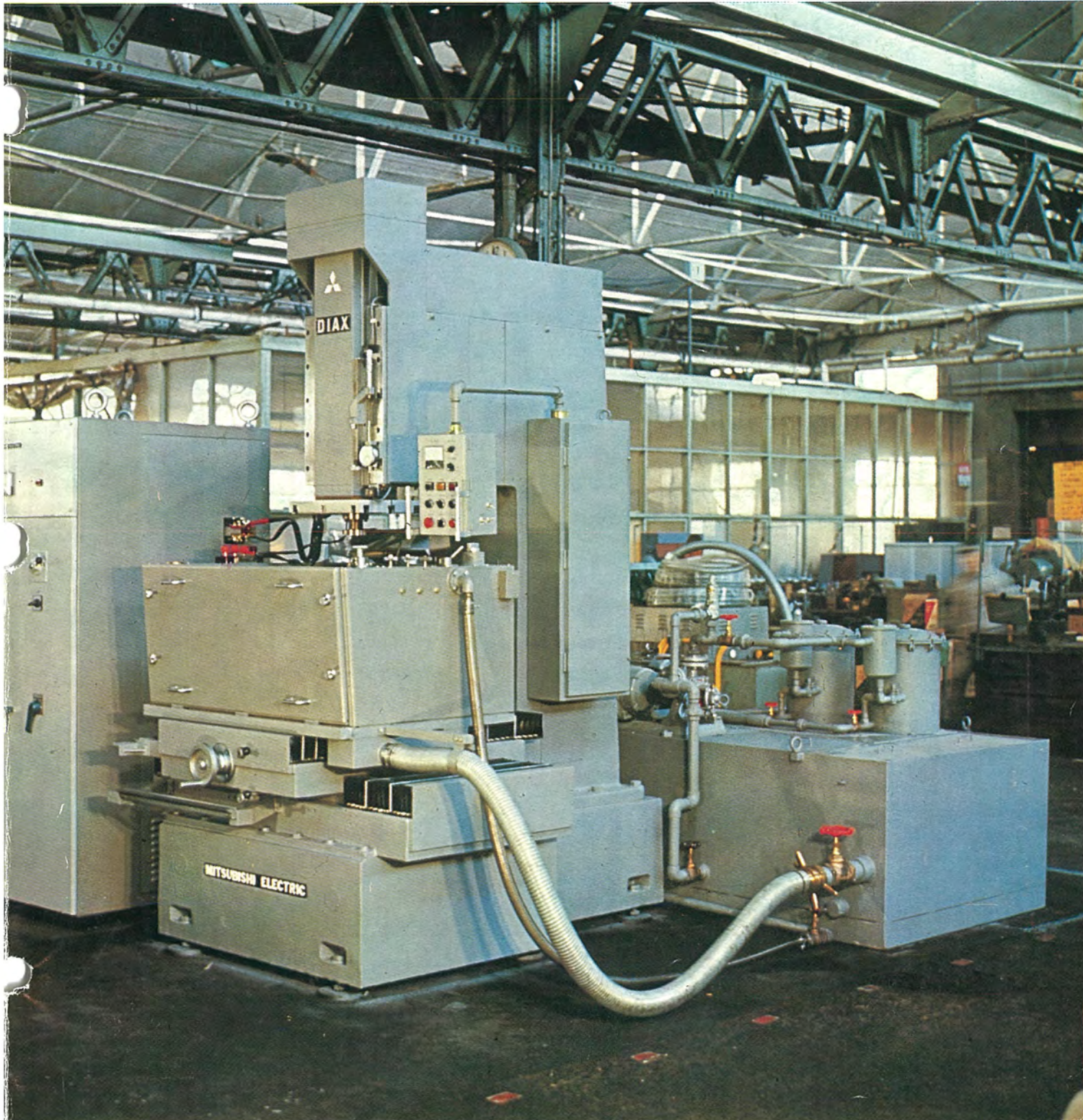


# MITSUBISHI DENKI GIHO 三菱電機技報

Vol. 41 October 1967  
放電加工・電解加工特集

# 10

三菱ダイアックス大形放電加工機DM500-5S形







## 放電加工・電解加工特集

### 目次

#### 《特別寄稿》

電気加工の展望と将来.....倉藤尚雄...1217

#### 《特集論文》

放電加工・電解加工の現状と将来.....斎藤長男...1220  
 放電加工の加工原理と加工特性.....斎藤長男・小林和彦...1222  
 ダイアックス放電加工機の機械構造.....杉江法雄・青島富士雄・坂嘉朗...1231  
 ダイアックス放電加工機の電源シリーズ.....吉田太郎・久慈陽一・大矢広太郎...1237  
 放電加工の生産への応用.....荒井伸治・片寄文雄・中川進...1245  
 低電極消耗放電加工における電極の表面構造.....田中利夫・加藤強・片寄文隆...1260  
 電解加工機による実用作業例.....末次宏志...1264  
 電解加工の加工原理と加工特性.....前田祐雄・斎藤長男・葉石雄一郎...1267  
 ダイヤシンカ電解加工機の機械構造.....杉江法雄・青島富士雄・佐藤国彦...1280  
 ダイヤシンカ電解加工機の電源シリーズ.....吉田太郎・久慈陽一・大矢広太郎...1283  
 電解加工の加工技術.....古池一成...1290

#### 《普通論文》

MELCOM-1600 オペレーティングシステム.....出口博章・坂本 巖...1301  
 MELCOM-3100 ソフトウェア(2).....香藤 勝・関本彰次・武田浩良・三光義治...1307  
 列車ダイヤ記録装置.....片田 弘・佐々木吉市郎・今出昭彦・八杉征晴・里見勝康...1313  
 MECL の動作試験のための加減算装置.....壺井芳昭・笹尾勇夫...1322  
 中性子による重油発熱量の自動測定.....宮下恭一・高田 守・小田 稔・山本健二...1327  
 ルビレーザー用固体 Q スイッチ.....中原昭二郎・伊東克能・草川英昭...1333

#### 《新製品紹介》

NF-2000 形ノーヒューズしゃ断器・RR-1200 形三菱電子レンジ発売・三菱 EMO-D-DL 形遅延釈放形電磁閉器・ボールバルブ用アクチュエータのシリーズ化進む・SS タイマ・FS 形フロートレススイッチ・三菱6 kV LCH 配電箱発売

#### 《ニュースフラッシュ》

台車わく加工専用機用数値制御装置 MELDAS-4201 納入・TBS 方式配電盤用広角度指示電気計器発売

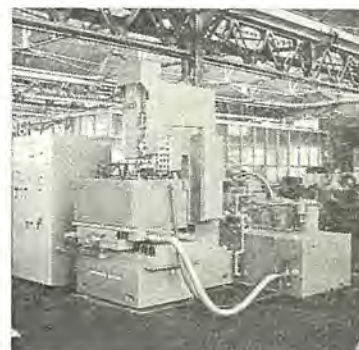
#### 《特許と新案》

屋外用電動機の軸封装置・油圧押上げ装置・記録紙印字装置・盲孔電解加工装置

#### 《表紙》

##### 「三菱ダイアックス大形放電加工機, DM 500-5 S 形」

これは主軸の制御に油圧サーボ機構を、電源には半導体パルス回路を採用した低電極消耗特性をもつわが国最大の大形放電加工機である。自動車関連産業において使用される大きなプレス型、鍛造型、および各種の大形金型の工作において、従来のならいフライスにまさる高い生産性を発揮している。





## SPECIAL EDITION OF ELECTRIC DISCHARGE MACHINING AND ELECTRO CHEMICAL MACHINING

### CONTENTS

#### SPECIALLY COLLECTED PAPERS

View and Prospect of Electrical Machining.....	H. Kurafuji...	1217
Present State and Future of Electric Discharge Machines and Electro Chemical Machines.....	N. Saitô...	1220
Machining Principle and Characteristics of Electric Discharge Machining.....	N. Saitô • K. Kobayachi...	1222
Mechanical Construction of DIAX, Electric Discharge Machines.....	N. Sugie • F. Aoshima • Y. Ban...	1231
Series of DIAX Electric Discharge Machines (EDM) Power Supply Unit.....	T. Yoshida • Y. Kuji • K. Ôya...	1237
Application of Electrical Discharge Machining to Production.....	S. Arai • F. Katayose • S. Nakagawa...	1245
Surface Structure of Electrode in Electrical Discharge Machining of No Electrode Wear .....	T. Tanaka • J. Katô • F. Katayose...	1260
Application of Electro-chemical Machines.....	H. Suetsugu...	1264
Principle and Characteristics of Electro-chemical Machining.....	S. Maeda • N. Saitô • Y. Haishi...	1267
Mechanical Construction of "Dia-Sinker" Electro-chemical Machines.....	N. Sugie • F. Aoshima • K. Satô...	1280
Series of "Dia-Sinker" Electro-chemical Machine Power Supply Units.....	T. Yoshida • Y. Kuji • K. Ôya...	1283
Machining Technique of Electro-chemical Machines.....	K. Koike...	1290

#### TECNICAL PAPERS

MELCOM-1600 Operating System.....	H. Deguchi • T. Sakamoto...	1301
MELCOM-3100 Software (2) —General Description of Model-30 Operating System— .....	M. Sudô • S. Sekimoto • H. Takeda • Y. Sankô...	1307
Automatic Recorder of Train Diagram.....	H. Katada • K. Sasaki • A. Imade • M. Yasugi • K. Satomi...	1313
Adder-Substructor for Operating Test of MECL.....	Y. Tsuboi • I. Sasao...	1322
Automatic Calorimetry of Heavy Oil by Neutron Measurement .....	K. Miyashita • M. Takada • M. Oda • K. Yamamoto...	1327
Plastic Q-Switches for Ruby Lasers.....	S. Nahahara • K. Itô • H. Kusakawa...	1333

NEW PRODUCTS.....	1340
-------------------	------

NEWS FLASH.....	1344
-----------------	------

PATENT AND UTILITY MODEL.....	1299
-------------------------------	------

#### COVER :

Mitsubishi "Diex" Large Electric Discharge Machine, Type DM 500-5 S.

Illustrated is large electric discharge machine unparalleled in the size ever built in this country with an oil pressure servo mechanism for the control of the main shaft and low electrode consumption performance operating on a power source of a semiconductor pulse circuit.

It has a higher productivity than the conventional profile milling machines used for the manufacture of large dies for press work, casting molds and various large sized metallic molds in the industries related automobile building.



UDC 621.9.018.3/.5

## 電気加工の展望と将来

倉藤尚雄

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1217~1219

電気加工として放電加工と電解加工とを取上げ、発展の経過と現状を述べた。とくに、電源方式の得失を述べた。電気加工機は現在、型加工に多く用いられているが、将来は、部品加工の分野にも発展するであろう。



UDC 621.9.018.5

## ダイアックス放電加工機の電源シリーズ

吉田太郎・久慈陽一・大矢広太郎

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1237~1244

放電加工機の電源は、超硬金属、精密加工、複雑な形状の加工に用いられてきたが、加工速度がおそい、電極の消耗があるなどの問題があった。ところが最近の電極の消耗しない回路の出現と、その回路方式に適した半導体パルス電源の進歩により、従来の考え方を一変し、多方面に応用されるようになってきた。三菱ダイアックス放電加工機に用いている半導体パルス電源について述べ、あわせて当社のシリーズ化された電源について紹介した。



UDC 621.9.018.3/.5

## 放電加工、電解加工の現状と将来

斎藤長男

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1220~1221

放電加工機、電解加工機は、はん用工作機ないし産業機械としての地歩を占めるに至った。わが国が一時放電加工の先進国と云われたときがあるが、その後あまり成長せず外国に遅れをとった。わが国は台数は多いが旧形が多い。これはエレクトロニクス導入の遅れをとったからと考えられる。当社はエレクトロニクス導入の加工機を開発、過去の6~10倍の成長率である。電解加工は、タービンプレード加工のようなすぐれた用途が見つかり、急激に用途がひろげられている。2~3年後には工作機械の10%程度は、放電加工機、電解加工機が占めると考えられる。これは 技術革新にもとづく合理化につながるからである。

UDC 621.9.018.5

## 放電加工の生産への応用

荒井伸治・片寄文隆・中川 進

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1245~1259

放電加工機はその特長を生かして生産に導入され、生産合理化の手段として応用範囲はますます広くなりつゝある。放電加工の諸特性は、種々の要因によって変化するが、諸要因を一定とすることによって、たとえばクリアランスを数ミクロンの公差内に入れることができる。現在の応用分野を紹介すると、貫通穴電源では、抜型、粉末冶金型、サッシ押出型などの金型や、化せんノズル穴加工、各種スリット加工、小穴加工などの部品加工がある。新しく開発された低電極消耗電源では、プラスチックモールド型、鋳造型、ダイカスト型などの底付穴の加工が容易に加 工される。

UDC 621.9.018.5

## 放電加工の加工原理と加工特性

斎藤長男・小林和彦

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1222~1230

放電加工の加工原理について、現在一般に説明されている加工機構の理論および放電回路を紹介し、つぎに、トランジスタ式放電回路を用いて行った単一放電と連続放電の結果より、単一放電と連続の関係、加工特性と電気条件との関連を求め、最後に、加工特性を求めるためのチャートを作成した。加工速度は、単一放電の消耗量から計算することができ、加工中のみかけのDuty Factorが一定の場合、放電電流の1.5乗に比例する。銅電極消耗比は、放電電流が小さく、パルス幅が長いほど減少するが、低消耗の場合、電極面に付着する黒色皮膜が、消耗の保護作用 としての効果を持っているようである。

UDC 621.9.018.5

## 低電極消耗放電加工における電極の表面構造

田中利夫・加藤 強・片寄文隆

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1260~1263

低電極消耗放電加工回路で加工をおこなう場合、電極消耗が少ないことの理由の一つとして、放電加工中電極表面に生ずる黒色皮膜が、重要な役割を果たしているのではないかと云われている。

この論文では、電極表面に生ずる黒色皮膜の組成および構造を、光学顕微鏡、発光分光分析、X線マイクロアナライザーおよびX線粉末カメラにより調べた。その結果、電磁軟鉄を放電加工する際に電極表面に生ずる黒色皮膜は、灯油の熱分解によって生じた微粉状のグラファイト、被加工物から白色点状の付着物として移転した $\alpha$ -Fe(マル テンサイト)および少量の $\gamma$ -Fe(残留オーステナイト)からなることがわかった。

UDC 621.9.018.5

## ダイアックス放電加工機の機械構造について

杉江法雄・青島富士雄・坂 嘉朗

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1231~1236

放電加工機は、最近半導体素子の利用、低電極消耗電源の開発等により、従来の特殊加工の領域から脱却し、ならいフライス、あるいはミリングマシンの代わりに使うのが常識化されつゝある。当社では顧客の広範囲な用途を考慮し電源、機械系ともシリーズ化を完了し作業内容に最も適した機械、電源の組合せが可能となった。

本文では三菱DIAX放電加工機の機械系の構造と特長につき述べ、系列化、特殊機についても簡単に述べる。



UDC 621.9.018.5

## 電解加工機による実用作業例

末次宏志

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1264~1266

三菱重工名古屋航空機製作所において開発した小形ガスタービンエンジンの部品には、切削性の悪い耐熱合金の材料が多く使われているので、加工技術面加工工数面に多くの問題があった。

これに対してわれわれは電解加工法に着目し、三菱電機名古屋製作所に技術的協力を依頼し、各種試験をくり返した結果、実用の見通しをえた。昭和39年10月三菱電解加工機DIASINKER MC-20V形を導入し、現在ではタービン翼車をはじめとする各種ガスタービン部品ならびに油圧部品などの加工に実用している。ここではこれら加工実 用例について報告する。



UDC 621.9.018.3

## 電解加工の加工原理と加工特性

前田祐雄・斎藤長男・葉石雄一郎

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1267～1279

電解加工の加工特性に及ぼす被加工物材質の影響をとりあげ、数種の材料について検討した。焼なましした材の加工において、実際の加工量が純粋の鉄を加工する場合の理論溶出量より数～十数%多くなることに着目し、これらの比をかりに見かけの電流効率と定め、高炭素鋼においては加工中に成分中のセメントが脱落すると仮定して電流効率が100%を上回ることを説明し、これと加工面あらさを炭素含有量の関数で表わすことができた。18-8ステンレス鋼では電解液中に硝酸ソーダを添加して加工性を改良し、さらに直流ではほとんど不可能であった超硬合金を交流により加工可能とした方式について加工特性と加工原理を明らかにした結果を述べる。

UDC 681.142D

## MELCOM-I 600オペレーティングシステム

出口博章・坂本 巍

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1301～1306

オンライン リアルタイム用の電子計算機MELCOM-1600のために開発したオペレーティングシステムの機能について述べる。

このオペレーティングシステムはランダム アクセス メモリを持った電子計算機によって、オンライン リアルタイム処理とオフラインのバッチ処理をそれぞれ単独に、あるいは併行して実行する機能を持っている。したがってランダムにしかも優先順位を持って発生するオンラインの要求を処理すると同時に、そのあき時間を利用してバッチ処理を行なう。バッチ処理としては科学計算・事務データ処理があり、そのためにSIASアセンブラ、FORTRAN、COBOL、SORT等を持ち運ぶ。連続処理を行なう。

UDC 621.9.018.3

## ダイヤシンカ電解加工機の機械構造

杉江法雄・青島富士雄・佐藤国彦

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1280～1282

電解加工機はわが国の第一号機が当社により発表されて以来、10年近くたち、その画期的加工法は放電加工機とともに注目のまとなっている。国内においては、すでに、その実動台数は30台余を数え、ますます、増加のいっとなだっている。電解加工機は通常の工作機械とは著しく異なり、機械、電気、化学を総合した、ユニークな工作機械である。

この稿では、三菱電解加工機ダイヤシンカに基づいて、電解加工機の構造と特長につき、概略を述べる。

UDC 681.142:007.3

## MELCOM-3100ソフトウェア(2)

### —モデル30オペレーティングシステムの概要—

首藤 勝・関本彰次・武田浩良・三光義治

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1307～1312

MELCOM-3100 Model: 30はMELCOM-3100シリーズに属するファミリーコンピュータの一つである。ハードウェアとしては入出力の多重処理能力にその特長がある。

MELCOM-3100 Model-30のソフトウェアはModel-10オペレーティングシステムの上級版として構成されており、上記の入出力の機能を生かすことばかりでなく、たとえばジョブの構成、プログラムライブラリの効果的な処理操作などの点で、磁気テープオペレーティングシステムとして現代の先端的技术をつくした考察に基づいて作られている。ここではModel-30オペレーティングシステムの機能と構造、およびそれによるジョブの流れについて述べる。

UDC 621.9.018.5

## ダイヤシンカ電解加工機電源シリーズ

吉田太郎・久慈陽一・大矢広太郎

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1283～1289

今日、電解加工機がめざましい発展をとげるにいたったのは大電力用シリコン整流器の出現と可飽和リアクトル、サイリスタ、トランジスタなどを用いた制御技術の進歩におうところが非常に大きい。

三菱電解加工機電源は、現在、最大電流 2,000A、5,000A、10,000A、の標準3機種と、超硬合金加工用特殊電源最大電流 1,000A、とが製作されている。加工電流は可飽和リアクトルによって交流側で制御されている。可飽和リアクトルはサイリスタ回路によって励磁されている。可飽和リアクトルは非常に頑丈な構造であり、特性上過大短絡電流は絶対に流れないので電解加工機電源には最も適しているといえる。電源特性として定電流と定電圧の二種がある。

UDC 625.2.066:656.221/.223

## 列車ダイヤ記録装置

片田 弘・佐々木吉市郎・今出昭彦・八杉征晴・里見勝康

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1313～1321

最近とみに高密度、高速化されていく列車運転に際し、輸送能力の向上を計るとともに、運転事故を防止し、安全で正確な列車の運転を行なうために、運転指令体系に直結した合理的なシステムの開発が望まれた。

列車ダイヤ記録装置は運転指令業務の情報収集・判断・指令・確認のうち大きな時分を占める情報収集を自動化し、列車ダイヤを時々刻々記録することによって、列車位置の確認、さらには基準ダイヤとの関係を直接判断できるようにしたもので、整理ダイヤとして保存できるようになった。

UDC 621.9.018.5

## 電解加工の加工技術

古池一成

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1290～1298

電解加工における電極形状と加工された穴形状の関係を明らかにするため、二、三の代表的形状について、そのオーバカットが加工深さに対していかなる変化を示すかを、計算および実験によって求めた。またその結果を用いて段付き穴加工の加工形状について解析を試み、底部におけるふくらみの現象を究明した。さらに電解加工の加工精度を示すために側面方向および深さ方向における電解加工のくり返し加工精度を調べ、それが比較的単純な形状の加工においては±0.05mm以内であることを示した。またタービンブレード、押し出しダイス、鍛造型、部品加工などの電解加工の実用例における加工精度を述べた。

UDC 621.373.3:621.382

## MECLの動作試験のための加減算装置

壺井芳昭・笹尾勇夫

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1322～1326

最近、半導体集積回路(IC)が注目をあびており、電子計算機などのデジタルシステムの一部では、すでに実用化されつつある。IC化にともない装置、布線による雑音、システム化した場合のICの特性などの問題の解決が望まれている。日本電子工業振興協会の半導体集積回路専門委員会の41年度の活動の一環として、IC約150個使用した加減算装置を試作したので装置の概略、ICの実装、試験結果について報告する。最高動作周波数4.5Mc、素子の特性は実装状態でもカタログデータと大差ない。布線による雑音はマージンに比べて十分小さいことなどを確認した。しかも、ICの実装密度は両面プリント板で十分高密度に実装できた。



UDC 621.039.8:681.125:662.753

## 中性子による重油発熱量の自動測定

宮下恭一・高田 守・小田 稔・山本健二

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1327～1332

中性子を利用して、重油の発熱量が自動分析できる。従来重油の発熱量は断熱式ボンブ法で直接燃焼させて測定されていた。

ここに述べる方法によれば、重油と無接触で測れ、結果が迅速に得られ、連続自動で測定ができ、個人差がない。火力発電所の受入れパイプラインに検出器をとりつけ、1年間にわたり実測した。総計66船の重油に対してボンブ法の測定法との相関を求めたところ、偏差偏差15.6 kcal/kgがえられ、この方法の精度がボンブ法によるそれと十分対抗しうるものであることが示された。




UDC 621.375.9

## ルビー・レーザ用固体Q-スイッチ

中原昭次郎・伊東克能・草川英昭

三菱電機技報 Vol.41・No.10・P 1333～1338

ルビー レーザ用の色素溶液Q-スイッチの色素の分散媒を液体から固体に置きかえた“固体Q-スイッチ”の開発に成功した。このQ-スイッチはバナジル・フタロシアニンをアクリル酸樹脂中に分散し平行平板に仕上げたものである。この固体化により、駆動装置や同期回路なしに繰返し使用できるという色素溶液Q-スイッチの特長を保持したまま、色素あるいは溶媒の紫外線による分解や液体であることからくる取扱いの不便さなどの色素溶液Q-スイッチの欠点を除くことができた。この素子と拡散反対面のランプ反射筒とを併用してピーク出力1～2 MWのジャイアン  トパルス、回數 100回以上繰返し発生することができた。



# 電気加工の展望と将来

倉 藤 尚 雄\*

## View and Prospect of Electrical Machining

University of Tokyo Hisao KURAFUJI

The most common practice to form materials into shapes as designed has been mechanical and thermal working. However as the industry advances, necessity has come in to handle very tough and hard materials, which are hard to work by the old methods. To cope with the situation epochal working methods are brought into reality. They are electric discharge machining and electro chemical machining, being introduced about a decade ago. The former is extensively applied to building metallic dies. It has fair prospect and will be developed to manufacture component parts of high precision and fine work. The latter is developed slightly behind time of the former, now mostly being used for building large dies. But it will not be long before it finds its way into the production of machine parts which is most suitable application.

### 1. 加工法

加工と言うのは材料の形状・寸法・表面状態を設計どおりに作りあげることである。加工をするには材料を移動せねばならず、これには機械力を必要とする。この機械力は加工を行なうときの材料の状態が固体のときは大きく、軟化状態・液体・イオン・気体となるに従って小さくてすむ。材料の移動には、表面から除去する（除去加工）、表面に付着させる（付着加工）、体積・重量を変えずに変形させる（変形加工）の3種類がある。

われわれの使用材料は固体状態であるから、これを軟化状態・液体状態……などにするため、および移動させるためにはエネルギーを与えねばならない。エネルギー供給には一つの手段だけを使用することもあり、副次的な手段を併用することもあり、対等の数手段を併用することもある。最後のものを複合加工法といっている。そこで加工法は、材料の状態・移動・エネルギーの供給手段によって、多くの種類がある。これを概略分類すると表1.1のようになる。

機械的、熱的加工法は古くから用いられ、現在加工法の主流である。工業の発展にともない強じん、高硬度の材料を複雑な形・精密な寸法に加工する必要がおこってきたが、これ等の方法では不可能あるいは不経済なため新加工法の開発が必要になった。これが以下に述べる化学的加工法である。このうち、高精度・高加工速度を有し、応用範囲の広いのが電気的および電気化学的加工法で、両者を

まとめて電気加工法 (Electrical Machining) と呼ぶ。電気加工法がわが国で始まったのは10数年前で、現在では専門の「社団法人電気加工学会」もできており、国際的にも CIRP (国際生産加工研究会議) の E グループは主としてこの加工法を取扱っている。

電解加工は電気化学的に溶解する。放電加工は放電の熱で溶解吹き飛ばすのであるから、従来の機械的加工とはちがった特色がある。

- (a) 工作材料の硬度・強度には無関係に加工できる。
- (b) 複雑な形状が精密に、容易に加工できる。
- (c) 加工の際材料に対する熱影響が少ないあるいは全くない。
- (d) 加工の際、大きな機械力が働かないので、ひずみが少なく、返りがない。

こういう利点のために、電気加工法が広く用いられるようになり、今後の大発展が期待されるわけである。

### 2. 放電加工法

二電極の間で放電を起こすと放電の足の付近の材料が溶融し、吹き飛ばされる。この作用は空中より水、油中のほうが有効であるから、普通は油中で行なう。この方法は昭和18年ソ連のラザレコ夫妻に始まり、わが国では東大の鳳誠三郎教授(昭和23年)が初めてである。現在三菱電機・ジャパックス・西部電機等7社のメーカーがあって、2,500台くらい実動しており、世界有数である。外国の主要メーカーは、アメリカの Elox 社、スイスのシャルヌー社・アジェ社等であるが、主要工業国はそれぞれ数社のメーカーがあり、1,000~5,000台使用している。ソ連は放電加工現象の研究に熱心で、高速機小形専用機以外はあまりすぐれた加工機を発表していない。

放電加工が短時日に広く普及したのは、焼入鋼・超硬合金に、複雑・精密な穴を容易にあげられるため、まず、プレス抜型・引抜ダイスの加工に成功し、この方面は放電加工に限るということになったためである。普及とともに不平不満も出てきた。それは加工速度(毎分の除去量)がおそく電極消耗が多いことである。いくら硬いものに加工できるといっても、最大加工速度 0.7~1 g/min ではちょっとした穴けにも長時間かかる。そこで電力をふやす。放電精度をますことが計画され、放電の起こし方もコンデンサ式からインパルス発

表 1.1 加工法の概略分類  
Rough classification of machining methods.

エネルギー供給手段	除 去	付 着	変 形
機 械 的	切削, 研削, せん断		冷間鍛造
熱 的	溶 断	溶接, 圧金	鍛 造
化 学 的	腐 食	化学めっき	
電 気 化 学 的	電 解 加 工	電 鍍	
電 気 的	放電加工, ビーム加工 プラズマ加工		放電成形
磁 気 的			電磁成形
光 学 的	レーザ加工		

\* 東京大学 (工博)



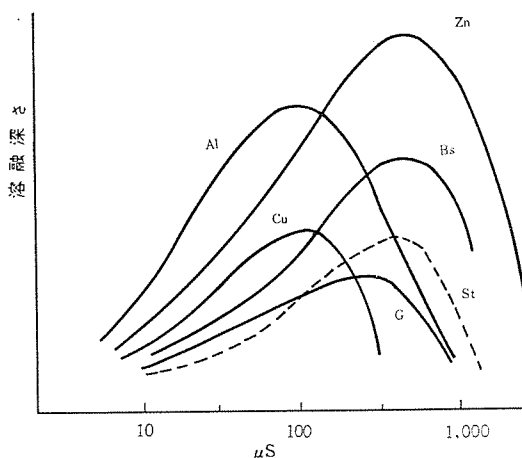


図 2.1 溶融深さ Melting depth.

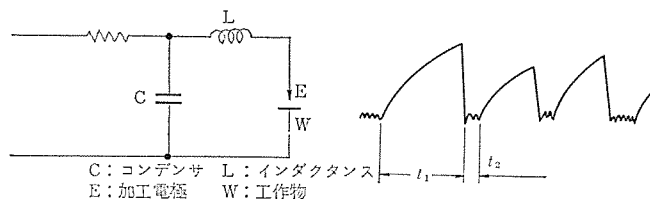


図 2.2 コンデンサ式低消費回路  
Condenser type low consumption circuit.

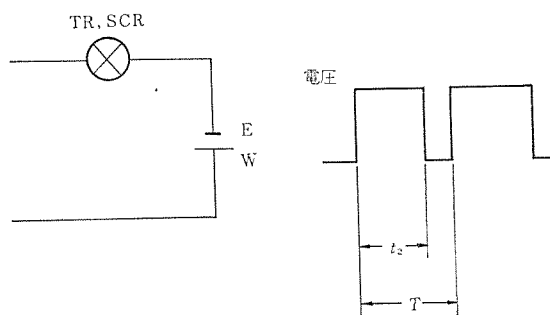


図 2.3 TR, SCR 方式 TR, SCR system.

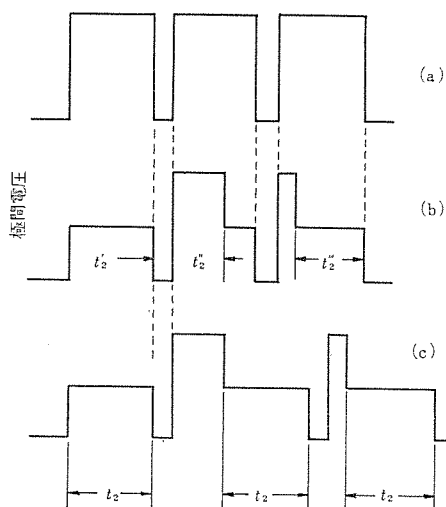


図 2.4 放電のそろい Evenness of discharges.

電機・インパルス変圧器式等に発展し、20~50 g/min は除去できるようになった。

電極の消耗量と材料の除去量の比、つまり電極消耗比は小さいほうが、高精度加工ができる。初期には黄銅電極で鋼を加工するとき100%，超硬合金加工では300%に達した。そこで抜型加工には工作物厚さの5~10倍の長さの電極を用いたり、底付き型加工では7~10本の電極を取りかえて仕上げを行なった。

熱伝導の計算から、ある放電エネルギーに対して溶融深さが最大または電極消耗が最小になる放電時間があることがわかった。(図2.1) この放電時間は従来のコンデンサ放電より著しく長いもので、放電回路にインダクタンスLを入れるなどして得ている。この方法で、銅電極・グラファイト電極等を用いて鋼を加工すれば、1%以下の消耗比も得られる。

図2.2のコンデンサ放電では放電時間 $t_2$ に比べて、充電時間 $t_1$ が著しく長いので、放電くり返し精度はあまり大きくできない。図2.3のようにトランジスタ(TR)、サイリスタ(SCR)で電流を断続すると、放電周期Tの90~95%を放電時間として利用できるようになる。つまり毎回の放電エネルギー・放電時間が同じでも放電精度を著しく大きくでき、同じ面あらさで著しく早い加工速度が得られる。

断続法のととき、極間電圧は図2.4(a)のようにかかるが、極間状態によっては放電はすぐ起きるとは限らず、(b)のようになる。つまり毎回の放電エネルギーが異なって、面あらさは悪化する。そこで放電時間を一定にする装置をTR、SCRに設けると、(c)のようにエネルギーがそろい、面・加工速度共に向上する。

図2.4(c)の方法はすぐれているが、いつでも最良とはいかない。図2.4(c)が図2.3にくらべてはっきり差のあるのは、数~十数g/minの中加工区域で、それ以上の荒加工域は面あらさが0.3~0.5mmと著しくあらいため効果が認められない。図2.3、2.4で、電流の断続にTRとSCRを用いるのも、くり返しが1~2kcくらいまでの荒加工ではSCR、さらに早い中加工ではTRが好都合である。放電ひん度の早い仕上げ加工で現在のTRでは、電流を十分大きく取れないので当分はやはりコンデンサ放電を用いるほかはないようである。

こういうわけで、SCR放電、TR放電、C(コンデンサ)放電を併用する加工機がふえてきた。

早い加工速度が得られるようになると、大きなくぼみの加工へと進み、1m角あるいは1×2mの取付テーブルを持つ超大形機がだんだん現われている。これは自動車用の鍛造型、絞り型あるいは、プラスチック用の型加工に用いられる。これと反対にごく小さな、数~数十μの穴加工をする加工機も現われつつある。

穴、くぼみの加工以外に、放電による切断も行なわれ、100台以上実動している。これは磁石鋼、超硬合金、鍛造素材の切断、ばねの切断用である。

### 3. 電解加工法

図3.1のように、電解液M中に二つの電極をつけると⊕側が溶け出す。この現象を利用したのが電解加工である。

電解量はファラデーの法則に従うので、早く加工するには電流をませばよいが、工作物表面の溶解生成物、酸化物、相手電極に析出する水素、電流(ジュール熱)による水蒸気等が通電を妨げる。これ



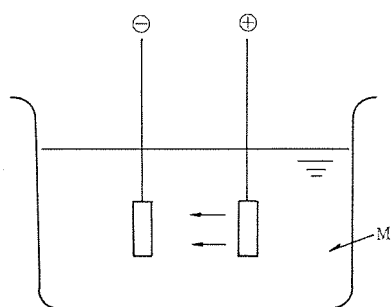


図 3.1 電解加工法 Electro chemical machining.

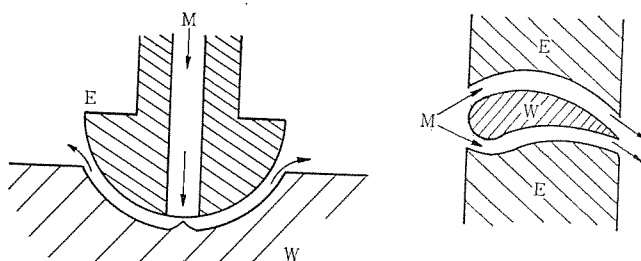


図 3.2 液流法 Liquid flowing method.

を除去するためには、極間に液流を流す。(図 3.2, 液流法), 表面を固体でまさつする (図 3.3, 固体まさつ法), 電流を反転する (電流法) などをおこなう。

このうち、液流法は齊藤長男氏が早く試み、固体まさつ法は筆者が実験したが、いずれも放置しておいたため外国に先を越された。現在世界で一番普及しているのはアメリカで、アノカット社が中心である。わが国ではその後独自の研究をおこない、アメリカ機以上の高精度の加工ができるようになり、30~40 台実動し、輸出も続々行なわれている。国内メーカーは三菱電機、日立製作所などである。

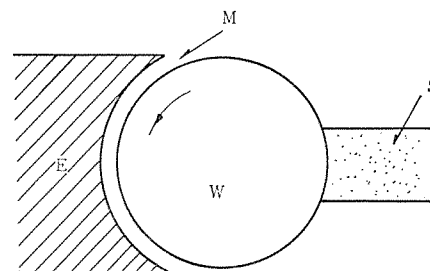


図 3.3 固体まさつ法 S: 固体 (と石)  
Solid rubbing method.

電解加工法は、電流さえ増せば加工速度は増し、10,000 A では 170 g/min にも達し、数万 A も可能である。また鋭い角、隅のないなめらかな形状では精度が高く、仕上面もよいため、鍛造型、プラスチック用型、機械部品加工に有望視されている。とくに最近では超硬合金の型ほりも数 g/min の加工速度でできるようになったので、今後の応用は期待できる。

液流法は主として穴、くぼみ、つまり型のようなものに使われるが、固体まさつ法は研削に使われることが多い。現在超硬合金研削では、ダイヤモンドと石研削の数倍の加工速度を得ており、クラックのないこと、経済的なことと合わせて急速にひろがっている。

#### 4. 電気加工の将来

電気加工のうち、放電加工は型加工によく用いられており、今後ますます使用される見込みであるが、高精度の部品加工、微細加工に発展し、標準タイプのほかに専用機が沢山あらわれるであろう。電解加工は開発が少しくれ、大形の型加工に使われているだけであるが、やがて本命の部品加工に大いに使用され、これまた専用機が開発されるであろう。

## 放電加工, 電解加工の現状と将来

齋藤長男\*

## Present State and Future of Electric Discharge Machining and Electro Chemical Machining

Nagoya Works

Nagao SAITO

Electric discharge machines and electro chemical machines have now secured positions in the general use machine tools and industrial apparatus. Japan was once regarded as an advanced country as for electric discharge machining, but she has not made much progress after that and is behind the foreign countries. Though the number of unit in use is fairly large, they are mostly old fashioned. This is considered due to poor application of electronics to this engineering. Mitsubishi, however, has developed the machines applied electronics, showing marked increase of the grow rate of the units such as 6~10 times that in the past. With the electro chemical machines, an excellent field of producing turbine blades by the new method has been found to bring about rapid increase of application. In a few years those machines may account for 10 % of machine tools in Japan, for this has the relationship with the rationalization of industry based on technological innovation.

## 1. ま え が き

電気加工の中でも放電加工機と電解加工機は、もはや特殊な分野だけに使用される加工機ではなく、はん用工作機械、産業機械の中に確固とした地歩を築くに至った。

ならいフライズと人手による仕上加工を含む工程を、電気加工に置換えることにより、著るしい能率の向上が見られ、生産技術の技術革新をもたらしている。また放電加工においては、“1人で何台もの機械を操作すること (One man multi machine)” が可能であり、とくに最近の熟練者不足、作業時間の短縮などに対処する一連の合理化投資の重要な対象となっている。

これらの新しい加工法は、その特色を発揮するにふさわしい用途が見出されたとき、あるいは性能が著るしく向上したとき急激な発展を見るものである。その一例として、昭和32~35年ころ放電加工は当時電極消耗が大きいという欠点があったにもかかわらず、抜型、サッシ型の工作に使用できることが見出され、加工法としての確固たる地位を得たのである。現在は、半導体電源の進歩により電極消耗量が加工量にくらべ無視できる程度に小さくなるという、性能の著るしい向上により、鍛造型、ダイカスト型、プラスチックモールド型、および自動車などのプレス型の加工にその用途がひらけつつある。一方、電解加工は、適切な用途が見つからないまま一時低迷したが、タービンブレードの工作、サッシ型の工作、部品加工などに、偉力を発揮することが証明されて、これもまた爆発的な発展をなしつつある。このような用途の発見には、抜型、タービンブレードの製作における電極製作技術の進歩のように加工技術の進歩も同時に必要である。

今後も、工業界からの要求と機器の進歩と加工技術の進歩などが伴って、新しい用途が見出され、用途が拡大するものと考えられる。ここに、放電加工、電解加工に関して、主として製作者側から見た状況、および当社の技術進歩の経過を述べ、将来にも言及したい。

## 2. 放電加工の状況

## 2.1 生産高

わが国の生産高は、通産省統計などによれば、放電加工機、電解

加工機、超音波加工機が一括されて示され、昭和40年約6億円280台、昭和41年約8億円約300台となっている。(ただし三菱電機を除いた数字) なお昭和34年以降の総販売数は2,000台となっている。

外国の状況については、昭和41年10月にチェコで開かれた非切削加工国際会議資料によれば、アメリカの放電加工は、1960年に約14億円、1965年に約56億円であり、1970年には約100億円になるであろうと述べている。またアメリカの保有する放電加工機は3,500台と言われている<sup>(1)</sup>。(約7,000台の保有台数のうち半数の3,500台は最近3年間に購入されたものであるという報告もある。)

アメリカには Elox Cincinnati Milling Co., Excello, Ingersol があり、Elox は1965年に約27億円を生産していると言われる。スイスでは、1965年に Charmilles, AGIE 両社で約27~30億円を生産しているようである。

## 2.2 加工機の大きさ

アメリカの Cincinnati Milling 社<sup>(5)</sup>は最近、加工面積が2.2m×2.7m、50トンの型を入れることのできる放電加工機を製作し、スイス AGIE 社は加工タンクの大きさ1m×1.5m×0.9m、重量3トンの放電加工機を発表した。

日本では当社が1.2m×0.75m×0.5m、重量4.5トンの加工機を発表した。

一般にアメリカでは大きな放電加工機の需要が多いようで、自動車産業はとくに大きな放電加工機を購入しているようである。

## 2.3 加工機の成長率

各国とも放電加工機は成長の一途をたどり、アメリカ、スイスとも11年前の10倍、イギリスは3年間に3倍の成長を遂げたといわれる。日本は通産省統計などより推定すれば、昭和35年と42年と比較して約2倍の成長にとどまるが、この成長率は小さく、生産額はスイスの一社にも劣る。

日本はかつて放電加工の先進国といわれたことが一時あり、これはコンデンサ放電によって貫通型を製作するのに成功したことにもとづくものと思われる。その後、半導体を中心とするエレクトロニクスを導入する段階に遅れを取ったと見られる。このため、外国機の輸入が増加した。昨年来われわれがエレクトロニクスの導入を試みた加工機を開発し発表したところ、著るしい反響をもって迎えられている事



実も、その理由を物語るものといってよいであろう。すなわち、わが国は放電加工機の台数が多いが旧形が多い。

### 3. 電解加工の状況

#### 3.1 生産状況

電解加工機が生産台数は、放電加工機にくらべるとまだ少ない。

わが国全体としては、生産開始以来の累計が輸出も含め 50 台程度ではなからうかと推定する。昭和 42 年にはいつてからは、受注も活発となり国内、輸出ともに多くなった。おそらく年間数億円の生産量になると思う。用途としては、タービンブレード加工、サッシ押出型、部品加工、鍛造型の製作である。

アメリカでは、電解加工機が 200~250 台使用されているといわれ、国内の生産額も 30 億円に達しているとも報じられている。用途はタービンブレードの加工が圧倒的に多い。イギリスでは生産量は不明であるが、タービンブレードの加工に使用されているのはたしかであり、従来の加工法で 494 分を要していたタービンブレードの加工を電解加工により 19.2 分の加工時間に短縮した由である。

#### 3.2 加工機の加工容量

わが国では、2,000 A、(加工速度は鋼の場合 34 g/min)、5,000 A (同じく 85 g/min)、10,000 A、(同じく 170 g/min) であるが、アメリカでは 30,000 A、(510 g/min) も製作されているということである。

### 4. 当社の電気加工に関する技術進歩の経過

電気加工に関する研究は、当社中央研究所において昭和 24 年ころから研究を開始したが、昭和 32 年に高周波重じょうコンデンサ放電方式を開発して以来、下記のような経過をたどっている。

(1) 昭和 32 年 高周波重じょうコンデンサ放電加工方式  
(第 1 回明石賞受賞)

(2) 昭和 37 年 油圧制御放電加工方式の開発  
DM-201, DM-250, DM-300, DM-500 形の基礎

(3) 昭和 37 年 気体混入方式電解加工方式の発明<sup>(3)</sup>  
日、英、米、仏、西独、スイス 特許取得

(4) 昭和 39 年 タングステンカーバイド電解加工方式の開発<sup>(4)</sup>  
仏、スイス 特許取得、その他申請中。

(5) 昭和 38 年 ソ連へ電解加工機 MC-20 V 成約以来毎年 1~2 台、昭和 41 年には MC-50 V 2 台を含め 4 台成約

(6) 昭和 40 年 サイリスタ方式低電極消耗放電加工機開発 鋼対銅電極消耗比最小 0.1 %

(7) 昭和 41 年 東ドイツ Leipzig 見本市にて GOLDMEDAL 獲得、東ドイツへ電解加工機 MC-20 V 輸出

昭和 41 年 チェコへ MC-20 V 輸出成約

(8) 昭和 42 年 トランジスタ電源開発  
最高周波数 200 kc

### 5. 今後の電気加工

放電加工、電解加工は、素材を取りつければ最終製品がおおむね得られるという合理化上の魅力があり、加工速度、仕上面あらさなどを含めた経済性は、極端に従来の方法よりもすぐれている場合が多い。William W. Wood 氏<sup>(2)</sup>によれば、電解加工は最も生産性が高く、放電加工は最も加工精度がよいといっている。

アメリカの航空工業およびロケット工業は、加工に関し電気加工の占める割合が 1962 年は 15 %、1967 年は 22 %、1972 年は 30 %、1975 年は 70 %に達するといっている。ソ連邦では 1970 年には、工作機械の 8~10 %が電気加工に代わるであろうといっている。

わが国の工作機械は年産約 1,000 億であるが、近いうちに少なくとも 10 %の程度には、電気加工が成長するのではないかと確信している。

当社においても、現在は、昭和 40 年以前とくらべると、約 5~10 倍に成長している。

この特集号が今後電気加工を使用される方、販売するかたがたに参考となれば幸甚のいたりである。

### 参考文献

(1) Entwicklung und Perspektiven der nichtkonventionellen Bearbeitungsmethoden im Ausland.

これは下記の国際学会の資料である。

KONGRES O ELEKTRICKÝCH METÓDACH  
OBRÁBĚNÍ KOVŮV BRNO—1966

(2) William W. Wood  
ASTME Vectors p. 4~10 (1967)

(3) 気体混入電解加工方式特許

アメリカ 3,284,327

イギリス 1,041,776

フランス 1,391,177

スイス 417,793

日本 474,199 その他

(4) タングステンカーバイド電解加工方式特許

フランス 1,433,358

1,417,497

(5) Metal working News Monday Feb, 20 (1967)

## 放電加工の加工原理と加工特性

齋藤 長男\*・小林 和彦\*\*

## Machining Principle and Characteristics of Electric Discharge Machining

Nagoya Works Nagao SAITÔ・Kazuhiko KOBAYASHI

The principle of electric discharge machining has been taken up as a subject of description. First the theory of machining mechanism now in general use and discharge circuits are introduced. Then, from the results of single discharges and continuous discharges made with a transistor type discharge circuit, the relation between two types of discharges and their correlation of machining characteristics and electrical conditions are obtained. Lastly, charts are formed to seek for the machining characteristics. The removal rate can be calculated from the removal of single discharge, and it is proportional to one and half square of discharge current when the duty factor is definite. A copper electrode wear ratio decreases with the decrease of discharge current and with the increase of discharge duration. Black film attached to the electrode surface in case of low wear seems to have an effect of protective action against the electrode wear.

## 1. ま え が き

従来は、放電回路と言えばコンデンサを用いたラザレンコ回路(RC回路)がおもであったので、加工速度は小さく、電極消耗比が非常に大きいという欠点があり、貫通穴加工を主とした用途に限定されていた。

最近の放電加工機は、エレクトロニクスの技術が十分に採り入れられた結果、加工速度は数十倍、電極消耗比においては、ほとんど皆無に近いような加工特性にまで向上し、非常に広い工業の生産分野に利用されるようになり、工作機械の確固たる地位を占めるに至った感がある。

ところで、放電現象については、現象そのものが非常に複雑なため、いまだに完全に説明できない部分が多く、また、銅・グラファイト等の電極を用いた場合の低電極消耗の原因についても、まだ定説はなく、今後の研究を待たねばならないような状態である。

この論文では、まず放電加工の加工原理について、現在一般に説明されている理論および放電回路を簡単に紹介し、つぎに筆者らがトランジスタ式放電回路を用いて、単一放電と連続放電の実験を行なった結果から、加工特性と電気条件との関連について述べる。

## 2. 放電加工の加工原理

## 2.1 加工原理

放電加工法は、電極工具(あるいは単に電極)と被加工物からなる二つの電極を互いに対向させて、その間に放電を起こさせ、放電により発生する金属の異常消耗を型彫りに応用したものであって、普通は白灯油・変圧器油のような絶縁性の油の中で、電極間隔を非常に狭く保ち、比較的大電流・短時間の放電を起こさせ、その放電(とん)痕の累積により加工する方法である。

放電電流波形は、たとえば図2.1のような波形で、消弧をはさんで放電が行なわれることが一つの特長であって、この消弧時間がなければ放電加工は行なわれない。放電時間は、定常連続的なアーク放電に比べて非常に短かく、短かいものでは0.1 $\mu$ sから長いものでもせいぜい数msである。

放電加工においては、図2.1における放電時間 $\tau$ と放電周期 $T$

との比率すなわちDuty Factorがかなり重要な役割を持ち、消弧時間を短かくして、Duty Factorをあまり大きくすると、一種の定常連続アーク状態に陥って加工が不可能になる。また逆に消弧時間を長くすれば、放電のひん度数が降下することになり、それだけ加工速度が低下する。

放電は、前述したような絶縁油の中でせいぜい100V程度の極間電圧のもとで行なわれるから、電極間隔は非常に狭く5~50 $\mu$ 程度となり、そのため、工具と被加工物のクリアランスもこれと似た値となり高精度が得られる。放電エネルギーを小さくすれば、1回の放電によって消耗する金属の量は小さくなるので、良好な加工面あらさが得られ、1 $\mu$ H<sub>max</sub>の値も可能である。

被加工物が加工されると、次第に電極間隔は広がっていき、放電を維持するために電極をその分だけ送ってやる必要があり、実際の放電加工においては、電極間隔が一定値になるようにサーボ機構によって制御される。

放電によって消耗するのは、被加工物ばかりでなく、電極のほうも同時に消耗するということが、この加工法の大きな欠点になっており、電極材料によっては、被加工物以上の比率になる場合もあり、電極消耗比を少なくするために、電気回路や電極材料の選択等にいろいろなくふうが凝らされている。

## 2.2 電気回路

電気回路を大別すると、放電周期が極間の物理状態によって決まる従属回路と、極間とは無関係に別個に発振回路を持った独立回路とに分けられ、さらに両方の特長を採り入れて構成された回路があり、ここではとりあえずその回路を組み合わせ回路と呼ぶことにする。

## 2.2.1 従属回路

まず、従属回路の最も基本的な回路はRC回路であろう。これは、図2.2のように直流電源、抵抗R、さらにコンデンサCから構成されており、電源からのエネルギーをいったんコンデンサに蓄積し、そのエネルギーが、ある大きさに達したときに瞬間的に極間EとW間に放出する回路である。つまり、コンデンサの充電電圧で極間の絶縁が破壊されるような適当な距離に極間E-Wを保っていると、コンデンサの充放電がくり返されるようになって、図2.3のようないわゆ



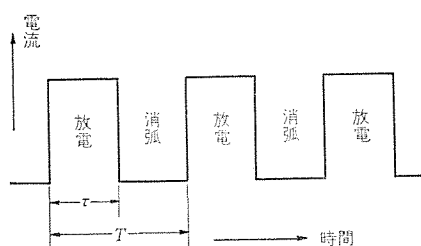


図 2.1 放電電流波形  
Discharge current wave form.

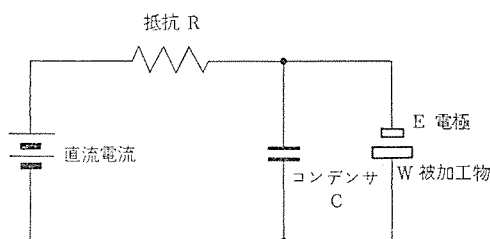


図 2.2 RC 放電回路  
RC electric discharge circuit.

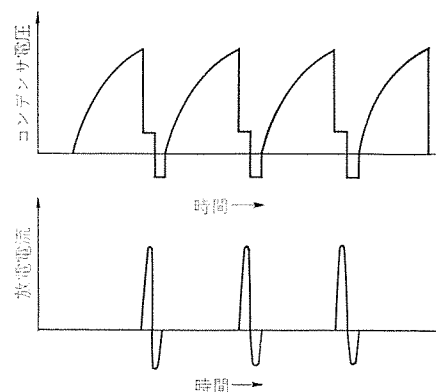


図 2.3 コンデンサの充電電圧と放電電流波形  
Condenser charging voltage and discharge current wave form.

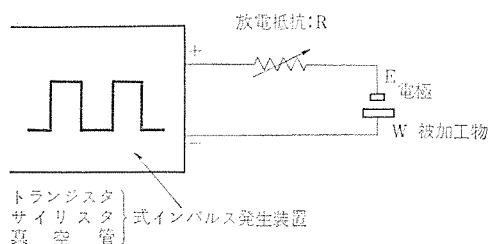


図 2.4 スイッチ素子を用いた独立回路  
Independent electric discharge circuit made by electronic switch elements.

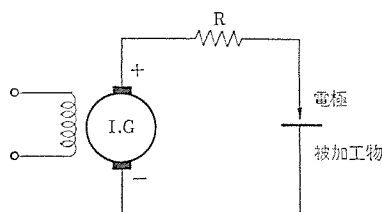


図 2.5 インパルス発電機  
Impulse dynamo.

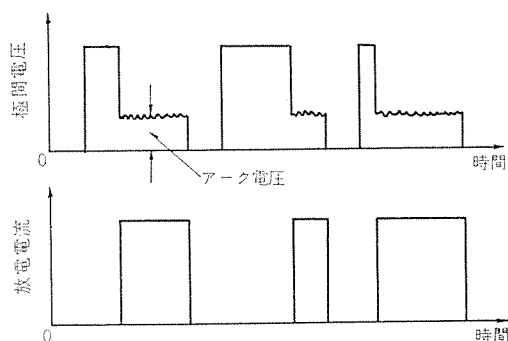


図 2.6 極間電圧と放電電流波形  
Gap voltage and discharge current wave forms.

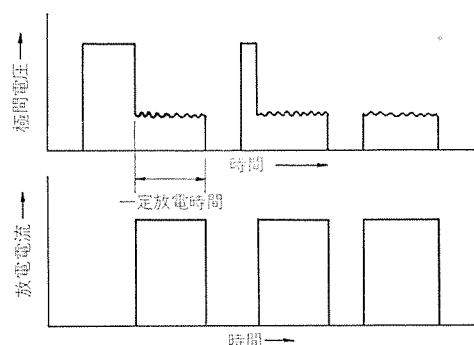


図 2.7 極間電圧と放電電流波形  
Gap voltage and discharge current wave form.

る弛張発振が発生する。電源電圧は普通 100~250 V 程度であり、コンデンサの値は 0.001~100  $\mu\text{F}$  のものが用いられる。

この回路の特長は、コンデンサ容量を小さくすればするほど非常に良好な加工面あらさが得られるということであるが、その反面、充電時間が放電時間に比べてきわめて長い（最大で 100 : 5 の割合）加工能率が低いという欠点がある。

### 2.2.2 独立回路

この回路としては、図 2.4、2.5 のように放電周波数が極間の物理状態とは無関係にきまるインパルス発振器があり、発振器からの出力を抵抗を通して極間に印加し、図 2.6 のような電圧および電流波形で加工する回路である。

発振器は、真空管・半導体素子（トランジスタ、サイリスタ）のようなスイッチ素子を用いた回路やインパルス発電機があるが、最近、半導体素子の性能向上から、トランジスタおよびサイリスタを用いた回路が大勢を占めつつある。

サイリスタ回路およびインパルス発電機は、大電流が得られるけれども、比較的周波数が低いため 10 kc 以下の荒加工領域に、真空管・トランジスタ回路は 100 kc 以上の高周波が得られるので、仕上加工領域に適している。

使用電圧は、真空管回路を除いては前記の RC 回路（図 2.2）に比べて低く、50~100 V が普通である。

独立回路の特長は、極間の状態に無関係に発振されるので、放電電流、パルス波形の操作が非常に簡単であり、さらに、スイッチ素子の数を増加させることにより無制限に電流を大きくとれることなどである。

### 2.2.3 組み合わせ回路

この回路は、従属回路と独立回路のおおのの特長を組み合わせた回路であり、たとえば図 2.2 の直流電源の代わりに、図 2.4 のインパルス発振器を用いるような回路は、その組み合わせ回路に属する。この場合の加工特性は、本質的には、図 2.2 の回路と変わりはなく、ただ、図 2.2 の場合は定常アークが発生したとき、それ自体でアークを解消する能力はないのに対して、組み合わせ回路の場合には、発振器が休止時間を持っているので、アークを容易に解消させることができる点に大きな特長がある。

以上のほかに、スイッチ素子を用いた独立回路を改良して、一種の組み合わせ回路に属するような回路がある。この方式は、図 2.4 において、極間の状態、とくに放電開始時を検出して、インパルス発振器のほうにフィードバックし、実際に放電するパルスの時間幅を一定に制御する方式である。極間電圧および放電電流波形は図 2.7 のようになる。図 2.6 との違いを比較されたい。

### 2.3 放電加工の加工機構

放電加工の加工機構は非常に複雑ではあるが、一般につきのよう考えられている。単一放電こんの生成機構、連続放電加工の機構、電極消耗の機構とに分けて述べる。



×300(縮尺率2/3)

図 2.8 素材の圧延方向に平行な面に放電こんを作ったもの  $V_d=200$  V, Cu 溶融金属の残留物が柱状晶として見られる

Cross section of crater that is cut parallel to mill rolled discharge.

### (1) 単一放電こんの生成機構

陽極と陰極との極間が  $5\sim 50\mu$  程度の狭い電極間げきに保たれ、 $100\sim 200$  V 程度の電圧が印加されると、極間は高い電界強度の状態に達し、主として電界放射によって絶縁が破壊され、電子などが誘発され放電電流が流れる。極間の放電点には、その間短時間のアーク放電を発生し、アーク脚部を蒸発あるいは溶融し、同時にアークの熱によって加工油が気化膨張爆発を起こし、そのとき電磁力・静電力も作用して、加熱されたアーク脚部の金属を吹きとばすことにより放電こんを生ずる。

熱作用が加工の主体となることは、加工粉が球状をなしていること、および単一放電こんの底に一度は溶融してもその全部は飛散せずに残留凝固した柱状晶が存在することなどからも証明<sup>(6)(7)</sup>される。

アーク脚部の加熱される原因としては、電子衝撃・イオン衝撃・ジュール熱などが考えられ、加熱部分には気化爆発力のほか、電磁力・静電力が作用すると考えられる。

電磁力・爆発圧力については、鳳教授がピンチ効果を計算によって求め、前田教授<sup>(4)</sup>および木本氏<sup>(5)</sup>がチタン酸バリウム圧電素子によって実測しており、 $50$  気圧程度は発生すると述べている。

### (2) 連続放電加工の加工機構<sup>(7)</sup>

放電加工は単一放電の累積によるものであるが、これらの連続的に発生する放電は、電極面内で、分散して発生する場合と集中して発生する場合とがある。放電は分散して発生すれば加工は安全におこなわれるが、集中して発生すればアークこん、すなわちピットを発生する。

放電の分散に関する筆者らが考察した機構模型をつぎに示す。

放電が発生すると放電こんの周辺にもり上がり、数百  $\mu$ s  $\sim$  数 ms の時間おくれをもって発生するから、放電の周波数がある程度高ければ、つぎに発生する放電は前の放電こんの周囲ではなく、かなり以前に発生した放電点のもり上りを誘因として発生する。したがって放電は同一放電点付近ではなく、放電の誘因となるもり上りの分布している範囲に発生することになり、特定の放電点のイオン濃度も高くなり、放電の分散が行なわれている限り定常アーク放電にはならない。また極間の完全な消イオンは通常  $1$  ms 程度を必要とするが、 $10$  kc  $\sim$  数百 kc などの放電加工を可能とする現実、完全消イオンを必要としないことを意味し、これは、放電がもり上りの時間おくれを伴って分散的に発生することにもとづく、放電分散の現象から説明される。

しかしもり上がりによる電界強度よりも、加工粉の累積などによ

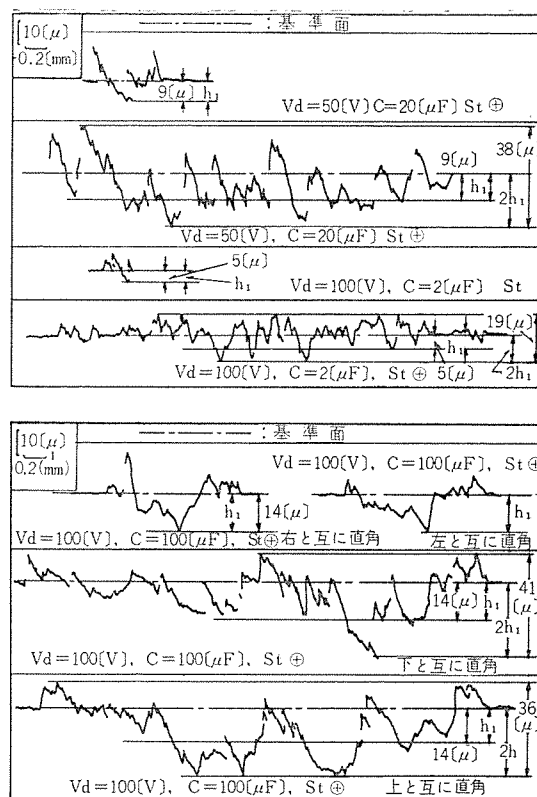


図 2.9 単一放電こんと仕上げ面との関係  
Relation between single discharge craters and surface roughness.

る電界強度のほうが強い場合には、同一個所に放電がくり返し発生することになり、ピット、アークこんを生ずることになる。

加工された素材の表層部は、急熱急冷による薄い変質層を生じ、素材が鋼の場合には硬化層を生ずる。これらの厚みはパルス幅と放電電流値によって変化し、パルス幅の長いほど、放電電流値の大きいほど厚さを増す。

加工された放電面は、放電こんの累積によって形成されるが、そのときの仕上げ面あらさは、単一放電こんが2個重なった状態となる。これを数式で示すと、

$$H_{\max} = 2h_1 + h_2$$

### (3) 電極消耗の機構

電極消耗はなぜ特定の電極材料が特定の条件の下で、高い消耗率を示したり低い消耗率を示したりするかは、まだよくわかっていない点が多い。

現在までに知られている理論として、鳳教授<sup>(1)(3)</sup>は、放電電流中に占められるイオン電子電流と電流の占める割合によって、陽極入力と陰極入力とが異なり、これにより電極消耗が決定されると述べている。元木教授<sup>(2)</sup>はこれを修正し電子電流は、熱電子放射と電界放射とからなり、これらを総合して、電子電流とイオン電流との占める比率を求めている。三谷助教授<sup>(12)</sup>によれば、コンデンサ放電方式により、低消耗放電加工回路を作ることができ、放電電流のパルス幅に対する比率が小さいほど、消耗が小さくなるとしている。ラザレンコはコンデンサ放電においては陽極側が電子ビームにさらされると述べている。

電極消耗の機構について定性的に言えば、つぎのように考えてよさそうである。

(1) 電子電流によって陽極側が高温になる。

(2) イオン電流によって陰極側が高温になる。



- (3) 電子電流は極間距離が狭くパルス幅が短い場合に多くなる。
- (4) イオン電流は極間距離が広くパルス幅が長い場合に多くなる。
- (5) 電極間に形成される黒色皮膜が電極消耗を防止する作用がありそうである。
- (6) 融点の高い材料、温度伝導率の高い材料は消耗が少ない。
- (7) 電極材料としては、熱電子放射をおこなう材料、たとえばタングステン、モリブデン、トリウムタングステンなどを含むもの、あるいはカーボンを含むものは、その材料を電極として陰極に用いるときは、同一放電条件でも加工速度が増加する。これは放電電流中に占める電子電流の割合が増加するからであろうと解釈される。

### 3. 放電加工特性

#### 3.1 概要

放電加工における加工特性は、面あらさに対する被加工物（普通は鋼）の加工速度 (g/min) と電極（工具）の被加工物に対する電極消耗比 (%) で表示されるのが普通である。

放電加工は、単一放電の累積で行なわれることから、加工速度を大にするためには、2章で述べたように単一放電エネルギーを大にすればよいということが容易に考えられるが、同一エネルギーを与えるにしても、低い電力密度で長時間にわたって与えるか、あるいは大きい電力密度で短時間に与えるかによって、放電こん直径、深さも変わってきて、当然のことながら上記の加工特性も変わってくるはずである。

加工特性は、また、電極材料によって大きく変化する。とくに電極消耗比は、電極材料として、W, C のような高融点材料を用いる場合と、Al, Zn のような低融点材料を用いる場合とでは、特性に大きな差を生ずるからである。

さらに最近では、銅・銀・ニッケルあるいはグラファイト (Graphite) などの電極材を用いた場合、電極消耗比の著しく少ない放電加工機が開発されており、これには、電気条件である放電パルス幅、放電電流ピーク値が大いに影響することがわかっている。

以上のようなことから、この章では、比較的現象の解析に容易な放電回路として、トランジスタパルス回路を選び、電極材として銅およびその他2, 3の材料を用いて放電加工の基礎的実験を行なった結果から、電気条件が加工特性にどのような影響を及ぼすかについて論

じて見たい。

#### 3.2 単一放電による基礎的実験

単一放電による基礎的実験は、国内でもかなり多くの報告<sup>(6)(7)</sup>があり、また外国では、Williams 氏等の一連の報告<sup>(8)(9)(10)</sup>がある。とくに後者は、真空管回路で発生させたパルスを放電加工に適用して、電気条件の加工特性に及ぼす影響を多くの材料について非常に詳しく論じている。しかしながら、以上の報告では最近開発された銅電極の低消耗特性についてはあまり詳しく触れていない。

そこでここでは、銅電極の低消耗性の解明に役立たせるために、比較的パルス幅の長い方形波パルスを用いて、単一放電による基礎的実験を行なったので、その結果について述べる。

##### 3.2.1 実験方法

実験装置および放電回路は、図3.1のとおりである。放電回路としては、多数個のトランジスタ Tr を抵抗で分割して並列に接続した回路を用いる。最初 Tr を ON にして、放電ギャップに直流電圧 60 V を印加し、放電が発生すると一定の放電時間幅で Tr を OFF にするように制御している。電極は油圧サーボ機構によって自動的に降下し、放電発生と同時に上昇する。

放電時間幅 (パルス幅) を一定にする。その値は約 40  $\mu$ s から 1,000  $\mu$ s まで変化させ、放電電流は、トランジスタの数を選定して数段階に変える。それらの値は、放電回路に直列に入れた分流器の出力電圧をシンクロスコープで観測することにより測定する。

次に 1,000 回以上の単一放電のくり返し実験を行なう場合は、図3.1のリミットスイッチを電極上昇時に働かせ、自動的に Tr をふたたび ON にする。この場合の放電回数は、パルスカウンタに記録させる。

電極の種類としては、陽極に銅およびアルミ、陰極に鋼 (SK-5) を用いる。加工液は白灯油である。

単一放電による放電こんの大きさは、仕上面検査器によって測定し、同時に顕微鏡的観察も行なう。単一放電のくり返し実験では、1,000~3,000 回の単一放電を数秒の間隔で行ない、実験前後の電極重量を精密直視てんびんでひょう量し、その差から平均的な単一放電消耗量 (累積消耗量/くり返し回数) を算出する。

##### 3.2.2 単一放電による消耗比

放電電流  $I_p$  (A) およびパルス幅  $\tau$  (ms) をそれぞれパラメータにして、1,000 回以上の単一放電をくり返し、電極の累積消耗量から平均的

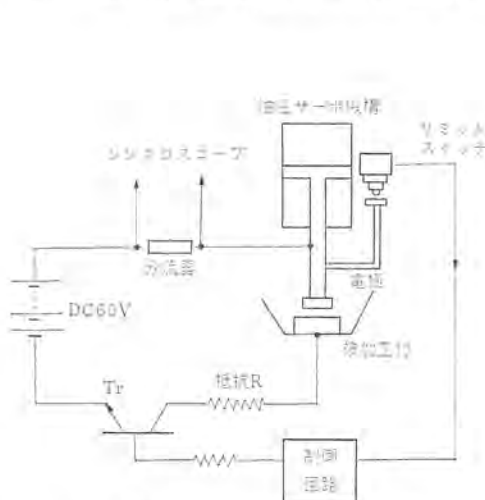


図 3.1 実験装置および放電回路  
Experimental equipment and electric discharge circuit.

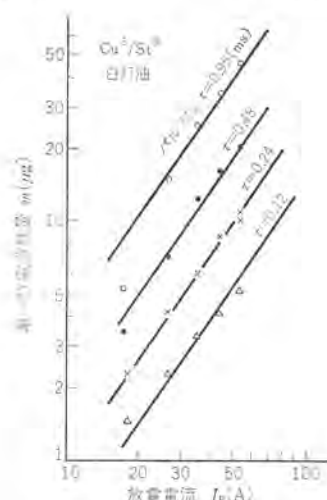


図 3.2 Cu@/St@ の場合の鋼の  
単一放電消耗量  
Single discharge removal of steel  
cathode with copper anode.

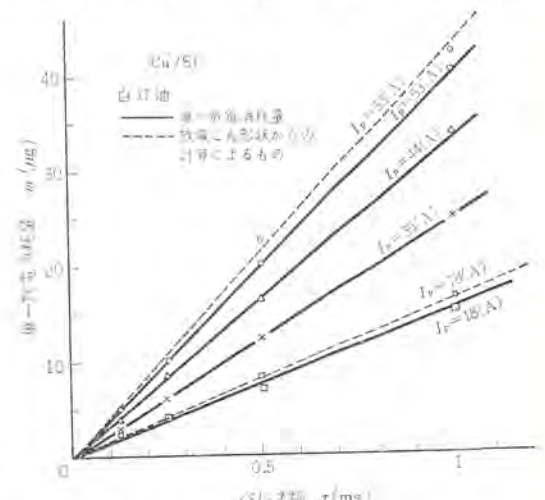


図 3.3 Cu@/St@ の場合の鋼の単一  
放電消耗量  
Single discharge removal of steel  
cathode with copper anode.

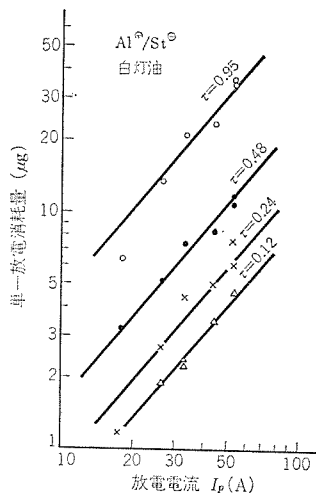


図 3.4 Al<sup>+</sup>/St<sup>-</sup> の場合の鋼の単一放電消耗量  
Single discharge removal of steel cathode with aluminium anode.

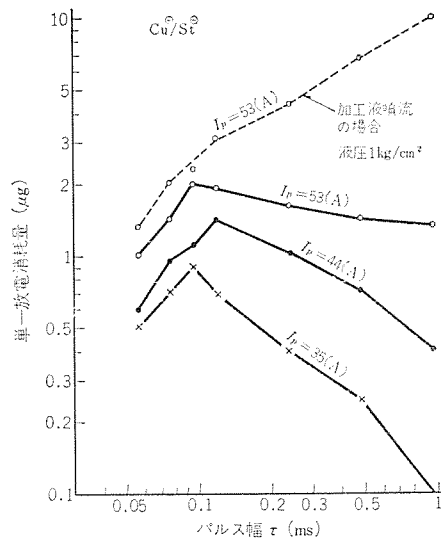


図 3.5 銅の単一放電消耗量  
Single discharge removal of copper anode with steel cathode.

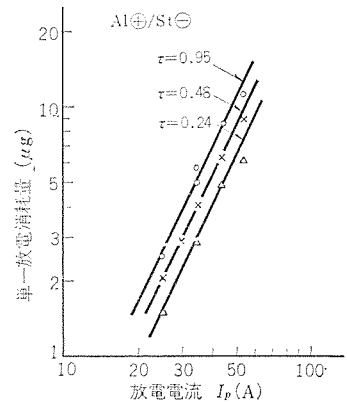
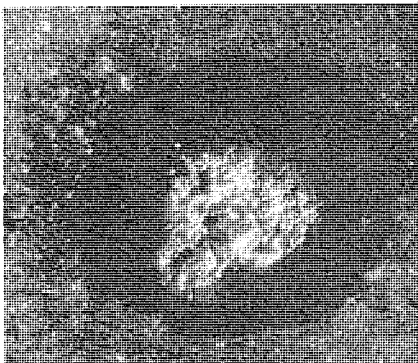
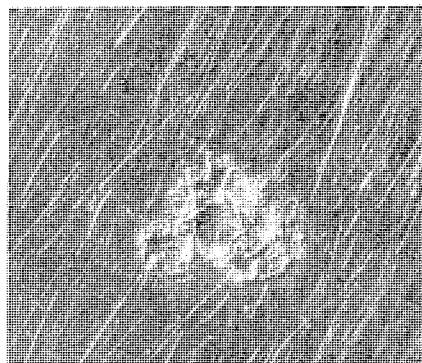


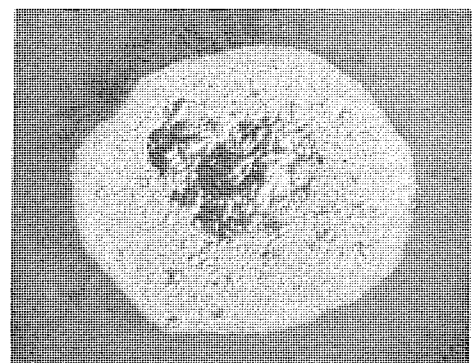
図 3.6 アルミ (Al) の単一放電消耗量  
Single discharge removal of aluminium anode with steel cathode.



(a) Cu<sup>+</sup> 面の放電こん (×100) τ: 1 ms, I<sub>p</sub>: 26 A



(b) 黒色皮膜をふきとった後の Cu<sup>+</sup> 面の放電こん (×100)



(c) St<sup>-</sup>面の放電こん (×100) τ: 1 ms, I<sub>p</sub>: 26 A

な単一放電消耗量を算出した結果を図 3. 2, 3. 6 に示す。

図 3. 2, 3. 3 は, Cu<sup>+</sup>/St<sup>-</sup> (銅が陽極, 鋼が陰極) の場合の St<sup>-</sup> の単一放電消耗量である。その値  $m(\mu\text{g})$  は, 図 3. 2 より,  $I_p$  に対して等比級数的に増加し, 図 3. 3 より,  $\tau$  に比例しているようである。

したがって,

$$m = A I_p^B \tau \quad (3.1)$$

$A, B$  は定数

のような形の実験式で表わすことができる。

そこで, 図 3. 2, 図 3. 3 より  $A, B$  の値を求めてみると,

$$\left. \begin{aligned} A &= 0.14 \sim 0.15 \\ B &= 1.4 \sim 1.5 \\ \tau &: \text{ms}, I_p : \text{A} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

次に, 図 3. 4 は Al<sup>+</sup>/St<sup>-</sup> の場合で, St<sup>-</sup> の単一放電消耗量は,  $I_p$  に対しては Cu<sup>+</sup>/St<sup>-</sup> の場合と似たような傾向を示し, 大体  $I_p^{1.2}$  に比例して増加しているようであるが,  $\tau$  に対する関係は, あまり明確になっていない。

図 3. 5, 3. 6 は, それぞれ Cu<sup>+</sup>, Al<sup>+</sup> の単一放電消耗量を示す。

Al<sup>+</sup> の単一放電消耗量は, 図 3. 6 より,  $I_p, \tau$  が増加するにしたがって増大しているが, Cu<sup>+</sup> のそれは,  $I_p$  が一定の場合, 図 3. 5 より  $\tau$  が長くなると, むしろ逆に減少していることがわかる。減少するときの Cu<sup>+</sup> 電極面は, 黒色皮膜でおおわれているのが観察される。 $\tau$  が長くなって, 放電電圧への供給電力がその分だけ増加しているにもかかわらず, Cu<sup>+</sup> の単一放電消耗量が減少するという

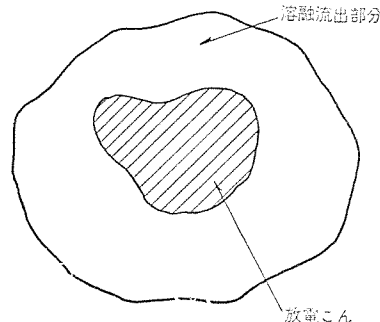


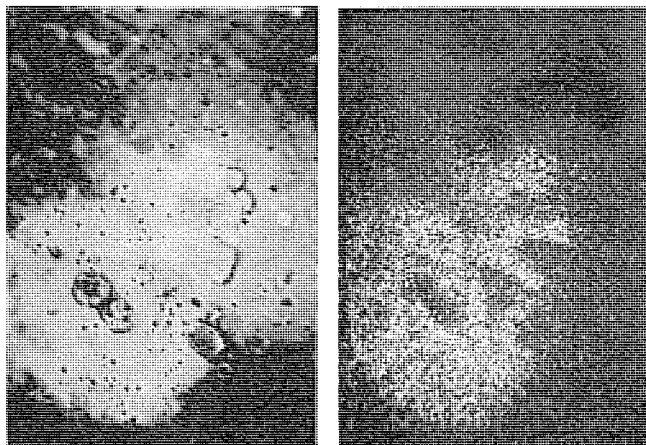
図 3. 7 電極面の放電こん顕微鏡写真  
Photomicrographs of copper anode or steel cathode crater.

ことから, この黒色皮膜が電極消耗の保護作用として何らかの効果を持っているということが十分に考えられ, 次章で述べる連続放電の場合の低電極消耗性と関係がありそうである。そこで, 黒色皮膜が付着しないような効果を与えるために, 電極の中心に加工液噴出口を設け, 約 1 kg/cm<sup>2</sup> の液圧をかけて, 加工液を噴出させるようにすると, 図 3. 5 の点線のような結果を生ずる。すなわち Cu<sup>+</sup> の単一放電消耗量は,  $\tau$  の長いところでも  $\tau$  の増加にしたがって増大するようになる。このときの Cu<sup>+</sup> 面では, 黒色皮膜がかなり消失しているのが見られる。

### 3. 2. 3 単一放電こんの顕微鏡的観察

St<sup>-</sup> 電極面の放電こん写真を図 3. 7(a) に, Cu<sup>+</sup> 電極面の放電こんおよび表面に付着している黒色皮膜をふき取った後の表面の写真をそれぞれ図 3. 7(b), 3. 7(c) に示す。St<sup>-</sup> 面の溶融流出部分がともにまったく同一の大きさとなっていることがわかる。これ





(a) SC×700 倍  
白色部分 カーボン(C)  
斑点部分 鉄(Fe)

(b) C×700 倍  
白色部分 カーボン(C)

図 3.8 Cu<sup>+</sup>面の X 線顕微鏡写真  
Photomicrographs of copper anode crater by means of X-ray analyser.

らのことから、次のようなことが想像できそうである。

(1) アーク柱が膨張しないか、あるいは膨張速度が小さいとすれば、熱伝導率の異なる二つの電極間の放電こんの大きさは、当然異なっていなければならないと考えられるが、両極の放電こんがまったく同一の大きさであると言うことは、放電持続時のアーク柱は、時間の経過とともにかなり急速に膨張するものと思われる。

(2) 黒色皮膜が生ずるのは、St<sup>+</sup>の溶融流出部分が存在するときで、この部分は、パルス幅が長いほど大きくなっている。パルス幅が長い場合、アーク柱は十分に膨張し、それに比例して電力密度が減少するので、溶融金属を吹き飛ばす力の作用が小さくなり、溶融金属が残存して電極面に流出する。その流出した部分が、加工液を分解してカーボンを生成し、何らかの作用でそれを一方の電極面に付着させるのではないかと考える。

黒色皮膜を X 線アナライザーで調べた結果を図 3.8(a), (b) に示す。カーボンが細密に付着していることが明らかである。

この黒色皮膜は、Cu<sup>+</sup>/Al<sup>+</sup>、Cu<sup>+</sup>/Bs<sup>+</sup>、Al<sup>+</sup>/St<sup>+</sup>等の組み合わせでも、陽極面に観察され、Cu<sup>+</sup>/St<sup>+</sup>の場合だけの特性ではない。ただし Al の場合は黒色膜が細密ではなく、そのため、図 3.5 の Cu 電極のような結果とならないのであろう。

### 3.2.4 単一放電こんの大きさ

Cu<sup>+</sup>/St<sup>+</sup>の場合の St<sup>+</sup>面の単一放電こん直径および深さを仕上面検査機によって測定した結果を、図 3.9 に示す。放電こん直径  $d$  および深さ  $h$  は、パルス幅  $\tau$ 、放電電流  $I_p$  の増加とともに増大していることがわかる。これらの結果から、実験式を求めると次のようになる。

$$d \propto \tau^{0.4} \cdot I_p^{0.4} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$h \propto \tau^{0.2} \cdot I_p^{0.6 \sim 0.7} \dots\dots\dots (3.4)$$

放電こんの形状は、かなり円すい形に近いのでこれを円すい形と仮定して、図 3.9 の結果から St<sup>+</sup>の単一放電消耗量を計算すると、前節の実験結果図 3.3 と非常に良い近似で一致する。図 3.3 の点線が、この計算結果である。すなわち、式 (3.3)、式 (3.4) より、

$$m = \frac{1}{12} \pi d^2 h \cdot \rho \propto \tau \cdot I_p^{1.4 \sim 1.5} \dots\dots\dots (3.5)$$

( $\rho$  : 比重 g/cm<sup>3</sup>)

となり、この式は式 (3.1) とほとんど一致していることがわかる。

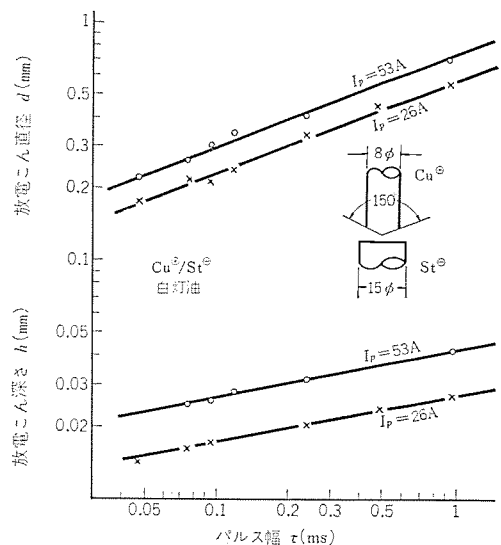


図 3.9 鋼の単一放電こんの直径および深さ  
Crater diameter and depth on steel cathode with copper anode.

一方、Cu<sup>+</sup>面の放電こんの大きさについて観察した結果は、直径のほうは、前述した如く、St<sup>+</sup>の場合とほとんど同一であり、深さのほうは、 $\tau$ 、 $I_p$  の大小に対してあまり変化がないということが、仕上面検査機による結果より観察された。一方、直径が式 (3.3) で示される値になっているということから、当然、単一放電消耗量も、 $\tau$ 、 $I_p$  の増加とともに増大するはずで、図 3.5 の減少範囲の結果とは、異なった傾向を示している。この事実からも、陽極面の黒色皮膜が、電極消耗の保護作用としての効果を持っているとみてよさそうである。

### 3.3 連続放電による加工特性

銅電極による連続放電加工実験を行なうことにより、電気条件と加工速度、電極消耗比、面あらさとの関係を求め、それから上記三つの加工特性の相互関係について定量的に述べる。

#### 3.3.1 実験方法

この実験で用いる放電回路は、図 3.1 と同じトランジスタ回路で、Tr を連続的にスイッチすることにより、極間に方形波電流を流す方式である。パルス幅と休止幅は制御回路で、放電電流はトランジスタの数を選定することにより、多段階に変えられる。それらの値は、単一放電実験と同一方法で測定し、さらにアーク電圧だけの平均値(平均アーク電圧)も測定した。

電極としては 20 $\phi$  (噴出口径 6 $\phi$ ) の銅およびグラファイト、被加工物としては工具鋼(SK-5)を使用し、電極側を陽極、被加工物を陰極に接続する。加工液は白灯油を用いる。

5 分間の放電加工を行ない、加工前後の電極および被加工物の消耗量を、精密直視てんびんでひょう量して、その結果から加工速度(g/min) および電極消耗比(%)を算出した。グラファイトの場合は、吸湿性のため長さで測定することにした。

#### 3.3.2 実験結果および考察

##### (1) 加工電圧と加工速度の関係

放電電流・パルス幅を一定にして、加工電圧だけを変化させた場合の実験結果を図 3.10 に示す。

この結果から、加工速度と平均アーク電圧は、同一傾向を示しており、加工電圧が極間開放電圧(この場合約 60 V) から減少するにしたがって、直線的に増大し、ある加工電圧で極大となることがわかる。また加工電流は、加工速度が直線的に増大している範囲では、

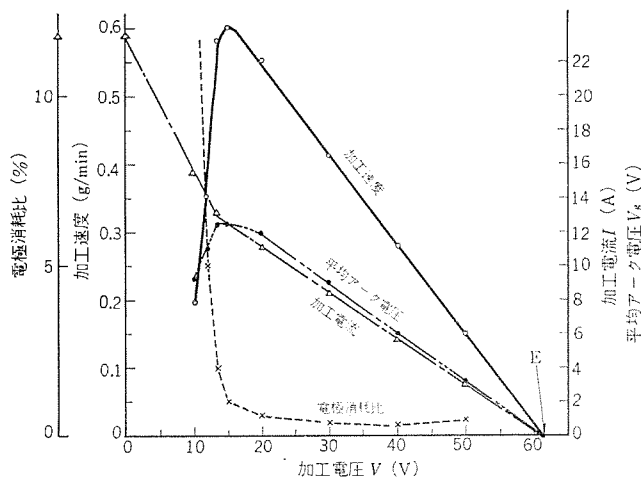


図 3.10 加工電圧を変化させた場合  
Experimental results as function of mean working voltage.

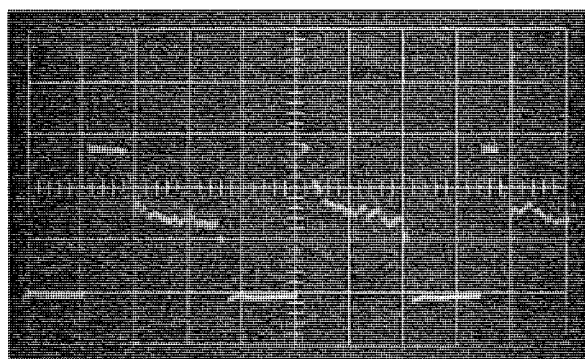


図 3.11 極間電圧波形  
50 μs/div, 20 V/div.  
Oscillograph trace of discharge voltage-drop.

やはり同じように直線的に増大するが、加工速度が減少すると、より大きな割合で増大するようになる。電極消耗比は、加工電圧が比較的大きい場合は、ほとんど変化はないが、加工速度が減少するような加工電圧になると、急激に増加するようである。

ところで、アーク電圧は、図 3.11 に見られるように、約 25 V の一定電圧を示しており、また他の実験から、この電圧は、放電電流・パルス幅・極間印加電圧とは無関係でほとんど一定であることが明らかになっている。

以上のことから、加工速度について次のような関係式が導かれる。

まず短絡が発生しない状態では、加工電圧が減少すると、極間距離が小さくなって、図 2.6 あるいは図 2.7 に示したパルス電圧のうち放電を起こさない時間が比例的に減少するものと考えられる。したがって、放電の周波数を  $f$  (c/s)、放電中のスパル幅を  $\tau$  (sec)、放電電圧を  $e_0$  (V) とすれば、平均放電電圧  $V_0$  (V) は次式で表わされる。

$$V_0 = e_0 \cdot \tau \cdot f \quad (3.6)$$

ただし、短絡が発生しないという仮定条件から、

$$V_0 \leq e_0 \cdot \tau / (\tau + \tau_r) = D e_0 \quad (3.7)$$

[註]  $V_0 < D \cdot e_0$  は短絡によって電圧が低下する以外は起こり得ない。(後述)

ここで、 $\tau_r$  : 休止幅 (S)

$$D : \text{Duty Factor} = \tau / (\tau + \tau_r) (< 1)$$

式 (3.7) を考慮に入れた場合、図 3.11 から平均加工電圧は、次式のようにも表わされる。

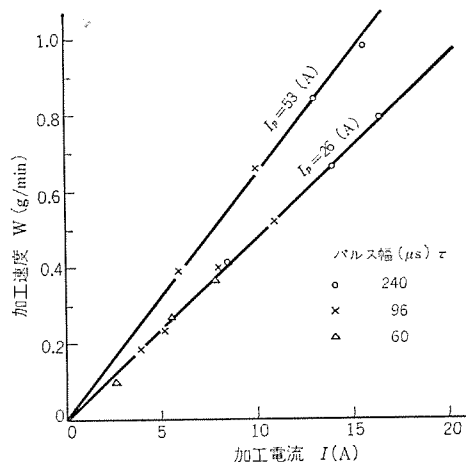


図 3.12 パルス幅  $\tau$  および休止幅  $\tau_r$  を変化させた場合  
Removal rate as function of working current in case of constant discharge current.

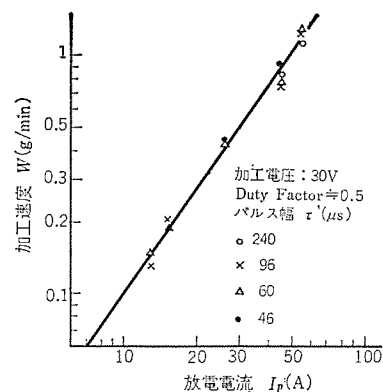


図 3.13 Duty Factor, 加工電圧が一定の場合  
Removal rate as function of working current in case of constant duty factor and working voltage.

$$V_0 = D \cdot e_0 (E - V) / (E - D \cdot e_0) \quad (3.8)$$

ここで、 $E$  : 極間開放電圧 (V)

同様な考え方で、加工電流  $I$  (A) は次のようになる。

$$I = I_p \cdot \tau \cdot f = D I_p (E - V) / (E - D \cdot e_0) \quad (3.9)$$

ここで、 $I_p$  : 放電電流 (A)

さらに極間に消費される電力  $P$  (W) を求めると、

$$P = (I_p \cdot e_0) \cdot \tau \cdot f \quad (3.10)$$

この式に、式 (3.9) を代入すれば次のようになる。

$$P = e_0 \cdot I = D e_0 \cdot I_p (E - V) / (E - D \cdot e_0) \quad (3.11)$$

なお、放電周波数は式 (3.6) と式 (3.8) から

$$f = D (E - V) / \tau (E - D e_0) \quad (3.12)$$

さらに、加工速度の極大値に対する加工電圧  $V_m$  (V) はだいたい次式で求められる。

$$V_m = D \cdot e_0 \quad (3.13)$$

実際の加工においては、安定加工の範囲で、できるかぎり加工電圧を  $V_m$  付近に設定するのが有利であろう。

以上は、加工電圧が  $D \cdot e_0$  より大きく、短絡が発生しないと仮定した場合であるが、次に加工電圧が最大平均放電電圧  $D \cdot e_0$  より小さくなると、その加工電圧を維持するために、必ず短絡が発生するようになるので、加工電流は、短絡電流によってより以上に増大し、放電周波数は減少する。したがって、式 (3.6) と、式 (3.10) より、平均放電電圧および消費電力も減少するようになる。

この加工条件において、加工速度が、極間における消費電力に比



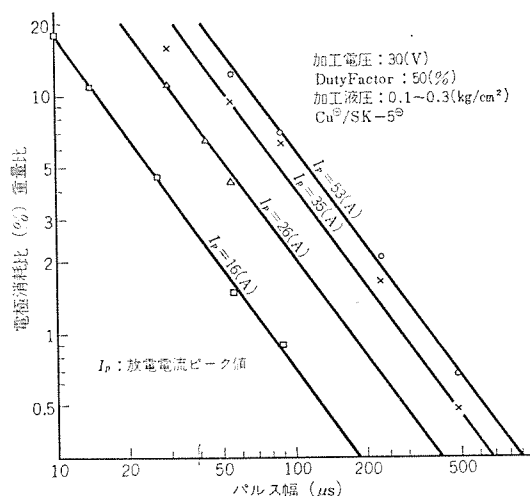


図 3.14 パルス幅に対する銅電極消耗比  
Copper electrode wear ratio as function of discharge duration.

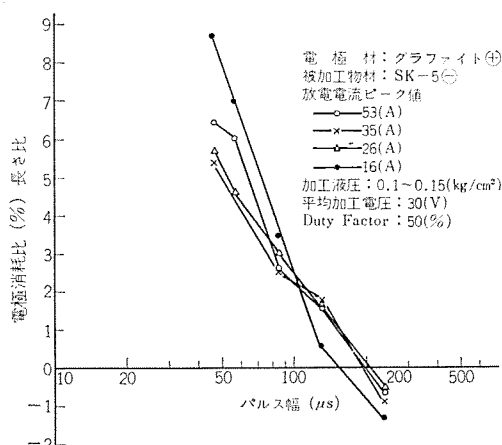


図 3.15 グラファイト電極消耗比  
Graphite electrode wear ratio.

例するものとすれば、図 3.10 の結果と非常によく合致することがわかる。

## (2) パルス波形と加工速度の関係

放電電流を一定にして、パルス幅および休止幅を変化させた場合の加工電流に対する加工速度の関係を図 3.12 に示す。

これより、放電電流が一定の場合、加工速度は加工電流に比例しており、パルス幅・休止幅の長さに対する影響はほとんどないことがわかる。また、同一加工電流における加工速度は、放電電流の大なるほど大きくなっている。

次に Duty Factor と加工電圧を一定にして、放電電流を変えた場合の加工速度を求めると、図 3.13 のようになる。

これより、Duty Factor と加工電圧が一定の場合加工速度は、放電電流の 1.5 乗に比例しているとみて無理がなさそうである。

ところで、単一放電の加工量は式 (3.1) より

$$m = A \tau I_p^B$$

であった。これを連続放電の場合に当てはめると、加工速度  $W$  (g/min) は、式 (3.1) と式 (3.12) より、

$$W = 60 \times 10^{-6} m f = 6 \times 10^{-2} \cdot A \cdot I_p^B \cdot D(E - V) / (E - D \cdot e_p) \quad \dots \dots \dots (3.14)$$

あるいはこれに、式 (3.9) を代入すると、

$$W = 6 \times 10^{-2} \cdot A \cdot I_p^{(B-1)} \cdot I \quad \dots \dots \dots (3.15)$$

ただし、 $A \approx 0.15$   $B \approx 1.5$

この式は、図 3.15、3.16 の関係を正確に表わしており、単一

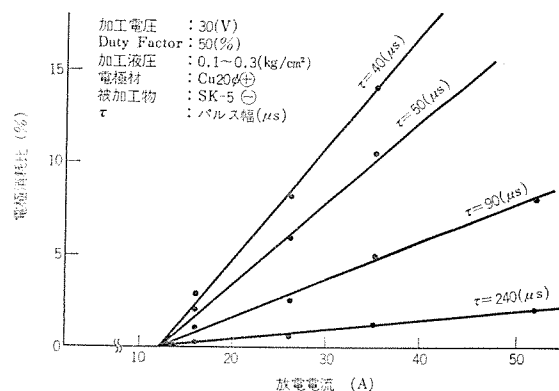


図 3.16 放電電流に対する銅電極消耗比  
Copper electrode wear ratio as function of discharge current.

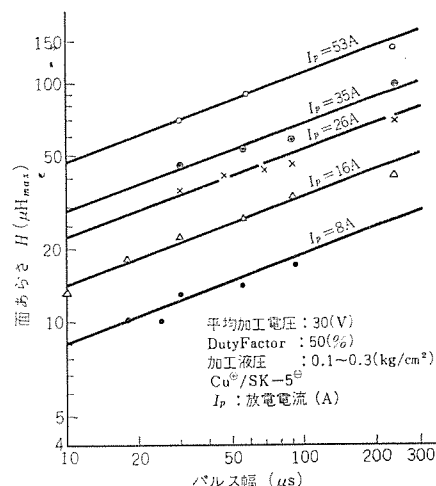


図 3.17 パルス幅に対する面あらし  
Roughness of machined surface as function of discharge duration.

放電の結果が、連続放電の場合でも成立することがほぼ確実であると言える。

## (3) 電極消耗比とパルス幅 $\tau$ および放電電流 $I_p$ との関係

$I_p$  をパラメータにして、 $\tau$  に対する銅電極消耗比の関係を求めると、図 3.14 のようになる。これより、電極消耗比は、 $\tau$  に対して等比級数的に減少していることがわかる。同様に、グラファイト電極の場合の結果を図 3.15 に示す。グラファイト電極の場合も、電極消耗比は  $\tau$  に対して等比級数的に減少していることは銅電極の場合と同一傾向ではあるが、 $I_p$  にはほとんど無関係であり、しかもパルス幅が長いとき負の値になる（電極が増長する）という点で非常に異なっている。

次に、図 3.14 より  $\tau$  をパラメータにして、電極消耗比と  $I_p$  との関係を求めた結果を図 3.16 に示す。電極消耗比は、 $I_p$  に対してほぼ比例的に増加しているようである。

そこで、図 3.14 と図 3.16 から、銅電極の場合の消耗比  $\varepsilon$  (%) は、 $\tau$ 、 $I_p$  をもとにして、次のような形の実験式で表わすことができる。

$$\varepsilon = k(I_p - I_0) / \tau^\alpha \quad \dots \dots \dots (3.16)$$

$k$ ,  $\alpha$ ,  $I_0$  は定数

$\tau$ : (μs),  $I_p$ : (A),  $\varepsilon$ : (%)

定数を実際に求めてみると

$$\alpha = 1.35 \sim 1.37, \quad I_0 = 13 \sim 14 \text{ A}$$

$$k = (0.99 \sim 1.06) \times 10^3$$

式 (3.16) は、銅電極消耗比が放電電流波形と密接な関係があるこ

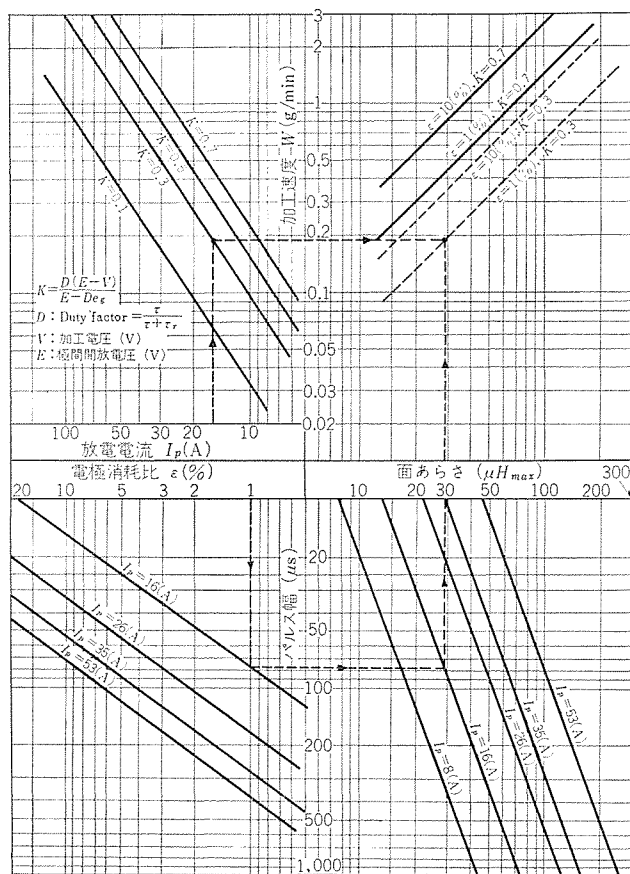


図 3.18 面あらさ-加工速度曲線を求めるためのチャート  
Chart for roughness of machined surface-removal rate curve.

とを示しており、実際の加工においてパルス幅、放電電流の選定がいかに重要であるかがわかる。

#### (4) 加工面あらさ

$I_p$  をパラメータにして、面あらさと  $\tau$  の関係を求めると図 3.17 のようになる。グラフ上の直線のこう配を求めることにより、面粗度  $H(\mu H_{max})$  は、 $\tau^{0.38}$  に大体比例していることがわかる。

すなわち

$$H \propto \tau^{0.38} \dots \dots \dots (3.17)$$

面あらさと  $I_p$  との関係は、図 3.17 からではあまり明確にすることはできないが、面あらさに及ぼす影響の度合いは、 $\tau$  よりも  $I_p$  のほうが数倍大きくなっている。したがって、良好な面あらさを得るためには、 $\tau$  よりも  $I_p$  の値を減少させるほうが有効である。

#### (5) 電極消耗比と加工特性 (面あらさ-加工速度特性)

図 3.14, 図 3.17 とさらに式 (3.14) をもとにして、面あらさ-加工速度曲線を求めるためのチャートを作成すると、図 3.18 のようになる。放電電流  $I_p$  と加工速度  $W$  の関係線図における  $K$  は、式 (3.14) より、

$$K = D(E - V) / (E - D \cdot e_0) \dots \dots \dots (3.18)$$

ただし、 $D$  : Duty Factor ( $< 1$ ),  $E$  : 極間開放電圧 (V)

$V$  : 加工電圧

で表わされ、これはいわゆる加工中の見かけの Duty Factor であり、加工電圧  $V$ , Duty Factor  $D$  で、0.1 から 0.9 まで変化させて求めた。

図 3.18 では、一例として、電極消耗比 1% の場合と 10% の場

合とで加工特性の比較を行なっているが、これより、電極消耗比と  $K$  の値が大きいほど、面あらさに対する加工速度は大きくなっていることが明らかとなる。

## 4. む す び

トランジスタ式放電回路を用いて、方形波パルスによる単一放電ならびに連続放電加工実験を行ない、その結果から、電気条件と放電加工特性の関係について述べた。

重要な結論のみを総括すると次のようになる。

(1) Cu④/St⑥ の場合の St⑥ の、単一放電消耗量  $m(\mu g)$  は、

$$m = A \tau \cdot I_p^B \quad A \approx 0.15 \quad B \approx 1.5$$

で表わされ、放電こんの直径  $d$  および深さ  $h$  は、だいたい次のようになるようである。

$$d \propto \tau^{0.4} \cdot I_p^{0.4}$$

$$h \propto \tau^{0.2} \cdot I_p^{0.7}$$

(2) Cu④ の単一放電消耗量は、パルス幅に対して極大点が存在し、パルス幅が 100  $\mu s$  以上になると減少する。この際の電極面は黒色皮膜でおおわれており、この皮膜が、電極消耗の保護作用としての効果を持っているものと思われる。黒色皮膜は、主としてカーボンであることが、X線アナライザにより判明した。

(3) 方形波パルスによる連続放電の場合の放電周波数  $f$ , 加工電流  $I$ , 極間に消費される電力  $P$  は次式で表わされる。

$$f = D(E - V) / \tau(E - D \cdot e_0)$$

$$I = I_p \cdot \tau \cdot f$$

$$P = e_0 \cdot I$$

(4) 連続放電における加工速度は、単一放電加工量  $W$  の累積として計算したものとほとんど一致する。すなわち、

$$W \approx 10^{-2} \cdot K \cdot I_p^{1.5} \quad \text{または} \quad 10^{-2} I_p^{0.5} \cdot I$$

で表わされる。パルス幅  $\tau$  による影響がないことが明らかになった。

(5) 電極消耗比  $\varepsilon$  は、放電電流が小さくパルス幅が長いほど減少し、

$$\varepsilon = k(I_p - I_0) / \tau^\alpha$$

の形の実験公式で表わされるようである。

(6) 電極消耗比が大きいほど、面あらさに対する加工速度は大きくなる。

## 参 考 文 献

- (1) 鳳, 倉藤: 放電加工, コロナ社 (昭 36)
- (2) 元木: 放電応用装置, 日刊工業 (昭 41)
- (3) 鳳: 精密機械, 29, No. 10 (昭 38)
- (4) 前田: 精密機械, 29, No. 10 (昭 38)
- (5) 木本: 電気学会誌, 139 (昭 36-11)
- (6) 斎藤: 精密機械, 26, No. 2
- (7) 斎藤: 精密機械, 26, No. 3
- (8) Williams: AIEE, Trans., 74, part 3 (1955)
- (9) Williams: AIEE, Trans., 74, part 1 (1955)
- (10) Williams: AIEE, Trans., 76, part 1 (1957)
- (11) 元木, 李, 倉田: 精機学会秋季大会 (昭 41)
- (12) 藤村, 三谷: 電子加工懇話会資料 (昭 40)
- (13) 斎藤, 荒井, 小林: 精機学会秋季大会 (昭 41)

# ダイアックス放電加工機の機械構造

杉江 法雄\*・青島富士雄\*・坂 嘉 朗\*

## Mechanical Construcion of DIAX Electric Discharge Machines

Nagoya Works Norio SUGIE・Fuzio AOSHIMA・Yoshiro BAN

It has become a common practice to operate electric discharge machines in the places of profile milling machines or conventional milling machines. Emerging from the field of the old special machining, this technique is now feasible in versatile ways because of recent utilization of semiconductors and development of low consumption power source. In consideration of the customers' wide and specific application, Mitsubishi is now successful in the arrangement of power sources and the machines in proper series. This permits appropriate combination of the related apparatus to suit best to the customers' requirements of work. This article describes DIAX electric discharge machines about their construction and features together with explanation of series and special machines.

### 1. ま え が き

放電加工機は、最近半導体素子の利用、低電極消耗電源の開発等により、従来の特殊加工の領域から脱却し、ならい フライス、あるいはミーリングマシン の代わりに使うのが常識化されつつある。当社では、顧客の広範囲な用途を考慮し、電源、機械系ともシリーズ化を完了し、作業内容に最も適した機械、電源の組合わせが可能となった。

本文では、三菱 DIAX 放電加工機の機械系の構造と特長につき述べ、系列化、特殊機についても簡単に述べる。

### 2. 三菱 DIAX 放電加工機機械系の構造と特長

放電加工機と他の一般工作機械、たとえば旋盤、ミーリング等と比較した場合、本質的に相違する点をあげると下記ようになる。

(1) 安定な加工を行なうためには、電極と被加工物間の間げきは、つねに微少な適正值 (0.004~0.04 mm) に保つ必要があり、そのためには、早い応答、適当な感度を持った極間距離制御機構が必要である。

(2) 電極の下降速度は、通常きわめておそく、しかも微少な上下運動を伴いながら下降するので、主軸のガイド部分の構造はステ

表 2.1 三菱放電加工機 DIAX 仕様一覧  
List of Mitsubishi electric discharge machines DIAX.

機 種	DM-25	DM-250	DM-300	DM-500	DM-51	DM-201
被加工体の大きさ (L×W×Hmm)	400×250×150	600×400×250	700×500×350	800×600×450	400×200×160	700×350×200
加工タンクの大きさ (L×W×Hmm)	500×300×200	750×430×320	900×550×420	1,200×750×530	550×220×200	850×380×250
テーブル上面の大きさ (L×Wmm)	300×200	500×300	600×450	800×600	320×155	500×300
テーブル左右移動距離 (mm)	100	250	300	400	160	300
サドル前後移動距離 (mm)	100	150	250	500	80	150
ヘッド移動距離 (mm) (手動)	125	150	250		(200)	250
主軸サーボ行程 (mm)	75 (電動)	150	150	300	200 (電動)	150
電極取付定盤寸法 (mm)	90 φ (20 H 6)	160 φ	200 φ	400 L×300 W	90 φ (20 φ H 6)	100 φ (20 φ H 6)
テーブルより電極取付 面までの寸法 (mm)	MAX 350	455	600	700	380	490
	MIN 150	155	200	400	180	90
床面よりテーブル面ま での寸法 (mm)	700	800	900	900	700	900
機械の最大高さ (mm)	1,795	2,000	2,300	2,800	1,500	2,180
電極取付可能重量 (Max kg)	5	50	100	200	5	5
加工液貯蔵容量 (約 l)	75	250	600	1,500	120	250
加工液ろ過方式	ろ剤ブリコート式 フ ィ ル タ	ろ剤ブリコート式 フ ィ ル タ	沈殿およびろ剤 ブリコート式フィルタ	沈殿およびろ剤 ブリコート式フィルタ	静電フィルタ	ろ剤ブリコート式 フ ィ ル タ
機械装置重量 (約 kg)	500	1,500	2,200	4,500	400	1,800
床面積積 × 奥行						



ックスリップなどの防止に対して、十分考慮しなければならない。

(3) 放電加工機は、精密な加工を行なう場合が多いので、機械の精度は十分高く、しかも剛性が高くなければならない。

(4) 加工は鉱物性の油中（灯油、変圧器油など）で行なわれるが、この油の引火防止に対して、考慮を払う必要がある。

(5) 加工液の噴出、吸引圧力は、加工に微妙な影響を与えるので、液圧は容易かつ微細に調整ができ、しかも安定でなければならない。

(6) 加工によって、微細な加工粉が加工油中に沈殿、または懸濁し、放置すると加工に悪影響をおよぼすので、これらの除去を十分に行なうことができるとともに、ろ過装置などは容易に清掃できるものが望ましい。

以上の点が一般工作機械との相違点として考えられるが、その中でもとくに重要な点は、前記(1)～(3)に対する機構であり、その良否は、放電加工機の死命を制するといっても過言ではない。この点当社の放電加工機は、DM-25 形を除いた一般産業用の機種にはすべて油圧サーボ方式によって構成されており、敏速な応答、強力な駆動力を誇り、DM-500 形では、電極重量最大 200 kg を取りつけても安定な加工ができる。DM-500 形は、機械系の大きさとともに取付けうる電極重量としてもわが国最大である。

前記(1)～(6)項のように放電加工機は、一般工作機械とは異

質なものとなるが、三菱放電加工機は、どのような構造となっているかを最も一般的な DM-250 形に例をとり説明し、また DM-500 形についても簡単に述べる。

表 2. 1 は、現在当社において製作販売している放電加工機機械系の仕様一覧であり、図 2. 1～2. 5 は DM 25, 250, 201, 300 および DM-500 の全景写真である。

## 2. 1 ヘッドおよびコラム部分

図 2. 6 に、DM-250 形のヘッド部分の構造を示す。

ヘッド部は、コラムのスライド面にそって手動ハンドルにより、その可動範囲内の任意の位置に固定させることができる。

油圧シリンダはハウジング中央にあり、ピストンロッドの下端は電極取付具を保持しており、上端部は板⑦が固定され、⑧は 2 個のボールベアリング⑦が取付けられている。ベアリングシリンダ⑦の外周は、固定軸⑨をはさみつけられるよう軸⑧は、わずかに偏心に加工されている。以上の機構によって、主軸の回り止めが行なわれる。シリンダ上下のふた(蓋)内には、ボールブッシュ⑩がローリングコンタクトによって、スピンドル(ピストンロッド⑪)をガイドしている。

放電加工時のスピンドルの下降速度は、一般に非常におそく、しかも放電加工特有の微細な上下運動を繰返ししながら、全体として下降していく。

加工条件によっても異なるが、仕上加工時は毎分 1/100 mm ある

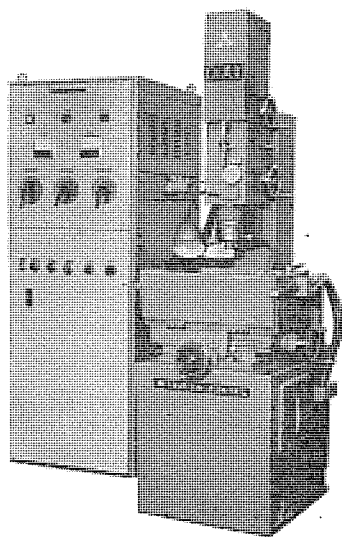


図 2. 1 DM-25 形放電加工機  
Type DM-25 Electric discharge machine.

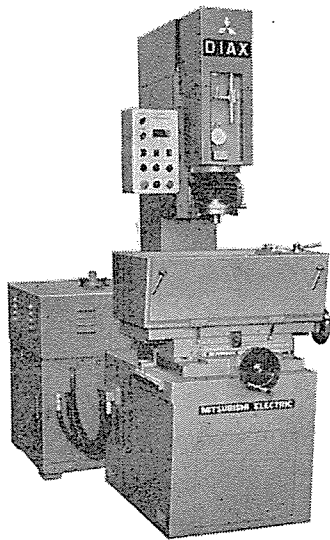


図 2. 2 DM-250 形放電加工機  
Type DM-250 Electric discharge machine.

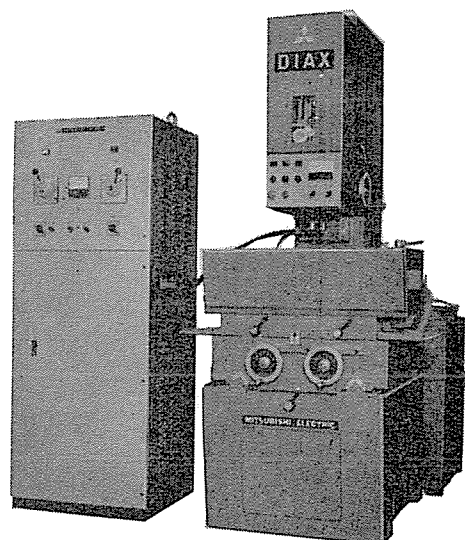


図 2. 3 DM-201 形放電加工機  
Type DM-210 Electric discharge machine.

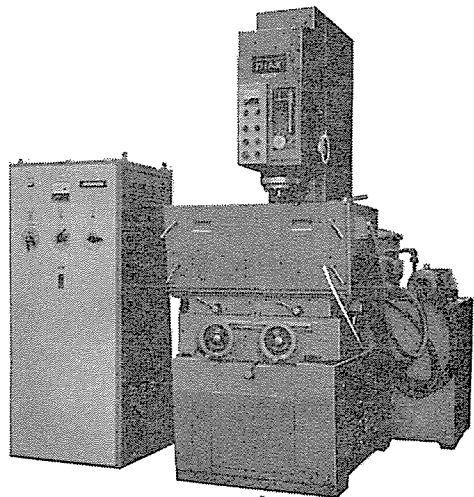


図 2. 4 DM-300 形放電加工機  
Type DM-300 Electric discharge machine.

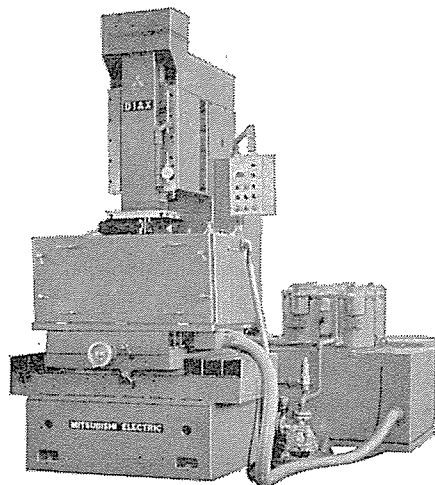


図 2. 5 DM-500 形放電加工機

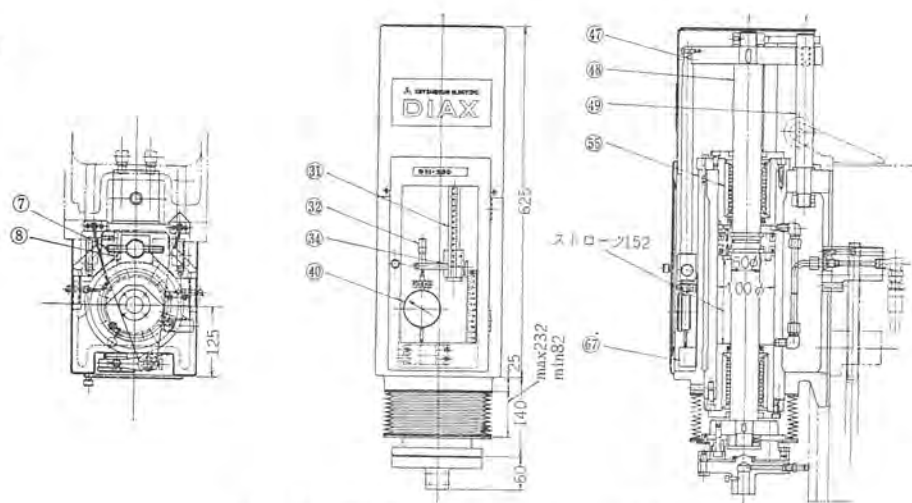


図 2.6 DM-250 形放電加工機のヘッド部構造  
Construction of the head of type DM-250 electric discharge machine.

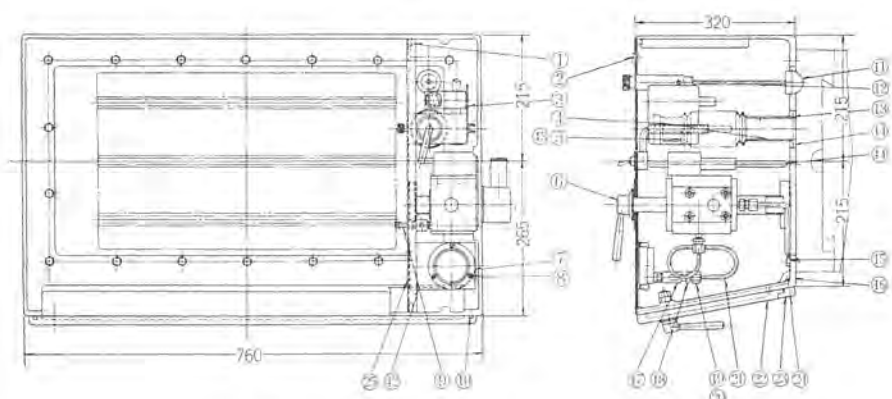


図 2.8 DM-250 形放電加工機の加工そう  
Working bath of type DM-250 electric discharge machine.

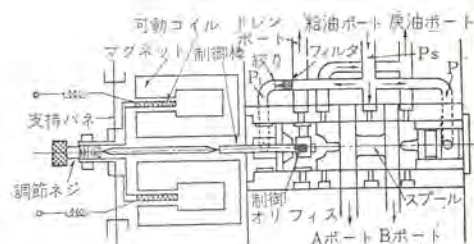


図 2.7 サーボ弁の原理図  
Diagram showing the principle of servo valve.

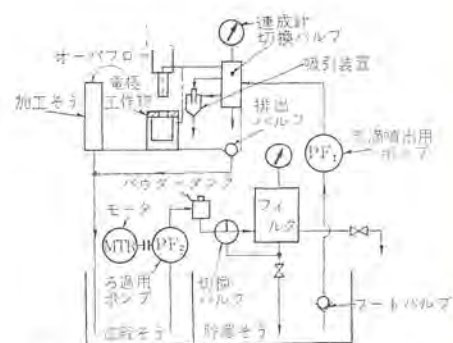


図 2.9 DM-250 形放電加工機加工液  
ダイヤグラム  
Working liquid diagram of type DM-250  
electric discharge machine.

いは、それ以下の場合もある。

このようにある周波数の振動を伴いながら、平均速度がおそい運動体の運動精度を、長年月にわたって維持することは、スライド面の構造・材質・工作・潤滑等について、慎重な考慮を払わないとたちまち焼付、摩耗を起して使用不能となる。そのためこの部分の構造は、もっとも精度の出しやすい、円筒軸外周をボールとのローリングコンタクトによって保ち、しかも軸外周とボールの間には適当な予圧を与えることによって摩擦の減少、スティックスリップの防止、精度の維持を計っている。

スピンドルの材質は、SUJ-2を熱処理し表面硬度はHRC 57~64、その円筒度は $3\mu$ 以下、ボールの硬度は、HRC 60~66程度である。スピンドルと同じ運動を行なう回り止め軸についても同様に、細心の注意が払われている。

他機種のスピンダルガイド部も寸法的、構造的に多少の相違はあるが、全機種ローリングコンタクトによってガイドされている。

スピンドル下端に取付けられた電極は、油圧サーボ弁とシリンダおよびその制御系によって、適正な極間距離を維持するように制御される。

図 2.7 は、油圧サーボ弁の原理図である<sup>(1)</sup>。

このサーボ弁の、4方向切換部分の構造は、一般の案内弁と同様である。スプールはフォースモータによって駆動され、図2.7にみるように、一種のオリフィスを先端部に有する制御棒の軸方向変位に比例

した位置で平衡する。この制御棒の変位量は、可動コイルに流れる電流に比例した起磁力と永久磁石の磁力、および支持ばねのばね力によって決まるものである。

可動コイルに流れる電流は、極間電圧と基準電圧の差に比例した制御電流と動特性を向上させるため、微少なデイズ電流が重畳されたものである。

スピンドル 下端部は、絶縁板を介して電極取付部に接続され、フローティング板または他の付属品によって電極が取付けられる。

加工深さの設定は、コラム 前面の固定された リミットスイッチ ⑥7、ダイヤルインジケータ ④0と、スピンドル に連結されたスケール ③1、ホルダ ③4、マイクロメータヘッド ③2によって、簡単にセッティングが可能である(図 2. 6 参照)。

ヘッド左側面には、機械操作に必要なラッシュボタン、切換スイッチ、加工電圧計等を収めた操作盤が取付けられている。

## 2.2 テーブル、サドル、ベッドおよび加工そう(槽)部分

テーブル、サドル部分は、他の一般工作機械となんら変わるところはない加工その前後、左右の移動はともにねじにより行なう。移動距離は、スケールおよびハンドル部にある目盛環によって2/100 mmまで読み取ることができる。とくに要求のある場合には、進捗計と棒ゲージを併用する場合と、読取顕微鏡を使用する場合があり、前者の場合は読取最小目盛1/100 mm 後者の場合は2/1000 mmである。

図 2.8 は、加工そう部分の構造を示す。加工そう本体および前面のふたはアルミ鋳物を採用し、ふたとそう本体はカム形式で簡単に

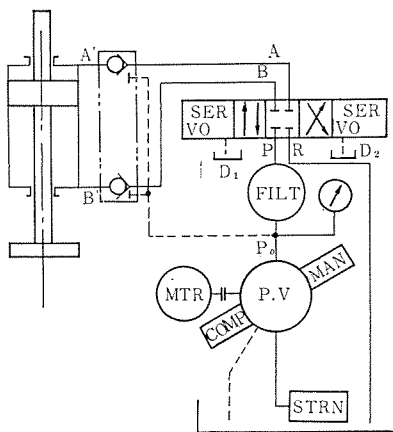


図 2.10 DM-250 形放電加工機油圧回路 ダイアグラム  
Pressure oil circuit diagram of type DM-250 electric discharge machine.

着脱できる。加工そうの右側には、加工液の切換バルブ、フロートスイッチ、排出バルブ、液面制御装置、サーモカップル、連成計等加工操作に必要な装置が集中して取付けられている。

切換バルブは加工液の急速充填、加工時の液の噴出、吸引を1個のレバーで切換える。加工に影響を与える噴出圧、吸引圧はレバーの位置をかえることにより微細な調整が可能である。被加工物の高さによって不必要に液面を上げなくていい場合には、液面制御装置によって任意の深さに設定できる。

普通放電加工時に使用する加工液は、灯油、変圧器油等が使用されるが、当社では貯油量の制限の大きい第3石油類、たとえば、三菱石油 KK の煙霧灯油（引火点 82°C）または日石 4 号 ソルベント油を推奨している。それにしても引火点が、比較的低いため火災に対する安全装置が必要である。そのためにフロートスイッチ、サーモカップルが設けられており、液面制御装置と連動で高さは自由に設定できる。フロートスイッチはなんらかの原因で液面が設定された高さより下がった場合に、サーモカップルは液温がある温度（当社の場合 60°C）以上に上昇した場合に、自動的に加工電源を切るようにインターロックされている。

一般に加工時に極間を通じて供給される液量は非常に少なく、場合によっては、液をためた状態で加工する場合もある。このような場合は加工そう内の油の汚濁度と温度は加工時間の経過とともに上昇し、好ましくないで極間を通さずにそう内の油を入れかえるよう、切換バルブより常時ある量の油をそう内に流し、液面制御装置よりオーバーフローさせて加工液を循環させている。

ベッド部分には、油圧サーボ系の電気制御部分が組み込まれており、そのセットは簡単に外部に引き出すことができ、調整時の便を計っている。

### 2.3 加工液関係

図 2.9 は加工液面回路のダイアグラムである。DM-250 形の場合、加工液タンクの容量は約 250 l であり、タンク内部は沈殿そうとろ過器によってろ過された油をたくわえる貯蔵そうの二つにわかれている。放電加工による加工粉は、荒加工の場合には、沈殿のみでも除去しうが、仕上加工時の加工粉は油中に懸濁し、適当なるろ過装置を必要とする。

三菱 DIAX 放電加工機は、全機種とも活性白土ブリコート式のろ過装置を使用し、そのろ過精度は 1 μ 前後の加工粉までろ過可能であり、ろ過容量は DM-250 の場合 30 l/min である。加工そうより

タンクへ帰った液は、まず沈殿そうへ導かれ、ここで大きな加工粉を沈殿させ、そのうわ澄みをポンプで加圧してろ過を行ない貯蔵そうへたくわえ、これを加工そうへ送る。したがって加工時には常に清浄な液が極間に供給される。

ろ過助材は、ダイアックスパウダ（活性白土）を使用して簡単にでき、フィルタエレメントの目詰り状況は、ろ過器付属の圧力計によって判別できる。清掃はフィルタエレメントを予備のものと交換する方法が時間のロスも少なく簡単であり、よごれたエレメントは乾燥させ清掃を行えば何回も使用できる。

### 2.4 油圧回路について

図 2.10 に油圧回路ダイアグラムを示す。

DM-250 形の場合は、加工液タンクを完全に仕切って一方を加工液タンク、他方を油圧作動油タンクとしている。油圧ポンプは可変吐出型ポンプを使用して油温の上昇を防ぎ、装置全体を小形化している。一般に油圧制御放電加工機は、加工しない状態に保持された場合、スピンドルが徐々に落下し、電極を被加工物にぶつけ電極を破損する可能性があるが当社では、シリンダとサーボ弁の間にパイロットチェックバルブを入れてスピンドル（電極）の自然落下を防止している。

油圧の設定圧力は 35 kg/cm<sup>2</sup> を標準としている。高性能な油圧サーボ弁を使用しているため、ごみの混入防止、油の劣化等に対しては、細心の注意を払っているのは当然であるが、当社のサーボ弁は他のノズルフラップタイプにくらべ、ごみの混入に対して事故が少なく、その掃除も容易である。

### 2.5 操作回路について

操作スイッチ類はすべてヘッド前面左側に集められ、集中制御が可能である。サーボ系の制御回路はベッド前面部に、また操作に必要なリレー類はベッド側面に収納されている。また無人運転も可能なように所定深さまで加工が進み、スピンドルが最上端までもどったとき自動的に電源をオフするように考慮されている。

## 3. DM-500 形放電加工機について

DM-500 形放電加工機は、本年 1 月発表した大型放電加工機で、まえがきにも記したように、電極重量最大 200 kg を取付けても安定した加工ができるもので、他機種と構造的に異なる点について簡単にのべる。

### (1) ヘッド部分

図 3.1 は、DM-500 形ヘッド主要部の構造を示す。

電極を保持するスライダはその両側面に焼入れした、山形ブロックを締付け、その表面には各 3 個、合計 12 個のフラットゲージを使用し、ローラとのローリングコンタクトでガイドされ、片側のフラットゲージ群は山形面に対して微細な調整が可能である。

本機は他機種のように手動によって電極の高さ方向の位置を決めることは、機械が大きく作業者の作業範囲を越えるため不可能である。そのため電極の高さ方向の位置は、スイッチの操作だけでシリンダストローク内の任意の位置に確実に停止させ、かつその位置を保持させるように製作されている。すなわち深さ位置決め時には、電源回路を最上仕上げの回路に切り換えて、位置決め用スイッチを下降にすると電極、工作物が接近し、微小放電を行なう。そこでスイッチを放すと微小放電は停止し、電極はパイロットチェックバルブによってそのまゝの位置を保持しつづける。

### (2) テーブル、サドル部分

大型部品の加工を対象としているため、被加工物の最大重量は約



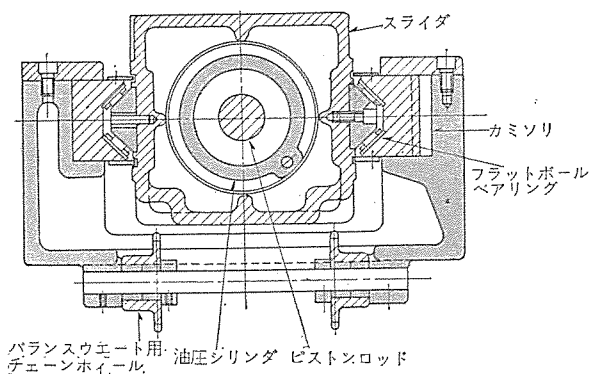


図 3.1 DM-500 形放電加工機主軸ガイド部  
Main shaft guide section of type DM-500 electric discharge machine.

1,000 kg 近い場合もありうるので、前後左右のスライド面には、焼入れした鋼板をはり、その上をローラが転動する構造を採用したためテーブルの移動はきわめて軽快に行なうことができる。

### (3) 加工さう部分

大型部品を加工する場合には噴出加工および、吸引加工のノズルの本数が多いほうが好都合である。その点を考慮し、DM-500 形の場合には 3 個所にパイプ接続口を設け、おののに連成計を接続し、噴出吸引とも圧力を指示させるとともにその微調整も可能である。DM-500 形の機械系は大型電源と組み合わせる場合が多く、荒加工時には加工粉も 0.2~0.3 mm というように大きくなっていく。とくに吸引加工の場合には、このような加工粉が切換バルブ内を通過するのでシュウ(摺)動部等につまって切換動作が重くなったり、バルブの機能が低下しないようとくに注意して切換バルブは設計されている。

また加工量が 10 gr/min 以上となると液面から出る煙の量も多く異臭頭痛等作業者に与える影響も少なくない。これを防止するため、十分な容量をもった排気ファンを設け、完全に煙を吸収し、工場外へ排出するよう考慮されている。

### (4) 加工液関係

基本的には他機種と変わらないが、タンク容量は約 1,500 l でろ過系はフィルタが 2 個並列に使用されている。加工量が増加すれば、当然液温も上昇するので、本機の場合は加工液タンク内にさらにサーモカップルをそう入し、油温が 40℃ 以上になった場合には、自動的に熱交換器が動作し冷却を行なうようになっている。

## 4. 機械精度について

現在 JIS には、放電加工機の精度規格が制定されていないので、当社では表 4.1 のような社内規準を作成し、それによって厳格な検査を行なっている。(表 4.1 は精度規格の一部である。) 図 4.1 は、DM-250 形の主軸精度の一例である。

## 5. 電源、機械の系列化について

表 5.1 は、系列化された電源、機械の組み合わせ表である。加工物の大きさ、底付加工か貫通穴加工かの加工適性、要求加工性能などにより、適当な電源と機械を組み合わせることができる。

## 6. 特殊放電加工機について

まえがきにも記したように、低電極消耗電源の開発により放電加工は、部品加工の領域にも進出しようとしている。図 6.1 は、この目的のために製作した 4 軸の特殊放電加工機で各軸は、おのの

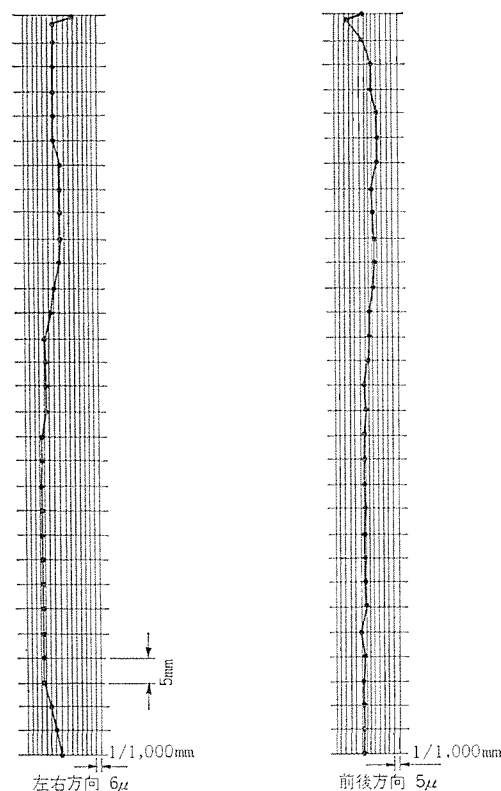


図 4.1 DM-250 形放電加工機主軸真直度の 1 例  
Example of straightness of spindle, type DM-250 electric discharge machine.

表 4.1 放電加工機の精度規格(社内規準)の按察  
Selection of accuracy standards of electric discharge machines now in use by the company.

検査項目	測定方法	測定方法図	許容差	測定値
4 主軸の上下運動とテーブル上面との直角度 (1)	左右方向		0.02	
	前後方向		0.02	
5 主軸の上下運動の真直度 (1)	左右方向		0.01	
	前後方向		0.01	
6 主軸頭の上下運動とテーブル上面との直角度	左右方向		0.02	
	前後方向		0.02	

(1)測定に際し主軸頭は締付けのものとする。

(2)測定に際し上下端におけるテストインジケータの読みは同じとなるよう直角度規を補正するものとする。

表 5.1 (a) 標準組合わせ表  
Combination of standard machines.

総合名称	機械本体	電源本体	電源回路方式
—	—	DE-40 S	半導体パルスアダプタ
○ DM 250-H	DM-250	DE-24 H	高周波重畳弛張発振
○ DM 250-HS	DM-250	DE-24 H と DE-40 S	アダプタ付き
○ DM 250-1 S	DM-250	DE-150 S	半導体パルス
DM 250-3 S	DM-250	DE-300 S	
DM 250-3 T	DM-250	DE-30 T	
○ DM 250-9 T	DM-250	DE-90 T	トランジスタパルス
DM 300-H	DM-300	DE-24 H	高周波重畳弛張発振
DM 300-HS	DM-300	DE-24 H と DE-40 S	アダプタ付き
○ DM 300-1 S	DM-300	DE-150 S	
○ DM 300-3 S-9 T	DM-300	DE-300 S-9 T	半導体パルス
DM 300-5 S	DM-300	DE-500 S	
DM 300-5 S-9 T	DM-300	DE-500 S-9 T	
○ DM 300-9 T	DM-300	DE-90 T	トランジスタパルス
DM 500-H	DM-500	DE-24 H	高周波重畳弛張発振
DM 500-HS	DM-500	DE-24 H と DE-40 S	アダプタ付き
DM 500-1 S	DM-500	DE-150 S	
DM 500-3 S-9 T	DM-500	DE-300 S-9 T	
○ DM 500-5 S	DM-500	DE-500 S	半導体パルス
○ DM 500-5 S-9 T	DM-500	DE-500 S-9 T	
○ DM 500-10 S	DM-500	DE-1000 S	
DM 500-9 T	DM-500	DE-90 T	トランジスタパルス

備考

- 印は、代表的組合せを示す。
- DM-300 S-9 T および DE-500 S-9 T は、中仕上領域に DE-90 T とほぼ同様のトランジスタパルス回路を採用している。
- DE-500 S の中仕上領域は、DE-150 S とほぼ同様の回路方式を採用している。

表 5.1 (b) 特定組合わせ機種  
Name of type of special combination.

総合名称	機械本体	電源本体	備 考
DM-25	DM-25	15 20 S (アダプタ付)	学校、試験所などの実験、実習用
DM-51	DM-51	12 H	高周波重畳、貫通穴加工用
DM-201	DM-201	DE-24 H	高周波重畳、貫通穴加工用
DM-201 +アダプタ付	DM-201	DE-24 H と DE-40 S (アダプタ)	貫通穴加工、底付き穴加工用
DM-220	DM-201	DE-150 S	半導体パルス底付き穴加工用

備考 特定組合わせ機種については機械本体形名をもって総合名称とする。

独立した低消費電源、油圧サーボ系、操作系を有しており、加工条件は荒加工から仕上加工に自動的に切換えができるようになっており、小物部品のマスコ専用機である。

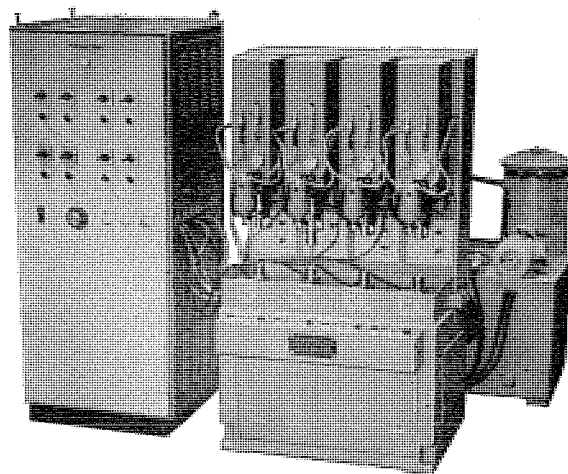


図 6.1 特殊形放電加工機  
Special type electric discharge machine.

## 7. む す び

放電加工機が本質的に具備しなければならない種々な条件に対し、三菱 DIAX 放電加工機がいかなる構造をとり、どのような特長があるかについて DM-250 形を主体に述べ、DM-500 形を概略的に述べたが、これによって三菱放電加工機の機械系に対する理解が得られれば幸甚である。

## 参 考 文 献

- (1) 香取、金子、吉田、破魔：三菱電機技報、36, No. 12, (昭 37)

# ダイアックス放電加工機の電源シリーズ

吉田 太郎\*・久慈 陽一\*・大矢広太郎\*

## Series of Diax Electric Discharge Machines (EDM) Power Supply Units

Nagoya Works Tarô YOSHIDA・Yôichi KUJI・Kôtarô ÔYA

Though electric power supply units for electric discharge machines have been used for the working on sintered alloys of extra hardness, precise processing and complicated configuration of metallic products, there were problems posed by slow working speed and high wear of electrodes. Under the circumstances, circuits of no electrode wear have been introduced together with the progress of semiconductor pulsed power supply units befitting to them and old concepts have been changed so as to apply the new technique to multitudinous kinds of work. This article deals with semiconductor pulsed power supply units used for Mitsubishi Diax electric discharge machines and also introduces to the Company's power supplies set in series.

### 1. ま え が き

従来、放電加工の利用は一般の機械工作法で、できないような超硬金属の加工や精密加工、複雑な形状の加工などの特殊な用途に限定されていて、最近まで放電加工の電極消耗はやむを得ないものと考えられていたが、電極の消耗しない回路方式が見出されて以来、急速にその用途が拡大されてきた。

放電加工機の著しい発展の重要な理由の一つは電源の進歩によるものであり、なかんづく放電加工に及ぼす放電波形の解析が進んだことと、その波形の制御を実現する大電力、高周波半導体スイッチング素子の開発とその応用技術の発達によるところが大きい。三菱ダイアックス放電加工機電源の概要について述べ、当社が開発した半導体パルス電源の機能と特性を紹介しよう。

### 2. 放電加工機の回路方式

放電加工機の構成は大きく分けて加工電源系、サーボ系、加工液系に分かれる。すなわち基本的には加工電極と被加工物を加工液に浸し、相互の距離が常に十分に接近しているようにサーボ送りを行ないながら、両者間にパルス性放電を持続発生させることによって放電加工ができるのである。その中で加工電源はその放電加工機の加工特性を左右するもので、種々の回路方式がとられる。基本的にはパルス性放電を安定持続発生させるのに適した回路を用いる必要があるが、機能的には a) 従属式と b) 独立式の 2 方式に分かれる。いっぽう実際の加工の立場から電源をみた場合は各加工対象物を能率よく加工できる電源が選ばれる必要があり、加工特性からは大きく分けて c) 貫通穴加工 d) 底付き穴加工に適した電源に分けられる。

#### 2.1 従属パルス電源

放電加工を行なうには、パルス性放電を繰返し発生させるための、発振回路をもっていなければならないが、放電加工間けきを発振回路の一部として用いているものを従属パルス電源といいパルス繰返し周波数、パルスエネルギーが、極間距離、極間状態により大きく左右される。最も代表的な回路が RC 弛張発振回路で、まずコンデンサに充電が行なわれると、極間の電圧は上り、ある電圧になると放電加工間けきで絶縁破壊がおりコンデンサのエネルギーが極間に放出され、

放電個所の被加工物が溶融飛散し加工される。コンデンサの電荷がなくなると、放電がやみ、またコンデンサに充電が始まる。以下充放電が繰返され加工が進められるのであるが、極間の状態が悪いとか、RC の値が適当でないなどのときは定常アーク放電に移行し、加工が不安定になる。

定常アーク放電を発生することは、弛張発振回路の最大の欠点で、次に述べる独立式回路のように一つ一つのパルス電流が完全に回路的に切られるのと大いに区別される点である。したがって種々の補助回路を用いて、定常アーク放電に移行しないよう、安定性、加工速度の向上、電極消耗の改善が加えられて用いられているが、限度がある。また、デューティサイクルを大きくできない本質的制約があり、加工能率が悪い(図 2. 1)。いっぽうこの方式は基本的にはきわめて単純な回路構成であることと、他の回路方式では容易に出せない高い周波数のパルスを簡単に発生できるなどの利点がある。

#### 2.2 独立パルス電源

電源の中に発振回路を構成して、パルス繰返し周波数、パルスエネルギー等が極間に関係なくほとんど独立に制御できるものをいい、高周波発電機・真空管・トランジスタ・サイリスタを用いた発振回路などがある(図 2. 2)。この回路は、従属式回路のように定常アーク

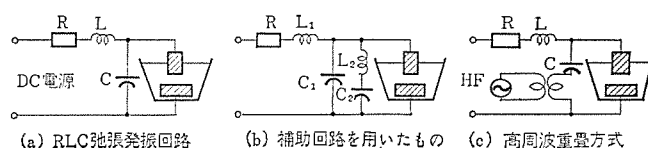


図 2.1 従属パルス電源  
Relaxation pulse power supply.

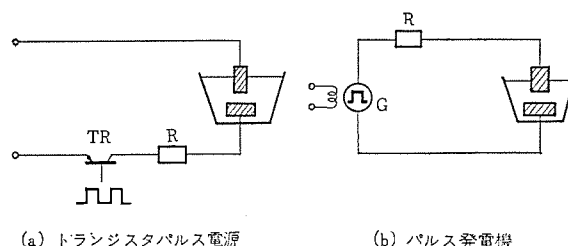


図 2.2 独立パルス電源  
Independent pulse power supply.



放電にならないので、安定加工が得られやすく、最近の高周波または大電力半導体スイッチング素子の進歩によりすぐれたパルス電源が製作できるようになってきた。いっぽう RC 回路と比べると複雑で大がかりな回路構成となる。

### 2.3 加工特性による分類

底付き穴加工電源は鍛造型、ダイカスト型、モールド型等の底付き穴加工に適した電極低消耗特性を有する電源をいい、貫通穴加工電源は抜型、押出し型、粉末成型型等の貫通穴加工に適し、電極消耗特性はよくないが、同一仕上げ面粗度に対して加工速度の点においてすぐれた電源を言う。

回路上、底付き型特性または貫通穴特性をもたせるかは、パルスの幅およびパルス電流ピーク値をどのように選択するかによって決定されるものである。貫通穴加工特性をもたせるには従来の RC 弛張発振回路のように、パルス幅は小さく、電流のピーク値が高いものが適し、電極消耗特性は悪いが、同一仕上げ面粗度に対し加工速度の早いものが得られる。いっぽう底付き穴加工特性は、一般的にパルス幅が大きく、電流のピーク値は従来のものに比べて低くすることにより得られる。(これらの最適なパルス幅・ピーク電流値の選定については、本誌「放電加工機の加工原理と加工特性」に述べられている。)

## 3. 半導体パルス電源

放電加工機の電源は従来ほとんどのものがコンデンサ放電による弛張発振回路を用いた電源が多く、独立パルス形のもの是一部研究的に使用されたにすぎない。ところが大電力または高周波スイッチングに適したサイリスタ、トランジスタ等の半導体の進歩により、半導体パルス電源が放電加工機用電源として急速に利用されるようになった。サイリスタ、トランジスタを用いたパルス電源について実際に使用した回路を中心に述べる。

### 3.1 サイリスタパルス電源

#### 3.1.1 サイリスタ DC チョップ回路

サイリスタパルス電源は補助サイリスタ (SCR) による強制転流形 DC チ

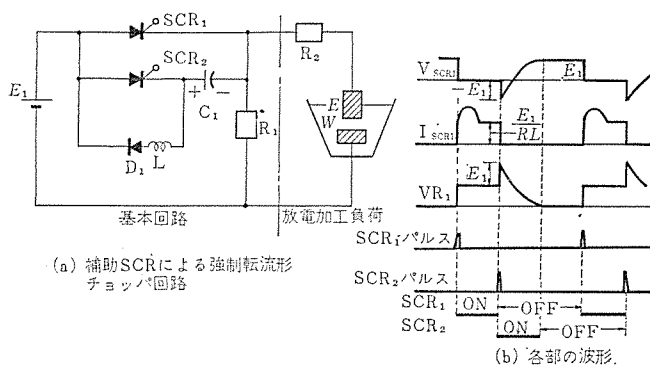


図 3.1 サイリスタチョップ回路  
Thyristor chopper circuit.

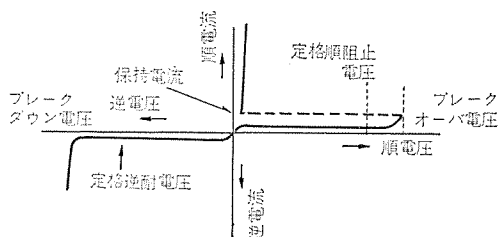


図 3.2 サイリスタの特性  
Characteristics of Thyristor.

ョップ回路 (図 3.1) で、直流電源からの電流を SCR をスイッチ素子として用いて断続させる回路である。

SCR の特性は図 3.2 に示される。その逆方向特性は普通の整流素子と変わらないが、順方向特性は大いに異なり ブレークオーバー電圧以上の電圧が印加されるか、点弧ゲート電流がはいらないかぎり導通 (ターンオン) 状態にならない。いっぽう一度導通した SCR は順電流を保持電流と呼ばれる電流値以下にするか、ターンオフ時間と呼ばれる時間以上逆電圧を加えるかしなければ、阻止状態 (ターンオフ) にもどらない。交流回路に SCR を用いた場合は毎サイクル正のサイクルで、ゲート入力が与えられてターンオンし、負のサイクルで逆電圧によりターンオフする。しかし図 3.1 のように SCR を流れる直流電流をしゃ断させるためには、何らかのターンオフ回路を設けることが必要である。図 3.3 にコンデンサを用いたターンオフ回路の基本形を示す。 $t_{off}$  を SCR のターンオフ時間とすると、 $t_d = CR \log_e(1 + E_r/E) > t_{off}$  の条件がなりたたなければならない。 $E = E_r$  ならば  $t_d = 0.7RC > t_{off}$  となる。

次に図 3.1 の動作を説明すると、初め SCR<sub>2</sub> を点弧し、コンデンサ C<sub>1</sub> には R<sub>1</sub> を通じて図に示す極性に充電する。その電圧が電源電圧に等しくなると SCR<sub>2</sub> には電流は流れなくなり、ターンオフする。次に SCR<sub>1</sub> が点弧すると C<sub>1</sub>—L<sub>1</sub>—D<sub>1</sub>—SCR<sub>1</sub> の共振回路で C<sub>1</sub> の充電電圧が逆転し、ダイオード D<sub>1</sub> が共振電流を阻止するので、C<sub>1</sub> は逆方向に充電された状態に保たれる。次にその状態で SCR<sub>2</sub> を点弧すると C<sub>1</sub> にたくわえられた逆方向電圧が SCR<sub>1</sub> に加わるため、SCR<sub>1</sub> に流れていた負荷電流は阻止されターンオフする。SCR<sub>1</sub>, SCR<sub>2</sub> を交

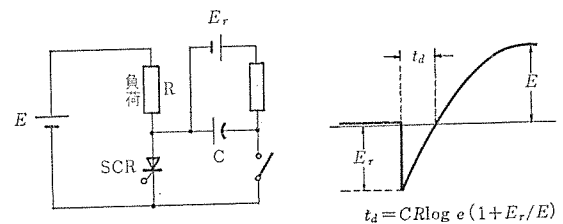


図 3.3 コンデンサを用いるターンオフ回路  
Turn-off circuit using capacitor.

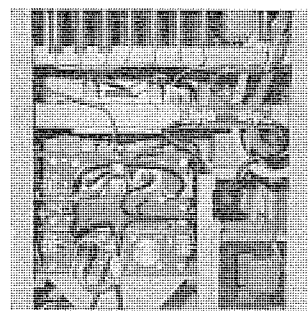


図 3.4 サイリスタチョップユニット  
Thyristor chopper unit.

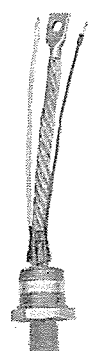


図 3.5 三菱大電力サイリスタ CR 250 A の外観

Appearance of Mitsubishi high power thyristor CR 250 A.

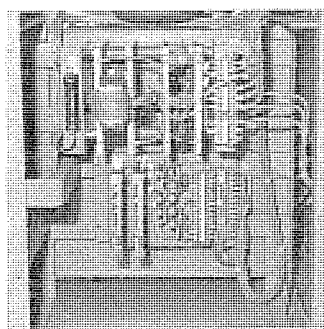


図 3.6 サイリスタチョップユニット (上) と点弧回路 (下)  
Thyristor chopper unit and firing circuit.

互に任意の時間で点弧することにより、断続した電流を目的に応じて制御できる。

サイリスタ DC チョップを放電加工機に用いたとき

(a) SCR<sub>1</sub> が点弧してパルス電圧が発生し、放電が始まるとその前後で大きな負荷電流の変動が起こる。それが毎サイクル繰返されるので安定に動作する回路でなければならない。

(b) 休止時間を小さくし加工周波数を上げるために、ターンオフタイムの小さいサイリスタが必要である。

(c) 加工周波数が簡単に換えられ、パルス幅、パルス休止時間が任意に、独立に調整される回路であることが必要である。

(d) 加工電流は数 10 A 以上から数 A まで調整できることなどが必要である。図 3. 4 は電車用 DC チョップ回路に使用されている大電流で、短いターンオフタイム特性の CR-250 A サイリスタ (図 3. 5) を用いた DC 150 V, 150 A のサイリスタチョップユニットである。(図 3. 6 は DC 240 V, 40 A サイリスタチョップユニットである。

### 3. 1. 2 パルス幅・休止時間制御回路

パルス幅、休止時間制御回路はユニジャンクショントランジスタ(UJT)を用いたサイリスタ点弧回路 (図 3. 7) である。UJT は E-B<sub>1</sub> 間の電圧がある値  $V_p$  を越えると急に負性抵抗を示す特性があり、それを弛張発振回路に利用したもので、発振周波数は  $C_1$  の充電時間を  $R_2$  を変えて調整できる。これを DC チョップに用いるときは SCR<sub>1</sub>, SCR<sub>2</sub> を交互に点弧するように出力波形を検出して、同期をとりながら、パルス幅、休止時間点弧回路を交互に駆動するように、図 3. 7 の A<sub>1</sub>,

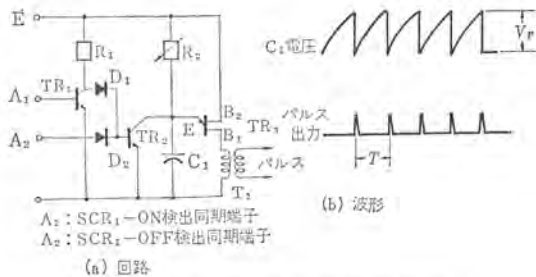


図 3. 7 パルス幅、休止時間制御回路  
On-time off-time control circuit of thyristor chopper circuit.

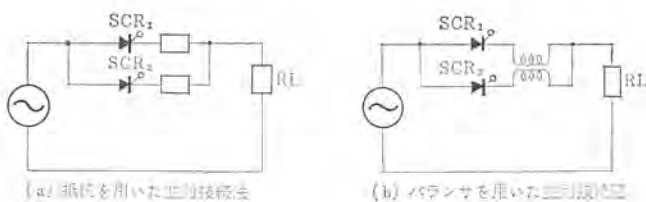


図 3. 8 サイリスタの電流平衡  
Parallel connection of thyristor.

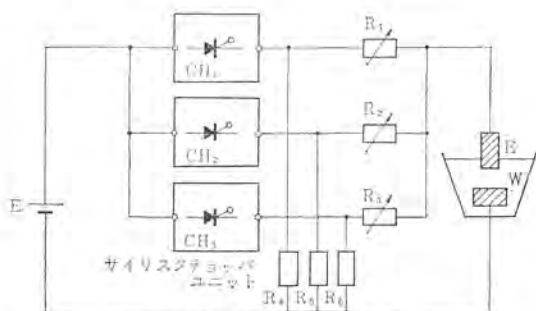


図 3. 9 大容量加工サイリスタパルス電源  
High power thyristor pulse power supply.

A<sub>2</sub> の同期端子を設けている。図 3. 6 に実例を示す。

### 3. 2 大容量加工サイリスタパルス電源

SCR を並列に接続して大きな電力を制御する場合、各素子の同時点弧、電流の平衡を確実にしなければいけない。

並列接続図 3. 8 には

(1) 抵抗を用いた並列接続法

(2) バランサを用いた並列接続法

がある。放電加工機では加工条件に応じて、電流制限インピーダンスを切換えているので大容量加工を行なう場合には、サイリスタチョップユニットにおおの電流制限インピーダンスをそう入して並列接続をして各ユニットの同期運転を行なうのである (図 3. 9)。したがって理論的には並列数を増せばどんな大きな電源もつることができる。同期運転を容易にするためには

(a) 各サイリスタは同時に点弧するようにしなければならない。

(b) 各サイリスタユニットの出力波形はできるだけ同一であることが望ましい。

(c) 各ユニットが相互に影響しないような回路方式をとったほうがよい。

図 3. 10 はサイリスタユニットを 3 並列したときの電源盤内部である。



図 3. 10 サイリスタチョップユニットの 3 並列接続  
Parallel connection of thyristor chopper units.

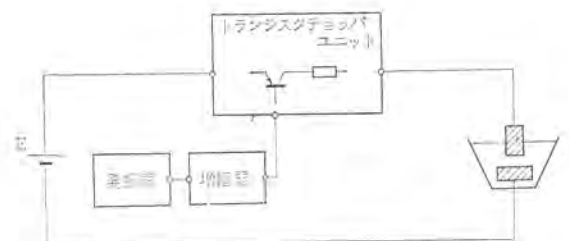


図 3. 11 トランジスタパルス電源  
Transistor pulse power supply.

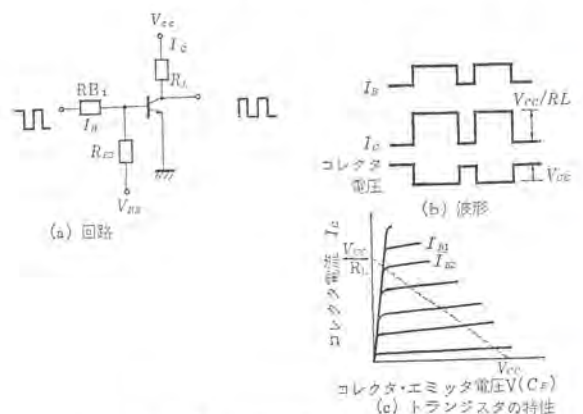


図 3. 12 トランジスタスイッチング回路  
Transistor switching circuit.

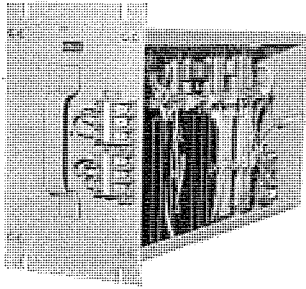


図 3.13 LF トランジスタチョップユニット  
Low-frequency chopper transistor unit.

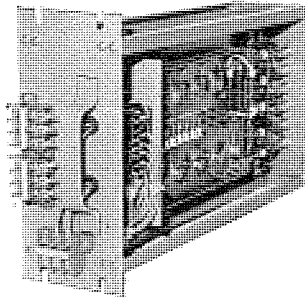


図 3.14 HF トランジスタチョップユニット  
High-frequency transistor chopper unit.

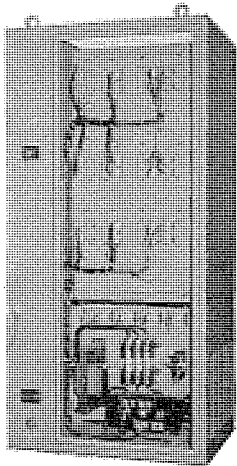


図 3.15 トランジスタチョップユニット  
Internal view of transistor chopper unit.

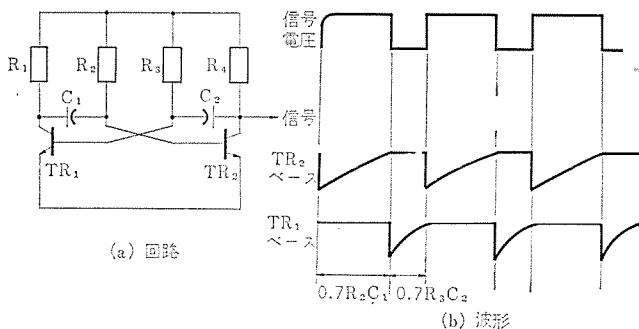


図 3.16 マルチバイブレータ Multivibrator.

### 3.3 トランジスタパルス電源

スイッチ素子をサイリスタからトランジスタにおきかえたもので、回路構成は発振器、増幅器、トランジスタチョップ部に分けられ図 3.11 に示す。発振器により加工条件に適したパルス幅、休止時間をもつ長方形波パルス電流を発生、増幅器で十分増幅し断続加工電流を得るのである。

トランジスタチョップ回路はトランジスタの ON-OFF スwitching 特性を利用して直流電流を断続するもので、他のトランジスタパルス回路に見られる動作原理と同じで、 $I_C = V_C / R_{LL} < k_{FE} I_B$  になるようなベース電流を制御することによりトランジスタチョップ回路をつくることのできる(図 3.12)。したがって基本になるトランジスタチョップ回路のユニットがあれば、並列接続の個数を変えることにより、加工電流ピーク値を自由に選択できる。

図 3.13, 3.14 に高周波、低周波トランジスタチョップユニットを示す。図 3.15 にその組み上りを示す。Switching 周波数は約 200 kc 以上

に及ぶので配線のインダクタンスが問題となる。プリント基板、配線形状の統一、保守点検、互換性を考慮して各チョップ回路はユニット化されている。

発振器はマルチバイブレータ(図 3.16)を用いているが

(1) 約 400~500 c/s から約 200 kc と大幅にパルス周波数を変化できること

(2) 立上りのよいパルス波形が全周波数域で得られること

(3) 発振始動信号を入れる必要があることなど、一つの発振器で安定に長方形波パルスを広範囲に得られることが必要である。

### 3.4 トランジスタパルス電源とサイリスタパルス電源の比較

トランジスタパルス電源は

1. 電圧はサイリスタに比べて高くとれない。
2. 素子当たりの電流容量はサイリスタに比べて小さいので、大電流を得る場合素子数が多くなり大がかりとなる。
3. トランジスタを Switching するための駆動電力はサイリスタに比べて大きく大容量には不適当である。
4. 周波数は 200 kc 以上に上げられるので精仕上げ加工まで使用できる。
5. パルス幅、ピーク電流値を自由に広範囲に選択できるので、底付き穴加工はもとより貫通穴加工特性も得られる。

サイリスタパルス電源は

- a. 無負荷電圧が高くとれる。(電圧が高いと電極消耗がより少なくなる。)
- b. 素子当たりの電流容量が大きいので大容量加工に適している。
- c. サイリスタ駆動電力は非常に小さくてよい。
- d. 周波数はトランジスタに比べて上げられない。
- e. 加工特性上は底付き穴加工に非常にすぐれた特性を示す。

以上まとめると、サイリスタパルス電源は低消費特性にすぐれ、中加工領域以上に適し、大容量加工電源には最適の Switching 素子といえる。トランジスタパルス電源は中加工精加工に適し、底付き穴貫通穴加工特性いづれにも用いることができる。

LCR 弛張発振回路と半導体パルス電源を比較すると LCR 回路ではコンデンサに充電する時間が放電時間に比べて長く、デューティサイクル = 放電時間 / (休止時間 + 放電時間) が大きくとれない。定常アーク放電に移行しやすいという欠陥などがあって、大容量加工は非常に困難である。中加工、精加工域ではトランジスタのほうがデューティサイクルが大きくとれるので加工速度が速くなる。いっぽう LCR 回路では、条件いかんによっては、電流ピーク値の大きな 500 kc~1 Mc 程度の非常に高い周波数のパルスが得られるが、トランジスタパルス電源では現在は 200~300 kc 程度である。LCR 回路は簡単に、安価にそして精加工から中加工以上まで一つの回路方式で加工パルス電源を作ることのできる利点がある。実際の電源を製作する場合は、加工目的、要求される性能、値段にかんがみて適当な回路方式が採用される。

### 4. 三菱ダイアックス放電加工機用電源

三菱放電加工機電源は加工特性より分類され、サイリスタまたはトランジスタパルス電源を用いた底付き穴加工電源と高周波重畳弛張発振電源、または高周波トランジスタパルス電源を用いた貫通穴加工電源に分類され、小容量から大容量までシリーズ化され、同じくシリーズ化された機械本体と組合わせて加工目的に応じた放電加工機を構成することができる。シリーズ化電源一覧表、機械総合名称の呼び方、お



表 4.1 放電加工機シリーズ化電源一覧  
Series of Mitsubishi Diax EDM power supply unit.

電源形名	回路方式	略形名	加工特性
DE-24 H	高周波重畳弛張発振	H	貫通穴加工
DE-30 T	トランジスタパルス電源	3 T	貫通穴, 底付き穴加工
DE-90 T	トランジスタパルス電源	9 T	貫通穴, 底付き穴加工
DE-40 S	サイリスタパルス電源	S	底付き穴加工
DE-150 S	サイリスタパルス電源	1 S	底付き穴加工
DE-300 S	サイリスタパルス電源	3 S	底付き穴加工
DE-500 S	サイリスタパルス電源	5 S	底付き穴加工
DE-1000 S	サイリスタパルス電源	10 S	底付き穴加工
DE-300 S-9 T	トランジスタ・サイリスタパルス電源	3 S-9 T	貫通穴, 底付き穴加工
DE-500 S-9 T	トランジスタ・サイリスタパルス電源	5 S-9 T	貫通穴, 底付き穴加工

S は SCR, T は Transistor, H は High freq の略

表 4.2 三菱ダイアックス放電加工機総合名称  
Serial numbering of Mitsubishi Diax EDM.

機械本体形名	電源本体略形名
--------	---------

DM-250, 300, 500 例 DM 300-1 S=DM 300 形機械と DE-150 S 形電源を組合わせたもの。

#### 特殊組合せ機種

総合名称	機械本体	電源本体	備考
DM-25	DM-25	DE-15, DE-20 S	学校, 試験所等の実験実習用
DM-51	DM-51	DE-12 H	貫通穴加工
DM-201	DM-201	DE-24 H	貫通穴加工
DM-201+アダプタ	DM-201	DE-24 H+40 S	貫通穴底付き穴加工
DM-220	DM-201	DE-150 S	底付き穴加工

表 4.3 おもな電源本体の仕様および加工性能  
Specification and characteristics of Mitsubishi Diax EDM power supply unit.

機 種	DE-500 S-9 T	DE-500 S	DE-300 S-9 T	DE-150 S	DE-90 T	DE-24 H	DE-40 S
電源回路方式	サイリスタ・トランジスタパルス	サイリスタパルス	サイリスタ・トランジスタパルス	サイリスタパルス	トランジスタパルス	高周波重畳弛張発振	サイリスタパルス
加工特性	底付き穴, 貫通穴加工	底付き穴加工	底付き穴, 貫通穴加工	底付き穴加工	底付き穴, 貫通穴加工	貫通穴加工	底付き穴加工
最大加工速度 g/min	アルミ 25 銅 15	25	13	7	5	1.8~2.2	1.3
電極消耗比	底付き 1%以下	1%以下	底付き 1%以下	1%以下	底付き 1%以下	—	1%以下
最良面あらさ	$\mu H_{max}$ 2~3 CLA 0.5~0.8	2~3	2~3	2~3	2~3	2	10~15
最平均加工電流	200 A	200 A	120 A	80 A	40 A	20 A	15 A
その他付属回路	放電安定装置	放電安定装置 SF 仕上領域弛張発振回路付	放電安定装置	放電安定装置 SF 回路付	放電安定装置		
特別付属アダプタ	SF 電源		SF 電源 <sup>1</sup>		SF 電源		
電源本体入力 約 kVA	32	32	20	15	7	5	5

- 放電加工機の電源入力, 電源本体と機械本体の補機入力との和となる。  
補機入力 DM-250 は 2 kVA DM-300 は 2.5 kVA DM-500 は 6.8 kVA
- DE-500 S の中, 仕上回路は DE-150 S と同一特性
- DE-500 S-9 T, DE-300 S-9 T の中仕上回路は DE-90 T と同一特性

もな電源の仕様と性能を表 4.1, 4.2, 4.3 に示す。

#### 4.1 DE-24 H 形電源

RLC 弛張発振回路に高周波重畳を採用し, 貫通穴加工にすぐれた加工性能を示す。高周波重畳は従来の弛張発振回路だけでは放電が集中し, 加工が不安定になる場合でも高周波を重畳することにより, 放電点が均一に分散しやすくなり, 放電の繰り返し周波数は上り, パルス性放電を安定に持続させる効果がある。とくに抜型, 引抜き型, 押出し型, 粉末成型型などの貫通穴加工にすぐれ, 被加工材質が超硬合金の加工においてもすぐれた特性を発揮し, 最良面粗度  $2 \mu H_{max}$  の精加工から荒加工まで安定に加工ができる。また DE-40 S 形アダプタ電源を付属させることにより底付き穴加工もできる。図 4.1 にブロック線図, 図 4.2~4.5 に外形と写真を示し性能を表 4.3 に示す。

#### 4.2 DE-150 S 形電源

サイリスタパルス電源を用いた底付き穴加工電源で, 広い加工領域で非常にすぐれた低消費特性が得られ, 他の方式の追随を許さぬ特性を誇っている。とくに鍛造

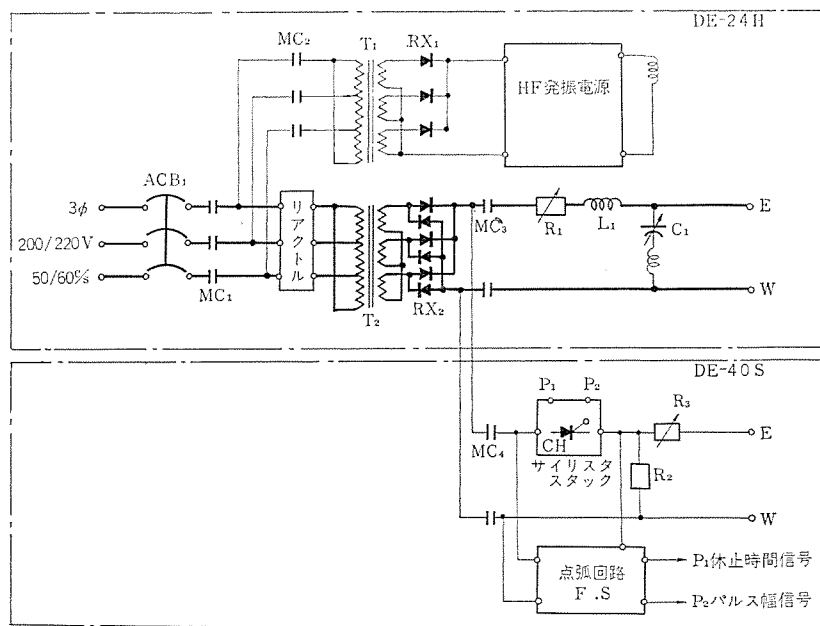


図 4.1 DE-24 H+DE-40 S 形電源 ブロック線図  
Block diagram of type DE-24 H+DE-40 S power supply.

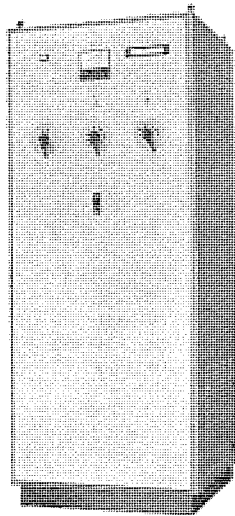


図 4.2 DE-24 H 形 電源  
Type DE-24 H power supply.

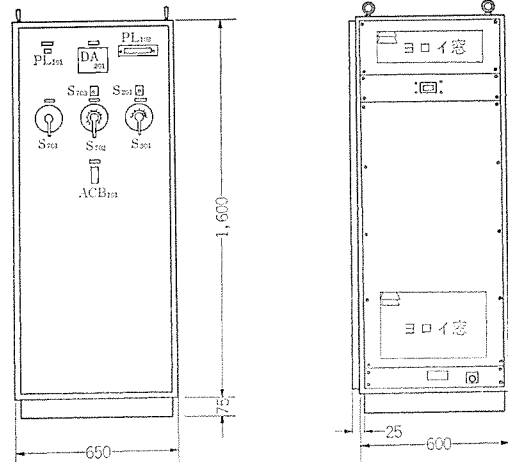


図 4.3 DE-24 H 形 電源  
Type DE-24 H power supply.

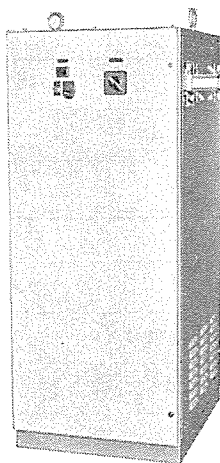


図 4.4 DE-40 S 形 電源  
Type DE-40 S power supply.

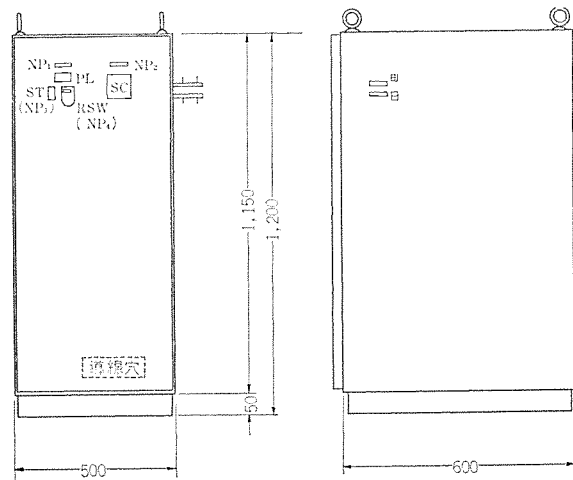


図 4.5 DE-40 S 形 電源  
Type DE-40 S power supply.

型、ダイカスト型、モールド型、ガラス成型型など底付き穴加工に広く用いられ、貫通穴加工に適した仕上領域の電源が蔵されているので用途に応じ、切り換えて使用できる。ブロック図、外観を図 4.6~4.8 に、特性を表 4.3 に示す。

#### 4.3 DE-500 S 形電源

DE-150 S 形電源において最大加工量を上げるために、サイリスタチョップユニットを 3 並列運転した電源で中、精仕上げ加工域は DE-150 S 形電源と同一特性である。外観および特性を図 4.9、4.10、表 4.3 に示す。

#### 4.4 DE-90 T 形電源

トランジスタパルス電源ではパルス幅、休止時間、パルス波高値を広範囲に自由に制御できるので、底付き穴加工に適する電極低消耗特性のパルス波形も、抜型、押し出しダイスなどの貫通穴加工に適するパルス波形も、1 台の電源で最適条件が得られるように選択できる。最良面粗度は銅/銅  $6 \sim 8 \mu\text{H}_{\text{max}}$ 、銅/超硬で  $2 \sim 4 \mu\text{H}_{\text{max}}$  で SF アダプタを付属すると  $0.8 \sim 3 \mu\text{H}_{\text{max}}$  で仕上げることもできる。

これはとくに中、仕上げ加工領域の加工速度を大幅に向上したもので、本邦最初の本格的トランジスタ電源でもある。ブロック線図、外観

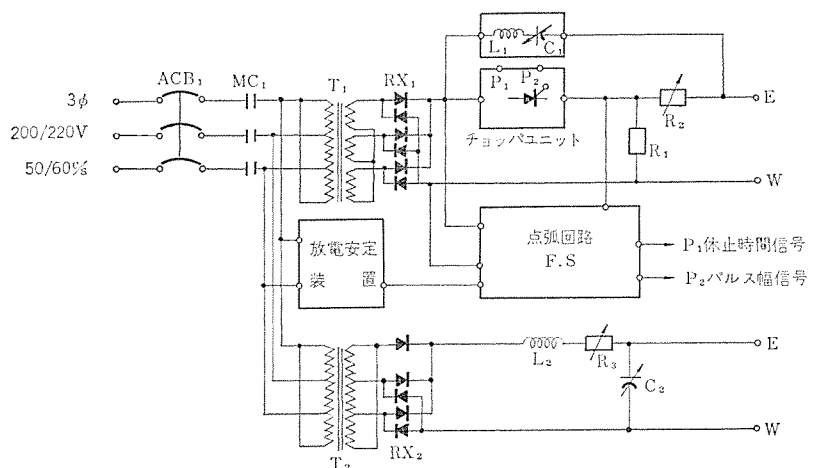


図 4.6 DE-150 S 形電源ブロック線図  
Block diagram of type DE-150 S power supply.

および性能を図 4.11~4.13、表 4.3 に示す。

#### 4.5 DE-500 S-9 T 形電源

DE-500 S 形電源の大容量加工特性と DE-90 T 形電源の中仕上げ領域の特性をもたせた電源で、大容量加工と、底付き穴加工、貫通穴加工特性をあわせ持った高性能大容量電源である。性能を表 4.3





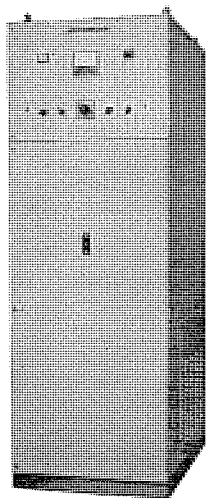


図 4. 12 DE-90 T 形 電源  
Type DE-90 T power supply.

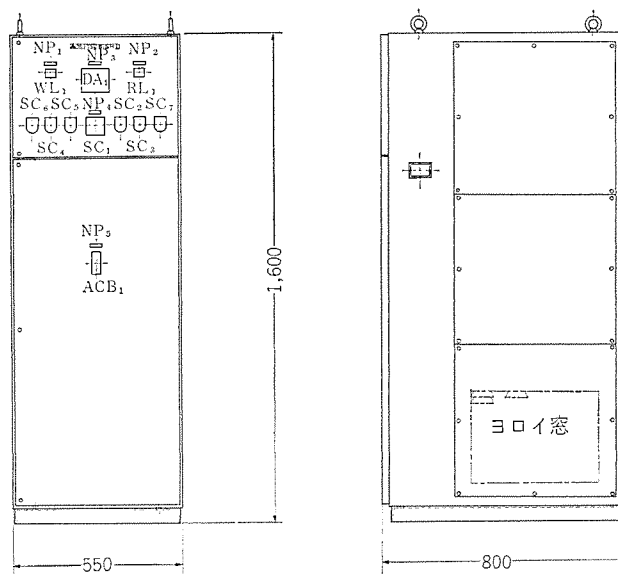


図 4. 13 DE-90 T 形 電源  
Type DE-90 T power supply.

放電加工機全体を金網でおおってシールドすることによって妨害波の伝ばを阻止することができる。これは非常に有効な方法である。当社が放電加工機を納入した安城市のある金型メーカーでは、近所のテレビがそれまで同期がくずれて映像が見えなかったのがシールドした結果、完全に同期がとれ鮮明な映像となった。

シールドの簡単な方法は放電加工機だけを金網でかこうことで、金網のシールド効果は目が細かいほど向上するが、換気採光などから限度がある。黄銅金網平織 16メッシュ SWG #28 が入手しやすいが、亜鉛メッキ鉄網、銅網でもよい。金網はすべて導電的につながっている必要があるが、シールドわくと金網はとくに完全にアースしなくともよかった。ただし導体であるので、どこかで漏電しているときは感電の危険があるのでアースはとらなければならない。部屋全体をシールドする場合、銅板を張るのが理想である。

#### (2) アンテナの位置、方向を動かす方法

テレビ電波の電界強度が比較的強い都会地において適用できる方法で、妨害電波は2～4mの間隔で強い所、弱い所がある。したがってアンテナの位置を2～4mの範囲で移動させることにより妨害電

波の影響を非常に少なくすることができる。

さらに、シールドする方法、アンテナの位置、方向を動かす方法を併用することによりいっそうの効果が得られる。

## 6. む す び

放電加工の加工技術、回路方式の進歩にともない、従来の工作機械が用いられていた分野にまで進出してきた。また特殊加工の電源や専用機も作られている。今まで述べてきたように、従来のコンデンサ放電を主とした放電加工機電源は、放電加工に最適の波形を制御することが回路上、構造上からも容易ではなく、放電状態は極間の物理的な状態に左右され、定常アーク放電になりやすく、良好な加工特性を得ることは容易でない。いっぽう半導体パルス電源は波形制御が行ないやすく、高速度スイッチ素子により定常アーク放電に移行することもなく、回路のユニット化が行ないやすく、電源に希望どおりの加工特性を持たすことが容易である。半導体スイッチ素子を用いた回路方式の放電加工電源が今後は多く採用されるようになると思う。

## 放電加工の生産への応用

荒井 伸治\*・片寄 文隆\*・中川 進\*\*

## Application of Electrical Discharge Machining to Production

Nagoya Works Shinji ARAI・Fumitaka KATAYOSE  
Central Research Laboratory Susumu NAKAGAWA

Electric discharge machines, introduced to the production with their distinctive features being made use of, are broadening the range of application as a means to promote the industrial rationalization. Though various characteristics of the electric discharge machining is effected numerous factors, it is feasible to bring about nearly constant results by making the factors constant. For instance, the tolerance can be arranged within a few microns. Application made available for the present covers making metallic dies for the work of panching, extrusion, powder metallurgy and the like in the case of through holes machining and also making nozzle slit and small hole in the same category. With new developed power supplies having low electrode wear, it has become easy to make holes with bottoms such as in machining plastic mold dies, forging dies and die casting dies.

## 1. ま え が き

放電加工機が工作機械として種々の金属の加工に使われるようになってからすでに十数年の年月を経ており、今日では放電加工機は、ますます生産合理化の手段として生産ラインに導入されている。とくに低電極消耗電源が開発されてから、放電加工は電極消耗を考えずに適用できるようになったので、その応用分野は非常に広がった。放電加工を生産ラインに導入する際の放電加工の長所短所を列挙すると次のようになる。まず長所としては、

(1) 高硬度、難切削性の材料でも金属であれば加工できる。この特長によれば、工作のことを考えずに使用目的に応じた最適の材料を使用することができる。

(2) 複雑な形状も容易に加工できる。放電加工では回転運動や往復運動は必要としないためである。

(3) 切削力のほとんどかからない加工である。このため被加工物にはひずみを残さない。また電極の強度もほとんど必要としないので、0.01 mm 程度の細い穴、細いみぞの加工もできる。

(4) 電極に対して均一なクリアランスで穴を加工できる。

(5) 加工面は丸い小さなくぼみから構成され、カッターマークにみられるような大きなうねりを作らないので、後加工が簡単にすむ。

(6) 加工面に方向性がない。

(7) 放電加工機は自動化されているので人手がいらない。またその取扱いは熟練を必要としない。

短所としてあげられるのは、

(1) 切削を用いる工作機械とくらべると、加工速度が遅い。

(2) 電極が消耗する。

(3) 加工の進行状況を見ながら加工することができない。

(1)の点については放電加工の技術によって、あるいは放電加工機の進歩によって改良されつつある。(2)の点については低電極消耗電源の開発によって、ほとんど電極消耗のない加工もすることができるようになった。(3)の点については、高度に自動化された最近の放電加工機では見る必要がなくなっている。このように欠点に対する対策も用意されているので、放電加工機はその長所を生かして、生産の合理化を目的として各方面の工場に導入されつつある現

状である。

本論文においては、2章に放電加工機を実際に使用する場合に必要と考えられる事項を述べ、3章にこれまでの加工の応用について加工例を主体として述べ、4章に研究所試作工場における放電加工機の実動の状況について述べる。

## 2. 放電加工の応用に関する基礎的事項

## 2.1 放電加工機の加工特性と、それによぼす種々の要因

放電加工機を生産に導入する場合に、種々の加工特性が要求され、またそれによって評価されるが、おもな加工特性をあげると次のようになる。

(1) 加工速度 (単位 g/min または mm<sup>3</sup>/min)

通常1分間に除去される被加工物の重量や体積で示される。

(2) 電極消耗 (単位 g/min または mm<sup>3</sup>/min)

電極の消耗速度を示し、単位は加工速度と同じである。

(3) 電極消耗比 (単位 重量% または 体積%)

電極消耗/加工速度の値をいい、この値が小さいほど電極の形状に似た穴がかけられる。

(4) 面あらさ (単位  $\mu\text{H}_{\text{max}}$ )

被加工物の加工面の面あらさをいう。

(5) クリアランス (単位 mm)

電極に対する、加工穴の広がりしろをいう。通常、片側の広がりしろで示す。この論文においても片側の広がりしろで示す。

(6) こう配 (単位 mm/min)

側面が垂直な電極で加工した加工穴側面のこう配をいう。

これらの諸特性が実際に放電加工を行なう場合に、どのような要因で左右されるかと考えると、まず、設計者、作業者によって選択されるか、あるいは放電加工機固有の1次的要因があげられる。

(1) 被加工物材料

(2) 加工形状、加工深さ、電極面積、電極形状

(3) 電極材料

(4) 電源の諸要因 (加工電圧、加工電流など)

(5) 加工液

(6) 機械装置の諸要因 (電極の送り機構方式、精度など)

放電加工の加工機構をさらに考えに入れると、1 次的要因の大部分は次にあげる加工機構内に派生する 2 次的要因をまず決め、その 2 次的要因が加工特性を決定するという 2 段階となる。この因果関係を図示すると図 2. 1 のようになる。

#### 2 次的要因

- (1) 被加工物側放電こん(痕)
- (2) 電極側放電こん
- (3) 放電繰返し数
- (4) ギャップ

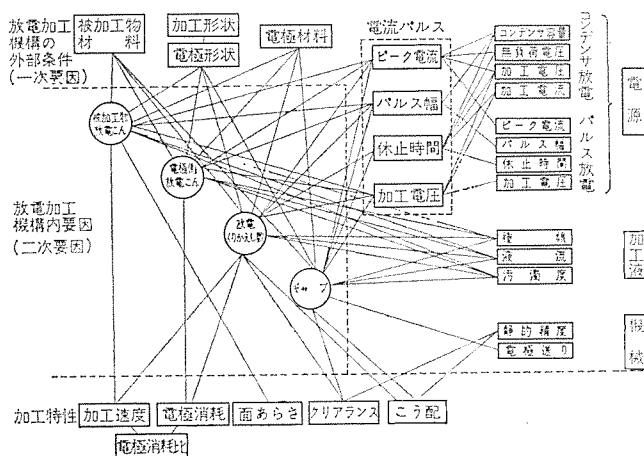


図 2. 1 放電加工の諸要因と加工特性の関係  
The relation between results and factors in E. D. M.

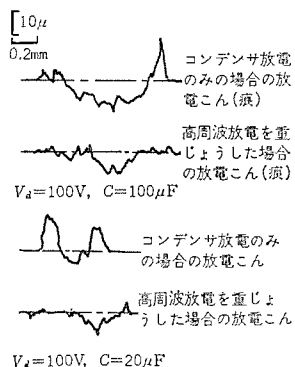


図 2. 2 放電こん(クレータ)の断面形状  
Cross section of crater. (single discharge)

電極、被加工物の形状

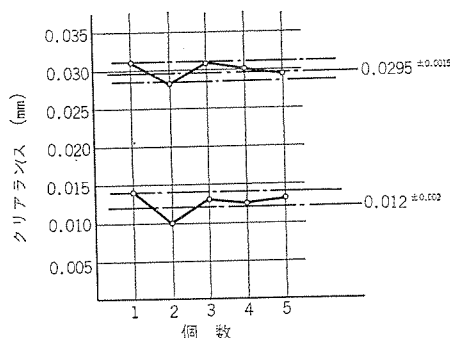
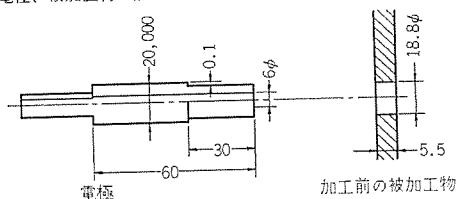


図 2. 3 DE 24 H 電源によるクリアランスの再現性  
Repeat ability of tolerance in DE 24 H.

放電こんの形状は独特のもので、断面形状を図 2. 2 に示す。この放電こんが、放電繰返し数(数百 c/s~数百 kc) 個累積されて放電加工による加工穴が形成される。図 2. 1 にあげた諸要因は、加工特性に大きな影響力を与えるとみられる要因で、また少なくともここにあげた 1 次的諸要因を一定とすれば、放電加工特性はほぼ一定となるとみられる。

加工特性の一つであるクリアランスをとりあげて、1 次的諸要因を一定とした場合に、どの程度の再現性があるかの実験を、つぎに示す。

使用機種 DE 24 H 形(貫通穴用放電加工電源)

#### 実験条件

- (1) 被加工物 炭素工具鋼 (SK-5) 6 mm 厚
- (2) 加工形状 図 2. 3 に示す段付電極で、先端部で荒加工、根元で仕上加工する。
- (3) 電極材料 電気銅
- (4) 電源 電源加工条件は、表 2. 1 に示すとおりである。
- (5) 加工液 三菱石油煙霧灯油を用い、表 2. 1 に示す液圧で下穴を通し噴出加工した。
- (6) 機械 油圧サーボ自動送り機構を備え、サーボ送りおよび手送り機構の双方による、電極の前後、左右方向のスレは 0.005 mm 以内である。(DM 201 機械装置)

以上の条件で 5 個の穴をあけ、入口側出口側のクリアランスを測定すると図 2. 3 に示す結果となり、 $\pm 0.002$  mm の公差内にはいる。DE 150 S 電源におけるクリアランスの再現性をみるために、同様の実験を行なった。

#### 実験条件

- (1) 被加工物 軟鋼 30 mm 厚
  - (2) 加工形状 被加工物に 9φ の下穴をあけておく。
- 電極は荒加工用 9.55φ と仕上加工用 9.995φ の 2 本を用意し、荒

表 2. 1 クリアランス 再現性実験の加工条件  
(DE 24 H 電源)

Machining data of experiment for repeat ability in DE-24 H.

	荒 加 工	仕 上 加 工
被加工物材料	軟 鋼	
電 極 材 料	銅	
加 工 電 流	(No. 6)	(No. 4)
主コンデンサ $\mu F$	(No. 4) 1	(No. 3) 0.02
並列コンデンサ $\mu F$	(No. 3) 0.2	(No. 3) 0.2
無 負 荷 電 圧 V	240	240
加 工 電 圧 V	80	80
高周波重じょう	強	強
加 工 液 圧 $kg/cm^2$	0.7	0.7
加 工 時 間 min	5	5

表 2. 2 クリアランス 再現性実験の加工条件  
(DE 150 S 電源)

Experimental conditions of repeat ability in tolerance.

	荒 加 工	仕 上 加 工
加工セッティング	No. 8	No. 3
加 工 電 流 A	8	1.6
加 工 電 圧 V	40	80
加工液噴出圧力 $kg/cm^2$	0.25	0.3~0.4
加 工 時 間	9 min 30 sec	28 min 30 sec
面 あ ら さ $\mu H$ max	110~130	25~30



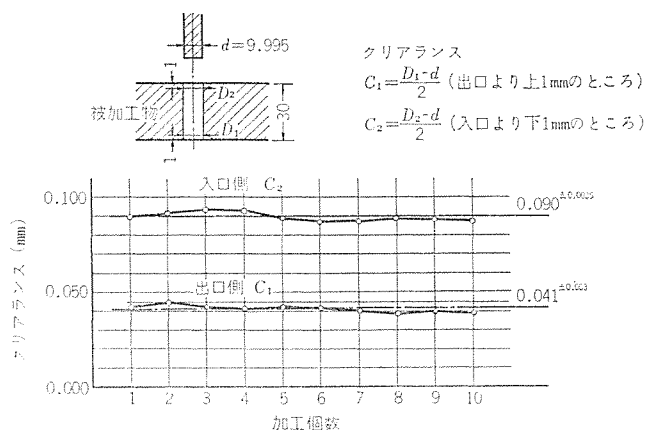


図 2.4 DE 150 S 電源による クリアランスの再現性  
Repeat ability of clearance on DE 150 S type electric power supply.

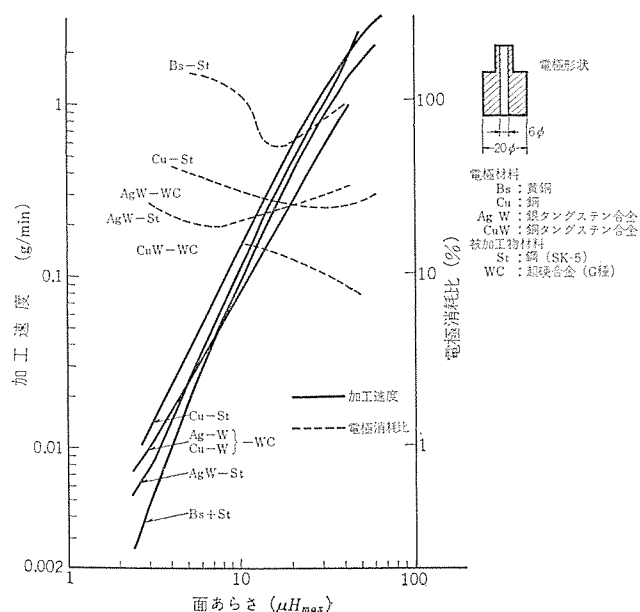


図 2.5 DE 24 H 電源による各種電極の加工特性  
Machining speed and electrode wear ratio to surface roughness with DE 24 H power supply.

加工を一度加工してから仕上加工電極を同心に位置づめて仕上加工する。

(3) 電極材料 電気銅

(4) 電源 DE 150 S 形放電加工電源。各加工条件は表 2.2 に示す。

(5) 加工液 三菱煙霧灯油。噴出液圧は表 2.2 に示す。

(6) 機械 DM 201 形機械装置

以上の条件で加工した 10 個の穴について、入口側出口側のクリアランスの計測結果を図 2.4 に示す。計測は、0.001 mm 目盛のマイクロメータを使用した。これによると ±0.0035 の公差内に納まり、この平均のテーパーは 3/1000 と計算される。

以上に述べた二つの実験で、1 次的要因を一定とすれば、加工性能（この場合クリアランス）が一定となることが明らかになったわけであるが、それぞれの要因がどのように加工性能に影響するかをみるのが重要である。図 2.1 に示す関係を定量的に明らかにしてゆくことが必要であると考えられるが、どの一つの関係をとっても複雑であり、多くの実験、研究が必要であり、すでに放電加工の加工機構の研究として多くの論文がある<sup>(1)</sup>。

実用的に放電加工を生産に使う立場からは、放電機構は一応考え

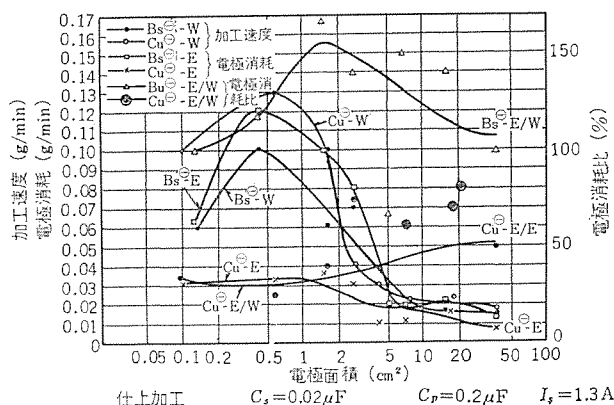
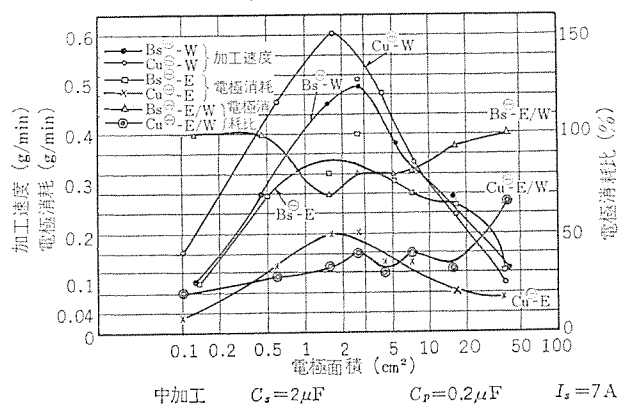
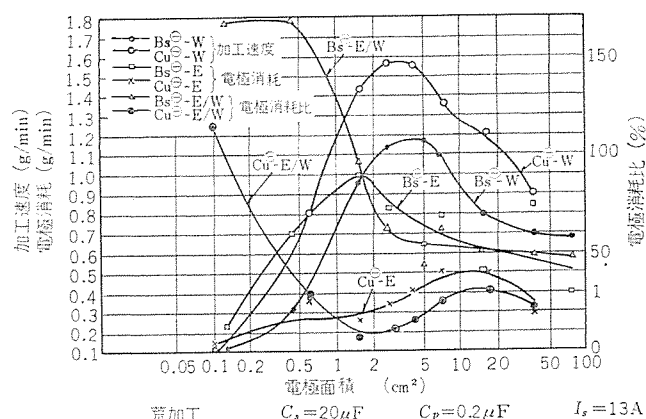


図 2.6 面積効果  
Effect of surface area in E. D. M.

ずに、放電加工機の加工条件（1 次的要因）の一つをとりあげて変化させ、他の 1 次的要因を一定とした場合に、どの程度加工特性に影響するかを実験的に求めるのが重要である。この種の実験の数例をつぎにあげる。

(1) 被加工物と電極材料の組合わせ

DM 201 形機の加工特性（面あらし—加工速度曲線および面あらし—電極消耗比曲線）が、被加工物材料と電極材料の組合わせによって、どのように変化するかを図 2.5 に示す。この実験は外径 20 mm、内径 7 mm の円筒形の電極を用いて、内径部より加工液を強制噴出しながら加工した結果である。

鋼を加工する場合には、銀タングステン合金（8～20%）、銅電極（25～40%）が電極消耗が少なく加工速度も速い。黄銅電極は電極を製作する際の機械加工性はよく、安価でもあるが電極消耗、加工

速度の面からはあまりよくない。

超硬合金を加工する場合には、銅 タングステン 合金あるいは銀 タングステン 合金の電極材料が電極消耗が少ない。銅電極では 30～300 % の電極消耗がある。

(2) 加工形状

加工形状の加工特性におよぼす影響として、加工面積と加工深さをとりあげる。

(a) 加工面積

円筒形電極を使い、面積を  $0.1\text{ cm}^2 \sim 35\text{ cm}^2$  に変化させた場合の加工速度、電極消耗、電極消耗比を図 2. 6 に示す。小面積の場合には、同じコンデンサ容量であれば放電繰返し数が面積に対する限度以上になり電極消耗は大きく、また加工速度は小となる。大面積の場合、加工粉の排除がうまくゆかないので加工速度が下がる。そのため粗加工、中加工、仕上加工のおおのについて最適の面積があるが、その値は荒くなるほど大きくなっている。これを面積効果といっている。

(b) 加工深さ

DE 150 S 形低電極消耗放電加工電源を用いて、1 mm 幅で長さ 16 mm および 48 mm の平板を電極として、加工液に浸せきするのみで加工し、加工時間に対する電極の送り深さの関係を求めた。またこれと比較するために 3 mm 幅で 16 mm 長さの平板、および 20  $\phi$ -18  $\phi$  の円筒電極で加工をおこなった。20  $\phi$ -18  $\phi$  の円筒電極の場合には内径部より加工液を強制噴出した。結果を図 2. 7 に示す。加工条件は表 2. 3 に示す。同じような加工面積でも、加工粉の排除のよい条件のものは、加工時間と加工深さは比例関係にあるが、加工粉の排除の悪いもの (3 t-16) は、加工深さが深くなると加工時間が急増する。面積に対して加工電流の多いほどこの傾向は強い。1 t $\times$ 16 の実験結果にみるように、加工穴が深い場合には加工電流を小としたほうが、短かい加工時間となる場合もありうる。この実験では加工深さ 10 mm に対して、電極消耗長さは 0.1 mm 以下であった。電極材料はいずれも銅であり、被加工物は鋼 (SK-5) である。

2. 2 電 源

電流 パルス 波形がいかに加工特性に影響するかは、本稿では述べ

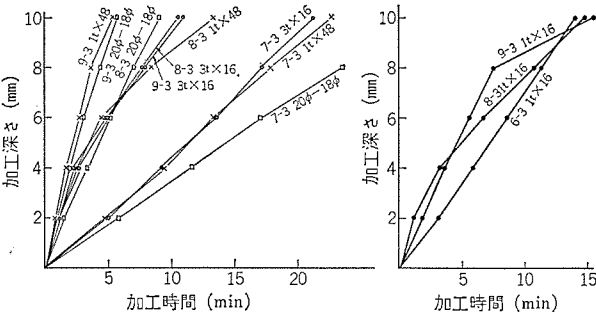


図 2. 7 加工深さと加工時間の関係 (DE 150 S 電源)  
Relation between machining depth and working time.

表 2. 3 加工深さの加工時間に対する影響の実験の加工条件  
(DE 150 S 電源)

Work conditions of experiment about worked depth.

加工条件	パルス幅 ms	休止時間 ms	平均加工電流 A
9-3	(#9) 0.64	(#3) 0.54	24
8-3	(#8) 0.64	(#3) 0.54	16
7-3	(#7) 0.32	(#3) 0.54	3.6
6-3	(#6) 0.32	(#3) 0.54	2.5

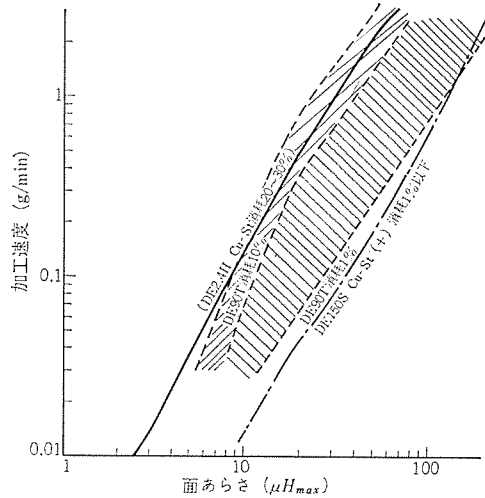


図 2. 8 各種電源の加工速度と面あらしの関係  
Relation between machining speed and surface roughness with various of electric source.

ないが、図 2. 8 に各種電源の面あらし-加工速度曲線を示す。パルス電源の開発によって、1 % 以下の電極消耗比の放電加工が実用に供せられ、底付型の加工に用いられている。このような低消耗電源で加工すれば、貫通穴 (たとえば抜型) も 1 本の電極で何個も穴がかけられるので都合のよいと考えられるが、実際には図 2. 9 にみるように、電極消耗を許す場合と比較すると同じ面あらしのところで、数分の 1 という加工速度しか得られない。よって貫通穴のように、電極が消耗しても電極を長く作っておき深く加工すればよいものについては、消耗を許す電流パルス波形を使用すると能率的である。

2. 2 電 極

2. 2. 1 電極材料

従来より電極材料は、導電性のものであればどのようなものでもよいという説明がなされていたが、近年放電加工の目ざましい進歩に伴ない電源部の回路方式が改良され、電極材料の選定良否により、加工機の性能が相違することが確認された。そのため使用に際しては、その加工機に指定された種々の条件を考慮して正しい使い方を必要がある。以下に電極材料として具備すべき条件を列記する。

(1) 放電加工の特性

- (a) 安定性
- (b) 電極消耗比
- (c) 加工速度
- (d) 仕上面あらし

などに対する影響。

(2) 電極製作上の特性

- (a) 価格と入手性
- (b) 被加工性、成形性
- (c) 機械的強度
- (d) 大きさの制限

これらの特性をすべて満足するものはないので、電源回路の条件、荒加工か仕上加工か、大物加工か精密加工か、などの使用目的条件に応じ、適当な特性に重点がおかれる。

表 2. 4 に貫通穴加工電源によく使われる材料についての得失を掲げた。このうち銀 タングステン、銅 タングステン 材料については価格が高いため、黄銅材などの先端に最小必要量 (加工深さの  $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$  程度の長さ) ろう付、ネジ止めされるのが通常である。

表 2. 5 に底付穴加工に使われる材料について示した。

2. 2. 2 電極製作

雄型の形状は、一般に機械加工しやすいので機械加工するのが基

表 2.4 貫通穴加工に使用されるおもな電極材  
Electrode materials used for through hole machining.

	放電加工性 (安定性など)	電 極 消 耗 比	機 械 加 工 性	鍛 造 性	鋳 造 性	価 格 円/kg	比 重	備 考
銅	ほとんどの材料に対して安定に加工する 黄銅に比べ加工速度は20~30%速くなる	黄銅の約半分。焼入 銅に対し15~30%	あまり良くない 研削不能	すぐれ ている	気泡を生 じやすい	600~800	8.96	
黄 銅	銅と同じくほとんどすべての材料に対して 安定に加工する	焼入銅に対し、30~ 100%と大きい	最 も 良 い	良 好	比較的容 易	550~600	8.3	
銀タングステン	安定性、加工速度、精度の面で最もすぐれ ている	消耗比が最も小さい	良好 研削可能			21,000	14~15	精密抜型加工にお もに用いられる
銅タングステン	銀タングステンに次いで良好	銀タングステンに次 いで良い	良 好			15,000	約 14	精密抜型加工にお もに用いられる
グ ラ フ ァ イ ト	荒加工に適し、加工速度も速い	かなり小	良好であるがかけ やすい			4,000	1.6~2.0	
Zn 合 金	比較的良好		良 好		簡単に鋳 造できる		6.9	ZAC, MAK な ど
タングステン線 (小穴用)	とくに剛性が大きで安定に加工するので細穴 加工に用いられる	銅線などに比して小					19.3	

表 2.5 底付穴加工に使用される電極材  
Electrode materials used for cavity sinking.

	放電加工における特性	材 質	形 製 作					価 格 円/kg	備 考
			形 成 形	機 械 加 工	研 削	機械加工時の ひずみ	特殊な方法		
銅	良	市 販 の 電 気 銅	鍛 造 鋳 造	あまり良 くない	研削はで きない	薄板の加工 などでひず みが出やすい	溶 射 電 鋳	600~800	
グラファイト	休止時間を長くしなければなら ないので、加工時間が2~3倍長い	密度1.6~1.8以上、電気伝導度の 良いもの (例: 東海電極 KK, HK-12)	焼 成	良、ただし かけやすい	研 削 可 能	薄板でもひ ずみは小		4,000	

本であるが、とくに形状が複雑であったり同形状のものを数多く求められる場合には、鋳造、鍛造、溶射、電鋳などを利用する。また、放電加工によって電極を製作する場合もある。

ここではとくに電鋳法による放電加工電極の製作をとりあげて記述する。これは金属 (おもに銅) を型 (母型) の上に厚くメッキして必要な厚みに達したときに型からとりはずし、電極とする方法で、鍛造型、ガラス型のように、電極が複雑な形状を要求されるとき、あるいは、大きな電極で電極自体の重量が大きく、そのため経済的にかんがりの費用を要する場合などに利用される。

電鋳法によれば複雑な形状の細部にわたり、精密な型を作れるとともに経済的にも有利に製作でき、製作コストを減ずることができる。図 2.9 にこの方法により作られた例を示す。これにはまず、与えられたザーズ、原品、模型により、転写精度のよいプラスチックなどで母型を作り、母型が非電導性の場合には銀鏡反応や、導電性塗料を塗布することにより導体化を行なう。

電着金属を母型からはく離するため、この後にはく離皮膜を作る必要があるが、銀鏡反応などは母型に電導性を付与するとともににはく離をも容易にするので好都合である。ついで母型を陰極とし、銅を電着させる。銅電鋳の場合、原理的には銅メッキとなんら変わるところがないから、装置、電解液などは銅メッキの場合とほぼ同様である。ただメッキにくらべ非常に厚く電着させる必要があるので、製作時間にかんがり時間はかかるが、人手はまったく不要である。

表 2.6 に 1 mm の厚さを得るための所要時間と電流密度について記す。こうして電極としての所要厚みが電着したなら、母型より

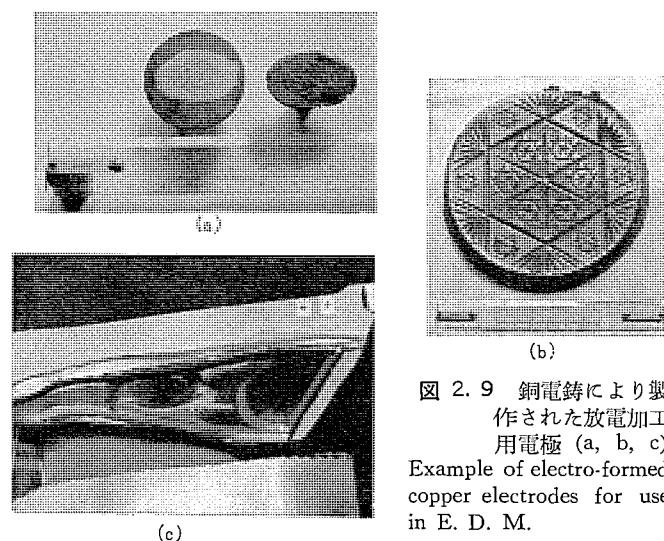


図 2.9 銅電鋳により製作された放電加工用電極 (a, b, c)  
Example of electro-formed copper electrodes for use in E. D. M.

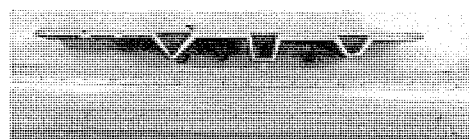


図 2.10 電鋳の形状効果  
Formal affect of electroforming.

はく離し、強度的に不足の場合は、バックアップを行ない電極とする。このように電鋳法による電極の製作は模写が精密で、寸法精度の厳密な電極の製作に利用されるとともに、その操作にはまったく人手

を要しない長所があるが、生産時間に比較的時間を要すること、および母型のすみやくぼみなどに均一の厚さに電着物をつけにくいことが欠点である。この一例として図 2. 10 に種々の形をしたくぼみに電着した場合の電着の様子について示した。このような場合には、くぼみに電極を近づけたり、補助極を考慮することによりある程度この問題を解決することができる。

現在では低電極消耗の放電加工機が開発されたことから、電鋳によって、厚さ数 mm から十数 mm の厚さにメッキして母型よりよく離し、電極を製作するという方法がさかんになっている。

### 2. 2. 3 荒加工電極と仕上加工電極

図 2. 5 にみるように放電加工機の特性は、荒加工と仕上加工の加工速度の差は非常に大きい。よって加工形状できまる被加工物の加工量の大部分を荒加工でとりきり、仕上加工は、加工面をこまかくするだけに使うのが、加工時間を短縮する有効な手段である。このために、荒加工電極と仕上加工電極の 2 本の電極を用意し、荒加工電極の寸法を仕上加工電極よりも小とすることが有効である。荒加工電極の最小の縮小しろを  $k$  とすると次式のようになる。

$$k = C_R + H_R \times 10^3 - C_F + x \dots \dots \dots (2.1)$$

$C_R$  : 荒加工のクリアランス (mm)

$H_R$  : 荒加工の面あらさ ( $\mu H_{max}$ )

$C_F$  : 仕上加工のクリアランス (mm)

$x$  : 心合わせ精度、面のうねり、こう配などに対する安全取りしろ (mm)

この式によると、図 2. 11 にみるように  $x=0$  とすると荒加工面の面あらさの谷部より仕上加工の面あらさ分だけは、余分に加工す

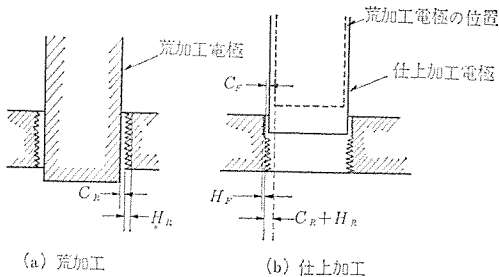


図 2. 11 荒加工と仕上加工の関係  
Rough machining and finishing.

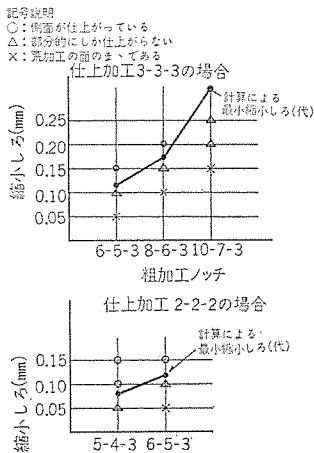


図 2. 12 荒加工電極の最小縮小しろ (DE 24 H 電源)  
Difference in dimensions between rough machining electrode and finishing electrode (DE 24 H).

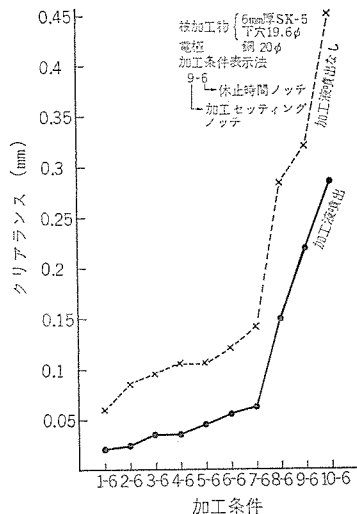


図 2. 13 DE 150 S 電源による  
クリアランス (入口側)  
Tolerance in DE 150 S.

ることになる。なおこの  $k$  の値より縮小しろが小であると、荒加工の面あらさが加工面にそのまま残る結果となる。

### (1) 貫通穴電源の場合

貫通穴加工の場合には、荒加工電極と仕上加工電極の心合わせの便利さを考えると、図 2. 3 に示したような段付電極が使いやすい。段差を、0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 mm と変えて、荒加工後、根元部で仕上加工をした場合、加工面が、仕上がっているかどうかを判定する実験を行なった。図 2. 12 にその結果を示す。この実験に使用した、DM 24 H 形電源について、別に 19 φ の下穴のあいた 6 mm 厚の鋼板 (SK-5) を 20 φ の銅電極を用いて加工液を十分噴出しながら加工してクリアランス、面あらさを計測した実験の結果を図 2. 7 に示す。

表 2. 7 に示すクリアランスおよび面あらさの値から、式 (2. 1) の  $k$  の値を  $x=0$  とし計算し、これを図 2. 12 に同時に図示してある。実験と計算値はよい一致を見せている。

### (2) 底付穴電源の場合

DM 220 形機の各加工条件におけるクリアランスの値を図 2. 13 に示す。これは 6 mm の鋼板 (SK-5) に 19.6 mm の抜き通しの下穴

表 2. 6 1 mm の厚さを得るための所要時間と電流密度  
Times and current density to product 1 mm thickness.

金 属	電流密度 A/dm <sup>2</sup>	所要時間 (時・分)
銅	硫酸銅浴	2
		38・20
	シアン化銅浴	8
		9・35
	2	26・10
		6・30

表 2. 7 DE 24 H 電源による クリアランス 面あらさ (銅電極)  
Tolerance and surface roughness on DE 24 H power supply.

電 流 No.	コンデン No.	並列コンデ No.	加工電 圧(V)	無負荷電 圧(V)	高周波 波	クリアランス		面あらさ $\mu H_{max}$
						出 口	入 口	
10	7	3	100/240		強 噴出	0.199	0.247	—
8	6	3	100/240		強 噴出	0.108	0.118	80
6	5	3	100/240		強 噴出	0.084	0.094	42
5	4	3	100/240		強 噴出	0.056	0.062	36
3	3	3	100/240		強 噴出	0.024	0.036	14
2	2	2	100/240		強 噴出	0.020	0.032	7
1	1	1	100/240		強 噴出	0.012	0.026	5

注) 加工条件の表示法 (ノッチの No. の意味) については表 2. 8 参照のこと。

表 2. 8 DE 24 H 電源各 ノッチ の数値  
Value of taps in DE 24 H power supply.

#### 電流 ノッチ

電流 ノッチ No.	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
短絡電流値 (A)	26	15	12	6.1	4.8	1.9	1.2	0.7	0.4	0.2

#### 主コンデンサ

主コンデンサ No.	7	6	5	4	3	2	1
静電容量 ( $\mu F$ )	60	15	2	1	0.02	0.005	0.002

#### 並列コンデンサ

並列コンデンサ No.	3	2	1
容 量 $\mu F$	0.2	0.02	0.01

注) 加工条件は、電流 ノッチ No. — 主コンデンサ — 並列コンデンサの順に ノッチ No. を併記して示す。



をあげ、20.0φの電極（銅）を用いて各加工条件で加工して穴径を内側マイクロメータ（0.001 mm 目盛）で計測し、クリアランスを求めたものである。加工液を流す場合と流さない場合の両者について表示してある。

また表 2. 9 に、各加工セッティングノッチに対する面あらしの値を示す。範囲で示してあるのは、ばらつきの範囲を示す。以上のクリアランス（ $C_R$ ）と面あらし（ $H_R$ ）より、式（2. 1）に従って縮小代 $k$ の値を計算すると表 2. 10 の値となる。ただし、これは 6 mm 深さの加工に対して加工液を流さないとして計算し、 $x=0.12$  の安全しろを算入してある。この安全しろは、加工粉の出方のアンバランスや加工面のうねりなどに対するもので、経験的に決定されている。表 2. 9 の値に従って多くの電極を製作したが、荒加工電極と仕上加工電極の心合わせ精度が  $\pm 0.01$  mm 程度であれば、側面は完全に仕上げられる。

底付穴を加工する場合には加工液を流さない場合が多いので、加工液を流さない場合のクリアランスの値を基として  $k$  値を求めたが、加工液を流せる場合には図 2. 13 液を流す場合のクリアランスの値を基とする。加工深さが 6 mm 程度の加工では、表 2. 10 の値はそのまま使用できるか、加工深さが異なる場合はこれを補正する必要がある。

表 2. 9 DE 150 S 電源各加工 ノッチ の面あらし  
Roughness of each machined notch with DE 150 S power supply.

加工セッティング	面 あ ら さ $\mu H_{max}$		$C_R+H_R$ mm
	底 面	側面 (CR)	
10	200~300	150~200	0.65
9	150~200	100~130	0.45
8	110~130	60~100	0.39
7	70~85	25~40	0.18
6	65~70	20~35	0.16
5	40~50	15~30	0.14
4	20~26	8~15	0.14
3	25~34	11~20	0.11
2	13~20	10~13	0.09
1	5~10	4~8	0.07

表 2. 10 DE 150 S 電源の荒加工電極縮小しろ  
Reduction margin of rough machining electrode of DE 150 S power supply.

仕上加工ノッチ	1	2	3	4	5
粗加工ノッチ					
10	0.71	0.68	0.67	0.66	0.66
9	0.51	0.48	0.47	0.46	0.46
8	0.45	0.42	0.41	0.40	0.40
7	0.24	0.21	0.20	0.19	0.19

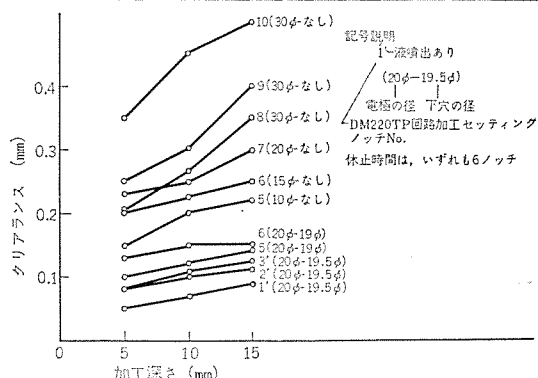


図 2. 14 加工深さのクリアランスに対する影響  
(DE 150 S 電源)  
Relation between tolerance and work depth.

ある。加工深さのクリアランスに対する影響を実験で求めると、図 2. 14 のようになる。加工深さによって面あらしは変化しないのでこのクリアランスの変化分だけ表 2. 9 の  $k$  の値を補正すればよい。

### 3. 応 用 例

種々の放電加工の応用に対する注意事項と応用例について述べる。

#### 3. 1 貫通穴加工

貫通穴というのは抜き通すことのできる穴のことをいい、この場合、電極の底面の形状は加工穴とは関係がない。

##### 3. 1. 1 プレス抜型の加工

放電加工で抜型を製作すると次の点で有利であり、放電加工のものとも古い応用の一つである。

(1) 熱処理後の工具鋼に加工でき、放電加工を応用しないときに生じやすい熱処理によるダイスの変形をまったく心配する必要がない。超硬合金の加工もできる。

(2) 均一で最適のクリアランスのポンチとダイスを加工できる。

(3) 熟練度の高い技能を必要としないので、型加工の合理化ができる。

プレス抜型の製作ではポンチと電極は同一形状の加工となるので、両者の作り方を組合わせて次の数種の製作法が採用されている。

(1) ポンチを作り、その根元を使い直接ダイスを加工する。この場合放電加工は、鉄対鉄の加工あるいは鉄対超硬合金の加工となる。鉄対鉄は安定性がよくないので能率が悪く、鉄対超硬合金は電極消耗が多く、勧められる方法ではない。—直接法 1—

(2) ポンチの根元あるいは刃先のいずれかに別の電極材料を取り付け（ろう付あるいははんだ付+ねじ止めなどの機械的方法）、ポンチと同時に成形研削などの機械加工で成形する。電極材料をポンチよりはずすか、あるいはポンチにつけたままダイスを加工する。

—直接法 2—

(3) ポンチの形状が機械加工では作りにくい場合には、別の電極材料で穴形状の一次電極を割型にするなどして製作し、まずポンチと二次電極を放電加工で製作し、つぎに二次電極（ポンチと同形状）によってダイスを放電加工する方法である。

—間接法—

混合法、間接法の加工例を次に述べる。

#### 加工例 1 モータコア 超硬合金抜型

モータのステータコアおよびロータコアの両方を打抜くための連続送り型で、直接法 2 により製作した。ダイスの材料は、超硬合金（三菱金属 GTi 40）で、ポンチは工具鋼（SKD-11）である。打抜く材料は 0.5 mm 厚のけい素鋼板である。ポンチは機械加工によって製作され、これに対して片側 0.015~0.02 mm のクリアランスになるように放電加工によってダイスが作られた。電極材料には、銀タングステン合金を用いた。ダイス材料にはあらかじめ大体の形の穴はあいており、全周に 0.5 mm の取りしろがあった。型の仕上面は  $\mu H_{max}$  に仕上げた。図 3. 1 に組み上げた抜型の全景を示し、図 3. 2 にステータコアのスロット部分の型とその加工に用いた電極の写真を示す。

#### 加工例 2 トランス用コアの連続送り型

加工の要領は加工例 1 と同じである。図 3. 3 に全景写真を示す。

#### 加工例 3 時計針用抜型（間接法の例）

図 3. 4 に示す大きさの時計針用の抜型を製作する。時計針の先端部は、0.1 mm で薄いので、機械加工で電極やポンチを製作するのは困難である。よって間接法を採用した。この場合の間接法の工程は図 3. 5 に示すとおりとなる。すなわち、割型方式としてみぞ加

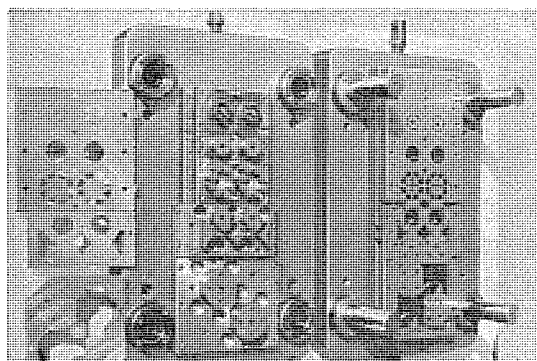


図 3.1 モータ用ロータコア、ステータコアの超硬合金抜型  
Sintered tungsten carbide progressive die for motor core.

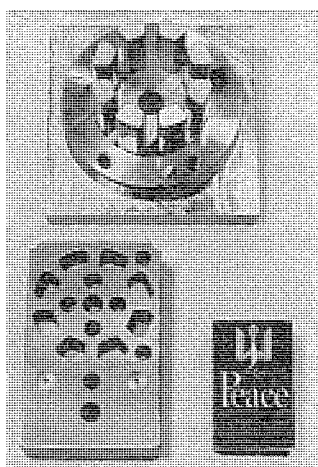


図 3.2 ステータコア 抜型部と電極  
Die for stator core and used electrode.

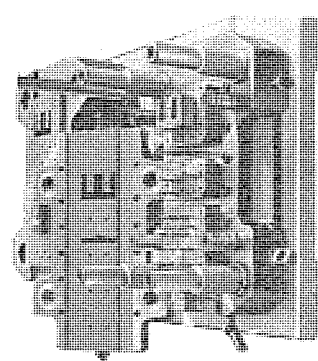


図 3.3 トランスコア用超硬合金抜型  
Sintered tungsten carbide progressive die for magnet core.

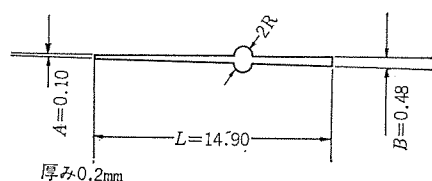


図 3.4 時計針の諸元 (加工例 3)  
Dimension of hand of watch (Example 3).

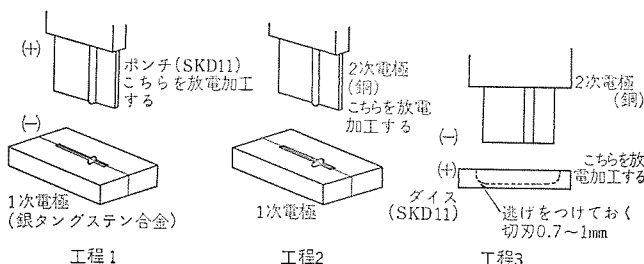


図 3.5 間接法の工程  
Work process of dies and punches for hand of watch.

工によって2枚合わせたときに時計針の形の穴になるようにした銀タングステン合金の2枚の板を治具で押し合わせ1次電極とした。この1次電極で、ポンチ(熱処理後の工具鋼)を放電加工により製作し(工程1)、次に同じ1次電極で、2次電極(銅)を加工する(工程2)。工程2で作られる2次電極で、ダイス(熱処理前に逃がしの加工をして熱処理をほどこした工具鋼)に放電加工をおこなう。この場合放電加工の加工条件は、工程1～3ともまったく同じ条件を用いた。

加工条件	使用機種	DM 201 機械装置+DE 24 H 電源
	平均加工電流	0.2 A
	コンデンサ容量	主コンデンサ 0.05 $\mu$ F + 並列コンデンサ 0.02 $\mu$ F
	平均加工電圧	40 V

これ以上の加工電流を流そうとすると、0.1 mm 幅の部分のポンチあるいは2次電極部が加工できなかった。表 3.1 に、各工程の加工時間とクリアランスを示し、表 3.2 に各電極、ポンチおよびダイスの工具顕微鏡で測定された主要寸法を示す。間接法の場合、工程1～3のクリアランスをそれぞれ  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  とすると、ポンチとダイスの間のクリアランス  $\delta$  は次のようになる。

$$\delta = C_1 - C_2 + C_3$$

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  をそれぞれ加工条件をかえて設定すれば、 $\delta$  を任意にきめることができ、 $\delta=0$  ということも可能である。これが、間接法

A : 1次電極 (銀タングステン合金)  
B : 2次電極 (銅)  
C : 加工されたダイス

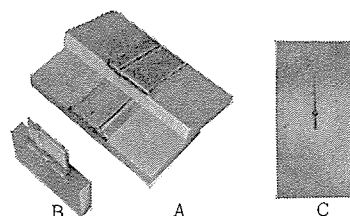


図 3.6 ダイス・ポンチおよび電極 (加工例 3)  
Machined die and punch (Example 3).

表 3.1 加工例3の加工時間およびクリアランス  
Machining time and tolerance in example 3.

	工程 1	工程 2	工程 3
加工時間	4 h	3 h	20 min
加工深さ mm	2.3	4.0	4.0
クリアランス mm	0.02( $C_1$ )	0.02( $C_2$ )	0.02( $C_3$ )

表 3.2 各電極ポンチダイスの寸法 (加工例 3)  
Dimensions of electrodes punch and die.

	1 次 電 極	ポ ン チ	2 次 電 極	ダ イ ス
寸法 (mm)				
A	0.10	0.06	0.06	0.095
B	0.48	0.44	0.44	0.47
L	14.93	14.88	14.89	14.94

の一つの長所となっている。この加工例の場合には、 $\delta=0.02$  mm となっている。図 3.6 に、各電極、ポンチおよびダイスを示す。

### 3. 1. 2 粉末や(冶)金成形型

粉末や金成形型の場合には、深さ 35～40 mm にわたってテーパが少なく、面あらかのこまかい面(後加工として、ラッピングが簡単にできる程度の面)が要求される。このような加工には次のような注意が必要である。

(1) 加工深さが深いので加工時間を短縮する必要性から、荒加工、仕上加工の2本の電極を使うのがよい。心合わせの手間をばくことを考えると、段付電極を使うのが最良である。

(2) あまり大きくない形(加工面積が、約 5 cm<sup>2</sup> 以下)のものについては、吸引加工を用いると、テーパがつきにくいのでよい。大きな面積になると、被加工物下の台になる“つぼ”からの加工液の分解ガスの排除が十分でなくなり、吸引加工では分解ガスが爆発することがある。“つぼ”の吸引する位置を工夫すると改良されるが、面積が大きいほど分解ガスの偏在の可能性が残る。爆発といっても作業者などに危険があるといった大きなものではないが、被加工物の位置をずらしたりするので、精度を悪くする原因となる。大きな

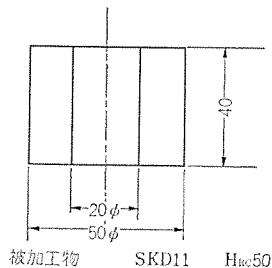
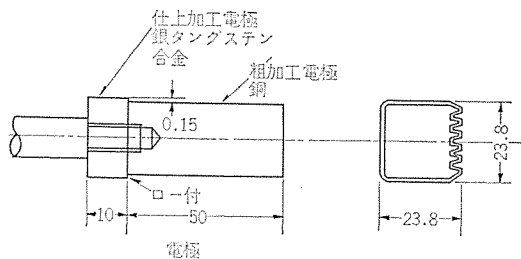


図 3.7 粉末や金成形成型の加工例  
Work sample of molding die for powder metallurgy.

表 3.3 粉末や金成形成型の加工例  
Machining data for die of powder metallurgy.

	加工条件	加工時間	加工液噴出圧力 kg/cm <sup>2</sup>
粗加工	7-5-3	2h 6min	0.3
仕上加工	3-3-2	1h 34min	0.8

面積のものでは噴流加工するわけであるが、この場合液圧を高くするように心がけると、テーパは小となる。

#### 加工例

荒加工には銅電極、仕上加工には銀 タングステン 合金電極を用いた。銀 タングステン 合金と銅をろう付けしておき、機械加工で形状を成形してから、銅の部分だけ片側 0.15 mm エッチングでやせさせて、段付電極とした。図 3.7 に電極と加工前の被加工物を示す。

この場合 DM 24 H 形電源を使用した。加工条件、加工時間は表 3.3 に示す。クリアランスは 0.03 mm であり、テーパは  $1/1000$  であった。

#### 3. 1. 3 サッシ押出型

細いみぞ形状の穴になるので、電極の製作が問題である。これに対して次のような方法が一般的にあげられる。

- (1) 1 本の電極で 1 個の穴をあければよい場合には、黄銅板を研削加工してはんだ付けで組合わせて用いる。段付電極として粗加工の工程を入れると、加工時間はいっそう短縮される。
- (2) 黄銅板に銀 タングステン 合金あるいは銅 タングステン 合金をろう付けした板を研削加工し、それをはんだ付けで組合わせることもある。
- (3) 間接法を用いることもある。
- (4) グラファイト 電極を用いることもある。

被加工物側に、あらかじめバンドソーなどで下加工するか、あるいは数箇所小穴をドリル加工しておき、そこから加工液を噴出して加工するとよい。

また一度粗加工で加工し、次にテーブルを左へ 0.1 mm 程度動かして仕上加工をして穴の右側面を仕上げる。このテーブルの移動を左右前後 4 回くりかえすと全周が仕上がる方法も発表されている。

#### 加工例

黄銅電極による加工の例である。最大深さ 8 mm に対して全長 30 mm の電極を用いた。図 3.8 に見るように板の上に黄銅板を組合わせて電極を作っている。先の方の 15 mm を塩化第二鉄溶液を使ったエッチングによって、片方 0.1 mm やせさせてこの部分で粗加工を行なった。みぞの幅は 1.70 mm である。加工条件、加工時間は表

表 3.4 サッシ押出し型の加工  
Machining data for extrusion die of sash.

		粗加工	仕上加工
加工条件	加工電流 A	(No. 5) 1.3	(No. 3) 0.35
	主コンデンサ $\mu\text{F}$	(No. 4) 1	(No. 2) 0.005
	並列コンデンサ $\mu\text{F}$	(No. 3) 0.2	(No. 2) 0.02
加工液		噴出 0.1 kg/cm <sup>2</sup>	吸引 20~40 cmHg
加工時間 min		41	14
電極材料		黄	銅

注：( ) 内はノック番号

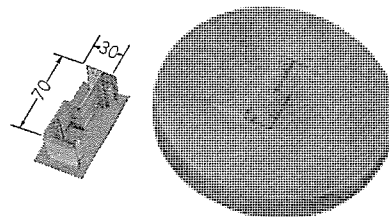


図 3.8 サッシ押出し型の加工例  
Extruding die for sash.

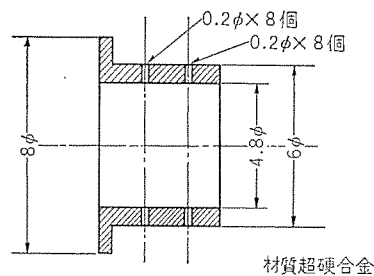


図 3.9 化繊ノズル加工例 (丸穴)  
Example of nozzle for chemical fiber.

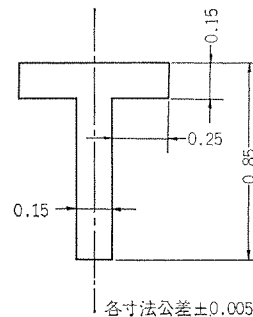
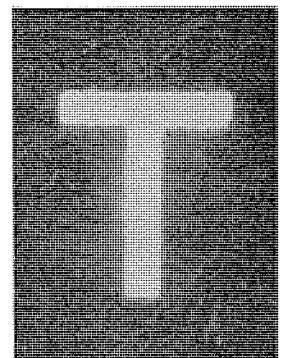


図 3.10 T 字形化繊ノズルの加工  
T shape nozzle for chemical fiber.



投影写真

3.4 に示す。総加工時間は、55 分であった。

#### 3. 1. 4 化繊ノズルの小穴あけ

ナイロンなどの合成繊維を成形するとき用いられるノズル穴の加工である。形は丸の場合も異形穴の場合もある。

#### 加工例 1 丸 穴

電極には 0.17  $\phi$  の銅線を用いて、特別なガイドやじぐ(治具)は使用しない。電源は DE 24 H 形で、高周波重じょうをせずに、コンデンサ容量も 33 pF というような小さな値とした。加工電流は 20~30 mA であった。図 3.9 に示す超硬合金の被加工物に 16 個の穴をあけるわけであるが、1 個あたりの加工時間は、1 分 23 秒であった。16 個の穴の穴径は、0.195~0.21  $\phi$  の範囲内にあった。加工深さは 0.6 mm である。

#### 加工例 2 T 字形

図 3.10 に示す T 字形の小穴をあけるのであるが、電極を機械加工で作るのは至難であるので、2 次電極を用いる間接法を採る。ただしこの場合ポンチはないので、図 3.5 の工程 1 は省かれる。1 次電極は、図 3.11 に示すようにみぞ幅部とみぞ端部の 2 回にわけて

表 3.5 T字形化繊ノズルの加工条件  
Machining data for T shape nozzle.

		2 次 電 極 の 製 作		ノズルの加工
		みぞ幅部の加工	みぞ端部の加工	
加工条件	加工電流 mA	(No. 1) 60	(No. 1) 60	(No. 1) 60
	主コンデンサ $\mu\text{F}$	(No. 1) 0.002	(No. 1) 0.002	(No. 1)
	並列コンデンサ pF	1,000	1,000	1,000
	加工電圧 V	100	100	100
加工時間		1 h 51 min	5 min 45 sec	3 min

押しつける。

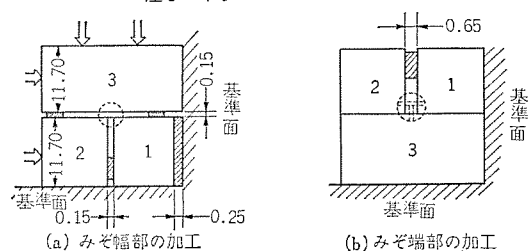


図 3.11 T字形化繊ノズルの1次電極  
Primary electrode for T shape nozzle.

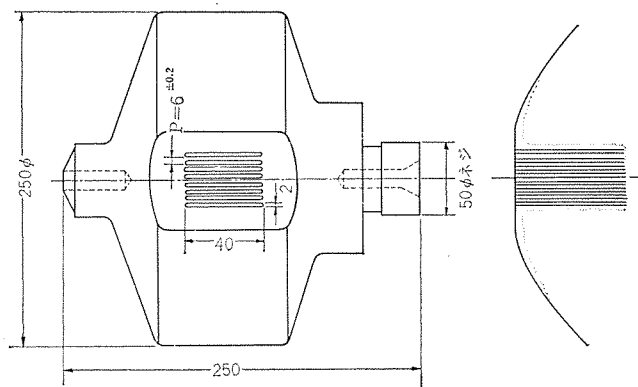


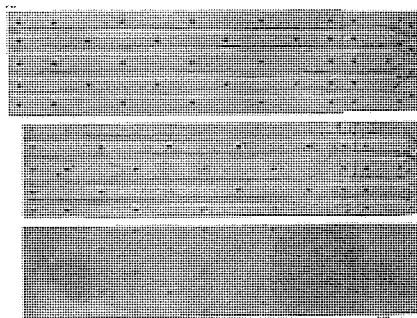
図 3.12 中性子スペクトロメータの主要寸法  
Slits for rotor of neutron spectrometer.

加工した。この場合基準面と加工しようとする2次電極の位置はかえらずに、銀タングステン合金のブロック1～3の組みかえとスペーサの取換で、所要の形状を作り出す。2次電極には銅の1.2φを使用した。被加工物は1mm厚の板に0.5mmまで裏穴加工したもので、2次電極による加工は0.5mmの深さである。加工穴は各寸法公差内にはいった。加工条件および加工時間は、表3.5に示す。

### 3.1.5 部品加工

加工例1 中性子スペクトロメータ用ロータの深みぞ加工

図3.12に示す形状の深穴加工を行なうわけであるが、切削加工ではとうてい不可能なので、放電加工によって加工した。従来ロータを割って機械でみぞ入れをおこない、それを合わせてロータとしていたが、放電加工によって一つのブロック状ロータに、直接加工できるので、このロータの設計自体が大幅に改良された。加工に使用したのはMD201形放電加工機である。深穴加工では加工粉をうまく排除しなければ加工が進行しなくなるのであるが、被加工物に下穴をあけることはこの場合不可能なので、電極側から加工液を噴出できるように電極構造をとった。図3.13にその構造を示す。黄銅に銀タングステン合金を約30mmろう付けし、加工液用のみぞを写真のようにきる。これを2枚リベットで合わせて電極とする。加工液みぞ先端部が曲がっているのは、残留心が長くなって加工が不安定にならないように、残留心も加工してしまうための配慮である。電極を研削する際に非磁性材料であるので、電磁テーブルに固定できない



黄銅部 銀タングステン合金部  
Tool electrode.

図 3.13 電極  
Tool electrode.

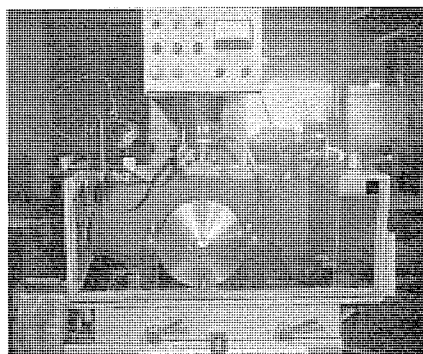


図 3.14 被加工物  
および電極  
の取付  
Setting in E. D. M.

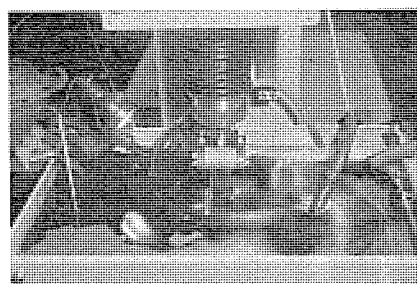


図 3.15 加工状況  
Working view.

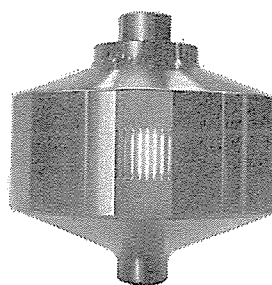


図 3.16 加工後のロータ  
Machined rotor.

ので、基準定盤にエレクトロワックスで固定して研削した。研削加工熱によるひずみは焼鈍により除去し、最後に0.01mmくらいの浅い送りの研削をする方式をとった。

図3.14に被加工物と電極の取付の様子を示す。電極はホルダとスペーサで、所要のピッチに組み8本を一度に加工する。加工は表と裏から140mmずつ送り込み中央部で継ぎ合わせる方式をとった。図3.15に加工中の状況を、図3.16に加工したロータを示す。表3.6に加工条件を示す。また図3.17に表裏それぞれからの電極の送り込み状況を示す。電極送り込みは、加工が深くなっても遅くならずほとんど一定の速度で送られている。加工時間は表からの加工は、46時間15分(平均加工速度0.24g/min)、裏からの加工は、41時間30分(平均加工速度0.27g/min)であった。なおロータの材料はKRモネルメタルである。

加工例2 非破壊検査校正用標準欠かん

標準欠かんは、超音波探傷機などの校正用に用いられる人工的な傷でみぞ幅50μ深さを50～100μの間の定まった値に±1μの精度



に加工したいという要求である。この加工に使用する電極は、幅  $30\mu$  の長さ  $3\text{ mm}$  のものである。被加工物は 18-8 ステンレス鋼で、外径  $15\phi$ 、内径  $13\phi$  の円筒の側面に加工する。加工の結果を表 3. 7 に示す。1000 pF のコンデンサ容量では、みぞの形状は V 字形になっており、100 pF のコンデンサ容量では U 字形の理想的なみぞ形状となっている。加工電流は 30 mA 程度であるので、標準の DM 201 形機では電極自動送り回路に同程度の電流が必要なため、たがいに干渉するので、電流増幅器を電極自動送り回路に入れて、これに必要な電流を 0.5 mA 以下にした。

表 3. 6 中性子スペクトロメータ用ロータのスリット加工の加工条件  
Machining data for slit of neutron spectrometer rotor.

被加工物材料	KR モデル
電極材料	銀タングステン合金
加工電流 A	(No. 4~No. 6) 1~2.5
主コンデンサ $\mu\text{F}$	(No. 3~No. 4) 0.02~1
並列コンデンサ $\mu\text{F}$	(No. 3) 0.2
加工液	噴出 $0.3\text{ kg/cm}^2$
加工時間	87 h 45 min

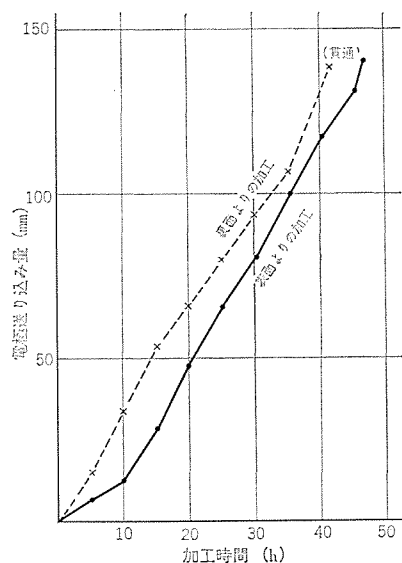
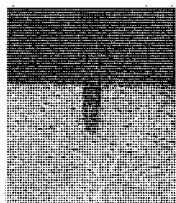
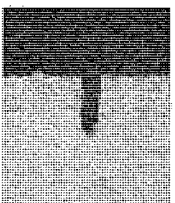


図 3. 17 電極送り込み状況  
Relation between electrode feed and machining time in slit machining on rotor of neutron spectrometer.

表 3. 7 非破壊試験校正用標準欠かんの断面形状  
Small size slit.

断面形状 $\times 25$		
		
コンデンサ容量 (pF)	1,000	100
加工深さ (mm)	0.13	0.17
テーパ	0.118	0.021
上面みぞ幅 ( $\mu$ )	50	50
加工時間	5min 14sec	6min 42sec

### 3. 2 底付穴の加工

低消耗電源の出現によって、底付穴の加工は非常に容易になった。

#### 3. 2. 1 プラスチックモールド型の加工

プラスチックモールド型は、複雑な形状のプラスチック製品が要求されるようになってきているので、機械加工では加工できない形状の穴あけが型に要求される。また型材料も硬度の高いものにおきかわりつつある。電極は、プラスチックモールド型では比較的機械加工しやすい形状となるので、機械加工で製作される場合が多い。型のほうも機械加工できる範囲については機械加工で加工し、どうしても機械加工不可能なところを部分的に放電加工する場合が多い。電極を各部分にわけて作り、位置を正確に決めながら型の加工部を組立てていく方法がとられる。ただし複雑な模様彫りの部分などには、電鍍電極も用いられる。

##### 加工例 1 リミットスイッチモールド型

リミットスイッチカバーのモールド型を 2 本の電極を用いて加工した例である。使用機種は DM 220 形機で、総加工時間は 5 時間である。表 3. 8 に加工条件と加工時間を、図 3. 18 に加工結果を示す。

##### 加工例 2 ヘアブラシ柄部のモールド型

ヘアブラシの柄部のモールド型を電極 2 本を使って加工する。この場合上下形の心合わせをとくに精度よく加工することを要求された。電極は上形用、下形用が一体となったヘアブラシ柄部と同一形状の電極を使った。まず、上形を図 3. 19 に示す電極を用いて、電極端面とダイブロック端面を基準として位置決めし、荒加工、仕上加工の 2 本の電極で加工する。つぎに、やはり平板ホルダで下形の荒加工をする。しかるのちに仕上加工用電極を、上形の加工穴にはめこみ、導電性接着剤ではりつけ、上形ごと電極支持軸にとりつけ、形ブロックの端面で上下形の位置を合わせ、下形の仕上加工をした。

また上下形の合わせめも、放電加工でならずところまで加工するとよい。この鉄対鉄の加工は不安定になるが、加工深さを精度よく加工するためと、形の合わせ面をぴったり合わせるために必要である。この加工の加工条件と加工時間を表 3. 9 に、加工結果を図 3. 19 に示す。放電加工後、鏡面とするためにラッピングする必要があるが、この作業には図 3. 20 に示すように、紙やすり、ゴムといし、パフなどを使って行なわれる。ラッピングに必要な時間は 1 面あたり約 1 時間程度であった。

##### 加工例 3 水道ジャロハンドル

表 3. 8 リミットスイッチカバーモールド型の加工条件  
(DE 150 S 電源)

Machining data for plastic molding die of cover of limit switch.

	粗加工	仕上加工
加工セッティング	No. 9	No. 2
休止時間	No. 6	—
加工電流 A	26~28	2
加工時間	2 h 30 min	2 h 30 min

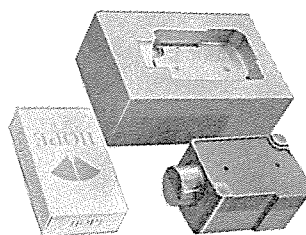


図 3. 18 リミットスイッチカバーモールド型  
Plastic molding die for cover of limit switch.

表 3. 9 ヘヤブラシ 柄部 モールド型の加工条件  
(DE 150 S 電源)

Machining data for plastic molding die of hair brush.

	上 型			下 型		
	荒加工	中加工	仕上加工	荒加工	中加工	仕上加工
加工セッティング	No. 8	No. 7	No. 2	No. 8	No. 7	No. 2
休 止 時 間	No. 6	No. 6	No. 6	No. 6	No. 6	No. 6
加工電流 A	18	7	1.8	18	7	1.8
加工深さ min	0~6.8	6.8~7.1	7.1~7.4	0~11.8	11.8~12.1	12.1~12.4
加工時間 min	120	30	70	190	30	70
加工時間計	3 時間 40 分			4 時間 50 分		

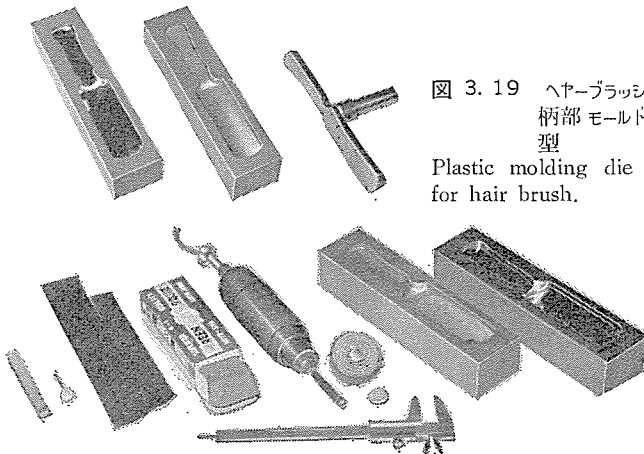


図 3. 19 ヘヤブラシ  
柄部 モールド  
型  
Plastic molding die  
for hair brush.

図 3. 20 放電加工後のラッピング加工  
Finishing after E. D. M.

表 3. 10 水道ジャロ ハンドルモールド型の加工条件  
(DE 150 S 電源)

Machining data for plastic molding die of knob.

	荒加工	中加工	仕上加工
加工セッティング	No. 7	No. 4	No. 3
休 止 時 間	No. 6	No. 6	No. 6
加工電流 A	6	3.5	2.5
加工深さ min	0~2.1	2.1~2.4	2.1~2.4
加工時間 min	18	25	5
最終面あらさ	8~10 $\mu$ H max		

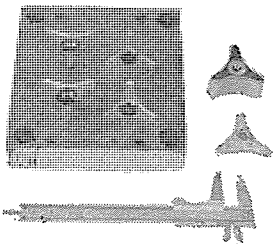


図 3. 21 水道ジャロ ハンドルモールド  
型  
Plastic molding die for knob.

プラスチックモールド型では、図 3. 21 に示す水道ジャロ ハンドルの型のように、1 面の型に多数個の同一形状の穴をあけることが多いが、このような場合には低電極消耗電源を用いると、形状のバラツキの少ない加工ができるので具合がよい。この加工の加工条件、加工時間を表 3. 10 に示す。

### 3. 2. 2 ダイカスト型

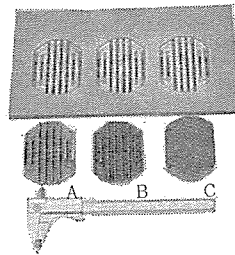
ダイカスト型についてもプラスチック型と同様に、加工形状の複雑なものも多く、またこの場合には耐熱性の型材が使用されるので、放電加工機が有効に使用されている。

#### 加工例 1 冷却フィンダイカスト型

自動 2 輪車用 エンジン の冷却 フィン 部のダイカスト型の加工例である。

表 3. 11 冷却フィンダイカスト型の加工条件 (DE 150 S 電源)  
Machining data for die of cylinder head cover.

	荒加工 1	荒加工 2 (リブ部)	仕上加工
被加工物材料	SKD-11		
電 極 材 料	グラファイト	銅	銅
加工セッティング	No. 10	No. 7	No. 5~No. 1
送り深さ mm	5	5	6
加工時間	55 min	2 h 5 min	1 h 45 min
加工時間計 (1 穴あたり)	4 h 45 min		
最終面あらさ	8~10 $\mu$ H max		



A : リブ部加工用 仕上加工電極 (銅)  
B : リブ部加工用 荒加工電極 (銅)  
C : リブ部以外の荒取り電極 (グラファイト)

図 3. 22 冷却 フィンダイカスト 型  
Die casting die for cylinder head cover.

リブがたくさんあるので、機械加工をしようすると加工時間が長くなり、また加工後の手仕上に相当の熟練がいる。放電加工の採用により加工時間は、約  $\frac{1}{3}$  に短縮され、熟練度の高い仕上工程は、不要になった。電極は粗加工、仕上加工のそれぞれ 1 本ずつ 2 本 1 組作り、同一形状の加工を 6 個穴あけした。加工条件、加工時間を表 3. 11 に、加工結果を図 3. 22 に示す。

### 3. 2. 3 鍛造型

鍛造型は一般に型の消耗がはげしく、また自動車部品などは部品個数も多いので、同一形状の型の面数も多くなる。最初の形を作ること自体は簡単であるが、同じ型をつぎつぎにどのようにして作るのが問題である。このような場合、すでに製作してある型で銅を熱間鍛造し、電極とする方法が有効である。単に熱間鍛造したままでは冷えたときに寸法が縮小するので、寸法が正確にならないという欠点がある。これを補うには、熱間鍛造したのちスケールを酸洗いで落とし、冷間で数回 コイニング して縮小分を補正する方法が有効である。

同一寸法の (仕上加工用の寸法) 銅電極は、鍛造で容易に得られるが、粗加工用電極としては側面をやせさせた形状にする必要がある。このための加工法としては、次の方法が有効である。

(1) 塩化第二鉄溶液を用いた エッチング を用いる。底面などのエッチング 不要箇所については、プラスチック 塗布膜を塗って保護する。エッチング 後多少の手仕上げは必要である。

(2) ならい フライス を用いて、仕上加工用電極をマスターとして用い、所定の cutter よりも大きな径の cutter を用いて加工すると、所期の補正ができる。

以上のように 1 組の荒加工、仕上加工電極を作れば同一形状の加工穴を少なくとも 10 分は加工が可能であり、その後も仕上加工用電極を 1 個/10 形の割合で補充すればよい。荒加工電極は、使用後の仕上加工電極を修正して用いるのもよい。また、大きな鍛造形の製作には、当然ながら低消耗形の加工速度の速い (2.0~30 g/min) 大形放電加工機が有利となってくる。

#### 加工例 自動車部品用鍛造型

電極はいずれも熱間鍛造で作られ、コイニングとエッチングを行なったものを用いた。加工方法はまず粗加工を行ない、そのまま電源のノッチを仕上加工に切換えてゆき、底面を仕上げ (この加工時間は約

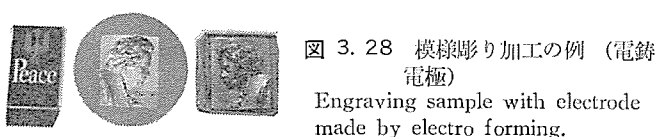
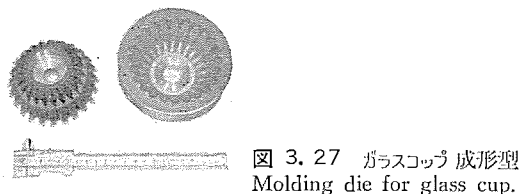
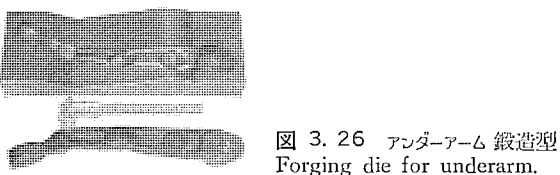
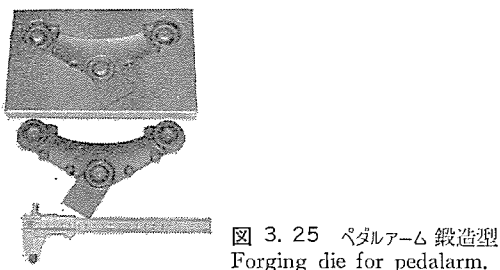
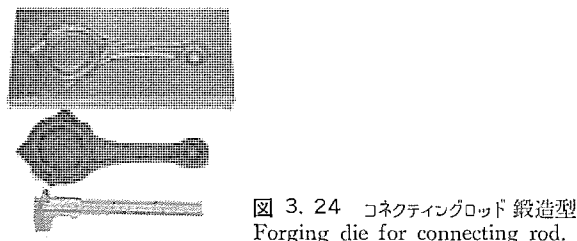
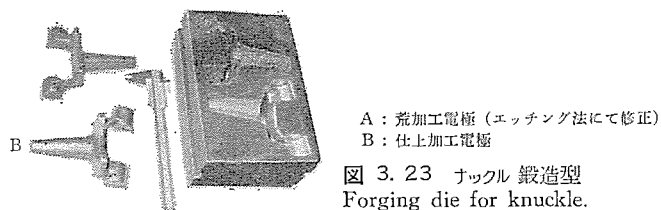


表 3.12 各種自動車部品鍛造型の加工条件  
(DE 500 S + 90 T 電源)  
Machining data for forging die of car parts.

図 番 号	3.23	3.24	3.25	3.26
品 名	ナックル	コネクティング ロッド	ペダルアーム	アンダー アーム
電 極 材 料	銅	銅	銅	銅
被加工物材料	SKD-11	SKD-11	SKD-11	SKD-11
荒加工	加工時間	1 h 10 min	1 h 30 min	30 min
	加工電流	160 A	115 A	95 A
中加工	加工時間	5 h	5 h	4 h 30 min
	加工電流	14 A	13.5 A	8 A
仕上加工	加工時間	1 h 30 min	3 h	2 h 30 min
	加工電流	2 A	2 A	2.5 A
加工合計時間	7 h 40 min	9 h 30 min	7 h 30 min	14 h 15 min
最終面あらさ	約 8~10 μHmax			

注) 予備加工なし

10 分程度), つぎに電極を仕上加工電極にとりかえて, 側面を仕上げる。図 3.23~3.26 に加工した被加工物と電極を示し, 表 3.12 にこれらの加工条件と加工時間を示す。使用電源は, DE 500 S + 90 T である。

### 3.2.4 ガラス金型

型によるガラス成形には, 型材として鋳鉄あるいは, ステンレス鋼が用いられる。複雑な形状の金型を同一形状に繰返して彫ることが, 要求されるので, 従来は高度の手仕上の技能が必要であった。また十数個の同じ金型が必要である。最近低消耗形放電加工機の採用によって, 金型製作は非常に容易になった。ガラス成型型では形状の大部分は機械加工で加工し, 模様彫りのところだけ放電加工するのが通常のやり方である。模様が複雑なので, 1 本の電極で, 粗加工および仕上加工をする場合が多い。垂直に近い面と水平面の両方があること, 垂直に近い面を仕上げるためには, 送り込み深さが深く結局水平面を深く加工しなければならないので, 加工時間が長くなる。よって, コップの金型のように垂直に近い斜面上に模様を彫らねばならない場合には, コップの底になる水平面は, 放電加工では加工することのないように逃がしをつけておくことが, 仕上加工時間を短くする方法として有効である。

#### 加工例 ガラスコップ用金型

加工条件, 加工時間は表 3.13 に, 加工結果は図 3.27 に示す。電極は, 銅をシーリング加工したものを 1 本だけ使用している。

### 3.2.5 模様彫り加工

複雑な模様彫りを行なう場合に放電加工を用いると次の利点があると考えられる。

(1) 浮かし彫りは彫刻機で彫ると, 取りしろが多いので加工時間が長くなることになるが, この場合, 電極に模様を彫りこんで放電加工を行えば, 彫刻機の加工時間も短くまた, 放電加工時間を入れても, 総加工時間は短縮される。

(2) 複雑な模様彫りの写実性がよい。とくに電鋳によって電極を製造すれば, 複雑な模様も簡単に彫ることができる。

(3) 同じ模様をいくつか彫る場合の再現性がよい。電極消耗が少なくないので, 再現性は高い。

#### 加工例 1 メダル型 (ベトベン像)

母形(陶器製)→石膏型→電鋳電極→放電加工の工程で, 加工した例である。1 本の電極で, 5 個加工しても模様の変化を判別できない程度の再現性をうることができる。加工時間は予備機械加工なしで約 5 時間である (DM 220 形機を使用)。図 3.28 に加工結果を示す。

### 3.2.6 冷間鍛造型

冷間鍛造型は消耗がはげしく, 約 1000 個の製品を鍛造すると型に形のくずれる部分がでてくるので, 型を再生する必要がある。

表 3.13 ガラスコップ成型型の加工条件 (DE 150 S 電源)  
Machining data for of glass cup.

	荒加工	中加工	仕上加工
加工セッティング	No. 8	No. 6	No. 3→No. 1
加工電流 A	16	5	3→1.2
送り深さ mm	0~9.5	9.5~9.7	9.7~9.75
加工時間	2 h 30 min	30 min	20 min
加工時間合計	3 h 20 min		
被加工物材料	ステンレス鋼 (SVS-23)		
電極材料	銅		

この再生作業は、最初に型彫りした放電加工電極をとっておき、放電加工によって行なうと簡単である。このような再生を1本の電極で、電極を修正することなく、15~20型おこなえる。使用機種はDE 150 S 電源である。

### 3. 2. 7 プレスしぼり型

自動車の外装部品のプレスしぼり型は、従来ケラマシシなどの大形のならいフライス盤が用いられていたが、加工後の手仕上がりがむずかしいので、放電加工機を用いて加工しようと企画している。大形の部品があるので、機械装置および電源には大きなものが必要である。機械装置としては、加工する材が少なくとも1m×2mの面積を収容できるもの、電源としては最高加工速度25~50g/minのものが要求される。電極は重量(取扱いの便さを考えて)の制限などから、電鍮による銅電極あるいはグラファイト電極を使用するのがよい。

## 4. 研究所試作工場における放電加工機の使用状況

放電加工機の応用というと、型加工が、主であると考えられているが、型製作の専門工場ではない当社の中央研究所試作部における放電加工機の使用状況をみると、放電加工のいろいろな応用を考えるうえ参考になると考える。

DM 201 形機を昭和39年10月に設置して以来、約3年間ほとんど連日使用しているが、十分に放電加工の特長を発揮している。被加工物は、中性子スペクトロメータなどのロータのスリット加工、微小径穴あけの加工、抜型の加工、活字板成形用ダイ加工、部品加工などがある。被加工物の種類の件数比率を表4.1に、被加工物の材質別の分類を表4.2に示す。電極材料についての件数比率は、銅50%、黄銅30%、銀タングステン合金10%、タングステン6%となっており、その他タンタル、モリブデン、チタンなども使用している。

加工条件の使用ひん度を調査すると、面あらし10~12  $\mu\text{H}_{\text{max}}$  を得る加工ノッチが全加工件数の30%と一番多い。

次に加工例を数例示す。

### 加工例1 小径穴あけ (0.1 $\phi$ )

2mm厚のステンレス鋼板(SVS-27)に、0.1  $\phi$  の穴をあけるものである。加工した穴の100倍の顕微鏡写真を図4.1に示す。電極はタングステン線を用いたが、巻きぐせを直すには引張り力を加えた

表 4. 1 被加工物の形状による加工件数の分類  
Classification by figure of work.

加工形状	比率 %
スリット加工	50
丸穴加工	25
異形状 (抜型)	15
その他	10

表 4. 2 被加工物材料による加工件数の分類  
Classification by work piece material.

材料名	比率 (%)
ステンレス鋼	30
軟鋼	14
合金工具鋼焼入材	14
黄銅・銅	15
その他	27

注) その他には、タングステン、タンタル、モリブデン、コバルト、モネルなどがある。

状態で加熱し、切断するときも局部加熱して引張りきることが必要である。加工条件は、DE 24 H 形電源の1-1-1である。

### 加工例2 毛細管側面につけたスタッドの穴あけ (部品加工)

被加工物は、図4.2に示す構造のもので、放電加工によって0.3  $\phi$  の穴を2.6mmの深さにあけて、毛細管内の圧力を導くようにする。電極は図4.2に示す構造のホルダによって保持して加工する。被加工物の材料は黄銅を用い、DE 24 H 形電源の3-1-2の条件で加工し、6~7分で加工できた。

### 加工例3 半導体素子抜型

被加工物材料は、SKD-1 でロクウエル C 硬度60に焼入処理したものである。電極は銀タングステン合金を使用し、ポンチとは別個に電極を成形研削で製作する。被加工物の寸法および加工後の状況を図4.3に示す。DE 24 H 電源の3-2-1の条件で加工し、1時間30分で加工完了した。このときのクリアランスは0.02mmであった。

### 加工例4 各種抜型

図4.4~4.6の各種抜型について、表4.3に示す加工条件および加工時間であった。

### 加工例5 スリット加工

外径26mm、肉厚3mmの銅パイプに、スリット幅1.3mmピッチ5.6mmで54スリットの加工を行なった。被加工物が残留応力などで変

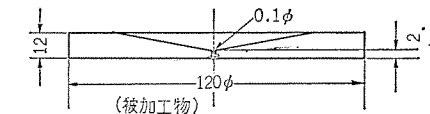
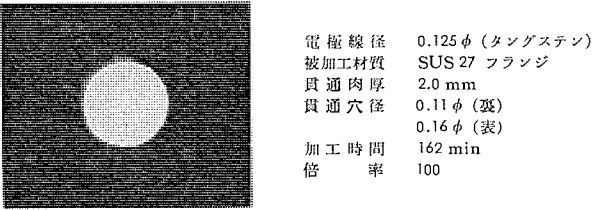


図 4. 1 小径穴あけの加工例  
Work sample of small diameter hole (0.1  $\phi$ ).

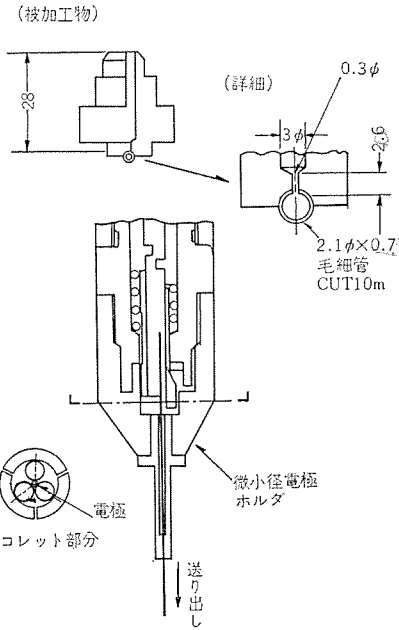


図 4. 2 毛細管側面への小径穴あけ  
Small hole on the side of capillary.



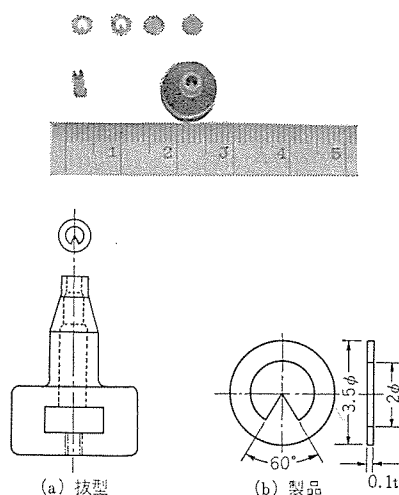


図 4.3 半導体素子抜型  
Punching die for parts of semi-conductor.

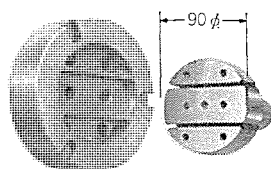
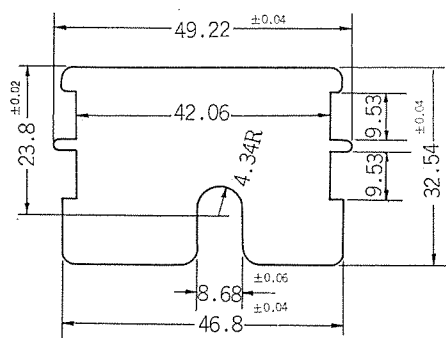


図 4.4 メタルガスケット 内形抜型  
Punching die for metal gasket.



(1) 製品板厚 1.2t  
(2) 材質 SPC1  
図 4.5 シールド板抜型  
Punching die for shield plate.

形することが心配されたので、管の両側に 6 mm の黄銅板をインジュムハンダ付けして補強した。加工中の状況、加工後の被加工物の様子を図 4.7 に示す。電極に 1.2 mm の銅板を用い、加工条件 7-5-3 で加工時間 9 時間 30 分であった。

加工例 テフロン活字板成形用ダイ

電極には市販の活字をそのまま使用した。被加工物材料はステンレス鋼板 (SVS-27) である。コンデンサ容量や、加工電流を小として活字合金をあまり消耗させないようにして加工した。レプリカキッドでテフロン板をモールド後、印刷に用いて実際に判定したところ、同じ活字電極を 3 度は十分に使用できることが判明した。加工条件 1-1-1 で加工深さ 0.34 mm 加工するのに約 1 時間 50 分を要した。加工は 10 本の活字を一諸に保護した電極を使用した。このときの仕上面あらさは約  $2 \mu\text{H}_{\text{max}}$  であった。

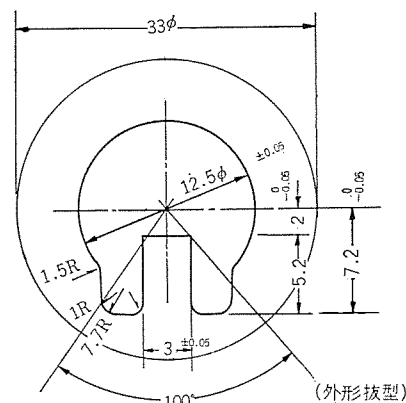
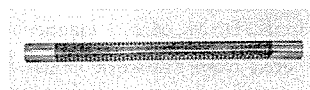
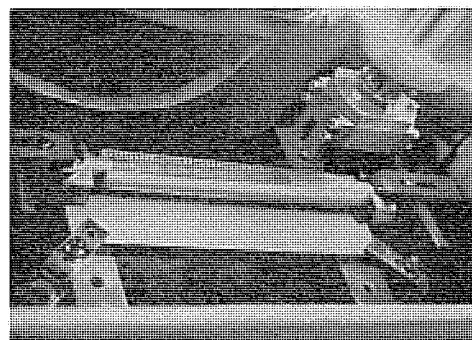


図 4.6 円形メタルキャップ抜型  
Punching die for metal cap.



(被加工物)



(加工状態)

図 4.7 MH スリット  
Work sample of slit.

表 4.3 各種抜型の加工条件  
Machining data for punching dies.

図 番 号	図 4.4	図 4.5	図 4.6
品 名	メタルガスケット	シールド板	円形メタルキャップ
被加工物材料	SKD-11 焼入材	SKS-3 焼入材	SKD-11 焼入材
電極材料	銅	黄銅	銀タングステン合金
加工条件	5-3-3	5-4-3	5-3-3
加工深さ mm	10	15	2.5
加工時間	7 h 20 min	6 h	6 h*
面あらさ $\mu\text{H}_{\text{max}}$	10	15	10
クリアランス mm	0.03	0.04	0.035

\* 印は下加工なし

## 5. む す び

本文では、放電加工機を実際に使用する場合に必要事項と、各種の応用例を述べた。これまでの機械加工法にくらべ、幾多の長所をもつ放電加工機が、今後ますます応用範囲を広くしてゆくものと確信している次第である。本文も、この応用分野の開拓のなんらかの参考となれば、望外のよろこびと考えている。

## 参 考 文 献

- (1) 斎藤：精密機械，29，10 (昭 38)

## 低電極消耗放電加工における電極の表面構造

田中 利夫\*・加藤 強\*・片寄 文隆\*

## Surface Structure of Electrode in Electrical Discharge Machining of No Electrode Wear

Nagoya Works Toshio TANAKA・Tsuyoshi KATÔ・Fumitaka KATAYOSE

In electrical-discharge machining on the no electrode wear circuit, one of the reasons of being none or negligibly small wear of the electrode seems to be ascribed to black coating produced on the electrode surfaces.

In this connection, the chemical composition and structure of the black coating produced on the electrode surfaces has been examined with a microscope, a spectroscope, an X-ray microanalyzer and an X-ray powder camera. As a result, it has been revealed that the black coating produced in E. D. M. of soft magnetic iron consists of fine powdery graphite produced by thermal cracking of kerosene,  $\alpha$ -Fe (martensite) transferred from the work in the form of white, point-shaped deposits and a small quantity of  $\gamma$ -Fe (retained austenite).

## 1. ま え が き

低消耗放電回路において電極の低消耗がなり立つ理由としては、陰極・陽極へのエネルギー配分および電極表面に生ずる黒色皮膜の二つが考えられ、これらの要因がうまく合致して、低消耗が達成されることが言われている。これらの2要因のうち、黒色皮膜については、その組成、構造などがこれまでに報告されていないので、この論文では銅を加工電極（極陽）とし、二三の材料を被加工物（陰極）とした場合に形成される黒色皮膜について、その組成および構造を、光学顕微鏡、発光分光分析、X線マイクロアナライザおよびX線粉末カメラにより調べた。

## 2. 加工装置および加工条件

放電加工機としては、三菱電機製 DIAX DM-220 を用い、その放電回路を図 2.1 に示す<sup>(1)</sup>。加工原理については、文献(1)に述べられているので、ここでは省略する。加工電極としては銅（陽極）を用い、被加工物を陰極とする低消耗放電加工回路である。加工液には三菱煙霧灯油を使用した。放電加工の条件を表 2.1 に示す。

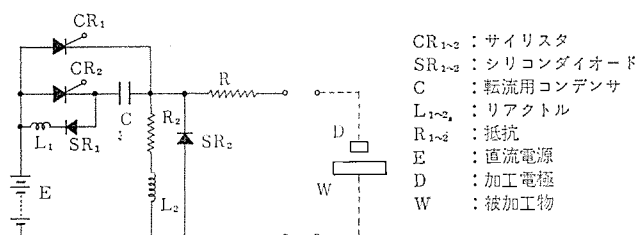


図 2.1 放電加工回路  
Circuit of electrical discharge machining.

表 2.1 放電加工の条件  
Conditions of electrical discharge machining.

Setting No	加工区分	電 流 A	電 圧 V	$\tau_p + \tau_c$ $\mu s$	$\tau_r$ $\mu s$	備 考
9	荒加工	25~30	40~45	900	500	
7	中加工	10	40~45	300	300	
3*	精加工	1.5~2.5	80			

\*図2.1の回路ではない

## 3. 被加工物の種類

表 3.1 に被加工物の種類と化学成分を示す。FC-15 および アルミニウム 地金は鋳造のまま、SUJB-2 および SK-5 は焼なまし状態で加工に供した。

表 3.1 被加工物の化学成分  
Chemical composition of work materials.

種類	化学成分	C	Si	Mn	P	S	Fe
SUJB-2		0.006	0.20	0.14	0.004	0.011	残
SK-5		0.84	0.28	0.40	0.012	0.007	残
FC-15		3.34	2.64	0.53	0.067	0.044	残
アルミニウム地金		—	0.06	—	—	—	0.14

## 4. 実験結果

## 4.1 光学顕微鏡による観察

一例として、SK-5 を被加工物とした場合の各種加工条件による加工電極および被加工物表面の顕微鏡写真を図 4.1 に示す。また、加工条件 No. 7 で加工した場合の、各種被加工物に対する電極表面の顕微鏡写真を図 4.2 に示す。これらの結果から、電極表面は、被加工物が移転溶着したと思われる白色点状の付着物（アルミニウム 地金の場合、多少広がりをもつ）と黒色微粉状の付着物からなることがあきらかである。そして、この白色点状の付着物は荒加工（加工条件 No. 9）になるほど大きくなり、また、その量も多くなる。つぎに、これらの付着物が電極表面に対してどのように付着しているかをみるため、断面のミクロ組織を調べた。図 4.3 は被加工物として SUJB-2 および アルミニウム 地金を用い、それぞれ No. 9 の条件で加工した場合の顕微鏡写真である。白色付着物が組織変化のほとんどない銅電極表面にとつ（凸）状に溶着しており、その周囲を黒色微粉状の付着物がうめている。

## 4.2 発光分光分析による付着物の組成の検討

つぎに、これらの黒色皮膜の組成を知るために、図 4.4 に示すような条件で発光分光分析を行なった。

分析試料は、つぎに示すとおりである。

- 三菱煙霧灯油（加工後）
- 東洋ろ紙 No. 6
- 加工電極（被加工物 SUJB-2）

- d. 加工電極 (被加工物 SK-5)  
e. 加工電極 (被加工物 FC-15)  
f. 加工電極 (被加工物 アルミニウム 地金)

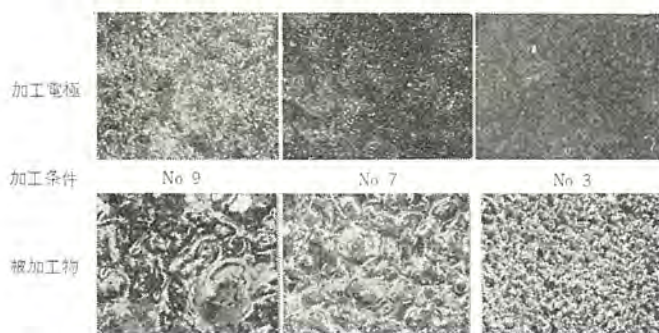


図 4.1 放電加工後の電極および被加工物 (SK-5) の表面×6  
Surface of electrode and work after electrical discharge machining.

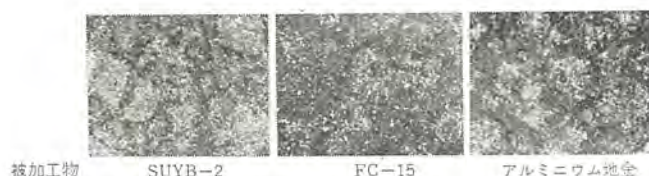


図 4.2 放電加工後の電極表面。加工条件 No. 7×6  
Electrode surface after electrical discharge machining.  
Machining condition No. 7.

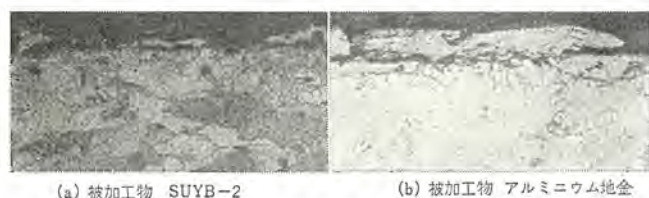


図 4.3 電極表面上の付着物 (断面)×54  
Deposit on the electrode surface. Cross section.

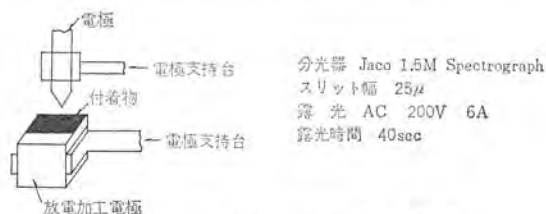


図 4.4 発光分光分析の条件  
Condition of spectrographic analysis.

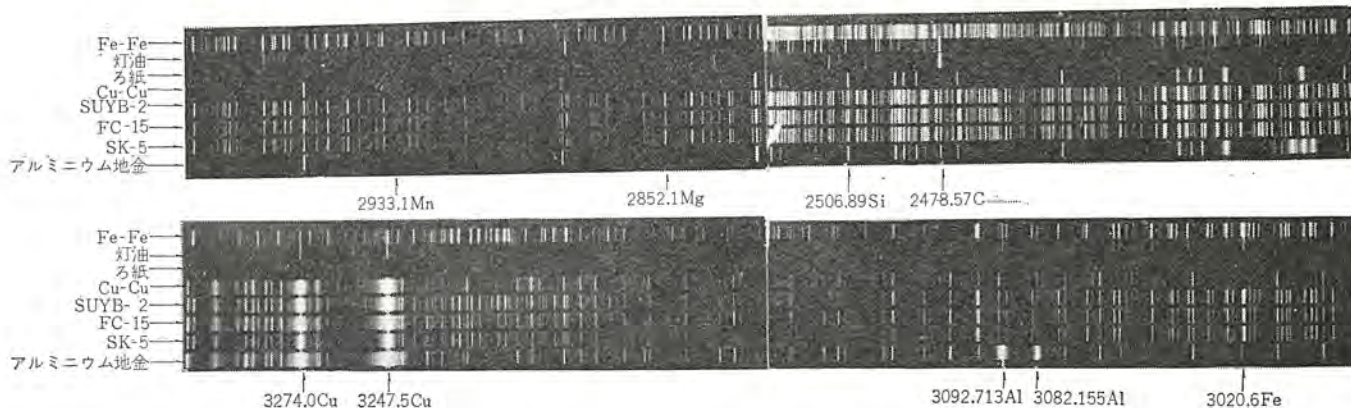


図 4.5 電極表面上の黒色皮膜および加工に用いた三菱煙霧灯油の蒸留残分の分光写真  
Spectrogram of black coating on the electrode surface and residue distilled from  
MITSUBISHI fogging kerosene used in electrical discharge machining.

被加工物の加工条件はすべて No. 9 である。分光分析用電極は、a, b の場合、炭素電極、他は銅電極を使用した。三菱煙霧灯油は、100 ml を蒸留 (シリコンオイルパス 200°C) し、残分を東洋ろ紙 No. 6 でろ過してろ紙に残ったものを灰化後試料とした。分析結果を図 4.5 および表 4.1 に示す。これらの結果から、被加工物が鉄系材料であれば鉄が、またアルミニウム材料であれば、アルミニウムが、炭素とともに付着していることがわかる。この結果より炭素は灯油の熱分解により生成することは明らかである。

これら一連の加工実験において、灯油を各実験ごとに入れ替えていないので、灯油中には被加工物ちゅうの各種元素が蓄積し、同一灯油を長期にわたって使用すれば、これらの元素が加工電極の表面に付着することが考えられる。なお、灯油が放電加工による分解以外に本質的に変質するのではないかと心配し、一連の加工実験後、赤外吸収を測定したが、和光純薬製ケロシンと比較してもほとんど変わっていないことを知った。波長 12~15 ミクロンのところに多少差があるのは、灯油中の芳香族含有量の差のためである。(図 4.6)

表 4.1 電極表面上の黒色皮膜および加工に用いた三菱煙霧灯油の蒸留残分の分析結果

Analytical results of black coating on the electrode surface and residue distilled from MITSUBISHI fogging kerosene used in electrical discharge machining.

被加工物	主成分	その他
SUYB-2	Fe, C	Mn, Si, Mg
SK-5	Fe, C	Mn, Si, Mg
FC-15	Fe, C	Mn, Si, Mg
アルミニウム地金	Al, C	Fe, Si, Mg
使用した三菱煙霧灯油	Fe, Al, Cu, Mg	

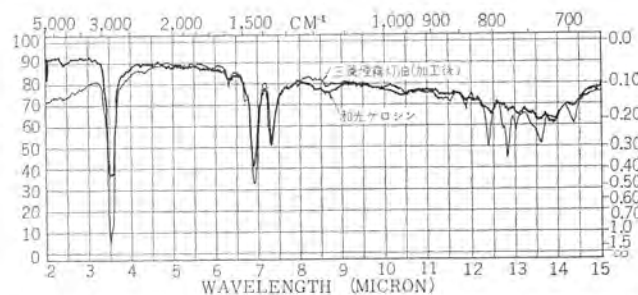


図 4.6 灯油の赤外吸収スペクトル。加工に使用した三菱煙霧灯油と和光純薬製ケロシンとの比較

IR-spectra of kerosene. Comparison MITSUBISHI fogging kerosene used in electrical discharge machining with kerosene manufactured by Wako Pure Chemical Industries Co Ltd.



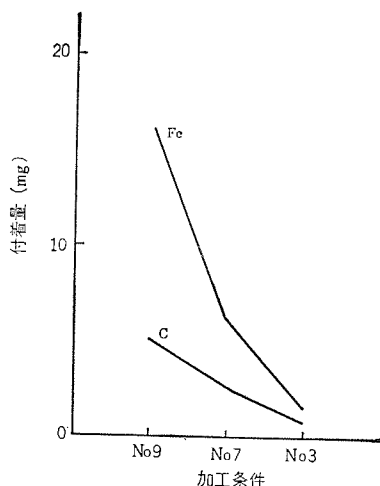


図 4.7 加工条件が付着量におよぼす影響  
Effect of electrical discharge machining condition on amount of deposit.

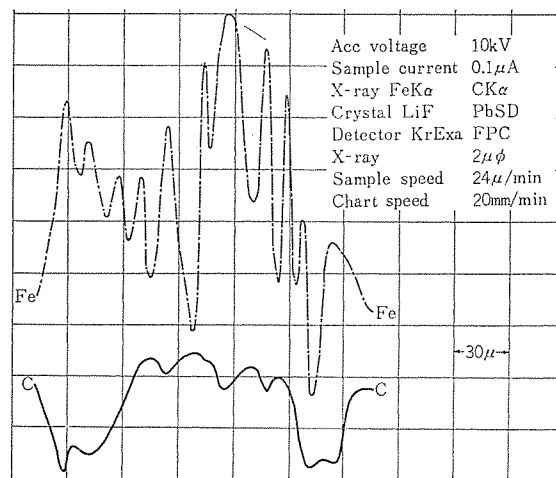


図 4.8 電極表面上の黒色皮膜の電子プロブマイクロアナライザによる分析。鉄と炭素の分布  
Electron probe microanalysis of the black coating on the electrode surface. Distribution of Fe and C.

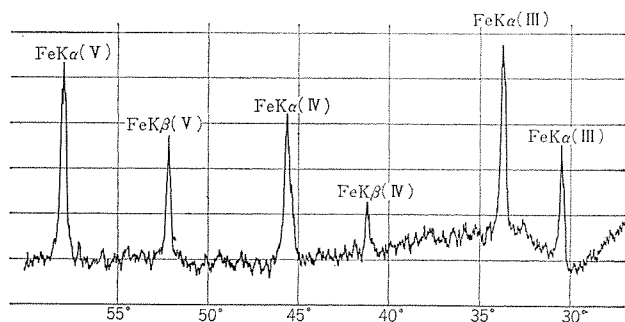


図 4.9 SUYB-2 の加工の際に、電極表面に生じた白色、点状付着物の E. P. M. A. 点分析  
E. P. M. A. point analysis of white, point-shaped deposit produced on the electrode surface in electrical discharge machining of SUYB-2.

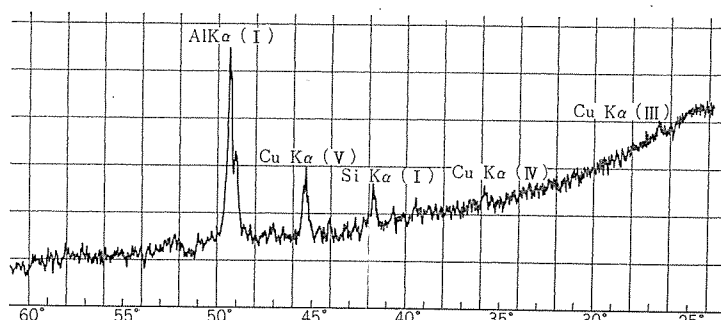


図 4.10 アルミニウム地金の加工の際に、電極表面に生じた白色、点状付着物の E. P. M. A. 点分析  
E. P. M. A. point analysis of white, point-shaped deposit produced on the electrode surface in electrical discharge machining of virgin aluminum ingot.

#### 4.3 黒色皮膜に存在する主元素の定量

10×50 mm の電極面積に対して、3 分間加工後の加工条件と付着量との関係を、被加工物 SK-5 の場合について示すと、図 4.7 のようになる。付着量は鉄、炭素ともに、荒加工ほど多くなる。鉄と炭素との付着割合は 3/1~2/1 程度の重量比で鉄の割合が多いが、体積では炭素のほうが多い。

#### 4.4 X線マイクロアナライザによる分析

まず被加工物を SK-5 とし、No. 9 の条件で加工した銅電極表面についてスキャンングにより、鉄および炭素の分布を調べた結果を図 4.8 に示す。このチャートから、鉄、遊離炭素および何らかの炭化物の存在することが予想される。遊離炭素については、筆者らが別に試みた電極表面の特性 X 線像によっても確認されているが、SK-5 はもともと 0.84 % の炭素を含有し、その大部分を球状化した  $\text{Fe}_3\text{C}$  の形で存在させているため、放電加工ちゅうにおける  $\text{Fe}_3\text{C}$  の挙動を知らないと、鉄および炭化物については単に被加工物が移転、溶着したものか、新たに形成されたものかを知ることはできない。

そこで解析をより単純化するため、つぎに、第二元素をほとんど含んでいない SUYB-2 および アルミニウム地金についての検討が必要である。したがって、図 4.3 (a) および (b) に示した点状付着物がどのような組成をもっているかを調べるために、加速電圧 20 kV、吸収電流 0.15  $\mu\text{A}$ 、ビーム径 2  $\mu\text{m}$ 、チャートスピード 20mm/min、角度

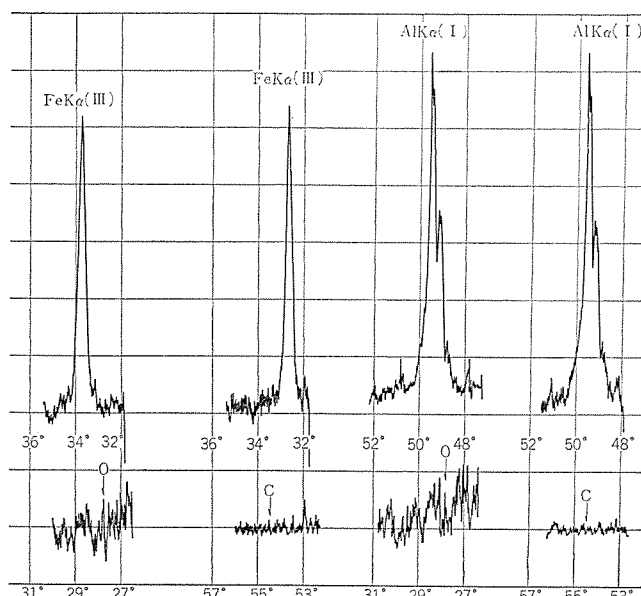


図 4.11 白色付着物ちゅうの炭素および酸素の E. P. M. A. 点分析  
E. P. M. A. point analysis of carbon and oxygen in white deposit.



スピード  $2^\circ/\text{min}$ , 結晶 Quartz (鉄) Mica (アルミニウム 地金) の条件で、この部分の電子ラローマイクロアナライザによる点分析を行なった。

図 4. 9 は図 4. 3 (a) に示した白色付着物に対して垂直に、また図 4. 10 は図 4. 3 (b) に示した白色付着物に対して、付着方向から照射したときの結果である。アルミニウム地金の場合、銅電極からと思われる銅のピークが現われているが、これらの結果はいずれも、黒色皮膜全体を分光分析にかけたときと、ほぼ同じ結果になった。つぎに、これら白色付着物ちゅうの炭素および酸素の存在の確認を、加速電圧 20 kV, 吸収電流  $0.15 \mu\text{A}$ , ビーム径  $10 \mu\text{m}$ , チャートスピード  $10 \text{ mm/min}$ , 角度スピード  $1^\circ/\text{min}$ , 結晶 Lead stearate の条件で行なった。その結晶を図 4. 11 に示す。いずれも、炭素および酸素は検出できず、 $\alpha\text{-Fe}$  であることが確認された。したがって、被加工物が移転したものであるということができる。

#### 4. 5 X 線粉末カメラによる付着物の同定

SUYB-2 を被加工物とし、各種の条件で加工した銅電極表面上の付着物をかきとり、X 線粉末カメラにより調査した結果、グラファイトと  $\alpha\text{-Fe}$  (マルテンサイト) のほかに、 $\gamma\text{-Fe}$  の存在が確認された。グラファイトは灯油の熱分解により生じたものであり、 $\alpha\text{-Fe}$  (マルテンサイト) は被加工物の溶融、移転、急冷により生じたものである。 $\gamma\text{-Fe}$  は、おそらく炭素の侵入した微粉状鉄の急冷効果、および表面効果による残留 オースタイト<sup>(2)</sup>が現われたものと考えられる。他の材質については未確認であり、今後の検討が必要である。

### 5. む す び

低消耗放電加工回路により加工する際に生ずる銅電極表面上の無

色皮膜について、光学顕微鏡、発光分光分析、X 線マイクロアナライザおよび X 線粉末カメラにより、その組成および構造を調べた。その結果、

(1) 鉄系材料の加工の際に形成される黒色皮膜の主成分は、鉄と何らかの炭素である。

(2) アルミニウムの場合、アルミニウムと何らかの炭素が主成分である。

(3) SUYB-2 を被加工物とした場合に生ずる黒色皮膜の構造は、グラファイト、 $\alpha\text{-Fe}$  (マルテンサイト) および  $\gamma\text{-Fe}$  である。他の被加工物についても、炭素の大部分はグラファイトの形で存在する。

(4) グラファイトは灯油の熱分解により生じたものと考えられる。

(5)  $\alpha\text{-Fe}$  は白色付着物となって銅電極表面に溶着しており、被加工物が溶融、移転、急冷によって生じたマルテンサイトと考えられる。

(6)  $\gamma\text{-Fe}$  は炭素の侵入した微粉状鉄が、急冷効果および表面効果により生じたものと推察される。

最後に、この実験に対し、ご指導とご援助をいただいた三菱電機中研小巻係長および北電杉岡研究員に厚く感謝の意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- (1) 斎藤ほか：精機学会講演会 昭和 41 年 11 月秋季大会予稿 No. 410.
- (2) 長島, 西山：日本金属学会誌, 23, 728 (昭 34)

## 電解加工機による実作業例

末次宏志\*

## Application of Electro-Chemical Machines

Nagoya Aircraft Works, Mitsubishi Heavy Industries

Hiroshi SUETSUGU

For the component parts of small gas turbines developed in the Nagoya Aircraft works, Mitsubishi Heavy Industries are used a good number of heat resistant alloys which are hard to cut. This poses many problems in the machining technique and working man-hours. Paying the attention to the electro chemical machining under the circumstances, Mitsubishi Heavy Industries asked the Nagoya Works of Mitsubishi Electric Corporation for technical cooperation to carry out numerous tests. As a result, fair prospects of practicability was held out. Then, in Oct. 1964 Mitsubishi electro chemical machines, DIASINKER type MC-20 V were introduced to the plant and now all kinds of turbine parts including turbine wheels and also oil pressure apparatus components are machined by the new technique.

## 1. ま え が き

三菱重工名古屋航空機製作所において開発した小型ガスタービンエンジンの部品には、切削性の悪い耐熱合金材料が多く使われているので、加工技術面加工工数面に幾多の問題があった。この問題を解決するため、各種加工方法を検討した結果、電解加工法に着目し、電解加工機の先駆者であった三菱電機株式会社名古屋製作所に技術的協力をお願いし、昭和38年4月以降数か月にわたり、各種試験を繰り返した。その結果タービン翼車の翼加工およびノズリング翼形穴加工に実用化の見通しがついたので、昭和39年10月三菱電機製電解加工機MC-20V形を一部改造して導入した。以来、タービン翼車をはじめとする各種ガスタービン部品ならびに油圧部品などの加工に実用している。以下加工実用例を述べる。

## 2. 概 要

電解加工機導入後、約2年半経過して、その間タービン翼車をはじめとする各種部品に電解加工法を実用してきた。

## 実用の結果

(1) 被削性が悪く、機械的な加工方法では加工不可能あるいは加工困難な部品

(2) 切削工具形状に制約をうけ、通常の機械加工法では加工困難な部品

(3) 機械的な加工ではひずみを生じやすい部品

(4) 加工熱をきらう部品

(5) 複雑形状部の面取り、およびバリ取り

などの加工にはきわめて有効な加工方法であるということを実証、確認した。

電解加工に対する今後の課題としては、

(1) 電解加工の特質に応じた加工対象部品の選定を行なうこと。

(2) 電解加工による加工精度を向上させ、適用範囲の拡大をはかることなどが考えられる。

## 3. 実 用 作 業 例

## 3.1 小型ガスタービンエンジン用タービン翼車の翼加工

タービン翼車は図3.5に示すごとく、ねじれを持ったテーパー翼を車板から一体に削り出す形状になっている。翼の加工は、従来ならい

ミーリングマシンにて加工後、手仕上にて翼面をみがき、完成していた。しかし材料が被削性の悪い耐熱合金であるうえ、使用カッター径が細いので、多くの加工時間がかかっており、加工面も粗雑であった。そのため手仕上工数も相当かかっていた。

そこで工数低減対策として、翼の荒加工および中仕上加工に電解加工を適用し、大きな工数低減をみた。加工精度については、翼のねじれ形状の関係から翼最終形状公差以内までの加工には困難な点があったので、わずかの仕上げしるを残しており、最終寸法の決定は他の工程で行なっている。電解加工によるタービン翼車加工方式には、次の2方式が考えられたが、荒加工の容易さ、要具整備の容易さ、2側面同時加工可能、翼面に加工液噴出口跡が残らないなどの理由により(1)方式を採用している。

(1) 電極をタービン翼車の半径方向に進行させる方式

(2) 電極を翼面に直角方向に進行させる方式

方式(1)による場合でも、翼間除去部分の両側にはテーパーおよびねじれがあるため、2工程に分割して加工している(図3.3)。タービン翼車は半径方向にテーパーがついており、翼にはねじれがあるため、図3.4に示すような電解液誘導装置を用意した。

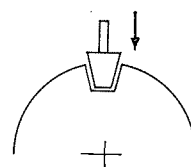


図 3.1 電極進行方向 (1)  
Feed direction of electrode (1).

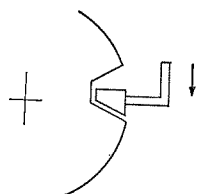


図 3.2 電極進行方向 (2)  
Feed direction of electrode (2).

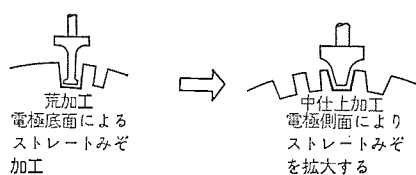


図 3.3 タービン翼車加工方法  
Machining method of turbine wheel.

### 3.2 小型ガスタービンエンジン用ノズルリングノズル翼取付穴の加工

ノズルリングは耐熱材料で作られ、図 3.8 に示すものである。リングの円周上には、タービン翼車へ燃焼を案内するノズル翼を植え込むための翼形状の穴があいている。このノズル翼取付穴の加工は、当初、生産数量の関係からならいミリングマシンにて加工していたが、翼形状穴形状に制約をうけ、最小径3φのカッターの使用が必要で、加工能率が悪かった。後縁部ではさらに幅が狭く、機械加工が不可能な

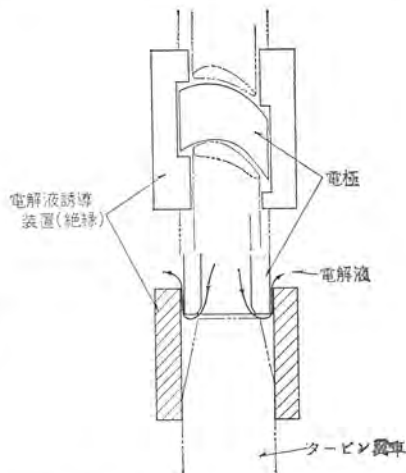


図 3.4 電解液誘導装置  
Control device of electrolyte.



図 3.5 タービン翼車  
Turbine wheel.



図 3.6 荒加工用電極  
Rough machining electrode.



図 3.7 中仕上加工用電極  
Middle finishing electrode.



図 3.8 ノズルリング  
Nozzle ring.



図 3.9 電極  
Electrode for nozzle ring.

ため、ノズル翼をそう入する際、手仕上にてこの未加工部分を除去していた。ここに電解加工法を適用した結果、未加工部分は解消し、翼形状穴形状も正規形状とほぼ一致し、加工工数も著しく低減した。

### 3.3 油圧ポンプ用ロータドリル穴の面取り

この部品は当社で製作しているペーン形油圧ポンプのロータで、スロットの奥にけられたドリル穴にR面取りを施す例である。ロータには機能的にみて図 3.10A 部分にR形状の面取りを施す必要がある。しかしドリル穴はスロットの奥にあり、ドリル穴口元形状は3次元形状のため、一般の機械加工では面取り不可能で、手作業でも困難を伴っていた。また手作業の欠陥としてツールマークがついた。ロータ1個に穴が30個あるため、手作業による面取り工数も大きかった。電解加工による穴加工の際、電極形状および加工条件によっては、穴の口元がR形状になる現象、ならびにスムーズな仕上面が得られる点にヒントをえて、上記面取り作業に電解加工を適用した。結果は、仕上面あらさが1~3-SのR面取りができ、所期の面取り工数の低減を達成することができた。他の2種のロータにも当工法を利用している。

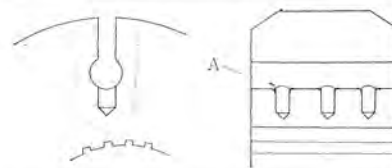


図 3.10 面取り箇所  
Deburring position.



図 3.11 ロータ  
Rotor.



図 3.12 電極(ロータ3個同時加工用)  
Electrode for deburring of rotor  
(This electrode deburs three rotors simultaneously).

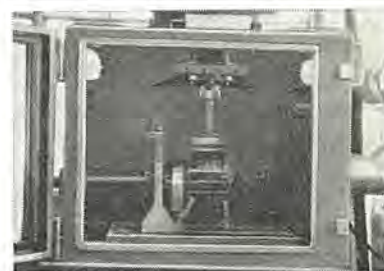


図 3.13 加工状況  
The deburring state of rotor.

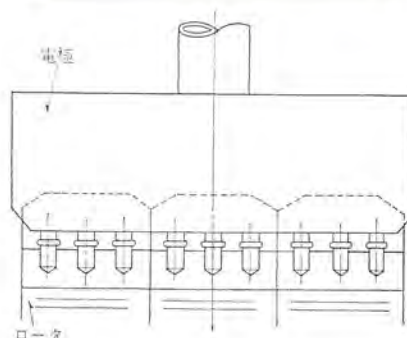


図 3.14 加工方法  
(ロータ3個同時加工)  
Deburring method  
(Three rotors are deburred simultaneously).

図 3.15 電極の説明  
Explanation of electrode.

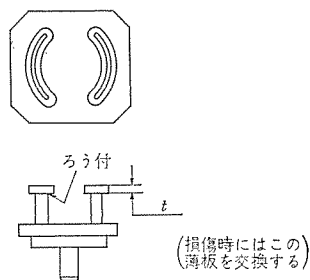


図 3.16 ポートプレート  
Port plate.

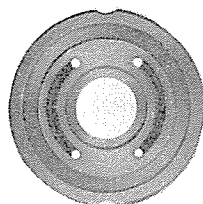
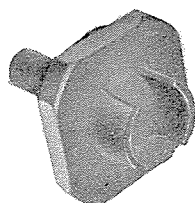


図 3.17 電極  
Electrode for port plate.



#### 3.4 油圧ポンプ用ポートプレート円弧形状みぞの加工

図 3.16 に示すポートプレートは、当所で製作している小型軽量高圧（最高  $316 \text{ kg/cm}^2$ ）ピストン形油圧ポンプの部品である。外径  $80 \text{ mm}$  厚さ  $8 \text{ mm}$  の円板状のものにみぞ幅約  $4 \text{ mm}$  の円弧状の貫通みぞを加工するのに従来はエンドミルによっていたが、材料の被削性が悪く、エンドミル径が細いため、切込みおよび送りが大きくとれなかった。また2個の穴を片方ずつ加工していたため、加工工数が大きかった。電極設計・製作上の問題点は電極の電解液噴出みぞ加工方法であったが、放電加工法を適用することにより解決できた。電極は加工穴のバックテーパー防止策および短絡損傷時の修正を考慮し、薄板  $t$  をろう付けする構造をとっている。ほかに同種類のもの3種につき試験中である。

#### 3.5 航空機エンジン用ディスチャージノズルの1部切断

当社では各種エンジンのオーバーホールを行なっているが、あるエンジンのオーバーホールの1項目にディスチャージノズルの摩耗損傷部を切断除去し、代材を溶接する作業が規定されている。ディスチャージノズルは耐熱合金板製の筒形状のため、切断除去作業では作業中にひずみが生じやすく、ひずみ修正作業を要する場合があります。被削性も悪いため切断工数も大きかった。電解加工適用の結果、両問題点とも解消した。

図 3.18 ディスチャージノズル  
Discharge nozzle.

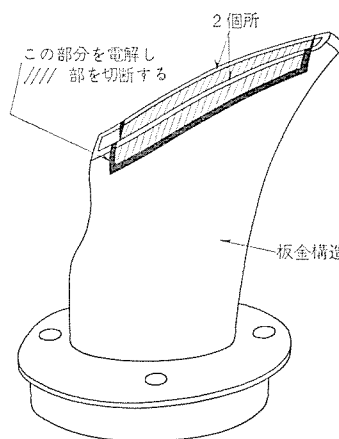
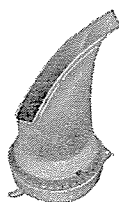


図 3.19 ディスチャージノズル  
Electrode of discharge nozzle.



図 3.20 電極  
Electrode of discharge nozzle.

## 4. む す び

以上、電解加工機設置以降の実用化例を数種述べたが、電解加工法は前記第2項に記した作業に、今後ますますその適用範囲が拡大されてゆくものと確信している。そのためには上記と平行して下記のような点につき、さらに改善ならびに検討を加えることが必要であると考えられる。

すなわち、

- (1) 電解液を均一に噴出させる電極の研究および設計
- (2) 被加工物の材質に適した電解液の選定
- (3) 電解液の適切なろ過
- (4) 薄い層で絶縁でき、しかも強固な付着力を有する絶縁方法の採用
- (5) 三次元形状電極に対する定電流密度、電極送り方式の採用
- (6) 被加工物の自動分割
- (7) 電解加工法を意識した部品の設計

などである。なお電解加工用取付具および電極の設計などについては、実際の作業で習得した技術ならびに知識をマニュアル化して、設計方法の標準化をはかっている。



## 電解加工の加工原理と加工特性

前田 祐雄\*・斉藤 長男\*\*・葉石雄一郎\*\*\*

## Principle and Characteristics of Electro-Chemical Machining

Sagami Works Sachio MAEDA

Nagoya Works Nagao SAITÔ・Yûichirô HAISHI

Effect of work materials on the machining efficiency in electro-chemical machining has been studied in regard to various kinds of materials. In machining of annealed carbon steel, attention has been paid to the fact that the actual working rate is found a few percent higher than the theoretical working rate in machining of pure iron and these ratio is provisionally determined as an apparent current efficiency, explanation being made that the current efficiency is observed higher than 100 % based on an assumption of  $Fe_3C$  among the constituent falling off. Together with this explanation the worked surface roughness is made to be represented by a function of carbon content. As for 18-8 stainless steel work ability has been improved by addition of  $NaNO_3$  to the electrolyte. And further machining of sintered tungsten carbide considered almost impossible with direct current has been made practicable with alternating current. Machining characteristics and the principle of operation has been described.

## 1. ま え が き

電解加工法は電気分解を応用して金属加工を行なうことを目的としたもので、電解作用の利用法の相違により電解研削法と電解加工法（電解穿孔法）とにわけられる。

前者はメタルボンドのダイヤモンドと（砥）石などを用い、電解液を研削液の代わりにかけながら通電研削するもので、被加工物の電気化学的溶出と機械的な研削を併用したいわゆる複合加工法で、主として超硬合金のバイトなどの研削に用いられる。後者は陰極とした加工電極と、陽極とした被加工物を狭い間隔きで対向させ、その間隔きに食塩水などの電解液を高速で流通させながら高電流密度で電気分解を行なわせ、加工電極と被加工物間に相対送り込み運動を与えながら被加工物に加工電極どりの穴をあける方法で、機械的な研削などを伴わず純粋に電気化学作用だけで加工するものである。

この報告は後者に関するものである。

電解加工法においては、原理上加工電極の消耗はまったくなく、また比較的良好な仕上面で数十 g/min～100 g/min の加工速度を得られ、加工された材質の部分的変質がないなどの利点をもっているため急速な実用化が進められ、現在タービンブレードの成形加工、機械部品の加工のほか鍛造型の加工などに広く用いられている。

しかし電解加工を実際実施する場合、加工精度に影響する因子が非常に多く、これらの影響因子の変動がそのまま加工精度のばらつきとなって現われる。したがってこれをどのようにして、要求される製品の寸法公差内に押えるかが重要な問題となり、逆にこれらの影響因子の変動を製品寸法の加工精度許容範囲内にコントロールできるものには、すべて電解加工を実施できるといえる。加工精度に影響を及ぼす因子には次のようなものがある。

- (1) 加工電圧と電流および電流密度
- (2) 電解液の電気化学的性質と極間における流動状態
- (3) 被加工物の材質

このうち(1)は電源の特性ならびに加工電極または被加工物の送り込み方式により定まるもので、当社の電解加工機では定電圧電源方式ならびに定電流密度送り方式を採用することによって、これら

の変動をほぼ完全に解決している。

(2)の電解液の電気化学的性質は、電解液の種類、濃度、温度および電解液中に加工中に生ずる水素ガスと溶出金属水酸化物の濃度によって変化し、また極間における流動状態の変動は、電解液の粘性、加工電極に設けた電解液噴出口の形状、加工電圧と電流密度の影響を受けて大きく変動し、さらに被加工物材質によっても変動することがある。しかもこれらの影響因子間に相関関係があり、これらを完全にコントロールすることは非常にむずかしい。当社ではこの流動状態の変動に対して独特の高圧ガス混入方式を開発し、極間の流れを気液二相流としてキャビテーションの防止、側面壁を電解液が通過するときの比抵抗を増大することによって加工精度の向上をはかっている。また加工中の極間の状態を総合的に表わすものとして、見かけの比抵抗なる概念を実験的に導き、これを用いて単純形状の加工精度に対する加工精度を論じられるようにし、これに基づいて要求される製品寸法の加工を行なうことのできる電極形状の修正法をある程度確立した。

高圧ガス混入方式による加工精度の向上ならびに見かけの比抵抗の概念と、これによる加工精度の解析結果については、すでに詳細な発表をしており<sup>(1)(2)(3)</sup>、また電極修正法については本特集号の別の論文<sup>(4)</sup>に述べているので、ここでは省略する。

この論文では(3)の被加工物材質の加工精度に及ぼす影響に着眼し、各種の鋼材について加工特性を調べた結果と、従来の直流電解加工ではほとんど加工の行なえなかった超硬合金に、電解加工を可能とする加工方式を開発したので、その原理と実際について報告する。

## 2. 各種鋼材の電解加工

電解加工の応用分野は、航空機用部品、自動車用部品をはじめ一般的な機械部品の製品加工および鍛造型の加工など非常に多岐にわたるため、加工される材質も多種多様であり、それらの加工特性も材質の影響を受けてかなり異なった傾向を示す。

この章では数種の鋼材について電解加工を行ない、材質による加工特性の相違がどのように現われるかを調べた結果を述べ、さらに

加工条件によって加工結果が著しく異なる 18-8 ステンレス 鋼について、加工条件に左右されずに良好な加工を行なえる方式を見出すことができたのでその結果を述べる。

### 2. 1 各種鋼材の加工特性

電解加工に比較的良好に使用される材質の中から数種の鋼材を選び、実際に電解加工を行なってその加工特性、とくに加工速度と加工面あらしさを調べ、その結果を検討した。

実験に使用した材料の化学成分を表 2. 1 に示す。表中の炭素含有量は使用した各材料から試料を採取し、JIS-G 1211 によるガス容量法を用いて炭素分析を行なった値を示した。なおこれらの材料はそれぞれ標準の焼なまし処理を行なったもので、このうち数種を標準の焼入、焼戻し処理を行ない、焼なまし材との比較を行なった。

#### 2. 1. 1 実験条件

実験は直流電源を用い、定速送りで下記の実験条件のもとで加工を行ない、加工電流を測定した。

電極：四六黄銅、角型（対辺距離 24.5 mm、内径 6 mm）

面積 6 cm<sup>2</sup>

電解液：20 wt % NaCl 水溶液（比重 1.4）、流量 10 l/min

温度 30~40℃

加工速度：0.6 mm/min

#### 2. 1. 2 実験結果

表 2. 1 に示した各材質に対してそれぞれ深さ 2 mm まで加工を

表 2. 1 実験に用いた被加工物材質  
Work material used for experiment.

組成 材質	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V
SKD-1	2.12	0.40 以下	0.60 以下		12.00 ~15.00			
SK-3	1.08	0.35 以下	0.50 以下					
SKS-3	0.94	0.35 以下	0.90 ~1.20		0.50 ~1.00		0.50 ~1.00	
S 45 C	0.44	0.15 ~0.40	0.40 ~0.85					
SKD-61	0.39	0.80 ~1.20	0.50 以下		4.50 ~5.50	1.00 ~1.50		0.80 ~1.20
SCM-2	0.29	0.15 ~0.35	0.60 ~0.08		0.90 ~1.20	0.15 ~0.35		
SUS 23	0.29	0.75 以下	1.00 以下		12.00 ~14.00			
SNC-2	0.27	0.15 ~0.35	0.35 ~0.65	2.50 ~3.00	0.60 ~1.00			

表 2. 2 各材質に対する加工電流とみかけの電流効率  
Working current for various materials and  
apparent current efficiency.

材質	熱処理	項目		加工速度(mm/min)	みかけの電流効率	
		加工電流 I(A)	電流密度 J(A/cm <sup>2</sup> )		実験値 $U_a$	理論値 $U_{th}$ $U_a/U_{th} \times 100$ (%)
SKD-1	焼なまし	130	21.7	0.60	0.47	128
SK-3	焼なまし	140	23.4	0.60	0.51	118
	焼入、焼戻し	185	30.9	0.60	0.67	90
SKS-3	焼なまし	145	24.2	0.60	0.53	113
	焼入、焼戻し	180	30.0	0.60	0.65	92
S 45 C	焼なまし	160	26.7	0.60	0.58	103
	焼入、焼戻し	175	29.2	0.60	0.64	94
SKD-61	焼なまし	160	26.7	0.60	0.58	103
SCM-2	焼なまし	160	26.7	0.60	0.58	103
SUS 23	焼なまし	160	26.7	0.60	0.58	103
SNC-2	焼なまし	165	27.5	0.60	0.60	100

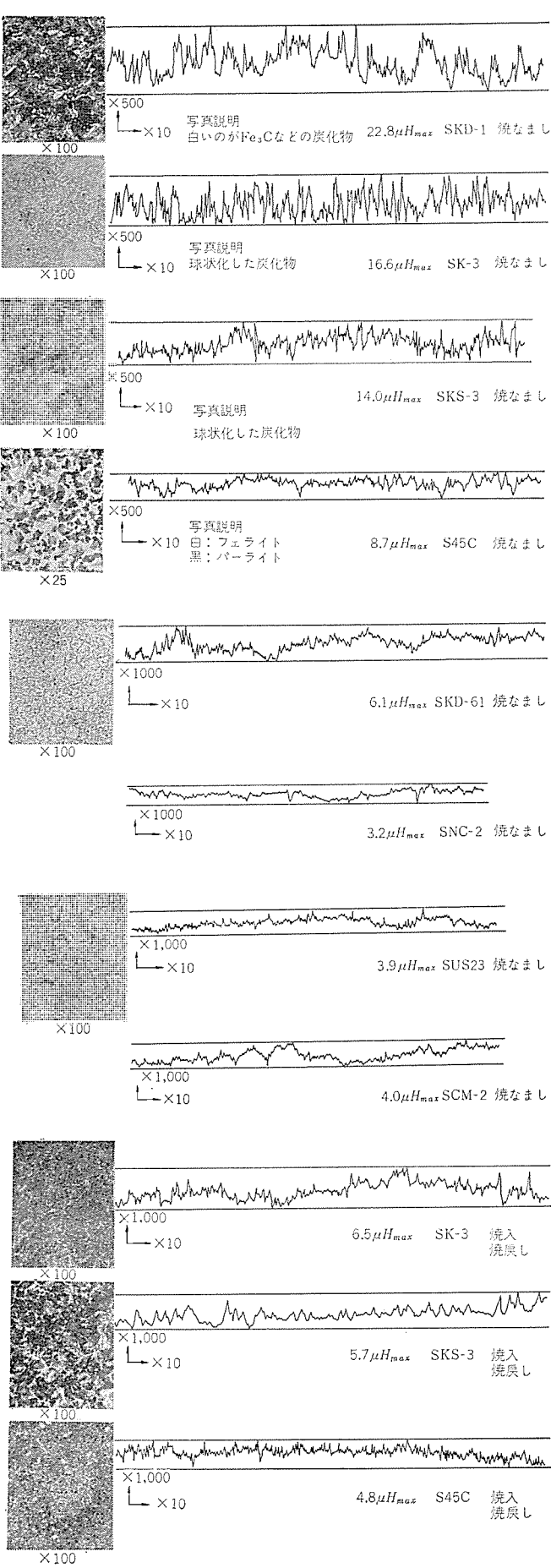


図 2. 1 加工面あらしと顕微鏡組成  
Surface roughness and photomicrograph  
of worked materials.

行ない、そのときの加工電流を測定した。測定はフルスケール 300 A、最小目盛 2 A、指示誤差  $\pm 0.5\%$  の可動鉄心型直流電流計で行ない、測定誤差はほとんど無視できる。ここで加工された量と等しい体積の Fe が、実験で得た加工電流値によって、電解溶出する理論加工速度を次式より求め、この理論加工速度と実験による加工速度の比を仮りにみかけの電流効率と定め、各材質に対するこれらの値を表 2. 2 にまとめた。

$$\text{理論加工速度 } U_{th} = \frac{60 \cdot K}{d} \cdot \frac{I}{A} \quad \text{cm/min} \dots\dots (2.1)$$

ここに  $K$ : Fe の電気化学当量  $\text{g/A} \cdot \text{s}$

$d$ : Fe の密度  $\text{g/cm}^3$

$I$ : 加工電流  $\text{A}$

$A$ : 加工面積  $\text{cm}^2$

$$\text{みかけの電流効率} = \frac{\text{実際の加工速度}}{\text{理論加工速度}} \times 100 \quad \% \dots\dots (2.2)$$

表にみられるようにみかけの電流効率が 100% を大幅に増加する材料が幾種類か存在することが見られる。また実験で得た加工穴底面のあらさ曲線を各材質の顕微鏡組織と対応させて図 2. 1 に示す。あらさは加工面における流れの方向とほぼ直角に測定したものである。

加工面あらさおよび上記のように仮定したみかけの電流効率と、炭素含有量との関係に着眼し、これをまとめてみると図 2. 2 および図 2. 3 のようになる。焼なましを行なった材料では加工面あらさ、みかけの電流効率のどちらも炭素含有量に対し、指数関数的に比例して大きくなる。この結果から焼なましを行なった各種鋼材の電解加工における加工面あらさとみかけの電流効率を炭素含有量の関数として、次の実験式を導くことができた。

$$\text{加工面あらさ } R = 9.62 I_n C + 15.6 \quad \mu H_{\max} \dots\dots (2.3)$$

$$\text{みかけの電流効率 } \alpha = 14.4 I_n C + 116 \quad \% \dots\dots (2.4)$$

ただし  $C$ : 炭素含有量 百分比  $C \geq 0.3\%$

焼入焼戻しを行なった材料については、焼なまし材に比べて加工面あらさは相当改良されて小さくなり、みかけの電流効率も低下して 100% 以下となる。しかしこの場合は炭素含有量との関係はあまり明白には認められなかった。

### 2. 1. 3 考 察<sup>(5)</sup>

焼なまし材において炭素含有量の多い材料ほどみかけの電流効率が増大し、加工面あらさが大きくなる原因について次のように考察してみた。

成分中の炭素は十分焼なましが行なわれると、ほとんど  $\text{Fe}_3\text{C}$  または  $(\text{Fe}, \text{Cr})\text{mCn}$  などの炭化物の形で存在する。高炭素鋼については炭化物は  $\text{Fe}_3\text{C}$  だけとなり、その量は一般に 1% の炭素が鉄鋼中に含まれるときには重量比 15% の  $\text{Fe}_3\text{C}$  として存在する<sup>(5)</sup>。この  $\text{Fe}_3\text{C}$  は直流電解では溶出しないと考えられるので、加工中の除去はまず周囲の Fe が溶出することによって  $\text{Fe}_3\text{C}$  は加工表面に露出し、結合が弱められて極間を流れる電解液の力で脱落すると考えるのが妥当である。

そこでこの考えに基づき、高炭素鋼について理論溶出量を計算すると次のようになる。

Fe 100% の場合の理論溶出量

$$U_{(\text{Fe})} = \frac{60 \cdot K_{(\text{Fe})}}{d_{(\text{Fe})}} \cdot J$$

Fe と  $\text{Fe}_3\text{C}$  からなる場合の理論溶出量

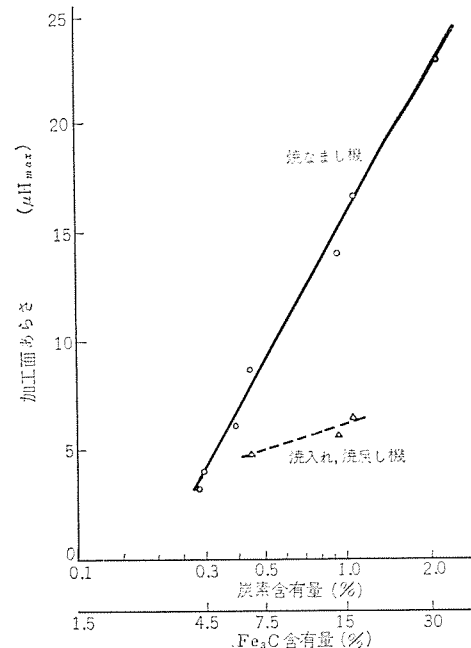


図 2. 2 炭素含有量と加工面あらさ  
Relation between carbon content and surface roughness.

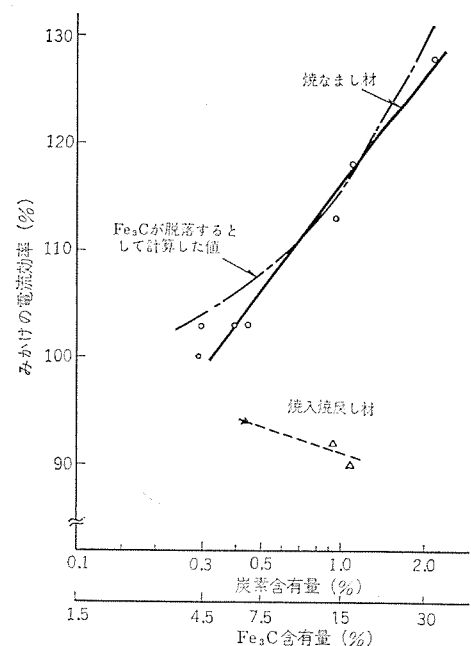


図 2. 3 炭素含有量とみかけの電流効率  
Relation between carbon content and apparent current efficiency.

$$U_{(\text{Fe}+\text{Fe}_3\text{C})} = \frac{60 \cdot K_{(\text{Fe}+\text{Fe}_3\text{C})}}{d_{(\text{Fe}+\text{Fe}_3\text{C})}} \cdot J$$

ここで Fe と  $\text{Fe}_3\text{C}$  からなる鋼のみかけの電気化学当量は

$$K_{(\text{Fe}+\text{Fe}_3\text{C})} = K_{(\text{Fe})} \cdot (1 + 15C)$$

また密度は

$$d_{(\text{Fe}+\text{Fe}_3\text{C})} = (1 - 15C) \cdot d_{(\text{Fe})} + 15Cd_{(\text{Fe}_3\text{C})}$$

ただし  $C$ : 炭素含有量 百分比

したがってみかけの電流効率は

$$\alpha = \frac{U_{(\text{Fe}+\text{Fe}_3\text{C})}}{U_{(\text{Fe})}} \times 100 = \frac{(1 + 15C) \cdot d_{(\text{Fe})}}{d_{(\text{Fe})} - 15C\{d_{(\text{Fe})} - d_{(\text{Fe}_3\text{C})}\}} \times 100$$

ここで Fe および  $\text{Fe}_3\text{C}$  の密度を代入すると

$d_{(Fe)}=7.86 \text{ g/cm}^3$ ,  $d_{(Fe_3C)}=7.30 \text{ g/cm}^3$  であるから

$$\alpha = \frac{7.86 + 117.90 \cdot C}{7.86 - 8.40 \cdot C} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

となり、炭素含有量の関数となる。この式を前に実験的に求めたみかけの電流効率の式 (2.4) と比較して示すと、図 2.3 の曲線のようになり、実験した材料中 Fe-C 系合金である S45C と SK-3 において得られた実験値と比較的よく一致する。なお成分中に Cr を含む他の材料においては、成分中の炭素はダブルカーバイド (Fe, Cr)mCn を形成するので、 $Fe_3C$  のみと仮定した上式でみかけの電流効率を論ずることはできないが、炭素含有量に比例してみかけの電流効率が増加していることは事実であり、このことから焼なまし材における成分中の  $Fe_3C$  または (Fe, Cr)mCn の除去は、前に考察したように脱落によって行なわれると考えてほぼ間違いないといえるのである。

加工面あらさについては、 $Fe_3C$  が脱落するまでの段階を考えると、周囲の Fe が溶出されて  $Fe_3C$  が突起として加工表面に露出し、これを発端として放射条こん(痕)を形成したり、あるいは脱落が起こるとその跡にくぼみを生じてこれによるキャビテーションが発生し、やはり条こんの原因になると考えられる。したがって炭素含有量の多いほど加工面あらさが悪化することが考えられる。また焼入焼もどしの材料では一般に焼なましのものよりも組織が微細化されるために、加工面あらさが小さくなると考えられる。

以上の結果から鋼材の電解加工においては、炭素含有量の少ないもの ( $C<0.4\%$ ) では、とくに他の成分元素の含有量の多いものでない限り  $7 \mu H_{max}$  以下の面あらさ、100% 前後の電流効率で加工できるので、加工性は非常に良好であり、また炭素含有量の多いものは、焼入焼戻しを行なってから電解加工を適用することにより、焼なまし材に行なうよりも良好な面あらさのもとに加工を行なうことができるといえる。

## 2.2 18-8 ステンレス鋼の電解加工

前節に一般的な鋼材について電解加工を行なった場合の加工面あらさなどの加工特性の傾向を求め、これを成分中の炭素含有量との関係で示すことができた。しかし 18-8 ステンレス鋼においては他の鋼材に認められた傾向に一致せず、加工特性は加工条件の影響、とくに電解液の性質に左右され、加工条件の選び方により大きな相違を示すことがわかった。そこでここでは加工条件が加工特性 (主として加工面あらさ) に及ぼす影響を調べた結果を述べ、さらに加工条件の影響を受けることなく良好な加工面を得る方式として、電解液の食塩水中に硝酸ソーダを添加することが非常に効果的であることを確かめたので、この結果について報告する。

### 2.2.1 食塩水のみによる加工特性

食塩水のみを電解液として加工した場合、加工面あらさに影響を及ぼす加工条件の中の因子として、電解液温度と電流密度が最も影響度の大きいことをあらかじめ確かめることができたので、他の加工条件を下記のように一定とし、電解液温度と電流密度を変化させて加工面あらさがどのように変わるかを調べてみた。

実験条件、

電極寸法：図 2.4 に示す。加工面積  $20 \text{ cm}^2$

図のように絶縁板を設け、加工中の極間の電解液の流れをほぼ平行流とした。

電解液：15 wt % NaCl 水溶液 (比重 1.10)

流量 50 l/min 温度 (入口)  $15 \sim 45^\circ \text{C}$

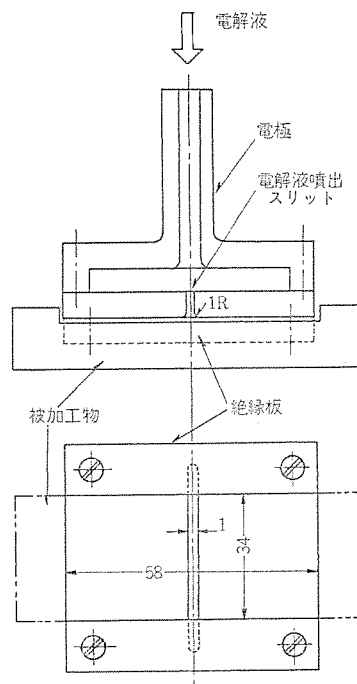


図 2.4 電極寸法  
Outline dimensions of electrode.

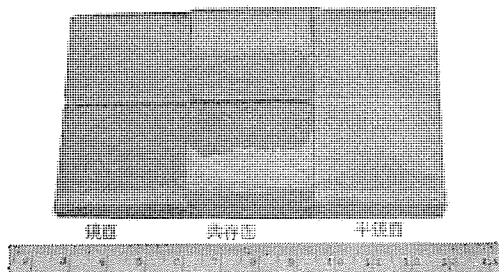


図 2.5 18-8 ステンレス鋼の加工面  
Worked surfaces in 18-8 stainless steel.

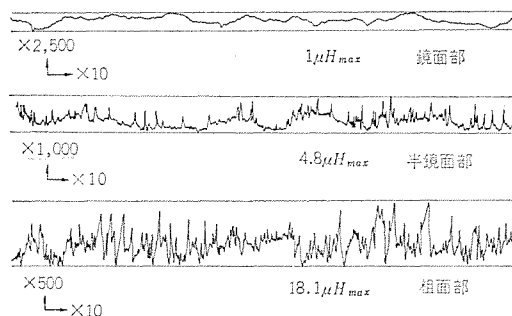


図 2.6 18-8 ステンレス鋼の加工面あらさ  
Surface roughness in 18-8 stainless steel.

加工電圧：12 V

電流密度：15~60 A/cm<sup>2</sup>

加工面は電解液温度と電流密度の変化によって次の四つの状態を呈する。これらの状態を図 2.5 に、また加工面あらさを図 2.6 に示す。

- (1) 鏡面：全面が  $1 \mu H_{max}$  以下の光沢のある鏡面となる。
- (2) 共存面：中央部に (1) の鏡面部があり、その外周部は  $10 \mu H_{max}$  以上の荒れた面となる。
- (3) 半鏡面：鏡面を生じる加工条件のうち電流密度の低い限界の近辺で加工をしたときに生じ、面あらさは 3 ~



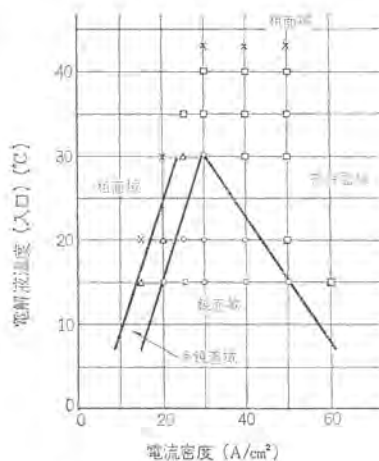


図 2.7 食塩水のみの場合の加工面分布  
Distribution of surfaces worked by only using the salt solution electrolyte.

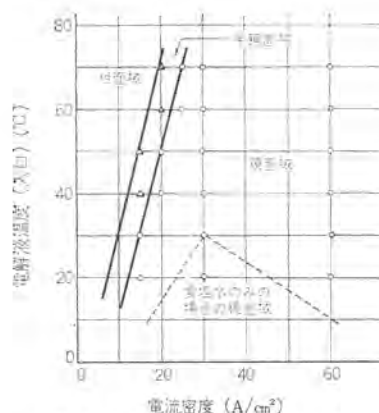


図 2.8 硝酸ソーダ添加の場合の加工面分布  
Distribution of surfaces worked by using the combined electrolyte of NaCl and NaNO<sub>3</sub>.

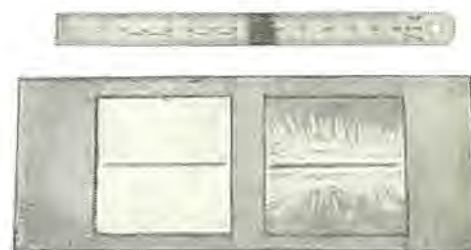


図 2.9 加工面の比較  
Compared surface with both methods in the same working condition.

10  $\mu\text{H}_{\text{max}}$  程度で、(4)の粗面とは少し異なった面の状態を示す。

(4) 粗面：(2)の外周部の荒れた面が全面に生じたもので、加工面あらさは 10~20  $\mu\text{H}_{\text{max}}$  となる。

これらの面の発生状況を電解液温度と電流密度の関係でまとめてみると図 2.7 のようになり、鏡面の得られる加工条件は図のグラフの下側の範囲内だけに限定される。さらに食塩水の濃度および電解液流量を下げると、この範囲はより減少する傾向をもっている。このことは 18-8 ステンレス鋼の電解加工において良好な加工面を得るには、電解液温度を必ず 30°C 以下に保ち、しかも限定された電流密度で加工を行なわねばならないことを示しており、工業上非常にきびしい制約であるといえる。

## 2.2.2 硝酸ソーダを添加した場合の加工特性

前項に示した鏡面加工領域を広げるために、電解液の食塩水中への添加剤として数種の塩類を混入して効果を調べたところ、硝酸ソーダを数%添加することで加工面が相当改良されることがわかった。(このほか硝酸カリ、亜硝酸ソーダ、亜硝酸カリおよびクロム酸塩なども多少の効果はある。)そこで電解液として 15% 食塩水中に硝酸ソーダ 5% を添加した溶液を用い、他の加工条件は前項の実験とまったく同じにして加工を行ない、前述の加工面の発生状況を電解液温度と電流密度の関係で求めてみた。

結果は図 2.8 のようで、鏡面の得られる領域は電解液温度については 70°C まで上昇できること、電流密度は加工中にスパークを生じないかぎり高い値まで範囲を広げることができた。電流密度の低いほうの限界は食塩水だけの場合に比べ多少改善されるが、20 A/cm<sup>2</sup> が限度のようで、それより低くなるとある幅をもって半鏡面域が存在し、さらに低くなると粗面の状態となる。しかし鏡面と粗面が共存する状態はまったく認められず、鏡面域を広げることができるのとあわせてこの方式の大きな特長である。なお電流密度 50 A/cm<sup>2</sup>、電解液温度(入口)の 40°C 同一条件で、食塩水のみによる加工面と、硝酸ソーダを添加した場合の加工面の比較を図 2.9 に示す。

## 2.2.3 考察

加工に際して全面に鏡面または粗面を生じる場合の加工速度を測

定し、また加工後の電解液を分析することにより表 2.3 の結果を得た。なお鏡面を生じるときの結果は食塩水のみの場合、硝酸ソーダ添加の場合いずれも同一であった。

表にみられるように加工速度に大きな差があり、これが食塩水のみの場合に生ずる共存面においては、加工深さの差となって粗面域が鏡面域に比べて深く加工されることになり、精度維持の点で問題となる。そこで加工後の電解液の分析結果に着眼すると、成分中の Cr の溶出原子価に相違のあることが認められる。すなわち鏡面の得られる場合は Cr は液中に  $\text{CrO}_4^{2-}$  として溶解しており、Cr は 6 価で溶出しているが、粗面となるときは  $\text{CrO}_4^{2-}$  の生成はみられず、この場合は  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  の形で沈殿しており、3 価として溶出している。そこで同じようなことが Fe にも起こっていると考え、18-8 ステンレス鋼の理論溶出量を求め、実験値と比較してみた。なお合金の電気化学当量  $K_A$  は次式で与えられると仮定した。

$$K_A = \sum C_M \cdot K_M \text{ g/A} \cdot \text{s} \quad (2.6)$$

ここで  $C_M$  : 各成分元素の含有量 百分比

$K_M$  : 各成分元素の電気化学当量 g/A · s

これから Fe, Ni, Cr の溶出原子価の組合わせを数種仮定して理論溶出量を求めると、

(1)  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{+3}$  で溶出するときの加工速度  $W_1 = 1.61 \text{ g/100 A} \cdot \text{min}$

(2)  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+6}$  で溶出するときの加工速度  $W_2 = 1.10 \text{ g/100 A} \cdot \text{min}$

となり、それぞれ表 2.3 の粗面または鏡面を生じるときの加工速度の値と比較的よく一致する。したがって鏡面の得られるときは Cr

表 2.3 18-8 ステンレス鋼の加工特性  
Machining characteristics of 18-8 stainless steel.

項目	加工面	鏡面を生じるとき	粗面を生じるとき
加工速度		0.65 mm/min (at 50 A/cm <sup>2</sup> ), 1.02 g/100 A · min	1.00 mm/min (at 50 A/cm <sup>2</sup> ), 1.57 g/100 A · min
加工後の電解液		上澄み液は橙黄色に着色 クロム酸イオン ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) を 溶解している	上澄み液は無色透明 $\text{CrO}_4^{2-}$ の溶解は認められな い



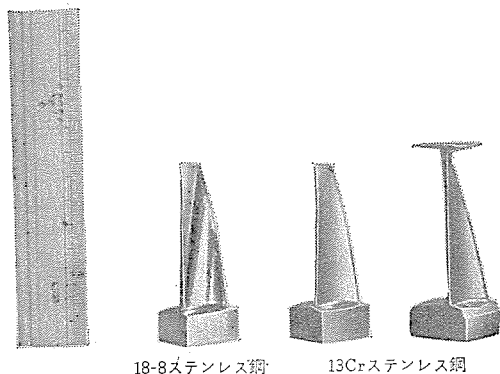


図 2.10 タービンブレード加工例  
Working examples of turbine blade.

の溶出が6価で行なわれると同時に、Feの溶出も3価で行なわれていると考えられる。

硝酸ソーダの添加によって鏡面域が拡大される原因については、加工中のステンレス鋼表面が不動態化して抵抗分極を生じ、これによってFeの2価の溶出が阻止され、3価の溶出が行なわれるためと考えている。伊東らは食塩水中で単相半波整流電源により18-8ステンレス鋼の加工時における極間電圧と加工電流のリサージュ波形を観察し、同じような結論を得ている。<sup>(7)</sup>

この硝酸ソーダ添加による効果は18-8ステンレス鋼に限らず、耐熱鋼、ニッケルクロム鋼など高ニッケルの特殊鋼には一般にあてはまり、タービンブレードなど高温強度や耐腐食性を要する材料の電解加工が広く行なわれるようになった現在、大きな成果をあげている。図2.10にこの方式で加工したタービンブレードの一例を示す。良好な仕上面のもとに電極形状の模写精度も非常にすぐれているため、電解後の仕上はほとんど行なわずにそのまま製品として使用されている。

### 3. 超硬合金の電解加工

この章では超硬合金に電解加工を試み、工業的に実施可能な加工法を確立できたのでその結果を述べる。

#### 3.1 実験に用いた超硬合金

超硬合金は2章に述べた鋼やその他の金属、合金と違ってタングステンカーバイド（以下WCと記す）やチタンカーバイド（以下TiCと記す）などの炭化物が主成分で、これをコバルトを結合材として焼結成形したものであり、拔型などに使用した場合相当寿命が長くなるため近年比較的小さな部品の拔型、絞り型、線引ダイスなどに広く利用されている。しかし非常に硬くて（HRC70~80）もろいため従来の機械加工では加工不可能であり、ダイヤモンドと石による研削、電解研削あるいは放電加工などの方法により行なわれている現状である。

表3.1に以下の実験に用いた超硬合金の種類と組成を示す。三菱金属製のダイヤチタニットを中心に用途別に1種ずつ選んだ。このうちダイヤチタニットGTi30とイゲタロイG8は耐摩耗用で拔型などに使用されているものである。

#### 3.2 直流電解による加工

最初に現在鉄系合金の加工に使用している直流電源を用い、電解液の組成を変えることにより超硬合金の加工の可能性を確かめてみた。その結果表3.2のようにカセイソーダ主体の電解液を用いれば直流電解によって十分加工の行なえることがわかった。

実験条件、電源：三相全波直流電源、無負荷電圧16V

電極：四六黄銅、外径10mm、内径4mm

電解液流量：5l/min

表 3.1 実験に用いた超硬合金  
Sintered tungsten carbide used for experiment.

品 種	化 学 成 分 (%)			比 重 (g/cm <sup>3</sup> )	おもな用途
	WC	TiC+TaC	Co		
ダイヤチタニット STi03	51	43	6	8.5	鋼、鋳鉄加工用 バイト、カッタ
ダイヤチタニット STi10 T	63	28	9	10.7	鋼、鋳鉄加工用 バイト、カッタ
ダイヤチタニット UTi40	79	6	15	13.6	快削鋼、非鉄金 属加工用
ダイヤチタニット HTi20	92	2	6	14.8	非鉄金属、難合 金加工用
ダイヤチタニット GTi30	84	0	16	13.7	拔型、線引ダイ ス
イゲタロイ G8	78~25	0	22~25	13.2	拔型、シャリン グダイ

表 3.2 直流による加工結果  
Machining speed on DC.

電 解 液 組 成			極間電圧 E(V)	電 流 I(A)	電流密度 J(A/cm <sup>2</sup> )	加工速度 F(mm/min)	加 工 面
NaOH(g)	NaCl(g)	水(cc)					
5	15	100	15	20	30	0.1	荒れた面
10	15	100	15	25	39	0.1	やや荒れた面
15	15	100	14	50	77	0.3	微光沢面
20	15	100	14	50	77	0.3	微光沢面

被加工物：HTi20

しかしこの方法では次の点で工業的な実用性は少ないと考えられる。

(1) 超硬合金の組成が異なると電解液の組成を変えねば加工できない。

(2) 電解液は濃度の高いNaOHを主体とした溶液で、取扱い上また衛生上好ましくない。

以上の予備実験の結果から超硬合金の電解溶出機構に関して次のように考えてみた。

(a) WCなどの炭化物の溶出は陽極においてWCがWO<sub>3</sub>（酸化タングステン）のような酸化物となり、次いでNaOHと反応すると考えると多量のNaOHを必要とするのではないか。

(b) 電源を半波整流のような断続電流にすれば、電源が断たれているときは陽極酸化されたWO<sub>3</sub>などが電位がない状態でNaOHにさらされるので、直流を継続して流す場合に比べてNaOHの量が少なくてよいのではないか。

(c) NaClの水溶液中でも交流電源を用い、被加工体を交互に陽極陰極とすることによってWCはWO<sub>3</sub>などに酸化され、同時にCoはFeと同様に溶出する。さらに陰極となる場合に電解によりNaOHを生じ、結局NaOHを用いた場合と同じ加工作用を呈するのではないか。

以上の考察に基づき以下に述べるように次の二つの方式について実験を行なった。

(1) 半波整流による加工方式、電解液：NaOH+NaCl水溶液

(2) 交流による加工方式、電解液：NaCl水溶液

#### 3.3 半波整流方式による加工実験

##### 3.3.1 実験装置および実験条件

実験に用いた電源と加工装置の概略図を図3.1に示す。電源は後に述べる交流電源としても使用できるように、整流器の着脱切換およびバイアス抵抗の着脱切換が可能となっている。仕様は次のとお

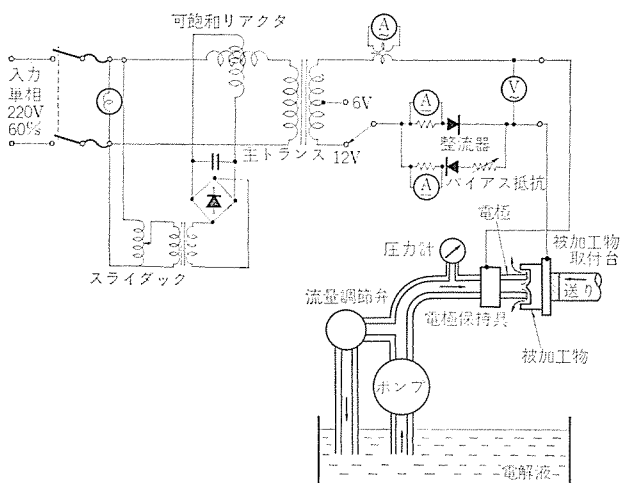


図 3.1 加工装置概略  
Schematic illustration of machining apparatus.

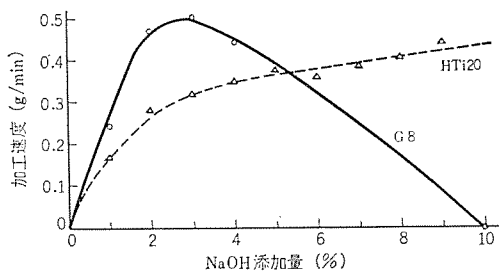


図 3.2 半波整流方式による加工特性(1)  
NaOH 添加量と加工速度  
Working characteristics by half wave rectification method (1).  
Relation between NaOH content and working speed.

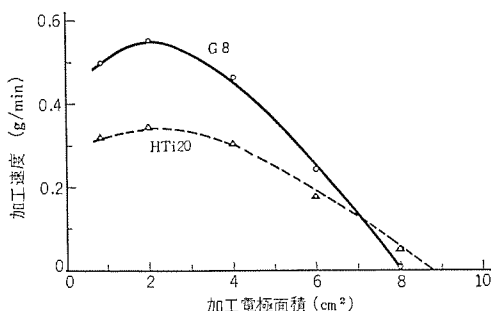


図 3.3 半波整流方式による加工特性(2) 加工面積と加工速度  
Working characteristics by half wave rectification method (2).  
Relation between working area and working speed.

表 3.3 半波整流方式による加工結果  
Machining result by half wave rectifying method.

品 種	極間電圧 E(V)	電 流 I(A)	電流密度 J(A/cm²)	加 工 速 度			加 工 面
				mm/min	g/min	g/100A·min	
STi03	5	180	126	0.61	1.26	0.70	光沢のある 平滑面
STi10T	5	160	112	0.53	1.17	0.73	光沢のある 平滑面
UTi40	5	120	84	0.33	1.01	0.84	光沢のある 平滑面
HTi20	5	120	84	0.28	0.93	0.72	やや荒れた 絹状面
GTi30	5	120	84	0.36	1.09	0.91	ほぼ平滑面
G8	5	120	84	0.39	1.12	0.93	小さな条 こんのある面

電極：四六黄銅，六角形対辺距離 14 mm，内径 6 mm，面積 1.4 cm²

りである。

電源仕様 交流無負荷電圧：6 V，12 V 切換

交流短絡電流：1,300 A

実験は図 3.1 の装置を用い，下記の条件で十分な加工速度と比較的良好的加工面の得られる電解液の組成を求めた。

実験条件，電極：四六黄銅，外径 12 mm，内径 6 mm，面積 0.85 cm²

被加工物：HTi20，G8 (表 3.1 参照)

電解液：20% 食塩水に NaOH を 1~10% 順次添加した

流量 5 l/min，温度 30~35°C

極間電圧：6 V (無負荷時)

### 3.3.2 実験結果

加工速度が NaOH の添加量によって変化するように図 3.2 に示す。

図にみられるように HTi20 の場合は，NaOH を 4% 以上添加してもそれ以上は加工速度があまり増加しないことが見られ，G8 の場合は NaOH が 2~3% で最大の加工速度が得られた。この結果は 3.2 節の考察(1)で述べたように直流電圧を継続的に加える場合よりは，NaOH が少量でも同じ程度の送り込み速度で加工が行なわれることを示している。

次にこの実験に使用した NaCl 20%，NaOH 3% の水溶液を用いて，表 3.1 に示した品種全部について加工した結果，表 3.3 に示すように HTi20，G8 と同様な加工結果を得た。

加工面については STi の 2 種と UTi40 は光沢を持った平滑面となるが，HTi20，GTi30 では，うろこ状の縞をもった面，また G8 では小さな条こんの多い面となる。これらは HTi20 の場合 NaOH の濃度を 10% まで上げると平滑面を得られるが，これと同じように NaOH の添加量の選び方でほかの品種についても最良仕上面を得られる条件があると考えられる。

次に同じ電解液を用いて，加工面積の増加に対して加工速度がどのように変わるかを HTi20，G8 について調べてみた。その結果を図 3.3 に示す。

図にみられるようにどちらの材料についてもある程度加工面積が増すと加工速度が減少し，ついには加工できなくなることが認められた。加工後の面を観察すれば加工面積の大きなものほど加工穴の周囲や底面に青らん(藍)色の酸化物が多く残るようになり，ついには底面全体に固着して通電不能となり，加工が進まなくなる。このことは，電流の増加に比例して WO<sub>3</sub> などの陽極酸化物の生成量が増えるにもかかわらず，NaOH の濃度が一定であるため，酸化物を十分除去できなくなるためであると考えた。

以上の結果から，この加工方式は電極材料には何を用いても消耗がないという利点はあるが，超硬合金の品種または加工面積が異なると電解液の組成も変えねばならないことになり，加工される対象物が一定で専用機化できる場合を除いて，はん用的な加工機としては実用的でないといえる。

### 3.4 交流方式による加工実験

最初の試みとして 60 c/s の交流を用い，無負荷電圧 12 V で加工を行ない，食塩水のみで電解液で加工できることを確かめた。しかし電極として四六黄銅を用いたところ消耗が非常に大きく，加工量に対して重量で約 2~3 倍，長さで 4 倍の消耗を生じた。これは交流を用いるために電極側が陽極となる時間があり，この間に電解溶出すると考えられる。したがって電極消耗を減少する方法として次の

二つが考えられる。

(1) 交流電源をへん奇し電極が陽極となるときの電流が、陰極となるときの電流よりも少なくなるようにする（以下交流 バイアス方式と称する）。

(2) 電極材料として消耗の少ないものを使用する。

以上の結果と考察に基づき、次の交流 バイアス方式における電極材料の消耗比ならびに加工速度に及ぼす影響を調べてみた。

### 3. 4. 1 交流バイアス方式における電極材料の影響<sup>(8)</sup>

実験には図 3. 1 に示した加工装置を用い、電源回路の交流 バイアススイッチを閉じ、整流器に対して逆方向電流を可変抵抗のはいったバイアス回路を通すことによって、順方向電流に対する比率を任意に選べるようにした。

電極材料としては炭素が化学的に安定であると考えられるので、グラファイトと、これより強度的に高いものとして金属中にグラファイトを含んでいる黒鉛鋳鉄、銅グラファイトを使用し、黄銅電極と比較した。

加工中の電極の送り込みは直流サーボモータによる等速送りとし、短絡を起こさない最大速度で送り込み、その結果を検討した。

実験条件、電極材料：グラファイト、銅グラファイト

黒鉛鋳鉄、四六黄銅の4種

電極寸法：外径 12 mm、内径 6 mm、面積 0.85 cm<sup>2</sup>

電解液：20% NaCl 水溶液、流量 10 l/min、温度 30～35℃

被加工物：HTi 20

実験結果を図 3. 4 に示す。またグラファイト電極を用い、バイアス抵抗が 0.2Ω、0.3Ω のときの極間電圧と電流波形を図 3. 5 に示す。

加工結果を要約して次のようにいえる。

(1) 加工速度はバイアス抵抗の値が 0.2～0.3Ω のとき、逆方向電流に対して順方向電流が 2～3 倍のときに最大値が得られる。

(2) 電極消耗は予期したようにバイアス抵抗を大きくするほど減少し、材質的にはグラファイトの場合が最も少ない。銅グラファイトも消耗は少ないが一樣でなく、電極面に比較的大きくぼみを生じ、これが被加工面に突起として現われ条こん発生の原因となつて好ましくない。これはグラファイト粒子を結合している銅が先に消耗し、結合がゆるんでグラファイト粒子が脱落するため、これが極間を短絡することもあり、この意味でも不都合といえる。

黒鉛鋳鉄も比較的消耗は少ないが、グラファイトに比べると多い。しかし銅グラファイトのような電極の局部的消耗はなく、強度的、また加工性の観点からこの加工方式には有効な電極材料といえる。四六黄銅は問題にならないほど消耗が多く使用にたえない。

次にグラファイト電極において最大の加工速度を得られたバイアス抵抗値 0.2Ω の条件で、表 3. 1 に示した全品種について加工性を調べてみた。結果は表 3. 4 のようで、どの品種に対しても HTi 20 に得られたのと同程度の加工速度を得られ、電極消耗比は品種間の相違にほとんど関係なく体積比で 3～5%であった。加工面はいずれも平滑な微光沢面が得られ、半波整流方式において生じた品種間の仕上面の相違はあまり認められなかった。

### 3. 4. 2 交流バイアス方式における加工面積の影響

前項において電極面積 0.85 cm<sup>2</sup> について交流 バイアス方式の効果を調べたが、ここで加工面積を増した場合加工速度がどのように変わるかを調べてみた。

実験条件、電極材料：グラファイト

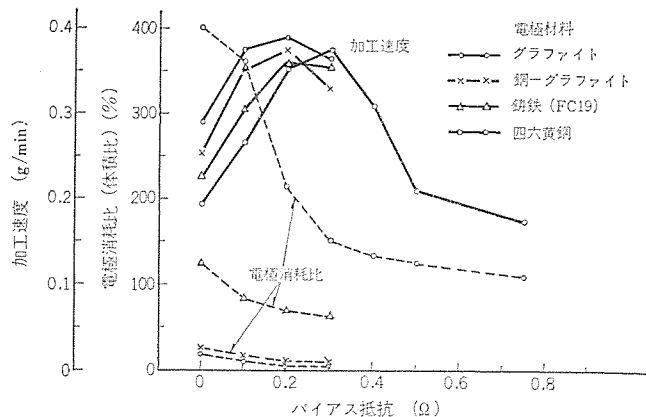


図 3. 4 交流方式による加工特性 (1) バイアス抵抗と加工速度  
Working characteristics by alternate current method (1).  
Relation between bias resistance and working speed.

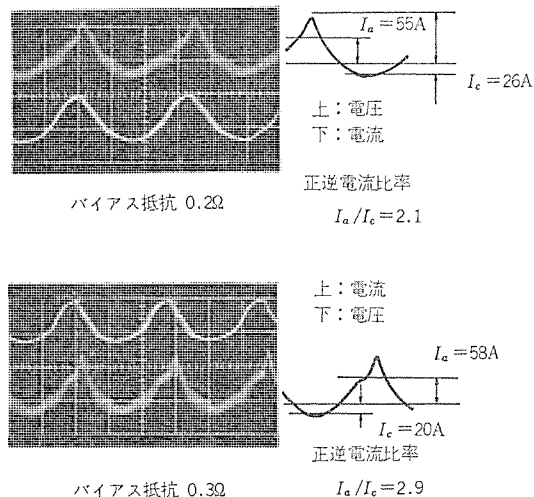


図 3. 5 交流方式における極間電圧電流波形  
Wave forms of gap voltage and current in alternate current method.

表 3. 4 交流方式による加工結果  
Machining speed by AC method.

品 種	極間電圧 E (V) A. C.	加 工 電 流		加 工 速 度			電極消耗 比体積比 (%)
		陽 極 Ia (A)	陰 極 Ic (A)	mm/min	g/min	g/100 A・min※	
STi 03	9	52	20	0.80	0.60	0.92	2.0
STi 10 T	9	52	20	0.65	0.58	0.89	2.0
UTi 40	9	50	18	0.30	0.34	0.55	3.4
HTi 20	9	52	20	0.30	0.38	0.59	3.0
GTi 30	9	52	20	0.30	0.37	0.57	2.5
G 8	9	50	18	0.30	0.32	0.52	2.8

※ Fe では 1.7 g/100 A・min

電極寸法：丸形、内径 6 mm、面積 1, 2, 4, 6, 8, 10 cm<sup>2</sup>

電解液：20% NaCl 水溶液、流量 20 l/min、温度 30～35℃

被加工物：GTi 30

結果は図 3. 6 のようで次のことがわかった。

(1) 加工面積が 2 cm<sup>2</sup> を前後にしてそれ以下の場合には加工速度が最大となるバイアス抵抗値が存在し、この値は加工面積が大きくな

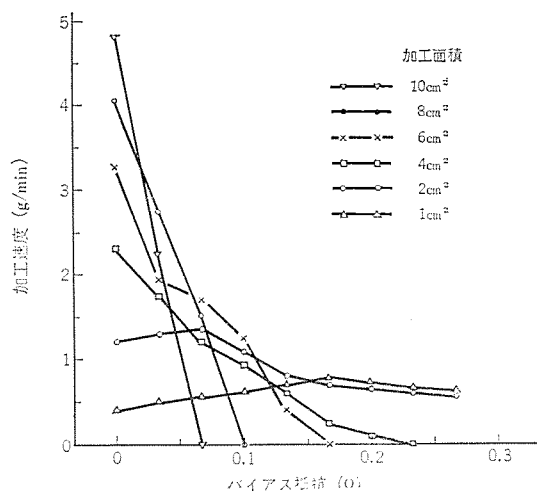


図 3.6 交流方式による加工特性 (2)  
加工面積と加工速度 (その1)

Working characteristics by alternate current method (2).  
Relation between working area and working speed (1).

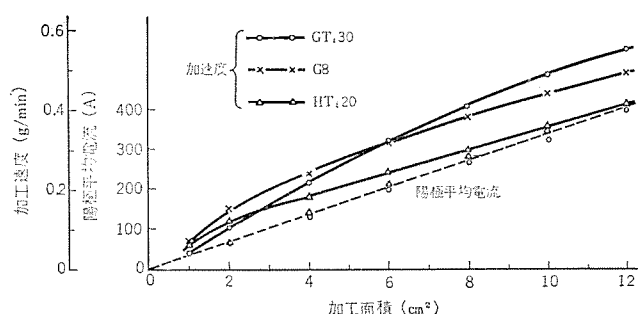


図 3.7 交流方式による加工特性 (3)  
加工面積と加工速度 (その2)

Working characteristics by alternate current method (3).  
Relation between working area and working speed (2).

るほど小さくなる傾向をもつ。4 cm<sup>2</sup> 以上ではむしろバイアスをかけない完全な交流で最大の加工速度を得られるようになる。

(2) 加工面積が 4 cm<sup>2</sup> 以上の場合、バイアス抵抗を入れると加工速度は減少し、さらに抵抗を増していくと完全に加工できなくなる。このときの加工面には青らん(藍)色の析出物が全面に固着しており、これが絶縁性をもっているため電流をシャ断して加工できなくなる。これは、被加工物が陽極となる間に生ずる陽極酸化物を完全に除去できないため、交流 バイアス 方式は加工面積の小さいものを加工するときに有効であるといえる。

(3) 電極消耗比は加工面積にあまり影響を受けないようで、また 4 cm<sup>2</sup> 以上では バイアス 抵抗にも関係なく、体積比で 3～5 % 程度であった。

次にバイアスをかけない完全交流で加工面積と加工速度の関係を数種の超硬合金について求めてみた。

実験条件、電極材料：グラファイト

電極寸法：丸形、内径 6 mm、面積 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 cm<sup>2</sup>

電解液：20% NaCl 水溶液、流量 20 l/min

温度 30～35°C

被加工物：GTi 30, HTi 20, G 8 の 3 種

結果は図 3.7 のようで、品種間に多少の相違はあるが加工速度は加工面積の増加にほぼ比例して大きくなり、加工中の陽極平均電流にほぼ比例して大きくなる。なお電極消耗比は品種の相違、加工

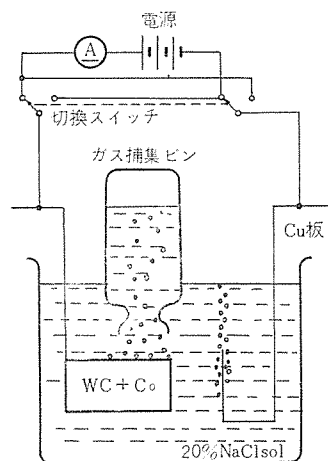


図 3.8 ビーカテスト装置  
View of beaker test device.

面積にあまり影響されることなく体積比で 3～5 % であった。

### 3.4.3 超硬合金の電解溶出機構

以上の実験によって NaCl 水溶液を電解液として交流電解を行なうか、あるいは NaCl と NaOH の二元溶液によれば直流電解によっても超硬合金の電解溶出ができることを確認してきたが、ここでビーカテストにより超硬合金が陽極および陰極となる場合に極間に起こる現象を観察し、同時に両極に発生するガスを捕集してこれを分析することにより、溶出機構に関する考察を進めてみた。

#### (1) 実験装置および方法

電解中の超硬合金と電極の状態を観察するために図 3.8 に示すように 20% NaCl 水溶液を満たしたビーカ中に超硬合金を銅線で縛ってつるし、一方には白金電極を設けて、これらを 10 mm の間隔をもって対向させ、極間には 7.5～10 V の直流電圧を印加し、2.5～3 A の電流を流した。

電源から極間への回路中には切換スイッチをそう入し、被加工体の極性を陽極、陰極に切換えられるようにした。また被加工体を陽極および陰極としたときのそれぞれにおける発生ガスを捕集ピンに集め、質量分析を行なった。なお被加工体には HTi 20 を使用した。

#### (2) 実験結果

##### (a) 超硬合金を陽極にした場合

通電後の時間の経過とともに超硬合金表面は黄白色の析出物が薄膜となって生成し、これが十分成長すると膜状の形で脱落する。印加電圧 7.5 V、電流 2.5 A、対向距離 10 mm の条件で第 1 層の脱落するまでの時間は約 4.5 min であった。これを取り出して十分乾燥させるとその色は WO<sub>3</sub> とよく似ており、また NaOH 水溶液に入れると完全に溶解することから WO<sub>3</sub> であると考えてほぼまちがいない。なお陰極の白金電極表面からは多量のガスを発生する。

##### (b) 超硬合金を陰極にした場合

(a)において超硬合金表面に析出物がある程度成長した状態で極性を反転し、超硬合金を陰極にすると、陰極側では析出物の薄膜の内側から激しくガスを発生し、このガスの圧力でくずれるように膜が脱落してゆき、超硬合金の地はだ(肌)の色になる。脱落物質はビーカの底に黒色の沈殿物としてたまる。陽極の白金電極表面ではわずかながらガスが発生している。これを銅電極などにおきかえたと銅が溶出しているのが観察される。

##### (b)' NaOH 水溶液に浸したとき

(a)において膜が生成した状態で超硬合金を引き上げ、別に用意した NaOH 5 % 水溶液に浸すと、一度あい色に変色し、さらに超硬合金の地はだの色に変わる。この場合は脱落ではなく完全に溶出



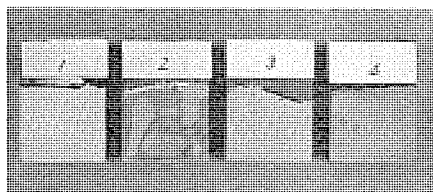


図 3.9 電解後の超硬合金表面状態  
View of surface conditions in worked sintered tungsten carbide alloy.

表 3.5 生成ガス質量分析結果  
Analysis result of formed gasses.

ガス種類	WC+Co→⊕のときの生成ガス mol %	WC+Co→⊖のときの生成ガス mol %
H <sub>2</sub>	21.60	89.40
N <sub>2</sub>	1.25	9.20
CO	37.70	1.00
O <sub>2</sub>	0.12	0.15
CO <sub>2</sub>	39.50	0.35
合 計	100.17	100.10

である。

以上の超硬合金表面の状態を図 3.9 に示す。No. 1 は陽極酸化によって黄白色の膜が生成した状態、No. 2 はこれを NaOH 水溶液に浸して一部があい色に変色した状態、No. 3 は NaOH 水溶液中で膜が溶出され地はだ面に戻った状態、No. 4 は No. 1 の状態から極性を反転し、膜が脱落されて地はだ面に戻った状態を示す。

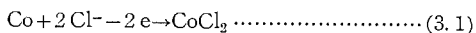
#### (c) 生成ガス分析結果

以上の実験において超硬合金を陽極および陰極にした場合に超硬合金表面から発生したガスを捕集し、質量分析を行なった結果を表 3.5 に示す。陽極となるときは水素ガス、一酸化炭素および炭酸ガスが発生していること、陰極となるときはほとんどが水素ガスであることがわかった。

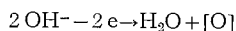
#### (3) 考 察

以上の結果から超硬合金の電解加工における溶出機構を考察すると次のようになる。

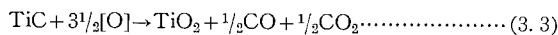
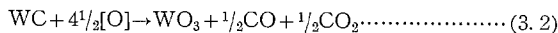
(a) 超硬合金が陽極となった場合は、成分中のコバルトは NaCl が解離して生ずる塩素イオンと電気化学的に反応し、塩化コバルトとして溶出する。



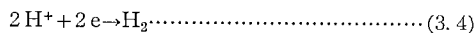
同時に水が解離して生ずる水酸イオンに電気量が与えられて発生期の酸素を生じ



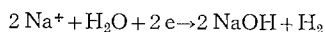
これが WC や TiC と反応して陽極酸化物を生成し、炭素は一酸化炭素または炭酸ガスとして飛散する。(以上陽極反応)



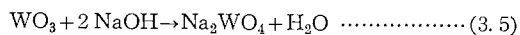
一方陰極側では水の電解によって水素ガスが発生する。



(b) この状態で極性が反転され超硬合金が陽極となると、陰極近傍には電気化学的に NaOH を生じ



これが陽極酸化物と反応して水溶性のタングステン酸ソーダとして液中に溶解する。



TiO<sub>2</sub> の除去については同じビーカテストを成分中の TiC の含有量の

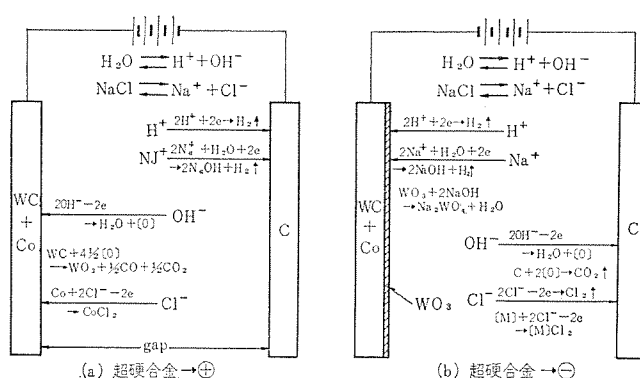
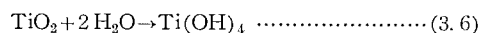


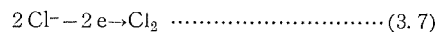
図 3.10 超硬合金の電解溶出機構  
Schematic illustration of mechanism in electrolytic dissolution of sintered tungsten carbide alloy.

多い TiO<sub>2</sub> について行ない、酸化膜が成長したあと超硬合金を陰極にすると、溶液中に白色のコロイド状の浮遊物を生ずる。これは別に TiO<sub>2</sub> を水溶液中に溶かした状態とよく似ており、したがって TiO<sub>2</sub> は水溶液中で水和して水酸化チタンとなって溶出するものと考えられる。

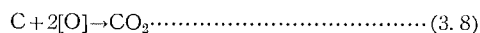
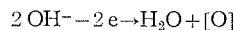


しかし、(2) の実験結果で述べたように陰極からは多量の水素ガスが発生して、この圧力によっても陽極酸化物が脱落しているのが認められており、したがって陽極酸化物の除去は超硬合金近傍に生ずる NaOH による化学作用と、表面から発生する水素ガス圧力による物理的作用との総合作用によって行なわれると考えるのが妥当のようである。

一方陽極における反応は、陽極となっている電極材料によって異なり、グラファイト電極を使用した場合は塩素イオンの放電によって塩素ガスを生じ、



同時に水の電解によって生じた発生期の酸素が電極の炭素と反応して炭酸ガスとなって飛散し電極消耗を生ずる。



電極が銅などの金属である場合は、塩素イオンがこれと反応し、塩素ガスの発生はなくなるが非常に大きな電極消耗を生ずる。



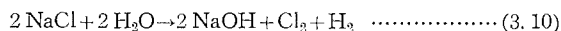
以上の超硬合金の電解溶出機構をまとめると図 3.10 のようになる。なお超硬合金の陽極酸化については倉藤、霜の実験式<sup>(9)</sup>、佐藤の硝酸ソーダ溶液中における反応式<sup>(10)</sup>、Reinhart らの超硬合金の電気化学反応式<sup>(11)</sup>などがあり、同じような推論がなされている。

なお半波整流電源を用い、NaCl と NaOH の混合水溶液により電解する場合は、陽極酸化によって生じた WO<sub>3</sub> などが通電休止の半サイクル間に溶液中の NaOH と反応して溶出する。

以上の結果から明らかなように、超硬合金の電解溶出はいずれにしてもまず炭化物の陽極酸化と、この酸化物の溶出または除去の 2 段階の作用によって行なわれるといえる。

#### 3. 4. 4 塩素ガス処理

前項で述べたように食塩水で交流電源によりグラファイトを電極として超硬合金を電解加工する場合、グラファイト電極が陽極となる半サイクル間に供給される電気量はほとんど食塩水の電解に費やされ、供給される電気量に比例して水素ガスと塩素ガスを発生する。



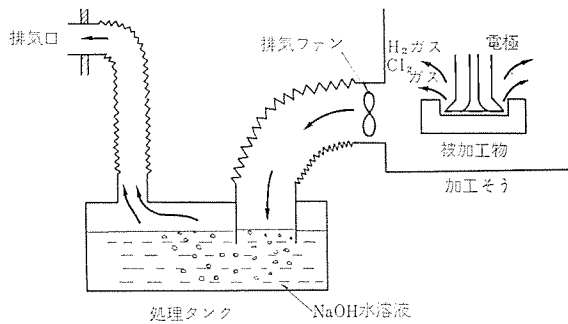


図 3.11 塩素ガス処理装置  
Schematic illustration of Cl<sub>2</sub> gas absorbing apparatus.

この反応は電気化学的にファラデーの法則に従うと考えられるから、標準状態で発生する塩素ガスの量は次式で与えられる。

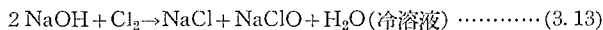
$$Q_{Cl_2} = \frac{22.4}{M} \cdot \frac{I}{96500} \cdot \frac{A}{n} \times 60 \quad (\text{l/min}) \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

ここで  $M$  : 分子量                       $n$  : 原子価  
          $A$  : 原子量                       $I$  : 電流

これらの値を代入すると

$$Q_{Cl_2} = 0.696 \times 10^{-2} I \quad (\text{l/min}) \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

この塩素ガスは非常に刺激性があり、人体に対してきわめて有害であるので何らかの方法で完全に吸収処理を行なう必要がある。当社の超硬用加工機では図 3.11 に示すように加工そうにおける発生ガスを強制排気して、NaOH 溶液中を通過させることにより、ほとんど完全に塩素ガスを吸収させている。NaOH 溶液に対する Cl<sub>2</sub> ガスの反応は次式で示される。



これから塩素ガスを完全に吸収するのに必要な NaOH の量を求めると

$$W_{\text{NaOH}} = \frac{80}{22.4} V_{Cl_2} = 3.57 V_{Cl_2} \quad (\text{g})$$

$V_{Cl_2}$  : 塩素ガスの発生量 (l)

NaOH の飽和水溶液を用いるとすると、溶解度は 100、比重は 2.13 であるから必要な飽和水溶液の量は

$$V_{\text{NaOH}} = \frac{2 \times 3.57}{2.13} \times V_{Cl_2} = 3.35 V_{Cl_2} \quad (\text{cc}) \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

いま陰極平均電流 300 A で、1 日 8 時間実動して超硬合金を加工すると塩素ガスの総発生量は 1,000 l、これを完全に吸収するのに必要な NaOH の飽和水溶液の量は 3.35 l となる。

この吸収装置による効果を北川式塩素ガス検知管により測定した結果、図 3.11 において処理タンクに NaOH 飽和溶液を入れない場合の排気口における塩素ガスの濃度は 40 p・pm、実験室内で約 5 p・pm を測定したが、タンク内に NaOH 溶液を満たし、この中に排気ガスを通過させた場合は排気口で 5 p・pm、実験室内ではほとんど認められなかった。このことから塩素ガス発生の問題に対しては NaOH による吸収装置を設けることでほぼ完全に解決でき、安全に機械を実動できることが明らかとなった。

### 3. 4. 5 電解液の加工特性への影響<sup>(12)</sup>

以上に述べた交流電解方式で実際に超硬合金を加工した場合、電解液の状態の相違が加工特性、ことに電極消耗比に影響をもつことが認められた。すなわち電解液の食塩水が新しいときは、グラファイト電極を使用してもかなりの消耗を示すが、十分加工して液が古くなるとほとんど消耗しなくなることがわかった。そこでこの項では、

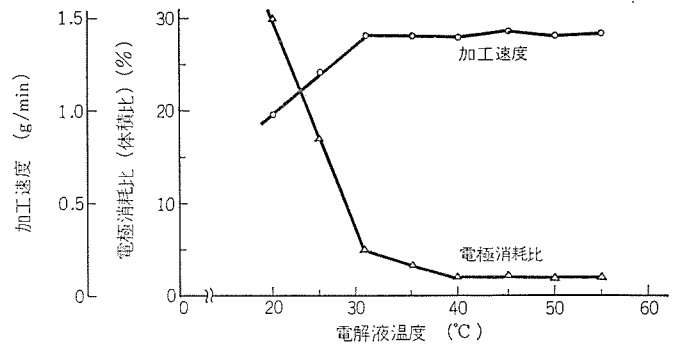


図 3.12 交流方式による加工特性 (4) 電解液温度の影響  
Working characteristics by alternating current method (4).  
Influence of electrolyte temperature.

電解液の性質、ことに電解液温度と食塩水中への添加剤が加工特性にどのように影響をおよぼすかを調べた。

#### (1) 電解液温度の影響

電解液には超硬合金をある程度加工して古くなった液を用い、下記の実験条件で電解液温度の影響を調べた。

実験条件、電極：グラファイト、外径 17 mm、内径 6 mm、面積 2 cm<sup>2</sup>

被加工物：GTi 30

電解液：20% NaCl 水溶液 (溶液中の加工された超硬合金濃度 2 wt %) 流量 20 l/min

バイアス抵抗：0 Ω (完全交流)

実験結果を図 3.12 に示す。図から明らかなように電解液温度は加工特性に非常に大きな影響をもち、30°C 以下では液温の上昇に比例して加工速度は急激に増加し、電極消耗比は急激に減少する。30°C 以上ではどちらもほぼ一定の値に落ち着く。この結果から超硬合金の電解加工は必ず 30°C 以上に液温を保って実施する必要があることが判明した。

#### (2) 塩化コバルト添加の影響

上述の電解液が古くなると電極の消耗が少なくなることに関して、電解液中に溶出した超硬合金成分が影響していると考え、新しい電解液に添加剤として塩化コバルトを順次加えてゆき、加工特性がどのように変わるかを調べてみた。

実験条件、電極：グラファイト、外径 17 mm、内径 6 mm、面積 2 cm<sup>2</sup>

被加工物：GTi 30

基本電解液：20% NaCl 水溶液、液温 35°C

流量 20 l/min

バイアス抵抗：0 Ω (完全交流)

実験結果を図 3.13、3.14 に示す。図 3.13 は塩化コバルトの添加量を増した場合の加工速度と電極消耗比を示したもので、加工速度はほぼ一定であるが、電極消耗比は添加量とともに減少して添加量が 0.5% になると消耗比は完全に 0% になった。図 3.14 は塩化コバルトを添加しない場合と、0.5% 添加したときの加工面と電極面の比較を示すものである。

#### (3) 考察

塩化コバルトの添加によりグラファイト電極の消耗を減少できる理由は次のように考えられる。

電解液が食塩水だけの場合は、電解溶出機構において述べたように電極が陽極となる半サイクル間に食塩水の電解が行われ、陽極からは塩素ガス、陰極からは水素ガスが発生すると同時に陽極側で OH<sup>-</sup> の放電によって発生期の酸素を生じ、これが電極の炭素と反

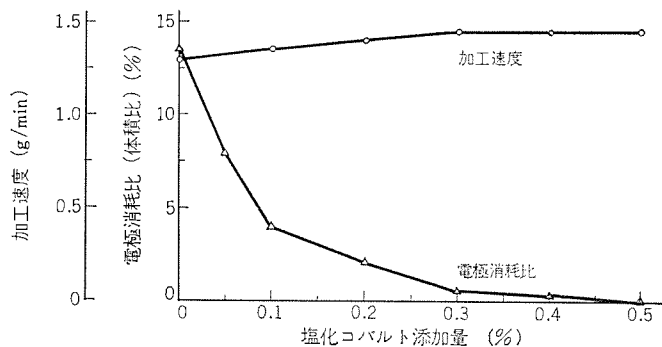


図 3.13 交流方式による加工特性 (5) 塩化コバルト添加の効果  
Working characteristics by alternating current method (5)  
Influence of added  $\text{CoCl}_2$  in electrolyte.

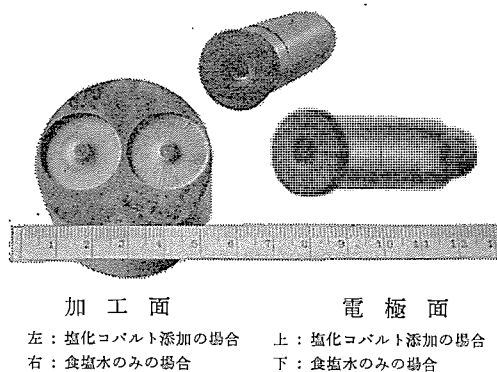
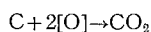
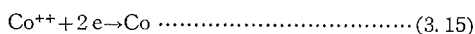


図 3.14 交流方式による電極面と加工面  
Surface condition of electrode and sintered tungsten carbide alloy by alternating current method.

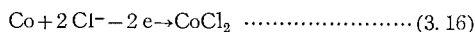
炭酸ガスを飛散し電極消耗の原因となる。



しかし電解液中に塩化コバルトが添加されると、電極が陰極となる間に溶液中に解離したコバルトイオンが電極表面に金属コバルトとして析出し、



次に電極が陽極になるとときに析出した金属コバルトがふたたび塩素イオンと電気化学的に反応して溶出する。



このように電極表面で起こるのは金属コバルトの析出と溶出だけで、 $\text{OH}^-$ を放電して発生期の酸素を生じるための電気量は、すべてこの反応に費され、グラファイト電極の消耗はまったくなくなると考えることができる。

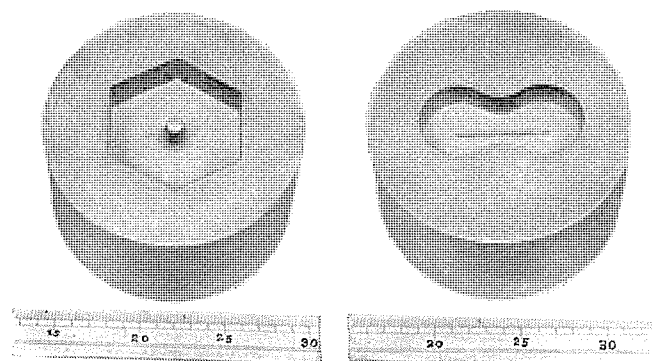
電極面への金属コバルトの析出および溶出は、電解溶出機構を確かめたときのピーカテスト装置により、塩化コバルトを添加した電解液中で極性を切換えて極間の状態を観察し、電極が陰極となったときの付着物を分析して確かめることができた。

なお、電極消耗の減少は塩化コバルトの添加だけでなく、たとえば軟鋼などを十分加工して古くなった電解液を用いた場合にも認められ、したがって塩化第一鉄 ( $\text{FeCl}_2$ ) や塩化銅 ( $\text{CuCl}_2$ ) などのように溶解液中で金属イオンを解離する電解質ならば、ほとんど同じような効果を得られると考えられる。

#### 3.4.6 加工応用例および従来方式との比較

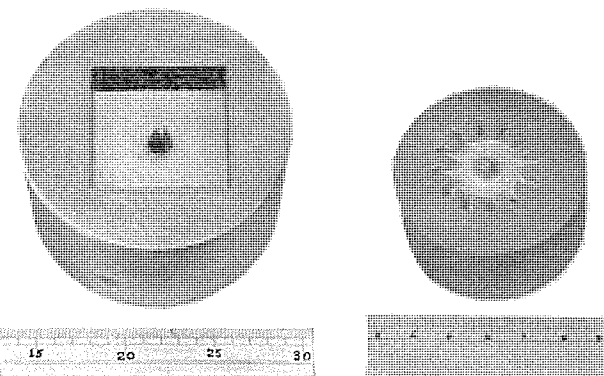
以上に述べた交流方式による超硬合金用電解加工機を用いて加工を行った例を図 3.15 に、また加工底面の面あらかの一例を図 3.16 に示す。

現在超硬合金の穴あけに最も一般的に使用されている放電加工と



六角穴加工 HTi20  
加工電圧 10 V, 加工電流 420 A  
加工速度 1.8 g/min  
加工時間 30 min

チェーンリンク抜型下穴加工 GTi30  
加工電圧 10 V, 加工電流 380 A  
加工速度 1.7 g/min  
加工時間 20 min



角穴加工 GTi50  
加工電圧 10 V, 加工電流 450 A  
加工速度 2.0 g/min  
加工時間 40 min

歯車抜型下穴加工 STi10T  
加工電圧 10 V, 加工電流 360 A  
加工速度 1.9 g/min  
加工時間 15 min

図 3.15 交流方式における加工例  
Working example of sintered tungsten carbide alloy in alternating current method.

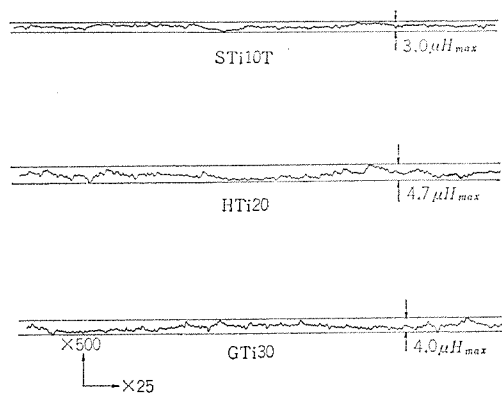


図 3.16 交流方式における加工面あらか  
Surface roughness of worked sintered tungsten carbide alloy in alternating current method.

比較して電解加工の特質をまとめると次のようになる。

#### 長 所

- (1) 加工速度が大きい。現在市販されている各種超硬合金に対して  $0.5 \sim 1.0 \text{ g/Amin}$  の加工速度が得られる。
- (2) ヘアクラックを生じない。溶出はまったく電気化学的に行なわれるため熱作用がなく、放電加工において生じやすい加工表面から内部に向うヘアクラック発生のおそれはほとんどない。
- (3) 良好な仕上面、被加工物の材質、加工速度の影響をほとんど受けることなく  $2 \sim 15 \mu\text{H}_{\text{max}}$  の加工面あらかを得られる。

#### 短 所

(1) 加工精度が悪い。加工精度は現在の鋼などの加工におけるのと同程度で電極寸法に対する加工穴の寸法の広がり（クリアランス）は単純形状の場合で片側 0.1~0.4 mm 程度である。

(2) 電極の製作がむずかしい。グラファイトを使用するため強度的に弱く、補強などを十分考えて製作せねばならない。また溶接やロウ付けができないため、複雑な形状の場合や、電解液噴出口を設ける必要のあるときはなおさらやっかいである。

以上のような観点からこの加工方式は超硬工具（拔型、絞り型、線引ダイスなど）の下加工には非常に有効な方法であり、またこれまで被加工性の悪さのために超硬部品の使用ができなかった応用分野の開発のためにも非常に意義のある加工方法であるといえる。

#### 4. む す び

本論文に述べた内容を要約すると次のようになる。

(1) 電解加工の最も一般的な被加工材料である炭素鋼、工具鋼、特殊鋼に対する加工特性を調べ、焼なまし材では加工面あらさとみかけの電流効率、炭素含有量またはセメント炭含有量の関数として与えられ、これらの含有量の多いほど面あらさは悪化し、みかけの電流効率は増加することを確認、さらにこの原因は加工中におけるセメント炭の脱落によるものであることを実験結果と計算より推論した。

(2) 18-8 ステンレス鋼の加工においては、食塩水のみで電解液で加工した場合に生ずる加工面の悪化を、硝酸ソーダの添加により完全に防止できることを述べ、鏡面の得られる場合の成分中の鉄の溶出が2価で行なわれることを確かめた。

(3) 超硬合金は直流や半波整流電源では NaOH を添加しないと加工が行なわれないが、交流方式により食塩水のみで電解液で加工可能としたことを述べ、この方式による超硬合金の加工原理を明らかにした結果と、最大の欠陥であった電極消耗を電解液の温度と添加剤の影響により、グラファイト電極において完全に解決できることを確かめた結果を述べた。

以上のように電解加工現象を解析し、新しい組成の電解液あるいは新しい電源方式の適用により、難加工性とされていた材料の電解加工性の問題が次第に解決されつつあり、近い将来ほとんど材料の加工性を問題にしないでよい加工機の開発が当社の技術によってな

されるものと確信している。

(昭 42-7-21 受付)

#### 参 考 文 献

- (1) 前田、斎藤、荒井、伊藤、杉江：三菱電機技報 37, No. 8, 1963, P 35
- (2) 前田、斎藤、荒井：三菱電機技報 39, No. 9, 1965, P 75
- (3) 前田、斎藤、荒井：精密機械 31, No. 11, 1965, P 70
- (4) 古池：三菱電機技報 本特集号
- (5) 前田：電解加工の加工現象と基礎的研究
- (6) 斎藤、佐藤、葉石：昭和 42 年度精機学会春期大会予稿 P 115
- (7) 伊東、近森、林：機械試験所所報, 18, 3 号, 1964
- (8) 前田、斎藤、荒井、葉石：昭和 40 年度精機学会秋期大会予稿 P 175
- (9) 倉藤、霜：昭和 36 年度精機学会秋期大会予稿
- (10) 佐藤：精密機械 30, No. 2, 1964, P 51
- (11) H. Reinhart, W. Grünwald : Werkstatt und Betr. 95, 1962, 87
- (12) 斎藤、荒井、葉石：昭和 41 年度精機学会秋期大会予稿, P 19

特許関係：

1. 高圧ガス混入方式に関するもの  
国内特許 特公昭 41-1086, 特公昭 41-1087  
外国特許 アメリカ 特許番号 3284327  
イギリス 特許番号 1041776  
フランス 特許番号 1391177  
ドイツ、スイス は出願中
2. 鋼材の加工に関するもの  
国内特許 特公昭 40-24003  
18-8 ステンレス鋼の加工方式は出願中
3. 超硬合金の加工に関するもの  
外国特許 フランス 特許番号 1433358, 1417497  
スイス 特許番号 417793  
アメリカ、イギリス、ドイツ は出願中  
国内特許 5 件出願中



# ダイヤモンド電解加工機の機械構造

杉江 法雄\*・青島富士雄\*・佐藤 国彦\*

## Mechanical Construction of "Diasinker", Electro-Chemical Machines

Nagoya Works Norio SUGIE・Fujio AOSHIMA・Kunihiko SATO

It is nearly ten years since the first electro-chemical machine was made public in our country. Its epochal machining method has been drawing attention of the circles as well as the electric discharge machine. Within the country, the number of machines in actual service has reached above thirty units, being still on the increase more and more. The electro-chemical machine operates on an entirely different principle of conventional machinery. It is, so to speak, combination of mechanical, electrical and chemical apparatus with unique features unparalleled by any other machine tools. The article deals with the construction and specific features of "Diasinker", electro-chemical machines.

### 1. ま え が き

電解加工機は、わが国の第1号機が当社により製作されて以来、10年近くたち、その画期的加工法は、放電加工機とともに、金属加工分野において、注目の的となっている。

最初 1,000 A 級から出発したわが国の電解加工機は、最近では 10,000 A 級の機械まで市販され、その加工法もようやく確立し、生産ラインに組込む工場も、増加の一途をたどりつつある。国内においてはすでに実動台数 30 台余の電解加工機が、実用化段階にはいっている。

電解加工機は、その加工原理上、一般工作機械と異なり、他の工作機に見られぬ特殊性を有する。電解加工機はその加工性能、操作性、保守を十分に満足させるには、種々の装置を組合わせる必要があり、機械というよりはむしろ、プラントと考えられるべきものである。

高加工速度で低電極消耗の放電加工機の出現により、電解加工の加工分野は、一部放電加工機にゆずらねばならないが、加工仕上げ面が美麗な状態で、加工速度が大きいと言う点では、放電加工機とは、次元が異なるとさえ言えるであろう。そのような特長を生かすために、電解加工機はますます大形化するものと思われる。一方、その用途開発が進むにつれ、たとえば、従来の型彫機としてのみでなく、タービングレード加工のような機械部品加工機とか、機械部品のバリトリ機などのような専用機化も、さかに行なわれるものと思われる。

電解加工機は、放電加工機とその加工分野は一部重複するかも知れないが、その特質上、両者は競合機種ではなく、あくまでも共存機種として、発展するものであろう。

以下国内にて最大の実績をもち、また、広く海外へも輸出している三菱電解加工機の標準機種に基づいて、電解加工機の特長を中心に、電解加工機の機械構造の概略について述べる。

### 2. 特長と性能

表 2. 1 に主要な仕様、図 2. 1 および図 2. 2 に MC-20 V 型、MC-50 V 型電解加工機の外観を示す。電解加工機は、他の一般工作機械とは異なり、設計上、次のような諸点をとくに考慮しなければならない。すなわち、

(1) 高圧の電解液を使用するため、電解液の液圧による加工反

力が大きい。剛性の高い堅ろうな構造であること。

(2) 電解液として、通常は食塩水のような腐食性の強いものを使用しているため、機械の電解液に対する耐食性。

(3) 低速度における、主軸のサーボ送りを円滑にするため、主軸のしゅう(摺)動面などの送り機構。

(4) 電解液中に蓄積されてくる、加工によって生成された加工反応物の除去装置。

(5) 大形機については、加工前後における被加工物の搬入、搬出が容易であること。

(6) 電解加工機は、単一の機械としてよりは、むしろプラントと考えられるべきであるため、機械の集中制御をおこなう必要があること。

(7) 加工に大電流を使用するため、機械本体に、大電流の通電が容易な通電経路を必要とすること。

(8) 加工中に、大量の熱を発生するため、機械内における熱発生を極力抑え、かつ、機械全体を熱ひずみの影響から極力さけるような構造であること。

表 2. 1 三菱電解加工機ダイヤモンドのおもな仕様  
Specifications of Mitsubishi E. C. M. "Diasinker".

		MC-20 V	MC-50 V	MC-100 V (G)
電 源	入	200/220 V, 50/60 c/s, 3 φ	200/220 V, 50/60 c/s, 3 φ	400/440 V, 50/60 c/s, 3 φ
	出	75 kVA DC 2,000 A, 4~12 V	190 kVA DC 5,000 A, 4~12 V	350 kVA DC 10,000 A, 4~12 V
機 械 本 体	主 軸 ス ト ロ ッ ク	mm 200	300	400
	最 大 加 工 深 さ	mm 180	250	350
	加 工 速 度	mm/min 0.3~5	0.3~5	0.3~5
	被加工物最大寸法	mm 500×300 ×180(H)	550×500 ×400(H)	1000×600 ×400(H)
	電 極 取 付 定 盤	mm 360×280	500×400	550×400
	テ ー ブ ル	mm 600×400	850×600	1000×700
	テーブルストローク (左右)	mm 280	400	500
	テーブルストローク (前後)	mm 200	250	250
	テーブルストローク (ワーク入時)	mm —	1200(左へ)	1400(左へ)
ろ過および電解液 そう	電極取付定盤よりテ ーブル上面までの寸 法	mm 420	650	700
	ろ 過 方 式	遠心分離機 SJ-52	遠心分離機 HZ-63	遠心分離機 HZ-63
	タ ン ク 容 量	l 1500	3000	6000
塩 水 ポ ン プ	TC-kW, 7 st, 40 mm	TC-kW, 7 st, 40 mm	TC-kW, 8 st, 50 mm	TC-kW, 5 st, 60 mm
	塩水ポンプ用モートル	2 P, 11 kW	2 P, 18.5 kW	2 P, 22 kW

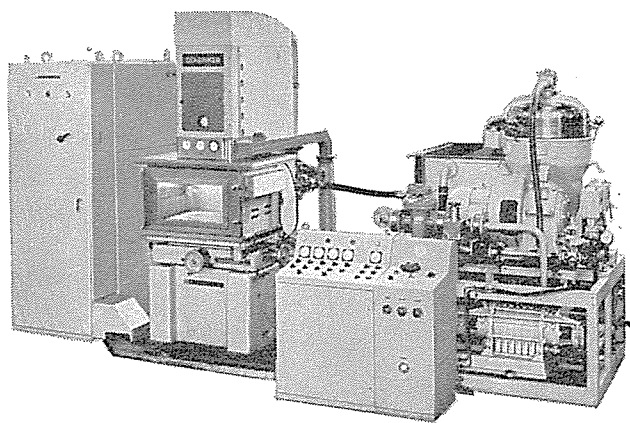


図 2.1 ダイアシンカ 電解加工機 MC-20 V  
E. C. M. "Diasinker" type MC-20 V.

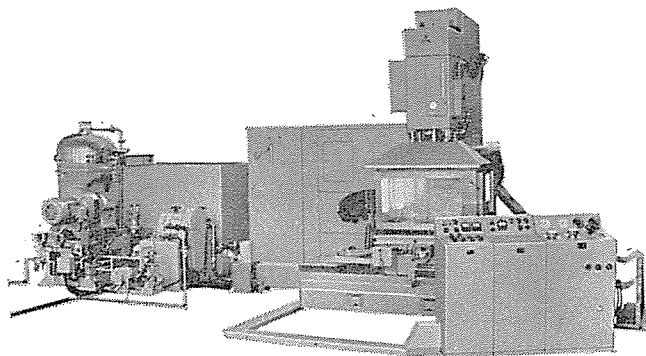


図 2.2 ダイアシンカ 電解加工機 MC-50 V  
E. C. M. "Diasinker" type MC-50 V.

### 3. 「ダイアシンカ」MC-20 V の構造

電解加工機は大別して、電源部、機械本体部、ろ(汙)過装置および電解液そう部の三部に分けられる。図 3. 1 にダイアシンカ MC-20 V の平面図を示す。

#### 3.1 機械本体部

ダイアシンカ MC-20 V は電極送り方向が垂直方向(Z 軸)の立形の機械であり、機械本体は電極送り機構を有するコラム・ヘッド、実際に加工を行なう加工そう、テーブルの XY 方向の位置決めを行なうサドルおよびベッドより成立つ。コラム・ヘッドの平面を図 3. 2 に示す。図において、主軸①は加工反力に十分耐え、高い剛性と精度を維持するため箱形構造をしている。主軸の案内しゅう動面は当社独得のころがり面を有する高硬度のナローガイド方式を採用している。直流電動機②の動力はギヤボックス③を介し、主軸内のボールネジに伝えられる。

このしゅう動面とボールネジのため、加工時の低速運動時においても、スティックスリップ等の不規則運動のない完全なサーボ運動を保証している。ギヤボックス内には、トルクミッタを有しているため、誤動作等により電極が被加工物に衝突しても、機械自体にある力以上かからないようになっている。電解液は機械後部より導入され、前方の供給管④を通り、電極取付定盤へ供給されている。⊖側通電部は機械後方より⊖導体を通り、絶縁板を介して主軸に取付けられた電極取付定盤へ導かれている。

したがって機械本体は電流経路とはまったく独立しているため、漏えい電流による抵抗損から発生する熱ひずみをなくするとともに、テーブルと電極取付定盤との極性変換を行ない、電極、被加工物を逆に加工することも可能である。コラム前方内側には、主軸、零点

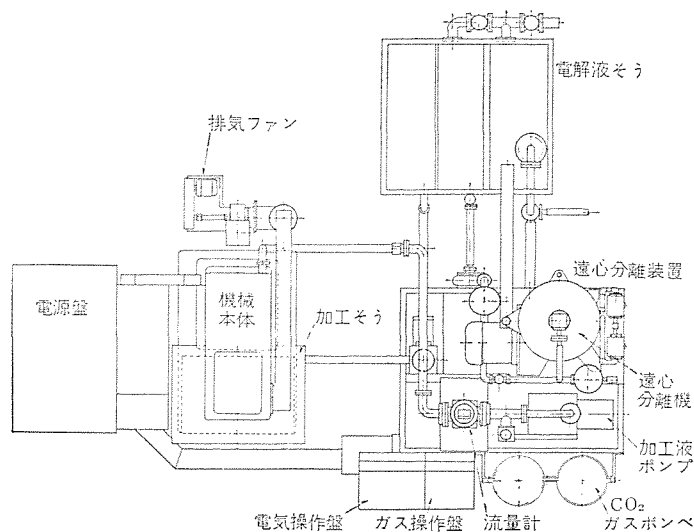


図 3.1 ダイアシンカ 電解加工機 MC-20 V 平面  
Plan of E. C. M. "Diasinker" type MC-20 V.

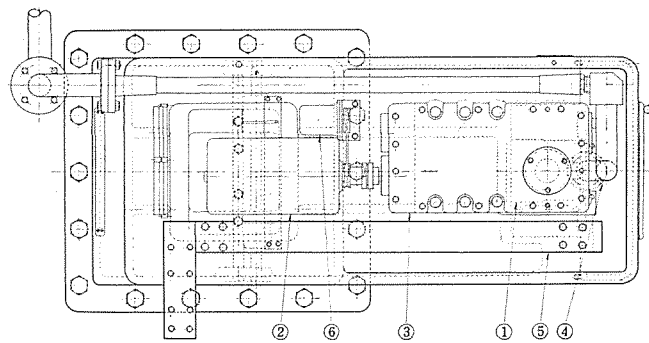


図 3.2 ダイアシンカ 電解加工機 MC-20 V コラムヘッド平面  
Plan of column-head of E. C. M. "Diasinker" type MC-20 V.

設定用機器、加工深さ設定機器などが内蔵されているが、すべて密閉保護できる構造になっている。

加工が行なわれる加工そう部はそう本体、テーブル、電極取付定盤が高級ステンレス鋼にて作られているほかは特殊のライニング加工が施こされている。また加工直後の電解液は、ある程度の温度上昇は避けられないため、加工そう下部にある電解液の受けざら部は上下に2分され、液温による受けざらの熱ひずみが直接サドルのほうへ伝わらないようになっている。

加工によって発生する水素ガスは機械後方にある排気ファンに吸引され、加工そう側面にある空気穴より、常に新鮮な空気がそう内に補充され、そう内の水素濃度は水素の爆発範囲の最小値4%をはるかに上まわるよう(10数倍)に希釈されている。

サドル部分はテーブルの左右の位置決めを行なう所であるが、これは前後左右ともハンドル操作で行なう。⊕側通電導体はサドルの横より、その内部を通りテーブルの下へ導かれている。テーブルは絶縁板を介して機械本体に締付けられている。

#### 3.2 電解液およびろ過装置

図 3. 3 に電解液およびガスの回路図を示す。電解液そうは清、濁の2そうに分かれている。電解液はポンプ P<sub>1</sub> により清液そうより流量計 F・M を通り電極へ圧送され、加工に使われる。P<sub>1</sub> より出た液はバイパス弁 V<sub>1</sub> の操作により所定の圧力、流量に調整される。加工後、加工反応物を含んだ液はポンプ P<sub>2</sub> により一時濁液そうに貯えられる。濁液そうの液はポンプ P<sub>3</sub> により遠心分離機に供給され、加工反応物が除去される。きれいになった液は清液そうに戻される。遠心分離機により除去された加工反応物は間欠的に外部へ放出され

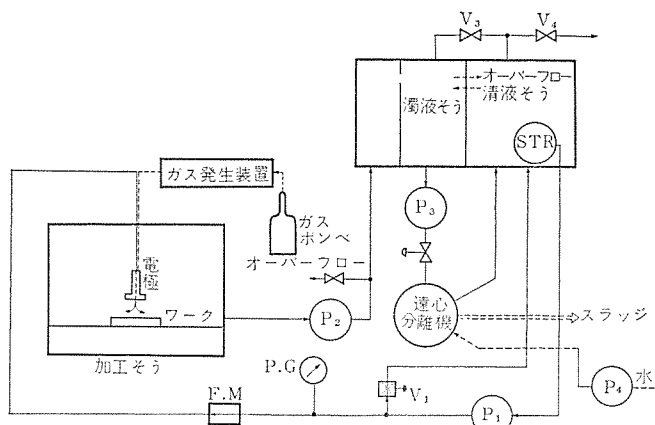


図 3.3 ダイアシンカ 電解加工機 MC-20 V 電解液  
およびガス回路図  
Flow chart of electrolyte and gas of E. C. M.  
"Diasinker" MC-20 V.

る。以上の配管等において、電解液としては腐食性の強い食塩水が使用されているうえ、加工により液温が上昇し、さらに一部は高圧配管となるため、ステンレス鋼や通常の合成樹脂類は、電解液通路としては使用に堪えない。したがって、これらの配管類はもちろん、電解液そう、加工液ポンプ  $P_1$  を除く他の補機ポンプ類は、独得のライニング加工をほどこしている。そのためこれらの補機類、配管類は非常に信頼性の高いものになっている。加工液ポンプの性能は加工性能に直接影響をおよぼすので、とくに耐食塩水としての材質を吟味したタービンポンプを使用している。

ろ過装置としては自動排出形の遠心分離機を使用している。遠心分離機は、高速に回転している回転体内部で遠心分離作用を利用し、電解液とスラッジ（反応生成物）とを分離する。スラッジの排出動作は、作動水ポンプ  $P_4$  により供給された水が回転体外周にある弁シリンダ内に水圧を生じさせ、回転体の開閉により行なう。また分離効果を高めるため、そう内にて電解液の酸化を促進させ、スラッジを比重の重い水酸化第2鉄に変えている。その結果、電解液の清澄度を 60～90% にあげ、加工には常に清浄な電解液を供給している。これらの作動はすべて自動的に行なわれるため、作業者は加工に専念できるようになっている。このため、従来効果的なろ過装置がないため、汚濁した液の交換による実質作業能率の低下や、また加工現象や機械性能に二次的な悪影響を及ぼし、電解加工の威力を半減していた欠点を一挙に解決している。

### 3.3 制御系統

電解加工機の制御系統は、電気（加工条件設定を含む）、電解液、ガス、遠心分離機関係、と多方面の制御系が混在する。三菱電解加工機ダイアシンカの制御はほとんど機械的前方にある操作盤で行なえる。すなわち操作盤は電気、遠心分離機、ガスの3ブロックからなり、操作器具は「オン」、「オフ」のスイッチ類、および電流、電圧、速度計などのメータ類およびそれらの調整器具からなっている。操作盤外の制御器具はコラム内の零点および加工深さ設定のみにとどめている。

また、電解液およびガスの圧力計、電解液の温度計は加工中監視しやすいよう、コラム前面に配置されている。電解液流量計および同調整バルブは操作盤の近傍にあり、操作盤と同時に制御可能である。電解液の温度計は前述のようにコラム前面にあるが、通常の加工の場合、液温制御は必要でないで温度表示のみである。耐熱鋼、ス

テンレス鋼などの加工を行なう場合は液温制御装置をつけられるようになっている。

### 3.4 安全装置

三菱電解加工機は、操作が容易で、構成部品も、十分吟味されたものを使用しているが、万一の誤操作、部品損傷に対する安全装置を備えており、機械の保護を行なっている。以下列挙してみると、

- (1) 過電流保護装置
- (2) 低電圧保護装置
- (3) 電源装置の断風リレー
- (4) 主軸駆動系のトルクミッター
- (5) 加工そうドラススイッチ
- (6) 加工そう内排気ファン駆動の確認
- (7) 加工そう位置検出 (MC-50 V 以上)
- (8) 各種モータルの過電流リレー、および短絡保護
- (9) 遠心分離装置の作動圧の検出スイッチ
- (10) 各種操作スイッチ、ボタンなどの誤操作時のインターロック

### 4. ダイアシンカ MC-50 V および 100 V

大型機 MC-50 V、MC-100 V 形の構造も基本的には、MC-20 V 形と同じ構造をするが、大形機独特の考慮がなされている。

#### 4.1 機械の剛性

機械の剛性はますます強化が要求され、被加工物によっては、加工反力が 10 トン近くにおよぶものがあるため、MC-100 VG は門形構造を有し、加工反力に対する機械剛性の強化を計っている。

#### 4.2 被加工物の搬入、搬出

電流量の増大に伴い、被加工物の形状、重量も増大するため、被加工物の加工テーブルへの搬出入に対し特別な考慮が払われている。すなわちテーブルは主軸の中心位置より、前後左右それぞれ所定のストローク分だけ移動できるが、そのほかに被加工物の搬出入時、主軸中心より、1,200 mm だけ左方へ、電動で移動可能となっている。被加工物の搬出入は、テーブルを移動させたのち、加工そう上面よりクレーンなどで容易に行なうことができる。

#### 4.3 大電流の通路

大容量の電解加工機は、とくに電流通路に特別の設計的配慮が必要である。導体の抵抗損などによる熱ひずみのほかに、主軸、テーブルを移動可能とするための可とう導体の重量は機械的ひずみの発生源となり、電解加工精度の低下の原因となる。MC-50 V および MC-100 V は機械の熱ひずみの影響をさけるため、導体やその締付部の電流量は温度上昇 20°C 以下に抑えるよう、十分余裕をもって設計されている。また可とう導体そのものは、別に電源盤のほうから支柱を出し、その重量をささえ、機械への影響を極力さけている。このため機械精度の保持と長時間連続運転が可能となっている。

### 5. む す び

以上三菱電解加工機ダイアシンカに基づいて、電解加工機の構造の概要についてのべた。今後、種々の電解加工の専用機もふえることとなるだろうが、構造上考慮される点は前述したものと同様である。電解加工法もその加工法、電解加工機自体の発達でようやく実用化の時期が到来した。今後放電加工機とならんで、ますます金属加工の分野に発展していくものと思われる。

# ダイヤシンカ電解加工機の電源シリーズ

吉田 太郎\*・久慈 陽一\*・大矢広太郎\*

## Series of Diasinker Electro-chemical Machine Power Supply Units

Nagoya Works Taro YOSHIDA・Yôichi KUJI・Kôtarô ÔYA

Present marvellous development of electro-chemical machines owe greatly to the advent of silicon rectifiers of large power use and to the progress of control engineering derived from the application of saturable reactors, thyristors and transistors. Power supply units for use with Mitsubishi electro-chemical machines now in production are rated 2,000 A, 5,000 A and 10,000 A maximum. The working current is controlled at the AC side with saturable reactors excited by a thyristor circuit. The construction of saturable reactor is very rugged and there is no danger of causing the excessive short circuit current because of its characteristics. This makes the most suitable power supply to the electro-chemical machine. There are two types of power supply characteristics for electro-chemical machine ; constant current and constant voltage ones.

### 1. ま え が き

今日、電解加工機がめざましい発展をとげるに至ったのは、大電力用シリコン整流素子の出現によって、経済的で効率のよい直流大電流電源が製作できたからであるといっても過言ではない。さらに可飽和リアクトル、サイリスタ、トランジスタ等からなる制御回路の進歩に負うところが実に大きい。

大電力用シリコン整流器が開発される以前には加工現象の研究が行なわれても、電解加工機の実用化ならびに普及は不可能であったであろう。

三菱電解加工機電源は現在、最大出力電流、2,000 A, 5,000 A, 10,000 A の標準 3 機種と、超硬合金電解加工用特殊電源、最大電流 1,000 A とを製作している。

ここでは、電解加工機電源の具備すべき条件、回路方式、回路の動作原理、電源盤構造について概要を紹介し、電解加工に関心を持たれる各位のご参考に供する次第である。

### 2. 電 源 回 路

電解加工機は 4 V~15 V の直流電圧を微小間げき (隙) 0.1~0.4 mm を隔てて対向させた電極と被加工物との間に印加し、数千アンペアの電流を、安定にかつ連続的に調整供給できる電源を必要とする。電極と被加工物が短絡した場合、直ちに電流をしゃ断する必要があり、またかりに短絡電流が流れたとしても配電系統をおびやかすような過大短絡電流とならないインピーダンスの大きい回路方式が望まれる。加工が定常的に行なわれている場合電極と被加工物の対向面積の変化に対して電流を調整する必要があるが、応答は電解加工現象からして 0.5~1 sec 程度で十分であり加工上支障はない。

#### 2. 1 基本方式

以上の条件を考慮して、電源回路方式として、可飽和リアクトルによって交流一次側で電流を制御し、その後、降圧して、シリコン整流器で整流する方式とした (図 2. 1)。可飽和リアクトルはサイリスタにくらべ応答がおそいが電解加工用としては十分な性能をもっている。また定電流源の動作をし、垂下特性をもつので、極短絡に対して、過大短絡電流が絶体流れず、非常に安心して使え、過電流保護として特別な装置を必要としない。サイリスタのようにサージ過電流に対する保護を必要としないので非常に信頼度が高くがん (頑) 丈である。電解加工用電源として可飽和リアクトル制御は最も適した方式といえよう。

電解加工機では加工の進行に伴い電極を送り込むサーボ機構が電源と並んで電解加工方式を決定する重要な構成要素である。

サーボ機構と電源特性との組合わせによって電解加工方式として次の二つが考えられる。

(1) 電源は定電流特性として (図 2. 2)、基準電圧と加工間げきとを比較してその差で油圧サーボを駆動し、加工電圧を一定に保つようにする方式である (図 2. 3)。加工電圧は間げきによって二次

表 1. 1 ダイヤシンカ電源特性一覧  
Characteristics of Diasinker electrical source.

電源機種 特性項目	2,000 A (MC-20 V 用)	5,000 A (MC-50 V 用)	10,000 A (MC-100 V 用)	特殊電源 (超硬合金用)
最大加工電流 A	2,000	5,000	10,000	正方向 1,000 逆方向 500
電 流 波 形	直 流	直 流	直 流	バイアス交流 半波直流
電 源 特 性	定電流	定電流	定電流	定電流
加工電圧 V	無負荷 20	4~12	無負荷 20	4~12
電極送り方式	油圧 サーボ	電動機 油圧 サーボ	電動機 油圧 サーボ	電動機 油圧 サーボ
電源電圧 V	200/220	300/220	400/440	200/220
電源周波数 c/s	50/60	50/60	50/60	50/60
整 流 回 路	三相全波	六相 ダイヤメリカル	六相 2 重星形	単相半波
シリコン 整流素子	SR-200 H	SR-200 H	SR-200 H	SR-200 H



図 2. 1 電源回路方式  
System of power supply circuit.

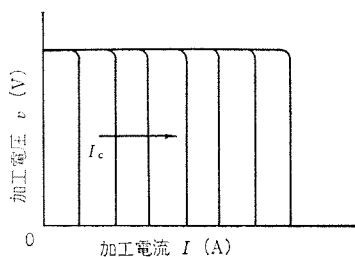


図 2.2 定電流特性説明図  
Constant current characteristics.

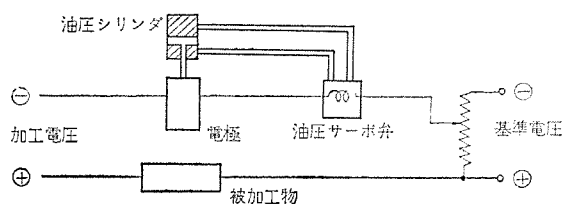


図 2.3 油圧サーボ方式  
Hydraulic servo system.

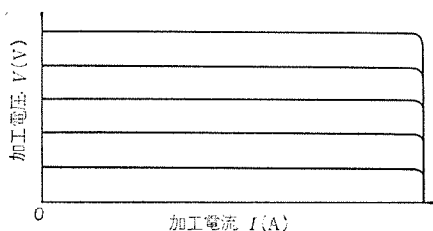


図 2.4 定電圧特性説明図  
Constant voltage characteristics.

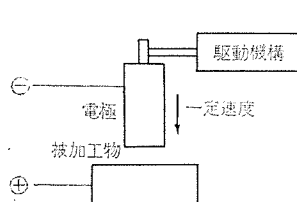


図 2.5 定速送り方式  
Constant speed feeding system.

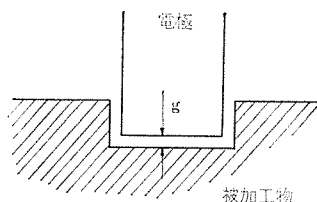


図 2.6 すきま説明図  
Gap.

的に定まる。この方式では、電極面積が大きくなった場合に電流密度を一定に保つため加工電流を調整するには可飽和リアクトルの励磁電流を手動で調整する必要がある。またこの方式は間げきを必ず保つように制御されるから電極と被加工物が激突することは絶体になく、非常に安定な加工を行なうことができる。電極が短絡したような場合油圧サーボによって応答早く、間げきを広げる方向に電極が移動する。送り込み速度を考慮する必要がなく加工面が広くて送り速度のおそい場合も安定に加工でき、操作が簡単である。電極面積に関係なく設定した加工電流で定まる加工速度となり、電源に無理がかからない。

(2) 電源は定電圧特性として、電極を一定の速度で送る方式(図 2.4, 図 2.5 参照)。

これは電極面積が大きくなった場合でも、電源は定電圧特性であるので電流は自動的に増加し電流密度が一定になる。

$g$ : 電極と被加工物の間げき (図 2.6 参照)

$J$ : 電流密度

$\rho$ : 電解液の比抵抗

$V$ : 加工電圧 (間げきに印加される電圧)

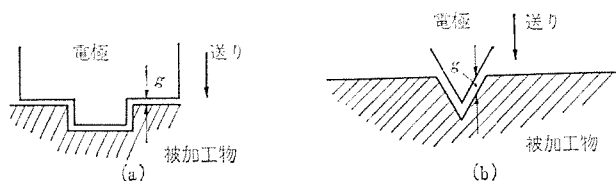


図 2.7 電極面積の変化  
Change of electrode area.

とすれば

$$g = \frac{V}{\rho J} \quad (2.1)$$

となる。したがって加工電圧  $V$  と電流密度  $J$  を一定にすれば間げき  $g$  が一定となり、精度のよい加工ができることになる。

定電圧電源を用いれば  $V$  は一定となり、 $J$  は電極送り込み速度で一義的に定まる。

溶解速度を  $v_s$ 、定数を  $K_s$  とすれば

$$v_s = K_s J \quad (2.2)$$

送り込み速度  $v_m$  とすれば定常状態では、

$$v_s = v_m \quad (2.3)$$

したがって式 (2.2) (2.3) より

$$J = \frac{v_m}{K_s} \quad (2.4)$$

となって送り込み速度  $v_m$  を一定に制御すれば電流密度は一定となる。

この方式を用いれば、図 2.7 のような電極形状で加工が進むにしたがい電極と被加工物の対向面積が変わる場合でも間げき  $g$  を自動的に一定に制御することができる。一方、電極は間げきの状態に関係なく一定速度で送られてくるから間げきの短絡に対してはとくに注意する必要がある。電極面積が大きい場合、電源の電流容量との関係から送り込み速度が限定されるのでこれを考慮して操作する必要がある。

定電圧特性であるから短絡した場合過大電流が流れる危険があるが、可飽和リアクトルによる定電圧電源であれば一定電流以上で垂下特性となり、電流を制限することができる。

以上二つの方式は一長一短があり、当社は電源シリーズとして両方式を製作して用途ならびに客先の希望に応じている。

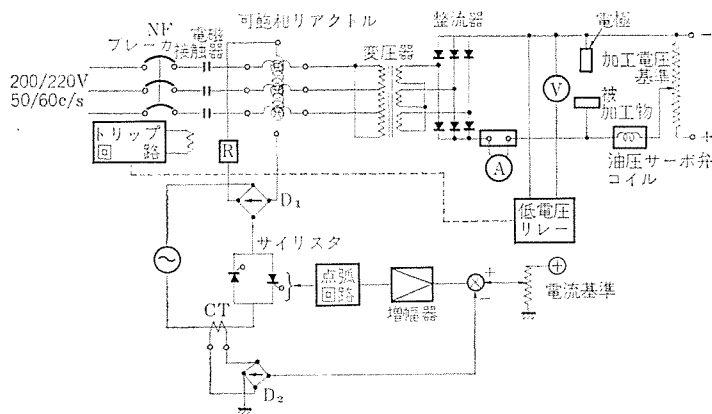
## 2.2 回路の実例

### 2.2.1 定電流サーボ方式

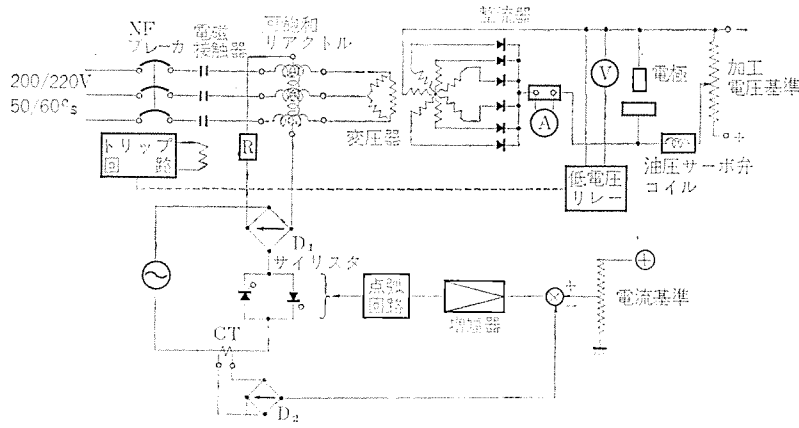
図 2.8 に回路を示す。この回路の加工電圧加工電流特性は、5,000 A 電源の場合について実測データを示すと図 2.9 のとおりである。電流容量に応じ整流器、変圧器が最も経済的になるように整流回路を設計している。2,000 A 電源では三相全波整流回路、5,000 A 電源では六相ダイアトリカル結線、10,000 A 電源では六相2重星形結線となっている。

無負荷直流電圧は 20 V である。電流調整は交流側の可飽和リアクトルによって行なっているが、その励磁はサイリスタを用いて定電流制御されている。すなわち電流基準より加工電流指令が与えられると、励磁回路交流側の電流を CT で検出し  $D_2$  で整流したフィードバック電流と基準値が比較され、その差が増幅器で増幅され、その出力に応じた位置の点弧パルスがサイリスタに与えられる。これによって可飽和リアクトルの励磁回路の電流の平均値が、電源電圧変動、回路抵抗の変化などに関係なく基準値に一致するように制御される。サイリスタによって制御された交流電流は整流器  $D_1$  によって整流され、

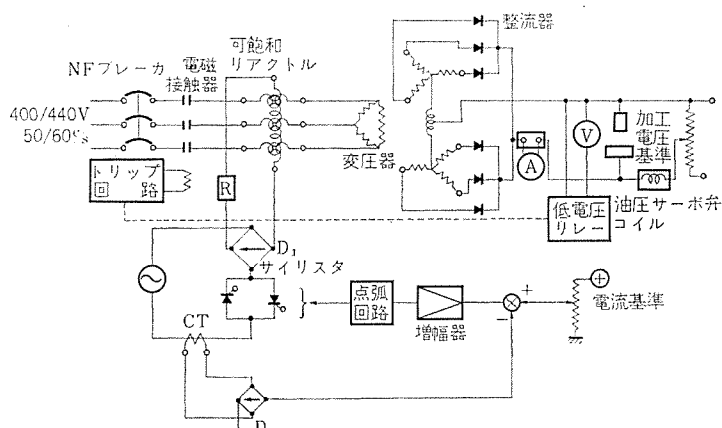




(a) 2,000 A 電源 (MC-20 V 用)



(b) 5,000 A 電源 (MC-50 V 用)



(c) 10,000 A 電源 (MC-100 V 用)

図 2.8 定電流方式  
Constant current system.

可飽和リアクトル 励磁巻線に与えられる。

$N_A$  : 可飽和リアクトルの交流巻線

$N_c$  : 可飽和リアクトルの直流励磁巻線の巻数

$I_A$  : 交流巻線の電流平均値

$I_c$  : 直流励磁電流

とすると次の等アンパターンの関係が成り立つ

$$N_A I_A = N_c I_c \quad (2.5)$$

$$I_A = \frac{N_c}{N_A} I_c \quad (2.6)$$

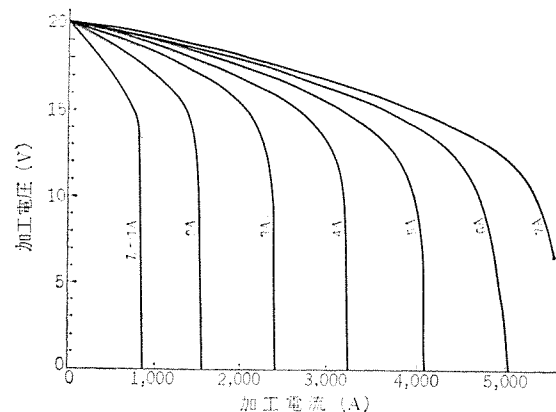
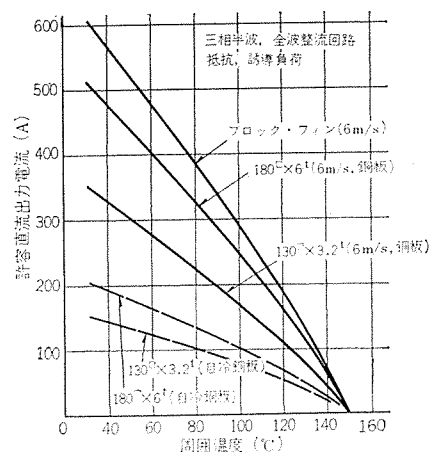
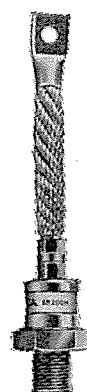


図 2.9 定電流方式電源の電圧-電流特性  
(5,000 A 電源)

Voltage-current characteristics of constant current system. (5,000 A source)



(a) 特性



(b) 外観

図 2.10 SR-200 H シリコン 整流素子の特性と外観  
Silicon rectifier type SR-200 H and its characteristics.

これより励磁電流  $I_c$  を一定にすれば交流電流が一定になることがわかる。実際の可飽和リアクトルでは鉄心特性から理論どおりの等アンパターンの関係はなりたないが、図 2.9 のような定電流特性を示す。したがってこの方式ではサイリスタによって可飽和リアクトル励磁電流が一定に制御されているから、主回路の電源電圧が変動しても垂下特性が一定に保たれ安定した加工ができることになる。

電極は油圧サーボ機構によって送っているが、油圧サーボ弁には加工電圧基準と極間電圧の差に基づく電流が流れ、間げきの電圧が加工電圧基準値にできるだけ一致するような間げきを保つ。たとえば図 2.9 において励磁電流が 3 A に制御されている状態では、加工電圧基準に従って動作点はこの垂下特性曲線上を上下に移動することになる。

電極と被加工物の短絡を保護するために、極間に低電圧リレーをそう入している。低電圧リレーによって極間が短絡もしくは設定電圧以下の低い電圧になったときは NF プレーカのトリップ回路を動作させ、高速しゃ断を行なっている。

整流器は三菱シリコン整流子 SR-200 H らを使用し、電源の出力電流に応じて、並列に接続している。SR-200 H は、1 素子で 240 A (单相半波、ケース温度 72°C) の容量を持っている。強制風冷三

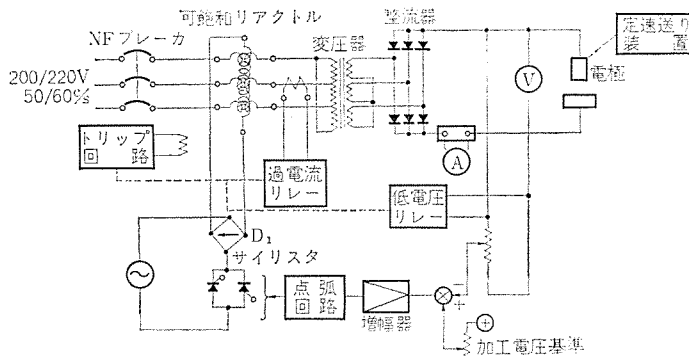


図 2.11 定電圧定速送り方式 (2,000 A 電源)  
Constant voltage-constant speed feeding system. (2,000 source)

相全波回路の特性を図 2.10 (a) に示す。電解加工電源では、ブロックフィンに取付け強制冷却を行なっている。バリスターおよび CR アブソーバによりサージに対して万全の保護を行なっている。並列接続した整流素子間の電流アンバランスを防ぐためバラサによって平衡をとっている。制御回路の増幅器、点弧回路、低電圧リレー等はすべて半導体回路を使用している。

可飽和リアクトル、変圧器は乾式 B 種絶縁を採用している。可飽和リアクトルを採用しているの、それ以後の回路の短絡に対して過大電流が流れる心配はない。したがってシリコン整流器に対して特別に過電流保護装置をつけなくても問題はない。過電流に対しては入力 NF ブレーカによって保護している。

## 2.2.2 定電圧、定速送り方式

図 2.11 に 2,000 A の場合のこの回路方式を示す。加工電圧をフィードバックして、加工電圧基準と比較し、その差を増幅器で増幅し、点弧回路から増幅器出力に応じた点弧パルスをサイリスタに与える。

サイリスタによって可飽和リアクトルの励磁電流が制御され、加工電圧ができるだけ基準値に一致するように制御される。電極と被加工物との対向面積が変わった場合、このように定電圧制御されているので電流は自動的に増加し、電流密度が一定になるよう制御される。電極面積が変わった場合の電流増加の変化は電解加工現象であるからそれほど早くなく、可飽和リアクトルの応答で十分満足できる。電極は定速送り装置によって、負荷変動、電源電圧変動などの外乱に関係なく設定された速度に一定に制御されている。

可飽和リアクトルはサイリスタにくらべて応答がおそく、電流源的動作をするから、電圧制御の面から見れば制御性は劣るが、電解加工機のように短絡を起こす危険のある使い方をする場合にはむしろ好ましく、励磁電流以上の電流は絶体に流さない性質がある。したがって定電圧電源として使った場合でも過大短絡電流が流れる心配がなく非常に安心して操作できる。

短絡に対しては定電流方式と同様に極間に低電圧リレーをそう入し、短絡および設定電圧より低い電圧になったときに NF ブレーカを動作させ電源の高速しゃ断を行なっている。また定電圧、定速送りであるから面積の比較的大きい電極を、早く送って加工電源が定格電流以上になることがしばしば起こりうるの、過電流リレーによって電流を検出し限時特性を持たせて電源をしゃ断するようにしている。これによってシリコン整流器・可飽和リアクトル・変圧器等を過負荷から保護している。

各容量別の整流回路方式は定電流方式と同様である。

定電圧自動制御系のループゲインを  $K$ 、負荷電流変化による電圧変

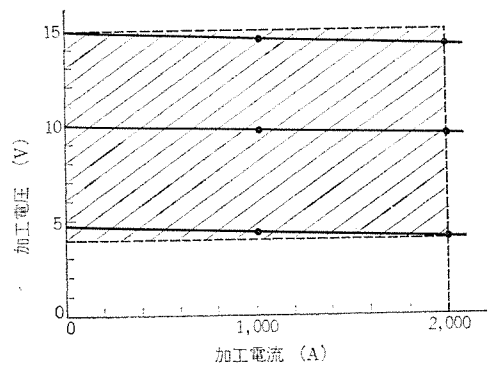


図 2.12 定電圧方式電源の電圧-電流特性 (2,000 A 電源)  
Voltage-current characteristics of constant voltage system for 2,000 A source.

動を  $\Delta v$ 、調整された後の偏差を  $\varepsilon$  とすれば

$$\varepsilon \doteq \frac{\Delta v}{K}$$

となる。今  $\Delta v$  が 100 % 変動し、 $K=20$  とすれば  $\varepsilon = \frac{100}{20} = 5\%$  となり、最初の設定値に対してこれだけ加工電圧が降下することになる。実際に電解加工機を操作する場合、加工電圧設定を無負荷の状態では行わず、おおよその値に設定しておき、加工状態にはいって電流が流れてから正式に設定するから、設定後 100 % の負荷変動はありえない。したがって実際起こりうる設定後の負荷変動を 70 % として、ループゲインとして  $K=15 \sim 20$  に設定すれば、3.5 ~ 4.5 % の精度の定電圧特性が得られる。この程度であれば可飽和リアクトルによる制御でも十分安定に動作を行なうことができ、実際加工上も十分満足できる性能である。図 2.12 にこの電源の定電圧特性を示す。ハッチの部分調整使用できる範囲である。

## 3. 超硬合金加工用特殊電源

以上は直流電源について述べたが、タングステンカーバイトなどの超硬合金を電解加工するためには特殊な波形が必要である。バイアス交流および半波整流波形である。図 3.1 に回路方式と電流波形を示す。単相 200 V の交流側で可飽和リアクトルによって電流を制御し、変圧器で降圧後、シリコン整流器で半波整流を行なっている。交流バイアス波形のときは  $S$  を閉じて、逆方向電流は抵抗によって調整するようになっている。半波整流のときは  $S$  を開く。加工電圧-電流特性は可飽和リアクトルを使っているから垂下特性となる。電極送りは油圧サーボによって行なっている。加工電圧を  $D_3$  で整流し、その平均値

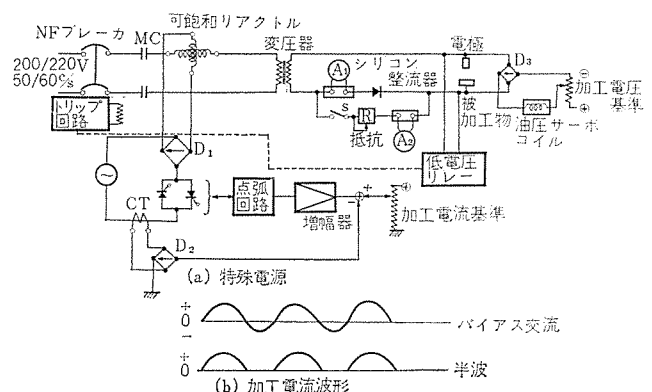


図 3.1 超硬合金電解加工機用特殊電源とその加工電流波形  
Special electric source for sintered tungsten carbide alloy and its working current waveforms.

と加工基準電圧とを比較してその差で油圧サーボ弁を駆動している。可飽和リアクトルの励磁電流は、標準の直流電源と同様サイリスタによる定電流制御を行なっている。出力は平均値で正方向最大 1,000 A、逆方向最大 500 A である。低電圧リレーによって短絡を保護している。

### 3. 1 サーボ方式

電極を送る機構には油圧方式と電動機方式とがあるがそれぞれ一長一短がある。

#### 3. 1. 1 油圧方式の長所、短所

- (1) 応答が早い。
- (2) 主軸の剛性が得られる。
- (3) 位置の制御に向いている。間げきを一定に保つ制御、位置決めのための電極移動、などには制御回路が簡単で非常に使いやすい。速度を問題にしない。ひん繁な直線運動に向いている。
- (4) 送り速度を一定に制御するのが電動機にくらべてやや手がかかる。
- (5) 経済的に電動機にくらべて高価である。

#### 3. 1. 2 電動機サーボの長所、短所

- (1) 減速機構が複雑となり、かつ回転運動から直線運動への変換機構が加わるため、主軸の剛性が油圧サーボにくらべて劣る。
- (2) 電極の進行、後退を急速に行なう場合は、油圧にくらべ応答がおそい。
- (3) 一定方向に一定速度で送る場合は、速度制御が容易で、経済的に安く、油圧にまさる。

前述のように定電流方式の電源の場合は、油圧サーボを用いるが、図 2. 3 に示すように非常に簡単な回路で微小間げき制御ができる。一方定電圧方式の定速送りには電動機による方式と油圧による定速送り方式とがある。図 3. 2 に直流電動機のサイリスタによる速度制御装置を示す。速度発電機 PG の出力と速度基準とが比較され、その差が増幅され、それによってサイリスタが点弧され電動機速度が基準値にできるだけ一致するように電機子電圧が制御される。図 3. 3 にこの装置の外観を示す。

経済的には高価になるが、油圧の特長を生かした油圧による定速度制御方式を図 3. 4 に示す。これはレゾルバを用い、主軸の直線運動をボールネジによって回転運動にかえ、レゾルバ  $Re_2$  を回転させる。一方レゾルバ  $Re_1$  の回転子は、基準速度を与える小形直流電動機によって回転させられている。したがってレゾルバ  $Re_2$  の回転子巻線には、基準速度とボールネジの回転角の差に比例する電圧が誘起する。この

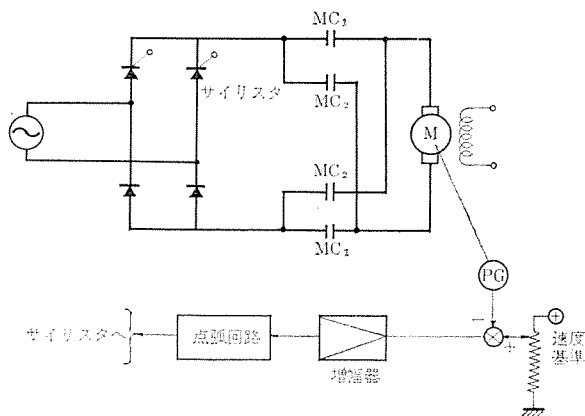


図 3. 2 定速送り用直流電動機 サイリスタ 制御回路  
Thyristor control circuit of DC motor for constant speed servo.

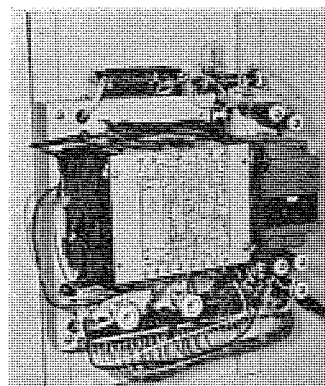


図 3. 3 直流電動機 サイリスタ 制御装置  
Thyristor control equipment of DC motor.

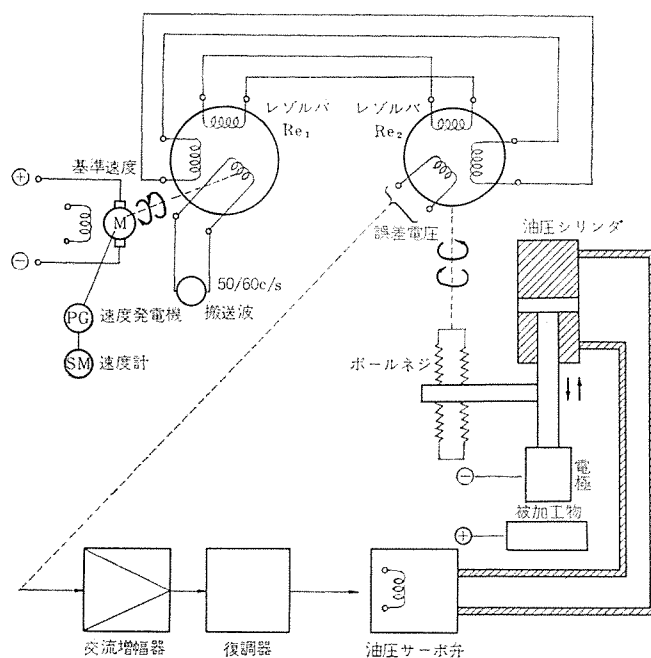


図 3. 4 油圧サーボにおける定速送り方式  
Constant speed feeding system of hydraulic servo.

誤差電圧を交流増幅器によって増幅し、復調して、油圧サーボコイルを励磁し、電極が基準速度に追随するように制御する。これによって電極に加わる反力、油の温度変化によるドリフトなどに関係なく設定速度で一定に送ることができる。この方式は速度制御を必要とせず、電極の移動を高速で行なう場合には、自動制御系を切りはなして使用できる。また定電流電源で使用する場合は図 2. 3 の回路方式に簡単に切り換えができる。これは定電圧と定電流の両方式に対して油圧の特長を生かして使用できる方式と言える。

## 4. 補機回路

電解加工機には多くの補機が付属している。塩水ポンプ用電動機・油圧ポンプ用電動機・排気ファン・遠心分離機電動機・各種電磁弁・ヒータ等であり、これらが電解加工機を運転する際、定められたシーケンスで動作するようになっている。電解加工機電源にはこれら補機を動作させるリレー、電磁接触器等がシーケンスを構成して内蔵されている。

## 5. 構成

電源系統は、操作盤と電源盤とから構成されている。操作盤には、電解加工機を動作させるための各種操作スイッチ・電圧計・電流計・

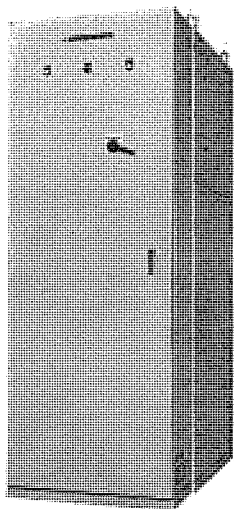


図 5.1 2,000 A 定電圧電源  
2,000 A constant voltage power supply.

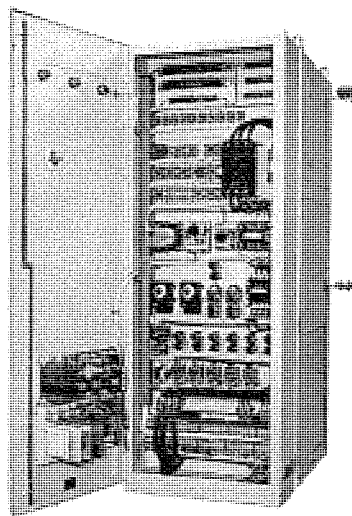


図 5.2 2,000 A 定電圧電源内部  
Interior view of 2,000 A constant voltage power supply.

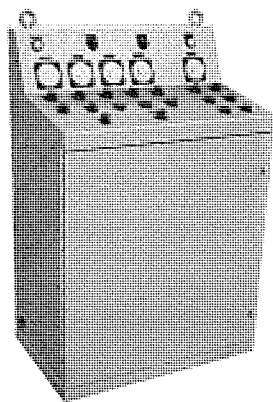


図 5.3 2,000 A 定電圧電源用操作盤  
Control panel for 2,000 A constant voltage source.

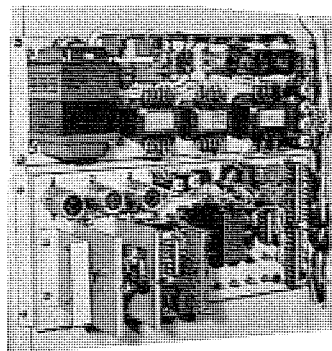


図 5.4 可飽和リアクトル制御用サイリスタ回路パネル  
Thyristor circuit panel for saturable reactor control.

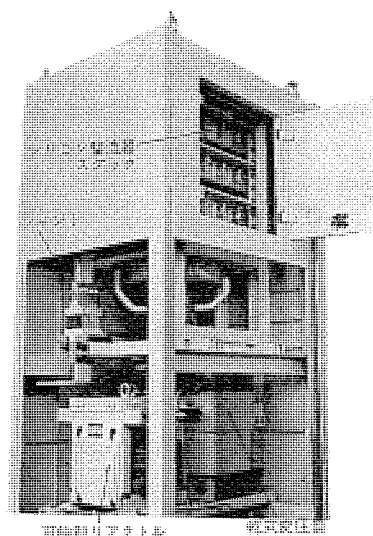


図 5.5 2,000 A 電源後部  
Back view of 2,000 A power supply.

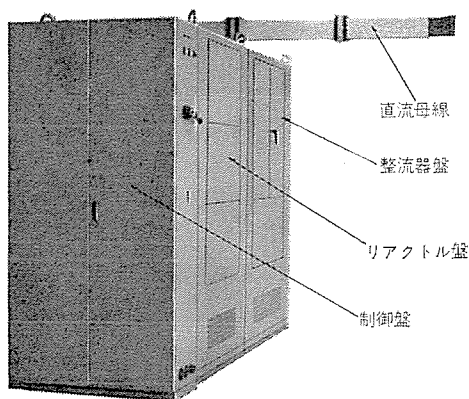


図 5.6 10,000 A 電源  
10,000 A power supply.

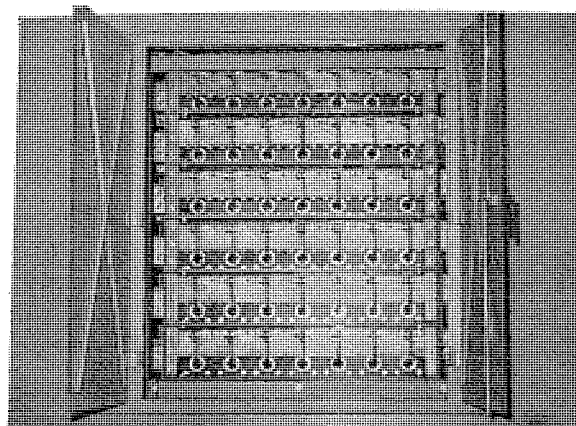


図 5.7 10,000 A 電源のシリコン整流器スタック  
Silicon rectifier stack of 10,000 A power supply.

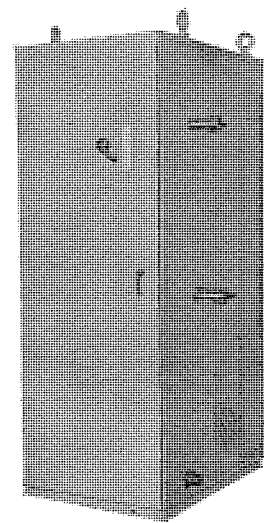


図 5.8 超硬合金用特殊電源  
Special power supply for sintered tungsten carbide alloy.

速度計などの計器類が装着されている。電源盤は 2,000 A と超硬用特殊電源のものは一つのキュービクルにまとめられているが、5,000 A 用は、整流器盤と制御盤（可飽和リアクトル、制御回路を含む）の二つに分かれており、10,000 A 用は制御盤、リアクトル盤、整流器盤の三つに分割されている。

塩水による腐食に対しては、十分な防食処理を行なっている。整流器は強制風冷を行なっているのでキュービクルは通風を十分考えた設計をしている。図 5.1 は 2,000 A 定電圧電源の外観であり図 5.2 は、その正面とびらをあけた写真である。図 5.3 は、2,000 A 電源の操作盤、図 5.4 は、2,000 A 電源の可飽和リアクトルを励磁するための、サイリスタ回路のパネル、図 5.5 は、2,000 A 電源のうしろ側から見た内部機器配置である。図 5.6 は、10,000 A 電源の外観であり、図 5.7 は、10,000 A 電源のシリコン整流器スタックである。

図 5.8 は超硬合金用特殊電源である。図 5.9～5.12 は各種電源の外形寸法図である。

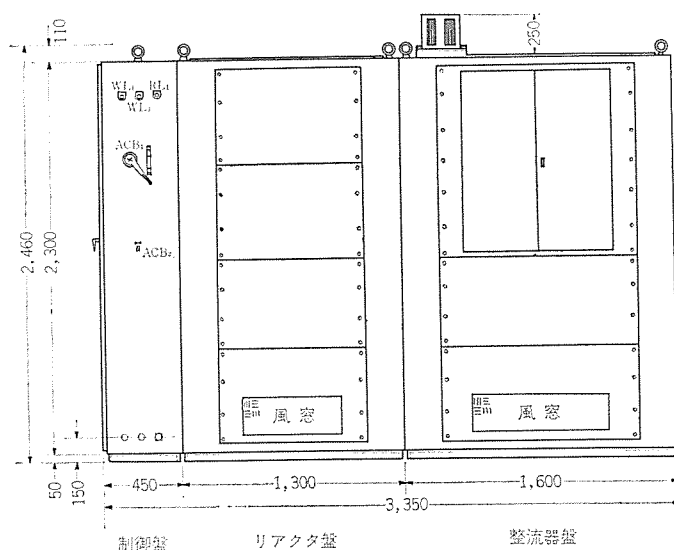


図 5.9 10,000 A 電源外形寸法図

Outline dimensions of 10,000 A power supply.

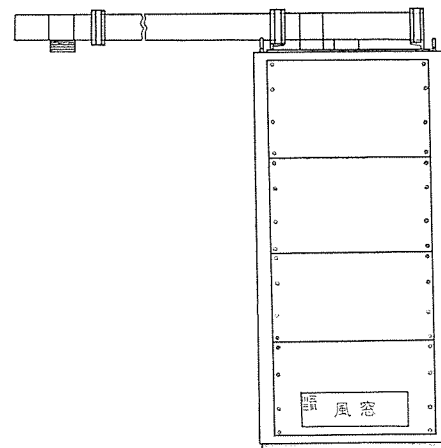


図 5.12 超硬合金用特殊電源外形寸法図

Outline dimensions of special power supply for sintered tungsten carbide alloy.

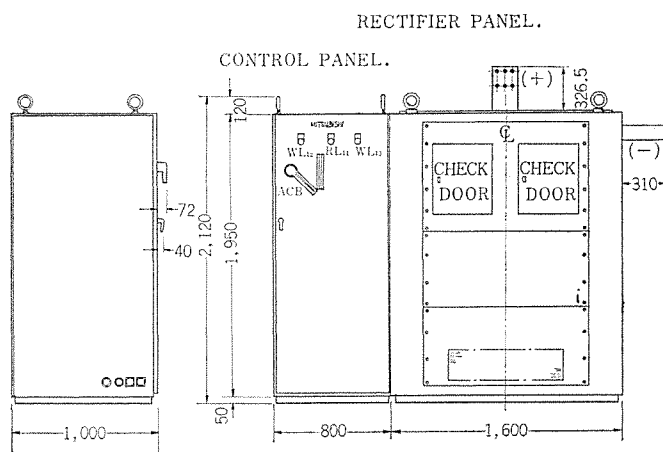


図 5.10 5,000 A 電源外形寸法図  
Outline dimensions of 5,000 A power supply.

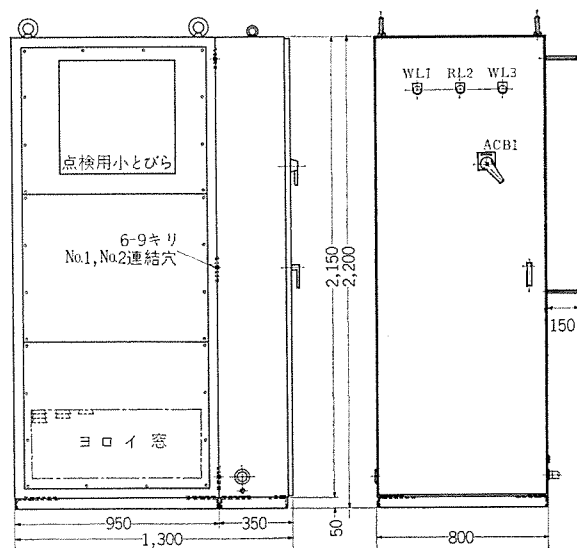


図 5.11 2,000 A 定電圧電源外形寸法図  
Outline dimensions of 2,000 A constant voltage power supply.

## 6. む す び

以上三菱電解加工機 ダイヤシカの電源についてその回路方式を紹介した。電源特性には電極送り機構との組合わせによって定電流—油圧サーボ方式と定電圧定速送り方式の2種があることを解説した。それぞれ一長一短がある。加工電流制御は可飽和リアクトルによるのが安全性、制御性の面から電解加工には最も実用的方式であると考えている。電解加工機はまだちょいついたばかりであり、今後加工精度向上の研究が進むにつれて、現在行なっているように電圧と送り速度の制御のみでなく、種々の要素を制御する必要が生まれ電源もますます高度の制御を発揮できるものが望まれるようになるであろう。電解加工法の発展は電源の制御方式にかかっているといっても過言ではないであろう。この小文が電解加工に関心をもたれる各位の参考になれば幸いである。



## Machining Technique of Electro Chemical Machines

Nagoya Works Kazushige KOIKE

Classifying the difference between the electrode shape and machined hole, this study has been made on the changes of over cut for the machined depth through calculations and experiments in a few typical shape. Based on the result, analysis has been tried on the machining shapes of terraced hole, and the phenomena of expansion on bottom have been looked into. Furthermore, with the intention of indicating the accuracy of electro-chemical machining, repeated machining accuracy has been investigated in the side and depth direction to find it to be within 0.05 mm in relatively simple shaped work.

Mention has been also made on practical examples of electro chemical machining on turbine blades, extrusion dies, forging dies and machining parts.

## 1. ま え が き

電解加工はその仕上面の良好な状態のもとで驚異的な加工速度を示し、また工具（電極）の消耗が全然ないことなどから金属加工の分野で大きな注目をあびている。しかし電解加工は一般に高い加工精度は得られがたいと考えられている。この理由の一つは、オーバカットが放電加工などに比べて大きいこと、および加工される穴の形状が単純な投影加工とはならないので、図面形状と著しく異なる形状の電極を必要とすることなどによるものと考えられる。オーバカットを減少させる方法としては、さきに前田<sup>(1)</sup>が気体混入方式によって改善されることを報告している。筆者は主として電極形状と加工される孔形状との関連を明らかにすることを試み、とくにオーバカットが加工深さに対しいかなる変化を示すかについて、計算および実験を試みたので報告する。なおこれを用いて段付穴加工の加工形状の解析も行なったのであわせて報告する。そしてさらに実用されている電解加工の加工精度を示すために、加工精度を中心に最近の加工応用例を述べる。

## 2. 電極形状とオーバカット

電解加工においては被加工物と電極とが電解液を介して対向している限り、電極との距離にほぼ比例して電流が流れるから、オーバカットは深さ方向に対し積分効果があらわれ、単純な電極形状の投影加工とはならない。この点が放電加工と異なり、電極形状の決定が困難な理由ともなる。ここでは電極形状の基礎となるストレート電極・側面電極・テーパ電極について述べる。

## 2.1 底面の極間間けき

側面のオーバカットを論ずる前に、オーバカットと関連の深い底面の極間間けきについて示す。いま図 2.1 のように電極の底面における極間間けきを  $g$  とすれば、この  $g$  と加工条件の間には、すでに次の関係式が成りたつことが知られている<sup>(2)</sup>。

$$g = \frac{V}{\rho \cdot J} (\text{cm}) \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで  $\rho$  : 電解液の見かけの比抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

$V$  : 極間電圧 (V)

$J$  : 電流密度 ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )

このうち  $\rho$  は電解液の種類、濃度、温度そして加工により発生

する水素ガスの量などにより値が変わるものである。一般に電解液の種類としては食塩水が最も多く用いられている。図 2.2 は温度・濃度に対する食塩水の比伝導度 ( $1/\rho$ ) の値を示すものである。前田<sup>(3)</sup>は式 (2.1) の見かけの比抵抗  $\rho$  に、加工中に発生する水素ガス、あるいは電解液に混入する炭酸ガスの影響を考慮し、実際の加工における加工精度を説明した。図 2.3 は  $\rho$  に及ぼす気体の影響を示す前田らの実験結果を再録したものである。図中  $Q_H$ ,  $Q_g$ ,  $Q_e$  は標準状態における単位時間当たりの発生水素ガス、混入炭酸ガスおよび電解液の流量をそれぞれ示すものである。このうち発生水素ガスの流量  $Q_H$  は加工電流  $I$  (Amp) に比例して増加するもので式 (2.2) で求めることができる。

$$Q_H = 6.96 \times 10^{-3} I (\text{e/min N. T. P.}) \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

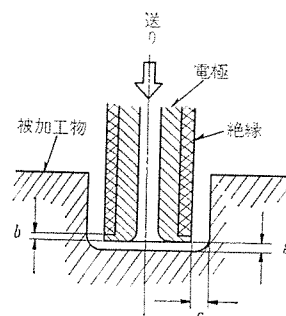
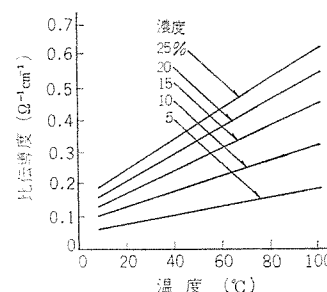


図 2.1 極間間けきとオーバカット  
Gap distance and over cut.



2.2 食塩水の比伝導度  
Conductivity of salt solution.

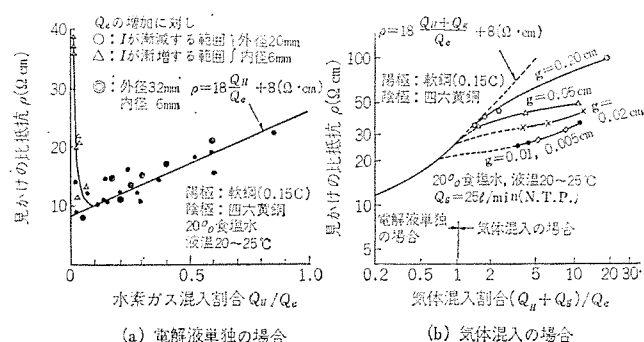


図 2.3 見かけの比抵抗と気体混入割合  
Apparent specific resistance and gas mixing ratio.

## 2.2 側面のオーバカット

側面のオーバカットは深さ方向に対する加工の積分効果によって、底面の極間間隔  $g$  より順次大きくなっていくものである。したがってその値は電極形状とか加工方法などにより異なるため一様に述べることはできない。ここでは代表的な電極形状について、オーバカットが加工深さに対し、いかなる変化を示すかを次の三つの仮定のもとに解析を行なった。

仮定1：電極の送りは常に一定である。

仮定2：電解液の比抵抗は電極の全面において一定である。

仮定3：任意の一点における加工速度はその点から電極への最短距離に逆比例する。

まず第一の仮定については、使用した電解加工機の電極送り方式が定電流密度方式であるため、電極はほとんど一定の速度で送られ、この仮定は成りたつものと考えて実用上さしつかえない。第二の仮定については、発生水素ガスや混入炭酸ガスなどが電解液の圧力変化により体積変化を起こし、さらには電解液が空气中に飛まつとなって飛び散り、電解液の見かけの比抵抗は側面においては底面におけるより著しく大きくなる。したがって普通の加工法では、この仮定は成りたない。しかし図2.4に示すように電解液の出口をしぼり、加工部分に背圧をかける方法（背圧加工法）においては、電解液の圧力変化による気体の体積変化も少なく、また電解液が空气中に飛散するのを防げるので、この場合には、この仮定が成りたつ。第三の仮定については、図2.5に示すように極間における等電位線は必ずしも電極形状に平行にはならない。この等電位分布については前田ら<sup>(4)</sup>がカーボンペーパーを用いて実験した結果などを報告しているが、ここではこれを近似的に取扱った。すなわち図2.5においてこの等電位線と垂直に進む電流線は④のように曲線を描くが、この仮定ではワーク上の一点Aの加工はそこから最も近い電極の一点Bから直線③を通して電流が流れると仮定した。

## 2.3 ストレート電極による加工形状

図2.6のように電極形状が垂直でしかもその側面に逃がしとか絶縁を施していない場合については、すでに前田ら<sup>(4)</sup>がその加工形状について解析を行なっている。この解析結果は後に述べる段付穴加工の解析に用いるため、ここに再録する。

$$\frac{dy}{dt} = \frac{k}{y} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\frac{dx}{dt} = u = \frac{k}{g} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

式(2.3)、(2.4)より

$$\frac{dy}{dx} = \frac{g}{y} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

いま  $X=x/g$ ,  $Y=y/g$  とすると式(2.5)は

$$\frac{dY}{dX} = \frac{1}{Y}$$

$$\therefore Y^2 = 2X + c \quad (c: \text{積分定数})$$

初期条件は  $X=0$  のとき  $Y=1$  ( $=g/g$ ) であるから

$$Y^2 = 2X + 1 \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

前田らはこの結果を用いて、さらに平面形状加工におけるオーバカット量について解析を試み、次のような関係式を導きだしている。この平面形状加工の電極は、図2.1に示すような電極の側面に厚さ  $b$  の幅を残して逃がしをもうけ、その逃がし部には絶縁を施したもので、これは一般に最も多く用いられる標準的電極形状である。

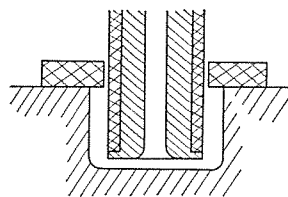


図 2.4 背圧加工法  
Back pressure method.

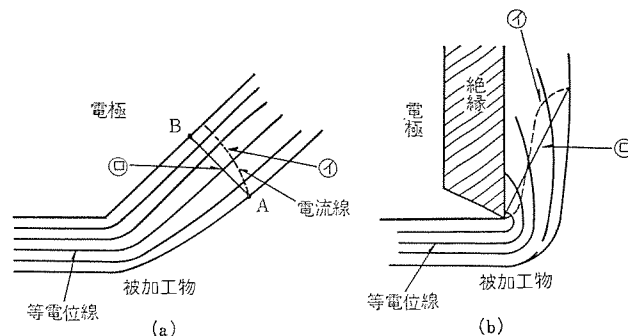


図 2.5 等電位線と電流  
Equipotential line and current.

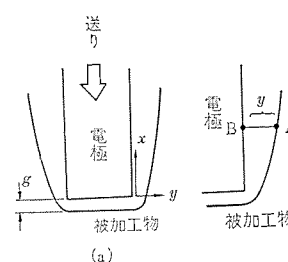


図 2.6 ストレート電極による加工  
Machining by straight electrode.

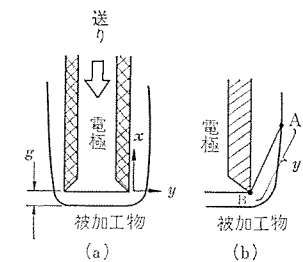


図 2.7 絶縁電極による加工  
Machining by insulated electrode.

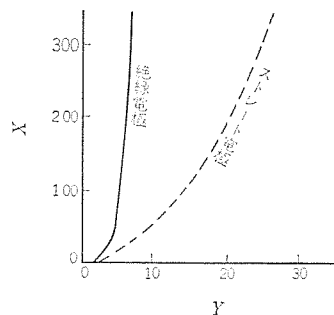


図 2.8 ストレート電極と絶縁電極による加工の解析  
Analysis of machining by straight and insulated electrodes.

$$\frac{c}{g} = \sqrt{\frac{2b}{g} + 1} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

## 2.4 絶縁電極による加工形状<sup>(5)</sup>

図2.7に示すような側面を完全に絶縁した電極で加工した場合の加工形状について、前に述べた三つの仮定のもとに解析を行なってみる。ただし、この場合電極の側面幅の厚さ(図2.1のb)はほとんどないものとする( $b \approx 0$ )。

$$\frac{dy}{dt} = \frac{k}{\sqrt{y^2 + (ut)^2}} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\frac{dx}{dt} = u = \frac{k}{g} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

式(2.8)、(2.9)より

$$\frac{dy}{dx} = \frac{g}{\sqrt{(ut)^2 + y^2}} = \frac{g}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

いま  $X=x/g$ ,  $Y=y/g$  とすると、式(2.9)は、

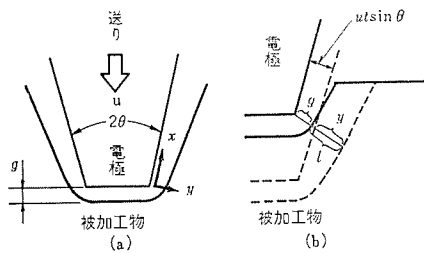


図 2.9 テーパー電極による加工  
Machining by taper electrode.

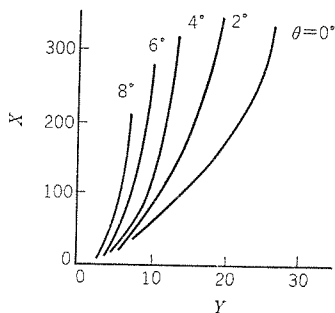


図 2.10 テーパー電極による加工の解析  
Analysis of machining by taper electrode.

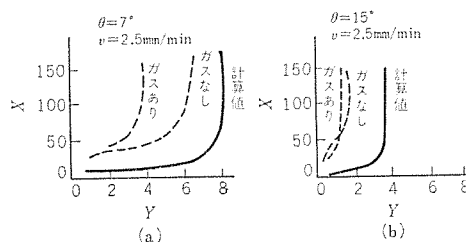


図 2.11 テーパー電極の実験結果  
Experimental results of taper electrode.

$$\frac{dY}{dX} = \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (2.11)$$

(初期条件は  $X=0$  のとき  $Y=1$ )

式 (2.11) の微分方程式は、そのまま解くことができないので電子計算機を用いて Runge-Kutter's Method により近似解析を行なった。その結果を図 2.8 の実線で示す。図中の点線はストレート電極による加工形状を示している。この両曲線から電極に絶縁を施すことにより加工穴のひろがり著しく少なくなることがわかる。

## 2.5 テーパー電極による加工形状<sup>(6)</sup>

図 2.9 に示すような電極の外形が、 $2\theta$  の傾斜角をもったテーパー電極で加工した場合の加工形状についても同様に解析を行なう。

$$l = y + ut \sin \theta - g$$

$$\therefore \frac{dl}{dt} = \frac{dy}{dt} + u \sin \theta \quad (2.12)$$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{k}{y} \quad (2.13)$$

$$x = ut \cos \theta \quad (2.14)$$

$$u = \frac{k}{g} \quad (2.15)$$

式 (2.12), (2.13) より

$$\frac{dy}{dt} = \frac{k - uy \sin \theta}{y}$$

$$\begin{aligned} \therefore t &= \int_0^y \frac{y}{k - uy \sin \theta} dy = \int_0^y \left( \frac{g - \frac{k}{u \sin \theta}}{k - uy \sin \theta} + \frac{\frac{k}{u \sin \theta}}{k - uy \sin \theta} \right) dy = \frac{1}{u \sin \theta} (g - y) \\ &\quad + \frac{k}{(u \sin \theta)^2} \left\{ \log \left( \frac{k}{u \sin \theta} - g \right) - \log \left( \frac{k}{u \sin \theta} - y \right) \right\} \end{aligned}$$

式 (2.14), (2.15) を代入して  $t$  および  $k$  を消去すると、

$$\begin{aligned} \frac{x}{\cos \theta} &= \frac{1}{u \sin \theta} (g - y) + \frac{gu}{(u \sin \theta)^2} \left\{ \log \left( \frac{gu}{u \sin \theta} - g \right) - \log \left( \frac{gu}{u \sin \theta} - y \right) \right\} \\ \therefore x &= (g - y) \cot \theta + \frac{g \cot \theta}{\sin \theta} \left\{ \log \left( \frac{g}{\sin \theta} - g \right) - \log \left( \frac{g}{\sin \theta} - y \right) \right\} \end{aligned}$$

いま  $X = x/g$ ,  $Y = y/g$  とすれば、

$$X = (1 - Y) \cot \theta + \frac{\cot \theta}{\sin \theta} \cdot \log \frac{1 - \sin \theta}{1 - Y \sin \theta} \quad (2.16)$$

式 (2.16) は  $\theta$  をパラメータとした  $X$  と  $Y$  との関係を示し、これを図

で表わすと図 2.10 となる。図中  $\theta=0$  の曲線はストレート電極における加工形状を示し、式 (2.6) で示したものである。 $\theta=7^\circ$  および  $\theta=15^\circ$  テーパーの電極で実験を行なったところ図 2.11 に示すような結果が得られた。この実験に用いた加工条件は次のとおりである。

### 実験条件

使用機種名： ダイシヅカ MC-20 V  
電解液： NaCl 20 % 溶液,  $40^\circ\text{C}$   
被加工物材質： SKD-11  
極間電圧： 10 Volt  
送り込み速度： 2.5 mm/min

この実験の結果  $\theta=7^\circ$  および  $\theta=15^\circ$  の両者とも加工された穴の寸法は式 (2.16) で計算した値よりも電極形状に近くなっている。さらにまた炭酸ガスを混入して加工したほうが電解液のみで加工した場合よりも一層電極形状に近い結果が得られた。これは電解液に背圧をかけないで加工しているので、発生水素ガスの膨張により電解液の見かけの比抵抗が増大したためであり、また炭酸ガスを混入して加工したときは、発生水素ガスに炭酸ガスが加わるためにさらにこの傾向が強まったものと考えられる。

## 3. 段付穴の加工<sup>(5)</sup>

電解加工で段付穴の加工を行なう場合、単に図 3.1 に示すような電極を用いて加工しようとすれば、図 3.2 に示すような小径部にふくらみが生じて所要の形状が得られなくなる。これは小径部の加工状態が大径部の加工開始の前とあととで大きく違うからである。すなわち大径部が加工される前は、小径部の側面では側面幅の厚さの間だけ電解液が満たされているが、その後はガスの膨張、電解液の空気中への飛散などにより、見かけの比抵抗が非常に高い電解液になっている。これに対して大径部が加工され始めると小径部の側面では全体に電解液が加圧され、満たされてしまうため、電解液の比抵抗は小さくなり、側面間げきは大きくなる。この側面間げきの差により小径部にふくらみが生じるものであると考えている。

### 3.1 段付穴加工の実験

段付穴加工における底部のふくらみの原因を追求するために、次の種類の加工法を用いて実験を行ない、そのときの側面間げきを測定した。

(1) 図 3.1 に示すような段付穴加工用電極を用いて普通加工法により加工する。ここで普通加工法というのは電極の中心より電解液を流し、背圧は加えずにそのまま加工する方法をいうことにする。

(2) 同じ電極で背圧加工法により加工する。ここで背圧加工法

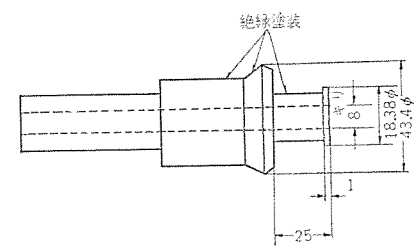


図 3.1 段付穴加工用電極  
Electrode for machining of terraced hole.

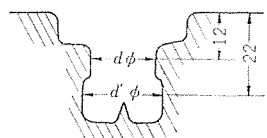


図 3.2 段付穴加工の測定位置  
Measurement position of terraced hole machining.

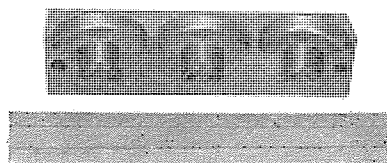


図 3.3 段付穴加工の実験  
Machining experiment of terraced hole.

とは図 2.4 に示したように液の出口をしぼり、極間に加圧された電解液を満たして加工する方法をいうことにする。

(3) 大径穴と小径穴とを別々の電極で加工する。これを二重加工法と呼ぶことにする。

図 3.3 はこの三つの加工法によって加工された穴の断面を示すもので、写真の左より普通加工法・背圧加工法・二重加工法の加工穴を示す。普通加工法の加工穴には底部にふくらみが見える。

### 3.1.1 加工条件

この実験に用いた加工条件は普通加工法と背圧加工法とは同じで次のようである。

使用機種名：ダイヤシカ MC-20 V 形

被加工物材質：SKD-11

	大径部の加工開始前	大径部の加工開始後
加工電流：	330 A	1800 A
極間電圧：	14 V	14 V
液 圧：	16 kg/cm <sup>2</sup>	16 kg/cm <sup>2</sup>
流 量：	50 l/min	50 l/min
加工速度：	2.73 mm/min	2.42 mm/min
V/J：	0.113	0.113
電解液温度：	30°C	30.5°C
電解液濃度(比重)：	1.115	1.115

二重加工法における加工条件は次のとおりである。

使用機種名：ダイヤシカ MC-20 V 形

被加工物材質：SKD-11

	小径部の加工	大径部の加工
加工電流：	330 A	1550 A
極間電圧：	14 V	14 V
液 圧：	16 kg/cm <sup>2</sup>	14 kg/cm <sup>2</sup>
流 量：	50 l/min	50 l/min
加工速度：	2.73 mm/min	2.61 mm/min
V/J：	0.113	0.112
電解液温度：	30°C	30°C
電解液濃度(比重)：	1.115	1.115

この加工条件は、(1) 式における底面の極間間けき  $g$  が一定になるように選んだもので、各加工とも電解液の比抵抗に影響を与える温度および濃度は一定に保ち、また  $V/J$  の値も一定になるよう

表 3.1 段付穴加工の実験結果  
Experimental results for terraced hole machining.

	単位 mm		
	普通加工法	背圧加工法	二重加工法
電 極 径 $d_0$	18.38	18.38	18.38
加工穴径 $d$	19.43	20.35	19.50
加工穴径 $d'$	20.33	20.31	19.40
$(d_0-d)/2$	0.52	0.98	0.56
$(d_0-d')/2$	0.97	0.96	0.51

に加工条件を決めたのである。

### 3.1.2 実験結果

これら 3 種類の加工法によってあけられた穴の直径を図 3.2 に示す  $d$  および  $d'$  の位置でそれぞれ測定した。その測定結果を表 3.1 に示す。これより段付電極を用いた普通加工法では底部にかなり大きなふくらみ(直径で 0.45 mm)が見られたが、背圧加工法および二重加工法ではこのふくらみは見られなかった。また背圧加工法での側面間けきは普通加工法のふくらみ部と等しく、二重加工法での側面間けきは普通加工法のふくらんでいないところと等しくなることもわかった。

### 3.2 ふくらみの解析

普通加工法において底部にふくらみの生ずる原因を次のように考え、そのふくらみ量を理論的に算出してみた。すなわち大径部が加工される以前は小径部の側面では電解液に圧力がかかっていないため、その側面間けきは 2.3 節に記した前田らによる式 (2.7) から求めることができる。これに対して大径部が加工され始めると、小径部では電解液に圧力が加わり側面全体に電解液が満たされるため「電解液の比抵抗はすべての点において一定である」という仮定が成りたつようになり、その側面間けきは絶縁電極における側面間けきを求める式 (2.11) によって算出しなければならない。このように大径部の加工開始の前とあとでは小径部の側面間けきは大きく異なるため、底部にふくらみが生じるのである。これに対して背圧加工法では初めから電解液に圧力がかかっているため、ふくらみは生じないし、その側面間けきは普通加工法によるふくらみ部と等しくなる。また二重加工法では大径部と小径部とは別々に加工するので、加工途中に加工の状態は変化せず、ふくらみは生じない。そしてその側面間けきも普通加工法のふくらんでいないところと等しくなるのである。ここでこの実験における普通加工法のふくらみ量を理論的に算出してみる。

#### (1) 大径部の加工開始前の側面間けき

電解液の流量  $Q_e$  は

$$Q_e = 50 \text{ (l/min)}$$

発生水素ガスの 30°C、1 気圧における発生量  $Q_H$  は式 (2.2) より

$$Q_H = 2.55 \text{ (l/min)}$$

電解液の見かけの比抵抗  $\rho$  は図 2.3 (a) の式より

$$\rho = 8.92 \text{ (}\Omega \cdot \text{cm)}$$

底面における極間間けき  $g$  は式 (1.1) より

$$g = 0.0127 \text{ (cm)}$$

電極の側面幅の厚さ  $b = 0.1 \text{ cm}$  であるから、式 (2.7) より

$$\frac{c}{g} = 4.1$$

表 3.2 計算値と測定値の比較  
Comparison between calculated and measured value.

単位 mm

	普通加工法		背圧加工法		二重加工法	
	計算値	測定値	計算値	測定値	計算値	測定値
$\frac{d_0-d}{2}$	0.50	0.52	0.91	0.98	0.50	0.56
$\frac{d_0-d'}{2}$	0.91	0.97	0.91	0.96	0.50	0.51

$$\therefore c=0.052 \text{ (cm)}$$

(2) 大径部の加工開始後の側面間げき

電解液の流量  $Q_e$  は

$$Q_e=50 \text{ (l/min)}$$

発生水素 ガスの  $30^\circ\text{C}$ ,  $17 \text{ kg/cm}^2$  における発生量  $Q_H$  は式(2.2)より

$$Q_H=0.445 \text{ (l/min)}$$

電解液の見かけの比抵抗  $\rho$  は図 2.3(a) の式より

$$\rho=8.054 \text{ (}\Omega \cdot \text{cm)}$$

底面における極間間げき  $g$  は式(1.1)より

$$g=0.014 \text{ (cm)}$$

加工深さ  $x=2.5 \text{ cm}$  であるから

$$X=x/g=179$$

図 2.8 の実線から  $X=179$  のとき,  $Y=6.5$  となり

$$y=gY=0.091 \text{ (cm)}$$

以上理論的に求めた普通加工法における大径部の加工開始の前とあとの側面間げきと, 実験によって求めた測定値とを表 3.2 に示した。計算値と実測値とはかなり良好な一致が見られた。

#### 4. 繰返し加工精度<sup>(4)</sup>

電解加工に限らず同一加工条件で数多くの加工を行なうと, その加工穴の間には寸法のばらつきが見られる。電解加工においてこのくり返し加工による寸法のばらつき値はどれほどであるのか, 比較的単純な形状の電極を用いて実験した。

##### 4.1 側面方向に対する繰返し加工精度

いま一辺の長さが  $27.9 \text{ mm}$  の正方形電極を用いて 48 個の穴をあけ, その各部における寸法のばらつきをしらべた。図 4.1 はこの実験で加工した 48 個の正方形穴を示す。

##### 4.1.1 加工条件および寸法の測定

この正方形穴加工の実験に用いた加工条件は次のとおりである。

使用機種名: ダイヤシカ MC-20 V 形

被加工物質: SKD-12 焼入鋼 (HRC-60)

加工電流: 1,050 A

極間電圧: 13 V

液 圧:  $17 \text{ kg/cm}^2$

流 量: 60 l/min

加工速度: 3.1 mm/min

加工深さ: 36 mm

電解液温度:  $47\sim 59^\circ\text{C}$

電解液濃度 (比重): 1.120

実験回数: 48

加工された穴の測定は図 4.2 に示すように 48 個の各穴の入口 (上面から 3 mm 下のところ), 中央 (穴の中央のところ), 出口 (下

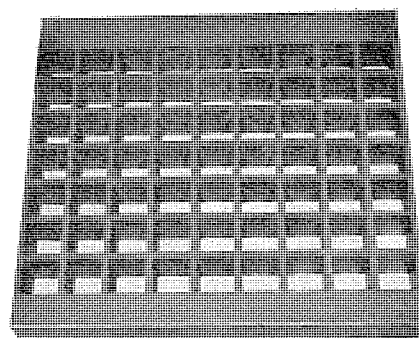


図 4.1 繰返し加工精度の実験  
Experiment of repeated machining accuracy.

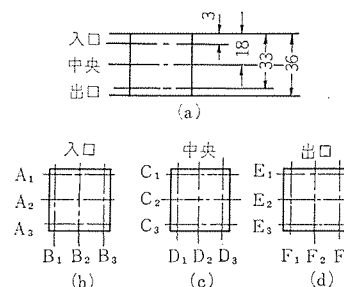


図 4.2 繰返し加工精度実験の測定位置  
Measurement position of repeated machining accuracy experiment.

面から 3 mm 上のところ) においてそれぞれ縦横 3 箇所ずつ測定を行なった。したがって 1 個の穴につき 18 個の測定値を得た。

##### 4.1.2 実験結果

この各部における寸法のばらつきはヒストグラフに示すと正規分布をなしているのので, そのおのおのについて平均値  $\bar{x}$ , 標準偏差  $\sigma$  および  $\pm 0.05 \text{ mm}$  を規格限界とした場合の不良率  $\varepsilon$  を求めた。この不良率  $\varepsilon$  はそれぞれの平均値より  $\pm 0.05 \text{ mm}$  以上の寸法差をもつ測定値が全体の何パーセント存在するかを示すもので, これらの値を表 4.1 および図 4.3 に示す。この結果かな工業的な条件のもとにおいて電解加工で数多くの正方形穴の加工をした場合, その寸法のばらつきは  $\pm 0.05 \text{ mm}$  とみなすことができる。

##### 4.2 深さ方向に対する繰返し加工精度

直径 80 mm の標準丸形電極を用いて, 同一加工条件で 20 回の加工を行ない, 電解加工の深さ方向に対する繰返し加工精度を求めた。この実験において加工深さの設定は特定箇所 リミットスイッチを取りつけ, 一定の深さで加工を停止させてその加工深さを測定した。

##### 4.2.1 加工条件

この実験に用いた加工条件は次のとおりである。

使用機種名: ダイヤシカ MC-20 V 形

被加工物質: S 45 C

加工電流: 1,000 A

極間電圧: 3.0~3.4 V

液 圧:  $13\sim 14.5 \text{ kg/cm}^2$

流 量: 40 l/min

加工速度: 0.44 mm/min

加工深さ: 2.5 mm

電解液温度:  $25^\circ\text{C}$

電解液濃度 (比重): 1.104



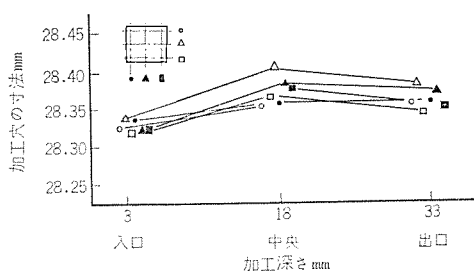


図 4.3 繰返し加工精度の実験結果  
Experimental result of repeated machining accuracy.

表 4.1 側面方向に対する繰返し加工精度  
Repeatad machining accuracy of over cut.

		平均値	標準偏差	不良率
		$\bar{x}$	$\sigma$	$\varepsilon$
		mm	$\times 10^{-2}$	%
入	A <sub>1</sub>	28.33	1.83	0.67
	A <sub>2</sub>	28.34	1.97	1.30
	A <sub>3</sub>	28.32	1.91	1.01
口	B <sub>1</sub>	28.34	2.02	1.52
	B <sub>2</sub>	28.32	1.56	0.05
	B <sub>3</sub>	28.32	1.78	0.49
中	C <sub>1</sub>	28.36	1.86	0.73
	C <sub>2</sub>	28.41	1.66	0.14
	C <sub>3</sub>	28.37	2.04	1.57
央	D <sub>1</sub>	28.36	2.04	1.56
	D <sub>2</sub>	28.39	1.83	0.63
	D <sub>3</sub>	28.38	1.69	0.35
出	E <sub>1</sub>	28.37	2.16	2.23
	E <sub>2</sub>	28.39	1.83	0.64
	E <sub>3</sub>	28.36	2.43	4.33
口	F <sub>1</sub>	28.37	2.12	1.87
	F <sub>2</sub>	28.38	1.80	0.74
	F <sub>3</sub>	28.36	2.30	3.02

表 4.2 深さ方向に対する繰返し加工精度  
Repeated machining accuracy of gap distance.

実験番号	電 流	電 圧	流 量	液 圧	液 温	ばらつき値
	A	V	l/min	kg/cm <sup>2</sup>	°C	mm
1	1,000	3.3	42	13	39	0
2	1,000	3.3	42	13	39	+0.01
3	1,000	3.3	42	13	39	+0.04
4	1,000	3.3	42	13.2	40	+0.035
5	1,000	3.3	42	13.5	42	+0.045
6	1,000	3.4	38	13.5	43	+0.01
7	1,000	3.3	39	13.5	43	+0.05
8	1,000	3.2	39	13.5	42	+0.055
9	1,000	3.2	36	14	42	+0.09
10	1,000	3.2	34	14	42	+0.02
11	1,000	3.2	37	14	42	+0.05
12	1,000	3.1	36	14	43	-0.01
13	1,000	3.1	36	14	43	+0.005
14	1,000	3.1	35	14.5	43	+0.01
15	1,000	3.2	36	14	43	0.00
16	1,000	3.0	33	14.5	44	0.00
17	1,000	3.2	37	14	43	0.00
18	1,000	3.3	38	14	42	-0.01
19	1,000	3.4	38	14	42	+0.005
20	1,000	3.3	38	14.2	42	-0.005

実験回数：20

#### 4. 2. 2 実験結果

実験結果を表 4. 2 に示す。表 4. 2 におけるばらつき値は No. 1 の実験の測定値を基準にして加工深さのばらつきを示したもので、+記号は加工深さの深いもの、-記号は浅いものを示す。この結果から電解加工の加工深さ方向のばらつきは  $\pm 0.05$  mm であることがわかった。なお前項の側面方向に対するくり返し加工精度の結果と合わせて考えれば、電解加工で同一形状の加工を数多くくり返した場合、どの部分においてもその寸法のばらつきは  $\pm 0.05$  mm であると考えられる。

### 5. 電解加工の応用例

これまでは電解加工の加工精度を中心にいろいろ述べてきたが、ここでは電解加工が実際にどのように応用され、どのような加工精度のもとに使用されているかを実例によって示す。

#### 5. 1 タービンブレードの加工

タービンブレードは、一般にステンレス鋼・耐熱鋼などのように被削性が悪く、工具摩耗の激しい材料が用いられている。したがって従来のようにならいフライスで加工していたのでは加工能率が悪い。最近では精密鍛造・精密鋳造などの技術が著しく向上し、タービンブレードの生産にも用いられるようになってきたが、これも設備に巨大な費用がかかる、金型の寿命が短い、付帯する温度管理がむずかしいなど諸問題がある。

これに対して電解加工はタービンブレードの加工に適した特質を数多く備えている。その代表的なものをあげると、

(1) ステンレス鋼・耐熱鋼などの材料でも、電解加工はその被削性に関係なく容易に加工することができる。

(2) 電解加工は電極の消耗が全然ないので、タービンブレードのように同形状の加工を数多く行なう場合には電極代が安くなる。

(3) 本論文では流体の流れについて触れていないが、タービンブレードは流体が乱れずに流れやすい翼形をしているので、極間に一律な電解液の流れが得やすく、加工精度が得られやすい。

このように電解加工はタービンブレードの加工に非常に適し、この分野で広く用いられようとしている。

##### 5. 1. 1 タービンブレード

図 5. 1 に示すタービンブレードは素材を 2 枚ならべて同時に加工したもので、その加工条件は次のとおりである。

使用機種名：ダイヤシカ MC-20 V

被加工物材質：SUS-22

加工電流：1,900 A

極間電圧：7 V

加工時間：20 min

このようなタービンブレードの加工法を図 5. 2 に示す。すなわち図 5. 2 において、(a) 2 枚の素材をならべる。(d) ブレードの翼形を片側ずつ 2 枚同時に加工する。(c) ワークを左右交換し、上下裏返してとりつける。(d) 2 回目の加工によって 2 枚のブレードが完成される。この場合電解液は中央から左右に流してやれば、電解液噴出穴の跡を加工面に残さずに加工することができる。またこの加工法により加工されたタービンブレードの加工精度は  $\pm 0.05$  mm (電解加工のくり返し加工精度) であり、電解加工のまま十分に使用できるものである。なお図 5. 2 は、東ドイツへ輸出した当社の電解加工機ダイヤシカ MC-20 V にて生産されているタービンブレードを示すも

ので、右端の素材から順次加工されて左端の製品を生産しているの  
である。

### 5. 1. 2 タービンホイール

タービンホイールの加工法などについては三菱重工(株) 玉井氏らの  
「電解加工機による実用作業例」の報告に詳しく説明されている。

### 5. 1. 3 タービンディスク

図 5. 4 はタービンディスクにおけるブレードをはめ込むみぞの形状の  
加工を示すもので、これも割り出し治具を用いて一つ一つ加工する。  
この加工条件は次のとおりである。

使用機種名： ダイアシンカ MC-20 V  
被加工物材質： SEH-5  
加工電流： 1,200 A  
極間電圧： 10 V  
加工時間： 14 min

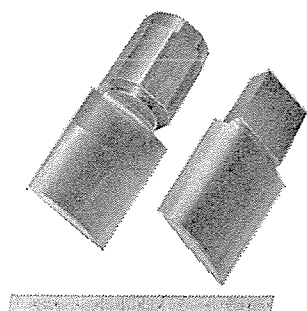


図 5. 1 タービンブレード  
Turbine blades.

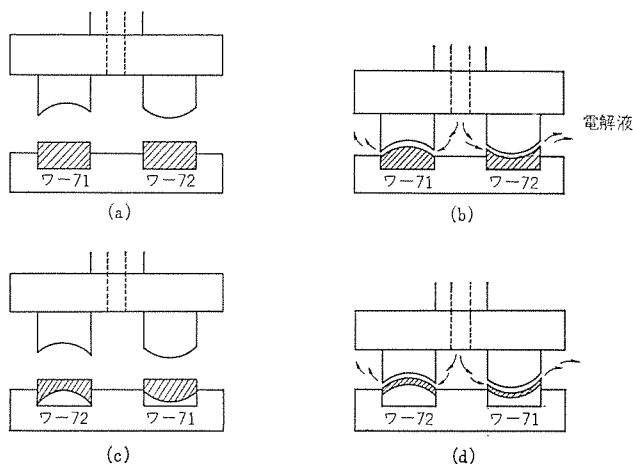


図 5. 2 タービンブレードの加工法  
Machining method for turbine blades.

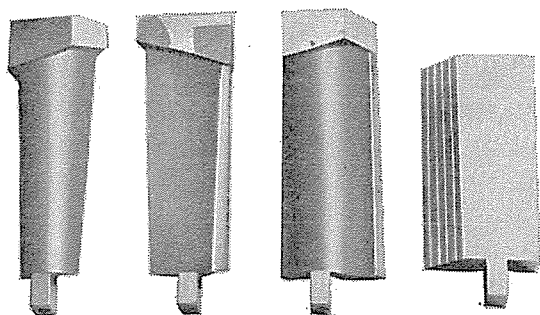


図 5. 3 タービンブレード  
Turbine blades.

この分野においては他にも タービンノズル、ノズルリング など数多くの部  
品に電解加工を応用することができる。

### 5. 2 押し出しダイスの加工

押し出しダイスの製作にも電解加工が採用され、この分野の加工技  
術も大きく変ぼうしようとしている。図 5. 5 は電解加工で押し  
出しダイスの形状をテスト加工したもので、この加工条件は次のとおりで  
ある。

使用機種名： ダイアシンカ MC-20 V  
被加工物材質： SKD-11  
加工電流： 910 A  
極間電圧： 8 V  
加工時間： 6.6 min

この加工における寸法精度は図 5. 6 に示す。これより電極寸法  
と加工寸法の差はだいたい一様に約 0.4 mm (片側で 0.2 mm) で、そ  
の測定場所による寸法のばらつきは  $\pm 0.05$  mm であることがわか  
る。電解加工ではこのような加工形状の複雑なものについては、加  
工の安定性および加工精度はとくにその電極の作りぐあいに大きく  
左右されやすく、高度の電極製作技術が要求される。さらにその電  
極自身の形状も複雑であるため、従来は電極製作にはかなりの時間  
と費用を要していた。

われわれはこの押し出しダイスを加工する電極も電解加工によっ  
て作り出す技術を開発し<sup>(7)</sup>、電極製作を容易にしかも速くすることが  
できるようになった。図 5. 7 は電解加工で成形した押し出しダイス用

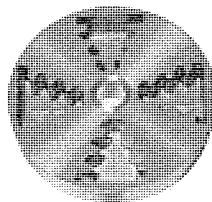


図 5. 4 タービンディスク  
Turbine disk.

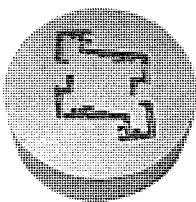


図 5. 5 押し出しダイス  
Extrusion die.

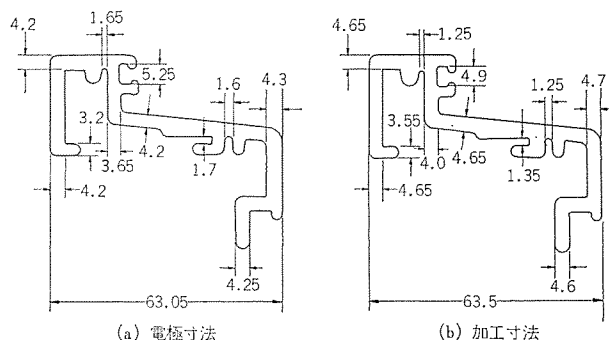
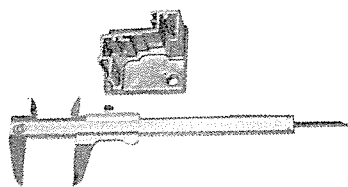
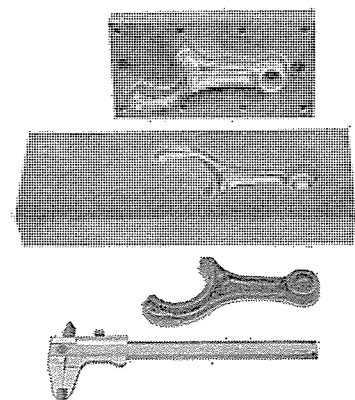


図 5. 6 押し出しダイスの加工精度  
Machining accuracy of extrusion die.

図 5.7 押し出しダイスの電極加工  
Electrode machining for extrusion die.



使用機種名： ダイアックス DM-220  
電極材質： Cu  
加工時間： 3時間53分



仕上面粗度 : 15  $\mu$ H max

図 5.9 にこの コネクティングロッド 鍛造型の電解加工後の寸法精度を示したが、電解加工では放電加工用取りしろとして全体に 0.5 mm 見込んで加工したのである。図中に記されている数値は図面寸法と加工寸法との差を示すもので、この結果放電加工用取りしろは測定場所により異なり 0.1~0.9 mm となった。これよりこのような鍛造型加工における電解加工の測定場所による寸法のばらつきは  $\pm 0.4$  mm であることがわかった。なお放電加工の加工時間はこの電解加工の取りしろであれば従来の ミーリング 加工後とくらべて十分に短くなっている。さらに現在ではトランジスタとかサイリスタを用いた電極消耗の非常に少ない放電加工機が開発されたため、電解加工後の放電加工は銅電極 1 本で最終仕上げまでできるようになり、この鋳造型製作に著しい発展が見られた。

図 5.10 は ボックスパナ の部品加工を示すもので、この部品の二重六角穴のところを電解加工で加工したのである。このように部品加工のなかで、切削が困難な材料や形状に関しては、電解加工はきわめて有効な加工法である。この ボックスパナ 加工の加工条件は次のとおりである。

使用機種名： ダイハツシカ MC-20 V  
被加工物材質： SKD-12  
加工電流： 600 A  
極間電圧： 8.5 V  
加工時間： 18 min

なおこの加工の寸法精度を測定するために、電解加工で加工されたボックススパナの部品の中から任意に5個を選び出し、図 5.11 に示す寸法を測定したところ表 5.1 のようになった。これよりこのような形状での電解加工の加工精度は、同じ測定箇所におけるくり返し加工精度は  $\pm 0.05 \text{ mm}$  であり、また一つの加工穴における測定箇所によるオーパカットの不均一は  $+0.075 \text{ mm}$  であった。

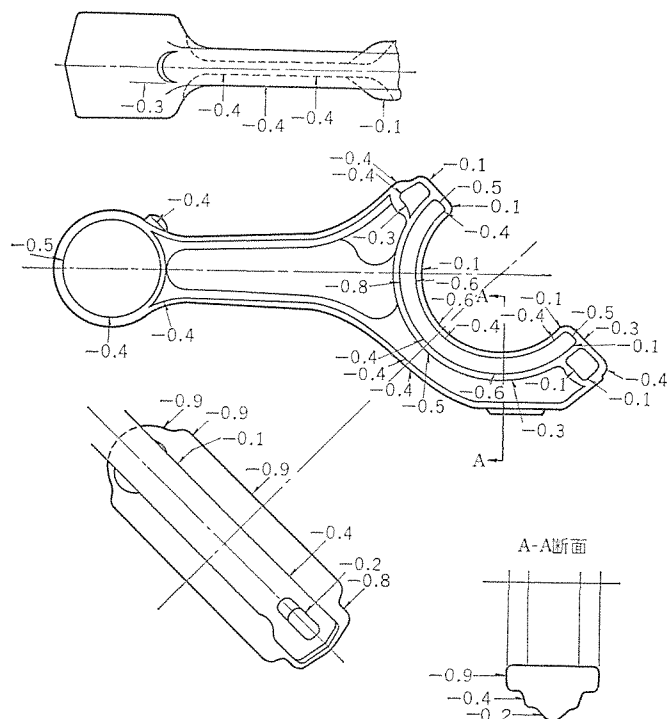


図 5.9 コンロッド鍛造型の加工精度  
Machining accuracy of connecting rod forging die.

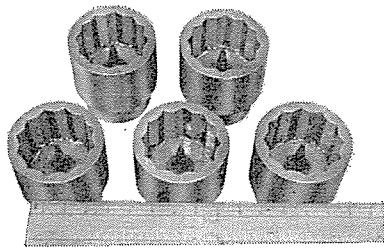


図 5.10 ボックススパナの 部品加工  
Part machining for box spanner.

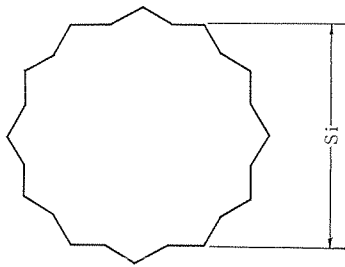


図 5.11 ボックススパナ 部品加工の測定位置  
Measurement position of box spanner part machining.

## 6. む す び

以上電解加工についてその加工精度がどのような要素から構成されているかを二、三の実験結果から究明し、さらに実際に電解加工の加工精度がどれほどのものであるかを実用例によって説明した。これらのことから電解加工は一般に言われるほど加工精度に問題があるのではなく、電解加工の有する特質を十分に認識し、新しい加工技術を駆使すれば、かなり広い分野にわたって電解加工機を活用できることがわかった。また放電加工や、従来の切削加工などとも併用して、電解加工の長所を十分に活かしてやる方法も電解加工を

表 5.1 ボックススパナの加工精度  
Machining accuracy of box spanner.

単位 mm

テスト ピース Si	A	B	C	D	E
1	32.60	32.50	32.60	32.55	32.55
2	32.65	32.65	32.55	32.55	32.55
3	32.50	32.55	32.50	32.50	32.50
4	32.55	32.60	32.55	32.55	32.55
5	32.60	32.60	32.60	32.55	32.55
6	32.55	32.60	32.50	32.50	32.50
7	32.60	32.55	32.55	32.50	32.55
8	32.65	32.60	32.60	32.60	32.55
9	32.65	32.60	32.60	32.60	32.60
10	32.60	32.55	32.65	32.55	32.60
11	32.60	32.65	32.65	32.55	32.60
12	32.55	32.60	32.60	32.50	32.55

じょうずに使いたいせつな加工方法であらう。

## 参 考 文 献

- (1) 前田, 斉藤, 荒井 : 三菱電機技報 39, 1,123 (昭 40)
- (2) 前田, 斉藤, 荒井, 伊藤, 杉江 : 三菱電機技報 37, 1,007 (昭 38)
- (3) 前田, 斉藤, 荒井 : 精密機械 (昭 40-11)
- (4) 前田 : 電解加工の加工現象の基礎的研究 (学位論文) (昭 39-12)
- (5) 斉藤, 古池 : 精機学会 41 年春期大会前刷
- (6) 斉藤, 古池 : 精機学会 42 年秋期大会前刷
- (7) 特許申請中





# 特許と新案

## 屋外形電動機の軸封装置

考案者 伏屋 良一

この考案は屋外形電動機における軸と端カバーとの間から雨水等が侵入するのを、パッキンを使用することなく防止する軸封装置に関するものである。

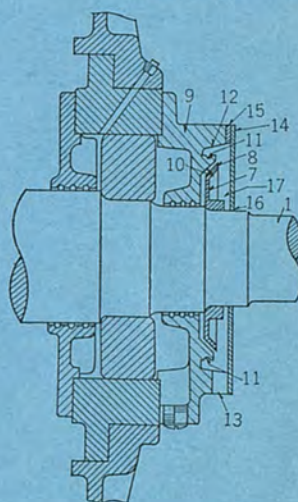
一般に屋外形電動機においては、軸と端カバーとの間から雨水等の侵入を防ぐためにパッキンを使用しているが、この構造においては、パッキンが直接電動機軸に接するため締めすぎなどによる機械損や摩擦熱が大きく、またメタルの焼損の原因にもなりやすい。

この考案はこれらの欠点を解消するためになされたものである。すなわち、この電動機の軸封装置は図示するように電動機軸(1)の端部に、かさ状の傾斜面(8)をその周縁部に形成した回転シール(7)を固定し、この回転シール(7)の傾斜面(8)にわずかの間隙を介して対向する他の傾斜面(10)と、その外方で上記軸(1)の周囲に形成されるみぞ(11)と、このみぞ(11)のさらに外方に形成される上記みぞ(11)に連なる斜面(12)とを有する軸箱カバー(9)に、上記軸(1)の回転を許容するように軸(1)の直径よりわずかに大なる直径の孔を中央部に形成した端カバー(14)を固定した構造のものである。

この構造において外部から雨水等が端カバー(14)と軸(1)との間隙から侵入して空間にはいると、この雨水は回転シール(7)から外方に飛ばされ軸箱カバー(9)の斜面(12)に付着し、その後この斜面(12)を下方に移動してみぞ(11)内に導かれる。このみぞ(11)は軸(1)の周囲に設けられているからみぞ(11)内にはいった水滴はみぞ

(11)内を下方に移動し、結局軸箱カバー(9)の下部に設けられた穴(13)から電動機外に排出される。また、空間(17)にはいった雨水の一部で、回転シール(7)の傾斜面(8)と軸箱カバー(9)の傾斜面(10)との間隙に流れ込むものは、回転シール(7)の遠心力によって、この間隙内を図の右方に移動してけっきょく斜面(12)に付着し、みぞ内にはいった下部の穴(13)から排出される。

(実用新案第 737431 号) (奥村記)



## 油圧押し上げ装置

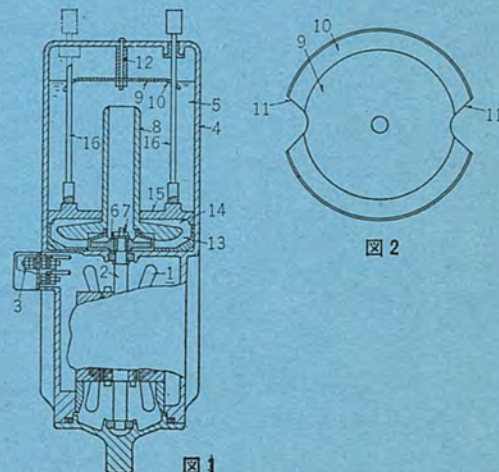
考案者 杉山 昌司・岩田 鋼二

この考案は電動油圧押し上げ装置に関するものである。

すなわち、図 1 において(1)は電動機で堅軸形として使用される。(2)は電動機(1)の軸、(3)は図示しない電源への接続端子、(4)は電動機(1)の上部に設けられたシリンダケース、(5)はこのケース(4)に収納された油、(6)は上記ケース(4)の底部に配置された羽根車で、電動機(1)の軸(2)にナット(7)により固定されている。(8)は羽根車(6)の上部に設けられたシリンダで、上記羽根車(6)の回転時に油の移動通路を形成する。(9)は上記シリンダ(8)のさらに上方に固定された静流板で図 2 に示すように円形に形成され、その外周部(10)が一方に曲げられている。この静流板(9)はシリンダケース(4)内の最高油面に位置するように設けられおう(凹)部が下に向くようにして図 1 のような状態に固定される。(11)はこの静流板(9)に設けた切りかきで後述するロッドの動作をさまたげないようにするためのものである。(12)は静流板(9)の固定用ねじ、(13)は羽根車(6)の半径方向に設けられた排油口、(14)はこの排油口(13)に連通する油室、(15)はこの油室(14)の油圧に反応して上下するプランジャ、(16)はこのプランジャ(15)に固定されたロッドでシリンダケース(4)の外

部に突出し、その外部に固定された荷物台(図示せず)その他を昇降するものである。

次にこの実施例の作動を説明する。まず電動機(1)に外部電源から接続端子(3)を通じて電圧を印加すると、軸(2)が回転し、した





## 特許と新案

がって羽根車(6)が回転する。これによってシリンダケース(4)内の油がシリンダ(8)の上方から吸い込まれ排出口(13)に吐き出される。この場合、油(5)はシリンダ(8)の上方に向かって移動するが静流板(9)の存在によって油(5)が油面上方の空気と接触することなくシリンダ(8)に流入する。この動作の繰返しによって油室(14)の油圧は次第に高くなりプランジャ(15)を上方に押し上げシリンダケース(4)の外部の被押し上げ物を押し上げることになる。

この考案の特長は上述のように静流板を設けることによって、油がシリンダの上方から羽根車によって吸い込まれるとき、油面上方の空気と接触せずシリンダに流入するため油に空気が混合されず、したがってプランジャに作用する油圧が弱められることなく短時間にロッドを所定距離押し上げ、インチング操作を可能にする点にある。

(実用新案第769429号) (奥村記)

## 記録紙印字装置

発明者 林 正 之・相 田 利 光

この発明は、簡単な構造で停電中の不動作による記録紙のおくれを、停電の回復に伴って取り戻すようにした記録紙印字装置に関するものである。

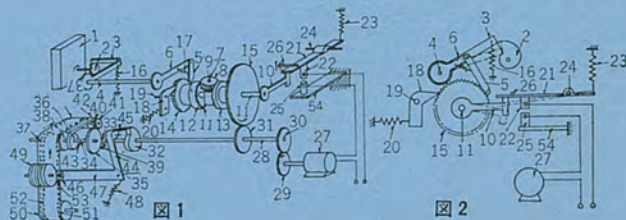
すなわち、図1において(1)はカム(2)を1時間に1回の割合で駆動する時計装置、(7)は差動歯車装置で、その回転軸(11)には接点(22)(25)を制御する作動かん(杆)(10)が固定されている。(27)は上記接点(22)(25)の閉合に伴って始動する電動機であって、その回転はカム(32)および上記差動歯車装置(7)の歯車(13)と一体をなす歯車(15)に伝えられる。(44)は上記カム(32)によって制御される打印づち(槌)で、これは1時間ごとに計量器の値を記録紙(50)に印字する。(38)は記録紙巻込用ローラである。

この発明は上記のように構成されているので、所定時刻になると作動かん(3)がカム(2)の突部から落下し、回転軸(4)が所定角度回転する。したがって、爪(5)によって歯車(14)が回転し、回転軸とともに作動かん(10)が図2の鎖線位置まで回転するので、接点(22)(25)が閉合する。このため、電動機(27)が始動してカム(32)が回転されるので、打印づち(44)が計量器(49)をたいて記録紙(50)に印字する。またローラ(38)によって記録紙(50)が1こま送られる。

一方、電動機(27)の始動とともに歯車(13)(15)が回転され、回転軸(11)が復帰回転しているので、記録紙(50)が1こま送られたところに接点(22)(25)が開いて電動機(27)が停止する。

また、電動機(27)の電源が停電しているときでも、時計装置(1)は動いているため、たとえば3時間停電した場合、作動かん(10)は3回分の角度だけ回転している。この状態で停電が回復すると接点(22)(25)はすでに閉合しているので、電動機(27)がただちに始動し、打印づち(44)が3回動作し、記録紙(50)も3こま送られる。したがって、停電が生じててもこれが回復すれば印字動作および記録紙送り動作が停電時間の分だけ連続して行なわれ、記録紙に印刷された時刻と印字時刻との間にずれが生じない。

(特許第458353号) (幸島記)



## 盲孔電解加工装置

考案者 前 田 祐 雄・斎 藤 長 男

この考案は電解加工装置に関するもので、とくに小さく、しかも複雑な形状の盲孔を加工するに適した電解加工装置を提案するものである。

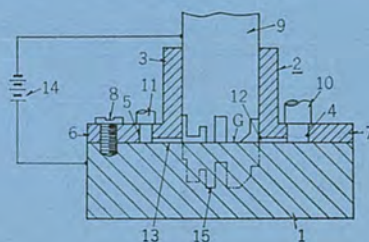
図において、(1)は被加工体、(2)は絶縁物から構成された案内子で、筒状の案内内部(3)と取付用つば部(7)を有しており、取付ボルト(8)により被加工体(1)の被加工面に密着して固定される。(4)は電解液供給口、(5)は電解液排出口で、これらはつば部(7)に穿設されており、それぞれ電解液の供給管(10)、排出管(11)が連結されている。(12)(13)はつば部(7)の被加工体(1)との接合面に設けられ、案内内部(3)の内側と供給口(4)・排出口(5)とを連通する通路である。(9)は案内内部(3)に遊かん(嵌)する加工用電極で、被加工体(1)との対向面は、加工面として構成され複雑な形状をなしている。(14)は直流電源で、正極が被加工体(1)に、負極が電極(9)にそれぞれ接続されている。

この装置は、電極(9)と被加工体(1)との間に微間隙Gを形成

し、電解液を供給口(4)から通路(12)・間隙G・通路(13)を経て排出口(5)へ流しながら、この電解液を電気分解して、被加工体(1)に電極(9)の加工面と同じ複雑な形状の盲孔を加工するものである。

この考案装置では、電極(9)に電解液の供排出口を設ける必要がないので、電極(9)の製作が容易となり、とくに小さく、しかも複雑な形状の電極(9)では顕著な効果がある。

(実用新案第799992号) (中林記)



## MELCOM-1600 オペレーティング システム

出口 博章\*・坂 本 巍\*

## MELCOM-1600 Operating System

Kamakura Works Hiroaki DEGUCHI・Takashi SAKAMOTO

The operating system for the electronic computer MELCOM-1600 has been designed for real time application. This operating system has such a function that real time processing and batch processing are carried out individually or in parallel by means of electronic computers with random access memory. Accordingly, it processes the requests of on line which occur at random and yet with a parity order, simultaneously making batch processing by utilizing it off time.

The operating system includes translators such as SIAS assembler, FORTRAN compiler, COBOL compiler, SORT program, and it is equally applicable to batched job and the real time application, scientific calculation and business data processing.

## 1. ま え が き

MELCOM-1600 オペレーティング システム (以下 OS と略称する) は、MELCOM-1600 のために準備した ソフトウェア システムである。MELCOM-1600 は オンライン リアルタイム 用に設計された電子計算機であり、リアルタイム の機能を除けば ハードウェア については MELCOM-1530 とまったく同じである。リアルタイム 用の機能としては、オンライン I/O、メモリ、プロテクト、割り込み、256 kW 容量の磁気ドラム、タイマ、マルチチャネルの I/O 等を持っている。

ソフトウェア システム については実時間処理が可能であること、およびランダム アクセス メモリ オリент なシステム であるという 2 点から、そのソフトウェア の体系は MELCOM-1530 とは大きく異なっているが、そのプログラム 言語は アセンブラ、コンパイラ ともに MELCOM-1530 とソースプログラム の段階で コンパティブル である。

オンライン リアルタイム 処理は、一般に適用する分野によって計算機に要求する機能が異なる。したがって OS においても適用するシステム ごとに、特定機能の付加、削除などの Modify が行なわれる。

1600 システム も現在いくつかの オンライン リアルタイム 処理に適用されているが、ハードウェア、OS ともにそれぞれの適用 システム によって部分的に異なる。以下 1600 OS の標準的な部分の機能の概略について記述する。

## 2. オペレーティング システムの基本概念

## 2.1 オペレーティング システムの機能

1600 OS はランダム アクセス メモリ (磁気ドラム) を中心としたオペレーティング システム であり、オンライン リアルタイム 処理と バッチ 処理を併行して行なうことができる。

リアルタイム 処理としては、データロギング・計算機による装置の制御・実時間で顧客 サービス 等に使用できる。また バッチ 処理は事務データ 処理・技術計算の両方を含み、それぞれ COBOL、FORTRAN、SIAS アセンブラ、SORT 等を使用することができる。1600 OS のおもな機能は次のとおりである。

## (1) タイム シェアリング

リアルタイム 処理と バッチ 処理の併行処理

## (2) マルチ プログラム

優先度の高いプログラム が要求されたとき、実行中のプログラム を一

時ランダム アクセス メモリ に退避し (Roll out) 優先度の高いプログラム を先に実行する。終わった後ランダム アクセス メモリ に退避したプログラム をふたたび メモリ にロード (Roll in) し計算を続行する。いわゆるプログラムの優先度によるマルチプログラム を Roll out/in によって行なうことができる。

## (3) オペレータ からの割り込み

緊急を要するプログラム が発生した場合、オペレータ からの指示によってプログラムの割り込みを行なうことができる。

## (4) プログラム の連続処理

バッチ 処理において

(a) コンパイル (FORTRAN、COBOL) および Compile and GO

(b) アセンブル (SIAS、MAS) および Assemble and GO

(c) ランダムアクセス メモリ に登録されているプログラムの実行

(d) Relocatable object の Load and GO

以上のオペレーション をいくつか組合わせたものを連続して処理することができる。

## (5) プログラム の分割

プログラム を Mainprogram または Subprogram 単位でコンパイルアセンブル およびデバッグ し、実行時に全体を結合することができる。

## (6) overlay

プログラム が大きすぎて、コアメモリ には入りきらないとき、適当な大きさに分割し、overlay によって実行することができる。

## (7) ランダム アクセス ファイル

ドラム をデータ ファイル および、プログラム ファイル として使用している。

## 2.2 プログラムのコントロール

OS に対するプログラムの実行要求は次の三つの要求源からなされる。すなわち オンライン からの要求、オペレータ による割り込み要求、それにスタックジョブ (バッチ 処理) の実行である。オンライン およびオペレータ からのプログラムの要求はランダム であり、しかも優先度を持っている。

優先度の低いプログラムの実行中に、より高い優先度のプログラムの要求が生じたときには、優先度の低いプログラム を中断してドラム に退避 (Roll out) し、優先度の高いプログラム を先に実行する。終わった後は、先に Roll out したプログラム をメモリ に再ロード (Roll in) し処理を続行する。いわゆる Roll in/out によるマルチプログラム が要求される。またスタックジョブ の実行は最初 オペレータ からの指示によ



って始まり、最後に END コントロールカードを読取るまで、計算機が自動的に連続して処理を行なう。ただしその優先度を一番低くおいている。したがってリアルタイムプログラムや割り込みプログラムのあい間をぬって、いわば計算機の自主性によって実行される。

上記プログラムの要求がいずれもないときは、計算機は WAIT になり、オンラインからの要求またはオペレータの指示を待つ状態となる。プログラムの優先度は適用するシステムによって異なる。これらのプログラムのコントロールを行なうのが、OS のコントロールプログラムである。コントロールプログラムはその機能によって Supervisor と Job Control に分けられるが、前記のジョブスケジュールを行なうのは Supervisor であり、OS の中核をなしている。Supervisor はこのジョブのスケジュールのほかに、各プログラムが出す I/O 命令を解釈しプログラムと I/O 機器の間のいっさいの雑用を処理する。すなわち演算と I/O 動作、または異なる channel 間の I/O 動作を並列に行なうためには I/O 命令を統一的に処理し、そのスケジュールを行なわなければならない。

Supervisor はジョブのスケジュールと I/O のスケジュールを行なうのがそのおもな機能である。その他にも Interrupt の処理、Error 処理等も Supervisor の機能に属する。1600 OS ではこの control program に対してそれ以外のプログラム全体をオペレーショナルプログラムと呼ぶ。図 2.1 はコントロールプログラム（とくに Supervisor）とオペレーショナルプログラムの実行および I/O 機器が時間的にどのように動作するかを示したものである。

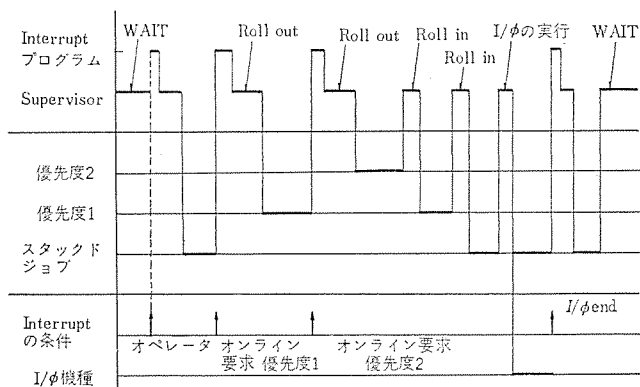


図 2.1 Supervisor とオペレーショナルプログラム  
Supervisor and operational program.

## 2.3 プログラムの構造と生成過程

### 2.3.1 プログラムの構造

#### (1) プログラムユニット

コンパイラまたはアセンブラが独立に処理することのできるプログラムの最小単位を言い、1600 OS では Mainprogram または Subprogram のいずれかである。プログラムを一つの Mainprogram といくつかの Subprogram に分割し、それぞれ独立にコンパイル、アセンブルおよびデバッグすることができるということは、プログラムの協同作業や虫が出た場合部分的に修正できるとともに、標準的な Subprogram を共通に使用するため、ライブラリに記憶することができる等の利点が生ずる。

#### (2) フェイズ (phase)

コアメモリに一度にロードし実行するプログラムの単位であり、一つのフェイズは唯一の Mainprogram からなるか、または一つの Mainprogram といくつかの Subprogram を結合して構成される。

#### (3) プログラム

一つのプログラムは唯一のフェイズか、またはいくつかのフェイズの

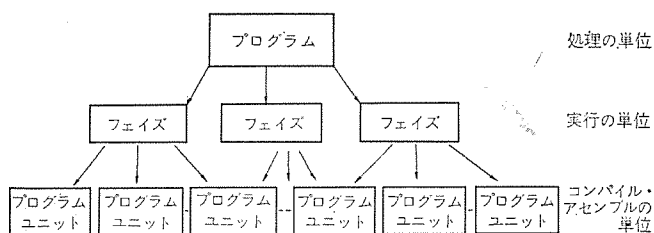


図 2.2 プログラムの構造  
Structure of program.

論理的なつながりであり、一つの処理を完結する。プログラムが大きすぎて一時にメモリにはいらない場合は、それをいくつかのフェイズに分割し、それらを逐次 overlay することによって実行することができる。EXIT 命令によって一つのプログラムの実行が完了する。図 2.2 はプログラムの構造を示している。

#### 2.3.2 プログラムの生成過程

プログラムはコーディングされてから実行するまで次の段階を経過する。

- (1) ソースプログラム
- (2) リンケータブルオブジェクト
- (3) アプソリュートオブジェクト

ソースプログラムは Translator (コンパイラアセンブラ) によって、リンケータブルオブジェクトに変換される。Translator への Input の単位をソースユニットと言い、ソースユニットに対応して out put する単位をオブジェクトユニットと言う。プログラムユニットとはソースユニット、オブジェクトユニットの総称である。リンケータブルオブジェクトは Linkage editor によって、互いに結合され、実行可能なアプソリュートオブジェクトに変換される。(Linkage editor 参照)。プログラムは、リンケータブルの段階、アプソリュートの段階でそれぞれオブジェクトユニット単位、フェイズ単位でシステムに登録することができる。

リンケータブルオブジェクトとはプログラムの内部の相対的位置は変わらないが、コアメモリの絶対番地は決定せずプログラムの各語に定数か、それともプログラムが読みこまれる番地と相対的な数であるか、を示す情報をつけ、それで読みこまれるコアメモリ上の場所が自由にえらべるようになった言語であり、サブルーチンがこの要求を持っている。リンケータブルオブジェクトはソースから実行までの途中のレベルがプログラムの保存上必要になった言語レベルである。

図 2.3 はプログラムの構造と生成過程の関係を示したものである。

#### 2.3 プログラムライブラリ

##### (1) Temporary/permanent なリンケータブル/アプソリュートライブラリ

1600 OS ではリンケータブルオブジェクトの段階とアプソリュートオブジェクトの段階でプログラムを、それぞれリンケータブルライブラリとアプソリュートライブラリに登録し、ランダムアクセスメモリに保存することができる。

リンケータブル/アプソリュートライブラリはそれぞれ Temporary library と Permanent library に分けられており、それぞれ TRL, PRL, TAL, PAL と略称する。Temporary library (TRL, TAL) は一時的なプログラムライブラリであり、Translator, Linkage editor の out put はかならず TRL, TAL に記憶され、それぞれ一つのジョブごとにクリアされる。Permanent library は永久的なプログラムライブラリであり、リンケータブル、アプソリュートライブラリに対応した Maintenance プログラムによって TRL, TAL からそれぞれ PRL, PAL に登録される。

##### (2) Run Timepackage

アプソリュートプログラムは必要な Subprogram をすべて結合し一つの

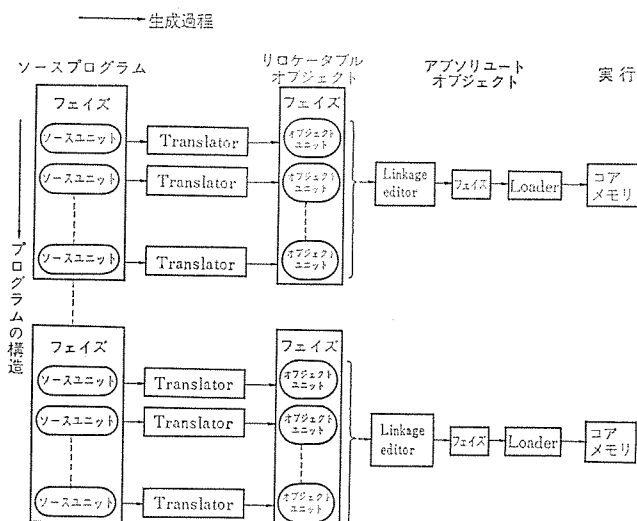


図 2.3 プログラムの構造と生成過程  
Structure of program and process of formation.

フェイズとして TAL, または PAL に記憶されている。したがって各プログラムに共通に使用される Subprogram は、アブソリュートな形で各フェイズに含まれてランダムアクセスメモリを占有することになる。

1600 OS では各プログラムに共通に呼び出される Subprogram 群をあらかじめアブソリュートに変換し、ただし Mainprogram とリンクできるように Entry name とそのアドレスを持った形でアブソリュートライブラリとは別に Run Time package library に記憶しておき、各プログラムに共通に使用することができる。

Run Timepackage (RTP) は Subprogram 群の組合せを変えることによって何種類も作ることができ、それぞれ name を与える。(Run Time package の Maintenance プログラムによって登録される) この name は Linkage editor の段階で指定され呼び出される。Linkage editor は Run Timepackage の中の Subprogram とリンクだけ行なう。指定した RTP に含まれていない Subprogram または RTP を全然指定しないときは、Linkage editor が自動的にリロケートブルライブラリから呼び出す。また RTP の中の必要としない余分の Subprogram はもはや切りはなすことができず、実行時に余分なプログラムとしてメモリを占有する。

RTP は実行時にフェイズと一緒にローダによってロードされる。この RTP によって共通に使用される Subprogram 群は、フェイズとは切りはなしてドラムに記憶し、しかも各フェイズに共通に使用する。したがって PAL, TAL のドラム効率が高まり、かつ Linkage editor の時間が軽減される。この効果は SIAS または FORTRAN で書いたプログラムに対してとくに顕著である。すなわち 1600 SIAS の命令はすべて Subprogram (Logram) によって実行される。

一般に SIAS で書いたプログラムにおいて使用される命令の種類は、プログラムの大きさによらずほとんど一定であり、ただ内容が事務計算であるか科学計算であるかによって、命令のレパートリーが異なる程度である。また FORTRAN で書いたプログラムも、I/O ライブラリ、四則演算等の Subprogram はかならず使用するといつてよい。したがって 1600 OS では標準の Run Time package として事務用、科学用、FORTRAN 用の 3 種類が準備されており、プログラムの種類に応じた RTP を指定することができる。以上 1600 OS では TRL, TAL, PAL および RTP の 5 種類のプログラムライブラリが存在する。図 2.4 はこれ等プログラムライブラリと OS の各プログラムの関係を示し

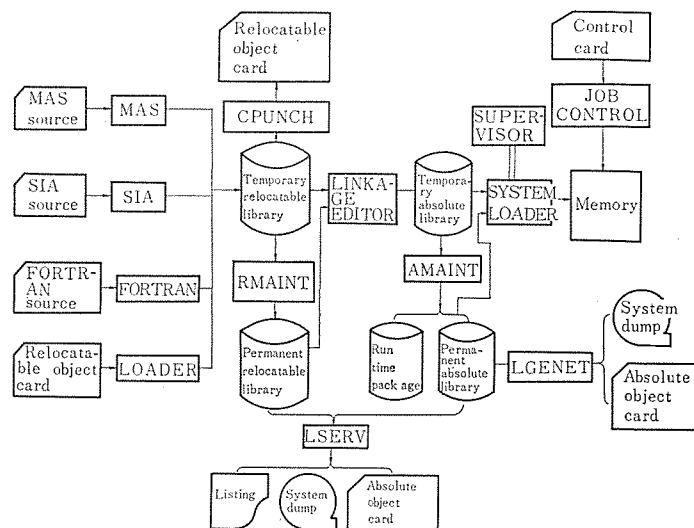


図 2.4 プログラムライブラリとプログラムの関係  
Relation between program library and program.

ている。

### 3. 1600 システムの構成要素

#### 3.1 ハードウェアの構成要素

ハードウェアの構成はその適用するリアルタイムシステムによって異なる。たとえばあるシステムでは信頼度の向上をはかるために Dual System になっており、おのおのがドラム 1 台とサブ CPU を持ち計算機システムの異常に対しては瞬時に自動的に Standby 系に切り換えられる。また I/O 機器に関しても XY プロッター等を持っているシステムもある。以下 1600 計算機システムの標準的な機器構成 (図 3.1) およびその仕様、機能の概要について記述する。

##### (1) CPU (Central Processing Unit)

記憶容量 (コアメモリ)	16 kW
1ワード	18 ビット
1キャラクタ	6 ビット
サイクルタイム	6 $\mu$ s

##### (2) CMM (Communication Module)

I/O コマンドを解釈し、各チャンネルに分配するとともにデータ転送の準備を行なう。

Interrupt をコントロールする。すなわち Interrupt を検出し、その割込みアドレスを発生するとともに Lower レベルの Interrupt の Mask 等を制御する。

データ転送の制御を Input/output Register を通して各コントローラの間で行なう。

##### (3) CMX (Channel Multiplexer)

CMM に Cycle Steal によるデータ転送の機能を与える。

二つ以上の (High Speed Data Channel) を Multiplex する。

##### (4) チャンネルの構成

CMM に接続されている、1本の Basic Data channel (BDC) の他に High Speed Data channel (HDC) および Normal Data channel (NDC) があり、NDC にはさらに 7 本のサブチャンネルの接続が可能である。

異なるチャンネルに接続されている I/O 機器は並行動作を行なうことができる。

##### (5) BDC (Basic Data Channel)

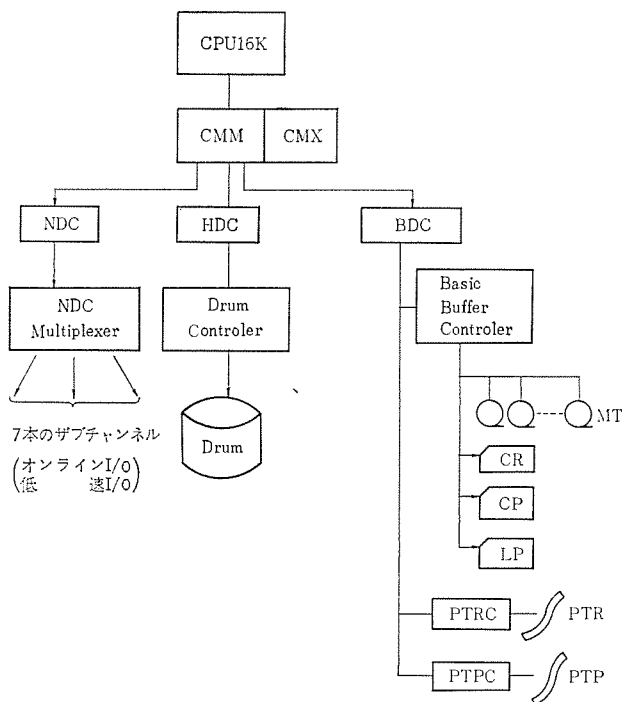


図 3.1 ハードウェアの構成  
Composition of hardware.

ライブラリアン (LP), カードリーダー (CR), カードパンチ (CP), 磁気テープ (MT), ペーパーテープリーダー (PTR), ペーパーテープパンチャー (PTP)等基本的な I/O 機器が接続されている。Cycle Steal または Normal Mode でデータ転送を行なうことができる。

#### (6) HDC (High Speed Data channel)

ドラムが接続され、Cycle Steal によってデータ転送を行なう。

#### (7) NDC (Normal Data channel)

低速の I/O 機器およびキャラクタ単位でデータを転送する、I/O 機器が接続される。

NDC には NDC Multiplexer により 7 本のサブチャネルが接続でき、オンラインのデータ転送にも使用する。サブチャネルは互いに並行動作を行なう。

#### (8) 磁気ドラム

Speed	900 回転/min
Word Density	1024 WD/Track
1ワード	20ビット (18+odd parity)
Clock Cycle	307.20 kc
Sector	8 Sector/Track
Track	256 Track/Unit

#### (9) 割込み

外部からの割り込み機構として、七つの割込みレベル、32の割込み原因が準備されている。

あるレベルの割込みが認められると、その割込みと同じレベルおよびそれ以下のレベルの割込みは認められなくなる。

#### (10) Memory Protection 機構

あるプログラムのミスによって、他のプログラム、とくに Resident なプログラム (Supervisor, オンラインプログラムの一部) が破壊されるのを防ぐためメモリ保護機構が準備されている。

Protect Area は次の範囲で選択できる。(数字はコアメモリ上のアドレスを示す)

0~511, 0~1023, 0~1534, 0~2047  
0~2559, 0~3071,  
1024~1534, 1024~2047  
2047~2559, 2047~3071

Protect は protect key flip flop (FFKEY) を命令で Set することによって有効になり、また命令で Reset して解除される。

Protect は FFKEY が Set されていて、Protect Area に情報を書き込もうとしたとき、Memory Protect の割込みが発生する。

### 3.2 ソフトウェアの構成要素

1600 システムのおもなソフトウェアは、その機能によって次のように分類できる。

Control program

Translator

ライブラリアン

Utility program

図 3.2 は 1600 OS のソフトウェア体系を示す。

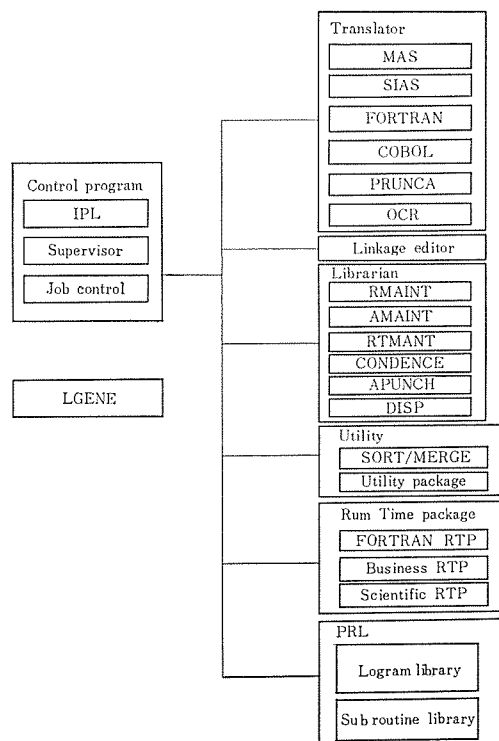


図 3.2 ソフトウェア体系  
Software system.

以下各プログラムの機能の概要を説明する。

#### (1) Control program

コントロールプログラムは 1600 OS の中核をなし、他のすべてのプログラム (オペレーショナルプログラム) の実行の準備とコントロールをつかさどる。コントロールプログラムは Supervisor, Job control, IPL loader から構成されている。

##### (a) Supervisor

常にメモリの中に存在し、その機能は次のように要約でき、2.2 節プログラムのコントロールで述べたとおりである。

入出力動作のコントロール



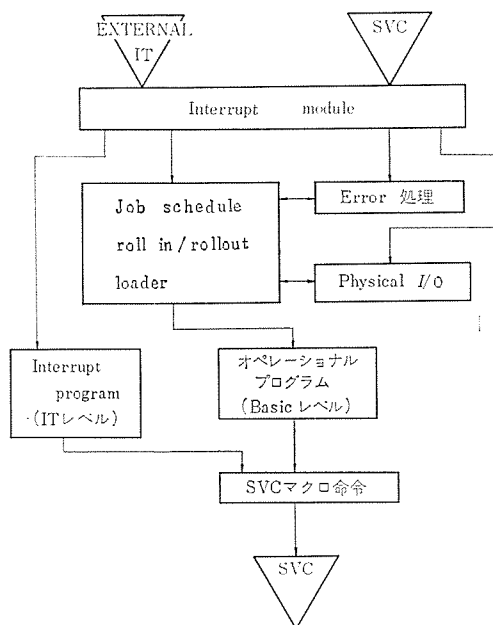


図 3.3 Supervisor と オペレーショナルプログラムの  
コントロールの関係  
Relation between supervisory and  
control of operational program.

プログラム実行のスケジュール

ハードウェアおよびプログラムのエラー処理

プログラムのロード

図 3.3 は Supervisor の各プログラムモジュールとオペレーショナルプログラムの関係を示している。

(b) IPL loader

最初 Supervisor をメモリにロードするプログラムであり、IPL loader 自身はオペレータの操作によって、ドラムの特定の番地から計算機が自動的に読み込む。

(c) Job control

オペレータの介入なしに一連の Stacked job (Batch 処理) を連続して処理するのが OS の大きな特長の一つである。連続の処理を行なうためには、次々に Job および Job step を指令しなければならない。この指令およびその補助的情報は Control Statement で指定する。この Control Statement を解釈し、Supervisor に対して適当な情報を伝え、かつ Stacked job の実行要求を出すのが Job control である。

Job control は job step と job step または job と job の間で Supervisor によって自動的にメモリに読み込まれ、次の job step または job の実行の準備を行なう。job control が END Statement (control card) を読込んだとき一連の連続処理が終了する。

次に Control Statement の簡単な例を示す。

次の例は Mainprogram と Subprogram からなる FORTRAN プログラムをコンパイルし、実行するのに必要な Control Statement およびソースプログラムの Stack の順序を示している。

111 JOB, TEST.

111 PHASE, TEST, FRTP.

111 EXEC, FOR, LIST, NODECK.

(ソースプログラム)  
(Mainprogram)

111 EXEC, FOR, LIST, NODECK.

(ソースプログラム)  
(Subprogram)

111 EXEC, LINKED, MAP, GO, TEST.

(データ)

(2) Translator

1600 OS ではプログラム言語として次の4種類が使用できる。

MAS

SIAS

FOSTRAN

COBOL

(a) MAS

MAS は機械語 (Logand) と 1 対 1 に対応するアセンブラ言語である。

(b) SIAS

1530 SIAS とプログラム言語の機能、形式はほとんど同じである。

(c) FORTRAN

1530 FORTRAN の機能を含んでおり、コンパイルの時間は 1530 FORTRAN に比較して平均 3 倍のスピードアップがなされている。

(d) COBOL

1530 COBOL とほとんど同じ機能を持っている。

(3) Linkage Editor

独立してコンパイルされたオブジェクトユニットは、まとめて Linkage editor に入力することによりはじめて実行の可能な一つのまとまったプログラム(フェイズ)をつくり出す。すなわち Linkage editor はリロケータブルオブジェクトをアブソリュートオブジェクトに変換するプログラムである。その際必要な Subprogram を PRL から呼び出したりまた RTP が指定されている場合は RTP とのリンクを行なう。

Linkage editor の機能、およびプログラムライブラリー、他のプログラムとの関係は図 2.3, 2.4 に示すとおりである。

(4) ライブラリアン

ライブラリアンとは次の四つの機能をはたすプログラム群の総称である。

Maintenance

Service

Organization

System Generation

(a) Maintenance

Maintenance とは新たにプログラムをドラムに登録したり、消去したりする機能であり、三つのプログラムライブラリーに対応してそれぞれ次のプログラムが存在する。

RMAINT, PRL の Maintenance プログラム

AMAIN, PAL の Maintenance プログラム

RTMANT, RTP の Maintenance プログラム

(b) Service

Service の機能とは PAL のフェイズをカードにパンチしたり、各プログラムライブラリーの name をリストアップしたり、Octal dump を取る機能である。次の二つのプログラムがある。

APUNCH, カードパンチ

DISP, name のリストアップおよび Octal dump

(c) Organization

プログラムライブラリーを Maintenance によって消去した場合、name だけが消去され Text 部の残がいはそのままライブラリーの中に残され、ドラムを占有する。この残がいを完全に取り除きライブラリーを Reallo-

cate するのが organization の機能である。CONDENCE プログラムがそれを行なう。

#### (d) System Generation

ドラム上に OS の中核となる IPL loader, や Supervisor, Job control, ライブラリアン等 PAL を Generate する機能である。LGENE プログラムがそれを行なう。LGENE プログラムは OS とは別にそれ自身一つの閉じたプログラムとして動作する。

### 4. む す び

MELCOM-1530 システムでは、磁気テープを中心としたバッチ処理用のオペレーティングシステムが開発されてきた。また制御用としては従来からリアルタイム処理専用のオペレーティングシステムを経験している。

1600 OS はリアルタイム処理、バッチ処理、および両者の併行処理を統一した一つのオペレーティングシステムで可能にし、はん用性のあるオペレーティングシステムを実現した。またバッチ処理においても従来は事務データ処理向き、技術計算向きでオペレーティングシステムが異なる傾向にあったが、1600 OS は両方のソフトウェアを同時にドラムに記憶し一つの OS で統一している。1600 OS はこのように新しい構想にもとづいて開発されたが、現在以上にははん用性のある OS とするためには Symbolic I/O Assignment 等 Supervisor 機能を充実するとともに、その機能を十分分析し、プログラムを module 化して適用システムごとの変更を容易にする等を考慮しなければならない。これ等の検討により refine し、一般化して次期電子計算機のオペレーティングシステムに加味されつつある。

## MELCOM-3100 ソフトウェア (2)

## ——モデル 30 オペレーティングシステムの概要——

首藤 勝\*・関本 彰次\*・武田 浩良\*・三光 義治\*

## MELCOM-3100 Software (2)

## —General Description of Model-30 Operating System—

Kamakura Works Masaru SUDÔ・Shôji SEKIMOTO・Hiroyoshi TAKEDA・Yoshiharu SANKÔ

MELCOM-3100 Model-30 is one of computer family of the MELCOM-3100 series. It has features distinguishable from the Model-10 in the multi-channel Input and Output capabilities.

The software system for the MELCOM-3100 Model-30 is organized as an upgraded version of Model-10 operating system, utilizing those powerful input and output features and aiming at the realization of many features based on the modern computer-architectural considerations, such as the formation of tasks and jobs and the manipulation of libraries, to an ultimate extent within MT-oriented operating system.

The article deals with the major functions and the organization of the MELCOM-3100 Model-30 operating system and the typical modes of job processing with it.

## 1. ま え が き

従来から言われていることであるが、Magnetic Tape (MT) Base の Operating System (OS) では Operator の Library Handling, Tape Search Time, さらに Program の検索の方法といった点で難点をかかえており、とかくその弱点が目立つ場合が多い。MT Operating System の立場からはそれらについてさまざまな工夫がたえずなされてきているが、問題点を解消するにはいたっていない。この意味で Random Access Memory を用いた Operating System を必要とする User も次第に多くなってきている。

しかし一方現状では Data Processing の種類とその規模、そして Cost の面などからみて MT System を必要とする User に対する固有の需要は大きなものがあり、計算機使用者はその層においても、数においても飛躍的に拡大されつつある現在、MT System が現実使用されるという事実は増大することはあっても決して減少するとは考えられない。

MELCOM-3100 Model-30 T Operating System はこうした需要の基礎の上に立って、従来からの MT-OS の弱点とされる面で新しい工夫と試みにとくに力が注がれて設計されたものであり、実用上十分な程度にまでその性能効率の改善がなされている。合わせて Cycle Steal 方式による入出力動作と Process Operation との同時動作を IOCS, SPOOL 機能等によって最大限に生かし Performance を上げている。

MELCOM-3100 Model-30 T Operating System は OS の機能としての新しい要素と、使用上からの拡張性がとりいれられており、先に発表された Model-10 T OS との間では Data および Source Program に関して互換性は存在するが Operating System としてはかなり違った形式になっている。

## 2. Task および Job

MELCOM-310 Model-30 T Operating System では Program によってなされる仕事の単位を Task と呼ぶ。また Job とは一つま

たはそれ以上の数の Task が組合わされて、一つのまとまった意味をもつ仕事を指す。たとえば COBOL Source Program を Compile して、かつ実行することは一つの Job である。そしてこの Job は次の Task によって構成される。

Compile and Execute	Job Preparation (Job Controller)
	Compile (COBOL Compiler)
	Edit (Program Editor)
	Object Execute (Executable Object)

Program は1度に Core Memory に Load される Program 量の制限からいくつかの部分に分割構成されていることもある。

1 度に Load する Program の単位を Phase と呼んでいる。すなわち Program はいくつかの Phase からなり、Job はいくつかの Program の組合せによって実行される。それぞれの Program 内では任意に Phase を呼び出すことができ (FETCH)、また Program は他の Program を呼び出すことができる (SEARCH)。Program が他の Program を呼び出すためには Job Controller の働きは必要としない。

Program Change のたびに Job Controller を呼び出すのは MT-OS では計算機時間に大きな損失を生むことを意味する。さらに Program を呼び出す際に検索時間を短くするよう工夫されており、これは Program Library の形式として System Loader の検索方式を改めることによって実現されている。

Model-30 T Operating System では End of Job と End of Task の仕事ははっきり分けられており、Program 内で EXEC 命令を発することは End of Job を示すものとしてただちに Job Controller が呼び出され、次の Job のために前の Job Status が Reset される。

Model-10 T Operating System では End of Job と End of Task は同じ EXEC 命令で指示され、いずれも Job Controller が間で働いてその区別を行っていたが、Model-30 T の場合は Job Controller は Job を単位とする仕事の切り換え、制御のときのみに呼びだされる。

### 3. Program および Library

Model-30 T Operating System の Object Program には、

- Relocatable Object Program
- Executable Object Program

の 2 種類がある。その他に Library Maintenance の際に使用される

- Absolute Object Program

もある。

OS で Load し実行できるのは前 2 者のみであって、Relocatable Object Program は実行に際して、Program Editor によってあらかじめ Executable Program に編集される。Relocatable Object Program についての詳しい説明は MACRO-CODER についての説明のときになされるが、この形式の Object は、一つの Program を別々の時点で Compile または Assemble したものをひとまとめにして Executable Object Program に編集することができる。Relocatable Object Program は通常は Translator によって Card で Output される。

Executable Object Program は Core Image の Object Program であって MT に記録されている。この形の Object はその Program 本体の部分は Model-10 T System での Secondary Object と呼んでいるものと同じである。

異なる点は、各 Phase の先頭に Phase 名を持っていることである。

また Program はいくつかの Phase からなっているが、Program 内にある Phase の名前を Table にして (Phase Directory と呼ぶ。) 各 Program の前部にもっている。Phase Directory は Phase 名と対応する phase に対する制御情報の集まりからなる。この情報は Job を Set するときに Job Controller によって使用され、実行中は System Supervisor (主として System Loader) によって使用される。Phase Directory の前部には Program 名と制御情報を持っている。この情報も同様の意味で Operating System によって使用される。

Program 名 : 9 けたの英数字 (最初の文字は英字である。)

Phase 名 : 9 けたの英数字 (最初の文字は英字である。)

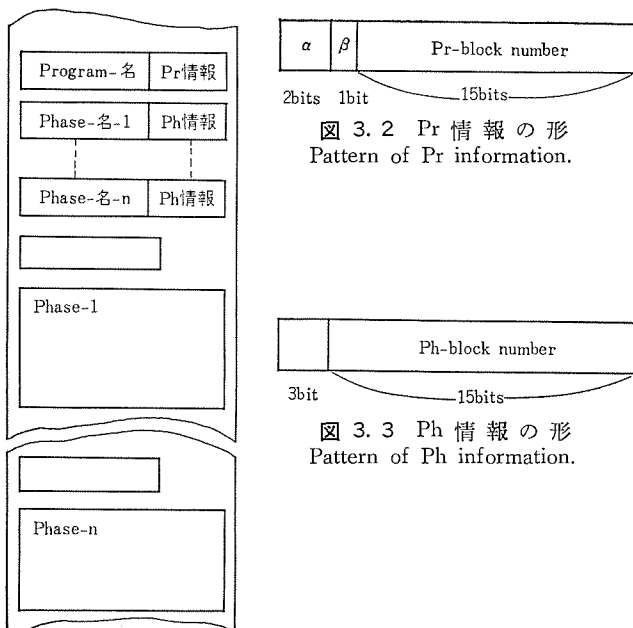


図 3.2 Pr 情報の形  
Pattern of Pr information.

図 3.3 Ph 情報の形  
Pattern of Ph information.

図 3.1 ライブラリテープ上での実行性プログラムの構造  
Structure of executable programs on library tape.

$\alpha$  : Program がどの種の Library Tape に記録されているかを示す 3 種類の情報があって SMT, SIPT, SS (後述) を表わす。

$\beta$  : SPOOL Program と同時に実行可能かどうかを示す Bit。

Pr Block Number : Library (MT) の基準点から Physical な Record で、いく Block 目から、その Program が登録されているかを示す数であり System Loader の Program 検索に利用する。

Ph Block Number : Library (MT) の基準点から Physical な Record で、いく Block 目から、その Phase が登録されているかを示す数であり、System Loader が Phase 検索に利用する。

一つの Program は 12 Phase まで分割できる。ただし Job を考えるときはそれらの Program をいくつも連結可能であるから、さらに大きな Job 処理も可能である。

Absolute Object は Library の Maintenance のときに使用されるものであって、これによって Program を Load し実行することはできない。

Absolute Object の本体は Model-10 T System における Primary Object と同じであり、Executable Program と同様の Program 名、Phase Directory、Phase 名がそれ以外に付け加えられている。

MELCOM-3100 Model-30 T Operating System では次のような Library を使用する。

- System Master Tape (SMT)
- User's Executable Library Tape (UEL)
- User's Relocatable Library Tape (URL)
- System Scratch Tape (SS)
- System Input Tape (SIPT)

SMT は Operating System Library の主体であり、次のものが登録されている。

- IPL Loader
- System Resident Program (System Supervisor)
- Job Controller
- SPOOL Job Controller
- Debugging Program
- Program Editor
- MACRO-CODER
- Translators (COBOL, FORTRAN, RPG 等)
- SORT/MERGE Program
- System Support Program (LP/PERT 等)
- Utility Programs
- SPOOL Job Packages
- System Input Tape Generator (SIPG)
- System Maintenance Program (SMP)

(b)~(d) の各機能の概要は後に述べることにして、ここでは外部的な Library Format について簡単に述べる。

Program name-1	"SMT"	$\beta_1$	Block number-1
Program name-2	"SMT"	$\beta_2$	Block number-2
...			
Program name-10	"SMT"	$\beta_{10}$	Block number-10

図 3.4 Program Directory の 1 ページ分  
Structure of 1 page of Program Directory.

IPL Loader は OS の初期条件を Set するものであり、Supervisor を主記憶装置の System Resident Area に Load する。(a)、(b) 二つの Function は形式的には Job Controller 以下のものとは異なる。Job Controller 以下は先に述べた Executable Object Program の形をしていて Supervisor 内の System Loader によって検索され主記憶装置の特定部分に呼び出される。SMT の最初の (a)、(b) を除いた位置に基準点がとられ、Job Controller は第 0 Block から登録されている。

Job Controller の直後には Program Directory と呼ばれる索引表が書かれている。これは Job Controller の System Data であって、次の形式と意味をもっている。

Program Directory は SMT に登録されている Job Controller 以下のすべての System Program について、その Program Index を集めたものである。そしてこの表は 10 Program 分の Index ごとに Physical な Record として SMT に書き込まれている。これを索引表のページと呼ぶ。

SMT 内の Program については Program Index の  $\alpha$  項はいずれも “SMT” を指している。ある System Program が実行されるときにはその Program が記入されている索引表の頁は開かれたままになっている。

Task から Task へ移るとき Program が同一頁内にあれば直ちに呼び出すことができる。互いに Job 内で Link しあう Program を同一頁内に登録しておくとき非常に早く呼び出すことができる。同じページ内にないときは元帳を索引するために Job Controller の直後まで帰らなくてはならない。Program の索引表を持つことは、やみくもに検索することを避け (登録されていないときもある。)、またページ方式をとるのは関係深い Program 間での Link を素早くするためである。また Block Number を持つことは Back Road が行えない MT Device で逆 Search を早くするためである。Block Number を付ける仕事は System Maintenance Program で行なう。

User's Executable Library (UEL) は Library Label が Tape の最初に書かれていて、その後その Tape に記述されている Program に対する索引表が SMT と同様の Format で書き込まれている。この索引表の  $\alpha$  項はすべて “UEL” を指している。この UEL は S-

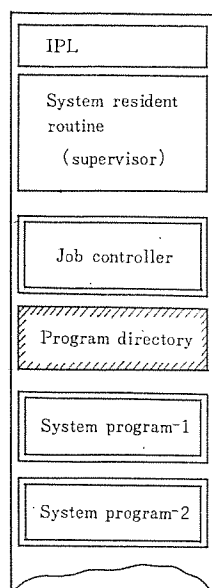


図 3.5 SMT の構造 Structure of SMT.

MT と働くことによって、そこに登録されている Program は自由に実行可能である。また System Input Tape Generator によって、SIPT を作成するとき、他の Library Tape といっしょに使用される。

User's Relocatable Library Tape (URL) の詳しい説明は次号で行なう。この Tape は UEL と同様に SMT と働くことによって、そこに登録されている Program は Executable Program に編集されて自由に実行可能である。編集された Executable Program は SS にたくわえられる。SS は System Program の実行の際の Scratch Tape として使用され、Translator からの Output (Object) とか、Program Editor からの Output (Executable Object) はこの Tape に書き込まれる。したがって Program Editor で編集されて実行される Program は SS Tape から Load されることになる。

このとき Job が唯一の単 Phase Program からなるときは、Job 内で SS を Scratch Tape として自由に使用することが可能である。

SS に書き込まれる Executable Program は SMT、UEL と同形式になっている。ただし Program 索引表の  $\alpha$  項は “SS” を指している。

SIPT は MELCOM-3100 Model-30 T System での stacked Job 処理を有効に進めるために OS で考えられたものである。

MT Base の OS では実行の際に Job の前準備を行なうために相当な時間をかけなくてははいけない。Model-30 T Operating System でも SMT から Job Controller を呼びださなくてははいけないが、いつもそこから読み出していたのでは計算時間の損失は大きなものになる。SIPT が考え出された理由はそのほかにもある。それはまず MT で Library が作られるとき、その容量の関係と、使用上の理由から通常多数の Reel にわたるものである。

これらの Library を使用して日々の Data 処理を行なうとき、Library の切り換えのための Process の申断、および Operater の繁雑さと労力は多くの計算機使用者から問題とされるところである。以上の二つの理由のほかに SPOOL を行なう場合に主 Job で Card Reader を使用せずに実行できることが必要である。

以上の点に対処するために Model-30 T Operating System では SIPT が考案された。SIPT の Physical な形式を次に示す。SIPT はこれから実行しようとする Job 群を SIPG によって編集されたものである。編集された個々の Job はその種類と処理の仕方によって、それぞれ SIPT 内で次のような Pattern を持つ。

Model-30 T Operating System で処理される Job は (a) または (b) の 2 種形のいずれかになって SIPT に書き込まれる。すべての Job に対して、Job 番号と Job Controller が先頭に書き込まれ

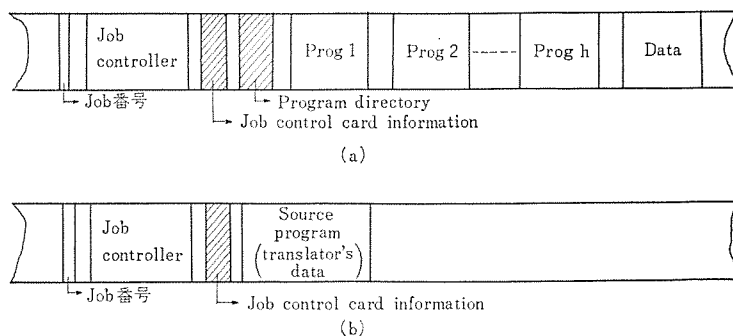


図 3.6 SIPT 上での Job の形 Patterns of Jobs on SIPT.



る。その後部にその Job に対する Job Control Statement が書き込まれる。その後 (a) の場合にはその Job に対する Program 索引表とそこに記載されている Executable Program がはいる。最後の部分に Card Image の Data がある場合とそうでない場合がある。

(b) は Job が System Program によってなされるか、Card から Relocatable Program を実行するときの Pattern であって Job Control Statement のあとに Data Card が Copy されている。これは Source Program, Relocatable Program または通常の Data Card に対するものである。

#### 4. Operating System の機能

MELCOM-3100 Model-30 T Operating System は次の機能をもつ System Supervisor と System Function Program からなりたっている。

System Supervisor の諸機能は

- System Loader
- PIOCS (Physical Input Output Control System)
- Interrupt Handler
- Error Handler
- Communication Handler
- Dynamic Debugging Routine

からなっており、Core Memory に定住する Program である。

System Function Program は必要に応じて Supervisor によって Working Area に呼び出されて実行される Program であり、

- Job Controller
- Program Editor
- Rerun Handler
- SPOOL Job Controller
- System Maintenance Program

がこれに相当する。

##### 4. 1 Supervisor Function

Supervisor Function のそれぞれについて概説する。

System Loader : この Routine は SMT, SS, UEL または SIPT から実行のために Executable Program を Working Area へ呼び出すものである。この System Loader を使用するために MACRO-CODER 言語には SEARCH および FETCH と呼ばれる二つの Supervisor Call 命令がある。SEARCH 命令は Program を呼び出すものであって、まず現在開かれている Program 索引ページ内に呼び出そうとするものがあるかどうか調べる。そのページ内になかったとき、そのページが SMT のものであれば、SMT を巻き戻して Program 索引表のすべてについて探す。開かれたページになかったとき、それが SIPT, SS, UEL のものであるときは誤とみなす。呼び出すべき Program が登録されていたときには Library Tape 位置をその位置まで移動し、Program 名とその Phase Directory を Supervisor Area へ移す。なお Supervisor には Program が登録されている索引ページもしまわれる。

FETCH 命令は Phase を主記憶装置に呼び出して実行するものであり、Supervisor 内の Phase Directory によって Phase を Load し実行開始番地へ Jump する。Supervisor 内には Library Tape の位置をいつも記憶しており、Program を検索する場合、最短距離で目的位置に達するように Design されている。

PIOCS : これは

- I/O Channel Scheduling
- Input/Output Action
- I/O Error Handling
- I/O End Interruption Handling

を行なう。

PIOCS は Macro 命令の形で Job Program から直接によぶことができ、また LIOCS (Logical Input Output Control System) から、さらに Supervisor 内部からも呼ばれる。

PIOCS は Job Control Statement の指定によって、SPOOL Status または Non SPOOL Status のいずれかに切り換えられ、SPOOL Status の場合には I/O End Interruption の際に、SPOOL Job Program を実行するための Control が働くように作られている。

Interrupt Handler : Interrupt Handling はすべて Supervisor 内部で自動的に処理され、Programmer はその働きについてまったく関知しなくてよい。Interrupt Handler は Interrupt の発生とともにその Source 解析を行ない、それぞれの場合の処理 Routine へ Control を渡す。

Communication Handler : この Routine は Machine Error Interruption, PIOCS で発生した Error および User's Program 内部からの要求があった場合に、Supervisor から Operater に向って Communication の要求が出される場合と、Operater から System に対して Job の中断、Memory の Dump Out を指示する場合などを扱う。それらはいずれも System Typewriter を通して行なわれる。

Dynamic Debugging Routine : Job Control Statement によって指定されたとき、特定の Resiter および主記憶域を Program の進行過程で Dump Out する。

##### 4. 2 System Function Program

まず Job Controller について説明する。

Job Controller は Job の前準備並びに End of Job 処理を行なう。

Job および Execution に関する制御情報を Card Reader または SIPT から読み取り、Job の前準備を行ない、Job の完了 (Normal/Unnormal) とともに System Loader によって呼び出される。

Job Controller は次のものによって呼び出される。

(a) IPL (Initial Program Loader)

IPL Procedure で最初の Job の準備をするため。

(b) Supervisor

Dump または Abort Operation の後。

(c) Problem Program

Normal End of Job によって、

Job Controller は SMT または SIPT に登録されていて、その選択は Console Table 上の Panel Switch によってなされる。

Job Controller の機能

Operating System のもとで実行されるすべての Program は SMT, UEL, SS, SIPT のいずれかから Load される。その機能のあらましは Control Statement によって示される。Control Statement には次のものがある。

JOB : Job

この Statement は Job の種類と、Job 名を指定するものである。

ASSIGN : Assign Actual Device

Model-30 T Operating System では Program 中での I/O Device の割り付けは Symbolic 名によって行なわれる。Physical な入出力装置の割り付けはこの Statement によって実行時に行なわれる。

LTOUT : Language Translator's Output

この Statement は Job で Language Translator を使用するとき  
に用いられ、それからの Output を指示するものである。指示する  
ものとしては List の種類と Object の種類がある。

SYSOUT : System Output

Print または Card への出力を直接それぞれの出力装置に出さず  
に System Output Tape に出力することを指示する。この出力 Ta-  
pe の内容は後で SPOOL によって Print および Card Punch され  
る。

SYSINP : System Input

Card Input Data を直接 Card Reader からでなく SIPT から  
Card Image で読みとることを指示する。

RFILE : Rerun File

この Statement は Rerun Job のための Check Point Record 番  
号とそれが書かれている File Tape を指定するものである。

USW : User's Switch

User's Program で使用する Switch の状態を Set する。

DATE : Date

Supervisor の Communication Area に日付けを Set するものであ  
る。

この日付けは User's Program によっても参照される。

PAUSE : Pause

この Statement は Job の準備作業を一時休止させる。

EXEC : Execute

この Statement は Job の Start を指令する。

BGSPL : Begin SPOOL

Supervisor Status を SPOOL Mode に Set する。

STSPL : Stop SPOOL

実行中の SPOOL Job が終了すると同時に Supervisor の SPOOL  
Mode を Reset する。

SCHJN : Search Job Number

SIPT を使用しているときに、この中の特別な Job を先に行ない  
たい場合、実行したい Job Number を指定する。この Statement  
は主として Operator によって Control Card Input をいったん、  
Typewriter Mode に切り換えて送り込まれるのが通常である。

SKPJN : Skip Job Number

SIPT を使用しているときに、ある特定の Job を Skip したい場  
合に用いる。この Statement も Typewriter から Input されるのが  
通常である。

END : End

すべての Job の End を示す。

Job Control Statement の処理中に発見された Error は Type-  
writer によって、Operator に示され、同じく Typewriter から修正  
その他が行なえる。

## 5. Job の Flow

### 5.1 Main Job と SPOOL Job との間での Job Flow

(1) Main Job Controller が BGSPL Statement を読みとると  
System を SPOOL Mode に Set する。同時に SPOOL Busy Mo-  
de に Set される。

(2) SPOOL Busy Mode であると、I/O End Interruption が  
Main Job 内で起こると Control は SPOOL System に引き渡

される。

(3) SPOOL Job System では、Job Initialize するためには  
SMT から Secondary Job Controller を呼び出し SPOOL Job Pre-  
paration を行なう。

SPOOL Job Control Card は SPOOL Job を Stack してある  
Card Reader から読み取る。Job 準備が終わると Control は Sup-  
ervisor に返される。

(4) SPOOL Job System では主 Job 内で Data End Interru-  
ption が起こるごとに繰り返して一定量ずつの Process を行なう。  
End of SPOOL Job になると SPOOL Job Controller が呼び出さ  
れて次の Job のために (3) のことが行なわれる。

(5) 主 Job の側でなんらかの理由で SPOOL Job を一時中断  
しなければならないとき SPOOL Job を中断可能な所まで進めて、  
SPOOL Area を主 Job にあけ渡す。SPOOL Busy Mode が Reset  
される。

SPOOL が中断するのは主 Job で Core Memory が必要とき、  
また Language Translator で Line Printer や Card Punch を必要  
とするときなどである。

(6) SPOOL Job が再開可能になったときは (主) Job Contro-  
ller からの指示によって Supervisor がこれを行ない SPOOL Busy  
Mode に set する。

(7) 主 Job Controller が STSPL Statement を読むと SPOOL  
Job System に実行中の Job が終わったならば SPOOL を終了せよ  
という指示を出す。

SPOOL から End of Job が出たときに SPOOL Mode は Reset  
される。

### 5.2 SPOOL Job

Model-30 T Job System では通常の意味での Job 処理の方式と、  
次のような SPOOL を用いた Job 処理の方式が考えられる。その  
目的とする所は、Model-30 T System での Cycle Steal の機能を生  
かして System の効率を上げることにある。

通常の Data 処理には Process 部分と Data の Input/Output の働  
きの部分にわけられる。Model-30 T System では後者を MT によ  
る部分と、Line Printer, Card Reader/Punch による部分にわけ、  
Process 部分と MT 入出力部を合わせて一つの Job とし、Line  
Printer (LP), Card Reader (CR) および Card Punch (CP) の  
部分を独立の Job として、2 者にわけ一方を主 Job とし他方を

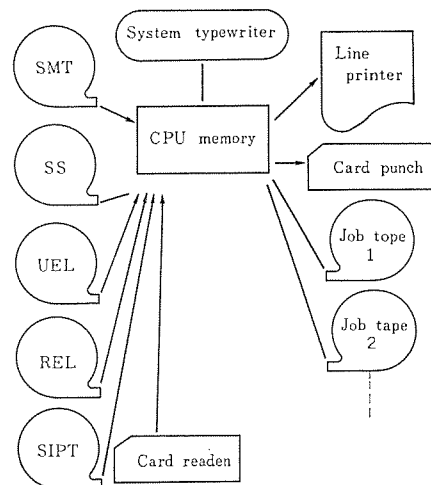


図 5.1 Standard mode の場合の Job の実行  
Standard of jobs in standard mode.

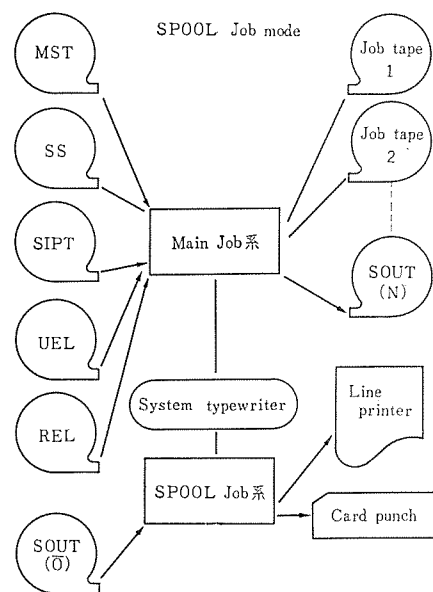


図 5.2 SPOOL mode の場合の Job の実行  
Process of job in SPOOL mode.

表 5.2 System Input 選択用 スイッチ  
System for selecting System Input.

Switch 名	Switch 番号	機 能
SIPT	16	OS が SIPT を選ぶ
CR	17	OS が CR を選ぶ
EXIT-HALT	13	EXIT で Main Job が Halt する. OFF-ON を行なうと再開

表 5.1 Job 別にみた System I/O device  
System I/O devices used for each type of job.

Job Source	Program Load Point	System Mode	SMT	SS	SIPT	SO-UT	UEL	URL	CR	CP	LP	備 考
Assembler または Translator を使用する Job	Library を使用しない場合	Standard	○	○	△	×	×	×	△	△	△	
		SPOOL Mode	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	Library を使用する場合	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Relocatable Program の実行	Library を使用しない場合	Standard	○	○	△	△	×	×	△	△	△	
		SPOOL Mode	○	○	○	○	×	×	○	○	○	
	Library を使用する場合	Standard	×	○	△	△	×	○	△	△	△	
		SPOOL Mode	○	○	○	○	×	○	○	○	○	
Executable Program の実行	Library を使用しない場合	Standard	△	×	△	△	×	×	△	△	△	SIPT 中に編集されている Job がすべて Executable Program のときは SMT は必要としない
		SPOOL Mode	○	×	○	○	×	×	○	○	○	
	Library を使用する場合	Standard	○	×	△	△	○	×	△	△	△	
		SPOOL Mode	○	×	○	○	○	×	○	○	○	

○ : Job 実行に必要な System Device  
△ : Job 実行に使用することのできる System Device  
× : Job 実行に使用しない System Device

SPOOL Job として Cycle Steal の機能を利用して別の時点で他の主 Job と同時処理を行なう。

Job Program 中に MT 以外を用いての出力があった場合、主 Job では Job 準備の際に Control Statement の指定があると System Output Tape に出力する。また CR からの入力があるときには先に説明した SIPT から読み取る。System Output Tape は次の SPOOL Job で処理することができる。この SPOOL Job Package Program は Maker 側から供給する System Function であって User's Program として与え得るものではない。また SIPT を作成する Program は 96 kc Memory System では Main Job で取り扱われる (System Input Tape Generator)。

### 5.3 Job の実行

Model-30 T-OS での Job 実行は Standard/SPOOL のいずれかの Mode で行なわれる。Mode の切り換えは Job Control Statement (STSPL/BGSPL) によって行なわれる。

Language Translator が使用されるときは SPOOL Job は一時停止する。その際に作り出される Object Program は SS にたくわえられ、実行されるときはそこから System Loader によって Load され実行される。Object Program が単 Phase であるときには Program 内で Scratch Tape として自由に使用することができる。

Standard Mode の Operation で SIPT を使用するとき、そこに編集された Job が Executable Program の実行のみであるときには、Operating System が必要とする System Tape はこの SIPT だけでよい。

System の二つの Mode と主 Job の分類については表 5.1 に示すとおりであり、その際に必要な System の入出力装置は表 5.1 の右側に記してあるとおりである。

Operating System では、Job Control Statement, Relocatable Object, Source Program, Executable Program 等を SIPT から読みとるか、CR その他から読みとるかを選択する。これは Console Desk 上の Panel Switch に Set されるようになっているが、SPOOL Job Mode のときには必ず SIPT Switch のほうが“ON”になっていなければならない。

## 6. む す び

本文では紙数の関係で System Maintenance Program についてふれることができなかった。また MACRO-CODER 言語の特性とそれによる Program 構造についての概説もなし得なかった。後者については続稿として詳しく説明されるはずである。

MELCOM-3100 Model-30 T Operating System は序章において述べたところを繰り返せば、MT Base の OS の持つ弱点とされる所を改善することによって、計算機の利用率を高め、Operator の操作を簡素で合理的なものとするを製作の主眼としてきた。

この System にみられる System File (Program Library) の形式と検索方式は Random Access Memory Device を Base とした System のそれに近づいている。これは Model-30 T System としての要請からなされたものであるが、一方 Disk System への応用が十分に考慮されているのである。

## 列車ダイヤ記録装置

片田 弘\*・佐々木吉市郎\*

今出 昭彦\*\*・八杉 征晴\*\*・里見 勝康\*\*

## Automatic Recorders of Train Diagrams

J. N. R., Kanazawa Railway Operating Division Hiroshi KATADA・Kiichiro SASAKI

Mitsubishi Electric Corp., Kamakura Works Akihiko IMADE・Masaharu YASUGI・Katsuyasu SATOMI

As the train operation has become highly frequent and speedy of late, a logical system in direct connection with the operation command has been demanded by the authorities for the purpose of improving the efficiency, preventing accidents and performing safe and accurate running of trains. Under the circumstances, automatic recorders of train diagrams have been completed by Mitsubishi as the most important item among the functions of collecting information, making judgement, giving command and confirming the outcome. They operate to record the train positions from to time so as to confirm if they are running in conformity to the schedule or not, thus making direct judgement feasible and the records kept for reference.

## 1. ま え が き

国鉄における列車の運転は、近年とみに高密度、高速化され、輸送量は逐年増加の一途をたどっている。これにともなって、輸送能力の向上をはかるとともに、運転事故を防止し、安全で正確な列車の運転を行なうために、運転指令業務の重要性はきわめて大きい。したがって、運転指令用の設備は、指令体系に直結した合理的なシステムを構成し、能率よく運用することが必要である。

列車運転指令業務は、情報収集・判断・指令・確認の作業に分けられるが、その基礎になるのは情報収集で、運転中の列車の種別・速度・運転条件など、広範囲にわたる軌道上の状況を大局的には握し、適正な判断指令を行なう必要がある。

現在の列車情報収集は、主として各駅からの電話連絡にたよっているが、これでは1人の指令者が担当線区全体の運転状況を正確には握することは相当の時間を要し、係員の運転取扱中の不在、電話の話し中などによる連絡不能の場合もあるので、列車の発着および駅に到着するまでの列車の位置の正確な把握が困難である。

これらの問題を解決するために、このたび最近の電子技術と搬送技術を応用して、全列車の時々刻々の位置情報を中央に自動的に収集し、あらかじめ予定ダイヤの印刷されたダイヤ記録紙上に、導電破壊方式によって自動的に記録を行なう「列車ダイヤ記録装置」を実用化した。これによって、列車位置の確認、さらには基準ダイヤとの関係が直接判断できるようになり、また整理ダイヤとして保存できるようになった。

ちなみに、昭和40年11月に東北支社秋田鉄道管理局における、列車指令員指令業務内容の調査報告によると、「運転整理のための情報収集に要する時分が、いずれの線区も全実働時分の約40%を占めており、情報収集のうち近代化可能時分が70%~80%を占めている。この時分は具体的には各駅からの列車の遅延時分の報告聴取の時分で、列車ダイヤ自動記録装置開発による大きな効果を物語っている」と述べられている。

この「列車ダイヤ記録装置」は、すでに、中部支社金沢鉄道管理局(北陸本線 金沢―直江津間 約180km)をはじめ新潟支社(羽越本線 新津―酒田間 約167km)、四国支社(土讃本線 多度津

一高知間 約127km)に設置され、応用装置として関西支社大阪鉄道管理局(大阪環状線 約20km)に電車運転時隔監視記録装置として設置されている。(四国支社装置の情報収集はC・T・Cで行なっている)

このように「列車ダイヤ記録装置」は、その有用性がつぎつぎと実証され、その必要度を増しつつあるので、ここに各装置の紹介を行ない、関係各位のご参考にご供するものである。

## 2. 列車ダイヤ記録装置の概要

## 2.1 システム概要

列車ダイヤ記録装置は既設の軌道回路を用いて列車位置を検出し、あらかじめ基準ダイヤの印刷されたダイヤ記録紙上に自動的に記録を行ない、あわせて主要駅構内の在線表示を行なう装置である。列車位置の検出および伝送には搬送技術を応用し、軌道回路の軌道継電器の接点と検出器の組み合わせによって中央に伝送している。したがって、多数の情報検出箇所には検出器を配置するだけで、発振器・電源などの活性回路を必要とせず、保守の手間が省けるといっても、ひじょうに経済的だという大きな特長をもっている。

図2.1は情報検出点が200点の場合のシステム構成図である。各情報検出点に配置された検出器は、それぞれ検出周波数50波中の1波が割り当てられた帯域器で、軌道継電器の接点の状態(ON, OFF)によって動作減衰量が大幅に変化するようにしたものである。したがって、情報検出機(B装置)から順次50波の波を送り出し、これを一方の線路で受信すれば、各情報検出点の軌道継電器の接点の状態が、各周波数の到着、不到着の形で検出監視できるわけである。

制御機(A装置)は、指令室またはその近くの機器室に設置され、情報検出機(B装置)を制御するとともに、伝送されてきた情報をトランジスタ論理回路を用いて、列車の有無および列車運転方向を判別し、記録に必要な列車位置信号だけを記録機へ送りこむ装置である。

記録機は制御機からの信号を基準ダイヤが印刷されているダイヤ記録紙上に記録するもので、記録は導電破壊式である。記録用紙は表面にダイヤが印刷されており、裏面に金属薄膜(アルミニウム)を蒸着したメタライズペーパーであり、裏面から記録針を押し当てて電流を流す

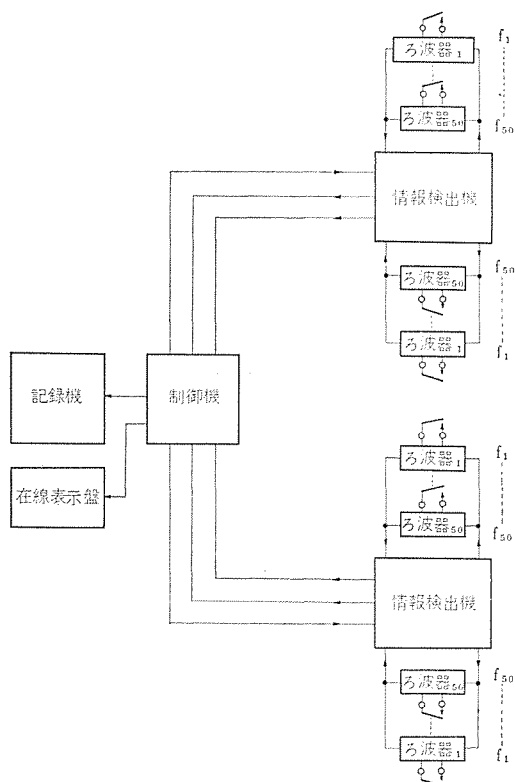


図 2.1 列車ダイヤ記録装置システム構成図  
System of automatic recorder of train diagram.

ことによって、その点の金属膜が溶融され、透明化して記録される。したがって、この方法は他の方式のように、カーボンボンやインクなどを用いず、また裏面から記録するので、表面に印刷された標準ダイヤが見やすく、記録紙上面から運転整理上必要な事項を容易に書きこむことができるなど、運用面についても十分な考慮をはらっている。

## 2.2 動作原理の概要

図 2.2 に示すごとく、制御機 (A 装置) は、情報検出機 (B 装置) が  $f_1 \sim f_{50}$  までの 50 波の周波数 (425 c/s  $\sim$  8,755 c/s 170 c/s 間隔) を 1 波ずつ順次線路に送り出すために、50 個の制御信号 (クロックパルス) を情報検出機 (B 装置) に送り出すとともに、検出波と記録状態が同期するよう記録機に記録指令と記録情報を送り出している。

検出ろ波器は、列車位置検出点の軌道継電器に対応して設置され、情報検出機 (B 装置) から送られてくる  $f_1 \sim f_{50}$  の 50 波のうち 1 波だけ通すように設計されているので、監視線路上全区間に列車のないときは、 $f_1 \sim f_{50}$  波はそれぞれ割り当てられた検出ろ波器を通して返ってくる。

いまかりに  $f_2$  地点に列車がある場合を考えると、その点に対応した軌道継電器の接点は落下 (ON) しているので、特定周波数 (この場合  $f_2 = 595$  c/s) に対する動作減衰量が増大し、今まで通していた  $f_2$  の波を通さなくなる。すなわち、送り出した検出波が返ってこないわけである。

このように、情報検出機 (B 装置) から送り出した検出波が返ってきたか、または返ってこなかったかを識別してこれを直流パルスに変え、信号伝送回線を介して制御機 (A 装置) へ伝送する。制御機 (A 装置) では、返ってきた直流パルス列から何番目のパルスが返ってこなかったかを識別し、その位置に列車があるという情報に読

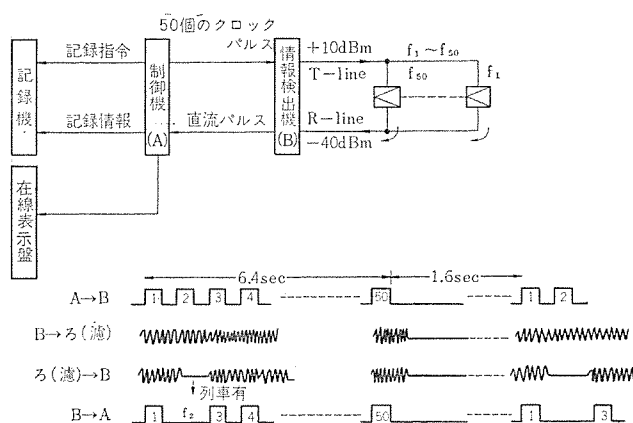


図 2.2 列車位置検出の構成と情報検出信号タイムチャート  
Detect system of train positions and detect signals time chart.

みかえて記録機へ送っている。記録機ではその信号を受けて基準ダイヤが印刷されているダイヤ記録紙の裏面から導電破壊方式で記録している。

## 2.3 軌道回路の原理と情報収集

列車の位置を検出するには、軌道回路に設けられた軌道継電器と、特定の周波数が割り当てられた検出ろ波器の組み合わせによって行なっているが、その原理を簡単に述べてみよう。

軌道回路の原理は周知のことであるが、図 2.3 に示すごとく、軌道を適当な区間に区分し、その両端のレールを隣接レールと電気的に絶縁してある。そして区分した両端の各レール継ぎめをインピーダンスポンドで電気的に接続し、変電所帰線電流は通すが、各軌道回路の信号電流は阻止するようになっている。この一端に信号電源を、他端に制御する継電器を接続して電気回路を構成している。

いまこの区分された軌道内に列車がないときは、電源から十分な励磁電流を受けて軌道継電器は動作しているが、軌道内に列車または車両がはいると、車軸によってこの電気回路は短絡され、したがって軌道継電器は無励磁状態になって落下する。

この軌道継電器の励磁接点 (打上げ接点) で綠色灯 (G) を、無励磁接点 (落下接点) で赤色灯 (R) を点灯すれば、信号機は列車によって自動的に制御されるわけである。一方検出ろ波器を図のように

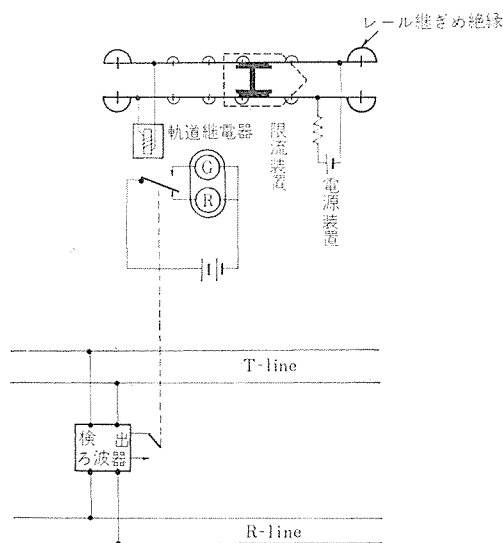


図 2.3 軌道回路の原理と検出ろ波器  
Principle of track circuit and detecting filter.



軌道継電器の落下接点に接続しておく、列車が軌道回路内にはいっているとき（軌道継電器の落下接点 ON）中央からの情報検出波は減衰量の増加のために検出ろ波器内を通過しないため中央の情報検出機（B装置）にはその点の検出波が返ってこない。したがってこの場合にはその地点（軌道回路上）に列車があると判定して制御機（A装置）へ信号を送っている。

## 2.4 情報検出機（B装置）

情報検出機は制御機からの制御信号（クロックパルス）を受け、列車位置検出個所に配置された各検出ろ波器に順次検出波を送り出し、その波の到着、不到着によって情報を検出して制御機へ送っている。情報検出機のブロック図は図 2.4 に示すとおりで、原理を示す周波数配置図は図 2.5 に示す。

検出波発振部は、発振器としては変調キャリア用の 5 個の水晶発振器と、10 個の CR 発振器より構成されており、論理回路からの制御

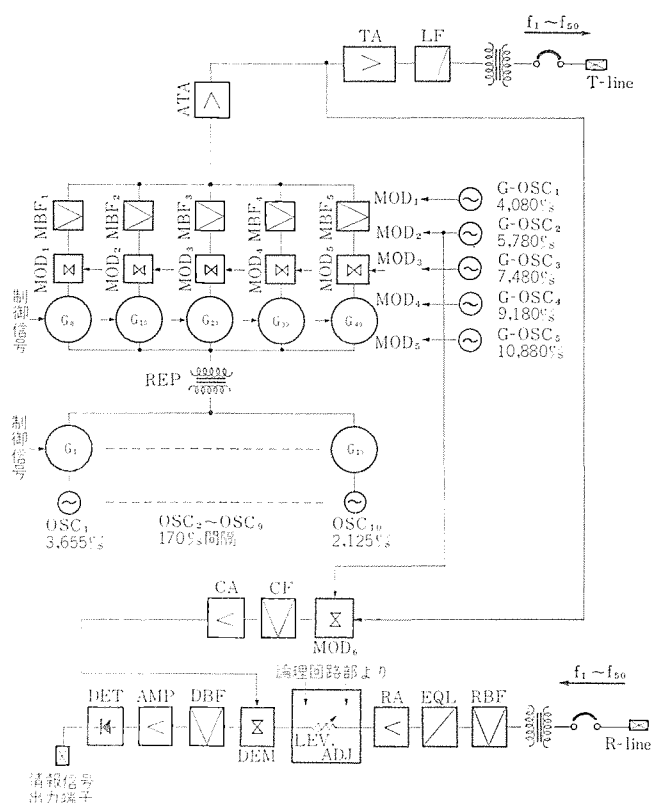


図 2.4 情報検出機ブロック図  
Block diagram of B equipment.

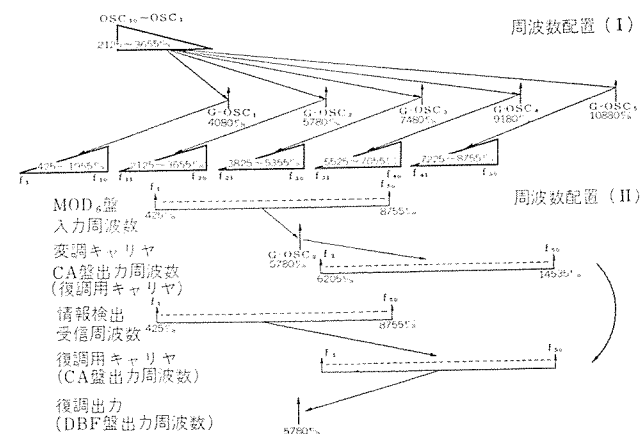


図 2.5 周波数配置  
Frequency arrangement.

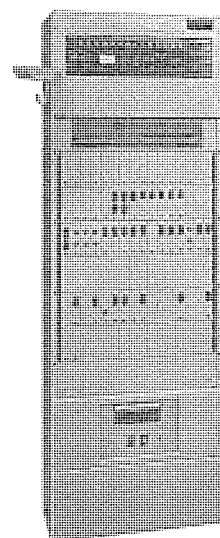


図 2.6 情報検出機（B装置）実装図  
Bay assembly of B equipment.

表 2.1 情報検出機標準仕様  
Specification of B equipment.

検出点数	100 点以下 (50 点ずつ 2 チャンネル以下)
使用周波数	425 c/s ~ 8,755 c/s (170 c/s ステップ 50 波)
送出時間	1 波当たり 128 ms
周波数安定度	$2 \times 10^{-3}$ 以下
入出力レベル (線路端)	送信レベル……+10 dBm (標準) 受信レベル……-45 dBm (最低)
入出力インピーダンス (線路端)	600 $\Omega$ 平衡
情報検出伝送路	許容線路損失 55 dB 以下 (往復) (検出ろ波器を通した往復の線路損失)
	S/N 比 25 dB 以上 (S……検出波 ON のときのレベル N……検出波 OFF のときのレベル)

信号によって、これらの周波数の組合わせゲートを制御して 50 波をつくり、順次送信部を通して T-line へ送り出している。

これらの送出波は、制御機からのクロックパルスに同期して時分割で送り出されているが、これらが各周波数に対応した検出ろ波器を通過し、検出ろ波器が“通”（軌道継電器接点が OFF）か、“断”（軌道継電器接点が ON）によって R-line に到着したり、しなかったりするので、受信部ではそれを増幅、検波し、直流信号として信号伝送部を通して制御機へ送り返している。受信部では論理回路からの信号によりおのおのの周波数ごとに受信レベルを調整できるようにしてあり、また検波回路にはヘテロダイン検波を用いて雑音に対して強くなるように考慮してある。

情報検出機の標準仕様は表 2.1 に、実装図を図 2.6 に示す。

## 2.5 検出ろ波器（フィルタ）

列車ダイヤ記録装置の情報源は軌道継電器や方向でこであることは前述のとおりだが、この情報源の状態を何らかの方法で検出して中央に集める必要がある。この目的のために情報点に配置されるものがこの情報検出ろ波器である。

各ろ波器は検出周波数 50 波 (425 c/s ~ 8,755 c/s 170 c/s 間隔) の中の 1 波が割り当てられた狭帯域ろ波器で、図 2.7 に示すように T-line と R-line を橋絡するように接続され、ろ波器の中点には情報源の接点が接続されている。

ろ波器は接点の状態 (ON, OFF) によってその動作減衰量が大幅に (約 60 dB 程度) 変化するので、T-line からの検出波は、信号

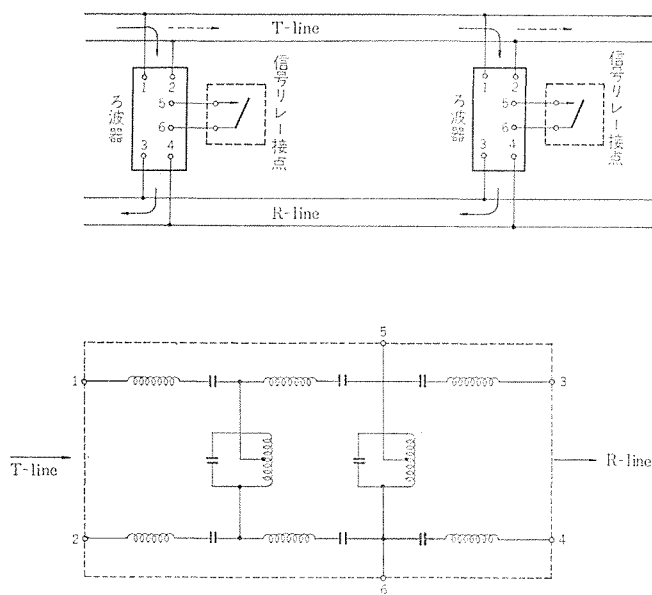


図 2.7 検出ろ波器 Detecting filter.

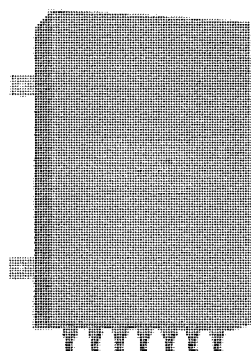


図 2.8 検出ろ波器外観 Detecting filter.

表 2.2 検出ろ波器標準仕様  
Specification of detecting filter.

大 き さ	高 51.5 mm	横 120 mm	縦 180 mm
中 心 周 波 数	425 c/s ~ 8,755 c/s 170 c/s 間隔		
減 衰 特 性	帯 域 内	$f_0 \pm 30$ c/s	10 dB 以下
	帯 域 外	$f_0 \pm 170$ c/s	35 dB 以上
インピーダンス特性	中心周波数 $f_0$	標準 600 $\Omega$ 平衡	
	中心周波数	$f_0 \pm 170$ c/s	2 k $\Omega$ 以上

リレー接点が OFF のときにろ波器を通過し、接点 ON のときに阻止されるわけである。したがって、情報検出機 (B 装置において R-line) から返送されてくる各周波数の到着・不到着を監視すれば各情報接点の状態、すなわち列車の有無および方向が検出される。

軌道継電器の接点や方向でこの接点は、一般に駅または信号扱所・継電器室等に集中管理されていることが多く、したがって検出ろ波器もそれらの屋内に集中設置している。

検出ろ波器の標準仕様を表 2.2 に、外観写真を図 2.8 に示す。

## 2.6 中継器

列車ダイヤ記録装置の情報収集は、情報検出機から検出波を送出し、各情報点に対応して設置した帯域ろ波器によって折り返されてくる検出波の有無を判別する方式であることは今までの説明とおりである。

したがって、広範囲に数多く存在する情報点には帯域ろ波器を設

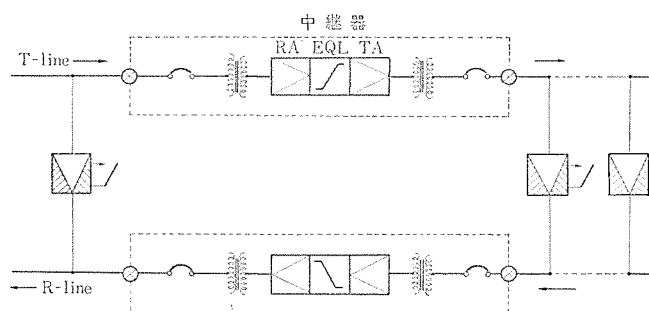


図 2.9 伝送線路と中継器  
Transporting line and repeater.

表 2.3 中継器標準仕様 Specification of repeater.

大 き さ	高 100 mm	幅 480 mm	奥 200 mm
電 源 電 圧	DC -24 V (外部供給)		
伝 送 帯 域	0.4 kc ~ 7 kc		
利 得	最小 5 dB 最大 40 dB 範囲内は 1 dB ステップ調整可能		
出 力 レ ベ ル	最 大 +15 dBm/600 $\Omega$		
ひ ず み 率	最大出力時 30 dB 以上		
入出力インピーダンス	入力インピーダンス 6 k $\Omega$ 以上 (平衡形) 出力インピーダンス 600 $\Omega$ (平衡形)		

置するだけで、保守がひじょうに容易であるという利点があるが、一方、検出波をろ波器で折り返すので線路損失は情報検出機からろ波器配置点までの往復の距離で影響し、おのずと検出できる距離に制約を受ける。しかも情報検出は前述のとおり検出波の到着・不到着によって判別するので、到着レベルが雑音レベルに比べて十分高くなければならない。そこで回線の途中で低くなった検出波を増幅して、検出可能距離を伸ばすとともに、S/N 比を改善して安定した検出を行なえるようにするのがこの中継器である。

なお、中継器を設置しない場合、ろ波器を接続したときの線路損失は、実測の結果、ケーブル単体の線路損失 (T, R-line 往復) に、ろ波器接続による分岐損失とろ波器損失を合わせたもの約 15 dB を加えればよく、ろ波器の配置状態にもよるが、情報検出機 (B 装置) 1 台の情報検出可能距離は 1 チャンネル 約 25 km、実装は 2 チャンネル まで可能で、約 50 km である。図 2.9 は伝送路の中継器の構成を示し、表 2.3 に中継器の標準仕様を示す。

## 2.7 制御機 (A 装置)

制御機 (A 装置) は情報検出機 (B 装置) を制御するとともに、情報検出機によって収集され、送られてきた情報を論理回路で処理し、記録機の入力に必要な信号に変換する装置である。制御機の回路構成を図 2.10 に示す。

制御機の動作原理を簡単に説明すると、まず制御信号発生部から送信部を通り情報検出機へ送られる信号は、図 2.2 に示すようなパルス信号で、1 走査 8 秒で、周期は 128 ms のクロックパルス 50 個 (6.4 秒) と 1.6 秒の休止期間から成っている。情報検出機から返送されてくる信号も図 2.2 に示すようにパルス信号で、前述のように送出されたクロックパルスに対応して 50 個の検出信号が返ってくる。ところが列車が検出されない場合には返送信号は送信信号と同じ 50 個のパルスであるが、列車が検出されるとその検出箇所のみパルスがなくなった信号が返ってくるわけである。

情報検出機からの検出信号は列車位置情報以外の情報も含まれて

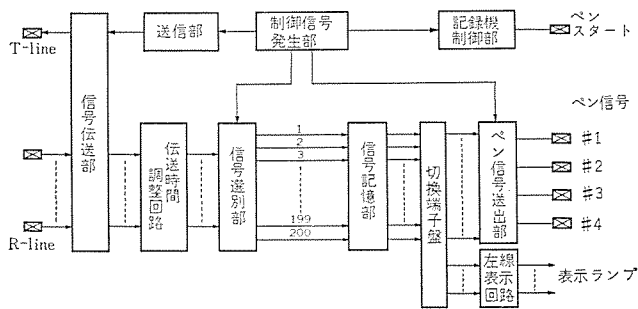


図 2.10 制御機ブロック図  
Block diagram of main controller.

いる。すなわち、複線自動閉鎖区間では信号機の状態⑨がそのまま「列車あり」の信号であるが、単線自動閉鎖区間では対向列車に対する条件が付加されてくるため、信号機の状態⑨は、そのまま「列車あり」に対応しないわけである。すなわち、単線区間では方向でこの状態も検出して伝送されてくるので、このような場合には、信号選別部でこれらの情報から列車の有無、列車運転方向を判別し、記録に必要な列車位置情報だけをとりだして記憶回路に送っている。記憶回路にはいった列車位置情報をペン信号送出处で走査し、記録すべき位置情報を50点ずつの直列信号に分割して記録機へ送り出している。

## 2.8 記録機

記録機は制御機からの信号によって基準ダイヤが印刷されているダイヤ記録紙(2.9節記録紙の項参照)に導電破壊方式によって列車位置を記録する装置である。

記録紙はダイヤの記録を行なうかわり、運転整理に必要な書込みや修正が容易にできるようにするため、記録機構部はすべて記録紙の裏面に組み込んであり、表面からみて鮮明な記録が得られるようにくふうしてある。

記録紙は図2.11のように紙巻取りスプロケットホイールに密着させ、スプロケットホイールとアース電極を固定電極、記録針を記録電極としてアルミニウム蒸着面に接触させ、両電極間に約-35V程度の直流電圧を加えると記録針(電極)の接触部分で金属薄膜(Al)が溶融破壊して半透明の記録を描いている。両電極間に電圧を印加するか、しないかは、検出点から収集した列車位置信号によって決められる。すなわち「列車あり」で電圧印加を行なっている。

記録点容量は最大200点で、50点ずつを4本の記録針で分担している。したがって、それぞれの記録針は記録紙幅方向に有効記録幅の $\frac{1}{4}$ 長を反復掃引している。その繰返し周期は8秒で、記録は送り時6.4秒間に行なわれ、約1.0秒で原点に戻り、送り終了後0.6秒後のスタート信号によってふたたび同じ動作を繰返ししている。この掃引は制御機の列車位置情報の走査と同期して行なっている。したがって、制御機からペンに送り込まれる信号と、ペンの記録紙上の位置はつねに対応しているので、検出された列車位置情報は正確にダ

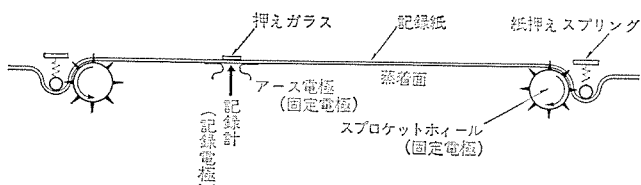


図 2.11 記録機原理図  
Principle of recorder.

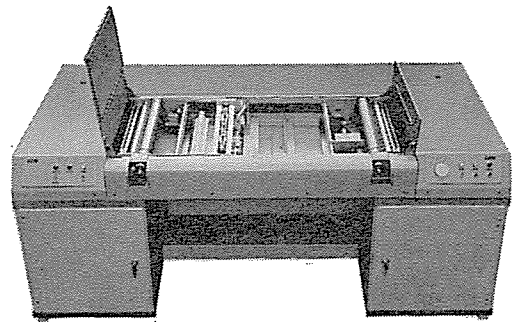


図 2.12 記録機内部構造および外観  
Recorder of train diagram.

イヤ記録紙上に再現されるわけである。記録針の移動は安定度の高い水晶発振器(50 c/s)でつねに一定回転させ、送りむらを生じて誤記録とならないよう考慮している。また記録紙移動機構も、記録が時間的に正しく再現されるようにするため、同じような方法で一定速度(60 mm/h)で右から左へ記録紙を送っている。

なお、記録紙は表面に常時約16時間分のダイヤが直視できるようになっているので、ダイヤの乱れたような場合の判断・整理・修正などが十分可能である。記録機の内部構造および外観を図2.12に示す。

## 2.9 記録紙

列車ダイヤ記録装置記録機の記録方式は導電破壊方式であることは前述したとおりである。記録方式についてはいろいろと考えられるが、この導電破壊方式はタイパーで記録するときのように音がせず、また分解能を高めることができるし、XYレコーダのようにインクを使用していないので記録が不鮮明になったり、よごれたりすることもなく、またにおいなどもしないという特長がある。しかも、裏面から安定した記録を行なうので、表面から記録が見やすく、ひじょうに使いやすい。

## 2.10 在線表示盤

列車ダイヤ記録装置による記録では、駅構内の在線状態はすべて1本の記録となる。したがって、数本の列車の駅構内での在線状態を記録紙上だけで判別するのは困難である。この問題を解決するために、主要駅の在線状態を同様の検出器で検出し、記録機上後方に設けた在線表示盤に表示している。この表示盤と記録機の併用によって列車の発着状況を正確には握ることができる。表2.4に金沢鉄道管理局の在線表示盤の概要を、また記録機上の写真を図2.13に示す。

表 2.4 金沢鉄道管理局在線表示盤一覧  
List of display for train position at Kanazawa.

外形寸法	高 350 mm	幅 500 mm	上部奥行 100 mm
	下部奥行 170 mm	鉄製卓上型	
表示能力	金	沢	10 点
	津	幡	6 点
	高	岡	6 点
	富	山	7 点
	富	山 (操)	16 点
	魚	津	6 点
	青	海	6 点
	糸	魚 川	10 点
電 源	直	江 津	9 点
	-24 V 10 A		

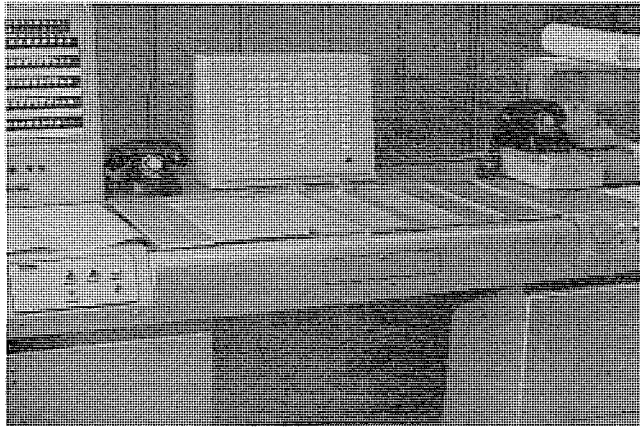


図 2.13 金沢鉄道管理局内列車ダイヤ記録機と在線表示盤  
Display panel of train position on train diagram recorder.

### 3. 列車ダイヤ記録装置の特長と運転指令上の役割

列車ダイヤ記録装置は前述のようにいくつかの特長をもっているが、おもなものをまとめると次のようになる。

#### 装置の特長

(1) 列車位置の検出は軌道継電器接点とろ波器だけの組合わせによって行っており、多数の検出個所にはろ波器を配置するだけでよく、発振器、電源などの能動回路を必要としないため保守の必要がほとんどない。

(2) 情報検出機1台の検出可能距離は、通常約50km(情報点100点、2系統実装)であり、中継器をそう入することによってさらに伸びるので経済的である。

(3) 線路条件の変更(複線化、駅の新設・廃止)があっても装置内で容易に変更できる。

(4) 主要部はトランジスタ回路を用いているため寿命が長く、保守・点検が容易である。

(5) 記録は導電破壊式であるため、静かで、鮮明であるばかりでなく、においもしない。また、カーボンリボンやインクを使用していないため保守が容易である。

(6) 記録は裏面から行なうので記録表面から見やすく、指令上の種々の書込みも容易である。

(7) 記録紙は鉛筆・色鉛筆・インク・ボールペンなどで書き込むことができ、鉛筆(色鉛筆)で記入したものは消しゴムで消すことができる。

#### 運転指令上の役割

(1) 列車位置の情報収集が電話連絡によらず、連続的・自動的に行なえる。

(2) 基準ダイヤと実運転ダイヤ(記録)が直視的に比較できる。

(3) 記録の精度が高く、全列車の正確な運行状況が基準ダイヤ上に時々刻々得られるので、広い視野で列車指令・監視ができる。

(4) 記録が永久に保存できる。

(5) 記録機上に主要駅構内の在線表示盤があり、現発情報がアップ表示されるため、ダイヤ記録と併用することによって効果的な運用が行なえる。

(6) 記録上に異常ダイヤが生じはじめると、即座に指令電話で状況聴取を行なうことができるので、指令の即時性を満足できる。

### 4. 金沢鉄道管理局システムについて

このシステムは、北陸本線 金沢―直江津間の列車位置情報を金沢に集め、列車運行軌跡を記録するものである。本装置は、昭和41年3月現地に設置され、数ヵ月間の試用期間ののち、現在実際の列車指令に有効に使用されているので、その概要、試験結果および使用状況などを紹介する。

#### 4.1 構成

本システムの構成機器としては、これまで述べてきたとおり、記録機・在線表示盤・制御機・情報検出機・中継器・検出ろ波器であり、これらを現地の状況に適合するよう、台数および設置場所を選択しており、表4.1のとおり構成となっている。図4.1はそのシステム構成図である。

検出ろ波器は全区間約180kmの信号機(軌道回路)および方向てこに対応して、合計331個を設置している。これらの情報接点は、駅または信号所の継電器室に集められているので、ろ波器もまた継電器室にまとめて設置している。

全区間は4区間に分割され、各区間の中心(高岡・魚津・糸魚川)または片方の端(直江津)には情報検出機が設置されている。これらの情報検出機設置駅は、装置の取扱い、保守の関係上、すべて急行停車駅に選んである。なお、高岡情報検出機の金沢側の石動・津幡・魚津の情報検出機の直江津側の生地には、中継器を用いて情報検出機の検出可能距離を伸ばしている。

制御機、記録機および在線表示盤は、この区間の列車指令を行なっている金沢駅に設置されている。

制御機と情報検出機間の信号伝送として、魚津・糸魚川・直江津情報検出機用には、FS電信回線を利用し、高岡情報検出機用には、専用の電信回線も電話回線もないため、情報検出用の搬送ケーブルを利用している。すなわち、信号を音声周波のFS波に変換し、情報検出用の搬送ケーブルに重畳し伝送する。この信号伝送には $f_1 \sim f_3$ 程

表 4.1 金沢―直江津間列車ダイヤ記録装置構成機器  
Components of train diagram system from Kanazawa to Naoetsu.

構 成 機 器	設置場所および台数
記 録 機	金 沢 1 台
在 線 表 示 盤	金 沢 1 台
制 御 機	金 沢 1 台
情 報 検 出 機	高岡、魚津、糸魚川、直江津 計3台
中 継 器	津幡、石動、生地 計3台
ろ 波 器	区内各駅 計331台

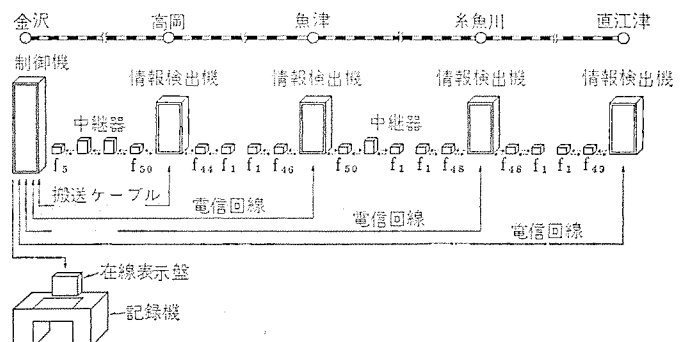
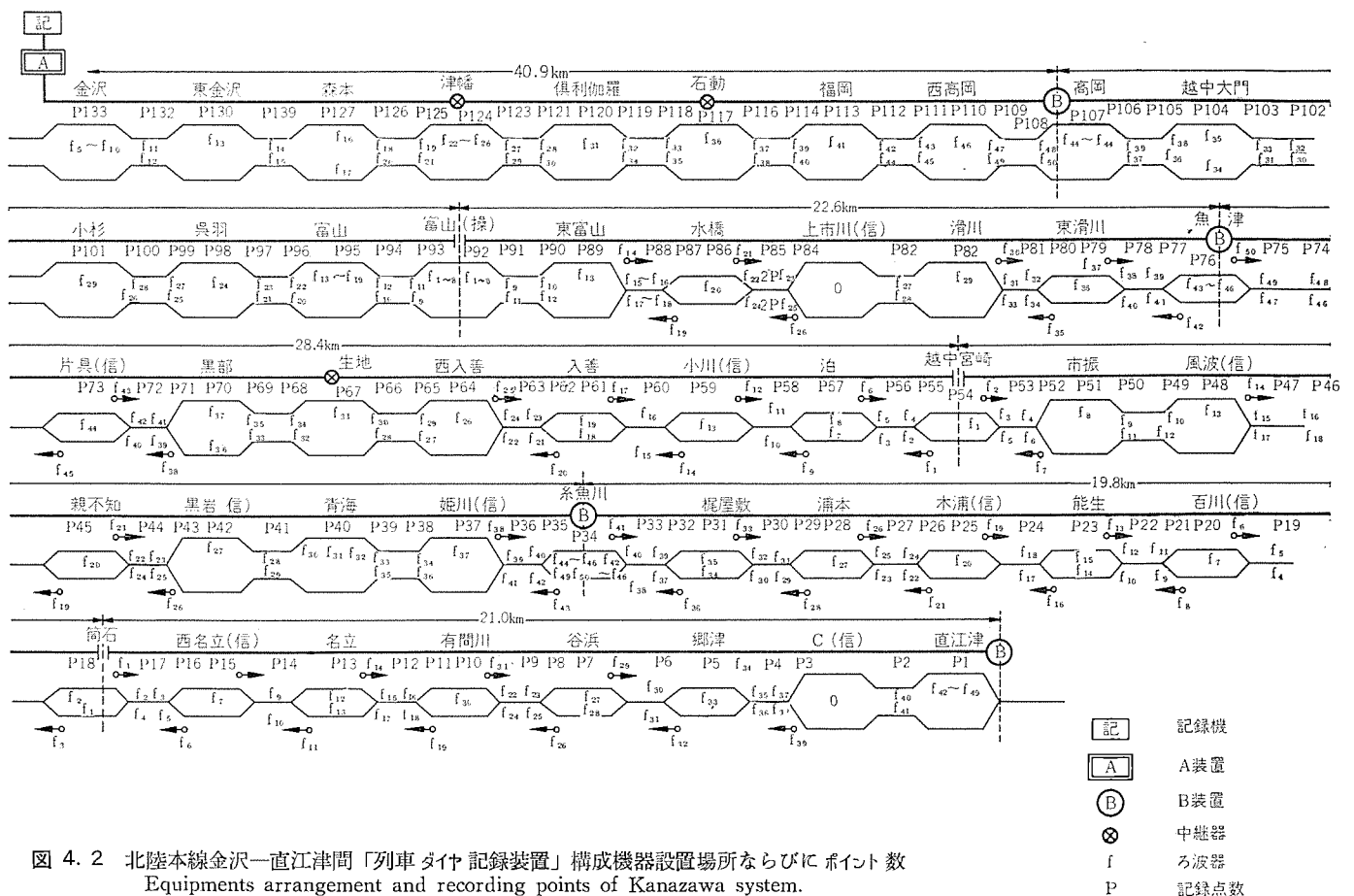


図 4.1 金沢―直江津間列車ダイヤ記録装置システム構成図  
Out-line of train diagram system from Kanazawa to Naoetsu.



度の波を利用するので、情報検出波は $f_5 \sim f_{50}$ の46波となっている。

#### 4.2 記録点および検出点

列車位置情報源としては既設の軌道回路を用いていることは前述のとおりであり、記録紙上の1記録点は、線路上の1軌道回路（閉そく区間）に対応する。1記録点の長さは、装置の性能上一定であるので、どの閉そく区間長も一定であることが望ましい。しかし、実際の閉そく区間長は場所によって異なり、1記録点に相当する実際の線路上の長さにかんがりの相異が生じる。（この場合には、記録用紙上の予定ダイヤの傾斜が、列車速度が同じでも、区間によって異なることになり、予定ダイヤの直線性が悪くなる）また、すべての閉そく区間ごとに列車位置情報の検出をすれば、検出点が多くなり、ろ波器、情報検出機、さらに制御機内部の回路の数もふえ、全体の装置の価格が高くなる。したがって、金沢システムでは、各閉そく区間ごとに列車位置を検出するのではなく、連続した2、3個の閉そく区間をまとめて1検出点（記録点）としたものもあり、記録点は、駅は1点、駅間は距離に応じて1点または2点とし、全体で133点の記録を行なっている。

情報検出点は、複線区間では、軌道回路の条件だけでよいが、金沢一直江津間は、単線区間もあるので、この場合には方向でこの条件が必要になる。また、主要駅での列車在線状況の表示も行なうので、各線路ごとの軌道回路の条件を検出する必要もある。なお、複線区間でも、上り、下り別々に検出するので、この場合にも、検出点は記録点の2倍必要である。したがって、情報検出点は実際の記録点よりも多くなり、全体で331点の検出を行なっている。

記録点と検出点を実際の線路状況に対応させて示したのが、図

4.2である。

#### 4.3 現地据付試験

このシステムの情報収集には、既設の現地施設をそのまま利用しているので、システム全体が、十分その機能を発揮するためには、装置単体が正常に動作するとともに、既設の通信回線による損失・雑音や信号・接点・抵抗値が仕様を満足する必要がある。もちろんこの点については、設計段階において、これまでの実用化試験の結果をもとに、十分考慮しているが、現地据付に当たり、とくに留意した点について述べる。

##### (1) 線路損失および受信レベル

情報検出機の情報検出波の送出レベルは+10 dBmであり、受信レベルは-45 dBm以上必要であるので、情報検出線路に許される損失は最大55 dBである。もちろん、この値はケーブル単体の値ではなく、ろ波器が接続されたときの値で、これまでの実験結果によると、ケーブル単体の損失よりも15 dB程度大きくなる。このろ波器そう入による損失も見込んで、受信レベルが-45 dBm以上になるように、情報検出機およびろ波器（-45 dBm以下になる個所については、中継器をそう入）を配置したわけであるが、実測によってもこの仕様を満足していることを確認できた。受信レベルの一例を図4.3に示す。この図によると、検出波が $f_{20} \sim f_{25}$ 前後の場合の損失が最大で、検出波の周波数の低い場合も、高い場合も損失は小さくなっている。これは、周波数の低い検出波は、単位長当たりの損失が小さいので全体としての損失も小さく、周波数の高い検出波は、単位長当たりの損失は大きい、ろ波器の配置位置が情報検出機に近いため線路長が短かく、全体としての損失も小さくなる。おのおのの検



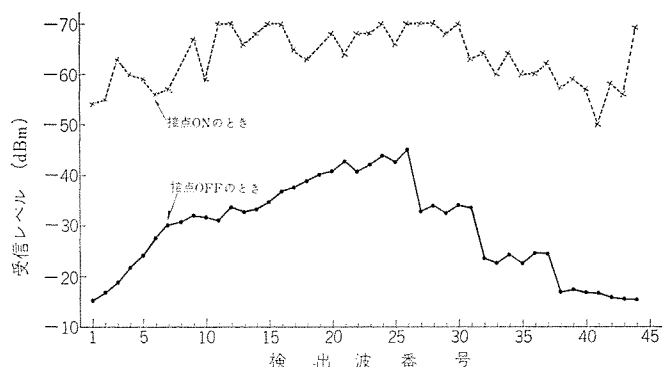


図 4.3 情報検出機（高岡—富山・操）受信レベル  
Received signal level of B equipment.

出波についてケーブルの単位長当たりの損失を表 4.2 に示す。

#### (2) 線路雑音による影響

信号接点の ON/OFF の判別は、情報検出波が情報検出機に到着するか、しないかによって行なっているため、検出波と同じ周波数の雑音レベルが、検出波の受信レベルに近くなった場合（S/N が 20 dB 以下）、信号接点の ON/OFF の判別が困難になる。本装置に使用したケーブルの線路雑音は、検出周波数帯内では -70 dBm 以下で、線路雑音による悪影響はない。

#### (3) 信号接点の ON/OFF による S/N

検出器に接続された信号接点の ON/OFF により、情報検出波が通過したり、しなかったりするわけであるが、この接点抵抗が大きいと、接点が ON で検出波が通過してはいけないうちにも、検出波が漏れて通過することになり、この場合にも、接点の ON/OFF の判別が困難になる。この判別を十分安定に行なうためには、接点の ON/OFF による情報検出機受信レベルの S/N は 25 dB 以上必要であり、この S/N を得るためには、接点の抵抗は、接続線の抵抗も含めて 5 Ω 以下でなければならないことが実験によりわかっている。実際に情報検出機の受信端で、信号接点の ON, OFF の場合について、検出波のレベルを測定した結果、接点不良により十分な S/N を得られないものが、全体で十数箇所あったが、これらは別の良好な空き接点に取換えることにより、必要な S/N を確保している。図 4.3 には接点が OFF の場合の受信レベルとともに、接点が ON の場合の受信レベルも示してある。

#### (4) レベル変動試験

情報検出機の送受信端で、検出波のレベルを ±5 dB 変化させて、装置の動作を試験したが、この程度のレベル変動では、装置は正常に動作することを確認できた。

#### (5) 信号伝送の遅れ

制御機より制御信号が送り出されてから、検出信号が制御機へ返ってくるまでの時間遅れは、70~150 ms 程度であり、各情報検出機によって異なるが、制御機内の遅延時間調整回路によって、すべて同一時間に調整し問題は無い。

### 4.4 列車指令での使用状況

本システムを構成する各機器のうち、列車指令に直接関係するのは記録機であるが、記録機は金沢駅の列車指令室に他の区間用の指令台と並べて設置され、この記録機が金沢—直江津間用の指令台の役割も果たしている。

指令員は、常時この記録機の前にすわり、記録状態にある記録紙に印刷された予定ダイヤ、およびそれに記録されていく列車の軌跡を見ながら列車指令を行なっている。もし記録に異常が生じれば、即

表 4.2 線路損失実測データ  
Line loss data.

f No.	f <sub>0</sub> (c/s)	dB/35.05 km	dB/km
f <sub>1</sub>	425	16.5	0.4708
f <sub>2</sub>	595	18.8	0.5364
f <sub>3</sub>	765	21.0	0.5991
f <sub>4</sub>	935	23.0	0.6562
f <sub>5</sub>	1105	24.8	0.7076
f <sub>6</sub>	1275	26.5	0.7561
f <sub>7</sub>	1445	28.0	0.7989
f <sub>8</sub>	1615	29.4	0.8388
f <sub>9</sub>	1785	30.7	0.8759
f <sub>10</sub>	1955	32.0	0.9130
f <sub>11</sub>	2125	33.3	0.9501
f <sub>12</sub>	2295	34.5	0.9843
f <sub>13</sub>	2465	35.7	1.0185
f <sub>14</sub>	2635	36.9	1.0528
f <sub>15</sub>	2805	38.0	1.0842
f <sub>16</sub>	2975	39.0	1.1127
f <sub>17</sub>	3145	39.8	1.1355
f <sub>18</sub>	3315	40.6	1.1583
f <sub>19</sub>	3485	41.4	1.1812
f <sub>20</sub>	3655	42.2	1.2040
f <sub>21</sub>	3825	43.0	1.2268
f <sub>22</sub>	3995	43.8	1.2496
f <sub>23</sub>	4165	44.6	1.2725
f <sub>24</sub>	4335	45.3	1.2924
f <sub>25</sub>	4505	45.9	1.3096
f <sub>26</sub>	4675	46.5	1.3267
f <sub>27</sub>	4845	47.0	1.3409
f <sub>28</sub>	5015	47.5	1.3552
f <sub>29</sub>	5185	48.0	1.3695
f <sub>30</sub>	5355	48.5	1.3837
f <sub>31</sub>	5525	49.0	1.3980
f <sub>32</sub>	5695	49.5	1.4123
f <sub>33</sub>	5865	50.0	1.4265
f <sub>34</sub>	6035	50.4	1.4379
f <sub>35</sub>	6205	50.8	1.4494
f <sub>36</sub>	6375	51.2	1.4608
f <sub>37</sub>	6545	51.6	1.4722
f <sub>38</sub>	6715	51.9	1.4807
f <sub>39</sub>	6885	52.3	1.4922
f <sub>40</sub>	7055	52.6	1.5007
f <sub>41</sub>	7225	52.9	1.5093
f <sub>42</sub>	7395	53.2	1.5178
f <sub>43</sub>	7565	53.5	1.5264
f <sub>44</sub>	7735	53.8	1.5350
f <sub>45</sub>	7905	54.1	1.5435
f <sub>46</sub>	8075	54.4	1.5521
f <sub>47</sub>	8245	54.7	1.5606
f <sub>48</sub>	8415	55.0	1.5692
f <sub>49</sub>	8585	55.3	1.5777
f <sub>50</sub>	8755	55.5	1.5835

線 種 PEF 0.5 mm 絶縁 PE シース 0.9 φ -38 P 市外星搬送複合ケーブル  
測定区間 坂町—葛塚間 35.05 km

時電話により状況を聴取し、必要な指令を出し、さらにその後の状況も記録によりただちには握できるので、列車指令が迅速化されている。ダイヤの変更、遅延時分、その他列車指令に必要な書込みも、



図 4. 4 指令中 Operation under command.

この記録紙に直接行なわれている。図 4. 4 は実際の使用状況を示したものである。

事前のダイヤ変更も、変更のたびごとに、直接記録紙に行なわれ、記録された記録紙はそのまま列車指令の報告書として保存されている。

図 4. 5 に金沢―直江津間の列車ダイヤ記録紙を示す。

## 5. む す び

列車ダイヤ記録装置の概要を、実際の設置例である金沢鉄道管理局システムと併せて紹介したが、関係各位のご参考になれば幸いである。なお、今後も、本装置が列車指令業務の近代化に十分寄与できるよう、より使いやすい、より有効なものにするための改良を加えていきたいと考えている。

最後に、本装置の開発および実用化に当たり多大のご指導をいただいた鉄道技術研究所・国鉄本社・金沢鉄道管理局・新潟支社の関係各位、および本装置の製作を担当された各位に深謝の意を表する。

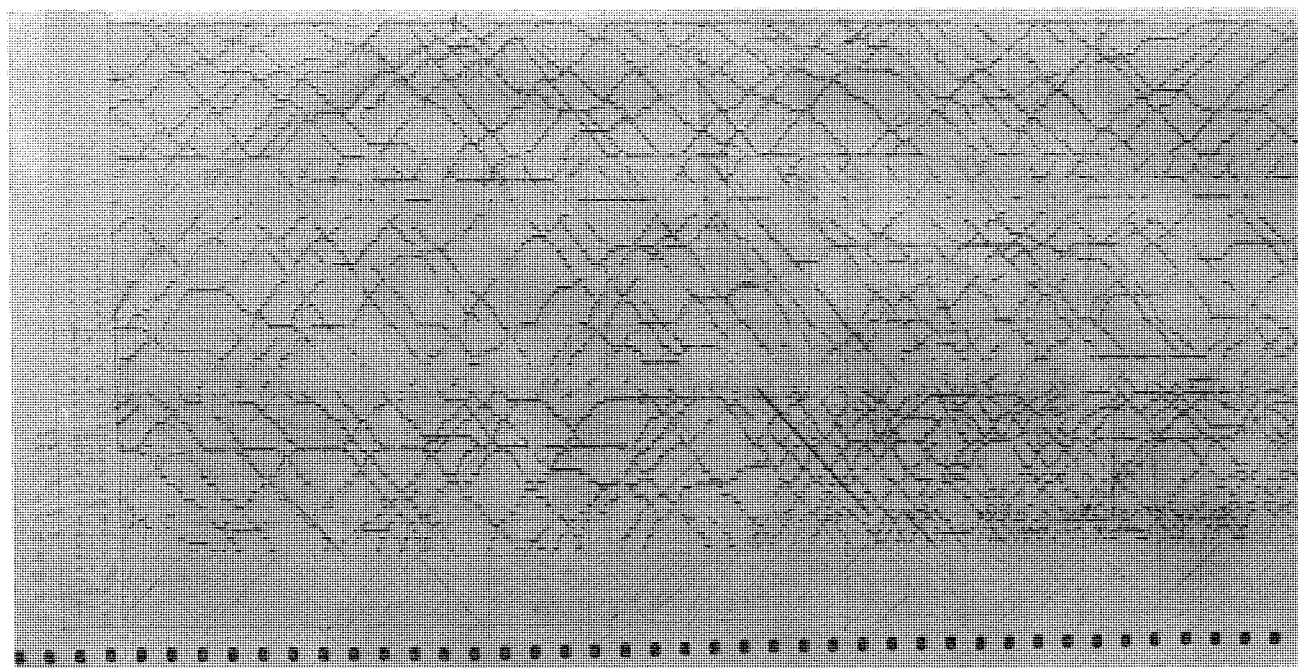


図 4. 5 列車ダイヤ記録紙 Train diagram paper.

## MECL の動作試験のための加減算装置

壺井 芳昭\*・笹尾 勇夫\*

## Adder-Subtractor for Operating Test of MECL

Central Research Laboratory Yoshiaki TSUBOI・Isao SASAO

Recently semiconductor integrated circuits have been drawing attention. In part of digital systems including electronic computers, these circuits are already in practical use. (Before employing the integrated circuits in a system, many problems such as, the way of packaging, the noise in wiring and the characteristics of the integrated circuits in the system should be evaluated.) To this end a simple adder-subtractor using about 150 integrated circuits (MECL) has been built for trial. As a result of test on the device, it has been confirmed that the maximum operating frequency is 4.5 Mc at a standard condition, the switching characteristics of the elements are almost the same as the catalog data even under packaged state, and the noise due to wiring is sufficiently small in comparison with the noise margin. It has been also proved that the packaging density of sufficiently high degree is made available by packaging with two layer printed boards.

## 1. ま え が き

電子回路の窮極の姿といわれている半導体集積回路 (Integrated Circuit 当社でいうモクロン, 以下 IC と呼ぶ) は最近急速に脚光をあびてきており, 電子計算機をはじめとするデジタルシステムなどの一部ではすでに実用化されつつある。IC 化により高速化・高信頼度化・小型化・軽量化・低価格など従来のトランジスタ回路より有利な点が多い。しかし IC 化するためには IC の実装, 布線それにもなる雑音, システムとして組込んだ場合の IC の特性はどうなるかなどいろいろ検討すべき問題がある。

日本電子工業振興協会の半導体集積回路専門委員会の 41 年度の活動<sup>(1)</sup>の一環として Motorola 社 (U. S. A.) の半導体集積回路 MECL の動作試験を行なうため 10 進 3 けたの加減算装置を試作したので装置の概要, IC の実装, 試験結果について報告する。

図 1. 1 にその外観を示す。

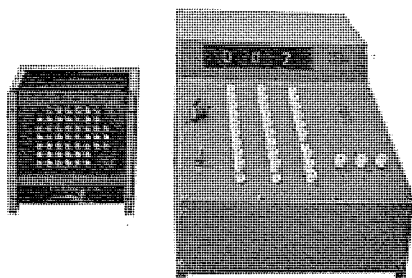


図 1. 1 MECL を用いた加減算装置  
MECL adder.

## 2. MECL

MECL は Motorola Emitter Coupled Logic を略したもので, Motorola 社 (U. S. A.) の電流切換形論理回路 (Current Mode Logic, CML) 素子の総称である。MECL の回路的説明は文献<sup>(2)</sup>あるいはカタログを参照していただくとし, 特長の要約を以下に列挙する。

(1) 回路の各トランジスタがつねに非飽和領域で動作するため高速動作が可能である。(現在市販の IC の内では最高速に属する, 一

ト 1 段当りのおくれ時間約 5 ns)

(2) OR と NOR (あるいは AND と NAND) 出力が同時に得られる。

(3) FAN-OUT が大きく (max 25), FAN-IN も大きい。

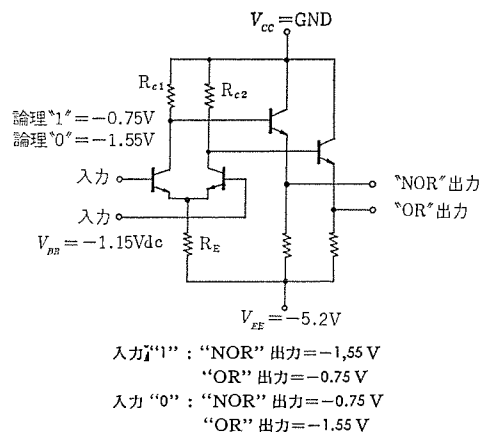
(4) Wired OR (あるいは Wired AND) がとれる。

(5) “1”, “0” のスイッチングにともなう電源電流の変化が小さいので, 電源回路からの雑音に強い。

MECL には MC 301 から MC 312 まで 12 種の異なった機能を持つゲート, フリップフロップなどがある。形状もフラットパッケージ形のもの, トランジスタと類似の TO-5 形の円形ケースにはいったものがある。今回の MECL 加減算装置に使用したのは TO-5 形のもので種類は MC 302 G (R-S Flip Flop), MC 303 G (Half Adder), MC 304 G (Bias Driver), MC 305 G (Expander), MC 306 G (3 入力 OR/NOR), MC 308 G (J-K Flip Flop) の 6 種だけを使用した。

MECL は, 論理電圧レベルの高電位側 ( $-0.75\text{ V}$ ) を, “1”, 低電位側 ( $-1.55\text{ V}$ ) を “0”, としたとき OR/NOR 演算素子となり, “1”, “0” のレベルを逆に選べば AND/NAND 系になる。この報告では, 今後すべて高電位側を “1” とした OR/NOR 系として使用する。

図 2. 1 に MECL の基本回路, 図 2. 2 に外形寸法を示す。



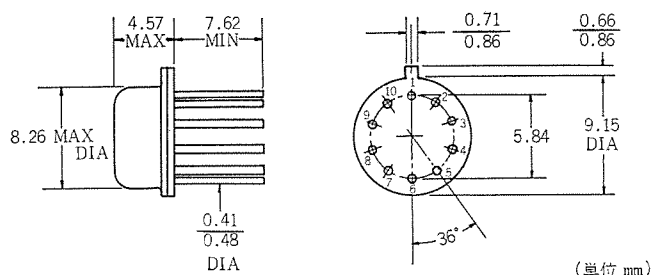


図 2.2 TO-5 パッケージの寸法  
Dimensions of TO-5 package.

### 3. 加減算装置の概要

MECL 加減算装置（以下 MECL Adder と呼ぶ）は半導体集積回路（IC）の実用化動作試験を行なうことを目的としたもので、システム的设计にあたってはつぎのことが考慮されている。

- (1) IC を使用した装置で 1 ユニットであること。
- (2) IC の動特性が検討できること。
- (3) デモンストレーションができること。
- (4) IC の使用個数が 100~150 個であること。

以上を考慮して、図 3.1 に示す 10 進 3 けたの加減算装置が前記専門委員会で決定された。

装置は電源、キーボードおよび表示部などを納めた本体と、約 150 個の IC で構成される演算部から成っている。演算結果を入れるレジスタの内容は 10 進表示管に表示され、これにキーボードで指定された 3 けたの数が加算または減算される。簡単な一種の計算器であり IC を用いた装置の動作状態をデモンストレーションできる。

つぎに図 3.1 に示すブロック図により装置の構成、動作を簡単に説明する。まず、押しボタン + または - を押すことにより制御回路が起動される。制御信号により X レジスタ（フリップフロップで構成）および Y レジスタ（キーボード）の下のかたから順に 1 けた 4 ビットずつの信号が入力ゲートを通じ加算回路に送られる。両者の和または差はフリップフロップで構成される 1 けたの Z レジスタで一時的記憶されたのちふたたび X レジスタの対応するけたにもどされる。3 けた分の演算が終わると制御回路はリセットされて停止する。

各部の動作は高速クロックパルス（最高 4.5 Mc/s）に同期して進行するため、実際に演算が行なわれるのはきわめて短時間（約 1  $\mu$ s）であり、押しボタンを押した瞬間に完了する。オシロスコープで各部の動作波形を観測し、IC の動特性あるいは布線などの誘導によって発生する雑音を調べるのに便利のように演算を 1 回で停止せず、自動

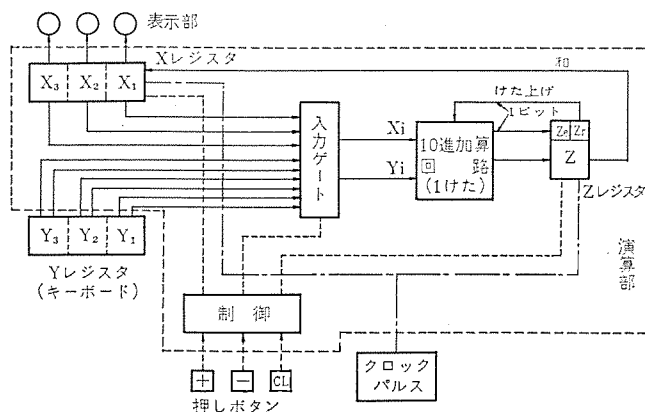


図 3.1 MECL adder のブロック図  
Block diagram of MECL adder.

的に繰返し行なわせることもできる。高速動作する部分は、クロックパルス発振器をのぞきすべて演算部に収容されており、IC だけで構成されている。本体との間は約 1 m のケーブルを通じ接続され演算部だけを恒温そうに入れて、広範囲にわたり温度試験を行なうことができる。

### 4. 素子の実装

プリント基板に IC を実装するにあたっては、全回路をできるだけ同一の単位回路に分解してとう載する方法と論理機能ごとにとう載する方法が考えられる。前者はパターン設計や保守点検などに有利な点があるが反面実装密度が低下し、配線点数が増加するなど不利な点が多い、一方後者では基板当りの実装密度を上げ得ること、基板相互間の配線が少なくなるなどの利点があるが、プリントパターンの種類が多くなりはん用性に欠ける。

IC の実装には、そのほかプリント基板の大きさ、コネクタのピン数などからも制限を受ける。

MECL Adder の演算はおもに MECL 素子（総数 147 個）で構成されており、その目的は MECL 素子の実用化試験とともに実装密度がどの程度まで上げられるものかを調べることも含んでいる。そのためプリント基板の仕様は非常にきびしくしている。

使用コネクタが決められていた（44 ピン）ので、それをもとにして回路の分割法についていろいろ検討した結果、主要演算回路部を信号の流れに対して二つに縦割りにすることとし、プリントパターンは 3 種類に、基板枚数は 4 枚になった。プリント基板 B-D. M と CONT. M とは 1 枚のプリント基板にまとめることが可能であるが、別の目的のため 2 枚に分けた。

#### 4.1 プリントパターンの種類

- (1) FA. M: 入力ゲートから演算回路で演算された結果をレジスタ (X レジスタ) に記憶させるまでの一連の動作をさせる素子を実装する。BCD (2 進法 10 進数) の 1 のビットと 2 のビットを 1 枚に、4 のビットと 8 のビットを 1 枚にまとめる。
- (2) B-D. M: 演算回路で演算された結果は各けたごとと純 2 進数であるので、それを BCD に変換する回路。
- (3) CONT. M: 制御回路

プリント基板の実装密度はパターンの描き方のほかに素子の大きさ、ストリップラインの許容電流、プリント基板の加工技術に左右される。素子の大きさ (TO-5) は決まっており、ストリップラインの許容電流は、使用電流がわずかであるので問題はないとすると実装密度を上げるためには加工技術が問題になる。すなわちスルーホール・ストリップ幅・ストリップ間隔が最小どれくらいまで可能であるかである。4.2 節にプリント基板の仕様を示すが、これらの値は普通のプリント基板の加工技術での限界に近い値である。

#### 4.2 プリント基板の仕様および IC の取付

##### プリント基板の仕様

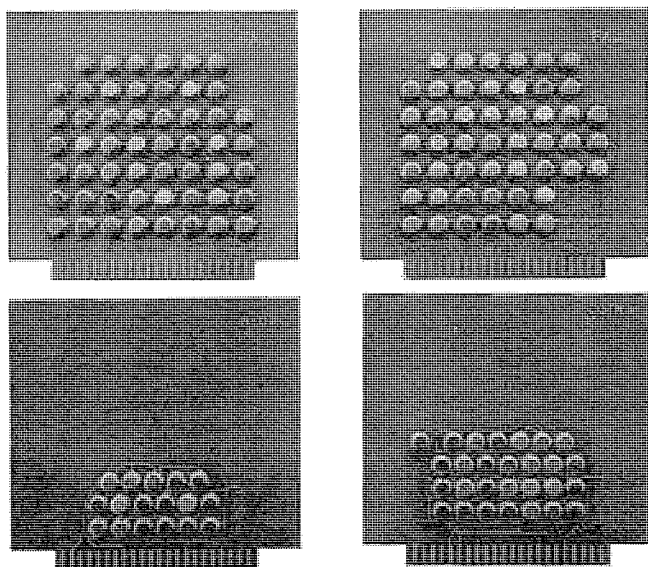
- (1) 1.6 mm ガラスエポキシ材両面板
- (2) 寸法 112×132 mm (接せん(栓)部をのぞく)
- (3) 接せんは 22 ピン両面形 (44 ピン最大)
- (4) ストリップ幅最小 0.25 mm, ストリップ間隔最小 0.3 mm
- (5) スルーホール最小径 0.6 mm

図 4.1 に各プリント基板の完成図を示し、図 4.2 にプリント基板 FA. M のパターンおよび実装素子数を示す。プリント基板 FA. M は、TO-5 ケースの中心間ピッチ 12 mm であり、B-D. M および CONT. M

は 10 mm である。ピッチ 10 mm はほぼ限界実装密度であり、とくに多層プリント基板を使用しなくても両面板により十分高密度に実装できることが実証された。なお素子の足は折り曲げることなくそのまま垂直に取りつけている。

4 枚のプリント基板に実装されている半導体集積回路の種類と個数を以下に示す。

RS Flip Flop (MC 302 G)	14 個
Half Adder (MC 303 G)	12 個
Bias Driver (MC 304 G)	9 個
Gate Expander (MC 305 G)	3 個



右上 FA. M1 : 所要電源 0.37 A, -5.2 V, 消費電力 1.9 W  
左上 FA. M2 : 所要電源 0.41 A, -5.2 V, 消費電力 2.1 W  
右下 CONT. M : 所要電源 0.40 A, -5.2 V, 消費電力 2.1 W  
左下 B-D. M : 所要電源 0.16 A, -5.2 V, 消費電力 0.8 W

図 4.1 プリント板完成図  
Completed printed circuit board.

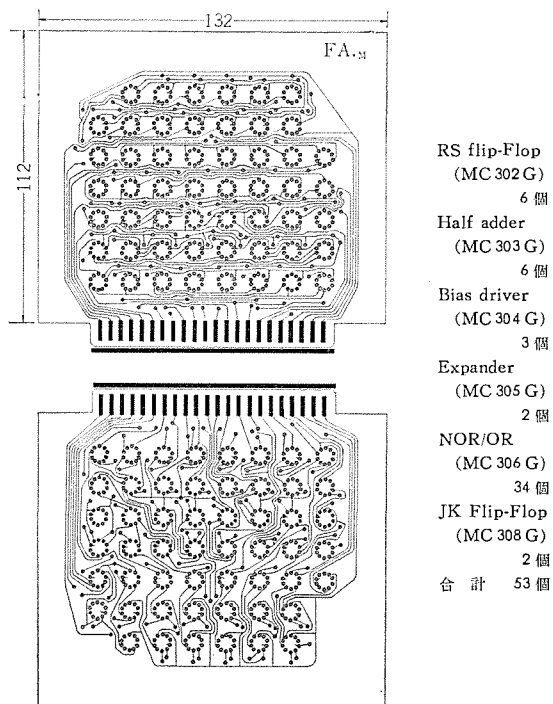


図 4.2 プリント板 FA. M のパターン  
Pattern of printed circuit board FA. M.

3 Input NOR/OR (MC 306 G)	90 個
JK Flip Flop (MC 308 G)	19 個
合計	147 個

この 147 個の IC はトランジスタ 1104 個を含め、合計 2102 個の個別部品に相当し、いかに IC により小形化されているかがわかる。

## 5. クロック発振器

MECL 素子 (MC 356 G NOR/OR 回路) を利用した無安定回路<sup>(3)</sup>および単安定回路<sup>(4)</sup>を組合わせ 2 相クロックパルスを発振する。この出力をラインドライバ (個別部品で構成) で電力増幅し、50  $\Omega$  同軸ケーブルで送り出す。構成を図 5.1 に示す。

クロックパルスの繰返し周期 T, 相 1 のパルス CPI と相 2 のパルス CPII の間隔 (遅れ) Td, および CPI と CPII のパルス幅 TW<sub>1</sub> と TW<sub>2</sub> は、それぞれ独立に変化させることができる。

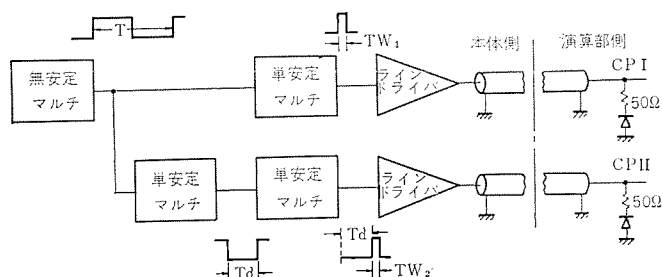


図 5.1 クロックパルス発振器のブロック図  
Block diagram of clock pulse generator.

## 6. MECL Adder の動作特性

### 6.1 最高動作限界

装置が正常動作する限界の最高クロック周波数 ( $f_{max}$ ) は、クロックパルス幅、繰返し周期と入力ゲート、10 進加算回路における最長論理チェーン (OR/NOR 5 段, Half Adder 5 段), コントロールフリップフロップ, 各レジスタのフリップフロップによる遅れの相互関係によって決定される。図 6.1 に限界周波数における関連波形の時間関係を示す。

最高動作限界の測定は、単発モードで行ない 000 に 777 を 10 回加算したのち 10 回減算を行ない、もとの 000 にもどるかどうかで判定した。クロックパルス幅は最小動作限界にセットしておき、繰返し周期を徐々に縮めていって誤動作する寸前の限界を求める。

### 6.2 電源電圧対最高動作限界

電源電圧 ( $V_{EE}$ ) を -4 V から -6 V まで変えた場合の最高動作クロック周波数 ( $f_{max}$ ) および相 2 (CPII) のクロックパルスの最小動作幅の変化に対する測定結果を図 6.2 に示す。 $V_{EE} = -5.2$  V,  $T_a \approx 25^\circ\text{C}$  (標準状態) における  $f_{max}$  は約 4.5 Mc/s であった。

上記測定では、電源電圧の変化にしたがってクロックパルス (CPI, CPII) の振幅も演算部 MECL の振幅と同様に変化するが、CPI のパルス幅 (中央値における) はほぼ一定に保たれている。

### 6.3 周囲温度対最高動作限界

周囲温度を  $-20^\circ\text{C}$  から  $+70^\circ\text{C}$  付近まで変化させた場合の最高動作周波数 ( $f_{max}$ ), および相 2 のクロックパルスに対する最小動作幅の変化を測定した結果を図 6.3 に示す。ただし周囲温度は演算部の箱の外側で測定した値であり、演算部のケースは開いた状態 (図 1.1) で実験した。

$50^\circ\text{C}$  を過ぎると動作周波数が急に下がりはじめ、約  $70^\circ\text{C}$  で動作不良となる。(プリント基板間の温度は周囲温度より約  $15^\circ\text{C}$  高くなって



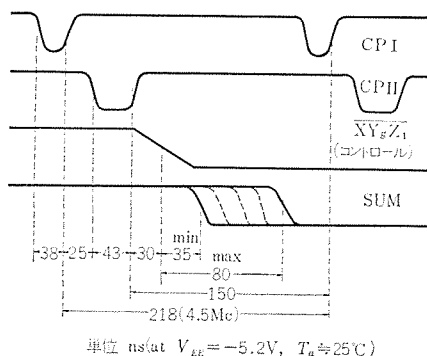


図 6.1 動作限界における各部波形の時間関係  
Signal timing chart at maximum operating frequency.

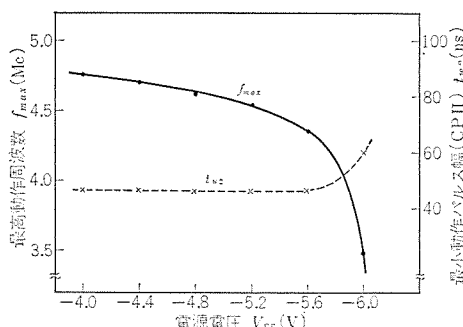


図 6.2 電源電圧特性  
Maximum operating frequency and minimum clock pulse width vs. power supply voltage.

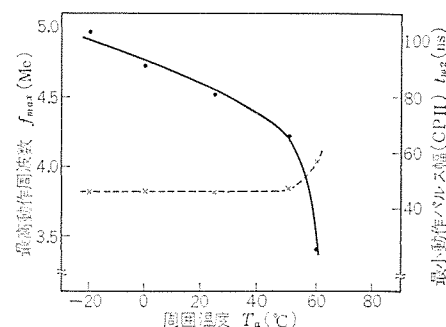


図 6.3 周囲温度特性  
Maximum operating frequency and minimum clock pulse width vs. ambient temperature.

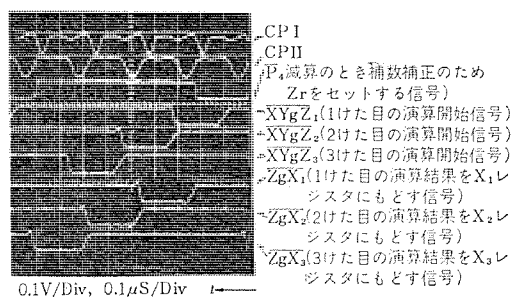


図 6.4 タイミングパルス発生回路の波形  
Waveforms of timing pulse.

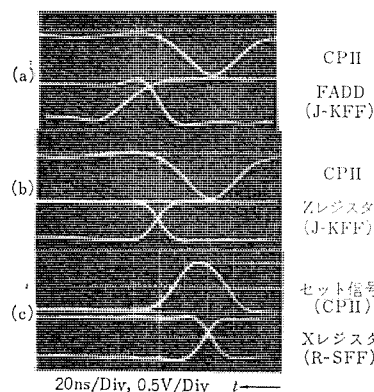


図 6.5 フリップフロップ (J-K, R-S) の応答波形  
Time response of J-K and R-S flip flop.

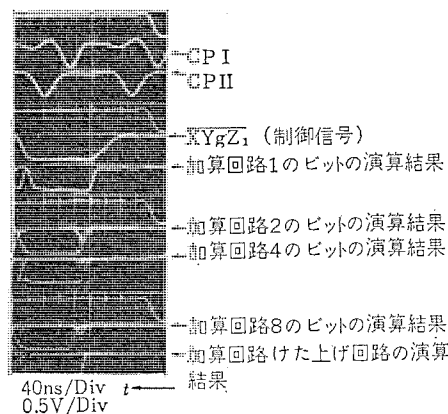


図 6.6 動作限界付近における各部の波形  
Typical waveforms at the maximum operating frequency.

いるので実際には上記温度 +50°C は +65°C に、+70°C は +85°C に相当する。6.6 節参照)

使用素子 (MECL) の使用可能温度範囲のカタログデータは -55°C ~ +125°C であり、高温に対して上記実験結果と相当開きがある。相 2 に対する所要クロックパルス (CP II) 幅も +50°C から大きくなることから、CP II に関するどれか特定の素子の高温特性が悪いため、全体の動作速度を下げているものと考えられる。各部の動作波形を順に調べてみたが残念ながら弱点部は発見できていない。

#### 6.4 各部の波形および素子のスイッチング時間

図 6.4 はタイミング発生回路の各フリップフロップの波形を示す。XYgZ<sub>1</sub> (制御信号) 以下の信号は、負荷が多い (ファンアウト=8~12) ため、とくに立下がり時間の劣化が目立つ。

図 6.5 はクロックパルス (CP II) とフリップフロップのスイッチング時間の関係を示す。(a) は加減算切替用のフリップフロップ FADD の動作波形で、これより負荷の軽い (b) の Z レジスタフリップフロップ Zi に比べ、ターンオフ時間のおくれが大きい。(a), (b) はいずれも J-K フリップフロップ (MC 308 G) であり、クロックパルス (CP II) の後縁でトリガされる。

一方、(c) の X レジスタは R-S フリップフロップ (MC 302 G) と NOR ゲート (MC 306 G) で構成されており、R-S フリップフロップはクロックパルスが NOR ゲートで反転された正のトリガパルスの前縁でトリガされる。

図 6.6 は、限界動作周波数付近において演算を繰返したときのクロックパルス (CPI, CP II) と制御信号、10 進加算回路の各ビットについての時間関係を示したものである。10 進加算回路の出力は演算

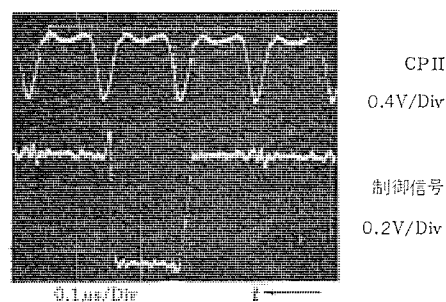


図 6.7 ゲート入口で見た信号と雑音  
Signal and noise at input of gate.

する数によって通過段数が異なるためばらつくのがわかる。

実装後のフリップフロップ、ハーフアダー、NOR ゲートのスイッチング時間 (Tr, Tf, Tpd) を実装前のスイッチング時間 (カタログデータ) と比較すると、なかにはおそくなっている素子もあるが、ほとんどはカタログデータの範囲内 (上限に近い値) にはいっている。なお、スイッチング時間の測定はカタログでの測定方法に比べて条件が悪くなっている。

#### 6.5 雑音

デジタル回路で一つのシステムを構成した場合、布線によりそのシステム内になんらかの雑音が発生する。その発生要素としては、

- (1) 接近した 2 線間の静電容量結合による雑音
- (2) 接近した 2 線間の電磁結合による雑音
- (3) 電流の変化でその線のインピーダンスにより発生する雑音
- (4) 信号が伝ばするときに発生する雑音 (配線路の L, C, R による)

が考えられる。これらの要素による雑音が MECL Adder の実装

後にどれだけ発生しているのかをオシロ波形で示す。

図 6. 7 は、装置の演算部のうちで一番雑音（スパイク状）が多く認められた部分（制御信号の布線）の波形を示す。雑音の最大は 0.05 V<sub>P-O</sub>（オパシュートの部分は約 0.15 V）であり、素子の雑音マージンは約 0.35 V であるので雑音は雑音マージンに比べて十分に小さい。この程度のシステムにおける内部に発生する雑音対策は問題にする必要がない。ただし布線はできるだけ短かく（20 cm 以内）なるように考慮している。

しかし、外部からの十分大きい雑音に対しては影響されることがある。この雑音は電源（AC 100）を介してはいる場合と電磁波としてはいる場合がある。前者に対しては AC 電源（装置のそば）にラインフィルタを入れる。後者に対してはきょう（筐）体、ケーブルを十分にシールドすることにより、ほぼ完全に取除くことができる。

## 6. 6 温度上昇

演算部は図 1. 1（左）に示すように 147 個の MECL 素子を 4 枚のプリント基板に実装している。プリント基板の間隔は 15 mm で、かなり密接しているため、プリント基板の間隔き部の温度は外周温度より 10°C 以上高くなる。

図 6. 9 に、プリント基板の間で温度上昇の一番大きかった部分（FA<sub>1</sub>M<sub>1</sub> と FA<sub>2</sub>M<sub>2</sub> の間）の温度上昇の様子を示す。実線は演算部の箱（鉄製）を密べいた状態で測定した結果を示し、点線は箱のふたをはずした状態（図 1. 1 の状態で箱の約半分が露出する）での値を示す。箱の外周気温度は +25°C 一定に保っている。

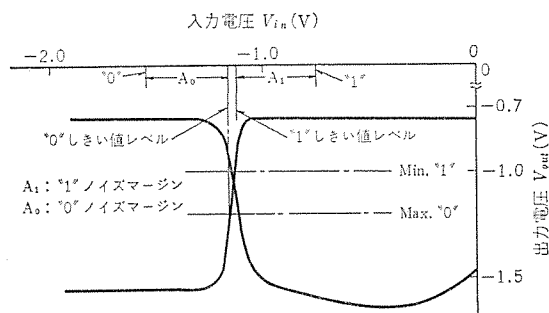


図 6. 8 MECL の雑音マージン  
Noise margin of MECL.

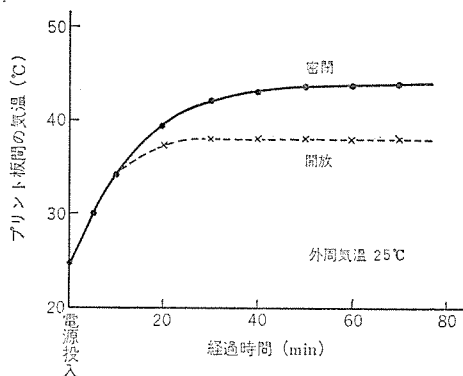


図 6. 9 演算部内の温度上昇  
Temperature elevation vs. time in arithmetic unit.

演算部の消費電力は、図 4. 1 に示したように、合計約 7 W である。

## 6. 7 その他

コネクタとしては、プリント基板のストリッパをそのまま接触片とするもので片面に 22 ピンずつ、両面で合計 44 ピンのものを用いたが、実験中にしばしば接触不良をおこした。IC の実装（とくにプリント基板への）にあたっては、信号電圧が低いこと、小形で多極のものが必要とされることから、今後 IC に適したコネクタの出現が望まれる。

## 7. む す び

MECL 素子で構成された 10 進 3 けたの加算装置について、その回路構成、動作特性、IC の実装などについて述べた。

これらを総括すると、試作装置について、つぎのことがいえる。

- (1) 最高動作周波数は 4.5 Mc/s ( $V_{EE} = -5.2$  V,  $T_a = 25^\circ\text{C}$ )
- (2) 素子のスイッチング速度は実装状態でもカタログデータと大差ない。
- (3) 布線による雑音は雑音マージンに比べて十分に小さい。
- (4) 周囲温度  $-20^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$  の範囲では正常に動作しており、低温になるほど速度が早い。この装置に使った素子の使用温度範囲は  $-55^\circ\text{C} \sim +125^\circ\text{C}$  であるが、これより狭い範囲の素子を使う場合などには、周囲温度の上限がさらに低くなるので十分に放熱などの熱対策を考える必要がある。
- (5) 電源電圧は  $-4$  V  $\sim$   $-6$  V の範囲で安定に動作する。電源電圧が高くなれば動作速度はおそくなる。
- (6) 両面形のプリント基板用コネクタは接触不良を起こしやすい。
- (7) 素子の実装は両面プリント基板で十分高密度に実装できることが実証された。（TO-5 形ケースの IC 53 個を中心間ピッチ 12 mm で実装）

この実験は IC の使用個数は 147 個と少ないが、大きなシステム（たとえば電子計算機など）の IC 化のための一つの段階としての実験であり、さらに多量（1,000  $\sim$  2,000 個程度）の IC を使ったシステムの検討が必要であろう。

終わりに、この装置の試作および実験結果に対し、種々ご検討いただいた日本電子工業振興協会半導体集積回路専門委員会の各位にお礼申し上げる。

## 参 考 文 献

- (1) 日本電子工業振興協会：超小形電子回路の解析結果（昭 41）
- (2) K. E. Lampatlaakis : New Ultra High Speed Integrated Logic Circuit, Proc. of the Pacific Computer Conf (1963)
- (3) 壺井, 松原 : 電流切換形論理回路 (CML) を用いた無安定マルチバイブレータ, 電通学会, No. 593 (昭 40)
- (4) 壺井, 松原 : エミッタ結合形単安定マルチバイブレータのパルス幅安定化の一方式, 電通学会, No. 627 (昭 40)

## 中性子による重油発熱量の自動測定

宮下 恭一\*・高田 守\*・小田 稔\*・山本 健二\*

## Automatic Calorimetry of Heavy Oil by Neutron Measurement

Central Research Laboratory Kyôichi MIYASHITA・Mamoru TAKADA・Minoru ODA・Kenji YAMAMOTO

The thermal value of heavy oil can be automatically analyzed by making use of neutrons. In the old practice the thermal value was measured by direct combustion of heavy oil through the adiabatic bomb method. But in the new method the measurement is possible with no contact with the heavy oil; the result is available quickly; continuous automatic measurement is feasible, and there is no personal difference. The device was attached to a receiving pipe line of a thermal power plant and the measurement was carried on through one year. For heavy oil brought by 66 tankers, the results of measurement have been compared with those obtained by the conventional method to find statistical deviation of only 15.6 kcal/kg. This proves that the new method is good enough for the purposes.

## 1. ま え が き

石炭に比べ、石油を燃料として使用する火力発電所は、石油が流体であるために自動化が考えやすい。しかるに高度に合理化された重油火力発電所においても、燃料分析だけはいまだに人手にたよっているのが現状である。熱源としての石油の発熱量は、発電所の熱効率を介して、直接、発電コストに影響をもつ重要な量であるので、発電所では石油の購入から燃焼にいたるまでの過程で、これの分析に大きな努力を払っている。石油を熱源として大量に使用する工業分野では、いずれも事情は同様であろうが、その最大の消費者である火力発電所が、これの精密な測定に関心が深いのは当然であろう。

石油の発熱量を測定するのに、従来は断熱ボンブ式法、すなわち、石油を燃焼させてその発生熱量から測定する直接法によって分析されてきた。今ここに述べようとする方法は、これに反し、間接法ではあるが、

- (1) 石油を直接とり出さずに無接触で測れること。
- (2) 測定結果が迅速に得られ、連続自動測定も可能であること。
- (3) 人手を節約でき、また測定者の個人差がないこと。

などの特長をもっている。

われわれは関西電力(株)火力部、大阪・兵庫各火力事務所、技術研究所、各火力発電所との5年にわたる協同研究により、この方法を実地の火力発電所において実施し、JIS 3種2号重油(C重油)について連続自動測定が可能であることをたしかめ、また、A・B重油についても結果が拡張できることをたしかめた。ただし、より軽成分および原油については、まだ予備検討中である。したがって、以下には主として重油について述べることにする。なお、密度、ボンブ法による発熱量の測定はすべて関西電力(株)によって行なわれた。

## 2. 発熱量分析の現状

重油は、表2.1に示すようにその品質をJISで規定されているものの、組成その他については決して簡単なものではない。その発熱量については、3種2号(C重油)の実測によると、大略10,200~10,500 kcal/kgにわたって分布しており、密度も0.93~1.00にわたっている。そもそも重油は、原油から分子量の大ざっぱな相異を

表 2.1 重油の JIS (JIS K 2205-1960  
JIS for heavy oil.

種 類	水 分 (vol %)	灰 分 (wt %)	硫 黄 (wt %)	おもな用途
3種1号	0.5 以下	0.1 以下	1.5 以下	鉄鋼用
3種2号	0.5 以下	0.1 以下	3.5 以下	大形ボイラ、大形内燃機関用 (C重油)
3種3号	0.6 以下	0.1 以下	1.5 以下	鉄鋼用
3種4号	2.0 以下			一般用

利用して分留により、軽質留分を分離した残りのものであるから、比較的分子量の大きい炭化水素を主成分とする複雑な混合体であるのみならず、原油の産地によっても成分を異にしている。市販の重油にいたっては、さらにこれらの産地から買った重油の混合物であることが多く、その混合比などは一般に不明である。しかし、炭素、水素以外の不純物は、いおうを除いては比較的少なく、わずかに存在するのは金属の酸化物で、その総量はたかだか0.3%をこえないとされている。

重油の発熱量の測定は普通 JIS に規定されている断熱式ボンブ法で行なわれている。これは要するに一定質量の重油を断熱容器内で燃焼させて発熱量を測定するのであって、発熱量が直接測定できる利点があるが、方法の性質上、測定操作およびその準備に時間がかかり、また個人差や装置による差が生ずるという二つの欠点をもっている。

おもな成分元素の分析(たとえばC, H, O, S, N, H<sub>2</sub>O)から発熱量を求める試みもあるが、元素分析の精度がそれほどよくないために必ずしも十分な結果は得られていないようである。さきに述べたように重油が単一の炭化水素でないで、これを比重、いおう分、動粘度などの多項式として実験式をみちびこうとする研究もなされている。また、これを簡略化して、比重と発熱量との間に一次関係を仮定し、比重のみからこれを推定することも現実に行なわれているようである。しかし、こうした方法で期待できる精度はせいぜい±150 kcal/kg程度といわれ、精度としては不十分である。

## 3. 中性子による発熱量測定の可能性

重油の主成分が炭素と水素であり、また発熱量の主要部分が炭素

と水素の酸化によっていることが、この方法のささえとなっている。

さて速中性子は水素などの軽い原子を含んだ媒質中で弾性衝突のためにその運動エネルギーを失なって減速する。中性子の一衝突あたりのエネルギーの対数値の平均の減り方を示す量と衝突の確率を示す量との積を吸収の確率を示す量で除した量を減速率とよぶが、これは媒質の中性子に対する減速能力を示すものである。炭素も水素も固体・液体という状態においては、大きな減速率をもつ代表的な物質であるから、炭素と水素からなる石油はすぐれた減速材料であるといえる。この際重油中の不純物の中に、中性子に対して著しく大きい吸収断面積をもつ物質が含まれていないことが、幸運な事情となっている。

このような減速材料中に、強度が時間的に不変な速中性子源をおくと、中性子は減速されて熱中性子になり、拡散するとともに、吸収されてゆき、中性子の発生と消滅とをつらねる一つの定常状態に達する。この定常状態における任意エネルギーでの中性子束の空間分布は、減速に対する適当な仮定をおいたモデルにもとづき計算することができる。この結果は速中性子源の位置を原点としたガウス分布になることがわかる。また重油の場合、この減速は炭素原子核と水素原子核のうち、水素原子核による効果が主要なものであることがわかる。したがって中性子源の付近で熱中性子束を測定すれば、この減速材である重油の減速率も最も効率よく測定することができる。ひいては単一体積中の水素原子核の密度を測定することができる。(こういう事情から、中性子の減速を利用して土壌中の水分を測定する中性子水分計がすでに実用化されている。)したがって、これを密度で除すことにより、重量当たりの水素原子密度がわかる。さらに、石油中の水素と炭素の重量比は約1対6とみてよいから、上記は近似的に水素原子数対炭素原子数をあらわしているとみてもよい。

炭素の発熱量は8,100 kcal/kg、水素は34,000 kcal/kgであり、重油においては水素を定量すれば十分な精度で発熱量が推定できる可能性があるという指摘は渡辺氏<sup>(1)(2)</sup>によってなされた。そこでは、石油を容器へ汲み込み、検出器と中性子源をその中央へそう入し、減速された中性子数を計数する方法でこのことを確かめ、ポンプ法と同等の精度が得られたと報告されている。

しかし、われわれは、水素の定量から発熱量がわかるのは少し異なった理由からであろうと考えている。

その理由づけについては紙面の関係で別の機会に譲るが、結論を述べれば、水素量から少なくとも近似的にでも発熱量が決定されるのは、これが石油炭化水素中の不飽和炭化水素や芳香族炭化水素の割合を示しているためであって、そのような混合炭化水素は、その不飽和分だけ、飽和炭化水素に比べてエネルギー的に低く、したがって発熱量が低いのであると考えるのである。実際、天然原油中には、芳香族や不飽和炭化水素は比較的少ないものの、これが分留・接触改質・接触分解の過程で増大し、最後の留分である重油中にはかなり大きい割合で存在すると考えてよさそうである。このことは重油の比重・粘性・発熱量・炭素水素比からもある程度推定がつくようである。

#### 4. 汲み込み法による実験

渡辺氏らが実施した方法を、仮りに汲み込み法と呼ぼう。われわれもまず最初はこの方法で、中性子計数と発熱量の間の相関について追試を行なった。われわれの場合は、無限大と考えられる十分大

きい容器で実施した。それは、密度に対する依存性を少なくすることと、容器寸法など本質的でない誤差をさけ、精密な測定を望んだからである。

装置は以下のとおりである。試料容器は図4.1に示すように直径400 mm、高さ550 mmの円筒形で、これに深さ460 mmまで重油をみたした。中央に内径38 mmのアルミニウム円筒をもうけ、これを位置の再現性よく固定できる構造とした。熱中性子の検出器にはBF<sub>3</sub>計数管(三菱ND-8122-E)を用いた。仕様はのちに述べるND-8534-60と大差ない。検出器の側壁にR<sub>a</sub>-Be中性子源5 m Ciを装着した。検出器からの信号は、図4.2のような普通の回路構成で計数された。計数回路の時間分解能は1 μsecである。

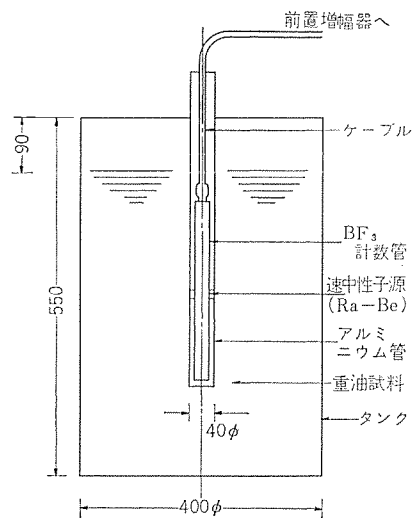


図 4.1 汲み込み法の実験装置  
Experimental apparatus for "scoop" method.

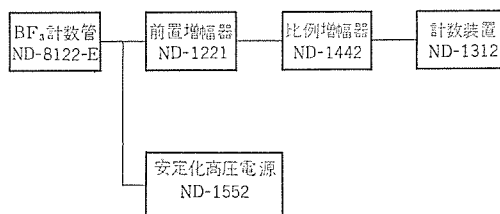


図 4.2 汲み込み法の回路構成  
Block diagram for "scoop" method experiment.

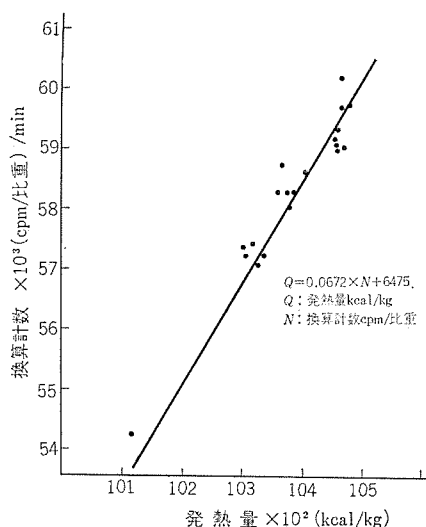


図 4.3 汲み込み法の測定結果  
Results of "scoop" method experiment.

試料となる重油は、なるべく異なった石油会社の製品から、比重や保証発熱量の異なるものを18例えらんだ。結果を図4.3に示す。測定時の各試料温度はただか1.5°Cしか相異がなかったで、密度の温度補正はしなかった。計数は1分間計数10回の平均値であり、統計偏差は0.14%である。密度の測定は浮きばかりによる。発熱量はポンプ法によったものである。発熱量は単位重量当たりで示されるのが普通であるので、これに対応する計数値として密度で除した換算計数を用いた。もし試料容器の半径方向への中性子の漏れがかなりあれば、容器の周囲におかれた物体からの中性子の反射が無視できないことになるが、直径を400mmもとっておけばそのようなことはないことが確められた。しかし液面の高さの変化は計数率に変化をおよぼす。実測によれば10mm当たり0.2%程度である。したがって液面はできる限り一定にした。検量曲線のまわりにおける標準偏差は約20 kcal/kgであるから50 kcal/kgの範囲にはいる確率は約99%である。

結果にみるように、われわれの得た結果も渡辺氏らとほぼ同様の精度で発熱量が測れることを示している。

## 5. 連続自動測定

### 5.1 連続自動測定の問題点

言うまでもなく、中性子減速を利用するこの方法の最大の効果は、連続自動測定において発揮される。重油試料の採取をすることなく、パイプラインを流れているときに、そのまま分析してしまおうというのが、当初からのわれわれの目標であった。

パイプラインの途中に検出器と線源を設置する。計測器は現場から離れた測定室に設置し、その間をケーブルでつなぐ。計測値は何らかの形で連続記録がなされるようにする。すなわち、連続自動測定といえども、原理上は、さきの汲み込み実験と何ら異なるところはない。

しかし、実際は、このために解決されねばならぬ技術上の問題は多かった。われわれの努力のほとんどは、この点に費やされたといえてよい。おもな問題点を以下に列挙してみよう。まず、計測器が電氣的雑音に十分強いこと、また検出部が機械的振動から防護されていることが必要である。次に温度の条件、すなわち、パイプを流れる重油は最大60°C位にまで加熱されていることがあり、他方設置場所が野外であるので0°C以下になることもある。検出部はこれに耐えて破損しないことはもちろん、特性の変化があってはならない。のちに述べるように、計数値としてはかなり高い精度が要求されるので、この特性の変化に対する要求はきびしいものになる。しかも、実用機としては、数年間にわたり校正などの必要がないことがたいせつである。また、放射性同位元素や放射線計測技術について知識のない人にでも、測定の操作だけは行なえるものでなくてはならない。

### 5.2 装置の構成

装置は、野外のパイプラインの所に設置される検出部と、建屋内の測定室におかれる計測器部に分かれる。その回路ブロック図を図5.1に示す。

検出器としては汲み込み実験と同様、BF<sub>3</sub>計数管(三菱ND-8534-60)1本を使用した。この計数管はさきのものとほぼ同型だが改良型である。要目を表5.1に示す。中性子源にはRa-Be 10 mCiを使用し、計数管にこれを固定した。(最近Am-Beが入手できるようになった。その場合50 mCi程度使用すれば同等の結果がえられるはずである。しかも放射線しゃへいははるかに容易になる。詳細は後述する。)

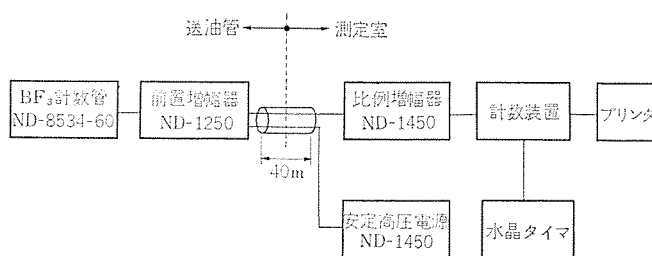


図 5.1 連続自動測定 の 回路構成  
Block diagram for automatic measurement.

表 5.1 使用された BF<sub>3</sub> 計数管の仕様  
Specification of BF<sub>3</sub> tube.

形 名		ND-8534-60
寸 法	最大 外 径 (mm)	25
	最大 長 さ (mm)	348
	有 効 長 さ (mm)	235
コ ネ ク タ		UG-59 B/U (HN 型) に合致
重 量 (g)		160
材 料	外 筒 (陰 極)	アルミニウム (JIS A1T3-0)
	陽 極	タングステン
	絶 縁 物	アルミナセラムミックおよびポリスチロール
	充 て ん ガ ス	BF <sub>3</sub> (96% 濃縮)
ガ ス 圧 (mmHg)		600
最大 印 加 電 圧 (V)		3,200
動 作 特 性	動 作 電 圧 (V)	2,200
	プ ラ ト ー 幅 (V)	300 以上
	プ ラ ト ー 傾 斜 (%/V)	0.02 以下

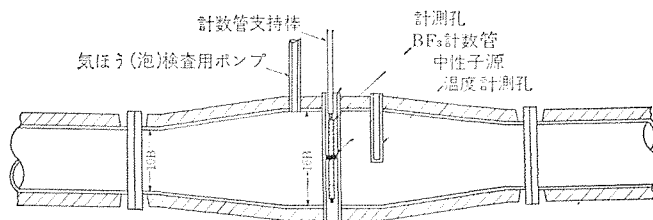


図 5.2 検出部 の 構造  
Structure of detector and its neighbourhood.

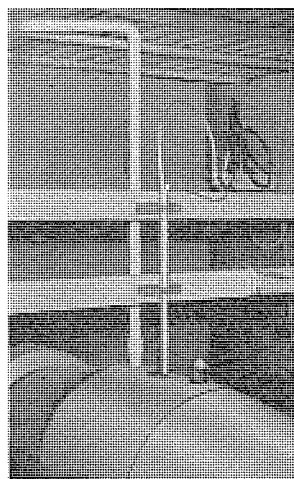


図 5.3 検出部建屋内部  
Interior of detector house.

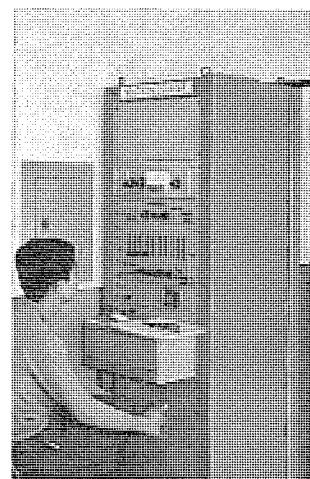


図 5.4 連続自動測定の実験装置  
Instrument for automatic measurement.

細は後述する。)

計数管取付部の構造を図5.2, 5.3に示す。10 Bのパイプをこの部分だけ16 Bに拡大し、これに垂直に計測用貫通孔をもうけた。計数管および線源はこの貫通孔中央に、別にもうけた防震台からつり下げられる。パイプの拡大は必ずしも必要ではないが、汲み込み実験と同様の理由で、この実験では採用した。密度の温度補正を行な



表 5.2 連続自動測定の結果  
Results of automatic measurement.

試料番号	日付	計数 (C/100 sec)	比重 (15/4°C)	平均油温 (°C)	油温換算密度 ( $\rho_{4/4}^{\circ}\text{C}$ )	換算計数 (C/100 sec)	発熱量 (kcal/kg)	いおう分 (Wt %)	水分含有率 (%)
1	9/11	119,503	0.945	30.9	0.9292	128,609	10,430	2.61	0.0
2	21	119,780	0.944	32.8	0.9330	128,381	10,410	2.34	0.1
3	24	119,717	0.937	38.5	0.9220	129,845	10,450	2.49	0.0
4	30	119,006	0.953	46.1	0.9335	127,484	10,380	2.73	0.0
5	10/15	120,539	0.949	23.0	0.9440	127,690	10,390	2.26	0.1
6	18	120,542	0.936	36.0	0.9225	130,668	10,460	2.39	0.1
7	19	119,503	0.936	36.5	0.9225	129,545	10,440	2.43	0.0
8	20	119,224	0.946	47.2	0.9260	123,751	10,430	2.62	0.0
9	25	119,108	0.938	52.7	0.9145	130,244	10,470	2.38	0.0
10	25	119,380	0.938	39.8	0.9222	129,939	10,470	2.35	0.0
11	26	119,539	0.938	45.7	0.9188	130,103	10,470	2.32	0.0
12	27	120,097	0.942	30.3	0.9322	128,832	10,440	2.47	0.0
13	29	119,315	0.952	42.1	0.9350	127,610	10,390	2.78	0.0
14	29	118,998	0.927	40.7	0.9110	130,623	10,450	2.90	0.0
15	11/12	119,941	0.951	40.7	0.9350	128,279	10,390	2.72	0.0
16	13	120,211	0.946	27.0	0.9385	128,083	10,390	2.30	0.0
17	16	120,332	0.948	23.7	0.9425	127,673	10,420	2.32	0.0
18	22	120,133	0.950	28.0	0.9420	127,530	10,380	2.71	0.0
19	24	120,145	0.952	30.5	0.9420	127,542	10,370	2.80	0.0
20	25	119,992	0.945	34.1	0.9330	123,610	10,430	2.46	0.0
21	25	119,521	0.943	35.3	0.9300	128,517	10,420	2.34	0.0
22	26	119,780	0.949	37.8	0.9345	128,175	10,410	2.60	0.0
23	12/11	119,364	0.950	41.1	0.9330	127,853	10,400	2.43	0.0
24	16	120,726	0.949	30.8	0.9390	128,569	10,430	2.35	0.0
25	25	119,892	0.950	34.3	0.9378	127,844	10,430	2.62	0.0
26	27	119,526	0.950	38.9	0.9350	127,835	10,400	2.62	0.0
27	1/18	120,182	0.922	20.2	0.9287	129,400	10,430	2.78	0.0
28	19	119,988	0.922	25.1	0.9256	129,623	10,440	2.76	0.0
29	21	120,202	0.943	29.9	0.9335	128,765	10,400	2.25	0.0
30	24	120,110	0.953	33.4	0.9413	127,610	10,390	2.21	0.0
31	24	120,965	0.943	17.0	0.9417	128,454	10,420	2.26	0.0
32	27	119,247	0.949	30.5	0.9220	127,824	10,390	2.32	0.0
33	2/22	120,149	0.947	28.1	0.9388	127,081	10,420	2.47	0.0
34	23	119,628	0.942	48.8	0.9207	129,932	10,460	2.67	0.0
35	25	120,011	0.951	23.7	0.9455	126,929	10,380	2.86	0.0
36	25	120,248	0.951	27.9	0.9428	127,543	10,400	2.72	0.0
37	26	119,164	0.949	45.1	0.9301	128,120	10,400	2.30	0.0
38	28	119,630	0.953	33.2	0.9415	127,063	10,420	2.79	0.0
39	3/24	119,984	0.953	37.3	0.9389	127,792	10,410	2.64	0.0
40	25	119,758	0.941	21.8	0.9367	127,851	10,400	2.71	0.0
41	26	119,329	0.956	23.4	0.9506	126,152	10,360	2.60	0.0
42	28	120,029	0.946	25.3	0.9395	127,758	10,400	2.24	0.0
43	30	119,902	0.944	43.2	0.9263	129,442	10,440	2.50	0.0
44	4/20	120,427	0.943	25.3	0.9365	128,593	10,440	2.24	0.0
45	27	120,340	0.943	23.7	0.9343	128,802	10,430	2.25	0.0
46	28	119,800	0.955	31.1	0.9448	126,799	10,350	2.65	0.0
47	5/21	120,423	0.944	27.8	0.9360	128,657	10,430	2.22	0.0
48	21	120,134	0.945	34.9	0.9325	128,830	10,430	2.40	0.0
49	25	120,132	0.946	27.8	0.9380	128,072	10,430	2.23	0.0
50	26	120,151	0.944	28.5	0.9354	128,449	10,420	2.30	0.0
51	27	120,172	0.941	24.0	0.9353	128,485	10,430	2.32	0.0
52	30	120,297	0.949	32.6	0.9376	128,276	10,400	2.22	0.0
53	6/13	120,216	0.944	26.0	0.9370	128,289	10,400	2.26	0.0
54	14	119,358	0.953	40.9	0.9365	127,451	10,400	2.66	0.0
55	16	120,087	0.942	34.6	0.9296	129,181	10,430	2.35	0.0
56	18	120,280	0.944	27.4	0.9362	128,477	10,420	2.26	0.0
57	20	120,574	0.944	35.1	0.9313	129,468	10,400	2.66	0.0
58	23	119,831	0.946	47.8	0.9254	129,491	10,410	2.43	0.0
59	24	119,881	0.945	40.9	0.9287	129,084	10,410	2.68	0.0
60	27	120,087	0.953	38.1	0.9384	127,970	10,370	2.66	0.0
61	7/13	120,488	0.954	29.4	0.9448	127,528	10,370	2.12	0.0
62	14	120,658	0.945	28.4	0.9364	128,853	10,430	2.38	0.0
63	16	120,266	0.946	40.0	0.9292	129,430	10,420	2.05	0.0
64	18	120,737	0.943	34.3	0.9308	129,713	10,460	2.54	0.0
65	19	120,222	0.944	30.2	0.9344	128,662	10,460	2.40	0.0
66	20	121,103	0.945	30.1	0.9355	129,453	10,430	2.41	0.0

うための油温を測定する計測孔、気泡の発生をたしかめるバルブもこの付近にもうけた。なお気泡は実際は問題になるほど発生しないことが確かめられた。信号は計数管近傍におかれた前置増幅器を経て、同軸ケーブルで測定室へ送られる。さらに増幅器・波高選別器を経て、計数装置で計数され、記録される。

このような計測系はすべてトランジスタ回路をもって小型に構成した(図 5. 4)。この実験では検出部を重油受入れラインに設置したため、測定はタンカーからの揚油中のみ行なった。1,000 t ぐらいのタンカー 1 台分の揚油に数時間かかるが、その間 100 Sec. ごとの計数が自動的に繰返されるようになっている。操作者はメインスイッチを投入しさえすればよく、結果はプリントされた用紙を持ち帰るだけでよい。

### 5. 3 計数の所要精度

最終的に得られる発熱量値の所要精度を、標準偏差 20 kcal/kg 以内におさめようとするれば、相対標準偏差 0.2 % 以内、中性子計数の標準偏差は 0.5 % 以内におさめる必要がある。またその他の系のドリフトや系統誤差も、これ以下におさめる必要がある。

中性子計数の標準偏差を 0.5 % 以内におさめるには、計数率計より計数装置によるのがよく、 $10^5$  カウント程度の計数をすればよい。われわれの線源強度と検出器配置では、100 Sec. 当たり約  $1.2 \times 10^5$  カウントが得られるから、これで十分である。しかも 100 Sec. の測定を繰返すことができるから、必要とあれば、線源強度をもっと下げることが可能である。

計数率のドリフトに対しては、BF<sub>3</sub> 計数管はきわめてすぐれた検出器である<sup>(3)</sup>。ラトロー実測 0.01 %/V 以内、という値から推定できるように、増幅器の利得変動や、高圧電源の変動に対して、十分な安定性をもっている。ただし、あとでわかったことであるが、これは温度一定の条件下でのことであり、温度係数が重要な問題点であることが見出された。この点については別に述べる。

計数装置により計数率を求めるには、正確な時間が必要である。交流周波数を基準とした時間計は、ある負荷変動時、たとえば正午前後や夕方に、数 % の 10 分の 1 ぐらいの変動をうけることがある。今の場合、この変動は無視できない要素であるので、われわれは時間計の基準信号として水晶タイマを用いた。これはまた音叉発振器でもよい。

### 5. 4 温度係数

この実験の過程で最大の問題となったのは、BF<sub>3</sub> 計数管の温度係数であった。良好なパルス波高分布をもつ計数管では、常温から 60°C 付近までの範囲で、波高分布のひずみは観測されず、したがって原理的に計数率に温度係数というものは考えられない。しかるに、実際、連続測定実験をやってみると、さきの汲み込み実験のときに認められなかった不安定性が現われ、くわしい検討の結果、これが温度係数であることが判明した。詳細は別に記した<sup>(4)</sup>のでそれにゆずるが、けっきょくそれは計数管の端末に原因があることがわかった。当初の実験では、計数管に温度制御をほどこすことでこれを避けていたが、この実験では、計数管の両端部に中性子しゃへいをほどこすことで、温度制御の要がなくなった。なお現在では、この点をさらに改良し、温度係数のない計数管が完成している。

### 5. 5 実験結果

結果を表 5. 2 にまとめた。タンカー 1 船分が測定点 1 点に相当する。さきに述べたように、1 船分は 100 回前後の 100 Sec. 測定、すなわち、約  $10^4$  Sec. の計数からなっている。船の容量によりこの回数は

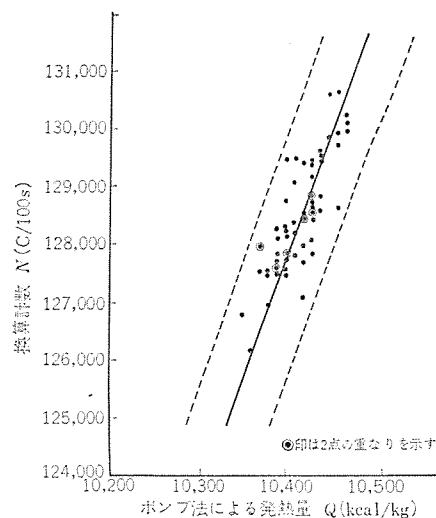


図 5. 5 連続自動測定の結果  
Results of automatic measurement.

かなり異なるが、表中の計数値はこれの平均である。したがって、この標準偏差は、表の計数値より計算されるものよりはるかに小さく、最も大きいものでも 0.1 % をこえない。

統計的に意味のある相関曲線を求めようとするれば、非常に長時間かかることは容易に推察していただければよい。この場合 66 船の測定に約 1 年かかった。燃料事情のため C 重油の受入れがとぎれたり、発電所の定期検査で中断されたりしたためもある。期間中には高温多湿の夏あり、台風と高潮の秋あり、寒冷の冬ありで、はからずして環境テストと長期間のドリフトテストを兼ねたことになった。なお、本期間中装置の校正や調整はまったく行なわなかった。1 年間の使用後、解体して計数管のパルス波高分布を調べたが、使用開始時と有意な変化は認められなかった。これから推定すれば、本装置はこのままで少なくとも数年間の使用に対して問題はないと思われる。

さて、表の結果を検量曲線にしたのが図 5. 5 である。受入れした重油の発熱量は、すべて 10,350 kcal/kg から 10,470 kcal/kg の間にはいており、当初計画したような、低発熱量と高発熱量の重油の測定を行なうことはできなかった。けっきょく、最小二乗法で求めた一次の検量式は次のようになった。

$$Q(\text{kcal/kg}) = 0.02149 N + 7656$$

$N$  は換算計数で、100 Sec. あたりの中性子計数をそのときの密度の一乗で割ったものである。密度は浮きばかりによって測定し、中性子測定時の油温における密度に換算した。相関係数は 78.8 %、検量曲線のまわりの標準偏差は 15.6 kcal/kg となった。相関係数が悪いようにみえるが、これは初めに述べたように、測定した重油の発熱量分布が非常にせまいためであって、この測定の信頼性が悪いということではない。この点は別に後述する。標準偏差の値はきわめて良好と言ってよからう。すなわち、この結果、ポンプ法による発熱量との差が 31 kcal/kg にはいる確率は 95.5 %、47 kcal/kg にはいる確率は 99.7 % となり、実際に JIS の許容差  $\pm 50$  kcal/kg (図 5. 5 点線) をこえたものは 1 件も認められていない。ポンプ法による測定値自身に  $\pm 20$  kcal/kg 程度の誤差があることを考えると、この測定結果は満足すべきであろう。

### 5. 6 放射線の障害防止

さきに述べたように、中性子源には Ra-Be 10 mCi を用いた。この線源からは速中性子のほかに、ガンマ線が放出されている。障害

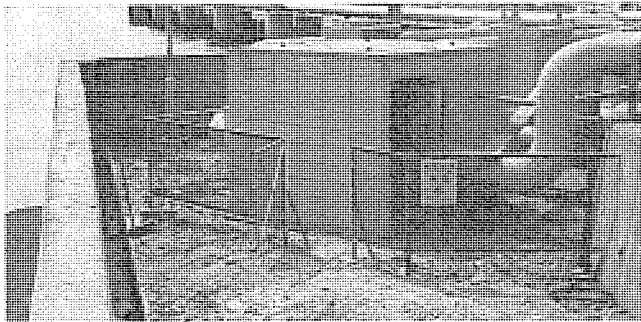


図 5.6 検出部の放射線防護  
Radiation protection in the neighbourhood of detector.

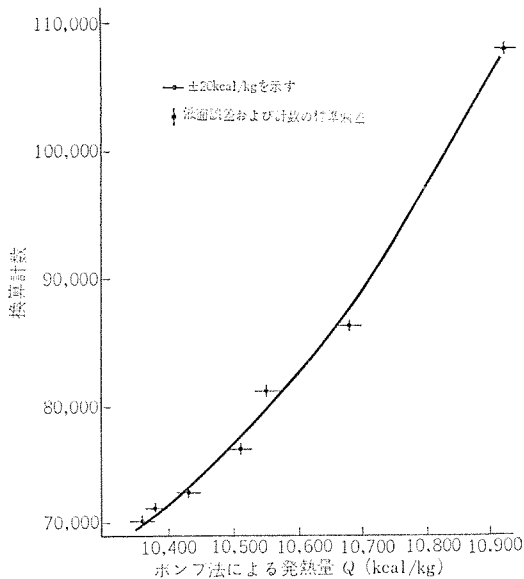


図 5.7 A,B,C 重油の実験結果  
Results of experiment for heavy oil of A, B and C grades.

表 5.3 A,B,C 重油の実験結果  
Results of experiment for heavy oil of A, B and C grades.

試料番号	名 称	計 数 (C/100 sec)	比 重 (15/4°C)	換算計数	発 熱 量 Q (kcal/kg)	いおう分 S (wt %)
1	HV-C 重 油	63,360	0.961	71,279	10,360	3.29
2	MS-C 重 油	62,849	0.953	72,207	10,380	2.60
3	C 重 油	63,231	0.949	73,413	10,430	2.75
4	LS-C 重 油	65,148	0.943	76,862	10,510	1.31
5	B 重 油	63,009	0.910	81,312	10,550	2.51
6	LS-A 重 油	60,887	0.877	86,267	10,680	0.14
7	A 重 油	64,712	0.823	107,746	10,920	0.46

注) 試料は三菱石油 (株) の提供による。

防止の観点からは、のちに述べる Am-Be 中性子源と異なり、この場合には中性子よりガンマ線のほうが重要であり、法令にしたがった防護措置が必要になる。すなわち、重油およびパイラのしゃへい効果がないと仮定して安全側にとり、線源から半径 2 m の範囲に金網のさくをもうけ、その内側に、防盜をかねて厚さ 180 mm のコンクリート壁をもつ小屋をもうけた。0.7 mr/h の管理区域はこの金網内となる。図 5.6 にその状況を示した。

所要精度から言えば、線源には 10mCi は要しない。1 mCi でも時間をかければ測れないことはない。その場合、管理区域の半径は 3 分の 1 にできる。

現在では Ra-Be の代わりに、Am-Be 中性子源が使用できる。中性子強度を Ra-Be 10mCi 相当にするには、50mCi 必要である

が、ガンマ線の放出が少ないので、コンクリート壁なしでも、半径 1 m の管理区域で十分である。このようにして、この方法の最大の欠点である放射線障害防止の問題は、事実上解消したとみてよい。

## 5.7 測定範囲の拡張

連続測定では、上記のようにきわめて安定な結果が得られたが、C 重油のうちでも低発熱量、および高発熱量重油の測定ができなかった。実用的観点からは、この検量曲線をそれぞれ低い発熱量側と高い発熱量側へ外そう (挿) できることを実証しなければならない。そこで、A, B, C 各種重油について以下の実験を行なった。

A, B 重油を発電所のパイラインに流すわけにはゆかないので、汲み込み方式で、しかも試料油量 3 l の少量で測定することにした。この際、もちろん検量曲線はさきの連続測定のそれと合致しない。また油量が少ない場合、中性子の漏れが大きいので、換算計数として計数値を密度の 1 乗で除すより 2~3 乗で除す方が相関が良いと言われている。今の場合 2.5 乗で除したが、前記のパイラインの場合には、おそらく 1 乗で除して良い相関が得られるものと思われる。

結果を表 5.3、図 5.7 に示す。これより明らかなように、C 重油から A 重油、すなわち発熱量 10,300~10,900 kcal/kg の範囲で、発熱量と換算計数はかなり高い精度で一つの曲線にのっていることがわかる。中性子減速による方法は、C 重油のみならず、A, B 重油に対しても適用可能であることを示していると言ってよからう。10,300 kcal/kg 以下についても若干の外そうを行なってもさしつかえないことは明らかである。

## 6. む す び

中性子の減速現象を利用して、重油の発熱量をその水素原子密度から間接的に測定することを試みた。その長所を生かすため、これを送油パイラを流れる C 重油に適用し、連続自動測定を実施した。その結果、従来採用されてきた断熱式 ボンフ法とほぼ同等の精度で測定できることが確かめられた。また、この方法が C 重油のみならず、A および B 重油にも拡張できることも確かめられた。

なお、この実験では重油の比重は浮きばかりによる測定値を採用したが、比重を放射線または他の手段で連続測定することは解決済みと考えたためである。

この実験は冒頭にも記したとおり、関西電力 (株) との協同研究によるものであり、場所・施設の提供、重油の分析などは関西電力 (株) によって行なわれた。結果の検討も全面的なご協力を得て行なわれた。関係者多数にわたるため、お名前を記すことは困難であるが、紙面をかりてここに厚くお礼申し上げたい。

また、A, B および C 重油への拡張実験には三菱石油 (株) より試料重油の提供をうけたほか、石油に関する種々有益な技術的知識をご教示いただいた、木村、笹田両氏に深く感謝したい。

(昭和 42-6-12 受付)

## 参 考 文 献

- (1) 渡辺：原子力工業，8，12，59 (昭 37)
- (2) 渡辺，鈴木：第 6 回日本アイソトープ会議報文集 p. 484 (昭 39)
- (3) 宮下，石井：三菱電機技報，37，12，1448 (昭 38)
- (4) K. Miyashita, M. Takada & K. Yamamoto : Mitsubishi Denki Laboratory Reports, 7, 3/4, 221 (1966)

## ルビーレーザー用固体 Q-スイッチ

中原昭次郎\*・伊東 克能\*\*・草川 英昭\*\*\*

## Plastic Q-Switches for Ruby Lasers

Kamakura Works Shôjirô NAKAHARA・Katsuyoshi Itô  
Central Research Laboratory Hideaki KUSAKAWA

A Q-switch for ruby lasers has been developed with success. It is a bleachable dye Q-switch using solid state dispersion media instead of conventional liquid solvent. This device, named "Plastic Q-switch", is an acrylic acid resin plate containing vanadyl phthalocyanine molecules. Substitution of the dispersion media has eliminated the defects of the conventional bleachable dye Q-switch such that the dye or solvent is dissociated by ultraviolet radiation and that the liquid state of the conventional one causes inconvenience in handling, still holding the merits of the conventional one of permitting repeated operation without driving and synchronizing. The device has been operated to generate several hundred giant pulses of a few megawatt peak power without shifting the device, through the combined use of a closely coupled lamp reflector having a diffused reflecting surface.

## 1. ま え が き

1960年に Hughes 社の T. H. Maiman によってルビーレーザー<sup>(1)</sup>が發明されて以来、種々の物質を用いたレーザーが次々と開発され、その発振波長も電子管では発生できなかったサブミリ波から紫外領域にわたる広い範囲をカバーするに至っている。レーザーはその活性物質の状態によって、固体レーザー・気体レーザー・液体レーザー・半導体レーザーなどにわけられそれぞれの特長を生かした応用の開発が盛んに行なわれている。その中で固体レーザーは非常に大きなエネルギーを一度に発生でき、またこれから述べるQスイッチング<sup>(2)</sup>という手法を用いれば、非常に大きな尖頭値の光パルスが発生できる特長を持っている。

ルビーレーザーは結晶の製作法が最もよく確立されており、結晶が丈夫なことで、発振特性もすぐれているなどの理由で最も広く使われている固体レーザーである。しかしルビーレーザーはそのままでは不規則なスパイク状の発振波形を持っており、レーザー距離計のように幅のせまい単一のパルスが必要な場合や、集積回路の基板加工のように非常に短かい時間にレーザー光をあてて熱伝導によって加工精度の落ちることを防ぐ必要がある場合などには、Qスイッチによって発振出力を単一の尖頭値の大きなパルスに整形する必要がある。このQスイッチングの

方法として、従来、レーザー共振器の一方の反射鏡を高速で回転させる回転プリズム法<sup>(3)</sup>、偏光面を電界の強さで制御するkerr cell法<sup>(2)</sup>、固体Qスイッチのもととなったbleachableな色素を適当な溶媒に溶かした色素溶液Qスイッチ<sup>(4)</sup>、その他励起された $\text{UO}_2$ イオンの吸収飽和を用いるuranyl glassのQスイッチ<sup>(5)</sup>、ある種の色ガラスフィルター<sup>(6)</sup>を使う方法などが用いられてきた。これらの方法はそれぞれ長所短所を持っているが、それを表1.1にまとめて示す。これを見ると簡便さでは色素溶液Qスイッチが最もすぐれていることが明らかである。しかしながら色素溶液Qスイッチにはつぎのような欠点がある。

- (1) 色素やその溶媒が紫外線などによって分解するものがある。
- (2) 液状であるので容器が必要である。またその容器はレーザー共振器中にそう入するので光学的な精度が要求され高価である。
- (3) 液状であるため、機械的振動の激しい状態では使いにくい。

色素溶液Qスイッチのこのような欠点を克服し、しかも色素溶液Qスイッチの、繰り返し使用で駆動や制御の必要がないなどの利点を生かすことを目的として開発されたのが、これから述べる固体Qスイッチである<sup>(7)</sup>。この素子は分解しにくい安定な色素であるバナジル・フタロシアニン (Vanadyl Phthalocyanine) をアクリル酸樹脂に分散させ、平行平面の板に仕上げたもので次のような特長を持っている

表 1.1 各種 Q-スイッチの比較 Comparison of various Q-switches.

項 目	Q-スイッチ	色素溶液 Q-スイッチ	回 転 プ リ ズ ム 法	Kere Cell 法	ウラニル・ガラス	Schottl 赤色フィルター
駆 動 装 置		不 要	プリズムを数万回転の高速で回転させるモータが必要	約 10 kV の高圧を数 10～数 100 ns で Switching しなければならない	ボンピングが必要	不 要
フラッシュランプとの同期		不 要	反転分布が最大になったとき共振器の Q が最大になるよう同期を取る	反転分布が最大になったとき共振器の Q が最大になるよう同期を取る	不 要	不 要
ジャイアントパルス発生時刻の予知 (他の現象との同期)		む づ か し い	可 能	可 能	む づ か し い	む づ か し い
消 耗 性		クリプトシアニンあるいはバナジル・フタロシアニンの溶媒である $\alpha$ -クロロナフタレン等はフラッシュ・ランプの紫外線で分解する	プリズムのかどがジャイアントパルスにより破損する			発振により損傷が残る
装 置 の 大 き さ		小 さ い	大 掛 り	非 常 に 大 掛 り	大 掛 り	小 さ い
消 費 電 力		不 要	数 10 W	～100 W	～数 100 J	不 要

る。

(1) 1 MW 程度の出力で 100 回から 1000 回以上繰り返し使用できる Q-スイッチができる。また直径 9.5 mm, 長さ 76.2 mm のルビーで 20 MW 程度のジャイアントパルスが得られる。

(2) 厚さ 5 mm 前後の板状で取り扱いが簡便であり、都合のよい形に切り出すことができる。

(3) 駆動, 制御回路が不要である。

(4) 調整したレーザ共振器中にそう入すれば, 調整なしにジャイアントパルスが得られる。

(5) ニトロベンゼンなどのように毒性のある溶媒を用いていないので, 取り扱いに特別な注意がいらない。

## 2. 原 理

固体レーザではレーザ作用を有する一対のエネルギーレベルのうちでエネルギーの高い状態にレーザ物質がとどまる時間すなわちそのレベルの寿命がポンピングに用いられるフラッシュランプの発光時間と同程度あるいはそれより幾分長い。これを利用して, ポンピング開始時のレーザ共振器の Q を低くし, レーザ発振が起きないようにしておき反転分布が十分大きくなった後, 急速にレーザ共振器の Q を高くして, レーザ共振器内の利得と損失との差を大きくし, 反転分布としてたくわえられたエネルギーを一度に放出させて, いわゆるジャイアントパルスが発生させるのが Q-スイッチである。つぎに色素溶液 Q-スイッチや固体 Q-スイッチのような bleachable な色素を用いる Q-スイッチの原理を簡単な数式で説明する。

図 2.1 のようなレーザ共振器において, その中の光子密度を  $\Phi$ , ルビーのレーザ物質であるクロムイオン濃度を  $N_0$ , 反転分布密度を  $N$  とする。吸収の飽和をおこす色素は 2 レベルで動作するとし, 図 2.2 のようなエネルギーレベルと各レベルにある色素の密度を持っているとする。ただし色素の濃度を  $\bar{N}_0$  とする。ルビーおよび色素のルビーレーザ光にたいする吸収係数をそれぞれ,  $\alpha, \beta$  とするとつぎのような方程式が成立する。なお  $C$  は光速,  $T$  は色素のレベル 2 の寿命である。

$$\frac{d\Phi}{dt} = \left\{ \alpha l_1 \frac{N}{N_0} - \frac{1-R}{2} - \beta l_2 \frac{N_1-N_2}{\bar{N}_0} \right\} C\Phi/L \quad (2.1)$$

$$\frac{dN}{dt} = -2\alpha l_1 C\Phi \frac{N}{N_0} / L \quad (2.2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \beta l_2 C\Phi \frac{N_1-N_2}{\bar{N}_0} - \frac{N_2}{T} \quad (2.3)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -\beta l_2 C\Phi \frac{N_1-N_2}{\bar{N}_0} + \frac{N_2}{T} \quad (2.4)$$

式 (2.4) から (2.3) を引き  $N_1-N_2=\bar{N}$  とおくと

$$\frac{d\bar{N}}{dt} = -2\beta l_2 C\Phi \frac{\bar{N}}{\bar{N}_0} + \frac{1}{T} (\bar{N}_0 - \bar{N}) \quad (2.5)$$

次に時間の単位をルビーおよび色素 Q-スイッチがないとき光子がこのレーザ共振器中にとどまる平均時間  $2L/\{C(1-R)\}$  で規格化し,  $N, \bar{N}, \Phi$  についても, 反射鏡から漏れる光子の割合に対して次のように規格化する。

$$t' = \frac{C(1-R)}{2L} t \quad (2.6)$$

$$n = \frac{2\alpha l_1}{1-R} \cdot \frac{N}{N_0} \quad (2.7)$$

$$\bar{n} = \frac{2\beta l_2}{1-R} \cdot \frac{\bar{N}}{\bar{N}_0} \quad (2.8)$$

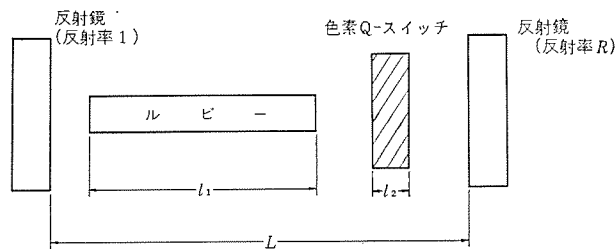


図 2.1 色素 Q-スイッチを用いたレーザ  
Schematic diagram of a laser using the bleachable dye Q-Switch.

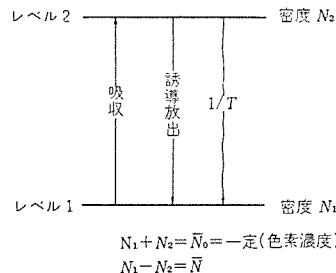


図 2.2 吸収飽和をおこす色素のエネルギー・レベル  
Energy levels of the bleachable dye.

$$\phi = \frac{2\alpha l_1}{1-R} \cdot \frac{\Phi}{N_0} \quad (2.9)$$

また,

$$\eta = \frac{\beta l_2}{\alpha l_1} \cdot \frac{N_0}{N_0} \quad (2.10)$$

$$\tau = \frac{C(1-R)N_0 T}{L N_0} \quad (2.11)$$

とおくと, 式 (2.1) (2.2) (2.5) は

$$\frac{d\phi}{dt'} = (n-1-\bar{n})\phi \quad (2.12)$$

$$\frac{dn}{dt'} = -2n\phi \quad (2.13)$$

$$\frac{d\bar{n}}{dt'} = -2\eta\bar{n}\phi + \frac{1}{\tau}(\bar{n}_0 - \bar{n}) \quad (2.14)$$

となる。ただし  $\bar{n}_0$  は色素分子がすべてレベル 1 にあるときの  $\bar{n}$  の値で次のように定義される。

$$\bar{n}_0 = \frac{\beta l_2}{1-R} \quad (2.15)$$

式 (2.12) (2.13) (2.14) の 3 式からこのレーザの発振特性が計算されるが, 詳細は文献 (8) に譲り, 要点のみについて述べる。

(1) 反転分布, 光子密度, 色素の吸収の時間的変化

レーザ発振が起こる前には  $\bar{n}=\bar{n}_0$  であり, これは式 (2.15) からわかるように色素 Q-Switch の吸収率に比例する値である。発振が始まるのは, 式 (2.12) の右辺の括弧の中がゼロから正にかわる瞬間である。式 (2.12) の右辺が正になると光子密度  $\phi$  が大きくなり, 式 (2.14) にしたがって  $\bar{n}$  が小さくなって bleaching が起こる。すると式 (2.12) は

$$\frac{d\phi}{dt'} \approx (n-1)\phi \quad (2.16)$$

となり, これは色素がないときの式に等しい。図 2.3 に  $n, \bar{n}, \phi$  の変化の様子を図示する。

(2) bleaching のおこる条件

ジャイアントパルスが発生するためには, 発振の始まりにおいて式



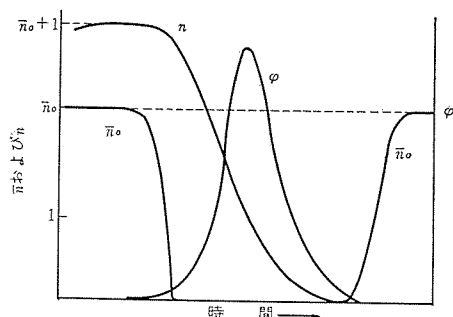


図 2.3 反転分布, 光子密度, 色素吸収強度のギヤントパルス発生時の変化  
Time dependence of the inverted population, photon density and dye absorption.

(2.12)の右辺が正に保たなければならないから

$$\frac{d}{dt}(n-\bar{n}) > 0 \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

であることが必要である。すなわち発振の始まりにおいて  $\bar{n}$  が  $n$  より十分早く減少しなければならない。式 (2.13) から (2.14) を引くと、

$$\frac{d}{dt}(n-\bar{n}) = 2(\eta\bar{n}-n)\phi - \frac{1}{\tau}(\bar{n}_0-\bar{n}) \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

となる。したがって式 (2.17) の条件を満たすためには

$$\eta \gg 1, \tau \gg 1 \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

でなければならない。 $\eta, \tau$  は式 (2.10), (2.11) の定義から明らかとなり、式 (2.19) の条件を満たすためには色素の吸収係数  $\beta$  がルビールのそれの  $\alpha$  にくらべて非常に大きいこと、色素のレベル 2 の寿命が十分長いことが要求される。これは次のようにしてもわかる。すなわち式 (2.14) において定常状態を仮定し、左辺を 0 とおき、 $\bar{n}$  についてとくと

$$\bar{n} = \frac{\bar{n}_0}{1+2\eta\tau\phi} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

すなわち  $\eta\tau$  の積が大きいほど少ない光子密度  $\phi$  で吸収の飽和がおこることがわかる。例としてルビーとバナジウムフタロシアニンをとって実際のデータを入れて見ると  $\alpha/N_0 \simeq 4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\beta/\bar{N}_0 \simeq 5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$  であるから、 $\eta$  は  $I_0/I_1$  を考慮しても  $10^3$  以上の値となっている。

またバナジウムフタロシアニンのレベル 2 の寿命  $T$  は、実測値はないが、マグネシウムフタロシアニンのデータなどから 5 ns と言われており、この値を式 (2.11) に代入すれば、やはり式 (2.19) の条件が満足されていることがわかる。また  $\eta\tau$  が大きければ色素濃度が小さくてすみ、色素がレベル 2 からレベル 1 に decay する際に発生する熱の量も少なく、Q-スイッチの寿命の点でも非常に重要である。

### 3. 固体 Q-スイッチの材料と製作法

固体 Q-スイッチは色素溶液 Q-スイッチの欠点を除くことを目指したものであるから、原理的には両者はまったく同じで、bleachable な吸収体にもおなじ色素を用いている。したがってその色素を分散させる固体も色素が熱分解しない温度で液体から固体に変化し、しかもレーザー光の波長付近に吸収がないなどの制限がある。このためガラスのような無機質は対象から除き、もっぱら合成樹脂を用いた。

#### 3.1 色素

検討した色素は、バナジウムフタロシアニン・Metal free フタロシアニン・銅フタロシアニン・クリプトシアニン・メチレンブルーの 5 種である。このうちバナ

ジウムフタロシアニンとクリプトシアニンはルビーレーザー用 Q-スイッチとして広く使われている。

結論として、固体 Q-スイッチに使える色素はバナジウムフタロシアニンだけであった。Metal free フタロシアニンと銅フタロシアニンは十分な吸収飽和がおこらず、クリプトシアニンは紫外線ばかりでなく、熱にも弱く途中で分解した。メチレンブルーはそのイオンが赤色光にたいして吸収を持ち青色に着色しているが、樹脂中ではイオン化しないため赤色光にたいして吸収を持たず、赤色の溶液になった。

バナジウムフタロシアニンは図 3.1 に示すような構造の青色の色素である。一般に金属イオンを含むフタロシアニンは、青色染料として広く使われており非常に安定なのが特長である。バナジウムフタロシアニンも空気中では 250°C 程度まで、真空中ではさらに高い温度でも安定で 600°C で昇華する。図 3.2 はその  $\alpha$ -クロロナフタレン溶液の分光吸収特性を示す。その吸収ピーク波長は表 3.1 のように溶媒により変化するが、吸収ピークの吸収率は  $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-1} (\text{mol/l})^{-1}$  に達する。

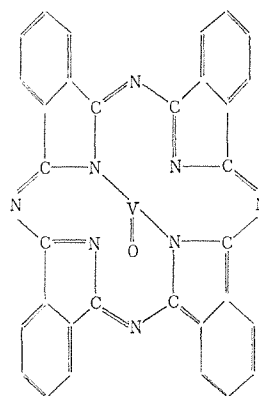


図 3.1 バナジウムフタロシアニンの構造  
Structure of vanadyl phthalocyanine.

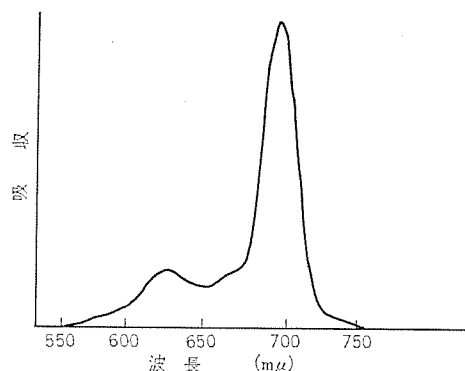


図 3.2 バナジウムフタロシアニンの  $\alpha$ -クロロナフタレン溶液の分光吸収特性  
Spectral absorption of vanadyl phthalocyanine in  $\alpha$ -chloronaphthalene.

表 3.1 バナジウムフタロシアニンの吸収ピーク波長の溶媒による変化  
Wavelength of absorption maxima of vanadyl phthalocyanine in various solvent.

溶 媒	吸収ピーク波長
$\alpha$ -クロロナフタレン	6,980 Å
ニトロベンゼン	6,955 Å
メタクリル酸メチル	6,855 Å
ポリスチロール	6,960 Å

表 3.2 アクリル酸樹脂の軟化点  
Softening temperature of the methacrylic acid resin.

樹 脂	軟化点
メタクリル酸メチル	105°C
メタクリル酸エチル	65°C
メタクリル酸 n-プロピル	38°C
メタクリル酸 n-ブチル	33°C

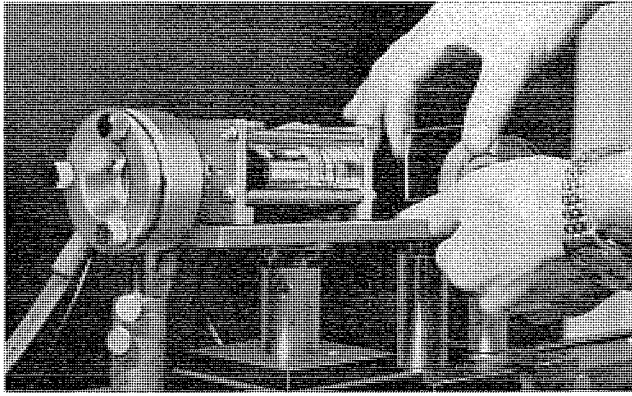


図 3.3 固体 Q-スイッチを用いたルビー・ジャイアント  
パルス・レーザ  
Ruby giant pulse laser using the plastic Q-switch.

### 3.2 固体分散媒

有機物で透明な固体という条件から、数種のアクリル酸樹脂とポリスチロールとを色素を分散させる固体分散媒として用いた。いずれも加工しやすく透明度もすぐれている。ポリスチロールはレーザ発振によって傷ができやすく、この目的には不向きであった。アクリル酸樹脂については表 3.2 のようなものについて実験したが、メタクリル酸エチルが最もすぐれていた。

### 3.3 固体 Q-スイッチの製法

固体 Q-スイッチは以下に述べる二通りの方法で作った。

#### 3.3.1 フィルム状固体 Q-スイッチ

最初に 3.1 節および 3.2 節で述べた材料を用いて固体 Q-スイッチが作れるかどうかを確かめた製法である。まず色素とそれを分散させる樹脂とをべつべつに両者に共通な溶媒にとかしたのち、適当な割合で両者を混合し、それをガラス板上に流し塗りし、乾燥して溶媒を取り去って、吸収率 20~60 % 程度、厚さ 10~400  $\mu$  程度のフィルム状の固体 Q-スイッチを構成した。共通な溶媒として、フタロシアニン系の色素には  $\alpha$ -クロロナフタレン、クリプトシアニンには N, N ジメチルホルムアミドを用いた。

#### 3.3.2 重合固化した固体 Q-スイッチ

上記の方法では厚い平らなフィルムは作れないし、溶媒を完全に抜くのがむづかしいので、溶媒を用いない方法で固体 Q-スイッチを作った（以後固体 Q-スイッチといえばこれをさすことにする）。表 3.2 に示したアクリル酸樹脂の単量体は液体なので、その中に色素を分散させ、それを重合剤の添加と加熱により重合固化させた。

はじめは重合固化を試験管中で行ない、固化したら適当な厚みに切り出し研磨して固体 Q-スイッチを作ったが、研磨がむづかしく手間もかかるので、後にはガラス板にはさんで重合固化し、初めから平行平板に固めて研磨の手数を省ける方法にかえた。前者の製法を研磨法、後者の製法を成形法と呼ぶことにする。図 3.3 に成形法で作った固体 Q-スイッチの装着状況を示す。写真の Q-スイッチの大きさは 40×40×5(mm) である。

## 4. 固体 Q-スイッチの動作特性

### 4.1 フィルム状固体 Q-スイッチ

図 3.3 とおなじようにこの Q-スイッチをレーザ共振器中にそう入し、その特性を観察した。銅あるいは Metal Free フタロシアニンを使用したものは Q-スイッチ作用が弱かった。一方バナジウムフタロシアニンをういたものは図 4.1 に示すような色素溶液 Q-スイッチにまさるとも

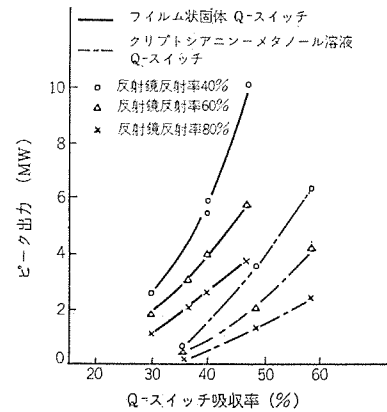


図 4.1 フィルム状固体 Q-スイッチの出力特性  
Output characteristics of the film plastic laser Q-switch.

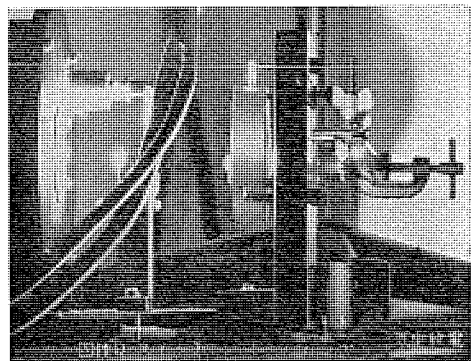
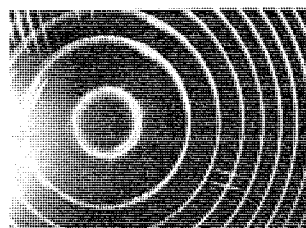
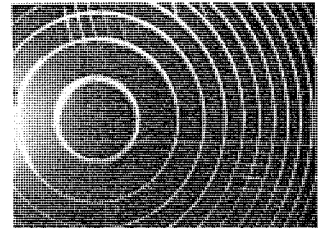


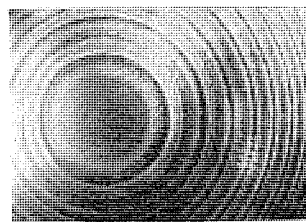
図 4.2 固体 Q-スイッチによって生じたジャイアント・パルス  
レーザ・ビームの集光による気中放電  
Optical breakdown by focussed laser beam generated by  
plastic Q-switch.



(a) フィルム状固体 Q-スイッチ  
出力 約 1 MW



(b) バナジウムフタロシアニン- $\alpha$ -クロロ  
ナフタレン 溶液 Q-スイッチ  
出力 約 1 MW



(c) 通常発振  
出力 約 100 mJ

図 4.3 レーザ出力の Fabry-Pérot interferogram  
エタロン 間隔 12.5 mm  
(0.4 cm<sup>-1</sup>)  
Fabry-Pérot interferogram  
of the laser output, etalon  
spacing 12.5 mm (0.4 cm<sup>-1</sup>).

劣らない特性が得られた。色素濃度を濃くしフィルムのとくによくできたものでは、図 4.2 に示すようにレンズでレーザ光を絞って空気の絶縁破壊をおこさせ放電させることができた。

このときの出力は約 10 MW で、集光に用いたレンズは焦点距離 10.3 mm、直径 8 mm の平とつレンズであった。一般に色素溶液 Q-スイッチを用いると、容器のモード選択作用のため非常に少ない縦モードで発振し、スペクトルの purity がよいが、このフィルム状の固体 Q-スイッチでもそのような作用が認められ、図 4.3 に示すようにか

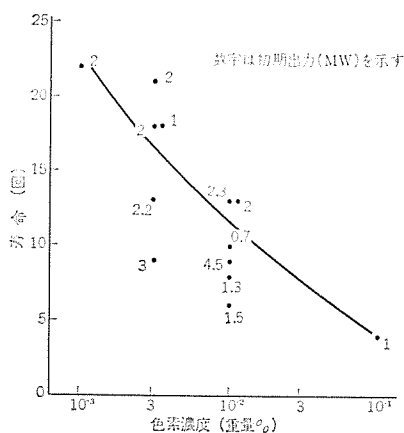


図 4.4 フィルム状固体 Q-スイッチの寿命  
Lifetime of the film plastic laser Q-switch.

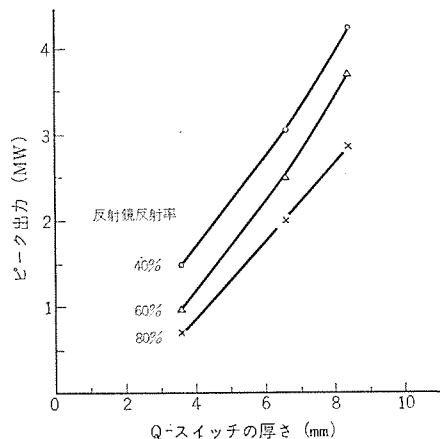


図 4.5 固体 Q-スイッチの出力特性 (研磨法)  
Output characteristics of the plastic laser Q-switch prepared by polishing.

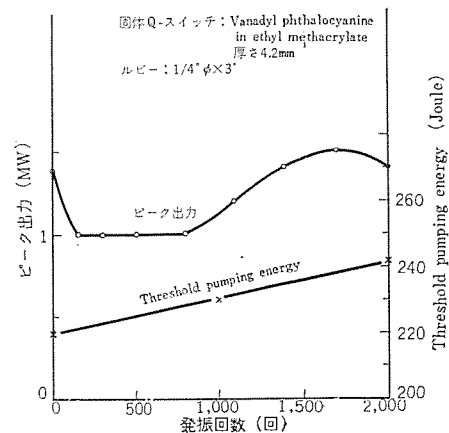


図 4.6 研磨法による固体 Q-スイッチの寿命  
Life test of plastic laser Q-switch prepared by polishing.

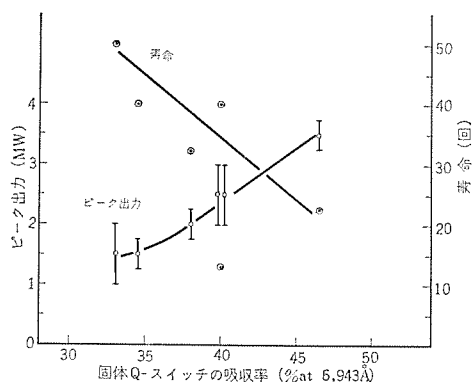
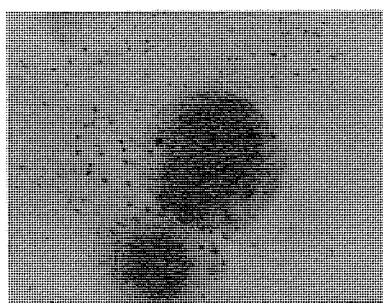
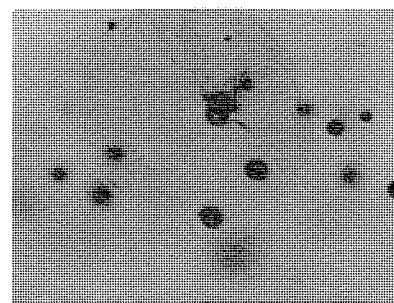


図 4.7 成形法による固体 Q-スイッチの発振特性  
Output characteristics of plastic laser Q-switch prepared by casting.



(a) 成形法の固体 Q-スイッチの損傷



(b) 研磨法の固体 Q-スイッチの損傷

図 4.8 重合固化による固体 Q-スイッチの損傷の顕微鏡写真  
Microscope observation of the damage of plastic laser Q-switch prepared by polymerization.

なり purity のよい発振スペクトルが得られた。

かくして固体 Q-スイッチが従来の溶液 Q-スイッチに劣らない発振特性を有することがわかった。しかしながら発振時の強い光電界のため Q-スイッチ内に細かいあわ(泡)状の傷が生じ、その散乱のために出力が減じ、ついには発振不能になる欠点を持つことがわかった。この傾向はポリスチロールのほうがアクリル酸樹脂より著しく、また色素濃度が大いほど、出力が大いほど、早く傷が生じた。その様子を図 4.4 に示した。ここでいう寿命とは発振出力が初期の値の半数になるまでの発振回数である。

多数回繰りかえし使えるようにするためには、色素濃度を減らすのがよいと考えられるが、一方出力は図 2.3、式 (2.15) などからわかるように Q-スイッチの初期の吸収に関係するので、色素濃度を下げれば、そのぶんだけ Q-スイッチはあつくしなければならぬ。このフィルムを作る方法では、0.4 mm 以上の厚さでは平らなフィルムができないので、3.3.2 項の方法で色素濃度のよりうすい固体 Q-スイッチをつくった。

#### 4.2 重合固化による固体 Q-スイッチの発振特性

4.1 節に述べた色素濃度と寿命の関係を色素濃度のより低い試料で確かめるため 3.3.2 項の研磨法で試料を作った。パナジルフタロシアニン はメタクリル酸エチルに非常にとけにくく、厚さ 5 mm の板で 6,943 Å において 50 % の吸収を得ることはかなりむづかしかった。吸収の中心波長が表 3.1 に示したようにルビー光の波長より短波長側にずれることも原因の一つである。この方法で作った Q-スイッチ

の発振特性を図 4.5 に示す。この方法によると寿命が非常に改善されて、とくに良好なものは図 4.6 に示すように 1,000 回を越す寿命を持つに至った。この方法でメタクリル酸メチル、n-プロピル、n-ブチルの 3 種のアクリル酸樹脂についても実験した。

メタクリル酸メチルでは 3 MW のピーク出力で 20 回程度、メタクリル酸 n-プロピルでは 2 MW のピーク出力で、800 回程度の寿命がそれぞれあった。メタクリル酸 n-ブチルは表 3.2 に示したように軟化点が低く、非常に軟らかくて研磨できなかった。メタクリル酸 n-ラウリルも軟化点が低いのが問題である。なおポリスチロールはやはり寿命が短く使えなかった。

かくして実用性ある固体 Q-スイッチが得られるようになったが、すでに述べたように研磨する方法は手間がかかり、量産向きではない。そこで 3.3.2 項の後半に述べた成形法で広い平行平板を作り、それを 40×40 (mm) に切った。この方法で作った Q-スイッチは図 4.7 に示すように出力は十分であったが、寿命が上記のものにくらべて遺憾ながら劣っている。

二つの製法によって作られた Q-スイッチが発振によって損傷した部分を観察すると、図 4.8 のようになり様子が異なり、あとで述べた方法によるもののほうが、損傷をうける欠陥がより多いことがわかる。二つの製法のどの工程がこのような差を生ずるのかは目下検討中であるが、最も重要なのは色素をいかにして細かい粒子にして樹脂中に分散させるかという点にある。

固体 Q-スイッチの損傷は光子を吸収して励起された色素が基底状



入力 221 Joule  
出力 1 MW (固体 Q-スイッチ使用)  
ルビー  $1/4 \phi \times 3"$   
反射鏡反射率 98%, 40 %  
(a) 拡散面反射筒を用いたときの Near Field Pattern

入力 265 Joule  
出力 0.3 MW (固体 Q-スイッチ使用)  
反射筒以外(1)と同じ  
(b) 金属鏡面円筒反射筒を用いたときの Near Field Pattern

図 4.9 反射筒による Near Field Pattern の差違  
Near field patterns by different pumping reflectors.

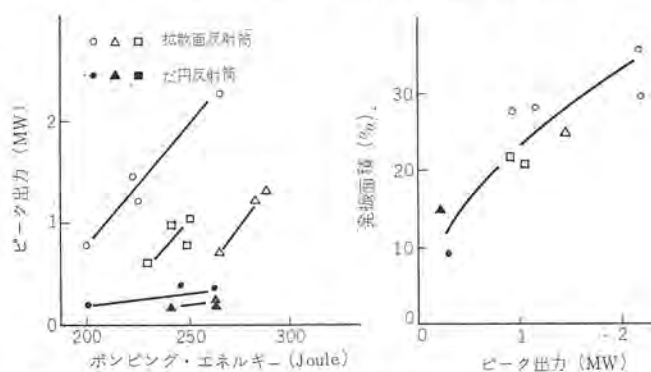


図 4.10 ポンピング反射筒による ジャイアント・パルス 出力およびルビー断面内発振面積の影響 (固体 Q-スイッチ 使用)  
Effects of the pumping reflectors on the giant pulse peak power and oscillating area of the ruby rod using plastic Q-switch.

態に戻るときにふく射をともなわず、フォノンを発生して戻するために発生する熱によると考えられる。したがって色素を含みぬマクリル酸樹脂板を Q-スイッチとともに、レーザ共振器中にそう入し、発振を行なってレーザ光をあてても損傷が生じない。2 章に述べたように、色素の吸収係数が大きく、励起状態の寿命が長ければ小さな光子密度で吸収の飽和がおこるとともに、励起状態から decay する色素の数が少なく、フォノン発生量も少なくなって、固体 Q-スイッチの寿命も長くなると考えられる。Metal Free フタロシアニンはアクリル酸樹脂中で励起状態は  $20 \mu\text{sec}$  の寿命を持っており<sup>(9)</sup>、寿命改善に役立つことを期待したが、Q-スイッチング作用が弱く使えなかった。他の固体分散媒の開発とともに新しい色素の開発も同時に望まれる。

最後に固体 Q-スイッチの寿命が 1,000 回をこえるようになった理由の一つに拡散面の反射筒をレーザヘッドに用いたことがある。すなわち固体 Q-スイッチの損傷はレーザ共振器内の光子密度が大きいほどおこりやすいから、ルビー断面のなるべく広い部分で発振させて、なるべく低い光子密度で大きな出力を得ることが、固体 Q-スイッチの長寿命化に欠くことができない条件である。拡散面反射筒を用いるとルビー断面のポンピングがいちように行なわれ、図 4.9 に示したルビー端面での発光パターン (near field pattern) にみられるように、よく使われる鏡面反射面の長円反射筒を用いた場合より広い面で発振が

おこっている。また同一ポンプ入力エネルギーに対するジャイアントパルス出力も拡散面反射筒のほうが大きいことがわかっている<sup>(9)</sup>。その様子を図 4.10 に示す。

## 5. む す び

色素溶液 Q-スイッチの溶媒を固体化した Q-スイッチが、パナジルフタロシアニオンとアクリル酸樹脂とを用いて実現できることについて述べた。これによってまえがきに述べたような利点が得られ、今後ルビーレーザのジャイアントパルスを発生する方法としてひろく使われるものと考えられる。現在当社において製作されているレーザ距離計<sup>(10)</sup>にもこの固体 Q-スイッチが装着されている。

今後、量産法の改善と 10 MW 以上の出力でも長寿命を持ちレーザレーダ用に使える固体 Q-スイッチ、他の波長のレーザ用——とくに  $\text{Nd}^{3+}$  レーザ用——の固体 Q-スイッチの開発を行なう予定である。

終わりに成形法による固体 Q-スイッチの製作に協力いただいた三菱レーヨン株式会社、新光合成樹脂株式会社の関係各位に感謝の意を表します。

(昭 42-6-16 受付)

## 参 考 文 献

- (1) T. H. Maiman, R. H. Hoskins, I. J. D'Haenens, C. K. Asawa, and V. Evtuhov : Phys. Rev., 123, 1151 (August 1961)
- (2) F. J. McClung and R. W. Hellwarth : Bull. Am. Phys. Soc., 6, 414 (November 1961)
- (3) R. C. Benson and M. R. Mirarchi : IEEE Trans., MIL-8, 13 (January 1964)
- (4) P. P. Sorokin, J. J. Luzzi, J. R. Lankard and G. D. Pettit : IBM J. Res. Dev. 8, 182 (April 1964)  
P. Kafals, J. I. Masters and E. M. E. Murray : J. Appl. Phys., 35, 2349 (August 1964)  
B. H. Soffer : ibid, 2551
- (5) J. I. Masters, P. Kafals and E. M. E. Murray : Report No. TOB 64-15, Prepared for the Office of the Naval Research under Contract No. Nonr-4126(00), (January 1964)
- (6) G. Bret and F. Gires : Appl. Phys. Lett., 4, 175 (May 1964)
- (7) 中原, 草川, 伊東 : 昭和 41 年度電気四学会連合大会予稿, No. 1,050 (昭 41-4)  
中原, 伊東, 草川 : 昭和 41 年度電気通信学会連合大会予稿 No. 501 (昭 41-11)  
中原, 草川, 伊東 : 電気通信学会 量子エレクトロニクス研究会資料 量子 66.5-1 (昭 41-5)
- (8) 中原, 伊東 : 電気通信学会 量子エレクトロニクス研究会資料 量子 65.12-19 (昭 40-12)
- (9) 中原, 伊東 : 昭和 42 年度電気四学会連合大会予稿 No. 1508 (昭 42-4)
- (10) 渋谷, 田村, 佐藤, 菊池, 福家, 柳沢 : 三菱電機技報 40, 1765 (昭 41-11)



最近登録された当社の実用新案

名 称	登 録 日	登 録 番 号	考 案 者	関 係 場 所
真空掃除機	41-11- 1	591168	武井久夫・祖父江常夫	群馬 馬
電気かみそり	41-11- 2	813529	小川 昇・福田興司	群馬 馬
扇風機のコード収納装置	41-11- 2	813535	鶴田剛司・佐藤秀昭	商品研究所
電気炊飯器	41-11- 2	813537	高橋正晨・村岡和典	群馬 馬
卓上電気鍋	41-11- 2	813538	野畑昭夫・高橋正晨 村岡和典	群馬 馬
電気鍋	41-11- 2	813539	高橋正晨・村岡和典 金子 弘	群馬 馬
電気鍋	41-11- 2	813540	東 邦弘・村岡和典	群馬 馬
電気鍋	41-11- 2	813541	高橋正晨・村岡和典	群馬 馬
電気鍋	41-11- 2	813542	山崎恒雄・梅田 明 村岡和典	群馬 馬
電気鍋	41-11- 2	813543	奥田文一・野畑昭夫	群馬 馬
電気調理器	41-11- 2	813544	氷室昌美	商品研究所
整流器出力の制御装置	41-11-14	591180	加藤又彦	伊 丹
モシンの油回収装置	41-11-15	814515	三津沢武夫	和 歌 山
同軸ケーブル用コネクタ	41-11-16	814659	近藤博通	中央研究所
水冷却器の開閉弁開閉装置	41-11-16	814460	三津沢武夫・足立吉弘	和 歌 山
アール炉の扉開閉装置	41-11-16	814461	田口 堅	伊 丹
冷温水器用給水弁の開閉装置	41-11-16	814662	三津沢武夫	和 歌 山
電気機器の排水装置	41-11-16	814663	山脇春雄	長 崎
電気機器の鉄心	41-11-16	814664	蒲生 裕・忍 正寿	伊 丹
テレビジョン受像機用携帯アンテナ	41-11-16	814666	中村元男	京 都 (無)
携帯用テレビのアンテナ取付装置	41-11-16	814667	須田良吉	京 都 (無)
軟質レーダドーム	41-11-16	814668	森川 洋	通信機製作所
半導体装置	41-11-16	814670	片井正男	北 伊 丹
蓋体取付装置	41-11-16	814671	馬渡豊造	神 戸
電解加工機用電極	41-11-16	814675	伊藤 明	名 古 屋
電解加工機用電極	41-11-16	814676	伊藤 明	名 古 屋
遠隔指示装置	41-11-16	814678	武田克己・林 正之	福 山
電解加工装置	41-11-16	814679	前田祐雄・齊藤長男 荒井伸治	名 古 屋
低沸点ガスの液化装置	41-11-16	814681	大門啓治	長 崎
遠心送風機	41-11-16	814683	水野間勝国	長 崎
リードリレー	41-11-16	814684	中西武三・渡辺勢夫	中央研究所
トランジスタ駆動回路	41-11-16	814685	磯崎 真・織田博晴	通信機製作所
時限方向距離継電装置	41-11-16	814686	西浜 忠・福原尚志 三上一郎	神 戸
時限方向距離継電装置	41-11-16	814687	西浜 忠・福原尚彦 三上一郎	神 戸
単相三線式自励発電機	41-11-17	814788	松尾陽一郎	長 崎
掛金装置	41-11-17	814789	忍 正寿	伊 丹
携帯用テレビアンテナ	41-11-17	814790	柳川 滋	京 都 (無)
電気裁断機の研磨台昇降装置	41-11-17	814791	森 田 稔・山野稔大	和 歌 山
内蔵形負荷時タッチ切換器の仮運転装置	41-11-17	814792	嶋 裕 雄	伊 丹
内燃機関点火装置	41-11-17	814793	三木隆雄	姫 路
装甲型配電盤の扉鎖錠装置	41-11-17	814794	藤 沢 繁	神 戸
機関用点火信号装置	41-11-17	814795	浅山嘉明	姫 路
可動鉄心形漏洩変圧器	41-11-17	814796	野口昌介	名 古 屋
ジグザグミシンの干鳥巾限定装置	41-11-17	814797	辻本忠司・堀本耕一	和 歌 山
内燃機関点火装置	41-11-17	814798	三木隆雄	姫 路
蓄電池の過放電防止装置	41-11-17	814799	林 正之・佐藤安俊	福 山
ジグザグミシンの干鳥巾限定装置	41-11-17	814800	山田正和・辻本忠司	和 歌 山
内燃機関点火装置	41-11-21	814806	三木隆雄	姫 路
避雷装置	41-11-21	814807	岡田昌治・永井信夫 三住日出夫	伊 丹
変圧器鉄心	41-11-21	814801	橋本政敏	神 戸
変圧器鉄心	41-11-21	814802	橋本政敏・水野竜夫	神 戸
切換開閉器	41-11-21	814803	茂平木良夫・西迫静隆	名 古 屋





# 新製品紹介

## NF 2000 形ノーヒューズしゃ断器

ノーヒューズしゃ断器としては世界最大容量の 2,000 A フレームが発売された。同容量の気中しゃ断器よりも小形、軽量、経済的である。

NF 形 ノーヒューズしゃ断器の大容量フレームの出現は早くから望まれていたのであるが、モールドケース成形機の容量やモールド金型代の償却を考慮すると、1,200 A フレームをこえるノーヒューズしゃ断器については採算の見通しがなかった。したがってこれらの回路には、気中しゃ断器を用いるのが一般的であった。

しかし当社ではこの困難を克服して、同容量の気中しゃ断器よりもはるかに小形で、高性能のモールドケースタイプのしゃ断器として NF 1,600 A フレームおよび 2,000 A フレームを完成した。ノーヒューズしゃ断器としては世界最大容量のものである。

構造は従来のノーヒューズしゃ断器とほぼ同様であるが、電源しゃ断器あるいは（饋）電しゃ断器として用いられるように十分な導体断面積を有している。また将来 5 c/s 程度の短限時引きはずし装置を付加できるように考慮されている。

おもな仕様はつぎのとおりである。

定格電圧： AC 550 V

定格電流： 1,600 A フレーム    1,200 A    1,400 A    1,600 A  
2,000 A フレーム    1,800 A    2,000 A

極数： 3 極

定格しゃ断容量： AC 220 V 75,000 A

AC 460 V 60,000 A

AC 550 V 50,000 A

外形寸法： 幅 305 mm 長さ 559 mm

奥行 228 mm

[福山製作所]



NF 形ノーヒューズしゃ断器 2000 A フレーム

## RR-1200 形三菱電子レンジ発売

三菱電機では、昨年 9 月小形の電子レンジとして RR-700 形三菱電子レンジを発売したが、このほど大出力形の電子レンジとして、高周波出力 1,200 W で強弱切換え回路を付属した RR-1200 形三菱電子レンジを発売した。

### ■ 特 長

(1) 大出力で調理時間の短縮化

高周波出力 1,200 W の大出力で、大量調理が可能となった。

(2) 出力安定回路付

強制帰還回路の採用によりマグネトロンが安定動作する。

(3) 強弱切換え回路付

食品の種類・量により出力を強弱の 2 段に切換えられる。

(4) 安全な機構

ドア二重安全スイッチ、調理完了報知ベル、マグネトロン保護回路付き。

### ■ 仕 様

電 源：単相 200 V 50, 60 c/s 3.3 kVA

高周波出力：1,200 W, 850 W 2 段切換え

周波数：2,450 ± 50 Mc

タイマ：モータ式タイマ 9 分 (60 c/s), 10 分 (50 c/s)

外形寸法：幅 580 × 高さ 720 × 奥行 570 mm

オープン寸法：幅 470 × 高さ 300 × 奥行 330 mm

重 量：95 kg

[静岡製作所]







## 新製品紹介

容易である。

### ■仕様

形名:	AE-R 130	AE-R 800
バルブ口径:	15~50 mm	65~100 mm
操作トルク:	130 kg-cm	800 kg-cm
回転時間:	4 sec	8 sec

回転角度:	90°	90°
電源:	AC 100 V 50/60 c/s	AC 100 V 50/60 c/s
オーバーライド:	1° 以内	1° 以内
手動操作:	可能	可能
重量:	8.1 kg	12 kg

[名古屋製作所]

## SS タイマ

最近各種産業において、生産性・品質の向上が目的で、装置の自動化および高速化が必要になってきた。これらの装置には、高い信頼性があり、保守を必要としない部品を要求され、現在ではエレクトロニクスに負うところが大きい。今回、これらの要求を満たす完全無接点方式のプラグインタイマを開発したので紹介する。

### ■特長

#### (1) 長寿命で保守が不要

トランジスタを使用した CR 時限回路と、サイリスタを使用した無接点スイッチから構成された完全無接点タイマである。

#### (2) 小形軽量のプラグイン方式

JIS 規格のオクタルソケット (8 P) を使用し、床面積 36×36 mm と小さく、装置の小形化が可能である。

#### (3) 広い応用範囲

使用電圧、時限とも種類が豊富で、従来のリレー回路と同じように配線でき、バルブ、ランプなどの装置も直接駆動できる。

#### (4) 時限設定が容易で高精度

上部のつまみで簡単に設定でき、繰返し誤差がほとんどない。

#### (5) 高ひん度使用が可能

### ■仕様

項目	仕様
時限方式	ON DELAY
使用温度範囲	-10~50°C
精度	電圧誤差 ±5% 以下 (使用電圧範囲内) 繰返し誤差 ±1% 以下 (同一休止時間で初回を除く) 温度誤差 ±5% 以下 (使用温度範囲内)
定格繰返し過電流	定格出力電流の 10 倍 (商用周波 1 サイクル実効値)
定格瞬時過電流	10 A (商用周波 1 サイクル波高値非繰返し)
重量	80 g

SS-PF 外観



### ■用途

- (1) プレス機械・研削盤などの工作機械
- (2) 印刷機・化学工業・溶接機・コンベアなどの産業機械
- (3) 自動販売機・交通信号機・医療機器

### ■機種一覧

形名	仕様				
	時限範囲 秒	使用電圧 V	定格出力 A	標準休止 時間 秒	消費電力 W
SS-P□-A 1	0.2~1.2	DC 24(20~26 V)	0.25	0.15	0.3
SS-P□-A 2		DC 48(41~53 V)	0.25		0.5
SS-P□-A 3		AC 100/110(85~120 V)	0.25		1.0
SS-P□-A 5		AC 100/110(85~120 V)	0.25		1.3
SS-P□-A 6		AC 200(170~225 V)	0.20		2.4
SS-P□-A 7		AC 220(190~240 V)	0.20		2.6
SS-P□-B 1	0.5~3	DC 24(20~26 V)	0.25	0.3	0.3
SS-P□-B 2		DC 48(41~53 V)	0.25		0.5
SS-P□-B 3		AC 100/110(85~120 V)	0.25		1.0
SS-P□-B 5		AC 100/110(85~120 V)	0.25		1.3
SS-P□-B 6		AC 200(170~225 V)	0.20		2.4
SS-P□-B 7		AC 220(190~240 V)	0.20		2.6
SS-P□-C 1	2~12	DC 24(20~26 V)	0.25	1.2	0.3
SS-P□-C 2		DC 48(41~53 V)	0.25		0.5
SS-P□-C 3		DC 100/110(85~120 V)	0.25		1.0
SS-P□-C 4		AC 200/110(85~120 V)	0.25		1.3
SS-P□-C 6		AC 200(170~225 V)	0.20		2.4
SS-P□-C 7		AC 220(190~240 V)	0.20		2.6
SS-P□-D 1	5~30	DC 24(20~26 V)	0.25	0.3	0.3
SS-P□-D 2		DC 48(41~53 V)	0.25		0.5
SS-P□-D 3		DC 100/110(85~120 V)	0.25		1.0
SS-P□-D 5		DC 100/110(85~120 V)	0.25		1.3
SS-P□-D 6		AC 200(170~225 V)	0.20		2.4
SS-P□-D 7		AC 220(190~240 V)	0.20		2.6

注) 形名の□部分は裏面接線用ソケット付のとき“L”, 裏面接線用ソケット付のとき“F”, ソケット不要のときは記入しない。

[名古屋製作所]





# NEWS FLASH

## ■ 台車わく加工専用機用数値制御装置 MELDAS-4201 納入

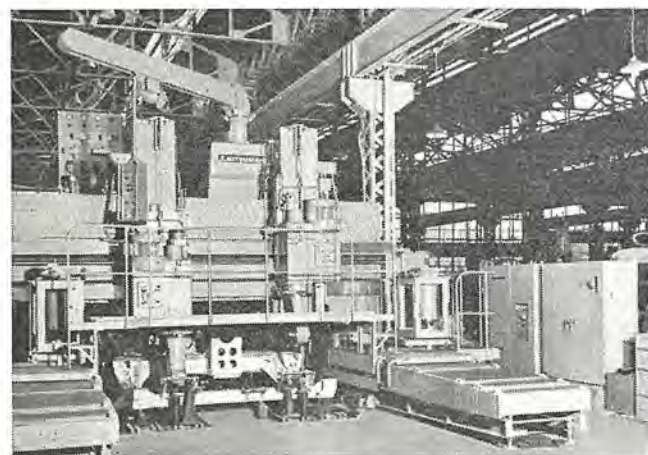
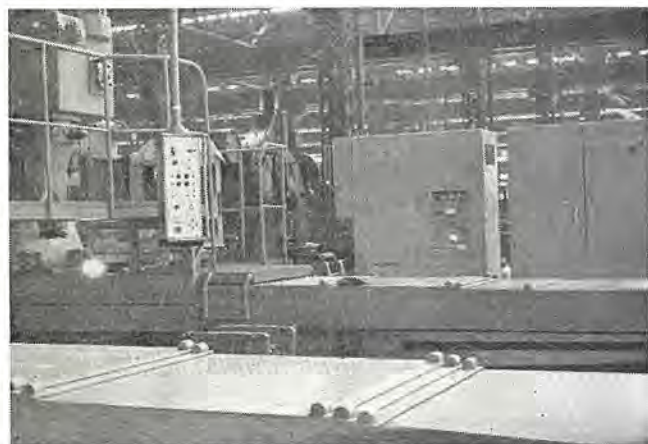
三菱重工株式会社広島精機製作所から、受注した台車わく加工専用機用数値制御装置 MELDAS-4201 の現地での総合組合せ試験を終わり実働にはいった。

この数値制御装置は最終的には東急車両製造株式会社に納入され、主として新幹線を含む各種電車の台車わくの加工に用いられるもので、専用機化した機械による加工能率向上とあいまって数値制御化により、従来の加工に対比して4.5～5倍の早さで加工ができる。

装置は機械の左右方向・前後方向・上下方向の位置決めおよび直線切削制御を行なうもので、2個のヘッドについて前後方向・上下方向にはそれぞれ同時2軸制御を行なっている。駆動系は直流モータと交流モータを和動手で結合したものを、早送りには両者併用、切削送りには直流モータを使用する方法をとっている。おもな特長および仕様は次のとおりである。

### (1) 特長

(a) レベルによるアナログ位置検出方式であるため、ノイズによる誤動作がなく、高精度の制御がおこなえる。



(b) 油圧駆動方式のように油圧配管や使用前の予熱の必要がなく、動作温度範囲も広い。

(c) 電源投入時に機械の位置ずれをおこさない自動誤差修正回路を内蔵しているため、休憩時間をはさむ長時間作業に有利である。

(d) 切削速度をテラで与えるので、作業による速度設定の必要がない。

### (2) 仕様

機械 ストローク :	9,000 mm (前後) × 2,800 mm (左右) × 750 mm (上下)
主軸用電動機 :	11 kW × 2 ヘッド
入力指令 :	8 単位紙 テラ (EIA 標準コード) ワードアドレス
座標方式 :	相対座標
制御軸数 :	指令 3 軸 (同時 1 軸) 駆動 5 軸 (同時 2 軸)
指令単位 :	0.01 mm
切削送り速度 :	30~400 mm/min インチング は 10 mm/min
位置決め速度 :	2,500 mm/min (前後) 1,250 mm/min (左右, 上下)
再現精度 :	±0.02 mm
駆動系 :	DCM 1.1 kW, ACM 3.7 kW
周囲温度範囲 :	0°C/40°C

(鎌倉製作所)

## ■ T. B. S. 方式配電盤用 広角度指示電気計器発売

指示電気計器の精度およびライフについては、在来の計器では、可動部軸のピロットおよび可動軸をささえる軸受の摩擦あるいは折損が weak point としてあげられており、種々改良されてきているが、9月から新らしく発売する T. B. S. 方式 (Taut Band Suspension system) の広角度計器は、可動部を2本の特殊金属性バンドでつった画期的な計器である。

可動部をバンドでつることにより、ピロット軸受を追放し、さらにバンドのツイストで在来の計器の制御ばねも不要となり、経年劣化および機械的損傷部分を取除くことができ、ライフは半永久的にまでもってゆくことができたわけである。

図2は、T. B. S. 機構の概要図であるが、バンドは張力ばねに与えられており、衝撃を吸収するのでバンドを損傷することなく、さらに過大な衝撃に対しても各方向にストップを設けてあるので、切斷





表 1 L-11 形計器仕様一覧

振れ角(度)	250						
目盛長(mm)	190						
防 殺	1.5 (周波数計は 0.1)						
種 類	形 名	動作原理	奥行寸法 A B	要付 抵抗器	定 格	付 属 品	
直 流 電 流 計	LM-11	永 久 磁 石 可動コイル形	94	—	500 $\mu$ A~50 A	・50 A を越える ものは分流器 ・リード線長さ未 定のばあいは T-3 形リード線 調整抵抗器	
直 流 電 圧 計	LM-11		94	—	500 V 以下	500 V を越えるも のは KR-1 形抵 抗器	
交 流 電 流 計	LS-11	可動鉄片形	94	—	75 A 以下		
	LR-11	整 流 器 形	94	—	100 mA 以下		
交 流 電 圧 計	LS-11	可動鉄片形	94	—	600 V 以下	600 V を越えるも のは KR-1 形抵 抗器	
	LR-11	整 流 器 形	94	—	500 V 以下	500 V を越えるも のは KR-1 形抵 抗器	
単 相 電 力 計	LP-11	永 久 磁 石 可動コイル形	139	—	無	RC-11 形変成装 置	
三 相 電 力 計	LP-11		139	—	無		
単相無効電力計	LP-11		139	—	無		
三相無効電力計	LP-11		139	—	無		
単 相 力 率 計	LD-11	電 流 力 計 比 率 計 形	121	158	有	220 V は KR-2 形抵抗器	
三 相 力 率 計	LD-11		121	158	有		
同 期 検 定 器	LI-11	誘 導 形	178	190	有	RC-11 形分相器	
周 波 数 計	LM-11	永 久 磁 石 可動コイル形	94	—	無	FC-2 形変換器	

力率計 同期検定器はピボット方式である。



図 1 LS-11 形交流電流計

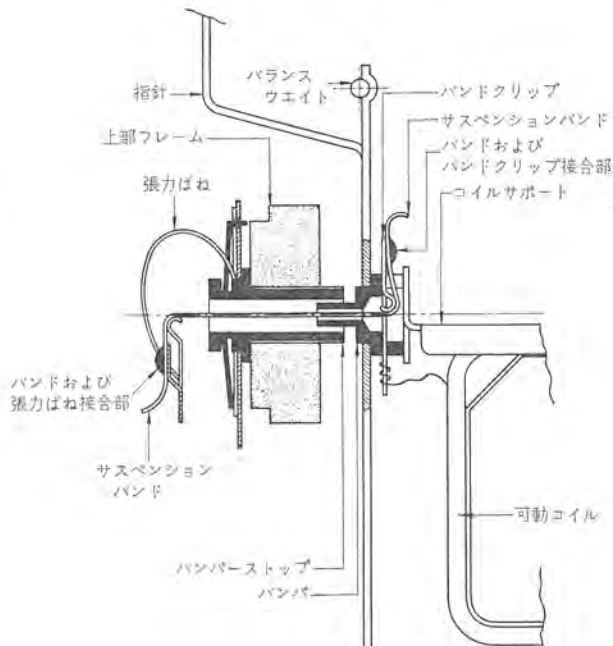
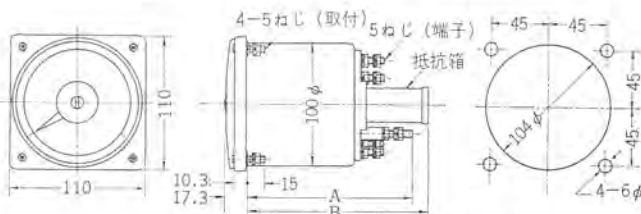


図 2 L-11 形計器 T.B.S. 機構



(注) 外形、取付寸法は現在の K-11 形計器と同一である。

図 3 L-11 形計器外形寸法

などのおそれはまったくない。

また摩擦がないので、特性劣化もなく感度が飛躍的に向上し、それに伴い種々の特性も大幅に改良された。

T.B.S. 方式の採用による大きなメリットとして、次のとおりあげることができる。

1. 寿命は半永久的
2. 振動衝撃に対する強度が大きい
3. 摩擦誤差は皆無である
4. 過負荷強度が大きい

5. 計器の感度が高く、消費 VA がわずかである

6. 指示の再現性がよい

7. 自己加熱の影響がほとんどない

なお広角度計器については、T.B.S. 化と同時にデザインを一新し、カバーは透明プラスチック製で一段と明るく読みやすい計器となり、一般配電盤用のほか船舶・車両用などくに振動・衝撃が問題となる使用分野において、その真価が発揮される。

仕様および外形寸法を表 1、図 3 に示す。

(福山製作所)

# 次号予定

三菱電機技報 Vol. 41. No. 11.

## 配電機器特集

### 《特別寄稿》

都市配電の今後の動向

### 《特集論文》

都市配電近代化の階層に関する考察

レギュラーネットワークとスポットネットワーク

三菱特高不燃式 20, 30 kV 閉鎖受電設備

最近のネットワーク変圧器

三菱配電盤用限流ヒューズとその応用

最近のネットワーク継電器

ノーヒューズしゃ断器とパンキングおよびネットワーク

最近の2次計測方式

最近の配電用変圧器

三菱配電用避雷器

真空しゃ断器の大電流しゃ断現象

### 《普通論文》

半導体素子の放射線効果とその応用

プログラム書きかえ問題へのCOBOLの応用

寒冷地向け車両用変圧器

kW級パルス進行波管

新形中容量SF<sub>6</sub>ガスしゃ断器

## 三菱電機技報編集委員会

委員長	小倉弘毅
副委員長	片岡高示
常任委員	明石石精一
"	石川理一
"	上田重夫
"	宇佐見重夫
"	大野寛孝
"	神崎遼
"	北川和人
"	小堀富次雄
"	鈴木正材
"	祖父江晴秋
"	山田栄一
委員	横山茂行
"	尾畑喜光
"	黒田忠光
"	南日達郎
"	林昇寿
"	松元雄蔵
"	和田義勝

(以上50音順)

昭和42年10月22日印刷 昭和42年10月25日発行  
「禁無断転載」定価1部 金100円(送料別)

### 編集兼発行人

東京都千代田区丸の内2丁目12番地

小倉弘毅

### 印刷所

東京都新宿区市谷加賀町1丁目

大日本印刷株式会社

### 印刷者

東京都新宿区市谷加賀町1丁目

高橋武夫

### 発行所

三菱電機株式会社内 「三菱電機技報社」

東京都千代田区丸の内2丁目12番地(三菱電機ビル内)

(電) 03-212-6111

### 発売元

東京都千代田区神田錦町3の1 株式会社オーム社書店

(電) 03-291-0912 振替東京 30018

## 本社・営業所・研究所・製作所・工場所在地

本 社 東京都千代田区丸の内2丁目12番地  
(三菱電機ビル) (電) 03-212-6111

大阪営業所	大阪市北区梅田町8・西阪神ビル(電) 06-312-1231
名古屋営業所	名古屋市中村区広井町3-88・大名古屋ビル(電) 052-561-5311
福岡営業所	福岡市天神2丁目12番地1号・天神ビル(電) 092-75-6231
札幌営業所	札幌市北二条西4の1・北海道ビル(電) 0122-26-9111
仙台営業所	仙台市大町4の175・新仙台ビル(電) 0222-21-1211
富山営業所	富山市桜木町1番29号・明治生命館(電) 0764-31-3151
広島営業所	広島市中町7番32号・日本生命ビル(電) 0822-47-5111
高松営業所	高松市鶴屋町5番地1(電) 0878-51-0001
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2丁目12番地・三菱電機ビル(電) 03-212-6111
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8の1(電) 06-314-1231
名古屋商品営業所	名古屋市中村区広井町3-88・大名古屋ビル(電) 052-561-5311
福岡商品営業所	福岡市天神2丁目12番地1号・天神ビル(電) 092-75-6231
札幌商品営業所	札幌市北二条西4の1・北海道ビル(電) 0122-26-9111
仙台商品営業所	仙台市大町4の175・新仙台ビル(電) 0222-21-1211
富山商品営業所	富山市桜木町1番29号・明治生命館(電) 0764-31-3151
広島商品営業所	広島市中町7番32号・日本生命ビル(電) 0822-47-5111
高松商品営業所	高松市鶴屋町5番地1(電) 0878-51-0001
新潟営業所	新潟市東大通1丁目12番地・北陸ビル(電) 0252-45-2151
中央家電営業所	東京都千代田区丸の内2丁目12番地・三菱電機ビル(電) 03-212-6111
城北家電営業所	東京都文京区大塚3丁目3番1号・新茗溪ビル(電) 03-944-6311
東家家電営業所	東京都世田谷区池尻3丁目10番3号(電) 03-411-8181
三菱電機世田谷ビル	
東京都杉並区清水1丁目10番1号(電) 0486-41-5324	43-4116・0156
横浜市中区富士見町3番地4(電) 045-251-2226	
大宮市寿能町1丁目37番地・大宮公園ビル(電) 0486-41-5324	43-4116・0156
千葉家電営業所	千葉市新宿町2丁目49番地・三菱電機千葉ビル(電) 0472-27-5486
静岡出張所	静岡市七間町9番地10・池田ビル(電) 0542-53-9186
長崎出張所	長崎市大黒町3番1号・長崎産業交通ビル(電) 0958-23-6101
岡山出張所	岡山市西長瀬字村北122番地の1(電) 0862-24-0331
船橋出張所	船橋市山手1丁目1番1号・日本建鉄内(電) 0474-31-1111
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地(電) 06-481-8021
商品研究所	鎌倉市大船2丁目14番40号(電) 0467-6-6111
神戸製作所	神戸市和田崎町3丁目10番地の1(電) 078-67-5041
伊丹製作所	尼崎市南清水字中野80番地(電) 06-481-8021
三田工場	三田市三輪町字父々部85(電) 07956-4371
長崎製作所	長崎市丸尾町6番14号(電) 0958-23-6211
稲沢製作所	稲沢市井之口1100番地(電) 0587-32-4121
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地(電) 0734-23-7231
鎌倉製作所	鎌倉市上町屋325番地(電) 0467-6-1111
通信機製作所	尼崎市南清水字中野80番地(電) 06-481-8021
北伊丹製作所	伊丹市大鹿字主ヶ池1番地(電) 0727-72-5131
熊本工場	熊本市竜田町弓削720番地の3(電) 096-22-1111
名古屋製作所	名古屋市中区矢田町18丁目1番地(電) 052-721-2111
福岡製作所	福岡市今宿青木690番地(電) 092-88-0431
岡山製作所	岡山市緑町1番8号(電) 0849-2-2800
姫路製作所	姫路市千代田町840番地(電) 0792-23-1251
相模製作所	相模原市小山字久保224(電) 0427-72-5131
世田谷工場	東京都世田谷区池尻3丁目1番15号(電) 03-414-8111
静岡製作所	静岡市小島110番地(電) 0542-85-1111
中津川製作所	中津川市駒場町1番3号(電) 05736-5-2121
大船製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号(電) 0467-6-6111
郡山製作所	郡山市栄町2番25号(電) 02492-2-1220
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地(電) 027652-4311
藤岡工場	藤岡市本郷字別所(電) 02742-2-1185
京都製作所	京都府乙訓郡長岡町大字馬場小学図所1(電) 075-92-4171
ラジオ工場	尼崎市南清水字中野80番地(電) 06-481-8021
札幌営業所	札幌市北二条東12丁目98番地(電) 0122-22-3976
札幌工場	