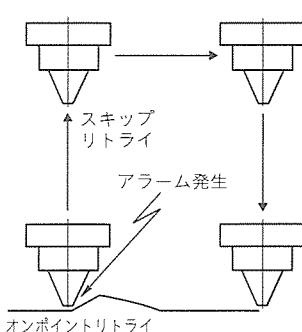


図5. リトライ機能

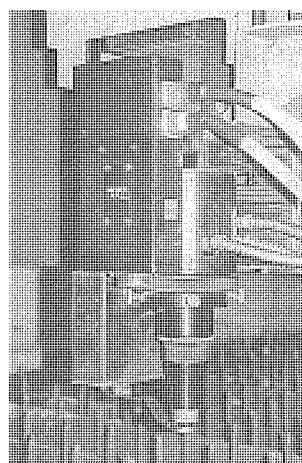


図6. 焦点プリセット  
加工ヘッド外観

- (1) 光路ビームずれ検知
- (2) 加工レンズ破損検知
- (3) 光路ミラー焼損検知
- (4) 個別センサの位置ずれ検知
- (5) 各種インターロック用インターフェース
  - ・火災報知機、地震(P波)センサ
  - ・酸素ガス濃度検出器
  - ・エリアセンサ

### 3.2 加工性能向上

レーザ加工の特徴である高速・高精度加工等の性能向上のために加工機のメカニクスや制御機能の充実が必要である。

以下に最近の主な技術・機能を紹介する。

#### (1) 高速・高精度加工

高速加工時の過渡振動の低減が高速・高精度加工において重要である。そのためには、駆動系(特に加工テーブル)の軽量化と高剛性化が必須である。図8にCAEを利用した構造解析・実験モーダル解析例を示す。この解析により、テ

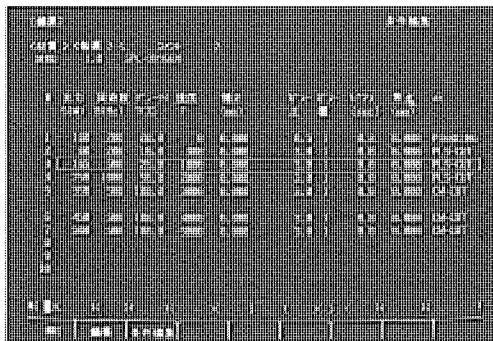


図7. 加工条件データ画面

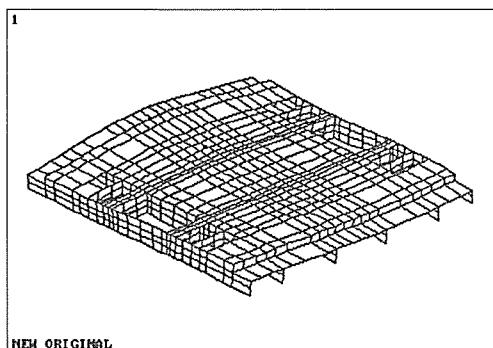


図8. モーダル解析(加工テーブル)

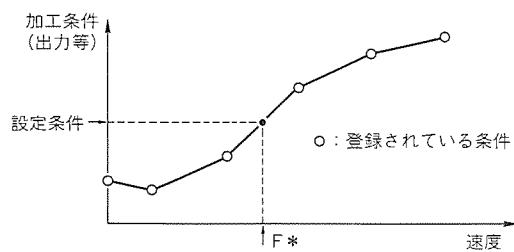


図9. 加工条件の最適化

ブルの固有振動数を従来に比べて約33%高くでき、特に鋭角コーナ加工時の過渡振動特性の改善に大きく寄与できる構造の改良が図られた。他の構造部材についても同様の解析を利用して多くの成果を上げている。

#### (2) 加工条件の最適化

加工条件データベースには、板厚／材質ごとに、10種の条件が登録されている。図9に示すように、任意の加工速度(図中F\*)をパラメータとして、登録データを基にその他の条件(出力、周波数、デューテー、ガス圧)を、加工中にリアルタイムに補間制御できる機能を設けた。

これにより、加工形状／精度に対して、細かな条件設定が可能となり、その結果加工の安定化や加工時間の短縮が図れる。

#### (3) コーナ加工条件制御

鋭角なコーナを加工するには、サーボ系・メカ系の追従遅れの影響を少なくするために、その近傍で速度を遅くする必要がある。この制御は、図10に示すように、あらかじめ、コーナ角度に対して最適な加工速度とその制御長さを登録しておき、コーナ部では自動的にその条件で加工される。

### 3.3 システム化

(コーナ加工条件制御)	
コーナ制御	1
第1コーナ角度	60°
第2コーナ角度	120°
<コーナ角度>	0° < I < 60°      60° < I < 120°
コーナ条件(F*)	1,000      2,000
コーナ制御長さ	3.0      2.0

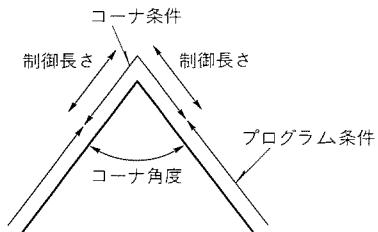


図10. コーナ加工条件制御

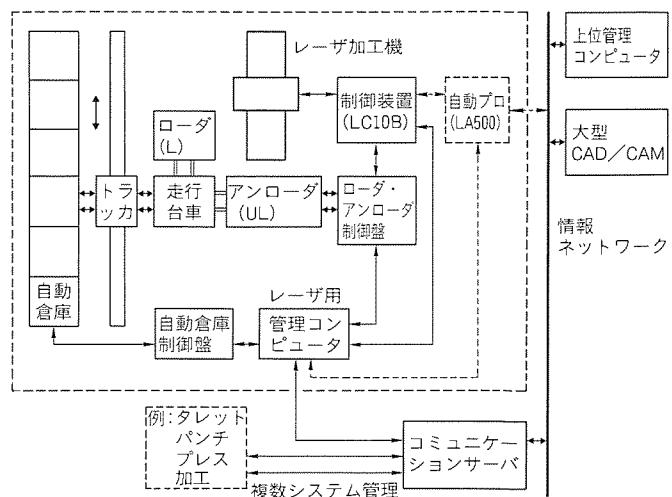


図11. 生産システム例

レーザ加工機も上記のとおり、連続自動運転化が進み、生産ラインへ組み込まれる場合も増えてきた。分野としては、板金ラインが主であるが、タイル等の非金属加工のラインにも適用されてきた。

図11に、他の加工機(例:タレットパンチプレス等)と組み合わされた生産システムの例を示す。今後は、上位計算機等との接続や生産管理とのリンクによるCIM(Computer Integrated Manufacturing)化がますます進展すると考えられる。

#### 4. レーザ加工機用 CAD/CAM システム

レーザ加工機の普及は、その用途の大半が二次元の板金切断加工で、加工部品のロットが少ないとことから、NCデータを作成するレーザ用自動プログラミング装置の性能(プログラム作成時間の早さ)と機能(ネスティング、イメージスキヤナ等)の優劣が、レーザ加工システムの稼働率向上の重要な鍵を握る。

のことからレーザ加工機発売当初から、本格的なレーザ用自動プログラミング装置を開発・提供してきた。現在では、

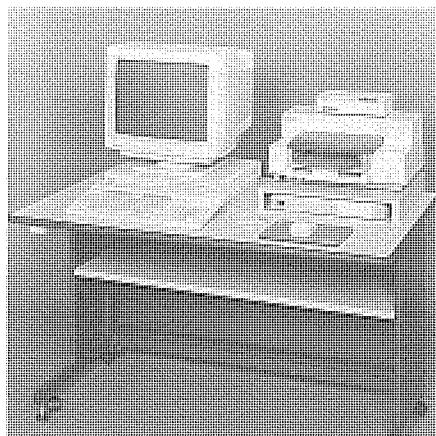


図12. LA500外観



図13. LA100外観

一層の高機能化、高性能化の要求に対応したWS(ワークステーション)版のレーザ加工機用CAD/CAMシステム“LA500”(図12)及びパソコン版の“LA100”(図13)をシリーズ化している。

以下に、LA500の特長等について述べる。

#### 4.1 構 成

##### (1) ハードウェア構成

図14にハードウェア構成を示す。本体に32ビットのWSを用い、大容量(200Mバイト)のハードディスク装置を内蔵し、無停電電源装置(UPS)等のシステムの保護に必要な装置も標準装備している。また、イメージスキヤナ(A3)等、各種周辺機器装置との接続が可能で、拡張性を重視した構成となっている。

##### (2) ソフトウェア構成

表1に示すようにソフトウェアは、加工形状の作成に必要なCAD機能とレーザ加工機用のNCプログラムを作成するためのCAM機能から構成されている。ネスティング機能や展開パターンの追加等、CAD機能が豊富となり、また当社レーザ加工機専用の加工条件設定機能の充実等により、加工プログラム作成時間の大幅短縮が可能となった。

#### 4.2 特 長

以下にこのシステムの主な特長を示す。

(1) 当社従来機LA51の約5倍高速のCPUと16インチ高解像度CRTを採用し、操作性向上を図った。

(2) オペレーティングシステムにはUNIX<sup>(注1)</sup>を採用している。一方、フロッピーシートへの入出力は各社パソコンとの互換性の高いMS-DOSフォーマットを探用し、データ入出力が容易にできる。

(3) 停電等の電源に起因する不具合を防止するための無停電電源装置やUNIXシステムを正常の手順で終了させる機能をも

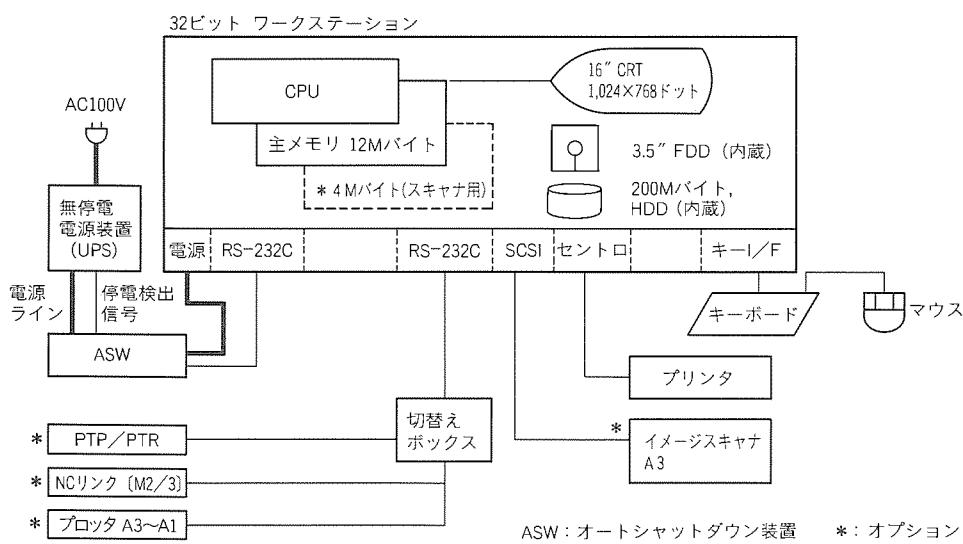


図14. LA500ハードウェア構成

(注1) UNIXは、UNIX System Laboratories社が開発し、ライセンスしているオペレーティングシステムである。

表1. LA500ソフトウェア構成

標準	CAD機能	図形定義	基本図形入力(点、線、円、円弧)、補助線入力、対話入力／自由曲線入力、サブパターン入力、特殊形状定義(インボリュート歯車、ラック、だ円)
		図形編集	要素削除、形状修正(トリミング、形状接続、復元等)、コーナ処理(コーナカット、コーナR、面取り、ループ)、移動・コピー(平行、回転、反転、拡大)、ストレッチ、寸法駆動編集
		製図機能	寸法線記入(水平、垂直、角度等)、注記
		展開機能	合成、面出し展開、ダクト展開1(9パターン)
		配置機能	自動(矩形)、手動ネスティング
		補助機能	ファイル管理、部材管理(ハードディスク装置側)、FLD管理(NC、CADデータ用)、副座標、寸法チェック
	CAM機能	画面操作	画面表示の拡大、縮小、移動、リフレッシュ、表示ビュー(複数設定、解除)、プリント出力
		その他	
オプション	CAD機能	属性付加	ピアス(直線、R)、マイクロジョイント、終点マイクロジョイント
		経路生成	自動、手動、干渉チェック
		NC生成	加工条件自動設定
		NC編集	NCエディタ、NCチェック、概略加工時間算出
	CADデータ入出力	展開機能	ダクト展開2(35パターン)、断面・曲げ展開
		配置機能	自由ネスティング
	CAM機能	CADデータ入出力	IGES入出力、DXF入出力、BIM入力
		入出力機器	イメージスキヤナ(A3)／デジタイザ(A0)入力、XYプロッタ(A3～A0)出力
	CAM機能	NC入出力	NCリンク(DNC)、リード／パンチャー
		データ変換	回転データ変換

つオートシャットダウン装置(ASW)を標準装備して、システムの信頼性向上を図っている(図14参照)。

- (4) 板金加工データ作成のポイントとなる部材配置機能として、高速の自動ネスティング機能(形状を矩形とみなして配置)に加え、必要に応じて部材を自動的に回転し、歩留りが飛躍的に向上する自由ネスティング機能(オプション)も可能となった。図15にこの自由ネスティングを利用した高歩留りの例を示す。また、パソコンを用いたものに比べて数分の1の時間で配置可能となった。
- (5) マウスやキーボードからの入力情報を記録するログ機能を、ソフトウェア開発時の自動評価試験に用いて、ソフトウェアの信頼性向上を図っている。また、フィールドでの不具合発生時に情報の自動収集が可能となり、原因究明にも効果を上げている。
- (6)汎用的なCADデータの形式であるIGES、DXF、BIMの3タイプの入力機能を装備し、他の主要CADシステムからのデータ流用が可能となった。

## 5. レーザ溶接システム

数ある溶接手段の中で高品質な継手が得られるレーザ溶接は、ここ数年、着実に用途を拡大してきた。溶接では加工対象物が高精度化するとともに高信頼性も要求され、見栄えも製品としての重要な要因となってきている。従来の溶接は、作業環境が決して良好とはいはず、また、場合によっては熟

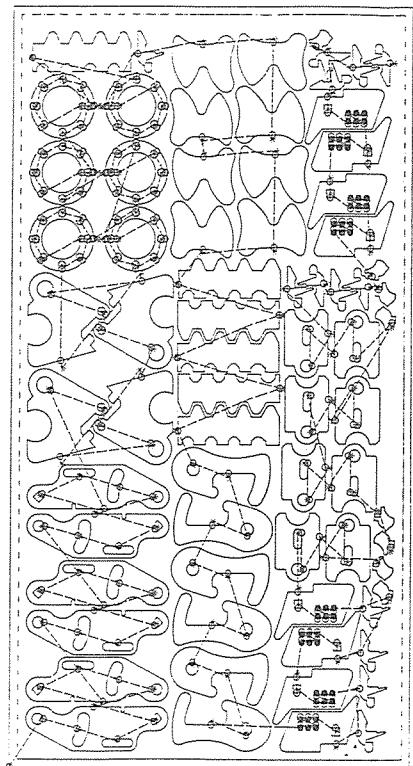


図15. 自由ネスティング配置例

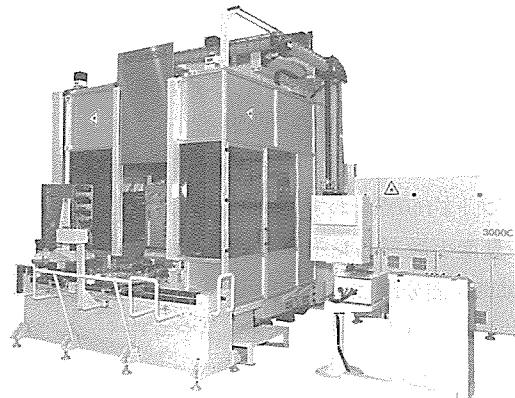


図16. 薄板ボックスレーザ溶接機外観

練者の長年の経験の上に成り立っているケースも多く、それらが生産の近代化を阻害してきた。これに対し、クリーンなエネルギーを非接触で供給しながら自在にコントロールできるレーザは、制御性の良さと低ひずみ・深溶込みの特長をもち、小物精密部品から重工業関連の大物ワークまで、重要な溶接の一手段として定着しつつある。自動化設備としても高い評価を得るに至っている。以下に、この分野における代表的な加工機を紹介する。

### 5.1 薄板ボックスレーザ溶接機

これまで、板金薄板の溶接はアーク溶接、抵抗スポット溶接が主に用いられ、入熱過多が原因で発生する熱ひずみは避

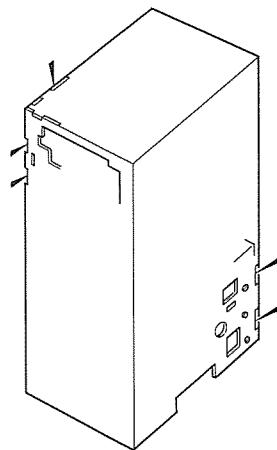


図17. 薄板ボックスレーザ溶接例

けられないものとして、後工程で修正されてきた。自販機やコピー機などの高精度を必要とする制御ボックスでは、特に、精度維持のために、ひずみ取り及びそれに続く精度出しに時間と手間を要し、コスト管理、工程管理を困難なものとさせていた。これらの問題点を解決した薄板ボックスレーザ溶接機を図16に示す。加工ヘッドを三次元5軸光走査方式とし、ワークテーブル側に90°ごとのインデックス機構を備え、両者のシーケンシャルな動作でボックスの底を除く5面の溶接を順次行うことができる装置である。さらに、パレットチャレンジャーとの連結を可能にしているため、ワークの搬出入を自動的に行いながら無人運転をすることも可能である。溶接ポイントはティーチングによって溶接姿勢とともに入力できる方式を採用し、作業性の改善を図っている。

この装置で溶接している対象ワークを図17に示すが、溶接ポイント約60点をわずか2~3分で処理している。

## 5.2 量産小物部品レーザ溶接機

自動車産業分野では、トランスミッション、トルクコンバータに代表される精密駆動伝達部品やエアバック、電装品などの機能部品にレーザ溶接が多用されている。図18に示す量産小物部品レーザ溶接機はこれらを対象に製品化したもので、数秒のタクトタイムにも対応できる高速溶接装置である。4ステーションのインデックステーブルと加工ヘッド移動機構を一体ベースに組み込み、加工姿勢を垂直から水平まで任意に変えられる構造とすることにより、広範な用途への適用を可能にし、インライン設備として利用されている。

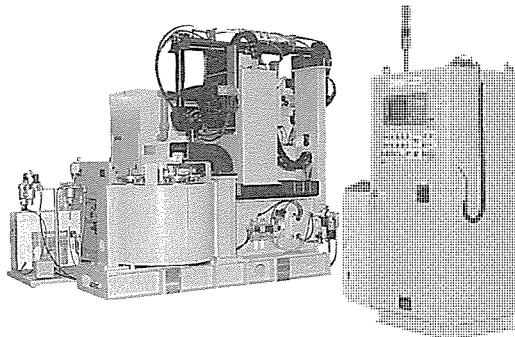


図18. 量産小物部品レーザ溶接機外観

►印は、溶接ポイントを示す。

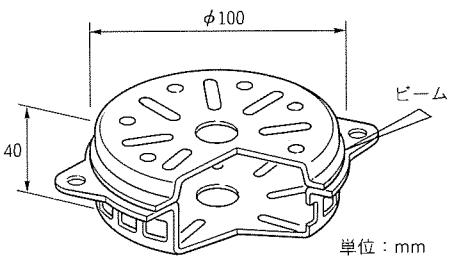


図19. 小物部品レーザ溶接例  
(エアバックインフレータ)

図19に実際に適用されているエアバックインフレータの形状を示す。

## 6. む す び

以上、CO<sub>2</sub>レーザ加工機の切断・溶接分野における最新の技術について紹介した。板金加工を中心に定着したレーザ加工は、便利で使いやすく、自動化に適したツールとして、ますます普及していくものと考えられる。また今後は、部品加工や溶接・表面処理分野への用途拡大も加速していくものと思われる。

レーザ加工は、レーザ技術(発振器)、メカトロニクス(加工機、制御装置)、加工技術を基盤としており、今後の発展のためになすべき課題も多く、またレーザ加工機の応用に関するユーザーの皆様の御意見は大変貴重である。レーザ加工のより一層の普及・拡大を目指し、各分野で努力を続けていく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) 大谷昭博：三菱電機炭酸ガスレーザ発振器の概要、金属プレス、No.7 (1992)
- (2) 大谷昭博、西田聰、葛本昌樹、水野正紀：溶接用炭酸ガスレーザ発振器、三菱電機技報、66、No.4、473~476 (1992)
- (3) 菊井正夫、佐藤清、大谷昭博：炭酸ガスレーザ発振器、三菱電機技報、61、No.6、460~463 (1987)
- (4) 管原雅之、形山裕亮：連続運転CO<sub>2</sub>レーザ加工機、ジョイテック、No.6、88~92 (1992)

# 厚板鋼板のレーザ切断特性と加工技術

金岡  
村井  
木谷  
優融\*

## 1. まえがき

レーザ切断の普及は板厚の薄い材料を高精度に切断することを目的として行われてきたが、近年プラズマ切断やガス切断による加工が行われていた厚板の分野にもその適用が図られつつある。本稿では特に加工用途や頻度の最も多い軟鋼材料の切断について扱う。厚板軟鋼の加工対象は橋りょう(梁)、建設機械、造船などの部品であり、これらの用途においても工程のクリーン化と高速・高精度化は時代の要請である。プラズマやガス切断を用いる場合には精度の高い穴あけの追加工を必要とするケースが多くある。

レーザによる切断の採用は、このような従来の熱加工法では達成が困難であった加工精度の要求に対し、二次的加工を加えることなく高品位な加工品質を提供することができる。しかし、レーザ加工の厚板切断への適用は、光学部品や発振器内部品への熱負荷の増加、加工条件裕度の減少、被加工物条件のばらつきなどのため、加工が難しくなる傾向にある。ここでは、このような厚板切断の安定性向上を目的として各種要因の最適化を検討した。

軟鋼厚板の切断において加工品質を評価する主な項目は、①燃焼反応が異常に広がるセルフバーニングの発生、②切断面に不規則に発生するキズ、③切断部裏面に付着するドロスである。これらの加工品質を左右する要因には、切断溝の形成を左右する光学的要因としてのビーム集光特性<sup>(1)</sup>と溶融金属を酸化させ、かつ溝内からの排出を行う酸素アシストガス特性が主なものとして挙げられる。以下に、これらの要因と加工特性の関係について示す。

## 2. 光学的要因

レーザビームは発散角によって、発振器から加工位置までの距離に応じてレンズ位置での入射ビーム径が異なるため、加工点でのビーム集光特性が変化する。このため加工する位置によって加工品質がばらつくという問題がある。以下に、このような光学的問題が切断特性を与える影響に関して検討した結果を示す。

### 2.1 厚板切断に適したビーム集光特性

図1には、板厚9mmのSS400(一般構造用圧延鋼材)を連続波(CW)を用いて切断した場合に良好な切断品質が得られるアシストガス(酸素)圧と上部切断溝幅の関係を示す。加工レンズは焦点距離が $f=127\text{ mm}$ と $f=190.5\text{ mm}$ のも

のを使用し、焦点位置 $Z$ を $0 \sim +4\text{ mm}$ の範囲で変化させて切断溝幅を調整した。ここで焦点位置 $Z$ とは図中に示すように被加工物の表面から焦点までの距離である。図中の○は良好な品質、×はセルフバーニング又は入熱不足で切断部下部があ(粗)れるガウジングによって加工品質の著しく劣るもの、△はセルフバーニングやガウジングは起こらないがドロスの発生が多いものを示す。良好な切断品質の得られる適正切断溝幅はアシストガス圧によって変化し、アシストガス圧が高いほど切断溝幅の狭いところに、逆にアシストガス圧が低いほど切断溝幅の広いところに適正条件範囲が存在する。

図2には、板厚9mmのSS400を焦点距離 $f=127\text{ mm}$ と $f=190.5\text{ mm}$ の加工レンズを用いて切断したときの焦点位置と上部切断溝幅の関係を示す。この場合のレンズ入射ビーム径は、アクリルバンパターン(出力1,000W、照射時間3s)で約24mmである。さらに、図2には図1からアシストガス圧が80kPaで良好な切断品質の得られる切断溝幅の範囲と焦点位置との関係を網掛けで示した。アシストガス圧80kPaでの適正上部切断溝幅は0.45~0.55mmであるが、アシストガス圧や板厚の変化に対応して適正上部切断溝幅も変化する。 $f=127\text{ mm}$ レンズでは $Z=+1.5 \sim +2.5\text{ mm}$ 、 $f=190.5\text{ mm}$ レンズでは $Z=+1.0 \sim +3.0\text{ mm}$ の範囲で適

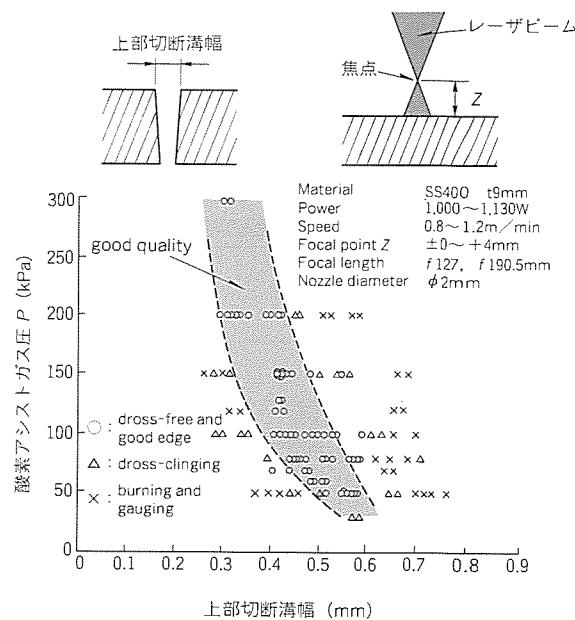


図1. アシストガス圧と切断溝幅の関係

正な上部切断溝幅が得られる。このように、厚板の切断には適正焦点位置範囲が広い $f = 190.5\text{ mm}$ 等の長焦点レンズが有効である。

## 2.2 光路長一定方式<sup>(2)</sup>

厚板切断では大型部材への適用が多くなり、それに伴って加工範囲の大きなシステムが必要となるが、この大型システムには一般の定尺材加工用のシステムとは異なる性能が要求される。レーザビームのもつ発散性によって、発振器から出射したレーザビームは、伝搬距離が長くなるほどビーム径が大きくなる。このビーム径の差によって、図2で示したビーム集光特性が変化し、切断溝幅も変化して適正範囲を外れる場合もある。この問題を解決するために、発振器から加工ヘッドまでの伝送距離を一定に保ち、レンズ位置でのビーム径を常に一定にするための機能が開発されている。

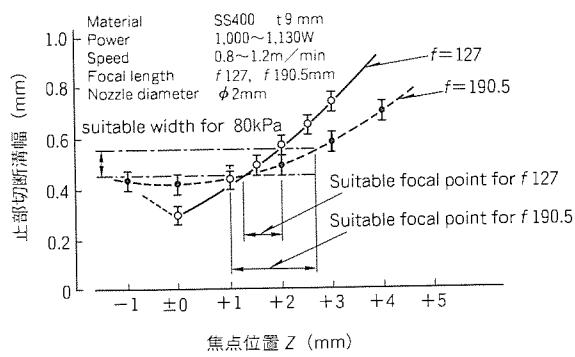


図2. 焦点位置と切断溝幅の関係

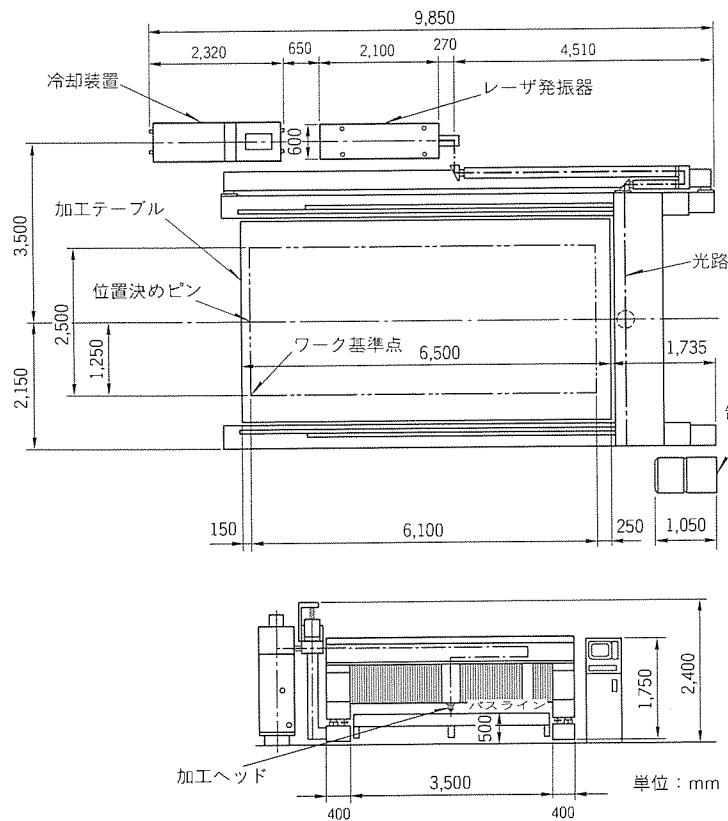


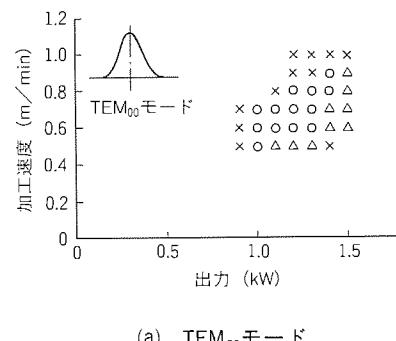
図3. 大型レーザ加工機の例

図3はこの原理によって開発された大型の光走査型レーザ加工機の外観を示す。この方式により、加工機のどの位置においても安定した加工が可能である。

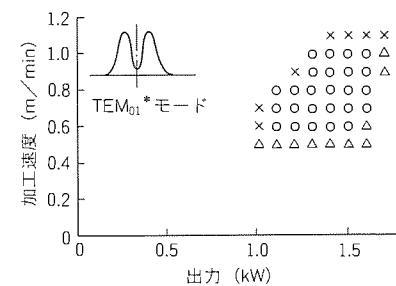
## 2.3 ビームモードの影響

レーザ切断では一般的にシングルモード( $\text{TEM}_{00}$ )は集光特性が良く、切断に適するモードとされてきた。しかし、前節で示したように厚板の切断では、焦点位置をプラス側ディフォーカスすることによって切断溝幅を幾分広げたところに適正条件が存在することから、薄板切断の場合と異なりビームの高集光性能は必ずしも必要でないことが予想される。また、シングルモードはその光強度分布が光学部品への熱負荷を与えやすく、厚板切断で必要な高出力になるほど熱ひずみ発生を招きやすくなる。そこでこの節では、集光特性の異なる2種類のビームモードを用いて、厚板切断性能に及ぼすビームモードの影響について示す。

図4は板厚12 mmのSS400を $\text{TEM}_{00}$ と $\text{TEM}_{01}^*$ モードのビームで切断し、良好な切断品質が得られる出力と切削速度との関係を示す。図中の○△×判定は、前節の図1で示した評価判定と同基準で行った。 $\text{TEM}_{01}^*$ モードでの良好な切断品質の得られる範囲は、 $\text{TEM}_{00}$ での範囲に比べて約2倍(面積比)に拡大し、かつ高速度側に裕度が拡大している。また、良好な切断品質の得られる焦点位置とアシストガス圧の関係を調査した場合も、 $\text{TEM}_{01}^*$ モードによる切削条件裕度は $\text{TEM}_{00}$ の条件裕度に比べて拡大している。波動光学シミュレーションによれば、各モードの焦点位置でのビーム径



(a)  $\text{TEM}_{00}$ モード



(b)  $\text{TEM}_{01}^*$ モード

図4. SS400, t12mmの切断能力

は TEM<sub>00</sub> でのものが TEM<sub>01</sub>\* でのものより小さく、また光軸方向へのエネルギー強度分布の変化は、TEM<sub>01</sub>\* でのものが TEM<sub>00</sub> のものより小さい。さらに、光学部品の汚れに伴う熱ひずみの誘発に対する影響も、TEM<sub>01</sub>\* モードの方が有利であるという結果が得られている。

以上のように厚板切断と薄板切断とでは最適なビームモードが必ずしも一致しないと結論づけられる。

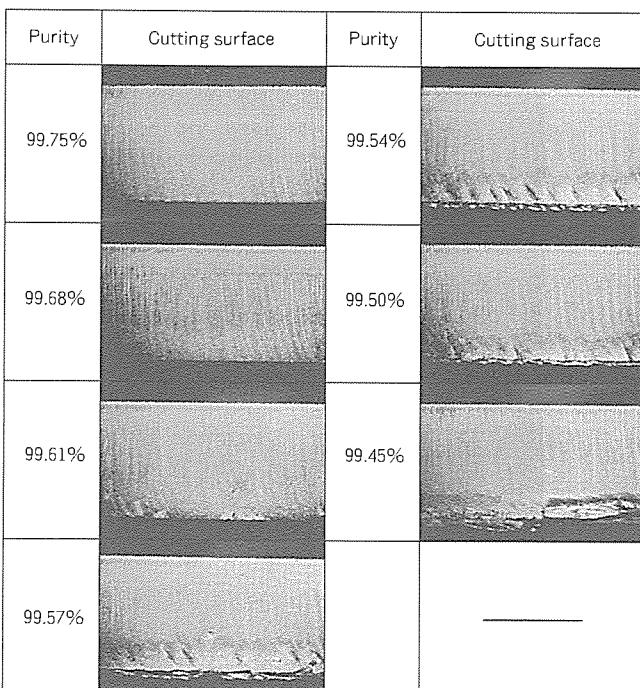
### 3. アシストガスの条件

レーザ切断におけるアシストガスの役割は、溶融した金属を切断溝内から排出するための運動エネルギーの提供、酸化反応熱の制御、被加工物の冷却、加工レンズの保護などを挙げることができる。そのため、アシストガスの種類や流量、圧力などの条件パラメータは被加工物材質や要求品質に応じて最適値に設定する必要がある。

以下に、軟鋼厚板の切断品質を向上させるためにノズル形状について検討した結果を示す。

#### 3.1 切断部の酸素ガスシールドの効果

アシストガスの酸素濃度と板厚 12mm の SS400 の切断品質との関係を図 5 に示す。この実験に用いたノズルは、一般的に切断用ノズルとして用いられている集束角 50° の円すい(錐)形で出口径は 2 mm のものである。レーザビームの走査は、図中の切断面に向かって右から左の方向である。アシストガスは、一般に市販されている液体酸素(濃度 99.75%)にアルゴンガスを微量混合させて酸素濃度を変化させた。酸素濃度が低下するほど板厚中央部から下部にかけてのドロ

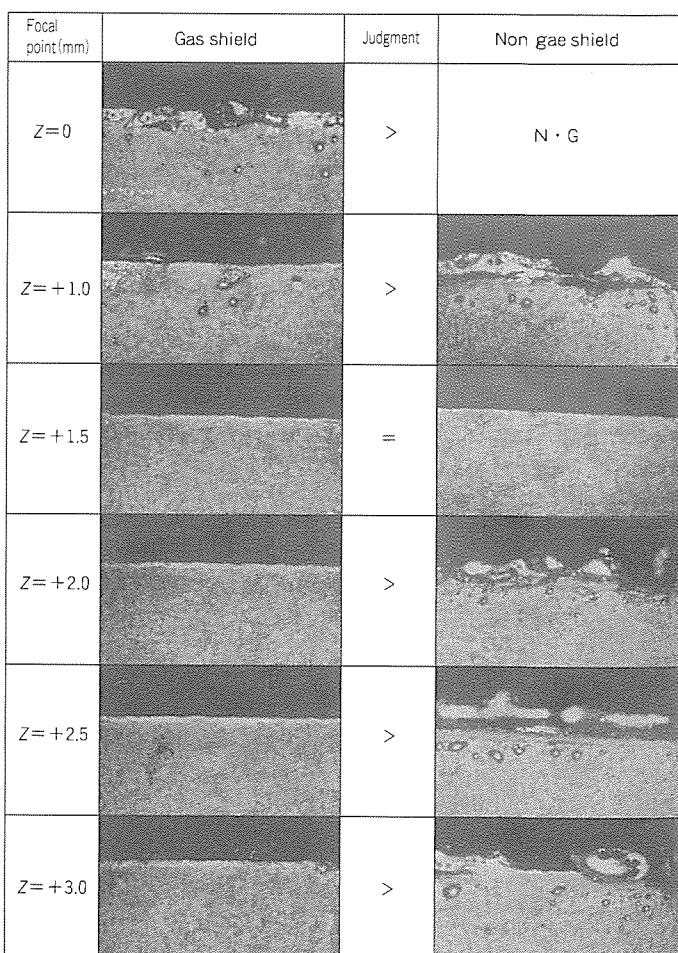


注 Material : SS400, Thickness : 12mm

図 5. アシストガスの酸素濃度と切断品質との関係

グラインがレーザビームの走査方向とは逆側に遅れる。酸素濃度が 99.75 % と 99.68 % では図中の切断部裏面へのドロス付着は起きていないが、99.61 % 以下の濃度ではドロス付着が起きている。さらに、酸素濃度の低下に従い、切断面の中央部から下部にかけての切断面粗れが著しくなる。以上のようにアシストガスの酸素濃度のわずかな低下によって、切断性能が大きく低下することが明らかになった。

次に、加工ヘッドにサイドノズルを設け、加工部全体を酸素ガスでシールドさせ、空気の巻込みを防止させた効果を図 6 に示す。サイドガスの噴射軸は、レーザビームの照射軸と 45° の角度で被加工物表面とレーザビームの接点が一致するように設定した。サイドノズルの径は 30 mm であり、その内部にはガスの整流のために線径 0.1 mm で #100 のメッシュを配置した。サイドノズルからの酸素ガス流量は 30 l/min 一定とした。加工は板厚 12 mm の SS400 をサイドガス有りと無しの状態で焦点位置を変化させたときの被加工物裏面でのドロス付着の状況を示す。図中右側のサイドガスシールドの無い状態では、焦点位置が Z = 1.5 mm においてのみ被加工物裏面へのドロス付着が起きていない。一方、サイドノズルで加工部を酸素シールドした場合は、Z = 0 ~ 3.0 mm



注 Material : SS400, Thickness : 12mm

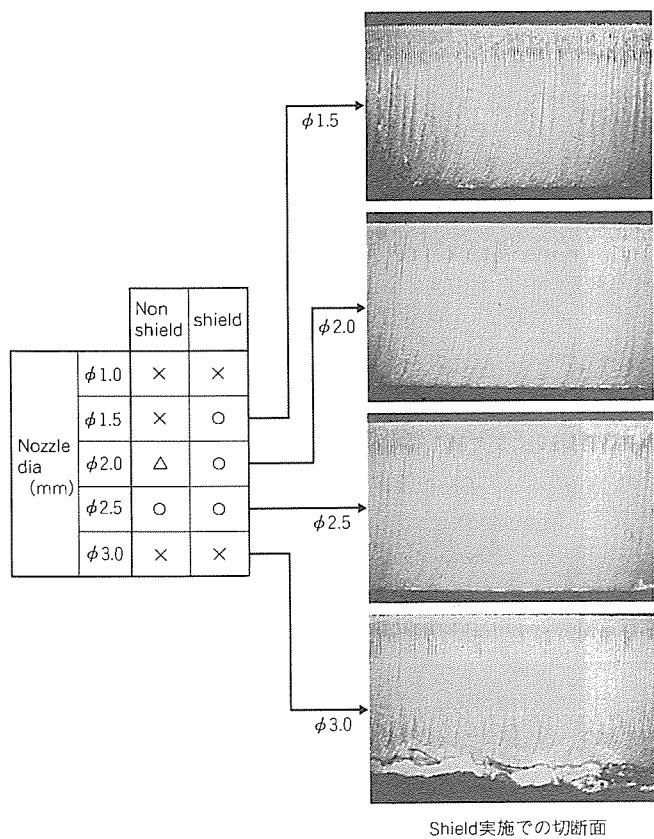
図 6. ガスシールドの切断品質に与える影響

の範囲にわたってドロス付着が起きていない。

図7は板厚16mmのSS400を直径1.0~3.0mmのノズルを用いて加工した結果である。アシストガス圧はすべて80kPaで一定であり、その場合の流量は径1.0mmで15ℓ/min、径1.5mmで27ℓ/min、径2.0mmで58ℓ/min、径2.5mmで84ℓ/min、径3.0mmで116ℓ/minである。図中で良好に切断が行われたノズルは○、一部ドロス付着の発生するノズルは△、多量のドロスの発生するノズルは×で示す。また、図中に示す切断面はサイドガス有りの状態で径1.5、径2.0、径2.5、径3.0mmのノズルを用いて切断した結果を示す。サイドガス無し(Non Shield)では、径2.5mmのノズル径で完全なドロスフリーになるが、径2.0mmでは若干のドロス付着が起きた。サイドガスを用いた場合(Shield)は、径1.5、径2.0、径2.5mmのノズル径でドロスフリーとなる。図7及び図8により、ノズル周囲をサイドガスによってシールドし、周囲の空気の巻込みを防止することによって、切断品質を向上することができる。

### 3.2 二重ノズルによる切断

前節のサイドガス方式は実切断への適用には形狀的に限界があり、同軸構造でシールド効果が期待できる当社独自の二重ノズルを試作し、切断を実施した。図8にはこの二重ノズルを用いて板厚12mmのSS400を切断したときの切断面と切断部裏面の写真を示す。焦点位置はZ=0~+3.0mmの範囲で、切断面にピッチの小さなドラグラインが並び、良好



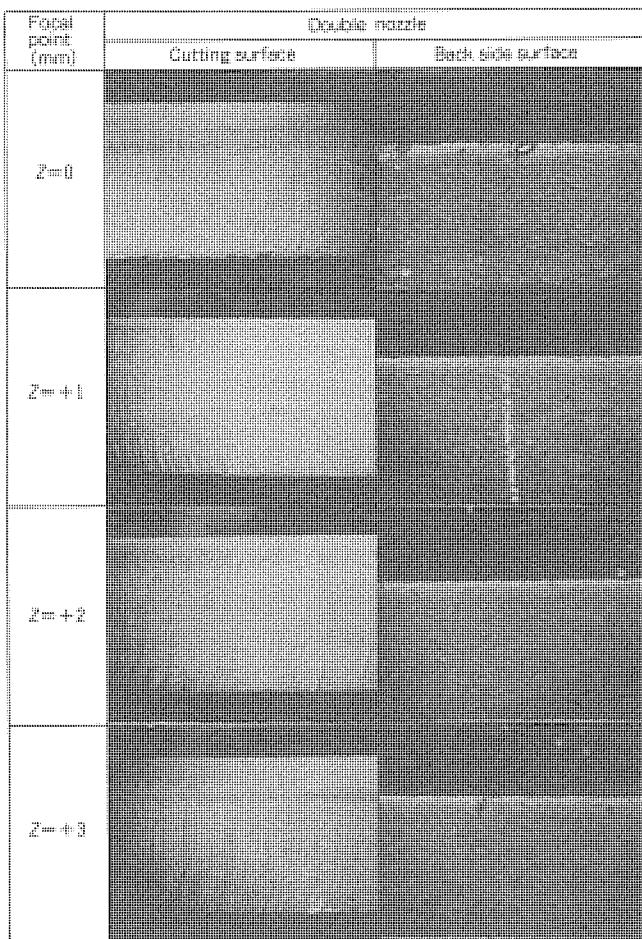
注 Material : SS400, Thickness : 16mm

図7. ノズル径と切断品質の関係

な切断品質が得られる。切断部裏面にはZ=0mmで若干のドロス付着が起きるが、Z=+1.0~+3.0mmの範囲ではドロスの付着は起きていない。以上の結果は前節のサイドノズルから酸素ガスを噴出させた結果とほぼ同傾向である。

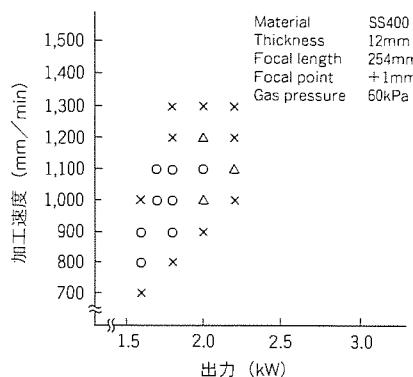
厚板を安定して切断するためには、良好な切断品質が得られる加工条件裕度の広いことが必要である。図9には板厚12mmのSS400をドロスの付着がほとんど無く、かつ切断面粗さが良好に切断できるレーザ出力と切断速度との関係を示す。ただし、実験で使用した発振器のビームモードの次数は2である。(a)は一穴ノズル、(b)は二重ノズルによる切断結果である。二重ノズルによる条件裕度は、従来の一穴ノズルによる裕度に対して大幅に拡大している。また、一穴ノズルによる切断では、良好な切断品質の得られる最大切断速度は1,100mm/minであり、更に速度を増加させても、良好な品質を得るためにの出力と切断速度の関係は存在しなかった。二重ノズルによる切断結果では、最大1,500mm/minの速度でも良好な品質が得られた。

図10は一穴ノズルと二重ノズルでの出力3,000W、速度1,500mm/minで加工したときの切断面の拡大写真である。上部切断面はノズルの違いによる差はほとんどみられず、ドラグラインのピッチは細かく、面粗さの良好な品質が得られ

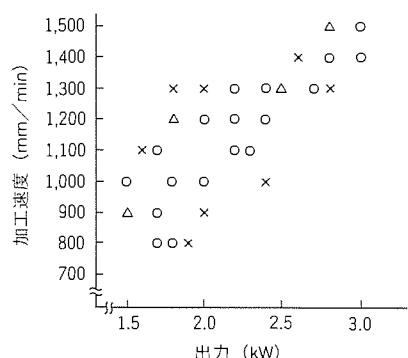


注 Material : SS400, Thickness : 12mm

図8. 二重ノズルによる切断サンプル



(a) 一穴ノズルによる切断



(b) 二重ノズルによる切断

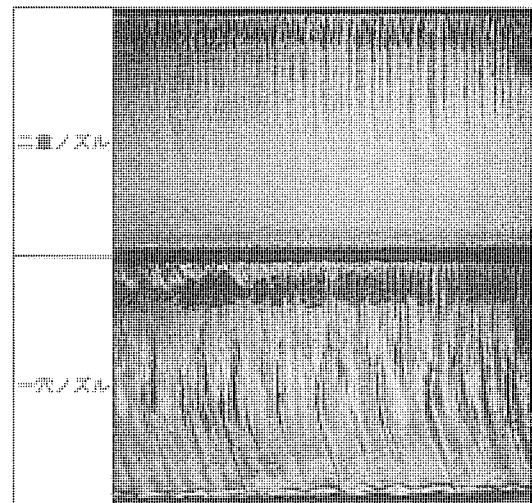
図9. 加工条件裕度の比較

た。切断面の中央部から下部にかけての面粗さは、一穴ノズルによる加工では大幅に悪化しているが、二重ノズルによる加工では良好な品質が得られた。以上のように、軟鋼厚板の切断速度を増加させる場合には、シールド方法を改善して加工部の酸素純度を向上させることで、加工能力の大幅な向上が期待できる。

#### 4. むすび

以上、炭酸ガスレーザによる軟鋼厚板の切断に関する加工技術について概説した。ビームエネルギーを大きな板厚の加工に適用することは、従来のレーザ切断のメカニズムとは異なる面がある。本稿ではこのうち光学的要因とアシストガス要因に絞って最新の知見を示した。

炭酸ガスレーザによる厚板の切断は、大きな可能性をもつものであるが、今後の進展のためには、さらに発振器の定格出力増加と長期間にわたるビーム品質の安定化が要求される



注 Material: SS400, Thickness: 12mm, Power: 3,000W (CW), Cutting speed: 1,500mm/min

図10. 最大切断速度での切断面

であろう。また、従来加工法との比較において、レーザ加工ではランニングコストの高くなる問題に対して、高付加価値加工の追求、従来加工法とレーザとの併用加工法の確立など加工技術面での課題も多い。いずれにしても、炭酸ガスレーザによる厚板の切断はその進展がハードウェア技術、ソフトウェア技術の発展を促すものであり、レーザ加工の発展に大きく寄与するものである。

さらに、本稿では述べていないが、厚板切断品質には材料の要因も重要である。材料表面状態も面粗さ、酸化膜の厚さ、酸化膜密着度などにばらつきがあり、これらが切断品質に影響することが確認されている。現在、厚板の安定加工に対する材料の要因は、材料メーカー側の検討も始まり、改善の方向に進みつつある。

最後に本稿をまとめに当たり、有益な御助言をいただいた関係各位に深く謝意を表する。

#### 参考文献

- (1) 金岡 優: レーザ切断精度におよぼすビーム集光特性の影響, 日本機械学会, C編, 56, No. 531, 3116 (1990-11)
- (2) 金岡 優, 木谷 基: 特許公開 平1-55076, レーザ加工装置 (1989)

# 電子ビーム加工機の高信頼化技術

山本吉廣\* 荒川及藏\*  
三浦 明\* 大田正雄\*  
金子秀巳\*

## 1. まえがき

電子ビーム加工の大きな特長は、 $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ に達する高エネルギー密度源であること、電子ビーム出力の制御、高速偏向などの制御性が優れていることであり、次の特長を挙げることができる。

- (1) 低入熱、低ひずみの深溶け込み溶接ができる。
- (2) 出力コントロールにより、0.05 mm の薄板から 300 mm の超厚板までの溶接ができる。
- (3) ビーム制御性が自在で種々の加工テクニックが使える。
- (4) 任意の加工距離が選べる。
- (5) ビーム照射による金属面の反射がなく、あらゆる金属の加工が可能である。
- (6) 真空中での清浄な加工ができる。

電子ビーム加工は、溶接のみならず、表面改質、穴あけなど、VA 設計の有力な手段として、あらゆる産業で利用されている。

当社では、ジョブショップや航空宇宙産業などで使われ、特殊な溶接機として扱っていた電子ビーム加工機を、生産現場に適合できる電子ビーム加工機として、長年にわたって研究・開発をしてきた。汎用機では主にビームの高性能化・大出力化・加工条件の CNC 化により、多種類のワークを高能率で加工できる製品を完成してきた。一方、量産機ではこれらの技術に加え、電子ビーム特有の高速偏向の適用、加速電圧の低電圧化、陰極の長寿命化、装置のコンパクト化、自動ライン化などの製品を完成してきた。今般、量産ワークを長期間安定に生産できる適合技術を確立したので紹介する。

## 2. 電子ビーム加工機シリーズと “40kV”新型電子ビーム加工機の概要

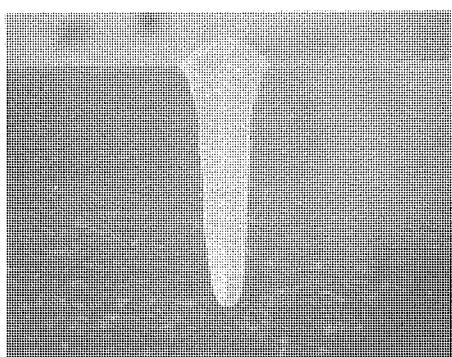
### 2.1 電子ビーム加工機シリーズ

電子ビーム加工機は、通常、真空中にある部品を組み立て溶接するための装置で、生産形態、生産量、ワークサイズ、加工の種類に応じて様々な種類があり、大別すると小物部品を対象とした量産型電子ビーム加工機と特殊材料や大物部品を対象とした汎用型電子ビーム加工機に分類できる。

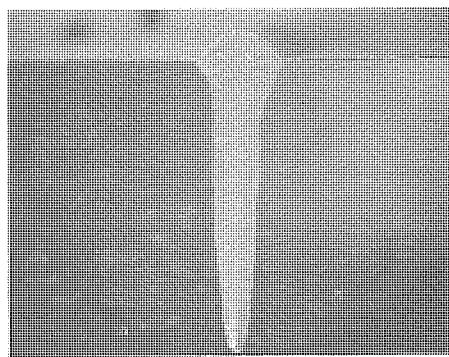
量産型電子ビーム加工機は、部品加工ライン中に設置されるため、小型でコンパクトに構成されている。出力は 6 kW 以下が多く、量産に適合できるよう、タクトタイムの短縮、自動化、操作性の面で配慮されている。

汎用型電子ビーム加工機は、航空機、重工業、電機分野を中心に、多品種小量生産用に利用されており、主にビームの高性能化・大出力化・加工条件の CNC 化により、多種類のワークを高能率で加工できる。これらの出力は量産型に比べると、大出力となっており、15 ~ 30 kW が中心で、6 ~ 100 kW をシリーズ化している。汎用型電子ビーム加工機を更に分類すると、ワークを移動させて溶接する方式と溶接室内で電子銃を移動させて溶接するムービングガン方式の 2 タイプがあり、ワークによって使い分けられている。

電子ビーム加工機の納入実績では、自動車産業での利用が圧倒的に多く、量産型電子ビーム加工機が主流になっており、70 % 強のシェアを占める。最近の傾向としては、自動車以外にも精密・計測、電気・電子などの量産品への利用が増えており、今後の市場の広がりが伺える。



(a) 40kV



(b) 60kV

図 1. 加速電圧 40kV, 60kV のビード断面

## 2.2 “40kV”新型電子ビーム加工機

電子ビーム加工機は、高電圧型と低電圧型に分類でき、高電圧型は、加速電圧100kV以上、低電圧型は60kV以下で、当社は60kVを採用している。

当社独自の棒状陰極は、ビームの大電流化に適し、ビーム発生能力及びビーム性能を長期間、安定維持できる優れた長寿命陰極である。その特長を生かして、加速電圧の低電圧化を更に進め、40kV化を実現した。

以下に40kV化の特長及び結果として得られる良好な性能、かつ大幅な安定性について述べる。

### (1) 40kV化の特長

図1に60kVと40kVのビード断面の比較を示す(ビーム出力5kW、溶接速度5m/min、材質SUS304)。

40kVは60kVに比べてビード幅が太く、電子ビームらしくないビードともいえる。これは加速電圧が低いことからビームの集束性は若干落ちるが、反面、ビームのエネルギー密度にコア、ハローの顕著な差がなくなり、溶け込み形状はワインカップの少ない平行なビードを形成する。

また、この特性はビームの焦点位置(焦点深度)が長くなり、焦点変化による溶け込み形状への影響も少なくなる。自動車部品の電子ビーム溶接では主に板厚5mm前後の部品をかん(嵌)合し、溶接するので、図1に示すような40kVで少々ビードが太くなってしまっても、溶接で発生する熱ひずみは、100kVや60kVの細いビードとほとんど差がなく、むしろ熱ひずみの観点では40kVビードで見られるようなワインカップ状のビード形状の方が変形が大きいといえる。

### (2) 40kV電子ビーム加工機の性能、安定性

(a) 100kV、60kVでは実現が困難であった高速溶接が

容易となった。

- (b) 高速溶接の実現により、低ひずみ化が一段と向上した。
- (c) 電子ビーム加工の安定加工条件の範囲が、大幅に拡大した。
- (d) 電子銃特有のアーキング現象が皆無となり、電子ビーム加工の信頼性が一段と向上した。

図2に高品位溶接とクリーンな環境を実現した“40kV”新型電子ビーム加工機の外観と構成機器を示す。

## 3. 高信頼化技術

加工機の品質は、その使用目的、使用環境によって変化する。汎用機では、多種類のワークを幅広く加工できるフレキシビリティが必要で、そのため加工条件を幅広く設定できる機能と、それらを容易に操作できる機能とが重要となる。一方、量産機では、装置に起因するばらつきと人的要因によるばらつきをいかに小さく抑えるかが重要で、そのため装置の安定化及び操作の容易性と自動化が課題となる。

40kV電子ビーム加工機は溶接品質の長期安定化、装置管理のAI化、低騒音スクロールポンプの採用など、従来にならない要素を盛り込んでいる。

図3に“40kV”新型電子ビーム加工機の高信頼化技術の概要を示す。

### 3.1 加工品質の安定化

#### (1) 陰極の長寿命化

陰極部は高温に加熱された状態で、加工室からのイオンスパッタリング、フィラメントからの電子衝撃等の影響を受けて蒸発・変形し、消耗していく。当社独自の棒状陰極は、直熱型のリボン形陰極と比べて以下の点において優れた寿命特

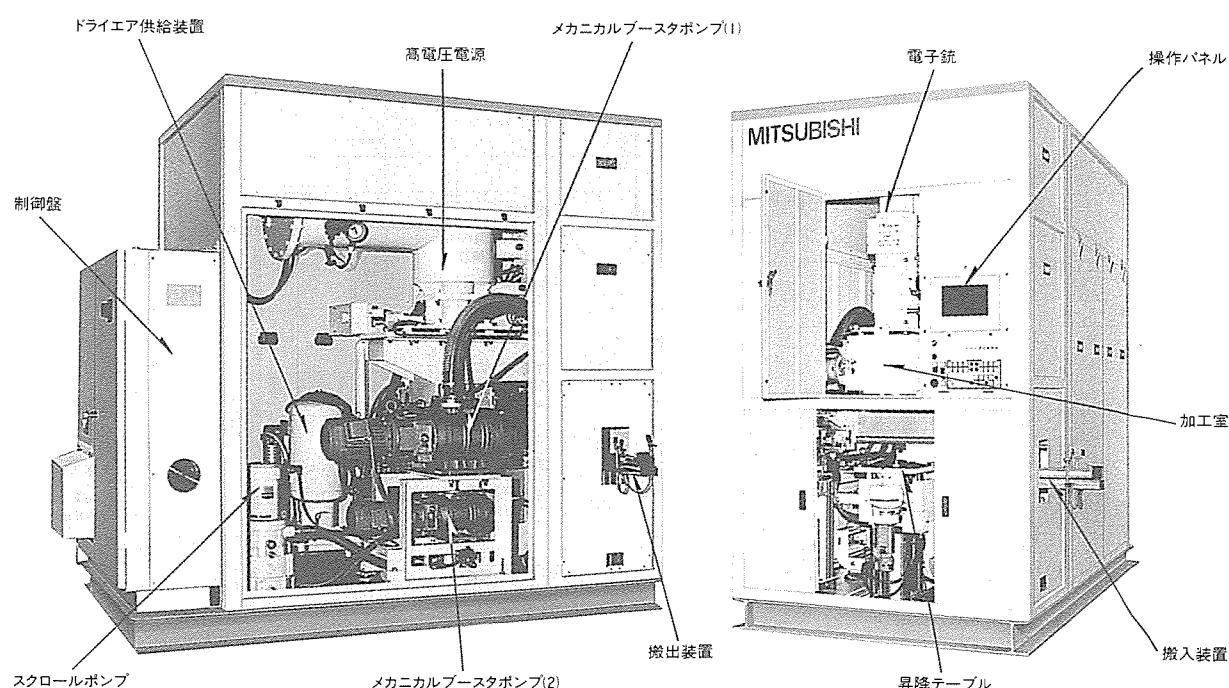


図2.“40kV”新型電子ビーム加工機の外観と構成機器

性をもっている。

- (a) 電子衝撃加熱のためイオンスパッタリングの影響が少なく、フィラメント断線がない。
  - (b) 陰極が軸対称で、しかも堅ろう（牢）な構造であるので、経時的な熱変形による加工特性の変化が少ない。

現状の棒状陰極の寿命は300～400時間である。これを更に長寿命化するために、陰極加熱電力自動補正により、陰極寿命の大幅拡大(従来の3倍:1,000時間)を実現した。

この方式は、陰極の消耗に比例して、バイアス電圧が変化する特性を利用したもので、陰極の経時変化による焦点変動をバイアス電圧検出回路によって検出し、陰極加熱電力を自動補正するものである。図4に陰極の加熱電力制御の原理を示す。

## (2) 溶接位置における溶け込み深さの安定性

溶接位置における溶け込み深さは溶接強度と直接関係するため変動することは望ましくない。

変動の要因としては焦点変動とビームの心ずれの影響が大きい。

加速電圧が40kVでは、図5に示すように溶け込み深さに影響の大きい集束変化特性(溶け込み深さと集束レンズ電

流の特性) がフラットに近い特性となる。したがって、集束変化が生じても溶け込み深さに影響が少なく安定する。またビーム形状が平行ビードに近くなるためビームの心ずれに対する目外れ裕度が向上し、溶接位置における溶け込み深さが安定する。

### 3.2 生產性向上

### (1) 高速溶接の安定化

従来の60kVでは、炭素鋼を5.5m/minの溶接速度のときハンピング発生で溶接できなかつたが、40kVでは、図6に示すように良好な溶接が可能となつた。また、スパイキングも図7に示すように減少している。これは、低電圧(40kV)にすることにより、ビーム形状が平行ビードに近くなり、ビード幅が太くブローホールやハンピングが発生しにくく安定な高速溶接が可能となり、低ひずみで溶接でき、かつルーズな嵌合でも安定した溶け込み深さが得られる。

## (2) 真空排気時間の安定化

電子ビーム加工は、真空雰囲気中で行われるが、加工室内を大気に戻す際(給気)、大気中の湿度の影響によって加工室内部壁面に水分が結露する。そのため、真空排気時間が遅延し、サイクルタイムに影響を及ぼす。また、洗浄後のワー

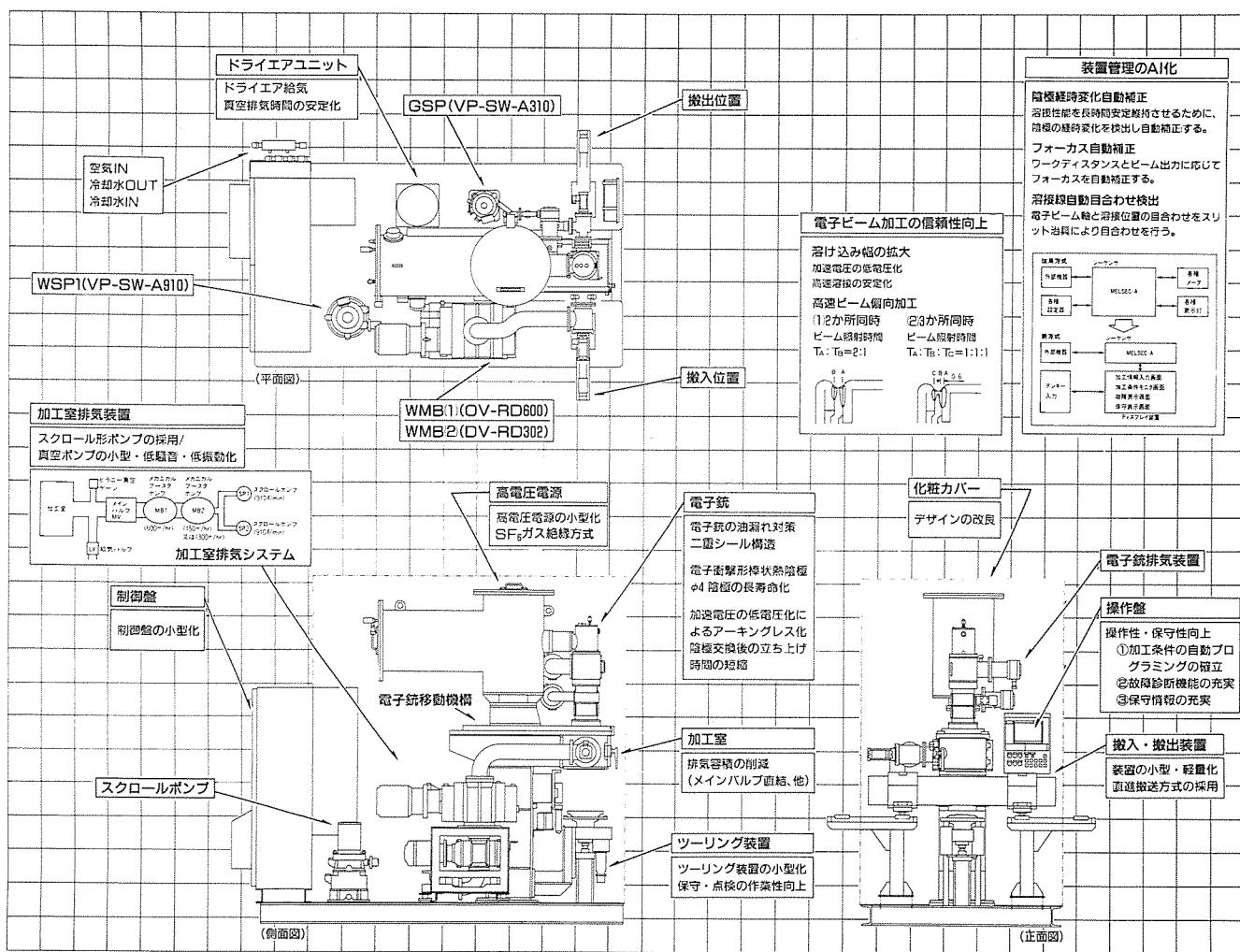


図3.“40kV”新型電子ビーム加工機の高信頼化技術の概要

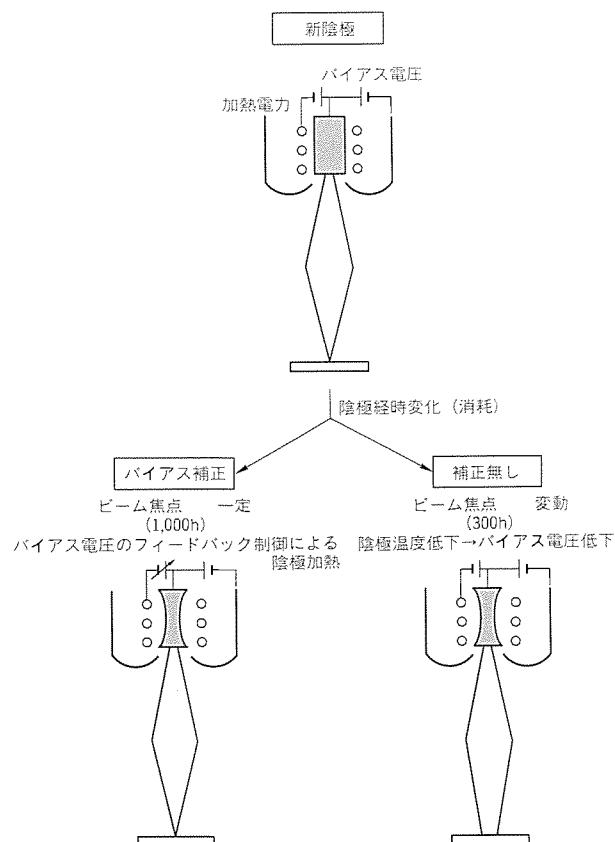


図4. 陰極の加熱電力制御の原理

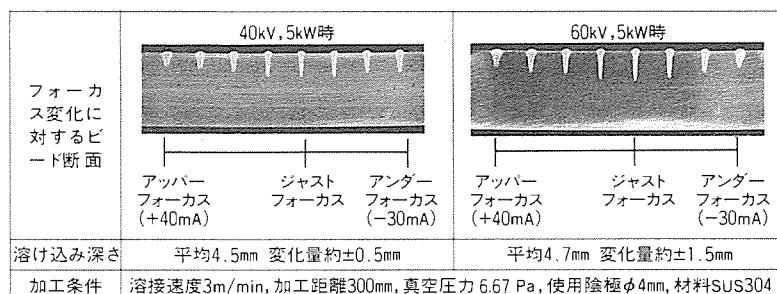


図5. 加速電圧とフォーカス変化に対する溶け込み深さの安定性比較

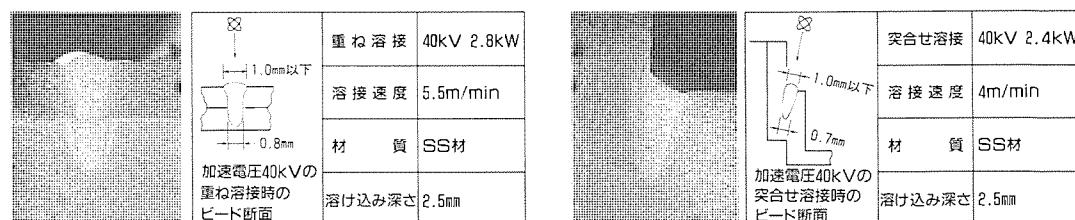


図6. 低ひずみ加工に最適な高速溶接加工例

ビーム出力	溶接速度	フォーカス	使用陰極	
40kV 5kW	1.5m/min	ジャスト	φ4mm	40kV, 5kW時の溶接ビードの縦断面 スパイクの発生が観測できない程少ない。
60kV 5kW	1.5m/min	ジャスト	φ4mm	60kV, 5kW時の溶接ビードの縦断面 約1mm程度のスパイクが発生している。

図7. 加速電圧40kV, 60kVのスパイキングに関する比較

クに付着した水分等によって真空ポンプ油の特性が劣化し、油回転ポンプの排気能力が低下することも問題となる。今回、真空ポンプを従来の油回転ポンプから、構造的に水分に強いスクロールポンプに替え、さらにドライエア供給装置をつけることにより、真空排気時間の安定性が向上した。

### (3) 陰極交換後の立ち上げ時間の短縮

アーキングは加工不良とともに、自動ラインではラインの一時停止の原因ともなる。しかしながら、アーキングは電子銃室内の高真空放電現象でその発生は不可避であり、特に陰極交換後は発生しやすい。この発生確率を下げるため、加速電圧を可能な限り低電圧とする方が望ましい。陰極交換後のエージング時間は加速電圧の3乗に比例すると言われている。例えば、60kVの場合0.5時間、100kVの場合2時間程度必要である。加速電圧40kVではアーキングが皆無となり、陰極交換後のエージングが不要となった。また、装置立ち上げ後のライン稼働中の発生もなく安定した生産が実現できた。図8に陰極交換後の立ち上げ時間の比較を示す。

### 3.3 人に親切な加工機

#### 3.3.1 小型・低騒音・低振動

##### (1) 高電圧電源の小型化

電子ビームの加速電圧を発生する高電圧電源は、絶縁の信頼性、安定度の観点から装置全体に占めるスペースファクタ

ーは大きい。当社独自のSF<sub>6</sub>ガス絶縁方式はパッケージ形電子ビーム加工機として発売以来、400台の実績がある。これはインライン装置に不可欠な小型電子ビーム加工機の実現、メンテナンスフリーが生産現場に適合したためである。さらに、高電圧電源の小型化を図るため当社はSF<sub>6</sub>ガス絶縁方式に加え、部品のモールド化・加速電圧の低電圧化により、当社比で約1/3の小型化

に成功した。

## (2) 加工室排気装置の改良

電子ビーム加工は、真空雰囲気中で行われ、ワークの材質等によって低真空加工 ( $6.67 \text{ Pa}$ ) と高真空加工 ( $6.67 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ ) のいずれかを選択するが、通常、タクトタイム及び価格面で有利である低真空加工が一般的である。排気系の能力が、加工品質、生産能力に直接影響を与えるため、排気能力の大きな真空排気ポンプを加工室の容積、生産能力に合わせて、装置に組み込まれていた。現状の真空排気ポンプシステムは、メカニカルブースタポンプとロータリポンプの組合せで、特にロータリポンプは大型で騒音・振動が大きく、小型・低騒音・低振動化が課題であった。

当社は小型・低騒音・低振動の高性能スクロール形ポンプ<sup>®</sup>の研究・開発に取り組み、製品シリーズを完成した。加工室排気装置に、高性能スクロール形ポンプを採用することにより、従来の電子ビーム加工機と比較して、次のように小型・低騒音・低振動化が実現できた。

- (a) 騒音で  $5 \text{ dB(A)}$  の低減、振動で約  $1/3$  の低減となる。
- (b) 大きな省エネ効果が得られる(約  $1/3$ )。
- (c) 大きな省スペース効果が得られる(約  $1/2$ )。
- (d) 大幅に質量が軽減した(約  $1/4$ )。

図9にスクロール形ポンプの原理を示す。

### 3.3.2 保守・点検の作業性の向上

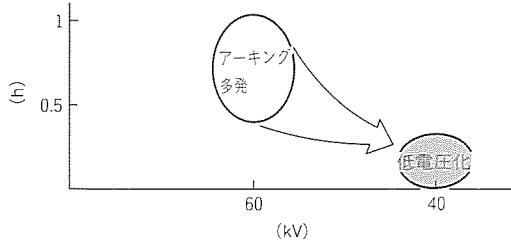


図8. 陰極交換後の立ち上げ時間低減

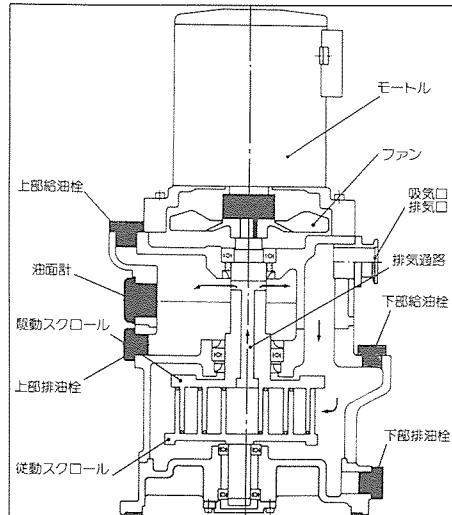


図9. スクロールポンプの構造

従来、例えば、洗浄-圧入-電子ビーム加工-検査装置からなる電子ビーム加工一貫ラインでは、ローダ装置内蔵の2ステーション回転インデックス型電子ビーム加工機が主流であった。この方式では、搬送装置が大きくなり装置前面からのメンテナンス作業が困難であった。このような問題を改善するため、ローダー一体形直線搬送式を採用し、搬送装置の小型化を実現した。

さらに、各機器の配置を考慮してすべて前面で操作・点検

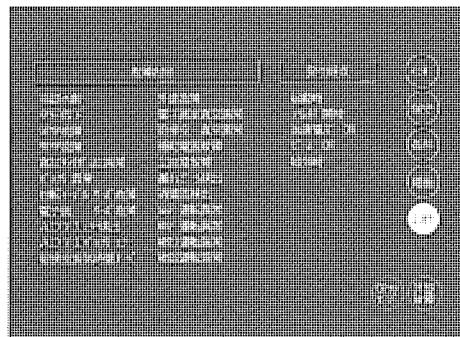


図10. 故障診断画面

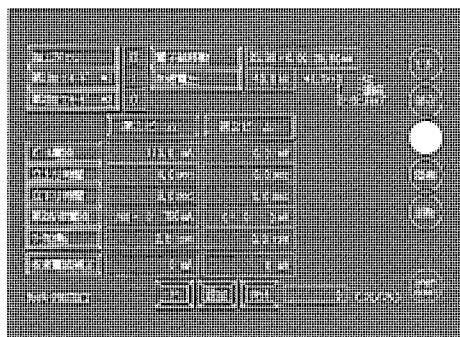
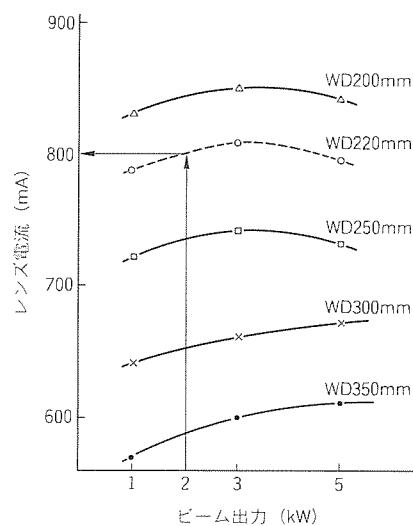


図11. 条件設定画面



実線は各ワークディスタンス (WD) におけるビーム出力、レンズ電流、データベースで補間演算により、任意のWDの特性データを求める。  
図の破線はWD220mmの演算結果を示す。これより、出力 2 kW時のレンズ電流は800mAに自動設定される。

図12. フォーカス自動設定の原理

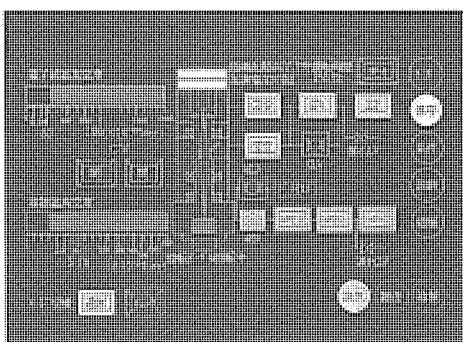


図13. 保守画面

できる構造とし、保守点検の作業性が大幅に向上した。

### 3.3.3 装置管理のAI化

#### (1) 故障診断機能の充実

機械の故障が起きた場合、迅速に対応できるように診断機能の充実を図り、図10のようにディスプレイによるメッセージにより、故障情報を作業者に明示するようにしている。さらに、メッセージとして陰極寿命、ターボ分子ポンプ給油時期等を表示して、事前に保守作業の準備ができるようにし、保守・点検の作業性を向上させている。

#### (2) 加工条件設定・モニタ機能の充実

加工条件設定は、図11のようにタッチパネルによる対話形式で入力できる。特に、焦点の設定に対しては図12に示すようにワークディスタンスを入力するだけで、装置内に記憶しているデータに基づき演算し、ビーム出力に応じてレンズ電流を自動設定するため容易に設定できる。

また、モニタは図13のように図形で一括表示させているため、装置の状態がすぐに理解できる。

#### (3) 溶接線の目合わせ作業の自動化

従来、溶接線とビームの目合わせを行う場合、ワークに直接ビームを照射し、そのずれ量を目視確認するか、溶接部の断面をカットし、心ずれ量を確認する方法であった。図14に溶接線自動目合わせ装置の原理を示す。この装置はワークの溶接線と同じ場所にスリットのある目合わせ治具をワークセットと同様に加工室にセットする。セット後は自動的に目

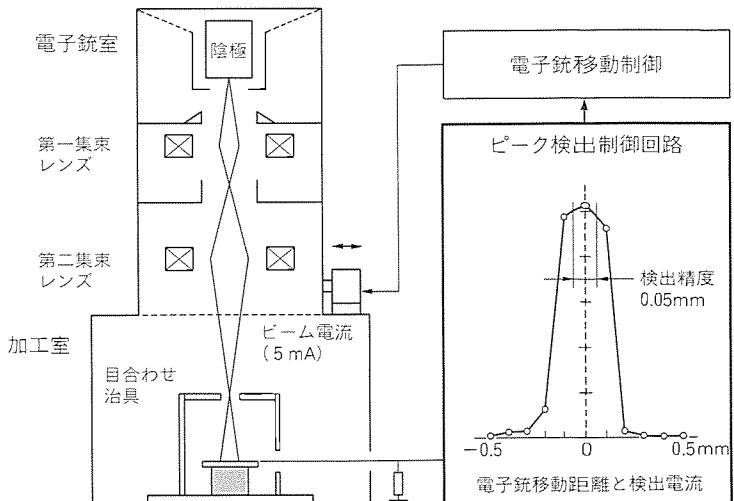


図14. 溶接線自動目合わせ装置の原理

合わせ治具にビームを照射し、スリットを通過するビーム量を計測し、スリット中心とビーム照射位置とのずれ量を自動補正する。このように目合わせ作業の自動化により、人手による複雑な目合わせ作業を簡単な治具で容易に管理できるため人為的ばらつきを排除でき加工品質が一段と向上した。

## 4. む す び

以上、“40kV”新型電子ビーム加工機と高信頼化技術について述べた。自動車の量産ラインのみならず、溶接における溶接品質の安定化と信頼性向上は、熟練者の不足、保全作業の軽減の要請もあり、装置の信頼性向上に依存することになり、高信頼化技術への要求はますます増えていく。

電子ビーム加工機は、今後、より高度な加工と信頼性向上へと発展、成長していくであろう。

## 参 考 文 献

- (1) 原 且則, 桂田重穂, 山本吉廣, 荒川及藏, 村上英信: 電子ビーム加工機, 三菱電機技報, 61, No. 6, 476 ~ 481 (1987)

# 電子ビームの高機能化と加工への応用

石見泰造\* 山地 茂\*\*  
山根義雄\* 野口 洋\*\*  
丸山敏郎\*\*

## 1. まえがき

電子ビーム加工は熱源のパワー密度を  $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$  と極めて高くでき、低ひずみの深溶け込み溶接が可能であるため、重工業分野における 100mm 級の極厚板の一層溶接や、自動車関連分野での A/T (Automatic Transmission) 化に伴う軽量化を目的とした部品の溶接などに広く適用されている<sup>(1)</sup>。また、加工パラメータを電磁界によって高速かつ高精度に制御できるという特長から、特に最近は精密、電子機器などの熱容量の小さい小物部品の精密溶接への適用が拡大している。さらに、これらの溶接分野にとどまらず、焼入れ、チル化といった表面処理や、穴あけなどの熱加工へも用途が広がりつつある。

この報告では、これら最近の進展のキー技術である微細ビーム発生技術とビーム偏向による高速・高精度位置決め技術

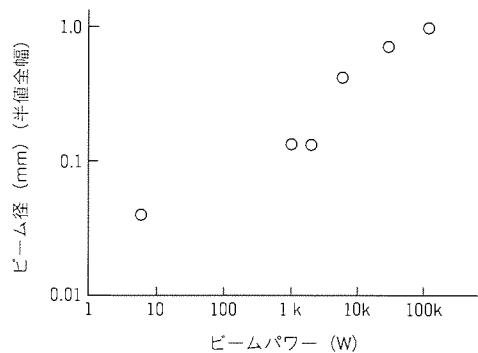


図 1. ビームパワーとビーム径

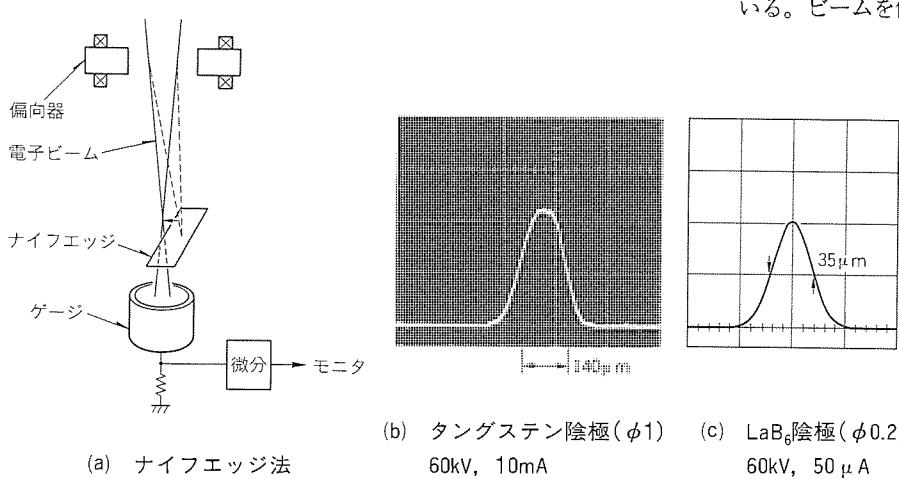


図 2. ビームプロファイルの測定法と測定結果例

及びそれらの加工への適用について述べる。

## 2. ビーム径の微細化とビーム偏向制御技術

### 2.1 ビーム径の微細化

当社の電子ビーム加工機の陰極には、タンクスチンやランタンヘキサボライト ( $\text{LaB}_6$ ) を用いている。タンクスチン陰極は棒状陰極の側面を電子衝撃加熱する傍熱型の長寿命陰極として実績があり、 $\text{LaB}_6$  陰極はタンクスチン陰極に比べて低温で動作するため小型電子銃用として用いられている<sup>(2)</sup>。

図 1 に実用化されている陰極の電子ビームパワーとビーム径の関係を示す。ビーム電流量とビーム径は陰極面の電子放出面積に依存するため、電流が少ないほどビームは細く集束できる。

従来の数 kW クラスの溶接ではビーム径約  $250 \mu\text{m}$  が得られる先端径 2 mm のタンクスチン陰極が使われている。精密溶接では小さなビーム径を得るために径 1 mm タンクスチン陰極を用いており、径 0.2 mm  $\text{LaB}_6$  陰極を用いればビーム径を更に微細化できる。図 2 はビームプロファイルの測定法の一つであるナイフエッジ法と、それを用いて測定した径 1 mm タンクスチン陰極、径 0.2 mm  $\text{LaB}_6$  陰極のビームプロファイルである。それぞれの陰極でビーム径  $140 \mu\text{m}$ 、 $35 \mu\text{m}$  (半値全幅) が得られる。

### 2.2 偏向によるビーム位置決めの高速・高精度化

電子ビームを偏向する方法として静電偏向と電磁偏向がある。静電偏向で大きな偏向領域を高速に偏向することは駆動電源の制約から実用上困難である。それに比較して電磁偏向は容易にそれらが実現できるため電磁偏向方式を採用している。ビームを偏向すると偏向収差などの誤差が発生するた

め、高精度に位置決めするには補正系が重要な役割を果たす。

また、高速偏向時には電気信号及び偏向磁界の応答特性による過渡的な位置誤差が発生するため、その低減が必要である。以下に偏向位置誤差と補正及び高速偏向について詳細に述べる。

#### 2.2.1 位置精度とビーム形状の補正

ビーム偏向は図 3 に示すようにビーム照射位置とビーム形状

に影響を与える。偏向によって発生する偏向ひずみ、像面湾曲、非点収差を総称して偏向収差と呼んでいる。偏向ひずみによる位置誤差は偏向量の3乗に比例し、例えば偏向領域 $\square 40\text{ mm}$ 、偏向距離(偏向器と加工物間の距離)200mmにおいて、約0.5mm発生する。また、高さずれによる位置誤差は、高さ方向に1mm変化することで約0.18mm発生する。このずれ量は、例えば、溶接の場合表面で目合わせを行っても溶け込み1mmの底部で0.14mmの目外れになる。また、薄物加工物のそりによる高さずれはビーム照射位置の目外れになる。精密溶接上、これらの位置誤差は大きな問題となり補正する必要がある。

次に、偏向によるビーム形状への影響について述べる。像面湾曲と非点収差は偏向量の2乗に比例してビーム径を増大させ、上記の偏向領域 $\square 40\text{ mm}$ では約0.2mm発生する。このビーム径の増大は、例えば、偏向による精密溶接の場合、偏向量によってエネルギー密度が異なることにより、ビード幅や溶け込み深さのばらつきが発生する。

これらの誤差量を低減するために用いた偏向系を図4に示す。偏向ひずみによる位置誤差は偏向信号の演算で補正され、像面湾曲・非点収差はダイナミックフォーカスレンズ、ステイグメータによって補正される。

残りの位置誤差のうち、前述のような加工底部で発生する位置誤差は、加工物の表面に対して、ビームが入射角をもつことに起因するものである。図5に示すように加工物に対してビームが垂直に入射できるビームの二段偏向方式では位置誤差は発生しない。この方式では、偏向領域 $\square 25\text{ mm}$ で位

置精度 $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$ が実現できた。

図6にレーザ変位計を用いた高さずれ補正システムの構成を示す。前述の偏向収差の補正系との併用で、 $\square 52\text{ mm}$ で位置精度 $\pm 15\text{ }\mu\text{m}$ とビーム径 $35 \pm 2\text{ }\mu\text{m}$ が得られた。

## 2.2.2 側向系の高速化

ビームを高速に偏向を行うと前述したように過渡的なビーム照射位置のずれが発生する。それらはパワーアンプの応答特性の限界と偏向器周辺に発生する渦電流に起因するものである<sup>(3)</sup>。従来の電子銃系では0.1mm程度のずれ量が発生するが、これは精密なエネルギー制御が必要な精密加工では許容されない値で、それらの影響を低減するには次の対策が有効である。

- (1) パワーアンプの応答性を改善するため、偏向器のもつインダクタンス成分によって生じる位相遅れを補償する。
- (2) 渦電流の発生を抑えるため、偏向器周辺の構成材を電気抵抗の高い材質にする。

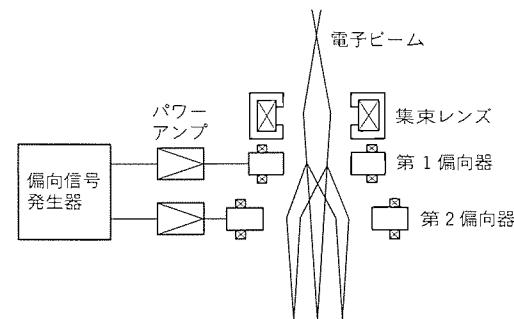


図5. 二段偏向系

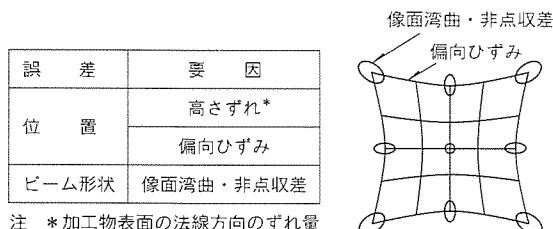


図3. 側向によって発生する誤差

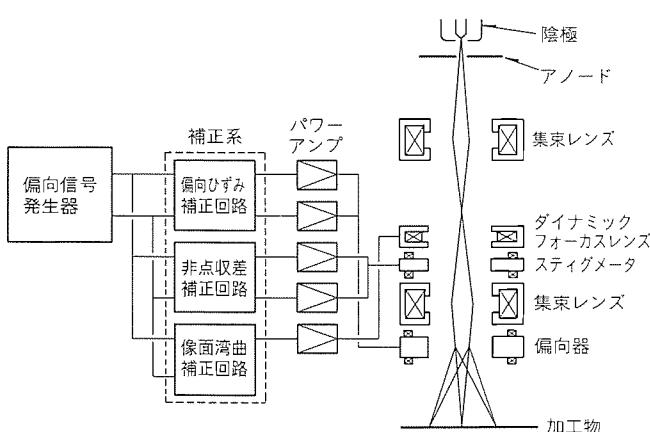


図4. 側向系

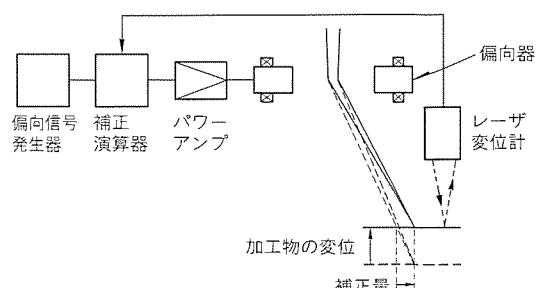


図6. 高さずれ補正システム

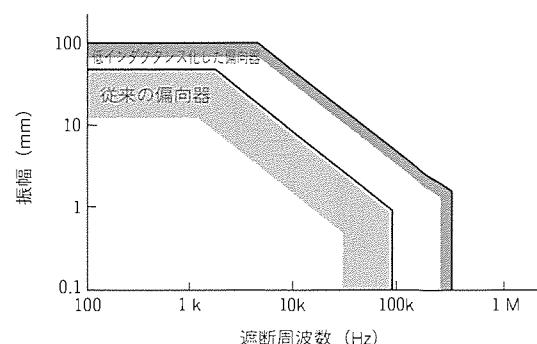


図7. 遮断周波数と偏向振幅の関係

さらに、高速・高精度化に対応するため低インダクタンス化した偏向器を用いた偏向系を試作した。図7は従来の偏向系と低インダクタンス偏向器による偏向系での遮断周波数と偏向振幅の関係を示す。また、表1に従来形と低インダクタンス化した偏向器による偏向系の性能をまとめて示す。

### 3. 高速偏向ビームの加工への適用

#### 3.1 ビーム加工機能の拡大

これまで述べてきたビームの高速偏向技術を用いると、以下のようにビームの加工機能が拡大する。

##### 3.1.1 偏向によるビームのON-OFF制御

通常の溶接速度は0.3～3m/minであるが、偏向によると10,000m/min以上のビーム移動速度を容易に得ることができる。加工物上をこの速度で移動すると、ビームパワーが10kWでも加工物に熱影響を与えないため、加工物に対してビームを等価的にON-OFF制御できる。加工物のステージ移動を伴わない加工であるため加工時間が短縮でき、また加工物上でビームのON-OFFを行わないため、安定したビームパワーを瞬時に供給できる。この制御方法を用いて、図8に示すような小物部品の高スループット加工を実現している。

##### 3.1.2 エネルギー密度分布制御

電子ビームを高周波でビームオシレーションさせると等価的に均一なエネルギー密度分布が得られる。さらに、コンピュータ等で所望のパターン信号を作成してビーム偏向することにより、加工物の形状に応じた任意のエネルギー密度分布

に制御することができる。

#### 3.1.3 ビームの時分割制御

電子ビームは一つのビームを偏向で複数に時分割することができる。この技術は以下のよう適用ができる。

- (1) 円周溶接において180°位相の異なる2か所から同時に溶接を開始して、溶接ひずみを低減する。
- (2) 同心状に複数の溶接箇所が存在する場合、それらの位置をビームの時分割で溶接することにより、1回で溶接し、タクトタイムを短縮できる。
- (3) ビームを溶接進行方向に時分割し、分割比を適性に選択することで、溶接時の予熱、後熱や脱ガス効果を上げることができます。

### 3.2 適用例

#### 3.2.1 プリンタ印字ヘッドの溶接

ビーム偏向を活用した精密溶接例として、ワイヤドットプリンタのばねチャージ式印字ヘッドの組立溶接について述べる。図9に加工物の構造とその外観を示す。溶接箇所は、薄板ばねとアマチュアのT形接合が48か所、スペーサー、薄板ばね、フロントヨークの3部品重ね溶接が24か所、計72か所の組立溶接であり、図9(c)のようすべてスポット状の溶接である。溶接はノーズにあけられた72か所の穴を介して行われる。

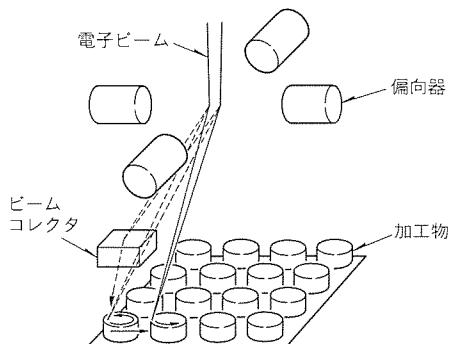
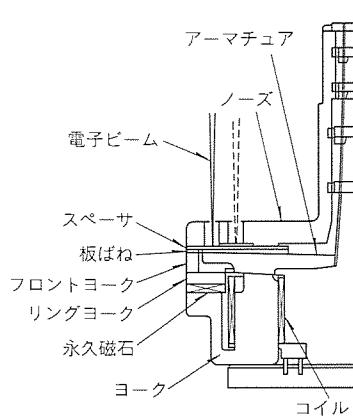


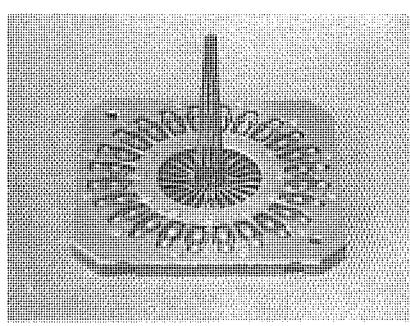
図8. 小物部品の高スループット加工

	小振幅での遮断周波数(kHz)	最大偏向速度(m/min) 偏向距離=200mm	位置精度(μm)
従来形偏向系	90	16,000	±50
低インダクタンス偏向器を用いた偏向系	300	52,000	±15

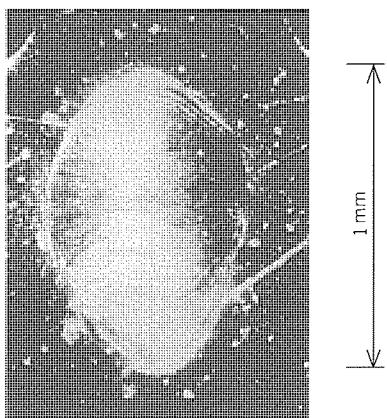
表1. 偏向系の性能



(a) 構造



(b) 外観



(c) 溶接部

図9. プリンタヘッドの溶接

従来法のYAGレーザのスポット溶接で問題となっていた割れやスパッタの発生、深溶け込みが得られないなどの課題に対して、以下の電子ビーム固有の制御性の良さを発揮することで解決できた。

- (1) ビームを微小距離だけ移動させることで通常の移動溶接となり、溶接金属に流れが生じ割れが発生しない。
- (2) ビームを溶接開始点で20ms停留させること、溶接速度を遅く設定することで加工部の急激な温度変化が避けられるためスパッタが発生しない。
- (3) 前述のビーム停留によってキーホールが形成されて、溶接長さ1mmにおいても2mm程度の深溶け込み溶接を実現できた。

位置誤差は±50μm以下で、すべての溶接は2.5秒で完了する。

### 3.2.2 アルミ鋳物ピストンの合金化

アルミ鋳物ピストンのトップリング溝部分の耐摩耗性を向上させるため、ビームのオシレーション及びビームの時分割を適用し、銅を溶加材とする合金層を形成した。溶融部は幅及び深さが10mm程度のく(矩)形状をしており、多量のガスが発生するため脱ガス技術が重要である。図10のように、矩形ビードを得るため電子ビームを溶接進行方向と直角方向にオシレーションさせ、また脱ガス効果を上げるために溶接進行と同一方向に電子ビームを二つに時分割し、主ビームの後

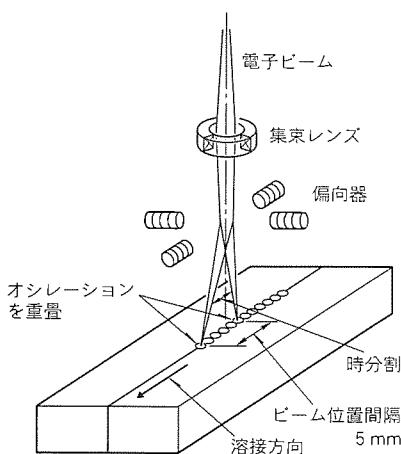


図10. ビーム偏向によるアルミ鋳物の合金化

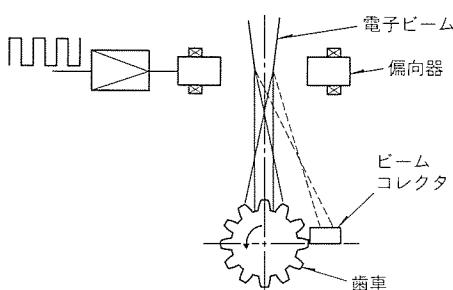


図12. 小型歯車の局部表面焼入れの方法

方にガス抜き用の副ビームを配置した。合金化後、溝加工を施した加工物断面を図11に、加工条件を下に示す。

ビームパワー：4kW

加工速度：0.8m/min

### 3.2.3 小型歯車の表面焼入れ

ビーム偏向の局所表面焼入れ<sup>(4)</sup>の適用例として小型歯車の自己冷却による焼入れについて述べる。従来法の高周波焼入れでは歯先全体が硬化してもろ(脆)くなり、また、レーザ法のような歯の片面ずつ焼入れする方法では、次の片面の焼入れ時に焼き戻しされるという問題点があった。電子ビーム法では図12に示すように、加工物を高速回転させるとともにビームを2本に時分割して照射することにより、すべての歯の両面を同時に加熱できる。図13、表2に加工結果を、加工条件を次に示す。

ビームパワー：2.4kW

ビーム照射時間：1s

加工物の回転速度：300r/min

### 3.2.4 セラミックの穴あけ

パワー密度の極めて高いビームをパルス化して加工物に照射すると加工物の蒸発による穴あけ加工が可能になる。特に、加工物の蒸発、蒸気の消散、加工部周辺の熱の拡散を考慮してパルス幅を最適に選択することにより、熱影響層が少ない穴あけ加工ができる<sup>(5)</sup>。多数穴加工を対象とした場合、二段偏向系の採用によって偏向加工においても垂直穴あけができ、一つの穴あけ加工の休止時間中に偏向により、他の加工位置

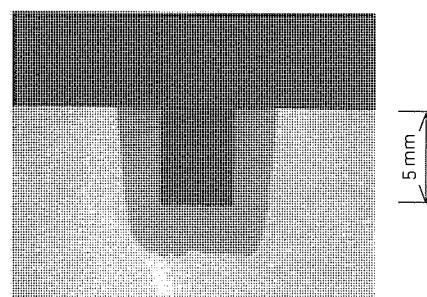
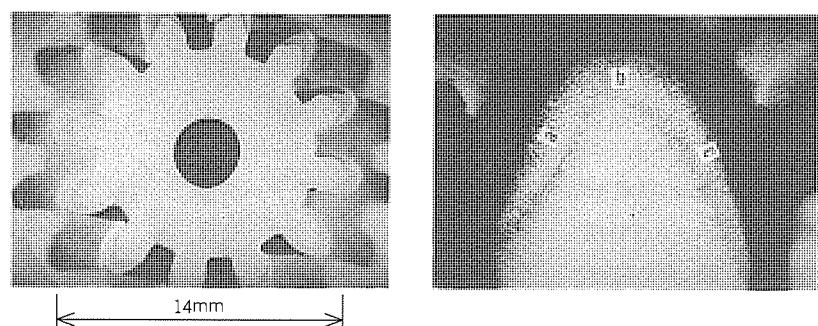


図11. 合金層の断面

表2. 硬度分布(硬度:Hv)

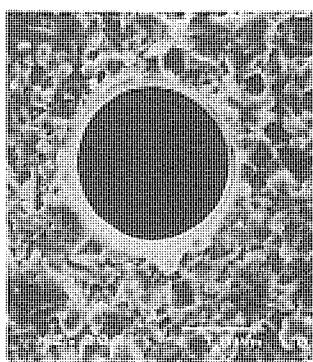
位置 深さ	a	b	c
0.1mm	688	642	716
0.2mm	610	610	677
0.3mm	371	378	458



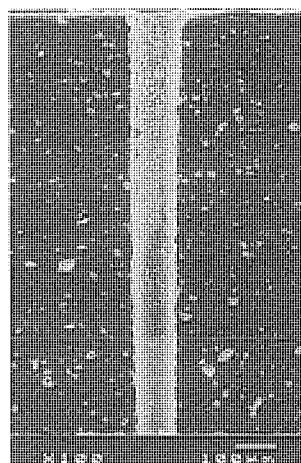
(a) 加工結果

(b) 歯先

図13. 表面焼入れの結果



(a) アルミナ  
(板厚0.1mm, 穴径30 μm)



(b) 窒化けい素  
(板厚1 mm, 穴径100 μm)

図14. セラミックの穴あけ

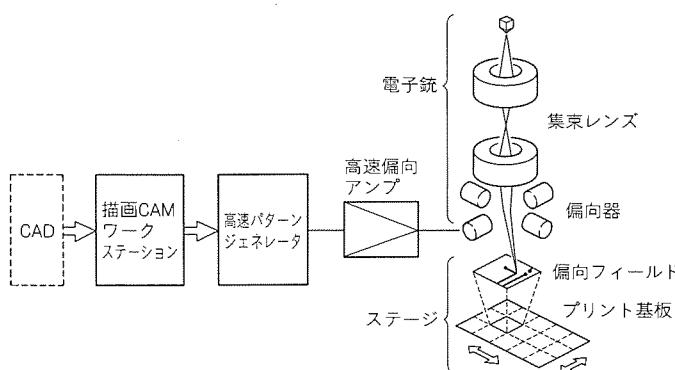


図15. プリント基板直接描画装置の基本構成

へ移動して穴あけを行うことを繰り返すことによって効率的に加工される。

電子ビームによる穴あけでは機械加工で小径穴あけが困難であった難加工材に対しても高スループットで穴あけできる。図14はアルミナ及び窒化けい素への穴あけの例であり、アルミナで微小穴径30 μmが得られ、窒化けい素で穴径100 μmアスペクト比10が得られた。

### 3.2.5 プリント基板配線パターンのレジスト露光

プリント基板の配線パターン形成は紫外線露光によるフォトプロセスによっていた。電子ビームによるレジストの露光を行うことにより、マスクフィルムの作成工程を削減し、工期・生産コスト面での生産性が向上する<sup>(6)</sup>。

図15に基本構成を示すようにCADで設計したデータを基に偏向データを作成し、ビームを高速偏向しレジストを露光する。図16に描画サンプル例を示す。最小線幅100 μm,

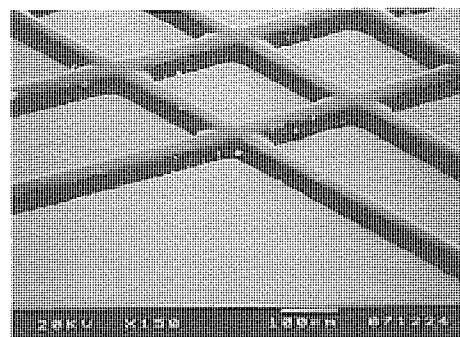


図16. レジストパターン

線幅精度±20 μm、位置精度±30 μmを実現しており、超X級基板(ピン間3本)まで対応できる。このときの描画条件はビーム径35 μm(半値全幅)であり、描画速度120 m/sで、□50 mmの偏向領域を1秒以下で描画できる。

## 4. むすび

以上、電子ビームの高機能化と加工における適用例について述べた。ビームの微細化や偏向による高速・高精度位置決め技術は精密加工に威力を発揮することが明らかとなった。小物部品の高速溶接、表面改質、穴あけ、レジスト露光などの加工は、従来の電子ビーム溶接に比べてビームの制御性の良さを十分に活用したものであり、この分野での適用拡大が予想されるとともに、生産方法の革新が期待できる。

## 参考文献

- (1) 石見泰造：電子ビーム加工の現状、ジョイティック，5, No. 2, 71～76 (1989)
- (2) 安永政司、佐々木茂雄、村上英信：電子ビーム加工機における陰極の長寿命化、溶接学会誌, 61, No. 8, 688～692 (1992)
- (3) 石見泰造、村上英信、安永政司：電子ビーム加工における高速ビーム偏向の研究、溶接学会論文集, 4, No. 1, 84～90 (1986)
- (4) 丸山敏郎、大田正雄：電子ビームによる表面改質、溶接技術, 38, No. 8, 75～81 (1990)
- (5) 桜井光一、山根義雄、村上英信、佐々木茂雄：パルス電子ビームによる高速穴あけ加工、高エネルギービーム加工研究会資料 HEB-11-89 (1989)
- (6) Hoshinouchi, S., Iwami, T., Sakamoto, M., Murakami, H., Sasaki, S., Simizu, R. : Electron Beam Lithography for Large Area Patterning 1, Scanning Microscopy, 4, No. 3, 555～561 (1991)

# 産業用ロボット“MELFA”の最新技術と応用

森 俊二\*  
寺内常雄\*  
近藤 誠\*\*

## 1. まえがき

90年代になって、バブル経済の崩壊による景気鈍化の傾向にあるが、製造業にとっては、ゆとりある労働環境の創出と生産効率向上という相反する課題があり、省力化・合理化がより質的な面で重要となっている。

このような背景にあって、ロボットはここ数年、人手不足の解消手段として、多方面、多分野で積極的な導入が行われてきた。ただ、その従来の導入形態をみると、周辺装置を配置したスタンドアロン的セルシステムの中で使われることがほとんどであった。しかし、最近のニーズとして、生産形態の質的改善、特に多品種少量生産への対応力強化が求められてきた。例えば、品種段取り替え時間の短縮、システムの簡易化など総合的な生産管理体制を実現するために最適なロボットの要求である。

また、物流分野では生産そのものに比べて付加価値が低く、自動化投資がペイしないとされていたが、近年の製品多様化、労働力不足により、物流コストが増大し、生産以上に自動化が叫ばれるようになった。

本稿は、こうした市場ニーズにこたえ開発した産業用ロボット“MELFA”的最新技術とその応用について述べる。

## 2. “Nシリーズ”

図2. RV-N6Hの外観



表1. “Nシリーズ”ロボット本体の概略仕様

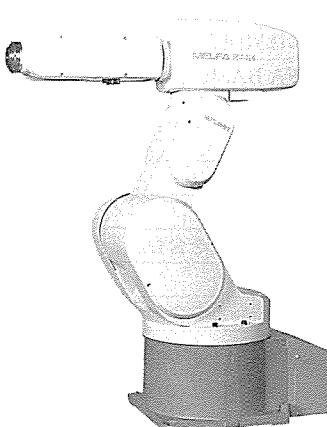


図1. RV-N4の外観

形 式	単 位	RV-N4	RV-N10	RV-N6H
構 造		垂直多関節形	垂直多関節形	垂直多関節形
動作自由度		6	6	4
駆動方式		ACサーボモータによる電気サーボ方式		
アーム長	肩シフト	mm	160	200
	上腕		315	500
	前腕		400	630
動作範囲 (最大速度)	腰旋回 J1	°(°/s)	±170 (180)	±140 (180)
	上腕旋回 J2		240 (113)	240 (113)
	前腕旋回 J3		150 (150)	+15~-30 (150) : 上下
	手首振り J4		±160 (270)	- (-)
	手首曲げ J5		±130 (300)	- (-)
	手首ひねり J6		±180 (432)	±180 (432)
	最大合成速度	mm/s	4,500	5,800
定格負荷	N{kgf}	39.2 { 4 }	98.0 { 10 }	58.8 { 6 } : 最大98.0 { 10 }
位置繰り返し精度	mm	±0.05	±0.1	±0.03
周囲温度	°C	0~40	0~40	0~40
本体質量	kg	98	180	92

長さをもつ。現在までに、RV-N 4 の軸数を 4 軸に削減した“RV-N 6 H”とアーム長が約 1.5 倍大きい“RV-N 10”をシリーズ化している。図 1 に RV-N 4、図 2 に RV-N 6 H の外観を、表 1 に N シリーズロボット本体の概略仕様を示す。

N シリーズロボット本体の特長は、次のとおりである。

- (1) 全軸ともブレーキ付き AC サーボモータとセミアブソリュートエンコーダを採用した。AC 化によってブラシ交換が不要となり、またセミアブソリュートエンコーダ採用により、始業時などの電源立ち上げ時の原点復帰時間が、大幅に短縮できる。
- (2) 全軸とも駆動ユニットに防じん(塵)型オイルシールを使用し、外部からのごみ(塵)やオイルミストなどの侵入を防ぐとともに、潤滑用グリースの漏れを防止した。これにより、機械工場など、3K 環境での作業はもちろん、電子機器の組立てなどのクリーンな環境下にも適用できる。
- (3) ロボット本体内にはハンドやツーリングをエア駆動するためのツーリング用信号配線・エア配管を標準装備している。また、信号伝送には後述するシリアルネットワークシステムを用い、高速リモート I/O(入出力)ユニットをアーム内に内蔵し、省配線を実現した。

### 2.3 コントローラ

N シリーズでは、共通のコントローラ “CR-P30C” を使用している。ロボット本体の構造形態と容量に合わせ、サーボアンプの交換及びソフトウェア (S/W) の変更を行いバリエーションに容易に対応できるようにした。“シーケンサ”(プログラムロジックコントローラ) 機能の内蔵により、当社のシーケンサ機器の使用と、上位ネットワークとの接続が簡単にでき、CIM (Computer Integrated Manufacturing) 化への対応を容易にした。図 3 に CR-P30C の外観、表 2 に概略仕様を示す。CR-P30C の特長は次のとおりである。

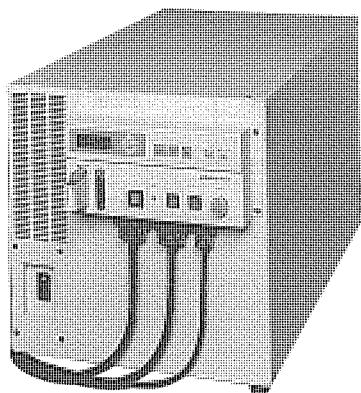


図 3. CR-P30C の外観

(1) シーケンサ機能内蔵と AC サーボ化を実現しながら、容積 0.18 m<sup>3</sup> と従来機種の約 1/2 以下のコンパクトサイズを実現した。

(2) サーボアンプは、各軸ごとにビルディングブロック化し、保守性を向上させた。アンプユニットはロボット本体に搭載するモータに対応する容量を用意し、構造形態の異なるロボットのシリーズ化に容易に対応できる。

(3) 当社の“MELSEC A 2 C”相当のシーケンサ機能を内蔵したので、従来のように、治具など周辺機器制御用のシーケンサを別に用意する必要はない。シーケンサの内蔵化はシーケンス処理専用プロセッサの並列動作(マルチプロセッサ方式)による処理の高速化、走行軸用の位置決めユニットなど、シーケンサオプション機器の活用が図れる。図 4 に外部機器との接続形態、図 5 に“MELSECNET/MINI-S 3”接続機器を示す。

(4) 周辺装置との信号入出力用に、シーケンサと下位機器との間で使用されている高速シリアルネットワーク MELSEC NET/MINI-S 3 のマスター局機能を内蔵している。これにより、周辺装置間及びロボット本体内の配線本数が大幅に減少し、配線信頼性、耐ノイズ性を向上した。

(5) 上位システムとの接続用に MELSECNET インタフェースをオプションで用意した。これにより、当社“MELSEC-LM 7000”で代表される FA コントローラや高機能シーケンサとの接続ができ、CIM 化への対応が容易に図れる。

### 2.4 ソフトウェア

表 2. “CR-P30C” コントローラの概略仕様

項目	摘要
型 式	CR-P30C
制 御 軸 数	最大 6 軸
経路制御方式	PTP 制御、CP 制御
駆 動 方 式	AC サーボモータによるセミクローズドループ方式 トランジスタ PWM 制御
位 置 検 出	パルスエンコーダ方式(セミアブソリュート方式)
補 間 機 能	関節補間、直線補間、三次元円弧補間
プロ グラム記憶容量	62K バイト (1,000 点相当)
プロ グラム本数	最大 30 本
教 示 方 式	ティーチングボックス、パソコンによるティーチングプレイバック方式又は MDI 方式の併用
プロ グラム言語	ロボット言語 “MELFA BASIC II”
シーケンサ機能	プログラム言語 シーケンサ専用言語
	処理速度 1.25 μs / ステップ
	プログラム容量 最大 8 K ステップ
	入出力点数 312 点
	外部リレー 2,048 点 (ロボット用特殊 348 点を含む。)
	タイマ 256 点
	データレジスタ 1,024 点 (ロボット用特殊 348 点を含む。)
	局間伝送距離 最大 30m
周 围 温 度	0 ~ 40°C
電 源	三相 AC 200V / 220V ± 10%, 50 / 60Hz, 4.5kVA
外 形 尺 法	約 W380 × D670 × H410 (mm)
本 体 質 量	52kg

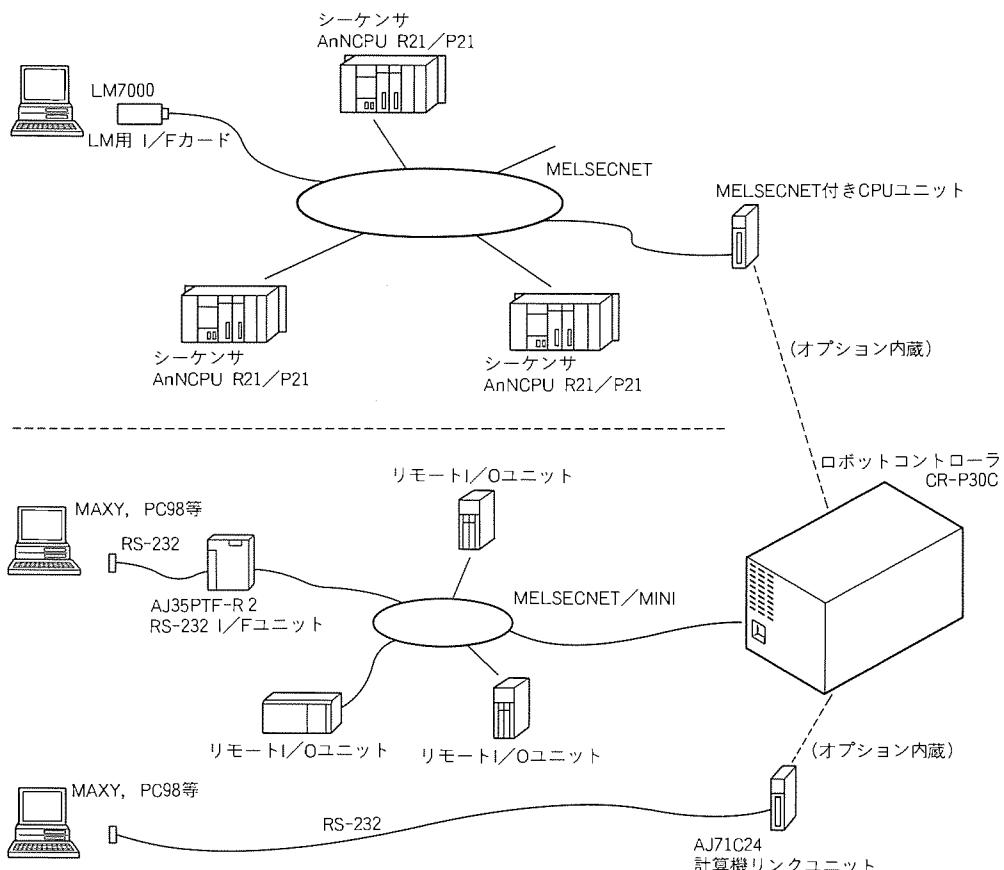


図4. 外部機器との接続形態

- (1) ロボット言語は“MELFA-BASIC II”を使用する。これは、ユーザーがフレンドリな BASIC 言語をロボット用にコンパクトにまとめた従来のものを、ユーザーがコントローラの能力を存分に引き出すことができるよう改強化したものであり、プログラミング作業とシステム立ち上げ時のデバック作業が容易にできるようになった。
- (2) シーケンサのプログラミングは、従来の支援 S/W やプログラミング装置などがそのまま使用でき、しかもロボットとシーケンサとの連携が言語のレベルで簡単に記述可能にした。
- (3) プログラムの作成は、専用のティーチングボックスに加え、市販の汎用パソコンも利用できるようにした。これにより、ユーザーは現場に適した方法が選択できる。また、パソコンでのプログラム作成ができるため、ティーチングボックスはキー数を最少限にとどめ、作業現場でのハンドリング性を重視した軽量薄型が実現でき、使いやすくなった。

### 3. Nシリーズの応用

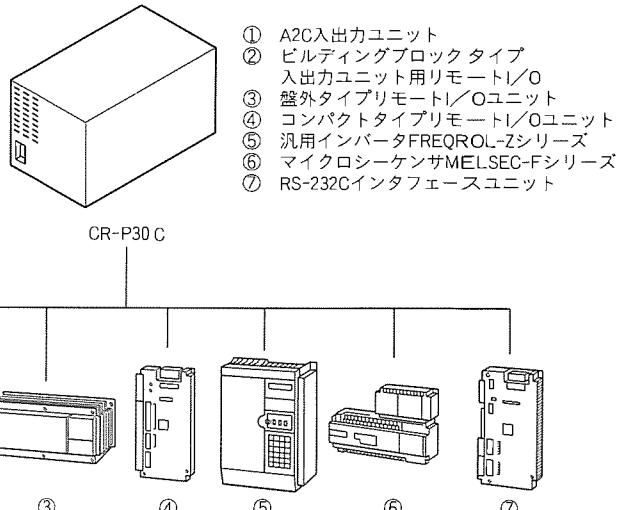


図5. MELSECNET/MINI-S3接続機器

#### 3.1 人の作業の置き換え

製造現場は、人に使いやすく設計された寸法、作業条件を備えた機械装置や道具が絶対的に多い。したがって、ロボット本体は、人に近い形態、すなわちヒューマンライクとすることが有効である。ヒューマンライクなロボットを造ることは、“人の置き換え”を容易にし、ロボットの適用範囲を拡大できる。Nシリーズでは、ヒューマンライクなロボットを実現するため、次の基本思想をもとに製品設計した。

- (1) 人の腕は直動機構がない。したがって、関節構造のみで

本体を構成すると置き換え時の干渉が少ない。

- (2) 基本を6軸とすることにより、位置、姿勢の最小限の自由度が満足でき、ほぼ人に近い巧みさを実現できる。
- (3) アーム長とオフセット量を、人の腕に近い長さと比率にすることにより、据付けが標準化できる。

図6に、“人との置き換え”をイメージした小型旋盤への適用例を示す。

### 3.2 ネットワーク応用による段取り替えシステム

CR-P30Cコントローラの特長を生かした応用例として、段取り替えシステムを紹介する。

このシステムは、多品種少量生産ラインのモデルとしている。システム構成は、上位にFAコントローラMELSEC-LM7000を設置し、光データリンクMELSECNETを介し、端末のCR-P30Cに、段取り替え情報を送る。この情報をもとにロボットは、ハンド交換、プログラム変更を自動的に行う。また、生産量や不良率などの生産指標管理データもコントローラからリアルタイムで送ることができる。図7にシステム構成を示す。

## 4. “RH-Tシリーズ” パレタイズロボット

### 4.1 技術的特長

パレタイズ作業で要求される動作範囲、動作速度、動作パターンなどを分析し、パレタイズ作業に特化したロボットとしてRH-Tシリーズを開発した。

設計の基本コンセプトとして、“タクトタイムの短縮”を

かかげ、機構の最適化、速度配分の最適化、可搬重量増大による複数個搬送化、加減速度の最適化を実施し、2,600個／時間(4個搬送時)を実現した。

### 4.2 ロボット本体

設置面積最小、動作範囲最大を考慮した機構を採用するとともに、食品、薬品工場などでも違和感なく使えるようデザインにも十分配慮した。また、多様なニーズに合わせて、可搬重量、上下ストローク、軸数が選択できるよう計10種類のバリエーションを用意した。図8に可搬重量60kgタイプの“RH-T 60B”的外観を、表3にRH-Tシリーズロボット本体の概略仕様を示す。

RH-Tシリーズの本体の特長は、次のとおりである。

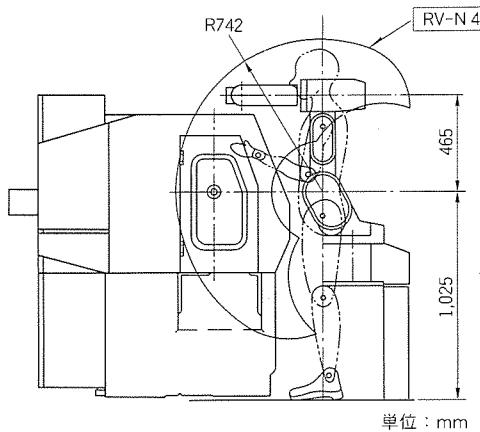


図6. 小型旋盤での“人との置き換え”

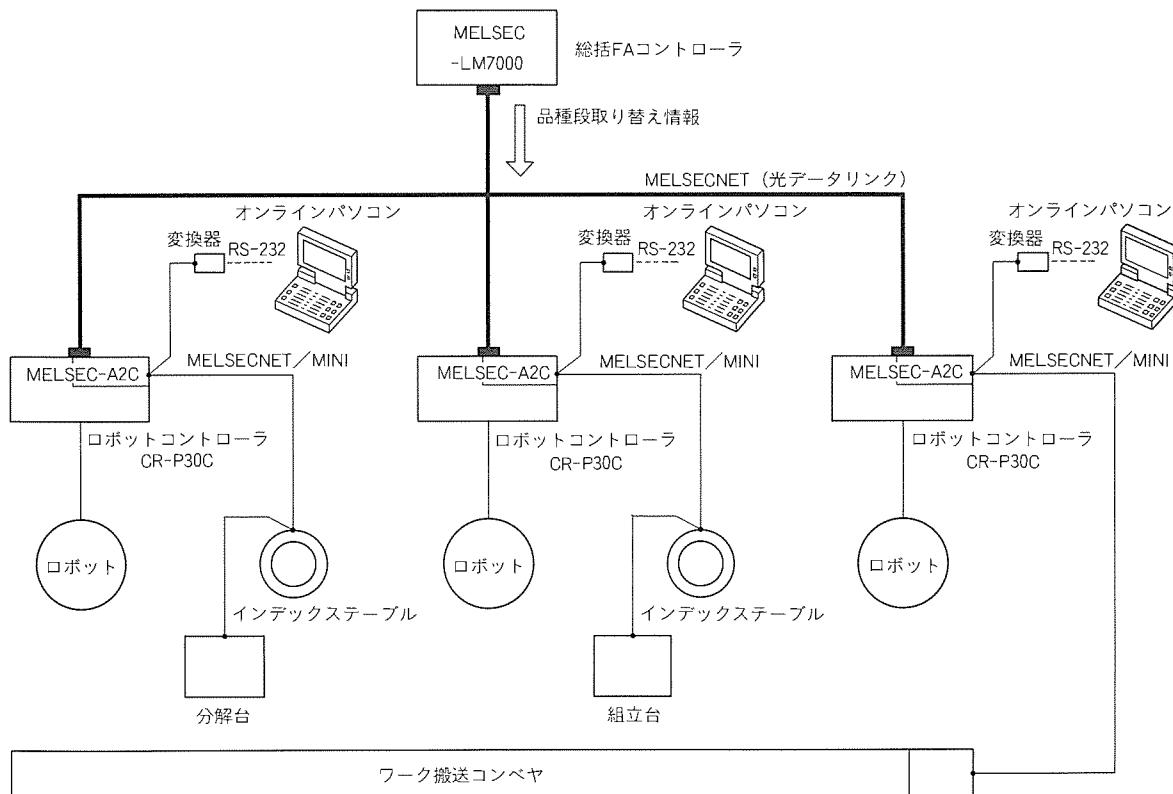


図7. 段取り替えシステム構成

- (1) 旋回機構の小型化により、設置面積を $0.64\text{m}^2$ と小さくするとともに、水平面での動作範囲を $360^\circ$ とれるようにして、パレット3枚が楽に配置できるようにした（“RH-T100B/T150B”）。
- (2) 最大 $150\text{kg}$ まで搬送可能として、複数個搬送、多機能ハンドへの適用を容易にした。
- (3) アーム部のケーブル実装を、アーム下方式として、低い天井高さにも対応可能とした（RH-T60B）。

#### 4.3 コントローラ

コントローラは、従来の“R-230R”をベースに、だれでも簡単に使え、人間には安全な、そして故障の少ないロボットを目指し開発した“R-250R”で、“RH-Tシリーズ”を始めとする中・大型 MELFA インテリジェント シリーズ ロボットに適用する。

R-250R の特長は次のとおりである。

##### (1) 操作性向上

従来のコントローラに比べて操作ボタンの数を $1/2$ に削減。ボタン操作回数でいうと、電源投入から自動運転起動までの回数を約 $1/4$ に減少して、使いやすくした。

##### (2) 安全性向上

デッドマンスイッチの標準装備、自動運転許可信号の追加等により、人間にに対する安全性をより向上させた。

##### (3) 信頼性向上

直列伝送される絶対値エンコーダ信号を位置フィードバック信号とするサーボ制御系を構成して、エンコーダ信号線数を $2/3$ に削減し、信頼性の向上を図った。

##### (4) 加減速度の最適化

ロボットの動作パターンに関係なく、常にモータのパワーを有効に利用できるよう、加減速度を可変にすることにより、タクトタイムの短縮を図った。

##### (5) ダウンタイム短縮

非常停止、停電後のプログラムの継続実行を可能として、システム停止時間の短縮化を実現。ただし、継続可否を判断で

きる機能を付加して、安全性確保にも配慮した。

##### (6) パソコンでプログラミング可能

ノートパソコンの普及、及びパソコンにすれば、操作性向上の有力な武器である汎用 GUI（グラフィカル ユーザー インタフェース）が使えるという理由で、ロボットのプログラミング装置としてパソコンを採用した。

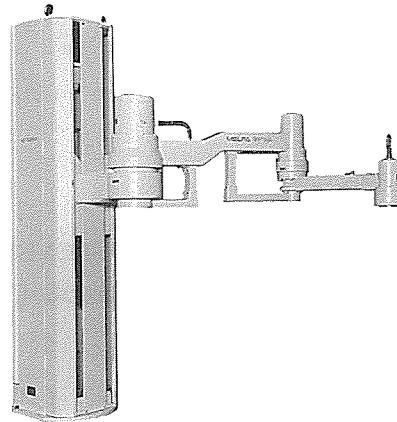


図 8. RH-T60Bの外観

表 3. “RH-Tシリーズ” ロボット本体の概略仕様

形 式	単 位	RH-T60B		RH-T100B		RH-T150B					
構 造		水平多関節形									
		4 *				4					
		AC サーボモータによる電気サーボ方式									
アーム長	上腕	mm	1,200		1,150						
	前腕		750		1,000						
動作範囲 (最大速度)	上下	mm (mm/s)	1,900 (1,200)	1,400 (1,500)	1,900 (1,200)	1,400 (1,500)	1,900 (1,200)	1,400 (1,500)			
	旋回(上腕)	° (°/s)	$\pm 125$ (135)				$\pm 150$ (135)				
	前腕		$\pm 165$ (140)				$\pm 145$ (135)				
	ひねり		$\pm 190$ (180)				$\pm 190$ (180)				
	曲げ		—				—				
最大可搬重量	N(kgf)	588 {60}		980 {100}		1,470 {150}					
位置繰り返し精度	mm	$\pm 0.5$									
周囲温度	°C	0 ~ 45									
本体質量	kg	1,550	1,450	1,900	1,800	1,950	1,850				

注) \* T60B, T100Bには5軸仕様もあり。

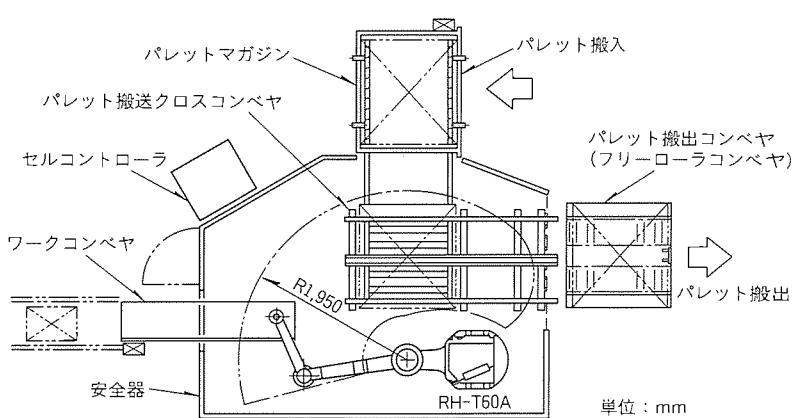


図 9. 標準パレタイズシステムの例

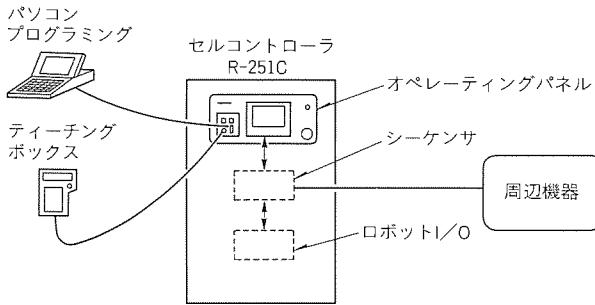


図10. パレタイズロボット セルコントローラ R-251Cの構成

#### (7) ネットワーク対応

当社製シーケンサネットワーク MELSECNETとの接続を可能として、周辺機器との接続線数の削減、CIM 対応を可能とした。

### 5. RH-Tシリーズを応用したパレタイズシステム

当社では、パレタイズ分野でのトータルシステムインテグレータを目指して、パレタイズロボット RH-T シリーズを核に、セルコントローラ、積付け計画S/W、ハンド、コンベヤなどを含めた標準パレタイズシステムを開発し、完結したシステムを提供できるようにした。

#### 5.1 標準パレタイズシステムの構成

パレタイズシステムは図9の例に示すように、基本的には、セルコントローラ、パレタイズロボット及びハンド、パレット供給、排出機構、ワーク供給機構の要素から成る。当社では、ワーク供給ラインの数、パレットの数に応じて、図9の例を含む7種の標準システムを設定した。以下、パレタイズシステムを構成する主な要素について述べる。

#### 5.2 パレタイズロボット セルコントローラ

従来のパレタイズシステムでは、全体のセルを制御するセルコントローラとロボットを制御するロボットコントローラとが別になっており、レイアウト、操作、価格面で問題があるとともに、ロボットコントローラが汎用であるためにパレタイズ用としては使いにくいという指摘があった。

パレタイズロボット セルコントローラ “R-251C” は図10に示すように、ロボットコントローラ R-250R をベースに、セル操作パネル及びセル制御用のシーケンサを追加したもので、従来のロボットコントローラとセルコントローラを一体化したものである。

操作パネルにはタッチパネルを採用し、パレタイズ作業指示、ロボット手動操作、周辺機器手動操作に対応した画面を

表4. 積付け計画S/W

名 称	機 能	混載	ワー ク種類	パターン種類	必要な H/W
ランダムパレタイズ	○	999	—	—	パソコン
インテリジェントパレタイズ	×	999	50	—	パソコン
スマートパレタイズ	×	30	15	R-251C	

用意して、使いやすくした。さらに、パレタイズ作業の指示は、従来のようにロボットを起動させるための一連の操作の後、ロボットのプログラムを番号で指示するといった面倒な操作をやめ、どのワークを何個積むといった単純な作業指示のみとして、ロボットの知識をもたない一般の作業者でも違和感なく操作できるようにした。

#### 5.3 積付け計画S/W

当社のパレタイズシステムでは、基本的にティーチレス方式を採用しており、ワークごとに積付け位置をティーチする必要がない。セルコントローラ又はパソコン上で動作する積付け計画S/Wが自動的に積付け位置を計算し、ロボットに指示する。この積付け計画S/Wには、混載(一つのパレットに外形の異なる複数種のワークを積む。)の有無、ワークの種類数、積付けパターンの種類数により、表4に示す3種類があり、システムの規模に応じて選択可能とした。

### 6. む す び

人との置き換えると周辺制御の容易化をコンセプトとした組立ハンドリングロボット N シリーズと物流の自動化を先取りしたパレタイジングロボット RH-T シリーズの最新技術と応用技術について述べた。

今後とも、使いやすさを含めた技術を開発し、様々な用途に対応したニーズにこたえられるロボットに発展させていきたい。

### 参 考 文 献

- (1) 渡部裕二、守田裕親、小林智之：産業用ロボット《MELSEC LFA》ピックアーム RV-P33、三菱電機技報、65、No.9、878～885 (1991)
- (2) 三田村隆輝、石原 豊：ロボット応用マテハンシステム——パレタイジング・機械加工——、三菱電機技報、64、No.5、381～385 (1990)
- (3) 松岡達雄、川村正美、伊藤雅信：中・大形マテハンロボット——RH、RV シリーズ——、三菱電機技報、64、No.5、408～412 (1990)

# 新CNCシリーズとその最新技術 “MELDAS-500シリーズ”

吉田利夫\* 竹下虎男\*  
海野真人\*  
小野茂昭\*

## 1. まえがき

M500シリーズは、M300シリーズCNCの高速・高精度、カスタム開放機能の充実などの特長を引き継ぎ、最新のマイクロプロセッサの採用等によって基本性能を大幅に向上させるとともに、小型化、低発熱化、マンマシンインターフェースの充実など性能の向上・機能の拡大を実現した最新のCNC装置であり、マシニングセンター用CNC(M500M)及び旋盤用CNC(M500L)の2機種から構成される。M500M/Lは、共通のアーキテクチャ上に小型・普及機M520から最上位機のM540までのそれぞれ3機種、合計6機種によって構成される(表1)。本稿では、M500シリーズCNCの概要及び特長について紹介する。

## 2. M500シリーズ概要

M500シリーズCNCは新世代のCNCとして従来機に対して各種の特長をもつ。ここではその中の主な項目について述べる。

### 2.1 NC基本性能の向上

M500シリーズCNCは、制御部、NC操作ボード、駆動部から構成される。各部は一つないし複数のCPUをもち、NCの機能の大半はソフトウェアによって実現している。各CPUに最新の高性能なものを採用するとともにメモリ・周辺I/Oの高速化を図った。これにより、微小線分処理能力・内蔵PLC実行時間・ユーザーマクロ機能実行時間、グラフィック表示速度など、NCの基本性能が大幅に向上し、また同時に従来演算能力の制限によって実現が困難であったハイゲイン制御、適応型制振制御などが新機能として実現可能となった。

なお、NCの基本性能を示す指標の一つである微小線分処理能力については、特別なCPUを付加することなく1mmの微小線分指令(EIAフォーマット)で、67m/minの送り速度を実現できた(従来は2CPUで、33.5m/min)。

### 2.2 小型化、低発熱化

NC工作機械の小型化の要求が最近ますます高まっている。これには強電盤の小型化が必ず(須)であり、NC制御装置の体積の縮小と低発熱化が重要である。M500シリーズCNCは、多種のカスタムLSIの使用・高密度実装化(面実装

表1. M500シリーズ機種構成

仕様項目	マシニングセンター用			旋盤用		
	520M	530M/535M	540M/545M	520L	530L/535L	540L/545L
NC制御ユニット	4スロット	4スロット	6スロット	4スロット	4スロット	6スロット
設定表示装置	9" CRT又は 9.5" EL	14" CRT又は 10.4" カラーレンズ	9" CRT又は 9.5" EL	14" CRT又は 10.4" カラーレンズ		
駆動アンプ・サーボモータ	オールデジタルACサーボ 1軸型MDS-V-V 1シリーズ 50W~9kW / 2軸型MDS-A-V 2シリーズ 50W~3.5kW					
検出器	10万/100万(パルス/rev)					
絶対位置検出	可					
主軸アンプ、主軸モータ	オールデジタルAC主軸 MDS-Aシリーズ 0.4~30kW (30min定格)					
最大制御軸数	5	9	21	5	10	21
最大系統数	1	1	2	2	3	6
最小制御単位	1(μm)/0.1(μm)/0.01(μm)					
最大送り速度	480(m/min)/48(m/min)/4.8(m/min)					
入力(D <sub>i</sub> ) TypeA/B	192/240	192/240	256/320	192/240	192/240	256/320
出力(D <sub>o</sub> ) TypeA/B	144/240	144/240	192/320	144/240	144/240	192/320
ボード入力	128	128	128	128	128	128
ボード出力	96	96	96	96	96	96
最大記憶容量	320m/200本	5,000m/1,000本	320m/200本	5,000m/1,000本		
最大PLCメモリ容量	30Kstep					
カスタムメモリ容量FEROM	1Mバイト	4Mバイト	1Mバイト	4Mバイト		
カスタムメモリ容量RAM	128Kバイト	1.6Mバイト	128Kバイト	1.6Mバイト		

90%など)・大電流回路プリント基板の開発・ヒートパイプ方式による高効率放熱構造・IPM (Intelligent Power Module) の採用・サーボ主軸アンプ共通コンバータ化などにより、従来の M300 に対し、NC 及びサーボ、主軸アンプの取付面積は約 1/2 となり、また総発熱量は約 40%，盤内発熱量は 60% 低減している(図 1, 表 2)。また、9.5" モノクロ EL 型表示器に加え、10.5" カラー液晶表示器の使用も可能とした。これにより CRT 使用の場合に比べて奥行きで 1/3 ~ 1/4、また、質量で 1/5 ~ 1/6 となり、機械操作ボードの薄型化・軽量化が実現できる。

### 2.3 マンマシンインタフェース(MMI)機能の充実

高速グラフィックプロセッサを採用し、ハードウェアによるマルチウインドウ表示制御をサポートしている。マルチウインドウを利用して、次のような使い勝手の良い新たな MMI 機能を提供している(図 2, 図 3)。

(1) 電子(オンライン)マニュアル機能

(2) HELP 機能

(3) ウィンドウを使用したカスタム機能

近年、CAM システム、加工プログラム管理システムなど NC 工作機械の周辺でパソコンが使用されるケースが増えている。このシリーズ CNC では操作ボードにフロッピーディスクドライブインターフェースを設けており、MS-DOS フォーマットのフロッピーディスクを媒体として、NC 加工プログラム、各種パラメータなどの入出力が可能である。

### 2.4 カスタム開放ソフトウェア開発環境の充実

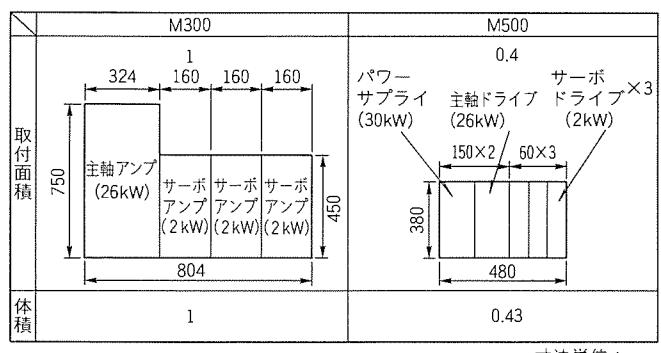


図 1. 外形寸法比較 (従来機種比)

表 2. 実機におけるアンプ発熱量比較 (従来機種比)

	主軸	サーボ			アンプ発熱量	従来との発熱量比	
		①	②	③		盤内発熱量	総発熱量
モデルA	18.5kW	1 kW	1 kW	1 kW	M300アンプ M500アンプ	58%減	38%減
モデルB	26kW	3.5 kW	3.5 kW	3.5 kW	M300アンプ M500アンプ	60%減	41%減
モデルC	11kW	3.5 kW	2 kW	2 kW	M300アンプ M500アンプ	60%減	40%減
発熱量 (W)				0 500 1,000 1,500			

- (1) コンピュータリング機能の充実
  - 従来の RS-232C によるホストコンピュータ接続に加えて、Ethernet を使用したネットワーク接続によるファイルの転送、NC 工作機械のモニタリングが可能
  - パソコンなどのホストコンピュータから NC の内部情報が読み出し可能な新通信プロトコルの開発
- (2) 外部 PLC リンクの実現
  - 高速シリアル接続による PLC 接続 (当社 MELSEC シーケンサ等)
  - PLC ネットワークへの接続

## 2.6 セットアップ・保守機能の充実

NC 機能の多様化・複雑化に伴い、NC と工作機械との結合、サーボ・主軸のパラメータ調整 (チューニング) などが非常に複雑になりつつある。今後の課題も多いが、M500 シリーズ CNC ではセットアップ・保守作業のサポートを行うための次の機能を新たに開発した。

- (1) サーボ主軸波形表示機能
- (2) オートチューニング機能
- (3) パソコンでのパラメータ管理機能

また、フラッシュ ROM によるカセットメモリの採用により ROM 切り時間を大幅に短縮し、開発・保守の効率化を支援している。

## 3. CNC 制御部の構成と特長

図 4 に M500 シリーズ CNC の外観を、図 5 にハードウェアの全体構成例を示す。CNC は以下に大別される四つの

要素から構成される。すなわち、

- (1) CNC 工作機械とオペレータとの MMI を構成する部分で、ディスプレイ装置と操作キースイッチ等を備えた表示操作部
  - (2) システムの核となり、CNC システム全体の制御を実行する制御部
  - (3) 制御部から順次送り出される移動指令を受けて電力増幅し、サーボモータ及び主軸モータを駆動する駆動制御部
  - (4) 機械移動部を駆動するサーボモータ、工作機械主軸を駆動する主軸モータと速度及び位置検出器
- から構成される。

図 5 の制御部に示すように、このシリーズ CNC では、役割分担型のマルチプロセッサ方式を採用している。ここでは、それぞれのプロセッサを中心に制御部の特長を順次説明する。

### 3.1 Main プロセッサ

システム制御の中心となるプロセッサであり、また CNC の処理サイクルタイム等の基本性能を引き出す重要な役割を

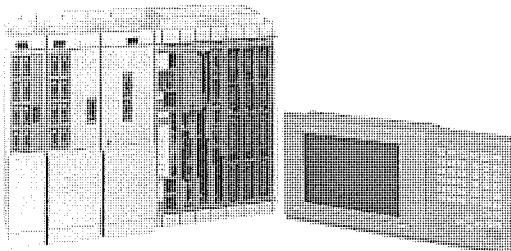


図 4 . M500シリーズCNCの外観

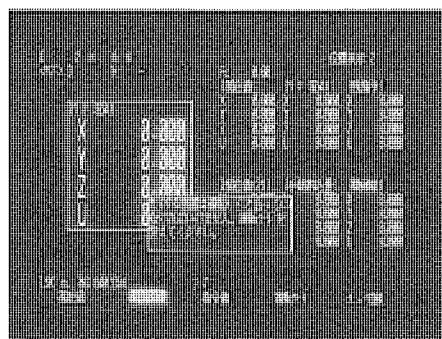


図 2 . HELP機能画面

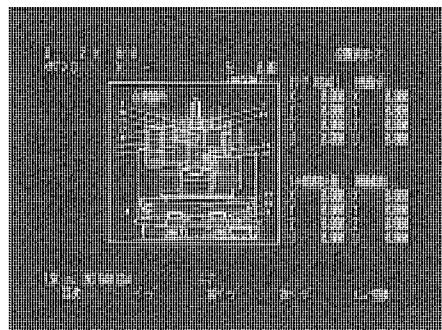


図 3 . 電子マニュアル機能画面

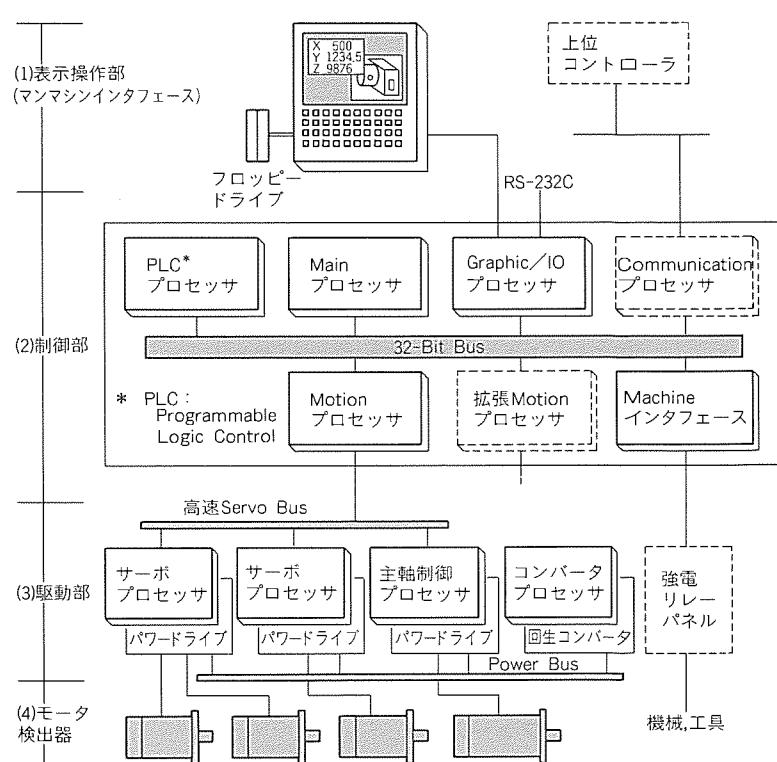


図 5 . M500シリーズCNCハードウェア構成

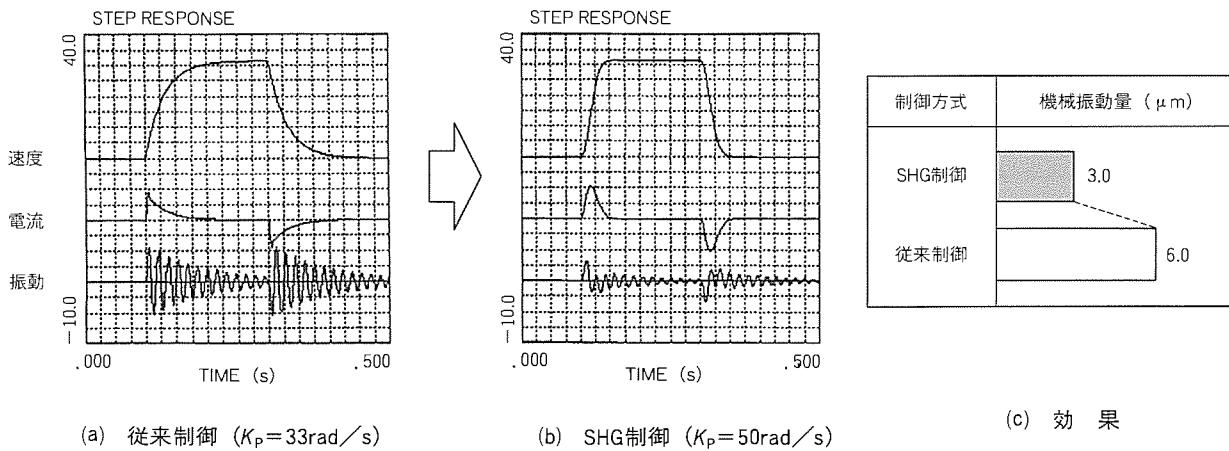


図6. ステップ指令入力時のサーボ系出力データ

もっている。このプロセッサは大容量キャッシュメモリを内蔵し、処理能力も従来機種に比べて数倍高速化されている。

### 3.2 PLCプロセッサ

主に機械シーケンス処理を高速に実行する専用プロセッサであり、並列に高速実行できるアーキテクチャを採用し、セルベース方式のASICで実現している。また、32ビット幅のデータ転送、比較等の機能命令をもち、ビット演算処理だけでなく機能命令処理においても高速化を実現している。

### 3.3 Graphicプロセッサ

32ビットの専用プロセッサを採用しており、ベクトル描画、塗りつぶし等のグラフィック描画の高速化に加え、マルチウインドウ表示をハードウェアで実行できる。また、文字の拡大縮小が可能であり、これによって文字のサイズが自由に選べ、電子マニュアル等の表示が高速に実現できる。

### 3.4 Motionプロセッサ

Motionプロセッサは、Mainプロセッサから逐次生成送出される移動データを受け、機械系がより高速に、高精度に、滑らかに動作するようにデータを微小単位でリアルタイムに処理加工し、駆動部へそのデータを高速送信する役割をもっている。特に高速処理が要求されるためRISC型マイクロプロセッサを採用しており、その制御プログラムは高速メモリに格納される。また、Motionプロセッサは、制御軸数又は制御系統数の拡張等の目的で複数使用可能のように考慮している。Motionプロセッサと駆動部のサーボプロセッサ、主軸制御プロセッサとは専用の高速シリアルバスで接続されており、高速化の実現と同時に制御部と駆動部間の配線の簡素化を図っている。

### 3.5 Machineインターフェース

各種アクチュエータ、リミットスイッチ等とCNCとがインターフェースする部分であり、高集積化によって入出力接点

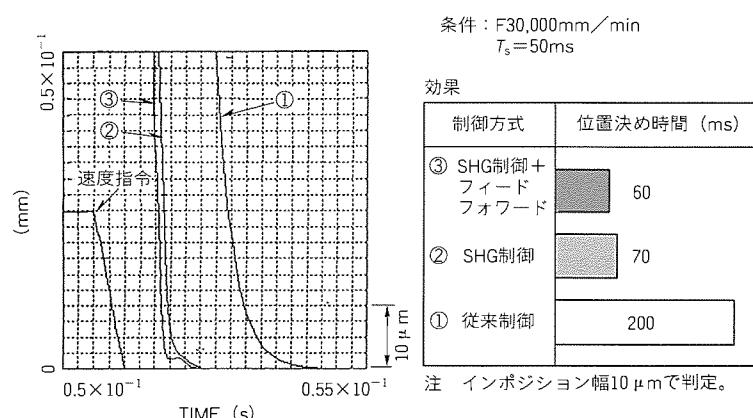


図7. 早送り減速時のドリープ量

数が大幅に拡大され、複雑なシステムにも対応が可能である。

### 3.6 その他

その他、オプションとしては通信インターフェースが準備されている。ここで使用されるマイクロプロセッサとしても32ビットタイプを準備しており、各種ネットワーク系への接続が容易となっている。

## 4. 駆動部構成と特長

図5に示すように、駆動部はコンバータ、サーボアンプ及び主軸アンプから構成されており、コンバータは回生機能をもっている。また、サーボアンプ及び主軸アンプはインバータ回路を構成している。電源回生型コンバータをサーボアンプと主軸アンプで共用することにより、アンプのビルトアップが容易になり、機械の複合化・多軸化要求に対応しやすくなるとともにサーボ・主軸の全面電源回生化により、従来のサーボアンプの抵抗放電による熱ロスの削減を実現している。

以下に、M500CNC駆動部の特長を紹介する。

### 4.1 滑らかハイゲイン(SHG)制御サーボシステム

従来、高速・高精度機能として、フィードフォワード制御に代表される前向きの補償が提案されている。100%補償できれば、指令追従誤差は発生しなくなり、高速・高精度な制

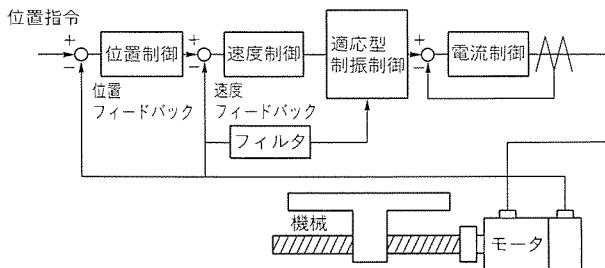


図 8. 適応型制振制御ブロック図

御及びサイクルタイム短縮が図れる。しかし、この場合、指令加速度が大きくなり機械振動を誘発しやすくなるため、フィードフォワードゲインを下げる得ないケースがあること及び負荷外乱に対しては抑制効果がないことに問題があった。また、従来の位置制御ゲインは機械振動が発生しないように決定されているため、ハイゲイン化が困難であった。M500シリーズ駆動部の位置制御には上記問題を解決するため、独自のSHG制御を採用している。次に、SHG制御の効果について述べる。

#### (1) 加減速特性及び形状誤差特性

図6に従来制御の位置ループゲイン( $K_p$ )が33rad/sの場合のステップ指令入力時のモータ速度、モータトルク分電流、機械振動波形及びSHG制御で $K_p=50\text{ rad/s}$ の場合の波形を示す。SHG制御では速度波形が滑らかであるため、 $K_p$ が1.5倍に上がっているにもかかわらず、機械振動量は1/2に低減されている。したがって、従来と同程度の機械振動を許容するならば等価的に位置ゲインを従来の3倍に上げることができる。この場合、真円指令時の形状誤差を例にとると従来の1/9に改善される。

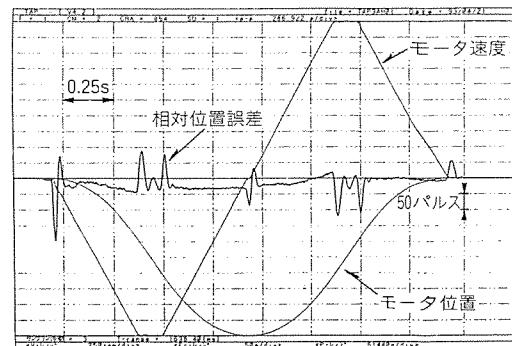
#### (2) サイクルタイム

図7に早送り減速時のドループを示す。条件①は従来制御( $K_p=33\text{ rad/s}$ )、条件②はSHG制御( $K_p=50\text{ rad/s}$ )、条件③はSHG制御( $K_p=50\text{ rad/s}$ )にフィードフォワード制御(40%)を付加した場合である。位置決め時間として仮に速度指令完了後、インポジション幅10μmに入るまでの時間と定義すると、条件①の従来制御での200msに対し、条件②のSHG制御では70msと約1/3に短縮されており、サイクルタイムの改善に大きな効果がある。

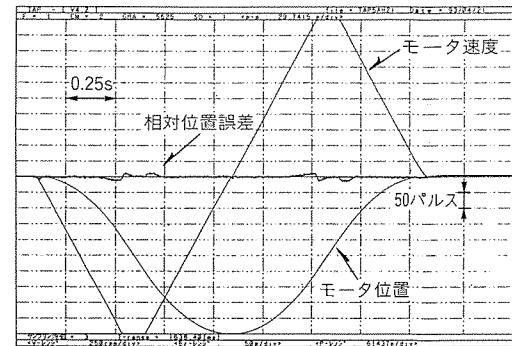
#### 4.2 適応型制振制御

位置ループのハイゲイン化に伴い、マイナーループである速度ループ及び電流ループのハイゲイン化が必要となるが、一般的にこれらのハイゲイン化によって機械系の共振を誘発する。これを防ぐため図8に示すような適応型制振制御系を構成し、検出速度情報からフィルタによって周波数成分を抽出し、機械系の共振周波数を検出し、リアルタイムに速度制御系をチューニングすることにより、振動抑制を行うものである。

#### 4.3 同期タップ精度向上



(a) M300システム



(b) M500システム

図9. 同期タップの精度向上

送り軸と主軸の補間動作による同期タップにおいて、両制御軸の位置ループゲインを一致させるだけでなく、加減速動作時の同期誤差を小さくするには、マイナーループの速度ループ及び電流ループの応答性をそれぞれ可能な限り一致させる必要がある。M500シリーズのサーボ、主軸では速度ループの応答を一致させるため、加速度フィードフォワード機能をもっており、図9に示すように従来機種に比べ、送り軸と主軸の同期性を大幅に向上させることができた。

#### 5. むすび

高速・高精度かつ小型・低発熱化を実現したM500シリーズCNCの紹介を行った。今後の課題としては、研削盤、複合工作機械、各種専用機への対応などシリーズの一層の充実、及び次のような項目についての重点的な開発が挙げられる。

- (1) 高速・高精度化の一層のレベルアップ
- (2) 機械加工の無人化・システム化への対応
- (3) オープンシステム化・グローバル化への対応
- (4) カスタム開放ソフトウェア開発環境の一層の充実
- (5) 駆動部(サーボ・主軸アンプ、検出器、モータ)の品ぞろえ強化

これらの課題について、ユーザーの真のニーズをつかみ、技術動向をにらみながら、順次開発を行い、ユーザーの期待にこたえていきたい。

# 金型・板金CAMの最新技術と応用

田中 豊\* 岩間俊樹\*  
長谷川貞彦\* 渡辺尚紀\*  
大久保秀之\*

## 1. まえがき

金型・板金用のCAMであるMS-Xシリーズは、当社の放電加工機、レーザ加工機及びNC工作機械対応のNCプログラム作成を目的として開発されており、次の4機種が製品化されている。

金型用：MS-20	(EWS)
MEDIAPORT TYPE CAD	(パソコン)
板金用：LA500	(EWS)
LA100	(パソコン)

上記4機種のうち、パソコン仕様では一部の機能に限定があるが、操作方法・基本機能は完全統一が実現されている。

MS-Xシリーズ内では、共通開発方針の基にシステム構築されており、以下にシリーズの共通開発方針を示す。

- (1) ネットワーク、ファイル媒体に関する透過性・共通性の維持を最大目標とし、ユーザー重要資源であるCADデータ、CAMデータを長期的に保護する。
- (2) 当社製の放電加工機、レーザ加工機等の加工条件・加工ノウハウ等を、CAMデータベースとして組み込む。
- (3) 金型部品図、レーザマクロデータ等をデータベースとして提供し、設計・加工現場の標準化を推進する。

## 2. システム構成と特長

### 2.1 ハードウェア構成

MS-Xシリーズは、進歩の著しいハードウェアに対して、

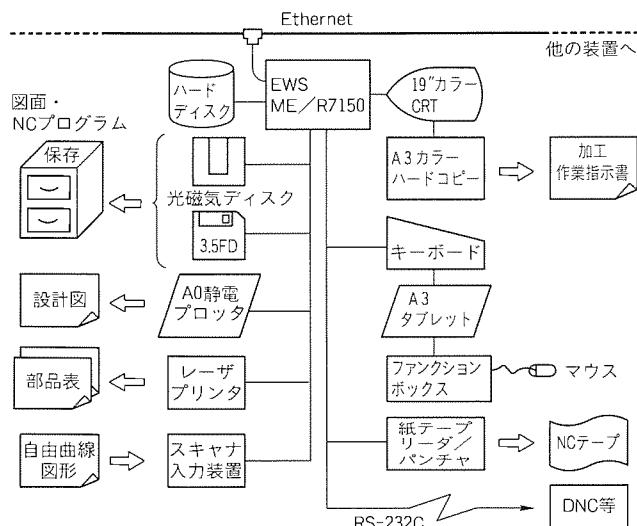


図1. ハードウェア構成

常に最新最良のハードウェアを利用できることが特長である。

一例として、高性能RISC(命令短縮)CPUを用いたEWS(エンジニアリングワークステーション)システムの構成例と、その運用形態を図1に示す。図では1台の構成だけを示しているが、実際のシステムではネットワークを介して他のCAD/CAM端末と接続されている。他の端末とは分散ファイル管理、静電プロッタサーバ出図など、情報資源・機器資源の共有を行っている。

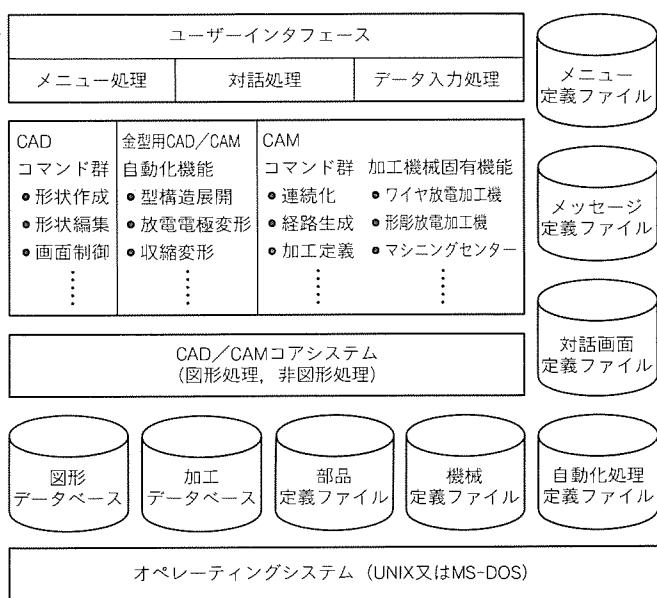
ソフトウェアによるCAD/CAM統合との相乗効果によってCAD専従、CAM専従、CAD/CAM一貫の、いずれの作業形態をとる作業者にも操作性が良く、相互データ交換ができる運用環境を提供している。

また、各種の入出力装置が接続されており、各個人の作業形態に合わせた操作環境を選ぶことができる。

### 2.2 ソフトウェア構成

次にソフトウェア構成を図2に示す。特長としては、

- (1) CAD、CAM及び各種の表入出力の機能が、統一のメニュー体系で、現場に合わせて構築されている。
- (2) CAD作画によるパラメトリック形状定義機能が用意されており、CAD標準部品及びCAM標準加工部品等の登録が表入力のみで、極めて短時間にできる。
- (3) 金型加工用NC工作機械、及びレーザ加工機対応のCAM機能を中心に、CADが構築されている。いったん入力し



たデータは徹底利用できる構造であり、手間の掛かるデータ入力作業を極力削減している。

(4) 多くの機能に関するデータ類を外部ファイルの形で存在させており、操作性に關係する部分は極力自由度を確保している。

### 2.3 ネットワーク環境

ハードウェア構成でも少し述べたが、このシステムはネットワーク環境での利用を強く意識して開発されている。

例えば、ユーザー資源の共用という点に関して、MS-Xシリーズの CAD/CAM であれば、ワークステーション版でもパソコン版でも、同一のネットワークに接続して、互いにデータを交換又は共有が可能である。

図 3 に示すようにワークステーションとパソコン、DNC (Direct Numerical Control) 端末を同一のネットワークで接続するだけで、図面データ、NC プログラムのレベルでは 100% の互換性があり、特別な変換操作のようなものは不要である。図面データのレベルでは金型用と板金用のシステム間で、図面データを共有することも行っている。

また、DNC 端末は、パソコンを利用したもので、貴重なワークステーションの性能を低下させることなく、安価に、DNC 環境が構築可能である。

## 3. MS-X シリーズの特長

### 3.1 金型設計機能

MS-X シリーズの金型機能では、統合化データベースを核に、以下の機能を実現している。

(1) CAD/CAM の統合化により、金型設計と金型加工の作業が共通環境で進められ、設計変更、加工方式変更等が柔軟に、高品質に対応可能である。

(2) 外部の製品設計 CAD データを取り込むためのインターフェースとして、IGES, DXF, BMI のツール等が用意されており、大型ホストからパソコンまでの幅広い製品設計データの取り込みを実現している。

(3) 本格的な量産金型を製作する前段階の板金試作部品の加工に、レーザ加工用のソフトが利用できる。このため、レーザ試作加工から最終の金型製作までが、共通データベース環境で効率的に実現できる。

(4) 徹底したオープンシステムを実現しており、標準組込みの標準金型部品(㈱ミスミ、双葉電子工業㈱等)の金型部品データベースに対しての追加変更が表入力により、瞬時に対応できる。

また、金型部品に CAM 属性として、付加されている金型部品工業会規格の穴加工データベースも同様に、瞬時に表入力で、カスタマイズ可能である。

(5) 他のシステムでは実現されていない、中間公差変形、放電電極の揺動変形、抜きこう(勾)配変形等の金型 CAD に特有の機能を実現しており、金型製作のトータル生産性を大幅に向上させている。

(6) 図 4 に示すプレート展開機能では、データベース内の標準モールドベースに対し、金型部品を配置するのみで、複数のプレート加工部品図が自動的に生成される。

生成された加工図は、各々が配置した金型部品の機能に対

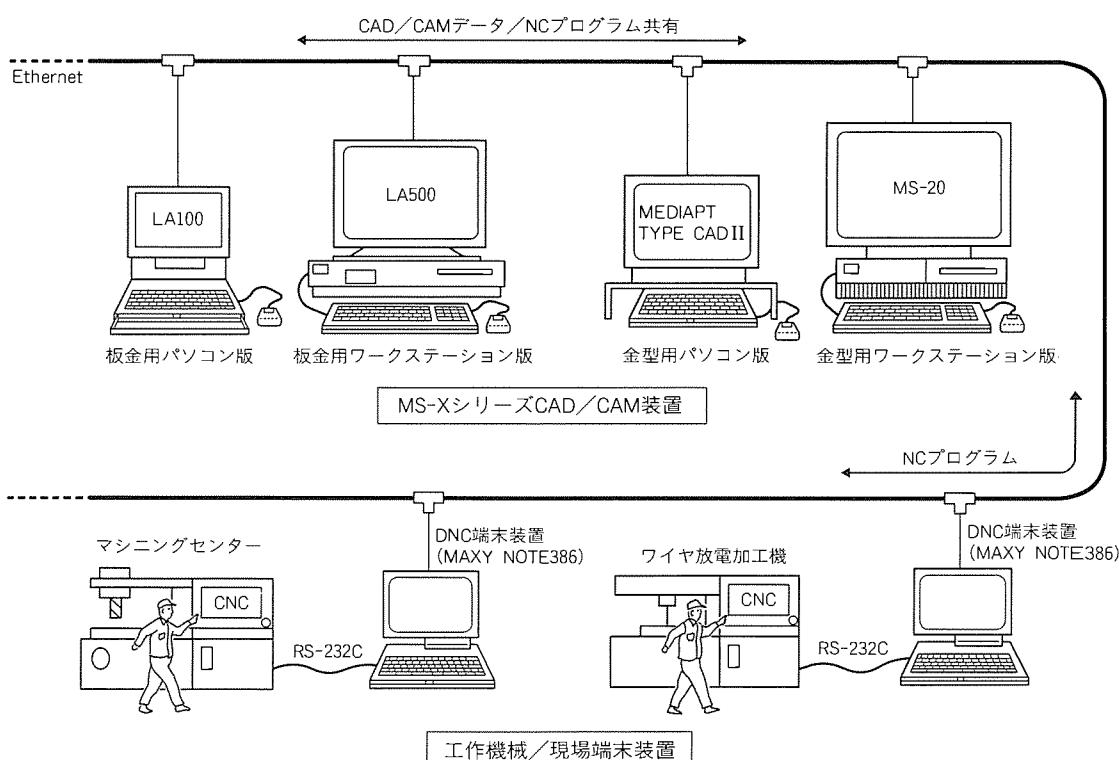


図 3. ネットワーク環境

応している。図4の例では、座グリ穴、通し穴、タップ止まり穴の加工図が自動生成され、後工程へ渡される。

### 3.2 金型加工機能

このシステムのCAM機能は、金型の製作に必要なNCプログラムをCADと密結合して作成することができ、このシステム1台のみで、以下の工作機械をサポートしている。

- (1) ワイヤ放電加工機
- (2) NCフライス、マシニングセンター
- (3) 形彫放電加工機

このシステムは、同一のCAD図を基に、複数種の工作機械にまたがる工程設計、NCプログラム作成が可能である。

また、金型加工専用のCAD/CAM結合機能が強化されており、設計(CAD)で付加された加工情報を後工程(CAM)で有効に利用でき、後工程の再入力作業が大幅に軽減されたシステムとなっている。

以下に各工作機械用CAMの特長について述べる。

#### 3.2.1 ワイヤ放電加工機

ワイヤ放電加工機は金型加工では広く使われており、プレス金型、モールド金型、形彫り用電極製作に不可欠である。

ワイヤ放電加工の高精度加工には、必ず(須)のセカンドカット加工、及び連続無人運転のためのスクラップ処理を不要とするコアレス加工(拡大加工)がある。

このシステムのCAMでは、これら機能のサポートに加えて、高精度化・自動化に対応できる機能の充実を図っており、以下の機能を特長としている。

- (1) 加工形状ごとにセカンドカット加工、コアレス加工等を組み合わせた加工工程を作成できる。
- (2) テーパ角度、上下同一コーナR、上下指定コーナR、上下任意形状のワイヤ放電加工特有の加工形状がシンボル表示でき、画面上で容易に加工形状を確認できる。

#### 3.2.2 ワイヤ放電加工における応用事例

##### (1) プリント基板金型

図5に示す金型では、微小な加工形状が多数散在しており、各々の形状に対して、イニシャルホールとアプローチ要素を指示するのは、非常に手間がかかる作業である。

ワイヤ加工自動定義機能を用いると、適切な加工工程の情報を自動で付加し、切落し加工、コアレス加工等の自動判別も行い、NCプログラムを即座に作成できる。

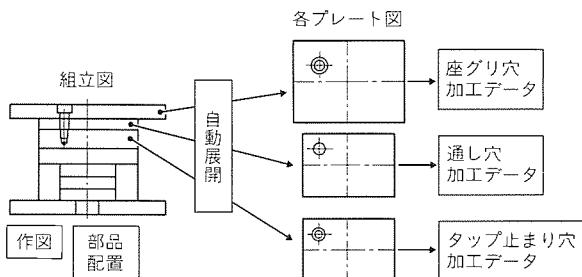


図4. プレート自動展開

さらに、イニシャルホール加工用、マシニングセンターへの穴加工用NCプログラムも自動的に作成されるほかに、同一加工形状の個数確認等の各種ユーティリティも用意されている。

##### (2) プレス金型加工

このシステムの応用事例のポイントを以下に述べる。

- (a) ワイヤCAM機能を用い、抜き勾配の加工に、部分又は全周テーパ加工の指示を画面上で行う。
- (b) また、微小形状加工に対しては、中子処理が不要の自動拡大加工(コアレス加工)を用いる。
- (c) 勾配の角度が徐変する形状では、上下面で異なる形状が定義できる上下任意形状加工を利用できる。
- (d) 加工マクロを用いることで、加工形状、加工個数、加工精度に応じ、加工工程や加工条件が自動で設定されて、適切な加工が簡単に行える。
- (e) 当社ワイヤ放電加工機の自動セカンドカット機能を最大限に生かし、ワイヤのたわみや遅れの影響を少なくした高精度な加工が簡単に実現できる。
- (f) さらに、ストリッパプレートの加工では、パンチ加工形状に一定のクリアランスを付加することに加え、コーナ逃しが必要となる。

このシステムでは、指定された値以下のコーナR形状を、一定値のコーナR形状に変更して加工する機能があり、同一の製品形状データから、パンチ・ダイ加工に加えて、ストリッパプレートの自動加工も可能となっている。

##### 3.2.3 NCフライス、マシニングセンター

切削加工に関しては、2.5次元、3次元加工機能の強化、穴加工のプレート展開によるCAD/CAMの強化が図られており、以下の機能を特長としている。

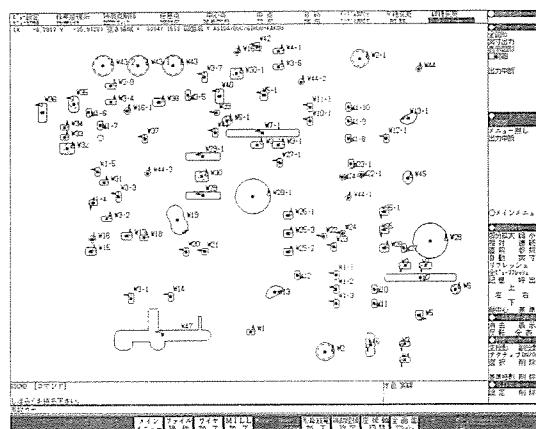


図5. プリント基板金型

(1) CAD 図から穴、溝、輪郭、面、2.5 次元形状を指示することにより、2 次元、2.5 次元、さらに3次元の曲面切削用 NC プログラムを自由に組み合わせて作成できる。

(2) 2.5 次元加工では、複数断面指定、一定コーナ R、コーナ R 変化指定、軸変換機能により、加工形状が簡単に定義でき、図 6 の荒加工用パス生成も容易である。

2.5 次元加工機能では、NC プログラム作成は瞬時に行われ、データ量も少なく、短時間の加工が可能となり、重要な機能として位置付けられている。

(3) 図 7 に示すように、3 面図で作成された CAD 図から特徴線を抽出するのみで、3 次元曲面加工が可能である。

また、加工曲面の自己干渉、相互干渉の回避が可能で、ボールエンドミル、フラットエンドミル、R 付きフラットエンドミルと工具種類に依存せず、削り込みが発生しない安定した加工を実現している。

(4) モールド金型のプレート展開 CAD 機能で、登録された金型部品が呼び出されると、対応する取付けの穴加工のデータがリンクされ、効率的な加工が実現されている。

(5) 穴加工の切削条件・加工工程は、ワーク材質・ワーク厚さ・工具種類・工具径から、登録のルールファイルに従って自動決定されるため、初心者でも高品質の NC プログラムを作成することができる。

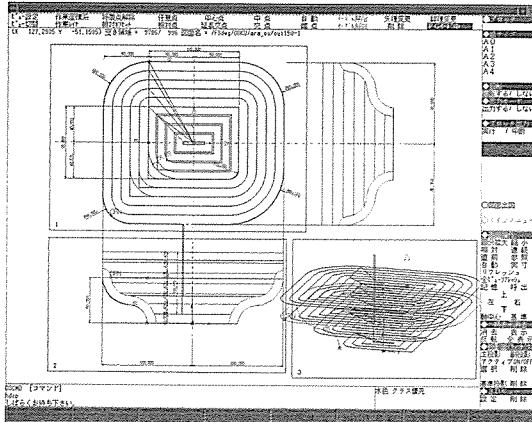


図 6. 荒加工パス生成（2.5次元加工）

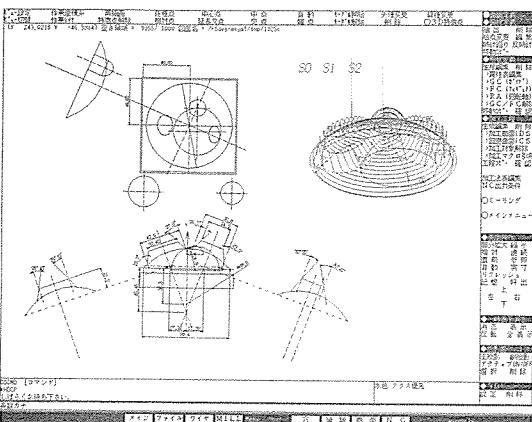


図 7. 3 次元曲面加工

### 3.2.4 金型設計・製作への適用事例

次に、当社名古屋製作所金型設計課における MS-X シリーズの導入事例を紹介する。

金型設計課では、現在 12 台の端末を保有し、主として、プラスチック射出成形金型、ダイカスト金型、プレス金型の設計及び金型部品の加工用 NC プログラム（マシニングセンター、ワイヤ放電加工機、形彫放電加工機）の作成業務に適用している。金型設計業務では、前述の抜き勾配変形等の金型設計支援機能を利用して、効率的に作業が行われている。

図 8 に、このシステムによって作成したプラスチック射出成形金型の一例を示す。

MS-X シリーズでは、CAM 側で CAD 図形データを、直接共有することができる。CAM オペレータは、設計者が登録した部品図データを呼び出し、加工情報を付加し、NC プログラムを効率的に作成している。

図 9 に、システムを使用した、マシニングセンター加工用の NC プログラム作成の一例を示す。図の加工例は、当社製品であるインバータの、アルミダイカスト・キャビティ型（SKD 61）をエンドミルにより、領域切削加工したものである。このシステムの加工シミュレーション図では、加工深さに応じて濃淡表示がされ、工具オフセット量も正確に描画されるため、高品質の加工チェックが画面上で容易にできる。

### 3.2.5 形彫放電加工機

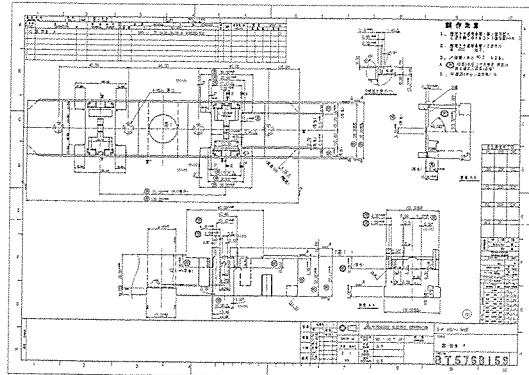


図 8. プラスチック射出成形金型

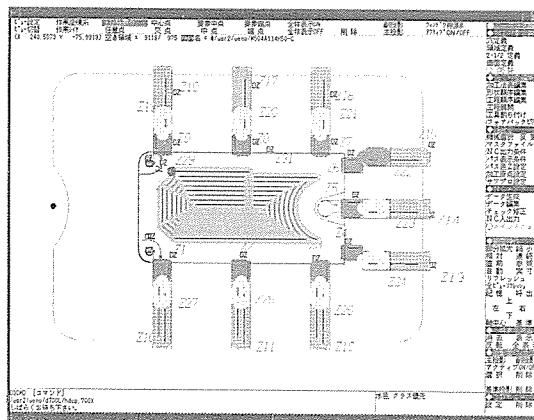


図 9. 加工シミュレーション図

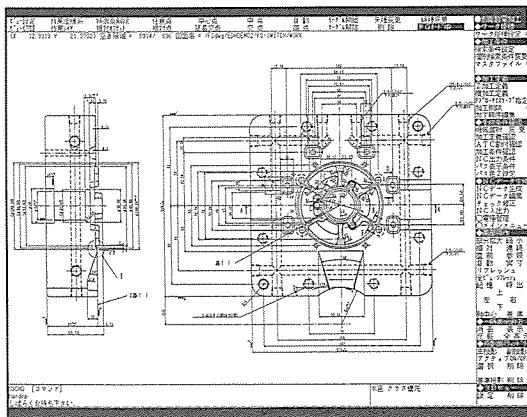


図10. 形彫り放電加工金型図（モータブラケット）

このシステムでは、電極設計機能、電極製作用のマシニングセンター用 NC プログラム作成機能と、形彫放電加工機用 NC プログラム作成機能を総合的にサポートしており、形彫放電加工機を効率的に運用可能である。

特に、業界初の形彫放電加工機用 CAM は、以下の機能を特長としている。

- (1) 放電加工の揺動パターンに従って、電極図を縮小代分シフト変形する電極揺動変形機能をもつ。
- (2) エキスパート検索機能は、材質、加工面積、加工深さ、面粗さに加え、精度／電極消耗／速度のバランスを指定することにより、熟練作業者並みの加工条件を決定することができる。
- (3) 電極図面から心ずれ補正プログラムを自動生成する。このプログラムは、加工用プログラムと併せて NC データの形で出力されるので、段取り作業が大幅に削減される。

### 3.2.6 形彫り放電加工における応用事例

#### (1) モータブラケット型の加工

図10のモータブラケット金型加工を形彫放電加工機で加工する場合、分割電極図面を CAD 機能（電極揺動変形機能）等を用いて作成する。この電極図には、材質、縮小代、揺動パターン等の加工情報を、属性として付加することができる。次に、電極の図面を基にして、図11に示すように、電極心ずれ補正を行う測定点を、画面上から指示する。この図で、電極形状の周辺の小円が、心ずれ誤差を測定する基準球を表しており、これにより、電極心ずれ補正の NC プログラムが自動生成される。

さらに、この電極でどの位置を加工するかを画面上で指示すると、電極に付加された属性から最適な加工条件が決定される。

なお、この際の加工条件は、熟練作業者の手順に従った、エキスパート検索機能又は登録されている加工条件列を利用して、だれでも簡単に設定できる。

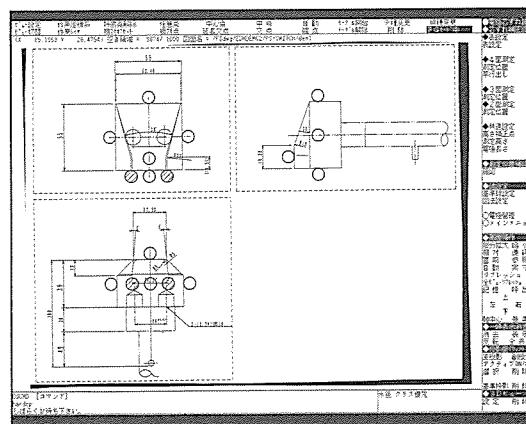


図11. 電極心ずれ補正

### 3.3 板金加工機能

この特集論文の“レーザ加工機の最新技術”でも詳細に紹介されているが、このシステムは CAD 図データを共用可能であるとともに、レーザ加工機用 CAM 機能を実現している。

レーザ CAM としては、以下の機能を特長としている。

- (1) 板金三面図から、合成展開機能により、容易に展開図を作成することができる。
- (2) 丸穴、角穴等の定型形状が登録されており、これらを呼び出すだけで、加工データを生成することができる。
- (3) 加工順序を自動決定する機能により、加工形状を作成、配置さえすれば、NC プログラムを容易に作成できる。
- (4) レーザ加工に重要なピッキング、ミクロジョイント機能により、NC プログラムを効率的に作成できる。
- (5) 加工形状を自動で配置できるネスティング機能により、歩留りの良い NC プログラムを容易に作成できる。
- (6) 豊富なダクト展開パターンを備えている。

## 4. む す び

以上の説明で分かるように、金型・板金用 CAM として開発された MS-X シリーズは、ハードウェア及びソフトウェアの連続性を重視し、設計図面、加工データ等のユーザー資源の維持と蓄積を可能としている。

また、放電加工機、レーザ加工機、マシニングセンター等のサポートを一貫して実現することにより、ユーザーの各種設計、加工業務を効率的に支援する環境を提供している。

このシステムは、標準 OS (Operating System)、金型標準規格等の業界標準プラットホーム上にすべてが構築されており、環境の変化に柔軟に対応が可能である。

今後とも、当社のメカトロニクス製品の進展に合わせて、このシステムの機能強化を継続し、エンドユーザーに満足していただける製品を目標にしていく。

# 関西電力(株)奥多々良木変電所納め

## 500kV 300MVA分解輸送方式変圧器“CGPA変圧器”

玉置栄一\* 富永雅久\* 丸岡俊雄\* 中塚昭治\* 佐久間 隆\*

### 1. まえがき

変圧器の高電圧・大容量化に伴い、輸送寸法・質量は増加傾向にある。一方、輸送条件は年々厳しくなり、山間部・都市部いずれも輸送上の対策を必要とする場合が多い。

当社では、この輸送上の制約を根本的に解決するため、変圧器の構成要素のうち最大質量物の鉄心とコイルを分離し、吸湿防止用のフィルムで個々にパッケージして輸送し、現地再組立する分解輸送方式変圧器“CGPA (Coil Group Pack-ed Assembly) 変圧器”を1978～1981年にかけて関西電力(株)と共同開発した。この間、防湿パック技術・現地工法などの基礎研究を行い、1979年には500kV 実証器を製作し、実系で約1年半にわたって長期課電試験を実施し、実用化検証を完了した。1985年には、275kV 初号器として300MVA 器を神戸変電所へ納入し、順調に稼働中である。

このたび当社では、これらの蓄積技術と新しい技術を適用した500kV 初号器を、新設の関西電力(株)奥多々良木変電所(1993年6月竣工)に納入した(図1)。この変電所は、兵庫県但馬地方の山間部の揚水発電所に併設され、兵庫県北部地域に77kV 納電を行う500kV 変電所である。

当社は、1972年同揚水発電所向けに、500kV 640MVA 主要変圧器を輸送制約のために本体を3分割した特別三相構造で納入したが、その後、JR もより(最寄)駅の側線廃止や、トレーラ輸送時に橋りょう(梁)補強が必要となるなど、当時に比べ輸送条件は更に厳しくなった。

この輸送条件の悪化に對処するため CGPA 変圧器を適用したもので、これによって輸送上の制約が大幅に解消され、工場から変電所まで小型低床トレーラによる道路輸送を行うことができた。

今回製作・納入した500kV CGPA 変圧器は、既納の275kV CGPA 変圧器に比べ、さらに次のような新しい技術を採用し、現地組立環境への対応・検査方法の充実や現地組



図1. 奥多々良木変電所納め  
500kV 300MVA CGPA変圧器

立期間の短縮を図ったので、その概要を紹介する。

- (1) 現地組立用クリーンハウス
- (2) 下部タンク現地組立溶接部の専用装置による油密検査法
- (3) レッグ鉄心のブロック挿入工法

### 2. 定格及び仕様

今回のCGPA 変圧器の定格・仕様は、次のとおりである。

形式：三相 60Hz 外鉄形 送油風冷式

負荷時タップ切換え変圧器 70ポン

容量：一次 300MVA

二次 300MVA

三次 安定巻線

電圧：一次 500±40.625kV 星形

二次 77kV 星形

三次 安定巻線 三角形

絶縁階級：一次線路 500号L

一次中性点 80号

二次線路 70号

二次中性点 70号

三次 20号A

インピーダンス：一次-二次間 24% (300MVA 基準)

端子引出し：一次 気中ブッシングにより架線接続

二次 油中貫通ブッシングにより油ダクトでケーブル接続

三次 気中ブッシングにより三角形結線の一端のみ引出し接地

図2に、このCGPA 変圧器の概略外形を示す。

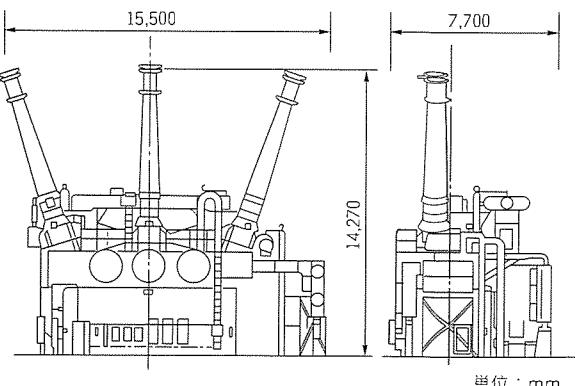


図2. 奥多々良木変電所納めCGPA変圧器の外形

### 3. CGPA変圧器と組立輸送方式変圧器の比較

#### 3.1 構 造

図3にCGPA変圧器の構造を示す。通常変圧器との構造面の相違点は下記の2点である(既納の275kV CGPA変圧器も同様)。

##### (1) コイルグループへのパックフィルム装着

CGPA変圧器では、分解・現地再組立に対してコイル絶縁物の吸湿防止を図り、工場で確認した絶縁性能を維持することが最も重要である。このため、コイル絶縁物は、工場製作時からコイルグループ周間にテフロン系フィルムを装着・パックすることで、吸湿防止を図る。

絶縁物の吸湿量は、コイルグループにサンプリング用のプレスボードを組み込み、工程ごとに測定し、500kV変圧器の管理値の0.5%以下であることを確認した。

##### (2) 下部タンク三相分離構造

CGPA変圧器では、輸送質量・寸法の軽減を図るために鉄心とコイルを分離し、コイルグループは1相ごとに輸送する。工場品質の維持と現地組立を不要にするため、コイルグループは製品下部タンクに収納したまま輸送を行う。このため、下部タンクは工場発送前に三相分離し、コイルグループの輸送タンクの一部として使用する構造としている。

#### 3.2 工 法

通常変圧器との工法面の相違点は下記の2点である(既納の275kV CGPA変圧器も同様)。

##### (1) 現地下部タンク相間溶接

輸送のために分離した下部タンク相間部は、現地で溶接し再結合する。

この相間部は、変圧器の寸法・材料を必要以上に増加させないために、図4に示すとおり非常に狭くしかも長尺(今回の場合幅約130mm、長さ約3,000mm)となる。このため、ビーム式自動溶接装置で溶接するが、溶接部がクリーンで油密性の優れたサブマージアーク溶接法を適用する。

##### (2) 現地鉄心組立

コイルグループの現地組立は不要

であり、現地ではクリーンハウス内で鉄心組立のみ行う。外鉄形変圧器では、鉄心構造が同一幅鉄心を水平積層する単純工法のため、鉄心のつ(吊)り込みや起立用の大がかりな設備は不要である。

コイルグループのパックフィルムは、冷却のため下部側の一部が開放された状態であるため、鉄心組立に先立ち、下部タンク内に油を満たし封入するとともにドライエアを供給し、パックフィルム内を外気よりも加圧状態にしてコイルグル

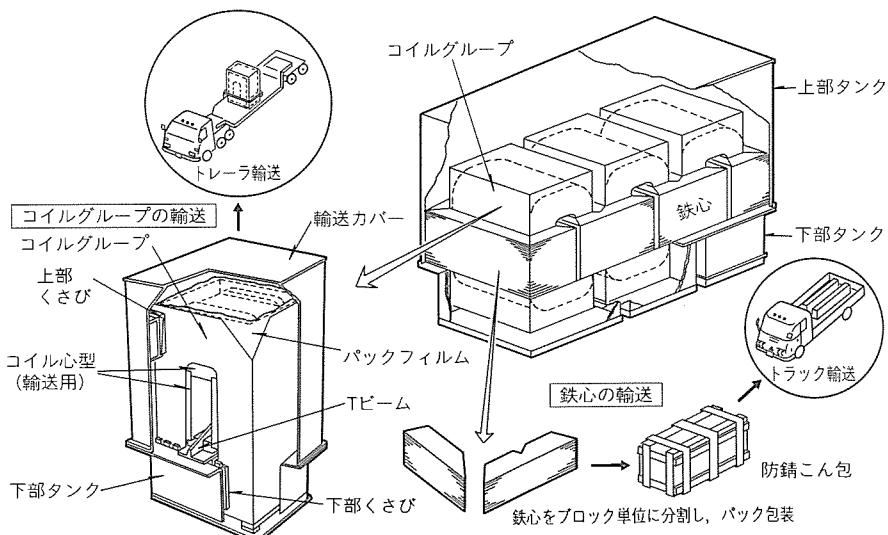


図3. CGPA変圧器の構造

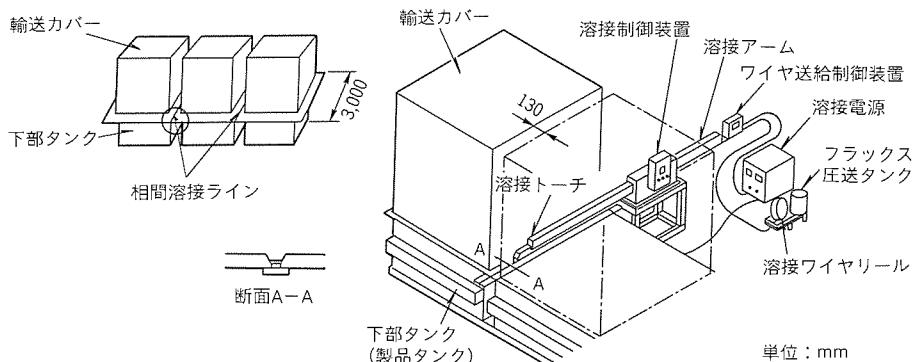


図4. 相間溶接部、自動溶接装置の詳細

表1. 組立輸送変圧器とCGPA変圧器の諸元比較

	組立輸送変圧器		CGPA変圧器	
	普通三相方式	特別三相方式		
仕 様	三相 60Hz 外鉄形 送油風冷式 負荷時タップ切換え変圧器 70ポン 300/300MVA(安定巻線付き) 500±40.625/77kV			
輸 送	最大輸送質量(t)	175	65	22
	輸送手段	180形シューナーベル式トレーラ	80形低床トレーラ	25形低床トレーラ
据 付 け	総 質 量 (%)	89	100	89
	据付け面積 (%)	85	100	85
損 失	現地組立日数(日)	41	54	59
	鉄 損 (%)	87	100	87
	銅 損 (%)	100	100	100
	合 計 (%)	98	100	98

プへの外気の侵入防止を図っている。

### 3.3 諸元比較

表1に、500kV 300MVA変圧器の組立輸送変圧器とCGPA変圧器の諸元比較を示す。

## 4. 新採用技術

図5に現地組立工程の概略を示す。ここでは、今回の現地組立環境と、検査方法の充実や現地組立期間の短縮を図るために新たに採用した技術について説明する。

### 4.1 現地組立用クリーンハウスの採用

既納の275kV CGPA変圧器は防音建屋内設置のため現地組立は屋内作業であったが、今回は屋外設置となるため図6に示す組立用クリーンハウスを設置した。ハウスは組立室と前室からなり、その間には、間仕切りを設けた2棟構造である。

#### (1) 組立室

現地鉄心組立を行うエリアで、内部は除湿送風装置による空調を行うとともに、湿度・温度・浮遊じんあい(塵埃)量を監視し、工場並みの作業環境で現地組立を行った。また、床面は、コンクリート面からの水分浸入を考慮して防水シートによる養生を行った。さらに、外気と内部の温度差で万一結露した場合の対策として、テントは二重シート構造とした。なお、テントは、鉄心組立前後の輸送カバーやタンク脱着を重機によって効率的に行うために、開閉容易な蛇腹式のレール移動形とした。

#### (2) 前室

異物管理の徹底を図るため、鉄心・中身部品及び工具等を組立室内へ搬入する前に清掃点検を行うエリアである。

また、組立室と前室との間に間仕切りを設け、前室開の場合は間仕切り閉、間仕切り開の場合は前室閉の作業手順とし、屋外から組立室内への直接の塵埃侵入防止を図った。

### 4.2 現地下部タンク相間溶接部の専用装置による油密検査法の採用

既納の275kV CGPA変圧器では、下部タンク相間溶接部の油密検査は、溶接直後のボアスコープによる目視点検と据付け完了後の油圧検査を行った。今回、更に信頼度を高めるために、図7に示す専用リーケテスト装置を開発し、より定量的評価の行える油密検査法を確立した。

検査手順は、次のとおりである。

- (1) 相間溶接終了後、溶接部の下面側に加圧容器を入れ、ジャッキで固定する。
- (2) 加圧容器内に不活性ガスを封入し、溶接部の上面側をシールカバーでマスキングし、規定時間放置する。
- (3) シールカバー内にガスセンサを入れ、ガスリークを検出する。

### 4.3 レッグ鉄心のブロック挿入工法の適用

既納の275kV CGPA変圧器では鉄心を順次積み上げていたが、今回は、鉄心組立期間の短縮を図るために、レッグ鉄心部について専用装置によるブロック挿入工法を適用した。この工法は、現在の工場組立の標準であり、レッグ鉄心を高

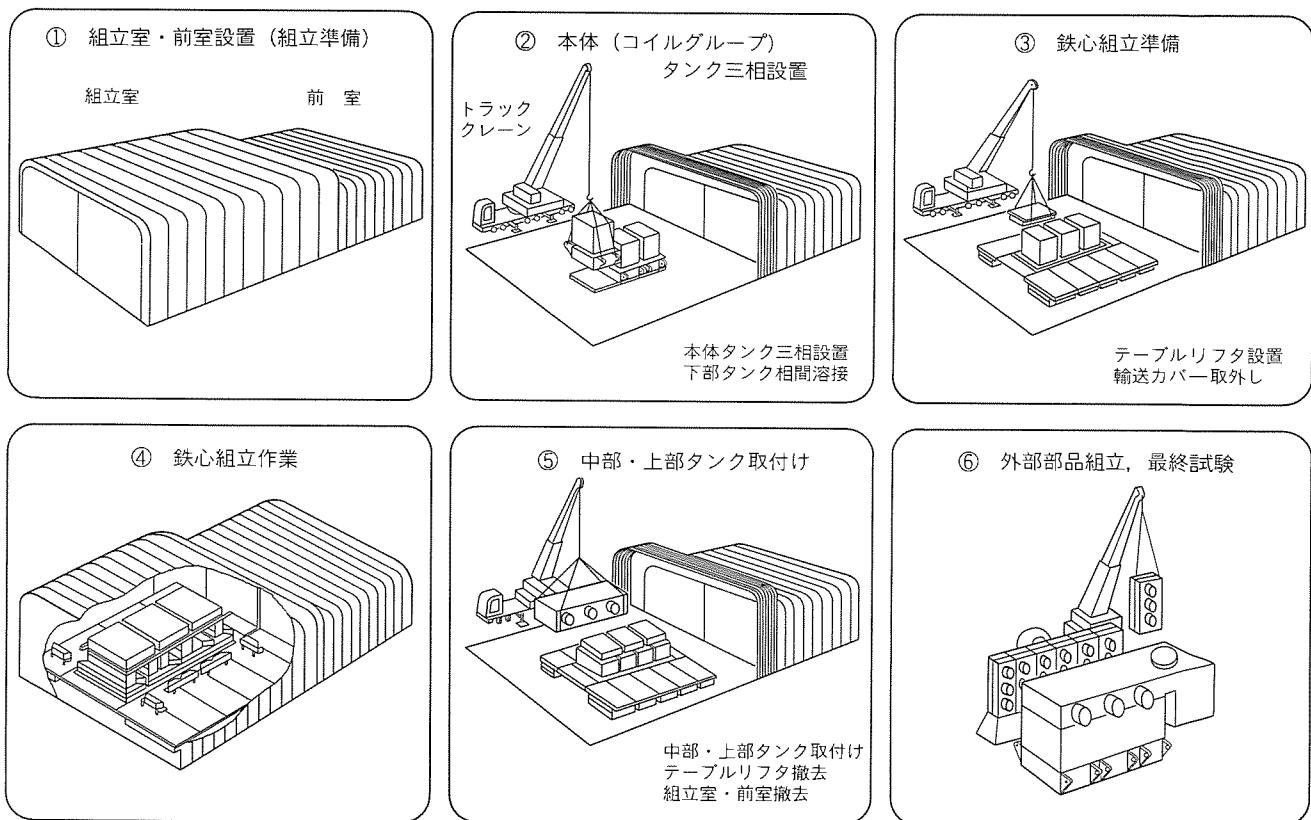


図5. 現地組立工程の概略

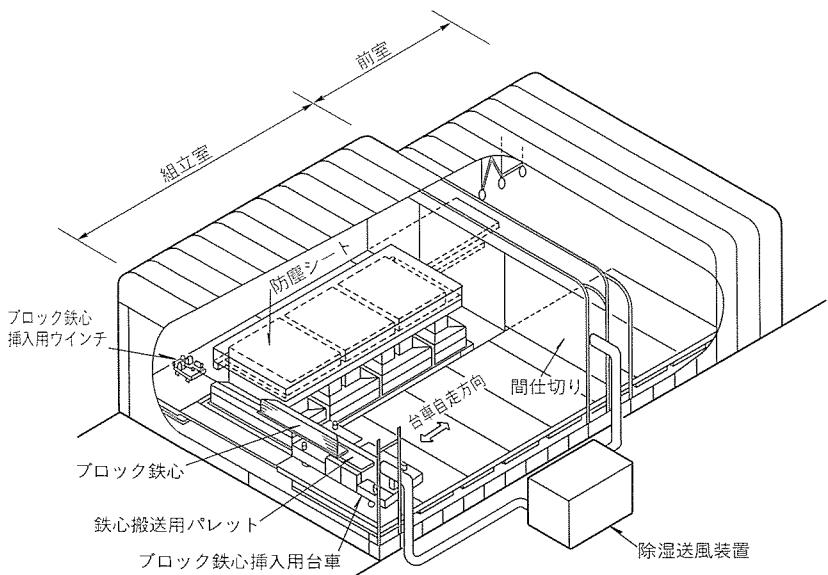


図 6. 現地組立用クリーンハウス(ブロック鉄心挿入時の状態)

き方向に3分割にブロック化(1ブロック当たり約400mm)し、ブロック単位でコイルグループ内に挿入組立するものである。

なお、鉄心は、図8に示すレッグ鉄心(縦方向)とヨーク鉄心(レッグ鉄心を接続する横方向)で構成した外鉄形三相5脚構造である。

作業手順は、次のとおりである。

- (1) 工場で鉄心を自動切断・自動積み装置でブロック化する。
- (2) ブロック単位で工場内鉄心組立→解体→油切りして、コイルグループと同一のフィルムでパックし、鉄心搬送用パレットに積載、さらに防せい(錆)こん包し、発送する。
- (3) 現地の前室内で、ブロック鉄心挿入用台車上にパレットごと積載し、組立室内の鉄心挿入位置まで移動させる(図6参照)。
- (4) 挿入用台車の反対側の挿入用ウインチで引張り、コイルグループ内に挿入する。

なお、ヨーク鉄心は、レッグ鉄心組立後にレッグ鉄心に挿入し、ラップジョイントを形成した。

この工法により、鉄心組立期間を2日間(30%)短縮することができた。図9は鉄心組立完了後のCGPA変圧器を示す。

## 5. 品質管理(検査・試験)

CGPA変圧器の品質管理のポイントは、分解・輸送・現地再組立に対して工場品質を現地で再現できているかを確認することである。この考え方に基づき、既納の275kV CGPA変圧器では、工程ごとにホールドポイントを設けて絶縁物の吸湿、輸送・組立にかかる品質確認を行った。

今回の500kV CGPA変圧器では、一層の品質管理レベルの向上を図るために、次の試験項目を追加した。

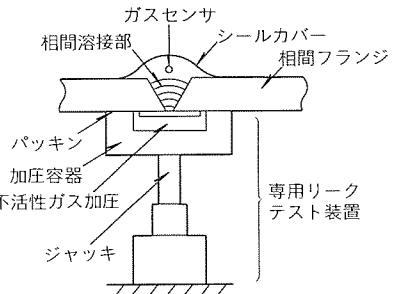
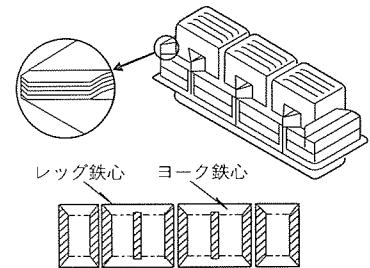


図7. 下部タンク相間溶接部のリークテスト装置



斜線部はブロック挿入するレッグ鉄心を示す。

図8. 外鉄形三相5脚鉄心構造

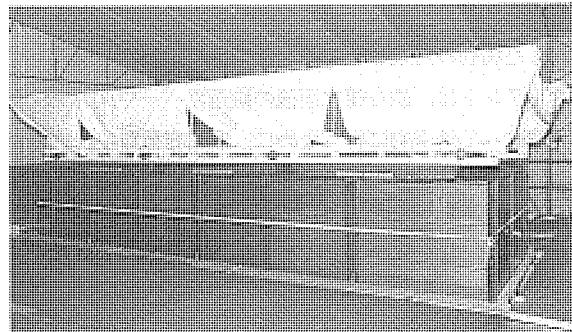


図9. 鉄心組立完了後のCGPA変圧器

- (1) 下部タンク相間溶接部の油密検査(4.2項で詳述)
- (2) 卷線抵抗測定(鉄心組立前に実施)
- (3) 低電圧励磁試験(鉄心組立後に実施)
- (4) 長時間励磁試験(組立完了後に実施)

特に、長時間励磁試験は、磁気回路の異常や絶縁性能を総合的に検証する最終性能確認試験として採用し、良好な結果を得た。

なお、上記(2)(3)は、工場試験で現地試験を想定した試験設備・試験回路でデータをとり、現地試験データと比較して判定を行った。

表2に、通常の組立輸送変圧器とCGPA変圧器との現地試験項目の比較を示す。

## 6. CGPA変圧器の適用効果

今回完成した500kV 300MVA変圧器の適用効果は、次のとおりである。

表2. 通常の組立輸送変圧器とCGPA変圧器との現地試験項目の比較

通常の組立輸送変圧器	既納の275kV CGPA変圧器	今回の500kV CGPA変圧器
●一般電気試験 (変圧比・極性チェック等)	同 左	同 左
●官庁検査 (絶縁耐力・温度試験)		
●インピーダンス試験 (組立完了後)		同 左
●無負荷試験 (組立完了後)		
●部分放電試験 (組立完了後)		
		目的 ●巻線抵抗測定(鉄心組立前) →コイルグループの輸送中の健全性確認 ●低電圧励磁試験(鉄心組立後) →磁気回路の健全性確認 ●長時間励磁試験(組立完了後) →磁気回路の異常、絶縁性能を総合的に検証

(1) 最大輸送質量を22トンに大幅低減でき、輸送制約が大幅に解消され、工場から変電所まで小型トレーラでの道路輸送を行うことができた。

(2) 鉄心は、コイルグループと分離して輸送するので、組立輸送方式変圧器のように輸送質量低減のために各相ごとに分割した特別三相鉄心構造にする必要がなく、相間部を共用化した普通三相鉄心構造(外鉄形三相5脚構造)にでき、特別三相器に比べて据付け面積を15%、鉄損を13%低減できた。

CGPA変圧器の適用効果を図10に示す。

## 7. む す び

今回、275kV CGPA変圧器の製作実績と蓄積技術を踏まえて工法の改善を加えた500kV CGPA変圧器を完成したので、その概要を紹介した。

今後、CGPA変圧器は、輸送条件の悪化、輸送費の高騰などの輸送問題に対する根本的な解決策として、特に山間部の変電所・大規模水力発電所・都市部の地下変電所などに、その適用が拡大していくと予想される。既に変電所用500kV 1,000MVA変圧器を始め揚水発電所用500kV主変圧器などの製作も決定している。

最後に、この変圧器の実用化に当たって終始御指導をいただいた関西電力(株)の関係各位に深く感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) 三浦良和、瀬藤憲治、祖開克二、西本 昂、新海 拡：

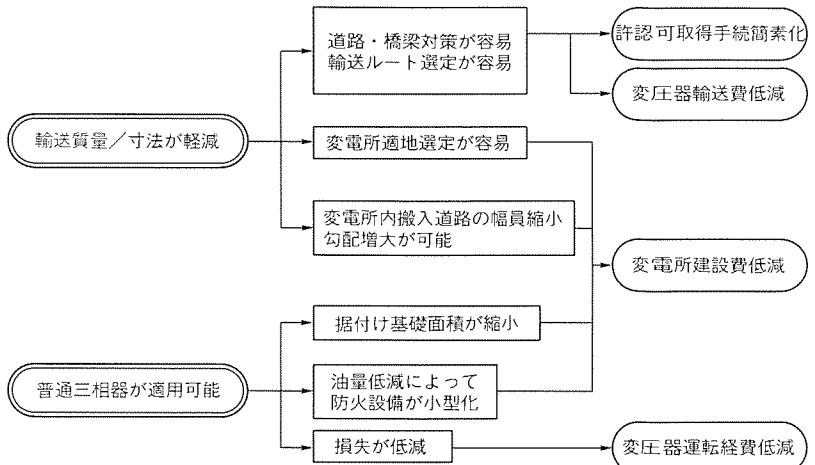


図10. CGPA変圧器の適用効果

関西電力(株)神戸変電所納め275kV 300MVA CGPA変圧器、三菱電機技報、60, No.4, 221~225 (1986)

- (2) 松村 晋、菅 寿郎：CGPA変圧器(変圧器の新しい輸送方式)、三菱電機技報、54, No.11, 37~40 (1980)
- (3) 齊藤紀彦、東狐義憲、中尾浩之、玉置栄一、中塚昭治、佐久間 隆：500kV級分解輸送方式変圧器の実用化について、平成5年電気学会全国大会、914 (1993)
- (4) 松村 晋、伊藤俊一、杉本 修、石坂 忍、田村良平、菅 寿郎、玉置栄一、光庵豊一：コイルグループパッケージ形分解輸送方式変圧器の開発および500kV実系統試験、昭和55年電気学会全国大会、570 (1980)
- (5) 松村 晋、菅 寿郎：パッケージ方式による分解輸送方式、昭和54年電気関係学会関西支部連合大会、G3-38 (1979)

# 24kV用キュービクル形ガス絶縁開閉装置(C-GIS)

片山 明\* 長谷川 裕\* 大河原正博\* 井上隆一\*

## 1. まえがき

OA・FA化の進展、受電システムの多様化・複雑化、地価高騰及び人手不足・人件費高騰により、受配電設備には、より高い信頼性、個々の設置に対する構成最適化、省スペース化及び省メンテナンス化がますます強く求められている。特高受配電設備について、この市場ニーズと社会的背景を図1に示す<sup>(1)</sup>。

キュービクル形ガス絶縁開閉装置(C-GIS)は、このニーズにこたえる製品として高電圧・大容量のものから製品化され普及してきたが<sup>(2)</sup>、現在更に信頼性の向上や設備の縮小化が求められている。

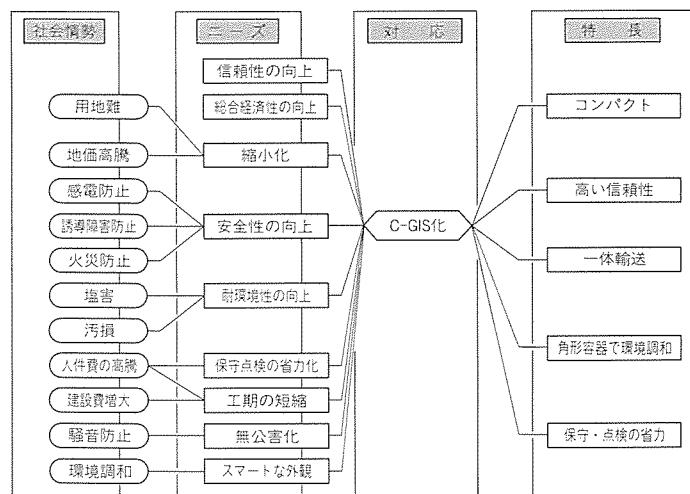
中電圧・中小容量の24/36kV C-GISについて、当社は1988年に製品化以来多数の製作実績をもつが、その経験を踏まえ、このたび上記の要求に対応した24kV・25kA用GX-20V形C-GISを製品化、納入を開始した。

本稿では、このC-GISについて構成、技術的検討及び検証試験の概要を述べる。

## 2. GX-20V形C-GISの構成

### 2.1 特長

22kV配電系統の受電は、“常用・予備二回線1MOF(計器用変圧変流器)方式”及び“スポットネットワーク方式”的適用が一般的である。しかし、その他の方式の適用も多く、また各需要家の負荷設備・電気室スペースなど固有の条件も



出典：電気学会技術報告

図1. 特高受配電設備の市場ニーズと社会的背景

様々であり、さらに近年では無停電で設備保守を行うため“2MOF方式”や“MOFバイパス方式”<sup>(1)(3)</sup>(2.2節(5)参照)が推奨されるなど、システム構成が個別化・複雑化する傾向にある。

C-GISの形態はユニット形と列盤形に分類できるが、当社では従来からシステム構成の自由度の高い列盤形を基本としている。上記の傾向に対し、さらに構成の自由度を向上するため、このC-GISでは各ユニットをモジュール化した。

図2にこのC-GISの外観を示す。環境調和のため、従来の閉鎖形開閉装置に対して違和感のないものとした。

### 2.2 構造

#### (1) 全体構成

列盤の各ユニットは、形状・寸法・接続部・主回路導体位置が標準化されたモジュールを組み合わせて構成されており、それらの選択・組合せによって回路を自由に構成することができる。

試験・検査は、モジュール、ユニット及びC-GIS全体組立状態で実施されている。また、各ユニットの前面上部に操作機構を、前面下部にそれらの制御部分をモジュール化して配置し、取扱い及び安全性の向上を図った。

MOFバイパス方式受電設備を構成する場合について、このC-GISと当社従来形C-GISの比較を表1に示す。

#### (2) 受電ユニット

ユニットの前上部に3位置(接続・断路・接地)断路器本体を収納する母線モジュールを配置した。各ユニットの母線

モジュールは列盤時に接続され、共通のガス区分を構成する。母線モジュールの下部にはVCB(真空遮断器)

モジュールが接続され、その後部には断路器や接地開閉器を収納した受電断路器モジュールが接続されてい

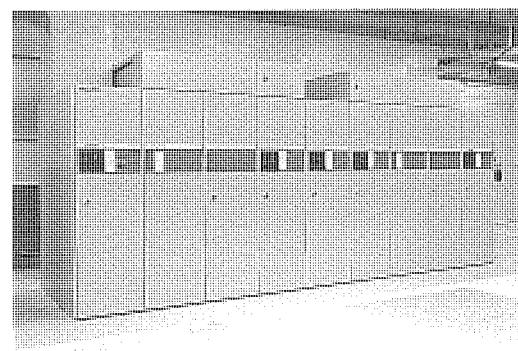
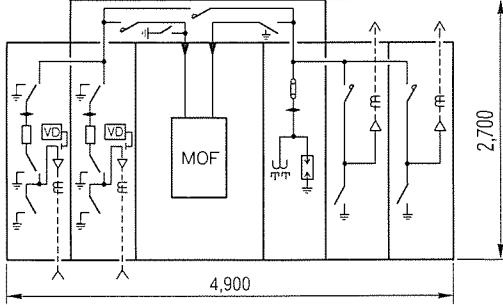
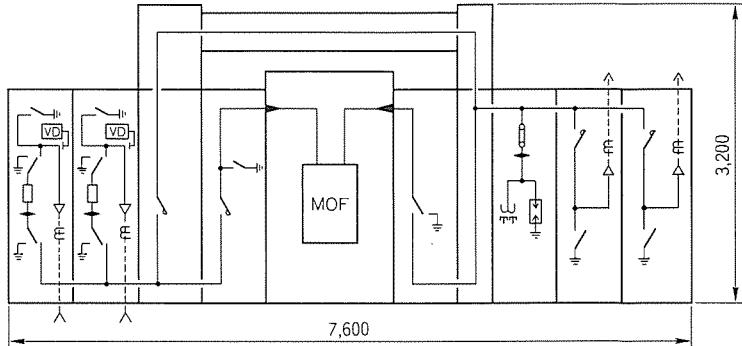
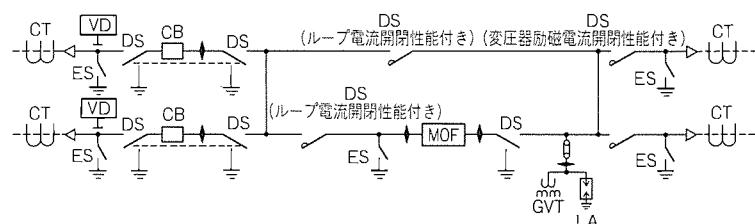


図2. GX-20V形 24kV C-GISの外観

表1. “MOFバイパス方式”受電設備における構成比較

C-GIS形名	占有床面積(m <sup>2</sup> )	床面積比 (%)	構 成
GX-20V	8.1	64	
GX-20G (当社従来機種)	12.5	100	

注 右図の回路を構成する場合の比較を示す。



る(図3参照)。

### (3) 変圧器一次ユニット

母線モジュールには、ばね操作の変圧器励磁電流開閉性能付き断路器が収納されている。母線モジュールの下部には接地開閉器モジュールが接続されている(図4参照)。

### (4) VCB

VCBは、単体での組立・調整が可能なため信頼性が高く、操作機構のメンテナンスが容易な図5に示す構成とした。

VST(真空バルブ)接点には長い電流開閉寿命をもつ材料を用い、また構造を風車形として小電流から短絡電流までの安定した遮断性能を得た。操作機構は当社VCBで多数の使用実績をもつ電動ばね操作機構を採用した。

### (5) MOFバイパス回路モジュール

MOFの検定有効期間は15年であり、従来の1M OFによる受電方式ではその更新・取替作業に長時間の停電を要していた。しかし最近、より事故率・障害率の低い回路方式が望まれるようになり、無停電

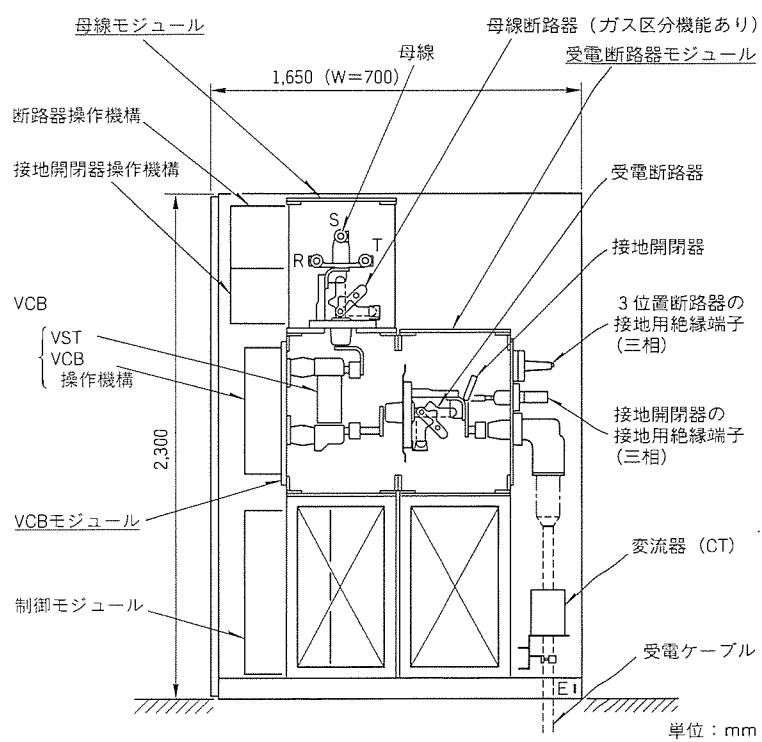


図3. 受電ユニット

にて MOF の更新・取替作業を行うため 2 MOF 方式のほか、設備を経済的に構成できる MOF バイパス方式の採用が推奨されている。各受電方式における事故率・障害率を表 2 に示す<sup>(4)</sup>。

この C-GIS では、バイパス回路の構成機器を収納するモジュールを MOF ユニット上部に設置することにより、バイパス回路設置による据付け面積の増加を抑えた(図 6 参照)。

#### (6) 断路器

図 7 に受電断路器モジュールに収納する 3 位置断路器を示す。この断路器ではベースを一体のエポキシ注型絶縁物とし、構成を単純化することによって信頼性の向上と小型化を図り、同時にベースにガス区分スペーサの機能をもたせた。

### 2.3 定格

C-GIS 本体の定格及び C-GIS に収納される VCB の定格を、それぞれ表 3 及び表 4 に示す。

## 3. 技術的検討

#### (1) モジュールのガス容器強度

各モジュールの容器は、最高使用ガス圧力及び真空引き作業時の負圧に対して十分な強度をもたねばならない。また、万一の内部せん(閃)絡事故による圧力上昇に対してもガスを外部に放出しない強度が必要である。

C-GIS 全体の軽量化を図るため、容器は薄板鋼板を折り曲げた波板構造を基本とし、有限要素法による解析を行ってその形状・寸法を決定した。機械計算の結果を図 8 に示す。

#### (2) VCB と主回路導体配置

C-GIS に収納される VCB は、SF<sub>6</sub> ガスの優れた絶縁性能によって相間距離や主回路-大地間距離を縮小できる。

主回路導体の配置は、その近接が VST に及ぼす影響を計算機を用いて模擬するとともに、試験によって定格遮断電流における遮断性能を検証した<sup>(4)</sup>。解析結果を表 5 に示す。

#### (3) 断路器エポキシ注型絶縁ベース

断路器のベースには、開閉操作力、母線電磁力、ガス区分圧力差・ガスケット締付力、ガス容器への取付拘束力、熱膨脹力・収縮力などが作用する。これらに対する強度を検討し、試作・検証を行いベース形状を決定した。母線電磁力に対し、有限要素法を用いた機械計算の結果を図 9 に示す。

#### (4) 変圧器ヒートラン試験用端子

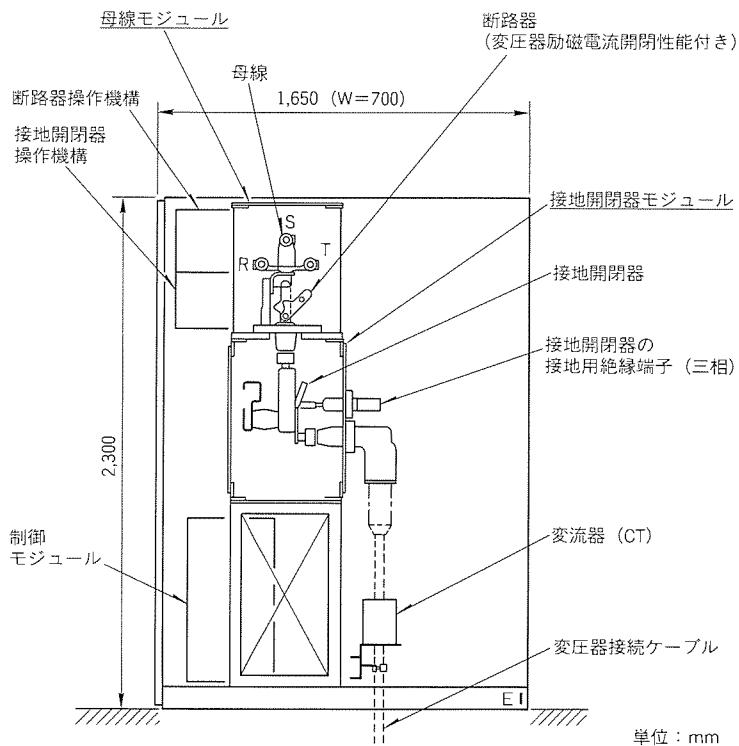


図 4. 変圧器一次ユニット

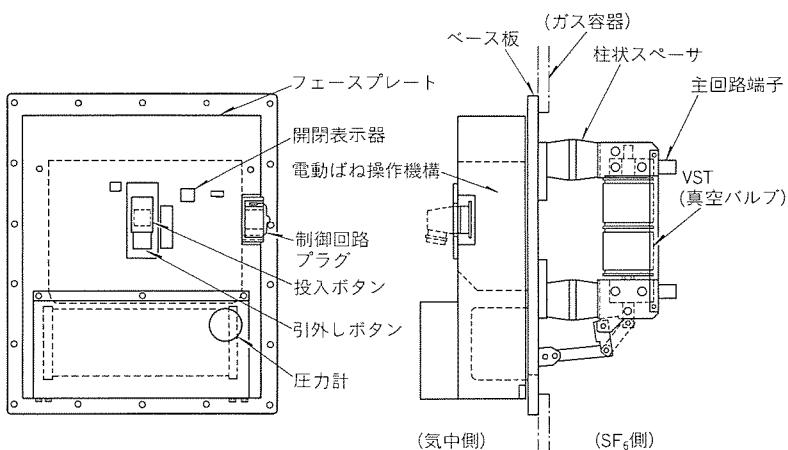


図 5. 20-VPR-25B(R)形 VCB

3 位置断路器や接地開閉器の接地側端子をガス容器外部に引き出した接地用絶縁端子は、主回路の接地のほか、絶縁抵抗試験や耐電圧試験に使用される<sup>(5)</sup>。

この C-GIS では変圧器一次ユニットから変圧器のヒートラン試験を実施できるように、接地開閉器の接地用絶縁端子に通電容量をもつものを採用した。

表 6 に各接地用絶縁端子の耐電圧・通電性能を示す。

## 4. 検証試験

断路器、VCB などの収納機器はそれぞれの規格に準拠して性能を検証し、またユニット列盤状態における耐電圧、温度上昇、短時間耐電流などの基本的性能を確認した。さらに、断路器組立状態でのヒートショック・ヒートサイクル試験、C-GIS ユニット増設時を考慮した系統運転電圧・現地耐電

表2. 各受電方式における事故率・障害率

回路名称	受電の方式	C-GIS	気中絶縁スイッチギヤ
一回線受電	DS CB MOF	事故率 0.043	5.31
		障害率 0.980	12.49
二回線受電	DS CB DS MOF	事故率 0.014	3.89
		障害率 0.210	11.07
二回線受電 MOFバイパス	DS CB DS DS MOF DS	事故率 0.006	1.79
		障害率 0.050	8.40
二回線受電 2パンク	DS CB DS MOF DS	事故率 0.008	2.09
		障害率 0.080	2.30
二回線受電 2パンク MOFバイパス	DS CB DS DS MOF DS DS	事故率 0.00	0.00
		障害率 0.00	0.00

注 事故・障害率は100年間の運転に対して発生する頻度を表す。

出典：電気学会技術報告<sup>(1)</sup>

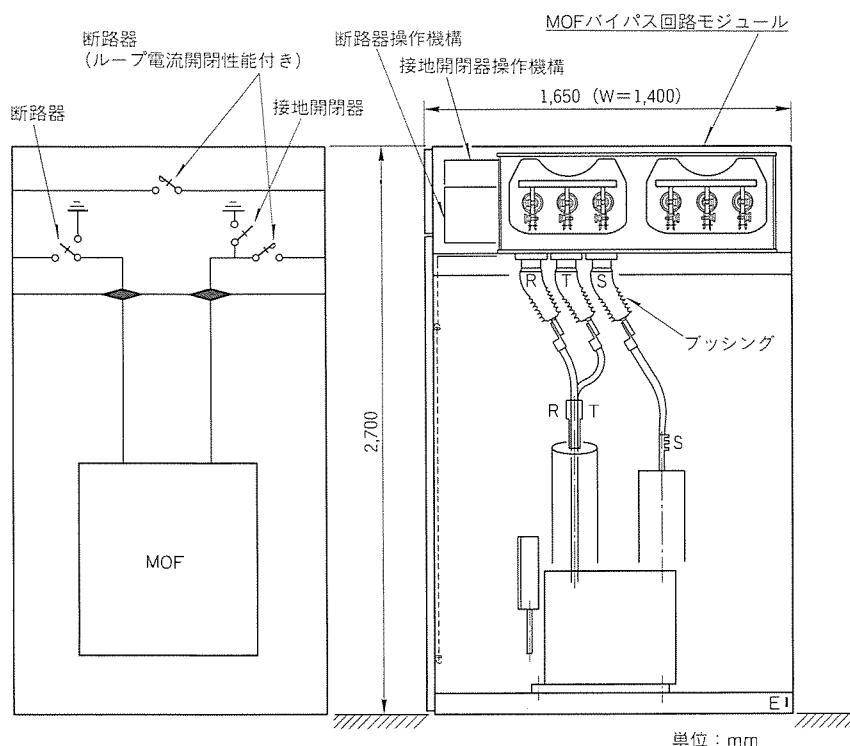


図6. MOFユニット(バイパス回路付き)

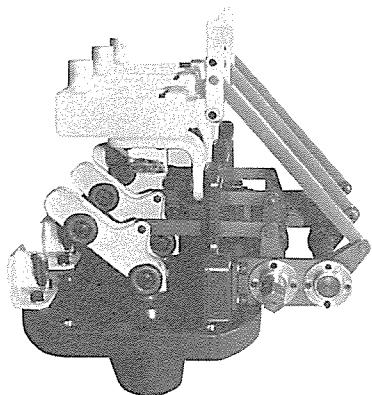


図7. 3位置断路器本体

圧試験電圧の重畠耐電圧試験など、実際の運用を考えた裕度試験を実施し、十分な実用性能をもつことを確認した。

このC-GISに特徴的な試験の結果を次に示す。

#### (1) ガス容器の圧力試験

“電気設備の技術基準”第52条第2号一には“1kg/cm<sup>2</sup>をこえる絶縁ガスの圧力を受ける部分であって外気に接する部分”に対する圧力試験が規定されている。このC-GISの最高使用ガス圧力は0.08MPa{0.8kgf/cm<sup>2</sup>-g}であるのでこの規定は適用されないが、規定に準じ、最高使用圧力の1.5倍で水圧試験を実施し、各容器の強度を確認した。

また、内部閃絡事故時の圧力上昇に対しても、各容器の強度に十分余裕のあることを確認した。表7に試験結果を示す。

#### (2) C-GIS収納状態におけるVCB遮断試験

VSTのシールド電位・アーク電磁力への影響を計算機によって解析し、VC

表4. VCBの定格

形名	20-VPR-25B(R)
準拠規格	JEC-2300
定格電圧	24kV
絶縁階級	20号B
定格電流	630A, 1,250A
定格遮断電流	25kA
定格遮断時間	3サイクル
操作方式	電動ばね操作

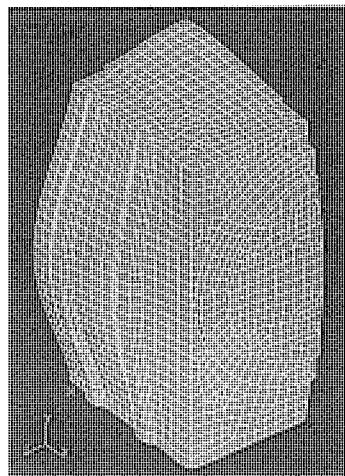
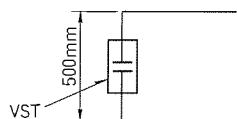


図8. ガス容器(1/4モデル)の応力解析

表5. 主回路導体近接のVSTへの影響

導体配置条件	条件1	条件2	条件3	条件4
近接状態	寸法A (mm)	320	160	160
	寸法B (mm)	280	280	40
解析結果	シールド電位比 (pu)*	0.92	0.85	0.78
	外部電磁力比 (pu)*	1.62	1.94	2.09

注 \* 標準配置状態(右図、気中絶縁閉鎖形配電装置に収納のV CBを模擬)におけるシールド電位・外部電磁力に対する比較値を示す。



B付近のC-GISの導体配置を決定した(3.2節参照)。この配置により、C-GIS収納状態で遮断試験を行い、十分な遮断性能をもつことを確認した。

## 5. むすび

標準化したモジュールの組合せによる各ユニット及びC-GISの最適化・縮小化については、このC-GISの実際の受電設備適用において所期の効果が得られ、客先からも御好評をいただいた。また“MOFバイパス回路モジュール”使用設備も計画中であり、今後の適用拡大が予想される。

特別高圧及び高圧受配電設備のC-GIS化は、今後もますます進展するとともに、それに収納される保護、制御、計測及び表示装置の複合化・電子化も進行中である。さらに、予測保全監視システムも含むC-GISのインテリジェント化が進められており、今後実用的なものとしての普及が期待される。

## 参考文献

- (1) 電気学会：キューピクル形ガス絶縁開閉装置(C-GIS)の技術動向、電気学会技術報告(II部)、第442号、6～51(1992)
- (2) 信崎泰秀、丹羽春美、寺田健次、笹森健次、太田照雄：キューピクル形ガス絶縁変電所、三菱電機技報、57、

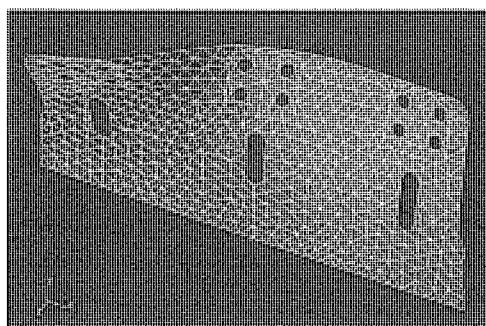


図9. 断路器ベースの応力解析(三相短絡電流により、左側の固定端子支持部に最大電磁力が働いた場合を示す。)

表6. 断路器・接地開閉器の接地用絶縁端子

性 能	接 地 用 絶 縁 端 子	3位置断路器用		接 地 開 閉 器 用
		三 相	单 相	三 相
相間耐電圧 (10分間)	AC 2kV	—	—	AC 50kV DC 57.5kV
対地耐電圧 (10分間)	AC 28.75kV	AC 2kV	—	AC 28.75kV DC 57.5kV
通電性能	—	—	—	AC 400A
据付け・保守点検作業のとき実施可能な試験	絶縁抵抗試験 現地耐電圧試験 VCB真空チェック VCB主回路抵抗測定 VCB動作時間測定	絶縁抵抗試験 (左記低圧側端子) (左記共通側端子) (左記共通側端子)	絶縁抵抗試験 現地耐電圧試験 ケーブル耐電圧試験 変圧器ヒートラン試験	絶縁抵抗試験 現地耐電圧試験 ケーブル耐電圧試験 変圧器ヒートラン試験

表7. ガス容器の水圧試験結果

単位: MPa

ガス容器	降伏圧力	破壊圧力
母線モジュール	0.19	1.25
VCB・ケーブル側モジュール	0.13	0.88

No.3, 236～240 (1983)

- (3) 電気協同研究会：特別高圧需要家受電設備、電気協同研究、47、No.5、32～33(1993)
- (4) 長谷川 裕、高橋正行、古賀博美、内田芳則：真空遮断器のSF<sub>6</sub>ガス中使用に関する一検討、電気学会開閉保護研究会資料、No. SP-92-17 (1992)
- (5) 電気協同研究会：ガス絶縁開閉装置の標準化、電気協同研究、39、No.6、25(1984)

# ハードウェア記述言語によるASIC設計向け トップダウンCADシステム

小野眞司\* 布上裕之\* 古茂田道夫\* 村上雅映\* 福水利之\*\*

## 1. まえがき

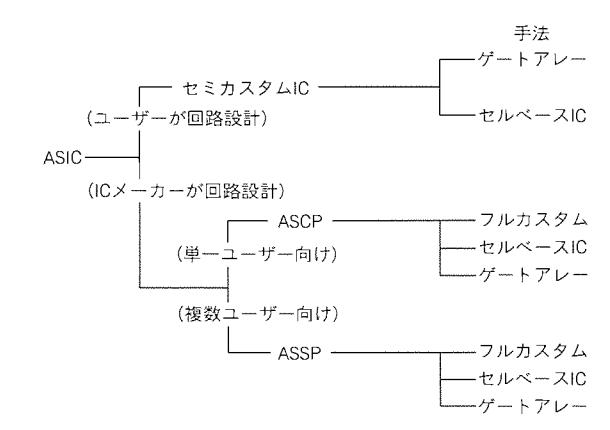
電子機器の高機能化・小型化に伴い、ASIC(Application Specific Integrated Circuit)が盛んに利用されるようになってきた。ASICの用途はワークステーションを始めとするコンピュータ、プリンタ等のコンピュータ周辺装置、通信装置、ディジタル映像機器等、幅広い分野・製品に用いられている。現在、最大ゲート数が100万ゲートのゲートアレーが市場に投入されている。このように大規模ASICを実現するための技術として、

- (1) ウェーハプロセス(製造)技術
- (2) デバイス設計技術
- (3) CAD技術

がある。ユーザーは製品の差別化として、高機能化とともに短期間に市場投入するため、ASICの設計期間を短縮できる設計サポートが重要になってきた。従来の設計手法を用いた機能設計／論理設計／論理回路設計の工程にハードウェア記述言語HDL(Hardware Description Language)を用いたトップダウンデザインと呼ばれる設計手法を導入することにより、短時間で効率的に行うことが可能になってきた。

本稿ではこのトップダウンデザインをサポートするASIC設計用CADシステムの開発を行ったので以下トップダウンCADシステム、設計サポート及び設計例について報告する。

## 2. トップダウンデザイン



(注) セミカスタムICには機種としてゲートアレーとセルベースICがある。

ASIC : Application Specific IC

ASSP : Application Specific Standard Product

ASCP : Application Specific Custom Product

## 2.1 当社ASICの特徴

ASICは特定用途向けICの総称であり、ユーザーが論理設計を行うセミカスタムICと、ICメーカーが論理設計を行う複数ユーザー向けの特定用途に限定したASSP(Application Specific Standard Product)及び特定用途でかつ特定ユーザー向けに開発するASCP(Application Specific Custom Product)がある(図1)。ASICの市場規模は図2のように1992年に約98億ドルに達したと推定され、さらに今後数年間にわたり年率10%以上の成長が期待されている。当社のASICはプロセスドライバと呼ばれるメモリ製品用に開発した先端微細化プロセスをベースに、内部ゲート間を金属配線で接続する多層配線技術を開発し、大規模集積化、超高速動作を実現してきた。この結果として、大規模トランジスタをワンチップに集積可能とし(0.5μmルール品で100万ゲート)、同時に高速動作(0.5μmルール品、電源電圧3.3Vで2NANDゲートの伝搬遅延時間190ps)を実現した。

さらに、システムの信号数の増加(16ビット→32ビット→64ビット→)に伴い、ASICがインターフェースする信号数も増加してきた。ASICでは現在200ピン前後のパッケージが主流となっており、500ピンクラス以上のパッケージの要求もでている。当社では、576ピンを始めとするTCP(Tape Carrier Package)を準備しており、多ピン化に対応している。

## 2.2 トップダウン設計のASICへの適用

大規模集積化に伴って長期化するASICの設計期間を短縮できる設計サポートが重要になってきた。この要求に対し、トップダウン設計が機能設計から論理回路設計までの設計期間を短縮するための手段として用いられている。動作・機能をHDLを用いて記述し、機能シミュレーションで動作を確

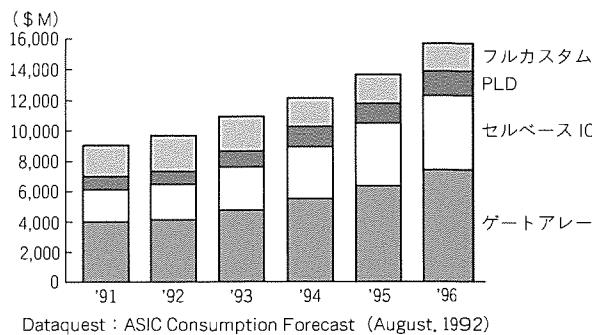


図1. ASICの定義

図2. ASICの世界市場

認した後、論理回路を論理合成ツールを用いて生成する。すなわち、システム設計者がシステムに必要な機能を記述することで最適な論理回路が生成される。システムの仕様を上位レベルで確認することが可能になるので、システム設計者にとって仕様を明確に規定することができ、システム設計サイドと LSI 設計サイドのインターフェースがスムーズに進められる。また、ゲートレベルの論理回路設計が不要であること及び論理シミュレーションでの論理動作の確認が容易であることから入手による論理回路設計に比べて 30 %以上の設計期間短縮が期待できる。

### 3. トップダウンCADシステム

大規模 ASIC に対する設計期間短縮の要求にこたえるべく CAD 技術も著しく進歩してきた。論理合成の性能向上により、ハードウェア記述言語 HDL を用いるトップダウンデザインをサポートする CAD システムの構築と実用化が達成でき、大幅な設計期間の短縮に貢献し、大規模 ASIC 設計では不可欠のものとなった。

#### 3.1 トップダウンデザイン概略フロー

図 3 にトップダウンデザインの設計フローの概要を示す。

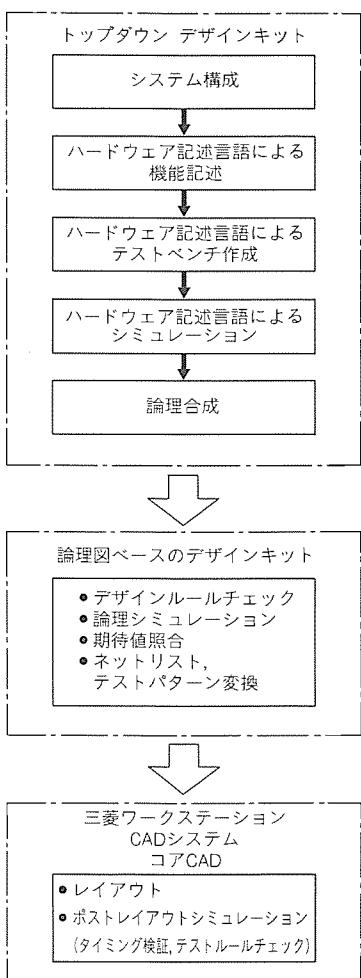


図 3. トップダウンデザインの設計フロー

今回、構築したトップダウン CAD システムは、トップダウンデザインキット、論理回路ベースのデザインキットと三菱ワークステーション CAD システムで構成される。

#### (1) トップダウンデザインキット

トップダウンデザインキットは、EDA (Electronic Design Automation) ベンダの論理合成ツールと機能検証ツールで主として構成され、当社は、ハードウェア記述言語 HDL から当社 ASIC に変換するためのライブラリを準備している。

設計フローについて以下に説明する。まず、システムの機能を HDL で記述する。このとき、対象とする ASIC デバイスのテクノロジーに依存せず実現したい機能のみに着目して設計を行う。論理合成ツールを用いて ASIC に変換するブロックに対しては、合成可能な言語範囲である RTL (Register Transfer Level) の HDL を作成する。

システムの機能を検証するために、HDL でテストベンチの作成を行う。テストベンチは、システムに入力するテストベクタの記述とシステムからの出力信号を比較するための期待値を記述することにより、シミュレーションを実行しながらシステムの動作確認を同時にを行うことができる。テストベンチの特徴は、テストベクタを従来の 1/0 のパターンではなく、HDL を用いてプログラミングすることで少量の記述から多量のテストベクタを生成できることと、設計者がトレースする信号に対して pass, fail 等の意味付けした言葉や整数を用いることができるということである。

HDL による機能レベルのシミュレーションは、ゲートレベルのシミュレーションと比較して処理速度が数倍から数十倍高速であり、機能検証、デバッグ作業を効率良く行うことが可能である。

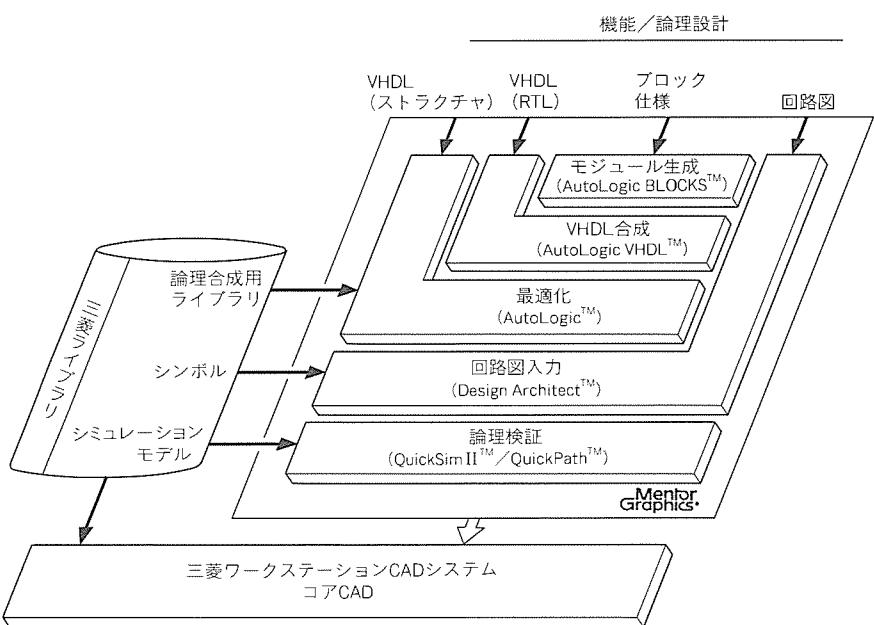


図 4. 三菱電機トップダウンデザインキット (Mentor Graphics® 社と共同開発)

システムの機能の検証が完了すると、論理合成ツールにより、HDL から対象となる ASIC に変換し、論理図又はネットリストを生成する。このとき、合成の条件として面積最小かパス遅延最小かを選択して、設計者の要求を満たす回路を生成する。また、タイミング制約を満足する回路を生成するために、FF、ラッチのセットアップ時間、ホールド時間の指定を行う。ファンアウト容量の制約に関しては、合成用ライブラリで定義している出力ピンに接続可能な最大ファンアウト容量以下の回路を生成することができる。

### (2) 論理図ベースのデザインキット

トップダウンデザインキットを用いて HDL から当社 ASIC の論理図又はネットリストに変換後、従来からサポートしている論理図ベースのデザインキットを用いて、ゲートレベルの詳細な論理検証を行う。

ここでの論理検証作業は、当社が開発したデザインルールチェックのプログラムを用いて、論理図又はネットリストに対して ASIC の設計制約である論理接続の正当性チェックや配置配線の可能性を判定する。次に、EDA ベンダの論理シミュレータを用いて、仮想配線遅延シミュレーションを行いシミュレーション結果と期待値との照合により、タイミングを考慮した論理動作の正しさを確認する。当社が、遅延計算を行うためのプログラムとシミュレーションモデルを組み込むことにより、当社 ASIC デバイスの動作スピードとの一致度を保証している。

論理検証作業が終了すると、当社ワークステーション CAD システム用ネットリストとテストパターンに変換を行う。

### (3) 当社ワークステーション CAD システム

論理図ベースのデザインキットによる論理検証後、当社ワークステー

ション CAD システム(コア CAD)を用いてレイアウト、及びポストレイアウトシミュレーションを行うことにより、設計サインオフ(マスク製作の認証)の作業を顧客と同一設計環境下で実施することができる。このことにより、顧客と当社との間のフィードバックがなくなり設計期間の短縮が可能となる。

### 3.2 EAD ベンダ対応の CAD システム

EAD ベンダであるメンター、ケイデンス、シノプシス各社が提供する CAD システム上に構築したトップダウンデザインを行う当社 ASIC 設計環境の説明を行う。

#### (1) メンター社と共同開発した CAD システム

図 4 は、メンター社の CAD システム上に構築している当社のトップダウンデザインキットである。VHDL を用いてデバイステクノロジーに依存しない機能設計から当社 ASIC へと最適に論理合成ツール AutoLogic<sup>TM</sup> を用いて変換を行う。

図 5 は、メンター社の論理図ベースのデザインキットで使用するグラフィカルな設計フローである。メンター社の Fal-

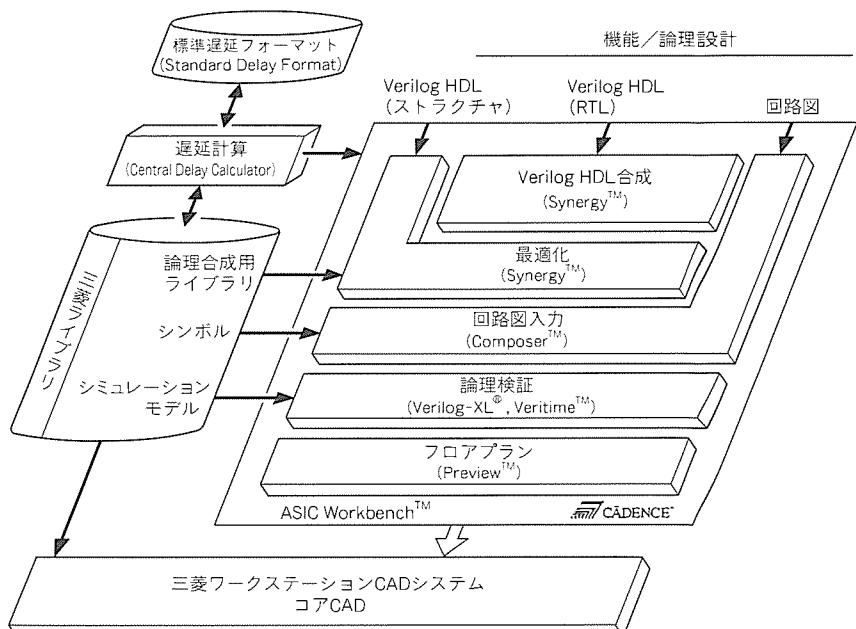


図 6. 三菱電機トップダウンデザインキット (CADENCE<sup>TM</sup>社と共同開発)

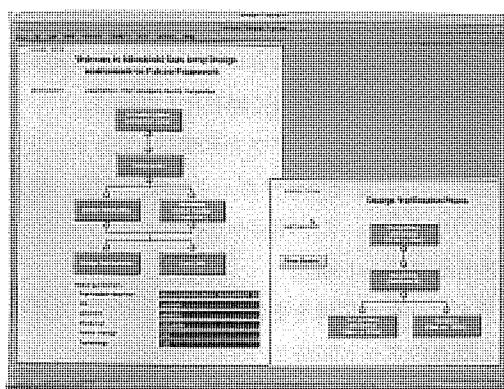


図 5. Mentor Graphics<sup>®</sup> 社ツールを用いた当社設計環境

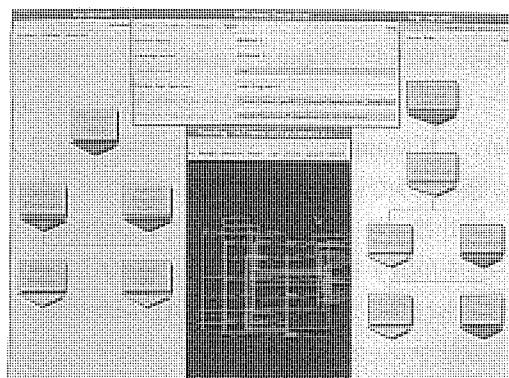


図 7. CADENCE<sup>TM</sup>社ツールを用いた当社設計環境

con フレームワーク<sup>TM</sup>上に DSS (Decision Support System)<sup>TM</sup>を使用して、当社 ASIC の設計フローを実現している。この設計フローを利用すれば、フロー中のボックスからツールを起動することができるため、当社 ASIC の設計手順、方法を熟知していない設計者でも容易に、かつ、誤りなく設計作業を遂行できる。

### (2) ケイデンス社と共同開発した CAD システム

図 6 は、ケイデンス社の CAD システム上に構築している当社のトップダウンデザインキットである。Verilog HDL を用いてデバイステクノロジーに依存しない機能設計から当社 ASIC へと最適に論理合成ツール Synergy<sup>TM</sup>を用いて変換を行う。

図 7 は、ケイデンス社の論理図ベースのデザインキットで使用するグラフィカルな設計フローである。ケイデンス社の Design フレームワーク II<sup>TM</sup> 上に SKILL 言語を使用して、当社 ASIC の設計フローを実現している。

### (3) シノプシス社と共同開発した CAD システム

図 8 は、シノプシス社の CAD システム上に構築している当社のトップダウンデザインキットである。Verilog HDL、又は、VHDL を用いてデバイステクノロジーに依存しない機能設計から当社 ASIC へと最適に論理合成ツール Design Compiler<sup>TM</sup>を用いて変換を行う。

#### 3.3 当社ワークステーションCADシステム

当社ワークステーション CAD システムは、複数の EDA ベンダの CAD システム、CAD ツールと組み合わせて使用可能のように設計しているため、顧客所有の設計環境に当社デザインキットと当社ワークステーション CAD システムを導入するだけで当社 ASIC のすべての設計作業を実施することが可能となる。

当社ワークステーション CAD システムの特徴は、マクロセルの入力容量、及び RC を考慮した詳細な遅延計算、テスト時のテスタスキューを考慮した詳細なタイミング検証等を具備しているため、ASIC デバイスの ES (Engineering Sample)、CS (Commercial Sample) 出荷時のトラブル、不具合が極めて少ない。

また、設計者にとって便利なツールである消費電力見積、不要ゲートを削減するセルリダクション等がある。

図 9 は、当社ワークステーション CAD システムのグラフィカルな設計フローである。マルチワークステーションで動作可能なように EDA 業界標準の motif を用いて設計している。

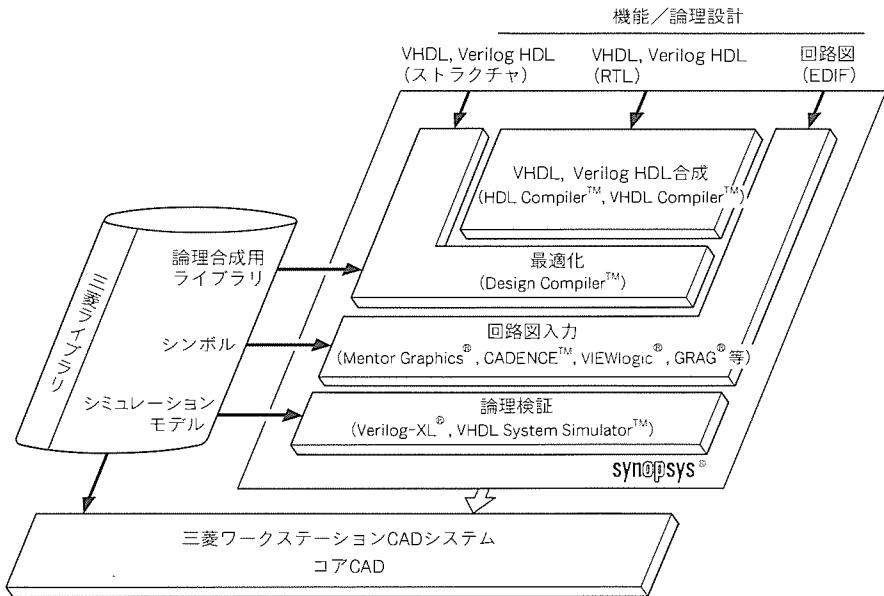


図 8. 三菱電機トップダウンデザインキット (Synopsys<sup>®</sup> 社と共同開発)

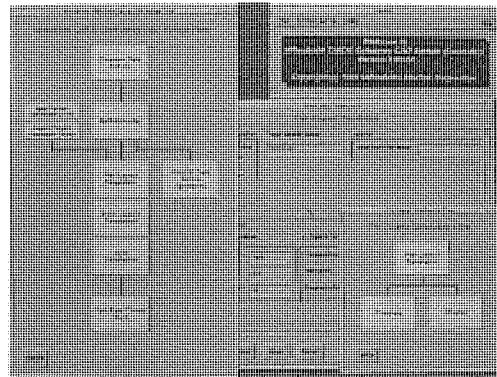


図 9. 当社ワークステーションCADシステムの設計環境

#### 3.4 今後のトップダウンCADシステム

現在の論理合成ツールはサポートされている HDL 構文がツールごとに異なるため、HDL でシステム検証が完了した後、論理合成を実行する段階にいたって合成不可能になる場合や機能レベルとは異なる動作の回路が得られる場合が存在する。

また、近年、プロセスの微細化、回路規模の増大に伴って論理とレイアウトとの不整合が顕著になってきている。これは、フロントエンドの論理レベルで一律に考慮している仮想配線長と、バックエンドでの実レイアウト上の実配線長との誤差が回路規模の増大によって顕在化している。

そのため、今後のトップダウンデザインキットに要求される項目として、①論理合成サポート環境の充実、②フロアプランナのサポート、の 2 項目が挙げられる。

##### (1) 論理合成サポート環境

トップダウン設計環境を更に充実するために、HDL の回路記述と既存のゲート回路との混在の開発環境をより整備する必要がある。さらに、回路図入力と同様のユーザーインターフェースで HDL テンプレートを作成するツールや、状態遷

移図等のグラフィック入力から HDL を自動生成するツールの構築提供、RTL レベルの HDL 作成をアシストするツールの提供といった HDL 作成開発及び論理合成のサポートを今後検討していく必要がある。

#### (2) フロアプランナ

大規模回路におけるフロントエンドとバックエンドとのギャップを埋めるべく、フロントエンド側でのレイアウト見積が必要不可欠となっている。そのため、今後フロントエンドとバックエンドをつなぐツールとしてのフロアプランナが必ず(須)である。

フロアプランナは、あらかじめ論理設計段階において機能ブロックの配置を見積ることにより、論理レベルでの仮想配線長の精度を上げることが可能となり、バックエンド側での工期短縮とともにフロントエンドへのフィードバックを削減することができる。

現在、当社においても今後のトップダウンデザインキット

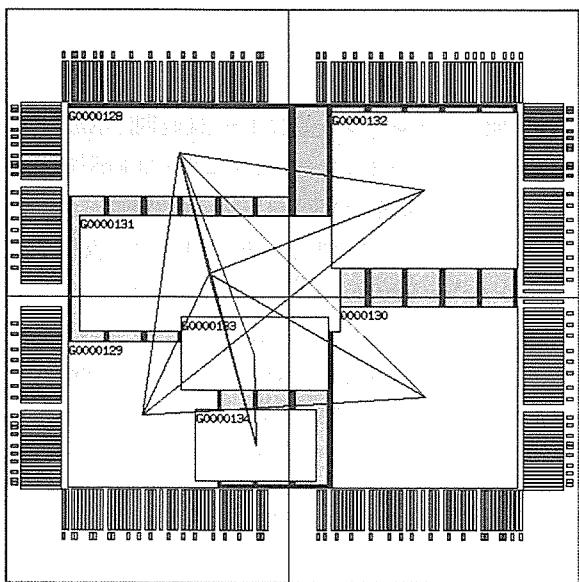


図10. フロアプランナ

表1. HDLライブラリの例

単位: ns (最大遅延時間)

機能	速 度	最 速	面 積	最 小
		ゲート数	最大遅延	ゲート数
1 全 加 算	101	3.31	58	8.16
2 3 数 加 算	204	3.94	107	9.08
3 減 算	152	3.06	61	7.99
4 乗 算 (キャリセーブ)	781	10.9	472	20.13
5 符号付き乗算 (booth)	845	8.93	454	22.68
6 符号有無切替え機能付き乗算器	855	11.97	515	22.31
7 2 乗	323	8.34	201	17.51
8 平 方 根	116	5.92	47	13.31
9 ALU (LS181簡略版)	232	3.29	117	11.13
10 マグニチュードコンバレート	100	2.43	40	5.84

注 0.8 μm CMOSゲートアレー M60084L, 負荷16.04uc, Typical条件

Verilog HDL使用, 入力は8ビット

の機能強化に向け、論理合成適用のための HDL 作成アシストツールやフロアプランナを開発中である。図10は、現在開発中のフロアプランナである。

#### 4. トップダウンデザインに対する設計サポート

HDL 設計は、CAD 上で現実のものとなり、要求される動作速度に最適な回路が合成によって得られる仕様変更が容易である、短期設計が可能である等、その優れた点が実証されている。その反面、設計スタイルが従来と全く異なり、ソフトウェアとハードウェア両方の設計知識が要求されるが、実用化されて間がないことからくる HDL 設計者の不足といった問題もあり、新技術である HDL 設計を有効に活用する設計サポート体制の確立もまた重要である。

##### 4.1 HDLライブラリ

当社では、HDL 設計の長所を有効に活用できる HDL ライブラリを準備している。HDL ライブラリとは汎用性の高い機能を HDL で記述した合成用のライブラリである。特に演算回路ではビット幅がパラメータ化されており、任意のビット幅に対応できるという特長があり、有効なライブラリとなっている。従来は例えば乗算器では、8ビット×8ビット、16ビット×16ビットといったように汎用性の高い構成の乗算器が図面で用意されていた。このため、例えば12ビット×10ビットの乗算器が欲しい設計者は、16ビット×16ビットの乗算器の入力の一部を電位固定して使用するといった方法を余儀なくされ、また図面として用意されているため回路特性が唯一に決まってしまい、速度が不十分であったり、逆に不必要に高速で回路規模が大きく消費電力が増大してしまうといった無駄が生じていた。これに対し、乗算器の HDL ライブラリを使用すればパラメータを設定するだけで12ビット×10ビットの HDL 記述が得られ、さらに必要とする動作速度を目標に合成すれば、動作速度を満たすことのできる回路規模最小の最適回路が得られる。

ところで単に乗算を行うだけであれば、ソフトマクロとな

表2. ASICの仕様

項 目	仕 様
デザインルール	0.8 μm CMOS
デバイス	セルベースIC
用 途	ムービー用
ゲート数	40,000ゲート
動作周波数	18MHz
電 源 電 壓	3 V
搭載メモリ	RAM及びROM 40,500ビット
パッケージ	100ピンQFP 0.5mmリードピッチ
特 殊 セ ル	JTAGセル

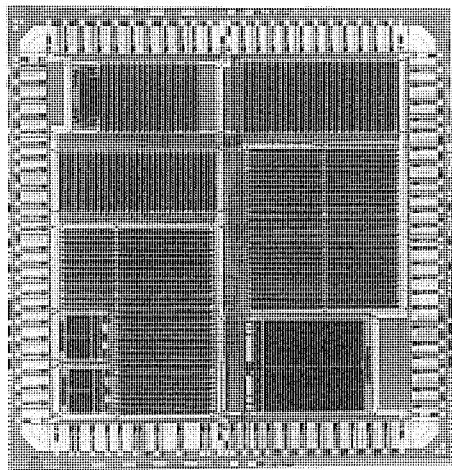


図11. トップダウン設計例

る HDL を使用するよりもモジュールジェネレータなどから得られるハードマクロを使用した方が効率的な回路が得られることが多い。HDL ライブラリを使用したソフトマクロが実力を発揮するのは、例えば演算結果の下位ビットは丸める、又は、1 段のパイプライン処理で実現する、さらには  $(A+1) \times (B+1)$  を計算するといった付加機能がある場合、それらもまとめて最適化できるところにある。ハードウェアとして効率的なアルゴリズムを使用することで単に乗算を行う回路と変わらない回路特性(動作速度、回路規模)で実現されることも少なくない。しかも付加機能を追加した HDL 設計を行う期間は通常 1 日以下である。現在、HDL ライブラリは演算回路を中心に 30 種類を超すレパートリ(表 1)があり、このライブラリを用いた回路提供が盛んに行われている。併せて、CPU 周辺の汎用ロジック等も HDL ライブラリとして準備中であり、今後も設計者からの要望をもとにレポートリを増やしていく計画である。

#### 4.2 設計サポート

更に当社のユニークな設計サポートとして、ユーザーとデザインセンターとが一体となって HDL 設計を行うサポートがある。HDL 設計は実用化されたばかりの技術であり、当社の HDL 設計の実績を有効に活用してスムーズな HDL 設計を行い LSI を開発いただくのがその主旨であり、既に何件かの製品開発がこの形態で行われ、実績を上げている。

このように当社では、トップダウンデザインを実現する優れた CAD システムのみならず、設計サポートにも力を入れている。

### 5. 設計例の紹介

トップダウン CAD システムを用いて設計した ASIC の例を紹介する。

この ASIC の仕様を表 2 に示す。ムービー用セルベース IC で、使用プロセスは  $0.8 \mu\text{m}$  CMOS、搭載ゲート数は 40 K ゲート、メモリの総サイズは 40 K ビットであり、電源電圧 3 V で動作周波数は 18 MHz である。使用パッケージは 0.5 mm ピッチの 100 ピン QFP である。機能仕様を入手し、機能ブロックごとに Verilog HDL で機能及びテストベクタを作成し、Verilog-XL<sup>TM</sup> を用いて機能シミュレーションを行った。論理合成には Synopsys 社の Design Compiler<sup>TM</sup> を使用してゲートレベルの回路生成を行い、Verilog-XL<sup>TM</sup> を用いてゲートレベルの仮想遅延シミュレーションによってタイミングのチェックを行った。各ブロックのサイズは 0.5 K ゲートから 4 K ゲート程度で、実行期間は機能記述に約 1 日、機能シミュレーションに 1 ~ 24 時間、論理合成に 0.5 ~ 6 時間、仮想シミュレーションに 2 ~ 30 時間であった。機能ブロックの検証後、出荷テスト用に前記機能ブロック検証時のテストパターンを編集し、チップレベルの仮想シミュレーションを Verilog-XL<sup>TM</sup> を用いて行った。

その後はレイアウト、詳細遅延シミュレーションというセルベース IC の通常開発手順を経てサンプル試作を行い、出荷及び客先評価を完了、仕様どおりの動作を確認した。

図11にこのトップダウン設計例を示す。

### 6. むすび

以上述べてきたように、大規模 ASIC 開発時の設計期間の短縮及び機能確認の容易性・確実性を実現するトップダウンデザイン CAD システムは今後の設計システムの中核をなす。今後も高機能化を推進して ASIC 開発に貢献していく。

最後に、開発に当たり御指導及び御協力をいただいた関係各位に対し深謝する。

# 長寿命宇宙用スターリング冷凍機

川尻和彦\* 久森洋一\*\* 大石 建\*\*\* 清田浩之\*\*\* 川田正国† 五十田 穂\*\*\*

## 1. まえがき

1998年に打上げを予定している極軌道プラットフォーム(Earth Observing System: EOS-AM 1)に搭載する短波長赤外放射計(Advanced Space Borne Thermal Emission and Reflection Radiometer/Short Wave Length Infrared Radiometer: ASTER/SWIR)の赤外線素子冷却用に寿命5万時間以上のスターリング冷凍機BBM(Bread Board Model: 基本性能検証用モデル)を開発した<sup>(1)</sup>。当社は、既に地上用として民生用の赤外線撮像装置“三菱サークルイメージヤ”に搭載している高性能な小型スターリング冷凍機<sup>(2)</sup>を実用化しており、その技術を今回の開発に応用している。衛星利用の地球観測分野では、素子の大型化によって熱負荷は増大(1W程度)し、システムは長寿命化(EOS-AM 1では、5万時間(約5年)以上)される傾向にある<sup>(3)</sup>。今回開発した宇宙用スターリング冷凍機BBMでは、従来の地上用冷凍機に比較して寿命を飛躍的に改善するため、サスペンションばねを用いた非接触ピストン支持機構やピストン駆動制御方式を取り入れるなどの新しい概念を採用している。さらに、熱負荷の増大に対しては、運転条件の最適化や電磁界解析に基づくリニアモータの損失低減などによって冷凍機の効率向上を図り、消費電力48Wで70Kにおける冷却能力1.2W(以下“1.2W@70K”という。)の世界トップレベルの冷却性能を実現した。

本稿では、この宇宙用スターリング冷凍機BBMについて、その構造とサスペンションばね、リニアモータなどの構成要素の技術開発及び基本的な冷却特性について報告する。

## 2. 宇宙用スターリング冷凍機の性能と特長

### 2.1 宇宙用スターリング冷凍機に対する要求性能

表1. 宇宙用スターリング冷凍機の要求性能

項目		要求性能
寿 命	動 作	50,000h
	保 存	30,000h
冷 却 能 力	定 常	1.2W@70K
	最 大	1.5W@70K
消 費 電 力	定 常	60W以下
	最 大	80W以下
許容温度範囲(動作時)		-20~40°C
質 量		7 kg未満
振 動		0.01N以下(暫定値)

ASTER/SWIR用スターリング冷凍機に要求される主要な性能を表1に示す。冷凍機の動作寿命は5万時間であり、さらに運用まで3万時間の保存期間があるため、その間も含めた寿命保証も必要とされる。冷却能力は、定常運転時のセンサ自体の発熱とデュワ侵入熱に対し、ある程度の余裕を含めて、消費電力60W以下で1.2W@70Kとしている。最大の冷却能力は、消費電力80W以下で1.5W@70Kである。なお、これらの性能は、放熱部である圧縮機の表面温度40°Cを基準に定義されている。冷凍機質量は、7kg未満に規定している。

### 2.2 開発した宇宙用スターリング冷凍機の特長

開発した宇宙用スターリング冷凍機BBMの外観写真を図1に、その概略構成の断面を図2に示す。この冷凍機は、その先端で極低温を生成する膨脹機(コールドフィンガとも呼ばれる。)と内部の作動ガスに圧力変動を発生させる圧縮機とを連結管で連結分離したスプリット型スターリング冷凍機である。圧縮機は2気筒対向にしてあり、また膨脹機はアクティブバランサ(図1の写真には示さず。)の付加により、低振動化を図る構成を採っている。赤外線素子は、膨脹機先端に取り付けられ冷却される。なお膨脹機ピストンに内包された再生器は、膨脹空間の低温ガスが圧縮室側へ流出する過程で一時的に冷熱を蓄え、逆に圧縮室側から温度の高い作動ガスが流入する過程で、このガスを予冷するものである。

従来の一般的なスターリング冷凍機の寿命は、数千時間程度である。これは、主にピストンがシリンダと接触して往復しゅう(摺)動するため、作動ガスのシールを構成するピストン又はシリンダが摩耗し、シール不良が発生して冷却性能の低下を招くことが原因である。この冷凍機では、5万時間以上の長寿命を得るために、ピストンとシリンダが接触しない“非接触すきまシール”を採用し、ピストンやシリンダの摩

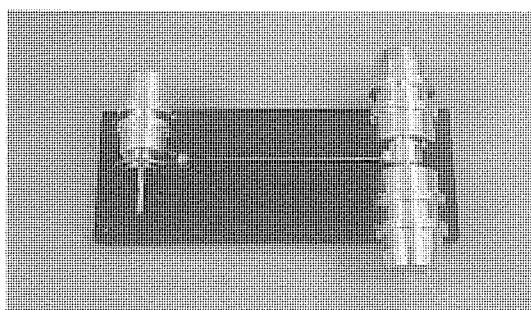


図1. 開発した宇宙用スターリング冷凍機BBM

耗を無くし、シール性能の劣化による冷却性能の低下がない構成にした。そのために、図3に示すサスペンションばねを用いてピストンを支持する機構を採用した。この機構によって、ピストンは径方向に支持され、軸方向には自由に動くことができる。

また、従来のスターリング冷凍機では、膨脹機ピストンに駆動装置がなくフリーであったが、ここにリニアモータを装着し、圧縮機と膨脹機のそれぞれのピストンの位置をセンサで検出し、その信号をもとにそれぞれの運動を制御し、常に最適な運転状態が実現できるようにした。

今回開発した宇宙用スターリング冷凍機BBMでは、このような構成により、安定した冷却性能を高い信頼性で確保できるようになっている。

### 3. 5万時間寿命保証と要素技術開発

これまでに5万時間以上の寿命を実際の運転によって実績

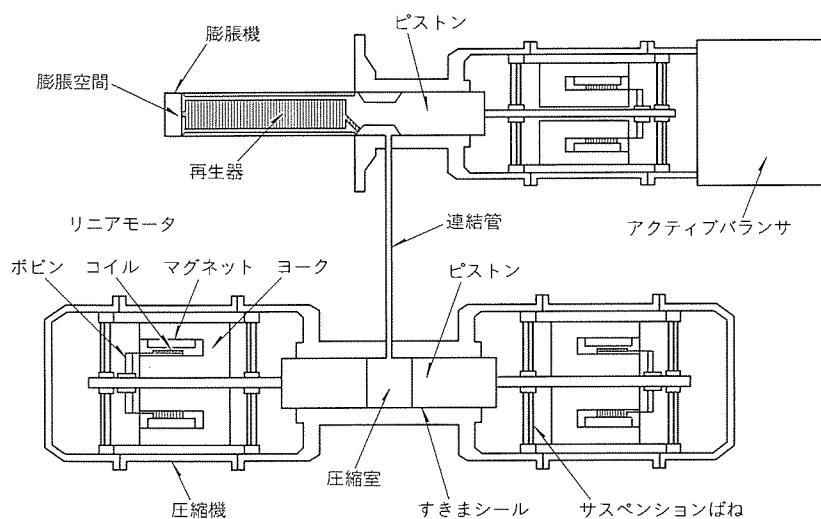


図2. 宇宙用スターリング冷凍機の概略断面構成

表2. 5万時間寿命保証

No	項目	故障モード	寿命保証						
			実績手段			解析手段			
			パラメータ	基準	手段	パラメータ	基準	モデル, データベース	
1	サスペンションばね	疲労破壊	繰り返し回数	$10^9$ 回以上	寿命試験 加速試験	S/N線図 安全率	$10^{10}$ 回 安全率 $\geq 1$	NASTRAN等	
2	作動ガス	ガス汚染	脱ガス	汚染濃度	脱ガス速度測定	許容汚染量 実測	脱ガス 総量算定	材料単体データ	
3	封止シール	ガス漏れ	リーク量	ガス圧 10年維持	温度サイクル試験		—		
4	ピストン, ディスプレーサ	耐放射線	—			累積照射量 耐量	$10^5$ rad以上	NASDAデータ	
5	コイル	絶縁破壊	絶縁抵抗	規定値	温度サイクル試験		—		
6	リード線	疲労破壊	繰り返し回数	$10^9$ 回以上	寿命試験 加速試験	S/N線図 安全率	$10^{10}$ 回 安全率 $\geq 1$	NASTRAN等	
7	アクティブバランサ	疲労破壊	繰り返し回数	$10^9$ 回以上	寿命試験 加速試験	S/N線図 安全率	$10^{10}$ 回 安全率 $\geq 1$	NASTRAN等	
8	電気部品	各種	—		信頼度	規定値	MIL-HDBK-756B MIL-HDBK-217E		

保証した冷凍機はない。ASTER/SWIR用の冷凍機の開発においても、その開発期間が短いため、実際に5万時間の運転による実績保証は不可能である。そこで、このスターリング冷凍機では、寿命を決定する要素を特定し、それらの故障モードに対し、実績による手段と解析による手段を併用し、5万時間の寿命保証を実施した。例えば、サスペンションばねの繰り返し疲労破壊に対しては、実験による加速試験や実験データにより、解析手法の妥当性を実証した上で、解析手段によって5万時間の寿命を評価し、構成部品の耐放射線などについては、データベースをもとに解析のみで評価保証することにした。なお、実機ではEM(Engineering Model)で1万5,000時間の運転実績保証を行うことになっている。表2に特定した要素とその故障モードなどを示す。

現在、それぞれの要素について、試験や解析を実施しているが、ここでは、サスペンションばねとガス汚染、及び重要構成部品の一つであるリニアモータについて紹介する。

#### 3.1 サスペンションばねの開発

冷凍機BBMに採用したサスペンションばねの形状を図3に示す。渦巻状のスリットを切った板ばねであり、外周部は冷凍機本体に固定され、中央部にピストンが固定保持される。このばねは、図3において紙面に平行方向に

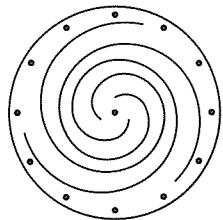


図3. サスペンションばね

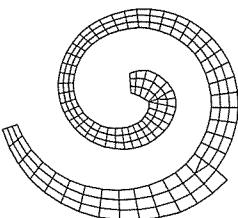
は非常に高い剛性をもっており、ピストンは紙面に垂直な方向のみに自由に運動することができる。実際には、これを複数枚重ねて使用している。

このばねの有限要素法による解析と実測値との比較の一例を図4に示す。ばねの外周を固定し、中央に荷重を掛けた場合の中央の変位を示している。実測値と解析値とは比較的良い一致を示しており、若干の補正を加えるだけで、ばねの特性を正確に予測できる解析モデルが得られた。また、並行して $10^9$ 回の繰り返し試験も実施しており、モデルを用いた解析と併せて、ピストン振幅に対し、サスペンションばねの $10^{10}$ 回（5万時間以上の寿命に相当）以上の繰り返し疲労寿命を達成する目どきを得た。

### 3.2 冷凍機BBMによる注水試験

スターリング冷凍機を長時間運転していると、リニアモータの構成部品などに使用している樹脂から脱ガスとして水分やCO<sub>2</sub>などが作動ガス中に排出される。この脱ガスが極低温となる膨脹機ピストンや再生器で氷結すると、そのピストンの運動を阻害したり、再生器における圧力損失の増大や再生器効率の低下を招き、その結果、冷凍機の性能が低下する。しかしながら、これまで脱ガスによるスターリング冷凍機の性能低下を定性的・定量的に評価した例はほとんどない。

そこで、宇宙用スターリング冷凍機BBMでは、一定量の水を注入して性能試験を実施し、脱ガス（作動ガス汚染）による冷凍機性能の低下を評価した。結果の一例として、図5に電気入力と冷却温度が一定の場合の冷却能力の注水量依存を示す。冷凍機内の全ガス量に対する注水量の割合が一定量を越えると、顕著な冷却性能の低下の起こることが確認された。



(a) モデル

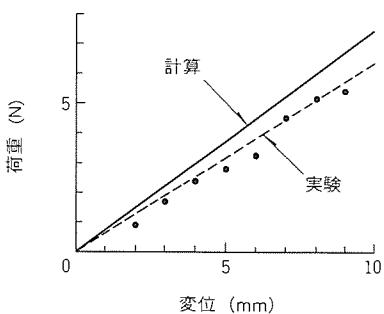


図4. サスペンションばね解析結果と実験結果との比較(一例)

### 3.3 リニアモータ

リニアモータは、ヨーク、マグネット、ボビン、コイルから成り、ヨークとマグネットで形成される磁気回路中のコイルに交番電流を流し、推力を発生する。圧縮機と膨脹機のピストンを駆動するリニアモータの性能は、冷凍機性能、特に効率に大きく影響する。さらに、その質量は冷凍機において大きな割合を占める。そこで、リニアモータの開発では、電磁界解析を利用し、リニアモータを構成する磁気回路に発生する渦電流損などの各種損失の低減検討と小型化検討を行った。図6に解析結果の一例を示す。コイルに流された電流によって生じた磁束密度分布を示している。ヨークの磁束密度は一様でなく粗密の分布がある。すなわち、磁束が侵入せず有効に利用されない不要と考えられる部分のあることが分かった。この解析を基にヨークの小型・軽量化を図っている。

### 4. 冷凍機BBMの運転特性と基本冷却性能

スターリング冷凍機の性能は、圧縮機と膨脹機のピストンそれぞれのストロークと位相差に大きく依存する。位相差が一定の場合の冷却性能（冷却能力）のストローク比（膨脹機ピストンストローク／圧縮機ピストンストローク）依存性を図7に示す。ここで、電気入力と冷却温度は一定である。この図から分かるように、冷却能力が最大となる最適なストロー

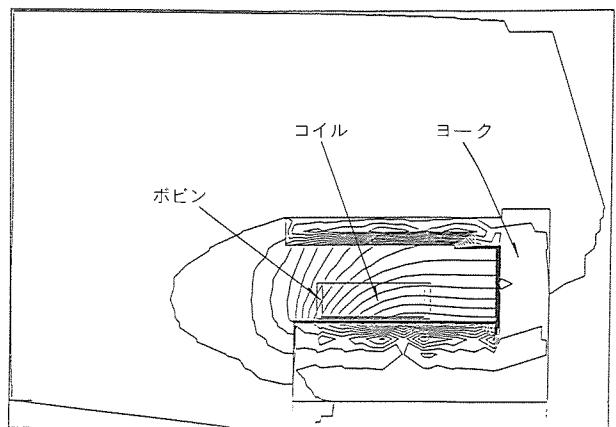


図6. リニアモータ磁気回路解析結果の一例  
(フラックスマップ)

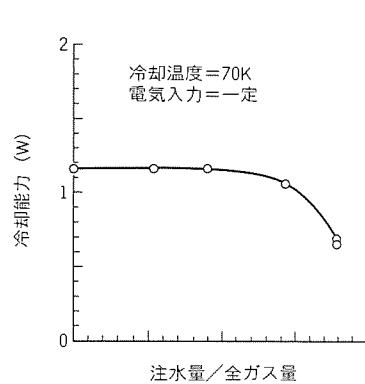


図5. 冷却能力の注水量依存

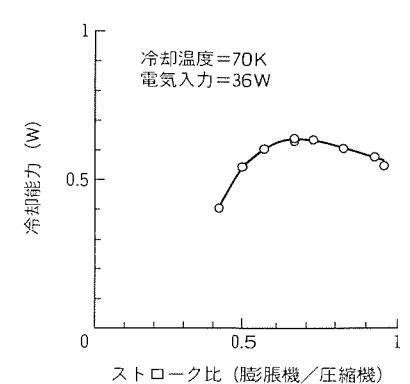


図7. 冷却能力のストローク比依存性

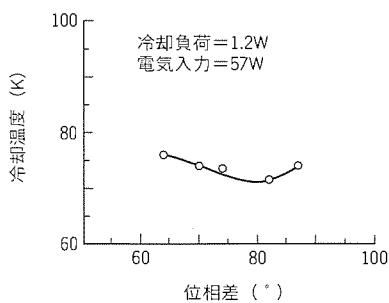


図8. リニアモータによるピストンの位相制御

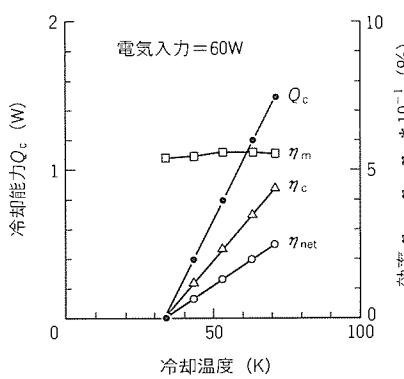


図9. 冷却能力の冷却温度依存

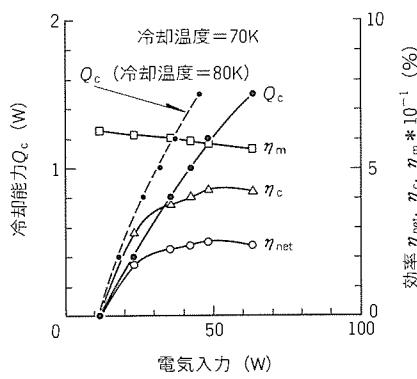


図10. 冷却能力の電気入力依存

ク比が存在する。図8には圧縮機電気入力と冷却負荷が一定で、膨脹機ピストンの位相をそのリニアモータによって制御した場合の位相差と冷却温度の関係を示す。位相差が約70~80°で最も低い冷却温度が得られ、最適な位相差が存在することが分かる。また、この試験において、駆動モータ出力が約1Wで膨脹機ピストンの位相を15°程度変化させうることが確認できた。ストローク比と位相差に冷却性能が最も高くなる最適値が存在するのは、これらの最適値より小さすぎても大きすぎても、内部作動ガスの圧力損失や熱損失が増大し、冷凍機の効率が低下するためである。

このように、今回開発した宇宙用スターリング冷凍機BBMは、ピストンも最適な位相やストロークとなるようにリニアモータで駆動制御することができる。実際には、定常運転時に膨脹機ピストン用リニアモータの駆動電力が少なくなるよう振動系を調整している。

図9に電気入力が60Wのときの冷却温度と冷却能力及び各種効率の関係を示す。冷却能力と冷凍機効率は冷却温度にはほぼ比例しており、無負荷時の最低到達温度は34Kであった。冷却温度70Kでの冷却能力と効率はそれぞれ1.48Wと2.5%である。リニアモータの効率 $\eta_m$ は、約55%一定であり、冷却温度が低くなるに従って比例的に熱力学的なサイクル効率 $\eta_c$ が低下するため冷却能力と冷凍機効率が低くなる。なお、冷凍機効率 $\eta_{net}$ 、サイクル効率 $\eta_c$ 、モータ効率 $\eta_m$ は、それぞれ次式で定義している。

$$\eta_{net} = Q_c / W_{in}$$

$$\eta_c = Q_c / W_c$$

$$\eta_m = W_c / W_{in}$$

ここで、 $Q_c$ は冷却能力、 $W_{in}$ は電気入力、 $W_c$ は圧縮機ガス仕事である。

図10に冷却温度が70Kと80Kのときの電気入力と冷却能力及び各種効率(70Kのみ)の関係を示す。電気入力が大きくなるに従って、冷却能力はほぼ比例的に増大する。電気入力が小さくなるとリニアモータの効率 $\eta_m$ は漸増する傾向

にあるが、サイクル効率 $\eta_c$ が電気入力の小さなところで急激に低下するため、冷凍機効率 $\eta_{net}$ は急激に低下する。サイクル効率が能力の小さいところで急激に低下するのは、冷却能力によらずほぼ同程度存在する熱伝導損失などの熱損失の割合が冷却能力に比べ相対的に大きくなるためである。

今回の冷凍機BBMでは、電気入力48Wで1.2W@70K、さらに電気入力63Wで最大冷却能力1.5W@70Kが得られ、目標冷却能力を達成した。また、80Kで1W冷却するのに必要とされる電気入力は32Wであり、世界最高レベルの高い冷却効率を実証した。

## 5. む す び

開発した宇宙用スターリング冷凍機BBMで、5万時間以上の寿命保証の目処を得ることができ、目標の冷却性能を達成した。今後、実機EMによる1万5,000時間の実証試験を含め、5万時間以上の寿命を保証するための試験や解析を実施すると同時に、この冷凍機BBMとEMをベースとして1994年までに衛星に搭載するスターリング冷凍機PFM(Proto Flight Model)を開発する予定である。

なお、この研究は、通商産業省/財團法人資源探査用観測システム研究開発機構(Japan Resources Observation System Organization: JAROS)から委託を受けた“極軌道プラットフォーム(EOS-AM1)搭載資源探査用将来型センサの開発(短波長赤外放射計部)”の成果の一部である。

## 参 考 文 献

- (1) 川尻和彦: 宇宙用スターリング冷凍機の冷却特性、第47回低温工学・超電導学会講演概要集、289 (1992)
- (2) 数本芳男、柏村和生、古石喜郎、清田浩之、和田明文: 赤外線撮像素子冷却用高性能スターリングクーラー、三菱電機技報、64, No.2, 188~191 (1990)
- (3) 森山 隆、古川正夫: 70K Cryocooler, 宇宙放射線シンポジウム、11~17 (1989)

# 広帯域音響コーデック

海老沢秀明\* 和田哲朗\* 内藤悠史\*

## 1. まえがき

近年、音声の高能率符号化に関する技術的進歩が目覚ましく、その実用化や標準化も積極的に行われている。当社においても、CCITT(国際電信電話諮問委員会)勧告等の国際・国内標準に準拠した方式を中心に、各種の高能率音声コーデックを開発し、様々な装置に適用している。

LD-CELP(低遅延符号励振線形予測)方式<sup>(1)</sup>など、これまでに開発した音声コーデックは電話帯域(約4kHz)のものが主体であるが、いわゆるオーディオビジュアルサービスの広帯域化・高品質化に対応すべく、伝送帯域を拡大した音声コーデックも実用化している。その一例が7kHz帯域の伝送が可能なSB-ADPCM(帯域分割適応差分パルス符号変調)方式の音声コーデック<sup>(2)</sup>であり、より肉声に近い高品質な音声の伝送が要求されるテレビ会議装置などに適用されている。

さらに、現行テレビジョンやHDTVの信号をデジタルで伝送する装置の開発に伴い、音声のみならず音楽等の音響信号を高能率かつ高品質に伝送できる音響コーデックの開発が要求されるようになってきた。これに対応するものとして、CCITT勧告J.41に準拠した15kHz帯域の音響コーデック<sup>(3)</sup>が挙げられる。

本稿で紹介する音響コーデックは、伝送帯域を20kHzに拡大しつつ、一層の高能率化を図ったものである。符号化アルゴリズムには、ISO(国際標準化機構)とIEC(国際電気標準会議)の合同組織で標準化された方式を採用し、これを汎用のDSP(Digital Signal Processor)を用いて実現した。

このコーデックは、20kHz帯域の音響信号を1チャネル当たり128kbpsに圧縮して伝送可能であり、高能率でありながらもコンパクトディスクと同等の高い伝送品質をもっている。

## 2. 符号化アルゴリズムの概要

### 2.1 MPEG 1 オーディオ方式

このコーデックの符号化アルゴリズムはISO/IEC規格に準拠しており、通称MPEG 1オーディオ<sup>(4)</sup>と呼ばれている方式である。このMPEG(Moving Picture Experts Group)とは、標準化作業を担当している組織の名称であり、MPEG 1は、1.5Mbpsまでのビットレートでビデオとオーディオの符号化を行う方式を指す。

MPEG 1におけるオーディオ符号化方式は、レイヤIからIIIまでの3種類の方式(数字の順に複雑なアルゴリズムとなっている)に階層化されている。各方式とも、標準化の対象は符号化データのフォーマットと復号の処理であり、符号化の処理は参考として記述されている。このコーデックは、比較的小さなハードウェア規模でオーディオ信号の高能率な伝送が可能なレイヤIIの方式に準拠している。

### 2.2 符号化アルゴリズムの原理

レイヤIIの符号化アルゴリズムは、サブバンド符号化方式を基本としており、入力信号をかなり細かな周波数帯域に分割し、分割後のサブバンド信号を量子化して伝送する。各帯域のサブバンド信号に対する量子化ビット数の割当ては、入力信号の周波数成分の分布に基づいて適応的に制御する。この際に、人間の聴覚特性を利用することによって割当てビット数を削減し、高い圧縮度(1/6程度)を達成している。

ここで利用している聴覚特性とは、最小可聴限とマスキング効果の二つである。まず、最小可聴限とは、音が聞こえない限界の音のレベルである。周波数によってそのレベルが異なり、図1の実線で示したカーブのような特性を示す。図において、カーブより下の領域の音は知覚されないことを意味する。例えば、符号器に入力した信号がA, B, Cの三つのスペクトラル成分からなっていたとすると、これらのうち成分Aの音は聞こないので、その帯域(サブバンド)の信号は伝送しなくてもよい。したがって、この帯域の割当てビット数をゼロにすることができる。

マスキングとは、ある音の最小可聴限のレベルが他の音によって上昇する現象である。図1の例では、成分Bによって、その近辺の最小可聴限が点線のように上昇してしまう

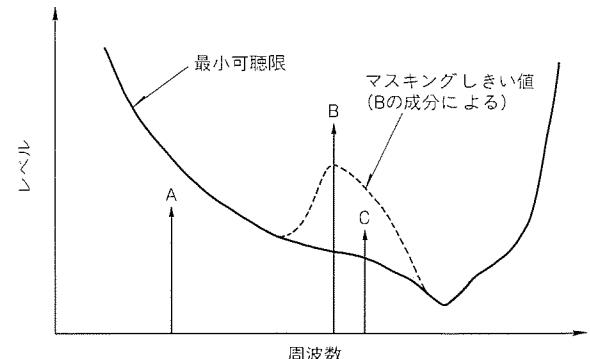


図1. 最小可聴限とマスキングしきい値

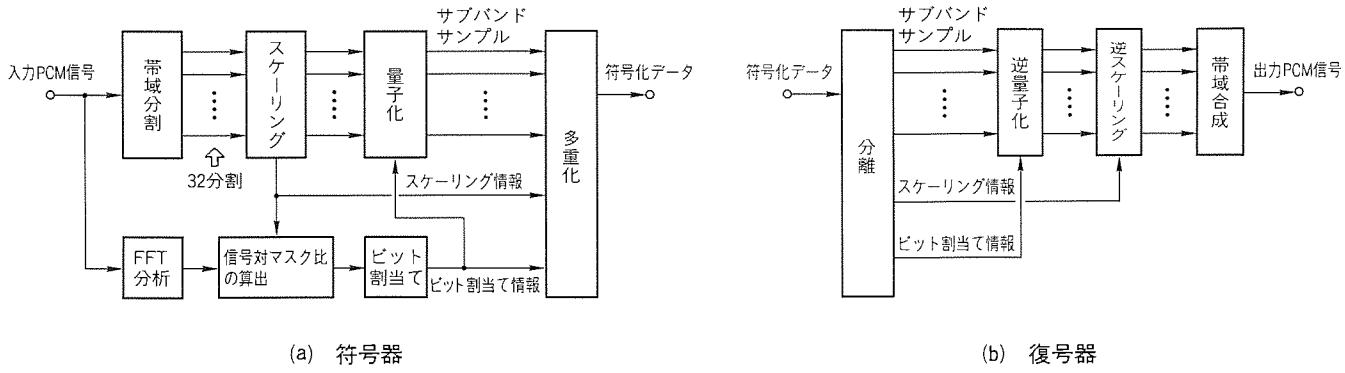


図2. 符号器と復号器の機能構成(MPEG 1 オーディオ／レイヤII)

(点線のカーブをマスキングしきい値と呼ぶ。)。したがって、成分Cは聞こえない音であり、成分Aの場合と同様に、この帯域の割当てビット数をゼロにすることが可能である。

### 2.3 符号器・復号器の処理

図2に、レイヤII符号器・復号器の機能構成を示す。まず、符号器について説明する。符号器に入力したリニアPCM信号は、帯域分割フィルタによって32帯域のサブバンド信号に等分割される。各帯域のサブバンド信号は、スケーリング部において正規化された後に、量子化部に与えられる。

一方、FFT(高速フーリエ変換)部において入力PCM信号の周波数成分が分析され、これを基に各サブバンドにおけるSMR(信号対マスク比：信号のレベルとマスキングしきい値との比をとったもの)が計算される。このSMRからサブバンド信号を量子化するために必要なビット数が求まる。ビット割当て部は、符号化データの量が設定された符号化速度(ビットレート)を越えないよう、各帯域に割り当てるビット数を制御する。

前述の量子化部は、帯域ごとの割当てビット数に従い、サブバンド信号を量子化する。量子化されたサブバンド信号、スケーリング情報及びビット割当て情報は、所定のフォーマット(後述)に従って多重化され、符号化データとなる。

レイヤIIの符号化処理は、入力PCM信号の1152サンプル分を一つの区切りとして行う。この区切りを符号化フレームと呼び、PCM信号の標本化周波数が48kHzの場合、フレーム周期は24msとなる。符号器から出力される符号化データのフレーム構成を図3に示す。

フレームの先頭にあるヘッダには、フレーム同期をとるための同期ワードや標本化周波数を示すコードなどの制御データが含まれている。ビット割当て情報は帯域ごとのサブバンドサンプルの量子化ビット数を表し、スケールファクター選択情報とスケールファクターはスケーリングに関するデータが含まれている。サブバンドサンプルの後には補助データの領域がオプションとして設けられており、オーディオ信号以外のデータを送ることも可能である。

なお、ステレオ(2チャネル)信号の符号化を行った場合、左右のチャネルのデータは、ビット割当て情報、スケールフ

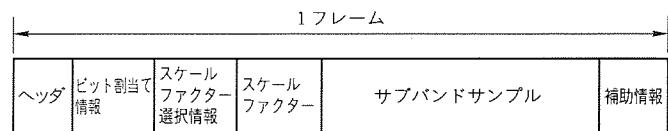


図3. 符号化データのフレームフォーマット  
(MPEG 1 オーディオ／レイヤII)

表1. 主要諸元

伝送信号帯域	5 Hz ~ 20 kHz
標本化周波数	48 kHz
入出力信号	16ビットリニアPCM
符号化方式	多帯域サブバンド符号化方式 (MPEG 1 オーディオ／レイヤII準拠)
符号化速度	128 kbps又は192 kbps(1チャネル当たり)
符号化フレーム長	24 ms
符号誤り制御	CRC-16による符号誤り検出(フレーム単位) 検出時には、前フレーム補間又は無音置換を行う。
付加機能	補助データ伝送機能 試験信号(1 kHz正弦波)出力機能 無音出力(ミューティング)機能

アクター選択情報、スケールファクター及びサブバンドサンプルの各領域に、それぞれ多重化される。

復号器では、入力した符号化データから、量子化されたサブバンド信号、スケーリング情報及びビット割当て情報を分離し、これらを用いて符号化と逆の処理を行って出力PCM信号を再生する。

## 3. 仕様・構成

### 3.1 主要諸元

このコーデックの主要諸元を表1に示す。前述のとおり、符号化方式はMPEG 1 オーディオ／レイヤIIに準拠している。ただし、今回の開発は業務用システムへの適用を主眼としたので、仕様を限定して装置規模の増大を避けた。

その一つが標本化周波数であり、MPEG 1 オーディオで規定されている3種類(32/44.1/48 kHz)の周波数の中から、業務用スタジオ標準規格の値である48 kHzを選択した。もう一つは、符号化速度(ビットレート)である。レイヤII

では、32～384 kbps の範囲で 14 種類のビットレートが規定されている。これらの中から、業務用システムに要求される高い品質を満足できるものとして、128 kbps と 192 kbps（共に 1 チャネル当たり）を選択した。

ちなみに、CCIR（国際無線通信諮問委員会）で行われた各種の高能率音響符号化方式に対する聴感試験の結果として、ディジタル音声に関する素材伝送には 180 kbps 以上でのレイヤII 方式を、同じく分配には 120 kbps 以上でのレイヤII 方式を、それぞれ用いることが推奨されている。

### 3.2 ハードウェア構成

今回の開発では、2 章で述べた符号化アルゴリズムを汎用の DSP を用いて実現した。符号化に必要な帯域分割（合成）フィルタや FFT の処理には、かなりの演算精度が要求されるため、DSP は 32 ビット浮動小数点演算タイプのものを採用した。

このコーデックのハードウェア構成を図 4 に示す。図に示すとおり、ステレオ（2 チャネル）信号の符号化と復号の処理に 4 個の DSP を使用している。符号化の処理はかなり複雑で演算量も大きいため、符号器はマルチプロセッサ構成とし、3 個の DSP を使用した。一方、符号化に比べて復号の処理における演算量は少なく、復号器は 1 個の DSP で実現

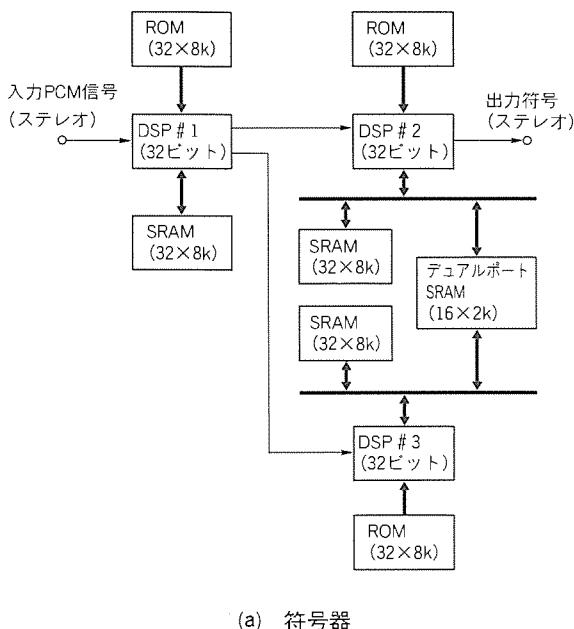


図 4. 符号器と復号器のハードウェア構成

できた。

PCM 信号などの主データの入出力は、DSP のシリアルポートを介して行う。各 DSP には、プログラムや定数データを格納している ROM と、変数データを格納するための SRAM が接続されている。マルチプロセッサ構成となっている符号器の一部には、DSP 間のデータ転送のためにデュアルポートの SRAM を使用した。これにより、データ転送用の DMA コントローラなどの付属回路が不要となり、ハードウェア量が削減できた。

復号器に設けたフレーム同期回路は、受信した符号化データの先頭位置を検出し、そのタイミングを割込み信号により DSP に知らせる。

図 5 に、このコーデック基板の一例を示す。この基板には、図 4 に示した符号器・復号器の他に、アナログでオーディオ信号（ステレオ）を入出力するための A/D・D/A 変換回路、音声と画像との同期をとるためのリップシンク用遅延回路などが実装されている。

### 3.3 DSP のプログラム構成

図 4 に示した各 DSP の処理内容と処理負荷（実際の実行ステップ数を DSP の演算速度から決まる許容ステップ数で割ったもの）を表 2 に示す。

この方式は、信号の標本化周波数が電話帯域の場合の 6 倍であるために扱うデータ量が多く、符号化アルゴリズムも複雑であることから、その処理をリアルタイムで実行するには、かなりの処理能力が要求される。なるべく少ない DSP でこれを実現するために、処理能力の高い DSP を用いるとともに、演算上の工夫などでプログラムの実行ステップ数の削減に努めた。

この方式における演算上の大きな負荷は、帯域分割フィルタと帯域合成フィルタである。そこで、帯域分割・合成フィルタの演算に用いるコサイン関数の周期性に着目して同類項の演算を省略し、併せて DSP 特有の積和演算命令を活用す

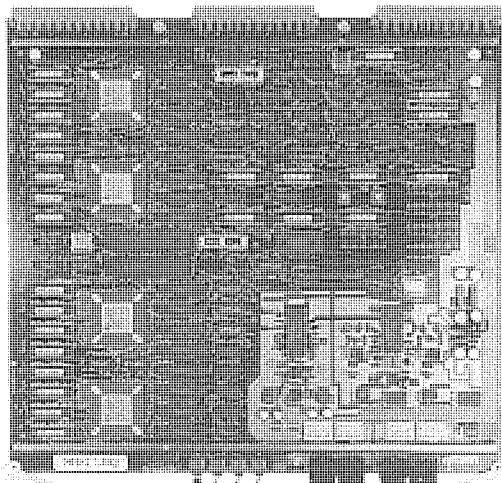


図 5. 広帯域音響コーデック基板

ることにより、規定どおりの演算に比べて演算量を4割以下に低減することができた。

その他、SMRの算出で多用されるデシベル値の計算を近似式やテーブルを用いて高速化したり、DSPに内蔵のDMA機能を用いてコンカレントなデータの入出力を行うことなどでプログラムの負荷を減らしている。

### 3.4 符号化フレームの同期方式

図3に示した符号化フレームの先頭には、フレーム同期をとるための同期ワードがあり、標準の規定では12ビットのオール“1”となっている。ところが、この同期ワードでは、伝送路の障害などにより、オール“1”的符号を受信した場合に、誤同期を起こすおそれがある。そこで、このコーデックではヘッダ内の同期ワードに続く4ビット(“0”を含む)も併せて同期ワードと見なして同期検出を行うことにより、これを防いでいる。

また、同期検出に不可欠な同期保護の段数は標準化の対象外なので新たにこれを検討し、その結果前方保護・後方保護ともに保護段数を2段とした。この値を用いれば、伝送路の符号誤り率が $1 \times 10^{-5}$ (デジタル回線の一般的な規格よりも1けた下の値)の条件下で、次の性能が得られる。

- 平均ミスフレーム発生間隔: 約11日

表2. 各DSPの主な処理内容とその負荷

D S P	処理内容	処理負荷
符号器 #1	入力ハイパスフィルタ 帯域分割フィルタ	78.6%
符号器 #2	スケーリング(左チャネル) 量子化(同上) FFT(同上) 信号対マスク比の算出(同上) ビット割当て(同上) 多重化	91.5%
符号器 #3	スケーリング(右チャネル) 量子化(同上) FFT(同上) 信号対マスク比の算出(同上) ビット割当て(同上)	79.8%
復号器	分離 逆量子化 逆スケーリング 帯域合成フィルタ	79.0%

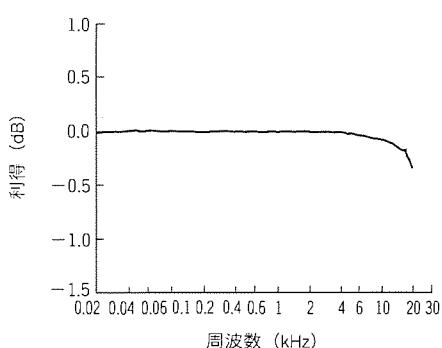


図6. 周波数特性(アナログ測定)

- 誤同期確率 :  $1.43 \times 10^{-6}$
- 平均同期復帰時間 : 48ms(2フレーム)

### 3.5 符号誤り制御

この方式では、符号化データ内のビット割当て情報などの重要なデータに符号誤りがあった場合、そのまま復号の処理を行うと出力PCM信号に著しい劣化を生じてしまう。そのため、規格ではオプション機能として、CRC(巡回冗長検査)を用いた符号誤りの検出(ただし、チェックの対象はヘッダからスケールファクター選択情報まで)が設けられており、このコーデックでもこれを使用している。

復号器において符号誤りを検出した場合の処理方法については標準化の対象外であるため、次に述べる独自の手法を用い、再生音の劣化を防いでいる。

この方式はフレーム(24ms)を単位とした符号化方式なので、CDプレーヤーなどで行われているような、PCM信号のサンプルを単位とした補間処理はできない。そこで、符号誤りを検出したフレーム(以下“エラーフレーム”)という。では、そのフレームの受信データを使用せずに、直前の無誤りのフレームのデータを用いて出力PCM信号を再生するものとした。

また、エラーフレームが連続した場合、2フレーム目から徐々にミューティングを掛け、出力を無音とする。いったんミューティング状態に入った場合、無誤りのフレームが一定の数だけ連続しないとミューティングを解除しない。これはビット誤り率が高い場合( $1 \times 10^{-3}$ 以上)には、補間したフレームが連続するための劣化とスケールファクターやサブバンドサンプルの符号誤りによる劣化が目立つためである。

以上の対策により、伝送路のビット誤り率が高い場合には、復号器の出力がミューティングされて異常音の発生が防げ、一方、伝送路のビット誤り率が低い場合には、符号誤りが発生した場合でも前フレームのデータを用いた補間を行うことで再生音の劣化を目立たなくできた。

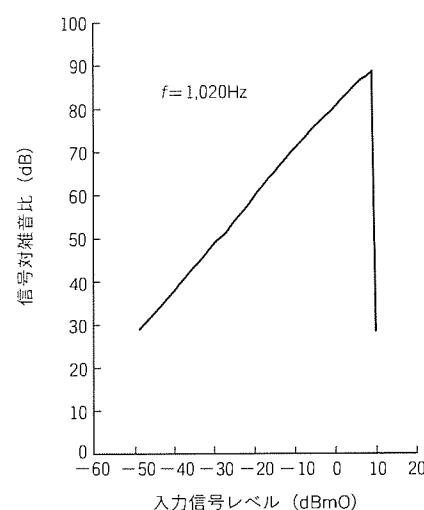


図7. 信号対雑音比特性(アナログ測定)

#### 4. 性能

このコーデックの客観評価として、図5の基板におけるコーデック折り返しでの測定結果を図6と図7に示す。

図6は、A/D・D/A変換部も含めたこのコーデックの周波数特性である。人間の可聴帯域である20Hzから20kHzまでを十分にカバーする特性を示している。なお、高域において若干利得が減少しているのは、D/A変換器の後段に設置したアナログLPF(群遅延特性の優れたベッセル型を使用)の特性によるものである。

図7は、同じくこのコーデックの信号対雑音(量子化雑音を含む)比特性である。この特性は、周波数特性と同様にアナログ部(A/D・D/A変換)の特性に依存しており、符号化・復号による特性の劣化はない。

このコーデックの主観評価として、開発技術者による簡単な聴感試験を実施した。今回開発したハードウェアによる復号音の品質は、これに先立って開発した計算機シミュレーションプログラムによるものとの間に有意差はなく、優れた品質であることを確認した。また、本格的なオーディオ機器を使用し環境の整った試聴室で比較しても、復号音と原音との音質の差はほとんど検知できないほどであり、通常の環境では全く違ひはないといえる。

#### 5. むすび

国際標準に準拠した高能率音響コーデックについて、その

概要を述べた。このコーデックを用いれば、高品質なオーディオ信号の高能率な伝送・蓄積が可能であり、各種のマルチメディア関連システムに適用できる。

既に、ディジタルSNG(衛星を利用したニュースの素材伝送)システム用ビデオコーデック<sup>(5)</sup>に搭載されており、衛星回線という限られた伝送帯域を有効に利用するシステムにおいて、その特長を十分に發揮している。

今後とも、高い品質を維持しつつより一層の高能率化を図るなど、漸次改良を行っていく予定である。

#### 参考文献

- (1) 河野典明、矢島久、浅井敬、長瀬平明、内藤悠史：16 kbps LD-CELP音声コーデックモジュール、三菱電機技報、66、No.12、1229～1233（1992）
- (2) 海老沢秀明、内藤悠史、高橋真哉、中島邦夫：高能率音声符号化装置、三菱電機技報、62、No.8、709～712（1988）
- (3) 技術の進歩特集：放送品質オーディオコーデック、三菱電機技報、65、No.1、77（1991）
- (4) Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media at up to about 1.5 Mbit/s Section 3 Audio, ISO/IEC 11172-3 (1993)
- (5) 坂戸美朝、佐々木源、浅井光太郎、海老沢秀明、吉田英夫：ディジタルSNGシステム用ビデオコーデック、信学会春季大会、B-227（1993）

# MOCVD法によるInP埋込み成長技術

木村達也\* 大倉裕二\*\* 園田琢二\*\*\*

## 1. まえがき

多くの情報を高速に伝送できる光通信は、高度情報化社会を支える通信のインフラとして、既に幹線系を始め、LANやCATV等に広く普及しつつある。さらに、次世代通信網の整備に向けて、各家庭に光ファイバを延長し、高度な通信サービスを提供する構想が打ち出されている。この構想を実現するためには、光源として用いられているInP系長波長(1.3~1.55 μm)半導体レーザの一層の低価格化が求められている。また、アレー化や光導波路等との集積化も必要である。これらの状況において、半導体レーザの作製方法として、高均一な結晶成長技術が不可欠くなっている。

通常、長波長半導体レーザは、図1に示すようなプロセスで作製されている。注入電流によって光を出す活性層を成長させ(図1(a))、エッチングによって活性層側面を除去して台形(メサ)を形成する(図1(b))。次に活性層内に電流及び光を閉じ込める埋込み層をメサ側面に成長させた後(図1(c))、最後にコンタクト層を成長させる(図1(d))。従来、活性層成長には膜厚の均一性、制御性に優れ、かつ大面積基板への成長が可能なMOCVD法(有機金属気相成長法)を用い、埋込み層成長にはメサ両側に選択的に成長する特徴を持つ半導体レーザの伝統的成長法であるLPE法(液相成長法)を用いていた<sup>(1)</sup>。しかし、LPE法では、メルトバック<sup>(2)</sup>や膜厚の均一性・制御性が不十分であるという問題があるため、設計どおりのレーザ構造を均一にしかも再現性良く作製することが困難であった。また、大面積基板への成長が難しいため、量産性の点でも問題があった。

これらの問題を解決するために、埋込み成長にもLPE法に代えてすべての層の成長をMOCVD法を用いる試みが数多く報告してきた<sup>(3)</sup>。しかし、半導体レーザの初期特性は、LPE法で埋込み成長したものと同等のものが得られるものの、信頼性に問題があったため広く実用化には至っていない。信頼性が悪い原因是、埋込み再成長界面の汚染物に起因するものと考えられている。また、一般にレーザアレーの高速動作には、駆動回路として高速のNPNバイポーラトランジスタが使えるp型基板を用いた方が有利であるにもかかわらず<sup>(4)</sup>、これまでの報告例ではn型基板を用いていた。これは、後で述べるようにp型基板を用いた場合、埋込み構造が複雑になるためである。

今回、MOCVD法によるメサ側面での特異な成長機構を

見いだし、特定の成長面上の結晶成長速度がメサ底面の結晶成長速度と異なることを利用してp型基板上のInP埋込み層成長の困難性を克服した。これにより、活性層を含むすべての層をMOCVD法を用いて2インチ基板上に均一にかつ再現性良く成長できる技術を確立した。また、埋込み成長直前の表面処理方法を改善して再成長界面の汚染物を低減し、レーザの信頼性を向上させることに成功した。

この論文では、まずMOCVD法によるInP埋込み成長機構について述べ、これを用いた当社独自のFS-BH(Facet Selective-growth Buried Heterostructure)レーザ構造<sup>(5)</sup>について記述する。次に再成長界面の汚染物低減について述べ、最後に1.3 μm帯長波長FS-BH半導体レーザの均一性及び信頼性について報告する。

## 2. MOCVD法によるInP埋込み成長

### 2.1 埋込み成長機構

図2(a)はこれまでに報告されたn型基板上の長波長半導体レーザの断面構造を示す。図の中央部には、活性層にキャ

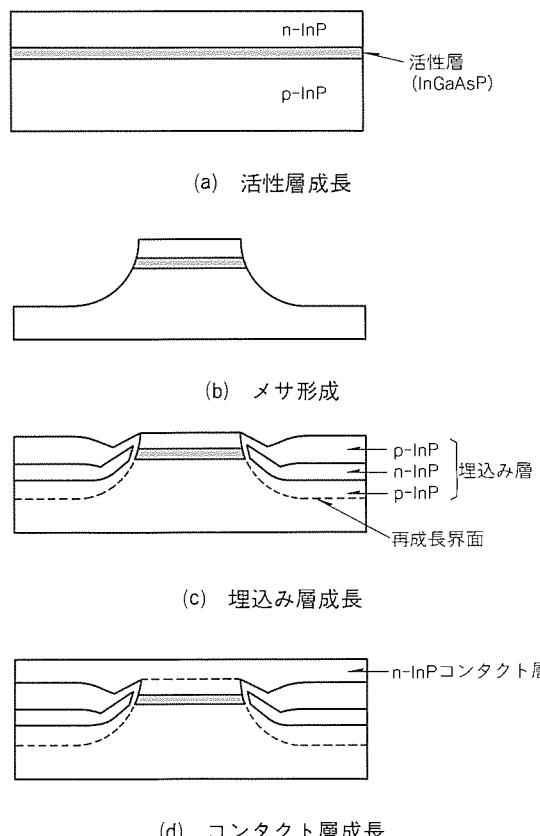
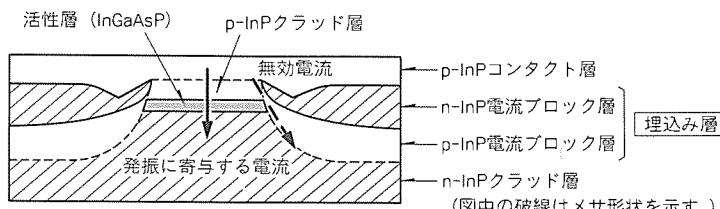
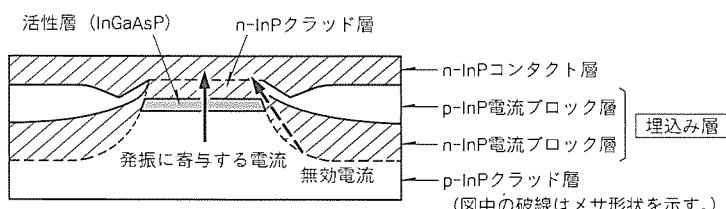


図1. 長波長半導体レーザの作製プロセス

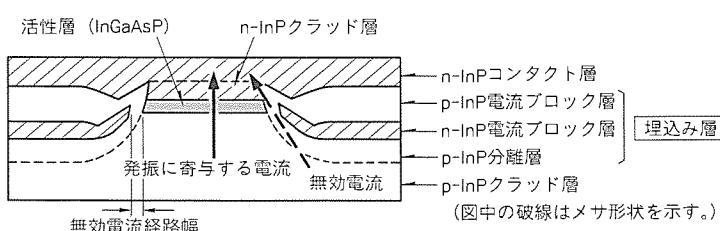
リアを注入してレーザ発振に寄与する電流が流れる。活性層の両側には、p-InP 電流ブロック層/n-InP 電流ブロック層の p/n 接合が形成されるために電流は流れない。この両者の境界部分には、活性層を流れずにレーザ発振に寄与しない無効電流(図中点線で示す)が流れる。しかし、この無効電流は、幅が狭くかつ抵抗率が高い p 層を流れるので、レーザ発振に寄与する電流に比べて無視できるほど小さい。次に、p 型基板上のレーザの場合について考える。上記の構造で、すべての層の導電型を單に入れ替えた場合を図 2(b) に示す。無効電流は図中点線矢印で示すように n-InP 電流ブロック層を流れる。n-InP 層は抵抗率が p-InP 層より約 2 けたほど低いため、無効電流は大きくなり、レーザの高出力特性や電流電圧特性の線形性が損なわれる結果になる。そこで図 2(c) に示すような抵抗率が高い p-InP 分離層を挿入する構造が採られている<sup>(1)</sup>。この埋込み構造は LPE 法特有的成長機構を用いて成長しているものの、膜厚の均一性・制御性が不十分なため、n-InP 電流ブロック層とメサ側面とを分離して無効電流経路幅(図中に示す)を狭くすることは非常に困難であった。n-InP 電流ブロック層と n-InP クラッド層とが接触すると、活性層の両側は電流をブロックする機能を失う。p 型基板上のレーザでは、その特性が無効電流経路幅に直接左右されるので、その幅を制御することが極めて重要である。また、これまで MOCVD 法による埋込み層成



(a) n-InP 基板上の長波長レーザ構造断面模式図



(b) (a)の構造で單に導電型を入れ替えた場合の長波長レーザ構造断面模式図



(c) P-InP 基板上の長波長レーザ構造断面模式図  
 図 2. n 及び p 型基板上長波長レーザ構造の比較

長が n 型基板上レーザに限られていたのは、p 型基板上レーザの無効電流経路幅制御の難しさが大きな要因である。

そこで、メサ側面での MOCVD 法による埋込み成長機構を調査した。成長機構が容易に分かるように、埋込み層には p-InP と n-InP の多層膜(n-InP は白い部分、p-InP は黒い部分)を用いた。その断面 SEM 写真を図 3 に示す。なお、選択成長マスクには SiO<sub>2</sub> 膜を用いた。成長は縦型 MOCVD 装置を用い、基板温度 650°C、反応管圧力約 1 × 10<sup>-4</sup> Pa {76 Torr} で行った。メサから離れた平たんな部分では、基板と平行に成長している。メサ両側近傍では特異な成長をしている。この特異な成長を模式的に図 4 に示す。

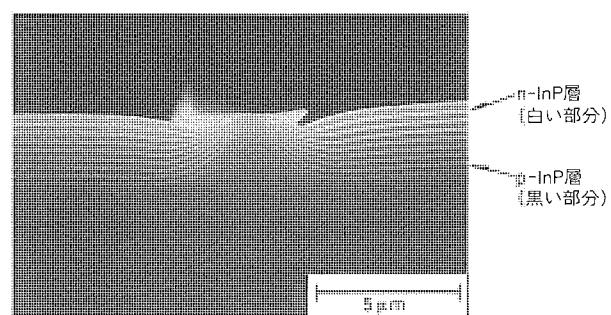
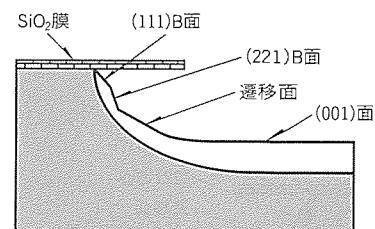
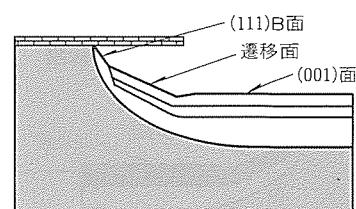


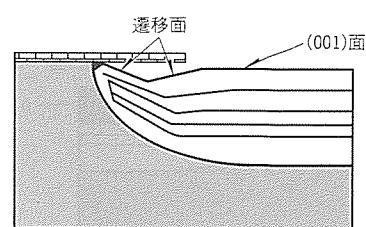
図 3. MOCVD 法による p/n 多層膜の埋込み成長の断面 SEM 写真



(a) 第一段階



(b) 第二段階



(c) 第三段階

図 4. メサ両側近傍の成長過程

まず、第一段階では、図4(a)に示すようにメサ側面には(111)B面、(221)B面、遷移面が現れる。(111)B面及び(221)B面は、メサ底面((001)面)に対してそれぞれ55°及び70°傾いた結晶面である。(111)B面及び(221)B面が現れる理由は、(001)面より成長速度が遅いからである。次に第二段階では、図4(b)に示すように(221)B面は消えて、最も成長速度が遅い(111)B面と遷移面が残る。さらに、第三段階では、図4(c)に示すように(111)B面が消えて最終的に遷移面と底面が残る。以上のことから、第一段階でメサ側面からの距離が決定される(221)B面を利用すれば無効電流経路幅の制御が可能になることが分かる。

## 2.2 FS-BHレーザ構造

上記埋込み成長機構を利用して図2(c)に示す埋込み構造を作製する過程を示す。図5に示すように埋込み成長過程の第一段階でp-InP分離層(図5(a))、第二段階でn-InP電流ブロック層(図5(b))を形成すると、成長速度が非常に遅い(111)B面により、n-InP電流ブロック層とn-InPクラッド層とを分離できる。さらに、その上に第三段階でp-InP電流ブロック層(図5(c))を形成することにより、図2(c)に示す埋込み構造が得られる。無効電流経路幅は、p-InP分離層成長時におけるメサ側面(221)B面の成長厚みで自動的に決まる。特定の成長面上の結晶成長速度がメサ底面の結晶成長速度と異なることを利用した新構造をもつ新しいレーザ構造をFS-BH(Facet Selective-growth Buried Heterostructure)レーザと名付けた。活性層を含むすべて

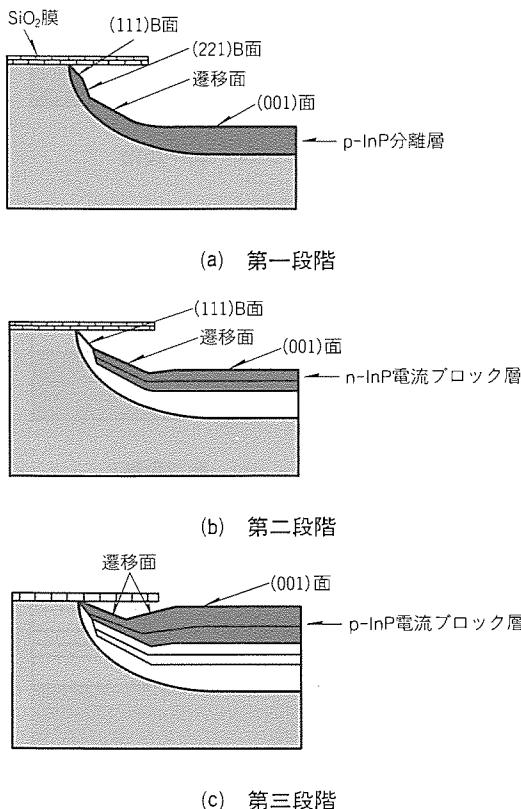


図5. MOCVD法によるp型基板上埋込み構造の作製過程

の層をMOCVD法を用いて作製したFS-BHレーザ構造の断面SEM写真を図6に示す。n-InP電流ブロック層とn-InPクラッド層とを分離して、無効電流経路幅は、0.18 μmの幅に制御されていることが分かる。

図7に、MOCVD及びLPE法で埋込み成長したレーザの無効電流経路幅の分布を示す。MOCVD法で埋め込んだ場合、無効電流経路幅は2インチ基板内で0.18 ± 0.015 μmと、LPE法で埋め込んだ場合の20mm基板内の無効電流経路幅(0.34 ± 0.075 μm)と比較して狭く、しかも均一であることが分かる。この成果は、上述したように、①従来のLPE法にはない成長速度の面方位依存性を利用したこと、②膜厚の制御性が2けた程度良いこと及び③埋込み成長前にメサ表面がIn溶媒中に溶け出すいわゆるメルトバック現象がなく、成長前の形状を維持できるというMOCVD法の特徴を生かして達成されたものである。

## 3. 再成長界面汚染物の低減

LPE法では、メサ表面の汚染物はメルトバックにより、除去できると考えられている。このため高い信頼性をもつレーザを容易に作製できる。しかし、MOCVD法では、埋込み成長前にサーマルエッティングを行っても汚染物をメサ表面から除去することができず、LPE法と同等の信頼性をもつレーザを作製することは非常に困難であった。メサ表面の汚染物は、主にメサ形成工程でのエッティング、その後の水洗及び乾燥時に発生する。そこで、①超純水の使用、②エッティング液温及び水温の管理、③埋込み成長前の表面処理、④乾燥方法の変更等からメサ表面汚染物を徹底的に低減した。この対策により、LPE法と同等の高い信頼性をもつすべての層をMOCVD法で成長したレーザで作製することが可能

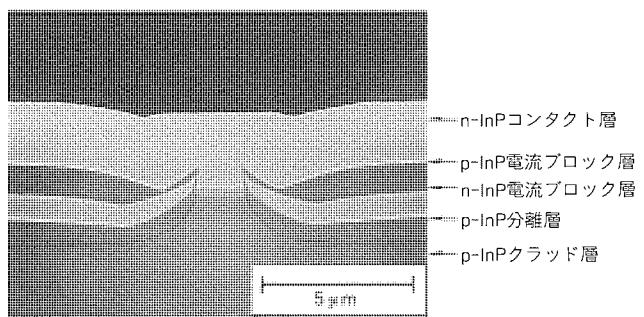


図6. FS-BHレーザ構造の断面SEM写真

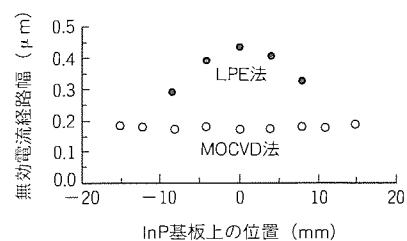
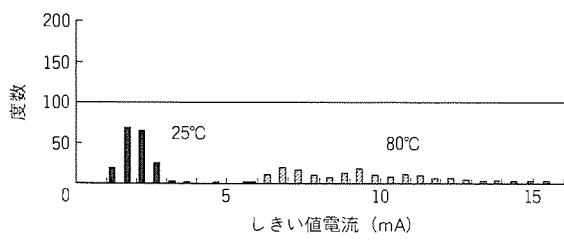
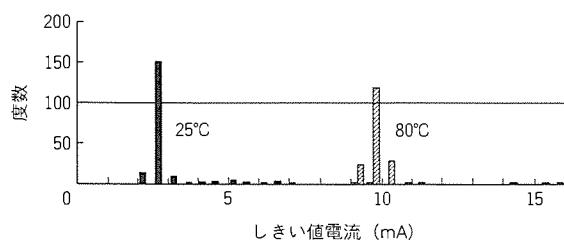


図7. 無効電流経路幅の分布(LPE法とMOCVD法)



(a) LPE法で埋込み成長



(b) MOCVD法で埋込み成長

図 8. しきい値電流分布 (LPE法とMOCVD法)

となつた。

#### 4. FS-BHレーザ特性の均一性と信頼性

すべての層をMOCVD法により、2インチ基板上に作製した $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 帯FS-BHレーザの $25^{\circ}\text{C}$ 及び $80^{\circ}\text{C}$ におけるしきい値電流のヒストグラム(総数200個)を図8に示す。しきい値電流のばらつきは $25^{\circ}\text{C}$ で $0.2\text{ mA}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ で $0.4\text{ mA}$ と非常に高均一なレーザ特性が得られている。この高均一性は今回開発したMOCVD法を用いた埋込み成長技術により、無効電流経路幅を均一に制御した結果得られたものである。

図9に $50^{\circ}\text{C}$ ,  $10\text{mW}$ でのFS-BHレーザの通電寿命試験結果を示す。通電時間3,700時間経過した時点でも動作電流の変化はなく安定に推移していることが分かる。これらの特性及び信頼性は、LPE法による埋込みレーザのものと比較して同等以上のものである。

#### 5. むすび

成長膜厚の均一性、制御性に優れたMOCVD法による埋込み成長において、メサ底面の結晶成長速度より遅い成長面がメサ側面に現れることを見いだした。この選択成長機構を、p型基板上で長波長半導体レーザの埋込み層成長に応用した。このことにより、設計どおりのレーザ構造を2インチ基板上に均一にしかも再現性良く作製することを可能にした。

また、埋込み成長前の表面処理方法を改善して再成長界面の汚染物を低減することによって信頼性を向上させた。これ

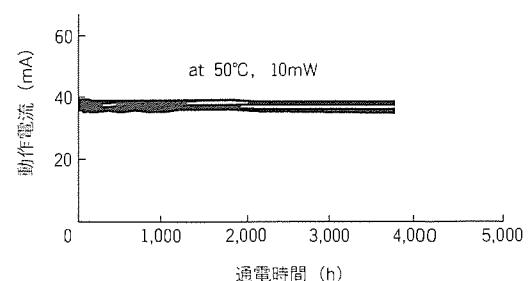


図9. 寿命試験結果

らのことにより、活性層を含むすべての層をMOCVD法で成長したレーザを初めて実用化した。レーザ特性の高均一なp型基板上FS-BHレーザの実用化は、レーザの低価格化及びアレー化を実現可能にし、今後の高度情報化社会の発展に大きく貢献すると思われる。

#### 参考文献

- (1) Takemoto, A., Sakakibara, Y., Nakajima, Y., Fujiwara, M., Kakimoto, S., Namizaki, H., Susaki, W.:  $1.3\text{ }\mu\text{m}$  InGaAsP/InP Distributed-feedback p-substrate Partially Inverted Buried-heterostructure Laser Diode, Electron. Lett., 23, 546~547 (1987)
- (2) Kawaguchi, H., Takahei, K., Toyoshima, Y., Nagai, H., Iwane, H.: Room Temperature C.W. operation of InP/InGaAsP/InP Double Heterostructure Diode Lasers Emitting at  $1.55\text{ }\mu\text{m}$ , Electron. Lett., 15, 669~670 (1979)
- (3) Ishiguro, H., Kawabata, T., Koike, S.: Very Low Threshold Planar Buried Heterostructure InGaAsP/InP Laser Diodes Prepared by Three-Stage Metalorganic Chemical Vaper Deposition, Appl. Phys. Lett., 51, 874~876 (1987)
- (4) 松本啓資, 西口晴美, 石村栄太郎, 西村隆司, 中島康雄, 多田仁史, 後藤勝彦, 木村達也, 柿本昇一:  $1.3\text{ }\mu\text{m}$  帯10ビームレーザダイオードアレイ, 電子情報通信学会論文誌, OQE92-176 (1992)
- (5) Ohkura, Y., Kimura, T., Nishimura, T., Mizuguchi, K., Murotani, T.: Low Threshold FS-BH Laser on p-InP Substrate Grown by All-MOCVD, Electron. Lett., 28, 1844~1845 (1992)

# 701系電車用

## スポットライト

## 走行風利用自冷式主変圧器

交流電車の床下には、電車の駆動回路及び補助回路の電源用として主変圧器が搭載されています。従来から、その冷却には電動送風機を使用した強制風冷式が採用されてきました。

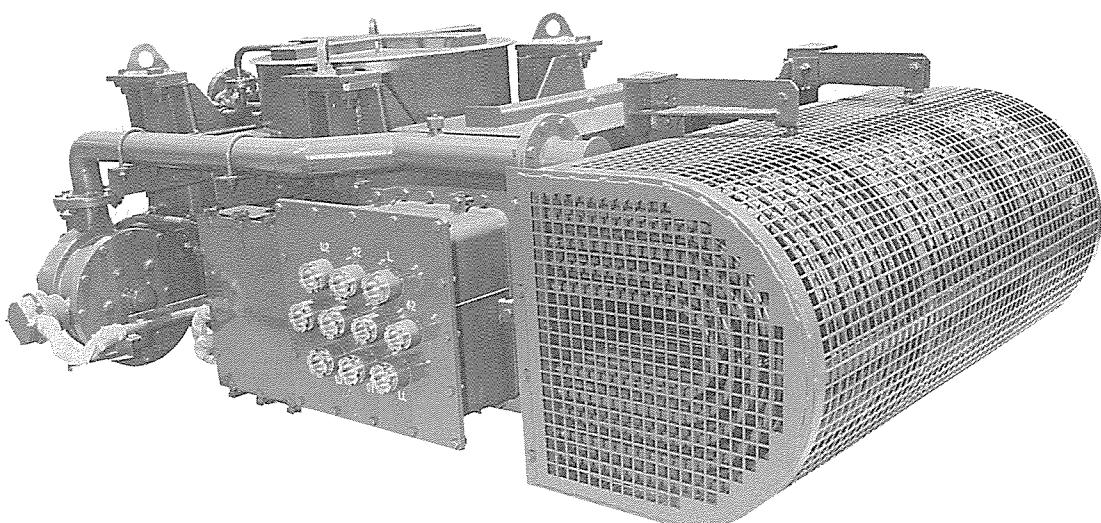
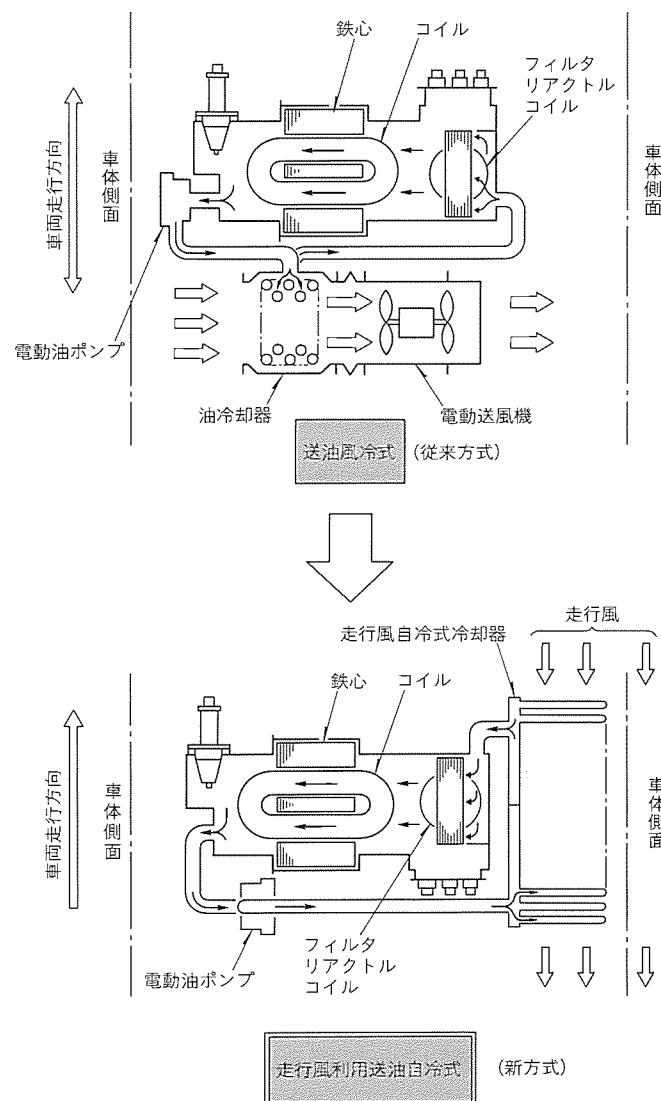
三菱電機では、車両走行時の自然風を利用して主変圧器を冷却する新しい冷却方式(走行風利用冷却自冷式)を開発・実用化し、このたび国内の量産車用として初めて東日本旅客鉄道(株)の701系新形車両(秋田地区奥羽本線・羽越本線の通勤電車)用の主変圧器を納入しました。この冷却方式は電動送風機を使用する従来方式に比べ、停車時のプラットホームでの騒音が少なく静かで、さらに保守の省力化・省エネルギー化が図れるというメリットがあり、今後の新形車両への適用が期待されます。

### 特長

- 電動送風機による騒音・振動がないため、低騒音化が図れます。
- 電動送風機の保守が不要、冷却器が目詰まりしにくく、かつ、清掃がしやすいという特長により、大幅な保守の省力化が図れます。
- 自然の風を有効利用して電動送風機を使用しないため、省エネルギー化が図れます。

### 仕様

形名	TM26形主変圧器 IC101形フィルタリアクトル内蔵
方式	走行風利用送油自冷式、外鉄形シリコーン油入、無圧密封式
定格	単相、50Hz 一次：20,000V 855kVA 二次： 825V×2 725kVA 三次： 388V 130kVA
内蔵リアクトル	4.6mH DC439A



# インテリジェントタイプ 自走式ゴルフカート

近年、ゴルフ場でのバッグ搬送車は自走式タイプのものや乗用式のものが主流になってきています。

このゴルフカートは、誘導路上の自動走行と、フェアウェイ内の(電動)マニュアル走行の2ウェイ方式を採用し、お客様へのよりよいサービスとキャディーさんの疲労軽減とを目標に開発しました。

誘導方式に磁気誘導方式を採用しており、雨やほこりの影響を受けず、また、誘導路における凍結や落雷等によるトラブルに対するメンテナンスの必要もないため、信頼性の高いシステムとなっています。

クッショントップ、クッショントップを採用し、また、チヨッパ制御でスピードをコントロールしているので、ゴルフクラブのがたつき音も小さく芝生面への影響も小さいというメリットがあります。

電磁波を利用したカート間の衝突防止機能、障害物を検出し距離に応じて自動減速、停止を行う障害物センサ(オプション)等を搭載し、安全面にも万全を期しています。



## 本体仕様

形 式	BAG-80A
スピーディ	自動 低速 3.0km/h、高速 7.0km/h (平地)
積載能力	4 バッグ
登坂能力	18°(自走時)
車体質量	89kg(除くバッテリ他)
走行モーター	DC24V、500W
車輪数	特殊3輪
タイヤ(mm)	前輪(Φ223×68)、後輪(Φ388×130)×2
走行時間	27h
バッテリ	EB65×2
寸 法	L1,600×W920×H940(mm)

## 充電器仕様

形 式	ZLC24-15AY1
入 力	電圧 AC100/200V 50/60Hz
出 力	電圧 DC24V 電流 15A
タ イ マ	電子 自動(4.0~9.5h)
出力コード	2.5m
外形寸法	W200×D250×H318(mm)
質 量	11.5kg

## バッテリ仕様

形 式	EB65
電 壓	DC12V
容 量	65Ah/5h
電解液比重	1.280
外形寸法	L306×W171×H236(mm)
質 量	23kg

## 特 長

### ●誘導磁石方式

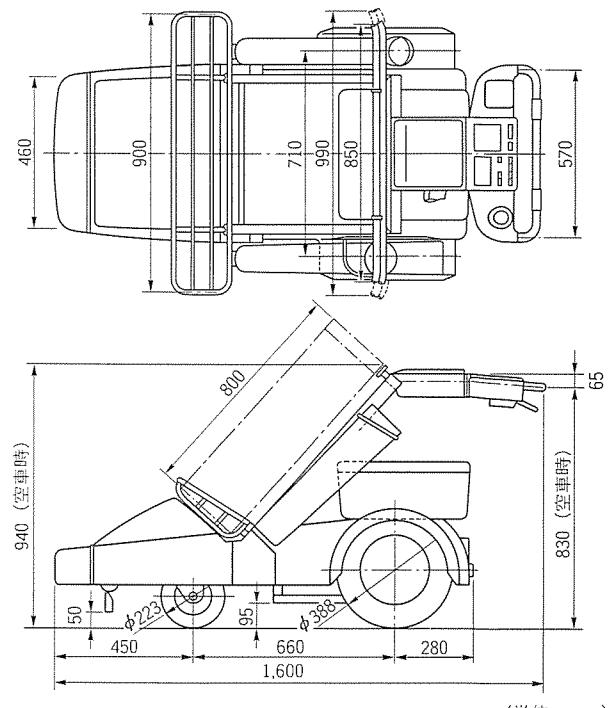
コース内はパワーハンドルによる電動カートとして、また、インターパル(ホール間)は自走カートとして自動走行させることが可能である。

誘導磁石を追加するだけで自走路ができるため、コースレイアウトの変更が容易に行え拡張性が高い。

電磁誘導を使ったループ線方式に比べ、落雷や凍結による誘導ラインのメンテナンスの必要がない。

### ●LCD(液晶)パネル装備

OKモニタ、カレンダー、バッテリ残量表示のほか各種メッセージが確認できる大型LCDを装備している。



BAG-80A形外形寸法

# 無電解ワイヤ放電加工電源

## スポットライト AE II

無電解高品位加工でワイヤ放電加工を革新したAE電源に、生産性・経済性をプラスしたAE II電源を開発しました。ICリードフレーム用金型、電子部品用金型、一般精密金型、超硬金型、耐摩耗工具、航空部品など、様々な高品位・精密金型加工、部品加工に最適です。

### 特長

#### ●無電解高品位加工による長寿命金型加工の実現

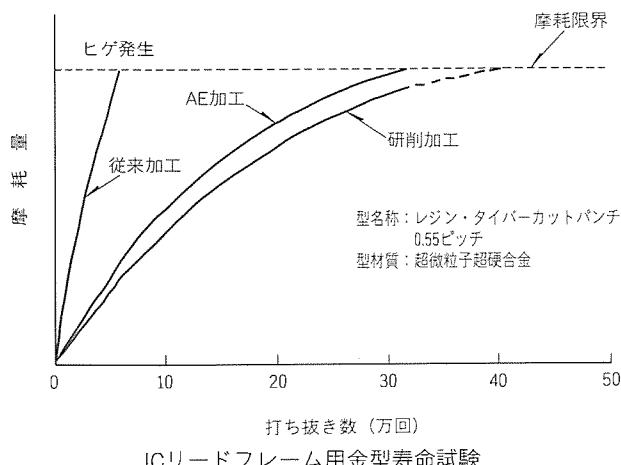
電解変質、腐食が発生しないため、加工面の硬度低下が少なく、金型寿命が大幅に向します。超硬合金など焼結体加工においても、バインダ(結合材)の溶出が防止でき、加工後の強度低下がありません。

#### ●加工面のさび(錆)や酸化層の発生を防止

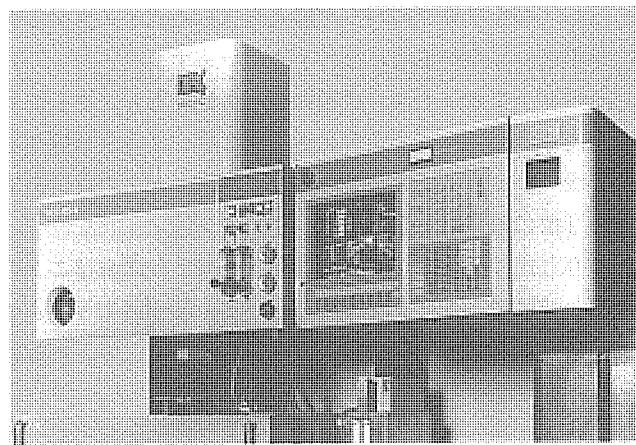
工作物の陽極酸化が進行しないため、加工面の錆や酸化層の発生を抑制できます。錆の発生しやすい鉄系材料、表面の酸化が問題となるアルミニウムやチタン合金の加工に威力を発揮します。プラスチック金型など多面加工においても、後工程でのワイヤ放電加工が可能です。

#### ●微細クラックのない精密仕上げ

エネルギーを均一化した特殊パルスにより、型寿命低下の原因となる微細クラックが極めて少ない均一な微細仕上げ加工面が得られます。



ICリードフレーム用金型寿命試験



ワイヤ放電加工機DWC90SZ+AE II

最良面あらさは  $1 \mu\text{mR}_{\max}$  です(微細加工仕様)。

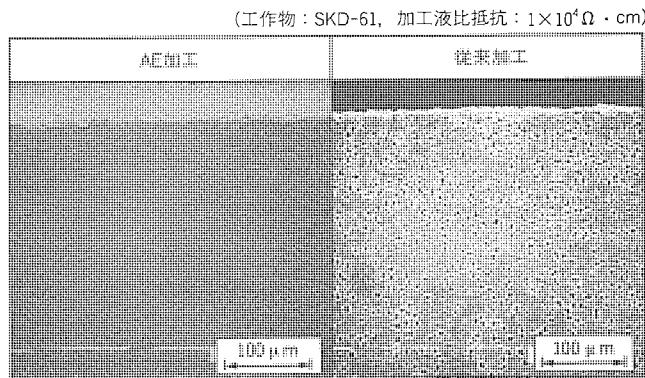
#### ●使いやすく安全な高速無人加工を実現

無電解最大加工速度は  $270\text{mm}^2/\text{min}$  です。油加工に比べると 3 ~ 4 倍の高速加工が可能です。

火災の心配がなく、消防署への届出は不要です。

#### ●イオン交換樹脂寿命の大幅向上

電源性能の向上により、標準浸せき(漬)加工におけるイオン交換樹脂寿命が約 3 倍に向上するため、ランニングコストを大幅に低減できます(SKD11連続加工時、当社比)。



(注) 写真は電解の発生しやすい悪条件下における比較です。  
通常加工では上記のような電食は発生しません。

工作物表面の電食

### 仕様

電 源 盤	型 式	G25PA-AE2	G25A-AE2	G25BA-AE2	G25HA-AE2
	回路方式	トランジスタパルス電源			
	極間最大加工电流	50A			
	加工電圧切替え	16種類			
	加工セッティング	18種類			
	休止時間	16種類			
	安定回路A	8種類			
	安定回路B	16種類			
	安定回路C	3種類			
	安定回路AE	3種類		2種類	3種類
	安定回路E		2種類		
	AVR	内蔵			
制御装置	型 式	W11PA	W11A/W11A-S*1	W11BA	W11HA
総合入力	AC三相 200/220V±10 50/60Hz, 力率0.9	15kVA	13.5kVA	9kVA/13.5kVA*2	
取付対象機種	PAシリーズ	Zシリーズ	Aシリーズ	HAシリーズ	
微細加工仕様	最良面あらさ $1 \mu\text{mR}_{\max}$	標準	標準	オプション	オプション

注 \* 1 DWC150SZは、W11A-S, DWC110SZ, 90SZはW11A。

注 \* 2 13.5kVAは、加工液温度制御装置(オプション)が付属の場合。



# 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 知的財産部  
特許営業グループ Tel(03)3218-2137

## 廃水の処理方法 (特許 第1284135号)

発明者 中山繁樹, 江崎謙治

この発明は水中の有機性の汚濁成分を除去する廃水の処理方法に関するものである。

近年、工場や家庭から種々雑多の有機化合物が排出され、河川、湖沼や海洋のBOD(生物学的酸素要求量)やCOD(化学的酸素要求量)が増加し、環境を著しく汚染させている。これらの有機成分を除去する方法として、オゾンの酸化力を利用する研究が行われている。また、オゾンと同様、二次公害のない過酸化水素水の廃水処理の応用も注目されつつある。しかし、オゾンは有機物の不飽和結合の切断には極めて有効であるが、ケトンやカルボン酸類などの有機物の酸化生成物とはほとんど反応しないためBODやCODを完全に除去することはできない。また、過酸化水素は、第一鉄塩との溶液(フェントン試薬)が、強力な酸化作用を有するが、厳密なpH制御や鉄イオンを添加する必要があり、その除去のための後処理が必要となり、実用上問題があった。

この発明は、これらの酸化剤の欠点を補う廃水の処理方法を提供することを目的としているもので、オゾンや過酸化水

素単独では酸化されない有機物を含む廃水に所定量の過酸化水素を添加し、オゾンと反応させることを特長とする。表は、酢酸イオンを含有する廃水2ℓにそれと等モルの過酸化水素を添加し、pHを7に調整した後、16mg/ℓのオゾンを含有する酸素を1ℓ/分の流速で反応させたときの全有機炭素量(TOC)を示したものである。

この表から明らかなように、オゾン又は過酸化水素単独では、TOCはほとんど除去されないが、両者を併用するとTOCが除去されることが分かる。

方 法	T O C (ppm)	
	反応前	反応後 (30分)
オゾン単独	71.5	70.5
過酸化水素単独	72.0	72.0
オゾン+過酸化水素	71.6	45.5

## 高周波加熱炉 (特許 第1372978号)

発明者 美濃和芳文, 前田 進, 小村宏次

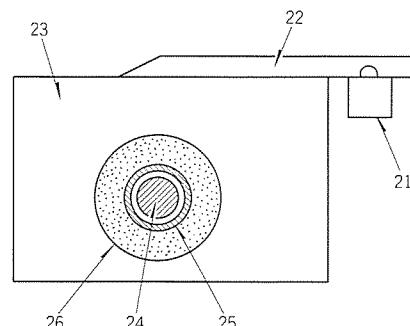
この発明は高周波で物質を加熱する高周波加熱炉に関するものである。

従来の高周波加熱炉においては、電界の不均一性のため、被加熱物に加熱むらが生じたり、また、輻射や自然対流などによる熱放射のため、被加工物を1,000°C以上に加熱することは非常に困難であった。

この発明はこのような従来のものの欠点を除去するためになされたもので、図に示すように被加熱物(24)を、高周波発熱する物質からなる内側容器(25)と高周波損失の小さい耐火断熱体からなる中間容器(26)とで順次囲焼し、高周波オーブン(23)内に設置し、高周波発生装置(21)で発生した高周波を導波管(22)を介して高周波オーブン(23)内に導くことにより、高周波オーブン(23)内に各種モードの共振電磁界を発生させる。この高周波電界により、中間容器(26)の耐火断熱体

は高周波の減衰がほとんど生じず、内側容器(25)を直接加熱するため、被加熱物(24)を均一に、かつ例えば1,000°C以上の高温に加熱することができる。

以上のようにこの発明によれば、被加熱物を均一かつ高温に小さな高周波入力により加熱することができる。





# 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 知的財産部  
特許営業グループ Tel.(03)3218-2137

## 融雪、凍結防止装置 (特許 第1267241号)

この発明は、寒冷地における屋根などの融雪、凍結防止装置の性能改善に関するものである。

屋根などに積もった雪氷は、温水管を流れる温水によって融解される。ここで、温水から加えられる熱量  $Q$  は温水の温度を  $T_W$ 、雪氷の温度を  $T_S$ 、熱抵抗を  $R_t$  とすると、

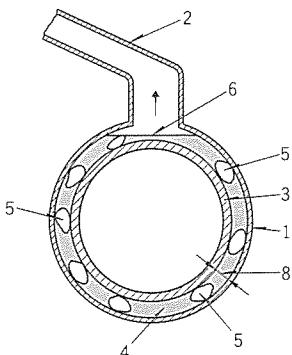
$$Q = (T_W - T_S) / R_t$$

で与えられる。本式から明らかのように、 $T_W$ 、 $T_S$  が一定である場合に、融解能力を増大させるためには  $R_t$  を小さくして  $Q$  を大きくすればよいことが分かる。

この発明はこの点にかんがみてなされたもので、図に示すように、温水管(3)の外壁面と蒸発部(1)の内壁面との間隙(8)を 3 mm 以下に抑えることにより、温水管(3)の外壁面から発生した蒸気泡(5)を間隙内で押し潰されるようにして上昇させ、作動流体(4)中に発達した過熱境界層を強制的に剝奪

して熱抵抗を小さくし、沸騰伝達率を向上させている。

この発明は以上のように温水管と蒸発部の間の間隙幅を 3 mm 以下にすることにより沸騰に基づく熱抵抗を小さくして、融雪、凍結防止装置の性能を改善することができる。



〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol. 67 No. 9 特集“ソフトウェア生産技術”／“パワーデバイスの進歩”

### 特集論文 “ソフトウェア生産技術”

- 今こそ、ソフトウェア工学の実践に向けた研究開発を
- ソフトウェア生産技術の現状と動向
- システム生産標準 “SPRINGAM”
- ソフトウェア生産の診断技術
- PPK 法に基づくソフトウェア設計プロセス支援
- オブジェクト指向ライブラリ Ghost House による UI システム構築
- 事務処理分野向けクライアント・サーバ型ソフト生産システム
- プラント制御分野向け統合化生産システム
- 組込み分野向け統合化ソフトウェア生産システム
- ソフトウェア品質管理システム
- 生産性向上を目指すソフトウェア技術者教育
- 大規模システム向けプロトタイピングシステム

### 特集論文 “パワーデバイスの進歩”

- 新しい応用を拓くパワーデバイス
- パワーデバイスの現状と展望
- 大容量・高耐圧 IGBT モジュール
- 第三世代 IPM
- 低損失共振形インバータ用 IGBT
- 大容量ゲートターンオフサイリスタ (GTO)
- GTO パワーブリック
- 高信頼度パワーモジュールパッケージ技術
- 低損失ソフトリカバリダイオード
- パワーデバイスのシミュレーション技術

### 三菱電機技報編集委員

委員長 田岡恒雄  
委員 永田謙蔵  
" 白井健三  
" 岩橋努  
" 福田哲也  
" 畑谷正雄  
" 鈴木軍士郎  
" 鈴木幹雄  
" 大井房武  
" 江頭英隆  
" 松村恒男  
" 才田敏和  
" 鳥取浩  
幹事 長崎忠一  
8月号特集担当 石川倫康

### 三菱電機技報67巻8号

(無断転載を禁ず)  
1993年8月22日 印刷  
1993年8月25日 発行  
編集兼発行人 長崎忠一  
印 刷 所 千葉県市川市塩浜三丁目12番地 (〒272-01)  
菱電印刷株式会社  
発 行 所 東京都港区新橋六丁目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  
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㈹, 振替口座東京6-20018  
定 價 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)

# 三菱中容量CVCF装置

## スポットライト MELUPS 8700H

平成2年発売のIGBTインバータ式大容量CVCF装置を始め、MELUPSシリーズ無停電電源装置は、単機容量で0.5kVAから1,000kVAまで標準シリーズ化しています。

このたび発売しましたMELUPS8700Hは、急速に進展しているコンピュータのダウンサイジングなどに対応して、75~200kVAまで、中容量クラスの汎用形(規格形)シリーズを拡大したCVCF装置で、豊富なオプション構成による応用システムもそろえています。

主回路は高速動作に最適の先進のIGBTモジュールを採用したMELUPS9100/9200の技術を受け継ぎ、また、制御回路は高度なデジタル化により、高性能・高機能・高信頼性を実現したCVCF装置です。

さらに、コンピュータ室などに設置されることも想定して、スペースユーティリティが生かせる業界最小のコンパクト設計にするとともに、シール形鉛蓄電池を採用したメンテナンスフリー化とあいまって、より一層使いやすくしています。

### 特長

#### ●コンピュータ負荷でも出力電圧は正弦波に制御

コンピュータ機器のようなひずんだ電流でも、三相個別瞬時波形制御方式により出力電圧は正弦波に制御されます。さらに大きなピーク電流耐量ともあいまって、コンピュータ負荷に100%供給できます。

#### ●100%負荷急変に対応

0→100%という大きな負荷変動に対しても、出力電圧変動は±5%以下と理想的な出力特性です。

#### ●三相不平衡負荷に強い

三相個別瞬時波形制御方式により、極端な100%不平衡負荷でも、電圧不平衡は±2%以下に制御されます。

#### ●コンパクト

高周波スイッチング技術や先進の部品実装技術を駆使して、大幅なコンパクト化を実現しました。

#### ●デジタル制御/デジタルモニタリング

マイコン制御により高機能・高信頼性を実現するとともに、デジタル計測・操作ガイダンスなどのモニタリング機能を標準装備しています。

#### ●メンテナンスフリー

シール形鉛蓄電池を標準的に採用することにより、均等充電・液面レベルチェック・補水などの日常メンテナンスは不要です。



MELUPS 8700H (100kVA)

### 主要諸元

項目	仕 様			
定格出力容量 (kVA)	75	100	150	200
交流入力	相 数	三相 3線		
	電 壓	200, 210, 220, 400, 415, 440V		
	周 波 数	50又は60Hz		
交流出力	相 数	三相 3線		
	電 壓	200, 210, 220, 400, 415, 440V		
	周 波 数	50又は60Hz		
	定格負荷力率	0.8(遅れ)		
蓄電池	形 式	シール形鉛蓄電池(メンテナンスフリー)		
	停電補償時間	5分又は10分		
CVCF	W	800	800	1,000
本体寸法 (mm)	D	840	840	890
	H	1,950	1,950	1,950

# 1,000kV外鉄形変圧器

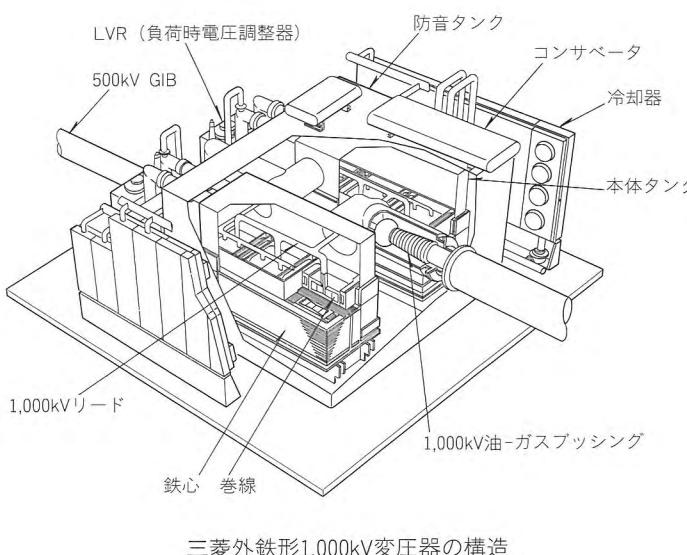
## ス ポ ッ ツ ラ イ ト 0号器の完成

UHV変圧器の開発は1973年に始まり、1977年には試作器を外鉄形で製作し、約3年間かけて各種試験を行うとともに、数多くの要素モデルによる検証を行うなど実用化に向け第一歩を踏み出しました。しかし、その後の電力需要の低迷から1,000kV送電の導入は一時見送られましたが、今般、高品質・高信頼性の電力の安定供給に向け、我が国初の1,000kV送電導入が東京電力(株)で検討されています。

このような情勢の中で、当社赤穂製作所では1,000kV送電用機器として、UHV変圧器の開発を急ピッチで推進しております。UHV変圧器は大容量・高電圧であるため、従来の500kV変圧器にもまして一層の信頼性の向上を図る必要があります。そこで、UHV変圧器の製作に先立ち、特に絶縁に関し、実際の変圧器と同一規模の巻線絶縁モデル及びリード絶縁モデルを製作して絶縁検証試験を行い、その結果を反映した0号器(UHV実変圧器の1/2相に相当する)を完成しました。

UHV変圧器は500kV変圧器に比べ電圧・容量共に2倍になるため輸送上の制約から1相を2分割した2タンク構造を採用しました。すなわち、同一電圧(1,050kV)で1/2容量(1,500/3MVA)の変圧器を2台製作して並列に接続する構造です。今回完成した0号器は、このうちの1台分(1,500/3MVA)を実変圧器と全く同一の設計及び構造で製作したもののです。

UHV 0号器は工場内の超高压試験場(UHVL)で通常の特性試験に加え、熱的及び機械的な裕度を確認する過酷試験、過電圧による絶縁性能試験を実施しました。これらの試験結果はすべて良好で、設計及び製作に対する妥当性が検証され、今後のUHV実変圧器の製作に向けて何ら問題のないことが確認できました。



三菱外鉄形1,000kV変圧器の構造



0号器の外観

### UHV変圧器の特長

- 高電圧・大容量変圧器に適した外鉄形を採用することで、変圧器のコンパクト化と高効率化が図れます。
- 一次及び二次巻線容量は3,000MVA、三次容量は1,200MVAであり、将来の送電容量の増加にも十分対応できます。
- 電圧調整幅は±7%，タップ点数は27点を採用し、系統運転電圧を広範囲にわたり細かく調整できます。
- 一次、二次及び三次側はそれぞれSF<sub>6</sub>ガス母線を使ってGISと接続するので、気中絶縁部が不要で変圧器の据付けスペースの縮小化が図れます。

### 1,000kV変圧器の基本仕様

項目	仕 様
形 式	外鉄形単相巻変圧器 (負荷時電圧調整器付き)
定 格 容 量	3,000 / 3 MVA
三 次 容 量	1,200 / 3 MVA (40%)
定 格 電 圧	一次 1,050 / $\sqrt{3}$ kV 二次 525 / $\sqrt{3}$ kV 三次 147 kV
一 次 電 圧 調 整 幅	±7 % (タップ点数 27点)
試 験 電 圧	LIWL 一次 1,950kV / 二次 1,300kV AC 1.5E - $\sqrt{3}$ E - 1.5E (1h) (5min) (1h) (E = 1,100 / $\sqrt{3}$ kV)
イ ン ピ ー ダ ン ス	18%
冷 却 方 式	送油風冷式
騒 音	65dB

# IGBT応用各軸制御VVVF

## スポットライト インバータ装置



當団07系 有楽町線インバータ車

### 07系有楽町線インバータ車主要諸元

項目	内 容
電 気 方 式	直流1,500V 架空線式
編 成	4M6T (CT1-M1-T-M2-TC1-TC2-M3-T-M1-CT2)
車両性能	加速度: 3.3km/h/s (期待粘着係数 23.4%) 減速度: 3.5km/h/s (常用最大), 4.5km/h/s (非常) 最高速度: 110km/h (地上), 70km/h (地下)
制御容量	205kW誘導電動機 1台×4群 最大525kVA×4群
主回路方式	IGBT応用各軸制御 3レベルVVVFインバータ 遠隔自動開放機能付き
主回路素子	高耐圧IGBT (1,500V, 600A) × 1S1P/アーム
制御方式	VVVFインバータによる自動加減速制御方式 新方式空転再粘着制御付き、軸重移動補償制御付き 電力回生ブレーキ付き、V/f一定、定トルク制御付き
周波数制御範囲	0 ~ 200Hz (非同期 ⇄ 3 ⇄ 1' ⇄ 1 パルスモード切替え)
電圧制御範囲	AC 0 ~ 1,400V

今回、帝都高速度交通営団に営業投入された07系有楽町線インバータ車は、次世代の主回路半導体素子といえる絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)素子を応用した3レベル各軸制御インバータを採用し、冗長性の確保と動力車集中(電動車/付随車比率 1:1.5)を両立させています。IGBT素子には業界最大クラスの1,500V, 600A素子を1アーム当たり1S1P接続で使用し、機器の小型軽量化と信頼性を確保しています。また、IGBT素子の特長である高速スイッチング特性を生かしたベクトル演算による非同期3レベル変調を採用し都市交通機関として必要な静かな車両を実現し、好評を博しています。



1,500V, 600A  
IGBTモジュール

### 適用技術

#### (1) 小型軽量化

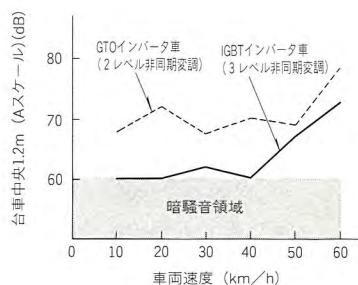
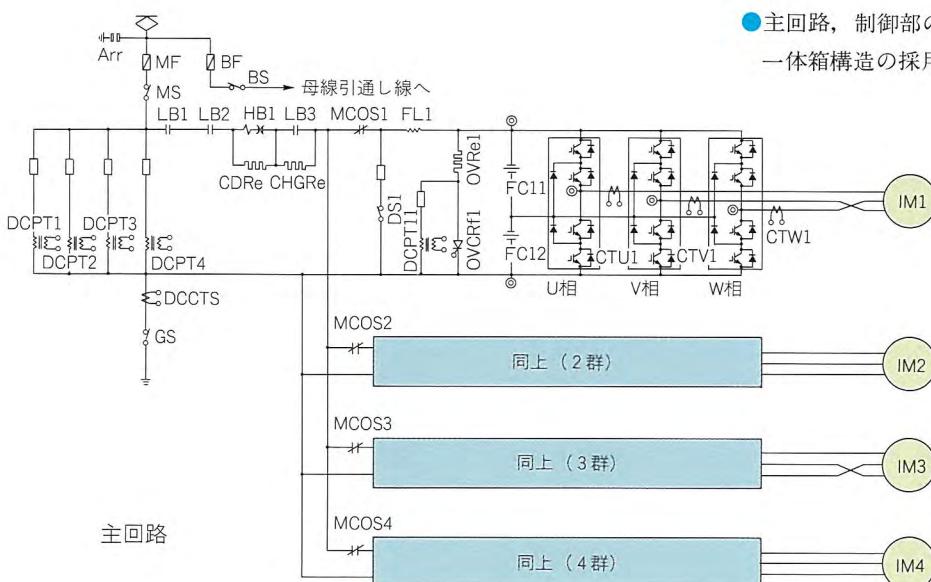
- 業界最大クラスのIGBT(1,500V, 600A)素子使用によるヒートパイプ冷却の採用
- 表面実装部品を使用した高密度実装ゲートBOX(インバータ制御演算部カード3枚)の採用
- 大容量電解コンデンサの採用
- 省電力ドライバの採用: 当社GTOゲートアンプ比1/30

#### (2) 高機能化

- 低騒音化: ベクトル演算による非同期3レベル変調の適用
- 高粘着化(期待粘着係数 23.4%): 新方式空転再粘着制御(軸重移動補償制御付き)の適用
- 制御機能の拡大: ディジタルシグナルプロセッサ(DSP), ハイブリッドICの適用

#### (3) 保守性

- 主回路、制御部の機能別ユニット化によるビルトアップ式一体箱構造の採用



変調方式の改善による  
車内騒音の低減効果