

# MITSUBISHI

# 三菱電機技報

MITSUBISHI DENKI GIHO Vol.61 No.6

6  
1987

加工機特集



技術がつくる高度なふれあい、**SOCIO-TECH**

## 加工機特集

### 目 次

#### 特集論文

加工機特集に寄せて	1
齊藤長男	
加工機の現状と今後の動向	3
田口 堅・赤枝潤二郎	
ワイヤ放電加工機の最新技術	6
倉橋安則・荒槻 淳・新開 勝・大丸隆正・中山建夫	
ワイヤ放電加工特性と加工技術	12
弥富 剛・岩崎健治・真柄卓司・志田伸一・牧野文平	
NC型彫り放電加工機の最新技術	16
田中俊明・加藤幸夫・松田久和・西川守久・七沢禎文	
NC型彫り放電加工特性と加工技術	24
高鷲民生・尾崎好雄・大泉敏郎・酒井洋三	
型彫り放電加工用電極の1チャック多面加工技術	30
三嶋吉一・古川誠司・中山喜敬	
炭酸ガスレーザ発振器	36
菱井正夫・佐藤 清・大谷昭博	
炭酸ガスレーザ加工機	40
吉田公生・山本昭規・柴山耕三郎・白須浩蔵	
炭酸ガスレーザ加工技術	44
木谷 基・金岡 優・柴山耕三郎・吉田寿男	
電子ビーム加工機	52
原 且則・桂田重穂・山本吉廣・荒川及藏・村上英信	
電子ビーム加工技術	58
内海晴之・大田正雄・平本誠剛・山根義雄・丸山敏郎	

#### 普通論文

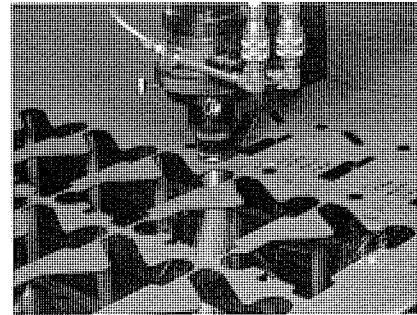
マイクロ波レベル計 ML2001	66
春尾弘志・長田俊二・齊藤勝男・高松泰男・小知和晴雄	
電源設備の信頼性向上と不燃化	
－ガス絶縁スポットネットワーク受電設備－	70
蓑輪 治・島津 熱	
プラスチックパッケージ型ECL RAM	76
中井義幸・小山和美・日下健一・黒肥地稔・真継泰典	
特許と新案	
位相弁別回路、回転子の接続導体の異常検出装置	83
耐電圧試験方法	84
スポットライト	
三菱静止形並列運転保護継電器MULTICAPシリーズ	80
三菱エンジン自動試験システム	81
低スイッチングノイズ、高出力電流、高速CMOSロジックIC M74HC-1シリーズ	82
三菱静止形小容量CVCF装置《MELUPS-8400S(1,3,5kVA)》	85
三菱盤用図面作成システム《MELCAD-ES/MINI II》	86
三菱13cmライトワنس形光ディスク装置MW形	(表3)

### 表紙

#### 炭酸ガスレーザビーム加工

高エネルギー密度に集光された炭酸ガスレーザビームは、材料の溶融・蒸発・除去の過程を瞬時に行う優れた加工熱源として、切断加工に応用されている。

写真は、パルスピーク出力が1,500WのML1212Hz-15SRPによるSPCC1.0mm厚鋼板の高速切断であり、切断速度としては、穴加工は0.3m/min、外周加工は5m/min、また、早送りは15m/minで切断加工している。1部品の加工時間は約2分である。加工精度は真円度は約10μm、面粗度は5~6μm (R<sub>max</sub>) と非常に高精度である。



## アブストラクト

### 加工機の現状と今後の動向

田口 堅・赤枝潤二郎

三菱電機技報 Vol.61 No.6 P3 ~5

生産活動用加工機械がメカトロ化され、高精度化・高速化・高信頼化されたのみならず、柔軟性・複合性・集約性をもったFAシステム用ツールとして多用され、生産性の向上、合理化の担い手として注目を浴びている。

本稿では、メカトロ加工機械のうち、非接触加工法で特長付けられる放電加工機、炭酸ガスレーザ加工機、電子ビーム加工機について現状技術と将来動向について紹介する。

### ワイヤ放電加工機の最新技術

倉橋安則・荒横 淳・新開 勝・大丸隆正・中山建夫

三菱電機技報 Vol.61 No.6 P6 ~11

三菱ワイヤ放電加工機Hシリーズは、金型加工の合理化を図るために、最良面あらさ  $0.5 \mu\text{m R}_{\max}$  という超仕上加工を実現し、最大加工速度  $250 \text{ mm}^2/\text{min}$  を達成している。このHシリーズの最新鋭機であるDWC110PHは、加工精度  $3 \mu\text{m}$  を実現するとともに自動スクラップ処理装置などの新技術を搭載した広範囲な高精度自動加工ができる機械である。更に、放電加工機でも、FMS・FMCといったFA化の動きが活発化していくと予想される。

### ワイヤ放電加工特性と加工技術

弥富 剛・岩崎健治・真柄卓司・志田伸一・牧野文平

三菱電機技報 Vol.61 No.6 P12 ~15

ワイヤ放電加工において加工精度の向上を図るために、最近ではセカンドカット法が注目され、高精度かつ自動化が推進されている。その中でも、当社FS電源によるサブミクロンの加工面粗さを得る超仕上加工の出現は、加工特性に革命的なインパクトを与えた。

今後、この超仕上加工を応用した自動拡大加工による微細形状加工、超高精度加工の実現、極細線による微細加工などは、大いに普及し、従来の加工法を一新することが予想される。

### NC型彫り放電加工機の最新技術

田中俊明・加藤幸夫・松田久和・西川守久・七沢禎文

三菱電機技報 Vol.61 No.6 P16 ~23

三菱NC放電加工機Kシリーズは、加工精度、加工速度、使いやすさを高次元で実現させるべく開発した最新鋭機である。このKシリーズは、数値解析手法を用いて、静的・動的精度を大幅に向上させた機械本体と、世界特許である電流波形スロープコントロール方式を採用した電源装置と、更に初心者でも1日で十分操作の習得が可能なフレキシブル自動プログラム(FAP)を採用した制御装置から構成される新世代のNC放電加工機である。

### NC型彫り放電加工特性と加工技術

高齋民生・尾崎好雄・大泉敏郎・酒井洋三

三菱電機技報 Vol.61 No.6 P24 ~29

NC型彫り放電加工では、加工対象別に最も放電加工の性能を発揮する電源が開発され、その中でも超低消耗回路は型彫り放電加工機の加工精度の向上、トータル加工時間の短縮をもたらす革新的な技術であり、無噴流加工技術の確立と最適加工条件の構築が完成した現在、今後更に高度化する自動化機能と相まって、成形金型のマザーマシンから精密加工分野への展開へと、ますます応用分野の拡大が期待される。

### 型彫り放電加工用電極の1チャック多面加工技術

三嶋吉一・古川誠司・中山喜敬

三菱電機技報 Vol.61 No.6 P30 ~35

金型加工の型彫り放電加工用電極は、多面体としての加工が必要とされている。従来は、汎用フライス盤で加工していたが、最近の金型の高精度化に対し、電極加工精度の向上が必要となってきた。このため、高精度マシニングセンターとNCチルトテーブルを組み合わせた5軸加工と、クランプ方式の開発により1チャック多面加工を実現した。また、このNCデータ生成のため、CAMシステムを導入し加工のマクロ化、単面加工データの合成システムなどを開発した。

### 炭酸ガスレーザ発振器

菱井正夫・佐藤 清・大谷昭博

三菱電機技報 Vol.61 No.6 P36 ~39

レーザ加工機の需要拡大に伴って、レーザ発振器の高性能化・高信頼化・小型化が急速に進展しつつある。

本稿では、加工性能との関係が密接なパルス特性、ビームモードなどの観点から、レーザ発振器の技術動向、当社各種レーザ発振器の特長、加工用レーザ発振器のあるべき姿について概論し、今後のレーザ発振器の展望について考察する。

### 炭酸ガスレーザ加工機

吉田公生・山本昭規・柴山耕三郎・白須浩蔵

三菱電機技報 Vol.61 No.6 P40 ~43

炭酸ガスレーザを用いた加工システムは、今や金属切断分野を中心に、産業用として幅広いユーザーに使用されている。

本稿では、この切断分野に使用されている最新の加工システムを紹介する中で、システムの技術動向・特長を説明する。また、今後の用途拡大が期待される三次元加工システム、溶接、表面改質を目的とした加工システムを合わせて紹介する。

# Abstracts

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 24 ~ 29 (1987)

## Characteristics and Application Engineering of NC Die-Sinking EDMs

by Tamio Takawashi, Yoshio Ozaki, Toshiro Oizumi & Yozo Sakai

Power supplies have been developed for NC die-sinking EDMs that optimize the performance of each type of machining. One revolutionary development has been that of ultralow electrode-wear circuits that raise the precision of die-sinking operations, while simultaneously shortening the machining time. Now that optimum-condition nonflushed machining has been implemented, sophisticated automatic functions are expected to follow, and applications are expected to broaden from molding-die mother machines to other precision-machining fields.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 30 ~ 35 (1987)

## Electrical-Discharge Machining of Multifacet Electrodes with a Single Clamp Operation

by Yoshikazu Mishima, Seiji Furukawa & Yoshinori Nakayama

EDM die sinking often requires the use of multifacet electrodes. Previously the electrodes were produced on ordinary milling machines, but high-precision applications require greater precision than this technique can yield. To fill this gap, Mitsubishi Electric has developed a machining technique using a high-precision, five-axis machining center with an NC tilt-table and clamp system that enables electrical-discharge machining of multifacet electrodes without the need to remove and remount the workpiece. To generate the NC data for this application, a CAM system with macro functions has been developed to involve the machining data of a single surface.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 36 ~ 39 (1987)

## CO<sub>2</sub> Lasers for Processing

by Masao Hishii, Kiyoshi Sato, and Akihiro Otani

The strong demand for laser-processing systems has spurred rapid development of laser oscillators of high performance, high reliability, and small size. The article examines the laser pulse and beam-mode characteristics that greatly influence laser-processing performance. The discussion broadens, taking up technical trends in laser-oscillator design, features of Mitsubishi lasers, construction requirements, and an overview of future lasers.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 40 ~ 43 (1987)

## A CO<sub>2</sub>-Laser Processing System

by Kimio Yoshida, Akinori Yamamoto, Kozaburo Shibayama & Kozo Shirasu

CO<sub>2</sub>-laser processing systems are now used extensively for sheet-metal cutting and many other industrial purposes. The article describes the technology and features of a state-of-the-art laser cutting system, and also introduces promising new systems for three-dimensional processing, welding, and heat treatment.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 3 ~ 5 (1987)

## Present and Future Trends in Machining Systems

by Ken Taguchi & Junjiro Akaeda

Machine-tool technology has developed rapidly. Basic advances such as improved numerical-control functions, and higher precision, speed, and reliability have made it possible for manufacturers to implement factory automation (FA) with large benefits including flexibility, integral processing, and intensive production. FA technology is receiving widespread attention for the improved productivity and rationalized operations it yields.

The article examines the current state of the art and future trends of non-contact machining systems employing electrical-discharge, CO<sub>2</sub>-laser, and electron-beam machining technologies.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 6 ~ 11 (1987)

## Advanced Technology for Wire-Cut EDMs

by Yasunori Kurahashi, Jun Aramaki, Masaru Shinkai, Takamasa Daimaru & Tatsuo Nakayama

Developed to reduce the machining operations required for die production, Mitsubishi H Series wire-cut EDMs boast ultrafine-finishing capabilities of 0.5μmRmax., and maximum cutting speeds of 250mm<sup>2</sup>/min. The top-of-the-line Model DWC110PH machines accurately to within 3μm, and features an automatic scrap rejector and other new functions that suit it to a wide spectrum of precision automatic-machining applications. These EDMs are intended to meet the greater demands placed on machines as flexible manufacturing system (FMS) and flexible machining cell (FMC) concepts are introduced into wire-cut EDM processing.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 12 ~ 15 (1987)

## Wire-Cut EDM Characteristics and Application Engineering

by Takeshi Yatomi, Kenji Iwasaki, Takuji Magara, Shin'ichi Shida & Bumpei Makino

Recently second-cut machining has been widely adopted to boost the machining accuracy of wire-cut EDMs, and new equipment now offers second-cut functions that are fully automated and of very high precision. Mitsubishi ultrafine-finishing wire-cut EDM equipment employs fine surface (FS) power supplies to realize submicron-roughness surface finishes in a dramatic improvement of second-cut machining characteristics.

Future applications of this technology include automatic coreless machining of intricate surfaces, ultrahigh-precision machining, and very-fine-wire micromachining. These applications will soon be implemented on a broad scale, reducing the need for conventional machining.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 16 ~ 23 (1987)

## Advanced Technology for NC Die-Sinking EDMs

by Toshiaki Tanaka, Yukio Kato, Hisakazu Matsuda, Morihisa Nishikawa & Yoshifumi Nanasawa

Mitsubishi K Series NC electrical-discharge machines feature state-of-the-art design with vastly improved precision, speed, and ease of use. Numerical analysis has been adopted in K Series, realizing dramatic increases of both static and dynamic precision. K Series EDMs also feature a power supply with a slope-control system that is internationally patented, and a highly operable control unit with flexible automatic programming. Inexperienced operators can learn to operate the system within a single day.

## アブストラクト

### 炭酸ガスレーザ加工技術

木谷 基・金岡 優・柴山耕三郎・吉田寿男  
三菱電機技報 Vol.61・No.6・P44~51

炭酸ガスレーザは、高エネルギー密度熱源の特徴をいかして、種々の加工に応用されている。本稿では、著しい加工品質の向上を遂げ、最も応用分野の広がっている切断加工を中心に、溶接、熱処理加工技術の動向と加工事例について紹介する。特に切断加工では、当社名古屋製作所内の板金加工におけるレーザの導入例を紹介し、今日の高精度切断の実現に大きく寄与した要因についても触れた。

### マイクロ波レベル計 ML2001

春尾弘志・長田俊二・齊藤勝男・高松泰男・小知和晴雄  
三菱電機技報 Vol.61・No.6・P66~69

現在、各種のプロセス用レベル計があるが、いずれにも問題がある。浸漬タイプのレベル計の多くは、汚損の可能性があり、汚損の問題のない非接触タイプで従来からある超音波レベル計は、測定面の状況などにより計測不能となるときがある。そこで我々は、これらの問題を解決する非接触タイプのレベル計として、汎用型のマイクロ波レベル計を開発した。本稿では、その特長、原理、構成及び適用などについて記述する。

### 電子ビーム加工機

原 且則・桂田重穂・山本吉廣・荒川及藏・村上英信  
三菱電機技報 Vol.61・No.6・P52~57

電子ビーム加工機には、多種類のワークを高能率で加工できるムービングガン式電子ビーム溶接機で代表される個別生産機シリーズと、量産ワークを安定に生産できる標準量産機シリーズとがある。

これらの加工機を生産現場に適合させるため、個別生産機では主にビームの高性能化・多機能化、加工条件のCNC化の技術を、量産機では陰極の長寿命化、装置の自動ライン化、排気時間の安定化の技術を組み込んだ製品としている。

### 電源設備の信頼性向上と不燃化

——ガス絶縁スポットネットワーク受電設備——  
蓑輪 治・島津 熱  
三菱電機技報 Vol.61・No.6・P70~75

都市の近代化、集中化により、電力供給の信頼性の要求がますます高まっている中で、無停電電力供給方式のスポットネットワーク受電設備の採用例が多くなってきている。主に、大都市高層ビルに採用されているこの受電設備は、新型ネットワークリレーの開発に併せ、変圧器の低損失化、保守の容易さ、不燃化、小型化の観点から、ガス絶縁方式が見直されてきている。変圧器と開閉器を一体化したガス絶縁機器を中心にガス絶縁受電設備を紹介する。

### 電子ビーム加工技術

内海晴之・大田正雄・平木誠剛・山根義雄・丸山敏郎  
三菱電機技報 Vol.61・No.6・P58~65

電子ビーム加工は、高エネルギー密度のビームを用いた高能率の加工法で、0.05mmの薄板精密溶接から、300mmの超厚板1パス溶接まで、加工レンジはきわめて広い。更に、電子ビームは高速偏倚、フォーカシング、ビームのパレス化など電気的な高速制御が可能で、最近はコンピュータ、NCなどエレクトロニクスの発達で加工機能も一段と高められ、溶接はもちろんのこと、表面焼入、穴あけ、刻字・マーキング、彫刻などその適用分野はますます拡大しつつある。

### プラスチックパッケージ型ECL RAM

中井義幸・小山和美・日下健一・黒肥地 稔・真継泰典  
三菱電機技報 Vol.61・No.6・P76~79

ECL RAMは、高速のスタティックメモリで、大型計算機のバッファメモリなどに用いられるが、発熱量が大きいことや高信頼度を要求されることから、従来、セラミックパッケージに封入されていた。このたび、特殊形状のリードフレームと高熱伝導性並びに低応力化樹脂を用いて、低熱抵抗、高信頼度のプラスチックパッケージを開発し、ECL RAMのプラスチックパッケージ化に成功した。

# Abstracts

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 66 ~ 69 (1987)

## The ML2001 Microwave Distance Meter

by Hiroshi Haruo, Shunji Osada, Katsu Saito, Yasuo Takamatsu & Haruo Kochiwa

Many types of distance meters have been developed for use in industrial processes, but all have suffered certain drawbacks. Liquid types are vulnerable to contamination, and noncontact ultrasonic types are affected by the surface characteristics of the test subject and sometimes are unable to return a useful measurement. Mitsubishi Electric has developed a multipurpose noncontact microwave distance meter that circumvents these drawbacks. The article describes its features, operating principles, construction, and applications.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 70 ~ 75 (1987)

## Highly Reliable, Nonflammable Equipment for Gas-Insulated Spot-Network Substations

by Dsamu Minowa & Isao Shimazu

Outage-free spot-network substations are being widely adopted to provide the reliable power supplies required in densely populated modern urban areas. These substations are generally installed in high-rise buildings, where a newly developed network relay, combined with considerations of low transformer loss, simple maintenance, nonflammability, and compact size have created a wide interest in gas-insulated designs. The article introduces gas-insulated substation equipment including integrated equipment that combines transformers and switchgear in an unit.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 76 ~ 79 (1987)

## A Plastic-Encapsulated ECL RAM

by Yoshiyuki Nakai, Kazumi Koyama, Ken'ichi Kusaka, Minoru Kurohiji & Yasunori Matsugi

Emitter-coupled-logic (ECL) RAMs are high-speed static-memory devices used as buffer memories in mainframe computers. Their high power dissipation and strict reliability requirements previously precluded the use of plastic packages, necessitating more costly ceramic packaging. Mitsubishi Electric has now developed a special lead frame and employed a highly heat-conductive and chemically inert plastic to produce a highly reliable plastic-encapsulated package with low thermal resistance. This new package has been used successfully to house ECL RAM devices, with corresponding cost benefits.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 44 ~ 51 (1987)

## CO<sub>2</sub>-Laser Processing Techniques

by Motoe Kitani, Masaru Kanaoka, Kozaburo Shibayama & Hisao Yoshida

The intense energy output of CO<sub>2</sub>-gas lasers has led to their use in many processing applications. The greatest performance improvements and widest uses of this technology are found in sheet-metal cutting applications, which are the primary focus of the article. Technical trends and typical applications of lasers in welding and heat-treating operations are also discussed, and a laser-processing system, installed in the Mitsubishi Electric Nagoya Works for sheet-metal cutting, is introduced. Development of the system is expected to contribute greatly to future advances in cutting precision.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 52 ~ 57 (1987)

## Electron-Beam Machines

by Katsunori Hara, Shigeho Katsurada, Yoshihiro Yamamoto, Kyuzo Arakawa & Hidenobu Murakami

Mitsubishi Electric manufactures two kinds of electron-beam machines: high-efficiency special-purpose moving-gun types (the Mitsubishi Electron-Beam Welder Series) that offer maximum flexibility for individual applications, and general-purpose types (the Mitsubishi Standard Mass-Production Series) that lower equipment costs. To boost the utility of these machines, Mitsubishi Electric has improved the beam performance, added new functions, improved the CNC machining-condition-control technology of the special-purpose models, developed a long-life cathode, implemented support for automated production lines, and realized more uniform evacuation times in the general-purpose models.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 61, No. 6, pp. 58 ~ 65 (1987)

## Electron-Beam Processing Technology

by Haruyuki Utsumi, Masao Ota, Seigo Hiramoto, Yoshio Yamane & Toshiro Maruyama

Electron-beam welders generate extremely energy-dense beams that enable precise, efficient single-pass welding of workpieces ranging from 0.05mm-thick foil to heavy plate up to 300mm thick. Electron beams can also be easily deflected, focused, and pulsed. Improved computer-controlled NC electronics exploit this capability not only to improve welding performance but also to implement case hardening, engraving, and marking functions that open up a broad array of potential applications.

## 卷頭言

### 加工機特集に寄せて

#### 1. まえがき

このたび、加工機に関する特集が企画され、最新の技術の紹介が行われることは、時節柄まことに意義の深いことと考えられる。すなわち、円高を含む日米経済摩擦は、産業界の投資意欲を著しく鈍化させ、将来が危惧されるようになってきた。円高によって日本は相対的に賃金の著しく高い国になったこと、及び大量生産型産業構造からの脱却を図りながら、なお、生産性の向上を図らなければならないこと、研究開発及び試作をスピードアップする必要があることなどに關し、有効な対策を確立する必要がある情勢となってきた。いる。

このような困難な諸問題を開拓して工業の先進国として発展を続けてゆくためには、生産加工においては、比較的少量（1,000個以上）の部品であっても、できるだけ金型を早く高精度にしかも安く作ることによって多様に十分に使用して部品の生産性を上げること、出来上がった部品は精密接合を行い、機械加工にくらべ格段に安い費用で複雑な構造をとりうることが重要となる。このためには、部品類の一体化構造と分離構造との使い分けと組立作業を考慮した設計・生産にわたる一貫した技術構成が必要となる。すなわち、金型による塑性加工あるいはレーザ加工、ワイヤ放電加工した部品を電子ビームで精密溶接して完成品を構成する手法となる。

また、研究開発及び試作のスピードアップについては、加工困難な新素材や加工形状が続出するのであるが、研究者や設計者のイメージに浮んだものを、特別の治具や工具がなくともできるだけ早く現実に形状化することが大切となり、加工材質や加工形状に制約の少ない、しかも1個だけの加工でも十分に経済的になり立つ加工法が必要となる。

これらを実現するには、放電加工とレーザ加工と、電子ビーム加工とが極めて重要な役割をなすに違いないと考えられる。特にこれら加工機の新しい用途開拓とそれに応する性能の向上が一層の発展を促進する。更にはファインセラミックスの構造材料としての発展に伴い、超音波振動加工も、この仲間に入ってくると考えている。

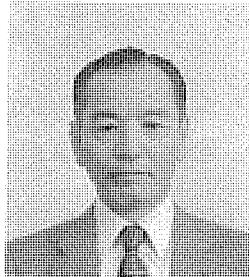
#### 2. 放電加工

放電加工に関しては金型製作に技術革新を巻き起こし、既に金型のマザーマシンとして定着していることは言うまでもない。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

豊田工業大学教授

工学博士

斎藤 長男



もつものであり、放電加工はその高精度化、短納期化、低価格化に貢献している。最近、電極の超低消耗化が実現し、より高精度の金型製作に寄与するものと思う。

ワイヤ放電加工が、二次元形状だけでなく、テーパー加工を高度に利用することによって、直線で創成される曲面（線織面）の加工が容易となり、双曲放物面、単双曲回転面などが加工可能となり、タービンブレードの試作品などの加工も容易となってきた。そのため設計者のイメージに浮んだ形状は、加工困難な材料や形にかかわらず容易に加工を行いうる。

最近の機械関係、電気関係、材料関係等の研究室では、破壊じん性試験片、翼形模型、焼結金型、押出ダイスや導電性セラミックスの加工などを試作工場や研究室に備えつけたワイヤ放電加工によって、意のままに加工し、研究のスピードアップを図っているところが多い。また、数年前見学した米国の航空エンジン会社は、ジェットエンジンのタービンブレード曲面及び植込みのクリスマスツリーを加工するのにワイヤ放電加工を用いていたが、研究開発に伴う実験準備と試作を迅速化する上で、はかり知れない役割を果たしうると考えられる。放電加工の全く新らしい用途として、極めて耐食性の優れた表面処理技術が生まれようとしている。

我々の研究室では<sup>(1)</sup>、かねてからシリコン電極による放電加工を行

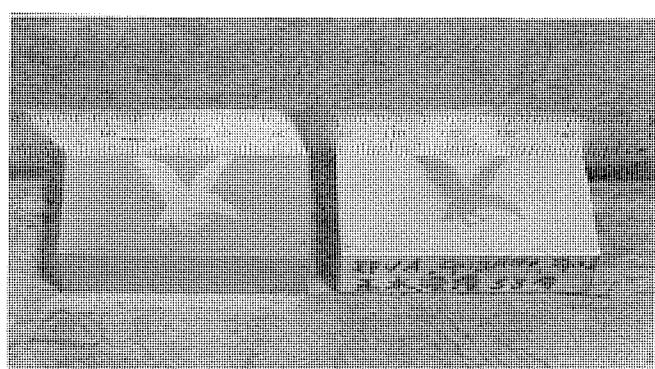


図1. (左) SUS 304 の表面に鳥の形状にシリコン電極（ワイヤ放電加工により鳥形状加工）で放電加工 (右) それを王水に53分間浸漬したもの（鳥の形状がそのまま残っている）

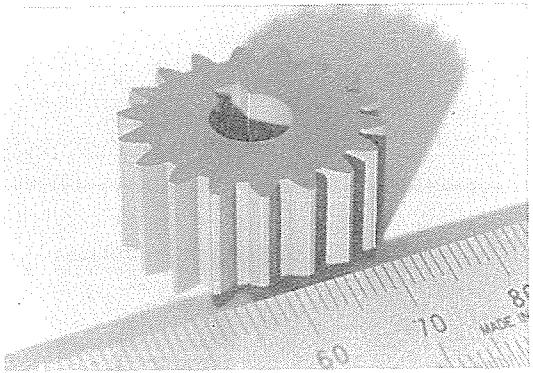


図 2. 導電性窒化けい素をワイヤ放電加工したもの

っているが、例えばSUS 304 (18 Ni-8 Cr ステンレス鋼) の表面をシリコン電極で放電加工を行うと、王水にも侵されない、しかも母材との密着性が極めて強固な3~4 μmの厚みをもつアモルファス膜が生成されることが分かった。図1.はワイヤ放電加工で製作したシリコンの電極(鳥の絵)を用いて、SUS 304に放電加工した後、王水に50分浸漬したものである。将来は有力な表面処理法として PVD や CVD などと匹敵しうる分野も出てくる可能性が考えられる。

その他の新らしい用途の一つとして導電性 フайнセラミックスの精密加工がある。ファインセラミックスは本来導電性をもっているものに、硼化ジルコニウム( $ZrB_2$ )や硼化チタニウム( $TiB_2$ )などがあり、これらを焼結したものは当然導電性があり放電加工も可能である。しかし、導電性のないセラミックス例えばアルミナ( $Al_2O_3$ )や窒化けい素( $Si_3N_4$ )などに、上記の導電性 フайнセラミックスを混合して焼結しても、放電加工が可能である。図2.には導電性を与えた窒化けい素をワイヤ放電加工により歯車加工を行ったものを示す。加工速度は鋼材の加工速度と大差がない。

### 3. レーザ加工

レーザ加工機を導入した抜型とプレス作業のあるメーカーが、抜型を製作する前に板金試作品の輪郭切断加工をレーザ加工機によって行い、依頼先の試作品に対する評価結果にもとづき、そのうちの幾つかの形状の抜型を受注するという方式で成功している。この場合のレーザ加工機の稼働率は導入後1年半以上経過しているが、1日

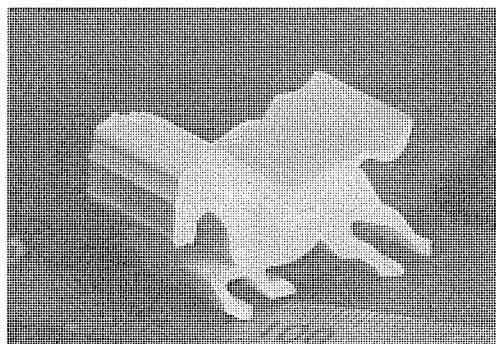


図 3. アルミナセラミックスの超音波加工による製品

平均20時間を下ったことはないと言っている。すなわち、寸法や形の異なった板金試作品が、次から次と切断されてレーザ加工機に取り付けたベルトコンベヤから流れてくるのである。古い話で恐縮だが、アルバン・トフラーの「第三の波」に述べているように、「たった1着の洋服の注文に応じてレーザ切断し、それぞれ異なった寸法の洋服を連続的に裁断することにより、採算のとれるプログラムが可能となった。24時間連続運転を基盤とする機械化された注文生産の時代に入りつつある」と述べているが、将にこれを板金くり抜き加工で実現している。これも、試作の著しいスピードアップである。

レーザ加工機の出現する前までは、板金製の機械類を製作する時には、治具類をまず製作して溶断トーチで板金から切り出していたものであるが、レーザ加工機によれば治具類を必要とせずに、溶断よりは著しく高い加工精度と少ない歪のものに、部材の切り出しができる。これによって専用機等の製作期間を著しく短かくすることができる。

### 4. 電子ビーム

電子ビームは精密溶接のきめ手である。溶け込み幅が狭いために、溶接後の寸法変化や残留応力が小さい。放電加工による金型で塑性加工を行い、ワイヤ放電加工やレーザ加工で切り出した部品を、精密溶接することにより、多品種少量生産と開発試作の合理化を行えば、どんなに複雑な形状の加工も低成本、短期間で可能となる。自動車部品にこの例が多い。

放電加工機、レーザ加工機、電子ビーム加工機が、これから機械工業の三種の神器となるであろう。

### 5. これから出現する新らしい加工機

これから構造用 フайнセラミックスが広く用いられるようになるためには、この加工法の確立が大切である。導電性 フайнセラミックスは放電加工が最適であるが、非導電性 フайнセラミックスは、超音波加工法が加工形状の制約も少なく有望であると考えられる。図3.には筆者の研究室で行っている超音波加工サンプルを示す。これは超音波加工の加工速度を大きく得られやすい半焼結状態で加工を行い、その後焼結するものであるが、焼結時の収縮を予測した寸法に加工を行う予測加工方式をとっている。この方式を各種の フайнセラミックスに適用できるようになれば、非導電性 フайнセラミックスの形状加工も困難の一つが解消されると考えられる。

### 6. むすび

多品種少量生産と、部品の組合せ結合による生産性の向上、新素材の加工、研究開発と試作の迅速化に、上記の加工機群が貢献するところは大きく、これから日本の工業の生産構造改革、研究開発の促進に必須のものとなると考えられる。

### 参考文献

- (1) 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、2号、p. 51~57 (昭和62-2月)

## D 加工機の現状と今後の動向

田口 堅\*  
赤枝潤二郎\*

## 1. まえがき

「メカトロニクス」の造語が世の人々の口の端に登場して以来、約10数年が経過し、メカトロ商品は、大は宇宙ロケット・航空機から小はカメラ・腕時計に至るまで現代社会に欠くことのできない存在になっている。しかし機械が電気・電子で制御されて動く製品は、造語「メカトロニクス」ができる以前から製作され利用されている。

「メカトロ」の言葉の発生はマイクロエレクトロニクス技術が長足の進歩発展を遂げ、その部品が使用されて後、世の中でけん（喧）伝されるようになったと言える。狭義のメカトロ製品は生産活動用加工機械に使われることが多く、その一例としてマザーマシンと言われる工作機械が数値制御化され、生産性の高いマシンに変身して以来、また省力化、無人化の担い手として登場した産業用ロボットがメカトロ製品の代表選手のごとく言われるに至って以来、一般に普及してきた。

現市場における商品は、多様化、個性化、高品質化、それでいて低価格化が要望されており、これら要望商品を生産するには通常の加工のみならず難加工性新素材加工、微細加工、高密度加工、自由曲面加工などが可能な加工機械が必要とされる。しかも低成長時代を反映して生産性向上が最優先課題としてクローズアップされており、生産活動用加工機械として、高生産性、柔軟性、複合性のあるメカトロ加工機械が出現し、成長し、脚光を浴びるに至ったと言える。

一般加工機械の分類法の一つとして、接触加工法と非接触加工法とに分けることができる。精密・微細・薄膜加工、高密度加工、曲面加工、新素材加工には非接触加工法がその特長を発揮する場合が多い。非接触加工機械として数ある加工機械のうち、メカトロの申し子的な放電加工機、炭酸ガスレーザ加工機（以下CO<sub>2</sub>レーザ加工機）、電子ビーム加工機の3加工機はその誕生以来比較的短期間のうちに10数倍のボリュームに成長している。この加工機特集号では特にこれら3加工機械を取り上げ、現状の技術動向と将来展望、また、当社のこれら3加工機械に対する取組み方を紹介する。

## 2. 加工機械の技術動向

昨今の経済状況の中で、顧客に十分なる満足感を与える、なおかつ技術競争・価格競争に打ち勝つには、企業として研究・開発部門、生産部門、間接部門すべてに対し、生産性の向上と合理化が必要とされ、トータルFAシステム（Total Factory Automation System）が企業体質改善強化の一手段としてクローズアップされている。トータルFAシステムは、営業部門での受注計上から各工場への生産指令、生産管理、資材管理、工程管理、品質管理、原価・経理管理までシステム化な物作りにより構成されるが、生産現場での物作り、部品作りには生産活動用加工機械としてその機能が重要な位置を占めている。

各種技術革新が進む中で加工機械は機械系として高精度加工、高速加工と長寿命・高信頼性が、また電気・電子系として簡単な入力指令に基づいて単純加工から任意形状までの自動加工が、自動検査、自己診断をしつつ行える方向、そして生産システム化への加工機械と

して柔軟性、複合性、集約性に富む機能を備える方向へ日夜絶えまざる研究開発が進められている。

## 2.1 放電加工機の技術動向

元来、少資源国日本にとって、また過去オイルショックなど海外からのインパクトによっても省資源思想がいかに大切であるかは一般家庭にも浸透している。そして、省資源思想が製品コストを低減させる上でもいかに重要であるかは言及するまでもない。製品コストの低減はその製造過程において主に材料費・加工費の低減であり、省資源加工を取り入れることによる低成本部品の製造とそれらの組立によって達成されるものである。

省資源加工法の一つに塑性加工法があり、切削加工に比較して材料歩留りの向上、加工時間の短縮など塑性加工が生産コスト低減上有利な場合がある。また省資源加工法として注型品加工があり、複雑形状部品を部品の組立によるものではなく、ダイキャスト金型、プラスチック金型などを活用して最終部品を一度の加工で完成する加工法で、材料費の節減と加工費の大幅削減が図れるばかりでなく、高精度部品の製作が可能である。

塑性加工法でのプレス金型、注型加工法でのダイキャスト金型、プラスチック金型など金型が現状加工業界において高品質、低成本を具現化するために重要な地位を占めており、例えば自動車製造において金型がなければ現在の高剛性・軽量・低燃費の車は作れなかつたと言われている。

金型製作のマザーマシンと言われている放電加工機は、数々の不況期においてもその生産額はあまり影響を受けることなく増大し、1985年度は約897億円を計上し、10年前に対し約13倍の成長を遂げている。1986年度は円高不況により影響を受け若干低下するも、この成長は、拡大した金型需要のみならず放電加工機には焼入れ硬化された鋼材・高硬度の焼合金が非接触で任意形状に加工が行えるという、大きい特長を有することに起因している。

今日の円高状況下においては製品コストの大幅削減は製造業にとって最優先課題であり、製品ライフの短縮化とあいまって金型に対する低成本化、短縮化の要求が大いに顕在化している。放電加

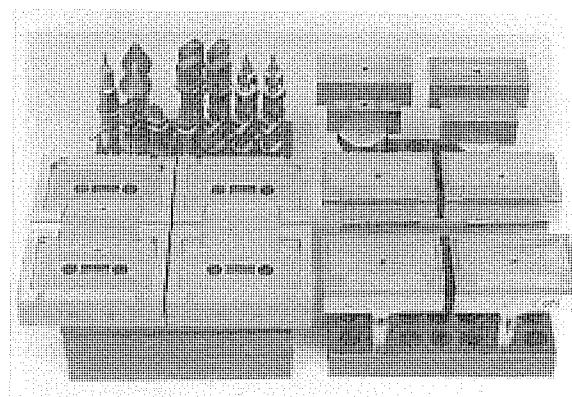


図1. 交換式電極によるモールド金型のサンプル

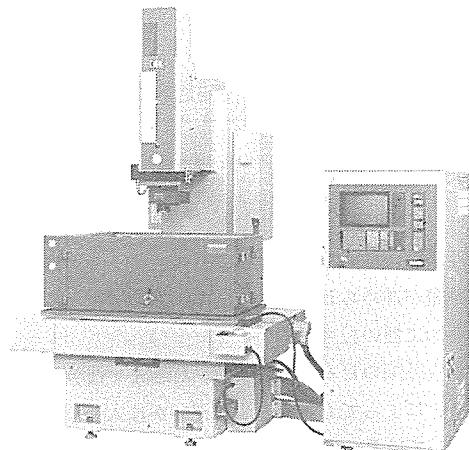


図 2. NC 型彫り放電加工機 《M 55 KC 4+G 35》

工機もこれらの要望を反映し高速化・高精度化による生産性の向上のみならず、加工プロセスにおける段取りや準備作業などの有人作業の省力化、省人化、更に進んでセルとしての自動化から周辺機器と結合してシステム全体のFA化にも対応できる機能を持った加工機械として要望されている(図 1.)。

放電加工機には NC 型彫り放電加工機(図 2.)とワイヤ放電加工機(図 3.)があり、NC 放電加工機に対して、最近カメラ、時計、計測機器など小形部品に、IC リードフレームコネクタなど電子・半導体関連部品に高精度化のニーズがあり、生産性向上を目的に自動化、高速化

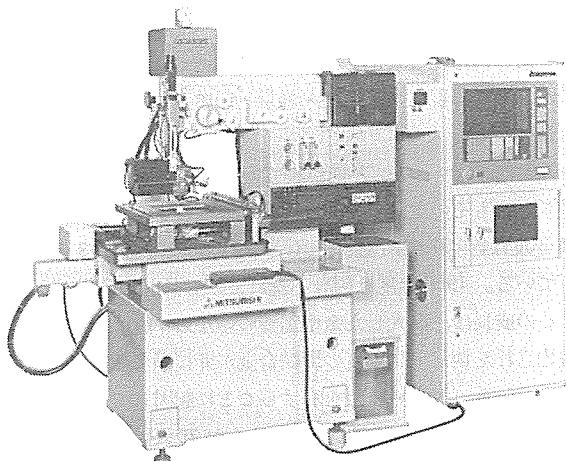


図 3. ワイヤ放電加工機 《DWC-90 H》

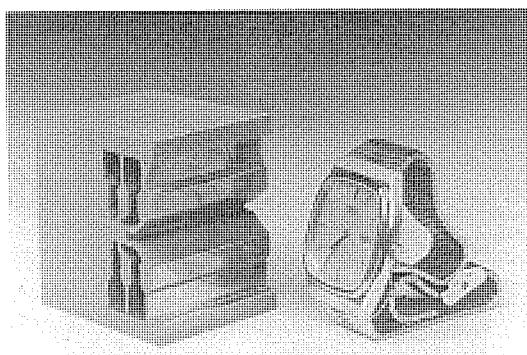


図 4. ワイヤ放電加工による加工サンプル

化、長時間安定加工化、そして操作の容易化の要望がでている(図 4.)。

これらの要求に対して当社は高精度化実現のため、高剛性と室温変化に対し相対変位の少ない機械構造を採用した機械系を、マイクロコンピュータ、パワー半導体素子など目ざましい技術革新の成果を取り入れた加工速度向上、電極の低消耗化を図った電源系を、操作性向上を目的に自動プログラミング方式、CRTへのモニタ表示、プログラムチェックを容易にするグラフィック機能などを有する CNC 制御装置を製品化している。

他方、ワイヤ放電加工機は金型加工分野にはもとより部品加工分野においても重要な役割を担いつつある。金型分野では生産性向上策として型の互換性を考慮した標準化が進み、互換機能をもつが故に金型に高い精度が必要とされるに至っている。ミクロンオーダに近い超高精度加工ができる機械の出現を強く要望されている。また、日進月歩の切断加工速度の上昇は部品加工分野での加工をクローズアップさせ、高信頼・長時間無人運転などの機能向上にともなって自動化への方向、FA 化対応技術の構築が必要とされている。

これら要望機能に対し、後掲論文にシステムとして、また機械系、加工電源系、CNC 制御系について代表例としてワイヤ放電加工機《DWC-110PH》について最近の技術動向、当社の放電加工機に対する考え方を述べるとともに、長年蓄積したノウハウを駆使して、自動拡大加工、超精密加工などの最新加工事例を紹介する。

## 2. 2 CO<sub>2</sub> レーザ加工機の技術動向

CO<sub>2</sub> レーザ加工機は米国ベル研究所の Patel が 1964 年に 1 mW 連続発振成功を発表して以来、波長・位相・伝播方向が同一であるという特性からエネルギー密度が  $10^8$  ワット/cm<sup>2</sup> と高いことによる熱加工一光の刃物として、高速・高精度・低歪・局部加工が可能な加工機械として注目を浴び、そして電気制御特性に優れ、フレキシビリティに富んだ多用途加工機械、特に非接触加工機械として、刃物の摩耗がなく、長時間運転に耐え、騒音、粉塵の発生が少なくクリーンな作業環境が維持できることなどから CO<sub>2</sub> レーザ加工機は FA システム用加工機械として重要なツールとなっている。

当社は CO<sub>2</sub> レーザ加工機にいち早く 1967 年に着目し、1974 年に高ガス圧・ガス封じ切り方式を特長とする発振器の開発に着手し、1976 年には 1 kW 連続発振に成功した。それ以降通商産業省工業技術院の「超高性能 レーザ応用複合生産システムの研究開発」に発振器開発の主契約社として参画し、1984 年には 26.5 kW の大出力連続発振

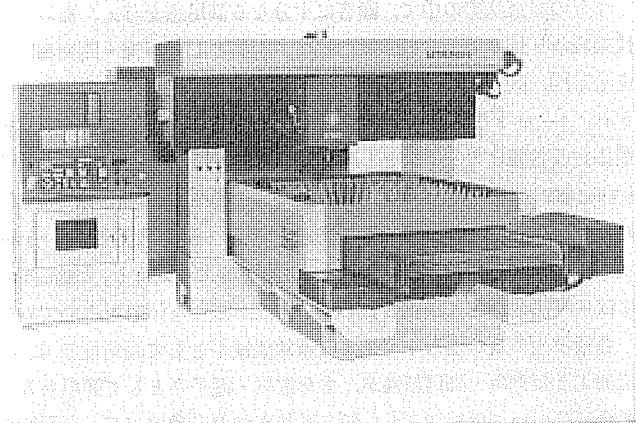


図 5. 炭酸ガスレーザ加工機 《ML-1212 H-15 SRP》

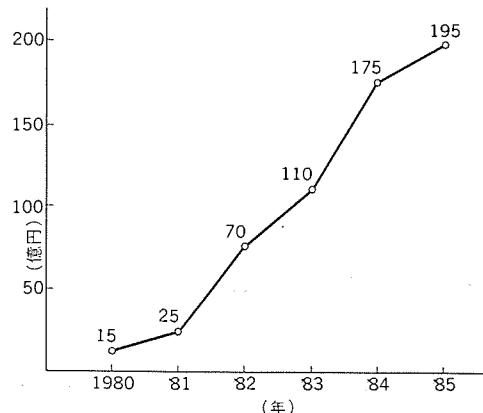


図 6. 炭酸ガスレーザ加工機総需要推移

に成功している(図5.)。

発振容量は当初の小出力から大出力へと開発が進み、小容量時代は哺乳瓶用乳首の穴開け、その後ダイボード板のスリット加工など非金属材料の加工に使用され、出力上昇にともなって薄鋼板から厚鋼板の切断へ、続いて溶接・表面改質へと用途開発が活発に行われている。

日本におけるCO<sub>2</sub>レーザ加工機に関する公式的な生産統計はないが通産省「機械安全化、無公害化委員会」、矢野経済研究所の「拡大するレーザ産業の市場実態と今後の需要展開」の資料などを参考とすると図6.のように60年度は景気後退による伸び率が落ちたとはいえ毎年度上昇曲線の生産推移となり、CO<sub>2</sub>レーザの原理発明からわずか20数年間に日本においては生産用加工機械として、約1,400～1,500台が普及、稼働するに至っている。この普及度はCO<sub>2</sub>レーザ加工機が他の加工機械に比較してその特性において優れることを示しており、この特長は今後切断のみならず溶接・表面改質への用途拡大とともに、加工機械として従来の単純な形状切断から、より付加価値の高い精密切断へ、また、プレス加工機の代替として多種少量生産・短納期・低成本化が図れる立体形状加工へとバリエーションを増加し、被加工物の搬入出、仕分装置また他の加工機械との複合化、ホストコンピュータからダウンロードされる生産指令・加工指令により稼働するシステム化へと進み、ますますFMSの中核的加工機械としての位置付けを確固たるものにしている。

CO<sub>2</sub>レーザ加工機の後掲特集論文では、安定した出力特性を誇る発振器、静的・動的特性にすぐれた加工機、高速演算処理、各種センサ等の機能をコントロールする制御装置をシステムアップした高速・高精度加工システムを説明し、あわせてCO<sub>2</sub>レーザ加工機の最新の加工技術を紹介する。

### 2.3 電子ビーム加工機の技術動向

CO<sub>2</sub>レーザ加工機が光の刃物で加工することに比べると、電子ビーム加工機は電子を刃物とした加工機械といえる。いずれも非接触加工機として、長時間の連続加工に耐え、高密度エネルギーによる溶接、表面改質、マーキングなど多目的に適用されている(図7.)。

電子ビーム加工機の場合はフォーカス制御により垂直方向に、またビーム偏向制御により前後・左右方向に刃物の位置を高速度に、自由に変えること、電気制御により出力制御が容易で必要な箇所・部分

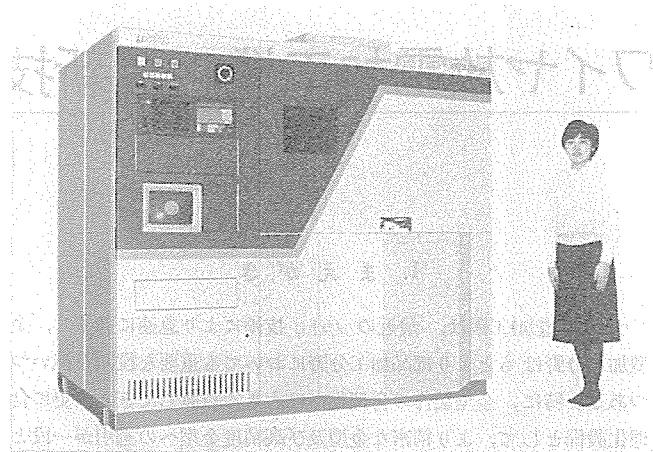


図 7. 電子ビームマイクロ加工機《MEBM》

に必要な量の加工が可能であるという特長を有している。

1950年後半以来電子ビーム加工機は真空中での溶接作業のため高品質・高信頼溶接ができるこより航空機部品などの加工に採用されてきた。しかし、リボン形電極の突然の断線による溶接停止とか、作業室の真空化への待ち時間とかがその普及に大きな障害となっていた。近年電極の長寿命化、各種真空ポンプの機能向上、連続排気・部分真空技術の進歩により、そして電子ビーム加工機自身の機能向上、改善により著しく採用が増加している。我が国においては1960年ごろから累算で約400台が設備されているが、そのうち約40%がここ5年間に導入されたものである。

当社では、1978年に1号機を自動車業界に納入して以来、棒状熱陰極の開発による電極の長寿命化(約400時間)と真空室の排気システムの性能向上を図り、電子ビーム加工機で当初問題とされた電極の短寿命と排気時間をいち早く解決に導びくとともに、「生産現場に適合できる電子ビーム加工機」を合言葉に、電子ビームの高性能化、大出力及び微小出力化、装置のコンパクト化、自動化、作業環境・作業管理下で安定した生産ができるシステム化を目標に、鋭意努力を行ってきている。

特に電子ビーム加工機は、その用途の拡大とともにFAシステムの加工機械として位置付け、ビームフォーカシングシステム、ビームオシレーション・偏向システム、ノンアーリングシステム、自動溶接線トラッキングシステムなどを開発し、加工機械のCNC化、他の加工機械、周辺装置とのシステムアップなどの方向へ製品化を進め、将来加工組立産業分野での合理化の重要なツールとなることを期待している。

### 3. むすび

以上、非接触式加工なるが故に、その特長が生産加工業界に注目され短期間のうちに大幅に普及した放電加工機、CO<sub>2</sub>レーザ加工機、電子ビーム加工機について以下の各論文でこれら加工機械の現在の技術動向、将来展望、当社製品の特長を記述するとともに、これら加工機械を稼働させ、より生産性を向上させるに必要な加工技術・ノウハウについても紹介したい。読者諸賢の御参考になれば幸甚と考えている。

# ワイヤ放電加工機の最新技術

倉橋安則\* 大丸隆正\*  
荒木 淳\* 中山建夫\*  
新開 勝\*

## 1. まえがき

ワイヤ放電加工機は、最近のメカトロ技術により急速に進歩し、金型加工分野はもとより部品加工分野においても重要な役割を担いつつある。特に、金型製作の合理化には大きく貢献してきた。更に合理化設備として、より精密な金型及び高精度金型への適用が一段と進み、ワイヤ放電加工機に対する期待と要求がますます強くなっている。

本稿では、最新市場ニーズを考慮し開発した超高精度ワイヤ放電加工機 DWC 110 PH を主体に、そのシステム、機械、電源、制御装置

及び FA 化対応の最新技術を中心に解説を加える。

## 2. 最近のニーズと技術動向

近年の多品種少量生産化と製品ライフサイクルの短期化の中で、急激な円高時代を迎える。製品コストの大幅削減が企業の優先課題となり、金型に対しても低価格化と短納期化が強く求められている。すなわち、金型製作のマザーマシンとなったワイヤ放電加工機については、その生産性向上と自動化が一段と加速され、単に加工速度の向上のみならず、加工プロセスにおける段取りや準備作業などの有人作業を省力・自動化し、更に進んでセルとしての自動化から、周辺機器と結合してシステム全体の FA 化にも十分対応できる機能を持った機械として要求されてきている。

一方、製品の軽薄短小化に対応すべく金型の細密高精度化と同時に、金型生産性向上策として金型の標準化が進み、型の互換性を持たせるべく高い精度の金型が必要となり、ワイヤ放電加工機に対してサブミクロンに近づく超高精度機の出現が強く望まれつつある。

このような市場動向の中で、最近のニーズに適合すべく、種々の新技術や新機能を開発し、搭載している。これらの新技術例として、

- (1) 加工精度  $3 \mu\text{m}$ , 最良面あらさ  $0.5 \mu\text{mR max}$  が実現できる DWC 110 PH の高精度化技術
  - (2) 高速加工から超仕上加工(サブミクロン面あらさ)まで可能とする高速加工電源と超仕上加工電源(PS 電源)
  - (3) 長時間無人運転を可能とする自動スクラップ処理装置などの自動化装置群
  - (4) 放電加工機における FA 化対応技術
- などがあげられる。

図 1. は、最新のニーズに適合する New EDM のキーポイント例を示したものである。

## 3. システムの概要

ワイヤ放電加工機 H シリーズは、工作物の大きさに応じて DWC 70 H,

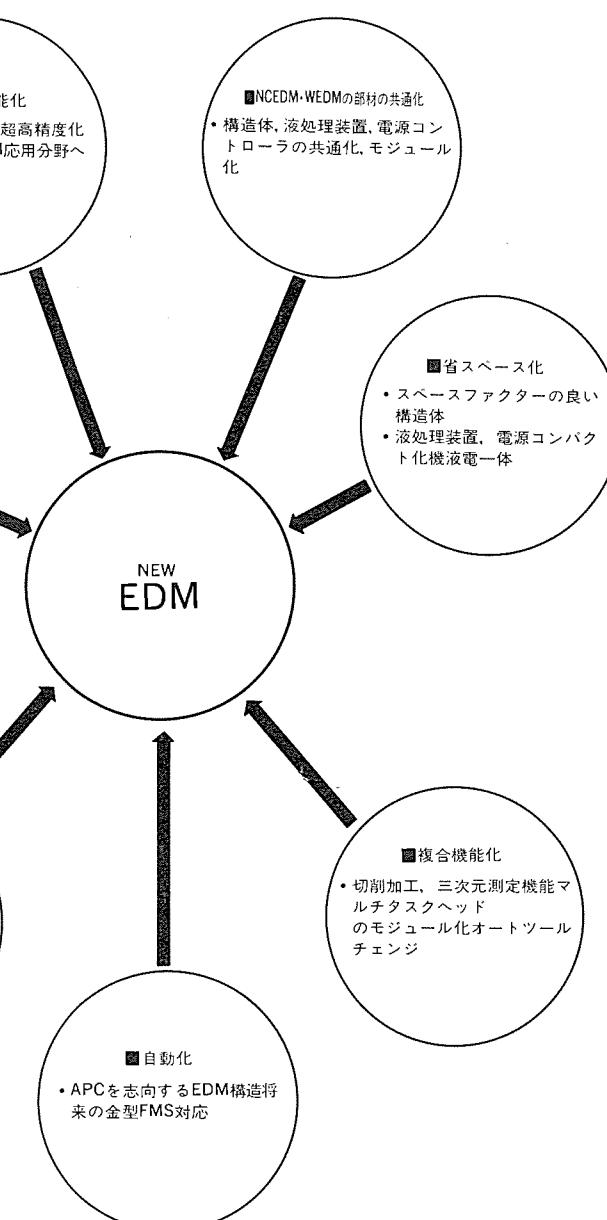


図 1. New EDM のキーポイント

DWC 90 H, DWC 110 H, DWC 200 H, DWC 300 H の 5 機種と、高精度特別仕様機である DWC 90 HS, DWC 110 HS の 2 機種及び超高精度機 DWC 90 PH, DWC 110 PH の 2 機種によりシリーズ化されている。

システムは機械本体、加工電源、NC 制御装置から構成されていて、その代表例として DWC 110 PH の外観を図 2. に示す。

#### 4. 超高精度機 DWC 110 PH

この加工機は加工精度  $3 \mu\text{m}$ 、最良面あらさ  $0.5 \mu\text{mR max}$  を実現するとともに、省力化のための数々の自動化装置を装備した最新鋭機である。

##### 4.1 高精度加工のための最適機械構造

精密金型をワイヤ放電加工する場合、長時間無人運転する場合が多い。ときには一つの金型において数週間にわたって連続加工するものもある。こうした場合、高精度を維持するためには加工中の長期にわたって、ワイヤ電極と工作物間の相対変位を極力小さくすることが重要である。特に、超仕上加工の場合のワイヤ電極と工作物との放電ギャップは約  $5 \mu\text{m}$  以下であり、高い繰り返し精度が機械に要求される。高精度化実現に配慮した点を以下に幾つか述べてみる。

###### 4.1.1 基本構造

この加工機は工作物を水中浸し(漬)状態で加工することを基本とする。その場合、工場におけるレーザ測長・補正、加工前の段取り作業、ワイヤ挿入動作などの自動動作及び加工中のすべての状態において、テーブル面までを水中浸漬状態で実施できる新構造を採用した。すなわち、常時水中浸漬状態を作ることによって、ユーザーでの加工中における機械状態が、工場出荷時において精度調整やレーザ測長・補正された機械状態とほぼ同一になることを目標としている。

###### 4.1.2 静的・動的変形対策

ワイヤ放電加工機は他の工作機械に比べて切削力は小さいので、工作物の重量変化とテーブル移動による荷重変化に対して、機械変形を抑えることが高精度維持に対し極めて重要である。その最適設計化のために、有限要素法を中心とする放電加工機用構造解析プログラムを当社で開発し使用した。図 3. は各構造要素に対し最適化を図ったのち、荷重変化などに対するワイヤ電極と工作物間相対変位の総合的なシミュレーションを実施した例である。また、表 1. に機械本体静的精度検査例を示す。

###### 4.1.3 熱変形対策

ワイヤ放電加工機のような自動化された機械において、加工誤差のかなりの部分が熱変形によるものと言われている。その対策として、①機械内外部の熱源を小さくすること、②発熱による温度分布を均一化すること、③熱源による機械変形を抑制すること、④その変形の基準を設定することなどが考えられる。

ワイヤ放電加工はワイヤ電極と工作物間に加工液(水)を介在させて放電加工する。すなわち、この液温を管理し利用することが熱変形対策の最も重要なファクターと言

える。加工液温制御システムは、インバータ制御方式により液温を室温  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  にリニア制御する。すなわち、この管理された液が室温、液温、機械の温度及び工作物の温度を均一化し、極部的な熱変形を抑制している。図 4. に加工液温制御装置による液温制御例を示す。

次に機械の変形を抑制する対策例として、最も重要な構造要素であるテーブルと下部アームについて述べる。

###### (1) テーブル(定盤)における熱変形対策

工作物をセットするテーブルは、低熱ひずみ鉄物材を使用して、一體化対称構造にしている。また、形状の最適化のために、熱解析プログラムを使用したシミュレーション例を図 5. に示す。

###### (2) 下部アームにおける熱変形対策

ワイヤ電極を支持する下部アームも、低熱ひずみ鉄物材を採用するとともに、熱的機械的外力を遮断するため三重構造にしている。

図 6. にその構造図を示す。

###### 4.1.4 駆動サーボ機構

超仕上加工における形状精度、ピッチ精度を確保するため、サーボ送りは最小指令単位  $0.1 \mu\text{m}$  パルス送り制御方式を採用している。また、 $0.1 \mu\text{m}$  送りを確実にするため、駆動要素の剛性は従来の数倍に高めてあり、送りガイドもしゅう(摺)動抵抗の小さい高剛性特殊

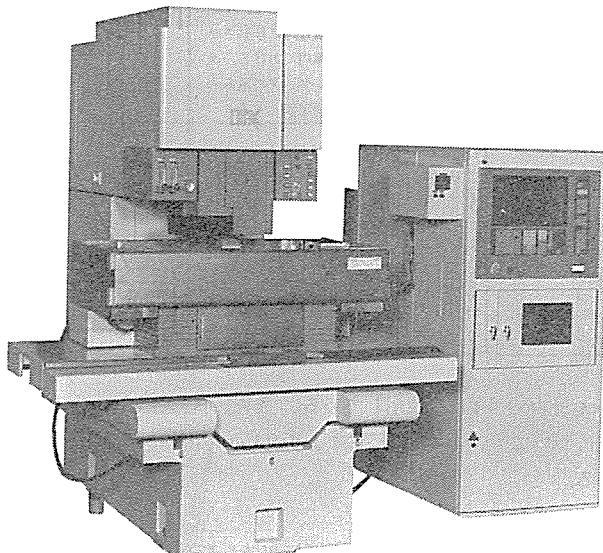


図 2. DWC 110 PH 型ワイヤ放電加工機の外観

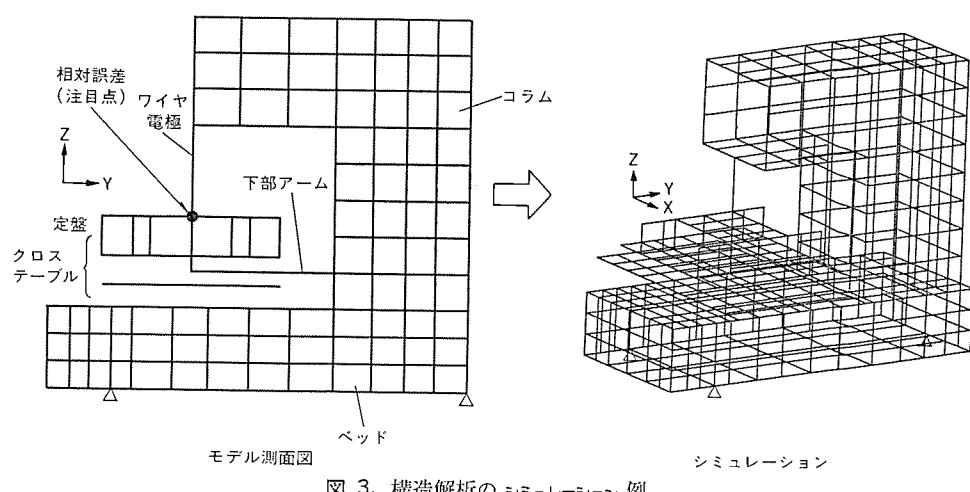
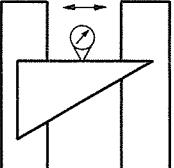
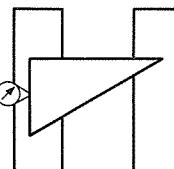
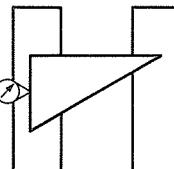
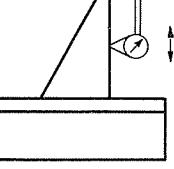


図 3. 構造解析のシミュレーション例

表 1. DWC 110 PH 型の静的精度検査成績表例

検査項目	測定方法	測定方法図	許容値	測定値
X軸方向及びY軸方向運動の直角度	X軸方向(X-Y面内)	テーブルをY軸方向の動きの中央に置き、石製三角定規を工作物取付台上に置いて、ヘッドに定置したテストインジゲータをこれの一边に当てて、テーブルをX軸方向に移動させテストインジゲータの読みの最大差を測定値とする。		0.003/450 0.0015/450
	Y軸方向(X-Y面内)	テーブルをX軸方向の動きの中央に置き、石製三角定規を工作物取付台上に置いて、ヘッドに定置したテストインジゲータをこれの一边に当てて、テーブルをY軸方向に移動させテストインジゲータの読みの最大差を測定値とする。		0.003/300 0.0015/300
X軸方向運動とY軸方向運動との直角度		石製三角定規の一边を工作物取付台のX軸方向の運動と平行に置き、ヘッドに定置したテストインジゲータを他の一边に当てて、テーブルをY軸方向に移動させ、全移動距離内における、テストインジゲータの読みの最大差を測定値とする。		0.005/300 0.002/300
ヘッドの上下運動と工作物取付台上面との直角度	X軸方向(Z-X面内)	工作物取付台の上面に石製三角定規を立て、ヘッドに定置したテストインジゲータをこれに当てて、ヘッドを上下に移動させ全移動距離内におけるテストインジゲータの読みの最大差を測定値とする。		0.005/165 0.0033/165
	Y軸方向(Y-X面内)			0.005/165 0.0025/165

ポールコンタクトガイドを使用している。また、バックラッシュ・ピッチエラー補正についても、レーザ測長器により  $0.1 \mu\text{m}$  単位での補正を実施している。

#### 4.2 自動化

DWC 110 PH は長時間無人運転可能な超高精度機として開発した。長時間無人運転するための自動化装置は、図 7. に示すように

中子（スクラップ）の処理であった。中子の形状に応じて次の二つの方法を採用した。小さい形状の場合の①中子を加工してしまう方法（自動拡大加工）、大きい形状の場合の②中子を除去する方法（自動スクラップ処理装置）である。図 8. に自動スクラップ処理装置の概念図を示す。この装置により、ワイヤ放電加工における荒加工から仕上げ加工までの無人運転が初めて可能となった。

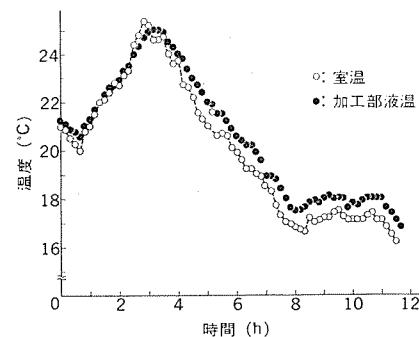


図 4. 加工液温制御装置による液温制御例

ヘッド部に高密度実装化されている。ここでは、特に自動化の重要なファクターとなるワイヤ自動供給と中子（スクラップ）処理について述べる。

##### (1) ワイヤ自動供給

ワイヤを自動的にスタート穴に通すワイヤ自動供給は、既に必須の自動機能になりつつあるが、新たに次の機能を追加した。①極細線 ( $\phi 0.03, \phi 0.05 \text{ mm}$ ) ワイヤの自動供給、②スタート穴  $\phi 0.5 \text{ mm}$  への自動供給 ( $\phi 0.1 \sim \phi 0.2 \text{ mm}$  ワイヤ)、③2種類のワイヤの自動交換 ( $\phi 0.1 \sim \phi 0.2 \text{ mm}$  ワイヤ) である。なお、ワイヤ回収は高圧水流方式で回収され信頼性を高めている。また、ワイヤガイド方式は用途に応じてダイヤモンドダイスガイド方式と V ガイド方式を使い分けている。

##### (2) 中子（スクラップ）処理

ワイヤ放電加工の自動化において残された最大の課題は、加工終了時に切り落とされる

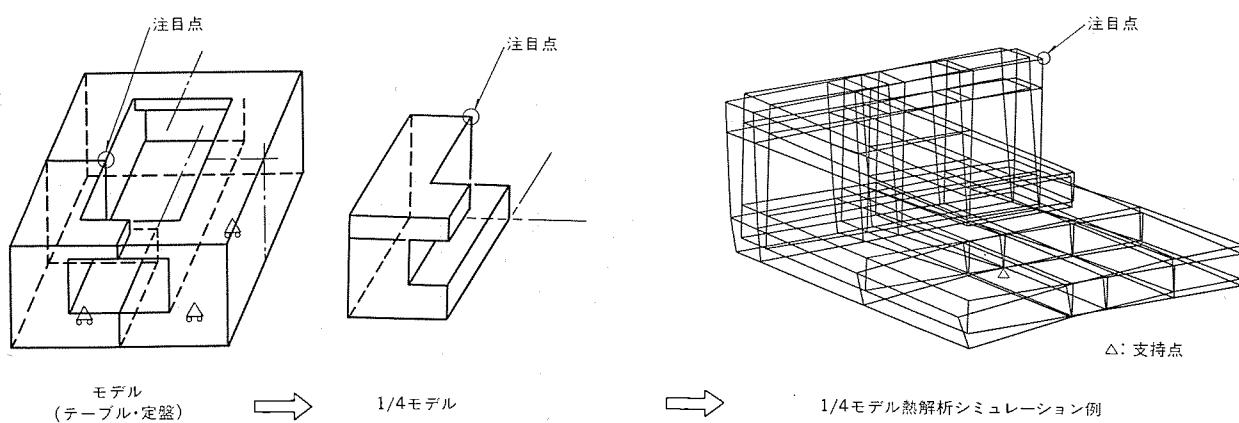


図 5. 热解析のシミュレーション例

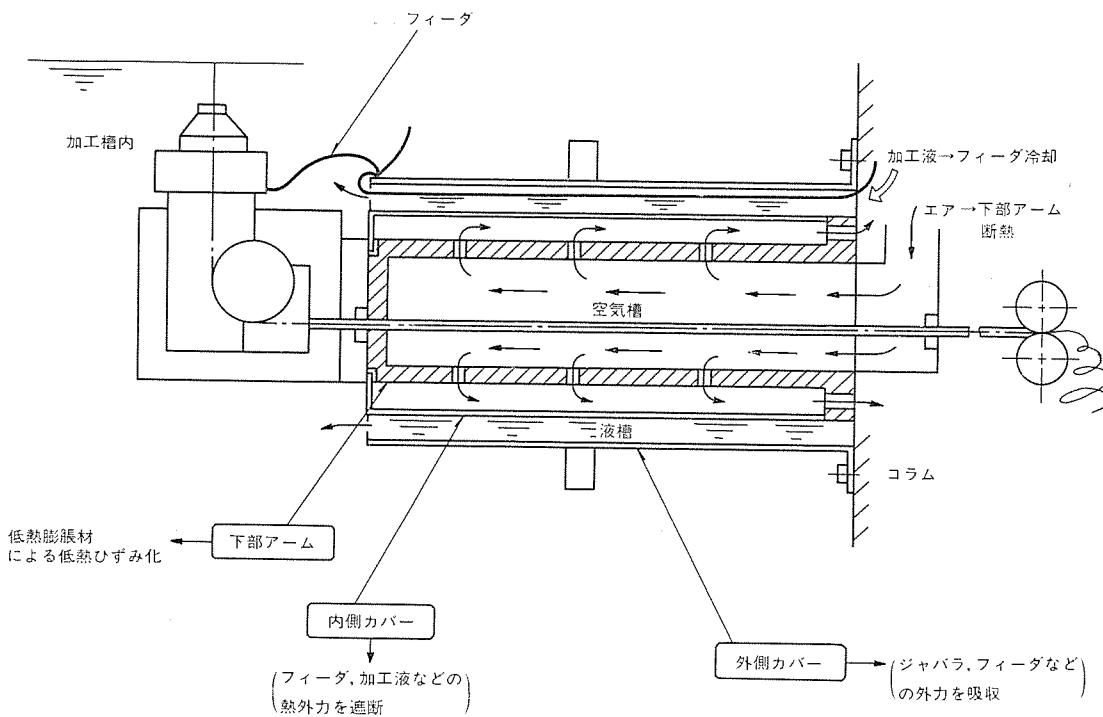


図 6. 三重構造の下部アーム

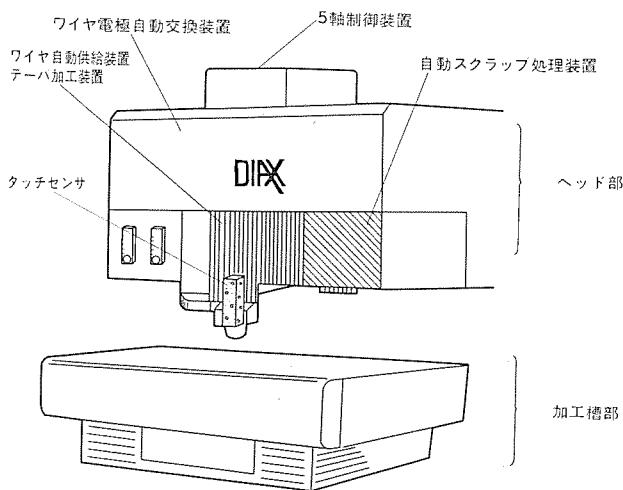


図 7. 自動化装置のモジュール化

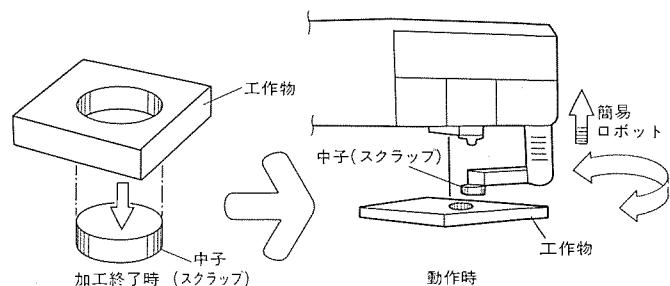


図 8. 自動スクラップ処理装置の概念図

表 2. DNC プロトコル仕様

機能	コマンド	パラメータ	データ		データ形式
			ホスト	NC	
ダウンロード	DL	L (プログラム番号)	→		NC プログラムフォーマット
アップロード	UL	同上	←		同上
イレース	ER	同上	なし		
ディレクトリ	DI	なし	←		ディレクトリフォーマット
ステータス	ST	なし	←		ステータスフォーマット
リモートコントロール	RM	なし	→		リモコンフォーマット
サード	SR	L (プログラム番号)	なし		
変数ダウンロード	HD	なし	→		変数フォーマット
変数アップロード	HU	(なし)又は(H番号-H番号)	←		同上
加工条件ダウンロード	ED	なし	→		加工条件フォーマット
加工条件アップロード	EU	(なし)又は(E番号-E番号)	←		同上
リンク終了	EX	なし	なし		

### 5. 加工電源と NC 制御装置

5.1 加工電源  
高速加工電源 (G 25) は放電電流波形を高ピーカ・高密度でばらつきを少なくし、常に最適に制御することにより、実用的形状加工で最大加工速度  $250 \text{ mm}^2/\text{min}$  を実現し、高速加工領域を更に拡大している。また、仕上加工においても仕上加工回路 (SD 回路) を追加し、加工条件設定をきめ細かくすることにより、仕上加工領域における加工時間を従来に比べて約 20 % 短縮することができる。更に、超仕上加工電源 (FS 電源) は極めて微小で安定した高周波エネルギーをワイヤ電極と工作物間に供給し、従来では達成できなかった  $0.5 \mu\text{mR max}$  の最良面あらさを実現し、金型製作における研磨工程の大幅削減を可能にしている。

### 5.2 NC 制御装置

マルチ CPU による CNC-W 7 は、14 インチカラー CRT による三次元

グラフィック機能、同時5軸(X, Y, U, V, Z)制御機能、大容量メモリ(1Mバイト)、DNC機能などにより、ワイヤ放電加工機の制御の中枢を成しているが、更に既に述べた0.1μm/パルス制御などの新機能を追加し、より高精度化、高機能化及び操作性の向上を図っている。以下主な点について述べる。

#### (1) 6軸制御

従来の5軸制御に1軸(A, B, Cのいずれか1軸)を追加し、それぞれX, Y, Zの回転軸として工作物取付定盤上に設置した工作物を取り付け、スパイラル加工、球状加工又は工作物割出し加工を可能にし、部品加工への適用を一段と強化している。

#### (2) 位置カウンタ表示手元操作箱

手元操作箱には各軸の位置決め用JOGボタンをはじめ、加工液、ワイヤ、加工、NCスタート・ストップなどの操作スイッチが付いているが、新たに位置カウンタ表示を内蔵することにより、機械本体側に設置された手元操作箱を使い、位置決め作業から加工スタートまでの作業を機械側で効率よく実施することができる。

#### (3) 3.5インチFDD

この装置は、制御装置のRS-232Cインターフェースに接続し、大量のデータを3.5インチフロッピディスクとの間で送・受信できる可搬式の入出力装置で、大量データをコンパクトに保管でき、取扱いが極めて容易である。

### 5.3 NCテープ作成装置《MEDIAPT TYPE-H MODEL 2》

この装置のCPUは80286-2(8MHz)を搭載した16ビットFAパソコンを使用し、処理速度を従来の約2倍に向上させ、テープ作成時間の大軒短縮を図るとともに、簡易DNC機能(詳細については後述する)も備えている。更に、高精度インボリュートプログラムも作成可能となり、超仕上加工を行うことによりJIS0~1級のインボリュート加工精度が実現できる。

## 6. 放電加工機におけるFA化

近年、放電加工機でもFMS化・FMC化といったFA化対応の動きが活発化してきている。放電加工機は、その加工対象が通常、金型加工であり、したがって一品加工が多く、また加工時間が段取り時間に比べて長い場合が多い。特にワイヤ放電加工機では、月当たりの稼働時間が400~500時間にも達しており、既に自動化機械として高い稼働率を実現している。こうした状況の中で放電加工機のFA化は、一般工作機械のFA化に比べ、必ずしも進んでいるわけではなく、一般工作機械において採用され、効果をあげてきた技術が、徐々に放電加工機にも適用されてきつつあると考えられる。本稿では、このような状況を考慮しつつ放電加工機におけるFA化について最新の技術と動向について紹介する。

#### 6.1 FAシステムにおける階層化とその役割

放電加工機を使用した金型加工のトータルなシステムを考えると、大きく分けて以下に示すような階層が考えられる。

##### (1) 生産管理システム

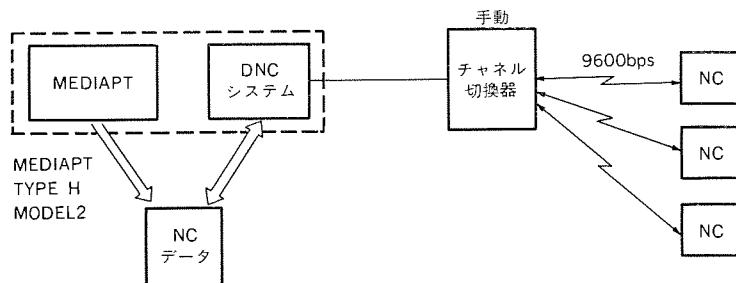


図9. ミニDNCシステム構成

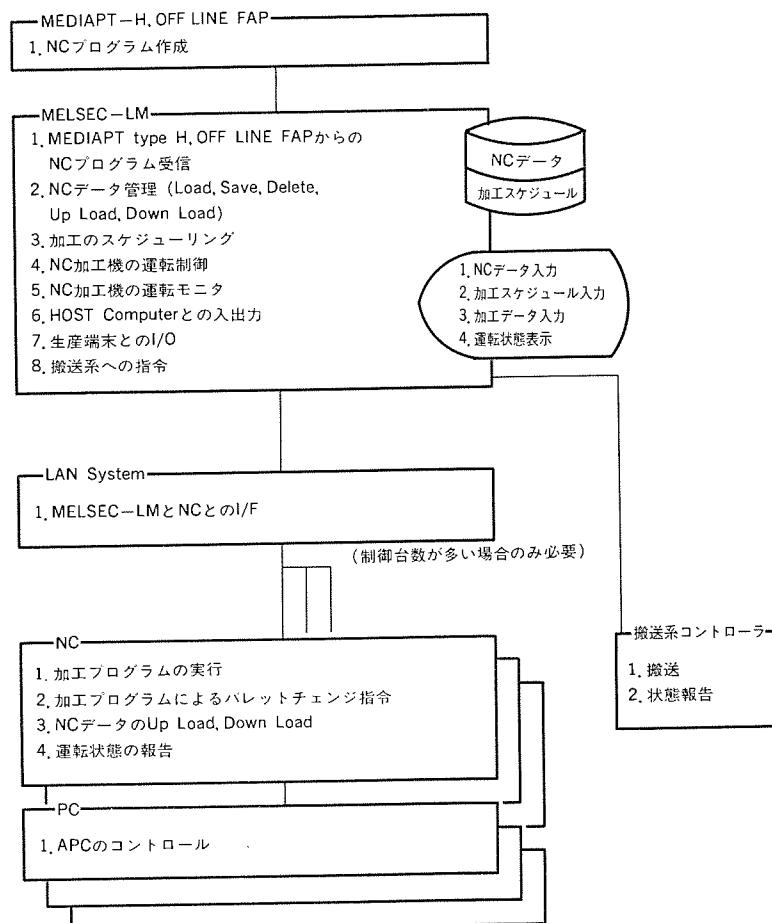


図10. FMCシステム構成例

トータルシステムの最上位に位置し、営業からのオーダー発令に対し、資材管理、発注管理から各機械ごとの加工分担、順序などの生産工程管理を担当する。

#### (2) 型設計システム(CAD)

与えられた製品図から、必要な型図及び各加工機ごとの加工図を作成する。必要であれば型設計計算を支援し、場合によっては、ある程度の自動設計を行う。

#### (3) CAMシステム

設計システムから引き継いだデータをもとに、加工に必要なNCデータの作成を行う。また、荒加工から仕上げ加工に至るまでの加工条件、方法などの加工工程設計を行う。

#### (4) 加工制御システム

上位システムから指令された工程情報を従い、NCデータのダウンロード、各加工機のスケジューリング、運転制御などを行う。必要であれば、搬送系のコントローラの制御も行う。

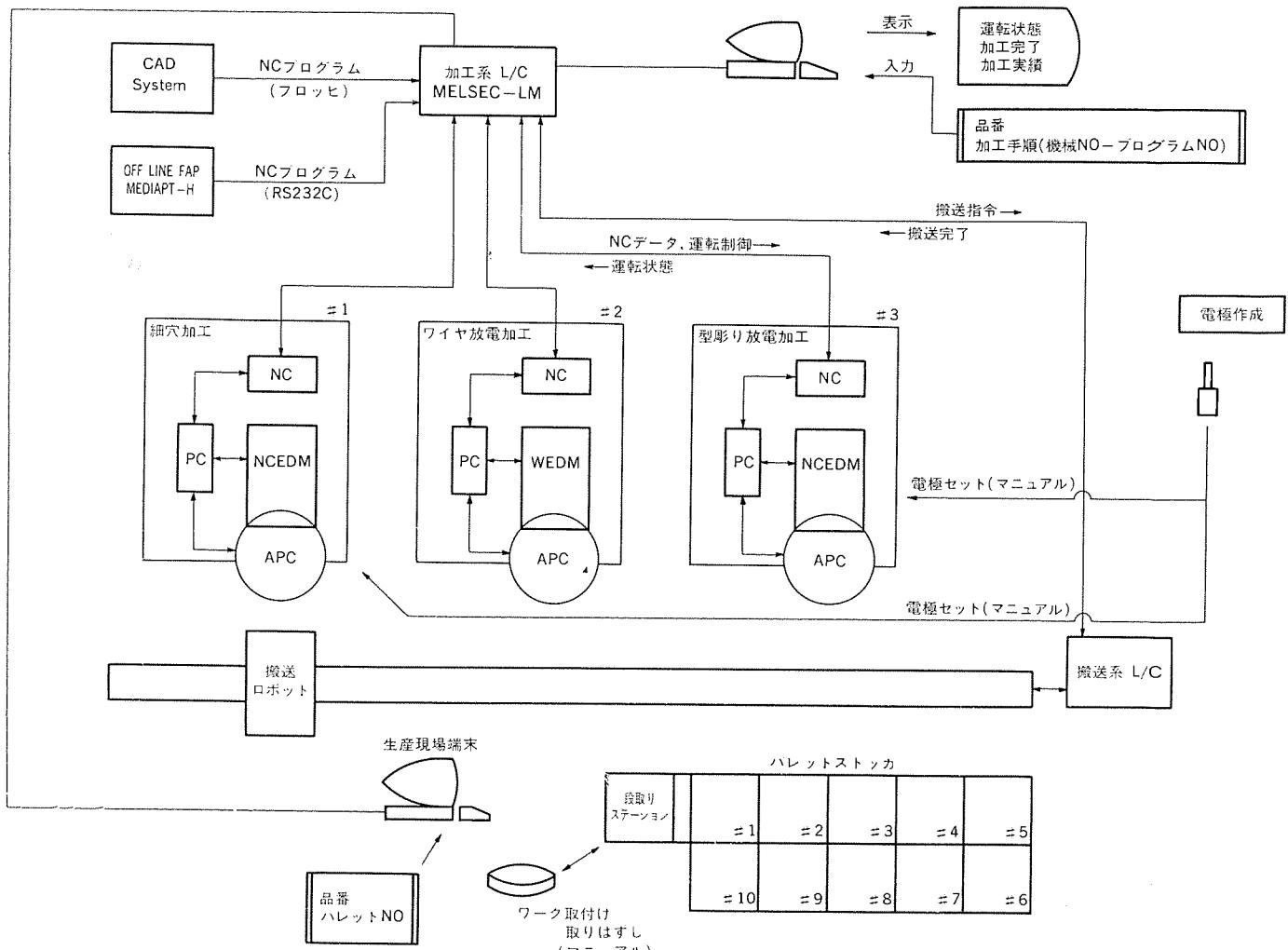


図 11. FMC システムの機能構成

### (5) 加工セル

放電加工機及び加工機に付属する自動化装置(ATC, APCなど)から構成され、実際の放電加工を行う。

上記の階層は、各システム単独でも稼働するように設計され、上位システムがあれば上位からの指令により、上位が無ければ入手で必要なデータを入力することにより個別に動作する。また、これらの各階層は構成概念上の区分であり、システムの能力、規模により、統合されたシステムとして形成される場合もある。

### 6.2 加工セルにおけるFA対応機能

DWC 110 PH を始めとする放電加工機には、前述したように多くの自動化対応装置を備えているが、加工セルとして上位システムの指令により自動無人運転を行うのに不可欠なのが、DNC機能である。今回、放電加工機用として開発したDNC機能の機能仕様を表2に示す。このDNC機能は簡単なプロトコルを持ち、パソコンなどで容易にDNC機能を実現できるばかりでなく、《MELSEC-LM》などのFAコンピュータを使用した本格的なFMSにも対応可能である。

### 6.3 放電加工機FAシステム構成例

#### (1) パソコンによるミニDNCシステム

図9.にパソコンベースの《MEDIAPT TYPE-H》を使用したミニDNCシステムを示す。このシステムは簡易ではあるが、NCデータの作成から、複数加工機へのダウンロード、稼働状況監視が可能である。

#### (2) FMCシステム

図10.に《MELSEC-LM》を使用したシステム構成例を示す。また、このシステムの機能構成を図11.に示す。このシステムでは、オートパレットチェンジ、自動搬送車を使用することにより、下穴加工から、型彫り放電加工、ワイヤ放電加工の連続自動運転が可能である。

## 7. むすび

ワイヤ放電加工機は、その加工上の特質から、機械、電源、制御装置の技術向上、進歩に伴い、金属加工分野へより広範に拡大し、発展していくものと思われる。ワイヤ放電加工機の発展は使用者のニーズを的確に把握し、ユーザー、研究開発及び製作者一丸となって初めて成し遂げられるもので、今後ますます諸賢の御協力をお願いする次第である。

(原稿受付 昭62-4-1)

# ワイヤ放電加工特性と加工技術

弥富 剛\* 志田伸一\*  
岩崎健治\* 牧野文平\*  
真柄卓司\*

## 1. まえがき

従来からワイヤ放電加工では、電極として $\phi 0.03\sim\phi 0.35$  mmのワイヤを使用しているために、加工中の放電反発力により振動を生じ、これがワイヤ放電加工特性（加工速度、加工精度、加工面あらさ）を低下させていると言われている。そのため、加工速度の増大に対しては、ワイヤガイドスパンの短縮、ワイヤ張力の増加などのワイヤ電極を剛体化し、放電効率を向上する方法が採られている。更に、加工精度、加工面あらさの向上に対しては、荒加工後、放電エネルギーを小さくして、加工面を再度、複数回にわたり加工する方法（セカンドカット法）により、加工精度の修正及び細かい加工面あらさを得ている。

しかし、最近では、従来から機械加工で行っていた部品加工をワイヤ放電加工に置き換えるために、より高速化が強く望まれている。また、金型はより一層精密化しているため、ワイヤ放電加工機は従来の後工程（研磨工程）を不要とし、更には治具研磨を越える精度が要求されている。

本稿では、まずワイヤ放電加工技術の現状動向について述べ、次に加工電源改良などによる高速化、サブミクロン加工の実現による超

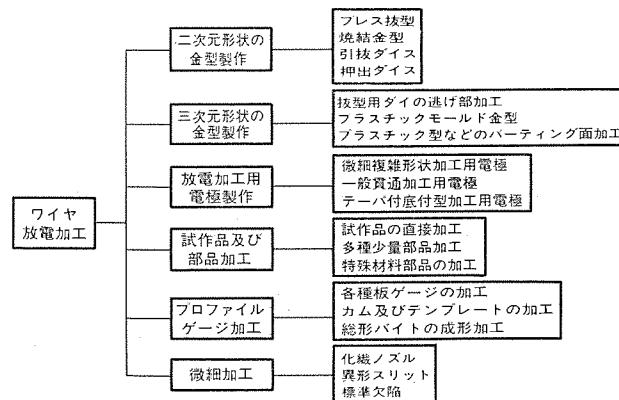


図 1. ワイヤ放電加工の用途

表 1. 最近5年間の加工性能と新技術の推移

年	1982	1983	1984	1985	1986
加工速度 (mm <sup>2</sup> /min)	70	140	200	200	250
加工面あらさ (μmR <sub>max</sub> )	5	3	2	1.6	0.5
加工精度 (標準値) (μm) (高精度機) (μm)	±15 ±7.5	±10 ±5	±10 ±5	±7.5 ±3	±5 ±3
テープ加工 最大角度 (°)	±5	±5	±12	±12	±12
微細加工 最小ワイヤ電極径 (mm)	φ0.05	φ0.03	φ0.03	φ0.03	φ0.025
ワイヤ自動供給装置	→				
自動セカンドカット	→				
上下任意形状加工	→				

高精度化、更には新加工技術による様々な応用例について述べる。

## 2. 加工技術の現状動向

ワイヤ放電加工の用途分類を図1に示すが、その大半は直接又は間接的な金型製作で占められており、特にこの分野を意識した加工技術の開発が重要になっている。金型の技術動向に見られるのは、金属部品からプラスチック部品への移行に伴うラ型の比重増大、部品の小型・精密化、金型の自動化・高速化、多種少量生産に対応する短納期化・低コスト化などが挙げられる。

以上の背景にあって、ワイヤ放電加工機の最近5年間の加工性能と新技術の推移を表1に示す。1984年ごろまでは特に加工速度の飛躍的な向上により、材料硬度によらず複雑形状も自動加工できる特長がいかされ、ワイヤ放電加工機が金型製作へ本格的に普及し定着した時期と言える。そして、従来は加工精度、加工面性状において研削加工に劣るため、ワイヤ放電加工後に研削や磨きといった仕上工程を必要とする場合が多く、ここ数年は、こうした通念を打破するに足る高精度化と加工面性状の向上を遂げている。

例えば、ICリードフレーム型のような高精度・高品質金型でも、ワイヤ放電加工面のまま実用に供することが可能となってきた。これは、金型製作の工程削減と省力化に大きく寄与するものであるが、特に対象が複雑微細になるに従ってその効果も大きくなっている。このワイヤ放電加工機の高精度化と加工面性状の向上は、製品の品質向上もさることながら、その中心となる技術は、加工面を数次加工する、いわゆるセカンドカット法にある。セカンドカット法の効能としては、

- ・1次加工で生じる工作物のひずみが除去され精度が向上する。
- ・漸次加工エネルギーを低くするため、加工面あらさが向上する。
- ・加工変質層を減少できる。

などが挙げられ、ワイヤ放電加工機が金型製作の主役として発展するに重要な意味を持つ技術として位置づけられる。

更に、ワイヤ放電加工の用途拡大を図り、様々な加工技術の開発が成されているが、代表的なものを次に述べる。

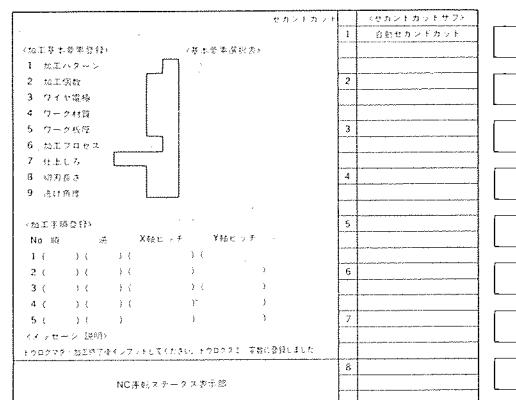


図 2. 対話方式による自動セカンドカット機能

## 2.1 三次元加工

テープ加工装置による上下任意形状加工の実現は、単なるプレス抜型の逃げ部の加工から、従来、加工困難とされていた三次元形状加工を可能としている。特にシロッコファンやフィルタの格子などのプラスチック金型では、部品点数の減少、金型の一体化など、金型製作の合理化達成の一翼を担っている。異形線引ダイス加工では、導入部、成形部、逃げ部をワイヤ放電加工だけで仕上げており、年々複雑微細形状を要求されるラジアルタイヤに用いられる鉄線製造に貢献している。タービンブレード、流量計の羽根車や流体異形ノズルなど、部品加工への応用も一段と増大してきている。

## 2.2 部品加工

ワイヤ自動供給装置の普及は、高速加工の実現に伴い、部品製造の専用機として広く使用されている。各種ボルトダイスヘッダ用の焼入れ素材を加工テーブル上に数十個配置し、フル稼働で無人加工させていいる例、従来の機械加工では加工困難である広角テープ付きの自動車部品を自動電極補正(APC)を用い高速加工する例、また、ぱりの発生がない特長をいかしたパイプへのスリット加工など、年々部品加工分野を拡大している。

## 2.3 特殊材加工

人造ダイヤモンド、CBNやボラジンなどの超難切削材の加工に加え、導電性セラミックスやコンポジット材の加工にも、ワイヤ放電加工機が素材取りから製品加工まで使われている。ワイヤ放電加工機の加工特性は、均一で信頼性も極めて高いため、材料の良し悪しも判断できる有効な加工手段となっている。

## 2.4 高精度加工

高精度加工を行うためには、長年蓄積された加工ノウハウが重要であるが、その加工ノウハウを機械に組み込んでいるのが自動セカンドカット機能である。加工目的に応じて対話方式による入力だけで、初心者でも、熟練者と同様の高精度加工を実現させている(図2.)。

## 3. ワイヤ放電加工特性

ワイヤ放電加工の加工特性としては、一般に加工速度、加工精度、加工面性状に分類され、各々に影響を与える要因としては、①電気条件、②ワイヤ電極条件、③機械精度、④加工条件、に大別される。以下、各加工特性について詳細に述べる。

### 3.1 加工面性状

ワイヤ放電加工の加工面あらさを向上させるためには、単発放電エネルギーを小さくし、高周波パルスにする必要があるが、数MHzの微小エネルギーのパルスで加工を行うことにより、高い加工能力を維持しながらサブミクロン(最良面あらさ  $0.5 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ )の加工面が得られる。図3.は当社超仕上加工用FS電源で加工した加工面の測定結果である。超仕上加工は後述する加工面の真直精度向上にも効果

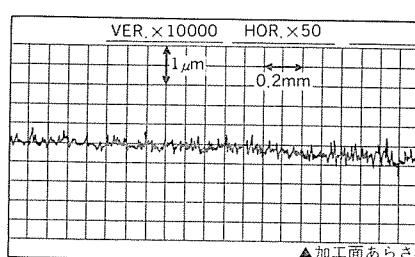


図3. 超仕上加工用FS電源による加工面あらさ

があるとともに、加工変質層の発生も少ない。図4., 図5.は超硬材に荒加工(1st cut)・超仕上加工をほどこしたものと、機械加工を行ったものについて、加工表面・断面の電子顕微鏡撮影及びX線面分析を行った結果を示したものである。図から、超仕上加工を行った加工面については、バインダであるコバルト(Co)の脱落や、電極材に含まれる銅(Cu)の付着がほとんど観察されず、従来の加工と比較して極めて変質層が少ないことがわかる。なお、このような微小エネルギーの加工では、ワイヤ電極と工作物間のギャップが非常に小さい

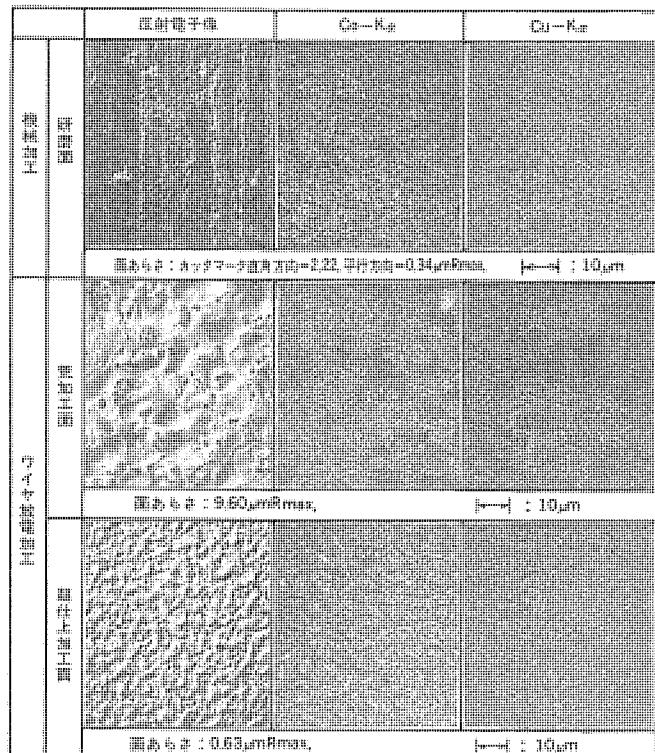


図4. 加工表面分析結果

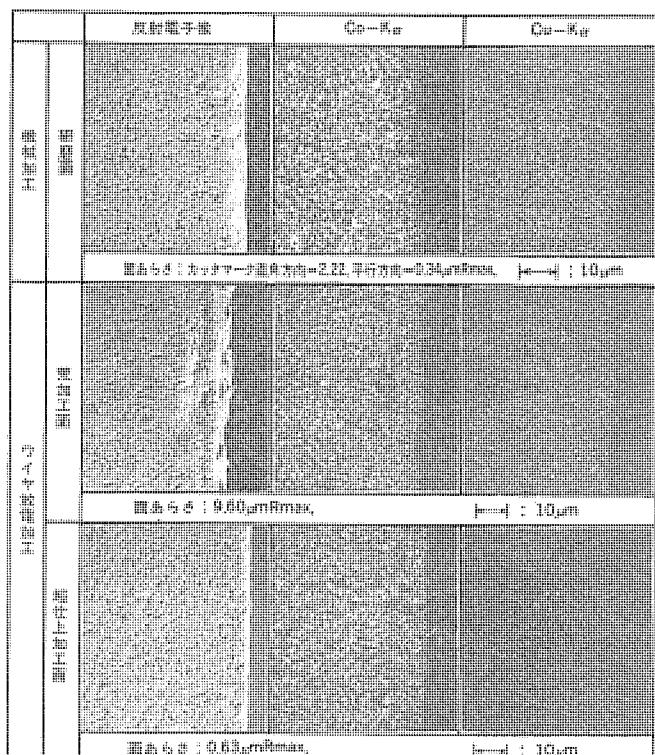


図5. 加工横断面分析結果

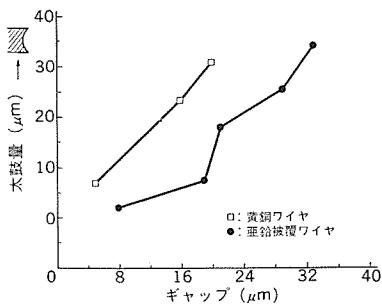


図 6. 加工ギャップと直真精度(太鼓量)

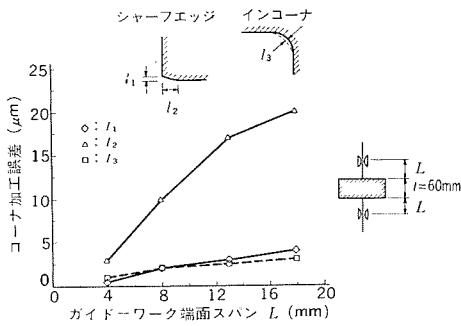


図 7. ワイヤガイドスパンとコーナ形状精度

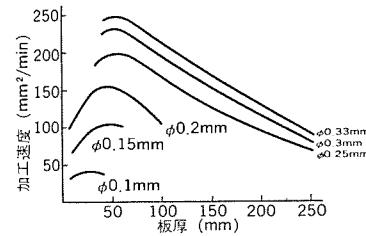


図 8. 被加工物板厚と加工速度

ため(数  $\mu\text{m}$  程度), ①ワイヤ張力変動の低減, ②放電性に優れたワイヤ電極材の使用などが必要である。

### 3.2 加工精度

ワイヤ放電加工における加工精度の向上のためには, 放電ギャップが均一かつ電極軌跡精度が正確である必要がある。放電ギャップのばらつき幅は加工エネルギーの低減とともに小さくなるため, 現在の最適化されたセカンドカット手法により, 極めて高い加工精度を得ることが可能である。ワイヤ放電加工の特徴として, 加工面が真直方向に太鼓状となる点が挙げられるが, こうした真直精度の劣化は加工時のギャップが小さいほど改善される傾向にある。図 6. に加工ギャップと真直精度の関係を示す。前述した超仕上加工は, 以上の点で真直精度を向上させるのに非常に有効であると言える。

一般的な加工精度とともに重要なのが, コーナ部での形状精度である。荒加工におけるコーナ形状精度の劣化は, 主として加工反力によるワイヤ電極のたわみに起因するため, 上下ワイヤガイドのスパン, ワイヤ張力がコーナ精度に及ぼす影響は大きい。図 7. はワイヤガイドスパンとコーナ形状精度の関係を示したものである。また, 複数回の仕上加工によりコーナ形状を仕上げる場合, 仕上条件における加工エネルギーは小さくなるため, ワイヤ電極のたわみも小さくなるが, コーナ部で発生する取り代の変化に追従しきれないことによるワイヤ電極側面ギャップ変化の影響が大きくなる。

### 3.3 加工速度

ワイヤ放電加工機の加工速度は, 基本的には平均加工電流に比例するが, 型彫り放電加工の場合と同様, 平均加工電流が同一であっても, 電流ピーク値が大きいほど加工速度は向上する。更に, 対向

面積によっても, 流し得る平均加工電流とスラッシュ排出効果との関係で面積効果が生じ, ある板厚のところで加工速度が最大となる(図 8.)。また, ワイヤ電極径によって最大加工速度は変化するが, それは以下の理由によるものである。加工速度  $W(\text{g}/\text{min})$ , 平均加工電流  $I(\text{A})$ , ワイヤ電極径  $d(\text{mm})$  とし, ピーク電流  $I_p$  が一定とすれば,

$$W = kI \propto \pi d^2 / 4 \propto d^2$$

したがって, 送り速度  $F(\text{mm}/\text{min})$  は加工溝幅  $\approx d(\text{mm})$  とすれば,

$$F = W / \rho \cdot d \cdot t \propto d/t$$

ここで  $\rho$ : 被加工物の比重,  $t$ : 板厚(mm)

よって, 加工速度  $F$  又は  $F \cdot t(\text{mm}^2/\text{min})$  は, ワイヤ径が大きいほど大きくすることができるが, 加工電流も大きくなるため, 当然のことながら面あらさは粗く, また加工精度も悪化する傾向にある。そのため, 現在では荒加工の後にセカンドカットによる仕上加工をほどこす場合が多く, こうした仕上加工プロセスを含めたトータル加工時間を低減することが今後の課題であると言える。

## 4. 新加工技術

ここでは, 豊富な自動化機能と高精度高速加工能力を持つHシリーズと, 長年蓄積されたノウハウを駆使して加工した自動拡大加工, 高精度インボリュート歯車, 繊維ノカル型などの最新加工事例について紹介する。

### 4.1 自動拡大加工(図 9.)

ワイヤ自動供給装置を使用して, 俗に言うスクラップレス加工を行った。ワイヤ電極を通すための加工開始穴の直径  $\phi 2\text{ mm}$  から徐々に拡大加工を行っている。1個当たりの加工時間は15分と, 従来のスクラップを作業者が取り除く方法に比べると約20%増加し, 61穴の総加工時間も14時間が17時間と長くなる。しかし, 従来方法では, 14時間作業者が機械につきっきりになり, 人件費の面から見ても

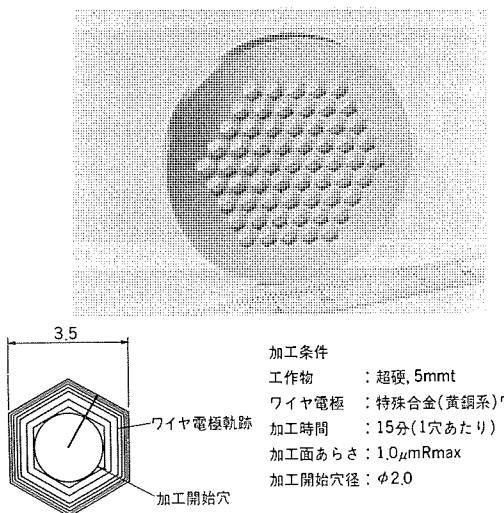


図 9. 自動拡大加工例

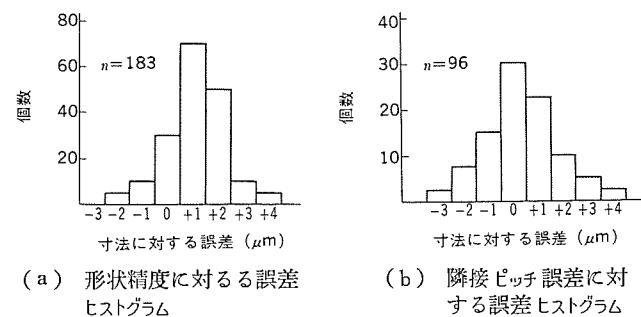


図 10. 精度測定結果

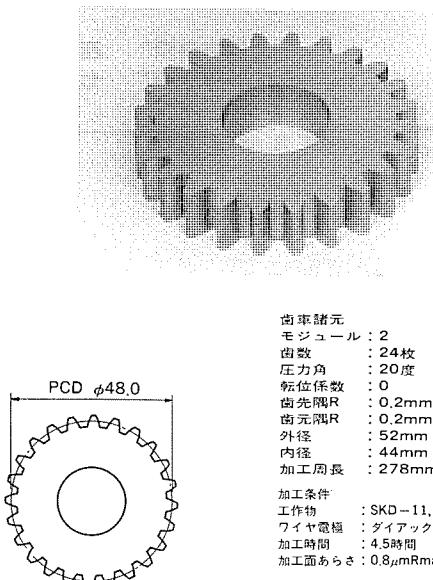


図 11. 高精度インボリュート歯車の加工例

合理的ではない。

図 10. に示すように、この拡大加工方法によれば、工作物の放電加工熱による材料ひずみの影響を少なくすることができるため、形状精度、ピッチ送り精度共に良好な結果が得られる。ただし、この加工方法において、形状寸法が大きくなると、かえって非能率となる。5 mm × 5 mm 程度の面積が限度である。

#### 4.2 高精度インボリュート歯車加工 (図 11.)

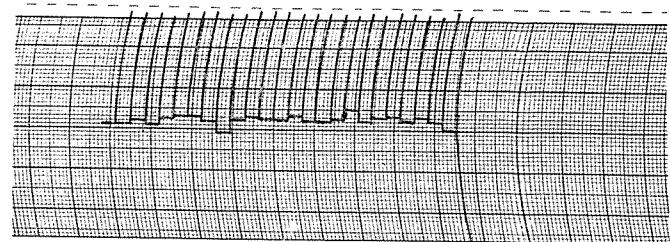
最近のプラスチック歯車の精度は、JIS 1～2級の等級を要求されることが多いとなっている。したがって、その金型の要求精度についても JIS 0～1級が要求される。従来からワイヤ放電加工機での歯車加工は行われてきたが、その精度は、JIS 2～3級程度であった。高精度化を実現するため、自動プログラミング装置 (APT) で作成するインボリュート歯車のプログラム精度を大幅に向上させ、基準インボリュート曲線に対して 2 ミクロン以内に抑えている。加工では、当社の高精度ワイヤ放電加工機 DWC-90 PH を使用し、超仕上加工電源 (FS 電源) とダイアックスワイヤ (亜鉛被覆黄銅ワイヤ) で加工を行っている。

図 12. は精度検査結果であるが、単一ピッチ誤差 3 μm、隣接ピッチ誤差 3.5 μm、累積ピッチ誤差 4 μm、歯形誤差 4 μm、歯溝の振れ 7 μm と JIS 0 級であった。特に通常の歯車の機械加工では、材料を回転させながら切削するため、精度を出しにくいとされる累積ピッチ誤差が許容精度に対し非常に小さいことがわかる。

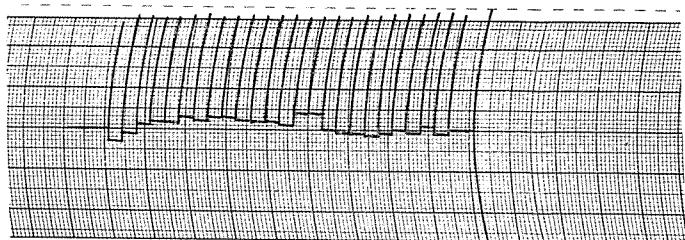
#### 4.3 繊維ノズル加工例 (図 13.)

ワイヤ放電加工機の細線仕様で、φ 0.03 タングステンワイヤ電極と超仕上加工電源で実施した繊維ノズル加工例である。外周約 φ 1 mm で、最小スリット幅は 0.035 mm である。

この加工については、型彫り放電加工機で加工する方法もあるが、その場合には、電極を製作するために、まずワイヤ放電加工機で銅タングステン材に図 13. の形状を加工する。次にその銅タングステンを電極として、本加工用電極素材 (銀タングステン) を逆放電して本電極を完成させる。いずれの方法においても、ワイヤ放電加工機での微細形状の高精度、高速加工が可能になったため、従来の機械加工による分割方式に比べ大幅な加工精度向上と、加工時間短縮が可能となった。



(a) ピッチ誤差 (倍率×1,000)



(b) 歯溝の振れ (倍率×1,000)

モジュール1.6を超える2.5以下の歯車の許容誤差 JIS B 1702 単位: μm

等級	誤差	歯ピッチ円直径 (mm)							検査結果
		12を超え 23以下	25を超え 50以下	50を超え 100以下	100を超え 200以下	200を超え 400以下	400を超え 800以下	800を超え 1600以下	
0	単一ピッチ誤差	3	4	4	5	5	6	7	3
	隣接ピッチ誤差	3	4	4	5	6	7	8	3.5
	累積ピッチ誤差	13	15	16	19	21	25	29	4
	法線ピッチ誤差	4	4	5	5	6	7	8	—
	歯形誤差	4	4	4	4	4	4	4	4
1	歯みぞの振れ	9	10	12	13	15	17	20	7

(c) 歯車の許容誤差と検査結果

図 12. 歯車精度検査結果

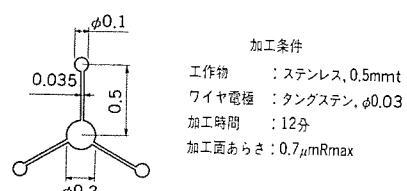
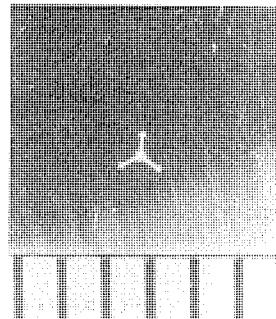


図 13. 繊維ノズルの加工例

## 5. むすび

本稿では、ワイヤ放電加工における代表的な加工特性と各種の新加工技術について述べた。特に従来と比べ、サブミクロン加工の実現はワイヤ放電加工技術において革新的であり、高精度化を指向するための心す(須)条件となり、更には加工後の後仕上工程を不要にする点でも、今後ますます応用範囲を広くしていくものと確信している。本稿もこの応用分野の開拓の参考になれば幸いである。

## NC型彫り放電加工機の最新技術

田中俊明\* 西川守久\*  
加藤幸夫\* 七沢禎文\*  
松田久和\*

## 1. まえがき

NC型彫り放電加工機に対するニーズは、使いやすさの追求、高性能化はもとよりますます高精度化している。この背景には、電子・半導体関連の機器の小型精密化をはじめ、ICリードフレームやコネクタなどの金属薄板プレス加工部品、カメラ部品や小型歯車などのエンジニアプラスチック射出成形品などの精密部品の生産量が急激に増加したことが挙げられる。

三菱KシリーズNC型彫り放電加工機は、高精度化を中心としたニーズにマッチする最新技術を搭載するとともに、多様化するニーズに高次元に対応するべく開発した最新鋭機である。

本稿では数々の最新技術の特長を中心に、機械系、電源、制御装置及びソフトウェアの各々の役割について紹介する。

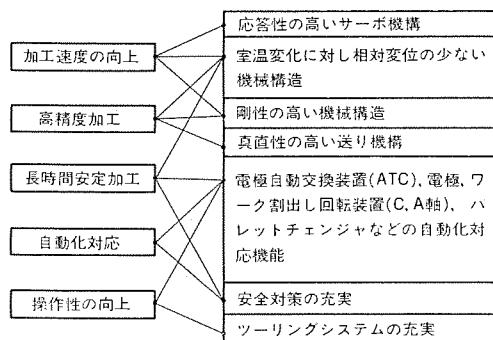


図1. NCEDM機械系に要求される条件と対応

## 2. NC型彫り放電加工機Kシリーズ機械系の特長

## 2.1 機械系に要求される条件

NC型彫り放電加工機の機械系に要求される条件とその対応の関連を図1に示す。ここでは、このように要求される条件に対応す

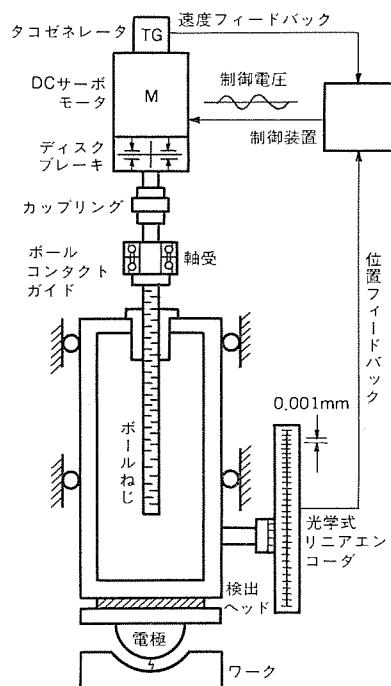
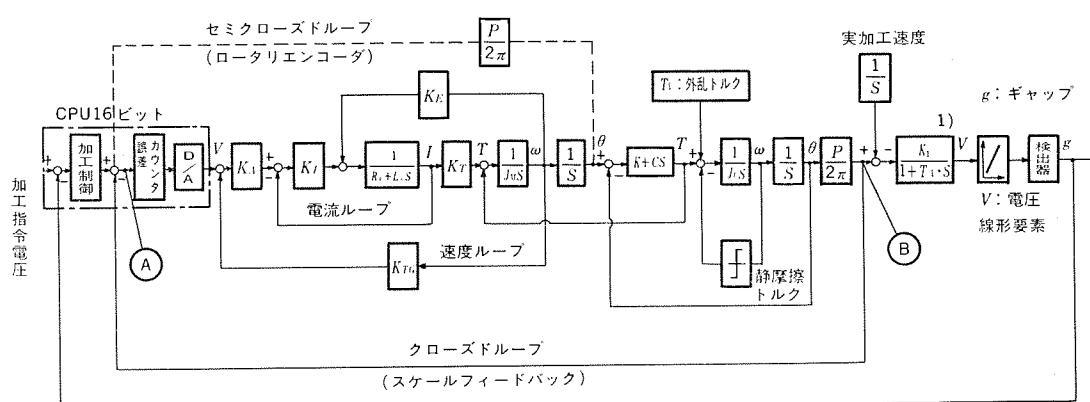


図2. サーボ機構



D/A: デジタル/アナログ変換器  
 $K_A$ : 速度ループ駆動AMP  
 $K_I$ : 電流ループ駆動AMP  
 $R_a$ : 電機子抵抗 ( $\Omega$ )  
 $L_a$ : 電機子インダクタンス ( $mH$ )  
 $K_T$ : トルク定数 ( $N\cdot m/A$ )  
 $J_M$ : モータインダクタンス ( $kg\cdot m^2$ )  
 $K_E$ : 誘起電圧定数 ( $mV/rpm$ )  
 $K_{Ta}$ : 速度帰還定数 ( $V/rpm$ )

$K$ : 機械剛性 ( $N\cdot m/rad$ )  
 $C$ : 動粘性抵抗 ( $N\cdot m\cdot s/rad$ )  
 $T_r$ : 外乱トルク ( $N\cdot m$ )  
 $J_L$ : 負荷インダクタンス ( $kg\cdot m^2$ )  
 $P$ : ボールねじリード ( $m$ )

図3. 放電加工機の制御ブロック図

る代表的な展開事例を《ダイアックス》NC型彫り放電加工機Kシリーズについて述べる。

## 2.2 応答性の高いサーボ機構

放電加工に伴う電極送り速度は一般工作機械と比べ極めて小さく、

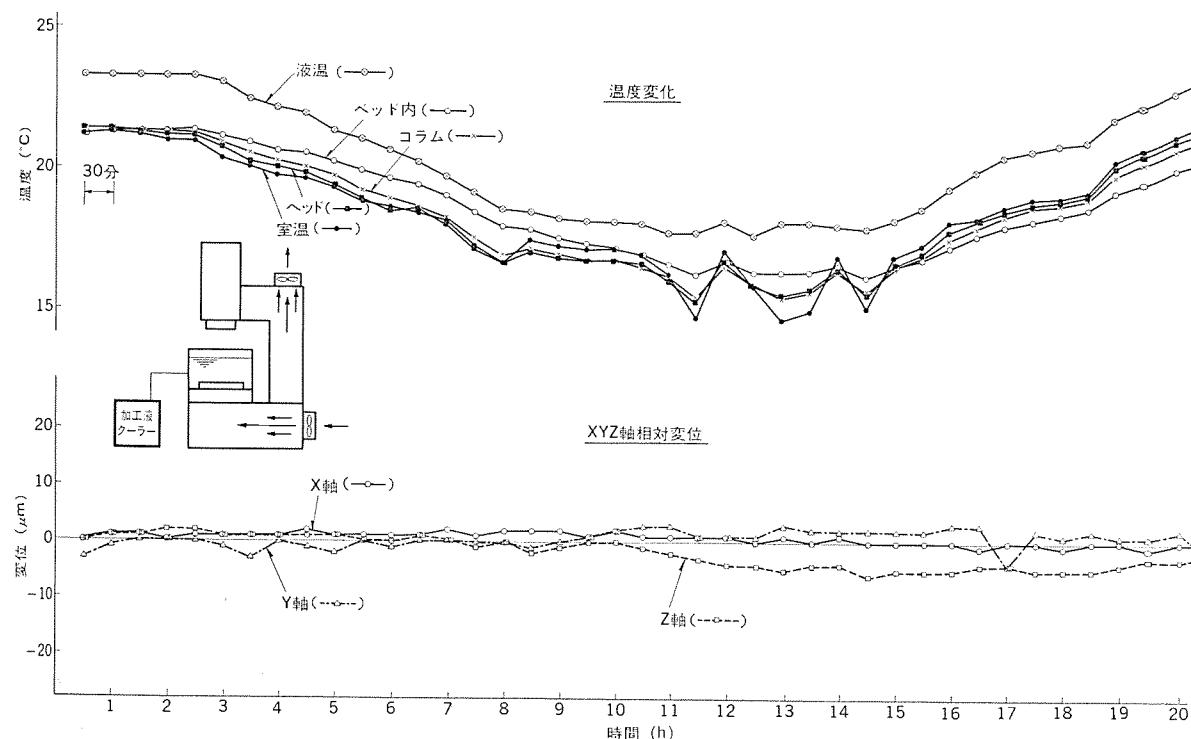


図4. 室温同調通風システム 装備機の温度変化に対する電極と工作物間の相対変位

表1. 機械仕様一覧

諸元	型名	M 30 PKC 7	M 25 KC 7	M 35 KC 7	M 55 KC 7	M 65 KC 7	M 85 KC 7
加工槽内寸法(幅×奥行×高)(mm)		630×465×280	700×450×310	800×550×310	1,000×650×410	1,300×750×410	1,600×1,000×700
最大工作物重量(kg)		150	250	500	1,000	1,500	3,500
テーブル寸法(幅×奥行)(mm)		500×300	500×350	700×500	800×600	1,000×600	1,200×800
テーブル左右移動行程(DCモータ)(mm)		300	250	350	450	700	1,000
テーブル前後移動行程(DCモータ)(mm)		220	200	250	350	500(700)	600(850)
主軸サーボ送り行程(DCモータ)(mm)		250	250	350	350	350	450
電極取付面とテーブルとの距離(mm)		400~150	450~200	500~150	600~250	600~250	900~450
最大電極重量(kg)		10	30	75	200	200	500
機械本体寸法(幅×奥行×高)(mm)		1,170×1,640×2,410	1,205×1,275×2,445	1,611×1,525×2,600	1,821×1,825×2,700	2,240×2,280×2,745	2,770×2,900×3,745
機械本体重量(kg)		2,000	2,000	3,100	3,700	5,000	9,000
加工液供給タンク容量(初期充てん量)(l)		395(395)	250(350)	250(350)	395(495)	700(900)	1,900(1,900)
補機入力(kVA)		1.5	2.5	2.5	2.5	5	5.5
高速スピンドル回転数(rpm)		200~2,000	—	—	—	—	—

諸元	型名	M 25 KC 4	M 35 KC 4	M 55 KC 4	M 65 KC 4
加工槽内寸法(幅×奥行×高)(mm)		700×450×310	800×550×310	1,000×650×410	1,300×750×410
最大工作物重量(kg)		250	500	1,000	1,500
テーブル寸法(幅×奥行)(mm)		500×350	700×500	800×600	1,000×600
テーブル左右移動行程(DCモータ)(mm)		250	350	450	700
テーブル前後移動行程(DCモータ)(mm)		200	250	350	500(700)
主軸サーボ送り行程(DCモータ)(mm)		250	250	250	350
電極取付面とテーブルとの距離(mm)		450~200	500~250	600~350	600~250
最大電極重量(kg)		30	75	200	200
機械本体寸法(幅×奥行×高)(mm)		1,205×1,275×2,445	1,611×1,525×2,500	1,821×1,825×2,600	2,240×2,280×2,745
機械本体重量(kg)		2,000	3,100	3,700	5,000
加工液供給タンク容量(初期充てん量)(l)		250(350)	250(350)	395(495)	700(900)
補機入力(kVA)		2.5	2.5	2.5	5

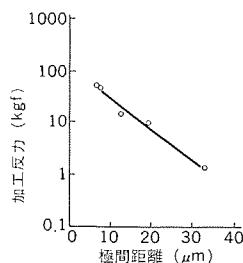


図 5. 加工液粘性による反力

$f$ : 加工液粘性による反力(上昇、下降とも同じ),  $\mu$ : 加工液の粘性係数,  $h$ : 実効極間距離,  $r$ : 電極移動速度,  $r$ : 電極半径

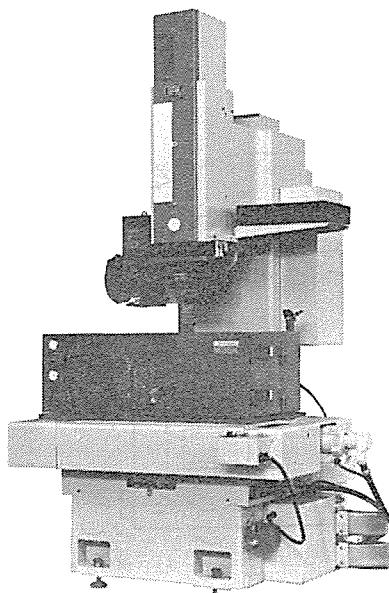


図 6. M 35 KC 7 機械本体

定速送りを基本とする他の工作機械のサーボ系とは根本的に異なっており、極間短絡発生を防ぎ時々刻々と変化する極間間げきを迅速に適正値に制御する機能が要求される。

K シリーズのサーボ機構を図 2. に示す。駆動源である DC サーボモータと主軸をボルネジを介して直結している。速度ループを構成するタコゼネレータ (TG) は DC サーボモータに直結され、主軸の位置は直線形光学式位置検出器 (リニアスケール) により、0.001 mm 単位で読み取られフィードバックされている。

このように構成されたサーボ機構はギヤレス構造であるので、パックラッシュ、ガタなどの機械的不感帯がなくトーションスラスト系のサーボ剛性が大きくパワー伝達効率も非常に高くなる。図 3. に K シリーズの制御ブロック図を示す。サーボに関する機能はすべて専用の 16 ビット CPU で構成されている。メイン CPU で  $T_1$  ms ごとに粗補間された 4 軸 (XYZC) 分の移動指令は更に  $T_2$  ms ごとに精補間に分割指令される。各軸のエンコーダからのフィードバックパルスは、誤差カウンタを介してサーボ CPU で  $T_2$  ms ごとに読み取られ、各軸の現在値算出に使用される。 $T_2$  ms ごとに算出される移動指令値と現在値との誤差、すなわちドリーブ量は D/A 変換器に入力され、ドリーブ量に比例した電圧でモータを駆動するよう構成されている。

### 2.3 室温変化に対し相対変位の少ない機械構造

放電加工機の加工精度は  $\mu\text{m}$  オーダーが要求され、これを実現するためには静的・動的変形と熱変形による変形を最小にする機械設計の確立が必要である。ここでは、これらの中で最も加工精度に影響を与える熱変形に対する K シリーズの対応について述べる。

電極と工作物間の相対位置の変化を起こす大きな要因は、機械系

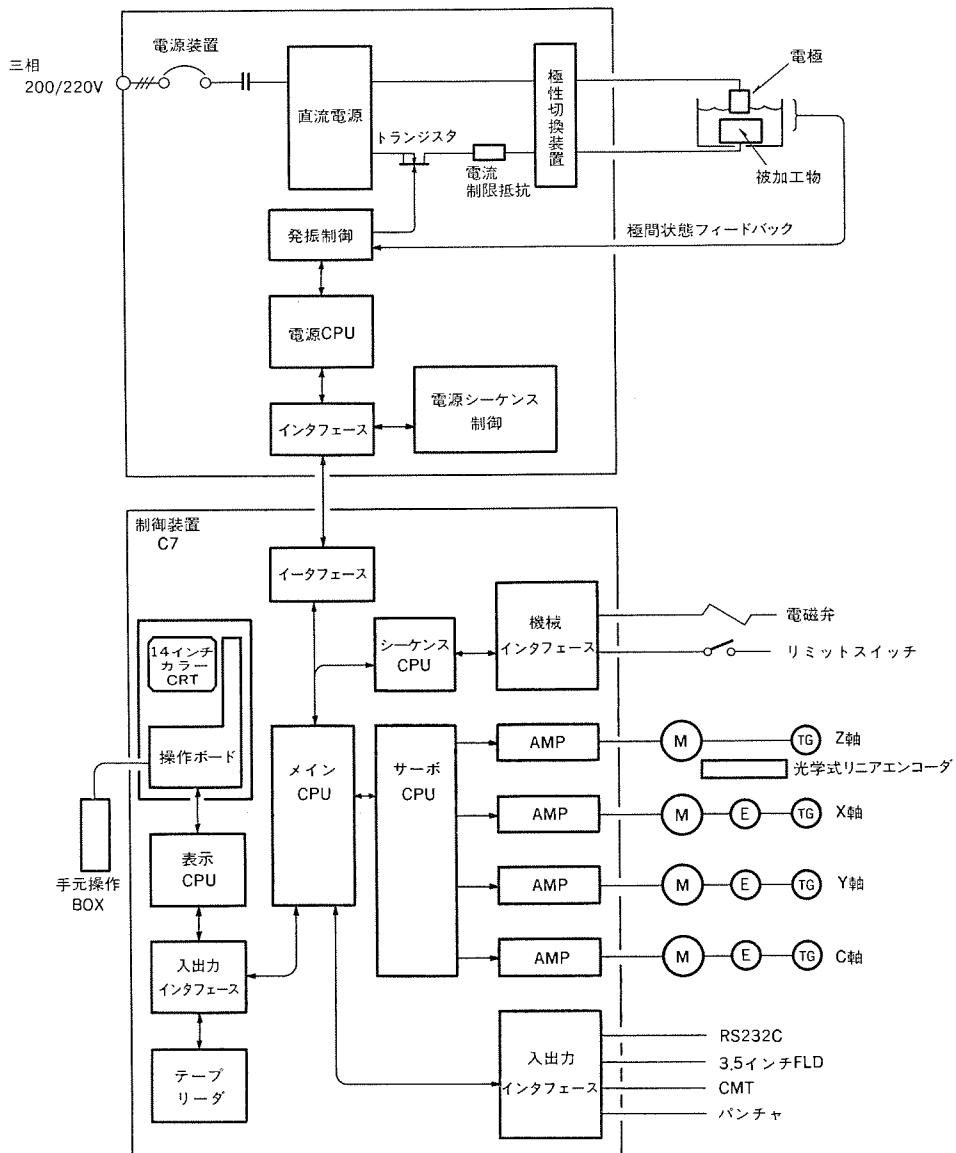


図 7. 放電加工機・電源制御系システム図

の熱変形でその原因是、

- ・機械周囲の温度変化
- ・加工エネルギーによる加工液の温度上昇
- ・ポンプの熱損失による加工液の温度上昇
- ・モータ、軸受の発熱

が考えられる。これらの温度アンバランスにより機械の各部は熱変形を生じる。この機械各部の熱変形が加工中に発生すると電極と工作物の相対位置が変化し、XY方向の形状精度の狂い、Z方向深さのばらつきが生じる。更には、この相対変位により加工時間が予想以上にかかるというような弊害を生じることがあり、とりわけ鏡面加工などの仕上加工領域において、この傾向が顕著に現れることになる。放電加工機の熱変形の原因の中で、最も大きな影響を与える機

表2. 電源のニーズと対応技術

ニーズ	対応技術	内容
トータル加工時間を短縮すること	SC回路 スロープコントロール方式による電極低消耗回路	銅電極において鉄系工作物を加工する場合、放電電流の立ち上がり波形をスロープ制御することにより加工速度を損なうことなく電極低消耗加工ができる。 効果 ・従来回路と比較し、同一消耗条件下において面粗さ対加工速度が向上する。 ・超低消耗加工（電極重量消耗比0.1%以下）ができる。 ・荒加工から仕上加工までの電極本数を低減して高精度加工ができる。 ・同一電極本数であればコーナ、突起、リブ、複角形状の消耗が減少することにより高精度加工ができる。 ・荒加工時の電極面のシワ、ムラ、荒れを防止し仕上加工時に工作に転写されない。 ・低消耗加工の加工面形状が均一で磨きやすいとなる。 ・多数個取り加工において電極1本当たりの加工個数が増加する。
熟練加工技術者を必要とせず加工ができること	OP-3K 異常放電を防止する適応制御回路	加工状態を複数のパラメータで検出し、電極のジャンプ動作及び休止時間の変更により極間のスラッジ生成と排出のバランスを保ち、安定した加工を行わせる。
後工程（磨き）が容易であること	GM回路 鏡面仕上加工回路	SKD61、SKS3やハイス鋼などの被加工物において最良0.3μmRmax程度の光沢面が得られる。
工作物の材質に適応した加工回路が選択できること	SF回路 微細面仕上加工回路	SKD11、DH2Fなどの光沢面が得られない材質でも0.7μmRmax程度の磨きやすい梨地加工面が得られる。
加工速度を向上すること	F回路 高電圧重畠回路	仕上加工において極間のギャップを適正に保ち安定加工ができる。
加工結果に再现性があること	EP/MVサーボ 加工内容に適したサーボ方式	EPサーボ方式 無負荷時間一定サーボ方式で荒中加工に適する。 MVサーボ方式 極間ギャップを適正に保つサーボ方式で仕上加工に適する。
	Cパルス方式 電流パルス幅一定制御方式	一発一発の放電電流の均一化により面形状の改善と電極消耗の低減化が図れる。 有消耗加工においては加工速度が向上する。
	SP回路 超硬加工用回路	超硬合金の加工において、高速トランジスターで高電流ピークで極小パルス幅の電流を供給し、加工面にクラックを発生させず従来比2~3倍の加工速度が得られる。
	自動定電圧機能	仕上加工での電源電圧変動による加工速度、面粗さ、クリアランスのばらつきを抑える。
大型金型用	G250B G500B	主にグラファイト電極を使用し鍛造型などの加工に用いられるパワーアップ用電源 最大加工速度 G250B 25g/min G500B 50g/min
高速加工パワー	不燃性放電加工機	不燃性加工液を使用し、グラファイト電極にて鍛造型などの加工に用いられる。 大電流を投入しても油性加工液の場合の火災の心配が無いため、夜間無人運転が可能であり、加工速度は油性加工液に比較し2倍程度速い。 最大加工速度 G250BW 60g/min G500BW 120g/min

械の周囲温度の変化については、ユーザーに恒温室への設置を求めることが最も有効な手段であり、恒温室への設置により機械の熱変形は大幅に抑制され、XYZ軸の相対変位はほとんど生じない。しかしながら、一般には通常の環境に設置されることが多いため、室温変化は避けられない問題となる。

Kシリーズの開発では室温変化時における機械各部の温度変化と変位の関係を測定し、これらの測定データを解析し最適通風システムを構築し、機械各部の温度を室温の変化に同調させる室温同調システムを開発した。この方式では、通常の環境条件における温度条件の下で図4.に示すように、電極と工作物間のXYZ軸方向の相対変位を±5μm以下に制御している。

## 2.4 剛性の高い機械構造

放電加工現象は非接触加工のため加工反力はほとんど受けないと考えがちだが、実際は放電加工時の電極のサーボ運動により、加工液から受ける反力はかなり大きい値となる。電極が受ける反力を液体の粘性によると考え、この場合の反力は図5.となることが報告されている。

Kシリーズでは、これらの力が加わったときの変形を有限要素手法を用いて解析し、主要構造物の形状、リブの最適配置を確立し高剛性機械構造を構築し、主軸系の剛性値( $K$ )=3.5 kgf/μmと当社従来比2倍以上に向上させている。この値はJIS規格値の約50倍以上の高い値を示している。このように剛性を高めることによりKシリーズでは、振動加工などの横方向の加工特性が大幅に向上し、側面クリアランスの再現性が向上するとともに加工速度も大幅に改善している。

表3. 電源仕様

機能	電源型名	G 35	G 70	G 140
トランジスタパルス回路	(TP回路)	●	●	●
超低消耗回路	(SC回路)	●	●	●
スロープコントロール回路	(SF回路)	●	●	●
微細面仕上回路	(GM回路)	●	●	●
鏡面仕上回路	(F回路)	●	●	●
オプティマイザ	(OP-3K機能)	●	●	●
極性切換	(TP, SC, SF, GM, SP)	●	●	●
高電圧重量回路		●	●	●
ACC回路		●	●	●
サーボ切換	(EP/MV)	●	●	●
最大平均加工電流	(A)	35	70	140
最大加工速度	(g/min)	3	7	16
電極(+)グラファイト 工作物(-)SK-3	(mm <sup>3</sup> /min)	380	890	2,040
電源入力	(kVA)	4	8	15
重量	(kg)	550	600	850
外形寸法(幅×奥行×高さ)	(mm)	700×1,200×1,730	700×1,600×1,730	
最良加工面粗さ	(μmRmax)	0.3~0.4		
最良電極消耗比	(%)	0.1以下		

注 ●印は付属を示す。

表4. スーパーパルス回路(SP回路)

最大加工速度	(g/min)	電極(-)銅タングステン 工作物(+)超硬合金 2.5以上(25~26 μmRmax)
電源入力	(kVA)	7.5
重量	(kg)	230
外形寸法(幅×奥行×高さ)	(mm)	700×400×1,730

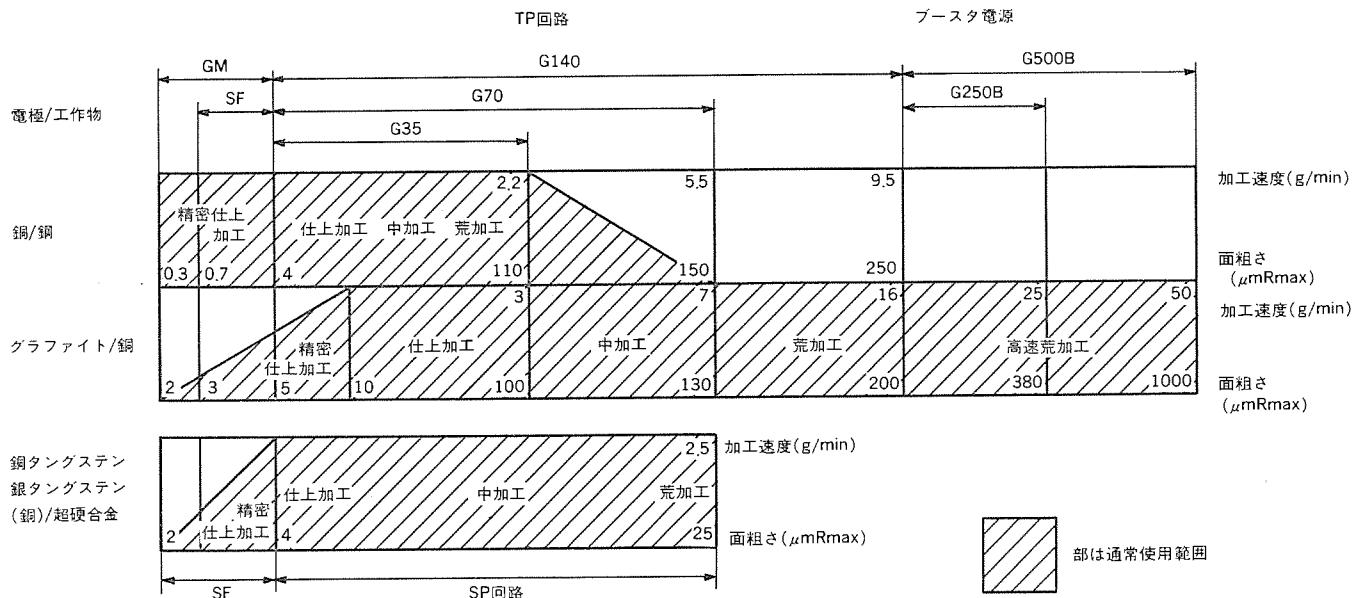


図 8. 加工領域と各電源・加工回路の対応

### 3. 《ダイアックス》放電加工機 K シリーズ機械系の仕様

K シリーズは工作物の大きさにより、M 25 KC 4, M 25 KC 7 の小型機、M 35 KC 4, M 35 KC 7, M 55 KC 4, M 55 KC 7 の中型機、M 65 KC 4, M 65 KC 7, M 85 KC 7 の大型機まで 9 機種及び超高精度 NC 治具放電加工機 M 30 PKC 7 がシリーズ化されている。表 1. に機械の仕様の一覧表を、更に図 6. に代表機種の M 35 KC 7 を示す。

### 4. NC 型彫り放電加工機 K シリーズの電源・制御装置

#### 4. 1 電源・制御装置の概要

一般工作機械の場合、加工性能は刃物材質や機械の剛性により決まるが、放電加工機の場合、パルス電流による電気エネルギーで放電を生じさせ工作物を加工する。したがって、電気エネルギーを制御する電源・制御装置は、放電加工機の加工性能を決定する重要な要素となる。今日、電源はマイコン、パワー半導体素子などのエレクトロニクスのめざましい技術革新の成果を取り入れることにより、例えば、放電電流の立ち上がり波形を制御するスロープコントロール方式など、從来、基礎研究段階で判明していた原理の具現化が次々と達成されている。

また、制御装置は CNC 制御装置が主流となっており、操作性では NC 言語を使用しない自動 プログラミング方式、CRT による加工状態のモニタ表示、プログラムチェックを容易にするグラフィック機能などの機能を持ち、またサーボ機構は幅広い加工のアプリケーションに対応するため、CPU による全軸等価サーボ方式を採用している。更に、自動化対応としては、ATC 機能、インプロセス計測及び補正機能などがあり、FA 化対応としては DNC 機能などをもっている（図 7.）。

#### 4. 2 電源装置

金型製作の短納期化、低コスト化の観点から放電加工機の電源装置に要求される項目は、

##### (1) 加工速度を向上すること

放電加工の場合、機械加工と同様に荒加工→中加工→仕上加工の手順で加工するのが効率的である。したがって、各加工の段階で、

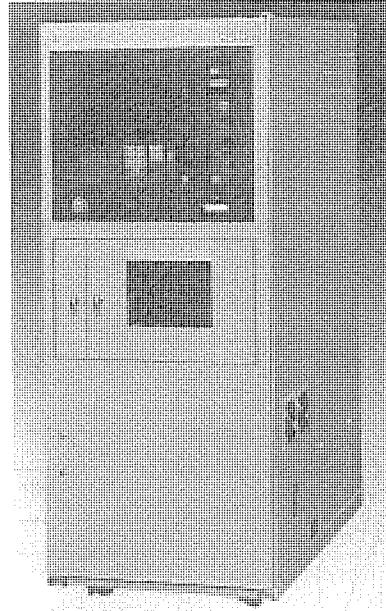


図 9. C 7 G 35 電源制御装置

加工条件の最適化や極限状態に対応したサーボ制御、電流波形制御が必要となる。また、工作物の材質に適した電流波形制御も考慮し、加工速度を向上すること。

##### (2) 後工程（磨き）が容易であること

放電加工後の機械加工による磨きが不要となるような、又は磨き時間が短縮できる面性状、面粗さが得られること。

##### (3) 加工結果に再現性があること

機械の剛性、熱変形はもちろんであるが、放電電流パルスのパルス幅、ピーク電流値が変動すると、加工速度、面粗さ、クリアランスに変動が生じるため、定電圧制御などの対策が特に仕上加工領域でとられていること。

##### (4) 熟練加工技術者を必要とせず加工ができること

電極形状が複雑な加工、深いリフ加工、又は多数個取りなどの加工液がうまく流せない加工、グラファイト電極などの定常アーケーに移行

しやすい電極による加工が、熟練加工技術者によらなくても再現性良く、安心して加工できること。(5) トータル加工時間を短縮すること

電極は加工の進行とともに消耗するので、通常、荒・中・仕上加工の各段階で電極を交換する。この電極消耗量を小さくすれば電極交換本数が減少でき、電極交換時間(位置決め、段取り時間も含む)が短縮されトータル加工時間が減少する。また、荒・中加工時に電極消耗量を小さくし高精度な加工を行なうことにより、仕上加工で加工速度の速い有消耗加工条件が使用できトータル加工時間の減少が図れる。更に、それほど形状精度が要求されない加工については、1本の電極で荒から仕上まで加工することが可能となるため、電極消耗は極力小さいこと。

(6) 工作物の材質に適応した加工回路が選択できること

特に冷間鍛造型、プレス絞り型などに使用される超硬合金の加工は、放電電流パルス幅が長いと加工面にクラックが発生しやすく、型割れの原因となるため、パルス幅の短いピーク電流の大きい電流波形が必要である。このように、工作物に応じた適切な加工回路が選択できること。

上記に述べた6項目に関する対応技術を表2., 表3., 表4. 及び図8. に示す。

#### 4.3 制御装置

NC制御装置は《MELDAS-M2》を母体とし、マンマシンインターフェース部、サーボ制御部などを放電加工機用に改良を加えている。制御装置としては、C7とこれを機能限定したC4の2機種がある(図9.)。

制御装置(C7の場合)の特長としては、

- (1) 16ビットCPUによるマルチCPU方式
- (2) 制御プログラム、補正データ、各種パラメータなどが半永久的に保存できるバブルメモリ(128Kバイト)方式の採用
- (3) 14インチカラーCRTによる豊富なチェック機能と容易な自動プログラミング方式
- (4) RS232C, RS422による通信機能の装備

表5. 制御装置C7/C4の仕様・機能

●C7/C4 仕様		C7		C4	
諸元	型名				
入力方式	紙テープ入力ISO/EIA, キーボード			キーボード	
表示方式	14インチカラーCRT			12インチモノクロCRT	
制御方式	CNCクローズドループ			CNCクローズドループ	
設定単位	XYZ 0.001mm, C 0.001°			XYZ 0.001mm, C 0.001°	
最大指令値	XYZ ±99999.999mm, C ±99999.999°			XYZ ±99999.999mm, C ±99999.999°	
位置指令方式	増分値/絶対値併用			増分値/絶対値併用	
手動送り	高速・中速・低速・超低速・インチング			高速・中速・低速・超低速・インチング	
インチング	1, 10μm/ブッシュ			1, 10μm/ブッシュ	
制御軸数	XYZ(C) 3(4)軸			XYZ(C) 3(4)軸	
振動モード	固定パターン及び任意軌跡			固定パターン及び任意軌跡	
振動制御方式	3種類(自由, 半固定, 固定)			3種類(自由, 半固定, 固定)	
プログラム容量	128Kバイト			64Kバイト	
最大送り速度(mm/min)	XYZ 1,300mm/分, C 7,200°/分			XYZ 1,300mm/分, C 7,200°/分	
バッテリバックアップ	80時間			1か月	
入力(kVA)	2			2	

●C7/C4 機能

項目		型名		項目		型名	
		C7	C4			C7	C4
NC機能	CRT表示	●	●	加工条件自動切換	●	●	
	MDI	●	●	時間加工機能	●	●	
	テープ入力	●	●	漢字表示機能	●	—	
	メモリ運転	●	●	グラフィック機能	●	—	
	スケール倍率	●	●	FAP機能	●	●	
	ミラーイメージ	●	●	対話型自動プログラミング機能	●	—	
	メモリサイクル	●	●	ピッチエラー補正	●	●	
	軸交換	●	●	バックラッシュ補正	●	●	
	図形回転	●	●	自動原点復帰	●	●	
	直線・円弧補間	●	●	加工液自動給排液	●	●	
	ドライラン	●	●	インチ・ミリ切換	●	●	
	ドウェル	●	●	外部出力M機能	●	●	
	ロックディート	●	●	RS232C(DC1, 3方式)インターフェース	●	●	
	マシンロック	●	●	自動端面位置決め	●	●	
	多数座標機能	●	●	自動穴中心位置決め	●	●	
	シーケンスナンバーサーチ	●	●	自動柱中心位置決め	●	●	
	ユーザーマクロ	●	●	放電位置決め	●	●	
加工機能	データ変数演算機能	●	●	振動加工	●	●	
	速度割り込み機能	●	●	テーパ加工	●	●	
	スキップ割り込み機能	●	●	横方向加工	●	●	
	時間読み込み機能	●	●	自動拡大加工	●	●	
	接点入力読み込み機能	●	●	三次元加工	●	●	
	現在値読み込み機能	●	●	オフセット加工	●	●	
	自動リターン	●	●	輪郭加工	●	●	
	マスタバック機能(20バック)	●	●	C軸加工(C軸)	●	●	
	Eバック	1,000個	100個	ドレッシング加工(回転姿置)	●	●	
				電極多数心ずれ・高さ補正機能(ATC)	●	—	

注 ●: 標準機能 ○: オプション機能

(5) 間接空冷による完全密閉化

(6) 操作部は完全防滴、防じん型のフラットキーボードを採用  
制御装置の主な仕様を表5. に示す。

#### 5. NC型彫り放電加工機Kシリーズのソフトウェアの特長

多機能と操作性のトレードオフの中で、NC型彫り放電加工機では操作性が優先される。この点を考慮し、Kシリーズでは、だれでも使

える高い操作性を追求した。

### 5.1 操作性の向上

#### 5.1.1 フレキシブル自動プログラム (図 10.)

汎用機より使いやすい NC 放電加工機を実現するため、加工手順に従い CRT 画面上のプロセスシートにデータを入力するだけで、加工プログラムが作成できる方式を採用した。NC 言語を用いず、最小限必要な加工深さ、加工条件などを入力するのみで加工プログラムが作成できるので、放電加工専用のオペレータを必要とせず、機械導入後汎用機の感覚ですぐに稼働することができる。また、NC 放電加工機の利点が最大限発揮できるように、ピッチ送り加工、繰り返し加工はもとより、振動加工、横加工、斜め加工、ヘリカル加工などの高付加価値を生み出す加工に対応できるようになっている。

汎用機より生産性を向上するため、よく使う加工条件はいちいちプログラムを作らずにパッケージ (E パック) 化して合理化を図った。更に、振動加工でいちいち加工条件、振動半径をプログラムしたり、チェックをすることをやめるために、振動半径、加工条件の荒加工から仕上加工までの一連のパターン

は一括で呼び出せ、実加工深さと電極寸法に関するデータを入力するだけで自動的に取り代の計算が行われる機能 (マスタパック) を付加した (図 11.)。このマスタパックは、メーカー推奨のものもあるが、ユーザーが今まで蓄積してきた加工ノウハウも同じように簡単に登録できるので、ユーザーの加工内容に合った最適の加工を実現することができる。この点が、従来の対話型自動プログラムと異なった点であり、メーカーおしきせの固定された加工ノウハウに限定されず、ユーザーが使い込んで行くうちに、ユーザー独自の加工ノウハウの蓄積と確立を可能としている。

また、NC 機能をフルに使って高付加価値の加工を行えるようになるために、フレキシブル自動プログラムのデータを NC 言語へ自動的に変換できるようにしている。このことにより、変換された NC プログラムを編集して、更に複雑な加工を実現することができる。

自動プログラムの体系として、上記に示したフレキシブル自動プログラムと、初心者でも簡単に加工ができる対話型自動プログラムがある。NC 言語によるプログラムとあわせて 3 種類のプログラム方式があるので、初心者から熟練者までのあらゆるレベルのユーザーに最適なプログラム方式が提供できる。

#### 5.1.2 専用画面による最適化

NC 機能は豊富でも當時使う機能はすぐに利用できるように、加工手順に従った専用画面がワンタッチで出せるように最適化を行った。段取り、位置合せのときは、手動キーにより位置決め専用の画面を表示する。この画面からは、数値入力により指定量移動できる機能のほかに、座標設定、柱中心位置決め、ATC、電極心ずれ量の測定、現在位置の変数読み込みなどの機能が網羅されている。これらの機能は NC プログラムで実現可能であるが、段取り時に手軽に使える点に着目し専用画面を設けた。

プログラム時は FAP (フレキシブル自動プログラム) キーにより、先に述べた自動プログラム画面を表示する。加工時は自動キーにより、加工状態をモニタできるモニタ画面を表示する。加工中に知りたい情報は、

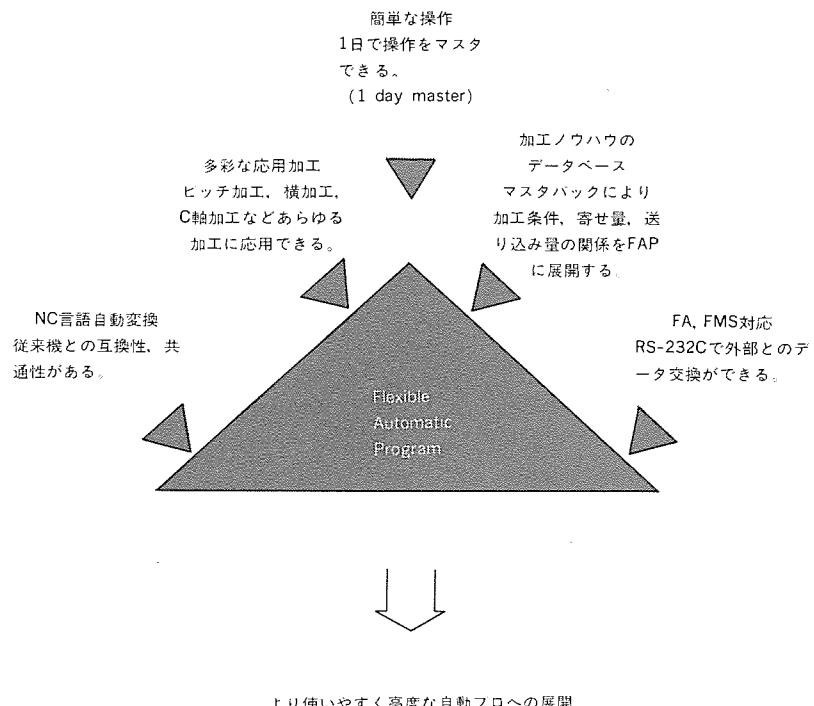


図 10. FAP の概念

この画面に集約するとともに、速度、ゲイン、サーボ電圧などのデータは加工中にも変更できるようにしてある。

以上のように、段取り、プログラム、加工と基本的に必要な操作に対し、専用キーと専用画面を設けることにより、だれでもわずか 1 日程度のトレーニングで汎用機並みに十分使いこなせるように配慮してある。

#### 5.1.3 加工状況に応じた柔軟性

加工状況によっては、加工条件、位置、プログラムなどを修正する必要が生じるが、このような場合に柔軟に変更できる機能を装備している。サーボ電圧、ゲイン、パルス休止幅などを加工中にも変更でき、その条件を次の加工に生かすためにパッケージに読み込むことができる。このことにより、1 個目の加工での最適条件を 2 個目以降に反映できる。また、電極とワークの現物合わせや、片当たりの修正などのために、自動運転で加工しながら手動移動で位置をずらすことができる。従来は、最初から加工しなおさなければならなかつたことが、途中で修正が効くことで大きな利点となった。更には、フレキシブル自動プログラムでは、加工中に加工プログラムそのものを修正することもできる。従来 NC は、先読みの実施により実行中のプログラムは変更できなかったが、これはユーザーにこたえた当社独自の機能である。

#### 5.2 自動化、高性能化

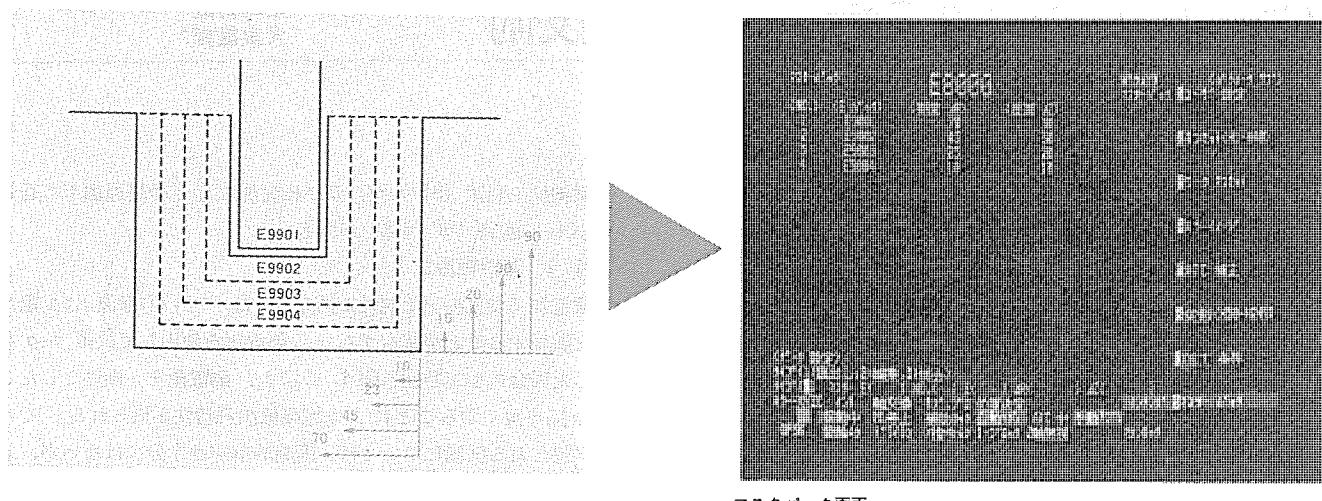
##### 5.2.1 側面サーボ

従来、振動加工では、主軸前進方向に極間サーボが働いていたが、深物加工で振動を行ふと、側面方向で加工不安定となる場合があった。そこで、振動加工時に側面方向でも極間サーボを可能とするようなサーボ方式を開発することにより、深物加工、リフ加工での加工安定性が向上し、また側面方向の時間切加工が可能となつたため、側面仕上げ加工に著しい効果を発揮することができた。

##### 5.2.2 その他

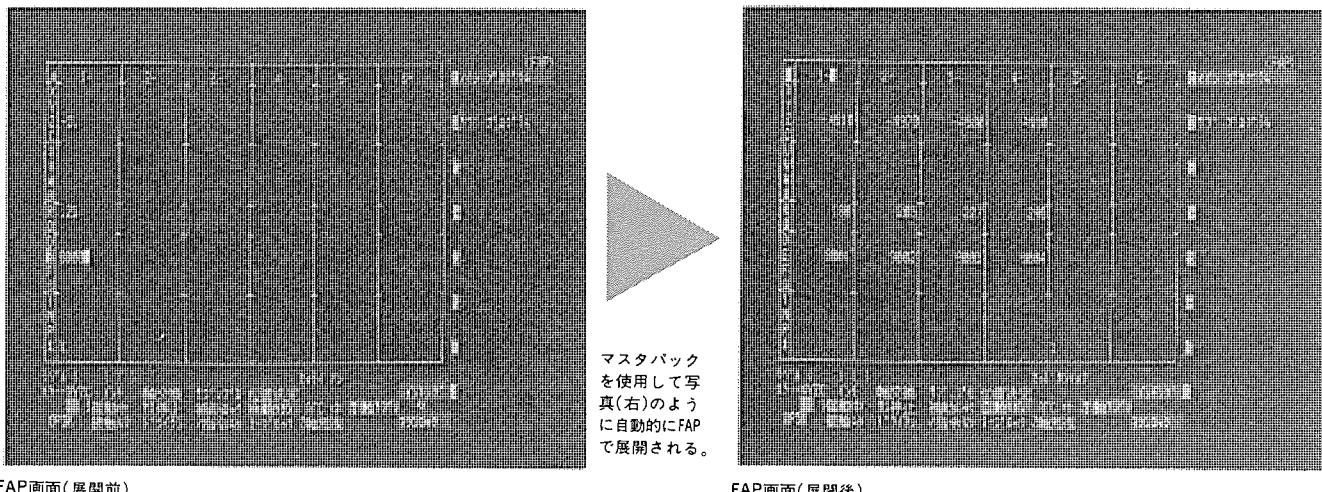
自動化を進めるうえで必ず(須)となる RS 232 C インタフェースによ

荒加工から仕上げ加工までの加工条件、寄せ量、送り込み量の関係をマスタパック画面上に設定し、この加工条件例をFAPで容易に呼び出すことができる。



マスタパック画面

FAPのデータ入力には、実際の加工深さと仕上寸法に対する電極の減寸量とマスタパック番号を入力するだけでよい。



FAP画面(展開前)

FAP画面(展開後)

図 11. FAP を高度に支えるマスタパック

る外部とのデータ交換をはじめ、タッチセンサを用いた高速の自動位置決め、ATCに伴う電極心ずれ補正機能などが装備され、更に自動化、高精度化のユーザーニーズに対応できるようになっている。

## 6. む す び

NC型彫り放電加工機は、主としてモールド成形金型製作のマザーマシンとして、多様化するユーザーニーズに対応すべく、マイクロエレクトロニクス技術、パワーエレクトロニクス技術、計測技術、更にはコンピュータによる構造、熱解析などのあらゆる先端的な技術革新の成果を取り入れ進歩してきた。

今後は更に高精度、高生産性化を目指して新しい制御理論やAI

技術等を導入し、新世代の加工機として発展させていく所存である。

(原稿受付 昭62-4-3)

## 参 考 文 献

- (1) 松田：NC 彫り放電加工機 K シリーズ、電気加工技術、(社)電気加工学会、10, No. 31 (1986)
- (2) 毛利：電気加工技術、11, No. 32, 第124回電気加工研究会 (1987)
- (3) 三菱放電加工機 K シリーズ、三菱電機 カタログ
- (4) 黒川：放電加工の伝達関数、電気学会誌、80巻 860号 (1960-5)

## NC型彫り放電加工特性と加工技術

高齋民生\* 酒井洋三\*  
尾崎好雄\*  
大泉敏郎\*

## 1. まえがき

NC型彫り放電加工機は、従来から三次元形状の成形金型の加工にマザーマシンとして幅広く用いられ、特に省入性や、その加工精度、仕上面の点で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はますます高度化し、次のような課題をNC型彫り放電加工機に対して提起している。
- (1) 電極の消耗を限りなく小さくして、少ない電極で、高精度加工・高能率加工の実現
  - (2) 加工対象ごとに最も性能を発揮する電源の開発
  - (3) だれでも計画どおりの加工ができる機械（加工技能から技術への脱皮）の実現
  - (4) 加工アプリケーションの拡大（機械の機能向上）
  - (5) 24h稼働、休日稼働などを実現する高精度・高信頼自動化システムの構築

本稿では、これらのユーザーニーズを先取りして開発された、当社NC型彫り放電加工機Kシリーズの加工特性と加工技術を紹介とともに、これらを用いた応用例について述べる。

## 2. 加工対象別電源回路の特徴

## 2.1 電源回路の種類

NC型彫り放電加工機Kシリーズの電源には、加工対象別に以下の回路が用意されている。汎用的なトランジスタパルス回路(TP回路)、超低消耗加工を可能にするスロープコントロール回路(SC回路)、鏡面を作る鏡面仕上回路(GM回路)、微細仕上げのなし(梨)地面を作

る微細仕上回路(SF回路)及び超硬加工などの貫通加工に適したスーパーパルス回路(SP回路)がある。

## 2.1.1 低消耗加工

放電加工で電極を低消耗に抑えるには、く(矩)形波パルス電流方式を採用することが基本である。銅電極を使用して鉄系ワークを加工した場合の加工特性を図1に示す。銅電極を+極性としたとき、パルス幅を長くすることにより電極低消耗特性が得られる。この特性が得られる機構については、理論的解明は十分ではないが、定性的には次のように説明できそうである<sup>(1)</sup>。

(1) 陽極である電極は、電子電流によって高温になり、陰極であるワークは、イオン電流によって高温になる。放電電流中に占められる電子電流とイオン電流の割合によって陰極と陽極への仕事量が決まる。また、電子電流は熱電子放射と電界放射とからなり、全電流密度(電子電流密度とイオン電流密度との和)であり、全電流をアーケ柱断面積で除した値)が大きいほど多くなり、全電流密度が小さいほど少なくなる。一方、アーケ柱断面積は放電の発生により徐々に増加し、全電流は一定の矩形波であるため、全電流密度は徐々に低下し、これに従って電子電流密度も低下する。つまり、パルス幅が短い場合には電子電流が多いため、陽極側の仕事量が多く、パルス幅が長い場合にはイオン電流が多くなるため陰極側の仕事量が多くなり、これにより電極の消耗が減少する。

(2) 融点の高い材料、熱伝達率の高い材料は消耗が少ない。熱伝達率 $\lambda$ と融点 $\theta_m$ との積 $\lambda \cdot \theta_m$ を銅と鉄とで比較すると、銅が4,000 W/cm<sup>2</sup>に対し、鉄が1,230 W/cm<sup>2</sup>で、鉄に比べ銅の消耗が少ない。

(3) 放電時に油が分解しカーボンが発生する。このカーボンはパルス幅が長いときに、より長く陽極面に付着する。付着したカーボンは、

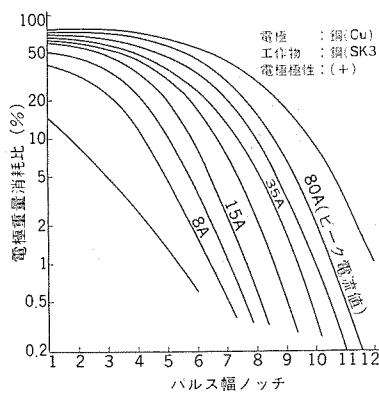


図1. Cu:St電極消耗特性(TP回路)

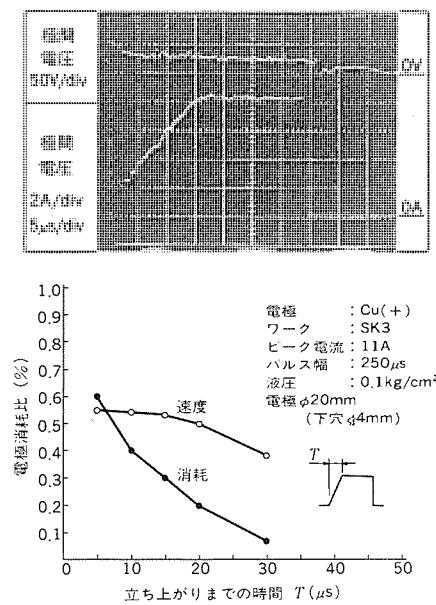


図2. スロープコントロール波形と立ち上がり時間に対する特性

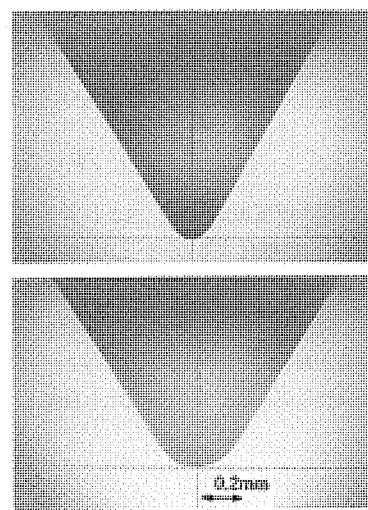


図3. スロープコントロールの効果

保護被膜となって陽極の消耗を減少させる効果を持っている。

トランジスタパルス回路による銅対鉄の加工は、電極消耗比0.5~1%程度まで可能である。また、電極にグラファイトを用いた場合も、この回路を使用する。

### 2.1.2 超低消耗加工

トランジスタパルス回路による電極消耗比0.5%以下の加工は、ワーク側の加工量が極端に低下するとともに加工が不安定となり、異常放電(いわゆるアーカ)になりやすい傾向がある。一方、電極消耗は放電電流の立ち上がり特性によって大きな影響を受け、図2.に示すように放電電流波形の立ち上がりを緩やかにすることにより、電極消耗を著しく低減することができる<sup>(2)</sup>。図2.に電流立ち上がり時間と電極消耗比の関係を示す<sup>(3)</sup>。電極消耗は立ち上がりが緩やかになるほど低下するのに対し、加工速度の低下は比較的少ない領域が存在する。スロープコントロールにより、電極消耗が低下する機構は、アーカ柱の膨脹に合わせて全電流を増加させることにより全電流密度を低く保ち、この結果、前項で述べたように電子電流密度が低く保たれ陽極の消耗を減ぜられる。スロープコントロール回路を使用すれば、0.1~0.01%の電極消耗比が得られ、特にコーナの形状精度が著しく向上する。

図3.はシャープエッジ電極で、深さ3mm、5個取り加工後の先端部の加工形状を比較した投影写真である。なお、加工速度についてはほぼ同等であった。スロープコントロール回路により、従来2~3本の電極を費した加工でも、1本の電極で荒・仕上加工が可能となるばかりでなく、パルス幅をあまり長くせずに消耗比を減少できるので、荒加工時の加工変質層の減少及びクラック発生の減少に効果がある。

### 2.1.3 鏡面仕上加工

一般にプラスチック成形型などの金型は、磨きを行って使用される。しかしながら、その形状によっては磨き作業が困難な場合もあり、放電加工のみで仕上げ、磨き工程を省略することが望まれている。鏡面仕上回路は、これを実現するための回路である。図4.は鏡面仕上回路及びコンデンサ放電の单発(痕)と連続放電加工面との比較である<sup>(4)</sup>。電流ピーク値1~2A、パルス幅0.5~1μs、電極負極性の有消耗条件で加工すると、一発一発の放電痕が平坦になり、連続

表1. 鏡面加工回路の材質別適性

光沢度	◎	○	△	×
材質	STAVAX SKD-61 SKH-9	SK-3 NAK-80 S55C	SKD-11 NAK-55 DH2F HPM-1	WC-Co FC

注(1) 光沢の程度 ◎>○>△>×

(2) 光沢度△、×は、微細仕上回路を推奨する。

加工においても各放電痕の境界が判明しないほど平坦になっている。

コンデンサ放電では单発痕の周囲の噴山と呼ばれる部分が高く、母材に十分になじんでいない。このため、連続加工においても噴山は残っている。なお、これらの仕上加工では、振動にて電極と工作物間に相対的な運動を与えており、これにより一層の平坦面が得られている。鏡面仕上加工では、材料によっては0.3μm R max の良好な加工面も得られるが、材料組織そのものが粗い鉄鉱や超硬合金などは、面粗さが細かくても光沢度の悪いものもある。表1.に加工材料による鏡面仕上加工の適性を示した。表中、不適性材料及び加工面積が大きい場合には微細仕上加工が一般には使用される。

### 2.1.4 微細仕上加工

供給するエネルギーを微細にすると、加工面は微細な梨地面になる。前述の鏡面加工ほどに面粗さを細かくするには時間がかかるが、磨きやすい2~3μm R max の加工面が比較的速く加工できる。また、微細仕上回路は電極消耗が比較的少ないものので、加工精度及びコーナ形状を重視する仕上加工に適する。また、鏡面加工の困難な材質や加工面積が大きいときには、前述のようにこの回路を用いる。

### 2.1.5 超硬加工

加工速度は平均加工電流に比例して増加するが、電流波形によって電流効果が異なり、同一平均電流であってもピーク電流値が高い方が加工速度は速くなる。更に、パルス幅を狭くしてピーク電流を高くした方が繰り返し周波数が高くでき、加工速度を速くできる。パルス幅を狭くすると低消耗加工は望めないが、電極消耗が多少あっても許容される抜型加工や、低消耗加工が望めない超硬合金のような材料に対しては、これを適用して高速加工を実現している。スーパーパルス回路は、最先端のパワーエレクトロニクス技術を採用し、狭いパルス幅で高ピーク電流を発生させることで、特に超硬合金の加工で、面粗さに対する加工速度が著しく向上し、また従来のコンデンサ放電とは異なり極間間げきの状況に応じて放電を制御できるため、加工が安定で均一な面に仕上がる特長を持っている。

## 3. 無噴流加工技術と最適加工条件

### 3.1 無噴流加工特性

一般に放電加工が安定に進行する条件は、放電によって生成される加工粉が、すみやかに極間から排出されることであることが知られている。すなわち、単位時間当たりの加工粉生成量(加工速度)と、加工粉排出能力をそれぞれw1, w2とすれば、

$$w2 \geq w1$$

の関係式が成立する必要がある。この式から加工速度を向上させるためには、w2を大きくすればよいことがわかり、その方法としては、

(1) 加工液噴流方式の採用

(2) 電極の定時引上げの最適化

の二つが主なものである。このうち、加工液噴流については電極、

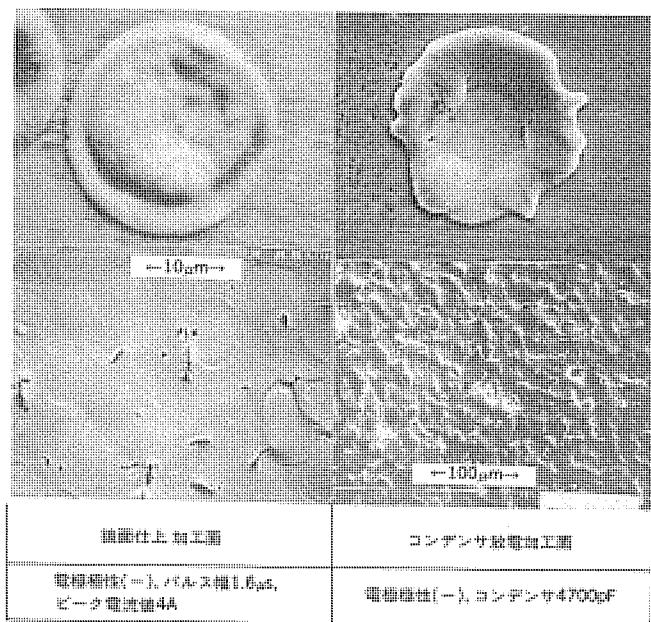


図4. 鏡面仕上加工面とコンデンサ放電加工面の特徴

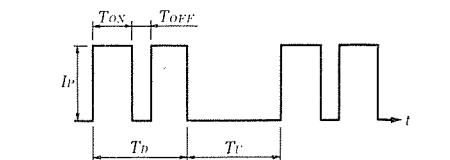
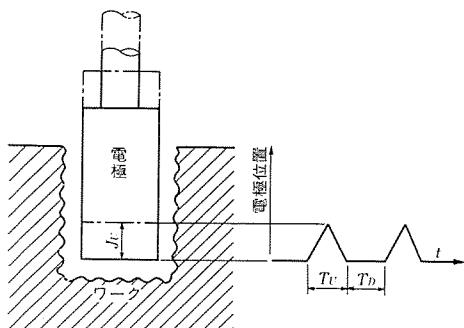


図 5. 電極の定時引上げ動作の概略と パラメータ

ワークの形状、加工深さなどにより最適な加工液噴射ノズルの形状、個数、位置が異なっている。このため選択を誤ると、逆に加工速度が低下するばかりか、電極の異常消耗、加工粉の滞留などによって加工精度を悪化させるおそれがあり、熟練作業者の経験が必要とされ加工条件決定の自動化に際しての大きな障害となっていた。

一方、電極の定時引上げに関しては、選択要素は電極引上げ距離( $JU$ )と電極降下時間( $T_D$ )の二つであり、NCによって制御可能である。よって、従来定性的に言っていた無噴流加工特性を定量的に求めれば、加工液噴流を用いない加工法が実現できることになる。Kシリーズ NCEDM では、この点を追求して加工条件が作成され、熟練者のテクニックを用いなくても安定した高精度加工が可能となつた。

図 5. に電極の定時引上げの概略図とその タイムチャートを示す。図において実線は電極の降下位置を、一点鎖線は上昇位置を示し、また  $T_U$  は電極引上げ時間を、 $T_D$  は実際に加工している時間(電極降下時間)を示している。ここで加工速度を向上させるために、 $JU$  を大きくとて  $w_2$  を大きくすると結果的に  $T_U$  が長くなり、 $T_D/T_U$  の値が小さくなつて加工時間が短くなるのと同じことになり、加工速度が低下するという問題がある。

### 3.1.1 電流密度と電極降下時間

図 5. に電極定時引上げを用いたときの電流波形の タイムチャートを示す。図において  $I_p$  はピーク電流値、 $T_{ON}$  は電流継続時間、 $T_{OFF}$  は休止時間を示す。ここで、 $I_p$ 、 $T_{ON}$ 、 $JU$ 、 $T_D$  を固定し、 $T_{OFF}$  をパラメータに加工時間と加工深さの関係を図 6. に示す。これにより、 $T_{OFF}$  を短くして単位時間当たりの電流量を多くしても加工速度には限界があることがわかる。このグラフを加工速度と電極の加工面積当たりの電流値(電流密度)のグラフに直し、 $T_D$  の値を 0.25 秒、0.75 と変化させた結果を図 7. に示す。ここで、

$$I_p = \bar{I}/S \quad \bar{I}: \text{平均加工電流} \quad S: \text{電極面積}$$

$$\bar{I} = I_p \times T_{ON}/(T_{ON} + T_{OFF})$$

であり、グラフからわかるように  $I_p$  を高くし、 $T_D$  を短くする方が加工速度が向上している。また、このグラフの加工速度を単位電流面積当たりの加工量( $w_0$ )に書き換えたものが図 7. である。ここで、

$$w_0 = w_1 \times \frac{(T_{ON} \times T_{OFF})}{T_{ON}} \times \frac{(T_U + T_D)}{T_D} \times \frac{1}{I_p}$$

であり、 $w_0$  は加工の効率を示すこととなり、下降線にあたる領域

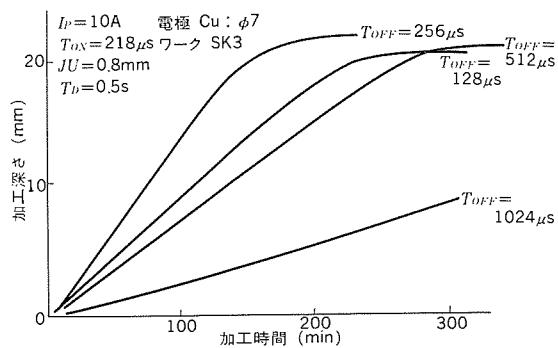


図 6. 加工速度に対する休止時間の依存性

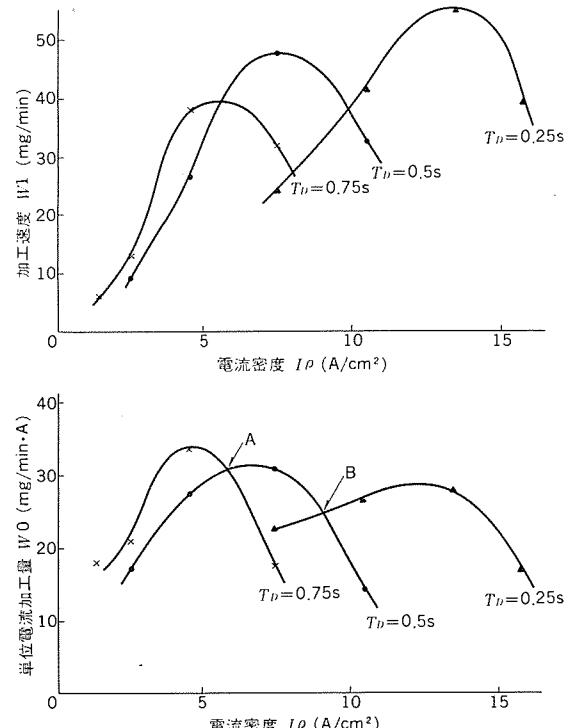


図 7. 加工速度に対する実加工時間と電流密度の関係

は電流の加工効率が低下してきているといえる。このグラフにより、 $I_p$  に対し最大の  $w_0$  をとる  $T_D$  の値が存在し、その値を加工条件に選べばよいことがわかる。しかしながら、実際の加工条件はある程度固定化する必要がある。ここで、グラフ上の各交点 A, B の値を

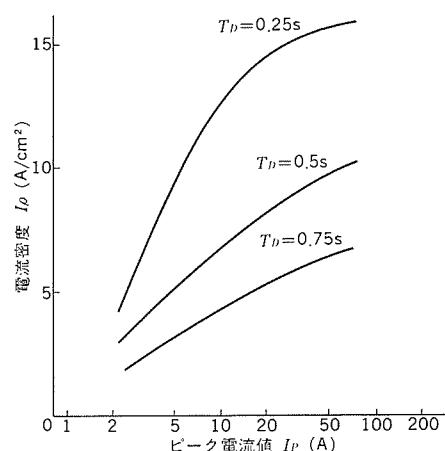


図 8. 最適実加工時間に対するピーク電流値と電流密度の関係

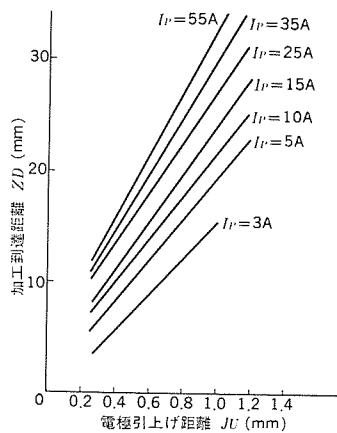
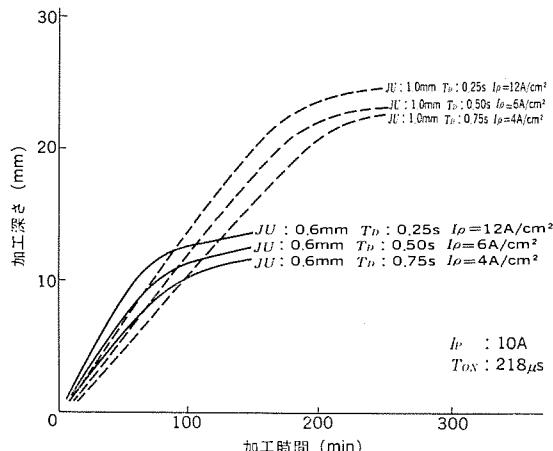


図 9. 加工到達距離に対する電極引上げ距離とピーク電流の関係

$I_P$  を変化させて求めたグラフを図 8. に示す。これにより、最適な  $T_D$  と  $I_P$  の関係は  $I_P$  により異なっており、 $I_P$  の高い荒加工ほど  $I_P$  を高く  $T_D$  を長くとっても安定に加工できることを示す。

### 3.1.2 電極引上げ距離と加工到達距離の関係

図 8. で得た  $I_P$  と  $T_D$  の関係を基に  $JU$  と加工到達距離 (ZD) の関係を調べたものを図 9. に示す。このグラフからわかるように、ZD は  $I_P$ 、 $T_D$  にほとんど関係なく  $JU$  によって決定されることがわかる。 $I_P$  を変化させて、同様の実験を行った結果を図 9. に示す。これにより ZD は  $JU$  の一次関数であり、 $I_P$  が高いほど同一  $JU$  に対して ZD が深くなっていることがわかる。

以上の関係により、最適な無噴流加工を行うためには、加工深さに応じて電極引上げ距離を変化させればよく、また深さによって電極面積が変化する場合も図 8. のグラフに基づいて休止時間、電極低下時間が設定可能となった。

### 3.2 最適加工条件

放電加工を行うために、作業者が設定しなければならない加工条件の主なものは、加工面積とクリアランスによって決定される  $I_P$ 、電極消耗比によって決定される  $T_{ON}$  に加え、3.1 節で求めた加工面積と加工深さによって決定される  $T_{OFF}$ 、 $JU$ 、 $T_D$  があり、これらの最適な組合せを加工条件表として供給する必要がある。K シリーズ用の加工条件表は、表 2. に示すように電極重量消耗比、加工深さ別に、加工面積、休止時間、ピーク電流、電極定時引上げの関係をまとめた。表の例では、消耗比 0.2% (A) で加工深さが 10 mm (B)、加工面積が 1.0  $\text{cm}^2$  (C)、電極片側減寸量が 0.5 mm ならば、開始条件に  $I_P = 4(5)$ 、 $T_{ON} = 9.0$  を選び (D)、 $T_{OFF} = 10.0$ 、 $JU = 3$ 、

表 2. 最適加工条件例

耗減率換算条件別 (0.2% - 1) : 加工深さ ~ 1.0 mm	
A	B (佳1) 電極小代、△Z <sub>0.5</sub> (佳2) 開始条件のうち
上バターン	開始条件
回路	→ → A → B → B → C →
$I_P = CN$	D → 4(5)-9.0 → 5(5)-8.0 → 2(5)-7.0 → 2(3)-6.5 → 0(5)-6.5
面積	E No. (OFF)
0.25 $\text{cm}^2$	9500(10.0) T3 ↓1
0.50 $\text{cm}^2$	9505(5.0) T3 ↓1
1.0 $\text{cm}^2$ C	9509(10.0) T3 ↓1
2.0 $\text{cm}^2$	9513(5.0) T3 ↓1
4.0 $\text{cm}^2$	9515(5.0) T3 ↓2
8.0 $\text{cm}^2$	9515(5.0) T3 ↓3
C4 E1*2	9920 9921 9922 9923 9924
消泡 (T)	0.15 0.15 0.2 0.2 0.15
碎小代 $\Delta Z$	357 324
碎小代 $\Delta R$	137
粗小代 $\Delta Z$	409 392 249 198 152 112
粗小代 $\Delta R$	249 119 62
粗小代 $\Delta Z$	441 412 281 218 184 132
粗小代 $\Delta R$	151 94 149 105 64
粗小代 $\Delta Z$	451 427 291 233 184 147
粗小代 $\Delta R$	161 104 159 125 74 134 49
粗小代 $\Delta Z$	465 436 305 242 208 156 173 129 85 144 62
粗小代 $\Delta R$	175 118 118 118 74 134 49

$T_D = 1$  が決定されることになる (E)。

### 3.3 電極コーナ消耗

放電加工における電極の消耗は、一般的な Cu : St の加工では重量消耗比で表すが、1 本の電極で荒から仕上まで加工するような場合には、荒加工時の消耗が問題になり、同一重量消耗比の条件でも  $I_P$  値の高い条件ほどコーナ部の消耗が多くなる。図 10. は 0.2% の消耗時における加工深さとコーナ R の関係を示すもので、加工深さと要求されるコーナ R の兼ね合いから開始条件を決定する必要がある。

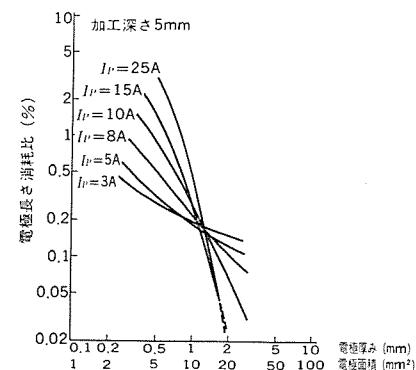
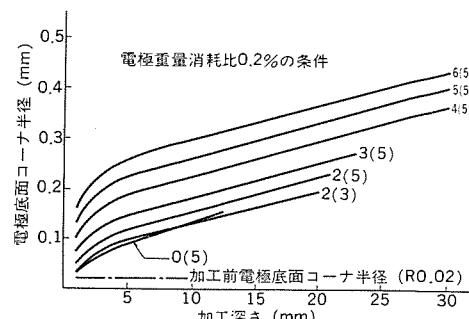


図 10. 電極コーナ消耗、長さ消耗特性

る。あまりにも小さい加工条件から開始する必要がある場合には、電極を2本以上用意し、もっと荒い条件から開始した方が加工時間も大きく短縮できる。

### 3.4 電極幅別長さ消耗

一般に電極の長さ消耗は重量消耗より小さいことが知られているが、これは電極の加工面積が十分に大きな場合であり、例えばスリット加工のように1mm以下の幅の電極を用いる場合は、長さ消耗が重量消耗よりも大きくなる。これは、3.3節で述べたコーナ消耗と関係が深く、電極の幅が小さいと加工面の両側のコーナ消耗が互いに干渉して長さ消耗が大きくなると考えられる。重量消耗が0.2%，加工深さが5mmの場合の幅別長さ消耗のグラフを図10に示す。これにより、電極の一部に0.5mmのリフがある電極を用いて加工する場合、 $I_P$ が8Aでは0.5%の長さ消耗があり、3Aでは0.28%の長さ消耗があることから、電極1本で加工しようすれば $I_P$ が3A以下で加工する必要があることがわかる。ところが加工速度は、 $I_P$ が8Aで加工すれば $I_P$ が3Aの場合の約10倍となるので、実際的には電極を2本用いて加工した方が加工時間は大幅に短縮できる。

以上のように無噴流加工条件は、単に電極の大きさと加工深さに関する最適化だけでなく、電極の形状による制限もあわせて構成してあるので、今後増加する傾向にある微細加工への対応も可能となっている。

## 4. 最近のNC型彫り放電加工機の応用例

前章までに述べたように、最新のNC型彫り放電加工機では、電源性能の向上や、NC型彫り放電加工機に適した加工データの整備により、オペレータの経験や技能に頼ることなく、その機械の持つ性能を十分発揮できるようになり、実用性能面で飛躍的な向上を果たしている。一方、NC型彫り放電加工機の持つ機能を使いこなす技術も進歩しており、上記の性能向上と相まって、従来の放電加工機

では困難であったようなことも、実用化されつつある。更に、NC型彫り放電加工機を使用することにより、電極製作から後工程までをも含めた放電加工プロセスを大幅に改善することもできる。

この章では、そのような最新のNC型彫り放電加工機の応用例を紹介したい。

### 4.1 電極製作工程を簡略化した応用例

NC型彫り放電加工機を使用することにより、電極製作を簡略化することができる場合は、大きく分けて以下の四つに分類される。

(1) 電極消耗を減少させることによる電極製作本数、種類を削減する。

(2) 加工形状を多数の部分に分割し、製作の容易な形状の電極にする。

(3) 単純な形状の電極を使用し、NC機能により加工形状を創成する。

(4) 電極の製作又は修整を放電加工機上で行う。

ここで、(1)の場合は、電源自体の改良による超低消耗加工が可能になったことと、振動加工法の確立に負うところが大きく、特に多数個取りの場合には、電極本数を従来の1/3から1/4にすることも可能になる。

また、(2)の場合は、特に小物の加工で放電加工時間をあまり必要としない場合、少しでも長時間連続して放電加工機を自動で運転するために、できるだけ電極を一体化する試みがなされてきたが、そのため電極製作に要する時間は、長くなる傾向にあった。これを解決する例としては、図11に示すように、電極をできるだけ製作しやすい形状に分割し、電極自動交換装置(ATC)を活用することにより、連続自動運転を可能にしたものがいる。この例は、コンセントプラグモールド型のコアで、鏡面加工(0.8μm R max)を実施することにより、後工程の磨き作業をも省くことができたものである。(3)の場合は、最もNC型彫り放電加工機の特長を示す加工で、従来のNC化されていない型彫り放電加工機では、不可能であった加

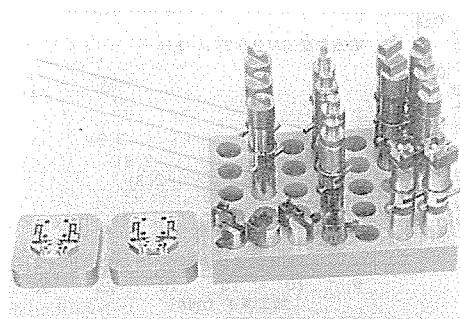


図11. コンセントプラグモールド金型コアの加工例

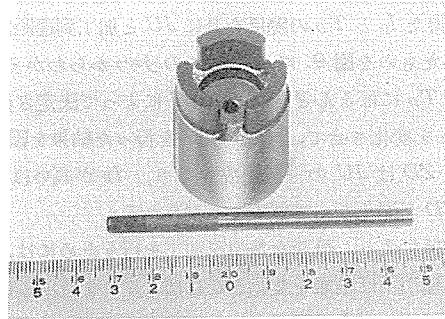


図12. 棒電極による輪郭加工例

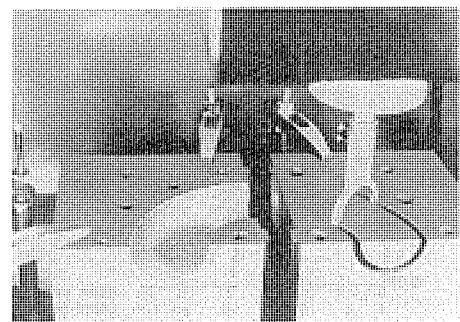


図13. 創成電極によるパイプベンド金型の加工例

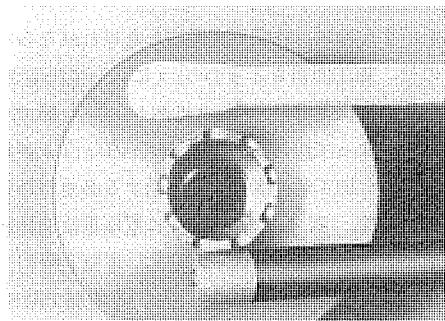


図14. ミニチュアベアリングリテーNA金型の加工例

工である。

図 12. は座付きパンチの加工例で、単棒電極により輪郭加工を行った例であり、加工時間は 3.3 時間で  $5 \mu\text{m}$  R max に仕上げている。このとき、電極を回転させて電極消耗の影響を全周均一になるようにしており、特に最初の荒加工の条件は、消耗を極力抑えた条件を使用する必要がある。この加工は、従来ワイヤ放電加工機などにより電極を製作し、次に型彫り放電加工機の主軸側にワークを取り付けて加工をしていたが、電極製作時間、段取り変えなどのことを考慮すると、単棒で加工した方が有利になることが多い。

図 13. は、パイプを曲げるための型の加工例で、リング状の電極を、XY の動きと C 軸の動きを同期させることにより、ワークをくり抜くように加工したものである。これは、特に荒加工時間を短縮するのに効果があり、写真の例では、両側で 30 kg 前後の取り量を約 10 時間に加工でき、断面積の大きなものほど効果が大きい。また、くり抜いた中の抜けかすが落ちるとき以外は、自動で加工が可能である。(4)の場合は、加工に使用する電極とは別のマスタ電極を放電加工機上に設置し、第 1 段階として、加工用電極をマスタ電極により放電加工する工程と、それにより製作された電極により、ワークを加工する工程とからなる。

この加工例としては、最近用途が拡大している微細穴加工がある。例えば、 $\phi 0.08$  の微細穴を開けるときには、電極として  $\phi 0.05$  程度のものを使用するが、放電加工機外で製作した電極では、機械の主軸の送りに対し、電極を真直ぐセットすることが難しく、特に板厚が 1.0 mm 程度もあると真円の加工をすることが極めて困難である。そこで写真に示す例では、電極として  $\phi 1.0$  mm の銀タングステンの素材を使用し、2,000 rpm で回転させながら逆放電により細くなるように加工したもので、 $\phi 0.05$  mm 長さ 6 mm の電極を 8 分間で製作している。

図 14. は、ミニチュアベアリングのリテナの型で、各半球形状の寸法公差が非常に厳しいため、電極の消耗の影響を極力抑える必要があり、1 穴加工するごとに、電極の形状を逆放電により修整して加工している。このときの修整用電極の形状は、半円状の溝を掘ったものを使用し、写真の電極を回転させながら溝に沿って送ることにより、電極の消耗分を修整するものである。

#### 4.2 C 軸を利用した加工例

NC 型彫り放電加工機では、XYZ 軸に C 軸を付加することにより、一層型彫り放電加工機の応用範囲を広げることができる。図 15. は、刻印ロールの模様を転写加工した例で、電鋳法により製作した模様電極を X 軸に平行に取り付け、ロールの素材を C 軸装置にセットし、X 軸と C 軸を同期させて加工したものである。ここで加工軸のサーボ方向は、Y 軸に沿った方向に取ることにより効率の良い加工が可能となる。

同様な加工として、紙などを切断するロールカッタの加工も可能である。このような加工では、NC 型彫り放電加工機を使用することにより、従来用いられていたような特殊な治具や装置を使用する必要がなく、非常に簡単になる。また、図 16. の例は、ホブカッタの加工例で、ワイヤ放電加工機で製作した電極をテーブル上に取り付け、ワークを C 軸に取り付けて加工したもので、XYZC の 4 軸を同時制御することにより、カッタの逃げ部分の加工も実施している。

NC 型彫り放電加工機に C 軸を付加することにより、超硬ドリルの溝加工、インターナルヘリカルギヤの加工など、従来困難であった加工も

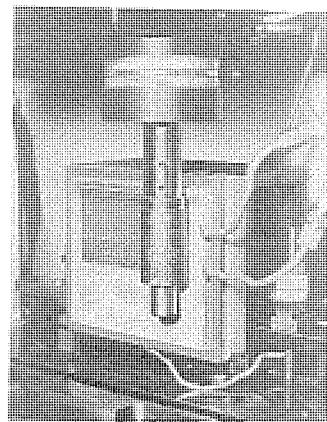


図 15. 刻印ロールの加工例

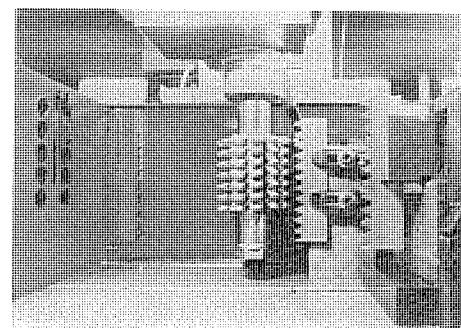


図 16. ホブカッタの加工例

容易に加工できるようになってきている。

#### 4.3 その他の応用例

そのほかにも NC 型彫り放電加工機の応用範囲は、従来に比べ非常に広がっているが、特殊な例として型合せに使用した例がある。これは、比較的厚板の絞り型などでは、コアを機械加工により仕上げるとともに、キャビティは荒取りのみを行っておき、コアにより直接キャビティを加工するもので、上下の型のクリアランスが重要なものである。このため、上型と下型を相対的に半球状に動かすことで、全方向にわたり均一なクリアランスを確保することができる。

### 5. む す び

本稿では、最新の NC 型彫り放電加工機における基本的な加工特性と、その応用のための加工技術について述べた。特に超低消耗加工は、型彫り放電加工機の加工精度の向上、トータル加工時間の短縮をもたらす革新的な技術であり、今後更に高度化する自動化機能と相まって、ますます応用範囲が拡大するものと確信している。

(原稿受付 昭 62-4-1)

### 参 考 文 献

- (1) 斎藤、小林：放電加工の加工原理と加工特性、三菱電機技報、41, No. 10 (昭 42)
- (2) 小林、大泉：電流波形制御（特殊電流波形）による加工特性、電気加工学会誌、8, No. 16 (1975)
- (3) 真柄ほか：放電加工機の加工誤差と高精度化、電気加工学会シンポジウム (1986)
- (4) 高鷲ほか：微少エネルギーによる放電加工の研究、電気加工技術、5, No. 13 (1982)

## 型彫り放電加工用電極の1チャック多面加工技術

## 1. まえがき

電子メカトロ製品の伸展に伴い、これら製品を形成する部品の中で、モールド成形品（熱可塑性樹脂）の採用が増加し、更に、部品の複合化、高精度化への傾向が大きくなってきた。したがって、これら成形品を生産する金型も高精度なものが要求され、金型部品の精度向上が必ず（須）となっている。この金型部品単体の精度向上を行う上で重要な要因の一つに、放電加工工程があり、その工程が所定形状の彫り込みや島残し加工形状を型金に形成する上で必要不可欠な工程となる。このときに用いる電極の精度も同様に加工上の重要な要素である。

本稿では、この型彫り放電加工時に用いられる電極の加工法について、多面体として構成されている電極形状と、放電加工機に用いられている電極のクランプ方式に着目し、従来の汎用フライス盤による技能依存型で、かつ、多工程加工とは異なった方式を採用し、導入した。すなわち、高精度マシニングセンターとNCチルトテーブルの結合とクランプ方式の改良による1チャック多面加工法、及びCAMシステムによる加工の標準化とマクロ化、更に多面加工NCデータ合成のためのユーザー応用ソフトウェアの開発を行った。これらにより、電極加工の生産性向上と高精度加工、加工データの品質向上を実現した事例について紹介する。

## 2. 電極加工の推移と方式

当社における製品（例えば、電磁開閉器、シーケンサ、インバータ、NC装置）に適用される金型の製作工程で、放電加工時に用いられる電極は、図1に示されるように製品形状と抜きこう配のため斜面が

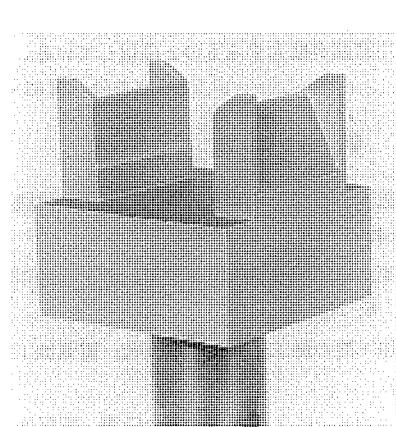


図1. 多面で形成されている放電加工用電極例

表1. 電極のフライス加工作業分析

区分	作業内容	従来方法(h) (汎用フライス (盤での加工))	新方法(h) (マシニングセン (ターボでの加工))
準備作業	1. 図面・素材の準備	0.020	0.020
	2. 読図・段取りの構想	0.100	0.090
	3. 取付具・工具の準備	0.070	0.005
	4. 清掃	0.005	0.005
	5. その他（伝票記入ほか）	0.040	0.040
加工	6. ワーク取付け・取り外し	0.106	0.033
	7. マーキング	0.040	
	8. 心出し・ワーク傾斜	0.380	0.050
	9. 工具交換	0.250	<0.750>
	10. 切削	0.484	
	11. 清掃	0.060	
	12. 寸法測定	0.134	0.190
	13. 図面寸法確認	0.105	
	合計	1.794	0.433

注（1） 時間値は、電極1本当たりの平均時間（作業者による作業時間）を示す。

（2） < > 内は、機械の自動運転時間を示す。

多く、多面体の構成になっている。

従来は、この電極加工においてフライス加工が、全加工工数（平均2.0h/本）上約90%を占めていた。この作業は表1に例を示すように、実切削のほかに、マーキング、角度の割出し（傾斜）や心出し、また加工平面が何度も変わるために複数回の取付け・取り外し作業を伴う。これらの段取り時間は、フライス加工工数中43%を占めている。また、斜面加工は、マーキングラインを基準に行われ加工後の形状チェックも作業現場では難しく、高精度に保つことが困難であった。

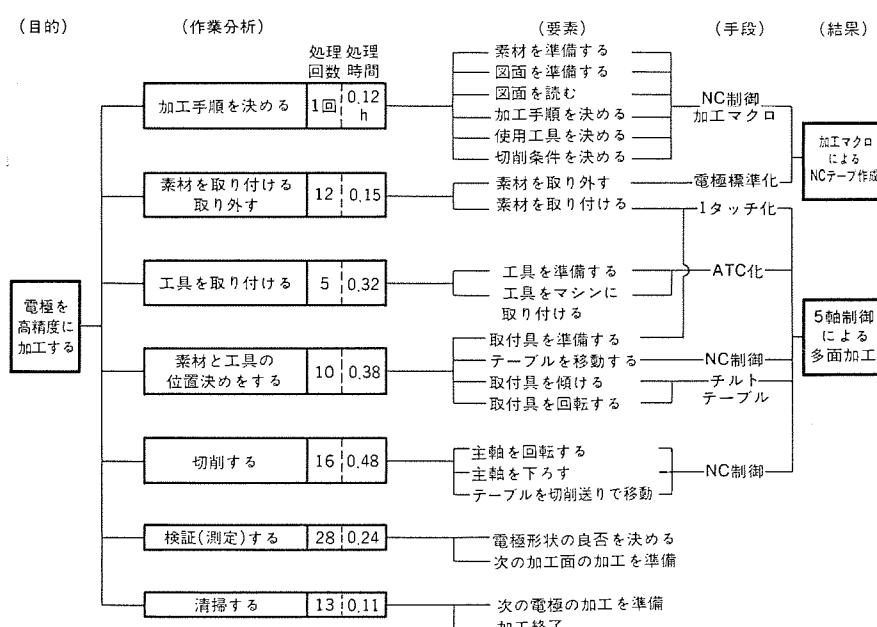


図2. 電極加工のための機能分析と展開

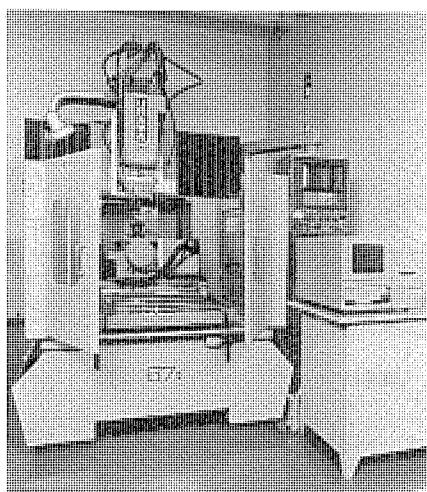


図 3. 5 軸加工用立型 マシニングセンター 全景

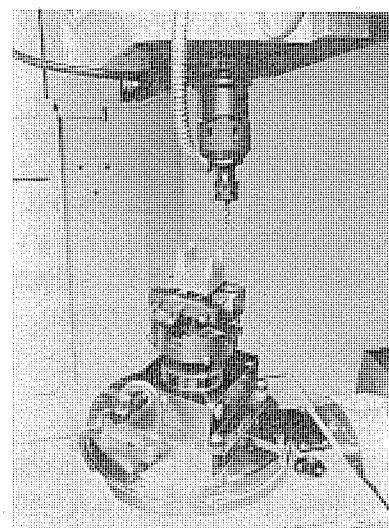


図 5. 多面加工事例

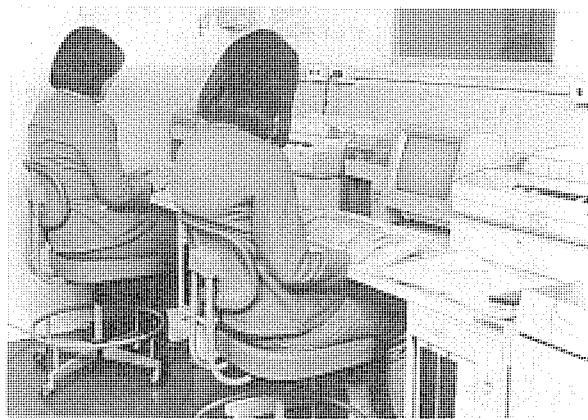


図 4. 《MELCAD-MS 1》システム

更に、作業に熟練を要し生産性も低かった。

このため、高精度で電極を安定して加工するための手順を分析し、これを実現するのに必要な機能と方式を検討した。その結果、図 2. に示すように、

- (1) NC コントローラによる 5 軸制御の多面加工
  - (2) 加工パターンのマクロ化による NC データの自動生成
- という二つの方式を導き出した。

これらの方式は、

- (1) 高精度マシニングセンター（図 3.）と NC チルトテーブルの組合せ
  - (2) CAM システム《MELCAD-MS 1》（図 4.）の導入と現場作業の標準化及び応用システムの開発
- により実現した。

### 3. 高精度加工と 1 チャック多面加工

電極の加工精度は、寸法公差で  $\pm 0.005 \sim \pm 0.010 \text{ mm}$  程度を要求されており、この精度を達成させるために、①機械、②治具・取付具、③ワークの加工時におけるバランスをいかにうまく保って加工するかが、大きなポイントである。特に、今回のような場合、ワーク素材が  $\phi 20 \text{ mm}$  の共通 シャンクにろう付けされていて クランプ部分が共通であるが、ワークが クランプ支点より オーバーハングした形になるため、加工上不利な条件となって びびり振動などの不安定要因の発生しやすい形態となる（図 5.）。

### 3.1 機械精度

加工精度を決定する主たる要因は、加工を行う工作機械にある。今回導入した 5 軸制御立型 マシニングセンター は、次の特徴を持っている。

位置決め精度：X, Y, Z 軸  $\pm 0.0015 \text{ mm} / 1,000 \text{ mm}$   
割出し精度：B 軸  $\pm 3 \text{ s}$ , C 軸  $\pm 7 \text{ s}$

#### 3.1.1 機械構造

- (1) 機械本体の構造が門形であり、主軸 オーバーハング が少ない。
- (2) テーブル構造も オーバーハング がなく、センタードライブ である。
- (3) 主要構造物は、十分な時間をかけた シーズニング（自然からし）がされている（内部応力除去）。

したがって、本体剛性が高く、加工位置による精度のばらつきもほとんどなく、熱バランスも良い。また、時系列的にみても大きく精度がくずれる要素はない。

#### 3.1.2 制御

- (1) コントローラは、当社製数値制御装置《MELDAS-M 60》を用いている。
- (2) 直交 3 軸全軸に光学スケールを取り付けた クローズドループ完全フィードバック 制御を採用した。

#### 3.1.3 NC チルトテーブル

- (1) ハイード 特殊 ウォームギヤの採用で、バックラッシュが少ない（バックラッシュ  $0.005 \text{ mm}$  程度）。
- (2) 傾斜軸（B 軸）にロータリ 磁気スケールをはり付け、クローズドループ完全フィードバック 制御を採用した。

#### 3.2 ワークとクランプ方法

前にも述べたが、電極加工は、ワークとしての電極材（純銅）そのものを クランプ するのではなく、電極材をろう付けした鋼製の シャンク を クランプ して行う。これは、この加工された電極がそのまま放電加工に用いられるためである。この クランプ 部分の寸法は、直径が 20 mm で共通なため、市販されている放電加工機用電極 シャンク の エアハイドロスタティック 式 クランプ 装置を、一部 クランプ 壓を高め、改造をして（クランプ力 1,000 kg）適用した。しかし、エンドミル加工時、びびりが発生し所定の精度が得られなかった。このため、図 6. (a) のような 3 点ねじ締め式のびびり止め治具を付加したが、各ねじの求心精度が悪く、シャンクが  $0.01 \sim 0.02 \text{ mm}$  たわみ、繰り返し精度も悪く心出しがうまくできなかった。しかし、びびり抑制には、有効

であったため、同図(b)のようなVブロック式のびびり止めを考案し適用した。これにより、加工上も心出し上でも安定した精度を得ることができた。

このクランプ方法は、機械動作から考えて1チャックによる多面加工を実現させるため、できる限りツールと治具との干渉をなくすように小型化しシンプルなもので、かつ、加工上ある程度の切削力(例、エンドミルによる1回当たりの切込みで2~3mm)に耐え得るような構造である必要性から、現場のノウハウも生かして考案し、実現したものである。

#### 4. NC プログラミングシステム

金型部品のような個別生産品に対して、NC加工プログラムを作成する手段は、設計情報を基にしたCAD/CAMシステムが最も有効であるが、設計面でのCADの普及、拡大と、多面加工用加工プログラムの出力(5軸対応)に短期的な対応ができない、また市販のCAD/CAMシステムもこれに対応したものもなかったため、ベース機器として、当社製CAMシステム《MELCAD-MS1》を採用した。《MELCAD-MS1》を採用した理由は、ユーザー独自のノウハウをマクロという形でファイル化し登録でき、更に入出力の対話機能も備わっていることから、ユーザーが自由にマクロを組み合わせられ、処理の簡便さを図れるためであり、かつ、ポストプロセッサもパラメトリックになっており、NCデータの出力パターンを、ある程度自由に変更できる機能も持っているからである。更に、OS(Operating System)が当社製パソコン《MULTI 16》と同じCP/M-86であり、ユーザーの応用プログラムもCP/M-86で開発されたものであれば、《MELCAD-MS1》上でロードモジュール化すれば実行可能であるため、ファイルの共用化が図れる便利さもあった。

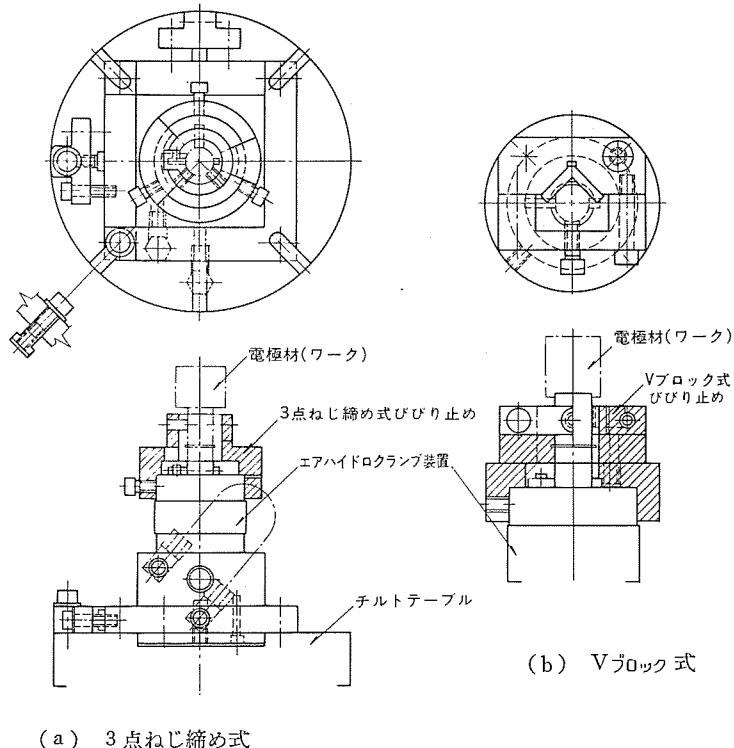
##### 4.1 システムの機能と構想

NCプログラム生成のためのシステム化に具備されるべき機能として次の2項を設定した。

- (1) ワーク(電極素材)を所定の角度に傾斜させて、面の加工(2次元加工)、又は立体の加工(2 $\frac{1}{2}$ 次元加工)を行うプログラムを生成できること。
- (2) NCプログラム作成時間は、一般的CAD/CAMシステムと同等か、それ以下であること。特に、入力が簡単であること。

以上の機能を実現させるシステムとしての構想を次に示す。

- (1) パラメトリック処理は、加工パターンをパラメトリック化して登録しておき(マクロ化)、対話でマクロを呼び出しパラメータに必要な数値などを入力して使用する。また、マクロ同志のネスティングが可能であることから、各々のマクロの組合せが可能であり、これにより多形状の加工パターンに対応してNCプログラムを生成する。
- (2) 第三角法で書かれた図面から、NCプログラムを生成する(3次元データの入力は極力避ける)。
- (3) 第三角法で書かれた図面から、簡単に得られる数値を基に、チルトテーブルの回転情報を入力する。



(a) 3点ねじ締め式

図 6. ワーククランプ装置とびびり止め方式

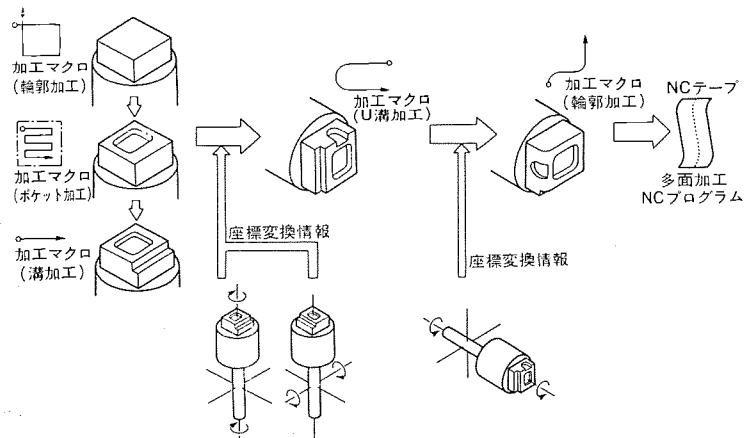
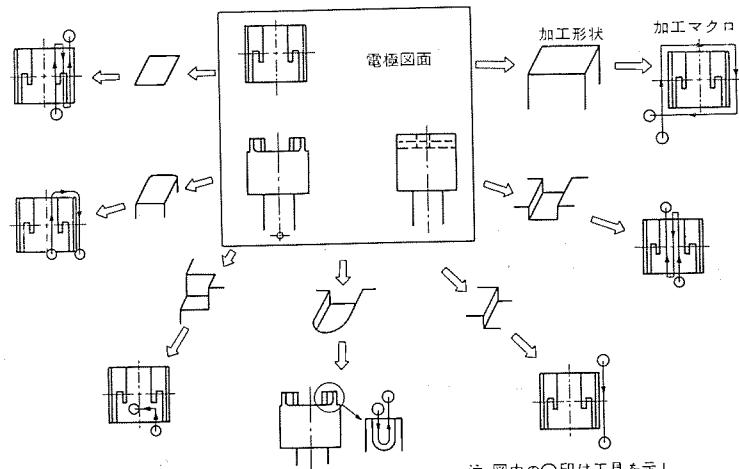
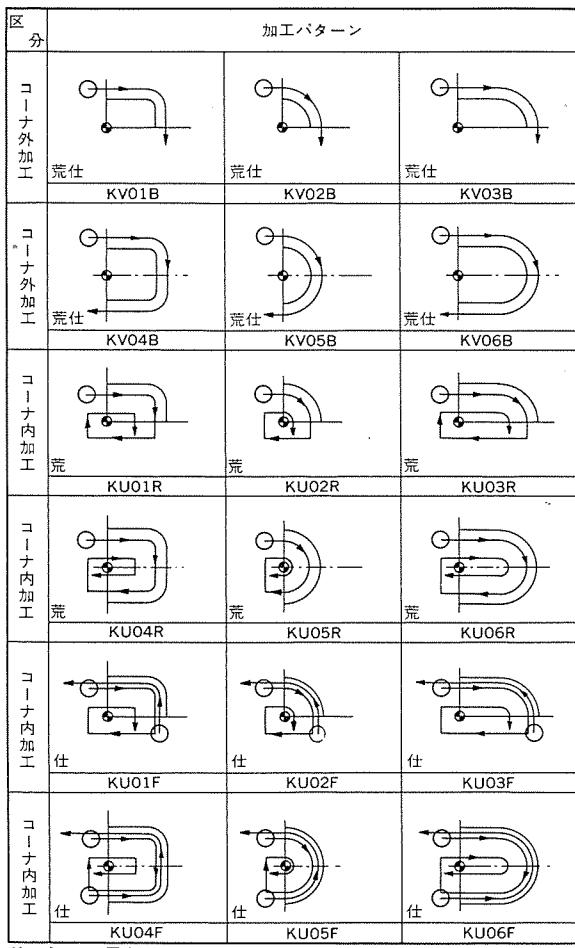


図 7. NC プログラム生成の概念



注 図中の○印は工具を示し、加工の始点と終点を示す。

図 8. 電極形状の加工マクロへの展開



注 パターン図中、

—加工マクロ名を示す。  
—荒加工、仕上加工の用途を示す。  
—工具径を示し、スタートポイントを示す。

図 9. 加工マクロ例

(4) チルトテーブルの傾斜、回転に伴う、座標系の設定と座標変換は、自動的に処理する。

システムの概念を図 7. に示す。加工手順ごとに、マクロを各々セットし、更に、ワークの傾斜・回転情報を挿入する。これらの操作で NC プログラムが生成されていくことを示している。

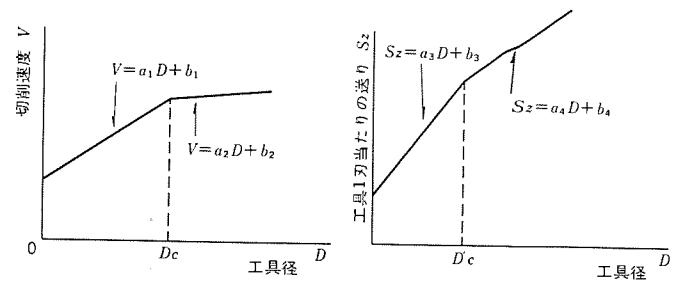
#### 4.2 マクロシステム

次に、我々が開発したマクロシステムの詳細を述べる。

##### 4.2.1 加工マクロ

一般に、加工対象となる立体は、2次元及び $2\frac{1}{2}$ 次元の加工パターンで近似して構成できる。特に必要な場合のみ3次元自由曲面の形成を行なうが、今回はその必要がないため、2次元又は $2\frac{1}{2}$ 次元の加工パターンで十分である。図 8. に電極図から各加工パターンに展開した例を示す。図に示したように電極の形状は、幾つかの工具の移動軌跡の集合体で形成されていく。これが、加工マクロである。

過去に設計された電極 250 種類の図面から抽出した加工マクロの一部を図 9. に示す。このマクロの抽出に当たっては、種類を最少にするため最も単純な軌跡が得られるまで形状展開を行なった。この結果マクロ総数として、38種にまとめることができた。また、同一形状の加工でも荒加工と仕上加工とでは、工具軌跡が異なるので二つの加工マクロとして抽出し、荒加工と仕上加工を明確に分離し、用



注 図中  $D_c$ ,  $D'_c$  は、2直線によって決まる変曲点を示す。

図 10. 切削条件と工具径の関係

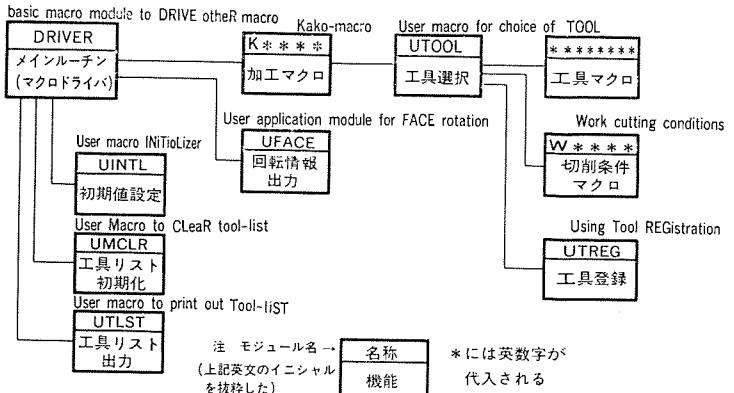


図 11. マクロシステムの構成図

途を明らかにした。

##### 4.2.2 切削条件マクロ

ワークの材質、切削工具、切削方法が決まれば、切削条件としての、切削速度  $V$  m/min と 1 刃当たりの送り  $S_2$  mm/刃が決定できる。《MELCAD-MS 1》では、ユーザー・マクロの機能を利用して切削条件の自動決定を行うマクロを作成し登録した。

この方法は、工具径に対する切削速度又は送りの関係を 2 直線で近似する方法であり(図 10.), 各直線の係数をワーク材質、工具種類などの条件の組合せに応じて登録しておくことにより、所定のパターンを呼び出しパラメータに値を代入することで(又はデフォルト値としておく)切削速度、又は送りが自動決定される。更に、切込み量も荒加工については自動決定を行なっている。

##### 4.2.3 マクロシステムの構成

前述した加工マクロ、切削条件マクロを使って NC プログラムを生成するシステムのプログラム構成を図 11. に示す。次に、各々の機能を説明する。

###### (1) DRIVER

システムのメインルーチンである。最初 “UINTL”, “UMCLR” を呼び出す。次に、オペレータの指示により “UFACE”, “K\*\*\*” のいずれかを呼び出す。必要な数だけこれを繰り返し行う。

###### (2) UINTL

NC プログラムに output するコメントや加工ワークの材質、寸法などの内容、若しくは値を入力し設定する。

###### (3) UMCLR

使用される工具の名称などを登録する配列のイニシャライズと、機械の工具マガジンに常時セットされている工具の名称などを配列に設定する。

###### (4) UTLST

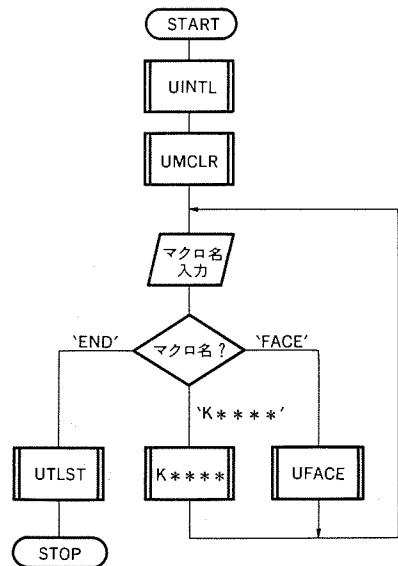
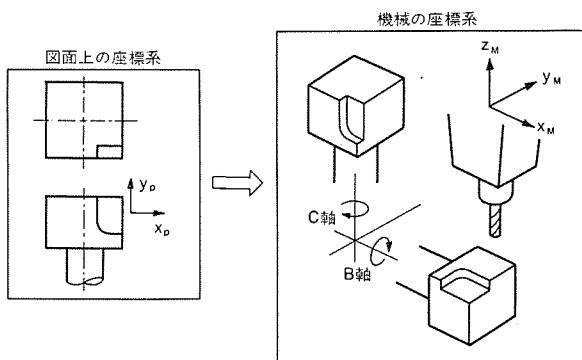
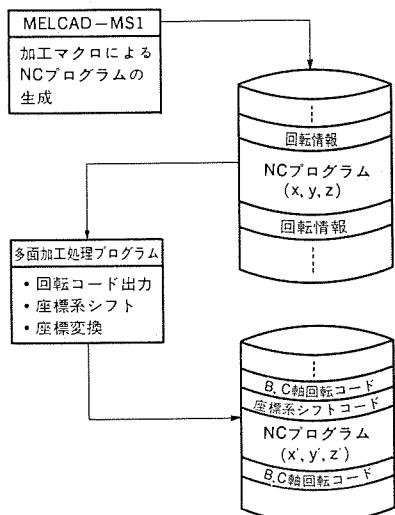


図 12. マクロシステムのフロー



(a) チルトテーブルの回転に伴う座標系の変換



(b) 多面加工 NC プログラム作成 システム

図 13. 多面加工における座標変換の概念

加工に使用される工具のリストをプリントアウトする。

#### (5) UFACE

ワークを加工する面の傾斜角と、加工基準点を決定するための情報を NC プログラムの中に出力する。

#### (6) K\*\*\*\*(\* \*\*\*\*には 4 文字の英数字が代入される)

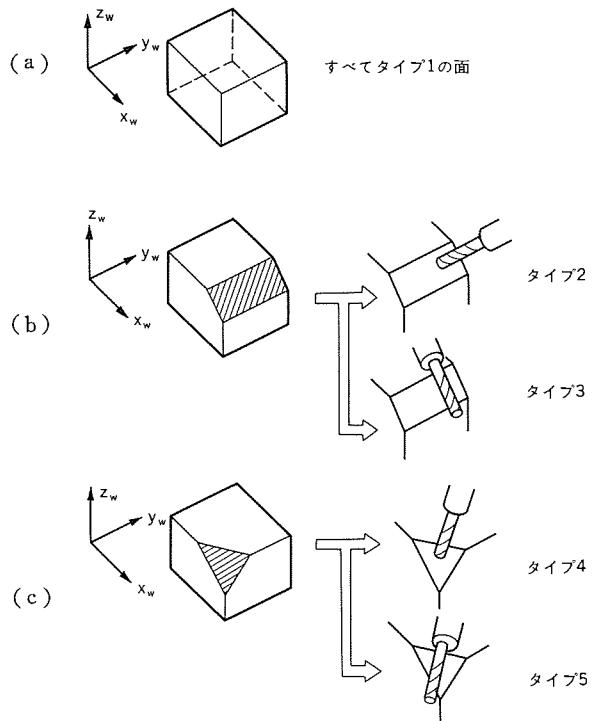


図 14. 面の分類

加工マクロの総称である。工具軌跡が、パラメトリックに登録されている。対話にてこのパラメータに値を入力することで実際の工具軌跡を生成する。また、"UTOOL"を呼び出す。

#### (7) UTOOL

工具コードを入力し、工具リストに登録し、その工具コードに対応した工具マクロを呼び出す。その後、加工条件マクロを呼び出す。

#### (8) \*\*\*\*\*(先頭が、D, K, U, W 以外の英字で始まる 8 文字の英数字の組合せ)

工具マクロ、工具コードと等価であり、工具種類、形状、材質、直径、などを表す値を決められたフォーマットで代入する。原則として 1 工具 = 1 マクロである。

#### (9) UTREG

工具リストに新しく指示された工具を登録する。このとき、それが常駐工具かどうか判定をする。

#### (10) W\*\*\*\*(\* \*\*\*\*には 4 文字の英数字が代入される)

工具の種類、寸法、ワーク材質、加工方法から切削条件を決定する。

(1)～(10)のマクロモジュールのシステムフローは、図 12. に示すようになる。これらのモジュールは、《MELCAD-MS 1》のパートプログラム言語で記述されており、1 ステップごとに処理される。

#### 4.3 NC プログラム生成システム

《MELCAD-MS 1》で生成される NC プログラムは、図面上の座標系により作成されているため、この状態ではワークを実切削することができない。多面加工としての NC プログラムにするためには、チルトテーブルの傾斜、回転に伴う座標系のシフトと、傾斜・回転コードの出力処理を行う必要がある。

この処理を含めた全体のシステム概要を図 13. (b) に示す。マクロの組合せで作られた NC プログラムには、チルトテーブルの傾斜、回転情報が挿入されており（特殊なコメント出力）、これがキーワードとなり、多面加工処理プログラムで解析処理されて、チルトテーブルの傾斜・回転

コードと座標系シフトコードが出力される。

#### 4.4 多面加工のための座標変換

##### 4.4.1 面の種類

多面加工とは、ワークに任意の面を設定してその面に対して加工を行うことである（2次元、 $2\frac{1}{2}$ 次元における面の定義）。このシステムでは、面の種類をパターン化し、図面指示の規準を作ることで、NCプログラムが、容易に短時間でチルトテーブルの傾斜・回転情報を作成できるようにした。この面の種類は、現在5種類用意されている。

すなわち、図14.で、ワーク座標系  $x_w-y_w-z_w$  に対して、(1)  $x_w-y_w$ ,  $y_w-z_w$ ,  $Z_w-x_w$  のいずれかの面に平行な面（平行面）。

(2)  $x_w$ ,  $y_w$ ,  $z_w$  のいずれかの軸に平行な面（斜面）。

(3)  $x_w$ ,  $y_w$ ,  $z_w$  のすべての軸に対して、交点を持つ面（斜面）。

と大別する。幾何学的には、これら3種類に分類されるが、面加工時、工具の側刃で加工するか、底刃で加工するのかという加工上の属性を面に与えると、(2)と(3)の面は、更に二つに分類され、面の種類は全部で5種類になる。

##### 4.4.2 座標変換

加工を付加する面のタイプとその幾何情報を与えることにより、ワーク座標系オフセット量とチルトテーブルの傾斜・回転角を求めることができる。これらの角度が決まれば、それから座標変換マトリクスを作ることにより、チルトテーブルの軸回転時のプログラム中心座標のオフセット値を求めることができる（ローカル座標の設定）。

#### 4.5 多面加工プロセスのシミュレーション

多面加工のNCプログラムチェック用に開発したシステムである。例を図15.に示す。このシミュレータは、多面加工独特のワークを傾けた状態と、そのときの工具刃先の動きをCRT上に描いていくものである。ワークの素材形状と治具をモデル化して表示し、その上に工具軌跡を重ねて表示するが、更に工具と治具の干渉チェック機能も開発中である。図15.に示す加工プロセスは、(a)がワークの上面から工具がアプローチして荒加工を行っているところで、(b)はワークを傾けて斜面の荒加工を行っている。(c)は上面の仕上加工、(d)は斜面の仕上加工を行っている。図中の\*印は、NCプログラムのワーク座標原点を示す。

### 5. 効 果

今回導入したシステムを、従来の汎用フライス盤による電極加工と比較すると下記のような効果があった。

#### (1) 加工工数の低減（表1.参照）

電極加工に要する時間は、従来 1.79 h/本かかっていたが、このシステムを利用することで、NCプログラム作成に 0.75 h/本、機械オペレーションで 0.43 h/本、合計 1.18 h/本となり、0.61 h/本の低減となった（低減比 34%）。

#### (2) 加工精度向上

電極加工の寸法精度が、従来  $\pm 0.01$  mm であったが、今回は  $\pm 0.005$  mm に向上した。また、斜面加工は、従来のマーキングライン基

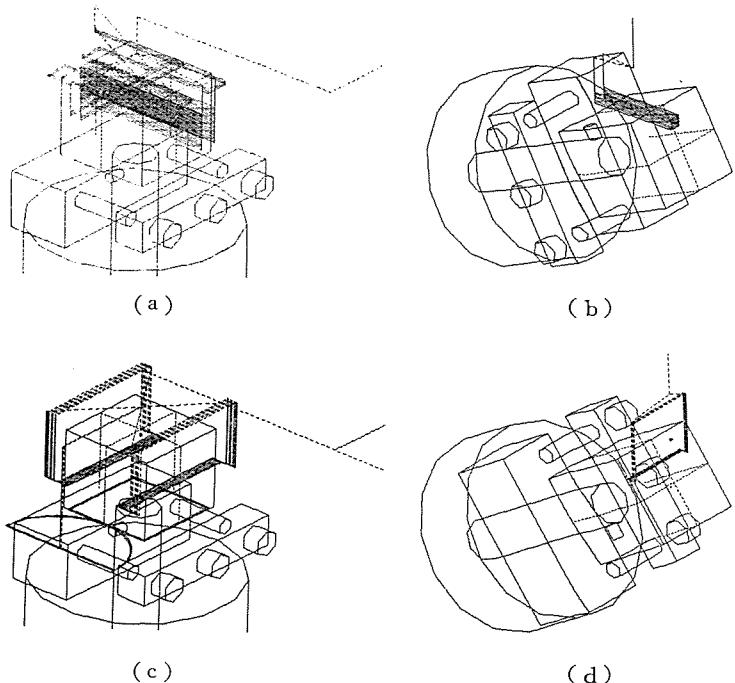


図 15. 多面加工のシミュレーション

準から、機械による自動割出しにより 45 度の斜面 30 mm 長で、従来は  $\pm 5$  min 程度であったが、これを今回  $\pm 11$  s にまで向上できた。

#### (3) 形状修正作業の軽減

コナRなどの汎用フライス盤では加工できない形状が加工可能になった。また、ワークを傾斜させる角度の算出が困難な形状（例えば、図14.でタイプ4の面）の加工が可能となったことにより、フライス加工後の仕上修正作業が、ほとんどなくなった。

### 6. 今後の課題

4章にも述べたように、このシステムの今後の課題は次の点である。

#### (1) CAD/CAMシステムを利用したNCプログラムの生成

設計で作られた図形データを基に、より短時間でより正確な品質の良いNCプログラムを生成すること。

#### (2) ワークの自動交換とDNC(Distributed Numerical Control)

無人運転拡大とOMMM(One man many machines)化拡大を図るため、ワークの自動交換機能を付加し、更にDNC化とスケジュール機能を導入し機械加工のインテリジェント化と、金型工場のFA化への展開である。

### 7. む す び

今後の展開として機械加工におけるインテリジェント化を図るために、各設備に自己診断と自動計測などセルフチェック、セルフプロテクト機能を装備、向上させ、無人化を指向する。

更に、これから金型工場のFA化への展開を図るために、各々の加工設備を有機的に結合させ、生産管理の充実とともに統合化されたタイムリーな対応のできるショットの構築を図っていく。

## 炭酸ガスレーザ発振器

菱井正夫\*  
佐藤清\*  
大谷昭博\*

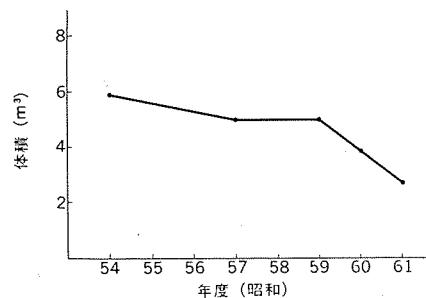
## 1. まえがき

炭酸ガスレーザ加工機の心臓部である炭酸ガスレーザは、1964年にパテル(Patel)により発明され、以来今日まで、産業用レーザとして継続的に技術開発が進められている。炭酸ガスレーザは高出力・高効率・集光性の高いビームで特徴づけられ、熱加工用途としてのレーザ加工に最適なレーザ発振器である。

昨今の本格的な多品種少量生産時代を迎え、フレキシビリティの高いレーザ加工機の需要がますます拡大しつつある。それに伴って、レーザ発振器の高性能化・高信頼化・小型化・低価格化が急速に進展しつつある。本稿では、当社レーザ発振器の最近の進歩を中心として、レーザ発振器の動向、レーザ加工に必要なレーザ発振器性能の概要について述べる。

## 2. 発振器の動向

CO<sub>2</sub>レーザ発振器は、性能、品質の向上、価格の低下などにより、0.5~5 kWクラスの実用機が生産ラインへ積極的に使用されてきている。製品のライフサイクルとしては、導入期を終え成長期に入ったということができる。当社のCO<sub>2</sub>レーザ発振器は、昭和42年に研究を着手し既に20年、昭和52年に製品の1号機としてML2000(マルチモード、2 kW)を完成して10年を経過している。

図1. 1 kW級CO<sub>2</sub>レーザの大きさ(電源・冷却ユニットを含む)

以下に発振器の動向を、放電方式、コンパクト化について考察する。

## 2.1 放電方式

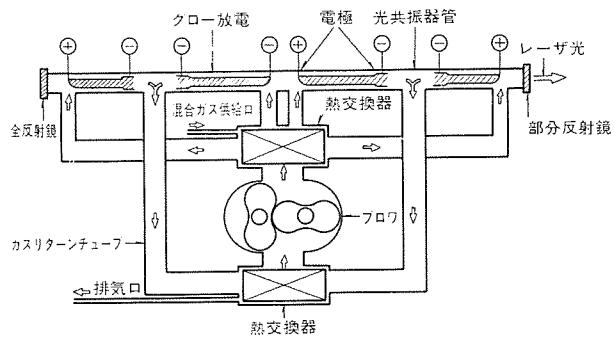
現在、一般的に直流放電方式が採用されているが、パルス化などの出力の高速制御が困難である。また、多くのバラスト抵抗が必要、かつ金属電極の劣化が生じる、構造が複雑で効率が悪いなどの問題点がある。これらの問題を解決するために、最近レーザ発振器は、直流放電方式から交流の高周波励起への動きが生まれているが、当社では独自で交流の高周波励起によるSD(Silent Discharge)放電方式を開発し、昭和53年から製品に採用している。

直流放電方式の問題を解決したSD放電方式は、従来0.5~2.5 kWクラスまで採用していたが、現在では5 kWクラス以上についても、電源の著しい開発が進み、0.5~10 kWまでのSD放電方式の発振器開発を完了させている。

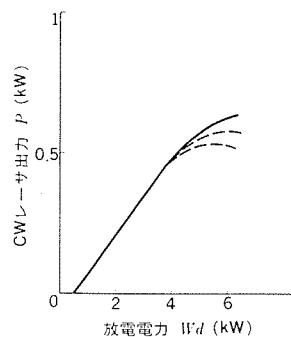
## 2.2 コンパクト化

コンパクト化の目的は、①設置スペースの縮小(加工テーブル、ロボットとの一体化)、②取扱いの容易化、③コスト低減などがあげられる。

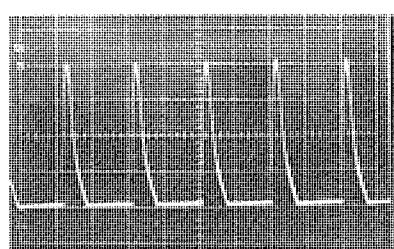
一例として図1.に当社、定格出力1 kW級レーザ発振器(電源、冷却ユニットを含む)の大きさ(体積)の変化を年度別に示す。昭和59年までは、信頼性の向上などに重点がおかれ大きさの変化は少ないが、59年から61年の間に約1/2の大きさになっており、急ピッチにコンパクト化が行われていることが分かる。今後も更に小型・軽量



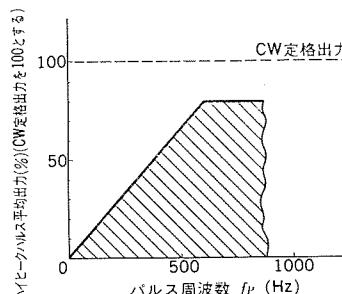
(a) 発振器の構成



(b) 発振出力特性



(c) パルス波形



(d) パルス平均出力制御可能範囲

図2. 高速軸流型レーザ発振器

化が図られ、近い将来には発振器が加工機の工具的存在になるものと考えられる。

### 3. レーザ発振器の特徴とレーザ発振器シリーズ

レーザ発振器の基本的構成は、ガス流、放電とレーザ発振光軸の相対位置関係、放電方式及び共振器の構成の三つで決まる。当社のレーザ発振器は、レーザビームのパルス化など出力の高速制御が要求されるレーザの励起方式として開発された交流(SD)放電方式を採用している。レーザの高速制御を行うためには放電の高速制御が必要であるが、直流(DC)グロー放電では放電の安定性の面から高速制御は困難であり、SD放電方式がパルス出力の制御性に優れている<sup>(1)</sup>。また、SD放電は面放電であり、均一な放電空間を得ることができ、高品質のレーザビームを得ることができる。

#### 3.1 高速軸流型と三軸直交型

レーザ発振器の代表的構成は、図2.(a)に示すようなガス流とレーザ発振光軸と放電方向が同一で、レーザ管内のレーザガスを高速(200m/s程度)で流す高速軸流型と、図3.(a)に示すようなガス流方向とレーザ発振光軸と放電方向が互いに直交した三軸直交型がある。

高速軸流型レーザの特徴は、断面が円形の放電空間から円形ビームを取り出すために発振効率が良く、装置がコンパクトになることがあるが、反面、レーザガス流速が高いので放電部圧損が大きく、ガス流量に制限があるため、放電入力によりガス温度が高温(約200°C)となり、高出力時の発振効率が顕著に低下し、いわゆる発振効率の頭打ち現象が起こる(図2.(b)参照)。この発振出力特性の折れ曲がり方は、ガス温度やプローブ流量変動により変化し、高出力時の出力は不安定となる。レーザ出力パルス発振時のレーザ出力波形(パルス波形)はピーク出力がCW(連続)出力定格以下のノーマルパルスでは、放電入力波形とレーザ出力波形が一致するが、ピーク出力がCW定格を超えるようなハイピークパルスの場合では、パルスのON時間が長くなるとレーザガスに過度の放電電力が投入されてレーザガスの高温化を招き、レーザ発振効率の極度の低下が起こるため、レーザガスが放電部を通過する時間よりも長いパルスON時間( $T_{ON}$ )にすることができない。また、パルス波形は三角状となる(図2.(c))<sup>(2)</sup>。したがって、パルス出力の制御範囲が図2.(d)に示すように限られたものとなる。

三軸直交型レーザは、装置のコンパクト性では高速軸流型に一步譲るもの、容易にガス流量を増大できるため、放電部通過後のガス温度が低く(80~100°C)、図3.(b)に示すような直線状の発振出力特性が得られる。このため、高出力時の出力安定性に優れているとともに、ハイピークパルス時においても投入電力波形に応じたく(矩形)

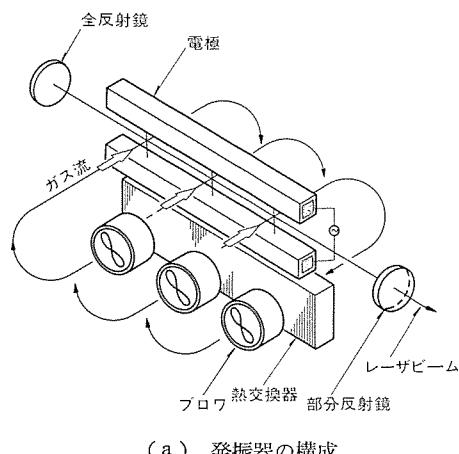
のパルス波形が得られる(図3.(c))<sup>(2)</sup>。したがって、図3.(d)に示すような広範囲にわたる制御範囲が得られる。精密レーザ切断加工では、出力のパルス制御は不可欠であり、パルスピーク出力、パルス周波数、デューティにより加工性能が左右され、その制御性が加工性能上必要不可欠である<sup>(3)</sup>。したがって、精密な入熱制御が必要なレーザ加工用途に対しては、三軸直交型が優れているといえる。

#### 3.2 共振器構成

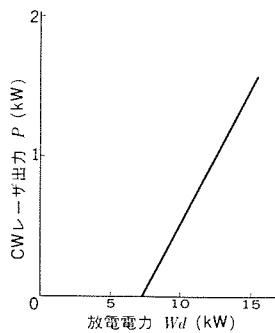
レーザ発振器の共振器構成には、安定型共振器と不安定型共振器の2種類がある。安定型共振器とは、共振器を構成する2枚のミラーが光をある比率で反射(透過)するような部分反射ミラーと、高反射ミラーで構成されており、この2枚のミラーの間に光の定在波を作り、この定在波の一部を部分反射鏡で取り出し、レーザ出力とするものである。安定型共振器における発振ビームモード(発振ビームの空間的強度分布、加工目的に合わせて選定される)は、ミラーの曲率、共振器長、アーチャ(ビーム絞り)径などの共振器構成により決まり、大きく分けてシングルモードとマルチモードと呼ばれるものがある。

シングルモード( $TEM_{00}$ )とは、図4.左に示すようにガウス型の強度分布をもつもので、レンズで集光した際の集光性が最も優れている。しかし、ビーム径を大きくして取り出せないため、ミラー耐光強度により取り出し可能な出力が制限される。アクリルにレーザビームを照射してシングルモードのパターンを焼き付けたものを図5.に示す。

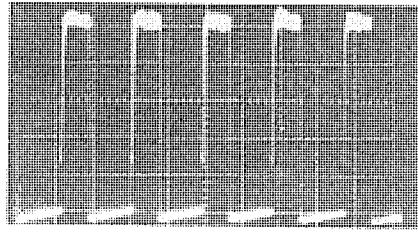
マルチモードは、ビーム強度分布に凹凸をもつもので、凹部の数により $TEM_{mn}$ ( $m$ ,  $n$ はモード次数)と表される。モード次数が大きいほどビーム径は大きくなり、取り出せる出力は大きくなるが、集光性能が低下する(図4.中)。安定型共振器から出射するレーザビームの大



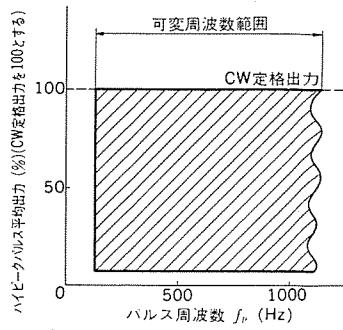
(a) 発振器の構成



(b) 発振出力特性



(c) パルス波形



(d) パルス平均出力制御可能範囲

図3. 三軸直交型レーザ発振器

ビーム プロ ファイル	シングルモード (ガウシャン分布) $TEM_{00}$	マルチモード		アニュラー(リング)モード	
	一例として $TEM_{02}$	一例として $TEM_{25}$	ニヤーフィールド (近視野) $M = \frac{r_1}{r_2}$	ファーフィールド (遠視野)	
共振器構成	TR PR (安定型共振器)	TR PR (安定型共振器)	2r <sub>1</sub> 2r <sub>2</sub>	中心強度は $M$ に依存	
発振器	ML10SP ML15SRP ML25SRP	ML25C ML50C	ML50C ML100R		

図 4. 共振器構成とビームモード

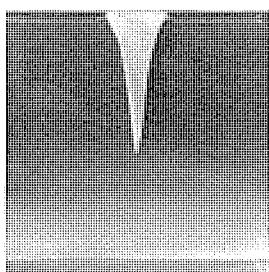


図 5. シングルモード アクリルバンパタン

表 1. 三菱 CO<sub>2</sub> レーザ発振器シリーズ

シリーズ名	機種名	モード	CW 定格出力 (W)	パルスピーク出力 (W)	外観
SP	10 SP	シングル	500	1,000	図 6.
SRP	15 SRP	↑	750	1,500	—
	25 SRP	↑	1,000	2,500	図 7.
C	25 C	シングル	1,500	←	—
		マルチ	2,500	←	—
	50 C	シングル	1,500	←	図 8.
		マルチ	5,000	←	—
		リング	5,000	←	—
R	100 R	リング	10,000	←	—

きな特徴は、モード形状がその伝搬距離によって変化しないことである。

不安定型共振器は一組の凹面及び凸面の全反射ミラーで構成されており、ビーム取り出しが凸面ミラーの近くに配置されたドーナツ状の穴開きミラーで行われるので、取り出されるビームのモードはドーナツ状のリングモードである。不安定型共振器から取り出されるリングモードは図 4. 右に示すように、レーザビームの伝搬距離により変化する。近視野ではリング状であるが、遠視野(集光点)では中心に強度の高いピークを持つモードとなり、焦光性は高い。大出力レーザ、特に 10 kW クラスのレーザ発振器においては、長時間にわたって安定した出力とレーザビーム品質を確保するために、この不安定型共振器が使用される。

三菱レーザ発振器シリーズを表 1. に示す。薄板鋼板切断用として、シングルモード CW 500 W、パルスピーク 1,000 W クラスの SP シリーズ(10SP)(図 6.)、高精度厚板加工用としてシングルモード矩形波ハイピークパルスの SRP シリーズ(15 SRP, 25 SRP)(図 7.)、また溶接、表面処理用

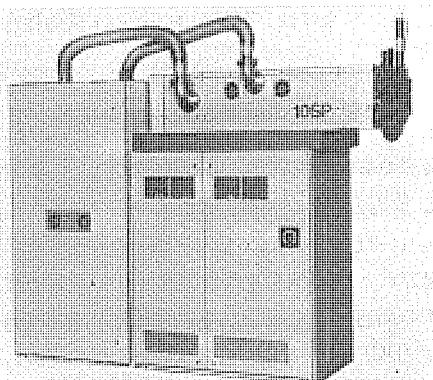


図 6. 三菱レーザ発振器シリーズ ML-10 SP (薄板鋼板切断用)

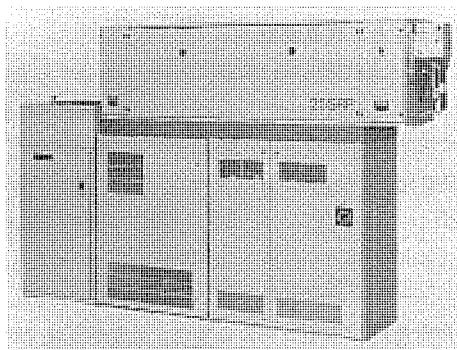


図 7. 三菱レーザ発振器シリーズ ML-25 SRP (高精度厚板加工用)

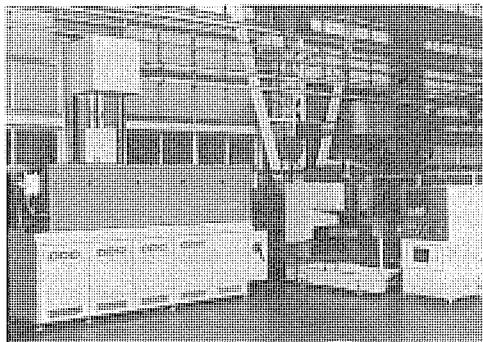


図 8. 三菱レーザ発振器シリーズ ML-50 C (溶接、表面処理用)

として、切断も含めた複合加工可能な、シングル・マルチモード切換装置付きの C シリーズ(25 C, 50 C)(図 8.)、深溶込み溶接用レーザとして R シリーズ(100 R)がある。

#### 4. レーザビーム性能と加工性能

##### 4.1 エネルギー密度と加工性能

レーザ加工は熱加工であるため、レーザ発振器から出たレーザビームをレンズ及び特殊なミラーなどでエネルギー密度を高めた集光性が加工に大きく影響を与える。切断加工、溶接加工は、約  $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$  の高エネルギー密度化するが、表面焼入れや表面改質加工については、被加工物表面を溶融させないため、適正エネルギー密度が切断、溶接加工より小さく  $10^3 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$  とするため、①ビームスキャナ方式、②インテグレーションミラー方式、③カーライドスコープ方式、④ポリゴンミラー方式などの方式が採用されている。

焦点位置でのエネルギー密度は、 $F$  値に影響される。 $F$  値とは、加工レンズの焦点距離  $f$ 、加工レンズ上の入射ビーム径  $D$  とすると、

$$F = f/D$$

で定義される。 $F$  値を小さくする、つまり焦点距離を小さくする、又は入射ビーム径を大きくすることが、焦点面でのスポット径を小さくすることになり、結果としてエネルギー密度を向上することになる。

レーザビームの焦光部のスポット径  $d_0$  (図 9. 参照) は、レンズに入射するビーム径  $D$  ( $1/e^2$  直径) のシングルモードのレーザビームを、焦点距離  $f$  のレンズによって集光すると、

$$d_0 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{f}{D} \cdot \lambda$$

で与えられる。したがって、焦点面でのエネルギー密度  $F$  は、レーザの平均出力を  $P$  とすると、

$$F = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{P}{d_0^2}$$

で表される。

計算例として、 $D=20$  mm,  $P=1,000$  W,  $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ ,  $f=50$  mm とすると、

$$d_0 = \frac{4}{\pi} \times \frac{50}{20} \times 10.6 \times 10^{-3} = 0.034 \text{ mm}$$

$$F = \frac{4}{\pi} \times \frac{1000}{0.034} = 1.1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$$

となる。

#### 4.2 ビームモードと加工性能

ビームモードは、共振器構成 (ミラーの種類、曲率半径、共振器長など) 及び励起空間の制限により決まり、シングルモード ( $\text{TEM}_{00}$ ) が一番低次のモードで、集光性が最も優れたものでビームセンターにエネルギーのピーク値があり、半径が大きくなるにつれてガウス分布状にエネルギーが小さくなる。

$\text{TEM}_{00}$  モードを得るには、共振器内に单一モード以外のすべての高次モードに対して、発振を抑止するのに十分な回折損失を与え、絞りを設けることにより可能となる。しかし、数 kW 以上の大出力をシングルモードを得ることは、共振器ミラーの耐光強度の点からも無理があり、大口径のビームにしてミラーの単位面積当たりの光強度を小さくする必要がある。この場合は安定型共振器のマルチモード、又は不安定型共振器のリングモード (アニュラーモード) となる。

加工性能を向上するためには、加工目的により、①集光特性、②出力の大きさ、③ビームの均質性のいずれが重要かを考慮して、ビームモードを選定することが重要である。

##### (1) 安定型共振器の場合のモード次数

レーザの発振モードには、発振周波数を主として決める縦モードと発振ビームの空間的強度分布を決める横モードがある。ビーム断面上の横方向の電磁界分布状態を横モード (Transverse Electromagnetic Mode) と呼び  $\text{TEM}_{mn}$  で表現する。ここで  $m, n$  はビームの次数を示す値で、X, Y 方向のスプリット数を示す整数となる。

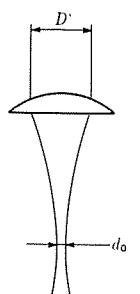
モード次数のみで、加工性能について論ずることは難しいが、切断及び深溶込み溶接へは、 $\text{TEM}_{00}$  に近い低次モードの方が好ましく、また表面改質などは、ピークが平均し高出力が可能な高次モードが優れている。

##### (2) 不安定型共振器の場合の $M$ 値

$M$  値とは、リングモードにおいて外径  $D$  と内径  $d$  としたとき、

$$M = D/d$$

で定義される。 $M$  値を大きくすることは、焦点面でのスポット径を小さくしエネルギー密度を向上するため、溶接での深溶込みとなる。



D: ビーム径 ( $1/e^2$  直径)

f: レンズ焦点距離

$d_0$ : 最小スポット径

$\lambda$ : 波長

図 9. レーザビームの焦光部のスポット径

現在、5 ~ 10 kW クラスのレーザ発振器で  $M=2 \sim 3$  が一般的に使用されている値である。

#### 4.3 偏光と加工性能

金属切断の場合、切断部の傾き  $\theta$  は、円偏光率に大きく影響され、円偏光率が高いほど  $\theta$  が小さくなり、高精度切断に適することは明らかになっている<sup>(4)</sup>。95% 程度の円偏光率で  $\theta$  がほぼ 0 度の高精度切断が可能である。

#### 4.4 パルス特性と加工性能

切断加工の場合は、一般的にパルス波形による切断が実施されている。パルス周波数は高いほど、面粗度は良好となるが、熱影響層が大きくなる。また、パルスピーク出力の加工性能に及ぼす影響は、パルスピーク値が切断に必要な平均出力の 3 倍程度が、加工品質の改善効果が著しいことが知られている<sup>(5)</sup>。

溶接加工、表面改質についてのパルス加工は、現在のところ実施例が少なく、今後の課題である。

## 5. む す び

レーザ加工機の需要の拡大とともに、レーザ発振器に対する高性能化・高信頼化・小型化・低価格化の要求が増大しており、レーザ発振器の改良・開発が更に進むものと思われる。

最近の潮流の一つとして、直流放電から高周波放電へのレーザ励起方式の移行が始まっている。この傾向は、高精度レーザ加工に必要不可欠なレーザ出力の高速制御において、高周波放電が適していること、また、発振器の信頼性向上の観点から、金属電極が放電に全く接触しない高周波放電は、いわゆる無電極放電のため電極が全く消耗・劣化せず常に安定した放電が得られる、などの高周波放電の優れた属性によるものである。この流れはレーザ加工の高精度化の進展とともに、加速されるものと思われる。更に、個々の加工に最適なパルス波形制御などの高速制御技術が進歩するであろう。

以上の高性能化に加え、発振器の光学素子の信頼性向上と発振器の小型化により、レーザ加工機システムにおける発振器の工具化 (ツール化) が進展するとともに、低価格化も進行し、レーザ加工機の需要が更に拡大していくものと予測される。

## 参 考 文 献

- (1) 菅井ほか: 三菱電機技術報, 60, No. 3, p. 22 (昭 61)
- (2) 三菱電機(株):  $\text{CO}_2$  レーザ加工機 カタログ (昭 61)
- (3) 金岡ほか: 第 109 回溶接法資料、レーザ切断性能に及ぼすパルス特性の影響
- (4) 木谷ほか: プレス技術第 24 卷第 9 号, PP 30-31

## 炭酸ガスレーザ加工機

吉田 公生\* 白須浩藏\*\*\*  
山本 昭規\*  
柴山耕三郎\*\*

## 1. まえがき

20世紀屈指の発明といわれるレーザが、初めて発振して4分の1世紀を経過し、レーザの応用技術は多方面で利用されるようになつた。ひと昔前まで「特殊加工」の項目に分類されていた産業用CO<sub>2</sub>レーザ加工も、特に金属切断分野を中心に、ここ数年、広範な市場で急速な普及を見せていている。

本稿では、最新のレーザ加工システムを加工用途別に紹介、その技術動向、特長について述べる。

## 2. 高速・高精度レーザ加工機

レーザ加工の70~80%を占める最大の利用分野である切断加工のニーズは、従来の単純な形状切断加工から、より付加価値の高い精密部品加工、多目的(複合)加工へ展開している。

シャープなシングルモード、安定した出力特性を誇る発振器、静的・動的特性の優れた加工機、高速演算処理や各種センサなどの機能をコントロールする制御装置をシステムアップした高速・高精度切断加工システムや、高精度切断に加え、出力されるレーザビームのモード切換器を付加した発振器と組み合わせて、溶接、表面改質など多目的(複合)加工を可能にしたシステムが次々と市場に投入されつつある。それに加え、各構成ユニットを加工機と一体化して光路系統の安定化と一層の小型化(省スペース化)を図ったり、稼働率向上、被加工物の品質向上、安定化のための各種センサや、ソフトウェアなど補機・機能を充

実したり、又は、集じん・脱臭装置など作業環境の改善や、ローダ・アンローダ装置、ロボットなど自動化への周辺機器の付加など広範囲な市場に適合すべくシステム化されてきている。

一方、このところ大きくクローズアップされてきているのが、立体形状加工(三次元加工)である。試作品、少ロット部品など、金型が必要なプレスに比べてコスト的に有利となる場合、プレス加工の代替としてメリットを生みだし、多品種少量、短納期、低成本の市場に適合しつつある。

以下に紹介する、高速、高精度加工機、又は多目的加工機は、

- (1) 作業性、安定性の良いハイブリッド方式(1軸テーブル移動、1軸光移動)で定尺板材対応のテーブルサイズをもつH2シリーズ。
- (2) 高精度切断はもとより、溶接、表面改質の多目的加工を可能にした光固定、テーブル移動方式のT2シリーズ。
- (3) 対応ワークサイズに対して省スペース化が図れる光走査方式のLシリーズ。

として標準シリーズ化されている。表1に各加工機の仕様を示す。

## 2.1 加工機の特長

## (1) H2シリーズ

生産ライン用として、鋼板の定尺材に対応したテーブルサイズで3機種ラインアップしている。図1にその外観を示す。安定した門形ハイブリッド構造で、主要構造体を振動特性に優れた鋳物構造とともに、高い位置決め精度、最良のサーボ特性(動特性)に加え、三軸直交型共振器を初めて機械搭載、レーザビームの伝達精度の安定化

表1. 高速・高精度レーザ加工機《MELLASER》の仕様

項目	403 T 2	806 T 2	1212 H 2	2012 H 2	2512 H 2	30 L
平板加工用						
型式	ビーム固定、テーブル移動			X: テーブル移動、Y: ビーム移動		ワーク固定、ビーム移動
加工ストロークX-Y(mm)	350×250	850×650	1,250×1,250	2,030×1,250	2,500×1,250	3,100×1,600
加工ヘッド上下ストローク(mm)	150	300	150 (300)			250
対集束大きさ(mm)	440×400	850×650	1,220×1,220	2,000×1,000	2,440×1,220	3,050×1,524
ワーク重量(kg)	100	150	150	200	300	450
制御方式	同時3軸又は同時2軸+Z軸独立制御					
早送り速度(m/min)	5	15			24	
加工送り速度(m/min)	max 5			max 15		
位置決め精度(mm)	0.005/300	0.005/500		0.01/500	0.02/500	
繰返し位置決め精度(mm)	±0.005			±0.01		
重量(kg)	1,460	5,700*1	7,000*1	9,000*1	10,000*1	8,000
システム据付幅×奥行×高さ(mm)	4,930×2,305×1,985	2,330×4,445×2,615*2	4,800×3,435×2,780*2	6,000×3,435×2,780*2	6,335×3,435×2,780*2	3,635×6,950×1,950
け寸法	面積(m <sup>2</sup> )	11.4	10.4	16.5	20.6	21.8
適合発振器	10 SP 15 SRP 25 SRP 10 C 25 C 10 C 25 C 50 C	10 SP 15 SRP 25 SRP 10 C 25 C 10 C 25 C 50 C	10 SP 15 SRP 25 SRP 10 C 25 C 10 C 25 C 50 C	10 SP 15 SRP 25 SRP 10 C 25 C 10 C 25 C 50 C	10 SP 15 SRP 25 SRP 10 C 25 C 10 C 25 C 50 C	
備考	新シリーズはすべて回転ヘッド対応可能(403 T 2, 30 Lを除く) *1, 印は、15 SRP, 25 SRP搭載時の値を示す。 *2, 印は、加工ヘッド上下ストローク300mm時の値を示す。					

図1. H2シリーズレーザ加工機《MELLASER 2012 H 2》の外観

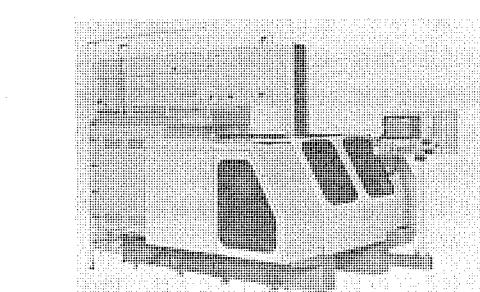


図2. T2シリーズレーザ加工機《MELLASER 806 T 2》(加工室付き)の外観

を図り、高速・高精度加工を実現している。

#### (2) T 2 シリーズ

高精度切削に加え、溶接・表面改質など、加工目的に応じてすべての発振器と組み合わせ可能な加工機である。前面及び左右を開放して作業性の向上を図ったC形コラム構造で、H 2 シリーズ同様、主要構造体をすべて鋳物化している。図 2. にその外観を示す。

共振器の機械搭載により省スペース化（従来比30%減）を実現するとともに、光路長を常に一定にできる光固定式のメリットを生かし、安定かつ高品質ビームで高精度加工を可能にしている。

#### (3) L シリーズ

ビームを移動し、ワークを静止した状態で加工できる光走査方式の採用により、他方式に比べ、大物ワークを省スペースで加工できる利点をもつ加工機である。重量ワークのハンドリングを容易にするワークリフタ、チップコンベヤを標準装備、作業の省力化を実現、更にローダ・アシローダ装置の付加とミクロジョイント加工により夜間の無人運転も可能とすることができる。

#### (4) その他の加工機

レーザ加工の普及をうながす一つのキーとして生産性向上があげられるが、この生産性向上を目的に製品化された加工システムを以下に紹介する。

図 3. に加工ヘッド周りの外観並びに光路構成図を示す加工機は、図から明らかなように標準加工システムの加工機に複数の加工ヘッド（5ヘッド）を搭載したもので、加工ヘッドは同一形状、同時加工用の4ヘッドと単一加工用の1ヘッドで構成している。ビーム切換装置により加工対象に応じて同時加工又は単一加工モードの選択が可能で、タクトタイムの短縮により、生産効率の高いしかもフレキシビリティに富んだ加工システムである。ビーム切換及び分光というレーザ加工ならではのメリットを生かした例である。

図 4. に示すシステムは、主に厚板ステンレスを対象とした板金切断ライン用で、光走査型レーザ加工機に“ワーク搬送出装置”、及び切断時発生するドロスを除去する“ぱり取り機”を配したシステムである。ワーク搬入、切断、ぱり取り機への搬送、ドロス除去、ワーク搬出の一連の動作を全自动で行える。ぱり取り機までの各ポジションへのワーク搬送は、自動位置決めクランプ方式で、ぱり取り機内でのドロス除去は、回転式ワイブランチを採用している。レーザ切断はすべてミクロジョイント加工としている。

#### 2.2 付属機器・機能の特長

より高精度加工を、高品質加工を、多目的加工を、又は操作性、稼働率の向上を目的に各種付属機器、機能を充実することは不可欠であり、今後の市場拡大の有効な手段となる。その代表的なものを以下に紹介する。

##### (1) 倣い装置

従来の接触式偣い装置とハードウェア上互換性のある加工ガス圧力を利用したガス浮上式非接触偣いユニットや静電容量式の非接触偣いユニット（加工ヘッドと一体化）を開発、偣い精度の向上並びに表面処理鋼板などの無傷加工や、薄板微細加工など高品質切断加工を実現している。静電容量式偣いユニットのセンサ部は、偣い機能のほかに、ワークタッチセンサ、ワーク衝突防止センサ、誤照射防止センサとしても実用可能である。

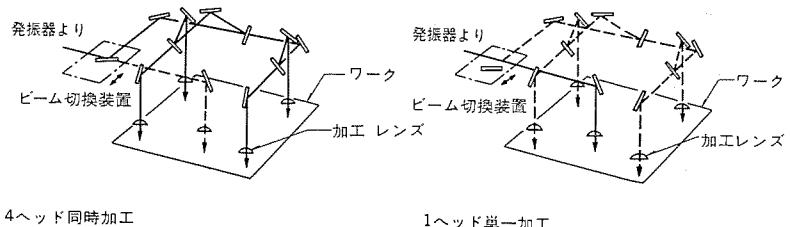
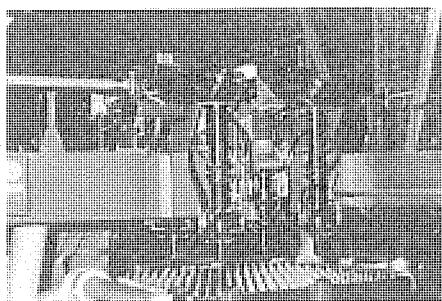


図 3. マルチヘッド 加工機の外観及び光路構成図

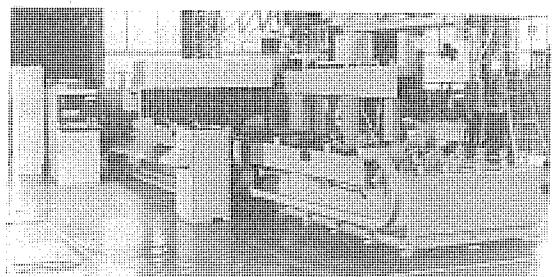


図 4. 板金ライン用レーザ加工システム《MELLASER 40 L-S》の外観

##### (2) 加工条件設定機能

(a) ピアッキング、CW（連続波）加工、パルス加工とそれぞれに最適な加工ガス圧力を、加工に応じて自動的に切り換える加工ガス圧3段切換機能。

(b) 加工条件が不明な場合、より高精度、高品質加工の条件に変更したい場合などに有効な加工条件プリセット機能（出力、周波数、デューティの3条件を加工しながら手動調整可）。NC内にサブプログラムとして、あらかじめ登録されている加工条件を呼び出し、常に再現性（安定品質）のある加工を可能にする加工条件NC制御機能。

(c) 被加工物の材質、又は加工内容により加工ガス種類を変更する場合、変更が容易な加工ガス3種切換機能。

##### (3) 回転ヘッド装置

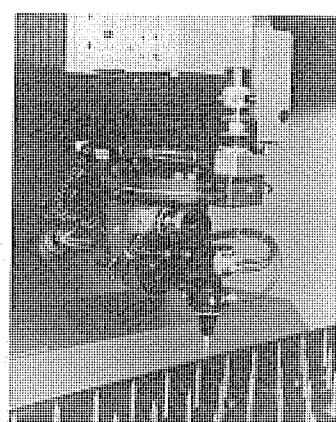


図 5. 回転ヘッドの外観

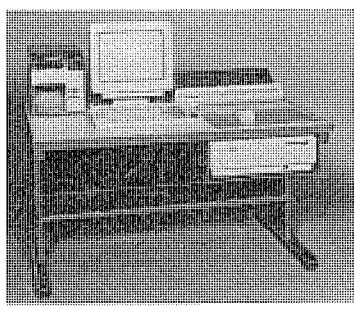


図 6. 自動プログラミング装置 LA 45 の外観

立体形状加工用に回転 2 軸をもつ回転ヘッドを開発、平板加工から立体形状加工まで加工用途を拡大可能にしている。対応する加工機は、806 T2 及び H2 シリーズ。平板用ワーク支持部をユニット化して着脱可能にするとともに、加工ヘッド取付部も平板用ヘッドと回転ヘッドを同一にし、加工ヘッドとワーク支持ユニットの交換のみで平板加工機を三次元加工機に仕様変更可能にしている。図 5. に回転ヘッドの外観を示す。

#### (4) 多目的加工用付属機器

ビームモード切換可能な発振器と組み合わせ、切断に加え、溶接・表面改質などを 1 台の加工機で可能にし、加工用途の拡大を図れる

表 3. 三次元レーザ加工機《MELCUT-3 DCM》タイプ G の仕様

型 名		MELCUT-3 DCM					
型 式		-1520 G	-1525 G	-2025 G	-2030 G		
最大ワーク寸法 (mm)	X	2,000	2,500	2,500	3,000		
	Y	1,500	1,500	2,000	2,000		
	Z	600, 800, 1,000					
有効ストローク (mm)	X 軸	2,660	3,160	3,160	3,660		
	Y 軸	2,160	2,160	2,660	2,660		
	Z 軸						
ク (mm)	A4 軸			±270°			
	A5 軸			±90°			
加工テーブル寸法 (mm)	X	2,100	2,600	2,600	3,100		
	Y	1,600	1,600	2,100	2,100		
5 軸同時制御 (X, Y, Z, A4, A5)							
制御方式	教示方式	① Point-to-Point 示教 (ティーチングプレイヤック) ② XY2 軸 NC テープ入力, Z 軸微動, A4・A5 手動割込み					
	NC 装置	MELAS-R2 (MULTI 16-III付属)					
加工速度 (m/min)	早送り速度 (m/min)	10					
	横リ返し精度 (X, Y, Z 軸)	0~10					
レーザ発振器仕様	加工対象 (金属)	±0.035 mm					
	(非金属)	±0.02°					
付属品及び予備品		ML 10 E 3		ML 15 S 3			
		0.5~3 mm		0.5~6 mm			
		10 mm 以下		25 mm 以下			
		標準		オプション			
付属品	1. 各機器基礎ボルト	予備品					
	2. レーザ発振器用工具	1. 加工レンズ 2. 反射ミラー φ60 Cu Au コート φ60 Cu Au コート (A4, A5 用)					
予備品	3. 保護メガネ	3. 発振器用イオン交換樹脂					
	1. ヒューズ類一式	付帯設備					
	2. ノズルチップ	1. 安全用パーテーション 2. MELDAS-M 2 3. 平板加工用治具					

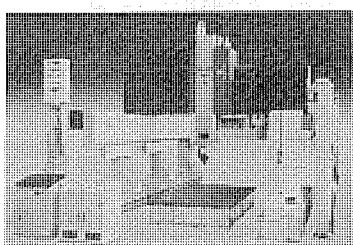


図 7. 三次元レーザ加工機《MELCUT-3 DCM》タイプ G の外観

表 2. 自動プログラミング装置 LA 45 の仕様

#### ソフトウェア仕様

型 名	諸 元	仕 様
(a) 演算装置 LA 45-C 700	CPU	16 ビットマイクロプロセッサー 20M バイトハードディスク
(b) ディスプレイ装置	(1) 補助記憶装置 (2) 補助記憶	3.5 インチマイクロプロセッサー 14 インチカラーモニタ 768×540 ドット
(c) キーボード LA 45-NKB	表示 解像度 表示文字	日本語キーボード方式 40 文字×27 行 アルファベット・数字 60 文字×27 行 97 キー (12 ファンクション) 2 ボタン, ローラーボール式マウス
(d) ポインティングデバイス LA 45-MDS		

#### ハードウェア仕様

No.	名 称	機 能
1	基本コマンド CAD/CAM	(a) 図形作成機能 6 種 (b) 交点計算機能 30 種 (c) 集合機能 14 種 (d) 出力機能 1 種
2	サブパターン LA 45-SUB 1	(a) 形状パターン 7 種 (b) 配列パターン 4 種 (c) ねじ下穴 14 種
3	描画機能	(a) XY プロッタ A3 サイズ接続可能 (別売)
4	入力方式 (CAD)	(a) マウスによる会話式图形入力
5	演算精度	(a) 有効数字 13 けた

付属機器として、回転テーブルや、溶接加工ヘッド、ビームスキャナ付き加工ヘッドなど、それぞれに対応した制御機能も含めて製品化している。

#### (5) 自動プログラミング装置

レーザ加工の優れた特長を最大限に利用するためには、優れた自動プログラミング装置が必要である。プログラム作成時間をいかに短縮して稼働率を向上させるかが、今後、レーザ加工の普及を左右するキーポイントである。ここに紹介する自動プログラミング装置 LA 45 は、だれにでも操作ができる、かつ作成時間が短いことを目標に製品化された装置である。表 2. に仕様、図 6. に外観を示す。

以下にその特長を述べる。

- (a) 会話式 CAD 入力による操作性の向上
  - (b) 図面から即 NC データへの変換機能による作成時間の短縮
  - (c) 板厚、材質、加工形状 (鋭角部、円弧半径、直線長さ) による加工速度、出力など加工条件の自動設定機能の付加
  - (d) 三面図から容易に展開図面を作成できる板金展開機能の付加
  - (e) テープレス運転を可能にする NC リンク
  - (f) 画面が見やすい 14 インチカラー CRT の採用
- など、豊富な機能を充実させ、従来のテープ作成作業を飛躍的に向上させたとして注目を集めている。

#### 3. 三次元レーザ加工機《MELCUT-3 DCM》

表 3. 及び図 7. に三次元レーザ加工機《MELCUT-3 DCM》タイプ G、図 8. に同じくタイプ C の外観を示す。タイプ G は 5 軸光走査、ガントリー型の機械構造をもつ大物三次元ワークの切断加工用に適した加工機である。一方、タイプ C は中小物三次元ワークの切断加工を対象とした 4 軸光走査、1 軸テーブル移動のハイブリッド型加工機である。以下にその特長を述べる。

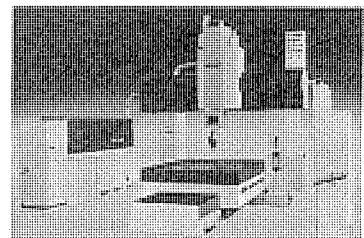


図 8. 三次元レーザ加工機《MELCUT-3 DCM》タイプ C の外観

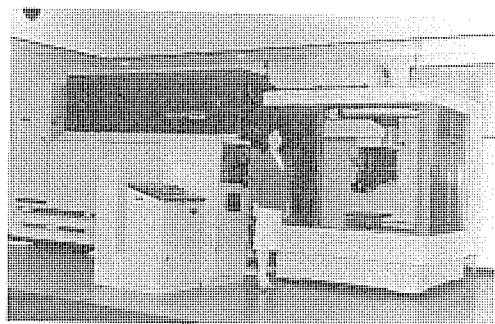


図 9. 汎用加工機(Gシリーズ)の外観

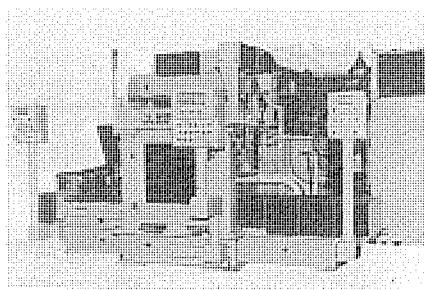


図 10. レシプロ式溶接機(Rシリーズ)の外観

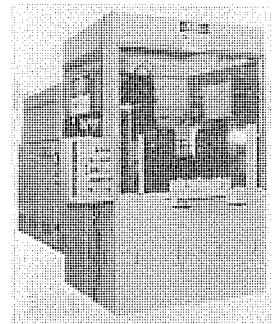


図 11. ターンテーブル式溶接機(Tシリーズ)の外観

#### (1) テーチング機能の充実

三次元のワークに対するテーチング作業の簡略化のため、各種機能を装備

- (a) 2軸NCテープ入力 (Z軸倣い, A4, A5軸手動割込み)
- (b) 5軸NCデータ入力 (F/Dベース, オプション)
- (c) 自動テーチング機能 (光センサ, オプション)
- 立体ワーク面上のケガキ線 (黒テープ) を自動的に倣いながら座標値 (X, Y, Z) と姿勢角 (A4, A5) を記憶し、テーチングデータを作成する機能。この機能と後述の加工条件自動設定機能を併用することにより、テーチング作業を大幅に改善している。
- (d) 加工条件自動設定機能  
加工条件データベース化、加工速度自動設定。

#### (2) 豊富なMDI機能

MDI機能の充実により、精度の高い加工を可能にしている。

- (a) 小穴など定型图形の座標値入力 (中心、半径指定)
- (b) ミラーイメージ、空間シフトなど基準座標の座標値入力
- (3) 平板加工機能の充実 (投資効果の向上)  
加工テーブルには平板加工用の装置を標準装備している (タイプCのみ)。
  - (a) 針山ピン、グリッパ、位置決め用ロケートピン (着脱可)
  - (b) ワーク搬出、搬入用フリーボール (三次元加工時はテーブル内に収納)
  - (c) 補助計算機《MULTI 16-III》にはNCテープ作成機能を標準装備、平板加工のテープレス運転が可能

#### 4. 溶接・表面改質用レーザ加工機

レーザの特長を生かした加工機として最も普及度の高いのは、先に紹介した切断用であるが、最近、溶接並びに表面改質の分野でも注目を集めつつある。母材を溶融し、高速度で“キーホール”溶接が可能なレーザビームは、電子ビームに次ぐ溶込み特性をもち、大気中で熱ひずみの少ない信頼性の高い継手を得ることができるため、今や自動車産業や鉄鋼ラインの1溶接ツールとして急速な勢いで定着しつつある。継手形状としては、突き合せ、重ね、かん(嵌)合をはじめとするあらゆる方式が採用可能であり、また、エネルギーを非接触で与えつつ、自在にコントロールできる制御性の良さが、精密機械部品から大物ワークまで広範な分野に適用を可能にしている。

一方、表面改質でも、焼入れ、チル化、コーティング強化、クラッディング、グレージングなど非常に幅広い応用が研究され一部で実用化が図られつつある。

以下にこの分野における代表的な加工機を紹介する。

#### 4.1 汎用加工機 (Gシリーズ)

研究用、ジョブショップ用、生産ライン用として幅広い用途を対象に開発した多機能加工機で図9.に外観を示す。X-Yテーブル上に0~90°の任意の角度で駆動できる回転テーブルを搭載し、円形回転ワークの迅速な処理をも可能にしている。X, Y, Z, A軸の同時4軸制御機能を持ち、スキップ溶接など特殊な加工にも対応できる。加工ヘッドには、オートフォーカスや溶接線目あわせセンサを内蔵し、作業性改善に対する配慮がなされている。また、溶接用加工ヘッドと表面改質に利用されるインテグレーションミラー、又は、シリンドリカルミラーとを交換することができる構造としているため、複合加工機として利用することもできる。

#### 4.2 レシプロ式溶接機 (Rシリーズ)

プレス部品のレーザ溶接が行える数少ない加工機で、自動車、2輪、農機、エンジンポンプなどの燃料タンクの重ねシーム溶接をはじめ、圧力容器など気密溶接を可能にしている。図10.に示すとおり、中央に位置する3軸光走査式加工室と、その両側に設けたレシプロ式ワーク着脱ステーションを組み合わせ、異種ワークを交互に処理することができる。亜鉛、すずなどめっき鋼板の良好な溶接が可能な加工ソフトと相まって、従来の抵抗シーム溶接機に変わるものとして注目を集めている。

#### 4.3 ターンテーブル式溶接機 (Tシリーズ)

図11.は小物嵌合部品の専用溶接機を示す。インデックステーブル上に2~4個のワーククランプ及び回転治具を持ち、自動車用機能部品の高速溶接に最適な機構をもっている。また、マニピュレータとの組合せで全自动運転も容易に実施できる。

#### 5. むすび

本稿では、二次元、三次元切断用レーザ加工機及び溶接、表面改質用レーザ加工機の技術動向並びに仕様、特長について述べたが、今後ますます多様化する市場ニーズ、更に先端応用分野へ広がる加工技術に対応できる経済的かつ信頼性の高い加工システムを開発、製品化し、ユーザーの期待にこたえていきたい。

## 炭酸ガスレーザ加工技術

木谷 基\* 吉田寿男\*\*\*  
金岡 優\*  
柴山耕三郎\*\*

## 1. まえがき

レーザ加工は高エネルギー密度に集光されたビームを用いるため、従来の熱加工法では得られない数多くの特長があり、最近ますます脚光を浴びている。その中でも炭酸ガスレーザは発振効率が比較的高く、大出力(～20 kW)を連続的に取り出すことができるため、鋼板の切断・溶接・熱処理など、その応用分野は多岐にわたっている。

本稿では、著しい加工品質の向上を遂げ、最も応用分野の広がっている切断加工を中心に、溶接、熱処理加工技術の動向と加工事例について紹介する。更に当社内でも、名古屋、長崎、群馬、稻沢、相模、福山の各製作所において導入されており、かなりの実績をあげている。ここでは特に名古屋製作所の導入例について紹介する。

## 2. レーザ切断

レーザ切断の用途は薄鋼板などの高精度切断、大型板金部品の高速切断、厚板部品の高品質切断、絞り成形部品への高精度三次元切断などに大別され、これらの目的には次のような切断特性が要求される。

- (1) プレスなどの接触加工では不可能な微細、かつ高精度な切断が可能であること(微細加工性)。
- (2) 金型を使わない加工法としての特長を最大限に発揮するため、加工品質に方向性の無い状態で異形部品を切断できること(等方加工性)。
- (3) プレス加工では不可能な厚板を切断できること(厚板加工性)。
- (4) 機械加工と比べて同等、若しくはそれ以上の高速で切断できること(高速切断性)。

これらの要求に対して、レーザ切断技術の開発や改良によって、現在では板厚1 mmの薄板で面粗さ5 μm以下、寸法精度も10～20 μmが得られている。また、形状切断可能な最大板厚も12 mmに達している。このような加工性能の向上に伴い、レーザ加工機の生産現場への普及も着実に進んでおり、国内では約1,000台が機械・電機・精密などの業界で稼働している。以下には、レーザ加工機の応

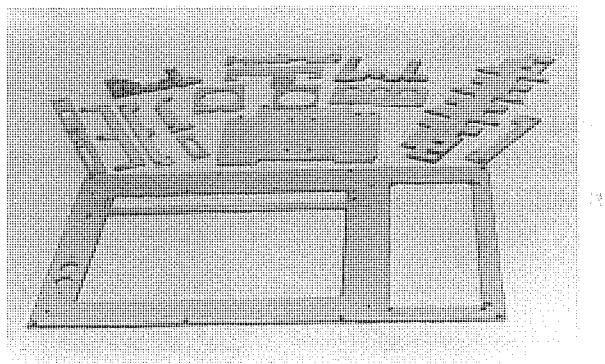


図 1. レーザ加工機の加工例

用例及び高精度切断の実現に重要な役割を果たした偏光とパルス特性について述べる。

## 2.1 レーザ加工機の板金加工ラインへの適用

当社名古屋製作所内の板金加工分野においても、レーザ加工機は積極的に応用され大きな成果をあげている。導入部門(部品製造部)では、レーザ加工機以外にもタレパン2台と自動曲げ機械によるFMSライン、自動溶接ライン及び自動塗装ラインなどが稼働しており、活発な自動化を推進している。主なレーザ加工部品は、図1.に示すような電磁開閉器や各種NC制御装置用部品などであり、日産5～30ロットを加工している。毎日の生産に必要なだけの部品をジャストイン投入できるため、在庫管理の改善や納期の短縮に大きな効果をあげている。レーザの導入に当たり、従来タレットパンチプレスで実施していた加工品のうち、レーザ加工でメリットのあるものを順次置き換えてきた。レーザとタレットパンチプレスを単純に加工速度で比較すると、タレットパンチプレスが有利になるが、レーザ加工は騒音の問題がないため夜間の無人運転による稼働率の向上や、曲率の多い部品、標準金型では加工できない部品などに対し有効であり、急速に適用加工範囲を広げている。

図2.には昭和60年7月以来の、レーザ加工機ML25L-10E(定格出力500 W、テーブルストローク1,250 mm×2,500 mm)の全稼働時間と無人運転の推移を示す。導入当初は不慣れなため、作業時間に占める機械の稼働時間の割合は約50%であったが、その後徐々に改善され、1年後の61年7月には約91%になった。現在の稼働時間は約400 hに達しているが、この稼働時間の増加に寄与した大きな要因は、61年11月から始めた夜間の無人運転の実現である。更に、この無人運転を可能にした背景には、ワークの加工ポジションへの搬入や、切断後の搬出を自動で行うオートローダ・アンローダの採用と加工途中のトラブル防止や加工後のワーク搬送に便利なミクロジョイント方式

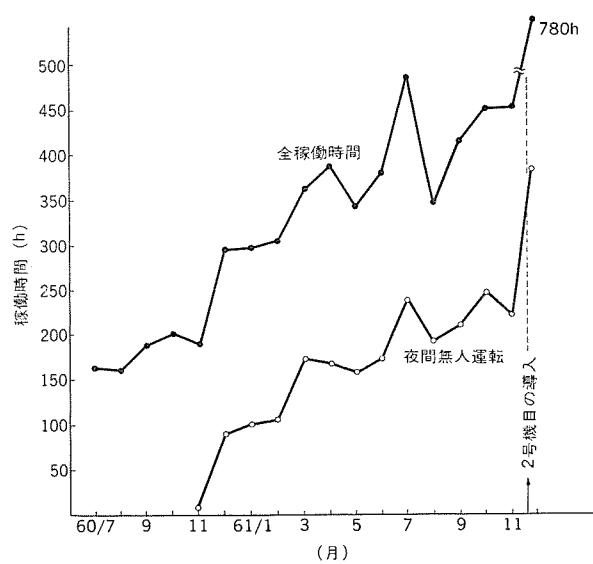


図 2. レーザ加工機の稼働推移

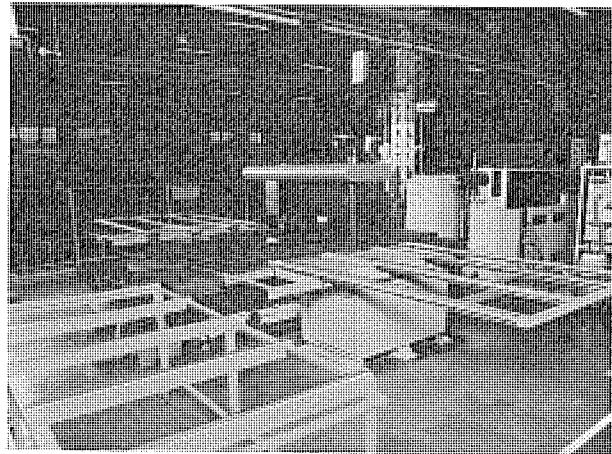


図 3. 加工システムの配置図

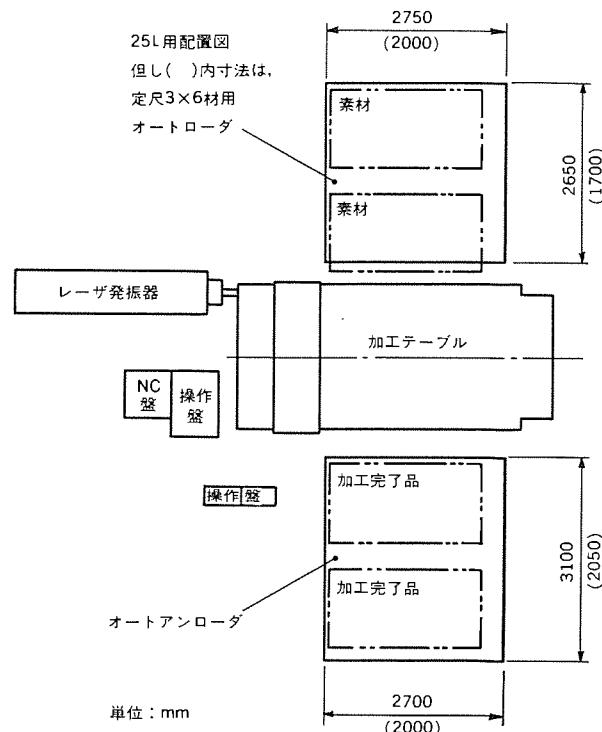
の採用がある。ローダ・アンローダは、レーザ加工機の NC と加工枚数設定カウンタがリンクしており、図 3. に示す例では定尺板 (3' × 6') ならば最大 3 枚まで無人にて加工可能である。

レーザ加工の対象ワークとしては、部品点数が 200 以下と比較的少ないものや小さなサイズのものを主に考え、そのほかにタレパンの加工では表面にきずの生じて困る NC フレームボードの加工にも応用している。ワークの板厚は 1~3.2 mm の範囲であるため、加工速度は平均で 1.5 m/min で切断でき、精度も製品仕様の百分台を満足している。

消耗部品の主なものは、光学部品であり、発振器内部の TR ミラー、PR ミラー、伝送系の ベンドミラー 及び集光レンズがある。そのほかには加工ヘッドに装着されるノズルや接触式倠、ワークを保持する剣山ピン、チラーの水質を保つイオン交換樹脂がある。

ランニングコストは、発振器、テーブル、チラーなどの消費電力、金属切

標準配置例 (LD25, UD25の場合)



単位: mm

断用のアシストガスである酸素、レーザ光を発生させるためのレーザガス (CO<sub>2</sub>, He, Ne, Co), 冷却用の水の四つがあり、表 1. に示すとおりである。なお、算出のための単価はそれぞれ電気 21 円/kWh, 液酸 70 円/m<sup>3</sup>, レーザガス 5,300 円/m<sup>3</sup>, 水 209 円/m<sup>3</sup>とした。こ

表 1. レーザ加工機のランニングコスト

調査期間	使 用 量	MC稼働時間	使用量/h	費用円/h
電 気 10/1~3/31	14,943 kWh	1,327.9 h	11.3 kW	237.3
液 酸 11/1~3/14	3,990 m <sup>3</sup>	1,035.9 h	3.9 m <sup>3</sup>	273.0
レーザガス 11/5~3/31	4.68 m <sup>3</sup>	1,180.3 h	0.004 m <sup>3</sup>	21.2
水	—	—	※理論値 97.51/min × 60 min × 0.03 0.176 m <sup>3</sup>	36.8
計	—	—	—	568.3

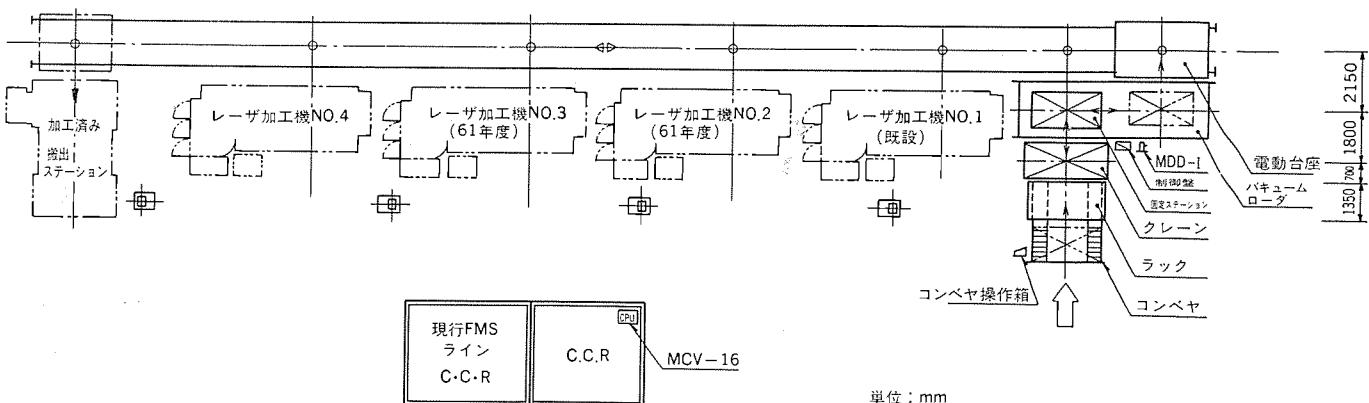


図 4. FMS ライン構想

のように実際の稼働におけるランニングコストの調査結果によれば、通常報告されているものより安価で、しかも夜間無人運転により、人件費や消耗部品などの諸経費を含めたトータル試算では、4,500円/hと通常のレーザ加工レートの1/2になる。同部門では図4.に示すような、レーザ加工機を4台導入したFMSライン構想があり、昭和62年秋には稼働する予定である。

## 2.2 その他の応用例

### (1) 積層金型(簡易金型)

金型レスの加工を特長とするレーザ加工を、逆に金型の作成に応用した例である。図5.に示すサンプルは対象板厚が1mmの抜き型で、刃部は寸法精度5/100以内で加工したSKD、その下のバックアップ材はSPCCである。切断面には0.1~0.2mm程度の硬化層(Hr800)が加工と同時に得られるため、従来加工のような後加工(熱処理)工程が省略でき、しかも寿命はほぼ従来と同じである。もちろん、加工時間が速いことから短納期であり、替刃も同時に複数枚加工・保存できるメリットもある。高精度金型としての用途にはまだ不十分であるが、精度のあまり必要としない対象物について積極的に用いられている。

### (2) 試作板金部品

製品の試作へは早くから応用されてきた。図6.の形状の場合、約15分ほどで加工が終了する。加工形状のプログラムでも、CAD/CAMなどを用いてやはり短時間で行うことができ、形状の変更にも柔軟な対応ができる。

### (3) 積層部品

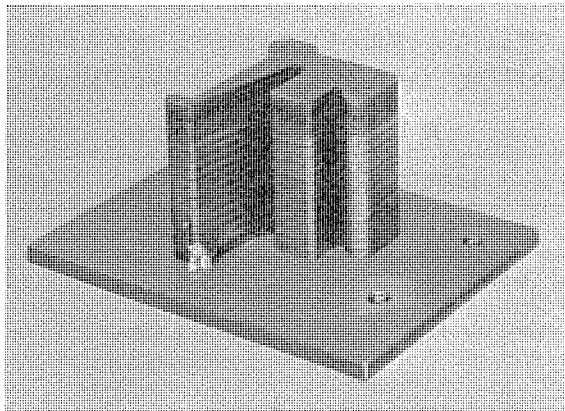


図5. 積層金型の例

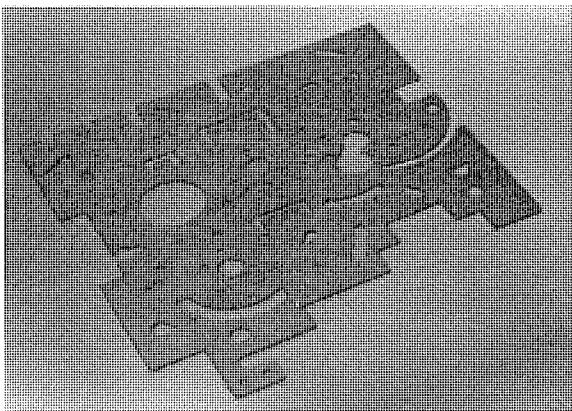


図6. 試作部品の例

従来は一体物として機械加工していた部品は、平板をレーザ切断した後、積層してレーザ溶接する方法で、コストも納期も大幅な改善を図ることができる。図7.は積層部品の例を示したものであり、各1枚の加工時間は約3分である。積層後のレーザ溶接は、電子ビームと同様に熱影響が少なく、低ひずみな加工が可能である。

### (4) 弹性材料の高精度切削

シリコンゴムなどの弾性材料を高精度に加工する場合、接触加工では加工途中に生じる変形が問題になるが、レーザは非接触加工であるため、外力を加えず寸法精度の高い加工が可能である。

### (5) 高硬度ぜい(脆)性材料の切削

新素材であるセラミックなどの、高硬度でしかも脆性材料の切削やスクライビングなどにもレーザは応用されている。加工工具の摩耗の問題を解消し、長時間にわたって一定の加工品質を得られることがメリットである。

## 2.3 加工性能に影響を及ぼす要因

### (1) パルス特性の影響<sup>(1)</sup>

パルス切削での加工条件にはCW切削条件に加え、ピーク出力、平

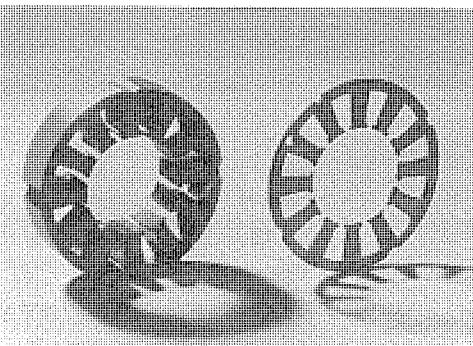


図7. 積層部品の例

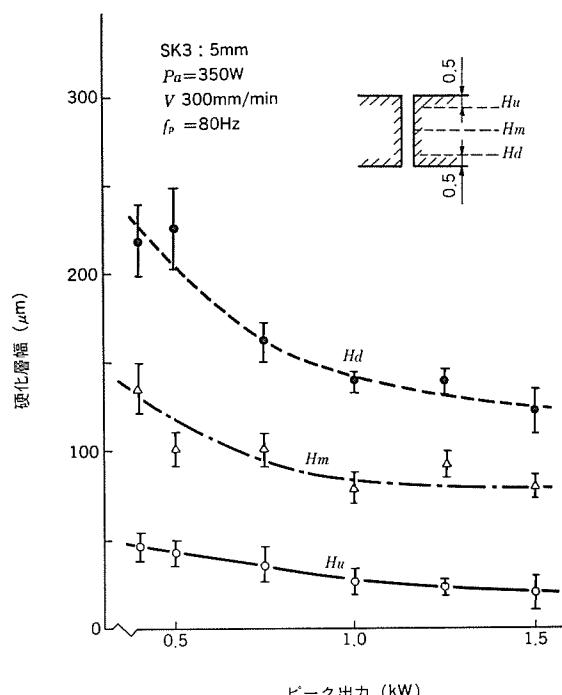


図8. ピーク出力と硬化層幅の関係

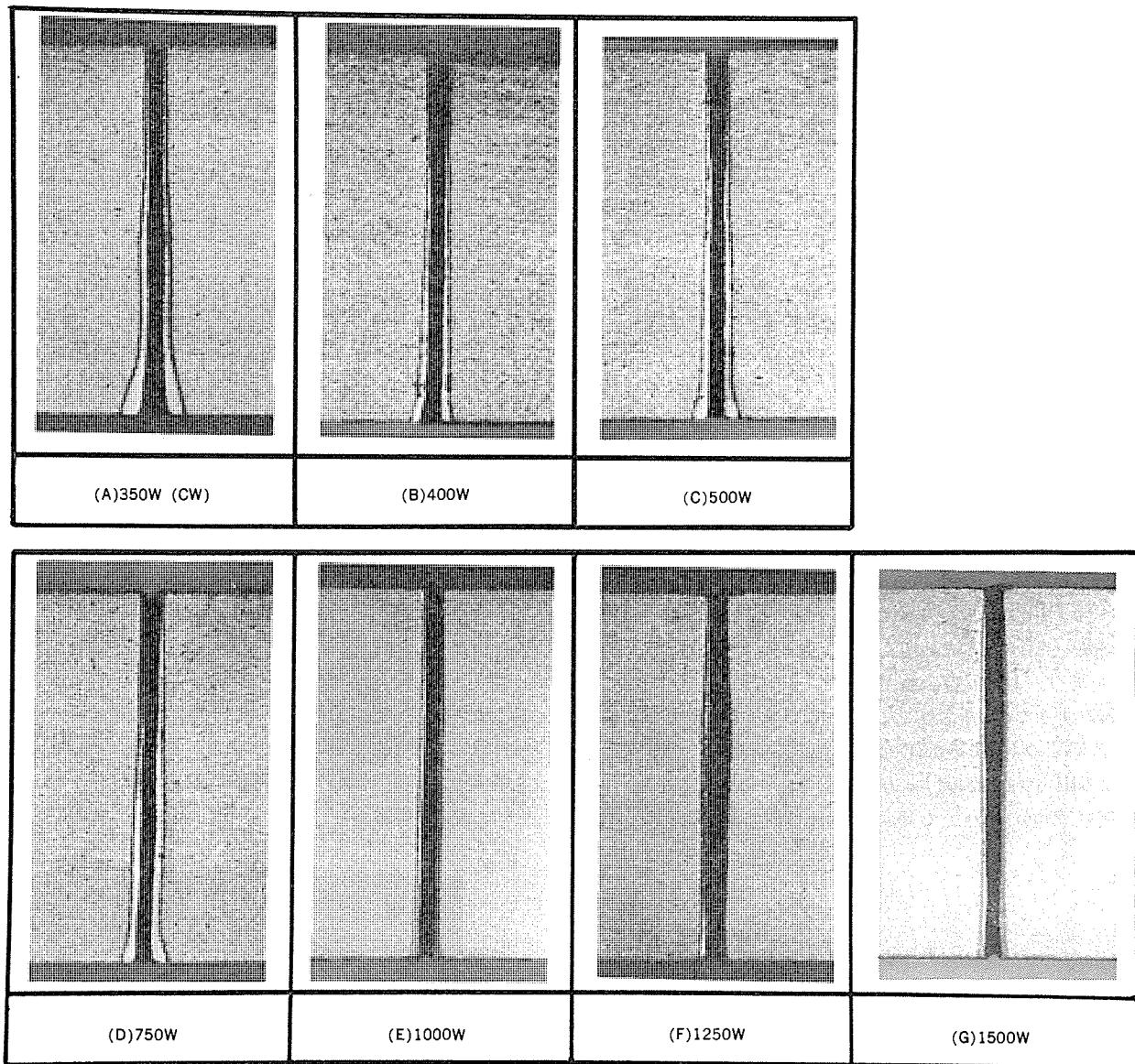


図 9. ピーク出力に対する切削幅と熱影響層 (SK 3: 5 mm, 平均出力 350 W, 速度 0.3 m/min)

均出力, 周波数, デューティーなどのパラメータがある。ここでは, 微細加工性能や面粗度の向上, 及び高反射材料の加工性能を向上させたピーク出力と周波数について述べる。

図 8. は板厚 5 mm の SK 3 を切削した場合の パルスピーク出力と熱影響層幅の関係であり, 図 9. には切削溝横断面写真を示す。硬化層は切削溝の両側に沿ってほぼ均等に発生しており, 上部から下部に向ってその幅は増加している。低いピーク出力では下部への入熱が多く, 下部硬化層幅  $H_d$  は 0.25 mm にも達し, 切削面の粗れも著しい。しかし, ピーク出力が高くなるほど低入熱で加工でき, シャープなエッジ加工や厚板加工に適する。

実用的な切削品質の評価としては, 切削面粗さも極めて重要な因子である。切削面粗さは, 一般に集光ビームのエネルギー密度に依存しており, 例えは短焦点レンズを用いて集光スポット径を小さくしたり, 正確に焦点を被加工物表面に設定することで良好な切削面が得られるが, それ以外にもパルスピーク出力と周波数の最適設定も重要になる。図 10. は軟鋼の板厚 1 mm, 3.2 mm, 6 mm を切削した場合の, ピーク出力と面粗さの関係である。ただし, 面粗さは板厚方向に変化するため, 被加工物表面から 0.3 mm の上部  $R_u$  と, 裏面から 0.3 mm の下部  $R_d$  の 2箇所について, 十点平均粗さ  $R_z$  を測

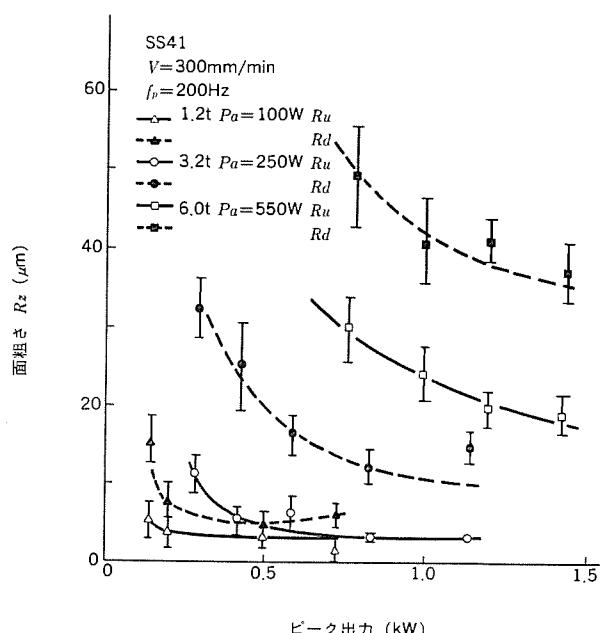


図 10. ピーク出力と面粗さの関係

定した。切断面粗さは板厚が薄いほど良好であり、上部と下部の面粗さの差は小さい。また、どの板厚の加工でも、ピーク出力が高くなるほど面粗度は向上している。

図 11. は軟鋼 2 mm のパルス切断において、パルス周波数を変化させた場合の上部面粗さである。切断面にはドングラインが規則正しく並び、その間隔はパルス周波数と加工速度により決まるピッチにほぼ一致する。この現象は下部面粗度にもみられ、低周波数域でドングラインと周波数は同期しているが、200 Hz 以上ではほぼ一定である。

最近の加工技術の進歩の一つにアルミや黄銅切断がある。従来これらの材料は、レーザ光の反射が大きいことや、高い熱伝導率のため切断面が粗れたり、ぱり状のドロスが裏面に付着するなど切断品質に大きな問題があった。しかし、ピーク出力 2.5 kW のく(矩)形ハイピークパルス技術の開発や、切断時の反射光による出力変動を制御する方式の採用で、ドロス付着がなく、面粗度も板厚 2 mm のアルミで  $15 \mu\text{m} R_{\max}$  前後の加工品質が得ら

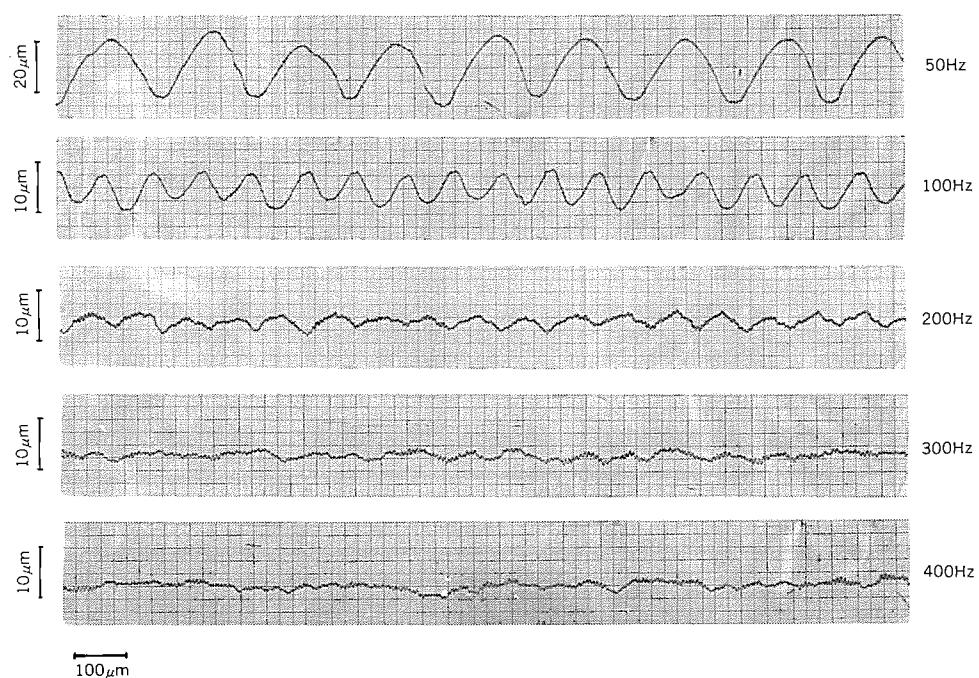
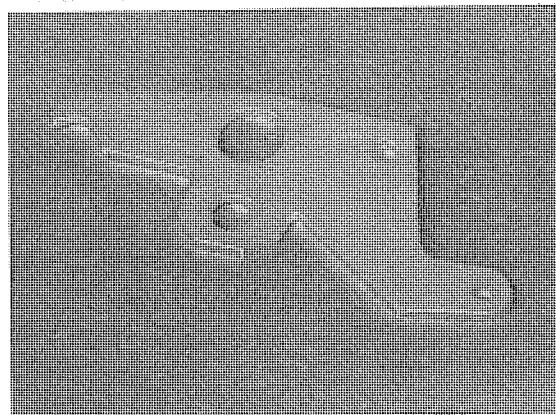


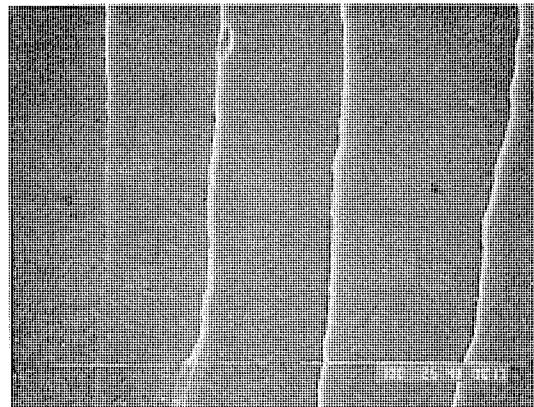
図 11. パルス周波数の面粗さに及ぼす影響

れるようになった。図 12. はアルミ合金 A 5052 の 2 mm の切断サンプルと、切断面の顕微鏡写真である。切断面には溶融金属の流れた筋がわずかにつくだけで、軟鋼の切断品質とほぼ同等である。

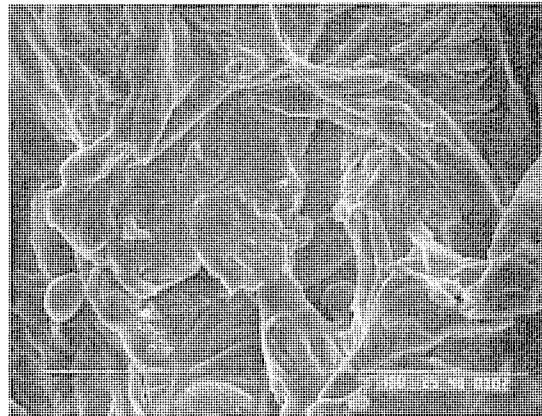
#### (2) 偏光の影響



(a) アルミ 切断サンプル



(b) 新方法による切断面顕微鏡写真



(c) 従来法による切断面顕微鏡写真

図 12. アルミ (2 t) の ドロスフリー 切断

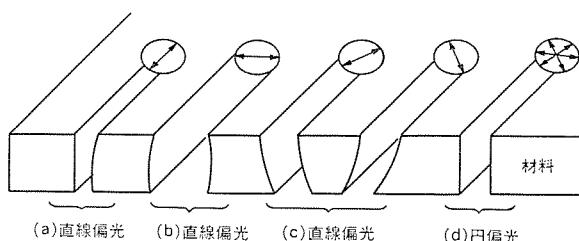


図 13. 偏光による切断面の状態

偏光には直線偏光、だ円偏光、円偏光及び偏光面の定まらないランダム偏光がある。従来からこの偏光と加工性能について、図13.に示すような重要な要因であることが指摘されている<sup>(3)</sup>。円偏光では加工性能に方向性がなく、どの方向にも均一な切断幅が得られる。一方、直線偏光やだ円偏光では、切断方向と偏光面の関係から切断幅の傾きにばらつきが生じ、等方性が失われる。

以上のような加工特性について、図 14. に示すようなモデルを用いて、偏光と精度との関係を定量的に表した。切断モデルは切断方向によって異なる切断幅の傾き量を測定するために、45°間隔の8方向で、中心に向ってスリットを切断し、被加工物裏面での対向するスリット中心間のずれ量  $L$  を測定する。図 15. は、板厚 2 mm の軟鋼 SPCC を切断した場合の最大スリットずれ量  $L_{max}$  と偏光度との関係を示したものである。偏光度が増すほど高精度な加工が可能になる。また、偏光度 32% で 2 mm の木材を切断した場合の最大スリットずれ量は、金属材料に比べて小さな量であった。これは、炭酸ガスレーザの波長 10.6  $\mu\text{m}$  の非金属材料に対する反射率が小さく、レーザ光を照射したときの切断面への入射角に依存せず、レーザ光のほとんどが吸収されるためである。偏光の影響は基本的には切断溝の傾斜に対するものであるから、板厚が厚くなるほど影響がでる。しかし、偏光度は経年変化を起こすため、その制御は難しく、通常各メーカーとも円偏光度 80% 以上を基準としているようである。

## 2. 4 三次元切断<sup>(3)</sup>

三次元加工の場合、その切断品質を決定する要因は多数あるが、特に、金属切断に対して最も重要な因子になるのが、加工ヘッド"ノズル先端と被加工物との間隔と相対的姿勢である。平板加工の場合、ノズル先端と被加工物との間隔、及び相対姿勢は常に一定に保たれるため、切断品質は安定しているが、三次元レーザ加工機の場合は、いかにして、常にこの関係を一定に保つかが重要なポイントとなる。

例えば、ノズル先端と被加工物との間隔が変化した場合、たとえ切断可能範囲であっても、切断幅が大きく変動する。また、相対姿勢に対しても「ロスフリー」の切断条件は極端に狭くなる。現状の三次元レーザ加工機は、ティーティングバックによる5軸同時制御が中心となるが、そのティーティング作業に対し、溶接ロボット以上に多大な時間をしているのは、正にこのノズル先端と被加工物の「相対的位置関係を一定に保つ」ことによるものである。また、アーチ溶接ロボットの場合、アーチそれ自体にセンシング機能があるため、被加工物の位置ずれに対しオンラインでの追随機能をもつが、レーザームは本質的にその機能を持たない。このため、種々のセンサ機能を装備することにより、いかに切断品質向上し、かつ、ティーティング時間を短縮できるかが重要なポイントとなり、最近では自動ティーティング機能をもつもの

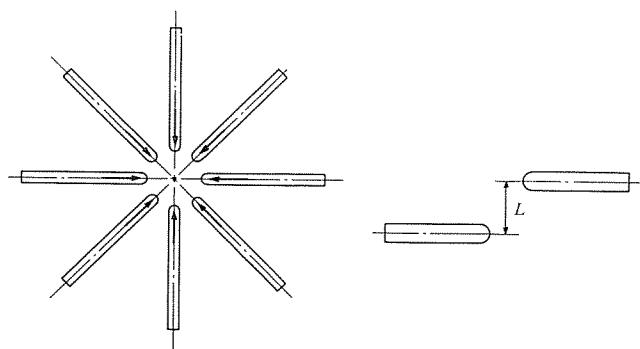


図 14. 切断モデル

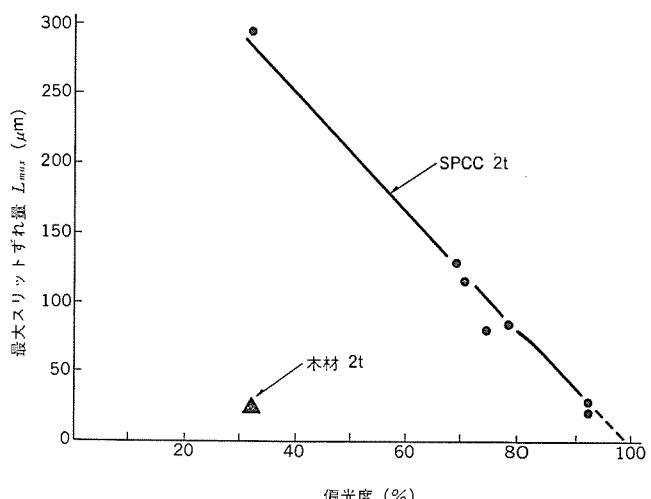


図 15. 円偏光度と最大スリットずれ量の関係

も開発されている。

例えば、ノズル先端と被加工物との相対関係を一定にするため、半導体レーザを応用したハイトセンサが装備されている。このセンサは、半導体レーザを光源に、位置検出装置(PSD)、高速演算プロセッサから構成されるもので、被加工物に照射された半導体レーザ光の正反射光及び拡散反射光を検出することにより機能する。センサ自身としては、検出精度  $\pm 5 \mu\text{m}$  の高精度センサであるが、オンラインでの追随精度は、2 m/min の切断速度時に  $\pm 0.5 \text{ mm}$  である。

三次元レーザの応用としては、現在既に60セット前後の三次元レーザ加工機が稼働中であるが、その適用業種の多くは自動車関連業種である。図16は自動車部品の加工例であり、内装品を中心とした樹脂加工は高速切断が可能なため、既に生産ラインへの導入が図られ、大きなメリットを発揮している。一方、ボディーパネルについては、穴加工やコーナ部での低速加工のため、平均速度が2m/min弱と小さく、生産ラインへの導入には今一歩の感がある。当面は試作車及び補修用のパネル部品への適用が中心となろう。

### 3. $L =$ 甘濾接

レーザ溶接は電子ビーム溶接と類似しており、次のような特長がある。

- (1) ビード幅が狭く、深い溶込みが得られ、熱ひずみの少ない高速溶接が可能である。
  - (2) レーザ出力の制御が正確にでき、板厚0.1mm程度までの薄板の高速溶接が可能である。

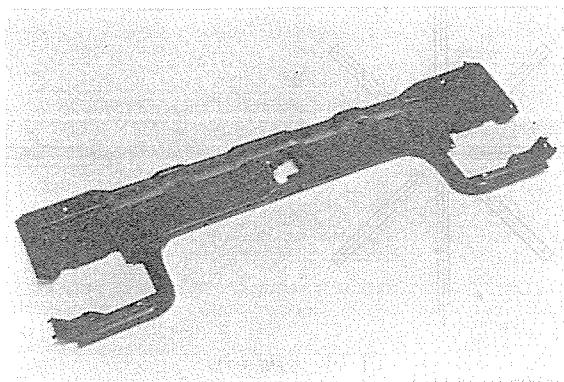


図 16. 自動車部品の切断例 (ポリプロピレン樹脂 1.0 t)

- (3) トーチが入らないような狭い部の溶接も可能である。  
 (4) 電子ビーム溶接と比べ、X線の発生もなく大気中で溶接でき、真空室が不要となるので治具が簡単になる。  
 (5) 異種材縫手・高融点材料の溶接性が良好である。

しかし、切断加工に比べ今までのところ、その応用は必ずしも活発とは言えない。このことは、後述する熱処理にもあてはまることがあるが、従来加工法（例えば、TIG, MIG, プラズマーアーほか）に比べて、装置のイニシャルコストの大きいことが導入を阻害している大きな要因であろう。ところが、このような問題を克服して実際に応用された例を見ると、①材料費の低減（歩留の向上、一体物から

組合せ構造）、②前後の作業工程の省略（ひずみ取りなどの廃止）、③加工時間の短縮（生産性の向上）、④他に加工法のないもの（極薄板などへの適用）などのメリットを引き出しており、ダイヤモンドカッタ、ブーリ、ステータコアなど数十例にのぼる。

### 3.1 溶接加工技術

リングモードの 20 kW 級 CO<sub>2</sub> レーザを用いた大出力レーザ溶接技術において、以下のことを明らかにしている<sup>(4)(5)</sup>。ビーム拡大率  $M$  が大きいほど深溶込みが得られ、アスペクト比（溶込み深さ／ビード幅）の大きな溶込み形状となる。 $M$  値が大きくなるに従い、ハンピング発生限界が低速側に移行する。低速度条件下では  $F$  値 ( $F = f/D$ ,  $f$  : レンズ焦点距離,  $D$  : レンズに入射するビーム径) を約 4 ~ 9 まで変化させても溶込み深さに大きな変化はみられない。ただし、 $F$  値が大きくなると表面ビード幅が広くなり、溶込み形状はワインカップ状を呈するようになる。また、高速域では  $F$  値の増大とともに溶込み深さは急に浅くなる。ステンレス鋼の溶接において、出力 10 kW、溶接速度 1 m/min の条件下で 14.5 mm の溶込みが得られる<sup>(4)</sup>。

図 17. に示すように、板厚 3 ~ 9 mm のステンレス鋼の突合せ溶接において、ワイヤを供給しないときの最大許容ルート間隔は 0.1 mm であるが、ワイヤを供給することによって最大許容ルート間隔を 0.8 mm まで拡大することができる<sup>(5)</sup>。鋼板の超薄板溶接技術では、シングルモード、マルチモードと溶接条件との関係、突合せ面の切断方法とルート間隔との関係などを明らかにしている<sup>(5)</sup>。超薄板の溶接にはマルチモードよりもシングルモードが適している。

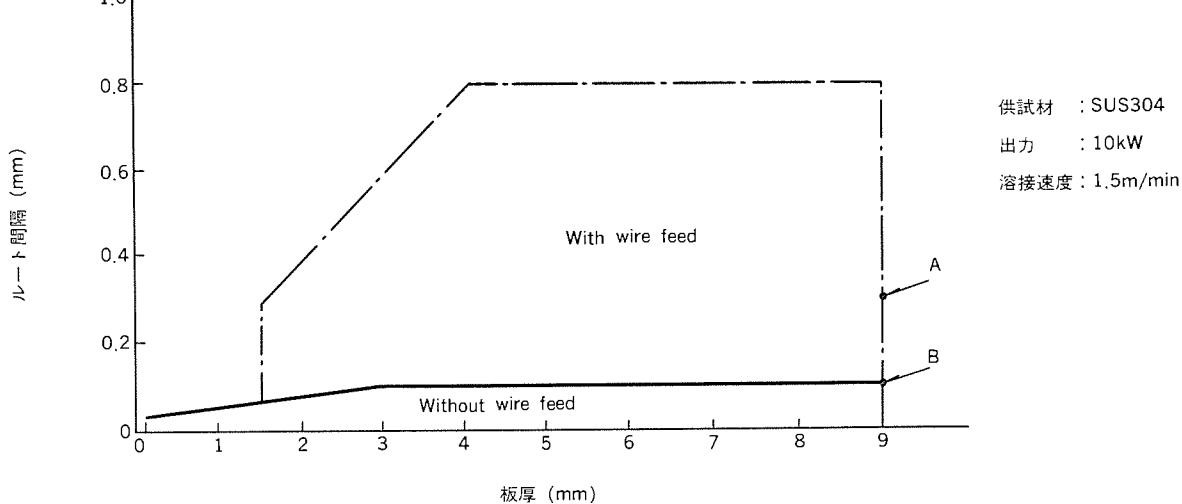
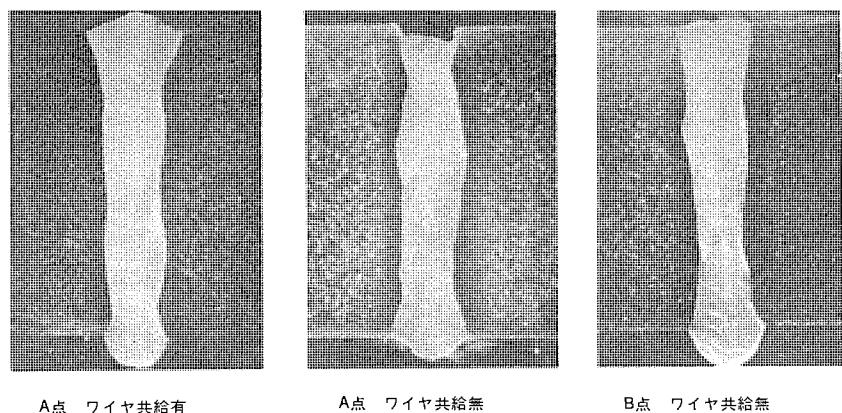


図 17. 許容ルート間隔

表 2. レーザ溶接の適用例<sup>(7)</sup>

分 野	材 料	レーザ溶接の特徴	利 用 方 法	適用のメリット	適 用 例
鉄 鋼 部 品	低 炭 素 鋼 中 炭 素 鋼 ス テ ン レ 斯 鋼 け い 素 鋼 板	低 溶 ひ ず み 接 込 み	・後熱処理省略 ・MIGの代替 ・抵抗溶接の代替 ・プラズマ溶接の代替	作 業 性 改 善 生 産 性 向 上 信 頼 性 向 上	鉄 鋼 用 コ イ ル バ イ プ
機 械 部 品 (自 動 車) (機 核 一 般)	Zn め つ き 鋼 低 炭 素 鋼 中 炭 素 鋼 低 合 金 鋼	低 高 ひ 速 ず み 高 溶 接	・シーム溶接の代替 ・単純形状に加工した後組合せ溶接 (鍛造・プレス併用)	生 産 性 向 上 信 頼 性 向 上 部 品 の 小 型 軽 量 化	燃 料 タ ン ク ミ ッ シ ョ ン ギ ャ 自 動 变 速 機 部 品 エ ン ジ ン 部 品 ホ イ ー ル
精 密 部 品 (航 空 機) (計 測 器)	銅 合 金 ス テ ン レ 斯 鋼	精 低 密 ひ ず 溶 低 溶 ひ ず 接 み	精 密 機 加工後溶接	部 品 精 度 向 上 生 産 性 向 上 信 頼 性 向 上	P A A ア ン テ ナ 精 密 油 壓 部 品 航 空 機 部 品 計 測 器 部 品
大 型 構 造 体 (重 工 構 造) (重 金 属 電 範)	ス テ ン レ 斯 鋼 低 炭 素 鋼	深 低 溶 ひ ず 溶 込 入 み 热	溶接前に機械加工をし、溶接後のひずみ取省略	生 産 性 向 上 作 業 性 改 善 信 頼 性 向 上	压 力 容 器 真 空 容 器 機 部 品

出力 300 W で板厚 0.15 mm の鋼板の突合せ溶接において、ビームの焦点の位置をモードに対応して最適化した場合、溶接可能な溶接速度は、シングルモードで 3 ~ 7 m/min、マルチモードで 4 ~ 6 m/min である。突合せ面の各切断方法によって切断時にばらつくルート間隔の最大値は、ダブルシヤー切断で 130 μm、シングルシヤー切断で 70 μm、シヤー切断後ミーリング加工で 35 μm、レーザ切断で 30 μm である。各切断方法による溶接可能な最大許容ルート間隔は、ダブルシヤー切断で 40 μm、シングルシヤー切断で 50 μm、シヤー切断後ミーリング加工で 60 μm、レーザ切断で 55 μm である。したがって、超薄板鋼板の突合せ面の加工は、シヤー切断後ミーリング加工又はレーザ切断が適している。

非鉄金属の溶接技術及び異種金属の溶接技術関係では、アルミニウムの溶接において Ar、N<sub>2</sub>シールドガスにO<sub>2</sub>ガスを混合することが有効であること<sup>(6)</sup>、また、銅-ステンレス鋼の溶接において He シールドガスにO<sub>2</sub>ガスジェットを補助することが有効であることを明らかにしている。アルミニウムの溶接において、シールドガスとしてN<sub>2</sub>やArにO<sub>2</sub>を混合したガスを用いることによって、溶融池上にアルミナや窒化アルミが形成されてレーザビームの吸収が促進された結果、ビームホールが安定に形成され、ビームのウォールフォーカシング効果と相まって被溶接材へレーザビームのエネルギーが効率良く投入されるので深溶込みが実現できる。出力 2 kW で厚さ 3 mm の板を速度 0.2 m/min で突合せ溶接することができる。このような特長をいかして、自動車、電機関係の生産工場でレーザ溶接の採用が報告されており、その例を表 2. に示す<sup>(7)</sup>。

#### 4. 熱 处 理 加 工

レーザ熱処理には、表面焼入れ、表面溶融、クラッディング、コーティング強化、合金化などがあるが、実用化レベルに達しているものは、表面焼入れとクラッディング(肉盛)の一部を除いて、まだ少ない。焼入れでは、高周波焼入れや浸炭硬化があり、クラッディングでは、プラズマアークなどの安価な方法があることや、高価な特殊光学装置の必要なことが大きな理由である。

実用例としては、国外の例になるが、船舶用ディーゼルエンジンのシリンドライナの焼入れ、自動車用パワーステアリングギヤハウジング内面焼入れやエンジンシリンドライナの焼入れなどが報告されており、一部国内でも実施例が見られる。

#### 5. む す び

以上、レーザ加工技術の動向と加工事例について紹介した。レーザ加工法は、他の加工法の単なる代替とするだけではコスト面での課題は残るが、附加価値の高い加工を実現できることで、着実にその適用範囲を広げてきた。今後も加工機性能の充実や加工技術開発及び装置のコストダウンなどの努力により、レーザ加工は飛躍的に発展していくものと予想される。

終わりに、本稿の執筆にあたり、資料の提供及び貴重な助言をいただいた、長崎製作所、伊丹製作所、名古屋製作所部品製造部の関係各位に深く感謝する次第である。 (原稿受付 昭 62-4-1)

#### 参 考 文 献

- 木谷ほか：レーザ切断性能に及ぼすパルス特性の影響、第 109 溶接法資料 (1986)
- F. O. Olsen : Laser '81. Opto-Electronic 5, Inter, Congress June 1/4 (1981) München
- 猪谷ほか：三菱三次元レーザ加工機《MELCUT-3 DCM》、三菱電機技報、Vol. 59, No. 9 (昭 60)
- 平本ほか：大出力CO<sub>2</sub>レーザ溶接技術、三菱電機技報、60, No. 11, p. 65 (昭 61)
- A. Shinmi et al: Laser Welding and It's Applications for Steel Making Process, ICALEO '85
- 平本ほか：アルミニウム材のレーザ溶接に関する基礎的検討、溶接学会春季全国大会講演 (1987) 予定
- プレス技術、第 23 卷、第 6 号 (1985)

## 電子ビーム加工機

原 且則\* 荒川及蔵\*  
 桂田重穂\* 村上英信\*\*  
 山本吉廣\*

## 1. まえがき

電子ビーム加工法は、高エネルギー密度ビームにより、必要な部分を必要量加工できるため、VA設計の有力な手段として認められてきており、装置も特殊加工機の位置付けから生産機へと定着しつつある。生産現場で加工機が使われる条件としては、単に加工機能が優れているだけでは不十分で、他の加工機と同様の作業環境、作業管理のもとで、安定した生産が確保できる必要がある。また、近年は作業の中の人的要素を極力減らす要求が増えてきている。

電子ビーム加工機には、対象ワーク及び生産形態によって様々な種類があり、大別すると特殊材料又は大物部品を対象とした個別生産機と、小物部品を対象とした量産機とに分けられる。

当社では、生産現場に適合できる電子ビーム加工機を合言葉に、永年にわたる研究・開発の結果、個別生産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する一方、量産機ではこれらの技術に加え、陰極の長寿命化、装置のコンパクト化、自動ライン化により、量産ワークを長時間安定に生産できる製品シリーズを完成した。

本稿では、これら電子ビーム加工機シリーズ及び生産現場に適合させるための技術の紹介を行う。

## 2. 電子ビーム加工機シリーズ

当社では昭和54年に自動車の自動変速機部品を対象とした量産機を納入して以来、ワーク形状、生産形態に応じて種々の製品を納入しております、その実績は百数十台にのぼる。

以下にその製品シリーズについて説明する。

## 2.1 個別生産機

航空機、重工業、電機分野を中心に、特殊材料、大型構造物を対象とした電子ビーム溶接機を製品化しており、その主な仕様を表1に示す。このシリーズには、ワーク寸法が1m程度以下のものに対し、ワークを移動させて溶接する汎用型CNC電子ビーム溶接機と溶

表1. CNC電子ビーム溶接機シリーズの主な仕様

汎用 タイプ	60 kV 3 kW 6 kW 9 kW 15 kW 30 kW	CNC制御 チャンバサイズ: フリーサイズ 排気方式: バッヂ式、高真空/低真空 テーブル: XYテーブル、回転テーブル A/C軸、多軸回転テーブル、 ランアウトテーブル 電子統: 下向き/横向き	溶接線検出装置 ITVシステム ワイヤフィーダ モニタリング システム アーキング ノンストップ システム
	100 kV ~50 kW		
	150 kW ~100 kW		
ムービング タイプ	70 kV ~30 kW	CNC制御 チャンバサイズ: 3M以上のもの 排気方式: バッヂ式、高真空/低真空 テーブル: 回転テーブル A/C軸 ランアウトテーブル 電子統移動: (X, Y, Z, θx, θy) 5軸	シーム トラッキング システム

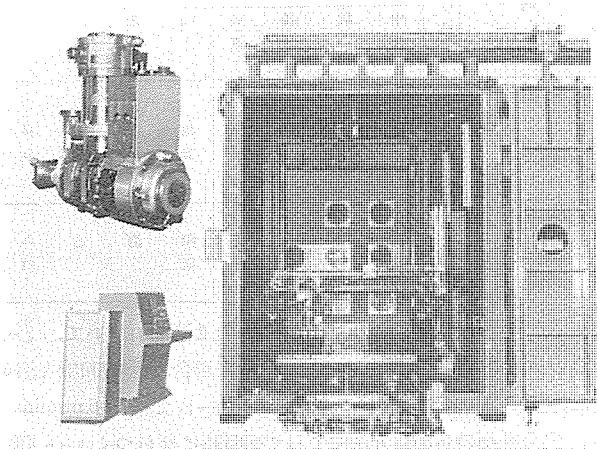


図1. ムービングガン式電子ビーム溶接機

接室内で、電子銃を移動させて溶接するムービングガン式電子ビーム溶接機とがあり、それぞれ定格出力が3~100 kW、15~30 kWのものが標準化されている。

図1.は、重工業、航空機などの部品を対象とした30 kWムービングガン式電子ビーム溶接機で、厚板で大型の構造物を5軸(三次元直交軸&回転2軸)の自由度を持つ電子銃が移動しながら溶接を行う。この溶接機は、特にワークが大きく、溶接室寸法が3m以上になる場合、狭く奥深い箇所に電子銃を近づける必要がある場合、電子銃を傾斜させて溶接する場合に威力を発揮する。

また、図中左上部の電子銃には、LaB<sub>6</sub>陰極を採用し、電子銃の小型化と高輝度化を実現している。

## 2.2 量産機

自動車工業分野を中心に、小物の回転体を対象とした量産用電子ビーム溶接機を標準シリーズ化しており、その主な仕様を表2.に示す。このシリーズでは、ワークの寸法に応じて溶接室寸法は、□250 mm、□350 mm、□500 mmの3段階が用意され、その各々について排気装置も4段階の能力のものを選択することができる。ワークセットと溶接とが別の場所で行える2ステーション型電子ビーム溶接機では、溶接期間中に次のワークのセットができるので、タクタイムを短縮できるうえ、ロボットなど搬送装置と組み合わせれば、自動溶接ラインを構成できる。

図2.は超コンパクトにまとめ上げた2ステーション型電子ビーム溶接機であり、図3.はミッショングリットの洗浄→圧入→溶接→検査の工程をライン化した自動溶接ラインである。

このように各種ワークに適合できるシリーズがそろっており、タクタイムは、ワークの溶接時間により異なるが、概略20~60秒のものが選択できる。特殊なものでは、更にタクタイムを短縮するため、実質上、排気時間を無くした連続排気システムの溶接機も多数稼働している。

表 2. 電子ビーム溶接機の標準シリーズ仕様

共通仕様	定格 電子銃 電子銃排気 電子銃準備時間 高電圧電源 制御装置	6 kW (60 kV, 100 mA) 棒状熱陰極 (φ2), 1段収束式 ターボ分子ポンプ使用 15分 ガス絶縁式, 高周波インバータ制御, 6 kW, 60 kV, Duty 30% プログラマブルコントローラによる統括制御				
	型名□□□-□□ ステーション数 溶接姿勢 加工室内寸法 加工テーブル	1 VR-25※ 2 VR-25※ 1 VR-35※ 2 VR-35※ 1 VR-50※	2 VR-25※ 1 VR-35※ 2 VR-35※ 1 VR-50※	1 VR-35※ 2 VR-35※ 1 VR-50※	2 VR-35※ 1 VR-50※	1 VR-50※
	※ 下記加工室排気時間の (S), (H), (M), (L) から選択する					
	ステーション数	1ステーション	2ステーション	1ステーション	2ステーション	1ステーション
	溶接姿勢	下向き (V) 又は横向き (H)				
別仕様	加工室内寸法	□250×200 H		□350×300 H		□500×500 H
	電子銃移動ストローク (手動)	(下向き) 75 mm (横向き) 50 mm		(下向き) 125 mm (横向き) 100 mm		(下向き) 175 mm (横向き) 175 mm
	加工テーブル回転数	2~20 rpm	2~20 rpm	2~20 rpm	2~20 rpm	2~20 rpm
	加工排気時間 概略 (60 Hz/50 Hz) sec	超高速 (S) 4/5 s	高速 (H) 5/6 s	中速 (M) 6/8 s	低速 (L) 12/15 s	(S) 7/9 s (H) 9/12 s (M) 12/15 s (L) 23/28 s
	マシンタイム (排気, 溶接外時間)	扉開閉 ワーク着脱	を除き 8 s	12 s	扉開閉 ワーク着脱	を除き 8 s
標準オプション	観察用望遠鏡	○	○	○	○	○
	溶接線検出装置	—	—	○	○	○
	電子銃自動移動 (NC 制御ほか)	○	○	○	○	○
	A軸回転テーブル/治具	—	—	—	○ (治具)	○
	テーブルセンター (A軸対応)	—	—	—	—	○
	多軸回転テーブル	—	—	—	—	○
	ロボット接続インターフェース	—	○	—	○	—
	溶接条件チャネル制御	○	○	○	○	○
	溶接治具 (上治具・下治具)	○	○	○	○	○

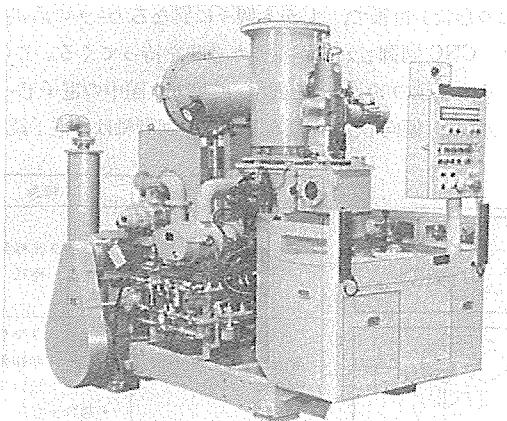


図 2. 2ステーション型電子ビーム溶接機

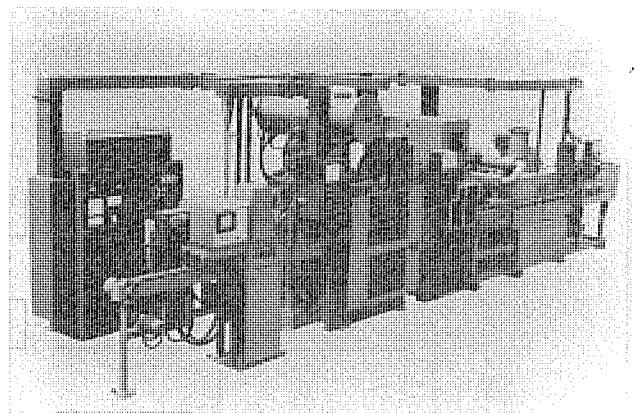


図 3. ミッショングヤ用一貫溶接ライン

### 3. 生産ライン適合技術

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。個別生産機では、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、生産部品の品質の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。

ここでは、個別生産機では主に高性能化、多機能化、自動化技術を、量産機では安定化技術を中心に紹介する。

#### 3.1 個別生産機適合技術

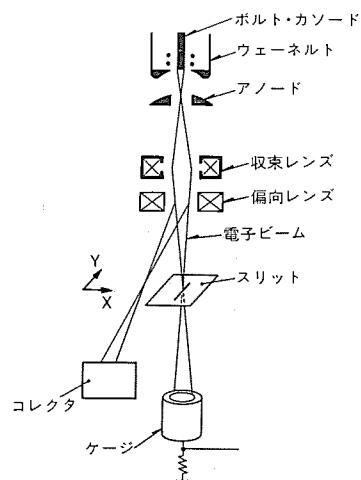
##### 3.1.1 電子ビーム系

###### (1) 電子ビームの高性能化

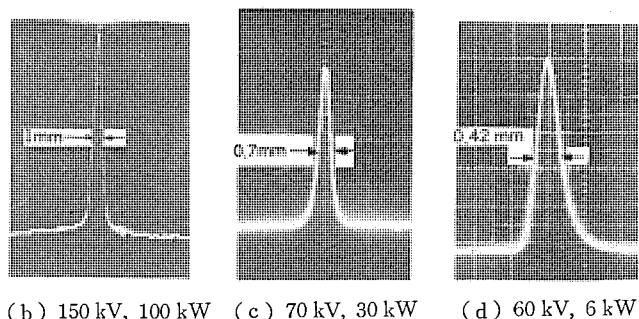
当社では、コンピュータを用いた電子銃設計技術と、スリット試験法な

どによる種々の解析・検証技術とを保有しており、この技術を用いて、低電圧・高性能電子銃を始め用途に応じて機能バランスが取れた各種電子銃を自社開発している。これら電子銃に共通な長寿命の棒状陰極は、その集束ビーム形状が真円であり、高性能ビームの基本となっている。

図 4. (a) 電子ビームのエネルギー分布測定用スリット試験法及び各電子銃のエネルギー分布を示す。同図(b)に示す 150 kV, 100 kW 出力ビームは、加工性能を最優先に設計したので、集束パワー密度が高く、焦点深度の大きいビームが得られている。このビームの貫通能力は、100 kW, 0.08 m/min で 300 mm 以上である。(c), (d) の 30 kW, 6 kW 出力ビームでは、その加速電圧は、発生 X 線強度、アーリングの影響などを考慮して低電圧型としているが、その加工性能は高く、ムービングガスの例では 30 kW, 0.3 m/min で 100 mm の貫通能力をもち、焦点深度は約 40 mm である。



(a) スリット 試験法



(b) 150 kV, 100 kW (c) 70 kV, 30 kW (d) 60 kV, 6 kW

図 4. 電子ビームエネルギー分布測定法とそのエネルギー分布

## (2) 電子ビームの多機能化

電子ビームは、偏向コイルへの電流を高速制御することにより、ビームの照射位置、ビームの移動速度及びビームの停留時間を自在に制御できる。高速偏向装置を用いれば、ビームの移動速度は、200 m/s程度、ビームの1ドット当たりの停留時間は、ドット溶融時10分の数ミリ秒、非溶融時数マイクロ秒程度で制御できる。

図5は電子ビーム高速偏向の応用例をまとめたものである。コンピュータプログラムに従って、パターン形状を瞬時に溶融又は焼入れすることができ、ビームを時分割して複数にすれば、同時に多箇所の溶接が可能になる。

## (3) アーキング対策

アーキングは電子銃室内の高真空中放電現象で、その発生は不可避である。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し、電子銃の耐圧設計、材料選定にも十分注意を払っている。ところが発生確率は低くても、対象ワークが高価な特殊材料や大型構造物の溶接では、アーキングによる溶接の途中停止は致命傷となる。そこで、高真空中放電の優れた絶縁回復特性に着目して、アーキングを検知した場合、電源を遮断せず、絶縁の回復を待って加速電圧を速やかに復帰させるアーキングノンストップ電源システムを製品化した。

図6はアーキングノンストップ電源システムのブロック図及び電源部の電圧・電流波形を示す。

## 3.1.2 制御系

## (1) 加工条件のCNC化

溶接部の形状が複雑で、しかも個々に異なるワークの溶接を行う場合には、CNC制御システムが重要な意味を持ってくる。このシステムにおける電気軸のパラメータを表3に示す。図中の電子ビーム出力、集束レンズ電流、偏向レンズ電流などの電気制御軸は、電子銃の移動

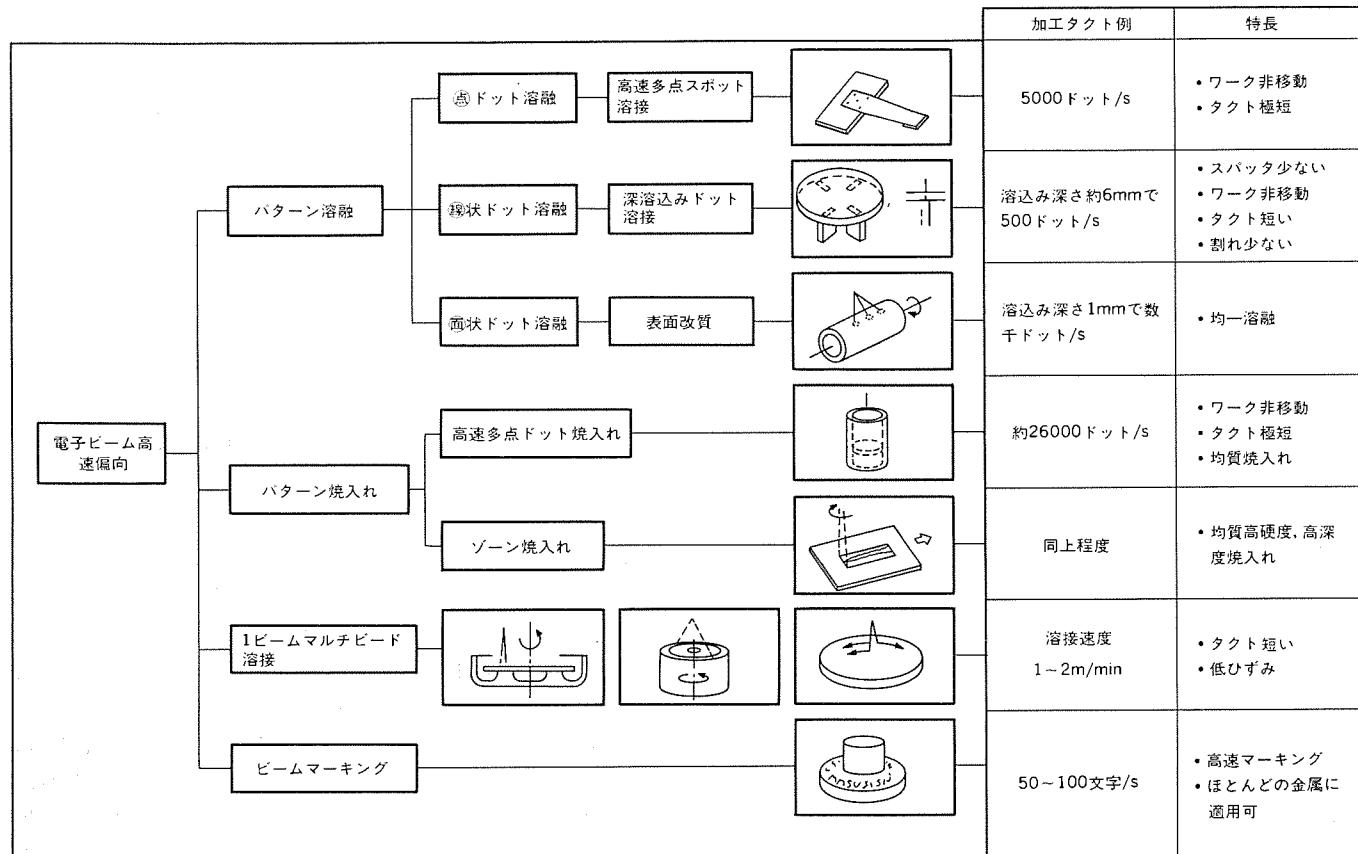
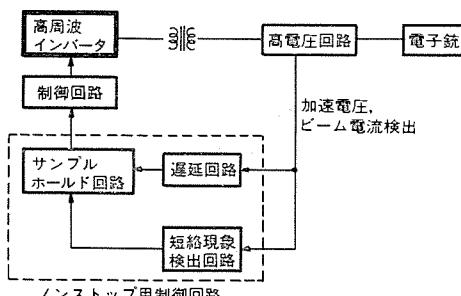


図5. 電子ビーム高速偏向の応用例



(a) 電源システムのブロック図

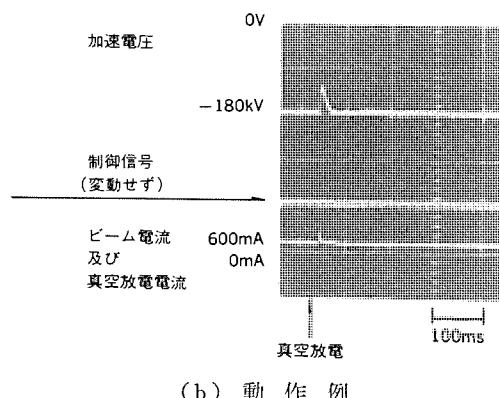
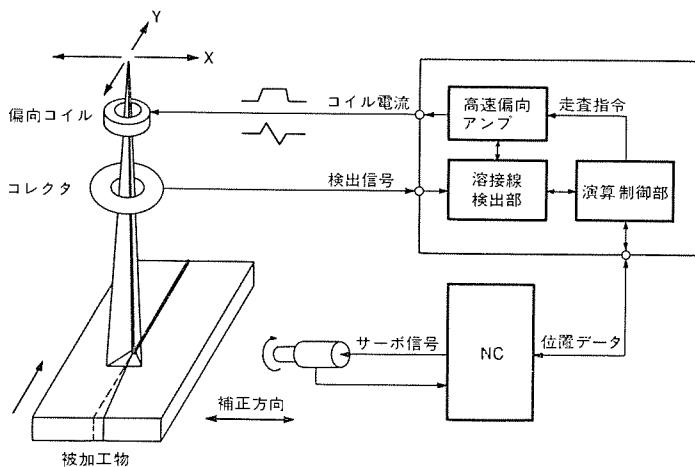


図 6. アーキングノンストップ電源システム

軸、テーブルの回転軸などの機械軸と同期して制御することができる。溶接プログラムのデータは、主駆動軸の NC プログラムの位置指令ごとに設定でき、しかも同期して出力されるので、複雑な形状のワークの溶接に対応できるうえ、溶接箇所が複数個ある場合でも連続して自動的に溶接することができる。

#### (2) ビーム位置制御の自動化

ワークのセット位置、加工精度、溶接部の形状のうち、どの誤差を補正するかによって自動化のポイントも異なってくる。当社ではワークのセット位置のみに誤差がある場合には、溶接開始位置のみを補正する溶接線自動目合わせシステムが、ワーク加工時の誤差も加わった場合には、自動ティーチング・プレーバックシステムが、溶接線の形状が



(a) システム構成

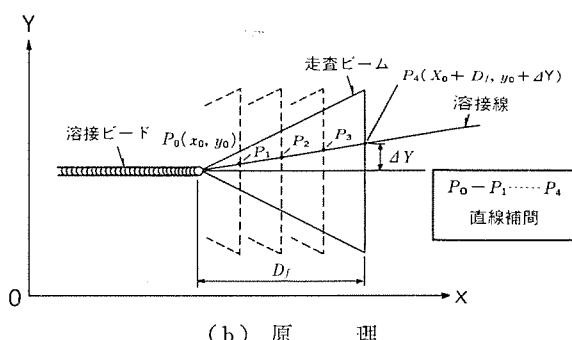
表 3. 加工条件の NC 設定コード

NC 設定コード	内 容	備 考
B 30	収束レンズ電流設定	単位: mA
B 32	アップスロープ時間	単位: ms
B 33	ダウンスロープ時間	単位: ms
B 34	加速電圧設定	単位: ×100 V
B 36	ビーム電流設定	単位: mA
B 37	偏向レンズ電流設定 (X 軸 DC)	単位: mA
B 38	偏向レンズ電流設定 (Y 軸 DC)	単位: mA
B 40	収束レンズ電流設定 (スキャン)	単位: mA
B 44	加速電圧設定 (スキャン)	単位: ×100 V
B 45	ビーム電流設定 (スキャン)	単位: ×10 <sup>-2</sup> mA
B 50	ワイヤフィーダ供給速度	×10 mm/min
B 60	傾斜ビーム用電流設定 初期値	単位: mA
B 61	傾斜ビーム用電流設定 中間値	単位: mA
B 62	傾斜ビーム用電流設定 最終値	単位: mA
B 63	傾斜ビーム用スロープきざみ回数 (前半)	単位: 回
B 64	傾斜ビーム用スロープきざみ回数 (後半)	単位: 回
B 65	傾斜ビーム用スロープ時間 (きざみ1回当たり前半)	単位: ms
B 66	傾斜ビーム用スロープ時間 (きざみ1回当たり後半)	単位: ms
B 70	傾斜ビーム用レンズ電流設定 初期値	単位: mA
B 71	傾斜ビーム用レンズ電流設定 中間値	単位: mA
B 72	傾斜ビーム用レンズ電流設定 最終値	単位: mA
B 73	傾斜ビーム用スロープきざみ回数 (前半)	単位: 回
B 74	傾斜ビーム用スロープきざみ回数 (後半)	単位: 回
B 75	傾斜ビーム用スロープ時間 (きざみ1回当たり前半)	単位: ms
B 76	傾斜ビーム用スロープ時間 (きざみ1回当たり後半)	単位: ms

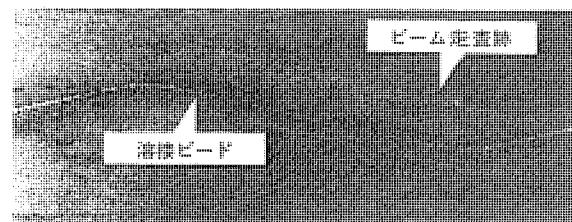
複雑で簡単には近似できない場合には、オンラインシームトラッキングシステムが選択できる。

図 7.にオンラインシームトラッキングの考え方を示す。現在のビーム位置を  $P_0(x_0, y_0)$  とし、点  $P_0$  から極短時間、溶接部の前方を縦目とクロス方向にビームを高速走査して、縦目位置  $P_4$  を検出し、そのずれ量を含む座標  $(x_0 + D_f, y_0 + \Delta Y)$  を記憶する。シームトラッキングは、既に記憶されている  $P_1 \sim P_3$  を含む  $P_0 \sim P_4$  間の各点を直線補間する形で実行される。

また、ワークディスタンスのセット誤差を自動補正するものとして、オ



(b) 原理



(c) 加工例

図 7. オンラインシームトラッキングシステム

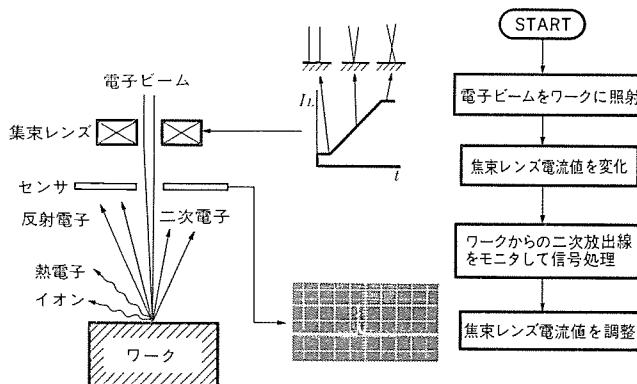


図 8. オートフォーカスシステム

ートフォーカスシステムがある。図 8. に示すように、まず電子ビームを照射した状態で集束レンズ電流値を変化させ、ワークから発生する二次電子を検出する。この値がピークになる所が焦点位置であり、このときの値に集束レンズ電流値を合わせる。このシステムは、ワークが斜めにセットされた場合などには特に有効である。

### 3.2 量産機適合技術

#### 3.2.1 電子ビーム系

量産機においては、電子ビームの性能向上もさることながら、いかに安定した特性を維持するかが重要なポイントである。

##### (1) 陰極の長寿命化

陰極部は高温に加熱された状態で、加工室から様々な影響を受け蒸発・変形し、消耗する消耗品である。当社独自の棒状陰極は、直熱型のリボン形陰極などと比べ以下の点において優れた寿命特性をもっている。

(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、フィラメント断線までの時間が長い。

(b) 堅ろうな構造であるので、経時的な熱変形による加工特性の変化が少ない。

図 9. は  $\phi 2$  陰極の加熱時間に対する溶込み深さと、ビード幅の特性を示したもので、経時変化の割合が少ないことがわかる。陰極寿命はまたその使用方法により、更に長寿命化することが可能となる。その一つは、加工条件を陰極が消耗しても変化しにくいように選定するもので、ビームの焦点をワークより上部に設定するのも効果がある。また、一つは陰極の使用時間に対して定期的に、パラメータ調整するもので、これには正しい管理が必要である。

最近のあるユーザーにおける  $\phi 2$  陰極の陰極寿命は、約 40 個の平均で 400 時間以上であった。

##### (2) アーキング対策

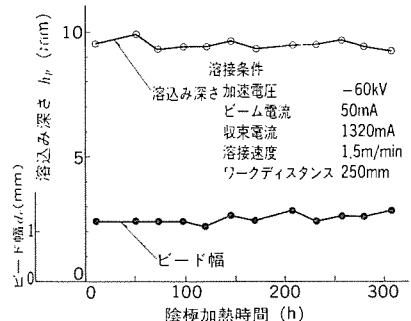


図 9. 陰極加熱時間対溶込み深さ、ビード幅特性

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。当社の電子銃は、コンピュータを用いた耐電圧設計に加え、加工室からの汚れにも強い構造となっているので、その頻度は少ない。また、アーキング時のエネルギーを極力抑えた電源システムであるので、通常のアーキングでは加工品質への影響はほとんどなく、ライン停止に至らない。しかしながら、加工室での油蒸気など大量のガスの発生は、電子銃汚染の原因となるので、棒の洗浄及び乾燥工程には十分注意を払う必要がある。

#### 3.2.2 制御系

量産機においても、単一部品の量産から多品種のロット生産へ、更には多品種のランダム流動へと生産形態が変化しつつあり、装置における自動化の要求も複雑化してきている。

##### (1) ワーク判別機能とチャネル制御

多種類のワークが加工室に入る手前で判別し、その結果をチャネル制御器に入力することにより、ワーク固有の加工条件に設定して加工するものである。チャネル制御部には、登録ワークごとに、連続溶接／スキップ溶接／仮付け溶接など溶接の種類と、電子ビーム出力、フォーカス電流などの条件が記憶されている。

##### (2) 加工ラインの信頼性向上

電子ビーム加工機の電気的加工条件は、個別に安定化制御されているうえ、管理幅を設定したモニタ回路で、その変動状態をチェックしているので、装置としての信頼度は向上している。更に、電子ビーム自動溶接ラインでは、接合強度に直接関係する溶込み深さをチェックする超音波探傷器を用いた検査装置を組み込み、総合的な品質向上を図っている。

#### 3.2.3 真空排気系

電子ビーム加工は、真空雰囲気で行われるため、排気系の能力が、加工品質、生産能力に直接影響を与える。

##### (1) 排気時間の短縮化

加工室の真空排気時間は次式で与えられる。

$$t_i = \sum_i \frac{V}{K_i \alpha_i S_i} l_n \frac{P_{i-1}}{P_i - \frac{Q(t)}{K_i \alpha_i S_i}}$$

ここに  $t$  : 排気時間 (s),  $V$  : 排気容積 (l),  $P$  : 排気圧力 (Torr)

$S$  : 排気ポンプの排気速度 (l/s),  $K$  : 排気系の特性係数

$\alpha$  : ポンプの特性係数,  $Q(t)$  : 放出ガス量 (Torr · l/s)

上式から排気時間を短縮するには、必要最小限の加工室寸法に抑

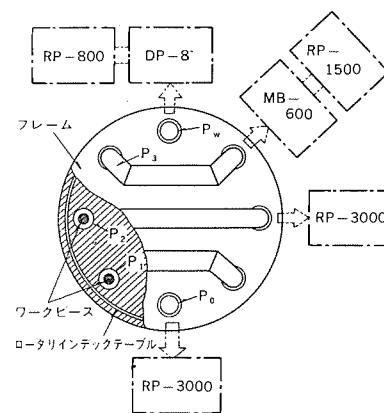


図 10. 連続差圧排気系のブロック図

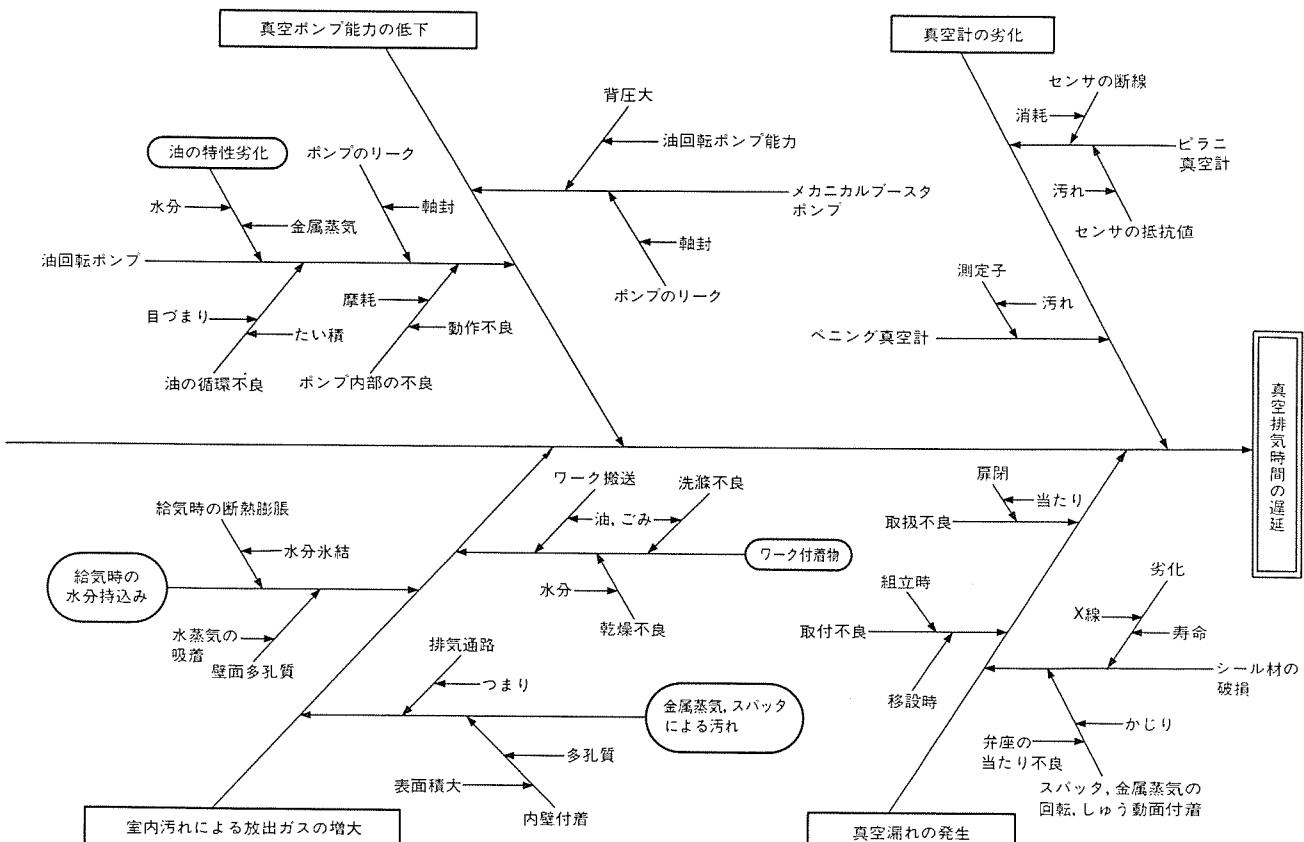


図 11. 電子ビーム加工機における真空排気時間遅延の特性要因図

え、ポンプの排気速度を大きくとればよい。当社では、タクタイムに占める排気時間の割合を0にするシステムを実用化している。図10.はこのシステムのブロック図で、ワークの搬出入口と加工室との間に3段のギャップシール部を設けて、差圧排気することにより、加工室を常に所定の真空圧力に維持できる。この方式を用いた例として、タクタイム12秒(溶接時間6秒、機械動作時間6秒)で高真空( $\sim 10^{-4}$  Torr) 雰囲気の溶接ができる装置がある。

#### (2) 排気時間の安定化

図11.に排気時間の遅延の特性要因図を示す。その要因のうちの主なものは、壁面からの放出ガスとポンプ能力の低下である。通常、特性悪化の引き金となるのは、加工中に発生する金属蒸気及びスパッタで、加工室壁面に付着して加工室給気時に大気中の水分を吸着するうえ、排気時には蒸気となって排気ポンプに混入し、油の能力を劣化させる。

##### (a) ドライエアの給気

真空室内に水分を含んだ空気を給気すると、圧力差のため流入空気は断熱膨張して壁面の温度が低下し、一部は氷結する。この氷が排気の際、圧力の低下とともに再び水蒸気となり、ポンプの負荷となる。そこで、給気ガスをドライエアに置換すると水分の凝縮が避けられ、排気の際の水蒸気分が少なくなる。したがって、金属蒸気の付着による加工室内壁の表面積増加の影響が軽減され排気時間が安定化する。

##### (b) タンデム排気方式

ポンプ能力の低下は、油回転ポンプで最も顕著である。これは、直接排気能力に影響を与える油が、排気ガス中の水分や加工油により特性劣化するためである。この結果メカニカルブースタポンプの背圧が高くなり、このポンプの排気能力が引き出せなくなり、中真

空領域の排気能力が大幅に低下する。タンデム排気方式は、メカニカルブースタポンプの背圧を、常にその動作圧力に応じて低下させられるよう、シリーズに接続したもので、油回転ポンプの特性劣化を補って真空排気時間を安定化する。

#### (c) 排気系の維持管理

金属蒸気などの付着により壁面の吸着面積は徐々に増加し、放出ガス増大の要因となるため、これを定期的に除去する必要がある。排気系の維持管理としては、図8.の特性要因図の要因管理を行うことが必要である。

## 4. むすび

以上、生産現場で稼働中の電子ビーム加工機の技術について述べた。ここで挙げたビームの高性能化、多機能化など個別生産機の技術は量産機へ、また装置の安定化など量産機の技術は個別生産機へと相互に影響し合って、より高度な加工機へと発展するであろう。

また、このような技術に加え、この加工機の特性を十分に理解し、消耗品管理を中心とした維持管理を行うことにより、より信頼性の高い加工機へと完成され、そして多用途加工機械としてFAの中核機として成長していくことであろう。

## 参考文献

- 原ほか：電子ビーム溶接研査資料，No. EBW-390-86
- 村上ほか：電子ビーム溶接研査資料，No. EBW-374-85
- 石見ほか：溶接学会誌，4，No. 1 (1986)
- 原ほか：三菱電機技報，58，No. 5, p. 47 (昭59)
- 安永ほか：三菱電機技報，55，No. 2, p. 26 (昭56)
- 平本ほか：三菱電機技報，59，No. 5, p. 56 (昭60)
- 阪本ほか：電子ビーム溶接研査資料，No. EBW-358-85

## 電子ビーム加工技術

内海晴之\* 山根義雄\*\*  
大田正雄\* 丸山敏郎\*\*\*  
平本誠剛\*\*

## 1. まえがき

これまで電子ビーム加工は、真空中で行われる特殊な溶接程度に理解されていて一般的ななじみは薄く、欧米においては1950年後半から、原子力産業、航空機産業など特定の分野で利用され始め、我が国では、主に自動車産業における量産部品の精密溶接に利用されてきた。しかし、最近は電子ビーム加工機そのものの大出力化、パワーエレクトロニクス及びCNC技術の発達により装置の機能が大幅にアップされて、利用分野も宇宙・航空機産業から、家電、OA機器に至るまで、あらゆる産業で利用されるようになってきた。また、電子ビームの持つ優れた性質、すなわち、高エネルギー密度とビーム制御性の発揮により、溶接のみならず、穴あけ、刻字・マーキング、表面改質などにも適用が拡大しつつある<sup>(1)</sup>。

本稿では、溶接を中心に電子ビーム加工法の原理と加工事例、市場動向、更にパルスビームを使った新加工技術などについても紹介する。

## 2. 電子ビーム加工機の利用状況

我が国の電子ビーム加工の利用は、1960年初めから始まり、既に25年を経過している。その間一時的な停滞は認められるものの、総じて着実な歩みを見せており、図1は1986年末までの国内の年次別設置台数と累計を示したもので、総設置台数は約400台に達する。年次別に見ると、1968~1974年にかけて最初の設置ブームが訪れ、この時期はR&Dと生産設備用が半数ずつ比較的広い産業分野に導入されている。第二の設置ブームは、1980~1983年ごろに訪れ、この時期は自動車において、A/T化に伴うミッション部品の軽量化設計で電子ビーム溶接が多く採用されている。更に、1985年以降第三の設置ブームが訪れるようとしている。最近の傾向として根強い自動車関連の需要に支えられる一方で、装置自身の高機能、多様化によって、数量は少なくとも付加価値の高い、宇宙・航空機、原子力産業をはじめ、高精度、高速加工性が要求される、精密、電子などの各分野、更に溶接以外の加工にもその用途が拡大しつつある<sup>(2)</sup>。

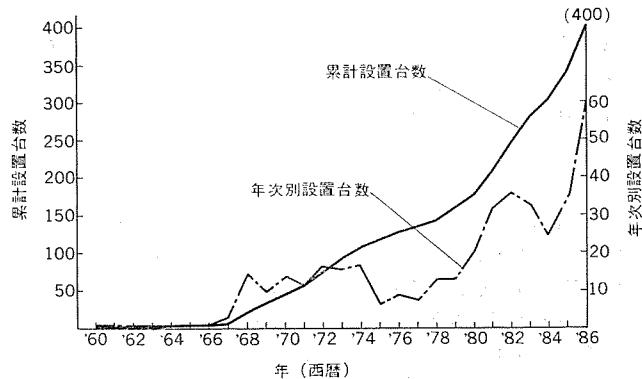
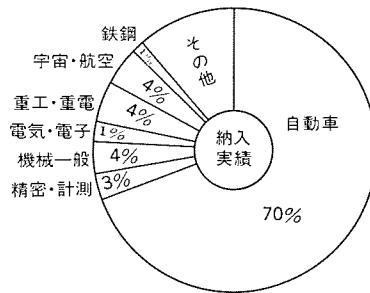
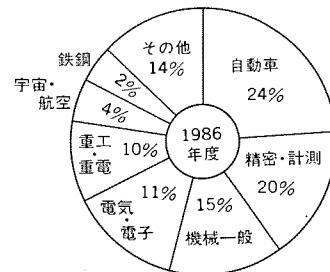


図1. 電子ビーム加工機の設置台数



(a) 当社の納入実績



(b) 最近のサンプル加工依頼内訳

図2. 電子ビーム加工機の利用分野

次に当社の納入実績と最近の客先からのテスト加工依頼により、利用分野を分類したものを図2に示す。過去の納入実績では自動車産業での利用が圧倒的に多いのに対し、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、各分野からのテスト加工依頼が増加しており、今後の市場の広がりが伺える。

## 3. 電子ビーム溶接

## 3.1 電子ビーム溶接の基本特性

電子ビーム溶接の溶込み深さは、ほぼビーム出力に比例し、溶接速度の平方根に反比例する。実際には、加速電圧、ビームスポット径、材

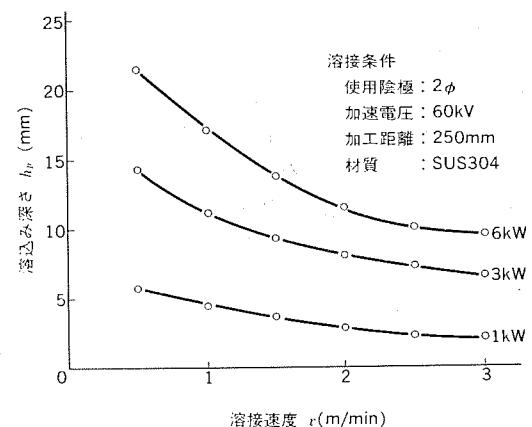


図3. 6 kW量産用電子ビームの溶接基本特性

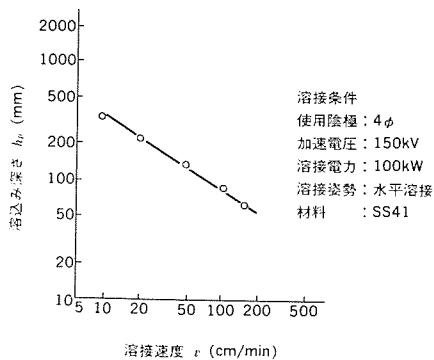
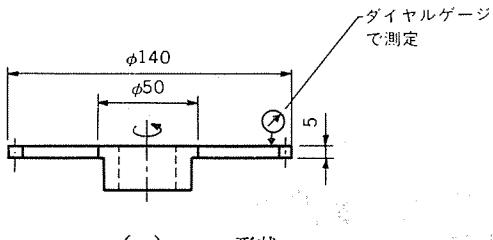


図 4. 大出力電子ビームの基本特性

質、ワーク形状などによって大きく左右されるので、各電子銃、材質ごとの基本データを整えておく必要がある。ここでは、一例として図3.に量産用に使われる6kW電子銃について、加速電圧と加工距離を一定とした場合の、出力、溶接速度ごとの最大溶込み深さを示している。

次に高電圧、大出力電子ビームによる厚板溶接時のデータを紹介する。厚板溶接では溶融金属に対する重力の影響を軽減させて、深いビームホール（溶接中ビーム照射によってできる狭深空間）を得る目的で、水平溶接が行われる。図4.では軟鋼（SS 41）を使って、ビーム加速電圧150 kV、ビーム出力100 kW、の場合の溶込み深さ（ $h_p$ ）と溶接速度（ $v$ ）の関係を示している。実際に100~300 mmの厚板溶接で

材質 : S25C, SCM420  
加速電圧 : 60kV  
ビーム出力 : 2.5kW  
溶接速度 : 2m/min



(a) ワーク形状

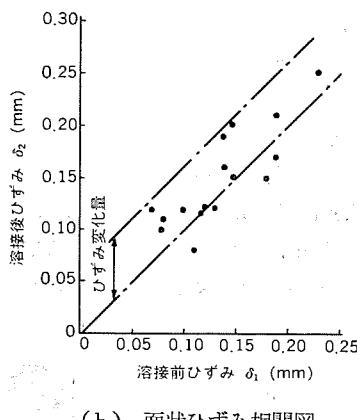


図 5. 電子ビーム溶接におけるひずみ特性

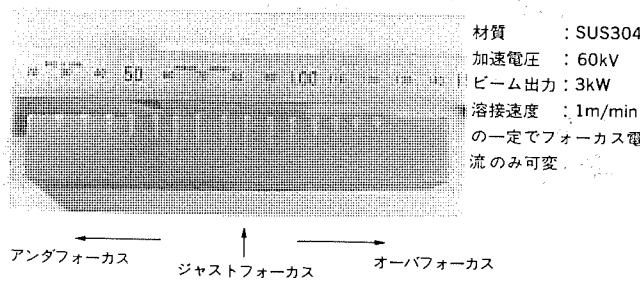


図 6. フォーカスポイントとビード形状

は、溶接部にできるキャビティ（空洞）抑制のため、150~80 mm/minの低速でビームオシレーション（ビームを高速で振動）させながら裏波を形成する貫通溶接とする場合が多い。

### 3.2 電子ビーム溶接の特徴と品質

電子ビーム溶接の長所としては、①低入熱、低ひずみの深溶込み溶接が可能。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数々のテクニックが駆使できる。④レンズ交換せずに任意の加工距離が選べる。⑤金属の反射率に大きく影響されず、あらゆる金属の加工が可能。⑥真空中故の清浄溶接。などが挙げられる。反面、①真空排気が必要。②磁化された材料には脱磁が必要。などの短所もある。

一方、品質面では特に溶接によるひずみが問題となり、その種類と量は継手形状、拘束方法、溶込み深さと幅など、多くの要因によって決まるものである。図5.に一例として、軸ボスにプレートギヤを押さえ治具なしの無拘束で溶接した場合のひずみ量について示した。ひずみが最大となる外周での変形が0.1 mm以内と、他のあらゆる溶接法より小さく納まっている。その結果、機械加工により一体削り出しを行っていたものを、ファインブランディングと単純な機械加工品を電子ビーム溶接で接合する方式に変えることができ、大幅なコスト低減が達成された。そのほか、継手部の強度、溶接部の割れについてもチェックしておく必要がある。一般に溶接部の強度は、溶加材を使わない真空中の清浄溶接であることと、溶接後の焼入効果により、母材よりむしろ強度が高まる場合が多い。溶接部の割れについては、材質、継手形状、溶接条件など多くの要因によって発生するので簡単には解決できない場合もあるが、電子ビーム溶接では基本的に細

くて平行な溶込み形成が可能なので応力が発生しにくく、割れ対策の面でもレーザなど他の溶接法より優れていると言える。

### 3.3 電子ビーム溶接に用いられる基本テクニック

#### 3.3.1 ビームフォーカシング

電子ビーム溶接では、電磁界レンズでビームを自在にあやつり、溶込み形状などをコントロールするなど数々の加工テクニックが駆使できる。図6.に一例として、ビーム集束用レンズの電流制御により、ワーク表面に対するフォーカスポイントを移動させ、ビード形状を任意に変えたものを示す。同一出力、同一加工速度

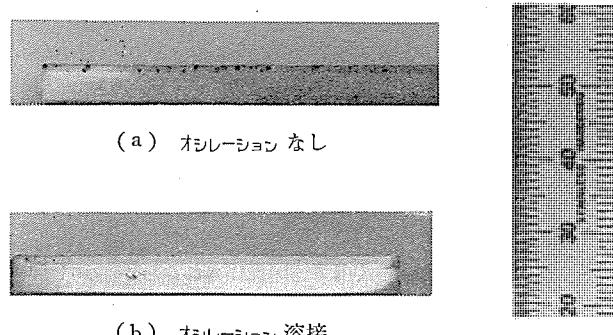


図 7. ビームオシレーションによるキャビティ除去（アルミダイカスト）

であっても針のような細いビードから、アーチ溶接のような太いものまで目的に応じたビード形状を選ぶことができる。

### 3.3.2 ビームオシレーション及びDC偏倚

ビード中のキャビティや、ビード表面のブローアウト(吹き出しによる欠陥)は、溶接金属中のガス成分、継手表面の酸化物、油・水分などの混入ガス化などによって発生する<sup>(3)</sup>。したがって良好な接合部を得るためには、脱ガスコントロールされた素材を選び、表面状態を清浄に保つとともに、ビームを数Hz～数kHzでオシレーションさせて、ビームホールをコントロールしたり、かくはん効果を高め、溶融金属中の脱ガスを促進し、上記欠陥の発生を防止することが大切である。図7.は脱ガス処理はされているものの、根本的にガス含有が多いアルミダイカストにおいてビームオシレーション効果を確認したもので、(a)のオシレーションなしではビードの縦断面に多くのキャビティが見られるが、(b)のオシレーション溶接ではキャビティのない良好な溶接ができている。

このほか、ビームのON-OFFによる、仮付け溶接、スキップ溶接のほか、ビームオシレーションとデフォーカス(フォーカスポイントを意識的にずらす)による、予熱・後熱処理、化粧ビード溶接など数々のテクニックが使える。

### 3.3.3 その他のテクニック

そのほか、ビームのON-OFFによる、仮付け溶接、スキップ溶接のほか、ビームオシレーションとデフォーカス(フォーカスポイントを意識的にずらす)による、予熱・後熱処理、化粧ビード溶接など数々のテクニックが使える。

### 3.4 溶接線検出システムと自動ティーチング溶接

溶接ビード幅の狭い電子ビーム溶接法では、溶接線に対してビームを正確に照射することが不可欠であり、溶接線自動検出技術が必要となってくる。図8.にビームスキャン法による溶接線検出システムの基本構成を示す。この方法は、ビーム照射によってワーク表面から発生するX線量を検出するもので、溶接線に対して直交方向にビームスキャンを行うと、ワークの突合せ部(溶接線)でX線量が極小となる特性を利用し、溶接線とビーム軸の“ずれ量”をCRT画面で表示計測している<sup>(4)</sup>。この検出機能とCNC加工機を組み合わせることにより、実際のワークにおいて、溶接基本プログラムに対しセンシングによるずれ量を補正值として自動的に実行プログラムにティーチングすれば、ブレーパック方式による自動センシング溶接が可能である。

また、溶接中のビームをタイムシヤリングして溶接線検出用のスキャンビームとして利用すると、オンラインシームトラッキングも可能で既に一部の機種で実用化されている。

## 4. 最新の電子ビーム加工技術

### 4.1 量産部品の溶接と品質管理

電子ビーム溶接は真空チャンバー内で遠隔操作されるため、プロセス中の人的介在による不安定要素は皆無に近いが、反面ビード幅の狭い精密溶接であるため溶接線に対して目はずれなどの欠陥が発生しやすい。そのため、加工される部品の溶接結果を監視しておく必要が

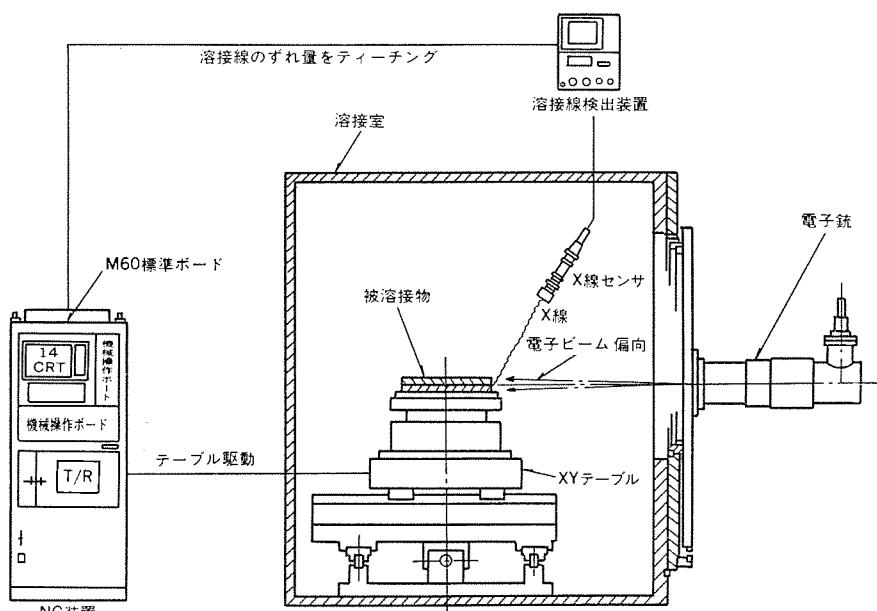


図8. 溶接線検出システム構成図

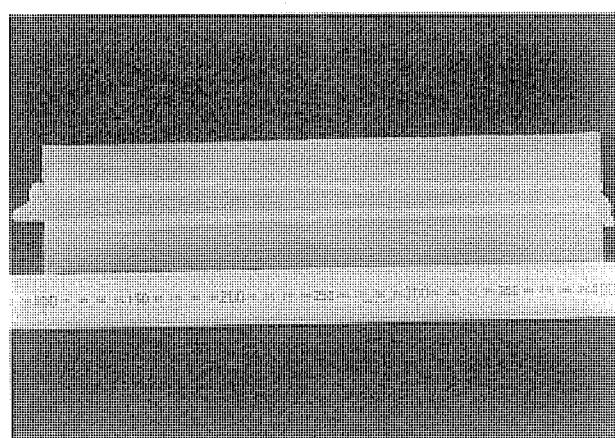
ある。

当社の装置においては、溶接条件となるビーム出力、焦点、照射位置、溶接速度などの設定値はワークの種類ごとに装置にデータが入力されていて、自動的に再現され、設定値に対する許容限度範囲内で実行されたかをモニタリングしているので、溶接不良品の発生する余地はほとんどない。しかし、加工後の品質はワークそのものを直接検査する方がよいので、最近は電子ビーム加工機とビード表面検査装置又は溶接部の超音波探傷装置などの非破壊検査装置を組み合わせたオンライン全数検査システムが導入されている。万一不良品が発生した場合は、ラインをサイクルストップさせ、そのときの加工データと不良内容が自動的にプリントアウトされ、不良原因の診断が容易にできるようになっている。

### 4.2 厚板・大型構造物の溶接技術

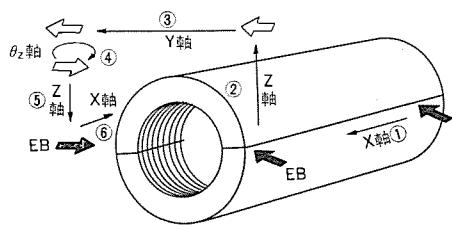
#### 4.2.1 超厚板の溶接

大出力ビームを使用した超厚板の1パス溶接は、他の加工法には類をみない電子ビームの最大の特長と言える。図9.は300mmの溶接断面で、出力105kW、溶接速度80mm/minで加工されている<sup>(5)</sup>。

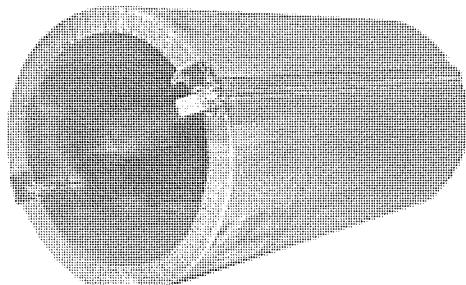


材質：軟鋼 ビーム出力：100kW  
加速電圧：150kV 溶接速度：80mm/min

図9. 300 mm 厚鋼板の1パス貫通溶接断面



(a) 加工手順



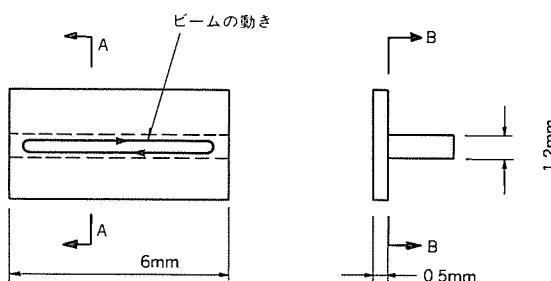
(b) 模擬サンプル

図 10. ボイラ胴体の厚肉・大口径溶接

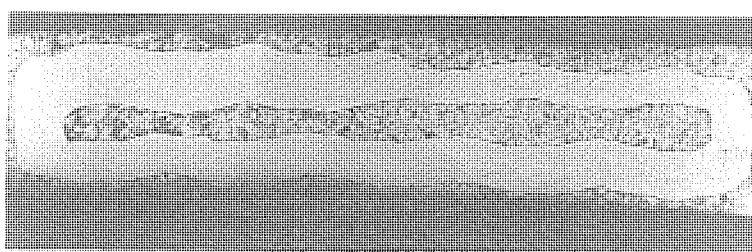
厚板溶接ではキャビティの発生を防ぐため、フォーカス位置制御とビームオシレーションを組み合わせた溶接テクニックが必要となる。また、溶接終了時のクレータ処理が必要となるので、ビーム出力を徐々に減少させるとともに、常に一定のフォーカス位置となる制御をしている。

#### 4.2.2 大型構造物の溶接技術

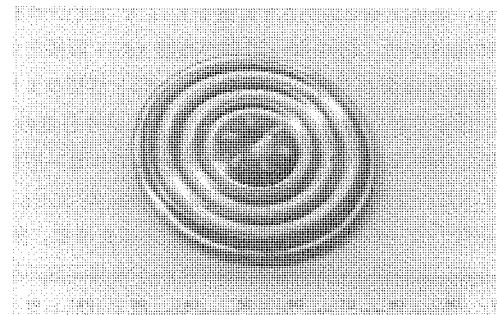
ボイラ胴体など厚肉・大口径パイプの製作では、図10.のように厚鋼板を半円筒状に成形し、突合せ溶接している。加工には数mに及ぶ長尺物も、大型チャンバ内で電子銃が5軸制御される三次元加工機(ムービングガス式電子ビーム溶接機)<sup>(10)</sup>を用い、前述の溶接線検出システム



(a) ワーク形状



(b) 断面 B-B のビード形状



(c) 断面 A-A のビード形状

図 12. ビーム描画による高速多点スポット溶接

この方法は、被加工物を動かさずに電子ビームをコンピュータ指令で所定の位置に偏向させ、毎秒30~50個の高速スポット溶接をするものである。しかも従来のYAGレーザによるスポット溶接のように、単なるドット照射でなく、ビームを移動させながら大小任意のスポットパターンを描く方法なので、スパッタの飛散や割れの少ない溶接ができる。図12.は、厚さ0.5mmの薄板と幅1.2mmのフレームをT字形に重ね溶接したもので、接合面積を広くするために、断面B-Bに示すように、約0.3sの短時間に四角のビードを描く高速溶接をしている。この高速多点スポット溶接は、今後、電子部品や光学機械部品などの精密組立溶接として期待が寄せられている。

同じく高速偏向技術を用いる新しい加工法として、ビームを高速で時分割し、3箇所を同時に溶接(1ビームマルチビード溶接)<sup>(6)</sup>した例を図13.に示す。

また、ビームを磁界で2段偏向して溶接した例を図14.に示す。この2段偏向技術は、①偏向範囲内でビームを垂直に入射させる必要がある場合。②図14.のように突出したパイプや、大型熱交換器の管板とパイプの溶接時など、ワーク全体を回転させずビームの偏向だけで小さな円溶接をする場合。などに有効な技術である。

#### 4.3.3 表面焼入、刻字・マーキング

電子ビームによる表面焼入はビーム照射後、被加工物の自己冷却を利用したものである。ビームの照射の方法としては、単にスキャンビームを被加工物表面に当てるのではなく、ビームの滞留時間コントロールにより、ドット熱源とし、ワーク形状に応じて任意のパターンに照射できるのが特長である。図15.(b)は深い凹形部への焼入<sup>(7)</sup>例であり、(a)は焼入れドットパターンをCRTに表した拡大図で、熱分散を考慮してドットの密度を変えた焼入れをしている。

また、前掲の図14.には刻字・マーキングの例もあわせて示している。

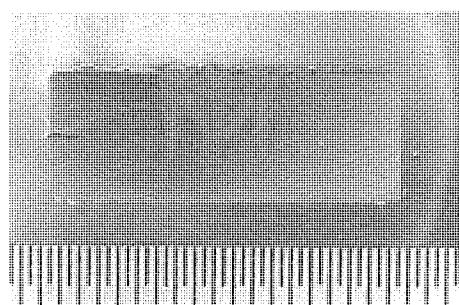


図13. 1ビームマルチビード溶接断面

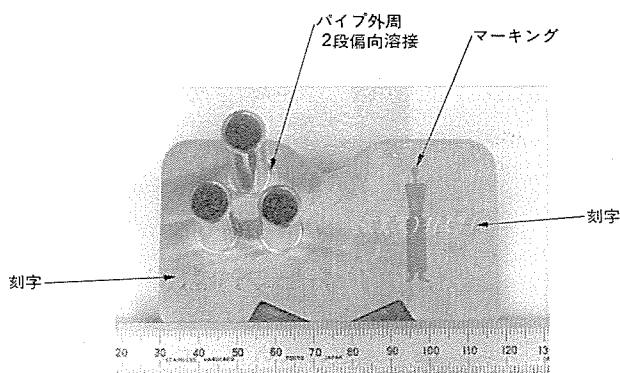
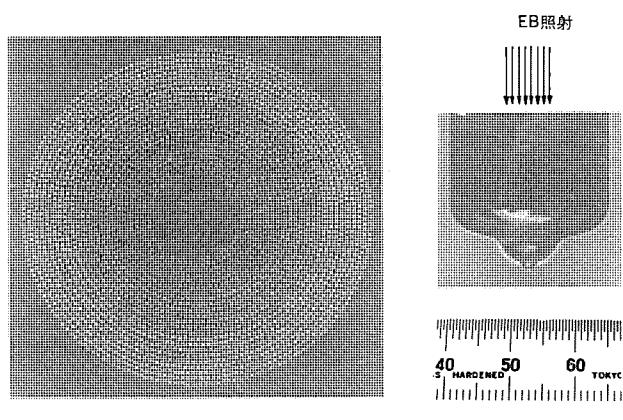


図14. 2段偏向溶接と刻字・マーキング



(a) CRTに映した焼入パターン (b) 四部焼入断面

図15. 深い凹形部へのドット焼入

#### 4.4 特殊な利用法

##### 4.4.1 特殊金属の溶接

宇宙・航空、海洋、化学、原子力など今後期待される分野では、チタン、ニオブ、タンタル、タンクステン、アルミニウムなどの金属が、それぞれ、軽量・耐熱・耐食・超電導性などの優れた特性を持つ材料として利用されている。しかし、そのほとんどが活性金属であるため、大気中の溶接では酸化反応を起こして良好な溶接ができない。そのため、真空溶接である電子ビーム加工法が注目されている。例えば、ニオブ

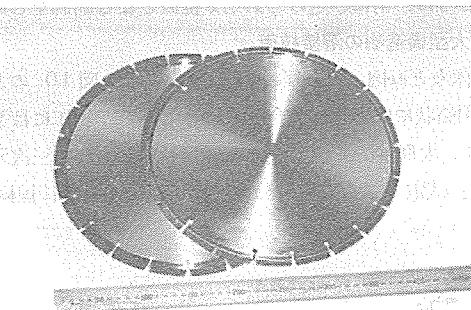


図16. ダイヤモンドカッタの溶接

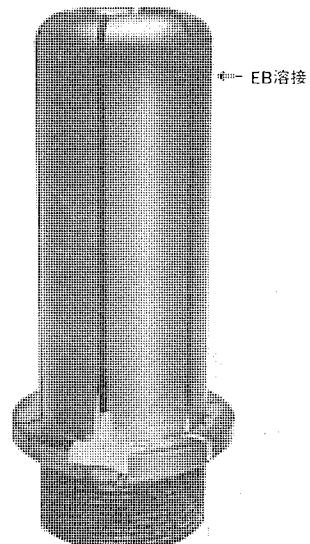


図17. コンタクトチップの溶接

に関しては  $1.3 \times 10^{-1} \text{ Pa}$  ( $1 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ ) 以上の高真空中での電子ビーム溶接ではきわめて良好に施工されるので、超電導部品、真空容器、耐酸容器などに利用され始めている。

#### 4.4.2 電子ビーム溶接と他の補助手段との組合せ

図 16. にダイヤモンドカッタの溶接<sup>(2)</sup>例、図 17. にコンタクトチップの溶接<sup>(2)</sup>例を示す。ダイヤモンドカッタは従来ろう付け法により基板とチップが接合されていたが、コンクリートなどを切断する場合の耐熱強度不足が問題となり、溶接法に切り替わりつつある。これまで、レーザ法、抵抗溶接法なども試みられているが、インサートメタル(ニッケルはくなどを溶接部に狭み込む)を利用した電子ビーム溶接で好結果を得ている。また、コンタクトチップの溶接では、チップ材(銅-タンクステン焼結材)の溶接性を改善する目的で、亜硫酸ソーダによる接合部の銅富化処理を行った後に本体(銅クロム合金)との電子ビーム溶接を行っている。これらは、電子ビーム溶接に他の補助手段を組み合わせたものであるが、電子ビーム溶接の特長である細くて平行な溶込み形成がそれらの加工を可能にしている。

### 5. パルス電子ビーム加工

これまで出力形態が連続の電子ビームを用いた加工法について、溶接への応用を中心に原理と加工例を記述してきたが、この章では電子ビームの新しい利用法として、かねてより当社が開発を進めてきたパルス電子ビーム加工法の原理、特長と 2, 3 の適用例を紹介する。

#### 5.1 パルス電子ビーム加工法の概要

従来の加工方式では連続出力であるため、被加工材料に投入され

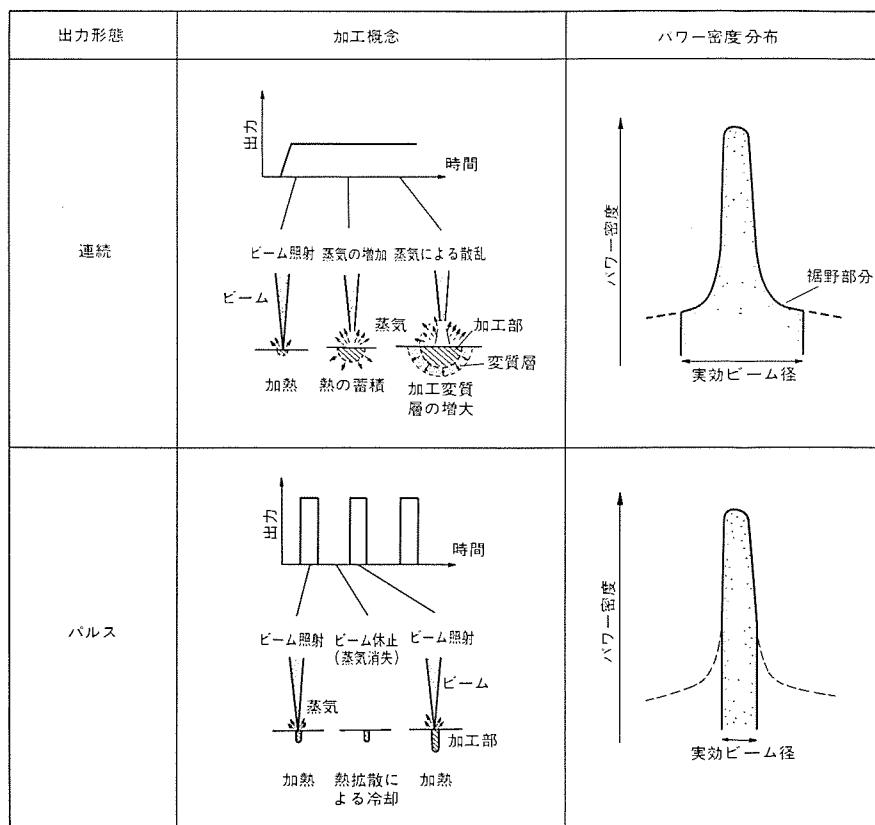
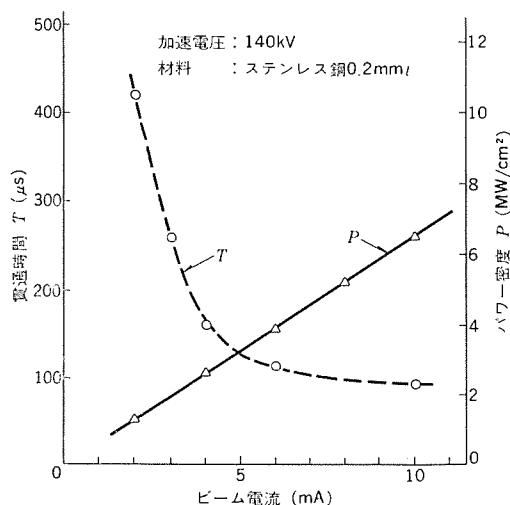


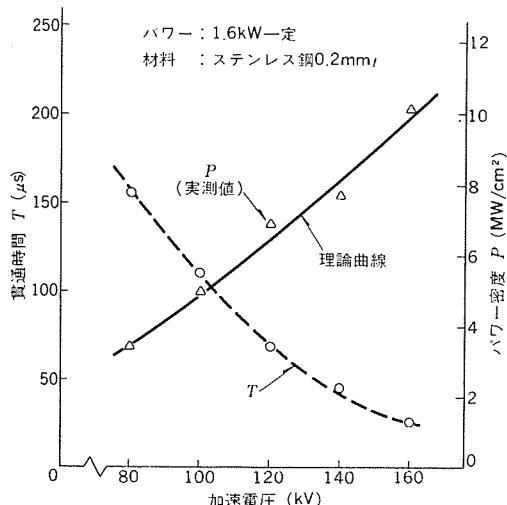
図 18. パルスビーム加工の概念説明図

るエネルギーをきめ細かくコントロールできず、加工部周辺に派生する熱影響層の増大を抑制することが困難、といった問題があり、適用範囲も溶接分野を中心としたものであった。そこで、電子ビーム加工の適用分野を、更に拡大するためにも出力形態をパルスとし精密なエネルギー制御を行う技術が必要不可欠となってきた。

図 18. はパルス電子ビーム加工法の基本的な考え方を示したものである。材料にビームを照射すると一定の時間遅れをもって溶融・蒸発が生じ、そのまま照射し続けると、この蒸気にさえぎられてビームが散乱するとともに、熱の蓄積により加工変質層が増大する。したがって、ビーム照射を極短時間とし、上記ビーム散乱及び熱の蓄



(a) 加速電圧を一定とした場合



(b) パワーを一定とした場合

図 19. パワー密度と加工能力の関係

積が起きる前にビームを停止すれば、加工部周辺に投入された熱は速やかに被加工物中に拡散・冷却されるので、熱影響層のほとんどない加工が達成できる。すなわち、連続出力の場合には、パワー密度分布を持つビームのすそ(裾)野部分も加工に寄与し、加工変質層が増大するが、極短パルス照射とすれば実効的にビームの裾野部分をカットしたことになり、空間的に急しゅんで輝度の高いパワー密度分布をもつビームと等価になるので、加工変質層を極めて小さくすることができる。

また、電子ビームは電気的手段により任意の加工位置に高速で走査できるので、パルス出力の休止している間に次加工位置へシフトし、順次加工を繰り返すことにより、高密度に配置された加工部位に対して、超高速・微細加工が実現できる。

## 5.2 基本加工特性

### 5.2.1 ビームパワー密度と加工能力

材料に電子ビームを照射した際、ビームホールと呼ばれる中空部分が形成され、材料内部にエネルギーを直接的に伝達しつつ加工が進行する。この加工の進行速度や材料内部に到達する深さは、ビームのパワー密度と密接な関係があり、溶接、穴あけをはじめとする加工の能力を決定づける最も重要な因子と考えられる。

図19.は供試材料(ステンレス鋼板 0.2 mm<sup>t</sup>)を電子ビームが貫通するまでの所要時間とパワー密度との関係を示したものである。ここで、パワー密度の計測にはナイフエッジ法<sup>(8)</sup>(鋭利な端面をもつ金属板をビーム径路に置き、ビームをこのエッジに対して直角に走査したときに、エッジで遮断されるビーム電流信号の変化を微分して得る方法)を用いた。図において、パワー密度はビーム電流の増加に伴ってほぼ比例して高まり、材料を貫通する時間は逆比例した形で短縮する。また、加速電圧とビーム電流との積を一定に保持した場合、パワー密度レベルは加速電圧の3/2乗に比例して上昇することが知られており、測定結果とほぼよく一致している。いずれの場合もパワー密度が高くなるに従って、材料を貫通する時間は早まり、加工速度が向上することが明らかになった。換言すると、前節で示したパルス電子ビーム加工法本来の特長である低変質、瞬時加工を達成するためには、高いパワー密度が必要であり、加速電圧及びピーク出力の高いビーム照射が有効であると考えられる。なお、同図は加工機の性能を表すものでない。

### 5.2.2 パルス時間と加工特性

パルス電子ビーム加工法の代表的な用途の一つに、従来法では加工

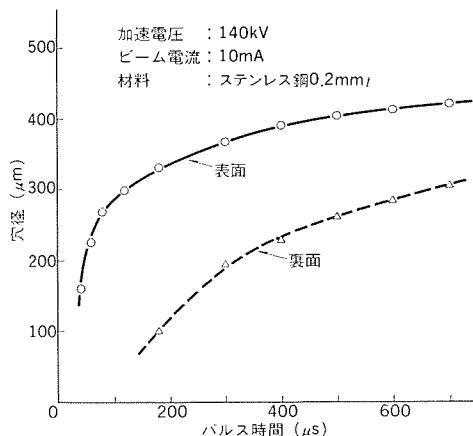


図 20. パルス時間と穴径の関係

困難な軟質若しくは硬質材料の小径穴あけ加工が挙げられる。ここでは、穴あけ加工に関する基本特性の一例として、単一パルスでのビーム照射時間(パルス時間)を変化させたときの加工穴径の変化について述べることとする。

図20.にステンレス鋼板 0.2 mm<sup>t</sup>に対する穴あけについて示す。ビームが照射される側を表面とすれば、貫通に至るまでの表面穴径はパルス時間の増加に伴って急激に拡大し、貫通後は比較的ゆるやかな変化を呈する。これに対して、裏面の穴径は貫通後も徐々に大きくなり表面穴径との差は小さくなる。このように、穴あけ加工においてはパルス時間を短く設定すればテープ状の断面形状が得られ、材料貫通後の持続照射時間を適切にコントロールすることにより、所望断面形状の加工穴を形成させることができる。

### 5.3 パルス加工の適用例

#### 5.3.1 溶接

単位時間当たりの平均入熱を一定とした場合のビームの繰り返しパルス照射と連続照射とのビード断面形状の違いを図21.に示した。パルス照射では連続照射で見られるワインカッブ状溶融層がなく、極めてシャープな溶込みとなっている<sup>(9)</sup>。これは、被加工物に作用する実効ビーム径が小さくなった結果と考えられ、前述のパルス電子ビーム加工法の概念の妥当性を示唆している。このようにパルスビームは、細いビード形状で熱影響の少ない溶接に適す。なお、ビード幅はフォーカス位置を変えることにより自在にコントロールできる。

#### 5.3.2 穴あけ

硬ぜい(脆)材料及びその他の難加工材料に対して、ドリルなどの機械的な加工法では多大な加工時間を要し、能率が非常に悪いうえ小径の穴あけが困難であった。このような材料に対して、パルス電子ビーム加工法を適用することにより、工具の消耗や折損がなく小径穴を高速、かつ高アスペクト比で加工できる。図22.には(a)ステンレス鋼、(b)モリブデン板、(c)セラミックの穴あけ例を示している。このように、材料の熱的又は機械的性質にかかわらず、小径穴あけが可能であり、多数の微小穴を必要とする製品群への適用により、生産性の飛躍的向上が期待される。

#### 5.3.3 彫刻

ビーム照射により、材料表面に微小溶融部若しくは蒸発除去部を形

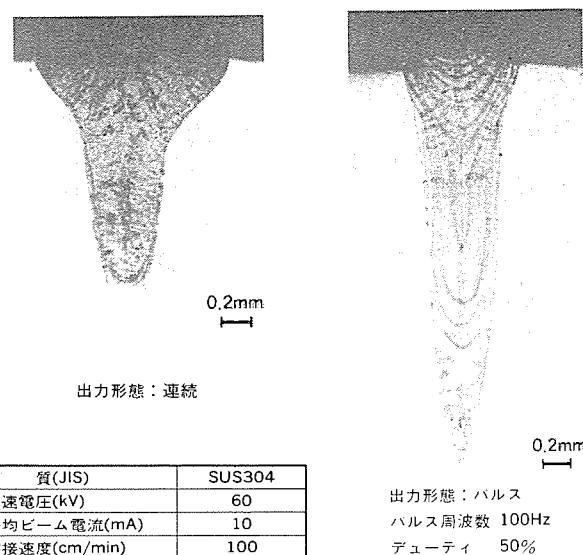


図 21. 出力形態による溶接性の比較

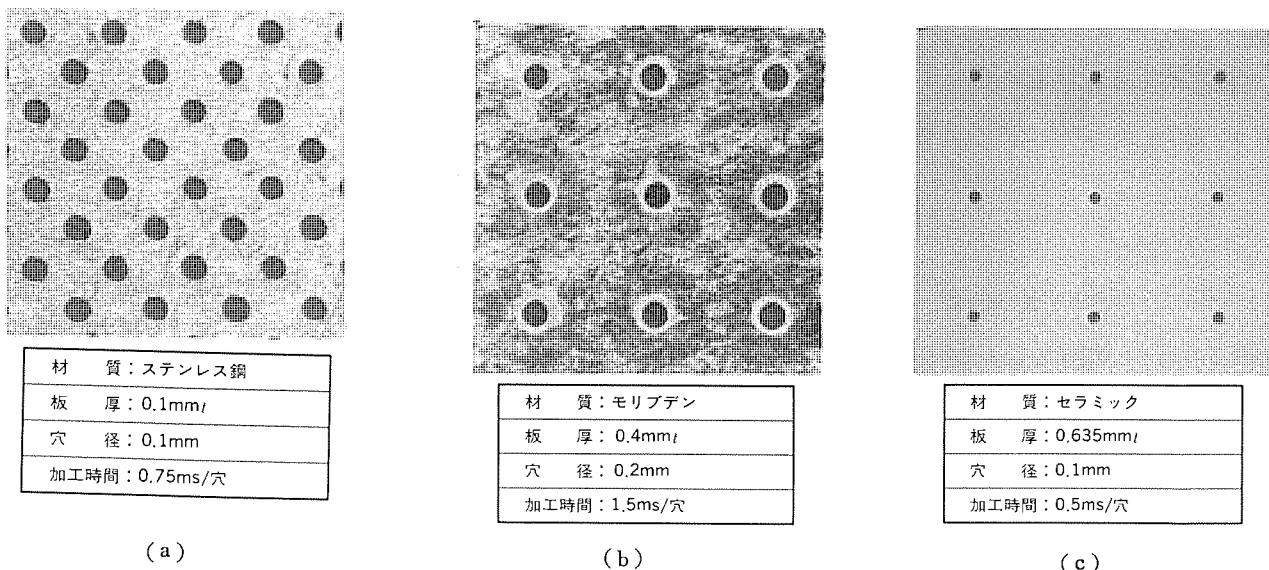


図 22. 穴あけ加工例

成させ、パターンを描くと電子ビーム彫刻ができる。図23.はその一応用例で、自動車用などの鋼板への塗装性を向上させるために、あらかじめ圧延用ロールにきめ細かい凹凸をつける加工(ダル加工)を施したものである。この加工法によれば、従来の放電加工法、ショットブラスト法に比べて表面粗度、密度が自在にコントロールできるので、鮮映性の優れた塗装面を保つことができる。

## 6. むすび

以上、電子ビーム加工法について述べてきた。電子ビームは、 $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$  のきわめて高いエネルギー密度で、しかも100kWクラスの大出力まで、効率良く、比較的安価に得られることから、これまでも量産用部品や、厚板構造物などの溶接用として利用してきた。

更に、この数年、NC、コンピュータ、インバータなどのエレクトロニクス技術の発達に支えられ、装置の多様化と機能の大幅な向上がなされ、電子ビーム本来の特長である高速、高精度、自在性が十分に発揮されるようになって、加工技術も一段と向上し、溶接はもちろんのこと、表面改質、穴あけ、刻字・マーキング、彫刻など幅広い応用が活発化しており、今後ますます利用が期待される。

## 参考文献

- (1) 石見ほか:溶接学会論文集, 4, No. 1, p. 84 (1986)
- (2) 内海、大田:溶接学会電子ビーム溶接研究委員会, EBW-395

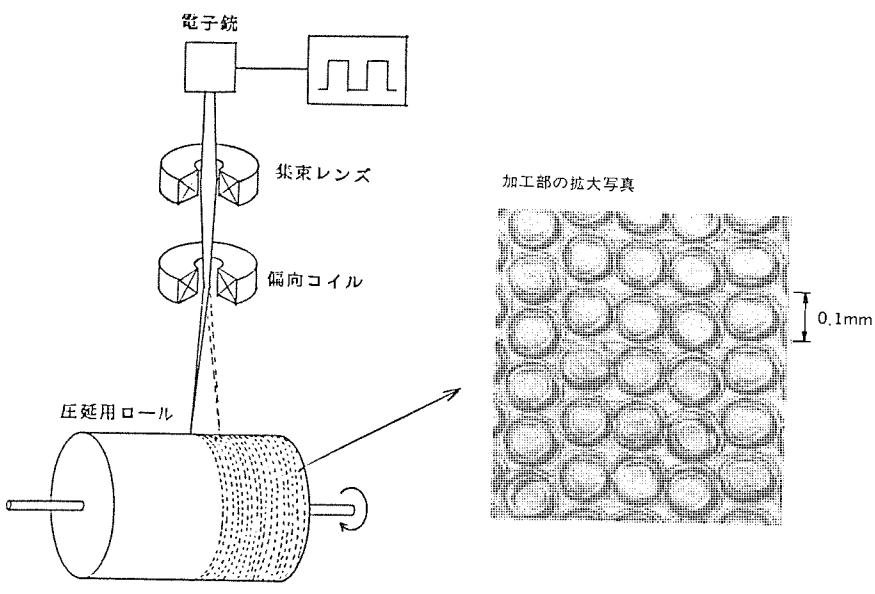


図 23. 圧延用ロールのダル加工 (Cr-Mo 鋼)

-86

- (3) A.H. Meleka:電子ビーム溶接—原理と実際—, 産報 (昭47)
- (4) 安永, 村上:溶接学会論文集, 3, No. 1 (1985)
- (5) 新見, 原:溶接技術, 4 (1986)
- (6) 原ほか:溶接学会電子ビーム溶接研究委員会, EBW-390-86
- (7) 安永ほか:日本機械学会第633回講習会教材 (1986)
- (8) 管田編:電子・イオンビームハンドブック, p. 276 (1986)
- (9) Megumi Ohmine et al: Fundamental Study on the Pulsed Electron Beam Welding IIW Doc. No. IV-348-83

# マイクロ波レベル計 ML2001

春尾 弘志\*・長田 俊二\*・齊藤 勝男\*\*・高松 泰男\*\*\*・小知和晴雄†

## 1. まえがき

液面などの高さを測定するレベル計の種類は非常に多岐にわたり、様々な分野における各種池・タンクをはじめとして、貯留槽・井戸・ダム・河川などで数多く用いられている。そして、これらのレベル計は、設置方式から浸し(漬) (接触) タイプと非接触タイプに分類することができる。ここで紹介するマイクロ波レベル計 ML2001 は、超音波反射式レベル計(以下、超音波式と記す)とともに非接触タイプに分類される。非接触タイプは、対象物に直接触れずにレベルの測定が可能なため、数々の利点があり、近年その利用価値が高まっている。ところが従来の超音波式では、測定面の状況や途中の環境条件により測定精度が悪化したり、場合によっては測定不能に陥ってしまうことがある。

そこで我々は、マイクロ波の特性に着眼し、これらの問題を解消できる非接触タイプのレベル計として、汎用型マイクロ波レベル計 ML2001(図 1.)を開発した。本稿ではマイクロ波式レベル計の一般的な特長、及び測定原理について述べた後、ML2001 の構成、仕様、特長及び用途などについて説明する。

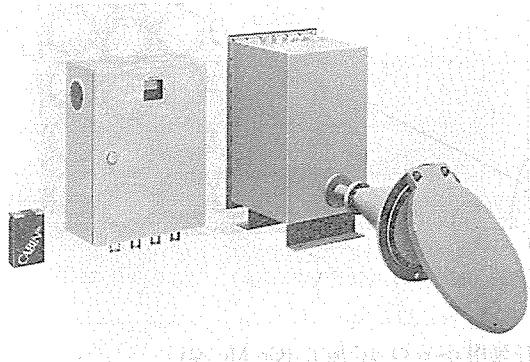


図 1. マイクロ波レベル計 ML2001、(マイクロ波部(右)と信号処理部(左))

## 2. マイクロ波式レベル計の特長

マイクロ波式レベル計における主な特長は次のとおりである。

- (1) 測定対象物に直接触れないため、汚れが少なく、メンテナンスも容易で、設置に際しても比較的簡単である。
- (2) 途中の媒質(空気)の環境条件(風、温度、粉じんなど)の影響をほとんど受けずに測定が可能である。
- (3) 水面上に存在する(洗剤などの)泡の層による欠測を引き起こしにくい。
- (4) 測定対象を液面に限らない。

このうち、(1)、(4)は超音波式にも通じる非接触タイプレベル計の特長であるが、(2)、(3)はマイクロ波式の保有する他のレベル計より優れた長所であり、本章ではこの(2)、(3)の特長についてもう少し詳しく説明していくこととする。

表 1. マイクロ波式と超音波式の比較

項目	マイクロ波式	超音波式
測定方式	9GHz 帯 FM-CW レーダ (FM-CW 周期計数方式)	超音波パルス発振方式 (発振周波数 10~数 10kHz)
伝播速度 (空気中)	$3 \times 10^8$ m/s	$331.5\sqrt{1+T/273.15}$ m/s $T$ : 周囲温度(°C)
水面上の泡による影響	フィールド実験においては 20~30mm 程度の泡の層であれば、その下の水面を測定可	数 mm 程度の泡の層があると測定不可
周囲環境	マイクロ波は途中の媒質の環境や温度変化を受けにくい	超音波の伝播は音と同じく風や温度の影響を受ける

マイクロ波とは、よく知られているように比較的の波長の短い(一般的には 30 cm から 1 cm、周波数で 1~30 GHz)電波のことをいい、電波の性質である直進・反射・回折・屈折などを備えていて、途中の媒質(空気など)の温度や周囲環境の変動などの影響を受けにくいという性質もあわせもっている。

ここで、マイクロ波式と超音波式とを比較したものを表 1. に示す。表に示すように、超音波式の最大の欠点は、本質が音であるために周囲環境の影響を受けやすく、また、測定面上に存在する泡により欠測を生じることである。下水のプロセスなどでは、洗剤などの混入により測定水面上に泡が発生する場合があり、発信された超音波は、この泡が吸音材の役目をして、吸収されたり、乱反射されたりして反射波が得られず、欠測に陥っている状況がみられている。我々も超音波式を採用し、泡による欠測が発生したことを経験したことは先にも述べた。

これと比較して、マイクロ波式の優れている点は、測定水面上に泡があっても、泡の透過誘電率( $\epsilon$ )が空気( $\epsilon=1$ )に近いことにより、ある程度の厚さまでの泡の層であるとそれを透過し、その下の水面( $\epsilon=50\sim60$ )ではじめて反射されることになるため、泡の影響を受けにくいことである。

以上がマイクロ波の性質をもとにしたマイクロ波式レベル計の一般的な特長である。ところでマイクロ波式レベル計は、今まで周囲環境の影響を受けにくいといふ(2)の特長をいかして、溶鋼の湯面計測など、ごく限られた場所でしか使われておらず、言わば特殊用途向けのレベル計であった。そこで我々は、これをもっと広い分野における汎用型のレベル計として製品化するために、測定精度、測定範囲、周囲環境などの機器、及び設置上の仕様の見直しを行った。そして、その仕様を満足させるために、従来のマイクロ波式レベル計と比較して様々な改良を加えている。その具体的な内容については、後ほどまとめて述べることにする。

## 3. 測定原理(FM-CW 方式)

マイクロ波レベル計 ML2001 は、測定方式として FM-CW (Frequency Modulated-Continuous Wave) 方式を採用しているが、ここでは、この方式の原理について説明する。

FM-CW 方式とは、周波数変調したマイクロ波を連続的に放射し、

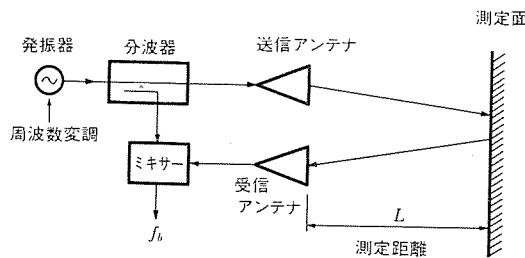


図 2. FM-CW 方式

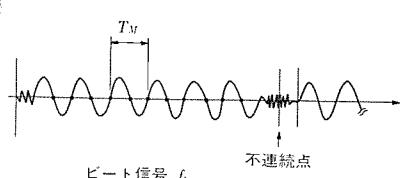
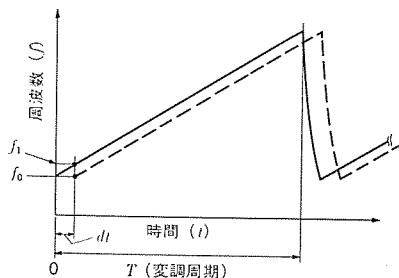


図 3. 測定原理

測定面で反射されて戻ってきたときのマイクロ波と、周波数偏移した発振器からのマイクロ波との周波数の差をビート信号（この信号の周波数をビート周波数という）として検出するものである。

測定原理を図 2. と図 3. に示す。図 2. において、発振器は一定周期  $T$  で周波数が増加する方向に周波数変調を行い、周波数変調されたマイクロ波は、分波器により送信アンテナとミキサーに分波されて、送信アンテナに導かれたマイクロ波は空中に放射され、測定面で反射されて受信アンテナからミキサーに導かれる。ミキサーでは反射されたマイクロ波と、発振器からの直接のマイクロ波との周波数差が検出されるが、この差は測定面までの距離に比例し、その距離が大きいほど、周波数差は大きくなる。したがって、このビート周波数をもって距離を測定することができる。ビート周波数は式(1)で表される。

$$f_b = \frac{\Delta F}{T} \times dt \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$dt = \frac{2L}{C}$$

ここで、

$f_b$ : ビート周波数

$\Delta F$ : 周波数偏移幅

$T$ : 変調周期

$dt$ : 遅延時間

$L$ : 測定面までの距離

$C$ : 光速

図 3. において、ビート周波数を測定する方法として、ビート信号が零点と交差する数を計測する方法があるが、直接、カウンタなどで計測すると、変調周期の始めと終りにビート信号の不連続な点があるため誤差が生じる。そこで、通常はビート信号の周期  $T_M$  を計測して、周期から周波数に変換し、測定誤差を少なくする周期計数方式を採用している。

#### 4. ML 2001 の構成

マイクロ波レベル計 ML 2001 は、マイクロ波を扱うマイクロ波部と、ビート信号から距離に比例した電流を出力する信号処理部によって構成されている。

##### 4.1 マイクロ波部

マイクロ波部の構成を図 4. に示す。マイクロ波部の構成は、マイクロ波を発振する電圧制御発振器 (Voltage Controlled Oscillator: 以下 VCO と記す) とヒータからなる発振部、測定距離に応じたビート信号を取り出す距離測定用信号検出部、及び VCO の直線性を補正するための信号を検出する補正信号検出部からなっている。

##### (1) 発振部

発振部では VCO に変調信号を加えることにより、周波数変調されたマイクロ波を発生させている。また、VCO は周囲温度の変化による特性のずれを防止するため、ヒータで一定温度を保つようにしてある。

##### (2) 距離測定信号検出部

発振されたマイクロ波のうち、一つは分波器 1 を直進し、距離測定信号検出部に入る。このマイクロ波は、分波器 2 によりミキサー 2 へ行く成分と、マジック T を経由して送受信アンテナから空中に放射される成分とに分けられる。アンテナから空中に放射されたマイクロ波は、測定面で反射され、逆の経路をたどって、更に遅延線  $f_b DL$  で遅延される。

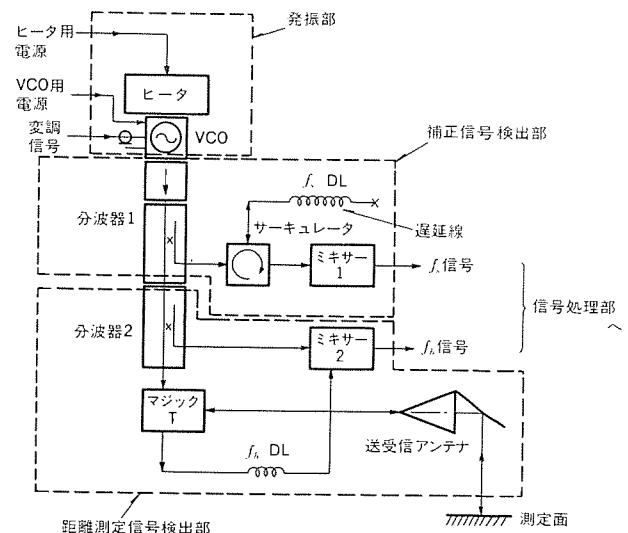


図 4. マイクロ波部の構成図

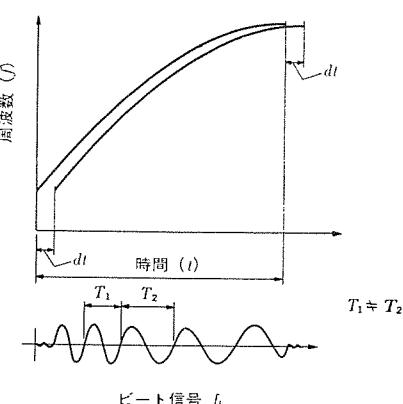


図 5. VCO の非直線性による誤差

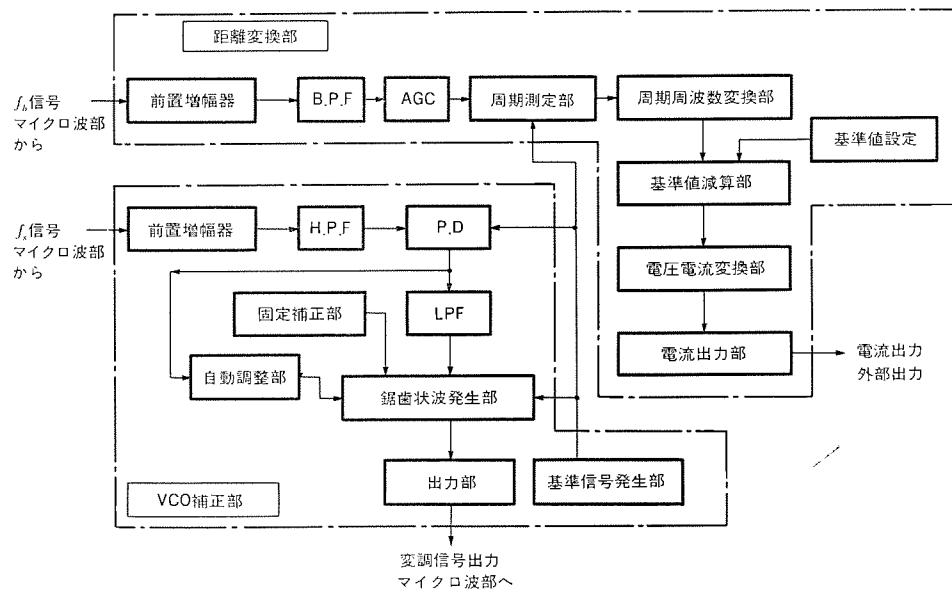


図 6. 信号処理部の構成図

延されてミキサー2に入る。ミキサー2では、この二つのマイクロ波が合成されて、距離に比例したビート信号  $f_b$  が発生する。

### (3) 補正信号検出部

測定原理の図3. ではVCOの周波数偏移の直線性が完全なものとしているが、実際のVCOの特性は、図5. のように非直線であり、これが精度を阻害する大きな要因となっている。

補正信号検出部は、このVCOにおける特性の非直線性を検出するところである。発振されたマイクロ波の内、もう一つは分波器1で分波されてサーキュレータに入り、遅延線  $f_sDL$  により遅延されて戻ってくる。また、サーキュレータでは、ミキサー1の方向にもマイクロ波は直進する。したがって、ミキサー1では、遅延線により遅延されたマイクロ波と、直進してきたマイクロ波が合成され、ここでもビート信号  $f_s$  を発生する。この  $f_s$  信号の方は、 $f_b$  信号と違って遅延時間が固定のため、常に一定の周波数となるはずである。ところが先に述べたように、VCOの直線性がよくないと、その周波数にむらが生じる。よって、そのむらを  $f_s$  信号の変動としてとらえるのがこの部分である。このむらをとらえてVCOの補正を行うが、それについて4.3節で述べる。

### 4.2 信号処理部

信号処理部の構成を図6. に示す。信号処理部は、マイクロ波部からの  $f_b$  信号を受けて距離を算出する距離変換部と、 $f_s$  信号を受けて補正をかけるVCO補正部によって構成されている。

#### (1) 距離変換部

距離変換部では、入力された  $f_b$  信号をバンドパスフィルタ(B.P.F)で必要な信号成分のみに分離し、その信号を周期測定部で周期の計測を行っている。周期測定部では、計測値の誤差を低減するために、 $f_b$  信号の8周期分の周期を計測し、8周期分の平均をとって1周期分の計測値を得ている。

また、周期一周波数変換部では、計測によって得られた周期値を周波数値に変換しており周波数に変換された値は、基準設定値から減算して変化分が算出される。ここで、基準設定値は測定距離が最大(アンテナから測定面が最も遠い位置、すなわち測定面のレベルからみれば0%の位置)のときの周波数値とする。よって距離が変

化すると、減算結果としてその変化による減少分が算出されることになり、これを距離信号として出力する。

#### (2) VCO補正部

VCO補正部は、マイクロ波部からの  $f_s$  信号の周波数のむらをなくすように制御をするところである。 $f_s$  信号はハイパスフィルタ(H.P.F)により、低域の不要成分を取り除かれ、必要成分のみとなった信号は、遅延線  $f_sDL$  の長さと周波数偏移幅及び変調周期で決定される周波数に等しい基準信号との間で位相比較が行われる。この位相比較の結果は、きょし(鋸歯)状波発生部に与えられる。

鋸歯状波発生部では、前段からの信号に基づき、鋸歯状波を制御

する。また、鋸歯状波発生部には、あらかじめVCOの直線性を補正する固定補正部が接続されており、ROMによってVCOの直線性補正データを記憶している。更に、鋸歯状波発生部には、自動調整部が接続されており、ここでは回路定数の変化及びマイクロ波部の温度による変動がある値以上に達した場合、自動的に調節を行う機能がある。

### 4.3 PLLの構成

前節まで概略の構成を説明したが、その中でマイクロ部内の補正信号検出部と信号処理部内のVCO補正部は、両者でクローズループを構成し、VCOの特性補正を行っている。つまり、VCOの特性や回路定数の変化などで発生した  $f_s$  信号の周波数むらを、基準信号との位相比較で検出し、この値で鋸歯状波の変調電圧を制御して、位相差がなくなる(ロックする)よう修正するのである。このクローズループをPLL(Phase Locked Loop)と呼ぶ。

## 5. ML 2001の仕様と特長

4章の構成で述べた内容と重複するところもあるが、ここでマイ

表 2. ML 2001の仕様

項目	内容
測定方式	9 GHz 带 FM-CW レーダ (FM-CW 周期計数方式)
測定範囲	0~300 mm から 0~20 m
測定精度	±1.5% F.S. *測定範囲が0~1 m 以上とのときは ±1.0% F.S.
信号出力	DC 4~20 mA (負荷抵抗 0~600 Ω)
ダンピング時定数	3, 6, 60, 120 秒切換 (立ち上がり、立ち下がりとも)
電源	AC 100 V ±10%, 50/60 Hz
消費電力	45 VA 以下
重量	マイクロ波部: 約 15 kg 信号処理部: 約 25 kg
マイクロ波部と信号処理部間の距離	専用ケーブルの使用により最大 100 m

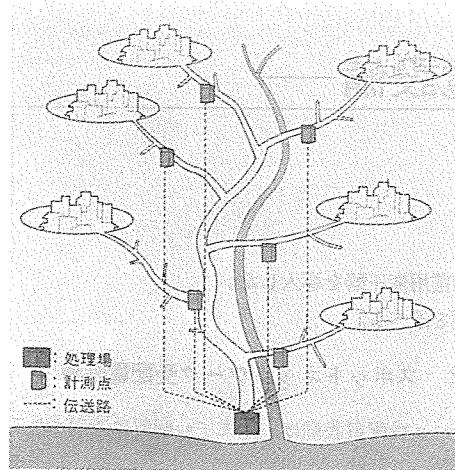


図 7. 幹線流量計測 システム

クロ波レベル計 ML 2001 の仕様及び特長をまとめておく。

### 5.1 仕様

ML 2001 の仕様については、表 2. に示すとおりである。

### 5.2 特長

#### 5.2.1 マイクロ波部

(1) 高利得、低サイドローブの円すいホーンリフレクタアンテナを採用

このアンテナにより、高い指向性が確保でき、また測定範囲の設定を幅広くとることができる。周囲に壁がせまっていたり、次章で述べる設置例のように狭い水路の中のレベルを測定するときに、高い指向性が要求される。また、測定範囲を幅広くとれれば、一つのタイプであらゆるレベル計測に適用できる。

(2) ホーン開口部の傾斜構造

ホーン開口部を鉛直でなく、傾斜をもたせてマイクロ波部内に残留(不要)反射を低減し、精度の改善によって 0~300 mm の測定範囲で  $\pm 1.5\%$  F.S. という精度を実現した。

#### 5.2.2 信号処理部

(1) 安価な VCO で高精度を実現

VCO の電圧一周波数特性の非直線性を、ROM 方式と PLL 方式で併用補正し、また VCO の温度特性を PLL 方式で補償する。従来のマイクロ波式レベル計と比較して低価格である。マイクロ波式レベル計を特殊用途向けから汎用タイプのものとした。

(2) ビート信号 8 周期分のサンプリング測定による精度の改善

## 6. 適用

マイクロ波レベル計 ML 2001 は、その特長から一般的なレベル計測はもちろん、次のようなプロセスでの適用が考えられる。

(1) 水面上に泡の発生するプロセス

例: 下水処理場・ポンプ場などの池、下水幹線など

(2) 粉じんやガスの発生するプロセス

例: 溶鋼炉など

(3) 大きな測定範囲を必要とするプロセス

例: 鉱石ヤードなど

実際のプロセスでの設置例では、某流域下水道における幹線流量計測システムのレベル測定用として納入したものが最初である。幹線流量計測システムとは図 7. に示すような構成で、一般家庭や小規模な工場からの排水を市町村単位で集め、その流量を県などが管理する処理場へ至る途中の幹線で計測するものである。そうして得られた

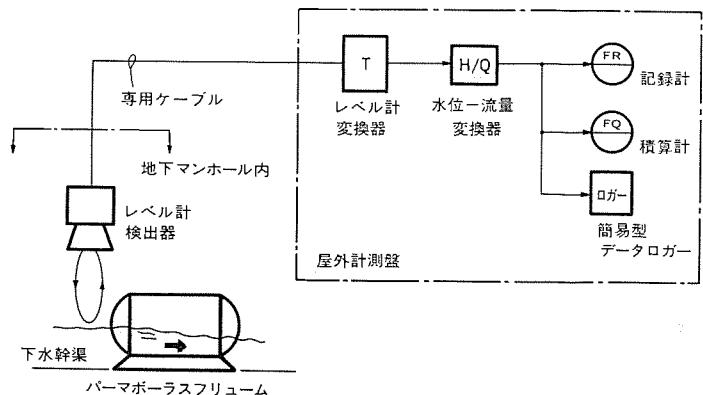


図 8. 計測点における流量計測の一例



図 9. 超音波レベル計が欠測中の泡の状態

流量データは、処理場の円滑な維持管理に不可欠なものである。この流量を測定・監視する方法には、例えば図 8. に示すような例がある。これは下水幹きょ(渠)に パーマボーラスフリューム と呼ばれる絞り機構を設けて測るものであり、この絞り機構の上流側の水位さえ測定すれば、水位一流量の特性変換式から流量を求めることができる。後はこの流量を、積算計、記録計などで記録する。

従来、このシステムで用いるレベル計は超音波式がほとんどであったが、家庭からの排水が大部分を占める下水幹渠内では水面上に洗剤などによる泡(図 9.)の発生が避けられないため、欠測に陥る場合が多く、流量の測定・監視に大きな支障をきたしていた。そこで超音波式に代わるものとしてマイクロ波レベル計の採用に至った訳である。

また、被測定対象が液面以外の例では、製鉄所内の高炉なべ(鍋)内の溶銑のレベル監視、ヤードにおける原材料鉱石の積載量管理、その他一般工業での粉粒体のレベル測定などを検討中である。

## 7. むすび

以上、マイクロ波レベル計 ML 2001 の概要、このレベル計が従来のレベル計より優れている点、及び適用範囲の広がりについて述べた。このようにマイクロ波レベル計は、今後の展開が大いに期待されるものである。

ただし、現状の製品は価格が他のレベル計と比較して高く、センサ(マイクロ波部)の構造も大きく取付方式も制約があるなどの改良すべき点が残されているので、これらの問題を解決し、よりニーズにあったものとしていくのが今後の課題である。

# 電源設備の信頼性向上と不燃化 —ガス絶縁スポットネットワーク受電設備—

蓑輪 治\*・島津 勲\*\*

## 1. まえがき

都市の近代化、集中化が進み、高負荷密度地域が多くなってきてる。これら地域の負荷への電力供給は無停電供給の信頼性に加えて、保守の容易さと防災性の面から受配電機器に対しての不燃化は、社会的要請ともなってきている。

従来から、ビル受電の無停電供給の信頼性の高い配電方式としては、22kV又は33kV/低圧スポットネットワーク受配電方式が使用されており、特に最近ではこれら受配電設備の不燃化のニーズが高まっている。このようなニーズにこたえるために、SF<sub>6</sub>ガスを絶縁及び冷却媒体にとり入れた非燃、不燃性のスポットネットワーク受配電設備をシリーズ化したので紹介する。

この設備は次の三つの優れた特長をもっている。

- (1) 主要機器にガス絶縁を採用し、非燃・不燃性とし、設備全体を防災性に優れた電力供給の信頼性の高いものとした。
- (2) SF<sub>6</sub>ガスの優れた電気的絶縁性と冷却性能を生かし、設備を小型軽量とした。
- (3) 静止型ネットワーキラーを採用し、無負荷損失を大幅に低減し

た低損失型受電用変圧器を導入した。

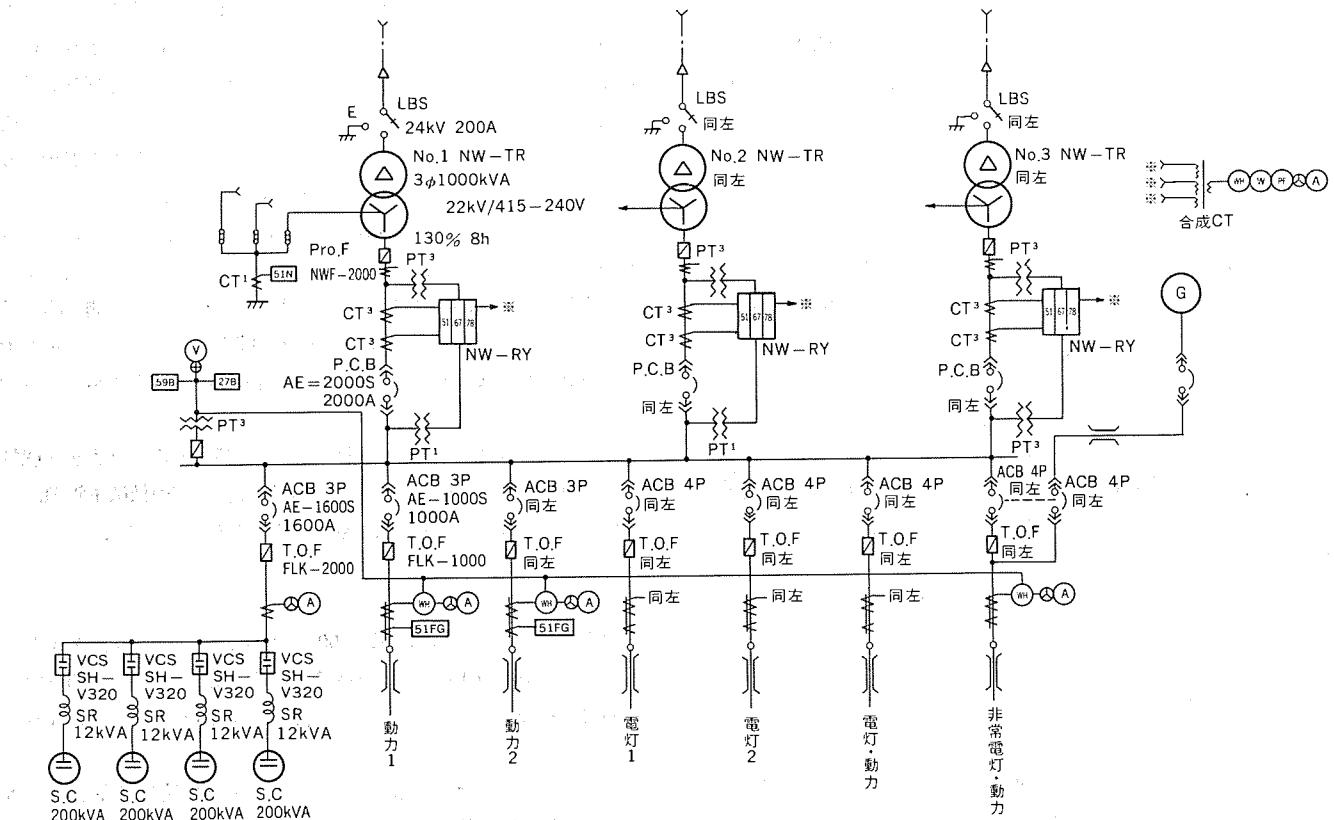
次にその概要を述べる。

## 2. スポットネットワーク受配電設備

スポットネットワーク受配電設備は、主にビル配電に適用される設備で、電力会社から2~4回線(3回線が多い)で22kV又は33kVの特高で受電し、ネットワーク変圧器を介して電圧を400Vに変成、ネットワーク母線で変圧器二次側を並列接続して、この母線から各負荷へ配電する方式である。

電力会社が特高回線の点検や、新規需要家への特高ケーブルのつなぎ込みのために、1回線の送電を停止させ工事をしても、残りの回線により無停電で需要家へ電力を安定供給できる高い供給の信頼性をもっている。

ビル用受配電設備として、負荷機器へ電力の無停電供給の観点からスポットネットワーク受電方式が最も信頼性が高いと言われているが、この信頼性を維持するには的確なハードウェア構成が必要であることはもちろん、受配電設備はメンテナンスを考慮した設備スペース、保守性、安全性並びに設備導入計画の容易さなどにも細心の配慮が必要



22kV/415-240V 3×1,000kVA 50Hz 標準單線接続図

図 1. ガス絶縁スポットネットワーク受配電設備

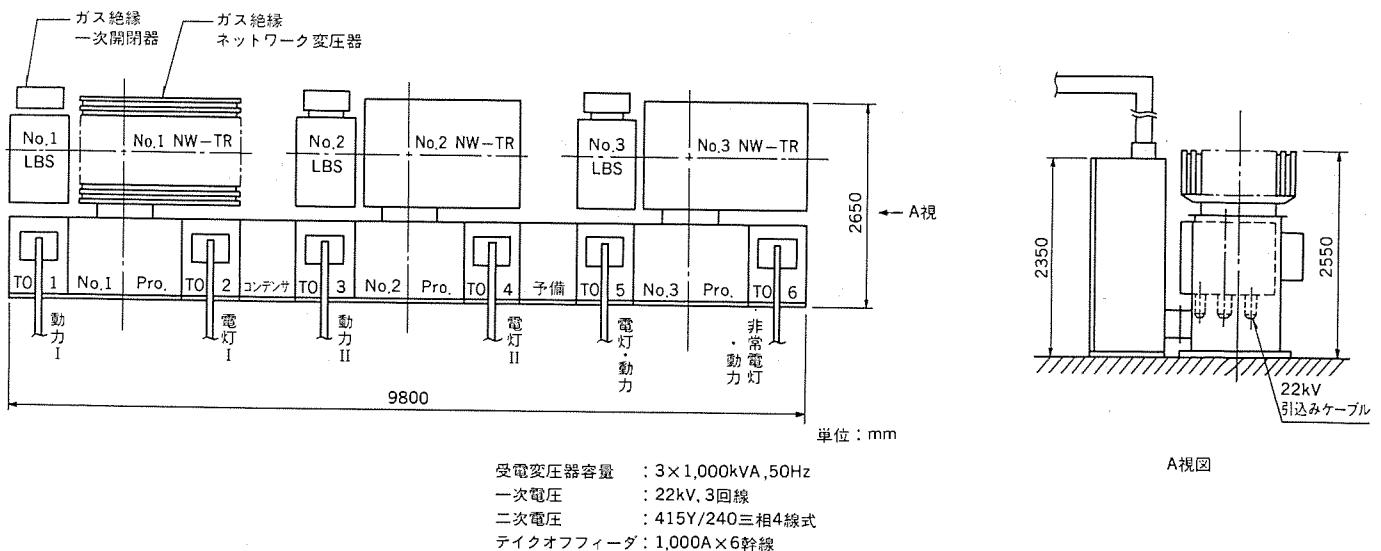


図 2. ガス絶縁 スポットネットワーク受配電設備の配置図

である。

このような観点から、このたびシリーズ化したガス絶縁スポットネットワーク受配電設備は、受電用一次断路器・ネットワーク変圧器、プロテクタ装置及びテイクオフ装置などを、それぞれ標準化されたユニットとして、これらを組み合わせることでスポットネットワーク受配電設備を一つのパッケージとして全体構成ができるように、それぞれのユニットの選択を容易にした。

そして、このシリーズ化計画は、各ユニットの信頼性と設備全体の縮小化を重点におき、変圧器からプロテクタ装置及びテイクオフ装置までを一体化する方式を標準配列とした。また、従来、主に油入機器又は空気絶縁機器が使用されていた一次断路器、変圧器及び力率改善用コンデンサなどの絶縁、冷却媒体にSF<sub>6</sub>ガスを採用しオイルレスと小型軽量化を図った。

図1.に3×1,000kVAスポットネットワーク受配電設備の標準単線結線を示し、図2.に同じく22kV、3×1,000kVA設備の全体配置例を示す。SF<sub>6</sub>ガスは電気的及び化学的に安定で、クリーンで扱いやすい上、電気的絶縁性能及び冷却能力は空気と比べ高いレベルを示している。このような特性のガスを絶縁油に代え、採用することにより機器の不燃化を図り、防災性を向上した。また、空気絶縁式に比べ各機器は小型化された。

そして、前述の一体化構造にしたことの効果と合わせて設備全体の床面積は、従来より30%以上の縮小を図った。

### 3. 設備構成機器の概要

スポットネットワーク受配電設備は、多くの機器により構成されている。受配電設備を構成する主な機器を表1.に示し、各機器の機能、特徴などについて以下に述べる。

#### 3.1 特高ケーブル終端接続箱

電力会社と需要家の分岐点で、充電部が露出することなくコンパクトにケーブルの端末処理を行い、一次断路器にケーブルを引き込む。断路器側に固定するエポキシとう(套)管とケーブル側のモールドストレスコンによる構成となっている。

#### 3.2 ガス絶縁一次断路器・ガス絶縁受電用変圧器

GIS(Gas Insulated Substation)に代表される各種のガス絶縁機器は、その非爆性、不燃性と高い絶縁性及び冷却性能の面で、多く

の分野で導入が進んでいる。ガス絶縁スポットネットワーク受電用の22, 33kV一次断路器・変圧器は、SF<sub>6</sub>ガスの非爆、不燃性に加えて高い絶縁性と冷却性能を利用して小型軽量を図ったものである。

SF<sub>6</sub>ガスは優れた電気絶縁性、消弧性、化学的・熱的安定性、不燃性並びに高い冷却性をもっている。SF<sub>6</sub>ガスの特性を空気、鉱油と対比して表2.に示す。SF<sub>6</sub>ガスは圧力が高くなるにつれ、絶縁、熱伝達率共に性能が高くなるが、一次断路器、変圧器のガス封入圧力は1.2kg/cm<sup>2</sup>・G(常温)としている。これは適切な絶縁性と冷却性能を維持しながら、表1.に示すように130%8時間の過負荷運転を行っても、変圧器の外箱が圧力容器の基準である内圧2.0kg/cm<sup>2</sup>・Gを越えないよう制限したものである。

表1. ネットワーク受配電設備の主要機器

機 器	機 能
(1) 特高ケーブル終端箱	電力会社ケーブルの端末処理を行い、一次断路器へケーブルを引き込む。現在は電力会社と需要家の分岐点となっている。
(2) 一次断路器	変圧器励磁電流の開閉が行える。3位置スイッチとして、ON-OFFのほかにケーブル接地機構も備えている。
(3) ネットワーク変圧器	受電用変圧器で、特高回線の点検又は新規需要家のケーブルつなぎ込みなどで、1回線が停止しても電力供給に支障がないよう、130%8時間の負荷条件(年数回)に耐える設計としている。
(4) プロテクタヒューズ	変圧器二次側以降の短絡事故の電力会社への波及を防ぐ。
(5) ネットワーククリーレ	スポットネットワーク受配電設備の最も重要な制御を行うリレーで、プロテクタ遮断器に次の指令を出す。 ①無電圧投入、②差電圧投入、③逆電力遮断
(6) プロテクタ遮断器	ネットワーククリーレの指令により、変圧器二次側の投入、遮断を行う。
(7) テイクオフ遮断器 テイクオフヒューズ	ネットワーク母線以降の幹線保護を行う。

表2. 主要絶縁媒体の特性

	絶縁耐力 (kV/2.5mm)	熱伝達率 (kcal/m <sup>2</sup> h°C)	引火点 (°C)
SF <sub>6</sub> ガス	35	6	—
空 気	10	2.5	—
鉱 油	60	50	130

注 SF<sub>6</sub>はゲージ圧1.2kg/cm<sup>2</sup>での値

我が国で電力用  $SF_6$  ガス 絶縁遮断器が実用化したのは昭和 40 年で、それ以来、発電所の開閉器類、母線、変圧器などにガスを封入し機器の不燃化、縮小化が図られてきたが、近年、都市が過密化する中で、設備の不燃化、小型化の要請は以前にも増して高まっている。

#### (1) 一次断路器

電力の供給又は需要家側で設備点検などのために、送電あるいは受電を停止したい場合に電路を開路するための機器である。開、閉、接地、の 3 位置構造で、①負荷電流を安全に通電できる、②変圧器励磁突入電流を投入でき、励磁電流を断路できる、③引込ケーブルを接地できる、の三つの機能をもっている。③のケーブル接地は、主に電力会社の電路点検、新規需要家へのケーブルつなぎ込みなど、停電している電路の充電部を扱う場合に安全確保のため行う。

断路器は負荷電流を開閉しないように、並びに電力会社 フィーダが

表 3. 一次断路器の定格

型 式	$SF_6$ ガス絶縁	
位 置 点 数	3	
定 格 電 圧 (kV)	24	36
絶 縁 階 級 (号)	20 B	30 B
定 格 通 電 電 流 (A)	200	
定 格 短 時 間 電 流	25 kA, 1 秒	
開 闭 能 力 (励 磁 电 流)	5 A, 300 回	
無 電 圧 開 闭 能 力	1,000 回	
操 作 方 式	手 動	
封 入 ガ ス 壓 力 (kg/cm <sup>2</sup> )	1.2	

表 4. ネットワーク 変圧器の定格

型 式	$SF_6$ ガス絶縁、自冷式	
回 路 電 圧 (kV)	22	33
一 次 側 定 格 電 圧 (kV)	F 23-R 22-F 21-F 20	F 34.5-R 33-F 31.5-F 30
二 次 側 絶 縁 階 級 (号)	20 B	
結 線	三 角	
二 次 側 定 格 電 圧 (V)	415 Y/240	
二 次 側 絶 縁 階 級	交流試験電圧 4 kV	
結 線	星形中性点端子付き	
角 变 位	Dy11	
温 度 上 界 限 度	E 種 卷線 70°C	
過 負 荷 特 性	100% 負荷連続後 130% 負荷 8 時間 (年数回)	
インピーダンス (%)	750, 1,000 kVA	5~5.5
ス電圧 (%)	1,500, 2,000 kVA	7.5~8.25
準 摂 規 格	JEC-204	
封 入 ガ ス 壓 力 (kg/cm <sup>2</sup> )	1.2 (20°C)	

表 5. スポットネットワーク 受電設備の標準定格

変 圧 器 容 量 (kVA)	MAX 受 電 容 量 130% 2 パンク (kVA)	契 約 電 力 (kW)	プロテクタ装置 定 格 (A)	テイクオフ装置 定 格 (A)	並用コンデンサ (kVA)
500	1,300	900	1,000	1,000	3×150
750	1,950	1,400	1,600	1,000	3×200
1,000	2,600	1,800	2,000	1,000	4×200
1,250	3,250	2,300	2,500	1,000	4×250
1,500	3,900	2,800	3,000	1,600	5×250
1,750	4,550	3,200	4,000	1,600	5×300
2,000	5,200	3,600	4,000	1,600	5×350
2,500	6,500	4,600	5,000	2,000	5×400

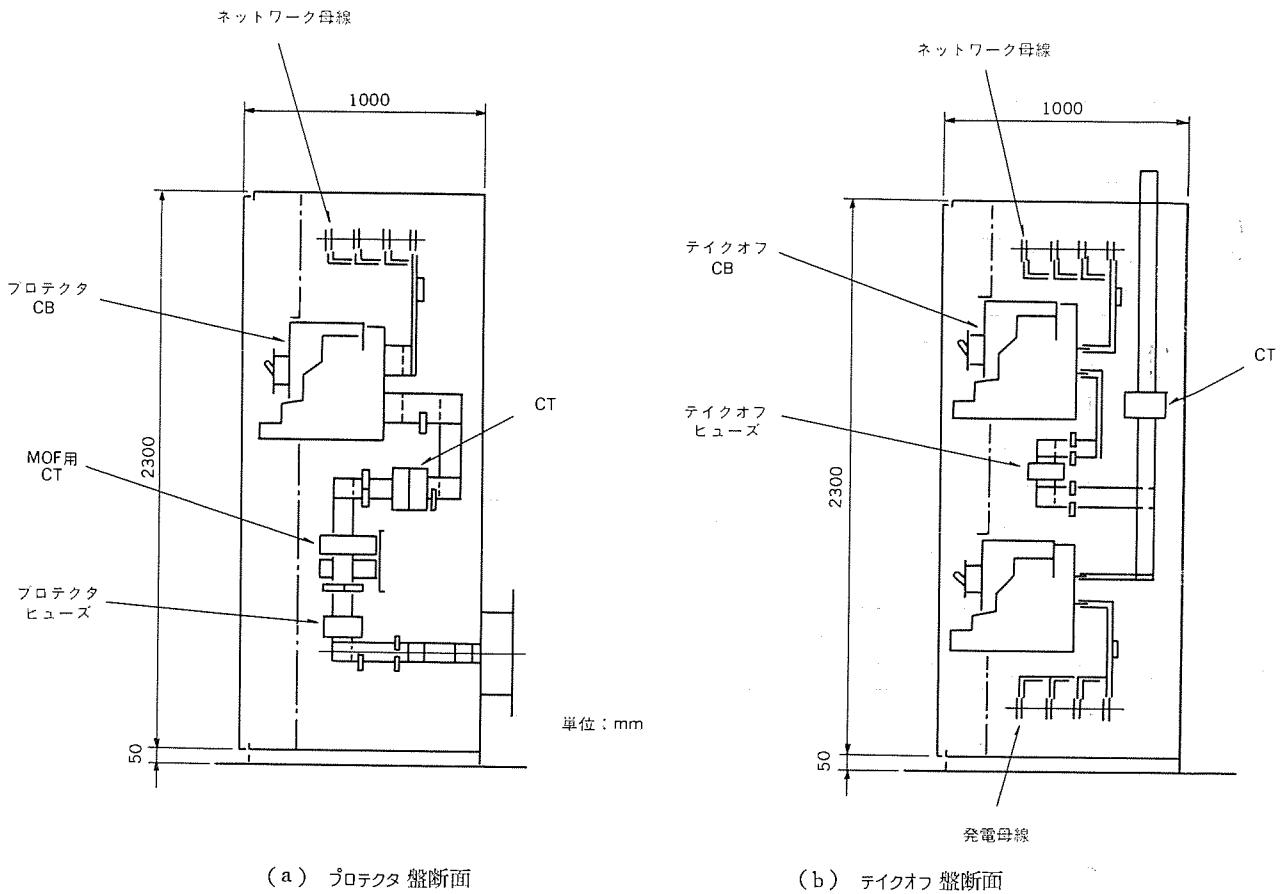


図 4. プロテクタ及びテイクオフ盤の構造

### 3.3 プロテクタ、テイクオフ装置

設備の計画から運転、保守にわたる面で、信頼性並びに安全性を確保するため、プロテクタ及びテイクオフ装置はそれぞれユニット化し、プロテクタユニットはネットワーク変圧器の容量に応じた定格とした。また、テイクオフユニットはフィーダ幹線の電路容量に合わせて選定できるものとしているが、ネットワーク母線の信頼性向上からもフィーダ幹線数は、できるだけ制限した方が望ましく、ネットワーク変圧器1台について2回線のフィーダ幹線を標準とした。表5にネットワーク変圧器定格容量に対するプロテクタユニットとテイクオフユニットの標準的な組合せを示し、図4に盤内構造を示す。

信頼性をより高めるため、ネットワーク変圧器、プロテクタ及びテイクオフユニットを一体構造として、ネットワーク変圧器とプロテクタユニット間の導体及びネットワーク母線を極力短くした。そのほか、防災性の観点から構造に種々の配慮を払っている。

### 3.4 ネットワークリレー

ネットワークリレーは、スポットネットワーク受配電設備の運転を制御する最も重要なもので、①無電圧投入、②差電圧投入、③逆電力遮断の三つの状況判断機能をもち、各条件を検出してプロテクタ遮断器へ動作信号を出す。

#### (1) 無電圧投入

全回線の変圧器が停止していて、運転を開始する場合、変圧器二次電圧が正常でネットワーク母線電圧が“零”的条件で、プロテクタ遮断器に投入指令を出す。

#### (2) 差電圧投入

2回線目以降の変圧器をネットワーク母線に並列運転させる場合、変圧器二次電圧とネットワーク母線電圧の差電圧を検出し、並列運転

可能な差電圧のときにプロテクタ遮断器に投入指令を出す。

#### (3) 逆電力遮断

ある回線の変圧器一次電圧が異常に低下したり、なくなった場合、その回線の変圧器は二次側から一次側に電力が逆流する。このようなとき、プロテクタ遮断器に開路指令を出す。

リレーは短絡事故などの大きな逆電流から、ネットワーク変圧器の励磁電流のごく微小な逆電流まで、広範な電力方向検出要素、差電圧とその位相確認の電圧検出要素、過電流検出要素及び回生電力による逆電力誤動作防止などの付属要素の複合機能をもち、従来はこの機能を持たせるため、複数のリレーを組合せ形状も大きかったが、電子式デジタル型リレーを開発したことにより、1台のリレーで、多機能、高感度、小型化を実現した。《MULTI CAPシリーズ》，CNPI-10-M3型デジタル型ネットワークリレーのハードウェア基本構成を図5に示す。PT, CT, の二次出力をフィルタ回路、サンプルホールド回路を通してマルチプレクサ(相切換)で選択された信号は、A/D(アナログ/デジタル)変換器によりデジタル化した後、マイコンで高速演算処理し、信号を出す。図6に示す逆電力遮断特性、差電圧投入特性をもつほか、プロテクタ遮断器の開閉の状態を入力することにより不要差電圧投入防止、回生電力誤動作防止などの機能も兼ね備えている。

電子式リレーは次の主な特長をもっている。

(1) 逆電力遮断、回生電力検出、無電圧投入、差電圧投入、不要差電圧投入防止、過電流要素、負荷電流計測の各機能をコンパクトにまとめた。

(2) 逆電力遮断の高感度化により、無負荷損を低くした低損失型ネットワーク変圧器との組合せが可能となった。

(3) 差電圧投入の高感度化により、軽負荷時にも確実な自動投入

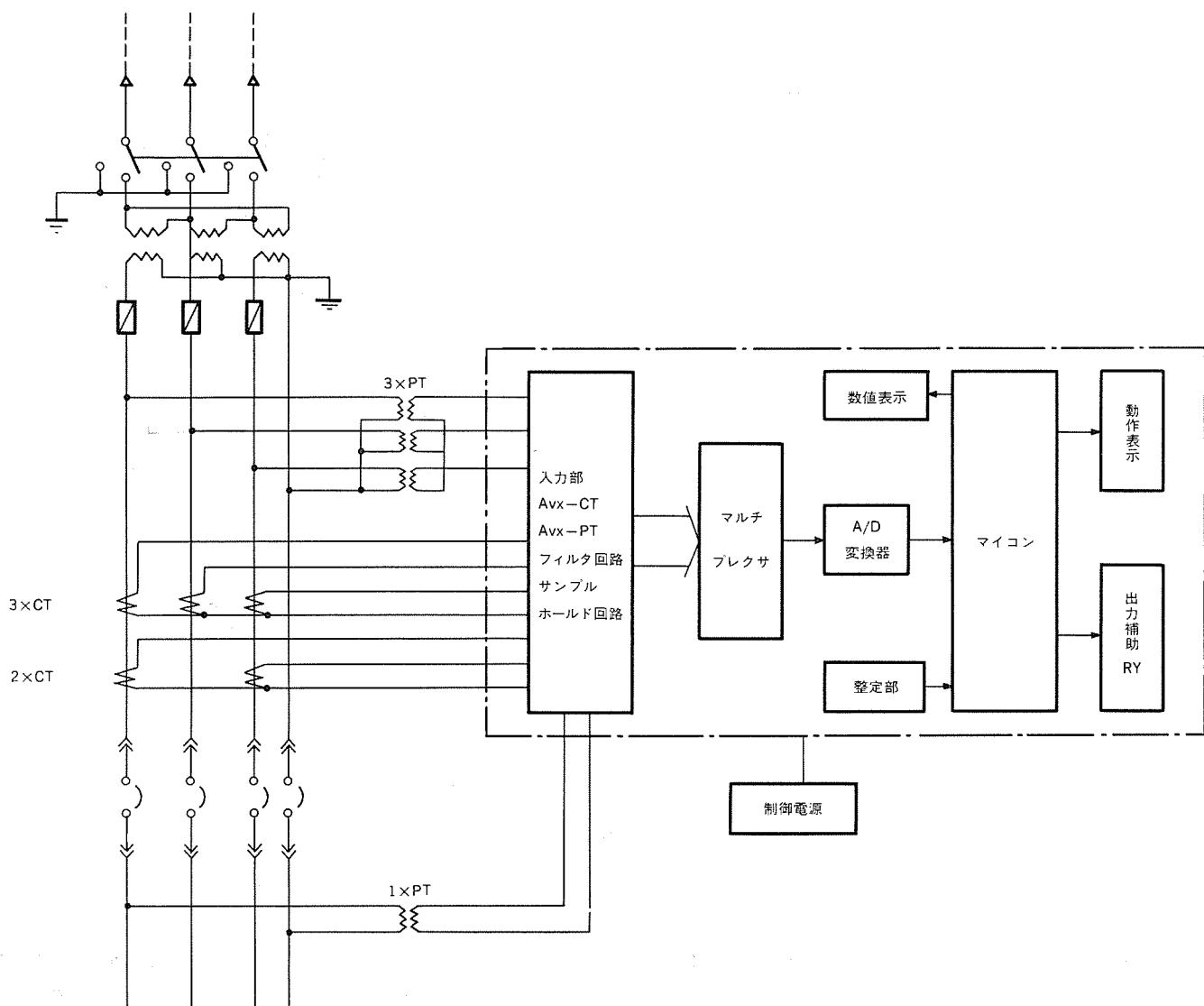
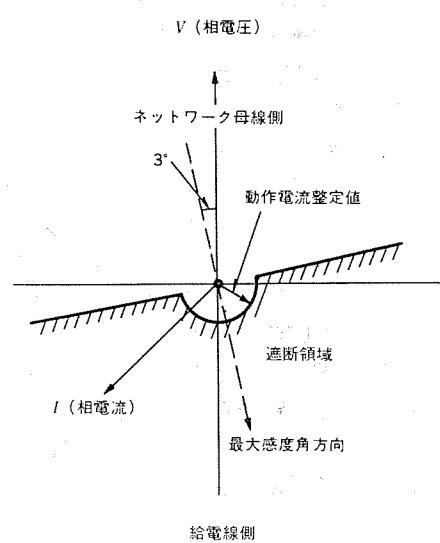
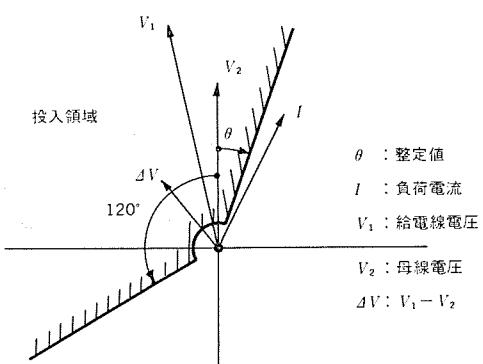


図 5. CNPI-10-M3 型ネットワークリレーの内部ブロック図



(a) 逆電力遮断位相特性



(b) 差電圧要素の位相特性

図 6. 逆電力遮断及び差電圧投入特性

表 6. 低圧進相コンデンサの定格

定 格	400 V AC 3φ 50 Hz 50 kVA
型 式	GFC型 SF <sub>6</sub> ガス封入自冷式
使 用 場 所	屋 内 用
容 量 偏 差	-5~+15% 相間不平衡 108%
最 高 許 容 通 電 壓	定格電圧の110%以下, 但し24時間のうち8時間以内
最 大 許 容 通 電 流	高調波電流を含めて定格電流の130%以下
放 電 特 性	開放3分後において75V以下
準 摂 規 格	JIS C 4901

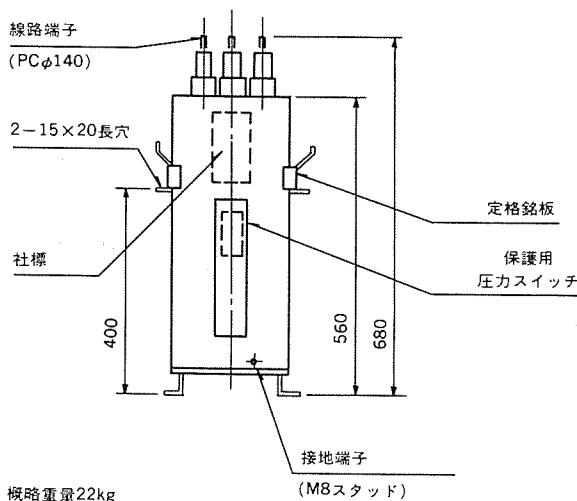
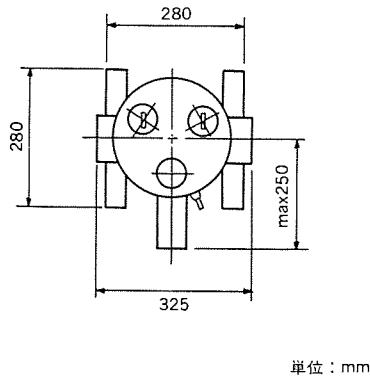


図 7. 低圧進相コンデンサの外観図

が行える。

- (4) 負荷電流の常時監視機能を付加した。
- (5) 従来の誘導型に比べ消費電力を小さくした(当社比80%減)。
- (6) 引出し型になっており、ケースを盤に取り付けた状態で内部ユニットを引き出すことができ、メンテナンスが容易である。

### 3.5 力率改善用ガス絶縁コンデンサ

従来、変圧器に次いで油を多く使用しているのが力率改善用コンデンサである。コンデンサも鉛油に代わり SF<sub>6</sub>ガスを充てんすることにより不燃化を図った。油入式に比べ次の特長がある。

(1) 非爆・不燃性である。

(2) 内部誘電体電極に蒸着金属を使用し、万一の レアショート事故時に自己回復特性をもっており、信頼性が高い。

(3) SF<sub>6</sub>ガスは大気圧より高い圧力で封入されているが、万一圧力が低下して、大気圧になったとしても常規電圧で支障なく使用できる安全設計となっている。

(4) ケース内圧の異常上昇に対して動作する圧力スイッチを付属しており、安全性を倍加している。

(5) 電力損失は油入式の約25% (当社比) と少なく、低損失型となっている。

図 7. に外形寸法及び外観を示す。表 6. に標準定格を示す。

## 4. む す び

ビル受配電設備としては、信頼性と安全性が最も優先されることを言うまでもなく、併せて、省スペースなどの経済性も重要な項目である。

都市が過密化し、インテリジェントビルの出現など、ビルの機能もますます高度に、かつ複雑になってきている中で、電力供給の信頼性向上の必要性は以前にも増して高まっていると考えられる。

供給信頼性の高いスポットネットワーク受配電設備を、その不燃性、非爆性の観点から、設備のガス絶縁化を図り、設備の縮小化はもとより、設備の防災性を向上したガス絶縁スポットネットワーク受配電設備はインテリジェントビルなど新しい都市型ビルに適した受配電方式の一つで、今後、広く採用されていくものと期待している。

# プラスチックパッケージ型ECL RAM

中井 義幸\*・小山 和美\*・日下 健一\*・黒肥地 稔\*・真継 泰典\*

## 1. まえがき

ECL RAM (Emitter Coupled Logic Random Access Memory) は、高速読出し、書き込み動作が可能なスタティックメモリであり、コンピュータのバッファメモリやコントロールメモリをはじめとして、計測機器や高速画像処理装置などの高速記憶装置に使用されている。このため、ECL RAM には高速性だけでなく、高信頼度が要求される。

高速動作を可能にするため、ECL RAM の消費電力は 0.95 W(標準)と大きく、従来、パッケージには熱抵抗の低いセラミックパッケージが用いられ、大消費電力による接合温度の上昇が低減されていた。

当社は低熱抵抗、高信頼度のプラスチックパッケージによる ECL RAM の製品化に成功したので、ここでは主に、プラスチックパッケージの特長について報告する。

## 2. 低熱抵抗プラスチックパッケージ

プラスチックパッケージは、モールド樹脂の誘電率が、セラミックの誘電率より小さいため、パッケージの端子容量が小さく、高速 IC に適する半面、その構造上の特徴から、セラミックパッケージに比較して、以下のような欠点があると考えられてきた。

(1) モールド樹脂の熱伝導率がセラミックのそれよりも小さいため、消費電力の大きい高速型 IC では接合温度が高くなり、スイッチングスピードが低下する。

(2) モールド樹脂が、IC の能動部のあるチップ上面に接するため、熱応力やモールド樹脂の硬化収縮応力により、IC の誤動作や機械的損傷を発生しやすい<sup>(1)</sup>。

これらの問題点の解決のため、(1)に関しては、主としてリードフレームの改良、(2)に関しては、主としてモールド樹脂の改良を実施し、セラミックパッケージより熱抵抗が低く、高信頼度のプラスチックパッケージを開発することに成功した。

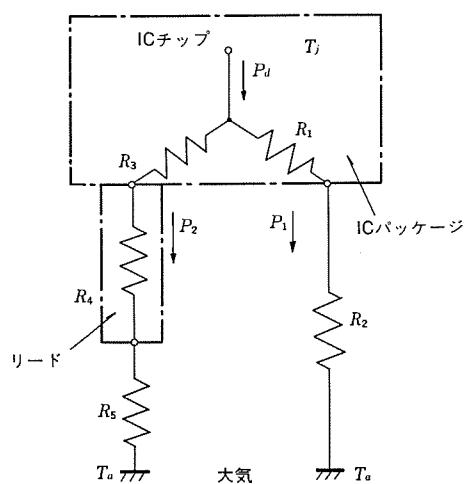


図 1. IC パッケージの熱流等価回路

## 2.1 热抵抗の低減

半導体の接合温度  $T_j$ 、消費電力  $P_d$ 、周囲温度  $T_a$  の間には、式(1)に示す関係が成立する。

$$T_j = T_a + P_d \cdot \theta_{ja} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\theta_{ja}$  はパッケージの熱抵抗と呼ばれ、パッケージの放熱性能を表す値である。

### 2.1.1 プラスチックパッケージの熱抵抗

IC パッケージの放熱経路は、図 1. に示す等価回路に置き換えることができる。図中、 $R_5$  は実装条件により決定され、 $R_2$  はパッケージ表面積や強制空冷などの冷却条件により変化する。 $R_1$  及び  $R_3$  は、パッケージ材料の熱抵抗を含んでおり、セラミックに比較して、熱伝導率の小さいモールド樹脂を用いるプラスチックパッケージでは大きくなる。 $R_4$  は外部リードの材質と形状で決まる。 $R_1$  及び  $R_3$  は、パッケージの内部構造で決まり、IC ユーザーの実装条件と独立に低減対策を施すことができるため、IC メーカーにとって、これらの低減が主要課題となる。

プラスチックパッケージにおいて、 $R_1$  及び  $R_3$  を低減するには、伝熱に寄与するモールド樹脂の断面積を増加させることが必要で、このために、モールド樹脂より熱伝導率が高いリードフレームのパッケージ内部の形状を工夫して、パッケージ内部でチップの発熱を広く拡散させ、従来のプラスチックパッケージでは、伝熱への寄与が小さかったパッケージ周辺部のモールド樹脂も伝熱に寄与させることができることがわかった。

### 2.1.2 低熱抵抗プラスチックパッケージの設計

ECL RAM 用プラスチックパッケージは、セラミックパッケージ型 ECL RAM との実装上の互換性を確保するため、外形は標準型 DIP パッケージとした。したがって、熱抵抗を低減するため、パッケージ表面積を増加させるような方策はとることができず、もっぱら、フレーム材料とパッケージ内部のフレーム形状の最適化により、チップ発熱の拡散を早めセラミックパッケージより低い熱抵抗のプラスチックパッケージを実現した。

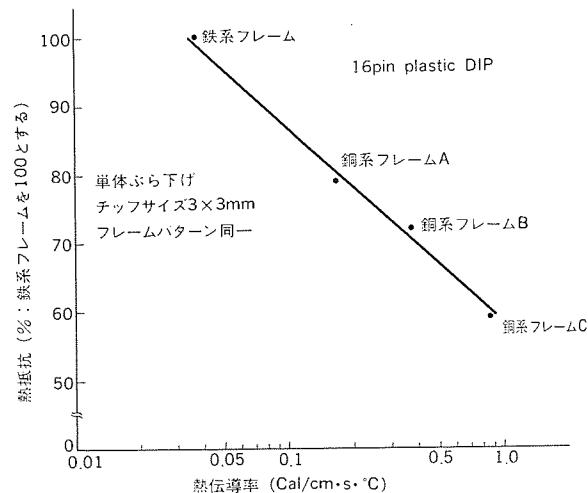


図 2. リードフレーム材と熱抵抗の関係

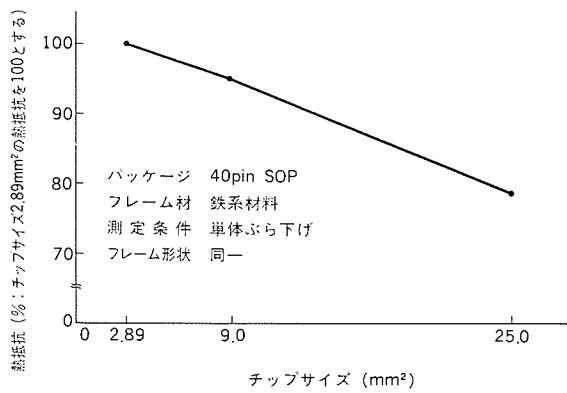


図 3. チップサイズと熱抵抗の関係

表 1. アイランドサイズと熱抵抗の関係

パッケージ	アイランドサイズ (mm <sup>2</sup> )	熱抵抗 (°C/W)	アイランドサイズの比	熱抵抗の比
24 Pin DIP	9	106.1	1	1
	28.08	91.7	3.12	0.864
24 Pin SOP	15.96	173.4	1	1
	23.92	164.1	1.50	0.946

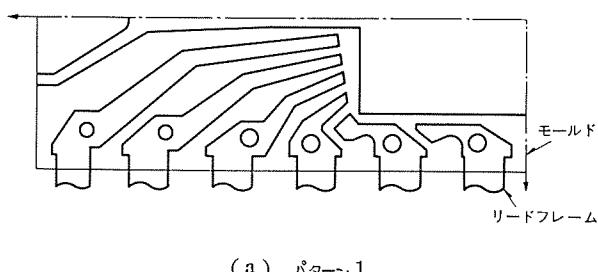
注 チップサイズ、フレーム材料、モールド樹脂、及び測定条件は同一。

### (1) フレーム材料

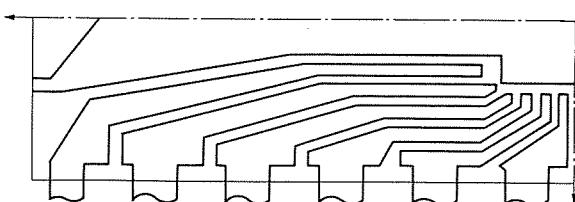
フレーム材料の熱伝導率が増加すると熱抵抗は低下する。図2.は16ピンDIPパッケージのフレーム材料と、パッケージ熱抵抗の関係を実測した結果である。図中、銅系のフレーム材Cでは、パッケージ熱抵抗が鉄系フレームの60%以下に低下している。一般に、熱伝導率の大きいフレーム材料は、機械的強度が低く、リード曲がりを発生しやすいが、この材料は当社の多くのICで十分な市場実績があり、DIP型パッケージでは、強度上の問題が発生しないことがわかっている。

### (2) フレーム形状

同一外形のプラスチックパッケージにおいて、内部のチップやリードフレームのアイランド(チップを搭載、固定する部分)が大きくなると、パッケージ熱抵抗が低下する。これは、パッケージ内部で、プラスチックに比較して熱伝導率の高いシリコンチップやアイランドが、熱を広く拡散するた



(a) パターン1



(b) パターン2

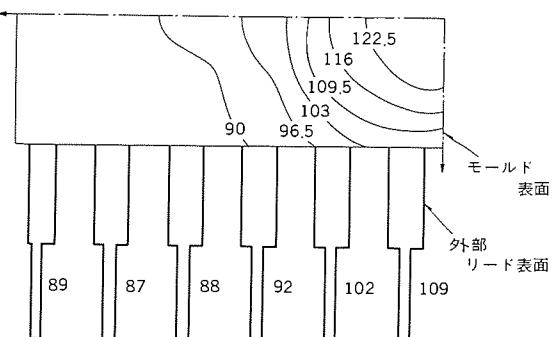
図 4. フレーム形状 (1/4 形状)

めである。図3.にチップサイズと熱抵抗、表1.にアイランドサイズと熱抵抗の関係を示す。パッケージ熱抵抗を低減するためにチップサイズを大きくすることは、経済性に難点があるので、チップサイズはセラミックパッケージ用と同一とし、フレーム形状の最適化を検討した。

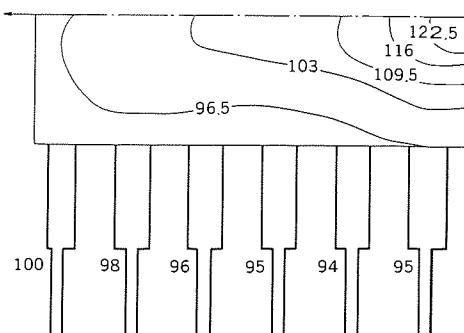
最初に、ECL RAMの実装が可能な既存フレームの中から、アイランドサイズが最も大きいものを抽出した。図4.(a)のパターン1に示すのがこのフレームであり、鉄系材料で作られている。このフレームを用いたプラスチックパッケージの熱抵抗は91.6°C/Wであり、ECL RAM用セラミックパッケージの熱抵抗57.5°C/Wより大きい。次に、前項で述べた銅系フレーム材Cに、このフレームパターン1を適用したときのパッケージ熱抵抗を、熱回路網法によるコンピュータシミュレーションによって求めると、57.6°C/Wとなり、セラミックパッケージと同等の熱抵抗が実現できることがわかる。しかしながら、このフレームでは、ECL RAMのチップサイズ3×2.5mmに比較して、アイランドサイズが10×5.5mmと大きいため、ボンディングワイヤが長くなり量産性に問題を生ずる。

ボンディングワイヤ長さを短くするため、インリード先端部をチップに近づけ、しかも、実効的なアイランドサイズを大きくするため、アイランドを支持する、いわゆる、つ(吊)りリードの幅を広げることにした。最適フレーム形状を求めるために、コンピュータシミュレーションを実施した。シミュレーションにより決定したフレームパターンを図4.(b)のパターン2に示す。パッケージ熱抵抗の計算値は52.2°C/Wでパターン1より優れている。これは、パターン2のフレームが、パッケージ内で効率良く熱を拡散できるためである。図5.にパターン1及びパターン2のフレームを用いたパッケージの表面温度分布のシミュレーション結果を示す。これらは、いずれもチップの消費電力を2Wとしたときのものであるが、パターン1では、パッケージ周辺部への熱拡散が十分でないことがわかる。

パターン2のフレームを用いたプラスチックパッケージの熱抵抗を実測し、



(a) パターン1 (フレーム材料銅系) 使用パッケージ



(b) パターン2 (フレーム材料銅系) 使用パッケージ

図 5. パッケージ表面温度分布 (単位: °C)

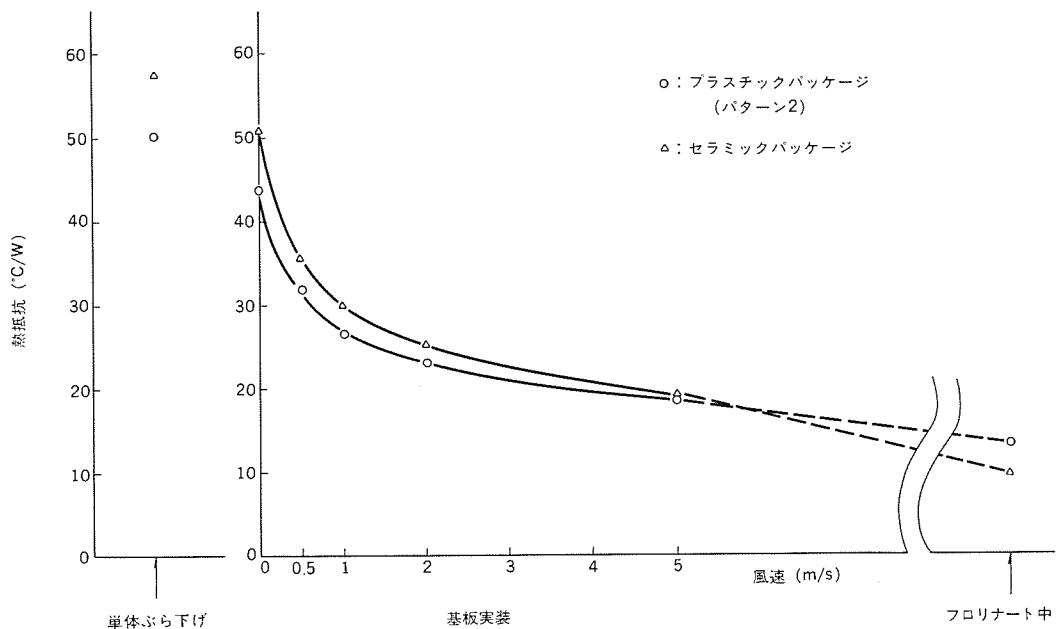


図 6. セラミックパッケージとプラスチックパッケージの熱抵抗比較

表 2. 热抵抗測定条件

測定条件	詳細説明
単体ぶら下げ	静止空気中に細い電線で IC を宙吊りにした状態で測定。
基板実装 (静止空気中)	静止空気中において、70 mm × 70 mm × 1.6 mm の片面銅はくガラスエポキシ板に実装した状態で測定。
基板実装+風速	上欄と同じサンプルを強制空冷（風速 0.5, 1, 2, 5 m/s）した状態で測定。
フロリナート*中	IC をフロリナート液槽中に吊った状態でフロリナート液をかくはんしながら測定。

注 \* 3M 社の登録商標

セラミックパッケージと比較したのが図 6. である。このときの測定条件を示すのが表 2. である。フロリナート（ふつ素系不活性液体：3M 社の登録商標）中では、パッケージ表面温度と周囲温度の差が小さいので、測定値は事実上、接合とパッケージ表面の間の熱抵抗  $\theta_{jc}$  を表す。また、 $\theta_{jc}$  は風速無限大のときの  $\theta_{ja}$  と考えてよいので、強制空冷下での熱抵抗の右端にプロットしてある。風速 5 m 以下で、プラスチックパッケージの熱抵抗が、セラミックパッケージより低いのは、パッケージ表面からの熱ふく射がプラスチックパッケージの方が、セラミックパッケージより大きく、パッケージ表面から空気への熱伝達率が小さくなる低風速域では、ふく射による冷却効果が顕著に現れるためと考えられる。

### 3. プラスチックパッケージと電気特性

素子の電気的特性に影響を及ぼすパッケージの特性は、主として熱抵抗と端子容量である。

#### 3.1 热抵抗

パッケージの熱抵抗は、素子のスイッチングスピードに影響を与える。図 7. は、1K ビット ECL RAM のアドレスアクセス時間  $t_{AA}$  の温度特性である。常温以上では、接合温度  $T_j$  の上昇とともに  $t_{AA}$  が大きくなる。このため、パッケージ熱抵抗を低減して、接合温度の上昇を抑えることが重要であるが、ECL RAM 用プラスチックパッケージは、前述のようにセラミックパッケージよりも熱抵抗が低く、十分な高速動作が確保

できる。

#### 3.2 端子容量

ECL はオープンエミッタ出力であり、OR Tie が可能である。この場合、端子容量が出力負荷容量として加わるため、端子容量が大きいと、出力の立ち上がり、立ち下がり時間が増大し、アクセス時間が長くなる。図 8. に 256 ワード × 4 ビット ECL RAM のピン配置、図 9. にセラミックパッケージとプラスチックパッケージの端子容量を示す。セラミックパッケージとプラスチックパッケージの端子容量の差は、主としてパッケージ材料の誘電率の差によるものであり、同一パッケージにおいて各端子の容量が異なるのは、パッケージ内部配線の形状によるものである。プラスチックパッケージは、すべての端子において、端子容量がセラミックパッケージより低く、ECL RAM に適することがわかる。

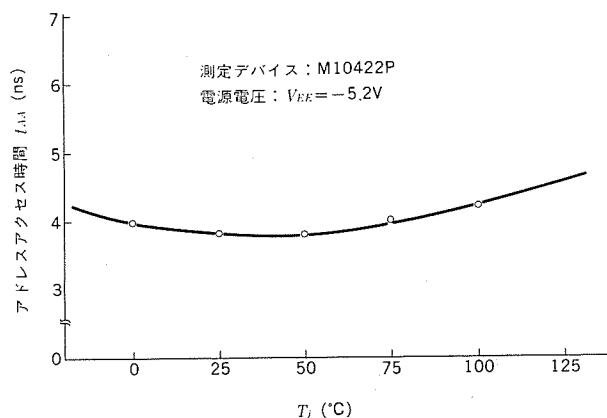


図 7. アドレスアクセス時間  $t_{AA}$  の温度特性

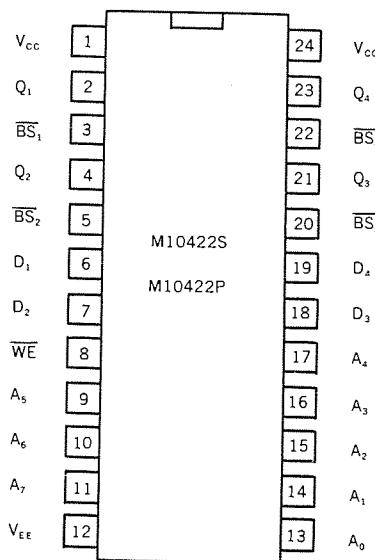


図 8. ピン接続図(上面図)

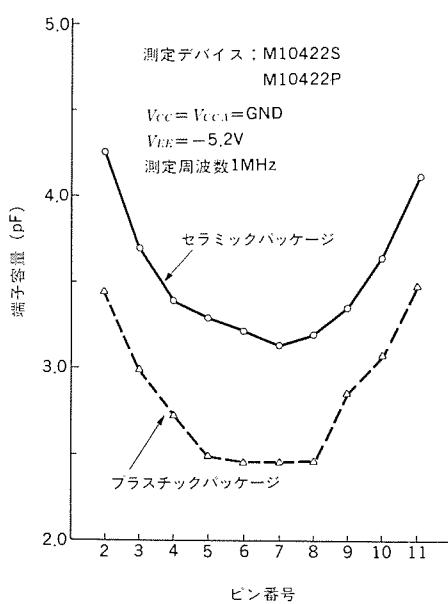


図 9. 端子容量

#### 4. 信頼性

##### 4.1 プラスチックパッケージの信頼性向上

###### (1) 高温寿命

プラスチックパッケージ IC の高温動作時の故障モードは、主としてオーバン不良であるが、これはチップ上のボンディングパッドと呼ばれる I/O 端子と金製ボンディングワイヤの接合部のはく離によるものである。この現象は、ボンディングパッド構造<sup>(2)</sup>や、封止モールド樹脂の種類<sup>(3)(4)</sup>に依存することが知られており、これらの点を考慮して、最適のボンディングパッド構造とモールド樹脂を選定している。

###### (2) 热応力

表 3. 信頼性試験結果

試験項目	条件	試料数	累積故障数					備考	
			48H	96H	240H	500H	1000H		
高温動作寿命(I)	$T_a=125^{\circ}\text{C}$ , $V_{EE}=-5.46\text{V}$	90	0	0	0	0	0	—	
高温動作寿命(II)	$T_a=75^{\circ}\text{C}$ , $V_{EE}=-6.5\text{V}$	45	0	0	0	0	0	—	
高温保存(I)	$T_a=150^{\circ}\text{C}$	66	0	0	0	0	0	—	
高温保存(II)	$T_a=175^{\circ}\text{C}$	44	0	0	0	0	0	—	
耐湿性	高温高湿バイアス $85^{\circ}\text{C}, 85\% \text{RH}$ , $V_{EE}=-5.46\text{V}$	90	0	0	0	0	0	DC バイアス	
	P. C. T $121^{\circ}\text{C}, 2\text{気圧}$	135	0	0	0	0	—	—	
熱的ストレス	はんだ耐熱 $260^{\circ}\text{C}, 10\text{s}$	135	0					シリーズで実施 (1) はんだ耐熱 ↓ (2) 热衝撃 ↓ 温度サイクル ↓ 温度サイクル	
	熱衝撃 <sup>(2)</sup> $-50\sim+125^{\circ}\text{C}, 10\text{分/サイクル}, 15\text{サイクル}$		0						
	温度サイクル $-65\sim+150^{\circ}\text{C}, 60\text{分/サイクル}, 100\text{サイクル}$		0						

注(1) 热的ストレスは同一サンプルで、はんだ耐熱、热衝撃更に温度サイクルと順次シリーズで実施。

(2) 热衝撃はプロリナート液中にて実施。

IC 封止用モールド樹脂の熱膨脹係数は、シリコンのそれよりも 1 けた大きい。このようなモールドパッケージでは、シリコンチップが直接、モールド樹脂に触れているため、はんだ実装時など、急激な温度変化によりチップに熱応力が加わり、チップ表面のパッシバーション膜に損傷が生じたり、甚だしい場合にはチップが割れることもある。ECL RAM 用パッケージには弾性率の低いエポキシシリコン封止材を採用して、熱応力を低下させている。

##### (3) 耐湿性

一般にモールドパッケージ IC の耐湿性は、チップ表面のパッシバーション膜として、塗化シリコンを用いることによって、実用上問題のないレベルに達しているが<sup>(5)</sup>、ECL RAM では、更に低応力化モールド樹脂の採用により、チップ表面やリードフレームからのモールド樹脂のはく離を防止し、更にモールド樹脂中の遊離ハロゲンの低減などの高純度化対策を実施している。

#### 4.2 信頼性試験結果

プラスチックパッケージ ECL RAM の信頼性試験結果を表 3 に示す。高温寿命・熱応力・耐湿性ともに何ら問題を発生していないことがわかる。

#### 5. むすび

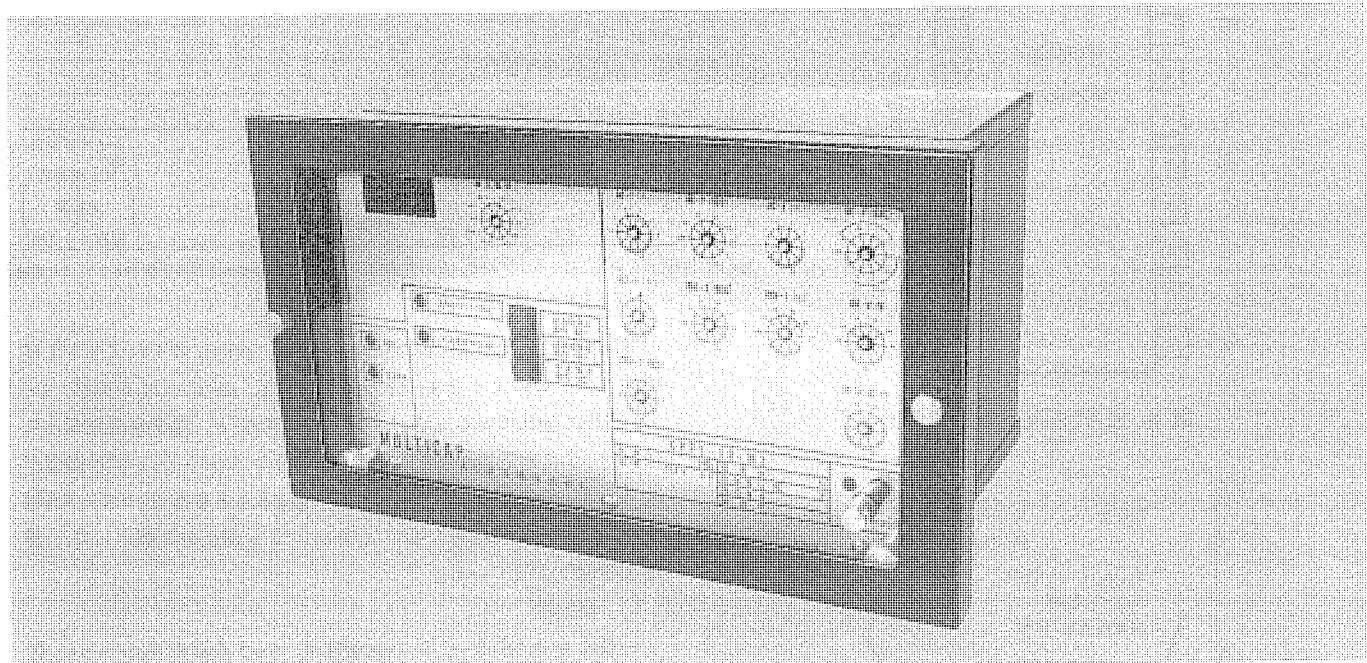
低熱抵抗、高信頼度の IC 用プラスチックパッケージを開発し、ECL RAM に適用した。パッケージ外形は、標準型 DIP であり、従来のセラミックパッケージ型 ECL RAM と置換可能である。

#### 参考文献

- (1) 渋谷ほか：日経マイクロデバイス, p. 81 (1986-4)
- (2) 松本、永野：信学技報, 85, No. 103, R 85-15
- (3) R. C. Blish, II, L. Parobek: Proc. 21st Phys. Sympo. p. 142 (1983)
- (4) R. E. Thomas, V. Winchell et. al: Proc. 29th Electronic Component Conf, p. 182 (1982)
- (5) 松本、永野：信学技法, 84, No. 88, R 84-12

# 三菱静止形並列運転保護継電器

## スポットライ MULTICAPシリーズ



最近、高圧以上の電力需要家において省エネルギー及びコスト低減の観点から、コーデュエネレーション及びピークカットとして系統を連系する例が増加しています。

このたび三菱電機では、このような系統連系時の保護に必要な並列運転保護継電器を製品化しました。

三菱静止形並列運転保護継電器は、需要家の自家用発電と系統との連系保護に必要な複数の要素をシーケンス機能と併せて収納したもので、コーデュエネレーション及びピークカット時の連系保護に最適です。

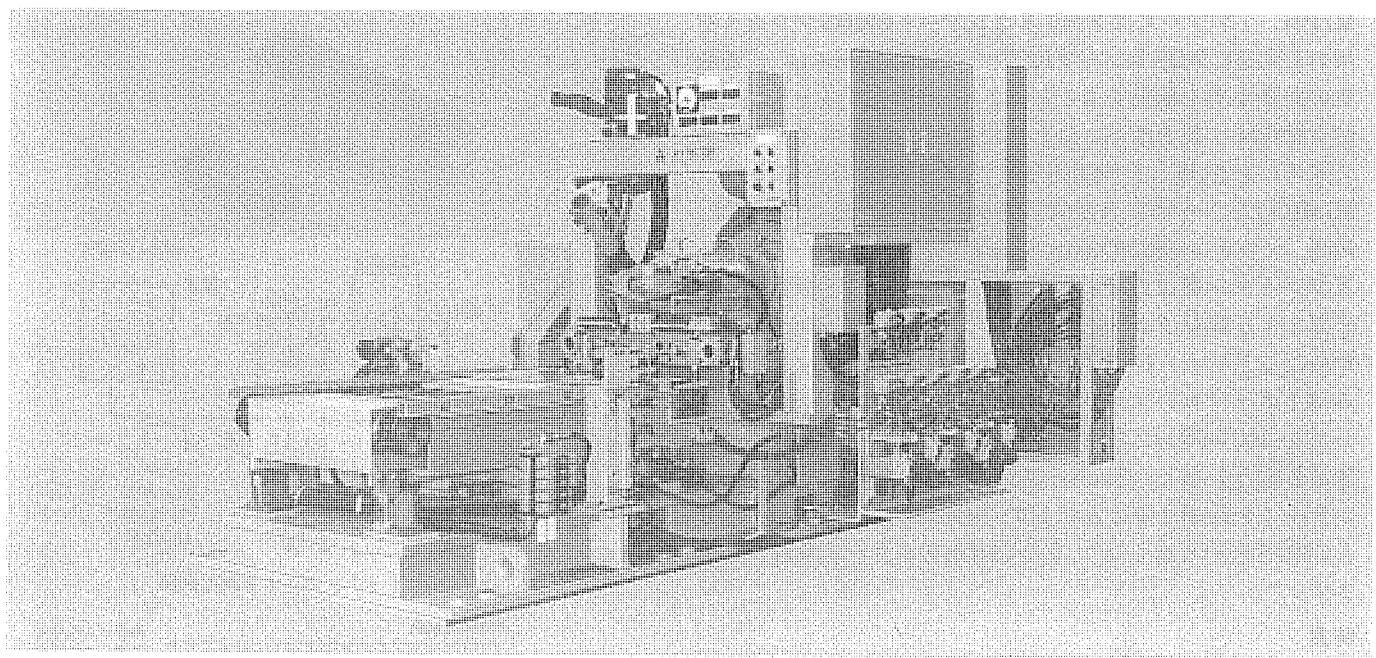
### 特長

- 至近端3相短絡事故でも確実に応動できる電圧メモリ付方向短絡継電要素を2要素収納。
- 方向短絡継電要素のフェールセーフ用として不足電圧継電要素を3要素収納。
- 逆電力継電要素を2要素収納。
- 専用回線及び非専用回線下での専用相当回線時の無警告停電用として不足電流継電要素を収納。
- 系統連系時の電力動搖による不要応動防止機能を収納。
- 系統連系保護に必要な複数の要素とシーケンス機能を1ユニットにコンパクトに収納。

### 仕様

形名		CPP1-10-M3
定格	周波数	50Hzまたは60Hz
	CT回路( $I_R$ )	5Aまたは1A
	PT回路	110V
	制御電源回路	DC24V、48V、110V、125V、220Vまたは250V
整定	逆電力要素(RP)	$I_R \times (2-3-4-5-7-10\%)$
	動作時間(RP-T)	LOCK-0.1-0.2-0.4-0.6-0.8-1-1.5-2 sec.
	方向短絡L要素(DSL)	$I_R \times (2-3-4-5-7-10\%)$
	動作時間(DSL-T)	LOCK-0.1-0.2-0.4-0.6-0.8-1-1.5-2 sec.
動作	方向短絡H要素(DSH)	$I_R \times (20-30-40-50-70-100\%)$
	動作時間(DSH-T)	50msec.以下
	不足電流要素(UC)	$I_R \times (2-3-4-5-7-10\%)$
	動作時間(UC-T)	LOCK-0.2-0.5-1-2 sec. 【出力モード I】動作接点出力は、入力条件に関係なく1秒後に復帰する。 【出力モード II】動作接点出力は、入力条件に応じて動作する。
負担	不足電圧要素(UV)	動作電圧60-65-70-75-80-85-90V 連系
	不要動作機能	ロック時間(LOCK-T) 0-1-2-4-6-8-10 sec. 系統が連系して電力動搖が安定するまでRP、DSL、DSH、UC要素の動作を一定時間ロックする。
	強制動作	正面パネルスイッチにて行います。
	自己監視	電子回路の監視および内蔵電源の監視を行います。
寸法	CT回路	0.5VA以下(5A定格) 0.5VA以下(1A定格)
	PT回路	0.1VA以下
	制御電源	27W以下
	耐圧	AC2000V 商用周波数 1分間
重量		6kg以下(中味のみ)、10kg以下 (MU-3 ケース高さ200mm幅350mm奥行220mm込み)

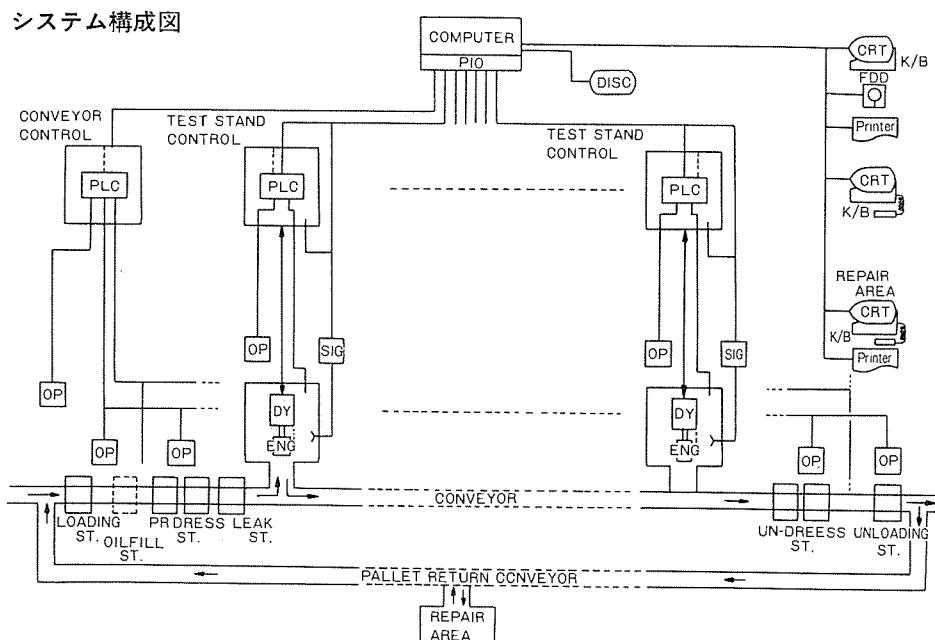
# スポットライ 三菱エンジン自動試験システム



近年自動車に要求されるPL(Products Liability)の重要性の認識がますます高まり、SQCの定着とともに生産ラインにおける品質管理の定量化が求められてきています。特に、重要コンポーネントであるエンジンの単体組立品の全数性能検査をライン上で行うために、コンピュータ化された全自動エンジンテストシステムの導入が進められています。

三菱電機は、1979年に日本最初のラインテスタを開発以来多くの実績がありますが、このたびディーゼル/ガソリンの混流生産ライン用の多機能形テスタを製作納入しました。FMSによる多種少量生産に対応したシステムとなっています。

## システム構成図



## 特長

- パレット外段取りにより多機種のエンジンに対応可能。
- コールドクランキングテストとファイヤリングによるホットテストの機能を1つのテストスタンドに集約し、ライン処理能力のフレキシビリティが向上。
- 高性能DCダイナモータを装備し、最大トルク、最大馬力の計測を短時間で実行可能。
- データの統計処理により、エンジンの品質把握のみならず、システム故障の自己診断も可能。

## 仕様

対象エンジン	ガソリンエンジン (キャブ式、電子噴射式) ディーゼルエンジン
リーコテストスタンド	加圧保持方式 (オイル系、冷却水系)
エンジンテストスタンド	110 kW 6000 RPM DCダイナモータ 温水供給、燃料供給装置付
テスト項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コールドクランキングチェック</li> <li>・始動性確認</li> <li>・アイドル性能</li> <li>・最大トルク点性能</li> <li>・最大馬力点性能</li> <li>・目視検査</li> </ul>

# 低スイッチングノイズ、高出力電流

## スポットライ 高速CMOSロジックIC M74HC-1シリーズ

M74HC-1シリーズは、 $2\mu\text{m}$ シリコンゲートCMOSプロセスを用いた高速CMOSロジックICです。このシリーズは、三菱独自の回路技術を駆使することにより、高出力電流を実現しながら動作時に出力端子に発生するノイズ（以下スイッチングノイズ）を低減した画期的なICです。表1に示すように、M74HC-1シリーズは、合計64品種の製品化を予定しています。最近、システムのCMOS化が進んでいますが、ゲートアレイ及びマイコン周辺でバスラインのドライブなど、駆動能力を必要とする部分では、従来のHCの出力電流が $4\sim6\text{mA}$ と少なかったことから、LSTTL（出力電流 $24\text{mA}$ ）をはじめとするバイポーラロジックを使わざるを得ませんでした。しかし、HC同等の広動作電源電圧範囲、広動作温度範囲及び低消費電力を備え、 $24\text{mA}$ の高出力電流を保証したM74HC-1シリーズを使用することにより、駆動能力を必要とする部分もCMOS化が可能となり、完全CMOSのシステム設計ができます。

### 特長

#### ●スイッチングノイズ及びEMI低減化（図1、図2参照）

従来の技術で $24\text{mA}$ の高出力電流をCMOSロジックで設定すると、非常に大きなスイッチングノイズが発生（従来のHCの2.6倍以上）し、場合によってはシステムの誤動作を引き起すとともに、EMIも問題となります。

M74HC-1シリーズは、三菱独自の回路技術を駆使することにより、 $24\text{mA}$ の高出力電流を保証しているにもかかわらず、スイッチングノイズ及びEMIを従来のHCと同等のレベルに低減しています。

#### ●高出力電流

$24\text{mA}$ を保証しています。（従来のHCの6倍）

#### ●高速

$2\mu\text{m}$ シリコンゲートCMOSプロセスの使用により、従来のHCより30%の高速化を実現しています。

#### ●高静電破壊耐圧、ラッチアップフリー

静電破壊耐圧は、全端子 $\pm3\text{KV}$ 以上です。（MIL-STD-883C METHOD 3015）

また、 $\pm300\text{mA}$ 以上の電流印加によってもラッチアップを起さず、ラッチアップフリーです。

#### ●低消費電力

最大 $25\mu\text{W}/\text{パッケージ}$ （ $V_{cc}=5\text{V}$ 、 $T_a=25^\circ\text{C}$ 、静止時）を保証しています。

#### ●豊富なパッケージ

パッケージは、全品種DIP及びSOP（EIAJ TYPE II準拠品、JEDEC準拠品）を用意しています。

#### 用途

HCより高出力電流を要求し、なおかつ高速化、消費電力の低減、EMIの回避を必要とする分野。

VTR、オーディオをはじめとする民生機器、プリンタ、ワープロなどのOA機器及びシーケンサなどのFA機器をはじめとする産業機器。

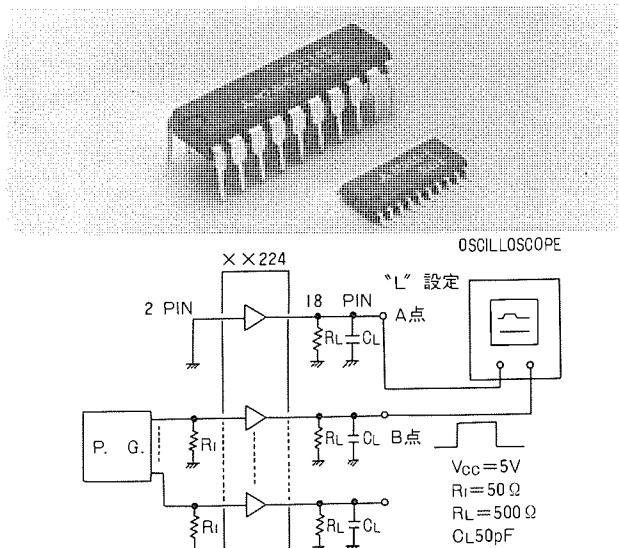


図1 スイッチングノイズ測定回路

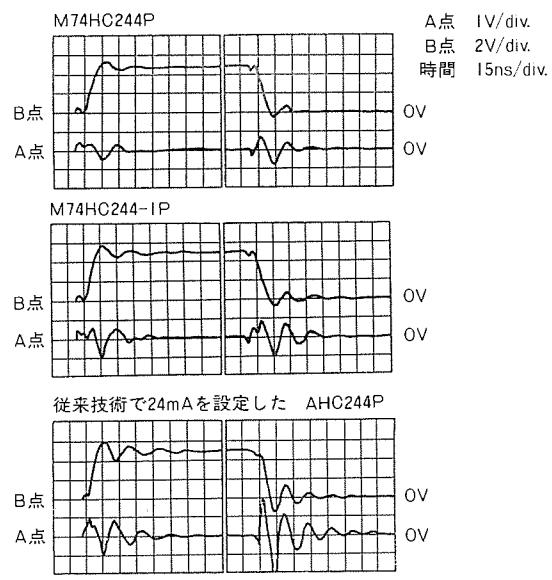


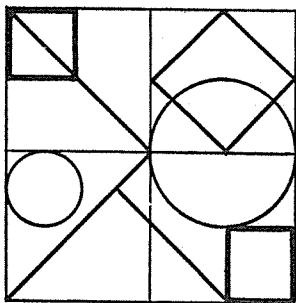
図2 スイッチングノイズ波形

表1

回路構成	形名
BUFFER DRIVER	M74HC240-1*, M74HC241-1*, M74HC244-1*, M74HCT240-1, M74HCT241-1, M74HCT244-1
BUS TRANSCEIVER	M74HC245-1, M74HC640-1, M74HC643-1, M74HC645-1, M74HCT245-1, M74HCT640-1, M74HCT643-1, M74HCT645-1
FLIP-FLOP	M74HC273-1, M74HC374-1, M74HC534-1, M74HCT273-1, M74HCT374-1, M74HCT534-1
LATCH	M74HC373-1, M74HC533-1, M74HC841-1, M74HC842-1, M74HCT373-1, M74HCT533-1, M74HCT841-1, M74HCT842-1
DECODER	M74HC138-1, M74HC139-1, M74HC138-1, M74HCT139-1

\*量産中 その他、32品種の開発を計画中です。

パッケージは、各品種ともDIP、SOP(EIAJ TYPE II準拠品、JEDEC準拠品)を用意しています。



# 特許と新案 有償開放

有償開放についてのお問合せ先 三菱電機株式会社 特許部 TEL (03) 218-2136

## 位相弁別回路 (特許 第1115974号)

発明者 野沢輝夫

この発明は保護继電器等において、交流入力信号を矩形波に変換する矩形波回路を演算増幅器で構成した高感度の位相弁別回路の改良に関するものである。

従来においては、図1.に示すように演算増幅器OP<sub>1</sub>, OP<sub>2</sub>の一対の矩形波回路の各々に一定の直流バイアス+V<sub>B</sub>, -V<sub>B</sub>を加え、交流入力信号V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>が共に無入力の場合は、位相判定部は不動作を保持し、通常入力に対しても安定な動作判定を得るようタイムT<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>を設定していた。しかしながら、一方が無入力で他方に過渡的な入力があった場合、入力波形の乱れから、高感度であるが故に位相判定部がしばしば誤動作する点に問題があった(図示しないが図1.の回路に誤動作防止の回路を付加しなければならなかった。)。

この発明は、図2.に示すように一对の矩形波回路OP<sub>1</sub>, OP<sub>2</sub>の出力に着目し、一方の出力を他方の入力側へ、通常の入力で位相特性を損なわない程度の抵抗R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>で帰還をかけ、変則的入力や過渡入力に対し、完全不動作域の交流入力があたかも与えられた状態

とし、誤動作のない安定した動作性能を有する位相弁別回路を提供するものである。

本発明によって、電気的性能が向上し、品質の安定化が図られる。また、誤動作防止専用の回路を追加する必要がなくなり、試験調整時間も短縮される。

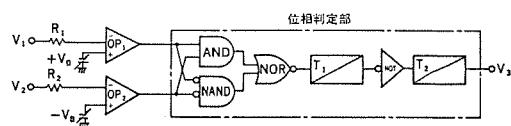


図1.

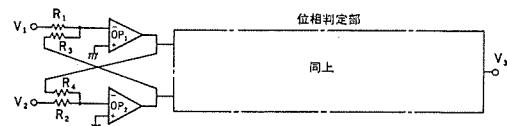


図2.

## 回転子の接続導体の異常検出装置 (実用新案 第1563509号)

考案者 天笠信正

この考案は、ブラシレス励磁機の回転体上における電気的な異常を自動的に、かつ非接触で検出する装置に関するものである。

ブラシレス励磁機は図1.及び図2.に示すように同期機の界磁に直流電流を供給する回転機であり、交流励磁機電機子で発生する交流出力電流を軸上に配列した多数の接続導体を通し整流装置に流し直流に変換するものである。整流装置内のヒューズが動作したり接続導体に異常がある場合などは、接続導体に流れる電流にアンバランスが発生し、この電流によって生ずる磁束が乱れる。これを図3.に示すとく固定側に設け、かつその検出信号を打ち消す方向で結線した対をなす検出素子で監視しようとするものである。

この装置は複数の接続導体の通電状態を対の非接触式検出素子で固定側より検出し、正常状態では回転数の変化や電流の変化によっ

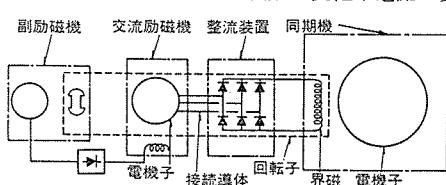


図1. 同期機のブラシレス励磁装置構成図

て信号特性が変化しても合成された信号には変化がなく、異常状態では顕著に変化するので、精度が良く構成が簡単で安価なものとすることが可能である。また、装置はすべて固定側であり、追設することも簡単にできる。

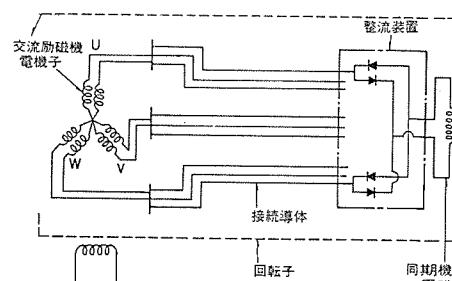


図2. 回転子説明図

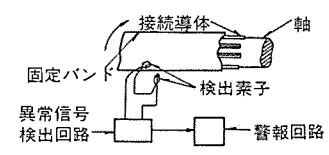


図3. 異常検出装置構成図

## 耐電圧試験方法 (特許 第962696号)

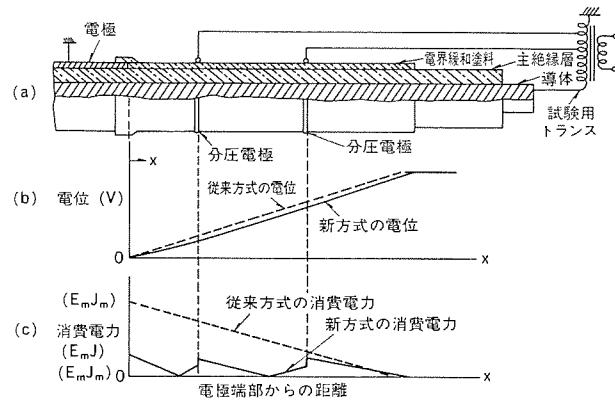
この発明は、定格電圧の高い回転電機の固定子コイル、ケーブル等の耐電圧試験方法に関するもので、特にJEC-114(1965)に準拠して行う絶縁耐力試験に適している。

絶縁耐力試験を行うとき、電位傾度が非常に大きくなる部分に、一般的には電圧非直線抵抗特性を有する電界緩和塗料が施される。電圧印加時、この塗料の表面電位 ( $V$ ) と塗料で消費される消費電力 ( $E_{mJ}$ ) は、図(b)・(c)に示す分布になる。課電圧が高くなると塗料における消費電力が大きくなるが、塗料の保有し得る最大消費電力 ( $E_{mJ_m}$ ) には限界があるため、最大消費電力を超えると塗料は焼損し、本来の機能である電界緩和の能力を失う。したがって、従来の試験法では課電できる電圧に制限があった。

この発明は、電界緩和塗料を施した層の内部もしくは外周面上、又は絶縁層の外周面上に分圧電極を設け、導体に課電される電圧に対して分圧された電圧をこの分圧電極に同時に課電するようにしたため、図(c)に示すように電界緩和塗料の最大消費電力 ( $E_{mJ_m}$ ) を著しく減少させることができ、課電し得る試験電圧を従来法に比べて2倍以上に高めることができる。

なお、上記電界緩和塗料を施さない場合であっても絶縁層の外周

発明者 川上 剛・谷 功・平林庄司  
面上に分圧電極を設けることにより、上記と同様の効果を得ることができます。



〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol. 61 No. 7 ワークステーション特集

### 特集論文

- 新しい分野を築くワークステーションの展望
- マルチワークステーションの概要と特長
- エンジニアリング分野におけるEWSの活用
- 知識処理におけるAIワークステーションの活用
- 画像処理ワークステーション 《MELISSA-WS》
- ソフトウェア エンジニアリングにおけるワークステーション
- ミックストモード通信におけるWSの活用

### ●画面管理分野におけるワークステーションの利用

- 普通論文
- アクティブラフィルタを適用した高調波補償装置
- 東京電力側向け設備総合自動化店舗電所システム
- OA-LANシステム
- 三菱テレコムステーション ML-TS 100
- レーザ利用センサ
- CMOS 1Mビット ダイナミック LAM
- 医用画像ディスプレイステーション “File Ace 4100”

### 三菱電機技報編集委員

委員長 鶴田 敬二  
委員 峯松 雅登  
" 松村 充  
" 尾形 善弘  
" 高橋 宏次  
" 藤井 学  
" 柴田 信之  
" 郷 鉄夫  
" 高橋 誠一  
" 関沢 英男  
" 柳下 和夫  
幹事 長崎 忠一  
6月号特集担当 赤枝潤二郎

### 三菱電機技報 61巻6号

(無断転載を禁ず)  
昭和62年6月22日 印刷  
昭和62年6月25日 発行

編集兼発行人 長崎 忠一  
印 刷 所 東京都新宿区桜町7  
大日本印刷株式会社  
発 行 所 東京都港区新橋六丁目4番9号 (〒105)  
菱電エンジニアリング株式会社内  
「三菱電機技報社」Tel.(03) 437局2338  
発 売 元 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 (〒101)  
株式会社 オーム社  
Tel.(03) 233局0641 (代)、振替口座東京6-20018  
定 価 1部700円送料別 (年間予約は送料共9,100円)

# 三菱静止形小容量CVCF装置 《MELUPS-8400S(1,3,5KVA)》



ワークステーションなどのOA機器、各種端末機器、伝送システムなどのCVCF装置（無停電電源装置）としてご好評をいただいているMELUPS-8100の後継機種として、いっそう小形化、高機能・高性能化を実現したMELUPS-8400Sを発売しました。このCVCF装置は蓄電池を内蔵し、バイパス無瞬断切換機能を付加するとともに、出力性能を一段と向上。また、オフィスに設置できるようさらに低騒音化を実現しました。

## 特長

### ●高機能

バイパスへの切換えはサイリスタスイッチによる無瞬断切換方式です。

負荷の突入電流など過電流が発生した時、無瞬断でバイパス回路へ切換え、その後自動的にインバータ側へ戻すオートリターン機能を備えています。このため連続給電能力は大幅に向上しています。

### ●高性能

100%の負荷急変があっても出力電圧の過渡変動は±8%以内(5kVA)です。

### ●低騒音

人の耳に聞こえない高周波でインバータ回路を高速スイッチング動作させています。

### ●50/60Hz共用化

いずれかの周波数を切換えて選択使用できます。

### ●スリムで省スペース

### ●保守が容易

蓄電池は補水作業のいらない完全密閉形を使用していますのでメンテナンスフリーです。

## 仕様

出力容量		1kVA	3kVA	5kVA
交流入力	相数		単相2線	
	電圧		100V	
	周波数	50-60Hz	選択可	
バッテリ保持時間		15分間		10分間
交流出力	相数		単相2線	
	電圧		100V	
	周波数	50-60Hz	選択可	

# 三菱盤用図面作成システム

## スロットライナ《MELCAD-ES/MINI II》



16ビット高機能業務用パソコン《MULTI-16W》をCPUとして、盤設計をはじめ電気設計用に必要な3つのCAD機能を統合化し、それぞれが専用機のみの高度な機能を実現した二次元の設計製図システムです。

特長

### ●盤用図面作成機能

- ・電気設計、部品図、外形図、裏面配置図などの図面を効果的に作成できます。
- ・部品表、原価表、見積書などの帳票類を作成できます。
- ・機器ラベル、端子ラベル、外部端子一覧表などの盤製造現場作業補助機能を装備しています。

### ●汎用図面作成機能

機械設計、建築設備設計などのあらゆる図面の作成が容易に行えます。

### ●シーケンサ図面作成機能

三菱電機製シーケンサ《MELSEC-A》、またはKシリーズのシーケンスプログラムの開発、及びシーケンスプログラムから内部回路図、入出力リスト、コメントリストの作成・保存ができるとともに、インテリジェントGPP《A6GPP》と接続することにより、シーケンスプログラムのアップロードやダウンロードが行えます。

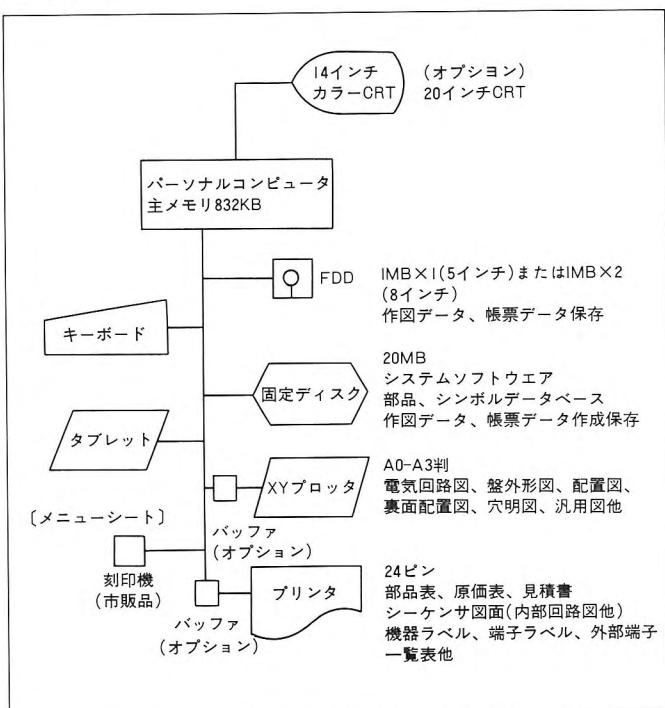
### ●使いやすいシステム

- ・タブレット使用や日本語メニューなどにより、入力時のコマンド指定、位置指定などが容易に行えます。
- ・かな漢字変換またはローマ字漢字変換により、図面上の日本語入力も容易です。また必要な熟語をユーザー自身で辞書登録することも可能です。

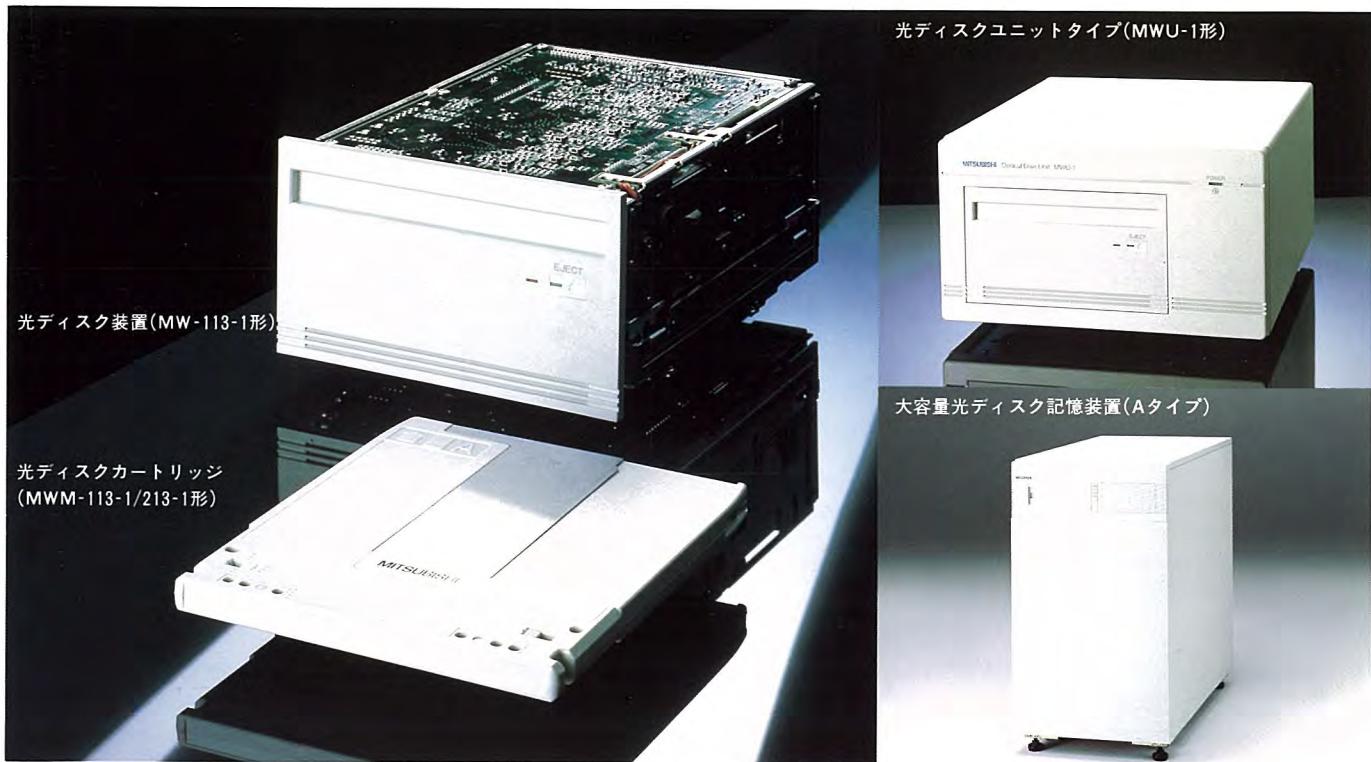
### ●万全のサービス体制

パソコンベースのシステムですが、アフターサービスや導入時のユーザー教育など、システム製品として万全の体制を確保しています。

### システム構成



# 三菱13cmライトワンス形 スポットライト 光ディスク装置 MW形



三菱13cmライトワンス形光ディスク装置は、5.25インチディスクと同一サイズで、しかも両面で600Mバイトの記憶容量を実現した新時代の記憶装置です。

この光ディスク装置は、三菱が独自に開発した小形・軽量の光ヘッドと、高性能リニアモータの採用及び現代制御理論によるサーボ制御により、業界最高水準の高速ランダムアクセスができます。また、イメージデータのほか、コードデータに対しても強力なエラー訂正技術の開発により、高信頼性が得られます。ホストコンピュータとの接続には、業界水準のSCSIインターフェースを採用していますので、ニーズに応じて各種のシステムに対応できます。

システム設計のニーズに対し、必要に応じてユニットタイプ及び光ディスクを最大152枚(90Gバイト)収納できるオートチェンジ機構付大容量光ディスク記憶装置もシリーズ化しました。

## 特長

- 平均シーク時間63msec、平均アクセス時間80msecの高速アクセスと、5.5Mbpsの高速データ転送レートを達成します。
- リアルタイム処理が可能な強力なエラー訂正回路の採用により、ビットエラーレート $10^{-12}$ の高信頼性を達成します。
- 直径13cmの光ディスクに、CAV(定回転速度)方式で600Mバイト(両面)のユーザー容量が得られます。
- 汎用性の高いSCSIインターフェースの採用により、各種のシステムに活用できます。
- 大容量ニーズに対応できるように、光ディスクカートリッジの収納枚数を56枚と152枚の2タイプを基本に、17Gバイトから90Gバイトまで8機種をシリーズ化した高速のオートチェンジ機構付大容量光ディスク記憶装置も用意しました。

## 光ディスク装置(MW-113-1形)仕様

形 式	追記形(Write-Once形)
ディスク径	130mm(5.25インチ)
記憶容量 (ユーザー容量)	片面 300MB 両面 600MB
アクセス時間 ドライブI/F上 (内にSCSI I/F上)	平均アクセス 80ms(85ms) 平均シーク時間 63ms(68ms) 平均回転待ち時間 17ms
ディスク回転数	1800rpm(CAV方式)
記録・再生速度	5.5Mbps
消費電力(平均)	14W(DC5V/12V)
外形寸法(W)×(H)×(D)	146mm×82.6mm×203mm
インターフェース	SCSI

## 大容量光ディスク記憶装置(MWG形)仕様

項 目	タ イ プ	A1タ イ プ	B2タ イ プ
ディスク枚数	56枚	152枚	
ディスク使用面	片面	両面	
総容量	17GB	90GB	
光ディスク駆動装置台数	1台~2台	1台~2台	
アクセス時間 (平均)	アンローディング	4秒	4秒
	取り出し	各4~7秒	各7~10秒
	装着		
	ローディング	4秒	4秒