

MITSUBISHI DENKI GIHO 三菱電機技報

Vol. 43 March 1969

3

三菱重工業株式会社神戸造船所納め 非破壊検査用電子ライナック





目次

《普通論文》

四国電力(株)納め分水水系自動出力制御装置	田中鉄弥・対尾準三郎・片岡明孝・石井清隆	355
低周波ビレットヒータ	藤室雅司	363
低周波ビレットヒータ用変圧器	鶴田敏二・川島 亘	370
超々高圧ガスしゃ断器とその実用性能	瀬渡卓三・渡辺次男・大野 玲	376
三重県三瀬谷発電所長ヶ逆調整池のゲートおよびゲート制御装置	西島淳方・滝沢 博・持田雅夫・柳沢 忍・山田米造	383
ME-04 D 051 X 形 400 MHz 帯多重無線装置	一ノ瀬友次・小森千之・光高公一・岡村義一	396
水冷式パウダクラッチブレーキ	村田俊哉・車戸秀男・浅野哲正	400
水素炎イオン化検出法による自動車排気ガス中炭化水素濃度の連続測定	森川允弘・吾妻健国・平野重明	407
フォトクロミックプラスチックシート	太田基義・矢田俊雄・豊田裕康・山口久美子	416
ガスレーザとその応用	谷口一郎・樋口隆一・宮沢淑子・佐竹正章	424
滴下処理用絶縁ワニス (DRV) の特性	柴山恭一・鈴木康弘	436
ドリル樹脂成形品の性質	西崎俊一郎・古橋靖夫	442
厚板鋼板用点溶接機	山本利雄・奥田滝夫・馬場利彦・越智紀明	446
遅延列車の回復運転法	山崎英蔵・小畑 甫	454
極低温におけるオーステナイト系ステンレス鋼の機械的性質	小俣虎之助・平田郁之・菅原 宏	460
非破壊検査用電子ライナック“ML-15 R 形”の性能	源 進一・逢坂誠司・浦田和義・長井俊彦・秋葉稔光 入江浩一・鈴木敏允・上田孝寿・美濃和芳文・藤田彪太・上 富 勇・大林愛弘・光森弘之	465

《技術講座》

アナログ計算機のプログラミング (3) —各種の問題, 自動演算—	桑田 博・井塚秀弥・米谷光雄	472
-----------------------------------	----------------	-----

《新製品紹介》

ZKG-B 形マイクロパウダクラッチ・“PW-2000 形三菱脱水洗たく機(愛称 ABS 千山)” 発売・17 形直角画面の“17 TS-6700 形三菱ソリッドステートテレビ(愛称・桂)” 発売・三菱けい光灯器具“ルミフラワーシリーズ” 発売	481
--	-----

《ニュースフラッシュ》

「レーザ式座標測定装置」日刊工業新聞社 10 大新製品賞を受賞・“FT 800 A 形サイリスタおよび FD-1000 B 形シリコン整流素子”を開発・画期的な電着絶縁電線 (MEDIS 電線) の開発に成功・アブセッタ用全自動バーエンドヒータ完成・世界最大容量の鹿島電解向けサイリスタ整流装置を受注	485
--	-----

《表紙》

三菱 ML-15 R 形非破壊検査用電子ライナック

電子ライナックは、高エネルギーで大線量率の X 線を発生することができ、これを用いて、厚い金属構造物の非破壊検査が短時間にできる。三菱非破壊検査用電子ライナック ML-15 R は、従来用いられてきたコバルト 60 やベータトロンに代わるものであって、そのおもな性能は、エネルギー 12 MeV (常時使用)、平坦化された X 線出力 10~2,000 R/min/m 連続可変、照射野は FFD 1 m で 400 mmφ、フィルム濃度 85 % 以内、X 線焦点 2 mmφ、鋼板 80 mm では、欠陥検出度 1 % の能力がある。また 1,000 R/min/m の出力、FFD 3.0 m、鋼板厚さ 350 mm、サクラ RR 形フィルム、濃度 2.5 に対し、露出時間は 20 分である。

本体は移動機によって、前後 6 m、左右 14 m、上下 6 m の移動が可能で、水平回転 ±90°、垂直回転 120° も可能である。





CONTENTS

TECHNICAL PAPERS

Automatic Power Control Equipment for Bunsui River Power Station Group of Shikoku Electric Power CompanyT. Tanaka • J. Tsushio • M. Kataoka • K. Ishii...	355
Low Frequency Billet Heaters.....M. Fujimuro...	363
Transformers for Low Frequency Induction Billet Heaters.....K. Tsuruta • W. Kawashima...	370
500 kV SF ₆ Gas Circuit Breakers and Their Practical Performance.....T. Seto • T. Watanabe • A. Ôno...	376
Gate and Gate Control Equipment for Misedani Nagake Secondary Regulating Pond in Mie PrefectureA. Nishijima • H. Takizawa • M. Mochida • S. Yanagizawa • Y. Yamada...	383
Type ME-04 D 051 X, 400 MHz Band Radio Equipment for Multiplex CommunicationT. Ichinose • C. Komori • K. Mitsutaka • Y. Okamura...	396
Water Cooled Powder Clutches and Brakes.....T. Murata • H. Kurumado • T. Asano...	400
Hydrogen Flame Ionization Detector for Continuous Measurement of Auto-Exhaust Hydrocarbon EmissionsM. Morikawa • K. Azuma • S. Hirano...	407
Photochromic Plastic Sheet.....M. Ohta • T. Yada • H. Toyoda • K. Yamaguchi...	416
Gas Lasers and Their Applications.....I. Taniguchi • T. Higuchi • T. Miyazawa • M. Satake...	424
Properties of New Insulating Varnishes Designed for Drip Method.....K. Shibayama • Y. Suzuki...	436
Properties of Doryl Resin Molds.....S. Nishizaki • Y. Furuhashi...	442
A Spot Welder for Heavy Gage Steel.....T. Yamamoto • T. Okuda • T. Baba • T. Ochi...	446
Schedule Adjustment for Transit System.....E. Yamazaki • H. Obata...	454
Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel at Low Temperatures.....T. Komata • I. Hirata • H. Sugahara...	460
Some Characteristics of Electron Linac for Non-Destructive Inspection "Model ML-15 R"S. Minamoto • S. Ôsaka • K. Urata • T. Nagai • T. Akiba • K. Irie • T. Suzuki K. Ueda • Y. Minowa • H. Fujita • I. Uetomi • Y. Ôbayashi • H. Mitsumori...	465

TECHNICAL LECTURE

Programming of Analog Computers (3).....H. Kuwata • S. Izuka • M. Yonetani...	472
---	-----

NEW PRODUCTS.....	481
-------------------	-----

NEWS FLASH.....	485
-----------------	-----

Mitsubishi Electron Linear Accelerator ML-15 R for Non-Destructive Inspection

X-ray of a very high intensity and energy can be produced by means of an electron linear accelerator, which makes possible the non-destructive inspection of thick metal objects with a relatively short exposure time.

Mitsubishi electron linear accelerator ML-15 R for non-destructive inspection, which will be intended to take the place of usual cobalt 60 or betatrons, has the following features : electron energy is 12 MeV, flattened X-ray intensity is continuously variable from 10 to 2,000 R/min/m, radiation field is 400 mm in diameter at 1 m FFD, film density difference in the field is less than 15 %, X-ray source size is 2 mm diameter, and sensitivity of flaw detection is better than 1 % with steel plate thicker than 80 mm. Exposure time is only 20 minutes when X-ray intensity is 1,000 R/min/m, FFD is 3 m, thickness of steel is 350 mm, a film is SAKURA type RR and film density is 2.5.

The accelerator unit is movable for the convenience of inspection of large objects, in the following range : 6 m laterally 14 m longitudinally, 6 m vertically, $\pm 90^\circ$ horizontal rotation, and 120° vertical rotation.

UDC 621.316.728

四国電力株式会社納め分水水系自動出力制御装置

田中鉄弥・対尾準三郎・片岡明孝・石井清隆

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P355~362

水力発電所の運転・制御に関しては、古くから自動化が進められてきたが、最近ではエレクトロニクスの飛躍的な進歩、水力地帯住民の過疎化によるべき地対策の推進、将来の労働力不足対策ならびに運転・保守の合理化などの要因から、水系一貫制御が大きくクローズアップされてきた。本文では以上の観点から四国電力株式会社分水水系（長沢発電所および分水第二発電所）に設置し、満足な運転結果を得た出力制御装置についてとくに次の点に重点をおき述べる。

本装置計画のいきさつ、設計上の問題点、デジタル計算機を用いた装置安定性の解析、解析結果と現 〇 地試験との比較、今後に残された水系一貫制御完成への問題点など。

UDC 627.83

三重県三瀬谷発電所長ヶ逆調整池のゲート

およびゲート制御装置

西島淳方・滝沢 博・持田雅夫・柳沢 忍・山田米造

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P383~395

宮川総合開発事業の一環として、三瀬谷発電所が建設されたが、この発電所は、せん（尖）頭負荷発電所であり、下流の農業用水・河川漁業に支障をきたす発電所の発電放流をもとの自然放流に調整するために、長ヶ逆調整池が設置された。

この逆調整池では、ゲートによる放流量制御を行なうが、大形起伏ゲートの採用、アナログ計算機による定放流制御、遠方制御による無人化など種々の特長を有するので、ここにその 〇 ゲートとゲート制御装置の概要を紹介する。

UDC 621.365.5.018

低周波ビレットヒータ

藤室雅司

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P363~369

低周波ビレットヒータはアルミビレット押出し用のほかに、特殊鋼・普通鋼の鋼管製造用の加熱装置として利用されている。本文ではこれらビレットヒータの機器構成、加熱コイルの立て形・横形の問題、加熱特性と温度分布、こう配加熱と均一加熱、さらにビレットヒータの機械的電気的な問題点と最近のヒータの改良内容にふれ、最後に誘導加熱とガス炉との経済比較について述べた。



UDC 621.396.4

ME-04D051X形 400MHz帯多重無線装置

一ノ瀬友次・小森千之・光高公一・岡村義一

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P396~399

400MHz帯における電波需要は急増の一途をたどり、もはや飽和の域に達した感がある。従来この周波数帯における多重のセパレーションは200kHzであるが、通話路数と占有帯域幅の関係を再考してこれをさらにせめれば電波割当の面から非常に有利である。当社ではこのような趣旨により占有帯域幅を80kHzとし、100kHzセパレーションが可能なME-04D051X形400MHz帯多重送受信装置を開発、実用化した。本機は建設省仕様準拠しており、SS-1M、5W、最大通話容量5CHの搬送端局装置を内蔵し、さらに信号中継装置を実装すれば完全な電話回線が 〇 構成できる。

UDC 621.314.2

低周波ビレットヒータ用変圧器

鶴田敏二・川島 亘

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P370~375

低周波ビレットヒータ用変圧器として、当社独特の外鉄形フォームフィット構造の採用とさらに特殊な設計を加えて、従来の変圧器に比べ、格段に小形・軽量の変圧器が開発され、十分な実績をもとにして標準化が行なわれた。

このビレットヒータ用標準変圧器は加熱装置によくマッチし、取扱いが簡単でさらに信頼性が高く、加熱装置に内蔵する変圧器としては最適といえる。



UDC 621.839

水冷式パウダクラッチ ブレーキ

村田俊哉・車戸秀男・浅野哲正

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P400~406

パウダクラッチ ブレーキは電磁式クラッチ ブレーキの一種であるが、トルク制御が容易で、熱容量が大きく連続スリップで使用できるなど、従来の摩擦板式のものでは得られない、特性をもっている。今回さらに応用範囲を拡張するため、熱容量を大きくした水冷式パウダクラッチ ブレーキを開発完了した。

ここではその構造、水冷式採用の意義とその特長、トルク特性、温度特性、許容連続スリップ仕事量、使用上の注意、張力制御を中心とした応用例について説明する。



UDC 621.316.57

超々高圧ガスしゃ断器とその実用性能

瀬渡卓三・渡辺次男・大野 玲

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P376~382

わが国においても500kV送電の実施を目前に控える時期に至ったので、500kVガスしゃ断器を試作し各種試験を実施した。500kVガスしゃ断の構造、動作、電気的性能とともに、とくにその機種的重要性から注目されている実用性能について紹介している。投入抵抗方式の実用系統における投入試験、実体の加振による耐震試験、北海道における耐寒実証試験を含む各種試験結果ならびにSF₆ガス中の水分管理、ガス漏れの管理についての検討結果等をのべている。



UDC 543.08:621.43.019:547.21:547.31

水素炎イオン化検出法による

自動車排気ガス中炭化水素濃度の連続測定

森川 允弘・吾妻健国・平野重明

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P407~415

自動車排気ガス中の全炭化水素濃度測定用に、水素炎イオン化検出器(FID)を試作した。その特性として、応答が速く、種々の炭化水素に対して感度が一定で、分解能や直線的検出能のすぐれたものが得られた。FIDの有用性を示す例として、本測定装置と市販の非分散形赤外線分析計(自動車排気ガス測定用)を用いて、JISモード走行時および特定のエンジン条件下での炭化水素放出量の測定をした。両測定器を併用することにより、公害対策上重要な不飽和炭化水素の放出量を減少 〇 させるためのエンジン状態、エンジン部品条件を見出すことができる。

UDC 541.6:678.54:677.84

フォトクロミックプラスチックシート

太田基義・矢田俊雄・豊田裕康・山口久美子

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P416~423

最近、フォトクロミズムの応用研究が盛んになり、いろいろな面に利用されはじめてきた。フォトクロミズムを示す物質は無機化合物、有機化合物とも数多くみうけられるが、応答速度が速い、色調が選べるなどの特長をもつ有機化合物がよく研究され、利用されているようである。

筆者らは、有機フォトクロミック物質をもちい、成形加工に有利なプラスチックシート基材に染色法による導入法を検討し、実用可能なフォトクロミックプラスチックシートの製作に成功した。

この報告書はその実験結果をまとめたものである。

UDC 621.791.76

厚板鋼板用点溶接機

山本利雄・奥田滝夫・馬場利彦・越智紀明

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P446~453

板厚6mm以上の鋼板を溶接する厚板鋼板用点溶接機を試作した。最初に、この溶接機の電源方式、仕様およびシーケンスについて述べる。次にこの溶接機を用いて軟鋼板を溶接し、溶接電流、加圧力、通電時間、保持時間および溶接ビッチがナゲット形状、溶接強度におよぼす影響について検討し、厚板鋼板の推奨点溶接条件を求めた。第3に点溶接継手の機械的性質について述べた。

実験の結果、この溶接機により25mmまでの軟鋼板は良好な点溶接が行なえることが明らかとなった。

UDC 535:535.35:535.89:537.525:681.41

ガスレーザとその応用

谷口一郎・樋口隆一・宮沢淑子・佐竹正章

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P424~435

ガスレーザの発展は目ざましくすでに数多くの装置が世界中で製品化されているが、実用装置としてはまだ完成されたものとは言えず改良すべき点が多い。

本報告は開発したヘリウム・ネオンガスレーザ、アルゴンイオンレーザおよび炭酸ガスレーザの構成、レーザ出力特性、技術的問題点および簡単な応用例について述べたものであり、ガスレーザ応用機器開発の参考に供した。

UDC 656.222.04:656.25

遅延列車の回復運転法

山崎英蔵・小畑 甫

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P454~459

列車運転の自動化機器の性能は、近年とみに向上し、その研究はほぼ完成の域に到達しつつある。今後の課題は総合化の研究にあり、世界的な勢として列車運転の中央制御に関する研究が種々検討されている。中央制御の目的はシステムマディックに輸送系の運転を最適にしようとするもので、輸送計画、運転乱れの防止、運転遅れの早期回復、運転情報・指令の自動化、だけでなく列車間制御から個々の列車制御まで計算機により制御しようとするものである。

本論文では中央制御の一問題点である遅延列車の回復に関する問題を列車群としての観点より論じており、高密度化した列車運転系の混乱を最小にとどめることを目的としている。

UDC 621.315:678.643.'42'5

滴下処理用絶縁ワニス(DRV)の特性

柴山恭一・鈴木康弘

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P436~441

小形～中形回転機のワニス処理として登場した滴下含浸法は、今までのワニス処理法と比べて工程を著しく短縮することが可能であり、大きな脚光をあびている。滴下法に用いられるワニスとして必要な性質は速硬化性であり、含浸性が良好で、硬化後はすぐれた電気的・機械的性質を保持すること、さらに安価であることなどが要求される。当社は最近滴下用ワニスとして特別に設計した一連の無溶剤ワニス(DRV)を開発した。この報告ではDRVワニスの開発に対する考え方とそのすぐれた性能について紹介する。

UDC 537.312.62

極低温におけるオーステナイト系ステンレス鋼の機械的性質

小俣虎之助・平田郁之・菅原 宏

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P460~464

MHD用大形超電導マグネットではその構造材に巨大な電磁力が加わるために材料の選択に十分な注意が必要である。構造材としては低温ぜい(脆)性の起こらないアルミ合金、チタン合金、オーステナイト系ステンレス鋼が使用されるが、これらの極低温での機械的性質に関するデータは少ない。われわれは国内で市販されているオーステナイト系ステンレス鋼の機械的性質について検討した。SUS27はマルテンサイト変態をおこしやすいので注意が必要である。SUS27とSUS32は溶接後熱処理を行えば母材と変わらない強度が得られるが、SUS42とSUS42Hの溶接強度は母材に比べてかなり劣る。

UDC 621.315.61

ドリル樹脂成形品の性質

西崎俊一郎・古橋靖夫

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P442~445

ドリル樹脂はHクラス電気絶縁材料として開発された新しい耐熱性ポリマーである。ドリル樹脂は機械的強度の熱安定性よく、高温における接合強度もよく、また化学薬品や溶剤に対してもよく耐える。ドリル樹脂成形品は新たにドリルワニスとガラス繊維またはアスベスト繊維より開発した。これら成形品は高温絶縁材料としてすぐれた性質をもっていることを明らかにした。

UDC 621.039.526:620.179.1

非破壊検査用電子ライナック“ML-15R形”の性能

源 進一・逢坂誠司・浦田和義・長井俊彦・秋葉稔光・入江浩一・鈴木敏允・上田孝寿・美濃和芳文・藤田彰太・上富 勇・大林愛弘・光森弘之

三菱電機技報 Vol.43・No.3・P465~471

電子ライナックを用いた非破壊検査装置について、設計および性能の試験結果の報告である。ライナックは、マイクロ波電力源として、尖頭出力5MWのクライストロンが用いられており、本体部の全長は約3mである。本体部は、前後左右上下方向の移動とともに水平面・垂直面内での回転も可能である。電子線出力のエネルギーは12MeVで、X線出力は2000R/min・mから10R/min・mの広範囲に連続可変である。焦点の大きさは2mm以下で、80mmから400mm鋼板で、欠陥識別率1%以下が得られており、350mm鋼板でも露出時間は10分以下で可能である。装置の性能のほか、ラジオグラフィの性能についての試験結果が報告されている。

UDC 681. 33. 06

アナログ計算機のプログラミング (3)

—各種の問題，自動演算—

桑田 博・井塚秀弥・米谷光雄

三菱電機技報 Vol. 43・No. 3・P472～479

第3回では，前回および前々回で紹介された微分方程式・伝達関数の解法以外に，アナログ計算機で解ける種々の問題のうち代表的なものの解法を紹介しまた最適値問題などの解法に用いられる自動演算について，その機能・解法の手法を説明する。



四国電力株式会社納め分水水系自動出力制御装置

田中 鉄弥*・対尾準三郎*・片岡 明孝*
石井 清隆**

Automatic Power Control Equipment for Bunsui River Power Station Group of Shikoku Electric Power Company

Shikoku Electric Power Co., Inc. Tetsuya TANAKA・Junzaburo TSUSHIO・Meiko KATAOKA
Mitsubishi Electric Corp., Kobe Works Kiyotaka ISHII

In connection with the operation and control of hydraulic power stations, their automatization has been proceeded for a long time. Because of rapid progress of electronics of late, of promotion of countermeasures for the decrease of the population around the site of water power development, of means to cope with the labor shortage in future and of rationalization of the operation and maintenance, the group control of the hydraulic power stations constructed alongside the river has been in the limelight.

The article describes, from the above viewpoint, the power control equipment installed in Nagasawa power station and Bunsui Power Station No. 2 of the Shikoku Electric Power Co. and operated successfully, the following is the main items of this report: details of the planning of the equipment, problems on the design, simulate analysis of the stability of the equipment using a digital computer, comparison between analyzed results and field tests and problems of the group control of the power stations left for future.

1. ま え が き

水力発電所の運転・制御については、古くから自動化が進められてきたが、従来は主として発電所の自動化または無人化がその大半であった。ところが、最近のエレクトロニクスの飛躍的な進歩とともに、社会構造の変化とくに水力地帯住民の過疎化による生活環境の悪化に対するべき地対策の推進、将来の労働力不足対策、ならびに運転保守の合理化による経費節減などの諸要因がからみ、従来手をつけていなかった水系の一貫制御が大きくクローズアップされてきた。

本文では以上の観点から計画・設計・製作され四国電力株式会社長沢発電所（以下長沢 PS という）および分水第二発電所（以下分

二 PS という）に設置した出力制御装置について述べる。

2. 計 画 概 要

まえがきに述べた水系一貫制御の対象水系として、四国電力では水路系が複雑で、かつ運転技術が必要とする分水系を選んだ。分水水系発電所の配置関係ならびに各発電所の自動化の推移を、おのお

表 2.1 分水水系発電所の自動化推移
Development of automatic modification for
Bunsui river power station group.

発電所名	認可出力 (kW)	水車台数	自 動 化 推 移
長 沢	5,000	1	昭 24 運転開始 (1人制御方式) 昭 31 遠方監視制御化 (制御所分一 PS) 昭 42 出力制御装置新設
大 森 川	11,800	1	昭 34 運転開始 (遠方監視制御方式 一制御所分一 PS 用)
分水第一	26,600	3	昭 15 運転開始 (1人制御方式) 昭 42 結合運転装置新設 昭 42 出力制御装置新設 (長沢 PS 用) 昭 43 出力制御装置新設 (分二 PS 用)
分水第二	7,500	2	昭 16 運転開始 (1人制御方式) 昭 43 遠方監視制御化 (制御所分一 PS) 昭 43 出力制御装置新設
分水第三	10,900	2	昭 16 運転開始 (1人制御方式)
分水第四	6,800	1	昭 25 運転開始 (1人制御方式) 昭 29 遠方監視制御化 (制御所分三 PS)
大 橋	5,300	1	昭 14 運転開始 (1人制御方式) 昭 34 プログラムコントロール化

□ 部分は本稿関連工事を示す。



図 2.1 分水水系発電所配置図
Power station arrangement of the Bunsui river.

の図2.1および表2.1に示す。

分水系の水の運用は、主として最上流の長沢 PS の放流量を分水第一発電所（以下分一 PS という）が使用し、以下、下流の分二 PS、分水第三発電所および分水第四発電所は、おのおのわずかの溪流取り入れはあるが、発電の大半を分一 PS の放流量に依存する直列水系発電所群である。したがって各発電所とも上流の発電所の出力や取水水位を電話により連絡を受け、運転員はそれらの値に見合う水量となるよう、かつ水そう水位を監視しながら出力調整を行ってきた。

水系一貫制御の第一段階として昭和41年度に最上流の長沢 PS～分一 PS 間の水系制御を計画し、分一 PS の要求出力を基準に長沢 PS の出力を自動的に制御する装置を据え付けた。これと同時に分一 PS の出力制御を容易にするため、分一 PS の発電機3台の結合運転装置を据え付けた。これらの装置はいずれも昭和42年3月に運転を開始した。なお長沢 PS はすでに分一 PS より遠方監視制御を行っていたので、上述の長沢 PS の出力制御装置を設置の際には既設遠方監視制御装置を一部改造して使用した。

長沢 PS の出力制御装置の完成に引き続き四国電力では、第二段階として昭和42年度に分一 PS の下流にあり複雑な水路系を有する分二 PS の無人化（出力制御装置ならびに遠方監視制御装置）を計画・施行した。

3. 長沢発電所自動出力制御装置

長沢 PS～分一 PS 間の水路構成を図3.1に示す。

吉野川ダムは調整容量が小さく、水路の中間にある大森川ダムへの流入量がほとんどないため、上流の長沢 PS で放流した水量とほとんど同じ水量を分一 PS で使用しなければならない。しかし、上記のとおり吉野川ダムの調整容量の不足、および流下時間遅れ（長



図3.1 長沢～分水第一発電所間水路図
Hydrographic sketch between Nagasawa and Bunsui power station No. 1.

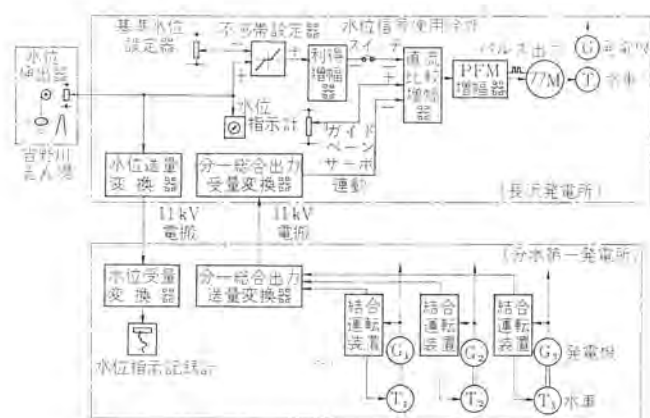


図3.2 長沢発電所出力制御装置ブロック図
Block diagram of automatic power control equipment for Nagasawa power station.

沢 PS～吉野川ダム間約20分)のために運転条件によっては、吉野川ダムよりのいつ(溢)流とか大森川ダム取水口より空気を吸入する可能性がある。そのために図3.2に示すとおり長沢 PS の出力制御装置には、分一 PS 総合出力信号のほか吉野川ダム水位信号を考慮し、水位信号により出力信号を補正する方式をとった。

なお水位信号での補正方法もいろいろ考えられたが、デジタル計算機を使用し検討の結果、吉野川ダム水位の設定水位に対する変化量で補正するのが最もよいことが判明したので、この方式を採用した。

この装置設置の結果以前に行っていた運転員の手動制御に比べて、安定した応答度の早い制御ができ、しかも安全な運転が可能になった。また本制御装置の完成により分一 PS～分二 PS 間の出力制御装置実現の可能性ができた。

4. 分水第二発電所自動出力制御装置

4.1 設計方針

分二 PS は図4.1に示すように水路構造が複雑であるために、普通の水位調整装置を採用することが困難であり、出力制御方式の技術的可能性を従来より種々検討を進めてきたが、上記の長沢 PS～分一 PS 間の出力制御装置の運転実績により、具体化が可能であるとの結論に達した。

分二 PS 出力制御装置計画上の要求事項としては、分二 PS の水路系にはほとんど調整容量がないため下記(1)～(4)の、またそのほか(5)などの多くの条件があった。

(1) 制御系が安定でかつ応答度がよく分一 PS の出力変動にすみやかに追従すること

(2) 保安面より、分一 PS においていかなる出力変化があっても分二 PS サージタンク、および中間水そうで生じるダウンサージが危険水位以下に低下しないこと

(3) 運転面では、負荷変化時に分一 PS の放水庭からのいつ(溢)水を生ぜず、かつ分二 PS のサージタンク水位が各負荷に応じた目標水位付近で安定すること

(4) 分二 PS の出力値によりサージタンクの安定水位を変え、負荷急変にそなえて安定な水位を保つこと

(5) 分二 PS の発電機が2台並列運転しているときは、2台の負荷の平衡を取ること。なお将来は出力指令値により2台目の発電機の起動停止を自動的に行なえる回路を考慮しておくこと

これらのうちでとくに問題となるのは、サージタンク水位をどのように制御系に取り入れるかという点である。図4.1のような水路系では分一 PS の放流量（枝川・安望谷溪流量を含む）と分二 PS 使用水量を等しくなるような制御系を構成すれば、制御系が安定したときには、途中の各水そうの水位は一定値となり変化することはない。

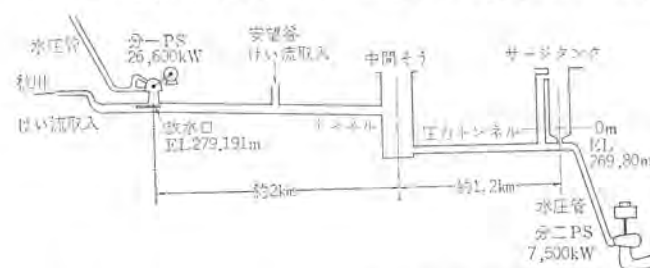


図4.1 分水第一～分水第二発電所間水路図
Hydrographic sketch between Bunsui power station No. 1 and No. 2.

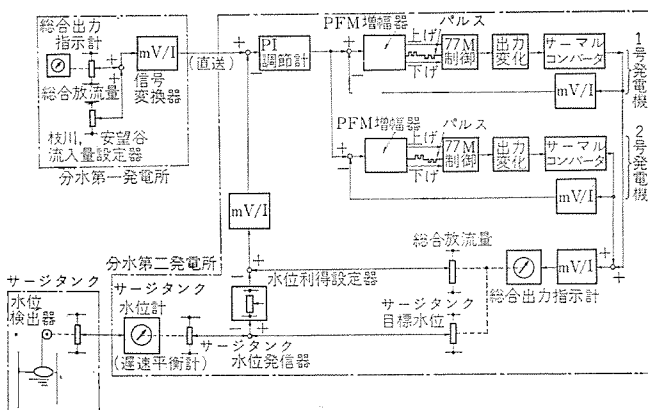


図 4.2 分水第二発電所出力調整装置ブロック図
Block diagram of automatic power control equipment
for Bunsui power station No. 2.

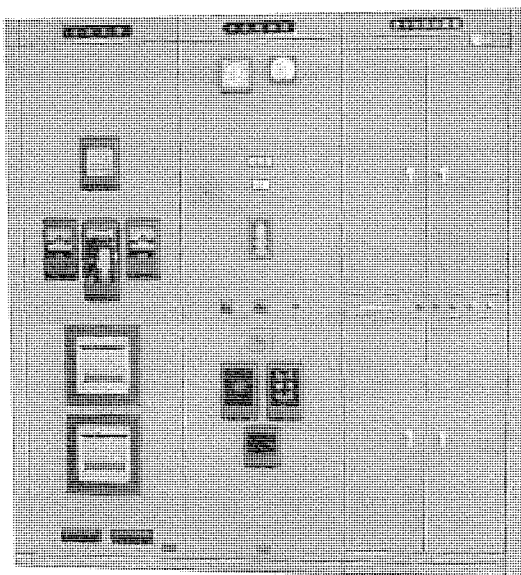


図 4.3 出力制御盤 (中央)
Switchboard for automatic power control (center).

い。したがって、このような水路系ではサージタンク水位を補助的な信号として加え制御系を構成することにした。なおサージタンク水位を比例制御 (P 制御) のみとして取り扱えば必ず水位にオフセットが残るため、積分制御 (I 制御) を取り入れ PI 制御系とした。

4.2 回路構成

(1) 基本回路

図 4.2 に分二 PS 出力制御装置のブロック図を、図 4.3 に装置の外観写真を示す。

信号比較回路は最終的にはすべて流量 (m^3/s) に換算して行なった。すなわち図 4.2 のごとく分一 PS 放流量と枝川・安曇谷流入量の和を分二 PS への放流指令量として分一 PS より信号を伝送する。分二 PS ではこの信号を PI 調節計で受ける。一方 PI 調節計には分二 PS の総合流量信号 (サージタンク水位で補正したもの) がフィードバックされているので、これらの信号の偏差が 0 となるように PI 調節計が動作する。

PI 調節計の出力は各発電機用の PFM 増幅器 (動作の詳細は後述) の入力として与えられる。PFM 増幅器にはマイナーループのフィードバックをかけているので、発電機出力が PI 調節計が指定した出力になるまで PFM 増幅器は動作を続け、入力信号に応じたパルス出力を出し、負荷制限用操作電動機 (77 M) を制御することにより発電機出力を制御する。

(2) 水位補正回路

水路系の安定した運用をし、しかも分二 PS 総合出力の応答を早くしてもサージタンク水位変動が危険水位とならないように、サージタンク目標水位は分二 PS 総合出力に応じて自動的に変え、目標水位とサージタンク水位との偏差信号を、(1) に述べた基本回路に追加した。負荷急増・急減の際にはサージタンク水位の変動は非常に大きくなるため、水位偏差信号も大きくなり、そのまま (1) の基本回路に加えると制御系が不安定となる。そのため水位の急激な変動に対しては緩慢に応動し、水位のゆるやかな変化に対しては、そのまま追従する水位発信機を採用する必要がある。この目的のために後述のごとく、非常に平衡速度のおそい自動平衡形指示計を使用した。(詳細は 4.3 節 (2) 参照)

(3) 負荷平衡回路

比例制御 (P 制御) のみの比較器では、入力偏差が 0 になれば出力信号も必ず 0 になるが、積分要素を持った比較器 (PI 制御) では、入力偏差が 0 になった場合には、出力信号は入力指令値に制御対象を保持する信号を出す。この特性に着目し、分二 PS への放流指令値を PI 調節計の入力とし、分二 PS 総合使用流量 (サージタンク水位で補正したもの) をフィードバック信号としている。したがってこれらの偏差が 0 になった場合には、PI 調節計の出力は分二 PS 放流指令値に保たれる。したがってこの出力信号を 1 号機および 2 号機用の PFM 増幅器への入力信号とすれば、各 PFM 増幅器には同一の制御指令を与えることができる。すなわち 2 台の発電機に同一指令を与えたことになるので、PFM 増幅器のフィードバック信号として各発電機の出力値を用いれば、2 台の発電機出力を等しくすることができる。

4.3 構成機器

本装置の構成機器のうち特殊なものについて述べる。

(1) PFM 増幅器

一般に自動制御系においては制御対象を目標値に維持するために、制御対象の現在値と目標値との偏差を増幅し、操作部にパワーを供給する増幅器を必要とする。

この増幅器は普通は連続した出力を出すものでよいが、操作部の種類によっては (たとえば操作用電動機) いわゆる ON-OFF 制御を行なったほうが、精度の向上、動作の確実などを期待することができる。ところが、単なる ON-OFF 動作では良好な制御は行なえず、なんらかの方法で増幅器の ON-OFF 出力の偏差の大きさに関連づける必要が生じる。PFM 増幅器は双安定増幅器とトランジスタ NOR 回路からなり、連続した入力から偏差に応じてパルス間隔を変えるパルス周波数変調方式を採用している。

すなわち、PFM 増幅器のパルス幅は入力のいかにかわらず一定であるが、パルス間隔は入力の偏差が大ききときには短かく、偏差が小さいときには長くなるように設計してある。このためパルス変調したあとも、比例制御の特長は失なわれず、偏差に応じた操作量を電動機に与えることができ、電動機たとえば (水力発電所の負荷制限用電動機) の制御に最適な増幅器である。

PFM 増幅器のおもな性能は下記のとおり。

入 力	DC 4~20 mA または 0~±10 V
出 力	パルス幅 0.1~1.0 秒 可調整
	パルス間隔 0.1~1.0 秒 可調整 (高ゲイン用)
	3.0~20.0 秒 可調整 (低ゲイン用)
(ただし上記数値は入力が 20 mA または ±10 V のときの)	



図 4.4 PFM 増幅器
PFM amplifier.



図 4.5 遅速自動平衡形指示計
Self-balancing indicator with slow balance speed.

パルス間隔であり、入力が小さくなればパルス間隔は長くなる)

図 4.4 に外観写真を示す。

(2) 遅速自動平衡形指示計

水位の緩慢な変化にはそのまま追従し、急激な変化にはゆっくりした動きをする信号変換器を必要としたため開発した製品である。したがって図 4.2 のようにサージタンク水位を制御信号として使用するような場合に適した機器である。

遅速自動平衡形指示計のおもな性能は下記のとおり。

入 力 DC 4~20 mA または 0~10 mV
平衡速度 フルスケール 8, 16, 32 分 (3 段切替)
指示目盛板 な し

図 4.5 に外観写真を示す。

4.4 保護装置

保護装置として下記のものを設けこれらが動作した場合には、警報を発するとともに出力制御装置を除外する。

- (a) 信号伝送路の断線検出
- (b) 装置動作渋滞
- (c) 装置電源喪失

4.5 安定性解析

(1) 必要性

図 4.1 に示すように分一 PS~分二 PS 間の水路系にはサージタンクおよび中間水そうを有し、しかも分一 PS 放水庭~中間水そう間は水量により無圧にも有圧にもなるトンネルである。しかも 4.2 節(1)に述べた条件をすべて満足しなければならないので、装置製作に先だち図 4.2 のブロック図を使用して、分一 PS のあらゆる負荷変動に対して安定に動作するかどうかを検討する必要がある。

とくに図 4.2 に使用している PI 調節計の各ゲイン、PFM 増幅器のパルス幅、パルス間隔、水位利得設定器のゲイン、遅速平衡形指示計の平衡速度をどのように設定すれば制御系が安定するかを検討する必要がある。これらの検討には三菱電機が開発したデジタル計算機を使用したブロック線図のデジタルシミュレーションプログラムシステム(略称

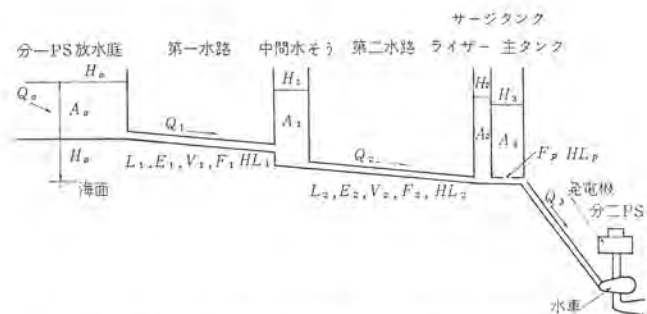


図 4.6 分水第一~分水第二発電所間水路略図
Rough hydrographic sketch between Bunsui power station No. 1 and No. 2.

BACS) を使用した。

(2) 理論式

この解析では水位変動に対しては最も過酷となる条件として、分一 PS 放水庭~中間水そう間は有圧トンネルであるものとして計算を行なった。

図 4.6 の水路系について下記各式が成りたつ。

連続の方程式より

$$A_0 \frac{dH_0}{dt} = Q_0 - Q_1 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = Q_1 - Q_2 \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} + A_3 \frac{dH_3}{dt} = Q_2 - Q_3 \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

一方運動方程式より

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{g}{L_1} \{ (H_0 \mp K_1 V_1^2) - H_1 \} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{g}{L_2} \{ (H_1 \mp K_2 V_2^2) - H_2 \} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

(注) $K_1 V_1^2$, $K_2 V_2^2$ の前の \mp の符号は下記のとおりとする

- : V_1 , V_2 が図 4.5 の矢印の方向のとき
- + : V_1 , V_2 が図 4.5 の矢印と反対方向のとき

サージタンク 制水口において

$$\frac{dH_3}{dt} = \pm K_S \sqrt{H_2 - H_3} \quad \left(\begin{array}{l} + : H_2 \geq H_3 \text{ のとき} \\ - : H_2 < H_3 \text{ のとき} \end{array} \right) \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

その他下記の式が成りたつ

$$Q_1 = F_1 V_1 \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

$$Q_2 = F_2 V_2 \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

$$K_S = \alpha \sqrt{2g} \frac{F_P}{A_3} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

図 4.5 および上記各式に使用した記号の意味は下記のとおり。

(記号)	(内 容)	(単位)	(データ)
H_0	分一 PS 放水庭水位	(m)	
H_1	中間水そう水位	(m)	
H_2	ライザー 水位	(m)	
H_3	サージタンク 水位	(m)	
A_0	分一 PS 放水庭表面積	(m^2)	160.0
A_1	中間水そう表面積	(m^2)	28.26
A_2	ライザー 表面積	(m^2)	4.91
A_3	サージタンク 表面積	(m^2)	42.20
F_1	第一水路断面面積	(m^2)	6.97

F_2 : 第二水路断面積	(m^2)	6.97
F_P : 制水口面積	(m^2)	0.785
L_1 : 第一水路長	(m)	2,105.0
L_2 : 第二水路長	(m)	1,155.0
Q_0 : 分一 PS 放流量	(m^3/s)	
Q_1 : 第一水路流量	(m^3/s)	
Q_2 : 第二水路流量	(m^3/s)	
Q_3 : 分二 PS 使用流量	(m^3/s)	

V_1 : 第一水路流速	(m/s)	
V_2 : 第二水路流速	(m/s)	
K_1 : 第一水路損失係数	(s^2/m)	0.411
K_2 : 第二水路損失係数	(s^2/m)	0.226
K_S : 制水口流出係数	($\sqrt{\text{m}}/\text{s}$)	0.0495
g : 重力加速度	(m^2/s)	9.8
α : 速度係数	($1/\sqrt{\text{m} \cdot \text{s}}$)	

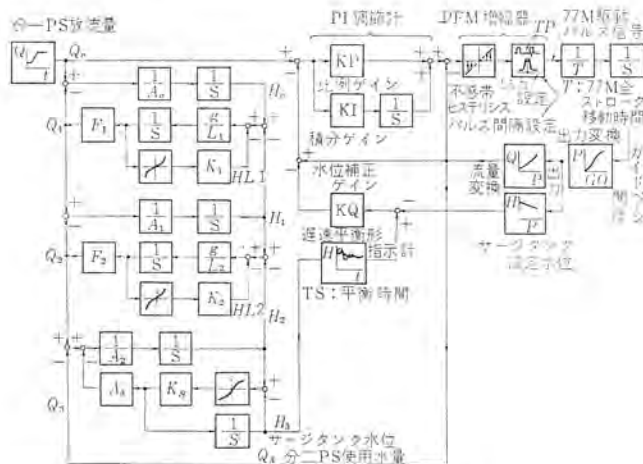


図 4.7 総合ブロック図
Block diagram including all components.

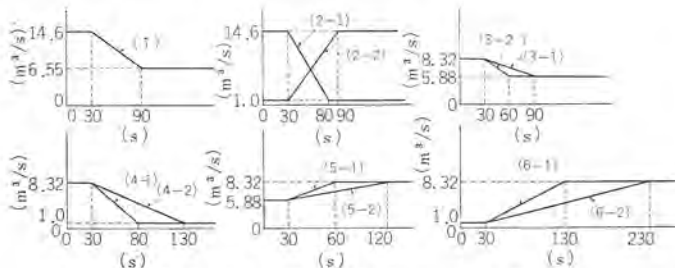


図 4.8 分水第一発電所放流量図
Discharge pattern diagram of Bunsui station
No. 1 and No. 2.

表 4.1 計算検討 CASE 一覧
Data list of calculation.

CASE NO	分一 P/S 流量変化	KP	KI	KQ	TS (秒)	PFM 特性
91	(1)	2.0	0.01	0.7(10%)	1920	
92	"	"	"	"	480	
93	"	"	"	"	960	
94	"	"	0.02	"	"	
95	"	4.0	0.01	"	"	
96	"	2.0	"	1.4(20%)	"	
97	"	"	"	0.35(5%)	480	
98	"	"	0.03	0.7(10%)	960	
99	"	4.0	"	"	480	
100	(2-1)	"	"	"	"	
101	(2-2)	"	"	"	"	
102	(3-1)	"	"	"	"	
103	(3-2)	"	"	"	"	
104	(4-1)	"	"	"	"	
105	(4-2)	"	"	"	"	
106	(5-1)	"	"	"	"	
107	(5-2)	"	"	"	"	
108	(6-1)	"	"	"	"	
109	(6-2)	"	"	"	"	

(3) ブロック図

(2)の各式および PI 調節計, PFM 増幅器などの部分を含め全体をブロック図にまとめると図 4.7 のとおりとなる。

なおブロック図に使用の記号の意味は下記のとおりである。

KP : PI 調節計の比例 ゲイン

KI : PI 調節計の積分 ゲイン

KQ : 水位補正係数

TS : 遅速平衡形指示計の平衡速度

図 4.7 のブロック図をもとに分一 PS 放流量を図 4.8 に示すように変化させ、しかも、各定数を変え種々の検討を行なった。

表 4.1 は代表的な検討データである。

(4) 検討結果

(a) KP, KI, KQ, TS の検討

まず KP, KI, KQ, および TS をどのような値に設計すればよいかを検討する。

分一 PS の流量を図 4.8 (1) のとおり変化させた場合に分二 PS 使用水量、サージタンク(主タンクおよびライザー) 水位および中間水そう水位がどのように変動するかを検討した。計算に使用したデータは表 4.1 の CASE No. 91~99 に示すとおりである。

なお以上の計算結果をサージタンク主タンク水位および分二 PS 使用水量についてまとめた結果を図 4.9~4.11 に示す。

(i) KP の影響

図 4.9 (CASE No. 93 および 95) に示すとおり、KP を大にすればサージタンク水位変動幅は小さくなるが、目標値とのオフセットは変わらない。

KP の値を大きくすると、分二 PS の使用水量の変動が激しくなるのであまり大きな値にはできない。

(ii) KI の影響

図 4.9 (CASE No. 93, 94 および 98) に示すとおり KI を大にすれば水位は早く目標値に達する。すなわちオフセットが少なくなる。しかし本文には記載していないがこの値を大きくすればサージタンク

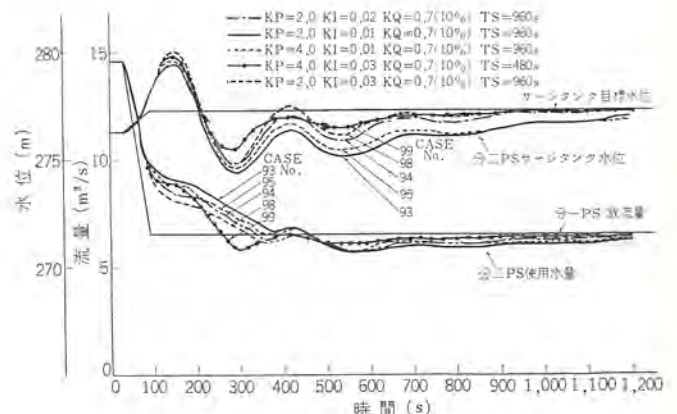


図 4.9 計算結果 (KP, KI の影響)
Result of calculation (Effect of KP and KI).

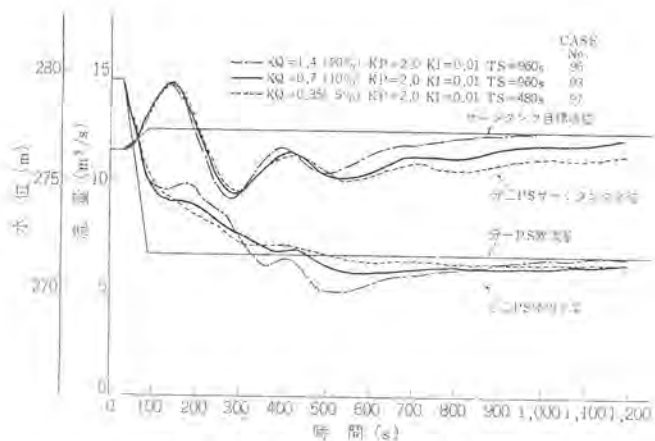


図 4.10 計算結果 (KQ の影響)
Result of calculation (Effect of KQ).

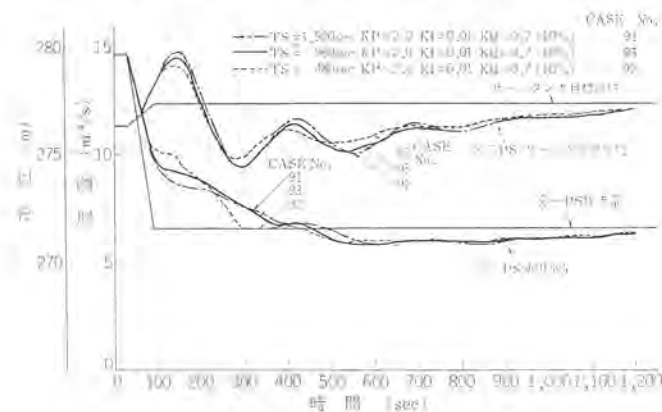


図 4.11 計算結果 (TS の影響)
Result of calculation (Effect of TS).

水位および分二 PS 流量がハンチング現象をおこし、一定値に落ちつくまでに非常に長い時間を必要とする。この点からも KI はあまり大きくすることは、制御装置を不要動作させることになり好ましくない。

(iii) KQ の影響

図 4.10 (CASE No. 93, 96, 97) に示すとおり KQ を大にすればするほど水位は早く目標値に達する。しかしそれに反し分二 PS 流量変動は激しくなる。

(iv) TS の影響

図 4.11 (CASE No. 91~93) に示すとおり、この程度の TS の値であれば TS を速くするほど水位変動幅は小さくなる。

(v) 結論

以上 (i)~(iv) の比較検討により、KP, KI, KQ, TS の定数を下記のとおり決定した。

これらの定数を使用し計算した結果は、図 4.9 の CASE No. 99 である。

KP=4.0
KI=0.03
KQ=0.7 (10%)
TS=480.0 秒

(b) 分一 PS 負荷変動に対する影響の検討

本装置を実際使用するうえで問題となる分一 PS の負荷変動に対して分二 PS のサージタンク水位、流量がどう追従するかの検討を行った。なお分一 PS の負荷変動は現在分一 PS で運転している最も過酷な条件を採用した。これらの計算には上記 (v) の定数を使

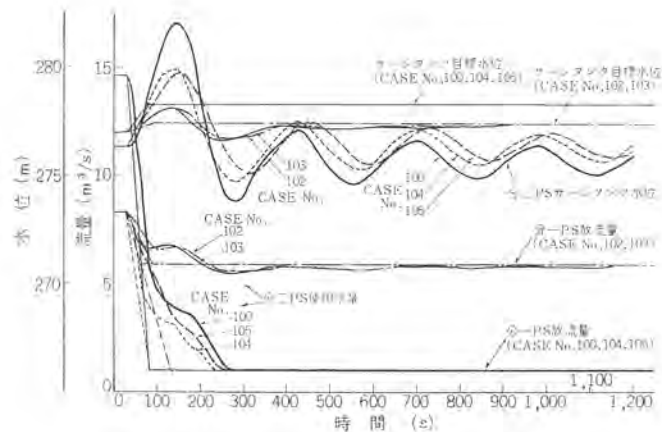


図 4.12 計算結果 (分一 PS 負荷急減)
Result of calculation (sudden power decrease of Bunsui power station No. 1).

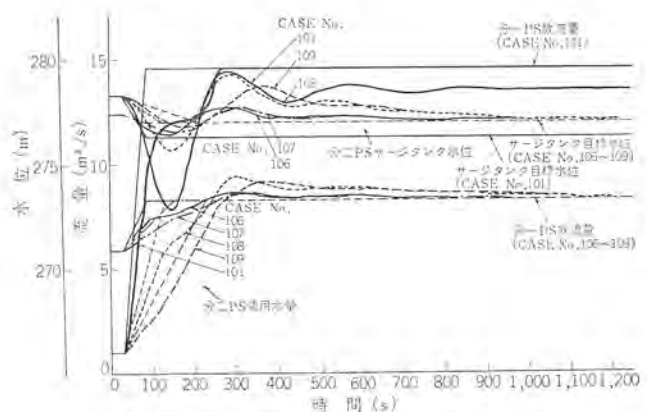


図 4.13 計算結果 (分一 PS 負荷急増)
Result of calculation (sudden power increase of Bunsui power station No. 1).

用した。

分一 PS の負荷変動状態および計算結果は図 4.12 および 4.13 に示すとおりであり、分一 PS のどのような負荷変動に対してもサージタンク水位は十分に余裕があり、分二 PS の出力も非常に早く追従していることがわかる。

CASE No. 100, 101, 104, 105 の場合にはサージタンク水位が目標値とかなり差がでているが、これは本装置の設計方針が流量バランスに主眼をおいているためであって、負荷変化開始後数分間は途中水路に蓄えた水を、流入量以上に使用したり、流入量以下で使用するためである。全負荷シャ断および全負荷まで急増する場合以外はこのような現象を生ぜず、図 4.12 および 4.13 に示すように約 1 時間程度でサージタンク水位は目標水位になっていることがわかる。

5. 遠方監視制御装置

分二 PS に自動出力調整装置を設置すると同時に、分一 PS を制御所とする遠方監視制御装置を設置した。

この遠方監視制御装置はワイヤスプリングリレーを使用したパルス符号式で図 5.1 は継電器盤の外観図を示す。

本装置のおもな特長は下記のとおりである。

- (1) 操作が簡単である
- (2) 制御・監視が迅速に行なえる (約 3~5 秒以内)
- (3) 長寿命で動作が確実しかも保守が簡単である
- (4) 制御電源は発電所の DC 110 V をそのまま使用できる

表 5.1 遠方監視制御項目一覧
List of items for tele-metering and tele-control.

ボジション番号	群点	遠方監視制御項目	遠方操作	表示 警報			備 考
				表示灯	フリッカ	ブザー	
1	1	No. 1 主 機 制 御	運転・停止	No. 1 G 停止			No. 1 回転数計測
	2	No. 2 主 機 制 御	運転・停止	No. 2 G 停止			No. 2 回転数計測
	3	中性点シャ断器	入・切	R・G			
	4	圧油ポンプ制御	起動・停止	圧油ポンプ			
	5	水位制御装置	使用・除外	水位制御			
	6	No. 1 86-2, 94 復帰	復 帰				
	7	No. 1 負 荷 調 整	増・減				No. 1 電力計測
	8	No. 2 負 荷 調 整	増・減				No. 2 電力計測
	9	No. 1 力 率 調 整	増・減				No. 1 無効電力計測
	0	No. 2 力 率 調 整	増・減				No. 2 無効電力計測
2	1	表 示 試 験	入・切 試 験				
	2	No. 1 固定子温度計測					No. 1 固定子温度計測
	3	No. 2 固定子温度計測					No. 2 固定子温度計測
	4	6 kV 母線電圧計測					6 kV 母線電圧計測
	5	No. 1 非 常 停 止	停止・停止	No. 1 G 非常停止	○	○	
	6	No. 2 非 常 停 止	停止・停止	No. 2 G 非常停止	○	○	
	7	水位制御装置故障		水位制御装置故障	○	○	
	8	No. 1 軽 故 障		No. 1 G 軽 故 障	○	○	
	9	No. 2 軽 故 障		No. 2 G 軽 故 障	○	○	
	0	No. 1 無負荷無励磁		No. 1 G 無 負 荷	○	○	
3	1	No. 2 無負荷無励磁		No. 2 G 無 負 荷	○	○	
	2	所 内 軽 故 障	所 内 軽 故 障		○	○	
	3	直流制御電圧低下	直流電源異常		○	○	
	4	火 災	火 災		○	○	
	5	予備圧油ポンプ運転	圧油ポンプ		○	○	
	6	ジェットポンプ運転	ジェットポンプ		○	○	
	7	遠方・直接切換え	遠方制御 直接制御				
	8	No. 1 並列シャ断器		R・G			No. 1 主 機 運 転
	9	No. 2 並列シャ断器		R・G			No. 2 主 機 運 転
	0	電 流 限 定	電 流 限 定		○	○	
常時計測項目	1	総 合 電 力					
	2	サージタンク水位					
	3	出力制御信号					分二 PS へ伝送

(8) 防じん(塵)構造である

なお遠方監視はすべての信号を電流に変換し直送方式を採用した。

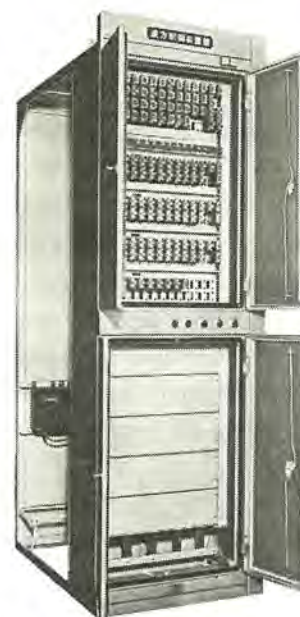


図 5.1 遠方監視制御継電器盤
Relay panel of supervisory control equipment.

- (5) 周囲温度につきとくに制限がない
- (6) 連絡線は 2 心でよい。このほか 2 心あれば選択計測ができる
- (7) 連絡線に対する誘導雑音に影響されることなく安定している

表 5.1 に遠方監視制御項目を示す。

6. 運 転 結 果

分二 PS の自動出力調節装置は、遠方監視制御装置とともに昭和 43 年 2 月に据え付け完了した。据え付けに引き続き上流の分一 PS の出力を変化させ現地試験を行なった。

試験の概要は上流の分一 PS の出力をパルス状に変化させ、分二 PS の応動状況を水位および出力が安定するまで記録し、4. 1 節に述べた要求事項の確認および最適運転条件を検討した。なおこの際は水量が豊富ではなかったため全負荷試験を行なうことができなかったが、これら一連の試験により出力制御装置が設計どおり満足に動作することが確認できた。

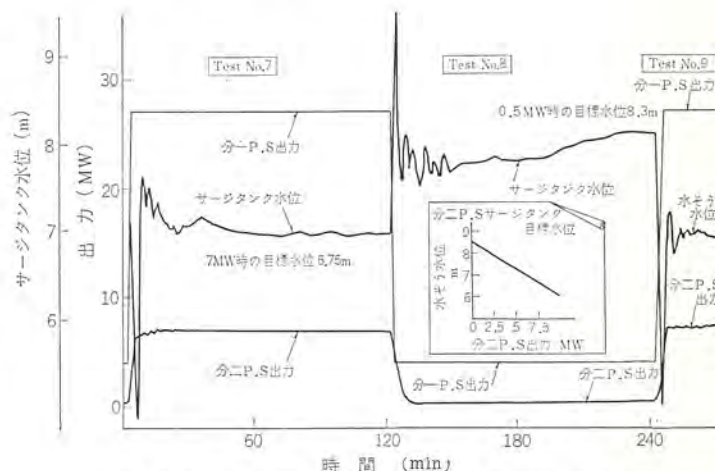


図 6.1 分水第二発電所出力応動試験結果
Test result of automatic power control equipment for Bunsui power station No. 2).

2月の試験に引き続き水量豊富な5月に全負荷試験を施行した。その際の試験の一例を図6.1に示す。

図6.1は分一PSの出力を4MWから27MWまで短時間に上昇、または下降させた場合の分二PSの出力ならびにサージタンク水位の応動状況を示したものである。TEST No. 7では分二PSは約6～7分で流量バランスがとれており、サージタンクのダウンサージは3～4m程度で危険水位までにはまだ4m程度の余裕もっており、十分安全であることが確認された。またサージタンク水位は約30分後にはほぼ目標水位付近に安定しており、そのほか分一PS放水庭よりのいつ流、中間水そうのダウンサージもともに問題のないことが確認された。また分一PSの全負荷シャ断の場合でもTEST No. 8に示すごとくまったく問題ないことがわかった。

7. む す び

以上、装置および試験の概要を述べたが、長沢PSおよび分二PSの出力制御装置の完成により、水系一貫制御において、流下時間遅れのある水路系でも、サージタンクのように水位変化のはげしい信号を用いた制御系でも、計算機による解析のみで十分現地試験を模擬できるという確信をもつことができた。その結果、一刻もむだなく

発電運転を続けなければならない水力発電所に、今後この種の装置を設置する場合には、あらかじめ各種の条件のもとにおける模擬解析を行えば現地試験に要する日程を短縮でき、しかも安定した制御系を構成することができる。

いっぽう実際の運転面からながめると、従来の当直運転員の手動制御に比べて安定したかつ応答度の早い制御ができ、しかも安全な運転が可能になった。

これらの装置の完成により長沢PS～分一PS～分二PS間の出力が分一PSの要求指令により意のままに制御可能となり、四国電力における水系一貫制御の端を開くことができた。

なお今後の問題点としては

- (1) エレクトロニクス採用の増大による弱電関係保守員対策
- (2) 将来の給電自動化に対処した水力発電所の最適負荷配分装置の導入
- (3) 被制御発電所群増加に対処した制御発電所の当直運転員の省力化対策

など新時代に即応した水力発電所の合理化対策を検討する必要がある。なお最後に、本装置設計・据え付け・試験面でご協力いただいた四国電力株式会社の関係各位にあつくお礼申し上げます。

低周波ビレットヒータ

藤 室 雅 司*

Low Frequency Billet Heaters

Itami Works Masaji FUJIMURO

With the increase of demands for construction materials of window sashes and members of rolling stock and aircraft, industry of aluminium extrusion is now flourishing extremely. Low frequency billet heaters have come in use under the circumstances to help promote the industry. They are used for the extrusion of aluminium billets and heating materials in manufacturing pipes of special and carbon steel. This paper deals with construction of the billet heating devices, problems on heating coils of vertical and horizontal setup, heating characteristics vs. temperature distribution, taper heating and uniform heating and further mechanical and electrical problems on billet heaters and the latest improvement of the heater. Comparison between induction heating and gas furnace heating are discussed from the economical viewpoint.

1. ま え が き

日本のアルミ押出し産業は、サッシなどの建材、車両・航空機の構造材などの需要の激増にともない、近年いじりしく伸長した。押出し能力も業界とぞっての設備拡張により、ここ3カ年の間に3倍の増強となり43年末には月産25,000トンに達すると言われている⁽¹⁾。この分野の発展には押出し技術の進歩、表面被膜処理法の開発もさることながら、誘導加熱(Induction Heating)を用いた低周波ビレットヒータ(Low Frequency Billet Heater)が設備の合理化に大きな役割を果たしたことは疑うべくもない。今日低周波ビレットヒータはアルミの押出し用のみでなく、ステンレス鋼・ニッケル合金、さらには普通鋼ビレットを対象とする継目なし鋼管製造用としての加熱装置として、一方では取扱いが便なるような徹底した標準化が進められ、他方新しい目的に合った新しい装置が創意工夫のうちに製作されている。「鍛造・押出し用誘導加熱装置」と題して低周波ビレットヒータの概要を本誌1968年3月号にて紹介したが、さらに技術上の諸問題について述べてみたい。

2. 機器の構成

2.1 並置式と多段式

押出機の大形化にともない、ビレットヒータの容量も一段と大きくなった。ヒータの処理能力を増し、また取扱うビレットの寸法も大きくなれば、加熱時間も長くなり、加熱コイルの長いものが必要となるが、ビレットの搬送上の問題、コイルの機械的強度の保持から無制限というわけではなく、コイル長は最大2~3m以内に押さえている。そこでそれ以上に容量、能力を増そうとすればビレットヒータを2基またはそれ以上配置することになる。押出機が1台でヒータが2基以上配置する方法に並置式と多段式とがある。

並列式は同容量、同定格のものを2基以上並べて置き、前後にビレットの送込み、取出しコンベアを設け、装置全体のtotal能力の増加を計るもので通常のビレットについて広く用いられている。温度領域により加熱電力を変え熱膨張によりビレット内にクラックが発生することを極力警戒したり、最初急熱し終わりは徐熱しビレットの均熱を極端に考慮する必要がある場合は、加熱コイルを直列に配置しそれらをコンベアで結び、ビレットを順次ことなる加熱コイル内を通過せ

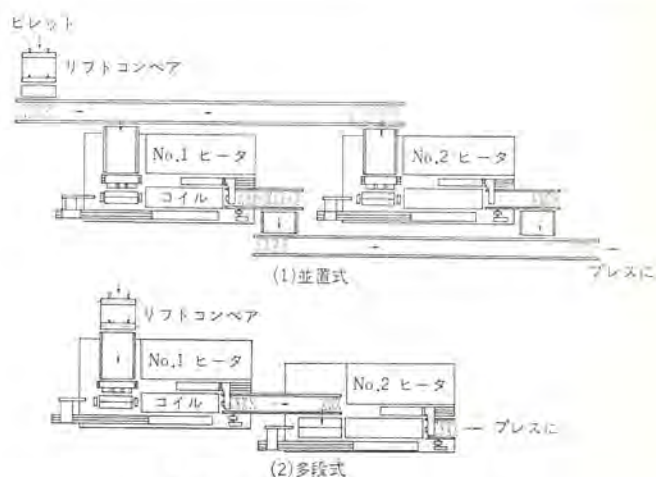


図 2.1 多基におよぶビレットヒータの配置
Arrangement of plural billet heater.

しめる多段式加熱方法がとられている。

2.2 立形コイルと横形コイル

立形方式は、ステンレス鋼、ニッケル合金などのビレットを N_2 ガスなどの完全無酸化ふん囲気中で加熱でき、コイルの壁面をいためない利点があるが、加熱されたビレットを垂直コイル下方に取出し、新しいビレットを下方からコイル内に持上げる動作が必要で電源を遊ばせている時間が多く非能率的である。また機構上一つの加熱コイルでは一本のビレットしか加熱できないので、加熱ステーションの数が多くなり設備費が高つく。

横形方式は、機構そのものはビレットを水平コイルの一端から押入れ他端から取出す従来からのポピュラーな方法であり、機構が簡単なので機械の信頼性も高く、電源の有効利用時間も多く能率的である。自由空気の出入りをきらう場合は加熱コイル両端にフレームカーテンを設けることもできる。また長尺コイルは中間に特殊支持機構を設けているので十分なる機械的強度をもたせうる。

2.3 構造

低周波ビレットヒータは電源装置と進相用コンデンサ、変圧器、加熱コイルとビレット搬送機構が一体構造となった加熱機と、温度調節計、電気計器、補助リレーを収納した制御盤と、表示灯、押しボタンを取付けた操作盤から構成され、他にビレットを床面からヒータに持上げ

* 伊丹製作所

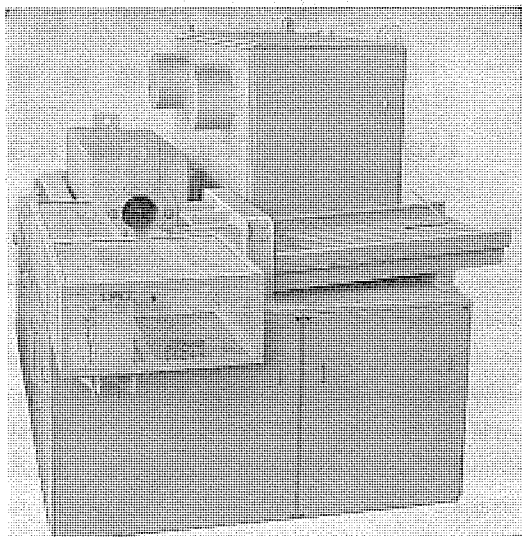


図 2.2 アルミ押出し用ビレットヒータ
Billet heater for Al extrusion.

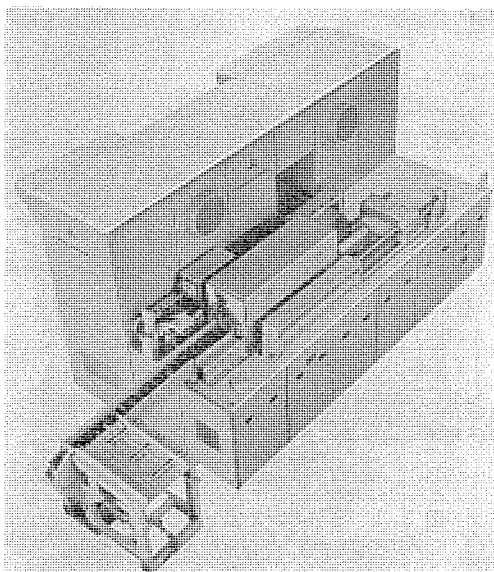


図 2.3 ニッケル合金・ステンレス鋼押出し用ビレットヒータ
Billet heater for Ni-alloy and stainless steel extrusion.

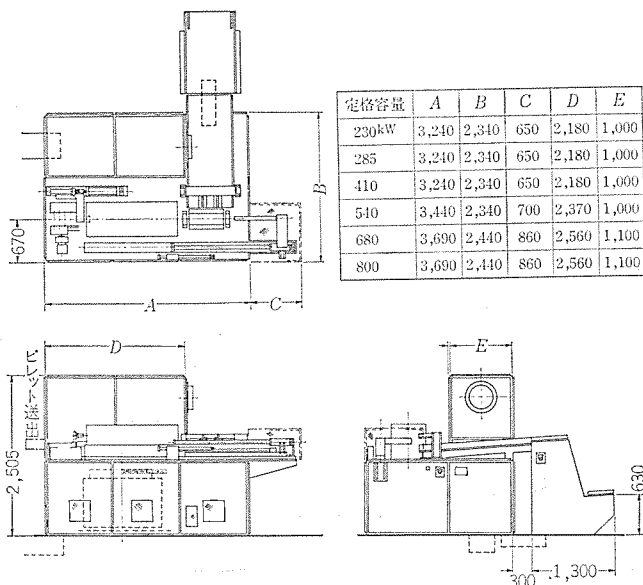


図 2.4 EL-EP 2 形低周波ビレットヒータ外形図
Outlines of type EL-EP 2 low frequency billet heater.

表 2.1 EL-EP 2 形低周波ビレットヒータ定格
Standard ratings of low frequency heater, type EL-EP 2.

定格 kW	電 圧 kV	周 波 Hz	ビ レ ッ ト		処 理 量 kg/h
			材 質	寸 法 mmφ × mm	
230	3.3/6.6	50/60	アルミ合金	150~100×660	750
285	3.3/6.6	50/60	アルミ合金	175~125×660	1,000
410	3.3/6.6	50/60	アルミ合金	175~125×660	1,500
540	3.3/6.6	50/60	アルミ合金	200~150×700	2,000
680	3.3/6.6	50/60	アルミ合金	250~200×800	2,500
800	3.3/6.6	50/60	アルミ合金	300~225×800	3,000
540	3.3/6.6	50/60	銅	200~150×700	2,000
680	3.3/6.6	50/60	銅	250~200×800	2,500
800	3.3/6.6	50/60	銅	300~225×800	3,000
420	3.3/6.6	50/60	普 通 鋼	250~200×660	1,000
600	3.3/6.6	50/60	普 通 鋼	250~200×660	1,500
800	3.3/6.6	50/60	普 通 鋼	250~200×800	2,000
1,000	3.3/6.6	50/60	普 通 鋼	250~200×800	2,500

(注) 1. 加熱温度はアルミ合金 450°C, 銅 870°C, 普通鋼 1,200°C である。
2. 定格容量とは kWh を示す。

るリフトコンベア、加熱機からプレスに運び渡すシュートを必要とする。それらの詳細については別掲文献⁽²⁾⁽³⁾を参照願うとして、ここでは割愛させていただく。図 2.2, 図 2.3 にアルミ押出し用ビレットヒータおよびニッケル合金、ステンレス鋼継目なし鋼管用ビレットヒータの外観を、図 2.4 にそれら低周波ビレットヒータの外形図を、表 2.1 に低周波ビレットヒータの定格表を示す。

3. 加熱特性

3.1 ビレットの均熱について

ビレットを押出す場合、押出機コンテナ内において加熱されたビレットの表面と中心に径方向の温度差がなく、また押出形状に応じてビレット長手方向に適度の温度こう配があれば、金属の流れが一様で良い押出形材が得られるとされている。こう配加熱の話はあととして、いかにすれば径方向の温度差をなくして効率のよい加熱が得られるか考えてみる。

電源の周波数は加熱するビレットの材質、寸法、温度により最適な値を選ばねばならないが、ビレットの直径がアルミ、銅の場合 80φ 以上、黄銅の場合 120φ 以上、ステンレス鋼の場合 140φ 以上あれば、電力会社から各工場に直接給電されている 50/60 Hz の商用周波 (低周波 Commercial frequency, Low frequency) がそのまま使うことができ、鍛造加熱や焼入加熱に多くみられる電動式高周波発電機や真空管式発振器などを用いた高周波 (High frequency) 電源設備を必要としない。

一般に誘導加熱によって、ビレットを加熱したとき、ビレット各部の温度は同一円周上では一様で、半径方向は電流の表皮効果 (Skin effect) により表面が中心部よりやや高く、温度分布は式 (3.1) で与えられる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

$$\theta_r = \frac{P_0 a}{k_c} \left[\frac{2kt}{a^2} + \frac{r^2}{2a^2} - \frac{1}{4} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{k\beta_n^2 t}{a^2}} \frac{J_0(\beta_n r/a)}{2J_0(\beta_n)} \right] \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

上式を図で表わせば図 3.1 のようなビレット昇温曲線となる。また表面と中心部との温度差は式 (3.2) で、ビレット表面からの熱放散や電流深度を加味したときの厳密式は式 (3.3) で示めされる。

$$\theta_s - \theta_c = \frac{P_0 a}{2k_c} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

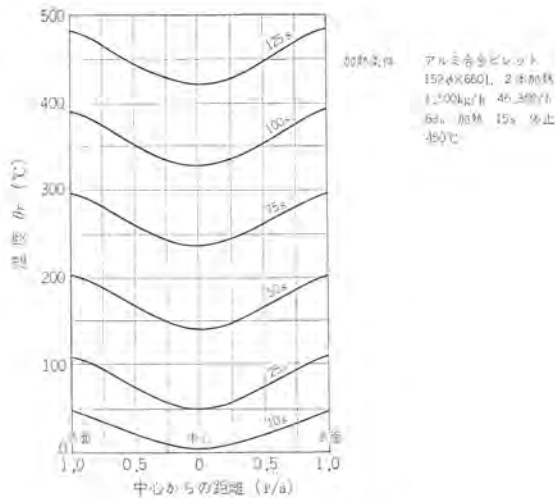


図 3.1 ビレット昇温曲線
Temperature rising curves.

$$\theta_s - \theta_c = \frac{P_n a}{2k_c} \left\{ 1 - \left[\frac{1}{P_n/P_a} \right] \left[\frac{1}{k_2} \right] \left[\frac{X(k_2) - 1}{Z(k_2)} \right] \right\} \dots \dots \dots (3.3)$$

$\theta_r, \theta_s, \theta_c$ 半径 r における温度, 表面, 中心部における温度 $^{\circ}\text{C}$

P_0 表面電力密度 $\text{cal/s} \cdot \text{cm}^2$

P_n, P_a 正味電力密度, 熱放散を加えた全電力密度 $\text{cal/s} \cdot \text{cm}^2$

a ビレット半径 cm

k_c 熱伝導度 $\text{cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}$

t 時間 s

$k = \frac{k_c}{\gamma \cdot c}$ 熱拡散度 cm^2/s

γ 密度 g/cm^3

c 比熱 $\text{cal/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$

$k_2 = \frac{\sqrt{2}}{\delta} \cdot a$ δ 電流深度 cm

$J_0(x)$ 第一次0次ベッセル関数

β_n $J_1(\beta) = 0$ の正根 3.83, 7.02, 10.17, \dots

$X(k_2) = \text{ber}^2 k_2 + \text{bei}^2 k_2, Z(k_2) = \text{ber} k_2 \text{ber}' k_2 + \text{bei} k_2 \text{bei}' k_2, \text{ber}(k_2), \text{ber}'(k_2), \text{bei}(k_2)$ ベッセル関数とその微分形

上式のように加熱終了時に $\theta_s - \theta_c$ の温度差を生じるが, 式 (3.4) で与えられる時間 T 秒後にはその値の 1/3 に減少し, 実質的には均熱化したと考えるとよい温度になる。加熱終了時には多少の温度差があっても, プレスコンテナにビレットが選ばれるとき均熱化しているのが最も理想的である。

$$T = \frac{0.071 \gamma c a^2}{k_c} \dots \dots \dots (3.4)$$

アルミビレットの場合, T は 150φビレットで 12s, 200φビレットで 20s である。実際のアルミビレットヒータの場合, 加熱電源しゃ断後プレスで押出されるまでの経過時間は 20~30s 程度なので, ビレットはほとんど均熱化しており押出しには良好な状態である。なおプレス待ちのために加熱コイル内で待機し, 保温加熱している際にはまったく均熱化していると言えよう。

図 3.2 は 50/60 Hz でアルミビレットを加熱した際の, 加熱直後の表面と中心部の温度差 $\theta_s - \theta_c$ である。また図 3.3 はアルミビレットに実際に熱電対を埋め込んで, 加熱中, 加熱後の温度を測定したデータである。

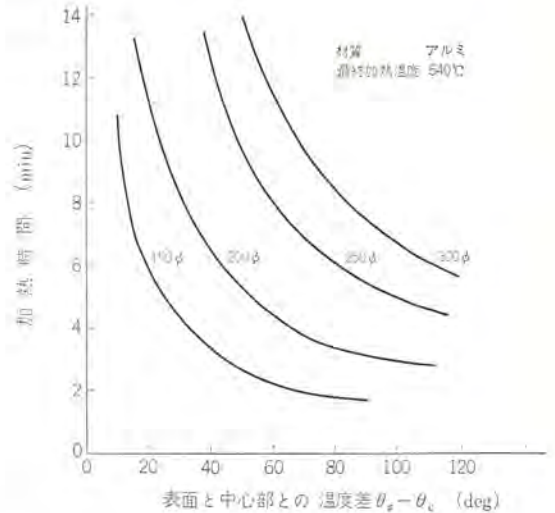


図 3.2 加熱時間と温度差 $\theta_s - \theta_c$
Relation between heating time and temperature difference $\theta_s - \theta_c$

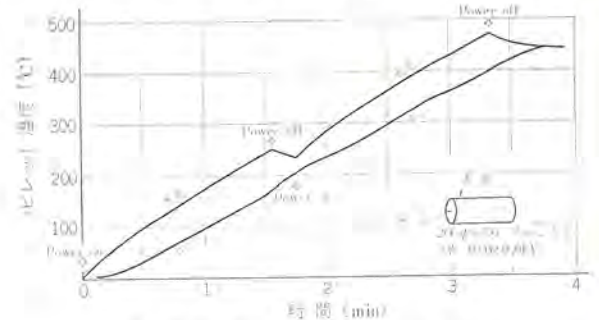


図 3.3 ビレット差温度と時間経過
Billet temperature and lapse of time.

3.2 こう配加熱と均一加熱

3.1 節では半径方向の温度差について考えたが, 次にビレット長手方向の温度について考えてみる。ビレットを押出す際に, 加工度が大きいと塑性変形による変形抵抗のため発熱し, 押出し終わりには押し出し始めよりかなり温度が上昇するので, 発熱をあらかじめ見込んで加熱コイル内でビレット先端部を高く, 後端部を低く加熱するこう配加熱 (Taper heating) が望ましい。ビレットの長さにより, 押出形状の形状により, またビレットの材質により発熱量が多種多様であるので, 温度のこう配は一様でない。あるときは大きくあるときは小さく, 均一加熱 (Uniform heating) が好ましいことすらある。

温度こう配を与えるには, ビレットヒータ内にある三相変圧器のビレット取出し側のタップを高く電力を上げ, ビレット送込み側のタップを低く電力を下げればよい。タップを変えることにより供給電力が調整できるので, タップの組合せにより図 3.4 のように任意の温度こう配が得られる。同一タップにすれば長手方向に温度こう配なしとすることも可能である。このようなこう配加熱の自由さは誘導加熱において可能なことで, ガスや灯油加熱ではまったく不可能な事からいえよう。

加熱コイルに三相電源を用いた三相コイルとする場合, 相間ではコイルの磁界強度が弱まるので, 通常真中の相の位相を反転するよう結線すれば, 相の位相差がいちじるしく改善され, 熱伝導度の良好なアルミ, 銅の場合相間において温度むらはない。熱伝導度の悪い金属では, さらに相間の磁界を高めるよう工夫すれば均一な温度分布が得られる。

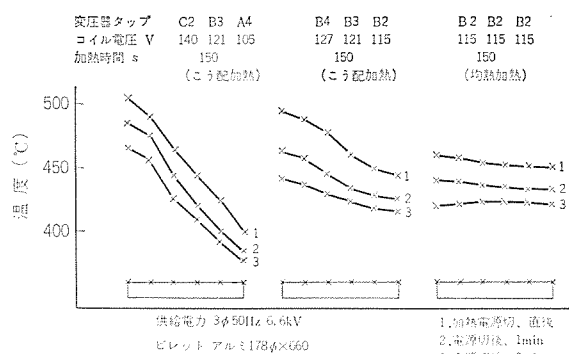


図 3.4 こう配加熱曲線
Taper heat characteristics.

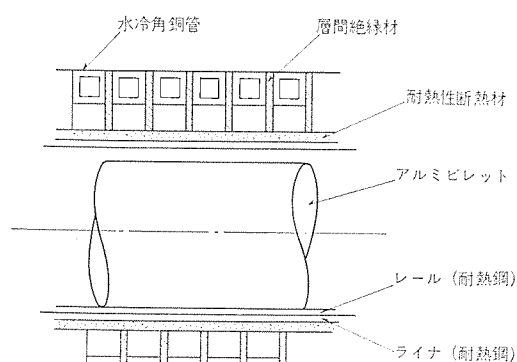


図 3.5 加熱コイル断面図
Cross section of induction heating coil.

3.3 加熱効率とエアキャップ

加熱コイルは図 3.5 のように水冷角銅管をつる巻き状に多巻きし、その内面に断熱耐熱シートを巻き、ステンスライナで全体をおおい機械的・熱的保護をし、さらにビレットののる面にはレールを敷いている。絶縁処理をほどこされた銅管コイルは、大きい電磁振動に耐えうようにテンションボルトでバネを介して強力に締め上げている。

断熱材の目的からいえば、厚肉であるほど熱放散が少なく熱効率が向上するが、電気的効率を高めるには銅管コイルとビレットのすき間 (Gap) すなわち両者の直径の差を小さくすることがきわめて有効である。電気的効率、熱効率および断熱材の耐熱度機械的強度から Gap を決めるが、アルミを 450~550°C に加熱する場合 25~35 mm、銅を 800~900°C 銅を 1,200°C 以上に加熱する場合は 40~55 mm としている。

4. 加熱装置の問題点と対策

低周波ビレットヒータは当社では、最初からシリーズ化を計り、標準シリーズにのって製作を進めてきたが、需要家の要求希望を取り入れ、メーカーとしての考えも打ち出し、以下に述べるような配慮を払い、各部にわたっての改良をほどこしている。

4.1 構造機構上の改良

(1) 装置のスペースは小さいか。

ビレットヒータの外形寸法、とくに幅寸法を小さくすることは押出し工場のレイアウト上からのぞましいことであるので、加熱コイルおよび内蔵機器の配置を合理化し、表 2.1 に示すようにビレットヒータの外形寸法の縮小を計った。さらに電気計器、温度調節計および表示灯を取付けた加熱機制御盤を、プレス操作盤から見える側のビレットヒータ側面に内蔵し、計器盤または温調盤と呼ばれる盤のスペースを不

要とした。もちろんヒータに内蔵した加熱機制御盤はヒータからの振動に対し十分に考慮を払っている。

(2) ビレットストック内のビレットがつまることはないか。

リフトコンベアにより持ち上げられたビレットを貯えるストックは従来門形フレーム内にあったので、ビレットがななめになりひっかかったときその処置に作業者は苦慮したが、図 2.2 にみられるような上面、側面のない開放形を設計しているので保守がすこぶる容易である。ストックにはレールを敷いてビレットにごみや異物金属が付着するのを防ぐ必要がある。

(3) プッシャの調整は容易か。

ビレットを加熱コイルに押込むためのプッシャは、ビレットの押込み量を調整するために従来はビレットヒータ架台上に作業者がのぼる必要があったが、ストロークを調整するストップを取付け、ビレットヒータ前面の床面上で手軽に調整できる構造とした。そのためビレットの長さが変わったときの段取換えがきわめて容易となった。

ストック内のビレットの処置にしても、またプッシャストロークの調整にしても、通常はビレットヒータ架台上面にのぼる必要はないが、万一のぼる場合の安全を考えヒータの後方で作業中であることをプレス操作盤の作業者に知らせるとともに、あやまった操作をしてもプッシャなど機械が動き出すことのないよう、また加熱電源ははいることのないようなインターロックを架台上面にのぼる作業者がとれるようになっている。安全については、当社では細かいところまで気を配った設計を行なっている。なお保護装置については第 5 章にその内容を取りまとめている。

(4) リフトコンベアはがん丈か。不便はないか。

わく組が非常にがん丈でビレットの衝撃に対して十分に耐えうる。またビレットを持ち上げるつめ (爪) は 3 本あり、長いビレットでも短いビレットもそのまま取扱い可能で、2 本の場合のようにそのつどつめを調整する必要はない。

4.2 電気品に対する配慮

(1) 変圧器の絶縁はだいじょうぶか。

変圧器は小形にして長寿命でなければならない。

従来のコンパウンドワニスの乾式水冷式の変圧器では、コンパウンドワニス溶けて流れ出したり、クラックを発生し大きな (き) 亀裂を生じることがある。そのため夏期など湿度が高い場合、冷却水と気温に差があれば汗をかき絶縁抵抗値が低下し操業上危険な状態となる。一時しのぎには乾燥炉に入れるだけでよいが、復元するにはコンパウンドワニスのつめ換えをせねばならない。

変圧器はビレットヒータの心臓である。変圧器の修理、取換えには日数を要し、ビレットヒータ引いてはあと工程の全ラインを長期間運転停止させざるを得ないことになる。また上記の冷却水による発汗を抑えるために冷却水水温が低すぎないよう変圧器巻線温度の下限値のサーモスタットと、絶縁物保護のための上限値のサーモスタット計 2 個を取付け、冷却水温が上限下限の範囲内となるよう電磁弁を開閉し、水量を調整しているが、電磁弁に全面的に頼っているだけに信頼性は低い。

これらの欠点を完全に解決したのが送油水冷式変圧器である。油は最良の絶縁物であり、油入変圧器の信頼度は抜群であるため、電力用変圧器など広範囲に使われており長寿命が期待できる。油入変圧器はスペース上の難点があったが、東海道新幹線車両用変圧器など小形軽量かつ堅固な変圧器が開発されたのでその技術を駆使し、従来の乾式水冷式変圧器よりも寸法的にやや小さい絶縁信頼度の高い

送油水冷式変圧器ができた。油は変圧器巻線の絶縁を保護し、巻線の熱を取り去り、変圧器タンクとは別の熱交換器で冷却水に熱を放散し、冷やされてふたたび変圧器タンクに帰っていく。空気は巻線はもとより冷却水の通る回路と直接触れることはないの、発汗の心配はまったくなく水量を調整するサーモスタットや電磁弁は不要である。また熱交換器内での冷却水の通路は広く、乾式水冷式の場合のように水あかでつまっておそれもない。当社の標準形低周波ヒータにはこの変圧器を使っているのである。

(2) 高圧電磁接触器の開閉ひん度に対し十分か。

当社では 3 kV 級 SH 形および H 形高圧電磁接触器、6 kV 級 6 CH および 6 UH 高圧電磁接触器を製作しており、JEM に規定されている、開閉容量 A 級 (定格電流の 10 倍)、開閉ひん度 3 号 (300 回/時)、寿命 1 号 (50 万回) または 2 号 (25 万回) で信頼度は高く、開閉ひん度のはげしい責務に十分に耐えうる。消弧箱はヒンジ取付けで、保守点検が便利である。接点は消耗品であるので寿命がくれば取りかえる必要がある。

(3) 高調波が発生したことはないか。

低周波ヒータでは力率改善用のコンデンサは 3 kV または 6 kV の変圧器一次側に接続されるので、電源側に高調波が存在するときコンデンサはその影響を受け、基本波電流のほかに高調波電流が重畳し過大電流が流れる。電源側の高調波源としてアーク炉による第 3 調波、変圧器の磁気飽和による第 5 調波が考えられるが、電源系統のインピーダンスの値によって高調波の影響の大小が決まる。系統が高調波に対し誘導性であれば問題はないが、容量性であれば直列リアクトルが必要である。

重電機メーカーとして電力系統の諸現象に明るい当社では需要家に適切な助言を与え、また処置を行ないうることは幸いなことである。

(4) 温度計はどんなものが良いか。

アルミや銅の加熱ではピレット端面を CA 熱電対を押しあてて測温する。測温誤差をなくするために、熱電対をバネ力で強く押しつけるので通常 6 mm 以上の太い特殊素子を使用し、先端を細くとがらす。黄銅、銅ピレットの加熱には温度が高いため、熱電対の酸化を防ぐためガスフレームを使用する。

熱電対で測温した温度を温度調節計にて指示させるとともに、上下限の警報接点にて一定温度範囲に温度制御する。温度調節計はピレット 1 本 1 本の温度制御のみでなく、全体の温度管理のため記録機構付きとすることが多い。温度調節計には角形と丸形とがあり、記録計付きの場合は記録紙の送り速度は 4~6 段程度に切換えが可能

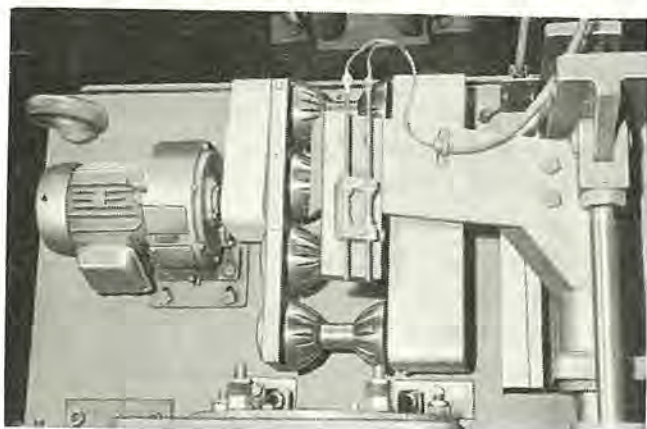


図 4.1 C・A 熱電対
C・A thermo-couple.

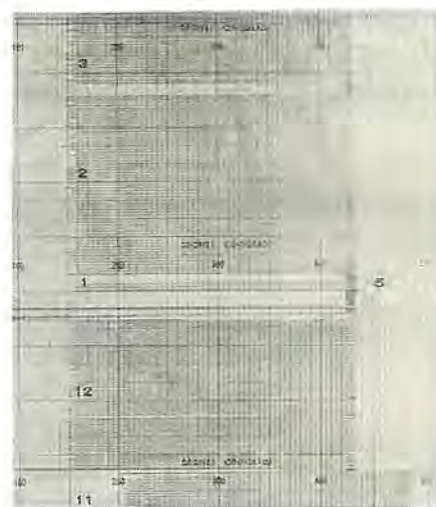


図 4.2 温度調節計記録紙の一例
Example of temperature controlling recorder paper.

である。丸形を使用する場合は 24 時間で 1 round で使用するが多い。いずれのメーカーの温度調節計でも以下のことに留意せねばならない。

50/60 Hz の誘導を拾うと温度指示に誤差を生じたり、乱調をきたしたりするので誘導除去のフィルタ回路をつけることが望ましい。また熱電対とピレットとの接触不良、熱電対リード線の断線時には指針が上限に振り切れるバーンアウト機構であることが必要である。さもないとピレットの温度が上昇しても指針が振れないので、過熱してピレットを溶かしコイルを傷つけることになる。さらに指針の移動速度の速いものがよい。遅いものは随従性が悪いというだけでなく、バーンアウト時に保護としての役に立たない。

鋼やニッケル合金を 1,000~1,250°C に加熱する場合は、CA 熱電対が使えないので保護管付の熱電対を用いるか、ふく射または光高温計を用いる。前者の場合は熱電対への熱の伝導を良い構造とし、保護管からの熱の流出には十分に注意せねばならない。後者はスケールの付着によって誤差を生じるので、測温位置と高温計の特性には十分なる考慮が必要である。

図 4.2 はアルミピレットヒータの温度調節計記録紙の一例である。横軸が温度°C、縦軸が時間 min で細線 1 目盛が 10 min 太線 1 目盛が 30 min である。記録紙の大半は加熱温度が 430°C の場合の記録で、終わりのほうにピレットのロッドが変わり加熱温度も 480°C に変えた状態がうかがえる。記録紙からはピレット温度の管理状態と単位時間に加熱されたピレットの本数も数えることができ、ヒータとプレスを含めた総合実動状態の良否の検討が一目のもとにできる。図の例では 430°C、480°C いずれの場合でもピレットの加熱温度は設定された一定温度内に規則正しく保持されており、取出しピッチもほぼ一定で良好なる運転状態といえる。中央部にややすいて見えるのが、プレスなど作業上の都合によりピレットを加熱コイル内で保温加熱している状態で、上限 434°C、下限 424°C の温度範囲内で保持している。

4.3 冷却水に対する注意

冷却水はピレットヒータにとって絶対不可欠のものである。冷却水が止まるとピレットヒータの運転を止めねばならない。誘導加熱コイルは、コイルに流れる大電流のため発生するジュール熱のほかに、ピレットからのふく射熱を耐熱断熱材を通してではあるが受けるので、中空構造となっており、その中を大量の水を通し冷却する必要がある。しかるに水の通路は、コイルを構成する銅管の巻数や寸法の制約から一

般に大きくとれず狭いので、ごみや泥でつまらないよう清浄な水を送り込んでやる必要がある。しかしコイル内壁に水あか(垢)が発生し閉塞されて流量が低下することもあり、ユーザの中には頭を痛められた方もあろうかと思われる。また何より冷却水の確保が重要である。

ここで、冷却水に関する諸問題をとり上げてみる。以下に冷却水の条件を述べる。

冷却水入口温度	30°C 以下
水 圧	入口圧 2.5~3.0 kg/cm ² 出口背圧 0.5 kg/cm ² 以下
水 質	50 メッシュ 程度のストレーナを通した清浄な水でごみ、ほこり、泥砂を含まぬこと。 PH は 6~8 で、比抵抗は 3,000 $\mu\Omega$ -cm 以上。60°C 以下で沈殿物を生じないこと。 固形物総量 500 mg/l 以下 硬 度 20 mg/100 cc 以下 塩化物 30 mg/l 以下 硫化物 30 mg/l 以下

(1) 水の循環回路

前記の水圧、水温、水質を満足し、ヒートポンプが必要とする十分な水量が確保できればいかなる回路方法でもよいが、水資源の確保の難易という地理的条件から、新工業地域など水の比較的容易に得られる地域では水を流し放なしで回収しない直接方式(一過式)を、既存の工業地域の水の得にくいところでは再循環して使用する再生方式を用いている。これら水の回路の例を図 4.3 に示す。

水を回収しない直接方式では、地下水または工業用水をポンプで吸み上げまたは昇圧してストレーナを通しヒートポンプに給水する。排水はできるだけ短い距離で排水路に放水し、ヒータに背圧のかからぬようにせねばならない。地下水を用いる時夏期は水温が低いので給水管表面に結露することがあるが、極端な場合は断熱材を巻くとよい。

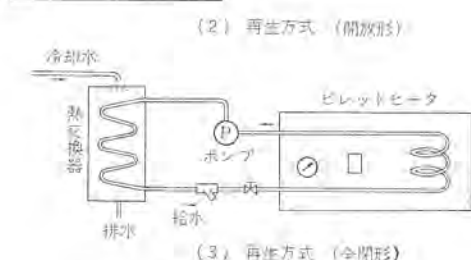
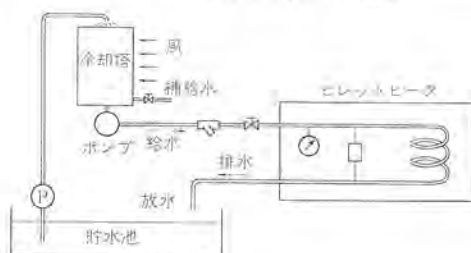
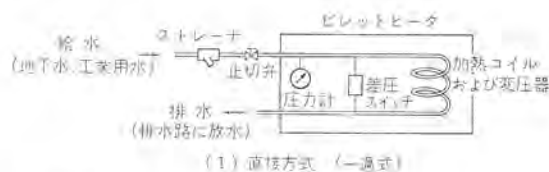


図 4.3 種々の水の回路
Various flow circuits of cooling water.

再生方式には貯水池を用いる開放形と、用いない全閉形とがある。開放形は他に冷却水を必要とする機器がある場合、貯水池、冷却塔、ポンプなど大部分の回路が共通にでき、冷却すべきものが多くある場合経済的であり、一般に広く用いられており水圧の調節も行ないやすい。全閉形は他に冷却を必要としない単一の回路で用いられ、系統内部で発生する水あか、さびの発生以外は、開放形のようにごみ、砂や他の冷却系統からの鉄粉などの異物が入り込むおそれはない。いずれの場合でも直接方式と同様、排水側の背圧はかからぬよう配管上の注意が必要である。図中のストレーナは大量のごみ、とくに泥砂に対し弱く破れることがあるので、水質の良くない場合はろ過装置を用いる必要がある。またストレーナは1週間または半月に一度は掃除することが望ましい。掃除や金網のとりかえが便なようストレーナを2個並列に置いて交互に使用すれば、ヒートポンプ運転中すなわち通水中にも点検が行なえる。

(2) 冷却水のつまり、水あか対策。

ヒートポンプにとって冷却水のとだえがもっとも禁物である。水によって運ばれたごみ、スケールがコイル内部に堆積し、流量が減少し閉塞されることになれば、コイルが温度上昇し電気絶縁物を焼損する。もっとも差圧リレーやサーモスタットなどの保護装置があるが、冷却水のとだえとなる原因を除去することが何よりたいせつである。

まず第1にごみ、砂はもちろんスケール発生を促進する不純物を完全に除去するろ過装置を設けることである。しかし大がかりで経済的負担が大きいのなら防せい(錆)、スライム防止剤などを用いて給水の水質を改善し、さらに付着したものに対しては洗浄剤で除去せねばならない⁽⁶⁾。

(a) ろ過装置

砂利や無煙炭を粒度の大きいものから積み重ねその上に有効粒度0.6~0.8 mmのろ過材を充てん(填)したものをろ過床とし、散水ノズルを上方に配し原水をろ過床上面から一様に放水し、下部に集水装置を設け清浄水を取り出すのが概略の構造である。鉄・マンガンの含有量が少なければそれらをろ材で吸着しうるが、多いときは原水に空気塩素などの酸化剤を混入しろ材により接触酸化させてろ過することがある。

(b) 防せい剤、殺そう(藻)・殺菌・スライム防止剤

水質の悪い冷却水には防しゅう剤、スライム防止剤を添加し、加熱コイル内面にスケール、スライムが付着するのを防ぐ。それらの薬品は多くのメーカーから種々の商品名で市販されているが、水と接触する金属に酸化金属およびスライムの発生付着をきらう合金層を造り上げる皮膜形成剤がもっとも好ましいようである。未酸化金属にまで浸透し、その表面を合金状の不しゅう体に改変するとともに、スケール部分を脱離させるのである。常時薬品を補給投入し冷却水中の濃度を規定値以上に保つ方法は不経済でもありめんどうでもあるので、防せい皮膜形成後は活性を保持するため何ヵ月かに一度薬品液をコイルにポンプなどを用いて循環通過させる方法がとられている。

(c) スケール除去、洗浄剤

てっとり早い方法として、コイル内に堆積したスケールを定期的にまたは流量が減少したときに、除去する方法がとられている。比較的脱離しやすい堆積物は各水系ごとに排水側から給水側に向け工場エアを吹きつければとれることもある。しかし給水側にコックなど流量調整弁があるときは弁をつまらすことになるので行なってはならない。チューブクリーナなど機械的洗浄法はコイルの幾重にも湾曲した構造から不適である。化学的洗浄法として塩酸などの無機酸をうす

表 6.1 ガス炉と誘導加熱装置との経済比較
Comparison of costs between gas furnace and induction billet heater.

		初年度負担額 (千円)		ガス-誘加	備 考
		ガ ス 炉	誘導加熱装置		
1	設 備 装 置 費	1,250	1,470	-220	投資額×資本回収係数 (0.147) ただし期待収益率を 0.1 とし経済耐用年数を 12 年とする
2	加 熱 費	3,630	2,720	910	ブタンガス (初年～3 年 30 円/kg, 4～12 年 25 円/kg) 2.4 千円/素材 1t 電気代 (電源償却費込みで 5.8 円/kWh) 1.8 千円/素材 1t 1 年=12 月×25 日×8 時間 プレス待ちなどの保温加熱はどちらの場合も無視する両設備とも素材に対する製品の歩留りを 65% とする
3	動 力 費	105	21	84	ガス炉 7.5 kW モータ, 誘加 1.5 kW モータ
4	起動停止に伴う費用	200	0	200	ガス炉 運転始め 早出 1 人 1 時間/日, 終了 残業 1 人 1/3 時間/日 500 円/人・時間 (ただし押出機の遊休は考えない)
5	起動時の加熱費	454	11	443	ガス炉 チャージング後ビレット取出すまで 1 時間必要 誘 加 チャージング後 2 分で取出し可能
6	保 修 費	300	300	0	ガス炉 炉床, 炉壁, パーナ 誘 加 耐火シート, 熱電対
7	固定資産税保険	136	160	-24	それぞれ投資額の 1.4%, 0.2% とする
8	作 業 者 人 件 費	1,200	600	600	ガス炉 炉専任者 1 人必要 500 円/人・時間 誘 加 プレスマンが兼任 (1/2 人)
合 計		7,275	5,282	1,993	

条 件 アルミニウム合金の加熱, 130φ×500, 500°C 35 本/時, ガス炉 (8,500 千円), 誘導加熱装置 (10,000)

めたものが広く用いられており, スケールの溶解能力も大きく低廉でもある。しかし無機酸は母材の銅材も侵しその侵食速度も大きいので, 母材に対して洗浄の減量の少ない, 皮膚に触れても危険度の低い, 有機酸を基材とした洗浄剤が市販されている。

5. 保 護 装 置

低周波 ビレットヒータとして次の保護装置がある。故障時にはまず加熱電源をしゃ断し運転を止めると共に, ベル 警報し作業者の注意をうながし故障表示灯に故障内容を示す。加熱電源切の押し ボタンを操作すれば, ベル は鳴り止み故障が回復していれば表示灯も消灯する。しかしたとえば工場 エア が低下したままであると故障が回復していなければ, 故障継続中であることを表わすためベル は鳴り止むが表示灯は点灯したままである。

- (1) 過電流保護
- (2) 欠相保護
- (3) 冷却水差圧保護
- (4) 加熱コイル 温度異常保護
- (5) 変圧器油温上昇保護
- (6) 空気圧低下保護
- (7) 後部作業中

その他 フアスイッ チをはじめ電氣的, 機械的 インターロック をとってあり作業者の操作中の安全処置をほどこしている。

6. ガス炉との経済比較

同じ能力を持ったアルミ 押出し用誘導加熱装置とガス 炉について初年度負担額を表 6.1 に比較したが, 誘導加熱装置は設備費は高

くつくが, 加熱費, 起動停止のためのむだ時間の皆無, 人件費等による運転費の経費低減がそれを補なってあまりあるため結局製品原価は安くつく。さらに比較対象にあげていないがこう配加熱の利点, 作業環境の改善, 温度管理に基因する プレス の型の寿命, 製品の歩留りを考えれば圧倒的に誘導加熱が有利である。

7. む す び

アルミをはじめ特殊鋼, 普通鋼の押出し用加熱に誘導加熱が今後とも多く用いられることは, 世界的な時代の傾向といえよう。中容量の標準 ビレットヒータとともに, プレス の大形化にともなう特殊大容量のビレットヒータの需要がますます大きくなってきた。今後よりよいものへと不漸の研究, 開発に努め需要家各位のご期待に沿いたいと思う。この小稿がいささかでも設備計画のご参考になり得れば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 藤井: アルミニウム「金属」38, 44 (1968)
- (2) 藤室・松尾: 鍛造・押出し用誘導加熱装置「三菱電機技報」42, 413 (1968)
- (3) 荻野・藤室: 誘導加熱装置「金属材料」6, 80 (1966)
- (4) SIMPSON: Induction Heating McGraw-hill Book (1960)
- (5) R. M. Baker Classifical Heat Flow Problems Applied to Induction Billet Heating AIEE (1958)
- (6) 日本工業用水協会編: 工業用水便覧 (1958)

低周波ビレットヒータ用変圧器

鶴田 敬二*・川島 亘*

Transformers for Low Frequency Induction Billet Heaters

Itami Works Keiji TSURUTA・Wataru KAWASHIMA

Transformers for low frequency induction billet heaters have been newly developed. The shell type Form-Fit construction unique to the Company being taken up with further special design added to, they are extremely small and lightweight in comparison with the conventional transformers. Based on fully successful results they are now available as the standard products of the Company.

These transformers of the standard series for low frequency induction billet heaters are befitting to heating apparatus, featured by easy inspection, high reliability and containment in the heating apparatus itself.

1. ま え が き

アルミ、銅、黄銅やニッケル合金、ステンレス鋼は押出し、伸線、圧延、製管など多方面に加工されて、その用途には際限がない。近年特にこの種の用途、需要が急増し、同時に工場設備の合理化・高能率化のために、コンパクトで高能率のユニット化された低周波ビレットヒータが多数使用されるようになったが、当社はビレットヒータおよびその電機設備一式の総合メーカーとして特異な存在を誇ると同時に産業界に寄与している⁽¹⁾。

当社は三菱独特の外鉄形（シェル形）変圧器を電力用の大形変圧器および大電流で小形軽量を必要とする特殊変圧器⁽²⁾⁽³⁾として製作してきたが、この種の変圧器を外鉄形で製作しているのは、わが国では当社だけであり、多年の製作経験とたゆまぬ技術の研さんによりこの方面に独特の地歩をきずき、三菱外鉄形フォームフィット変圧器として好評を博している。この外鉄形フォームフィット構造の変圧器は本質的に小形軽量であり、日本国有鉄道の東海道新幹線電車用主変圧器をはじめ、小形軽量かつ堅ろう、高信頼性、保守点検の容易性などの条件が強く要求される車両用主変圧器としても標準的に採用されている⁽⁴⁾。

当社の低周波ビレットヒータ用変圧器はこれらのすぐれた技術に応用し、ビレットヒータおよび電機品の一貫メーカーの特色を利してビレットヒータにマッチした設計、製作を行なっている。

低周波ビレットヒータが製作開始された当初においては、ビレットヒータ用変圧器も一般の変圧器と同様な観念で設計・製作されていたために、外形寸法・重量が大きく、加熱装置に内蔵することが不可能で、

変圧器は加熱装置と別に設置されていた。そのために設備の占有面積が大きく、変圧器と加熱コイル間の大電流の長い接続が必要など、設備として非常に不経済な要素があった。

これら欠点を解消するために乾式水冷式変圧器を採用することによって小形、軽量化をはかり、加熱装置に内蔵した時期もあったが、乾式水冷式変圧器は、後述のように、吸湿、結露による絶縁低下、水冷管の万一の目詰まりに対する処置の困難性、高価などの欠点を有している。そのために再び油入変圧器に目が向けられて、加熱装置に内蔵しうる小形、軽量のビレットヒータ用油入変圧器が開発され、十分な実績をもって標準化が行なわれた。（図1.1）

以下に三菱低周波ビレットヒータ用標準変圧器の概要を紹介し参考に供するしだいである。

2. 設計条件および仕様

2.1 冷却方式および絶縁方式

変圧器の冷却媒体として一般に空気または水が用いられる。冷却水の使用が可能な場合には、水冷式を採用することによって変圧器は当然、小形・軽量・安価となり、さらに変圧器内部の発生熱量は冷却水によって運び去られるから、室内温度の上昇を考える必要がない。

絶縁方式は変圧器内部の冷却方式とは互いに関連があるが、大別すると乾式と油入式があることは周知のとおりである。乾式変圧器は一般に絶縁物が直接外気にさらされているために、わが国のように湿度の高い場所で使用される場合には吸湿による絶縁低下のおそれがある。これは特に断続的に運転される条件にある場合にはスペースヒータなどによる保護がなされていないかぎり顕著である。さらに乾式水冷式の場合には結露による絶縁低下のおそれもある。

図2.1は乾式水冷式の場合の巻線切断面の一例であるが、高圧巻線および低圧巻線内に発生した熱は低圧銅板コイルあるいは冷却銅板の外側にろう付けされた冷却管を流れる冷却水によって放熱される。乾式水冷式は一般にこのような構造が採用されるが、万一冷却管の目詰まり、水あかなどによる冷却効果の低下をきたした場合、構造的に冷却管の清掃がきわめて困難である。

油入式では変圧器中身はタンクによって保護されているから、外気の湿度や結露による絶縁低下の心配はなく、また冷却は油-水のユニット再冷却器が用いられるので冷却管の清掃も比較的簡単に行なうことができる。

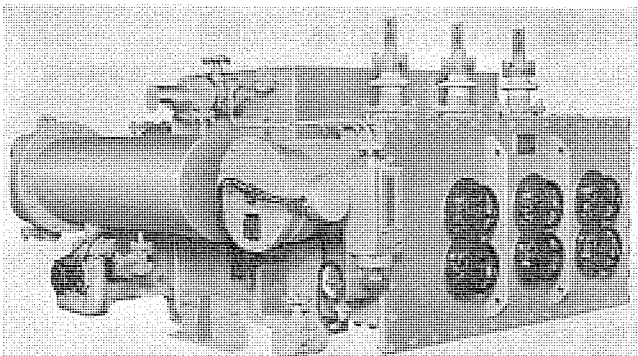
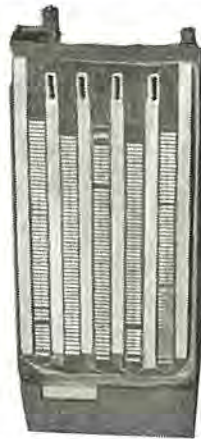
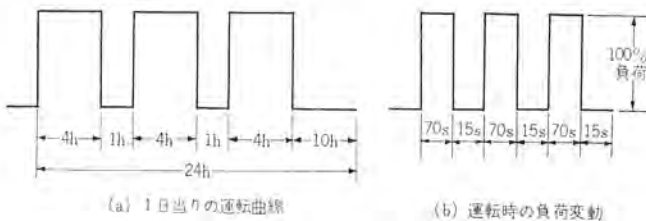
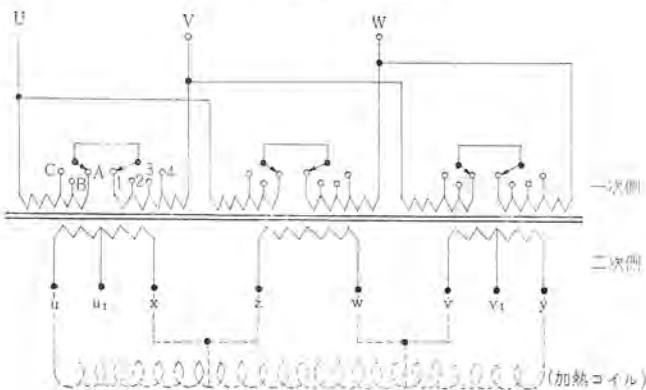


図 1.1 ビレットヒータ用変圧器
Transformer for billet heater.

表 2.1 二次側電圧

Secondary side voltages.

形 名	二 次 側 タ ッ プ 電 圧 (V) と タ ッ プ 切 換 ハ ン ド ル 位 置											
	定 格	全 容 量							低 減 容 量			
		C-4	C-3	C-2	C-1	B-4	B-3	B-2	B-1	A-4	A-3	A-2
SUW- 99	121	115	109	104	99.2	95.0	91.0	87.4	83.5	80.5	77.6	75.0
SUW-120	133	127	120	114	108	104	99.2	95.0	90.4	87.4	84.1	81.0
SUW-165	157	148	140	132	126	120	115	109	104	100	96.4	92.3
SUW-210	181	169	159	150	143	136	129	123	119	114	109	105
SUW-270	203	192	181	169	161	154	147	139	131	126	121	116
SUW-315	236	220	206	194	186	176	167	159	152	145	139	133
SUW-360	259	245	232	216	203	194	186	176	165	159	153	147

図 2.1 乾式水冷式変圧器の巻線断面図
Cross section of dry type water-cooled transformer windings.図 2.2 負荷条件
Operating conditions.図 2.3 結線図
Connecting diagram.

以上の理由から、油入式が採用され、さらに冷却を合理的に行なうために強制油循環式として、油入送油水冷式で標準化が行なわれている。

2.2 周波数および電圧

周波数は 50 Hz と 60 Hz の二地域があるが、変圧器本体は 50/60 Hz 共用として、油ポンプのみを考慮すれば 50 Hz、60 Hz どちらの地域においても使用できるように考えられている。

高圧側の電圧は 6,600 V および 3,300 V の二系列によって標準化

表 2.2 標準変圧器の形名
Type names of standard transformers.

許容実負荷 (kVA)	連続容量 (kVA)	相 数：三相 周波数：50 Hz または 60 Hz			
		一次側電圧 3,300 V		一次側電圧 6,600 V	
		冷却器左側配置	冷却器右側配置	冷却器左側配置	冷却器右側配置
1,200	990	SUW-99-L3	SUW-99-R3	SUW-99-L6	SUW-99-R6
1,500	1,200	SUW-120-L3	SUW-120-R3	SUW-120-L6	SUW-120-R6
2,000	1,650	SUW-165-L3	SUW-165-R3	SUW-165-L6	SUW-165-R6
2,500	2,100	SUW-210-L3	SUW-210-R3	SUW-210-L6	SUW-210-R6
3,200	2,700	SUW-270-L3	SUW-270-R3	SUW-270-L6	SUW-270-R6
3,800	3,150	SUW-315-L3	SUW-315-R3	SUW-315-L6	SUW-315-R6
4,300	3,600	SUW-360-L3	SUW-360-R3	SUW-360-L6	SUW-360-R6

表 2.3 必要な冷却水量
Volumes of cooling water required.

形 名	必要冷却水量 (l/min)
SUW-99	40
SUW-120	50
SUW-165	60
SUW-210	90
SUW-270	120
SUW-315	150
SUW-360	180

ただし冷却水入口温度は 30℃ 以下

を行ない、それ以下の電圧、たとえば 6,000 V あるいは 3,000 V の受電電圧の場合でも、二次側タップ電圧の適当な選択によって標準品が使用できるように考慮されている。

低圧側の電圧は加熱コイルから要求される電圧と、上記の標準化の条件によって 12 ステップのタップ電圧が選択できるようになっている。表 2.1 は標準変圧器の二次側電圧の一覧表である。

2.3 容量と形名

表 2.2 に標準変圧器の容量と形名を示す。ヒートヒータは一定負荷で連続使用されることはなく、間欠的に使用されるから、変圧器の利用効率(運転率)を考慮すれば実際の負荷は変圧器の連続容量以上の負荷が許容される。

表 2.2 中に示された許容実負荷は、ヒートヒータの操業度を考慮して決定された図 2.2 の負荷条件および試験結果などをもとにして、電子計算機によって寿命計算を行ない、さらに端子、タップ切換器などの通電容量を考慮して決定されたものであって、この容量として使用されてもならん支障はない。

2.4 冷却水

冷却に必要な流量は表 2.3 のとおりであり、冷却水の入口温度は 30℃ 以下として考えられている。冷却水出口の温度上昇は変

圧器の容量およびそのときの負荷によって異なるが、規定流量、最大負荷のとき約 10°C である。

2.5 結線とタップ切換方式

ヒータの加熱に必要な電力は本質的には単相であるが、これを単相負荷として使用することは好ましくなく、一般の低周波ヒータは三相負荷として使用できるようにくふうされている。そのために変圧器の三相結線は特殊な結線となり、従来は単相変圧器を3台用いて三相結線がなされていたが、三菱ヒータ用標準変圧器は図 2.3 に示す結線を採用し、かつ重量、寸法の小さい三相変圧器で製作されている。図中の点線部分は加熱コイルおよび加熱コイルとの接続を示しているが、変圧器二次側の端子配列も加熱コイルとの接続が容易に行なえるように考えられている。

タップ切換は無電圧で行なわれるが、迅速に行なえるように、図 2.3 に示すとおり A、B および C の粗調整と 1、2、3 および 4 の密調整によって行なわれる。タップ位置と二次電圧の関連は表 2.1 に示されている。

3. 構造

3.1 外形

寸法、重量は三菱独特の外鉄形フォームフィット構造の採用と特殊設計によって、図 3.1 および表 3.1 に示すとおり、従来の変圧器に比較して格段に小さく、加熱装置との適合性が十分に考慮されているから、加熱装置内に収納することがきわめて容易である。さらに変圧器本体には加熱装置からの引出し、押込みが便利のように車輪が取り付けられている。

ヒータを2台以上設置するときには、その操作を便ならしめるために2台を一組として全く対称に配置される場合が多い。そのために、変圧器も全く対称な2種類のものが標準化されている。表 2.2 に示すように、冷却器が変圧器正面に向って左側または右側に取付けられているものを、それぞれ冷却器左側配置または冷却器右側配置として、たとえば、それぞれ SUW-99-L3 または SUW-99-R3 のように L と R で形名を区別している。図 3.1 は冷却器左側配置の図であるが冷却器右側配置のものはこれと全く対称である。

タップ切換器ハンドルはその操作がひんばんに行なわれるので最も操作しやすい変圧器正面に配置され、冷却水の入口、出口の接続フランジは変圧器背面、二次側端子側すなわち加熱コイル側に配置して、冷却水の配管が簡単に行なえるように考えられている。また、冷却器はユニット型であるため、水配管が非常に単純であり、漏水のおそれはきわめて少ない。

3.2 内部構造

外鉄形変圧器の中身の水平断面は内鉄形と異なりく(矩)形状であって、コイルは絶縁物によって完全に包まれたうえ鉄心に囲まれているから、外力を受けて損傷する心配は全然ない。また絶縁上の距離はまったく不要である。したがって中身すなわち鉄心とタンク内側とは、単に組立上の余裕寸法と鉄心冷却に必要な若干のスペースがあればよいわけで、この間けきを極度に切りつめ、変圧器中身とタンクとを作りつけにしたものがフォームフィット変圧器である。

図 3.2 は普通の外鉄形変圧器(a)とフォームフィット変圧器(b)との比較を示す垂直断面図である。普通形の場合は図 3.2(a)に示すように鉄心と巻線を保持するためにみぞ(溝)形鋼や山形鋼で組み立てられた端わく(枠)と呼ばれる締め付け金がいわれているが、

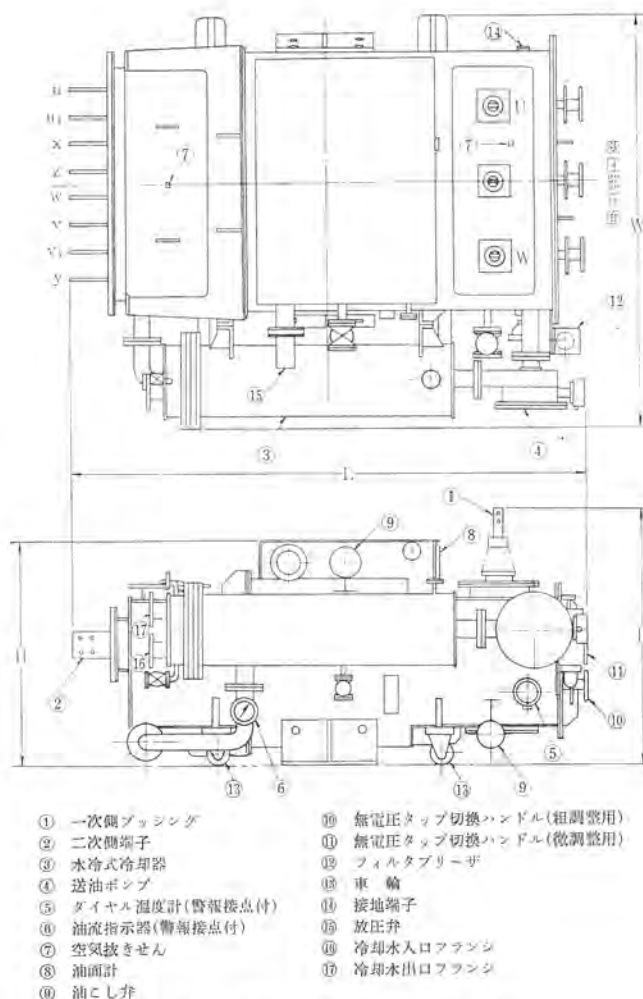


図 3.1 外形 (冷却器左側配置の場合)
Outline drawing.

表 3.1 寸法重量表
List of dimensions and weight.

形 名	寸 法 (mm)				重 量 kg
	w	L	H	B	
SUW-99	1,783	2,070	980	1,122	4,280
SUW-120	1,783	2,079	980	1,122	4,510
SUW-165	1,783	2,159	980	1,122	4,980
SUW-210	1,980	2,284	1,070	1,222	6,250
SUW-270	1,980	2,350	1,070	1,276	6,760
SUW-315	1,980	2,440	1,070	1,276	7,330
SUW-360	1,980	2,510	1,070	1,276	7,800

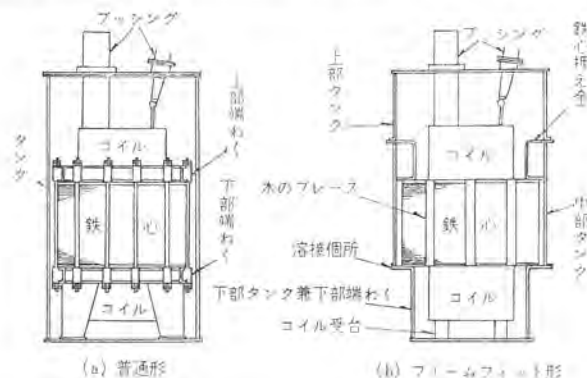


図 3.2 フォームフィット構造説明
Illustration of Form-Fit construction.



図 3.3 絶縁を施した高低圧 コイルグループ
High and low voltage coils insulated.



図 3.4 鉄心積み完了後の中身
Interior view after core assembly.

フォームフィット形ではタンクが上下に2分割されて、上部タンクおよび下部タンクがそれぞれ同時に鉄心と巻線を押さえる上部および下部端わくを兼ねている。

以上から明らかなようにフォームフィット形の構造上とくに異なった点としては、

- (1) タンクを中身にぴったり適合して造っている。
- (2) タンクが鉄心と巻線を押さえる端わくをかねている。
- (3) 鉄心締め付けボルトを使用しない。

の3点である。

以下組立順序を示しながら、その構造をもう少し詳しく述べよう。

高圧コイルを構成する素線導体としてはく形断面をもった平角銅線を用い、この上に良質の絶縁紙を巻いて十分な巻線間絶縁耐力を与えている。この絶縁紙には従来の絶縁紙に比べて熱特性のすぐれた三菱 HI-L 絶縁紙(変圧器用耐熱処理絶縁紙)⁽⁵⁾が使用されているので従来の変圧器に比べ、熱劣化が少なく、それだけ寿命が長く、過負荷特性がすぐれている。さらに絶縁紙は最外層の一枚だけに固着剤を塗布したものをを用いているので、コイルの成形は容易で、乾燥後は線間が固着してがんじょうな一枚のコイルになる。

低圧コイルは銅板を使用し、所要の形に切断したうえ、接合部は銅溶接を行なっているから、短絡大電流が流れても、じょうぶで接合部の焼損などに起因する故障は絶対に起こらない。

これら高低圧コイルは合理的な絶縁物の配置とともに組合わせられ、図 3.3 に示すようなコイルグループが形成される。このコイルグループ三相分を下部タンク内に直立させ、コイルの周囲の端わくを兼ねた下部タンクのフランジ上に鉄心を積層する。図 3.4 は鉄心積み後の中身の

写真である。

変圧器に使用される材料のうち、変圧器の特性を左右する重要な材料の一つに鉄心があるが、きわめてすぐれた磁気特性を有する冷間圧延けい素鋼帯が使用されている。このけい素鋼帯は一方向性であるが、鉄損、励磁電流がきわめて小さく、また波打ちがなく占積率の大きい優秀なけい素鋼帯である。

鉄心の構造はひずみ(歪)による特性劣化をなくすために、切断後ひずみ除去のための焼鈍を行ない、その方向性を生かすために、ヨークのレッグ接合部は額縁形に45°に切断して鉄心積みを行なっている。

鉄心積みが終わると、上部タンクを上から中身にすりおろすようにしてかぶせ、鉄心下部で下部タンクと溶接する。

このようにしてできた中身とタンクが一体となった変圧器本体を横に倒し正規の位置にして、無電圧タップ切替器・高圧ブッシング・低圧端子などを取付け、リードの接続が終れば本体の組立が終るわけである。

なお低圧リードは、コイル銅板がそのまま低圧端子付近まで延長された形になっており、これら間をたわみ導体を介して接続するだけであるから、途中多くのボルト接続などの必要がなく、単純で信頼性が高い。

以上述べたとおり、フォームフィット変圧器は、タンクと中身をぴったり適合して造っているの、これに付随してつぎのような種々の特長が生じてくる。

(1) フォームフィットの採用と特殊な設計により、重量、油量をきわめて減少させることができる。表 3.1 に示す重量、大きさは普通の変圧器に比較すると約1/2以下である。

(2) すでに述べたようにタンク壁と鉄心間のスペースがきわめて小さく、油は大部分巻線内部を通して冷却作用を行なうので、油量は少ないにもかかわらず冷却効果がすぐれている。

(3) コイル、鉄心およびタンクが一つの剛体のように構成されていること、また外鉄形特有のコイル構成によって二次短絡時に発生する機械力に強い。

4. 主要付属品

4.1 冷却器

冷却方式として送油水冷式が採用されていることは前述のとおりであるが、変圧器の巻線および鉄心を冷却し蓄熱された冷却油は次項で述べる送油ポンプによって、水冷式冷却器に送りこまれ、ここで冷却されて再び変圧器本体にはいり、変圧器中身の冷却を行なう。

冷却器には図 4.1 にその断面を示すようなユニットクーラが使用されている。この冷却器は図のように、鏡板2枚を使用した二重式の特殊構造で、これによればたとえ水室側鏡板接合部より漏水があっても、2枚鏡板の間げきから外部に漏水するだけで、冷却水が油中に

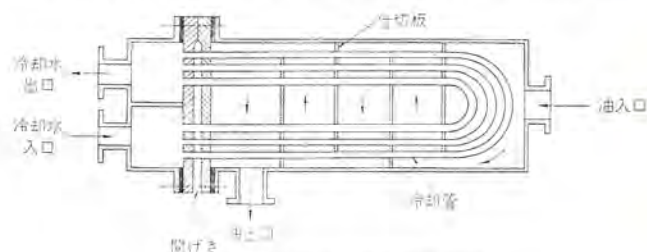


図 4.1 水冷式油冷却器構造図
Cut-away view of oil-cooler.



図 4.2 送油ポンプ
Oil pump.



図 4.3 油流指示器
Oil-flow indicator with alarm contacts.



図 4.4 フィルタブリーザ
Dehydrating filter breather.

浸入することは絶対ない。また冷却管自身は耐食性の強いコンデンサチューブを使用し、鏡板との接合は拡管によって圧接し、溶接は施行していない。管の選定および拡管作業に対しては管の圧着力が失われず、また残留応力によってシーズンクラックの発生しない範囲内の拡管率におさえ、とくに厳密に作業管理が行なわれている。

ユニットクーラの採用により、従来の乾式変圧器に比べつぎのような利点が生ずる。

- (1) 冷却水配管が単純で、漏水のおそれはほとんどない。
- (2) 冷却管は乾式水冷式の場合の冷却管より断面積の大きいものが使用されるから目詰まりの心配はほとんどない。万一、水あか、目詰まりなどによって冷却効果が低下した場合でも、乾式水冷式の場合と異なり比較的簡単にそうじ(掃除)することができる。
- (3) 乾式水冷式のようにコイルを直接水で冷却する構造と異なり、結露による絶縁低下は全くない。
- (4) 万一冷却管に不都合をきたした場合でも乾式水冷式のように

にコイルの修理あるいは取換えをする必要性は全くなく、クーラユニットのみの修理あるいは取換えですむ。

4.2 送油ポンプ

送油ポンプは図 4.2 に示すようにアイソバルチャップ方式を採用した三相電動機とそれに直結したうず巻きポンプからなっており、これらは同一ケーシング内に収められているので、貫通軸がなく油もれの心配はない。電動機の冷却、絶縁およびベアリング部の潤滑はすべて送油ポンプケーシング内を通る変圧器油によって行なわれているので送油ポンプの保守は不要である。

電動機の定格はすべて三相 1.5 kW であり、周波数、電圧はその都度要求に応じているが、標準的な電圧は 50 Hz のとき 200 V または 400 V、60 Hz のとき 220 V または 440 V である。

4.3 油流指示器

油流指示器は油配管途中に取り付けられ、運転中の油流の停止を検知し、警報を発するようにしたもので、図 4.3 にその外観を示す。警報接点にはマイクロスイッチが用いられているため信頼性が高く、またマイクロスイッチおよび指針の部分と羽根との間の駆動力伝達には仕切板を介してマグネットカップリングによって行なわれているから、油もれのおそれはない。

4.4 温度計

温度計はつる巻き形バイメタル式ダイヤル温度計(BA形)が使用され、油温度を測定すると同時に、警報接点により規定油温(80°C)以上のとき警報を発するようにしたものである。感温部は二重構造とし、その保護管は変圧器タンクにパッキンを用いて油密に取り付けられているので、油漏れは完全に防止されるとともに、変圧器の油を抜かなくても簡単に取り付け、取りはずしができる。

4.5 コンサーベータおよび油面計

油の膨張係数は比較的大きいために、油温の変化により、油面が上下するので、変圧器上部に油量の数パーセントの容量をもったコンサーベータが配置されており、油面が常に規定の最低油面以上にあることの確認が容易にできるようにコンサーベータの変圧器正面側に油面計が取り付けられている。

4.6 放圧管

放圧管は万一の変圧器事故のアークなどで油中に発生したガスによる異常圧力上昇を防止するための安全弁であり、放圧管の途中に薄いマイカルタ板の安全膜が取付けられている。

4.7 フィルタブリーザ

変圧器は前述のように、油温の変化に応じていわゆる呼吸作用を行なっているが、大気中の湿気を吸入すれば油の劣化が促進されるので、大気呼吸通路に吸湿剤を配置して吸入空気中の湿気をできるだけ防止して油の劣化を少なくする目的で図 4.4 に示すような FLM 形吸湿呼吸器(フィルタブリーザ)が使用されている。このフィルタブリーザは呼吸空気が油つぼ(壺)に封入された油を通して行なわれるようになっており、防じん作用もかねている。吸湿剤としては青色に着色したシリカゲルを使用しており、この変色(吸湿すると桃色に変色する)をもって吸湿の尺度とし、ガラス窓により外部から容易に監視できるようになっている。

フィルタブリーザは点検、保守が容易なように変圧器正面に取り付けられている。

4.8 無電圧タップ切換器

無電圧タップ切換器は二次側電圧を適宜に変化させるために使用されるもので、操作が容易なように変圧器正面に取付けられている。

このタップ切換器は三相の各相の電圧を単独に調整することができるように各相が独立している。したがって、二次側電圧は各相独立して種々の電圧が選定できるので、ビレットの加熱に対し、自由なテーパー加熱が可能である。

上段に微調整用、下段に粗調整用の切換器が配置されており、それぞれ同一構造の切換器が使用されている。切換器軸の変圧器カバー貫通部は2組のボールベアリングと2組のSB形オイルシールが使用されているので油もれはなく、かつ軽いハンドル操作が得られる。

ハンドルには握手止め金が付いており、ハンドルが定位置にあるときには、この止め金が文字板の穴にばねで圧入されておりハンドルは固定されているから運転中に可動コンタクトがずれるようなことはない。タップを変えるときにはハンドルとともに上記の握手止め金を握りハンドルを回転させる。所定の位置まできたときにハンドルから手をはなせば、握手止め金はばねでもとにもどり、ハンドルがロックされる。

以上のようにこのタップ切換器は、ハンドル操作、定位置停止、ロックがワンタッチで行なうことができ、操作が非常に簡単である。

5. む す び

以上三菱外鉄形フォームフィット構造を採用した低周波ビレットヒータ用標準変圧器の概要を紹介した。冒頭でも記述したごとく、外鉄形フォームフィット構造は本質的に小形、軽量であり、特に日本国有鉄道の交流電気車搭載用の主変圧器として標準的に採用されており、当社はすでに十数年の経験を有し、このすぐれた技術とビレットヒータの一

貫した総合設計によって標準化されたこの標準変圧器は、ビレットヒータによくマッチし、使用しやすいものとして、需要家の好評を博しているが、ビレットヒータ用変圧器の進歩改良は、ビレットヒータ全般の総合的検討に負うところが大きく、今後とも積極的に協力研究していく所存であり、需要家各位のいっそうのご指導を得てさらにより実績を増すことができるように急願している。

なお、この標準変圧器以外の仕様のものについての設計、製作ももちろん可能であるが、標準変圧器の注文に際しては形名と送油ポンプに必要な補機電源の周波数と電圧が与えられれば短納期で納入することができる。

参 考 文 献

- (1) 藤室ほか：鍛造・押出し用誘導加熱装置，三菱電機技報 42, 413 (昭43)
- (2) 小林ほか：電気化学用大電流レクチフォーマ，三菱電機技報 39, 662 (昭40)
- (3) 荻野ほか：アーク炉用フォームフィット形変圧器，三菱電機 34, 936 (昭35)
- (4) 南角ほか：最近の車両用変圧器，三菱電機技報 39, 1547 (昭40)
- (5) 白井ほか：変圧器用耐熱処理紙の実用性能試験，三菱電機技報 38, 769 (昭39)

超々高圧ガスしゃ断器とその実用性能

瀬渡 卓三*・渡辺 次男*・大野 玲*

500 kV SF₆ Gas Circuit Breakers and Their Practical Performance

Itami Works Takuzô SETO・Tsugio WATANABE・Akira ÔNO

In preparation for forthcoming practical operation of 500 kV transmission systems in this country, 500 kV SF₆ gas circuit breakers have been developed and have undergone factory tests. Environmental tests under a severe cold atmospheric condition were conducted in Hokkaido and also field tests against switching surges were made on no-load 275 kV transmission systems, all being proved successful. Now one phase of the circuit breaker is being put to actual performance tests at Takeyama Extra High Voltage Laboratory.

This article describes the results of these tests, touching on actual performance of circuit breakers anticipated in view of their vital role.

1. ま え が き

SF₆ ガスのすぐれたしゃ断性能と絶縁耐力を利用したガスしゃ断器として、昭和40年以来72 kVから300 kVに至る大容量ガスしゃ断器SF形が各電力会社の現有系統で実用化されているが、これは超々高圧用しゃ断器の製品化・実用化を最終目標とする計画的製品化活動の一環といえる。

今やわが国においても500 kV送電の実施を目前に控える時期になり、集積された技術を実用化する段階にいたったので、500 kVガスしゃ断器を設計試作し、社内における各種の性能上の検討を行ない、さらに北海道における耐寒性能実証試験、275 kV系実系統における抵抗投入方式の無負荷線路の開閉試験を実施し、超高压電力研究所武山研究所の実用性能実証試験に供試し、着々と実用化への移行を進めている。

超々高圧用しゃ断器はその重要性から一次的機能の電気的性能はもちろんのこと、付随する二次的機能に対する要求はそれ以下の電圧階級のものに対するものより非常に過酷であるので、とくに実用性能に関する検討を重ね、しゃ断器自体の事故による停電はもとより、保守点検による停電もできるだけ少なくするように努力している。ここにそれらの検討結果について紹介する。

2. 構 造・動 作

図2.1に武山研究所に供試した500 kVガスしゃ断器の1相分を示す。その供試器の定格事項を表2.1に示す。

このしゃ断器の本体構造、油圧操作機構、ガス系統ならびに常時充気式・排気弁方式の消弧方式は300 kV以下の大容量ガスしゃ断器と同様であるので詳細は省略する⁽¹⁾。ただし500 kV系統を経済的に建設するために開閉サージを極力低くおさえることが必要であり、特に投入時のサージは、しゃ断器を抵抗投入方式にすることによって抑制するのが最良とされ、このしゃ断器についても300 kV以下のユニットに使用されている消弧室に投入抵抗および投入抵抗コンタクトを付属させている。投入抵抗コンタクトは図2.2、図2.3に示すように可動コンタクトを駆動する同一シャフトに連結されており、投入時には投入抵抗コンタクトがメインコンタクトより時間にして約10 ms早く接触するようにしている。引きはずし時にはメインコンタクトの固定コンタクトが一定のワイピング距離の間、可動コンタクトに追従で

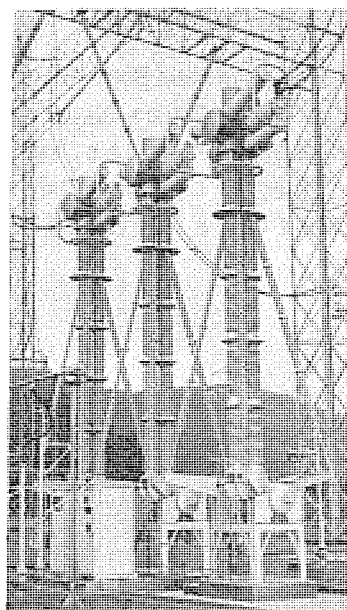


図 2.1 500 kV ガスしゃ断器 1 相分
One phase of 500 kV SF₆ gas circuit breaker.

表 2.1 定格事項
Items on ratings.

定 格 電 圧	(kV)	550
定 格 電 流	(A)	4,000
定 格 周 波 数	(Hz)	50/60
定 格 し ゃ 断 容 量	(MVA)	40,000
定 格 投 入 電 流	(kA)	120
定 格 短 時 間 電 流	(kA)	42
定 格 し ゃ 断 時 間	(サイクル)	2
無 負 荷 投 入 時 間	(s)	0.1
操 作 方 式		油圧操作
定 格 操 作 油 圧	(kg/cm ² g)	320
定 格 制 御 電 圧	(V)	DC 100
定 格 引 け ず し 電 圧	(V)	DC 100
定 格 ガ ス 圧 力	(kg/cm ² g)	
高 圧 側		15
低 圧 側		2
標 準 動 作 責 務		O-θ-CO-1分-CO

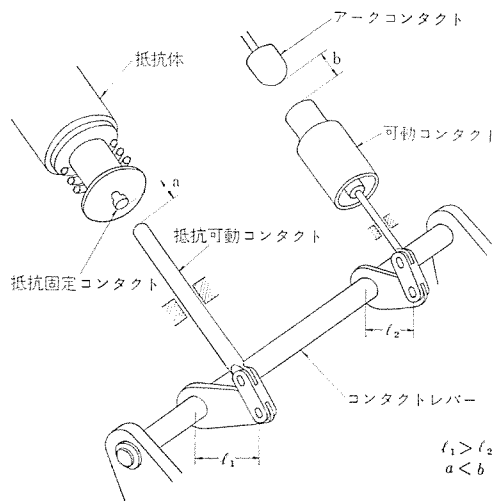


図 2.2 投入抵抗部の機構
Mechanism of closing resistors.

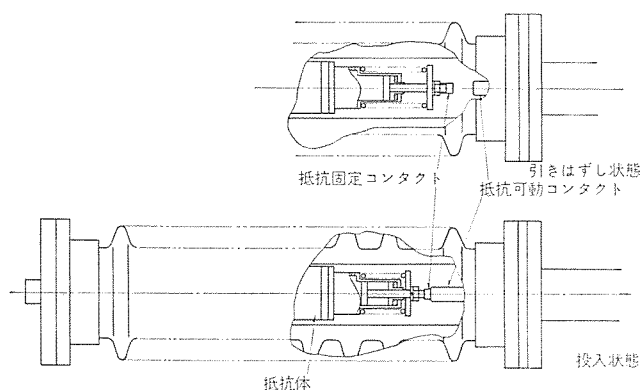


図 2.3 投入抵抗部断面
Cross section of closing resistors.

きるのに対し、抵抗固定コンタクトは抵抗可動コンタクトに追従できないふうがなされているので、抵抗コンタクトよりメインコンタクトのほうが遅れて開極する構造である。定格しゃ断時間は 300 kV 以下が 3 サイクルであるのに対し 2 サイクルであるが、それは油圧操作機構の引きはずし電磁コイルなど、部分的な変更を行なっている。

表 3.1 代表的な短絡試験結果
Results of typical interrupting tests.

試 験 方 法	供 試 器	動作責務	試 験 条 件				全 極 線 路 電 圧 換 算 値			アーク時間 (サイクル)	しゃ断時間 (サイクル)	備 考
			給 与 電 圧 (kV)	しゃ断電流 (kA)	固 有 再 起 電 圧		電 圧 (kV)	しゃ断電流 (kA)	固 有 再 起 電 圧 上 昇 率 (kV/μs)			
					周 波 数 (kHz)	振 幅 率						
単 相 等 価	1/6	〇 〇 〇	66.5	52.5	2.3	1.55	550	52.5	3.35	0.35 0.5 0.6	2.55 2.7 2.8	
単 相 等 価	1/6	〇 〇 〇	80	37.5	3	1.6	663	37.5	5.4	0.35 0.5 0.6	2.55 2.9 2.8	
単 相 等 価 (脱 調 条 件)	1/6	〇 〇 〇	117	24.1	1.8	1.45	1,070	24.1	4.3	0.3 0.4 0.5	2.5 2.6 2.7	525 kV 2 E に相当
単 相 実 負 荷	2/6	〇 〇 〇	195	2.4	2.8	1.7	690	2.4	6.6	0.5 0.45 0.5	2.7 2.65 2.7	
単 相 実 負 荷 (SLF 条 件)	2/6	〇 〇 〇	22	35.8	H 36 L 3	1.7 1.5	—	35.8	3.75 0.5	0.5 0.55 0.5	1.85 1.9 1.85	L=0.82 mH/km とし約1.9 km 相 当の SLF 条件

注) (1) 全極換算電圧は試験条件の給与電圧 $\times \frac{1}{\alpha} \times \frac{\sqrt{3}}{1.1}$ $\alpha=0.19$ は 1/6 極における電圧分布係数

(2) SLF 条件のしゃ断試験は 2 サイクル用操作機構、その他は 3 サイクルの操作機構で実施したものである。

3. 電氣的性能

3.1 シャ断性能

しゃ断部は 300 kV 以下の消弧室と同一ユニットに投入抵抗を追加したものにすぎないので、しゃ断性能に関しては従来のしゃ断試験で十分検証済みといってよい⁽¹⁾。すなわちしゃ断器にとって再起電圧の過酷度がもっともきびしいものといわれている近距離線路故障は再起電圧上昇率が短絡電流に比例しているの、500 kV よりしゃ断点数が少なく短絡電流は逆に大きい 300 kV 用のほうが試験条件はきびしい。回復電圧に関してきびしい条件である脱調しゃ断、充電々流しゃ断についても同様に 240 kV 2 点しゃ断点のしゃ断器のほうが過酷で、これらはいずれも数多くのしゃ断試験を実施後形式試験を受験している。表 3.1 にそれらの結果の一部を示す。

3.2 耐電圧性能

短時間耐電圧試験としては表 3.2 に示す条件で試験し立証した。なお特に超々高圧のしゃ断器になると外雷による極間せん(閃)絡の結果波及するところはきわめて大きいので、極間に関しては衝撃電圧と商用周波電圧の重畳および開閉サージと商用周波電圧の重畳を消弧室ユニット試験で確認し、極間内せんのマージンをかなり大きく持つように考慮した。この件に関してはさらに検討を重ね、新しい試験法の確立が必要であろう。

3.3 投入抵抗

しゃ断器の投入時の異常電圧を抑制する方法としてしゃ断器に投入抵抗を付けるのがもっとも経済的と考えられるため、このしゃ断器は投入専用の抵抗を有している。アナライザの解析等によって投入抵抗値として約 1,000 オーム、抵抗素入時間として 5 ないし 10 ms

表 3.2 耐電圧試験条件
Conditions of dielectric test.

項	目	対地間	極間
AC 電圧 1 分間 (乾燥, 注水)		790	790
衝撃電圧 1×40 μs		±1,800	±1,800
開閉サージ (乾燥, 注水) 100~200×3,000 μs		±1,200	±1,200
衝撃電圧と AC 電圧の重畳	—	—	±(1,800+450)
開閉サージと AC 電圧の重畳 (乾燥, 注水)	—	—	±(1,200+450)

表 3.3 現地投入試験項目
Items of field switching test.

種 別	試 験 内 容	シーケンス	回 数
抵 抗 付	三 相 し ゃ 断	O	8
	三 相 投 入	C	4
	三 相 再 閉 路	O-C	12
	単 相 再 閉 路	O-C (B相)	6
抵 抗 な し	三 相 し ゃ 断	O	6
	三 相 投 入	C	17
	三 相 再 閉 路	O-C	3
	単 相 再 閉 路	O-C (B相)	8
	単 相 再 閉 路	O-C (A相)	6

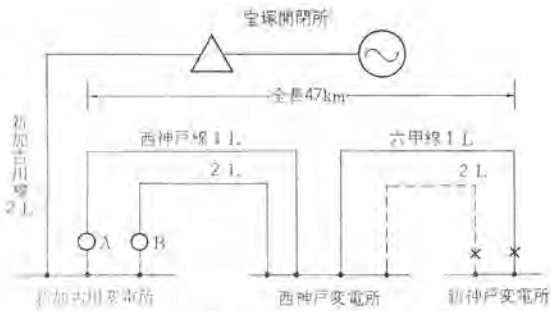


図 3.1 現地投入試験系統
Transmission systems on which switching surge tests were made.

表 3.4 最大サージ電圧倍数実測値
The maximum measured values of the switching overvoltage factors.

試 験 項 目	新 加 古 川 変 電 所									新 神 戸 変 電 所					
	しゃ断時対地電圧倍数			投入時線路残留電圧倍数			投入時対地電圧倍数			投入時対地電圧倍数			投入時線路電圧倍数		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A-B	B-C	C-A
抵 抗 付	三 相 投 入	—	—	—	—	—	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	三 相 再 閉 路	-0.76	+1.28	+1.0	-0.62	+1.0	+0.83	1.0	1.2	1.0	1.0	1.5	1.3	—	—
	単 相 再 閉 路	—	+1.4	—	—	+1.06	—	1.1	1.0	1.0	1.3	1.0	1.0	1.0	1.1
抵 抗 な し	三 相 投 入	—	—	—	—	—	1.3	1.6	1.5	1.4	2.1	1.8	—	—	—
	三 相 再 閉 路	-0.5	-0.7	0	-0.32	-0.5	0	1.7	1.4	1.4	2.3	1.8	1.8	1.0	1.5
	単 相 再 閉 路	-1.22	—	—	-0.95	—	—	1.9	1.2	1.4	2.7	1.3	1.6	1.5	1.4

が適当であることがわかり、このしゃ断器を約1,000オーム、そう入時間約10msに設計した。抵抗体としてはそう入時間10msで短絡投入8回または脱調投入2回の責務に対して余裕のあるように設計している。

3.4 現地投入試験

上記のように開閉サージ抑制のため抵抗投入方式にしているが、そのうらづけとなる実系統における無負荷線路のしゃ断器開閉試験を関西電力、電力中央研究所ならびに当社の共同で、昭和43年5月はじめに実施した。

3.4.1 試験条件

試験は関西電力新加古川変電所—西神戸変電所—新神戸変電所間の西神戸線六甲線47kmで行なった。図3.1に試験系統を示す。なおこの試験系統での条件は試験電圧259~270kV、充電電流は約40Aであった。供試しゃ断器はAは抵抗付、Bは抵抗なしで、抵抗なしは三菱ガスしゃ断器250-SF-2500-S 定格電圧300kVで単相再閉路形である。抵抗付供試しゃ断器は250-SF-2500-Sの消弧室ユニットを500kV用ガスしゃ断器の消弧室ユニットに取りかえたもので、投入抵抗値は約750Ωである。試験項目は表3.3に示す。再閉路時間は19サイクルを目標にした。しゃ断器の投入およびしゃ断は位相制御装置によって位相制御を行なった。たとえば抵抗付三相再投入時しゃ断は残留電圧が最大になるように、投入では60°おきに位相制御をし、投入位相の違いによる過電圧の大きさを調べた。

3.4.2 試験結果

新加古川変電所および新神戸変電所で測定した各試験項目における電圧倍数の最高値を表3.4に示す。抵抗つきでは線路末端の新神戸変電所の電圧倍数は単相再閉路で1.3倍、3相再閉路で1.5倍であるのに対し、抵抗なしでは単相再閉路で2.7倍、3相再閉路でしゃ断位相の条件をよくしても2.3倍とかなり高い電圧が発生した。これらの実測結果にもとづいて、この試験回路で発生するサージ倍

表 3.5 最大サージ電圧倍数推定値
The maximum possible overvoltage factors in switching.

試 験 項 目	抵 抗 な し	抵 抗 付
三 相 投 入	2.1	1.0
三 相 再 閉 路	3.5	1.7
単 相 再 閉 路	3.1	1.3

率の最大値を推定計算すると表3.5のとおりであり、理論計算とほぼ同様の結果が得られた。

この試験条件は故意にしゃ断器を不ぞろいしゃ断とし、残留電圧が最大となるような過酷なケースであり、実際にはそのようなケースはほとんど発生しないと考えられる。

以上の実測結果から超々高圧用ガスしゃ断器の開閉サージ抑制効果が大なることが実証された⁽²⁾。

4. 実 用 性 能

超々高圧用ガスしゃ断器の実用性能のうち特に耐震性能、耐寒性能、SF₆ガス中の水分の管理、ガス漏れの管理をとりあげてのべる。先にも記したように超々高圧用のしゃ断器にとって実用性能はきわめて重要なことであり、500kV送電実証試験研究委員会においても、500kVしゃ断器の実用性能について現地実証試験を実施することに決定し、当社のガスしゃ断器も超電研武山研究所に供試し、昭和43年7月から昭和44年末までの予定で次の検討項目について試験されている。図2.1はその供試器の外観である。

検討項目

(a) 安全性

高圧空気、ガスおよび油圧系統ならびに保守点検時の安全性

(b) 保 守

据付調整方法、分解点検時の作業性

(c) 操 作



図 4.1 振動試験状況
View of vibration test.

付属機器を含む各部の操作性能

(d) 耐候性

汚損・湿度・温度変化などに対する長期間にわたる耐候性

(e) 耐震性

4.1 耐震性能

近年続発した地震によるシャ断器の被害により、従来のように 0.5 G の水平力を仮定した静的耐震設計の取り扱い方では不十分であることが判明した。特に高さの高い超々高圧用シャ断器に対しては、静的な強度計算以外にその機器に加わるであろう地震波を想定し、その地震波によってどのように揺れ動き、その結果不都合が起これないかどうかを解析する必要性が生じてきた。その際根拠のない安全第一という不経済な設計は避けるべきで、そのことはシャ断器自体の経済性、保守点検の不便さに限らず、基礎や他の機器の協調等にも関連するので、合理的な最適設計が確立されることが必要である。

当社は早くからモデルによる実験、電子計算機による解析、実体の加振試験等を行ない検討を重ねてきているが、詳細は別の機会にゆずり、ここには超々高圧用ガスシャ断器について最終的に大形加振機を使用した実体加振試験によってその耐震性能を実証したので、それについて紹介する。

4.1.1 大形加振機による実体加振試験

わが国においては電力機器の耐震強度についていまだ明確な規格の制定をみていない。地震については不明な点が多く、それだけに想定地震波の考え方は人によって相違している。当社では独自の立場で各種の耐震強度の検討方法を試み、最終的に実地震波形たとえば今までに記録された中で最大加速度の EL Centro 波や新潟地震波などによる実体の加振を行なえる大形加振機を設置した。

図 4.1 に超々高圧用ガスシャ断器 1 柱の加振状況を示す。表 4.1 にその試験結果の一例を示す。われわれとしては過去の地震のデータにもとずき EL Centro 波の実振動に対しても安全であることから、超々高圧ガスシャ断器の耐震性能は十分であると判断している。

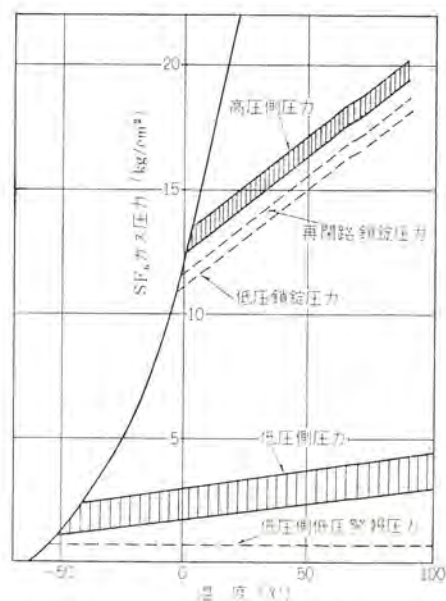


図 4.2 SF₆ ガス圧力-温度特性
Pressure-temperature characteristics of SF₆.

表 4.1 振動試験結果
Vibration test result.

加振方向	固有振動数 Hz	減衰比率 %	EL Centro 地震波に対する応答	
			先端加速度 g	破壊、不具合点の発生
同相極間方向	1.9	3.9	1.51	無
相間方向	1.9	4.9	1.35	無

4.2 耐寒性能

SF₆ ガスは図 4.2 に示すような液化特性があって、このシャ断器の高圧側の使用圧力は図 4.2 の斜線の範囲に制御しているので、高圧側ガス温を 0°C 以上にして液化を防ぐため高圧系統にガスヒータを設け高圧側ガス温度によって入り切りし、あたためられたガスをブローによって循環させる方式を採用している。ガスヒータの容量は想定される最悪の気象条件においても、外気への熱放散に見合う十分な量が望ましいが、補助電源を少なくする目的で適当な保温装置を施し、ガスヒータ容量を少なくするように考慮している。これらの対策に関する試験は所内においてドライアイス、大形送風機等を使用して人工耐寒試験で確認したが、さらに自然状態での実証のため、北海道電力と共同で昭和 43 年 1 月から 2 月にかけて西旭川変電所において、500 kV ガスシャ断器 1 柱について耐寒実証試験を実施したのでその概要をのべる。

4.2.1 現地耐寒試験

図 4.3 にその試験状況を示す。

(1) ガス系統温度-圧力特性試験

(a) 試験ケース

ヒータ容量、ブロー運転停止状態、各保温装置の有無等について実施した。

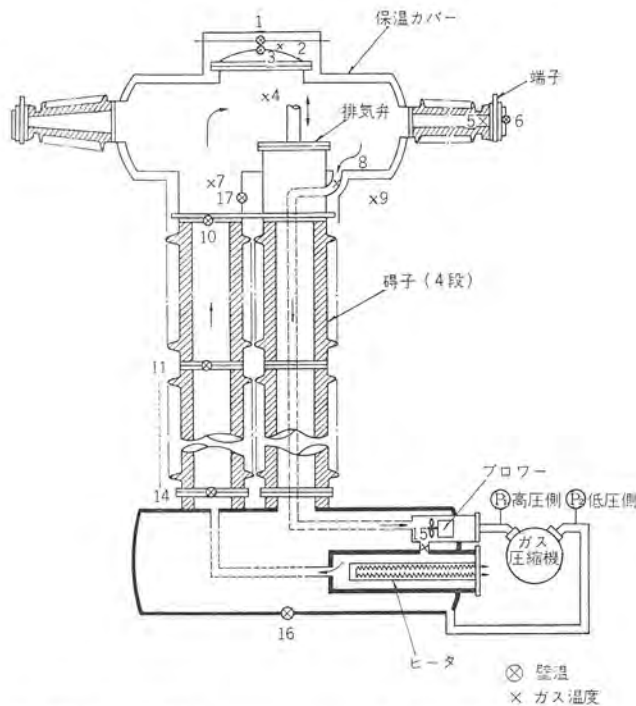
(b) 測定項目および測定法

気象条件（外気温・風速・気圧・湿度・天候・積雪）、ガス圧力、シャ断器各部の温度、図 4.4 に測定箇所を示す。

風速はピラミッド回転風速計で 2 分間の平均風速を測定した。シャ断器各部の温度は熱電対を使用し、マイクロボルトメータおよび記録計を使用した。



図 4.3 現地耐寒試験状況
Field test under cold atmosphere.



- ① 保温カバー内壁温度
② 保温カバーと上部タンクとの空間温度
③ 上部タンク壁温度
④ 上部タンク内ガス温度
⑤ がいし先端ガス温度
⑥ 端子表面温度
⑦ 上部タンク高圧ガス入口温度
⑧ 上部タンク高圧ガス出口温度
⑨ 外気温度
⑩ がいし表面温度
⑪ がいし表面温度
⑫ がいし表面温度
⑬ がいし表面温度
⑭ がいし表面温度
⑮ ヒータ高圧ガス入口温度
⑯ 下部タンク壁温度
⑰ 上部タンク高圧ガス入口温度

図 4.4 温度測定点
Temperature measuring points.

(c) 測定結果

測定結果のうち代表例を図 4.5 に示す。これらの測定結果から常規使用状態（最低周囲温度 -20°C ）において十分満足な性能を有していることが実証できた。また、ブロー停止時の影響、各保温装置の効果等について確認できた。

(2) 開閉動作特性試験

周囲温度による開閉動作特性の信頼度について、しゃ断器の据付時、試験開始時、ならびに投入状態で約 20 日間経過後の 3 回にわ

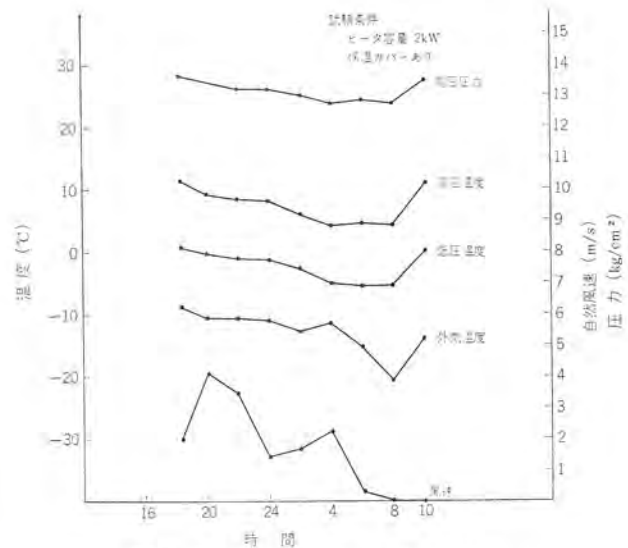


図 4.5 温度—圧力測定結果
Result of temperature and pressure tests.

表 4.2 開閉特性試験結果
Result of operating test.

(a) 投入特性試験

日付	制御電圧 V	操作油圧 $\text{kg/cm}^2 \cdot \text{g}$	投入時間 ms
42 年 10 月 27 日	110	260	85
	110	320	80
	110	336	79
43 年 1 月 14 日	114	260	86
	114	320	80
	114	336	78
43 年 2 月 2 日	114	260	86
	114	320	82
	114	336	78

(b) 引きはずし特性試験

日付	制御電圧 V	操作油圧 $\text{kg/cm}^2 \cdot \text{g}$	開極時間 ms
42 年 10 月 27 日	110	260	31
	110	320	32
	110	336	32
43 年 1 月 14 日	114	260	31
	114	320	32
	114	336	32
43 年 2 月 2 日	114	260	32
	114	320	32
	114	336	32

(c) 引きはずし自由特性試験

日付	制御電圧 V	操作油圧 $\text{kg/cm}^2 \cdot \text{g}$	投入時間 ms	開極時間 ms	油消費量 $\text{kg/cm}^2 \cdot \text{g}$	ガス消費量 $\text{kg/cm}^2 \cdot \text{g}$
42 年 10 月 27 日	110	260	85	31	15	0.3
	110	320	80	32	23	0.3
	110	336	79	33	28	0.3
43 年 1 月 14 日	114	260	84	32	21	0.3
	114	320	78	32	34	0.3
	114	336	78	33	37	0.3
43 年 2 月 2 日	114	260	86	32	24	0.3
	114	320	82	33	38	0.3
	114	336	80	33	43	0.3

10 月 27 日 外気温 8°C
1 月 14 日 外気温 -3°C
2 月 2 日 外気温 -18°C

たって試験を行なった。その結果の一部を表 4.2 に示す。なお操作機構は 300 kV 用ガスしゃ断器のものを使用しており、定格しゃ断時間は 3 サイクルである。

開閉動作特性は外気温の違いによる変化はほとんど認められず良好である。その他制御系統に使用している各機器たとえば油圧スイッチ・油圧安全弁・温度補償圧力スイッチ等の特性についても同様に

表 4.3 水分測定結果
Measured moisture contents. PPM

		高 圧 側	低 圧 側
夜	間	11~20	27~33
早	朝	24~30	40~51

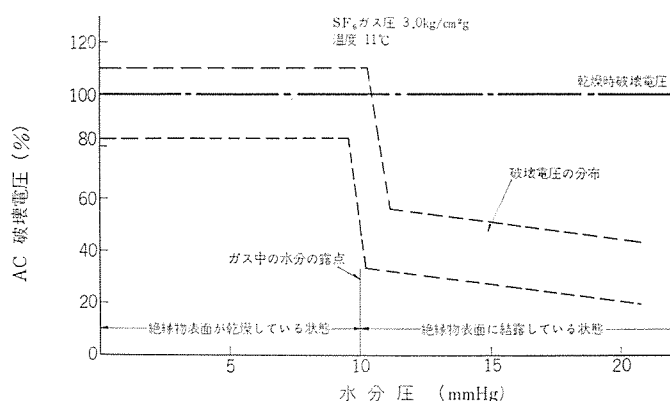


図 4.6 水分圧とAC破壊電圧の関係
AC dielectric strength vs. moisture content.

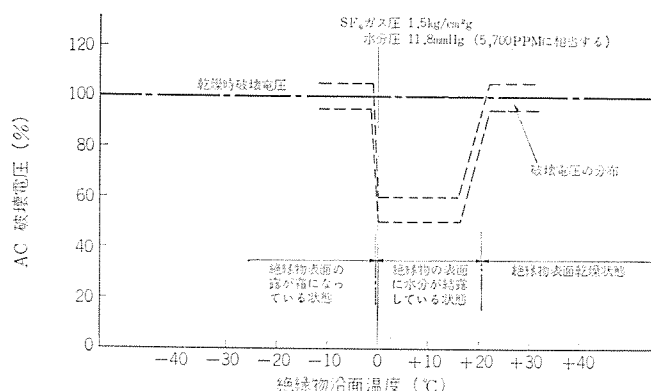


図 4.7 AC破壊電圧と絶縁物沿面温度の関係
AC dielectric strength vs. temperature of insulator surface.

表 4.4 SF₆ガス中の許容水分量
Theoretical-allowable moisture level in SF₆ gas.

圧 力	kg/cm ² ・g	許 容 水 分 量	PPM
14.0		400	
7.0		750	
3.0		1,500	
1.5		2,400	

表 4.5 水分量実測結果
Measured moisture content in SF₆ gas.

設 置 場 所	形 名	据 付 日	水分測定日	水分量
関 電 湖 南 S/S	250-SF-2500 1号機	41年 7月	41年 7月	85 PPM
	250-SF-2500	41年 7月	42年 2月	80 PPM
	250-SF-2500	41年 7月	42年 11月	80 PPM
中 部 電 力 岩 塚 S/S	70-SF-500	40年 7月	40年 7月	70 PPM
	70-SF-500	40年 7月	42年 4月	85 PPM
四 国 電 力 新 徳 島 P/S	170-SF-1000 1号機	43年 5月	43年 5月	50 PPM
四 国 電 力 新 徳 島 P/S	170-SF-1000 2号機	43年 5月	43年 5月	55 PPM
超 電 研 実 用 性 能 実 証 試 験 機	500-SF-4000	43年 6月	43年 6月	46 PPM
	500-SF-4000	43年 6月	43年 10月	48 PPM

良好であった。

漏れガスについても試験開始時、完了時フロンリークテストを実施し異常のないことを確認した。

(3) 水分測定

SF₆ガス中の水分量を一昼夜以上にわたってその変化の有無ならびに各場所の差を実測したが、いずれも水分量はきわめて少なく良好であった。測定結果の一部を表 4.3 に示す。

以上のようにこのガスシャ断器はすぐれた耐寒性能を有していることが実証された。

(4) 点検作業

極寒時における点検作業の難易についても調べたが、外気温-15℃程度であれば屋外作業でも2時間程度は支障なかった。SF₆ガスの取り扱いも、充てん時に強制的にガスに熱を与える必要はあったが、支障はなかった。

4.3 SF₆ガス中の水分管理

当社ではSF₆ガスシャ断器を開発するに先立ちSF₆ガスの物理・化学的性質、消弧能力、他の材料への影響等について基礎的な研究を行ってきたが、ガス中に水分が含まれた場合の絶縁特性についても、早くから注目し研究を重ね、次のような結論を得ている。

(1) SF₆ガス中に水分が混入した場合、混入量が多く絶縁物表面に水滴がつくと耐電圧が低下するが、混入水分量が少ない場合には耐電圧の低下はない。水分圧と耐電圧の関係は図 4.6 のようになる。

(2) 絶縁物表面に水分が氷の状態で付着しても図 4.7 に示すように絶縁性能に変化はないので、露点氷点以下になるように水分を制限する必要がある。すなわちガス中の水分圧を0℃における飽和蒸気圧4.6 mmHg以下にする必要がある。ガス中の水分量は普通 PPM 単位 (水の分子数/ガスの分子数×10⁶) で表わされ、ガス中の許容 PPM 値はガス圧力によって異なり表 4.4 のようになる。

4.3.1 ガスシャ断器の水分管理方法

上記の研究結果よりSF₆ガス中の水分の管理として次の項目を実施することにした。

(1) ガス中に水分を多量に放出しない含有水分量の少ない絶縁材料を使用する。

(2) シャ断器内部に必要な量より十分多量の活性アルミナを入れる。

(3) シャ断器のガス充てん時、外部より水分が入らぬように注意し、真空乾燥作業を十分に行なう。

(4) シャ断器据付時にガス中の水分量を測定し、管理限界内にあるかどうか確認する。管理限界は十分な安全率をとって決めている。

(5) 冬期、ガスヒータで温められたガスはブローで強制循環させて、シャ断器内部で部分的な液化を生じ、ガス水分の偏圧がおこらないようにする。

4.3.2 実用機における水分量の実測結果

実用機の水分量の実測値の一部を表 4.5 に示す。いずれも管理限界値より十分低い値であり、長期間経過後も何ら問題ないことを実証している。

4.3.3 米国ガスシャ断器との比較

1966年から1967年にかけてアメリカでガスシャ断器の絶縁破壊事故を起こしたが、その原因はガス中の水分によることが究明され水分含有量を規定値以下に管理する対策がとられている。

表 4.6 当社ガスしゃ断器と米国ガスしゃ断器の比較表
Comparison between Mitsubishi gas circuit breakers
and Westinghouse's.

項 目	当社大容量ガスしゃ断器	米国ガスしゃ断器
消 弧 方 式	高圧ガス排気方式	高圧ガス吹付方式
	高 圧 約 15 kg/cm ² ・g 低 圧 約 3 kg/cm ² ・g	高 圧 約 15 kg/cm ² ・g 低 圧 約 3 kg/cm ² ・g
操 作 機 構	油圧操作機構	空気操作機構
ガス液化防止法	ヒータ・ブローア併用による 強制循環方式	ヒータによる自然対流方式
操 作 棒	ガラスエポキシ棒	ウッドマイカルタ棒
高圧ガス送気管	強化エポキシチューブ	マイカルタチューブ
支持がいし取付法	セメント付フランジ方式	ウッドマイカルタ棒によるクランプ方式

このガスしゃ断器は、周囲温度が4℃以下になると消弧室の高圧ガスだめ内部のSF₆ガスが液化し、送気チューブを伝って下タンクへ流れおち、そこでヒータによって気化され上昇する方式である。

SF₆の気相・液相が平衡状態にあるとき、液体SF₆中に含まれる水分は、気体SF₆中に含まれる水分よりはるかに少ないことから上部の高圧ガスだめ中でSF₆が液化するとき、気相のSF₆中に水分を置き去りにする。この液体SF₆が下タンクで気化して上部高圧ガスだめに戻るときは、下タンクの水分を吸着して上昇するので、水分が上部の高圧ガスだめに偏在するようになる。この結果高圧ガスだめ中の水分が増しついに水滴となり、送気チューブ内を流れおち絶縁破壊に至ったものである。

その対策として、ガス中の水分量の管理基準をきめ、これに合格するように高低圧間にガスリークのバイパスを設けてガス圧縮機を運転してガスを強制循環させ、ガス回路にはいつている乾燥剤のフィルタでガスを乾燥させる方法をとった。また吸湿性の少ない信頼性の高いエポキシ等の絶縁物にかえることにした。

これらの対策は当社が製品製作当初から行なっている処置と何ら本質的に変わりはない。

アメリカで事故を起こしたガスしゃ断器と、当社のガスしゃ断器の相違点をまとめると表4.6に示すように、水分の含有量の少ない絶縁物を使用し、しかも使用量が少ないとか、ヒータ・ブローア併用による強制循環方式を取り、消弧室に水分の偏在することを防止しておりSF₆ガス中の水分量が少なくなるよう十分に考慮している。

4.4 ガス漏れの管理

しゃ断器の正常状態を維持するためガスの外部への漏れを極力避けなければならない。SF₆ガス空間と外気のシール面はほとんどOリングを使用しているが、当社においては細心の注意をはらい、素材の検査、機械加工やめっき後の検査、さらに組立後の次の検査を実施している。

(1) 真空テスト

真空状態で長時間放置して真空度の低下が規定値以下のことを確認する。

(2) ハロゲン気密試験

フ里昂と空気の混合気体をつめリークディテクタによって漏れ箇所の有無を検査する。この試験によってガス漏れ量の定量的測定が可能である。その概要を紹介する。

4.4.1 ガス漏れ量の定量的測定法と管理基準

当社ではシール個所のガス漏れの定量的測定方法としてシール個所を一定時間容器で包んで、ここに漏れ出たフ里昂の分圧をリーク検出器によって知り、フ里昂の混合比、被測定物および集積用容器の容積、内部圧力、集積時間などの数値から単位時間当たりの気体の洩出量を算出することになっている。

たとえば、4年間に低圧側圧力が図4.2の警報圧力にならず、無給運転であることを目標にして、シール1か所の許容ガス漏れ量を求めることができる。

そこでシール1か所当たりの許容ガス漏れ量 $: JV (l/h)$

フ里昂混合比 $: A$

集積用容器の容積 $: M (l)$

リークディテクタの読み $: R$

集積容器内のフ里昂の分圧 $: K$

とすると、リークディテクタの読み R はフ里昂の分圧 K によって得られるがその関係は

$$K = 6 \times 10^{-7} R$$

である。一方フ里昂分圧 K は

$$K = A \cdot JV / M$$

であるので

$$R = 1.67 \times 10^6 \cdot A \cdot JV / M$$

から求められリークディテクタの読みが上記の値以下であれば、全シール個所が同等の漏れが発生しても、4年間にガス漏れによる警報の発生がないこととなる。なお工場内でのしゃ断器の組立時には、実際には判定基準として上記で求められる R 値より1けたないし2けたの安全率で管理しており、ガス漏れの管理は十分といえる。

5. む す び

以上記したように、超々高圧用ガスしゃ断器については諸試験、とくに実用性能に關しての試験を実施し十分検討を重ねており、きたるべき500 kV級送電運転時点においてはその使命のいったんをになうに十分なものであると確信している。さらに実用性能実証試験の結果、ユーザーのご意見、300 kV以下の実用経験を十分に活用して、検討改善に努めたい所存である。

筆をおくにあたって、このしゃ断器の各種試験にご尽力賜わった関西電力、電力中央研究所、北海道電力、超電研武山研究所はじめ関係各位に紙上をもって心から謝意を表する次第である。

(昭和43-12-26受付)

参 考 文 献

(1) 富永、森岡：三菱電機技報 39, 971 (昭42)

(2) 吉田、田中、尾崎、瀬渡：昭和43年関西支部連合大会

三重県三瀬谷発電所長ヶ逆調整池のゲートおよびゲート制御装置

西島 淳方*・滝沢 博**
持田 雅夫⁺・柳沢 忍⁺⁺・山田 米造⁺⁺⁺

Gate and Gate-Control Equipment for Misedani Nagake Secondary Regulating Pond in Mie Prefecture

Mieken Kigyochō Atsumo NISHIJIMA
Sato Kogyo Co., Ltd Hiroshi TAKIZAWA
Mitsubishi Electric Corp., Kamakura Works Masao MOCHIDA
Mitsubishi Electric Corp., Communication Equipment Works Shinobu YANAGIZAWA
Mitsubishi Electric Corp., Head Office Yonezo YAMADA

Misedani power station has been constructed as one of projects for irrigation and power development of Miyagawa. This power station is used as the peak load station, but its operation tends to cause troubles for irrigation of fields and fishery in the downstream. To avoid these troubles, Nagake secondary regulating pond has been set up to adjust the water discharge of the power station to natural flow of the river. In this Nagake regulating pond, the discharge control is made by means of a gate, and many features are involved in it such as employment of a large hinged-leaf gate, constant discharge control with an analogue computer and the remote control. This article describes the outline of the gate and its control devices.

1. ま え が き

近年、河川、水路における灌漑用水・都市用水の確保、洪水調節などの目的で多目的ダム・取水せき(堰)の建設など利水事業が、随所で行なわれている。これに伴い、ゲートによる取水量または放流量制御、定水位制御などゲートの自動制御、ゲートの集中監視制御が盛んに実施されている。

この一例として、大形起伏ゲートの採用、アナログ計算機による定放流制御、遠方制御による無人化など、多くの特長を有する長ヶ逆調整池のゲートおよびその制御装置について、設備概要を紹介する。

2. 計 画 概 要

三瀬谷発電所は、わが国最多雨地帯の大台ヶ原を源とする、宮川の総合開発事業の一環として建設された発電所で、伊勢の地、松阪市の南々西、約25 kmに位置する。この発電所は日調整のせん(尖)頭負荷発電所であるため、急激な増減を伴う放流となり、下流の農業用水・河川漁業に影響を生じる。このため、発電所下流約5 kmの長ヶ地内に逆調整池が築造された。

この逆調整池の施設の特徴を列挙すると次のとおりである。

- (1) 大型起伏ゲートによる連続定放流
- (2) アナログ計算機による定放流制御
- (3) 定放流制御回路の無接点化
- (4) こう(開)門式魚道の採用
- (5) 遠方監視制御による無人化

2.1 施設の概要

- (1) 三瀬谷発電所

発電型式	ダム式
使用水量	最大 40 m ³ /s

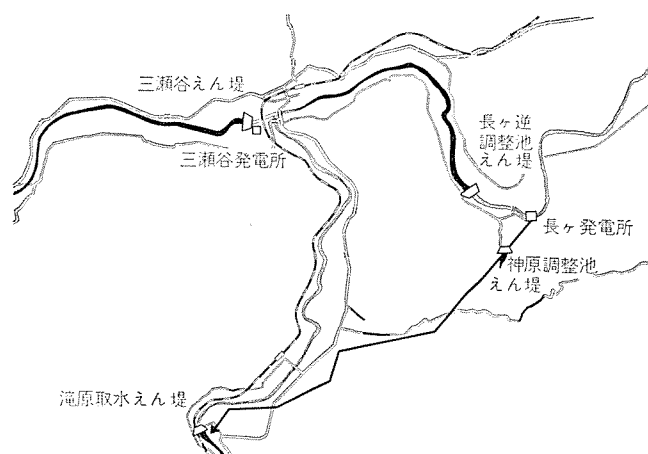


図 2.1 長ヶ逆調整池付近地図
Map of Nagake secondary regulating pond and its environment.

有効落差	最高 33.2 m
水車出力	最大 11,700 km
水車型式	たて軸力プラン 水車

(2) 長ヶ逆調整池ダム

型 式	コンクリート 重力式いつ(溢)流型 (魚道付き)
堤 高	11.80 m
堤 長	73.00 m
堤 体 積	5,414 m ³
門び(扉) (余水吐)	鋼製油圧式自動起伏ゲート 幅 20.00 m × 高 3.50 m 2 門
門び (調整口)	鋼製油圧式 ローラースライドゲート 幅 2.20 m × 高 1.50 m 1 門

* 三重県企業庁 ** 佐藤工業株式会社 + 三菱電機(株)鎌倉製作所
++ 三菱電機(株)通信機製作所 +++ 三菱電機(株)本社

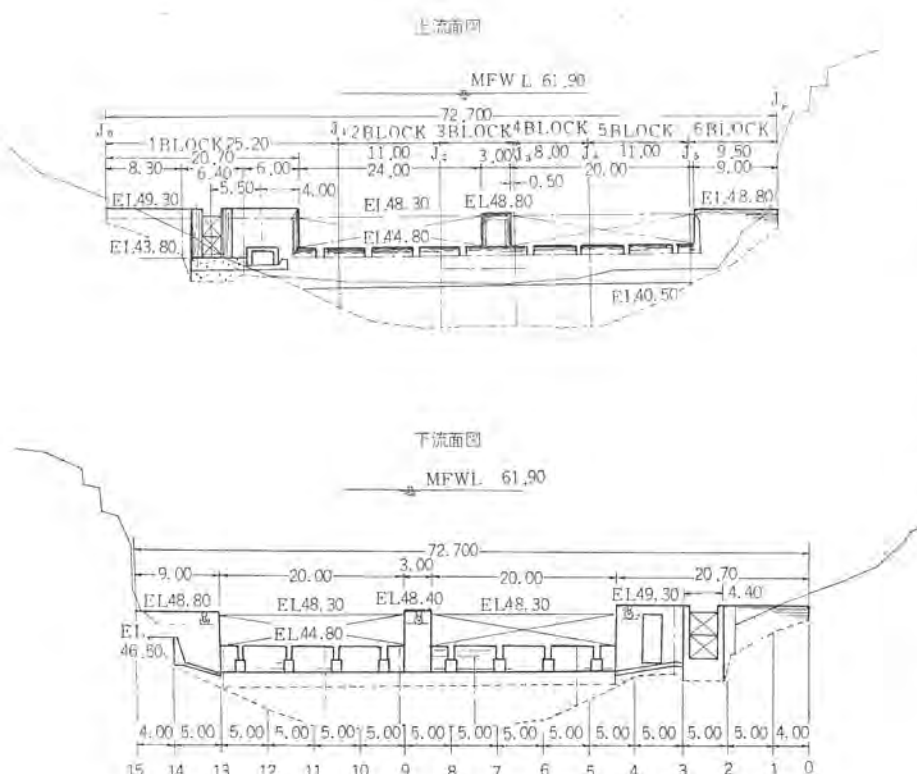


図 2.2 ダム上下流面図 Dam of secondary regulating pond.

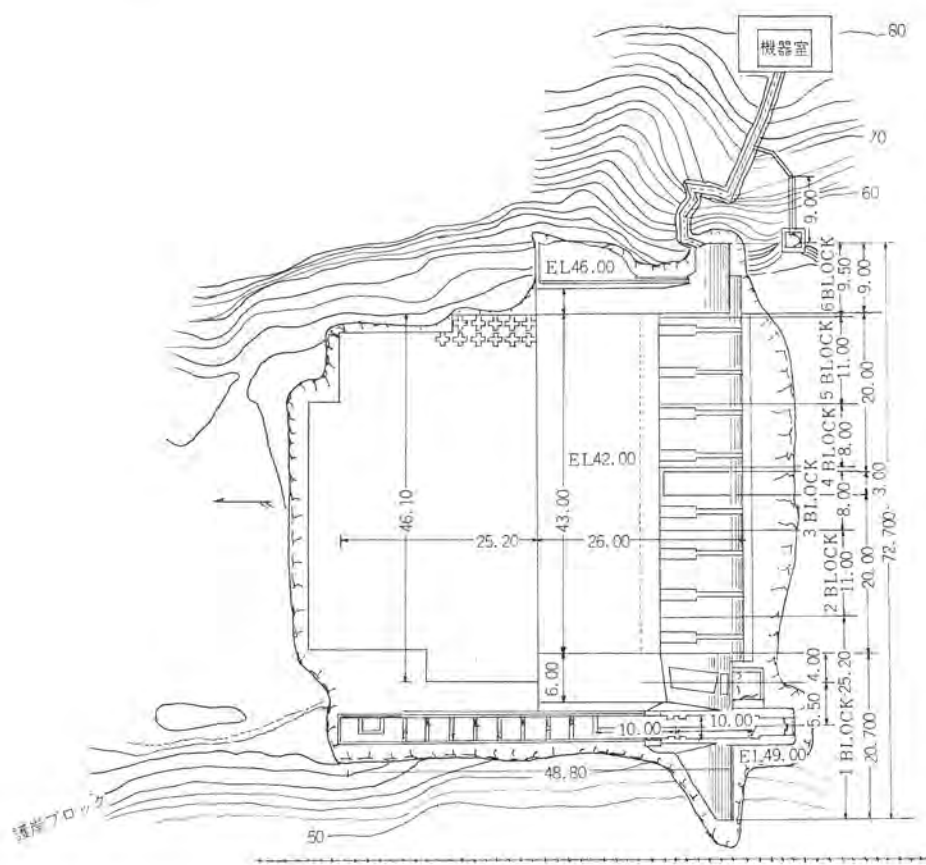


図 2.3 ダム平面図 General plan of dam.

門び (魚道)	鋼製油圧式 ロータゲート (2 段式)
	幅 2.00 m × 高 4.00 m 2 門
監視方式	無人 (遠方監視および測定)
制御方式	直接および遠方制御ならびにアナ

各ゲートの定放流の範囲は
(1) スライドゲート 0~20 m³/s
(2) 起伏ゲート 0~60 m³/s
であるが、放流がスライドゲートの限度に達すると、自動的に起伏ゲ-

2.2 放流制御の概要

2.2.1 逆調整池の容量

逆調整池の必要容量は、最大発電使用水量を 40 m³/s、三瀬谷ダム地点の流量を q とすれば、

$$Q = 86,400(q - q^2/40) \quad (\text{m}^3)$$

となる。すなわち、三瀬谷ダム地点の流量が 20 m³/s のときに、最大となり、864,000 m³ となる。しかし、三瀬谷ダムから下流の長ヶ発電所までの間で、三瀬谷発電所の放水位に影響を与えずに、この水量を確保することは地形上不可能であり、この制約のもとに確保できる水量は、580,000 m³ である。

上記水量から逆算すると、三瀬谷ダム地点の流量で、8.5 m³/s 以下と 31.5 m³/s 以上が完全に逆調できることになる。

残流を加算して、逆調ダム地点の流量 (Q_G) にすれば、

- (1) $16 \geq Q_G \geq 60 \text{ m}^3/\text{s}$ 逆調整可能
- (2) $16 < Q_G < 60 \text{ m}^3/\text{s}$ 完全逆調整不能となる。(2)の範囲については、三瀬谷発電所の運転に若干の制限を加えることになる。

2.2.2 定放流の範囲

逆調ダム地点の計画洪水量は 6,020 m³/s であり、逆調ダムのいつ流面から約 17 m の水深となる。この水量を、通常のゲートで放流せんとすれば多額の土木工費を要するので、平常は必要な池容量を持たせ、洪水時には倒伏して門び上面をいつ流させる起伏ゲートを用い、洪水余水吐と定放流をあわせ行なわせる。

三瀬谷ダム地点の流量が、最大発電使用水量である 40 m³/s 以上のときは、24 時間運転となるので逆調整の必要がなく、40 m³/s 以下のときに定放流制御が必要となる。三瀬谷ダム地点の 40 m³/s の流量は、残流を加算して逆調ダム地点では約 70 m³/s の流量となるので、定放流の範囲は 70 m³/s まで必要となる。

また、河川の流況から、16 m³/s 以下の日数は 190 日ほどあり、流量が減少するほど、下流利水に対する変動を抑える必要があるので、小放流用のスライド型ゲートを別に設けている。

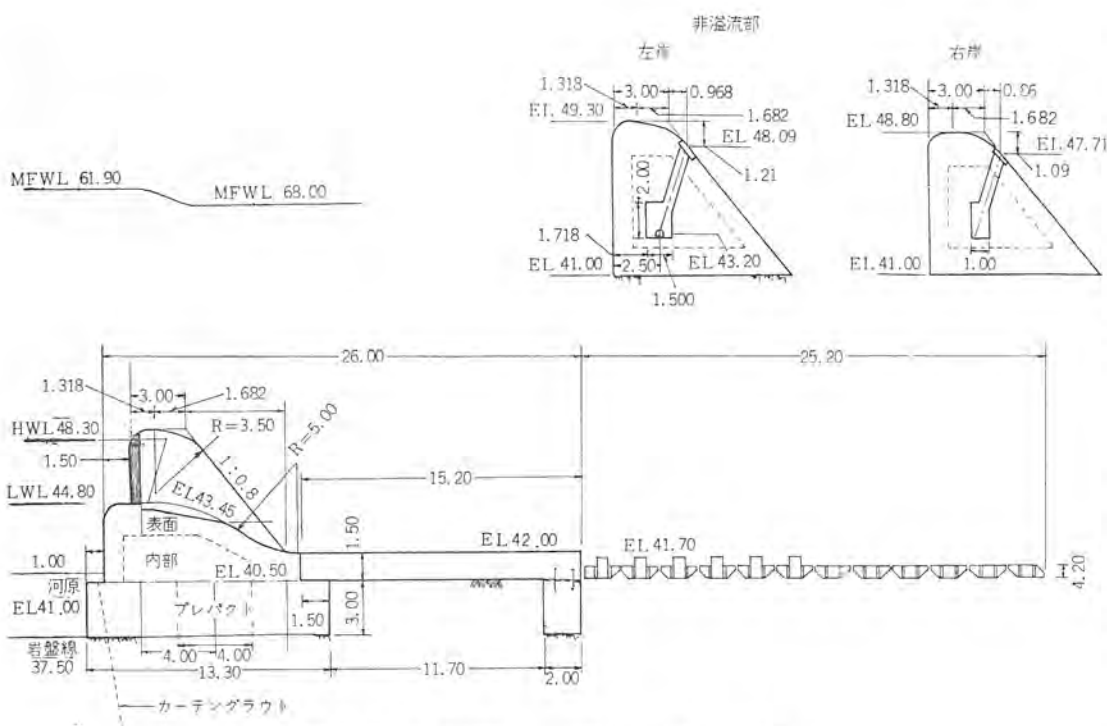


図 2.4 タム断面図

Cross section of dam.

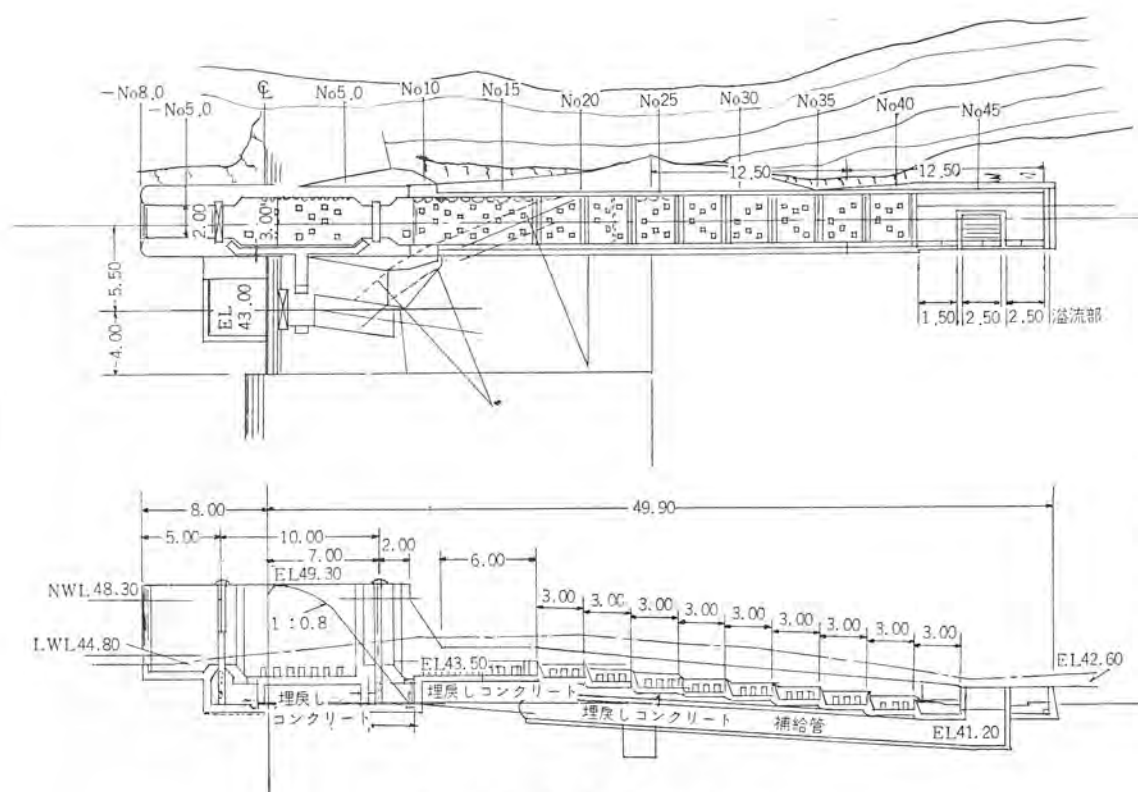


図 2.5 魚道縦断および平面図
Cross section and plan of fish stairs.

トに制御が移り、最大 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ までの連続定放流が可能である。

2.2.3 制御の概要

制御は、三瀬谷発電所からの遠方操作と現場での直接操作があり、いずれの場合も、手動・自動の制御が可能である。通常は自動による定放流制御であり、三瀬谷ダム地点の流量により、残流を考慮した逆調整池の放流量を設定し、あとはアナログ計算機に流出量追跡を

行なわせている。この設定は、流量の変化がなければ再調整の必要はない。

また、各ゲートの駆動力はすべて圧油を用いているが、水位変動が激しいので、自動制御中は圧油ポンプを連続運転とし、無接点スイッチにより電磁弁を操作し、ゲートの開閉動作を行なわせている。

後備制御としては、定水位制御・順次転倒・非常転倒などがあるが、定放流制御にいちがいがあれば、自動的に各制御に移行する。

おもな保護は、制御偏差過大、誤制御および油圧、油面異常の鎖錠などがあり、制御の状態とともに、すべて三瀬谷発電所に表示・警報される。

遠隔測定としては、逆調整池水位・各ゲート開度・計算流量などがあるが、これらは三瀬谷発電所で自動タイプされている。

2.3 こう門式魚道の概要

長ヶ逆調整池は、1日に最大3.5mの水位変動を一往復することがあり、通常の階段式魚道では、多額の工事費と地形上の制約の解決を要する。このため、小規模の固定階段式魚道に、一定のいつ流深で水位に追従する2段ゲート2門を、一定時間ごとに交互に開閉せしめ、魚をさか上らせるこう門式魚道を初めての例として併用している。

このゲートも油圧式とし、現場での手動・自動の両制御があり、自動側は無接点化されている。

3. ゲートおよびゲート操作機構

3.1 余水吐ゲート

発電所の制水に起伏ゲートが用いられたのはきわめてまれであり、



図 2.6 ダム全景 (下流側)
Full view of dam (lower side).



図 2.7 ダム全景 (上流側)
Full view of dam (upper side).

しかも、幅 20 m×高さ 3.5 m の大きなものは初めてであって、使用目的から、従来の起伏ゲートより多くの過酷な条件が要求された。その条件を列記すれば次のとおりである。

- (1) 油圧シリンダには軸方向の荷重のみ働くようにし、いささかも曲げモーメントを与えてはならない。
- (2) ゲートと油圧シリンダとは不可分の関係にあるから、ゲートリフの軸受部と油圧シリンダ支持金具は一体化する。
- (3) 油圧シリンダの点検・取換えが容易にできる構造とする。
- (4) 土木構造物による制約を満たす。

これらの条件を満足する開閉機構については、従来研究されてきているものに適合するものがなく、図 3.1 に示すような機構を採用した。メカニズムはリンク機構と斜面軌条面のころがり運動の組み合わせであって、説明するまでもないが、ゲート開閉装置として採用したところに大きな特長があり、より大形の起伏ゲートの実現も期待できよう。油圧シリンダには最大 80 トンもの力が作用することがあ

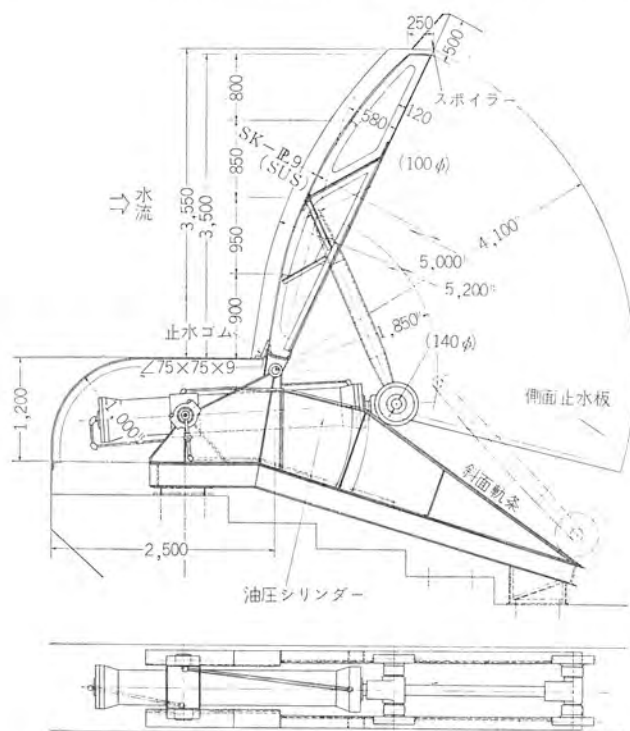


図 3.1 余水吐ゲート断面図
Cross section of gate.

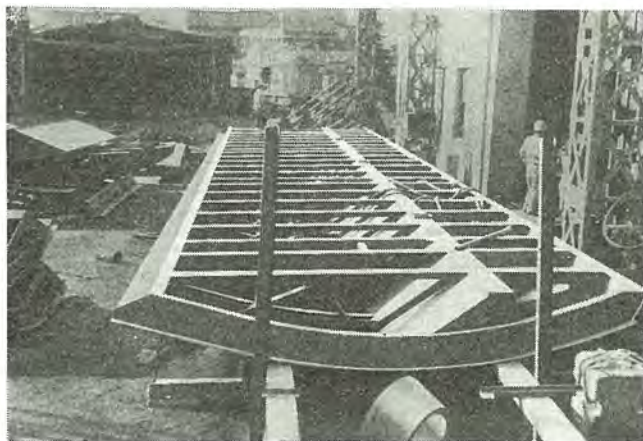


図 3.2 ゲートリフ Gate leaf.



図 3.3 側面止水板
Side water check board.

り、しかも、動作速度が非常におそく、そのうえ漏油は絶対に許されず、油圧シリンダの欠点であるステックモーション防止などの問題も生じ、技術的にあらゆる面の検討を行なった。

ゲートリフ・側面止水板については図 3.1, 3.3 に示すように、みぞ形鋼・L 形鋼・鋼板の組み合わせによるトラス骨格であって、自重・静水圧・動水圧および地震時慣性力などに耐えられる構造になっている。材質的には河川内構造物であることから、不しゅう(銹)鋼などを採用した。

また、いつ流時にゲート背面に負圧が発生し、振動を誘発するこ

とがあるので、いつ流水脈を切り欠くためにスポイラー(水切り金具)や補給空気管などを設け、圧力のバランスをとるように工夫した。

3.2 調整ロゲート

このゲートは一般に採用されているローラーゲートであるが、この開閉装置も土木構造物の制約から、従来のものと異なり、スピンドルねじとめねじを組み合わせウォーム減速機を介して、回転動力には油圧モータを採用した。めねじはゲートリフに取付け、スピンドルねじを回転させ、ゲートリフ内にスピンドルねじを出し入れする機構となっている。この機構の採用は、流量制御の精度を要求されたことと機械的ロックが必要となったからである。



図 3.4 魚道ゲート
Gate of fish stairs.

3.3 魚道ゲート

このゲートも土木構造物の制約と使用目的より、いつ流形、二段式となり特異な構造のものである。図 3.4 に示すように、外わくゲートリフに小さなゲートリフが格納されており、小さなゲートリフが全開すると外わくのゲートリフが全開する構造になっている。このゲートで技術的に問題となったのは止水方法であったが、特殊止水ゴムの採用により解決した。なお、開閉装置は、ワイヤーロープ巻取り式ウインチであり、回転動力には油圧モータを採用した。

3.4 油圧装置

油圧装置は制御ひん度が非常に高いので、計画時点では油圧サーボ機構を採用し、定放流制御装置からの偏差信号により連続制御とする予定であった。しかし、サーボ機構の特性とこの装置の全系の精度、ならびに保守点検管理や経済性の面から検討の結果、ON-OFF制御を採用することとした。この結果、図 3.5 および図 3.6 に示す油圧回路図のように油圧機器やその付属品は、はん(汎)用品を組み合わせることでその目的を達することができた。

3.4.1 余水吐ゲートの油圧回路

図 3.5 に余水吐ゲートの油圧回路を示している。

(1) アンロード回路

電動機⑨によりポンプ⑤を駆動すると作動油はストレーナ②cより吸上げられ、チェックバルブ⑪aを経て方向切換弁②に送られる。この弁が作動していないときは、エアローラー③を貫流してタンクに返油される。

(2) 使用ゲート切換回路

方向切換弁②a、②bを同じ方向に作動させて、いずれのゲートを制御するかを選択する。ソレノイド3、5を励磁すれば右側、4、6を励磁すれば左側のシリンダに油が送られ、ゲートを作動させることが

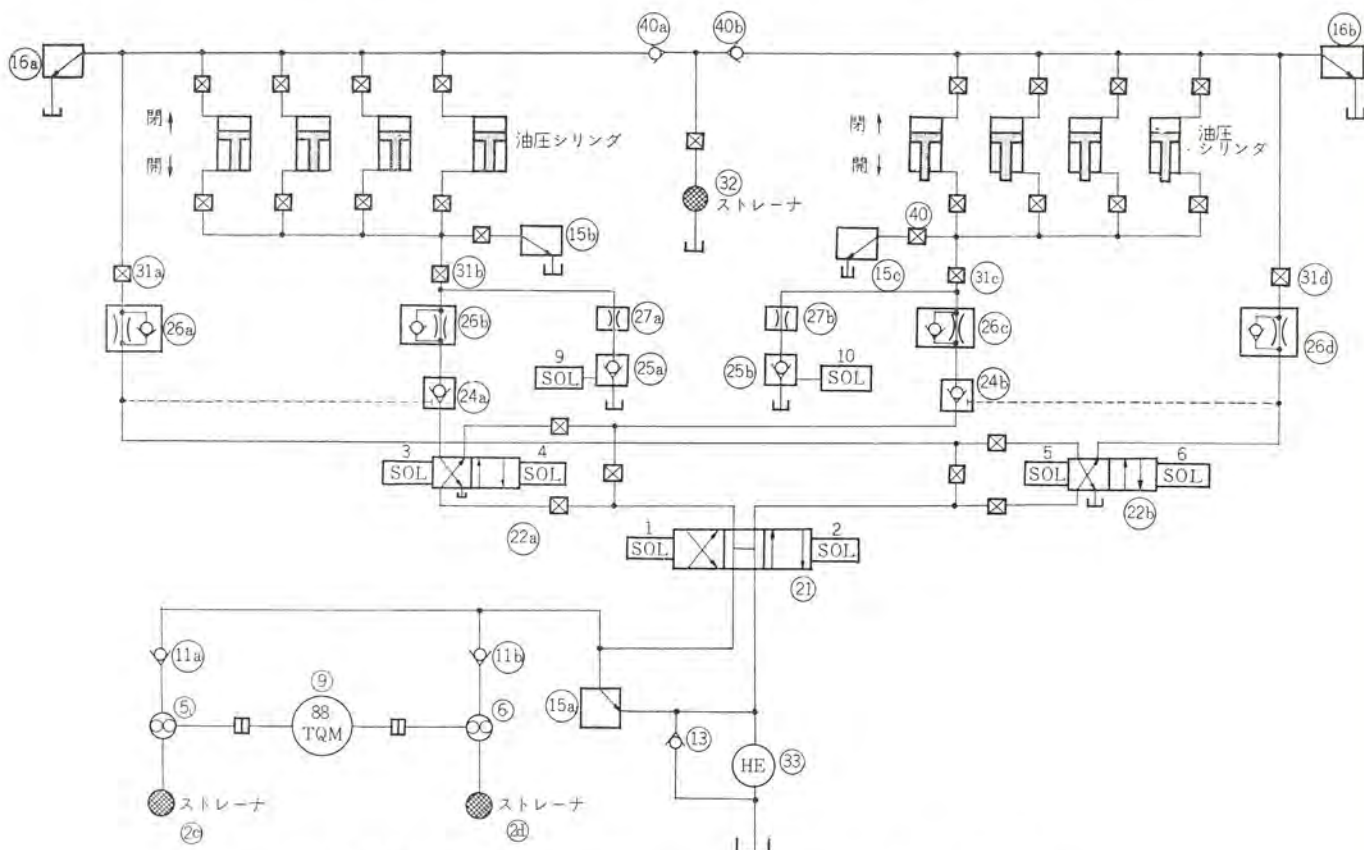


図 3.5 余水吐ゲート油圧回路

Diagram of gate operation system.

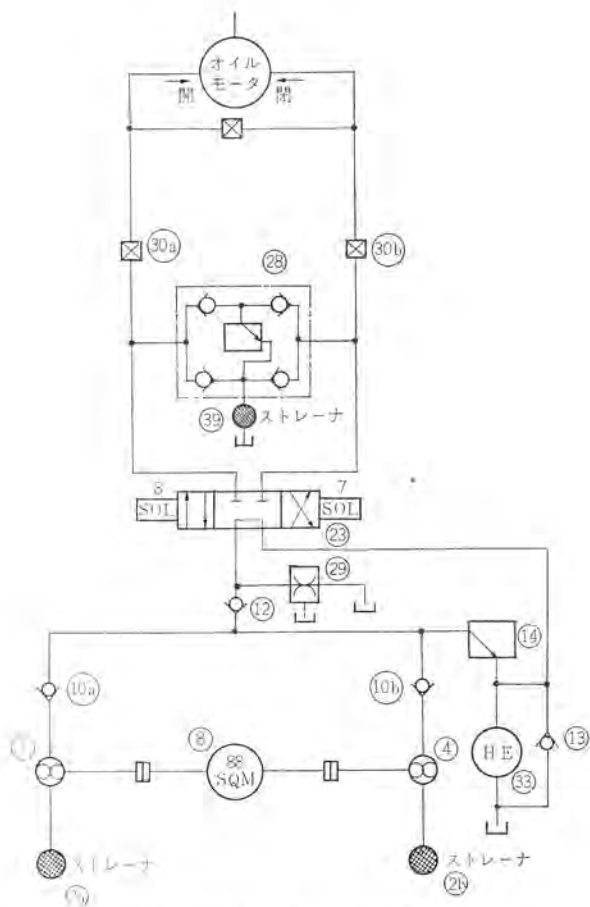


図 3.6 調整口ゲート、魚道ゲート油圧回路
Diagram of gate operation system.

できる。

(3) ゲート 開閉操作回路

上記(2)により操作させるゲートの選択がなされ、方向切換弁②を作動させれば、ゲートは開または閉操作ができる。ソレノイド1を励磁すれば、油は方向切換弁②_b、スロットルチェックバルブ②_dを通してシリンダのヘッド側に送油される。一方ロッド側の作動油はスロットルチェックバルブ②_cの絞り側を経て、パイロットチェックバルブ②_b、方向切換弁②_a②およびクーラー③を貫流しタンクにもどる。シリンダロッド側が押し出されてゲートは開口する。ゲートの閉操作は上記と逆操作で行なわれる。

(4) 非常倒伏回路

洪水その他により水位が異常上昇すると、直流ソレノイド9, 10を作動させ、2門同時に開口し、計画以上の荷重がゲートに作用し流出事故などを引き起こさぬようにする。

シリンダロッド側の圧油が、絞り弁②_a②_b、チェックバルブ②_c②_dを貫流してタンクに戻る。一方シリンダヘッド側には負圧を生じるため、ストレーナ②、チェックバルブ②_a②_bを通してシリンダヘッド側に吸込まれ、シリンダロッドが除々に引き出されてゲートは2門同時に開口する。

3.4.2 調整口ゲート、魚道ゲートの油圧回路

図 3.6 に調整口ゲートおよび魚道ゲートの油圧回路を示す。

(1) ゲート 開閉操作回路

方向切換弁②の開口により、圧油は開口されたストップバルブ②_aを通して油圧モータに回転力を与え、戻油はストップバルブ②_b・切換弁②・クーラー③を経てタンクに戻る。切換弁②を逆に作動させれば、油圧モータは逆回転し、ゲートの開閉操作ができる。

(2) フローコントロールバルブ②

バルブ②は油圧モータに送り込む油量を調整するもので、ポンプから吐き出される量の一部を直接タンクに返油することでモータの回転数を制御する。

(3) ブレーキバルブ②

バルブ②は油圧モータおよび回転体の慣性による制御の行き過ぎを防止するためのものである。戻り側の配管内の異常圧の発生、送り側配管内の負圧の発生などのショックを同時に防止する。

4. 電機設備および制御装置

4.1 電機設備の概要

(1) 三瀬谷発電所（制御所）に設置のもの

遠方監視制御盤	1面
遠方監視制御継電器盤	1面
遠方監視制御機	1面
テレメータ 信号伝送架	1架
日報作成装置	1式

(2) 長ヶ逆調整池（被制御所）に設置のもの

受電変圧器盤	1面
電動機制御盤	1面
ゲート制御盤	1面
直流電源盤	1面
魚道ゲート制御盤	1面
テレメータ 信号伝送架	1架
アナログ 計算機	1組

(3) 単線接続図

単線接続図は図 4.1 のとおりである。

4.2 運転制御方式

(1) ゲートの運転制御方式

調整口ゲート・余水吐ゲートに対し、下記の運転方法ができる。

(a) 現場手動制御

ゲート制御盤の押しボタンスイッチで制御を行なう。

(b) 遠方手動制御

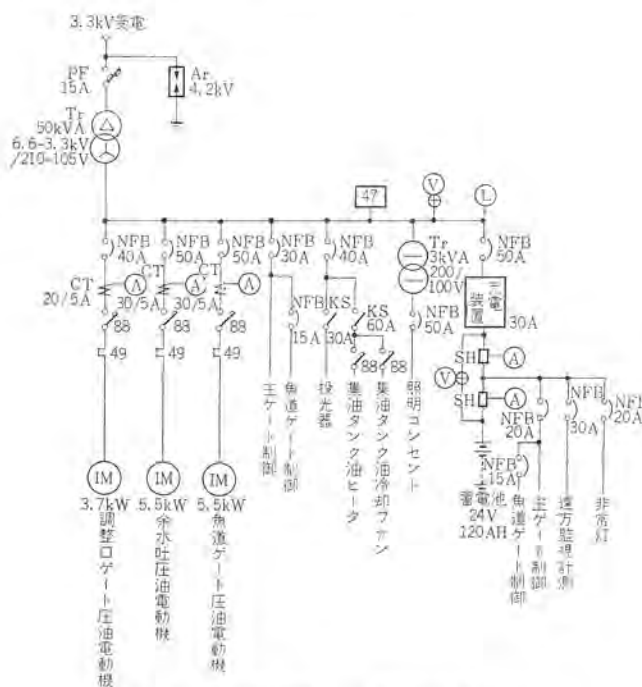


図 4.1 単線接続図 Skelton diagram.

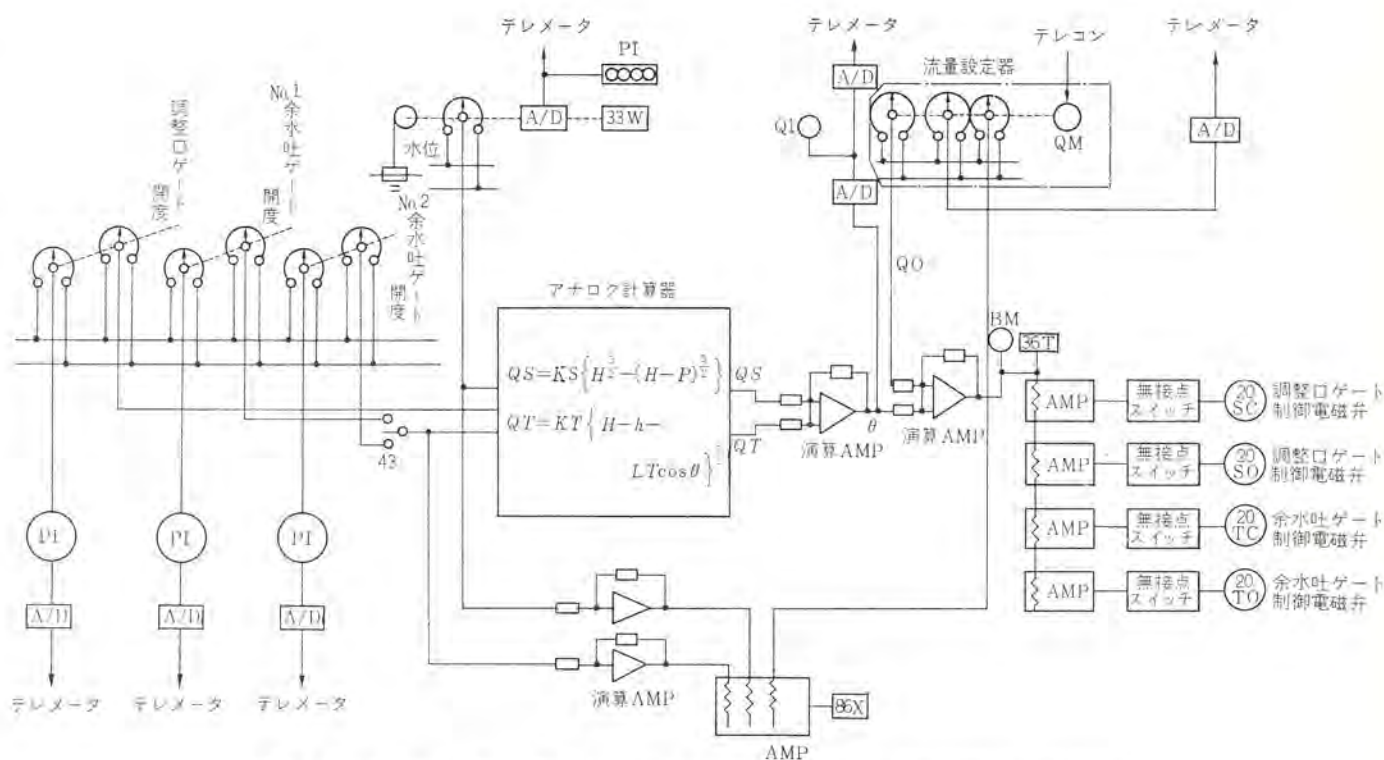


図 4.2 定放流制御回路図

Schematic diagram of gate control equipment.

三瀬谷発電所から遠方制御装置による開・閉・停止指令により制御を行なう。

(c) 自動制御 (定放流制御)

三瀬谷発電所から遠方制御装置で監視を行ないながら、ゲートよりの放流量を設定値になるよう自動制御する。

上記のうち、定放流制御が常用され、手動制御は必要に応じて使用される。遠方直接の操作場所の選択は被制御所で切換え可能である。自動-手動の制御方法の切換えは、制御所または被制御所で切換え可能である。

(2) ゲートの定放流制御

ゲートの定放流制御の構成は図 4.2 のとおりである。

(a) 流量計算

フロート式水位検出器、ゲートに連動する開度検出器により、上流水位と各ゲートの開度信号を、アナログ計算機に導入し、ゲート形式・実験結果より定められた計算式により、調整口ゲートおよび余水吐ゲートよりの放流量をそれぞれ算出する。

(b) 放流量の設定

三瀬谷ダム地点の流量および三瀬谷発電所と逆調整池間の残流を考慮して、三瀬谷発電所から遠方制御装置を使用して、流量設定器の操作モードを制御し、放流量の設定を行なう。

放流量の設定範囲は 0 ~ 70 m³/s である。

(c) 定放流制御

調整口ゲート・余水吐ゲートよりの放流量 (Q_s , Q_T) を演算増幅器で加算し、全放流量 (Q) を算出する。設定流量 (Q_0) と比較し、制御信号を得て、磁気増幅器・サイリスタ無接点スイッチによりゲート制御用電磁弁を制御し、全放流量が設定流量に一致するようゲートを開または閉制御する。

調整口ゲートは全閉から全開まで約 7.5 分、また、余水吐ゲートは全閉から全開まで約 40 分を要し、非常に緩慢な制御であるので、上述のとおり単なる ON-OFF 制御とした。

定放流制御の不感帯は $0 \pm 4\%$ 以下を目標とした。

また、調整口ゲートでの放流量の範囲は 0 ~ 20 m³/s であり、設定流量がこれを上回る場合は、自動的に余水吐ゲートに制御が移行するようにした。この制御移行時に、偏差の増大、誤警報などを生じないように留意した。

(d) 監視・保護装置

三瀬谷発電所に、水位・各ゲート開度・計算流量 (Q)・設定流量 (Q_0) をテレメータによりデジタル指示を行ない、この制御の監視を行なっている。設定流量と放流量の偏差が大きくなれば、制御所に警報・表示する。

定放流制御装置の故障、ゲート操作油圧系統の事故などにより、余水吐ゲートが誤って倒伏し、下流の洪水を引き起こさぬよう、誤転倒検出装置も付加している。これは上流水位信号・余水吐ゲート開度信号により概算流量を算出し、設定流量を約 10 m³/s 上回れば動作して、定放流制御をロックし、警報表示するものである。

(e) 定水位制御・順次転倒制御・非常転倒制御

急激な雨量の増大、洪水などにより定放流制御ができない場合、下記のとおり余水吐ゲートを転倒させ、定水位制御・順次転倒制御を行なう。

(i) 上流水位が一定値を超過すれば、調整口ゲートを全開し、余水吐ゲート 1 門を転倒させ放水する。

(ii) (i) の制御により水位が一定値に低下すれば、余水吐ゲートを倒立させ、定放流制御に復す。

(iii) (i) の制御により水位がさらに低下しない場合には、余水吐ゲートの他の 1 門を転倒させ、放流量を増加する。

(iv) (iii) により水位が一定値に低下すれば、後行余水吐ゲートを倒立させ、さらに水位を確認したのち、定放流制御に復帰する。

台風時など雨量の増大とともに停電も考えられるが、上述のゲートの転倒制御が不能となることもありうるので、蓄電池電源により油圧制御電磁弁を制御して、余水吐ゲートを 2 門同時に倒伏させる

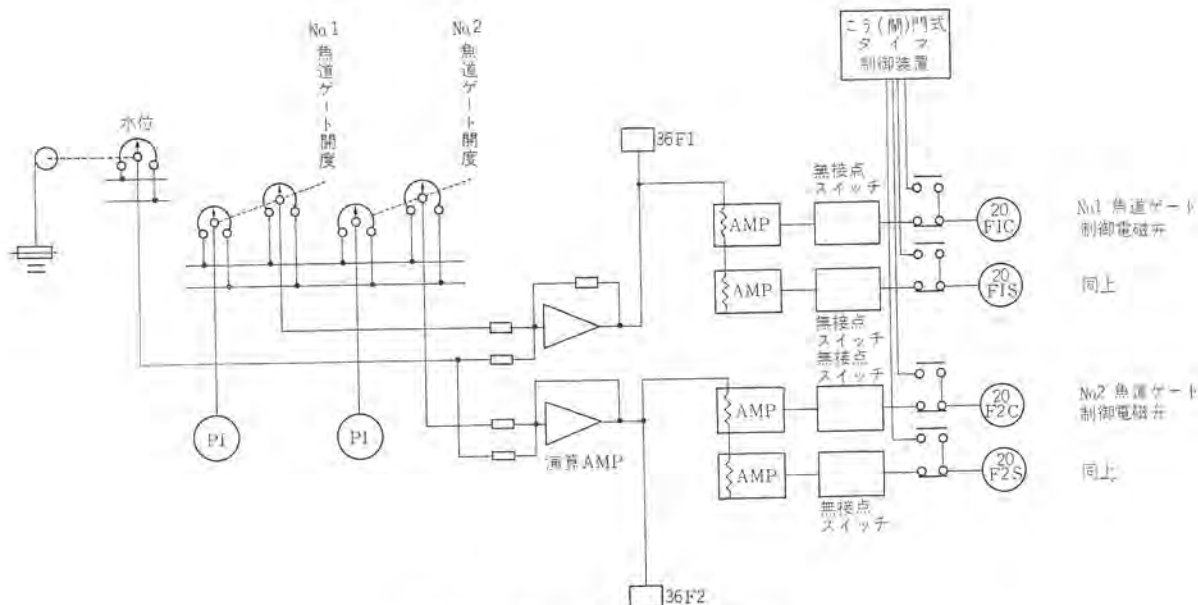


図 4.3 魚道ゲート制御回路図
Schematic diagram of gate control equipment.

非常転倒制御装置が設けられている。

(3) 魚道ゲートの運転制御方式

魚道ゲートは、現場手動制御および自動制御を行なう。自動制御の構成は図 4.3 に示すとおりであり、固定階段式魚道の上流側に一定のいつ流深で水位に追従する魚道ゲート 2 門を、こう門式に交互に開閉制御し、魚をさか上らせるものである。

上流水位信号および魚道ゲートの開度信号により、演算増幅器を使用して、魚道ゲートのいつ流深が 20~30 cm となるような制御信号を発生させ、主ゲート制御と同様、磁気増幅器・無接点スイッチで油圧制御電磁弁を制御し、魚道ゲート開度を制御する。

2 門の魚道ゲートは、別のタイマー制御により交互に上述の水位追従制御と全開をくり返し、魚をさか上らせる。

夜間は上述の自動制御は不要となるので、タイムスイッチにより上流側ゲートの全閉、下流側ゲートの全開を行なう切換え装置を付加している。

また、主ゲートが非常転倒・順次転倒を行なう場合は、水位上昇により魚道ゲートの流出も考えられるので、2 門とも全開する制御も行なう。

4.3 監視・保護方式

故障はすべて被制御所内ゲート制御盤に、それぞれ表示するとともに三瀬谷発電所でも表 6.1 の監視項目に示すとおり、重要度に応じ一括あるいは個々に監視できる。

被制御所での監視項目は次のとおりである。

(1) 重故障

調整口ゲート制御用圧油電動機過負荷	(49 SQ)
余水吐ゲート制御用圧油電動機過負荷	(49 TQ)
調整口ゲート制御圧油ポンプ吐出油圧上昇	(63 SQH)
余水吐ゲート制御油圧低下	(63 TQL)
余水吐ゲート制御油圧上昇	(63 TQH 1,2)
余水吐ゲート制御圧油ポンプ吐出油圧上昇	(63 TQH)
集油タンク油面低下	(33 QL)
余水吐ゲート誤転倒	
余水吐ゲート非常転倒	
魚道ゲート制御用圧油電動機過負荷	(49 FQ)

魚道ゲート制御用圧油ポンプ吐出側油圧上昇 (63 FQH)

火災発生 (28)

上記故障発生の場合、警報・表示するとともに圧油ポンプを停止し、ゲート制御をロックする。

(2) 軽故障

受電停電 (47)

直流電源接地 (64 D)

逆調整池水位上昇 (33 WH 1)

逆調整池水位低下 (33 WL)

逆調ゲート偏差過大

魚道ゲート偏差過大

魚道ゲート全開全閉

上記故障発生した場合、故障の種類を表示するとともに警報する。

5. アナログ計算機

5.1 流量計算

アナログ計算機は、三瀬谷逆調整池の調整口ゲート・余水吐ゲートその他からなる放流量制御システムにおいて、水位・ゲート開度の計測データから放流量を計算し、ゲート制御装置へ信号を送る機能を有している。

ゲートを通して流れる流量の計算式は、基本的には薄い層流の積算値として導かれるが、余水吐ゲートについては、開路における流れであることや、ゲートが水没したときの浮力や渦流の影響があり、ここでは実験モデルにより確認した結果、表 5.1 に示す計算式を採用した。表 5.1 の各記号の詳細は表 5.2 のとおりである。

表 5.1 の演算式にもとづいて計算した理論計算結果の一例は図 5.1、5.2 に示すとおりで、とくに余水吐ゲートについて、開度角が大きい所で非線形性が著しいことがわかる。

5.2 アナログ計算機

計算機は信頼度を最も重視して開発した、全シリコントランジスタ式制御用演算要素を主体として構成し、流量計算のためのプログラムは固定配線である。

計算機は高さ 2,300 mm・横幅 560 mm・奥行 450 mm で、自立形の鉄製きょう(筐)体 1 架で構成され、片面実装である。その外観

表 5.1 流量計算のための計算式
Calculation formula of water flow.

A. 調整ロゲート	
a) $H-P>0$ の場合	
$Q_s = K_s [H^{\frac{3}{2}} - (H-P)^{\frac{3}{2}}]$	
$K_s = \frac{2}{3} \cdot C_s \cdot \sqrt{2g} \cdot B_s$	
b) $H-P<0$ の場合	
$Q_s = K_s \cdot H^{\frac{3}{2}}$	
B. 余水吐ゲート	
a) $H_t > 0$ の場合	
(i) $0 < \theta < 45^\circ$ の範囲	
$H_t = H - h - L_t \cdot \cos \theta$	
$Q_t = K_t (1 + 0.002 \theta) H_t^{\frac{3}{2}}$	
$\theta = \theta_0 + \theta'$	
$K_t = \frac{2}{3} \cdot C_t \cdot \sqrt{2g} \cdot B_t$	
(ii) $45^\circ < \theta < 81^\circ 15'$ の範囲	
$H_t = H - h - L_t \cdot \cos \theta$	
$Q_t = K_t (1 + 0.002 \times 45^\circ) H_t^{\frac{3}{2}}$	
(iii) $81^\circ 15' < \theta < 94^\circ 56'$ の範囲	
$H_t = H - h - Y_1 + Y_2 \cdot \sin(\theta - 18^\circ 10')$	
$Q_t = K_t (1 + 0.002 \times 45^\circ) \cdot H_t^{\frac{3}{2}}$	
b) $H_t < 0$ の場合	
$Q_t = 0$	

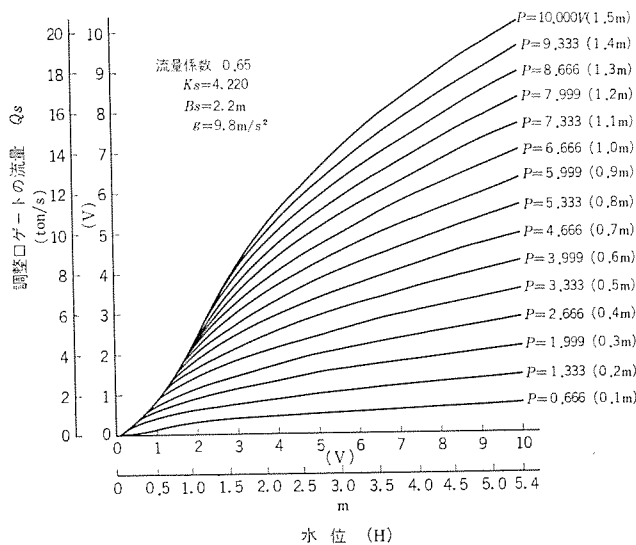
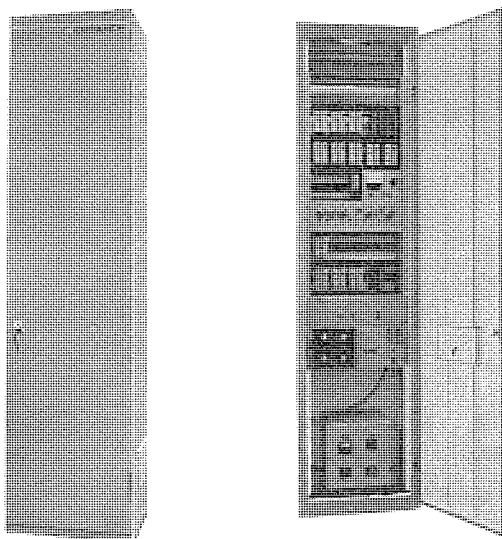


図 5.1 調整ロゲートの流量計算結果
Characteristics curves of water flow.



(a) 前とびらを閉じた状態 (b) 前とびらを開いた状態

図 5.3 アナログ計算機の外観
Analog computer.

表 5.2 各記号の詳細
Description of symbols.

記号	内容	種類	変化範囲
Q_s	調整ロゲートよりの流量	計算量	0~20 m³/s
K_s	流量係数	定数	4.22
H	水位	計測値	0~5.4 m
P	調整ロゲートの開度	計測値	0~1.5 m
C_s	調整ロゲートの形状よりきまる定数	定数	0.65
g	重力の加速度	定数	9.8 m/s²
B_s	調整ロゲートの幅	定数	2.2 m
Q_t	余水吐ゲートよりの放出流量	計算量	0~60 m³/s
K_t	余水吐ゲートの流量係数	定数	38.368
θ	余水吐ゲートの総開度角	計算量	17°04'~94°56'
θ_0	余水吐ゲートの初期開度角	定数	17°04'
θ'	余水吐ゲートの開度角	計算量	0°~77°52'
B_t	余水吐ゲートの幅	定数	20 m
C_t	余水吐ゲートの形状よりきまる定数	定数	0.65
L_t	余水吐ゲートの高さ	定数	3.85 m
h	余水吐ゲートの下部までの高さ	定数	1.63 m
H_t	余水吐ゲートの実効高	計算値	0.19~3.72 m
Y_1	余水吐ゲートの円弧長	定数	5.00 m
Y_2	余水吐ゲートの水受けによる実効円弧長	定数	4.95 m

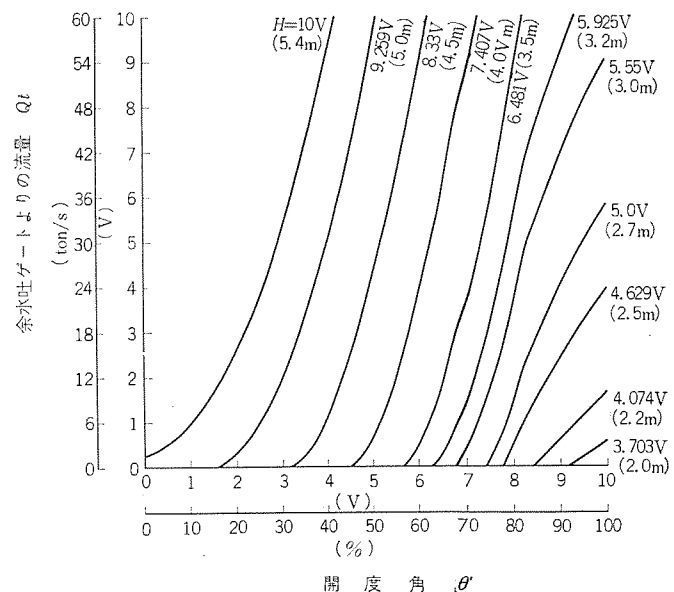


図 5.2 余水吐ゲートの流量計算結果
Characteristics curves of water flow.

を図 5.3 に示す。とびらは前後に設けられており、前とびらをあけると、演算増幅器の零調、入出力信号の確認など日常の保守を行なえる。なおきょう体上部には設置環境などを考え、けい光灯を付け保守の便宜を計っている。図 5.4 に各演算要素の実装図を示す。

図 5.5 は流量計算を行なうためのアナログ計算機における演算接続図である。水位 (H)・ゲートの開度 (P , Q) が各発信器より入力信号 (直流電圧) として与えられる。

調整ロゲートを流れる流量 (Q_s) と、余水吐ゲートを流れる流量 (Q_t) は別々に計算され、ゲート制御装置へ送られる。出力信号はもちろん直流電圧であるが、保守の単純化から、計算機の入出力信号は DC 0~10 V に選定されている。図 5.5 の関数発生器 (FG 3, 5, 6) および掛算器の回路は、転倒ゲートの流量係数の非直線性を

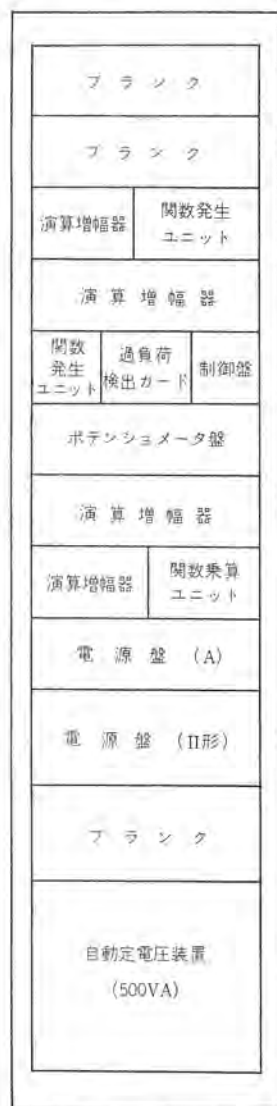


図 5.4 アナログ計算機の実装図
Analog computer assembly.

表 5.3 計算機の性能
Performance of computer.

演 算 電 圧	±10 V
線 形 要 素 精 度	±0.5 %
非 線 形 要 素 精 度	±2 %
演 算 増 幅 器 ドリフト	100 μV/8 h 以内
計 算 精 度	±2 %
使 用 温 度	-5 ~ +50 °C
使 用 湿 度	80 % 以下
消 費 電 力	AC 200 V 120 VA AC 100 V 10 VA

シミュレーションするもので、関数発生器はそうように設定されている。流量計算にアナログ方式を用いる特長は、このように非線形特性を簡単にシミュレーションでき、また非線形の形状が容易に変更できるところにある。

この計算機の代表的な性能を表 5.3 に、各演算要素の構成数と簡単な仕様を表 5.4 に示す。代表的な演算要素について、以下その内容を簡単に記載する。

(1) 演算増幅器

演算増幅器はシリコントランジスタ式チョップ安定化電圧相似形の 高利

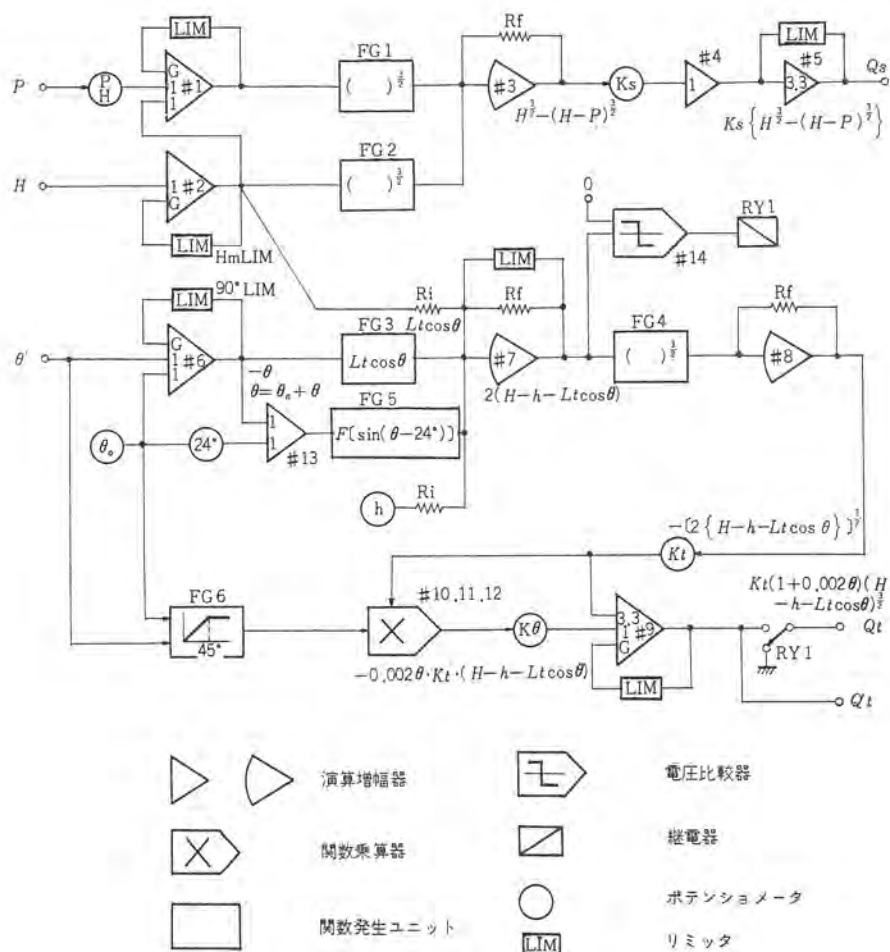


図 5.5 流量計算のための演算回路
Block diagram of analog computer.

表 5.4 計算機の構成と概略仕様
Constitution and brief specification of computer.

要 素 名	性 能	要素数	備 考
演 算 増 幅 器	出 力 ±10 V 10 mA 直 流 利 得 平均 130 dB ド リ フ ト 100 μV/8 h 以内	14	
ポテンシオメータ	10 回転 (3,600°±3°) 2 kΩ 1 回転 2 kΩ	5 20	基準ポテンシオメータも含む
関数乗算ユニット	入力インピーダンス 100 kΩ (X・Y 共) 出 力 XY/10 -10 ~ +10 V 3.5 mA 精 度 ±2 % 以内	1	1/4 自乗逆方式
関数発生ユニット	入力インピーダンス 100 kΩ 出 力 -10 ~ +10 V 3.5 mA 精 度 約 2 %	5	折線近似方式の折線
制 御 盤 (電圧計)	レ ン ジ ±30 V, ±10 V, ±1 V 精 度 2.5 級	1	電位差計法の測定も可能
過負荷検出要素	演算増幅器の過負荷検出 (±11 V)	1	
電 源 盤 (B 形)	出 力 ±24 V 1 A	1	
電 源 盤 (A)	出 力 AC 6.3 V 1 A ±10 V 100 mA	1	過負荷表示電源喪失警報

得の直流増幅器で、入力段はペアトランジスタによる差動増幅方式により、高入力インピーダンス・低出力インピーダンスとなっている。加算・減算動作以外に、関数発生・掛算ユニットなどの演算増幅器としても使用される。外部よりの異常信号に対し不安定動作を行なわないよう、リミッタ回路が付加されている。

(2) 関数乗算ユニット

演算増幅器3台と組み合わせて用いられる変形1/4-2乗差方式の乗算器で、2乗特性は、ツェナーダイオードのツェナー電圧を効果的に利用し、構成要素数を減らしている。

(3) 関数発生ユニット

3/2乗、 $\cos \theta$ などの関数を発生するもので、演算増幅器2台と組み合わせて用いられる。ユニットはシリコンダイオード、ツェナーダイオードを使用した折線近似回路で折線傾斜は任意に可変でき、折点間隔は固定である。

(4) ポテンシオメータ

流量係数・初期値などを与えるもので、10回転・1回転のものがある。

(5) 電源

トランジスタによる直列制御形定電圧回路による安定化電源、チョップ駆動電源、増幅器の過負荷検出回路基準電源などから構成されており、警報回路として、過負荷警報・電源電圧喪失表示回路を備えている。

6. 遠方監視制御装置

制御所は三瀬谷発電所とし、約5km下流の長ヶ逆調整池、さらに約1km下流の長ヶ発電所、長ヶ発電所から約1km離れた神原調整池、ならびに神原調整池から約7km離れた滝原えん(堰)堤の各機器の制御、監視を行なう遠方制御装置の一環として、このゲート制御装置の遠方制御装置も設置されたものである。

長ヶ発電所は子局、その他の地点は孫局となるもので、子局一孫局間は直送式であり、親局一子局間はトランジスタ形自己照合符号式である。

6.1 方式の概要(親局一子局間)

- | | |
|-------------|------------------------------------|
| (1) 操作方式 | 2挙動式 |
| (2) 検定方式 | 二重誤り検定とパルス数総数検定の併用 |
| (3) レスポンス時間 | 選択および制御 1s以下
表示 2s以下 |
| (4) 容量 | 制 御 30項目 実装25項目
表 示 50項目 実装50項目 |
| (5) 信号伝送装置 | 表7.1参照 |

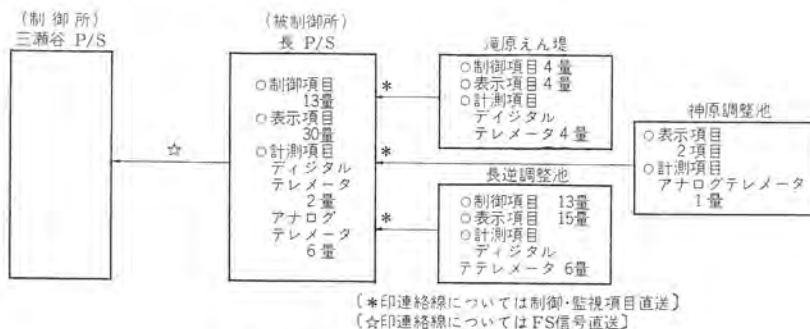


図 6.1 三瀬谷系遠方制御系統図
Remote supervisory controlling system.

6.2 特長

(1) 符号誤り検定に当社独特の二重誤り検出可能な奇数検定方式を採用しているので、装置が簡単となり、動作が確実で、制御・表示に要する時間がきわめて短い。

(2) 符号の送受信部など動作ひん度のきわめて高い部分、また操作時間に関連する部分を、すべてシリコントランジスタ、シリコンダイオードにより無接点化し、装置は長寿命、動作が高速化されている。

6.3 制御監視項目

逆調整池関係の制御監視項目は表 6.1 に示すとおりである。

表 6.1 遠方制御監視項目
Items of supervisory control.

制 御 項 目	操 作	備 考
逆調整ゲート自動、手動切換	自 動, 手 動	
逆調整ゲート流量設定	増, 減	
逆調整整流ゲート制御	開, 閉, 停	
逆調整 No. 1 余水吐ゲート制御	開, 閉, 停	
逆調整 No. 2 余水吐ゲート制御	開, 閉, 停	

監 視 項 目	警 報		備 考
	ベ ル	ブザー	
逆調整ゲート直接操作		○	
逆調整ゲート手動操作		○	
逆調整ゲート故障		○	1 括
逆調整ゲート電源異常		○	
逆調整ゲート非常転倒	○		
逆調整ゲート水位上昇		○	定水位制御
逆調整ゲート水位低下		○	順次転倒後帰
逆調整整流ゲート全開全閉		○	1 括
逆調整 No. 1 余水吐ゲート全開全閉		○	1 括
逆調整 No. 2 余水吐ゲート全開全閉		○	1 括
逆調整 No. 1 余水吐ゲート優先		○	
逆調整 No. 2 余水吐ゲート優先		○	
逆調整ゲート偏差過大		○	
魚道ゲート偏差過大		○	
魚道ゲート全開全閉		○	1 括



図 6.2 遠方監視制御盤
Control panel.



図 6.3 遠方監視継電器盤
Relay panel.

7. テレメータ

このシステムに使用されるテレメータも、長ヶ逆調整池の定放流量自動制御の監視のみならず、三瀬谷発電所を中心とした、長ヶ発電所の無人化、滝原えん堤、明豆の雨量、水位、ゲート開度の監視を行なうために設置されたものである。

河川水量を集中監視するため、また長ヶ逆調整池の放流量設定を行なうためにもそれぞれ必要な情報を伝送するものである。

三瀬谷発電所—明豆間が 71.82 MHz の無線回線であることを除き、2 線の通信ケーブル回線を使用している。(図 7.1 参照) なお、滝原えん堤からの信号は、いったん長ヶ発電所で受信し、表示されるが、三瀬谷発電所へは直流中継を行なっている。

7.1 テレメータ内容

各地点から伝送されるテレメータ項目は図 7.1 に記入のとおりであり、三瀬谷発電所において、収集データの指示計指示・数値表示・定時日報作成を行ない、状態および動作の監視を行なう。

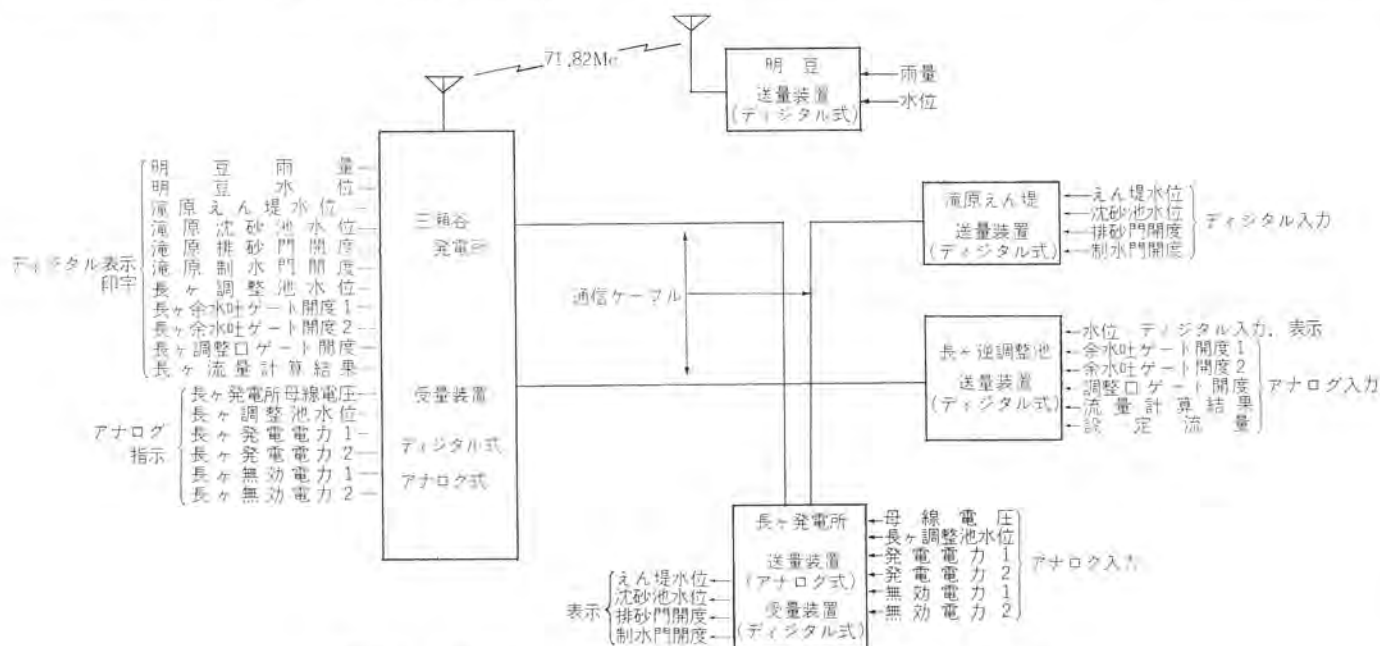


図 7.1 三瀬谷系 テレメータ 系統図

このテレメータ装置にはテレメータ用、遠方監視制御用の符号伝送用変復調装置を含め、水位・雨量・開度などの検出装置も含めている。

7.2 テレメータ方式

テレメータの方式としては検出装置信号形式、精度、伝送路の条件、データ処理内容を考慮して決定することとし、次の3方式を採用した。

(1) 搬送直列常時伝送 デジタルテレメータ方式 (TM-1100 形)

この方式は検出装置出力がデジタル式または高精度で得られ、回線が常時使用でき、処理も印字など数値で行なう必要のあるばあいには適当なので、滝原えん堤・長ヶ逆調整池のデータのテレメータについて採用した。長ヶ逆調整池は水位が4けたの測定を必要とし、アナログ計算機による制御を行なうので、デジタル、アナログのデータが混在するが、アナログ—デジタル変換 (A/D 変換) を行なってデジタル伝送とした。

(2) 搬送直列呼出式 デジタルテレメータ方式 (TM-1200 形)

この方式は無線回線のように回線が送受交互通信となり、精度を必要とするばあいには使用される呼出返送式であるため、明豆のデータ収集用に使用した。この方式は建設省標準仕様書に準ずるものである。

表 7.1 符号伝送用変復調装置
Modulator and demodulator of code transmission.

項 目	形 式	TG-50 M	TG-200 M
変 調 方 式		周波数変調	周波数変調
通 信 速 度		50 ボー	200 ボー
線 路 側 イ ン ピ ー ダ ンス		600 Ω ± 20 %	600 Ω ± 20 %
総 合 ひ ず み		7 % 以下	15 % 以下
中 心 周波数	滝原—長ヶ P/S	$n=3$	
	長ヶ P/S—三瀬谷 P/S	$n=4, 5, 6, 7, 8, 9$	$m=5.6$
	長ヶ逆調—三瀬谷 P/S	$n=10$	
	明豆—三瀬谷 P/S	$n=12$ (無線機にて伝送)	
		ただし $f=425+(n-1) \times 170 \text{ Hz}$	ただし $f=800+(n-1) \times 400 \text{ Hz}$
周 波 数 偏 移		± 35 Hz	± 100 Hz
用 途		テレメータ信号伝送用	遠方監視制御信号伝送用

Misedani telemetering system.

(3) アナログテレメータ方式 (TM-45 形)

衝流式アナログテレメータは、直流 mV 入力で指示計指示を行なわせるばあい最も簡単となるため、長ヶ発電所関係のデータの伝送に使用した。

7.3 各種テレメータ仕様

表 7.1～7.4 に示すとおりである。

表 7.2 TM-1100 形 テレメータ
Type TM-1100 telemeter.

項 目	
伝 送 方 式	連続繰返し伝送
符 号 方 式	2 連送 ON-OFF 符号
符 号 検 定 方 式	パリティ検定、2 連送照合検定、総数検定の三重検定
信 号 内 容	データ BCD 4 けた、局番 BCD 1 けた
A/D 変 換 (アナログ入力のばあい)	変換精度 0.2% 変換符号 BCD 3 けた

表 7.3 TM-1200 形 テレメータ
Type TM-1200 telemeter.

項 目	
伝 送 方 式	呼出時返送
呼 出 方 式	定時自動呼出
呼 出 信 号	2 周波直列組合せ
返 送 符 号	RZ 3/1 長短符号
返 送 符 号 内 容	データ 4 けた、局番 1 けた、電源警報 1 けた、BCD パリティビット付
無 線 送 信 出 力	明豆、三瀬谷 P/S 共 10 W

表 7.4 TM-45 形 テレメータ
Type TM-45 telemeter.

項 目	
方 式	衝流周波数方式
使用周波数範囲	12～24 Hz
総 合 精 度	1% (常温、定格電圧にて)
応 答 速 度	送量器 1 秒、受量器 2 秒
温 度 変 化	送量器 $\pm 1\%$ 以内、受量器 $\pm 1\%$ 以内 (0～40°C にて)

8. 運 転 結 果

昭和 42 年 4 月以来、無人の環境で、順調に運転を続けている。

放流量は地形・ダム の形状から正確に測水することができないので、適用計算式が正しいものとして運用している。したがって、制御の総合精度を数値的には握していないが、水位変化の大きい場合は、平均 1 分間隔の高ひん度で動作し、下流水面の変動はまったくない。

また、このような大形起伏ゲートになると、強度と水理から円弧状となり、倒伏状態で流速が増加すると浮力を生じるが、これを土木構造物に固定することが困難であったり、かりに固定できたとしても破損を増す原因になることもあるので、本ゲートでは先端に 30 cm ほどのフラップを取付け、水理的に浮力を押える方法をとった。このフラップは実験上、計画洪水量 6,020 m³/s まで十分の効力を持つが、最大流量 2,200 m³/s、いつ流水深 7.40 m の実洪水に対してなら異常がなかった。

今後の保守の問題点としては、水中に没する機器のあることであり、開度発信器・極限開閉器などの封水性、150 m に至る圧油配管の内部発しょう(錆)による油圧機器への影響などが考えられ、絶縁試験・油質検査を 3～4 カ月ごとに行ない対処している。

こう門式魚道も動作時の音響を懸念していたが、その影響もなく非常に良好なそ上をみせている。

以上、運転開始後の状況を簡単に記したが、長ヶ逆調整池の施設は、この他種々の新しい試みがなされ、工事中はもちろん、運転開始以来大過なく運転を続けているのは、施設者ゲートおよび制御担当メーカーとの三者一体の協力のたまものであることは言を待たなくてもなからう。

9. む す び

以上ゲートおよびゲート制御装置の概要について記載したが、大形起伏ゲートによる定放流、アナログ計算器による定放流制御、定放流制御回路の無接点化など種々の新しい試みの具体化にあたっては十分な検討を行ない、すぐれた性能を得ることができた。今後このような利水事業は、ますます盛んに行なわれるであろうし、ゲートおよびゲート制御装置もさらに高度なものとなるのは必定であり、発展のための努力が必要であろう。

終わりにのぞみ、ご指導・ご尽力をいただいた三重県企業庁、佐藤工業関係者のかたがたに深く感謝の意を表する次第である。

ME-04 D 051 X 形 400 MHz 帯多重無線装置

一ノ瀬友次*・小森 千之*・光高 公一*・岡村 義一*

Type ME-04 D 051 X, 400 MHz Band Radio Equipment for Multiplex Communication

Communication Equipment Works Tomoji ICHINOSE・Chiyuki KOMORI
Kôichi MITSUTAKA・Yoshikazu OKAMURA

As a result of rapidly increasing demands for radio service in a 400 MHz frequency band, the operation in this seems almost impracticable because of saturated channels. The frequency separation for multiplex communication, so far, has been based on 200 kHz apart, but it would be very advantageous from the viewpoint of frequency allocation if 100 kHz separation is realized by means of narrowed occupying bandwidth. Following a series of fully solid state radio devices, Mitsubishi has developed and put into practice type ME-04 D 051 X, multiplex communication equipment permitting the 100 kHz separation through a narrowed bandwidths to 80 kHz. It is easy to construct the telephone circuits by installing a telephone repeater optionally. This apparatus, having 5 kW transmitting power and a maximum of 5 CH multiplex equipment, conforms to the specification of the Construction Ministry.

1. ま え が き

400 MHz 帯の多重はマイクロ波主幹回線からの分岐回線、あるいは24チャンネル以下の比較的中継数の少ない専用回線として需要が多く、この帯域では新たな波の需要に応ずることが困難な状態にある。ここで従来の多重バンドの周波数割当と通話収容量について見ると、24 CH に対する 600 kHz、12 CH に対する 400 kHz、6 CH に対する 200 kHz と、200 kHz セパレーションが基準となっており、もしなんらかの方法でセパレーションを半分の 100 kHz に縮めることができれば、新たな波の利用、ひいては周波数の効率的な利用が可能となる。

本装置はこのような考えに基づき建設省仕様によって製作された小容量回線用多重無線装置である。当社ではすでに高信頼度、低消費電力および小形化を特長とする全固体化 400 MHz 帯 ME-40 形送受信装置を実用化し、多数の納入実績を有しているが、このたびはこの技術を基礎として上記の電波の有効利用という観点から狭帯域化すると同時に、保守性、経済性を考慮しつつ、さらにいっそう小形、簡易化を図って製作した“小容量 400 MHz 帯多重無線装置 ME-04 D 051 X”をご紹介します。

2. 機器の概要

2.1 構造

無線機は図 2.1 (a)、(b)および(c)に示すように、幅 520 mm、奥行 225 mm、高さ 800 mm の鉄架で送受信装置・送受共用回路・5 CH 容量の端局装置・信号中継装置(レピータ)を実装している。装置の主要部はユニットプラグイン方式で前面より容易に着脱可能な構造となっている。本装置は小形軽量であるから緊急災害時には運搬も容易におこなえ、床面据付のほか、机・作業台等に固定することでもでき、架下のボルト止めて自立し、日常の保守・点検がすべて前面よりおこなえるので、2 架を back to back に設置できるが、必要に応じて積み重ね設置も可能である。

また外部配線引込み口は架上背面、架下背面および架基底部にあ



図 2.1 (a) ME-04 D 051 X 形無線機外観
Exterior view of type ME-04 D 051 X radio equipment.



図 2.1 (b) 架実装図
Interior view of fully equipped type ME-04 D 051 X.



図 2.1 (c) 架実装図
Bay assembly of type ME-04 D 051 X.

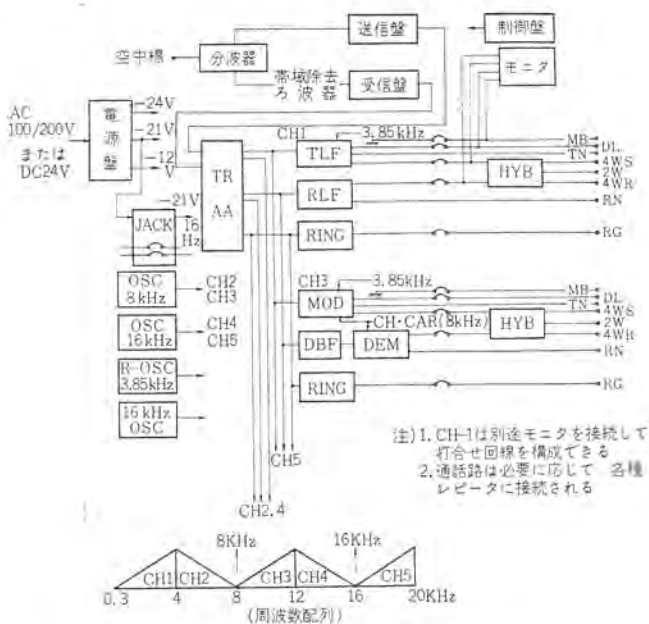


図 2.2 総合系統図
System diagram of type ME-04 D 051 X.

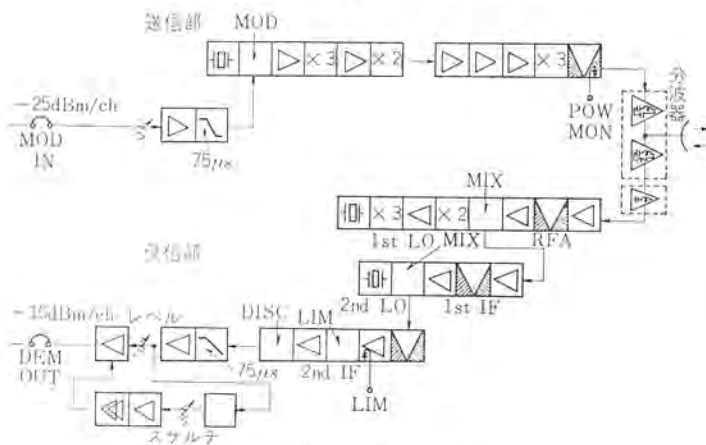


図 2.3 送受信部ブロックダイヤグラム
Transmitter and receiver block diagram.

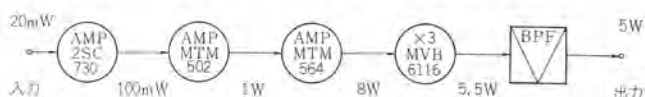


図 2.4 増幅・倍電の電力レベルダイヤグラム
Power level diagram of transmitter.

り、設置場所、使用状態に応じて最も適した方法で設備できるよう考慮している。

2.2 総合動作の概要

装置の概略の総合系統図を図 2.2 に示す。また送受信部のブロックダイヤグラムを図 2.3 に示す。

送信部は変調・倍電部と増幅・倍電部とから構成される。水晶発振器を原振として、可変容量ダイオードの PM 変調器でビデオ信号を変調し、トランジスタ、およびパワートランジスタで高効率の増幅・倍電をおこなって 400 MHz 帯で所要の電力レベルを得ている。この間の電力レベルダイヤグラムは図 2.4 に示すとおりであるが、送信部の全消費電力は 30 W 以下に抑えられた。

受信部は各部をユニット化して 50 mm のパネル厚におさめた。とくに高周波帯域の波器は増幅器 2 段を含む集中定数素子による多段形として小形で高い選択度を得るようにし、中間周波段には高 Q のコイルを用いた 3 段の狭帯域 (IF) 波器を 2 組使用して隣接無線チ

ヤネルに対し 30 dB 以上の高選択度を得ている。

電源部は低電圧動作のトランジスタを送信部に用いて DC-DC コンバータを除去し簡略化した。

搬送端局部は 5 通話路容量の周波数変換部、搬送波供給部・20 Hz 信号発振器・ジャック盤・5 通話路容量の信号中継器部・端子部よりなるが、各通話路は 300 Hz~3.4 kHz 音声帯域を 4 kHz 間隔で積み上げ 300 Hz~20 kHz の帯域に 5 通話路を構成している。通話路は用途に応じ、自動電話機用・自動交換機用、あるいは共電式電話機用信号中継器を接続し、電話回線として機能する。

2.3 装置の特長

(1) 電波の有効利用

本装置は占有帯域幅が 80 kHz に縮小されているので、従来の多重通信割り当て周波数間隔を細分しふくそう(幅狭)する無線周波の有効利用をはかることができる。

(2) 回線構成の簡易化——経済性

無線機は原則として現用機構成であり、小形化、単純化を軸とした経済設計をおこなうことによって一般多重に比べはるかに廉価となり、とくに本装置と組合せて簡易形アンテナを採用すれば工事規模は従来に比べきわめて簡単になり経済的な回線設備が可能となる。

(3) 多用途性

最大 5 CH までの搬送端局装置と信号中継装置(対電話、対交換機用または共電式電話機用)を実装できるので、用途に応じて完全な電話回線を構成することができ、小形軽量の機構によって可搬性を生かした運用も可能である。

(4) 固体化、高信頼度

機器はすべて固体化され、かつ単純化されているので動作が安定であり、信号中継装置は一部を除いて半導体化した無接点方式によって信頼度の高い動作をおこなう。

(5) 取扱い、保守が容易

本装置は原則的に予備機を設けず、したがって切換制御回路をもたない構造になっており、必要の際はプラグイン式で予備パネルと交換する設計となっているので装置本体の構成が単純で日常の保守が簡単である。

(6) 交、直流両用

電源はパネル内のジャンパの接続によって AC 100 V/200 V または DC-24 V のいずれでも使用できる。

2.4 主要性能

本装置の主要性能はつぎのとおりである。

1. 一般

周波数範囲	335~470 MHz
変調方式	SS-PM
送信出力	5 W
受信方式	二重スーパーヘテロダイン
通話路数	5 CH
周囲条件	温度 -10~+40°C、湿度 90 % 以下
電源電圧	AC 100/200 V または DC-24 V ± 10 %

2. 送受信機性能

送受信周波数	335~470 MHz 帯内の指定の 2 波
送受信周波数安定度	$\pm 2 \times 10^{-5}$ 以内
変調度	0.22 rad(rms)/CH
	ただし CH 1 は 75 μ s の前送回路によ

送信電圧	18 倍
送信 スプリアス	-50 dB 以下
伝送周波数特性	0.3~20 kHz, ± 2 dB 以内
受信帯域幅	80 kHz
中間周波数	第 1 : 33.5 MHz, 第 2 : 4.5 MHz
受信雑音指数	12 dB 以下
送受信共用回路	通過帯域内のそう(挿)入損失は送受信 おのの 2 dB 以下
入出力レベル および インピーダンス	高周波側 50 Ω , 同軸 搬送周波側 入力 -25 dBm/CH 600 $\Omega \pm 20$ % 出力 -15 dBm/CH 600 $\Omega \pm 20$ %

3. 搬送端局性能

音声周波数帯域特性	300~3,400 Hz
信号方式	CCITT の 3/5 以内
同期方式	独立同期
総合雑音	送受信端局対向一通路路総合雑音は 0 dB 点で -50 dB 以下
音声ひずみ率	2 次ひずみ 25 dB 以下 3 次ひずみ 30 dB 以下
信号ひずみ	ダイヤル・インパルス ひずみは スピード 10, Imp/sec, メーク率 33 %, レベル変動 \pm 3.5 dB にて ± 5 % 以下
入出力レベル および インピーダンス	音声側 2 WS 0 dBm 600 $\Omega \pm 20$ % 以内 2 WR -4 dBm 600 $\Omega \pm 20$ % 以内

3. 標準回線および雑音配分

CCIR では、遠距離の加入者装置に対して S/N 52 dB を確保するよう勧告しているが、実用上このような高品質が必要とされることは少なく、少容量の電話チャンネルを近距離伝送するという条件を想定すれば、S/N は 40 dB 以上あれば十分であると考えられる。回線規格を決定するための標準擬似回線として本機の用途から図 3.1 のような回線を仮定し雑音配分をおこなった。

すなわち中継距離を 15 km, 全区間を 30 km とし、全区間に 178,000 pW (無評価) の雑音を割り当てた。したがって 1 無線変復調区間当り 89,000 pW となり、さらにこれをつぎのように配分した。

無線区間	79,000 pW
搬送端局	10,000 pW

1 区間 15 km の距離は無線回線の標準としてはやや短かいようであるが、本装置がローカル回線もしくは端末回線に使用され、しかも経済的な建設を目標としているためであって空中線に高利得のもの(たとえば パラボラ 空中線)を使用し損失の少ない給電線をもちいれば区間距離を延ばすことができることはいうまでもない。無線区間の雑音配分を表 3.1 に示す。

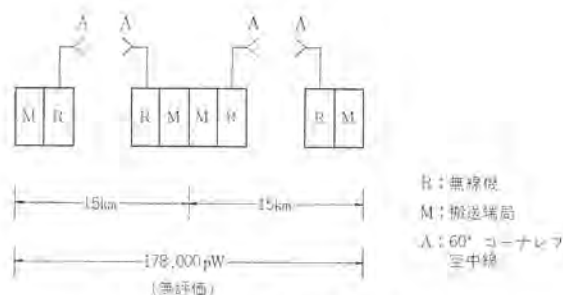
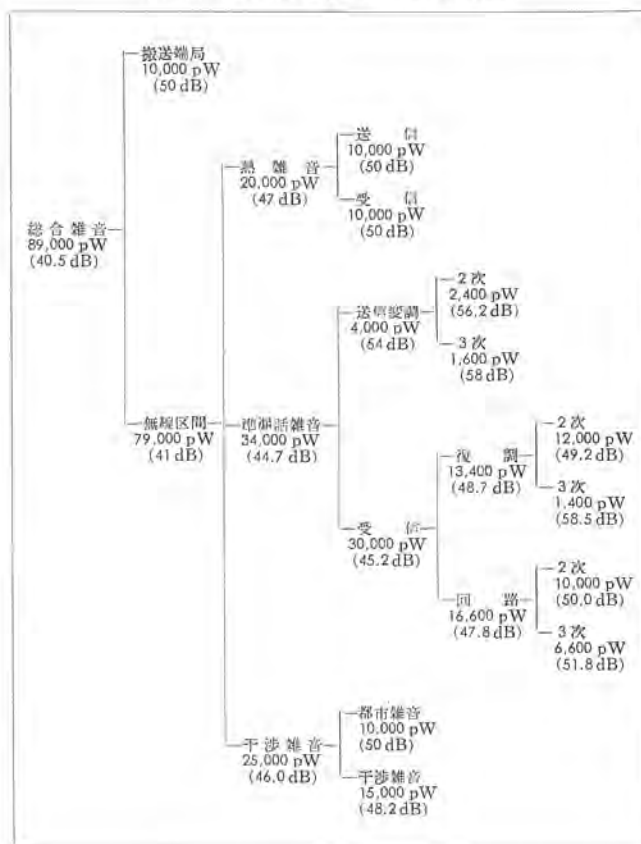


図 3.1 標準擬似回線
Hypothetical reference circuit.

表 3.1 雑音配分表
Noise distribution by reference circuits.



4. 装置の応用例

応用面については本装置の簡易性を生かすよう留意し、従来の本格的な多重無線装置に見るような複雑な構成をとらずその目的を達することが望ましい。以下にその概略を述べる。

4.1 交換機あるいは電話機との接続

本装置による電話回線の構成は用途に応じ プラダイン 方式の半電子式信号中継装置と接続機器を組み合わせてバラエティをもたせるが、一般にはつぎの 2 とおりを標準とする。

(a) 加入者回線

図 4.1 に示すように、中央局の自動交換機加入者回路のうちのいくつかを OR-T 102 形自動交換機用信号中継装置に接続し、相手局の ARC-T 103 形自動電話機用信号中継装置を経て自動電話機に接続する。この場合の動作は交換機が加入者としての無線回線を捕そく(捉)して、リングダウン方式により相手局自動電話機のベルを鳴動させるか、あるいはまた対向局からの発信をトルダイヤル方式でおこ

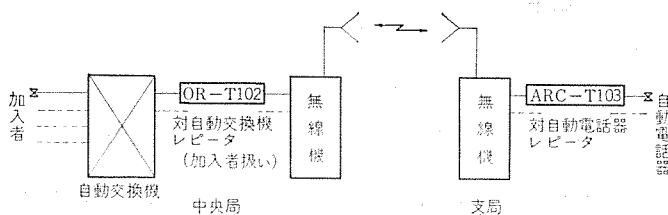


図 4.1 自動交換機の加入者回線
Subscriber's circuits by automatic branch exchange system.

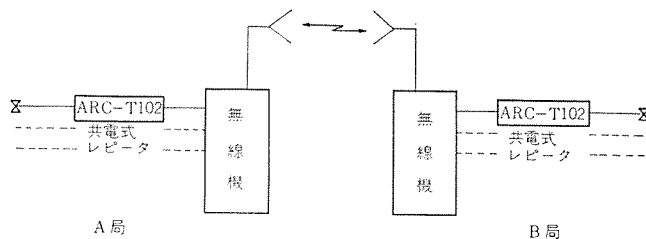


図 4.2 共電式電話回線
Common-battery telephone circuits.

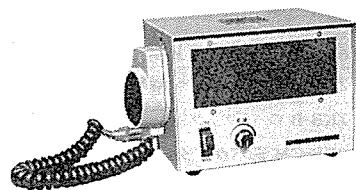


図 4.3 打合せ通話付属装置
Optional monitor device for order service.

なって中央局の自動交換機を起動させるものである。すなわちこの場合、無線で延長される通話回線は中央局の内線扱いとして対向局へ延長される。

(b) 共電式電話回線

直通回線として使用する場合は図 4.2 に示すように、ARC-T 102 形対電話機信号中継装置を使用することにより共電式電話回線が構成できる。

4.2 打合せ通話装置

この無線機の打合せ通話は、図 4.3 に示すような打合せ通話付属装置によっておこなう。これは通話路のモニタとしても使用でき、

また必要に応じてダイヤルを組み込みダイヤル試験もおこなえる。

4.3 中継方式について

分岐を必要としない中継局では一般におこなわれているビデオ中継方式とするが、他回線と分岐接続を構成する場合、本装置は特殊な搬送波配置をしているため 4 線中継方式となることが多い。この装置のみの中継回線ではフィルタによる分岐あるいはリーク中継といった方法は装置が小数通話容量であるだけに利用されることはないと思う。

5. む す び

以上、ME-04 D 051 X 形多重無線機の設計上のねら(狙)いと、特長、応用例を中心にご紹介してきたが、これは 400 MHz 多重バンドにおける周波数割当上の困難をきりひらき固定用としてはもとより、可搬用としても比較的多目的の用途に応じうる装置であり思い切った回路の単純化と経済性によって多重回線の設備が従来に比べいっそう容易となった。

本装置はすでに東北・関東・中部・九州の各地方建設局をはじめ、宮城県等でも採用いただき、それぞれ各地で実用回線として実動しており今後ますます多方面で活躍することが期待されるが、設計ならびに製造者としては使用者の協力を得ていっそうの技術の研究に励む所存である。

終わりに臨み本装置の開発、製作についてご協力を賜った社内の関係各位に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 丸浜, 阿部, 沼田, 笹田, 一ノ瀬: 三菱電機技報, 38, 10 (昭 39)
- (2) 丸浜, 阿部, 君川, 花房: 三菱電機技報, 40, 4 (昭 41)
- (3) 阿部, 笹田, 一ノ瀬: 全固体化マイクロ波発生装置, 三菱電機技報, 40, 6 (昭 41)
- (4) 沼田, 中川, 一ノ瀬, 小森, 里: ME-04 D 21 形 400 MHz 帯多重無線装置, 三菱電機技報, 41, 6 (昭 42)
- (5) 沼田, 笹田, 中川, 里: ME-40 R 形 400 MHz 帯 SS-PM 多重回線用簡易中継機, 三菱電機技報, 40, 8 (昭 41)
- (6) 阿部, 嶋田, 陶山: ME-2 H 301 形 2 GHz 帯多重無線機, 三菱電機技報, 40, 12 (昭 41)

水冷式パウダクラッチブレーキ

村田 俊哉*・車戸 秀男*・浅野 哲正*

Water Cooled Powder Clutches and Brakes

Himeji Works

Toshiya MURATA・Hideo KURUMADO・Tetsumasa ASANO

Powder clutches and brakes are one kind of electromagnetic clutches and brakes. They have a number of characteristics such as easy torque control, large thermal capacities, workability with continuous slip and the like, which are hardly available with the conventional friction board type units. In order to expand the scope of applications, water cooled powder clutches and brakes have been newly developed and brought to completion with their heat capacities increased a good deal.

This article describes their construction, the significance and features of water cooling, torque characteristics, temperature characteristics, allowable continuous slip work load, cautions in operation and examples of applications with tension control taken up as a main subject.

1. ま え が き

パウダクラッチブレーキは、動力伝達の媒体にパウダ（磁性鉄粉）を使用したユニークな動作原理をもつ電磁クラッチブレーキの一種である。したがって従来の摩擦板式電磁クラッチなどの特性とはかなり異なった特性をもっている。そのため従来のクラッチブレーキでは考えられなかった新しい用途にも使用され、産業界の新しい機械要素として注目されている。

今までのクラッチブレーキは動力の起動、停止という働きが主であったが、最近このパウダクラッチブレーキはトルク制御のできる機械要素としてとくに重要視されている。さらに熱容量の大きいことを生かし、それぞれのきめられた許容範囲内で、連続スリップ状態でも使用できる特長をもっている。これらのことから現在では、繊維・紙・シート・フィルム・金属はく（箔）などの巻き取り、巻きもどしの張力制御用が需要の大半をしめている。張力制御用として使用されるばあいには、とくに熱容量の大きいことが要求され、その結果水冷式の開発となったのである。

ここではすでに発売し好評をえている水冷式パウダブレーキと今回新しく開発完了した水冷式パウダクラッチを中心に、構造・特性、使用上の注意・応用について説明する。

2. パウダクラッチの種類

標準形のパウダクラッチブレーキについて構造上大きく分類すると次の三つに分けられる。

コイル回転形で通し軸形のZKA形パウダクラッチ⁽¹⁾、コイル静止形で突き合せ軸形のZKB形パウダクラッチ⁽¹⁾、およびコイル静止形のZKG形マイクロパウダクラッチ⁽²⁾である。

現在ではこれらの機種種のトルク範囲は0.01 kg・m から400 kg・mまでに達している。またこれらの冷却方法は、自然空冷式から強制空冷式、さらに水冷式へと次々と熱容量の大きいものを開発追加してきた。表2.1はパウダクラッチブレーキの標準機種をまとめたものである。この中で太文字で表わしたものがここで説明する水冷式パウダクラッチブレーキである。

3. 水冷式パウダクラッチブレーキの必要性和その特長

パウダクラッチまたはパウダブレーキを選定するとき、次の点を検討して

表 2.1 パウダクラッチの種類
Classification of powder clutches.

大 分 類	小 分 類	冷却方法	トルク範囲 kg・m
ZKA シリーズ (通し軸形)	※ZKA-A 形パウダクラッチ	自然空冷式	1~400
	ZKA-W 形パウダブレーキ	水 冷 式	6~45
ZKB シリーズ (突き合せ軸形)	ZKB-A(B) 形パウダクラッチ	自然空冷式	0.06~400
	ZKB-B 形パウダクラッチ	●強制空冷式	1.2~400
	ZKB-CM 形パウダクラッチ	水 冷 式	10~40
	ZKB-Y(X) 形パウダブレーキ	自然空冷式	0.06~400
	ZKB-X 形パウダブレーキ	●強制空冷式	1.2~400
	ZKB-W 形パウダブレーキ	水 冷 式	5~100
ZKG シリーズ (マイクロ)	ZKG-A 形マイクロパウダクラッチ	自然空冷式	0.01~0.5
	ZKG-Y 形マイクロパウダブレーキ	自然空冷式	0.02~0.5

注) 1. ※印はコイル回転形 他はコイル静止形

2. ●印の強制空冷式は自然空冷と共用できる

大きさを決める必要がある。

- (1) 起動（制動）要素として使用のばあい、負荷トルクと起動（制動）時間、加速（減速）トルクを考慮した、トルク容量の検討
- (2) 大きな慣性をもつ機械の起動（停止）および起動（停止）ひん度の高い条件のばあい、連結仕事量の検討
- (3) 巻き取り、巻きもどしなどの張力制御用、あるいはトルクリミットなど連続スリップで使用するばあい、スリップ仕事量の検討

本来パウダクラッチは、摩擦板式電磁クラッチブレーキに比べて、熱容量の大きいことが特長の一つである。そのため(1)、(2)のように起動（停止）の要素として使用されるときは、自然空冷で熱容量的には十分であり、とくに高慣性、高ひん度の条件でも強制空冷を採用すれば、熱容量的な問題は解決できる。したがってこのばあいのパウダクラッチブレーキの大きさはトルク容量の大きさに決定できる。

しかし(3)のように連続スリップで使用するときは、自然空冷式や強制空冷式のパウダクラッチブレーキではトルク容量よりも、熱容量、すなわちスリップ仕事率の大きさに決定されることが多い。そのため、トルク容量の検討は二次的なものとなり、トルクの使用範囲が定格値よりも非常に小さくなる。それをある程度補正する意味で適当な減速装置を使用して、トルクを制御しやすい範囲に変えるなどの操作をおこなっていたが十分なものではなかった。

しかし、水冷式を採用することは次のような特長が得られるようになった。

(1) 熱容量が大きくなるため、トルク容量と見合った大きさのものが選定できるので、定格トルクの近くで使用できるようになり、制御精度が一段と向上した。

(2) 同じ熱容量のもので比較すると、自然空冷や強制空冷のものに対して外形寸法は小形となるため取付上便利となり、経済的になるばあいもある。

(3) 巻き取り、巻きもどしの巻比が大きく、張力が大きくてもライン速度を速くすることができるので、機械の能率化に役立つようになった。

(4) 使用トルクが定格値に近いところで設定できるので、トルク調整のための減速装置は不要となり、これらの機械損失が少なくなり、したがって制御精度の誤差もわずかとなった。

4. 動作原理と構造

4.1 ZKB-CM 形 水冷式パウダクラッチ

図 4.1 はその構造、図 4.2 はその外観である。その基本構造は強制空冷形の ZKB-B 形 パウダクラッチ と同じである。

まず、動力伝達の動作原理は次のとおりである。ステータ中の励磁コイルに電流を流すと、励磁コイルのまわりに磁束が発生する。その磁束の通路の一部であるパウダギャップの中のパウダは、磁束の方向に鎖状に連結される。このときのパウダ間の連結力、およびパウダと動作面との摩擦力により、ドライブメンバ（駆動側）からドリブメンバ（被動側）にトルクが伝達できる。

つぎに、その冷却方法については動作面のスリップ仕事によって発生した熱を、ドリブメンバの内側に設けられた水路に水を循環させて外部にとり出すようにしたものである。すなわち、冷却水はドリブメンバ軸の軸端の給水口からはいり、ドリブメンバの内面を一周して、ふたたびドリブメンバ軸を通して排水口に出るようになっている。

ドリブメンバは回転するので回転体に水を給水し、回転体から水を

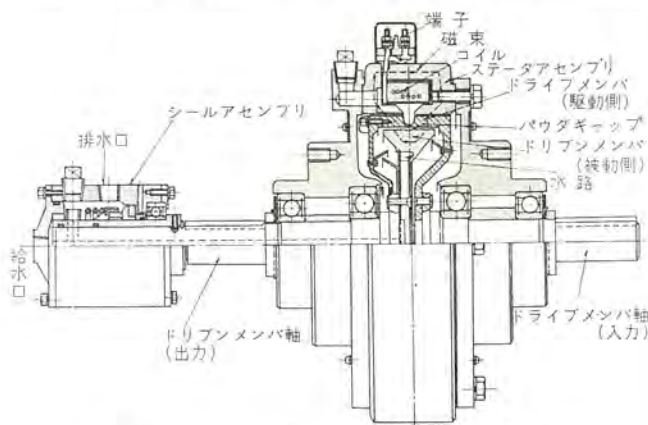


図 4.1 ZKB-CM 形 水冷式 パウダクラッチの構造
Construction of type ZKB-CM water cooled powder clutch.



図 4.2 ZKB-40 CM 形
水冷式 パウダ
クラッチ
Type ZKB-40 CM
water cooled powder
clutch.

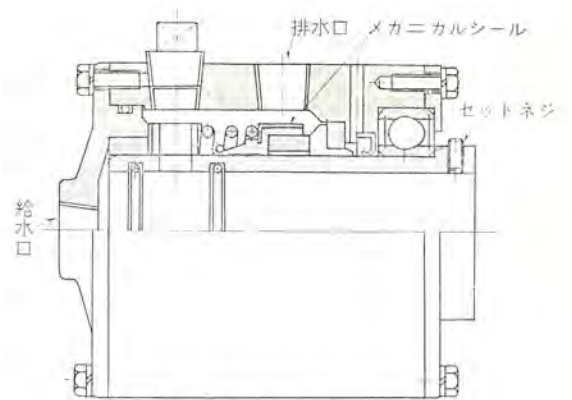


図 4.3 シールアセンブリの構造
Construction of seal assembly.



図 4.4 シールアセンブリ
Seal assembly.

排水する装置が必要となる。そのため、ドリブメンバ軸の軸端には、メカニカルシールを内蔵したシールアセンブリが設けられている。図 4.3 にはシールアセンブリの詳細な構造を示す。図 4.4 はその外観である。そのしゅう（摺）動部は耐久性のすぐれた特殊な材料を使用している。またシールアセンブリのおのおのはめ合わせ部には、Oリングを使用して完全な密封構造としている。なおシールアセンブリは、セットネジをゆるめればドリブメンバ軸から容易に脱着できる。

ドリブメンバアセンブリとシールアセンブリを除く部品は ZKB-B 形のものと同じであり、互換性がある。

4.2 ZKB-W 形 水冷式パウダブレーキ

図 4.5 はその構造、図 4.6 はその外観である。その構造は ZKB-B 形 パウダクラッチのドライブメンバに当る部分をステータと一体にして、コイルと動作面間の三角状のスペースに水路を設け、スリップで発生した熱を吸収するようになっている。

一方、クラッチでいえばドリブメンバに相当する部分が回転する構造になっている。冷却水は下部給水口からはいり、2分されてそれぞ

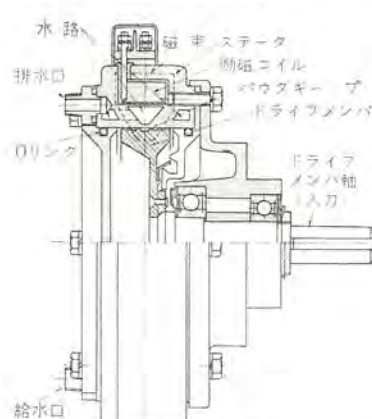


図 4.5 ZKB-W 形 水冷式 パウダ
ブレーキの構造
Construction of type ZKB-W water
cooled powder brake.



図 4.6 ZKB-20 W 形
水冷式 パウダ
ブレーキ
Type ZKB-20 W water
cooled powder brake.

れ水路を半周して上部排水口から出される。ブレーキのばあいには、クラッチと異なって静止部に水路があるため水のシールは簡単で、水路の近くのはめ合わせ部に Oリングを使用するだけで完全な密封構造となっている。なお強制空冷形の ZKB-X 形パウダブレーキとは内部構造は異なっているが、外形寸法は同一で取付上の互換性がある。

4.3 ZKA-W 形 水冷式パウダブレーキ

図 4.7 はその構造、図 4.8 はその外観である。その構造はコイル回転形の ZKA 形パウダクラッチを基本としたもので、クラッチのコイルを内蔵しているドライブメンバを固定し、ドリブンメンバを回転するようにしてブレーキとしたものである。水路は ZKB 形と同じくコイルと動作面の間のスペースを利用している。

構造的にはドリブンメンバ軸は両側のベアリングでささえられて、貫通している点が異なっている。取付けなどの関係で原動機（モートル）と負荷の間にブレーキを設ける必要があるとき、この通し軸形のものが使用される。このブレーキは水路に水を通さなければ、熱容量は小さくなるが自然空冷形としても使用できる。

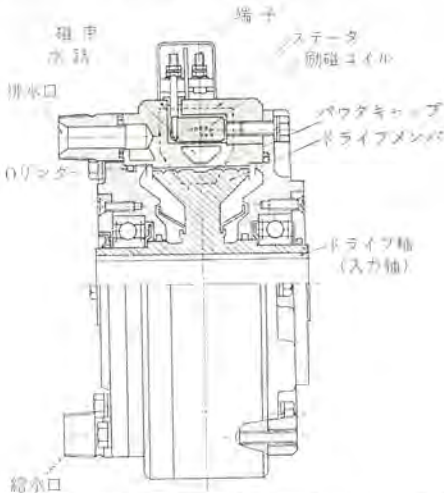


図 4.7 ZKA-W 形 水冷式 パウダブレーキの構造
Construction of type ZKA-W water cooled powder clutch.



図 4.8 ZKA-10 W 形 水冷式 パウダ
ブレーキ
Type ZKA-10 W water cooled powder
brake.

5. 外形寸法とその仕様

表 5.1, 5.2, 5.3 は水冷式パウダクラッチブレーキの主要機種の外
形寸法である。また表 5.4 はそのおもな仕様である。

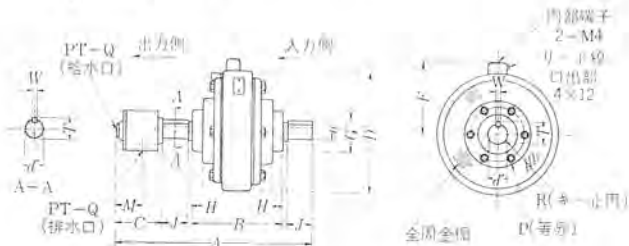
6. 特 性

6.1 励磁電流対トルク特性

パウダクラッチのトルク伝達を解析するために動作面での現象を検討
してみる。

パウダギャップの磁束分布を平等磁界とすれば、パウダギャップを隔てて

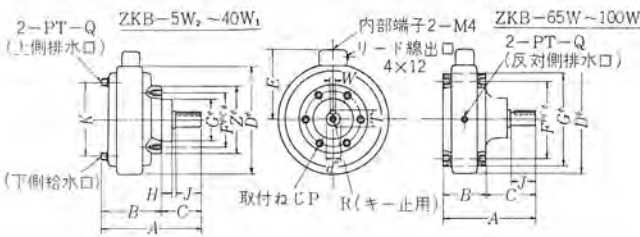
表 5.1 ZKB-CM 形 水冷式 パウダクラッチ 外形寸法
List of dimensions of type ZKB-CM water cooled
powder clutches.



記 号	A	B	C	D	E	F	G (g7)	H	J	M
形 名										
ZKB-10 CM	479	216	119	290	174	140	100	28	65	60
ZKB-20 CM	535	250	127	325	197	150	110	30	69	68
ZKB-40 CM	630	291	130	398	229	200	130	35	92	72

記 号	P			Q		R		T	W	d
形 名	N	ねじ径	本 数	深 さ	ねじ径	深 さ	ねじ径	($\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$)	(P7)	(h7)
ZKB-10 CM	96	10	6	15	3/8	10	20	33	7	30
ZKB-20 CM	100	10	6	15	3/8	10	20	38.5	10	35
ZKB-40 CM	104	12	8	20	3/8	10	20	48.5	12	45

表 5.2 ZKB-W 形 水冷式 パウダブレーキ 外形寸法
List of dimensions of type ZKB-W water cooled
powder brake.



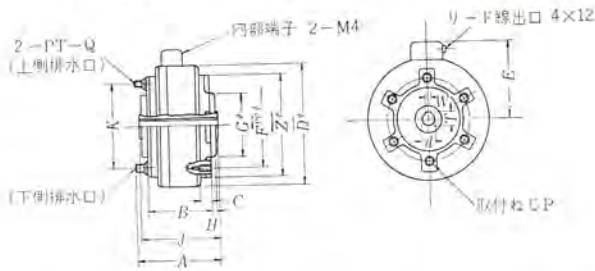
塗装色 マンセル 2.5 G 5.5 2.5

記 号	A	B	C	D	E	F	G (g7)	H	J	K
形 名										
ZKB-5 W ₂	203	112	91	219	138	100	74	30	53	168
ZKB-10 W ₁	245	145	100	290	174	140	100	28	65	218
ZKB-20 W ₁	276	167	109	335	197	150	110	30	69	258
ZKB-40 W ₁	333	194	139	398	229	200	130	35	92	314
ZKB-65 W	390	170	220	480	290	410	460	—	100	—
ZKB-100 W	440	190	250	540	320	460	510	—	110	—

記 号	P			Q		R		キ ャ ッ プ			Z
形 名	径	本 数	深 さ	径	深 さ	径	深 さ	T ($\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$)	*W (P7)	d (h7)	
ZKB-5 W ₂	6	6	10	3/8	6	12	28	7	25	114	
ZKB-10 W ₁	10	6	15	1/2	10	20	33	7	30	160	
ZKB-20 W ₁	10	6	15	1/2	10	20	38.5	10	35	174	
ZKB-40 W ₁	12	8	20	1/2	10	20	48.5	12	45	230	
ZKB-65 W	W1/2	8×2	21	1/2	—	—	65	15	60	—	
ZKB-100 W	W5/8	8×2	21	1/2	—	—	76	18	70	—	

* 印：ZKB-65 以上は W(r7)

表 5.3 ZKA-W 形 水冷式 パウダブレーキ 外形寸法
List of dimensions of type ZKA-W water cooled powder brake.



塗装色 マンセル 2.5 G 5.5 2.5

記号	A	B	C	D	E	F	G	H	J
形名							(g7)		
ZKA-2 W	96	72	11	152	104	120	80	5	82
ZKA-6 W	112	88	15	215	136	170	120	5	102
ZKA-10 W	129	100	16	255	157	200	140	7	116
ZKA-20 W	142	115	19	300	180	240	160	7	130
ZKA-45 W	189	162	25	365	212	270	200	10	184

記号	K	P			Q	キ			Z
形名		径	本数	深さ		T (+0.2 0)	W (E9)	d (H7)	
ZKA-2 W	116	5	6	8	3/8	22.5	6	20	134
ZKA-6 W	168	6	6	10	3/8	33	8	30	188
ZKA-10 W	200	8	6	14	1/2	39	10	35	220
ZKA-20 W	234	10	6	16	1/2	49	12	45	258
ZKA-45 W	270	12	6	20	1/2	66.5	18	60	300

表 5.4 ZKB 形 水冷式 パウダクラッチ ブレーキ 性能
List of rated value of type ZKB water cooled powder clutches and brakes.

形 名		公 称 トルク kg・m	励磁コイル 20℃		水 冷 条 件		重 量 kg	許容回転数 rpm
			電 流 A	電 力 W	水 量 l/min	仕事量 W		
ク ラ ッ チ	ZKB-10 CM	10	4.4	106	5	2,000	45	2,400
	ZKB-20 CM	20	4.6	110	9	2,800	69	2,100
	ZKB-40 CM	40	6.1	146	14	3,500	115	1,800
ブ レ ー キ	ZKB-5 W	5	2.4	58	3	1,100	16	3,000
	ZKB-10 W	10	2.7	66	6	2,000	36	2,400
	ZKB-20 W	20	3.0	72	9	3,000	52	2,100
	ZKB-40 W	40	3.3	80	15	4,000	72	1,800
	ZKB-65 W	65	1.4※	57	20	7,500	210	1,500
	ZKB-100 W	100	1.7※	82	25	10,000	260	1,000

注) ※は DC 48 V 他は DC 24 V

相対するドライブメンバとドリブンメンバ相互間に、パウダを介して、次のような磁気吸引力が発生する。

$$df = k/8\pi \cdot B^2 dA \dots\dots\dots (6.1)$$

ここに、 df は dA なる面積に働く磁気吸引力、 k はパウダの見かけ密度などによって定まる定数、 B は平等磁界の磁束密度、 dA は相対する微小面積である。

式 (6.1) をドリブンメンバ全円周および幅について積分し、それを F とすると

$$F = \int \frac{k}{8\pi} B^2 dA = \frac{k}{8} B^2 DL \dots\dots\dots (6.2)$$

ここに、 D および L はドリブンメンバの外径と幅である。したがって伝達トルク T は

$$T = \mu \cdot F \cdot \frac{D}{2} = \frac{k}{16} \cdot \mu B^2 D^2 L \dots\dots\dots (6.3)$$

となる。ここに μ はパウダとドリブンメンバとの相互間の摩擦係数である。式 (6.2) からわかるように、パウダクラッチの伝達はトルクはパウダギャップの磁束密度とドリブンメンバの外径の 2 乗と、ドリブンメンバの幅に比例する。

図 6.1 は、ZKB-CM 形 水冷式 パウダクラッチシリーズの励磁電流対トルク特性である。これらのパウダクラッチの伝達トルクは、パウダギャップを含む磁気回路が励磁電流に対して広範囲にわたって比例するように考慮して設計してあるので、定格トルクの約 5~130% にわたって制御性のよい特性を示している。

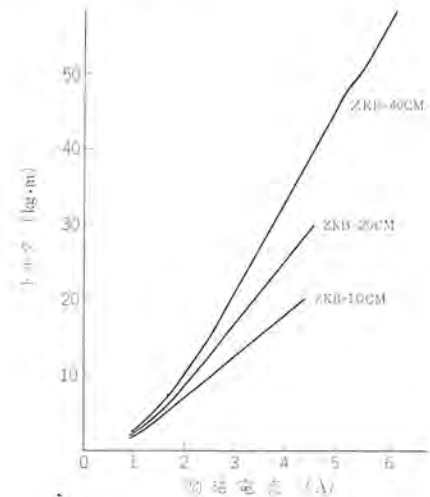


図 6.1 ZKB-CM 形 水冷式 パウダクラッチの励磁電流対トルク特性
Characteristics of exciting current and torque of type ZKB-CM water cooled powder clutch.

6.2 スリップ回転数対トルク特性

図 6.2 は ZKB-10 W 形 水冷式 パウダブレーキのスリップ回転数対トルク特性である。この図からもわかるように、伝達トルクはスリップ回転数に関係なく励磁電流によって定まる。これは動力伝達の媒体

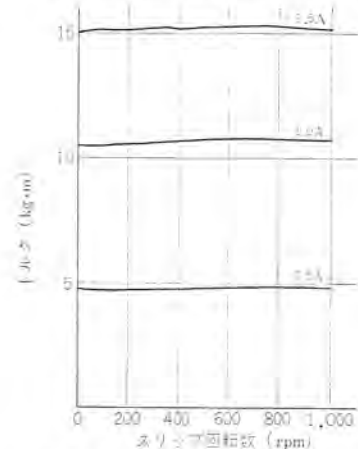


図 6.2 ZKB-10 W 形 水冷式 パウダブレーキのスリップ回転数対トルク特性
Characteristics of slip speed and torque of type ZKB-10 W water cooled powder brake.

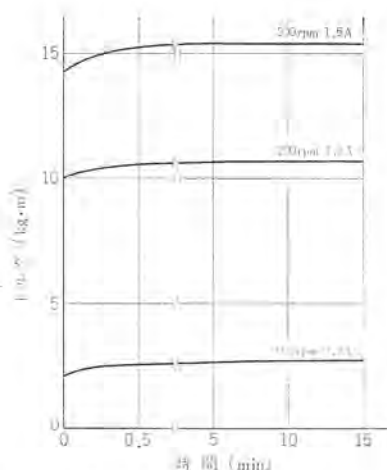


図 6.3 ZKB-10 W 形水冷式パウダブレーキの連続スリップトルク特性
Characteristics of continuous slipping torque of type ZKB-10 W water cooled powder brake.

として半固体ともいふべきパウダ（磁性鉄粉）を使用しているためである。いかえれば静摩擦トルクと動摩擦トルクの差がなく、理想的なトルク特性が得られる。

図 6.3 は ZKB-10 W 形水冷式パウダブレーキの励磁電流とスリップ回転数を一定にして、連続スリップで使ったときのトルクの安定性を示している。このように長時間にわたって安定した特性をもっているものは、パウダブレーキ以外のものでは少ない。

6.3 温度上昇特性

パウダクラッチを発熱体と考え、一定の連続スリップで使ったとき、周囲温度に対する温度上昇 θ (deg) と時間 t (s) との間には、

$$Qdt = C d\theta + H d\theta \dots \dots \dots (6.4)$$

または、

$$C \frac{d\theta}{dt} + H\theta = Q \dots \dots \dots (6.5)$$

の関係が成立する⁽³⁾。

ここに、 Q ：スリップ損失による毎秒の発熱量 (W/s)

C ：熱容量で各部の比熱と重量の積 (W·s/°C/g)

H ：全体の放熱係数 (各部の放熱係数と表面積の積) (W/°C)

最初の温度を θ_0 (°C)、最終温度上昇を $Q_\infty = Q/H$, $\tau = C/H$ とすると、任意の時間 t における温度上昇は

$$\theta = (\theta_\infty - \theta_0)(1 - e^{-t/\tau}) + \theta_0 \dots \dots \dots (6.6)$$

となる。式 (6.6) からわかるように、パウダクラッチが一定のスリップ仕事をすれば、その温度は熱時定数が $\tau (=C/H)$ なる指数関数で上昇し、その最終温度はスリップ仕事 Q に比例し、クラッチの放熱係数 H に反比例してきまる。

ところが、パウダクラッチは動力伝達の媒体であるパウダの耐久性のため、動作面の最終温度上昇を制限する必要がある。したがって、パウダクラッチはそれぞれの大きさによって許容できるスリップ仕事量に制限しなければならない。この制限を大きくするためには、冷却方法を改善して放熱係数を大きくすればよい。ここでは冷却方法として水冷式を採用し、放熱係数を大きくして許容スリップ仕事量を大きくしたわけである。

図 6.4 は ZKB-20 CM 形水冷式パウダクラッチのトルクを 4 kg·m に設定し、スリップ回転数を 670 rpm で連続スリップ運転したときの温度上昇をしめしている。このときスリップの仕事率は 2,700 W で

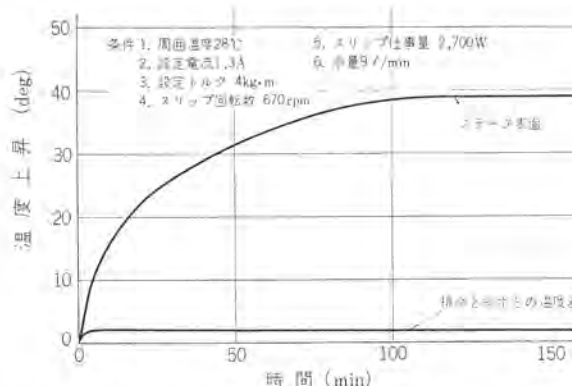


図 6.4 ZKB-20 CM 形水冷式パウダクラッチの温度上昇特性
Characteristics of temperature of type ZKB-20 CM water cooled powder brake.

あるが、冷却水量が 9 l/min で給水口と排水口の温度差は約 4°C であり、冷却水によって外部にとり出される熱量は 2,500 W となり、クラッチがスリップで発生する熱の約 90% は水によって放熱されることになる。

6.4 許容連続スリップ仕事率

図 6.5 は ZKB-CM 形水冷式パウダクラッチシリーズで動作面の最終温度上昇を制限するため、ステータの外周の温度を 80°C 以下としたときの、冷却水量に対する許容連続スリップ仕事率の関係をしめたものである。

冷却水量を増加させれば、それにもなると、許容連続スリップ仕事率も増加し、ある程度まで冷却水量が増加すると飽和するが、この値を最大許容連続スリップ仕事率と称している。この値は機種の大

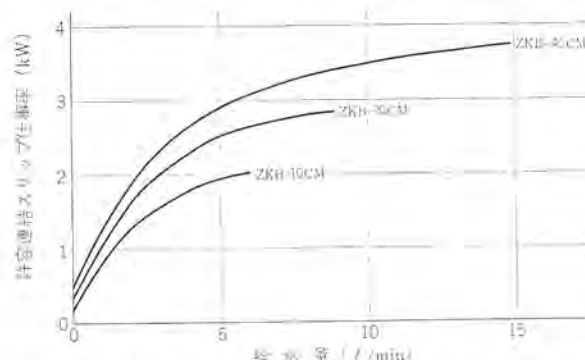


図 6.5 ZKB-CM 形水冷式パウダクラッチの冷却水量対許容スリップ仕事率特性
Characteristics of cooling water value and allowable slipping power of type ZKB-CM water cooled powder clutches.

表 6.1 ZKB 形パウダクラッチブレーキ 許容連続スリップ仕事率一覧

List of allowable continuous slipping power of type ZKB powder clutches and brakes.

形 名	トルク kg·m	許容連続スリップ仕事率 W			
		自然空冷式クラッチブレーキ	強制空冷式クラッチブレーキ	水冷式クラッチ	水冷式ブレーキ
ZKB-5	5	150~250	400	—	1,100
ZKB-10	10	250~400	800	2,000	2,200
ZKB-20	20	350~700	1,400	2,800	3,000
ZKB-40	40	450~900	2,100	3,700	4,000
ZKB-65	65	600~1,900	2,800	—	7,500
ZKB-100	100	800~2,500	3,900	—	10,000

注) 自然空冷のばあいの値は入力回転数 100~1,000 rpm の範囲についての値である。

さによって異なるが、それはドリフメンパの内側にもうけた水路の表面積の大きさによって、熱放散係数が異なるためである。表 6.1 は各種冷却方式における許容連続スリップ仕事率の比較である。

定格トルク 10 kg・m のクラッチを例にとって説明すると、自然空冷で 250~400 W、強制空冷で 800 W、水冷式で 2,000 W まで増加する。すなわち、水冷式は自然空冷の約 5 倍、強制空冷の約 2.5 倍の熱量が得られる。

6.5 許容連続仕事量

図 6.6 は水冷式パウダクラッチの連結ひん度対許容連結仕事率の関係を示している。これは許容連続スリップ仕事率から計算でもとめたものであるが、点線で示す自然空冷式のものとくらべて、最大連結仕事量で利用できる範囲が増えるとともに、高ひん度においても連

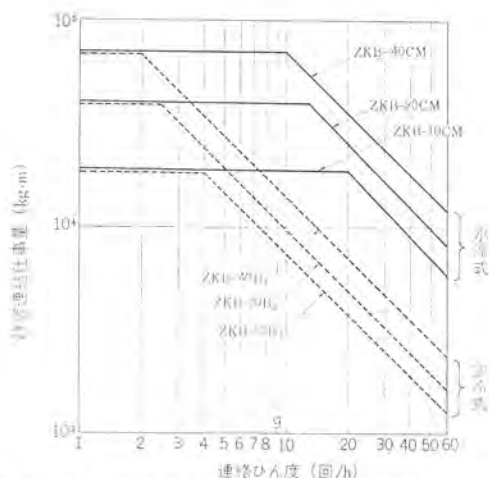


図 6.6 ZKB-CM 形水冷式パウダクラッチ許容連結仕事率線
Type ZKB-CM water cooled powder clutch allowable engaged energy diagram.

結仕事量は大きくなる。したがって高慣性の負荷を高ひん度に起動することが可能となる。また高ひん度の正逆転装置などに使用すれば機械の能率化に十分役立つことになる。

6.6 耐久性

パウダクラッチブレーキはスリップ動作を本来の目的としているが、その耐久性を決定する要素としては、次の点が考えられる。

(1) 連結(制動)動作のときは、連結仕事量の大きさとその連結ひん度

(2) 連続スリップで使用するときは、そのスリップ仕事量の大きさ
これらの点が許容値の範囲内で使用されれば、連続 8,000 時間以上の使用が可能である。

現在では、自然空冷形のものでは許容値のやや低めのところで連続スリップ 15,000 時間使用でも、特性の変化が認められないものもある。水冷式についても温度的に同じ条件で許容値を設定しているので、同じ耐久性が期待できる。現にわれわれは水冷ブレーキでスリップ仕事量を許容値に設置して、約 5,000 時間耐久テストを行なったが、トルクの低下は 8% 以内であった。

次に水冷式パウダクラッチは、水のシールの部分の耐久性が問題であり、これはペンの耐久テストで耐久性を確認した結果、性能表にある許容回転数で使用して 5,000 時間は使用可能である。

なお、この回転数以下で使用すれば、これ以上の耐久性が期待できる。ただしこのばあい、水質がメカニカルシールのしゅう(摺)動部の耐久性に大きい影響をあたえるので十分注意する必要がある。図 6.7 は、シールアセンブリのペンチ耐久テストの様子を示している。

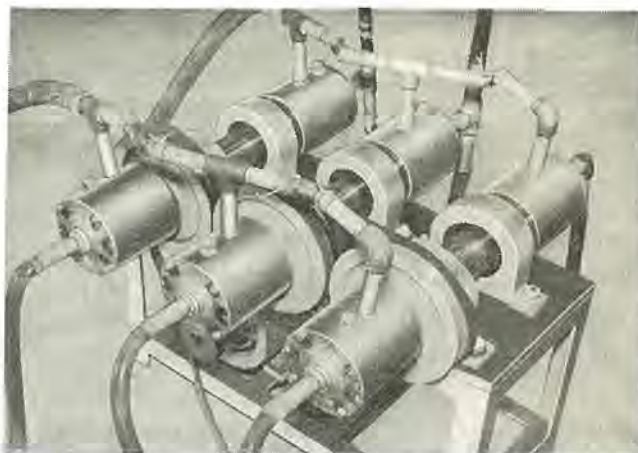


図 6.7 シールアセンブリの耐久試験装置
Endurance testing device of seal assembly.

7. 使用条件および保守

水冷パウダクラッチブレーキ式を使用するときには、次のような状態で使用しなければならない。

(1) 水冷式パウダクラッチは原則として、シールアセンブリのついているほうを出力側として使用することががのぞましい。ただし、出力側を軸端連結で使用するときは逆にしてもさしつかえないが、トルク容量は約 1 割ほど小さくなる。図 7.1、図 7.2 は水冷式パウダクラッチとパウダブレーキの取付け方法の一例を示している。

(2) クラッチのばあいの冷却水は循環方式を原則とし、防食剤を混入して図 7.3 のような配置で使用するががのぞましい。上水道以外の水を放水式で使用するときは、給水口にストレーナ(ろ過器)を設ける必要がある。

(3) 冷却水の断水時にはクラッチの回転が停止するように保護回路を設けて、スリップ熱によるメカニカルシールのしゅう動部およびク

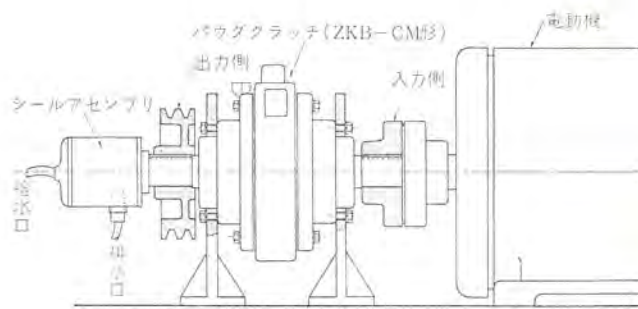


図 7.1 ZKB-CM 形水冷式パウダクラッチの取付け方法
Mounting of type ZKB-CM water cooled powder clutch.

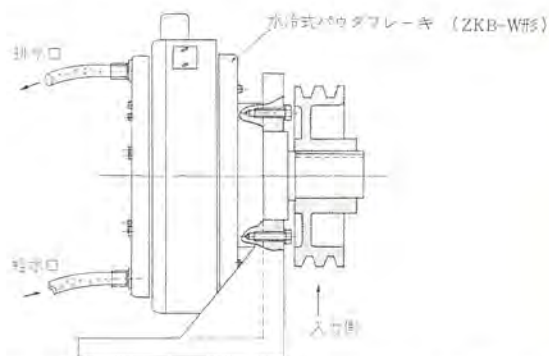


図 7.2 ZKB-W 形水冷式パウダブレーキの取付け方法
Mounting of type ZKB-W water cooled powder brake.

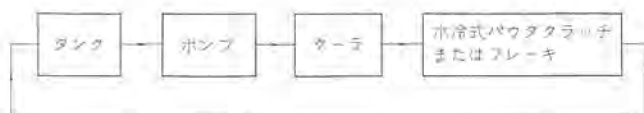


図 7.3 冷却水の循環方法
Method of circulation of cooling water.

ラッチ(ブレーキ)本体の焼損防止をおこなう必要がある。

(4) 長期にわたって運転を中止とするときは、クラッチやブレーキに冷却水がたまっていないようにしておく必要がある。

8. 応 用 例

パワクラッチブレーキの用途を大別すると、連続スリップ用と間欠スリップ用となる。

前者は、紙・糸・電線・各種シート・テープ・ロープなどの長尺物の巻取り、巻出し張力制御、あるいは小形原動機の動力試験用ダイモメータなどが代表的である。

後者は大慣性負荷の緩衝起動用・一般産業機械の高ひん度起動・停止・可逆運転用・あるいはチャック、クランプ、ねじ締め装置などのトルクリミッタとして多くの実用例がある。とくに水冷式パワクラッチブレーキは、その性質上大熱容量を必要とする連続スリップ用としての用途が大半であり、なかでも巻取り、巻出し張力制御用に最も多くの需要がある。その特長は次のとおりであり、機械の高速化・自動化・高性能化に役立っている。

(1) 巻径に応じた励磁電流を与えると張力が定まり、張力計がなくても簡単に張力の設定ができる。

(2) 広範囲なトルクで使えるから、大幅な張力調整ができる。

(3) スリップ速度の大小にかかわらず、一定のトルクが伝えられるから安定した運転ができ、ラインスピードをかえても張力は変化しない。

(4) 機械の起動・停止時における巻わくの慣性の影響を考慮するばあいでも、その補償制御が簡単にできる。

なお、定張力を得るために巻径の変化に応じて自動的にクラッチブレーキの励磁電流を制御する方法としては、張力検出による閉ループ方式と巻径検出による開ループ方式とがある。

図 8.1 はダンサーロールによって材料の張力を検出し、これが所定の値となるよう自動制御するものであって、最も正確な定張力が得られる。

図 8.2 はタッチレバーによって巻径を検出して、励磁電流を自動的

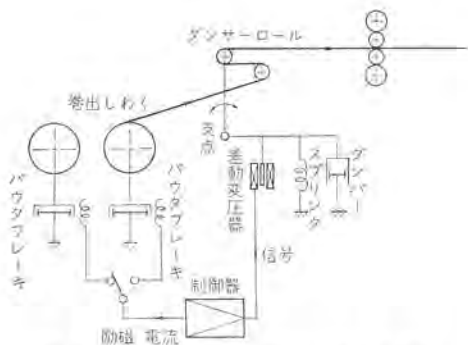


図 8.1 多色輪転印刷機における応用例
Application to colour printing machine.

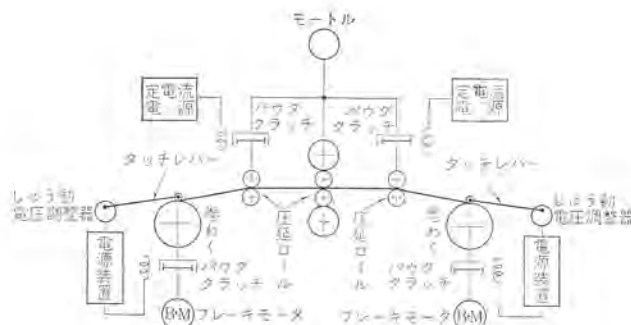


図 8.2 可逆圧延機における応用例
Application to press machine.

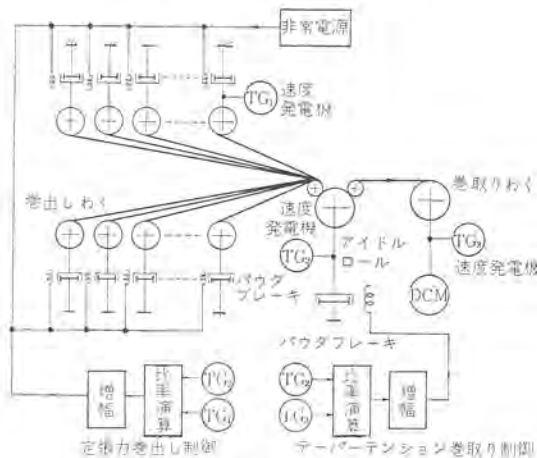


図 8.3 化学繊維巻返し機における応用例
Application to rayon machine.

に増減させるようにしたものであり、簡単、安価に自動化できる。

図 8.3 はタッチレバーを使わないで巻径を検出するようにしたものであり、繊維、フィルムなどの張力制御に好んで使われている。

この種の用途では電力経済の点からあまり大きなスリップ損失のものには適さないことになるが、たとえば巻出しのばあい、ラインスピードと張力との積が $(3 \sim 10) \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{min}$ 程度のものまで実用されている。

9. む す び

パワクラッチブレーキの生産を開始して以来すでに数年を経過したが、張力制御の応用面においては熱容量不足のため、その需要範囲がかなり制限されていた。水冷式パワブレーキについては給水機構が簡単なため、まず開発が行なわれ好評をえた。水冷式パワクラッチについては一般需要家から強い要望があったが、給水機構技術にむずかしい問題があり、開発にかなりの時間を要した。今回確信のあるものができたので、発表することにした。

今後さらに熱容量の大きいものに改良されてゆくであろうが、これら水冷式パワクラッチブレーキが新しい分野において広く利用されることを期待している。

参 考 文 献

- (1) 宮崎ほか：三菱電機技報，38，No. 10，20 (昭39)
- (2) 村田ほか：三菱電機技報，40，No. 9，1,494 (昭41)
- (3) 森沢：電動機応用 (昭41) オーム社，p. 271～273

水素炎イオン化検出法による 自動車排気ガス中炭化水素濃度の連続測定

森川 允弘*・吾妻 健国*

平野 重明**

Hydrogen Flame Ionization Detector for Continuous Measurement of Auto-Exhaust Hydrocarbon Emissions

Central Research Laboratory Masahiro MORIKAWA・Kenkoku AZUMA

Himeji Works Shigeaki HIRANO

A hydrogen flame ionization detector (FID) has been developed for continuous measurement of total hydrocarbon contents in exhaust emissions of vehicles, having a fast response and a uniform detectability on carbon basis for various hydrocarbons. A good resolution besides a wide linear detection are its another features. As a powerful demonstration of the device, hydrocarbon concentrations, emitted by a vehicle operating on the JIS mode test cycle or at a certain engine condition, have been measured with it and a nondispersive infrared analyzer in joint use to obtain quantitative and qualitative data. The combination is proved to be recommended for the judgement of engine condition or its parts to control the public nuisance posing serious problems of late.

1. ま え が き

近年自動車普及量の急増とともに、自動車排気ガスに含まれる有害成分による大気汚染が公害対策上重大な問題になってきた。これに対処してアメリカをはじめ、日本でも有害成分の排出濃度の法的な規制を開始した。具体的な対象成分および規制値は表 1.1 に示す。

最近、アメリカ政府は 1970 年度の新車から現行の一酸化炭素、炭化水素（以下、CO、HC と略記する）の排出規制濃度を、乗用車および軽トラックに対して 30% 引き下げることを、従来対象とされていなかったバス、大形トラックに対しても新たに規制値を設けることなどの新基準を発表している。このようにアメリカにおける許容基準は年を追って強化される傾向にある。

わが国では表 1.1 に示されているように CO だけを 3% 以下に規制しているが、対米輸出車には当然アメリカのきびしい排気ガス規制が適用される。したがって CO 濃度を下げるとともに HC 対策も必要である。排気ガスの成分としては水蒸気が全体の約 15 vol%，水蒸気以外のガス状物質の 80 vol% あまりを窒素が占め、残りの 10% 弱は炭酸ガス、酸素、水素、一酸化炭素、炭化水素、窒素酸化物、アルデヒド類などである。これら炭酸ガス以下の成分はエンジンの形（2 サイクルか 4 サイクルか）、容量、走行状態、空燃比などにより大きく変動する。アメリカの大形車について測定された成分例⁽¹⁾を表 1.2 に示した。

HC としては 200 種類以上が確認されているが一例⁽¹⁾を表 1.3 に引用した。これらの濃度は前述のようにエンジン状態やガソリンの種類によっても変化し、HC の成分がいかに複雑なものであるかを示している。排気ガスの浄化を考えると、まず第 1 に有害成分を有効に減少せしめるようなエンジンの開発が重要であるが、それに付随して問題としている成分を迅速かつ正確に連続測定する装置が必要である。

現在 CO の測定装置としては日、米ともに非分散形赤外線分析計（以下 NDIR と略記する）を標準とすることが定められている。これは価格、簡易さの点で使用者の不満はあっても性能的には、本質的な問題はあまりない。HC は n-ヘキサンに感度を合わせた NDIR

表 1.1 排気ガス中の有害成分の規制濃度
Regulated concentration of noxious components in
exhausted gases.

	対象車種* (排気容量 cc)	対象成分および規制濃度 (CO : vol. %, HC : ppm, 容積比)				
		1966 年	67 年	68 年	69 年	70 年以後
米国カリフォルニア州	2293 以上	CO : 1.5 HC : 275				CO : 1.0 HC : 180
全 米	819~1638 1638~2293 2293 以上	CO : 2.3, HC : 410 CO : 2.0, HC : 350 CO : 1.5, HC : 275				同左の 30% 減
日 本	全 4 輪 車	CO : 3				

* ガソリン車にかぎる。

表 1.2 自動車排気ガスの成分の一例
Example of components of auto-exhausted gases.

測定項目	アイドリ ング	加 速	定 速	減 速
炭化水素（ヘキサンとして） ppm	800	540	455	5,000
炭化水素範囲（ヘキサンとして） ppm	300~1,000	300~800	250~550	3,000~12,000
アセチレン ppm	710	170	175	1,096
アルデヒド ppm	15	27	35	199
窒素酸化物* (NO ₂ として) ppm	23	543	1,270	6
窒素酸化物範囲 (NO ₂ として) ppm	10~15	1,000~4,000	1,000~3,000	5~50
一酸化炭素 %	4.9	1.8	1.7	3.4
炭酸ガス %	10.2	12.1	12.4	6.0
酸 素 %	1.8	1.5	1.7	8.1
排気ガス量 scbm	8	60	35	8
排気ガス量範囲 scbm	5~25	40~200	25~66	5~25
排気ガス温度範囲（マフラス入口） °C	約 150~320	約 490~700	約 430~600	約 200~430
未燃炭素（ヘキサンとして） 対供給燃料 wt %	2.88	2.12	1.95	18.0

* ガソリン車に対しては 99% 以上が酸化窒素 (NO) である。

表 1.3 自動車排気ガス中の炭化水素の成分
(エンジン状態, ガソリンの種類: 不明)
Components of hydrocarbon in auto-exhausted gases.

成 分	濃 度 (ppm (容積))
メタン	178
エタン	16
エチレン	231
プロパン	0
アセチレン	104
プロピレン, i-ブタン	89
n-ブタン	14
メチルアセチレン	5
i-ブチレン, 1-ブテン, 1, 3-ブタジエン	40
トランス-2-ブテン	4
シス-2-ブテン	3
3-メチル-1-ブテン	1
i-ペンタン	16
1-ペンテン	1
2-メチル-1-ブテン, n-ペンタン	10
2-メチル-1, 3-ブタジエン	1
2-ペンテン, 2-メチル-2-ブテン	7
2, 2-ジメチルブタン	1
4-メチル-1-ペンテン	1
シクロペンタン	1
2, 3-ジメチル-1-ブテン, 2, 3-ジメチルブタン	2
2-メチルペンタン, 4-メチル-2-ペンテン	6
3-メチルペンタン	4
2-メチル-1-ペンテン, 1-ヘキセン	2
2-エチル-1-ブテン, 3-ヘキセン, n-ヘキサシ, 2-ヘキセン	7
2, 2-ジメチルペンタン, メチルシクロペンタン	3
2, 3-ジメチル-2-ブテン, 2, 4-ジメチルペンタン	
2, 3, 3-トリメチル-1-ブテン	2
2, 3-ジメチルペンタン, 2-メチルヘキサシ	4
シクロヘキセン	
3-メチルヘキサシ, 5-メチル-2-ヘキセン	3
2, 2, 4-トリメチルペンタン	9
ベンゼン, 3, 3-ジメチルペンタン	26
n-ヘプタン, 3-ヘプテン	4
2, 2, 4-トリメチル-1-ペンテン, 2-ヘプテン	1
2, 2, 4-トリメチル-2-ペンテン, 2, , 2, 3-トリメチルペンタン	3
トルエン, 2, 3, 4-トリメチルペンタン	42
不 明	2
不 明	1
n-オクタン	1
不 明	2
エチルベンゼン	8
m-キシレン, p-キシレン	21
不 明	1
o-キシレン	10
n-ノナン	1
不 明	1
n-プロピルベンゼン	1
1-メチル-3-エチルベンゼン, 1-メチル-4-エチルベンゼン	8
1, 3, 5-トリメチルベンゼン	4
1-メチル-2-エチルベンゼン	4
1, 2, 4-トリメチルベンゼン, 第3-ブチルベンゼン	10
1, 2, 3-トリメチルベンゼン, 1-メチル-3-イ-プロピルベンゼン	2
1, 3-ジエチルベンゼン, 1-メチル-3-n-プロピルベンゼン	3
1, 3-ジメチル-4エチルベンゼン	2
不 明	1
不 明	3

表 1.4 種々な炭化水素に対する NDIR の応答値
Response values of NDIR for various hydrocarbons.

成 分	濃 度 (ppm C)	平均相対感度 (炭素原子数あたり)		
		セルの長さ 63.5 mm	セルの長さ 133 mm	セルの長さ 343 mm
バ ラ イ ン	メ タ ン	143, 1,390	29	30
	エ タ ン	216	100	100
	プ ロ パ ン	321, 1,005	102	103
	i-ブ タ シ	404	101	101
	n-ブ タ シ	412	105	106
	i-ペ ン タ シ	520	99	99
	n-ペ ン タ シ	510	105	104
	n-ヘ キ サ シ	294, 462, 600, 1,500, 1,980	100	100
	n-ヘ プ タ シ	707	97	97
	オ レ フ ィ ン	20, 200, 1,050, 2,100	9	9
ア セ チ レ ン	エ チ レ シ	306	30	31
	1-ブ テ シ	396	—	53
	1-ペ ン テ シ	955	—	57
	1-ヘ キ セ シ	775	—	61
芳 香 族	ア セ チ レ シ	202, 1,020	1	1
	メチルアセチレン	390	16	16
	エチルアセチレン	432	33	32
芳 香 族	ベ ン ゼ シ	1,070	2	2
	ト ル エ シ	930	12	13

注) 63.5 mm の CO₂ フィルタ付き

で測定することが定められ、測定結果を n-ヘキサシの容積濃度で表わすことになっている。この方法の本質的な欠点は表 1.4⁽⁹⁾ に引用したように、炭化水素の種類によって感度が大幅に変動することである。大まかな傾向としては、飽和 HC 類に比べてオレフィン, アセチレン, 芳香族 HC などに対する感度がとくに悪い。

ところがアメリカの HC 規制のおもな理由である光学的なスモッグの生成に関与しているのは、排気ガス中の HC のうちのオレフィン類⁽³⁾であり、飽和 HC はスモッグ生成に寄与しないことが、はっきりしてきたので全 HC 濃度を NDIR で測定することには問題がある。

これに対して、従来ガスクロマトグラフの検出器の1種として使用されている水素炎イオン化検出器(以後 FID と略記する)は、有機化合物だけに感度を有し、しかも HC に対しては飽和、不飽和、鎖状、環状によらず、ほとんどの種類のものに対して1分子中に含まれる炭素数に比例した感度を有する。さらに検出能は ppm 以下の高感度であること、適当なトラップを使用すれば、応答速度はおちるが、飽和 HC と不飽和 HC を区別して測定することもできることなど、自動車排気ガス中の全 HC 濃度測定用としてすぐれた特長をもっている。

したがって応答の速い、安定な排気ガス測定用の FID が開発されれば、NDIR とは異なった信頼性のあるデータを提供する装置として、あるいは NDIR のデータを補完することのできる有用な研究用装置として大いに利用価値のあることは明らかである。最近の情報によるとアメリカでは、HC 測定器として NDIR の代わりに FID を採用しようとする有力な動きがあり、安定で応答の速い特性をもった FID の開発とともに NDIR と FID の指示値の対応づけが急がれている。

当社ではかねてより排気ガス測定用の FID を研究開発し、HC の排出濃度を有効に減少せしめるエンジン状態の研究、エンジン部品の開発改良用に使用してきたが、今回は試作した FID の特性について述べるとともに、FID と NDIR による HC 濃度同時測定結果のいくつかを例にとって、FID の有用性を示すことにする。

2. FID の原理と構成

FID は大別して

(1) 水素炎を形成するための燃料である水素と窒素ガスや、空気、被検ガスを一定の流速で送るためのガス導入系

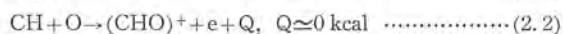
(2) 検出用電極をそなえた燃焼そう(槽)

(3) 信号の増幅、記録部

からなる。それらの構成を図 2.1 に示す。排気ガス中には大量の水分、カーボン、タール、ミストなどが含まれているので、排気ガス測定用の FID にはガスフィルタや、冷却そうをつける。

FID の原理(詳しくは Krugers の文献⁽⁴⁾を参照)を一口で述べると、有機化合物が水素炎中に導入されたとき生ずる電荷を捕集し検出するものである。水素、窒素、炭酸ガス、水蒸気などの無機ガスはイオン化ポテンシャルが高い(12~16 eV)ので、炎の温度(1,000~2,500°C)ではイオン化しない。したがって防害電流を生じない。

水素炎での有機物の分解、イオン化機構は複雑で、完全には理解されていない。しかし燃焼そうに導入された有機物は水素炎の予備加熱部分で熱分解して、CH ラジカル、その他のカーボンラジカルを生成することは確かとされている⁽⁴⁾。生成した CH ラジカルは、空気中の酸素が水素炎の温度によって熱解離して生成した原子状酸素、O、と式(2.1)のような化学イオン化反応を起こし、(CHO)⁺イオンを生成する。生成した(CHO)⁺イオンと電子はそれぞれ負電極と正電極に捕集され検出される。



CH ラジカルは、3,900 Å および 4,315 Å の光を、CHO は主として 2,500 Å から 4,100 Å の間の光を放出する。これらのエミッションは分光学的に測定され、CH と CHO の存在は確認されている。式(2.1)、(2.2)の反応にあずかる有機化合物中の炭素原子は、水素だけまたは水素および他の炭素原子だけと直接結合しているものだけであり、(CHO)⁺の収率は炭素原子数 10⁴ から 10⁵ 個あたり 1 個の割合である。

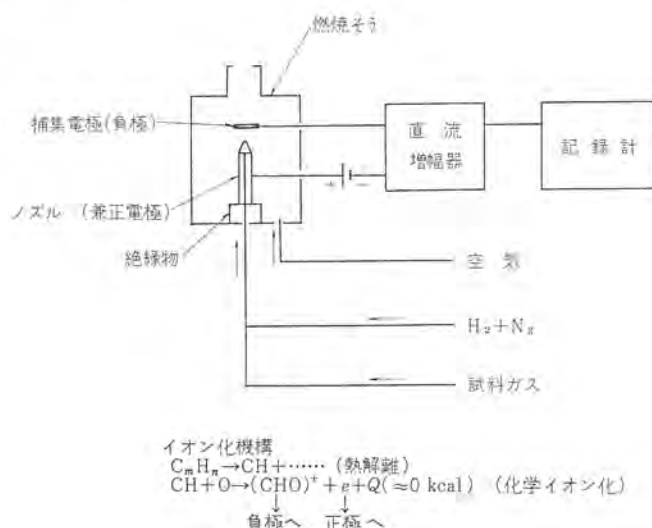


図 2.1 FID の原理説明のための図
Explanatory diagram for principle of flame ionization detector.

3. 試作した FID の特性

自動車排気ガス測定用の FID に要求される特性は応答が速いこと

と、n-ヘキサン換算値で 10 ppm から 20,000 ppm くらいまで直線的検出ができること、測定値が正確であること、長時間安定であることなど相当きびしいものがある。

われわれは次のような仕様を目標として試作を行なった。

応答速度	2 秒以下
直線的検出能	n-ヘキサン換算値で 10 ppm から 2×10^4 ppm
正確度	フルスケールの $\pm 1\%$

これらの特性を達成するためには、応答速度に関しては試料ガス導入系の諸エレメントの死容積をできるだけ小さくすることも必要であるが、試料ガスの供給方法として、HC 検出のために水素炎が必要とする試料ガス量は高々数 cc/min であるので、応答をよくするためには、まず数 l/min から 10 l/min くらいの流速で燃焼そう近くまで試料ガスを導入し、そのうちの適当量を毛細管で分流させ燃焼そうに供給する方法をとることが好ましい。増幅器、記録計も当然応答の早いものを使用することが必要である。

次に感度を安定にするためには水素炎を安定にすることがまず必要であり、そのためには水素、窒素、空気、水素炎への試料ガス導入口、燃焼そう温度などを一定に制御することが要求される。このような諸項目を考慮して試作した FID のブロックダイアグラムを、図 3.1 に、装置の外観を図 3.2 に示した。

3.1 燃焼そう(槽)の動作条件と特性

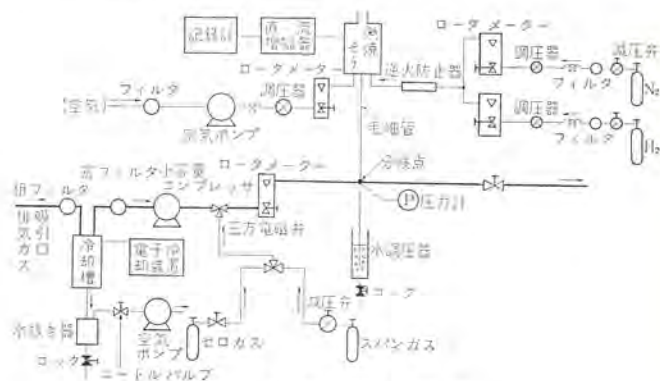


図 3.1 FID 構成概略
Schematic diagram of FID.



図 3.2 試作した FID の外観
Exterior view of developed FID.

3.1.1 検出能の直線性

通常の FID では、 μO パン換算値で 5×10^3 から 10^4 ppm (n-ヘキサン換算 2.5×10^3 から 5×10^3 ppm) 以上の高濃度の HC を含む試料に対しては、検出能は直線からずれて飽和の傾向を示す⁽⁴⁾。その主

たる原因は水素炎中で生じたイオンの再結合にある。直線性を支配する因子としては、水素炎の形状（ノズルの形状、水素、窒素、空気流量などに依存する。）、電極電圧、電極間隔、試料流量などからあげられる。

(1) ノズル径の影響

他の条件を同一にして、ノズル（正電極を兼ねる）の内径を0.5, 1.0, 1.5, 2.0φと変化させて直線性の検討をおこなった。その結果は、表3.1のとおりで、ノズルの内径が大きいほど広い直線領域をもっており、それからはずれたさらに高い濃度の試料に対する飽和の程度も小さい。これらの結果は、ノズルの内径が大きいほうがイオン対の生成する水素炎の反応帯がノズルの近くに形成され、ノズルは正電極を兼ねているので、負の電荷のドリフト距離が短くなり、再結合の確率が減少するためと解釈される。ノズルの肉厚は実験をおこなった2, 3の例では、飽和特性にはほとんど影響しなかった。

表 3.1 ノズル*内径と直線領域
Nozzle inner dia. and linear range.

ノズル内径 mmφ	H ₂ cc/min	N ₂ cc/min	直線領域 %, n-ヘキサン換算
0.5	35	45	約 1.1
1.0	35	45	約 1.2
1.5	35	45	約 1.8
2.0	35	45	約 2.5

* 外径はすべて5φ

(2) 電極電圧・電極間隔の影響

一般に直線領域を大きくするためには電極電圧は大きく、間隔は小さくすることが好ましい。しかしあまりこの傾向を強くするとノイズレベルを大きくし、感度も小さくなるので通常間隔6mm~15mm、電極電圧200V~300Vにする。

電極電圧間隔と直線性の関係を示す一例として、ある一定濃度のHCに対して間隔4mmのとき10V以上の電極電圧に対しては検出電流は一定であるが、間隔が23.6mmになると120Vでもまだ不十分であるとの報告⁽⁵⁾がある。

われわれのおこなった実験では、たとえば図3.3に示したように一定条件下で電極電圧だけを100Vから300Vに変化させると、検出能の直線領域はn-ヘキサン換算で 8×10^3 から 1.8×10^4 ppmまで増加し、また他の条件を一定として電極間隔を6mmから10mmまで変化させると直線領域は1/2に減少した。

(3) 電極の設け方、形状

通常正電極は図2.1のようにノズル自身とするが、別個にノズルの周囲に正電極を設けるかの二つの方法があるが、前者のほうが一般に直線領域がひろい。しかしこの場合にはノズルをアース電位より絶縁する必要がある。また水素炎の上に設ける負電極の形状は、円板状、線状、金網状、円筒状のものなどが使用されているが、水素炎にかかる電場の対称性がよいこと、簡便であることなどの理由からリング状のものを採用した。リング径は水素炎よりも大きい径で5~7mmφがよい。

(4) 試料流量の影響

燃焼そうへの試料の導入量が少ないほど、直線領域は増大する。たとえば一定条件下で試料導入量を0.8から3.6cc/minまで変化した場合、0.8cc/minのときn-ヘキサン換算値で4.8%まで直線的であったが3.6cc/minでは0.8%に減少した。このように試料導入量は少ないほうが好ましいが、一方流量制御や応答速度の観点からは

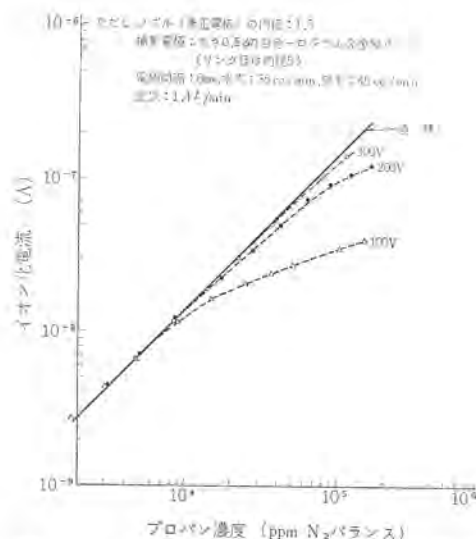


図 3.3 電極電圧と検出能の直線性
Effect of electrode voltage on linear detectability.

多いほうが好ましい。これらの点から試料導入量は2.4cc/min（図3.1の分岐点圧力で100mmAq）に設定している。

以上(1)から(4)までの検討事項をまとめると、検出能の直線領域を大きくするためには、ノズル径は大きいめに（たとえば2φ）、電極電圧は高めに（たとえば300V）、電極間隔は6mmないし8mmとし、正電極はノズル自身とすることが好ましい。このような条件下でn-ヘキサン換算20,000ppm以上の直線的検出能を得ている。

3.1.2 検出感度の安定性

(1) 燃焼そうへの試料ガス導入量と感度

同一濃度の試料ガスに対してでも、水素炎に導入される量が変わると検出器の感度は変動する。一定条件下で流量と検出電流特性をとったところ、実験をおこなった範囲内（0~12.2cc/min）では流量と電流値とは直線的関係にあった。すなわち試料ガス流量の変動はそのまま感度変動をもたらすから、燃焼そうへ導入する試料の量は常に一定に制御することが必要である。図3.1の水調圧器は分岐点圧力を一定に保ち、試料導入量の変動による感度の変動を減少させるためのものである。

(2) 水素流量と感度

窒素流量をパラメータとして水素流量—感度特性をとると、図3.4に示したようになり、一定量の水素に対して感度が極大値を示す特性を得る。このグラフは窒素流量が一定で、水素流量が感度の極大値近辺の量であれば、多少の水素の流量変動があっても感度の変動は少ないことを示している。

(3) 窒素流量と感度

水素流量を図3.4のピーク近辺の値とし、窒素—感度特性をとる

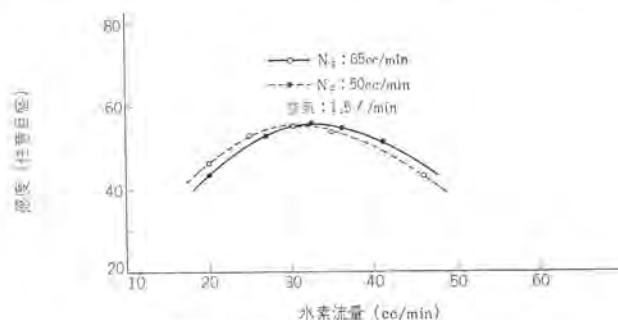


図 3.4 水素流量と感度
Current response at various hydrogen flow rates.

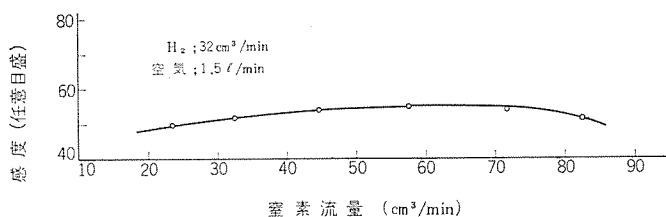


図 3.5 窒素流量と感度
Current response at various nitrogen flow rates.

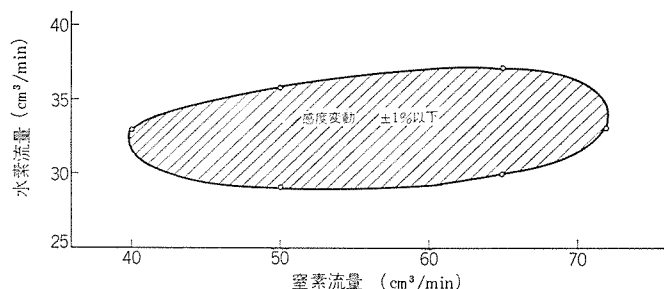


図 3.6 水素、窒素流量と感度変動
Effect of hydrogen and nitrogen flow rates on sensitivity change.

と図 3.5 に示したようにゆるやかな極大値をもった曲線がえられる。すなわち水素流量が一定であれば窒素流量の変動による感度の変動はゆるやかである。

(4) 水素、窒素流量の許容変動範囲

図 3.4, 3.5 から感度変動 $\pm 1\%$ を許す水素、窒素流量範囲を求めると図 3.6 を得る。すなわち水素、窒素流量をこの閉曲線の中心あたりに設定することが望ましい。

(5) 空気流量と感度

空気流量が 0.5 l/min から 2 l/min (測定上限) の範囲内にあれば、他の燃焼条件によらず感度は一定である。0.5 l/min 以下では感度は急激に減少する。また空気流量が少ないほうが指示値のリップルが小さく安定であるので、通常 1.3 l/min くらいの流量としている。

(6) 燃焼温度と感度

燃焼温度は水素炎の温度に影響し、その結果感度にも影響をおよぼす。他社のガスクロマトグラフ用に用いられている FID のデータによると、燃焼温度周囲の温度が 20°C から 120°C まで変わると感度は 52% 増大するが、120°C 以上になると感度変動はゆるやかになり、200°C までの間に 2% 増大するだけである。われわれは燃焼を外部からヒータで加熱し、水素炎とヒータの熱によってその内の温度を 200°C 近くに安定させ、その内の温度変化による感度の変動を除くようにしている。

以上の (1) から (6) の項目を要約すると安定な感度を得るためには水素、窒素流量は“最適流量”を導入し、空気は 1.3 l/min の流量とし、試料ガスは一定流量に制御し、燃焼温度は 200°C 近くの一定温度とすることが必要である。このようにして決定した条件下では $\pm 1\%$ 以内の感度の安定性が得られた。

3.2 HC の成分感度

前述のように FID は HC に対しては 1 分子中に含まれている炭素原子数に比例した感度を有するといわれているが、燃焼温度の状態によっては成分感度がかなり変動することを報告している文献⁽⁵⁾もある。そこで試作した FID の正確な特性をうるためにいくつかの代表的な HC に対する成分感度を測定した。結果を表 3.2 に示

表 3.2 炭素原子あたりの感度比
Sensitivity ratio per carbon atom.

炭化水素	相 対 感 度				使用ガス濃度 ppm, N ₂ バランス	相対感度 FID アメリカ B 社製
	FID ⁽¹⁾	FID ⁽²⁾	FID 計算値	NDIR ⁽³⁾		
メタン	102	103	124	22.7	7,670	104~119
エタン	100	102	110	90.2	4,080	102~106
プロパン	(測定せず)	101	105	104	3,090	103~104
正ヘキサン	(測定せず)	100	100	100	1,650	100
エチレン	99.2	96.6	95.4	6.4	3,930	100~105
プロピレン	99.0	96.2	95.4	30.6	2,630	100~105
イソブチレン	101	97.4	95.3	4.97	1,876	(測定せず)
1,3-ブタジエン	107	106	92.1	5.13	1,910	(測定せず)
アセチレン	98.4	87.4	82.2	0.3	3,990	52~156

注) 1. H₂: 37 N₂: 65 空気: 1.3 l/min
2. H₂: 45 N₂: 0 空気: 2 l/min
3. 低濃度用の分析計の指示値

した。表中の理論値は HC のグラムあたりの感度の M/12n (M は分子量, n は 1 分子中の炭素数⁽⁴⁾) として計算した結果である。

また参考のためにアメリカ A 社製の FID および国内 B 社製の NDIR の成分感度も付記した。当社の FID の成分感度は通常の動作状態で 7 種類の HC に対して、エタンの単位炭素原子あたりの相対感度を 100 としたとき、98.4 (アセチレン) から 107 (1,3-ブタジエン) の間にあり、良好な結果を示している。

3.3 共存ガスの影響

排気ガスに含まれている成分のうち HC の検出感度の影響をおよぼすおそれのあるものとして、酸素と酸化窒素が考えられる。それらの含有量は一例として表 1.2 に示したように酸素は減速時に約 8%, それ以外の状態で 1.5% から 1.8%, 酸化窒素は数 ppm から 4,000 ppm の範囲である。

酸素の共存効果について系統的に詳細な研究をおこなった報告はなく、わずかに n-ヘキサン⁽²⁾や n-ヘプタン、トルエンなどに対する効果⁽⁶⁾が簡単に報告されているのみである。それらによると、n-ヘキサンに対しては、数種の濃度のものに対する平均値として、酸素共存量約 7.5% のとき 5% から 23% の感度減少 (燃焼温度に供給される水素、窒素、空気流量の比によって異なる) が起こる。n-ヘプタン、トルエンに対しては酸素共存量 35% のとき感度が最も大きくなり、酸素が共存しないときと比較して最高 180% の増加を示すと報告されている。

酸素の共存効果としては酸素と HC が水素炎の予備加熱帯で副反応を起こし、HC の検出感度を減少せしめる効果 (不飽和 HC など効果が大きい) が推測されるが、上述のように酸素共存量によっては感度を増大させる場合もあり、簡単な問題ではないようである。

当社の FID では通常の使用条件下で、メタン、エタン、n-ヘキサンなどの飽和 HC に対して酸素共存量 1.8% のとき 0.4~2.1%, 酸素 8% のとき 1.6~10% の感度減少を示した。これらの値は、上述の n-ヘキサンの文献値と比較すると小さい。エチレン、プロピレン、アセチレンなどの不飽和 HC に対する効果は、飽和 HC の場合よりもかなり大きく、酸素 1.8% のとき 6~10%, 8% のとき 19~25% の感度減少を示した。

すなわち共存酸素量を考えるとアイドル、加速、定速状態における酸素効果はあまり問題ではないが、減速時には不飽和 HC に対する効果はかなり大きい。しかしわれわれの実験によると燃焼温度へ導

入する水素や窒素流量を多くすること、試料導入量を性能にきしつかえない範囲内で減少してやることにより、酸素の影響を半減することができるので、今後減速時の不飽和 HC に対しても 10%以下の感度減少の範囲内におさえることは不可能ではないと考えている。

酸化窒素は水素炎のなかでラジカルトラップとして作用して HC の感度を減少せしめる効果が懸念されたが、実験をおこなった HC と NO の濃度範囲内 (HC 濃度 n-ヘキサン換算で約 30 ppm~1,400 ppm, 酸化窒素濃度 6 ppm~3,200 ppm, 濃度比 (HC)/NO=0.1~240) ではほとんど感度変動はみとめられなかった。

3.4 テーリング特性

HC は CO や CO₂ と比較して吸着能が大きい。したがって試料ガスの配管系の材質は HC の吸着の少ないステンレスやテフロンとして、しかも長さはできるだけ短かくし、吸着によるテーリングを少なくするようにしている。それでも排気ガスを連続的に吸引することによって配管系がよごれてくると、だんだんとテーリングがひどくなる。とくにフィルタ類や冷却管の寄与が大きい。したがって NDIR による測定の場合と同様に、使用中にはフィルタ類はひんばんに新しいものと交換し、また窒素ガスや清浄な空気を吸引することにより配管系をきれいにしておくことが必要である。

当社の FID のテーリング特性としてはフィルタ類が新しく、試料の流路に数分間空気を流したあとでは、アイドルガスを放出中の自動車のテルパイプより試料採取管を引き抜いてから 10 秒後の応答値が初期値の 5~7%, 20 秒後の値が、2.7~3.6% であった。JIS モードの走行パターンによる排気ガスの測定をおこなったあとでは、10 秒後の応答が 12~15%, 20 秒に 7.8~8.5% であった。これらの値は同様な条件下でおこなった NDIR のテーリングによる応答値よりもかなり小さいものであった。

3.5 その他の性能

装置の安定化時間	1.5 時間以上
感度	燃焼そうの動作条件によって異なるが、標準的使用状態で n-ヘキサン 1 ppm あたり 4×10^{-13} アンペア
感度の安定性	±1% 以内/4.5 時間 (プロパン 856 ppm の標準ガスを連続的に流した状態)
最小検出感度	S/N=10 とすると標準的使用状態で n-ヘキサン換算 2.5 ppm
零点移動	フルスケール 1,620 ppm (n-ヘキサン換算) のとき 4.5 時間の測定の間でほとんどなし
不感時間	約 1.5 秒

4. FID による自動車排気ガスの連続測定および NDIR の測定値との比較

排気ガス中の HC は多成分からなり、成分の種類と濃度はガソリンの種類や運転状態などによって変わる。全 HC 濃度は運転状態によって数 100 ppm から 10,000 ppm 以上 (n-C₆H₁₄ 換算) にわたって変動する。とくに加速や減速などの過渡的状態における放出濃度の変動が大きい。したがってエンジン状態と HC 濃度を関連づけて、効果的な浄化をはかるためにはどうしても応答の速い連続測定器が必要である。この目的のために従来用いられてきた NDIR は、前述のように飽和 HC と比較してオレフィン類 (光学的スモッグ生成のおもな原因) などの不飽和成分に対して応答がきわめて低い。

このことはアメリカにおける HC 規制のそもそもの目的、すなわちそれによって光学的スモッグの生成を少なくしようとする意図にそぐわないものがある。たとえば NDIR によって測定された HC 濃度が減少していても、実際には飽和 HC は減少しているが、かんじんの不飽和 HC は増加していることも十分起こりうる。

一方 FID は全 HC に対して炭素原子あたりの応答はほとんど一定であるので、全 HC 量の増減が記録される。したがって公害対策上信頼できる測定値をうるためには、現在のところ全 HC 濃度の測定用には FID を、飽和、不飽和の大略の値を知るためには、FID と NDIR を併用することが最も望ましい方法である。このような観点からしてアメリカ政府部内に HC 測定器として NDIR の代わりに FID を採用しようとする動きがあるのは当然のことといえよう。

図 4.1 に引用したグラフのは点火時期と HC 放出量の関係を FID と NDIR によって同時測定したものであるが、上述の NDIR について懸念されたことと類似の現象が実際に生じていることを示している。すなわち、点火時期を -10° BTDC から 20° BTDC まで進めたとき FID の指示値 (= 全 HC) は減少気味であるのに、NDIR の指示値 (≒ 飽和 HC) ははっきりと増加している。その結果、HC 濃度測定値が最小となる点火時期は測定器によって異なったものとなる。

公害対策上は、HC 規制のおもな理由であるところの光化学的スモッグ生成と直接関係ある HC 成分を最小にすることが望ましい。このような条件は、FID と NDIR 両指示値の差が最小となる条件であると近似してよい。図 4.1 ではこのような条件は、図中に最適点火時期として示されている。図 4.1 の例からもわかるように、公害対策上の各最適条件を見出すためには NDIR だけではもちろんのこと FID だけでもだめである。両者を併用することが望ましい。(どちらか一方を取るとすれば FID のほうをとるべきであろう)。

同様な結果はわれわれの実験からも得られている。この章では、JIS モード走行時の全 HC 排出濃度および一定の走行状態でプラグの間隔、種類や点火時期等をかえたときの HC 濃度を試作した FID と、市販の NDIR によって同時測定した結果を報告する。

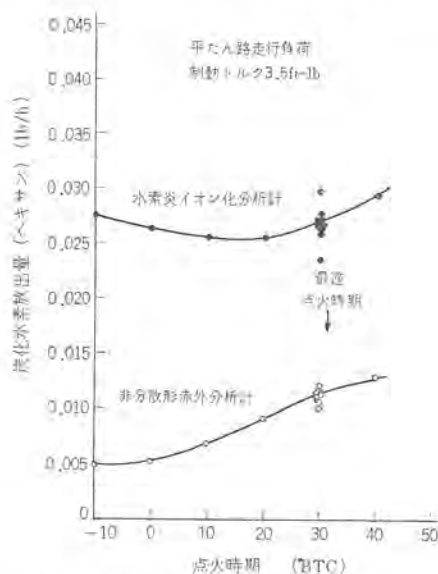


図 4.1 炭化水素放出量におよぼす点火時期の影響
Effect of ignition timing on exhaust hydrocarbons concentrations.

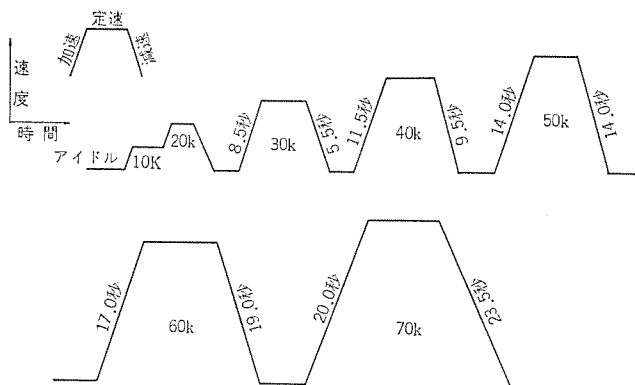


図 4.2 JIS モードの走行パターン
Operating pattern of automobile based on JIS test cycle.

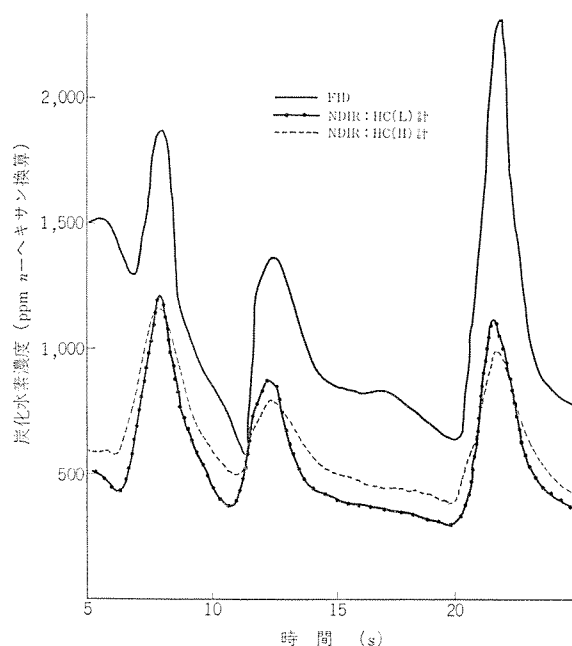


図 4.3 加速時 (0→70 km/h) の指示曲線
Emission characteristics of auto-exhaust hydrocarbons during acceleration (0→70 km/h).

表 4.1 炭化水素排出濃度の測定結果
Measurement results of concentration of exhausted hydrocarbon.

走行状態	速度 km/h	時間 平均 濃度 ppm, n-ヘキサン換算		
		F	N	F/N
	アイドル	708	360	1.97
定 速	10	424	230	1.84
	20	446	280	1.59
	30	463	300	1.54
	40	457	300	1.53
	50	397	270	1.47
	60	337	220	1.53
	70	332	230	1.44
加 速	0→30	849	530	1.60
	0→40	813	520	1.57
	0→50	524	420	1.25
	0→60	688	408	1.72
	0→70	670	450	1.49
減 速	30→20	1,420	980	1.45
	40→20	2,930	1,980	1.48
	50→20	4,155	3,020	1.38
	60→20	5,040	3,480	1.45
	70→20	5,560	4,250	1.32
平均 排出 濃度		621	375	1.66

注) F=FID, N=NDIR

4.1 JIS モード走行時の排気ガスの測定

4.1.1 実験装置

FID—当社製

NDIR—国内 B 社製、低濃度用 (HC(L) 計) と高濃度用 (HC(H) 計) を装備している。

自動車—小形国産乗用車、1,300 cc スタンダード仕様

チャシダイナモメーター—国内 C 社製、渦電流式 2 ロール形

ガソリン—市販レギュラー および ハイオクタンガソリン 各種

4.1.2 JIS モードの走行パターンおよび排気濃度の求め方

走行パターンを図 4.2 に示した。

図中に記入された時間のうち、加速時間はアイドルから規定速度までの時間を、減速時間は規定速度から 20 km/h までの減速時間をあらわす。各状態の条件は、

アイドル—指示値が安定した状態で 20 秒間測定する。

加速—規定時間±2 秒以内で加速する。

定速—規定速度±2 km/h 以内の一定速度で安定させた状態で 30 秒間測定する。

減速—規定時間±2 秒以内で 20 km/h まで減速する。

平均値の出し方は下記のとおりである。

アイドル および定速—その状態の終了前、12 秒から 4 秒までの排出濃度の時間平均値。

加速—平均 0 km/h から規定速度までの排出濃度の時間平均値。

減速—規定速度から 20 km/h までの排出濃度の時間平均値。

平均排出濃度は下記式 (4.1) によって求める。

$$\text{平均排出濃度} = 0.11 \times (\text{アイドル 時の平均濃度}) + \boxed{0.35 \times 40 \text{ km/h 加速}} + \boxed{0.52 \times 40 \text{ km/h 定速}} + \boxed{0.02 \times 40 \text{ km/h 減速}} \dots\dots\dots (4.1)$$

なお濃度曲線の面積測定は プラニメーター を使って測定した。

4.1.3 測定結果

(1) 平均濃度

NDIR と FID の各 HC 成分に対する感度差からも予想されることであるが、測定された平均濃度は常に FID のほうが大きい。すなわち、アイドル および定速時には 1.4~2.3 倍、加速時には 1.2~2.1 倍、減速時には 1.2~1.5 倍 FID のほうが大きい。式 (4.1) により計算した平均排出濃度では、1.6~1.9 倍 FID のほうが大きい。各走行状態での平均濃度と平均排出濃度の一例を表 4.1 に示した。

(2) HC 排出濃度曲線の検討

アイドル、定速時には HC の排出濃度は大体一定しているが、加速と減速時には HC の濃度変化がはげしい。そこで加速、減速時の FID および NDIR の指示曲線を比較してみた。

加速状態：加速時の両指示値は定性的には類似している。しかし、加速から定速状態にうつるときに現われるピークの指示濃度は FID でとくに大きくなっている 場合が多い。この状態のとき HC 成分の変動が急激に生じているものとおもわれる。指示曲線の一例を図 4.3 に示した。

減速状態：再指示値の大まかな傾向は類似している から定量的には、減速が進むにつれて NDIR と FID の指示値の比の値は異なってくる。すなわち減速状態では、HC の濃度ばかりでなく成分変動も起こっていることが推測される。減速状態の指示曲線を図 4.4 に示した。

分解能：図 4.4 (2) にも表われているように、60 km/h や 70 km/h などの比較的高速の走行状態から減速するときの FID の指示曲線には、ピークの近辺に 1 秒前後の短周期の増減が記録される。そ

れに対応してNDIRのほうにも増減があらわれる場合が多い。しかしFIDと比較して分解能が悪い。また、アイドルや定速走行状態のときFIDの指示曲線には小さな脈動があるが、NDIRのほうにはほとんどそれが現れない。

これらのことから、分解能はFIDのほうがかなりすぐれているものとおもわれる。しかし分解能以外にも、成分感度の相違による現象すなわちNDIRに対して感度の低いオレフィン類、アセチレン、芳香族HCなどの短周期の増減があっても同様な現象がえられるだろうから、上記のFIDとNDIRの指示曲線の差が分解能のみに原因していると断定することはできない。

4.1.4 排気ガス中のHCの成分分析

NDIRとFIDの指示値の相違を検討するため、アイドル、0→70 km/h加速、70 km定速、70 km/h→20 km/h減速状態の各排気ガスを採取し、ガスクロマトグラフィーによって成分分析をおこなった。分析結果を表4.2に示した。表中*印の成分は標準試料により、その他は参考文献(8)により同定した。大まかな近似値として、

感度比(FID/NDIR)

$$= \frac{(\text{飽和 HC}) + (\text{不飽和 HC})}{(\text{飽和 HC})} \dots\dots\dots (4.2)$$

とする。この式に表4.2の結果をあてはめると、この値は、

アイドル≈2.58>定速(70 km/h)≈2.07>加速(0→70 km/h)≈1.76>減速(70 km/h→0)≈1.64となる。この絶対値は、前述4.1.3項の

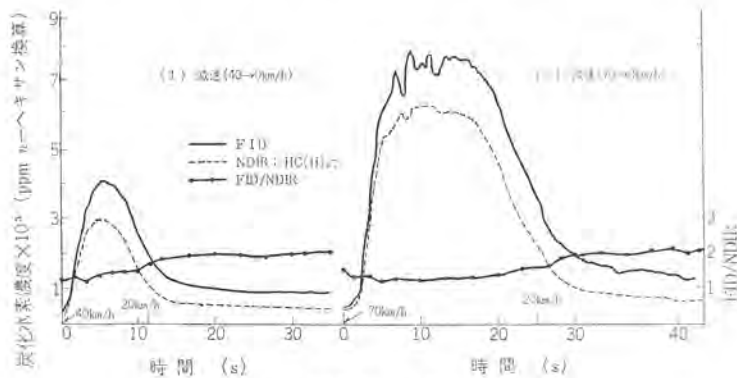


図4.4 減速時の指示曲線
Emission characteristics of auto-exhaust hydrocarbons during deceleration.

(1)の実測された平均濃度の比とあまりよく一致していないが、各走行状態のこの値の大小関係は一致している。

4.2 特定エンジン状態における排気ガスの測定

排気ガスに関係あるとおもわれるエンジンの4因子すなわちエンジン回転数、点火時期、プラグ、点火エネルギーを変えてHC排出濃度を測定したが、FIDの測定値はNDIRのそれとはかなり異なる傾向を示している。以下にいくつかの例をあげる。

4.2.1 プラグの形状、間隔の効果

一定の条件下でプラグの形状、間隔を変えたときのHC濃度をFIDとNDIRで並列に同時測定した結果を図4.5に示した。

図によると、両者の指示濃度は絶対値の相違もさることながら最適条件の測定結果が異なってくる。すなわちHC排出濃度が最小となる条件はFIDのほうからはプラグ間隔1.0 mmのときと定められるが、NDIRのほうからはパワーチップ2.5φ、0.8φまたはプラグ間隔1.0 mmのときとなる。

4.2.2 点火時期の効果

点火時期をBTDC 40°からATDC 10°まで変えたときのHC排出濃度を図4.6に示した。上述の場合と同様エンジン回転数が、1,500 rpmのときには実験範囲内でのHC排出濃度が最小となる条件は、FIDからはTDC、NDIRからはBTDC 20°、2,000 rpmのときにはFIDからはBTDC 40°または20°、NDIRからはBTDC 40°と

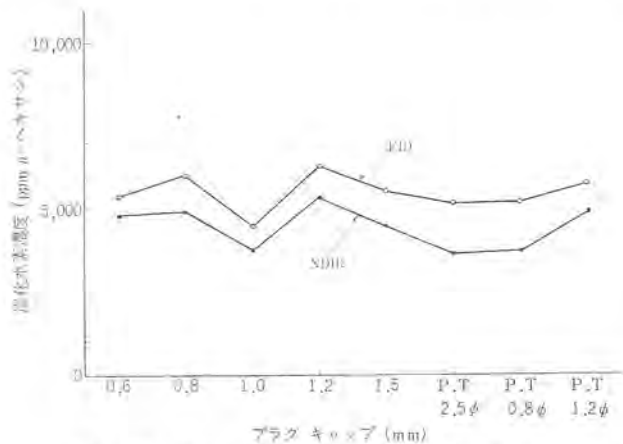


図4.5 プラグの形状とHC排出濃度
Effect of plug gap or shape on total hydrocarbon concentrations in auto-exhaust gases.

表4.2 各走行状態における排気ガス中の炭化水素成分分析例 (ppm, n-ヘキサン換算)
Example an analysis of hydrocarbon components in exhausted gases during the running of vehicle.

HC成分	走行条件	アイドル	加速	定速	減速(N ₂ の混入列)	カラム
○ CH ₄ (*)		106	561	44.1	68.3	活性アルミナ
○ C ₂ H ₆		32.8	12.3	26.6	35.0	
○ C ₂ H ₄		240	128.0	27.4	426.0	
○ C ₂ H ₂ (*)		—	—	—	116.0	
○ C ₂ C ₂ ・C ₃ H ₆ (*)		40.8	50.5	77.5	58.0	
以上小計		786.8	246.9	177.6	603.3	D
○ CH ₃ C ₃ H ₇ (*)・C ₂ C ₂ ・C ₂ H ₄ (*)・C ₃ H ₈ (*)		(573)	(194)	(125)	(490)	
○ i-C ₄ H ₁₀ ・n-C ₄ H ₁₀		573	24.5	9.8	122.6	
○ i-C ₃ H ₇ (?)		703	35.5	6.7	199.6	
○ n-C ₃ H ₇		42.0	41.8	5.6	168.5	
○ i-C ₆ H ₁₄ ・3×4nペンタン		65.5	35.5	3.3	135.6	N
n-C ₆ H ₁₄ (*)		35.2	31.3	—	70.2	
未知 1		21.0	8.6	—	28.0	
未知 2		54.7	37.8	—	12.4	
未知 3		42.1	37.8	—	56.2	
未知 4		54.7	29.3	10.1	62.5	P
合計		1,014.3	509.9	160.4	2,058.1	

○印…飽和炭化水素

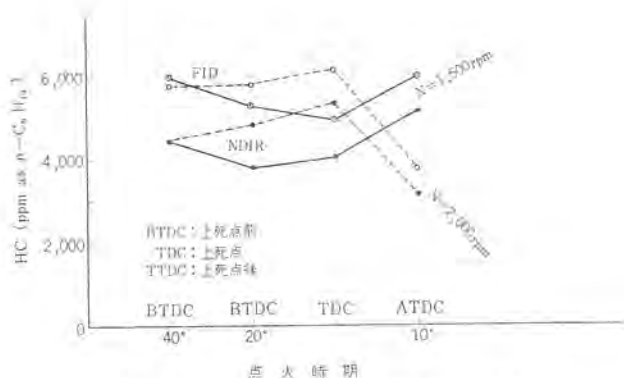


図 4.6 点火時期と HC 排出濃度
Effect of ignition timing on total hydrocarbon
concentrations in auto-exhaust gases.

のように異なった結果を与える。

5. む す び

自動車排気ガス中の全炭化水素濃度の測定用の水素炎イオン化検出方式による連続分析装置を試作し、その性能を報告した。次に本装置と現在一般に用いられている非分散型赤外線分析計とにより、シャーシダイナモメータ上で JIS モードの走行時の自動車の排気ガスの同時測定をおこなったところ、FID から得られる情報は平均排出濃度、加速終了直後の指示曲線の形状、減速時の分解能などの点で NDIR とかなり異なるものがえられた。両者からえられる平均濃度の相違は、各走行状態での排出ガスを成分分析することによって大よその説明がなされた。

ブラグ間隔、点火時期と全炭化水素排出濃度の関係を調べた実験では、両者の測定値からえられる最小排出濃度を与える条件は異なってくる。両測定器を併用することにより、公害対策と重要な炭化水素成分（オレフィン類、芳香族等）の放出量を減少させるためのエンジン

状態、エンジン部品の条件を見出すことができる。

現行の排気ガス規制法規で定められている排気ガス測定装置は、非分散型赤外線分析計（NDIR）であるが、炭化水素の測定に関するかぎり、NDIR は規制理由に直接関連した成分を有効に測定していない。規制理由に忠実な浄化対策をとることが望ましいことはいうまでもない。当社ではかかる観点から、炭化水素測定装置としては、NDIR ばかりでなく FID も有効に利用するなど、排気ガス浄化関連の電装品の改良開発研究に真剣に取り組んでいる。

最近の情報によるとアメリカ政府部内では、自動車排気ガス中の炭化水素測定には、現行の NDIR から FID に変更しようとする有力な動きがあり FID と NDIR 測定値の相関、両測定値と光化学的スモッグの相関について詳細な検討が急がれている。このような情勢に対処した研究をするためにも、今回試作した FID は今後ますます利用されるだろう。（昭和 43-8-2 受付）

参 考 文 献

- (1) John D. Caplan : Proc. Instn. Mech. Engrs. (A. D.) 242 (1962~63)
- (2) M. W. Jackson : J. Air Poll. Cont. Assoc. 11, 697 (1966)
- (3) W. J. Hawning and P. E. Dichinson : J. Air Poll. Cont. Assoc. 16, 317 (1966)
- (4) J. Krugers : Philips Res. Repts. Suppl. No. 1, 1 (1965)
- (5) P. H. Desty, C. J. Geach. and A. Goldup : "Gas Chromatography 1960", R. P. W. Scott, Ed., p. 46 Butter worths, Washington (1960)
- (6) ibid. p. 61.
- (7) 八巻：石油学会誌 8, 689 (昭 40)
- (8) 柳原，篠山，篠原：機械試験所所報 18, 28 (昭 39)

フォトクロミックプラスチックシート

太田 基義*・矢田 俊雄*・豊田 裕康*・山口久美子*

Photochromic Plastic Sheet

Central Research Laboratory Motoyoshi OHTA・Toshio YADA

Hiroyasu TOYODA・Kumiko YAMAGUCHI

Photochromism is being intensively studied nowadays with its application in various fields. Materials that have the photochromism cover a good number of inorganic and organic compound. However, it looks that chemical compounds having features of quick response and permitting selection of colors have been thoroughly studied and utilized in this connection.

Investigation has been made on a method to introduce organic photochromic compounds to plastic sheet, being easy to mold, by a dyeing process. As a result it has been made successful in producing photochromic plastic sheet of being put to practical use. This article is a summarized report of the experiment.

1. ま え が き

ある種の物質は光をあてるとその吸収波長域や吸収曲線が変化して着色または変色し、暗所に放置したり、より長波長側の光を照射するとふたたび元の吸収波長域または吸収曲線に戻る性質をもっている。この性質を一般にフォトロピイという。とくに近紫外一可視領域での現象を問題にする場合 フォトクロミズム という。

近来、この フォトクロミズム の応用研究が盛んになり、サングラス、窓ガラス、ヘルメットのひさし、写真複写装置、がん具などに利用されはじめてきた⁽¹⁾⁽²⁾。フォトクロミズム を示す物質は無機化合物、有機化合物中に数多くみうけられ⁽³⁾、フォトクロミズム を示す条件、反応機構、応答速度などについて報告されているが、反応機構はまだ明らかにされていない。特に、有機化合物の場合は種類も多く、反応機構も多種多様であろうと推定される。一応、つぎの機構で着色、変色するものと考えられている⁽⁴⁾。

- (1) 異性体生成
- (2) 互変異性体生成
- (3) イオン 解離
- (4) ラジカル 解離
- (5) 酸化・還元
- (6) 励 起

有機化合物は無機化合物に比べ、光に対する応答速度が速い、色調が選べる、などの長所をもっているが、疲労度が大きいという欠点も持っている。しかし、実用化の段階では、応答速度が速い点を考慮して、有機 フォトクロミック 物質を使用し、さらに成形加工に有利なプラスチックシートを基材とすることが考えられ、導入方法などが研究されている。

有機 フォトクロミック 物質をプラスチックシートへ導入する方法としては、大略、つぎの3方法がある。

- (1) シートの製造工程中にペレットとして混ぜ込むペレット法。
- (2) 有機 フォトクロミック 物質の溶液にシートを浸せきし、染色する染色法。
- (3) 有機 フォトクロミック 物質とプラスチックを同一溶媒に溶解し、塗布するコーティング法。

現在市販されている フォトクロミックプラスチックシートはペレット法、コーテ

ィング法で製造されているものが多いようである。

筆者らは、比較的容易に着手でき、作業操作も簡単でしかも導入した フォトクロミック 物質を有効に利用できるという点から染色法を選んだ。染色性、染色条件、染色後の フォトクロミック 特性、復元速度などを検討し、さらに特性の良好なものは耐光性の改良も試みた結果、かなり有効な知見が得られたので報告する。

2. 実 験 操 作

2.1 フォトクロミック物質とプラスチック基材

フォトクロミック特性を示す有機物質は非常に多種類のものが知られている⁽³⁾。それらのうち7種類を選び試料とした。再結晶法その他の精製技術をもちいて精製し、赤外線吸収スペクトル、融点を測定、

表 2.1 使用した フォトクロミック 物質
Utilizing photochromic materials.

	試料名	固体におけるフォトクロミズム*	液体または溶液中でのフォトクロミズム*	使用溶媒
ア ズ 染 料	A	確認できず	可	アルコール ベンゼン
	B	確認できず	可	アルコール ベンゼン
ア ニ ル 類	C	可	確認できず	アルコール ベンゼン
イミダゾール類	D	可	可	ベンゼン
金属キレート化合物	E	可	可	ベンゼン
	F	否**	可	T H F
	G	否**	可	ベンゼン

注 * 室温観察

** “否”は文献上でも明らかにフォトクロミズムを示さないと判明しているもの

表 2.2 タックシートの性状
Property of TAC sheet.

項	目	
融	点	290°C
耐 熱 温 度	長 時 間	150°C
	短 時 間	210°C
屈 折	率	n_D^{25} 1.487
透 過 率	可 視 部	92 %
	紫 外 部	300 mμ まで吸収せず
日 光 の 影 響	可 視 部	優 秀
	紫 外 部	優 秀
厚	さ	0.35 mm

表 2.3 タックシートの耐溶剤性
Antisolubility of TAC sheet.

	溶 剤 名	耐 溶 剤 性
ケ ト ン	ア セ ト ン	○
	メ チ ル エ チ ル ケ ト ン	□
ア ル コ ー ル	メ タ ノ ー ル	×
	エ タ ノ ー ル	×
	イ ソ プ ロ パ ノ ー ル	×
	n-ブ タ ノ ー ル	×
	グ リ セ リ ン	×
エ ス テ ル	ギ 酸 メ チ ル	◎
	酢 酸 メ チ ル	◎
	酢 酸 エ チ ル	○
	D M P	□
	D E P	×
エ ー テ ル	エ ー テ ル ン	×
	ジ オ キ サ ン	○
	テ ト ラ ヒ ド ロ フ ラ ン	○
炭 化 水 素	n-ヘ キ サ ン	×
	ベンゼン	×
	トルエン	×
	キシレン	×
	シクロヘキサン	×
そ の 他	四 塩 化 炭 素	×
	メ チ レ ン ク ロ ラ イ ド	◎
	ク ロ ロ ホ ル ム	○
	トリクレン	△
	酢 酸	○

注 ◎ 完全溶解, ○ 著しく膨潤, □ 膨潤 (50% 以上)

△ 膨潤 (50% 以下), × 膨潤せず

試験法: タックシート 0.1 mm 厚を 30°C で溶剤中に 1 週間浸せき

同定したのち使用した。表 2.1 に使用した フォトクロミック物質を示す。

プラスチック基材としては光学的特性のすぐれている三酢酸繊維素シート (以下シートと称す) を使用した。その性状および耐溶剤性を表 2.2, 2.3 に示す⁽⁴⁾。

表 2.3 および各フォトクロミック物質の溶解度より染色溶媒を決定した。

2.2 染色

比較的溶解度の大きい A~D は精製後直示天びんで一定濃度に調製した。また、溶解度の小さい E~G に対しては飽和溶液を調製し、染色液とした。染色液の組成についてはあとで詳細にのべる。

シートは溶媒洗浄をおこない、純水で洗浄後乾燥した。

染色は、染色液を適当なビーカーに移し取り、きれいに洗浄したシートをいろいろな条件で浸せきしておこなった。染色温度を室温以上に保つ場合には還流冷却器をつけ、ウォーターバスで液温を調節した。所定時間浸せきしたシートは純水でシート表面を洗浄後乾燥した。

2.3 染色度測定

染色終了後のシートは島津製作所製自記分光光度計 SV-50 およびマルチパス自記分光光度計 MPS-50 L をもちいて分光透過率を測定し、得られた吸収ピークの強さをシートに各フォトクロミック物質を含浸させたときの量と考え、染色度換算にもちいた。たとえば、染色によって図 2.1 のような吸収曲線が得られたとする。この場合、シートに含浸したフォトクロミック物質の量はつぎのような式で計算することができる。

$$x = \frac{c}{b} \times a \times \frac{10,000}{t}$$

ここで、 x : フォトクロミック物質のシートへの含浸量

a : 溶媒中でのフォトクロミック物質濃度

b : 濃度 a における 10 m/m 水晶セル中でのフォトクロミッ

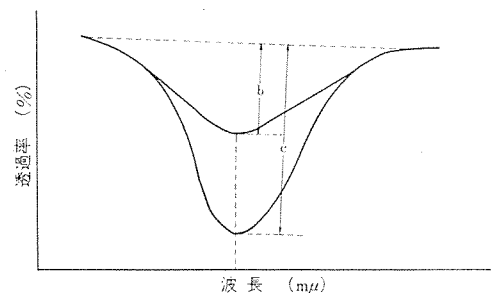


図 2.1 フォトクロミック物質の吸収スペクトル
Absorption spectra of photochromic materials.

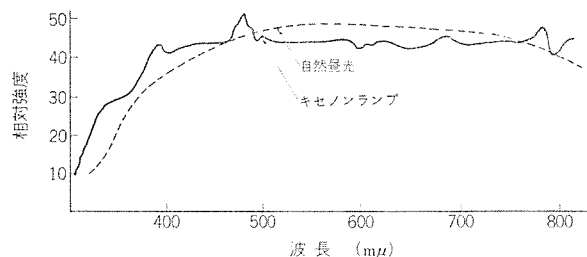


図 2.2 キセノンランプと自然日光の分光エネルギー分布
Spectra energy of xenon flash lamp and sun.

c 物質の吸光度または透過度

c : 染色後におけるシートでの吸光度または透過度

t : シートの膜厚 (mm)

をあらわす。

なお、染色濃度が大きすぎて吸収ピークが消滅している場合にはなるべくピーク値に近い波長における吸光度または透過度から計算した。したがって、この場合、相対的な染色度しかわからないかもしれないが、それでも十分筆者らの目的がかなえられると考えた。

2.4 フォトクロミック特性と復元速度測定

染色したシートのフォトクロミック特性は光照射前後における透過率変化であらわした。照射光源にはキセノンガス入りストロボライト (以下ストロボと略す) をもちいた。図 2.2 に示すようにキセノンランプの分光エネルギー分布特性は太陽光 (自然日光) の分光エネルギー分布特性と類似しているため、よく実験室内での擬似太陽光として使用されている。

復元速度 (光照射によって着色または変色したシートが元の色に戻る速度) は光照射によって新しく現われた吸収ピークの暗所放置における経時変化で表示した。

2.5 耐光性

比較的染色性もよく、フォトクロミック特性のよいものに対しては耐光性テストをおこない、併わせて耐光性の改良を試みた。

一般に、フォトクロミック物質、染料に限らず物質が劣化、退色するのは紫外線や熱エネルギーによる分解が主原因となっていることが多い。したがって、紫外線吸収剤を添加してフォトクロミック物質への紫外線の影響を少なくすれば耐光性は良くなることが推定される。

この実験では、フォトクロミック物質を染色したシートに紫外線吸収剤を併用し、ウェザオメータ照射後の影響を検討した。

試料はいずれも室内光で変色しやすいので、乾燥後、乾燥器からとりだすとすぐアルミはく (箔) でしゃ光し、室温まで下げたのち分光透過率を測定した。つぎに試料をウェザオメータ内のドラムにセットし、所定時間暴露する。暴露後の試料は変色した状態になっているのでしばらく放置し、元の色に戻ってから分光透過率を測定した。最初

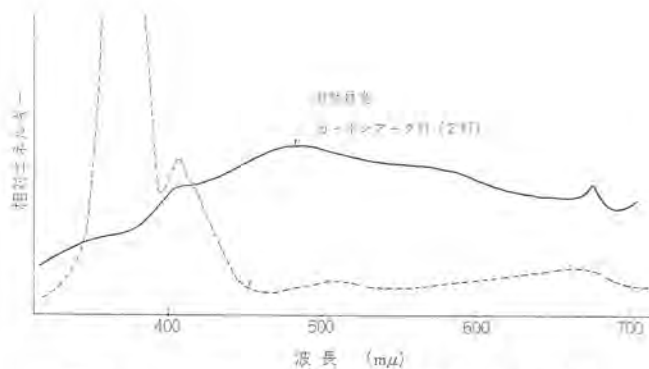


図 2.3 自然日光とカーボンアーク灯の分光エネルギー分布
Spectra energy of carbon arc and sun.

の分光透過曲線、すなわち、ウェザオメータによる暴露0時間における分光透過曲線と比較し、透過率の変化量を耐光性（耐光時間）の目安とした。

使用したウェザオメータは東洋精機製の標準品で、カーボンアーク灯が2灯ついているものである。なお、試料面における温度は65°Cである。

図 2.3 に太陽光（自然日光）とウェザオメータ（カーボンアーク灯2灯）との分光エネルギー分布特性を示す。カーボンアーク灯の場合、太陽光に比べ380~400 mμにおけるエネルギーが極端に大きく、それに反し、可視部が小さいことがわかる。したがって、太陽光による劣化とはいくぶん異なってくるかも知れないが、前述したように、フォトクロミック物質、染料などの劣化・退色は紫外線による分解が主原因と考えられるから、その点非常に良い。

3. 実験結果

3.1 アゾ染料

いくつかのアゾ染料はシストランス変化によってフォトクロミック特性を示す⁽⁶⁾⁽⁷⁾。筆者らはよく知られているアゾ染料2種を精製したのち試料とした。

3.1.1 染料 A

染料Aはメタノール、エタノール、ベンゼンなどによく溶ける。メタノール、エタノール、ベンゼンおよびメタノール-ベンゼン系混合液を溶媒とした染色液を調製した。図 3.1 に各溶媒における染色性の一例を示す。また、メタノール-ベンゼン系混合溶液における混合比に対する染色性を図 3.2 に示す。極性溶媒であるメタノールを添加すると染色性が急激に増大している。なお、図 3.2 より判断すると、メタノール-ベンゼン系においてメタノール含有率は染色性にそれほど大きな影響を与えないことになるが、後述するように、染色時間が2時間とかなり長いため。

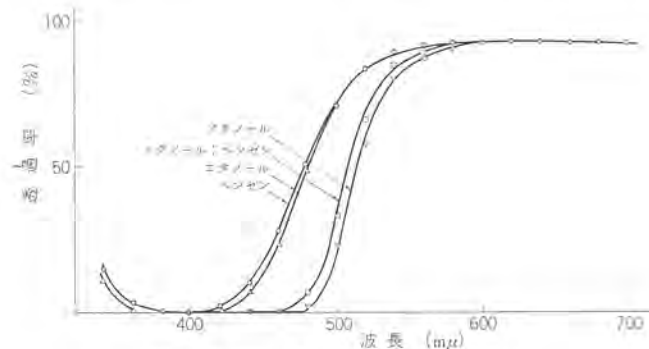


図 3.1 試料Aの各溶媒による染色性
Dyeing effect of specimen A in each solvent.

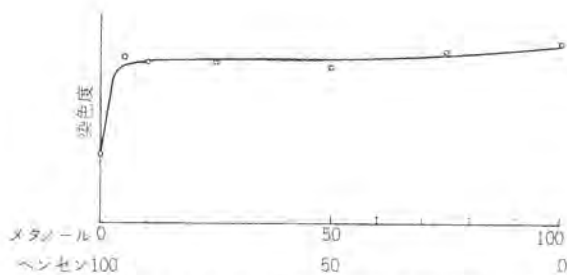


図 3.2 メタノール-ベンゼン系溶媒における混合比と染色度
Dyeing effect for methanol-benzene solvent ratio.

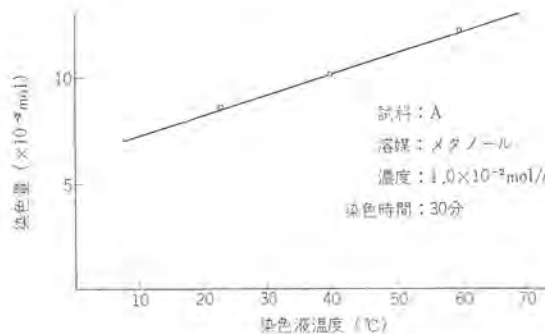


図 3.3 染色液温度と染色量
Dyeing effect for bath temperature.

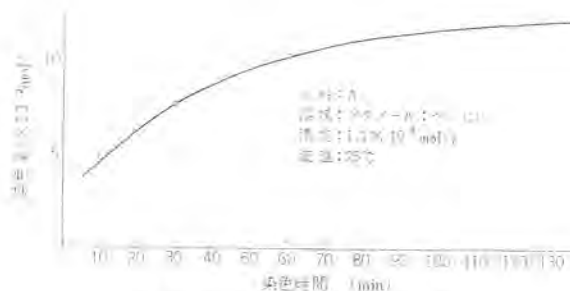


図 3.4 染色時間と染色量
Dyeing effect for immersion time.

表 3.1 各染色条件におけるシートへの染色量（試料 A）
Dyeing condition and its effects (specimen A).

溶 液	染色条件		溶 濃 度 mol/l	タックシートへの 含浸量* mol	タック含浸量 溶濃度
	温度 °C	時間 h			
精製分析用エタノール	26	4	1.1×10^{-2}	5.6×10^{-2}	5.1
特級エタノール	26	2	1.1×10^{-2}	3.4×10^{-2}	3.1
特級メタノール	26	2	1.1×10^{-2}	12.4×10^{-2}	11.3
特級メタノール	23	0.5	1.0×10^{-2}	8.5×10^{-2}	8.5
特級メタノール	40	0.5	1.0×10^{-2}	10.2×10^{-2}	10.2
特級メタノール	60	0.5	1.0×10^{-2}	12.1×10^{-2}	12.1
メタノール:ベンゼン	23	1/6	1.1×10^{-2}	4.7×10^{-2}	4.3
メタノール:ベンゼン	25	0.5	1.1×10^{-2}	7.4×10^{-2}	6.7
メタノール:ベンゼン	25	1	1.1×10^{-2}	9.2×10^{-2}	8.4
メタノール:ベンゼン	26	2	1.1×10^{-2}	11.9×10^{-2}	10.8
メタノール:ベンゼン	23	20	1.1×10^{-2}	12.5×10^{-2}	11.4
ベンゼン	27	2	1.0×10^{-2}	3.5×10^{-2}	3.5

注 * 1.8×10^{-4} mol/l の染色液濃度における 500 mμ の吸光度を基準とした。

ほぼ染色量が飽和に達していたため差がでなかったのではないかと考えられる。一般的には、メタノールの含有率が増加するほど染色性は大きくなるようである。図 3. 3, 3. 4 に液温と染色量および染色時間と染色量の関係を示す。

染色液温度と染色量は直線関係を示し、染色時間 2 時間でほぼ一定の染色量となることがわかる。

染色液濃度、溶媒、液温および染色時間と染色量の関係をまとめると表 3. 1 のようになる。

表中、シートへの含浸量の換算において、染料 A の吸収ピークは図 3. 5 に示すように 390 mμ にあるけれどもほとんどの染色条件では透過率がゼロになってしまい、計算に使用できないのですべての染色条件に適用でき、グラフ上からも適当と思われる 500 mμ における透過率を基準にした。

メタノールおよびエタノールを溶媒にもちいて染色したときのストロボ

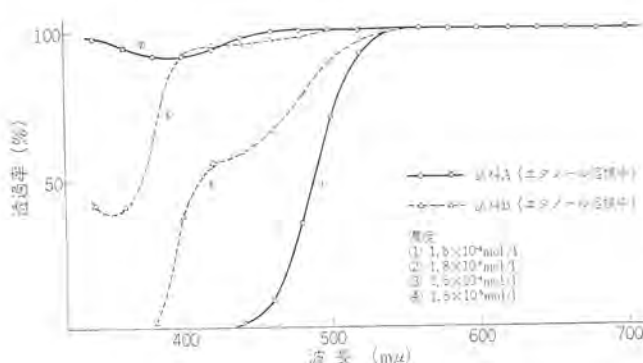


図 3. 5 試料 A および B の吸収スペクトル
Absorption spectra of specimen A and B in ethanol solvent.

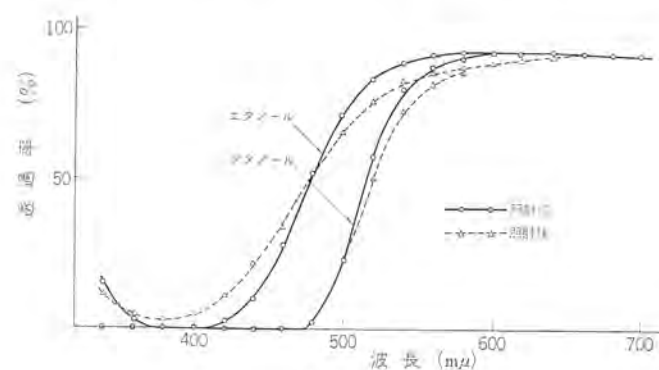


図 3. 6 試料 A のフォトクロミック特性
Photochromic spectra of specimen A in plastic sheet.

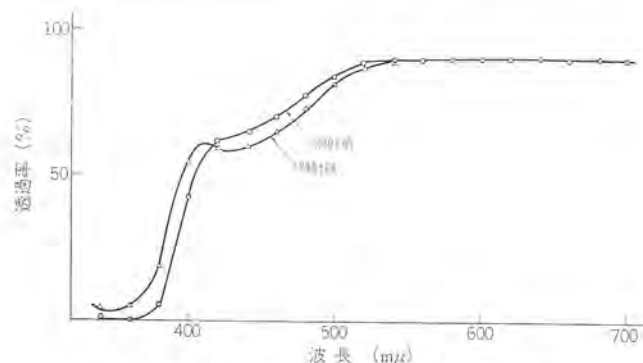


図 3. 7 試料 B のフォトクロミック特性
Photochromic spectra of specimen B in plastic sheet.

表 3. 2 各染色条件におけるシートへの染色量 (試料 B)
Dyeing condition and its effects (specimen B).

溶 溶 媒	染 色 条 件		溶 液 濃 度 mol/l	シートへの 含浸量 [*] mol	シート含浸量 溶 液 濃 度
	温度 °C	時間 h			
精密分析用エタノール	17	1.5	?	0.8×10^{-2}	?
精密分析用エタノール	16	17	?	2.8×10^{-2}	?
特級メタノール	22	0.5	1.0×10^{-2}	4.2×10^{-2}	4.2
特級メタノール	40	0.5	1.0×10^{-2}	5.3×10^{-2}	5.3
特級メタノール	60	0.5	1.0×10^{-2}	6.3×10^{-2}	6.3
特級メタノール	22	1.6	1.0×10^{-2}	2.9×10^{-2}	2.9
特級メタノール	22	0.5	1.0×10^{-2}	4.2×10^{-2}	4.2
特級メタノール	23	1	1.0×10^{-2}	5.2×10^{-2}	5.2
特級メタノール	23	2	1.0×10^{-2}	6.1×10^{-2}	6.1
特級メタノール	23	20	1.0×10^{-2}	7.0×10^{-2}	7.0

注 * 1.5×10^{-4} mol/l の染色液濃度における 420 mμ の吸光度を基準とした。

照射後における透過率変化を図 3. 6 に示す。変色性は小さいけれどもフォトクロミック特性を示している。

3. 1. 2 染料 B

シートへ染色したものは染料 A と同様フォトクロミック特性を示す。しかし、短波長域で透過率変化をおこすので眼でみた感じではなんら変色していないようにみえる。フォトクロミック特性の一例を図 3. 7 に示す。液温と染色量、染色時間と染色量の関係はほぼ染料 A の場合と同じである。ただし、染色性は染料 A に比べかなり小さいようである。

まとめると表 3. 2 のようになる。

ただし、表中シートへの含浸量の換算は、表 3. 1 のときと同様、染料 B が示す吸収ピーク 352 mμ はほとんどの染色条件で透過率ゼロとなるため 420 mμ における値を基準とした。

3. 2 アニル類

アニルはアルデヒドと 1 級アミンの縮合生成物で $R-CH=N-R'$ (R, R' は有機ラジカルを意味する) という構造式をもつ。大部分のアニルはサモクロミズム (熱の高低によって着色、変色がおこる現象) を示すが、フォトクロミズムを示すものは少ししかないようである。試料としてもちいた物質 C はそのフォトクロミック特性を示すものの一つで紫外光などにより淡黄色からオレンジ色に変色する。固溶体を含めた固体でよく変色するようである。

Cohen と Schmidt らの研究によれば数少ないフォトクロミック特性を示す物質の一つであるサリシリジニアニリンのフォトクロミズムはオルソ-OH 基の図 3. 8 に示すような水素転移による互変異性によるものである⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

この実験でもちいた試料 C も同じような機構でフォトクロミック特性を示すものと考えられる。

再結晶法で精製した試料 C はサリシリジニアニリンと同様淡黄色粉末

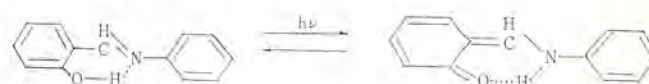
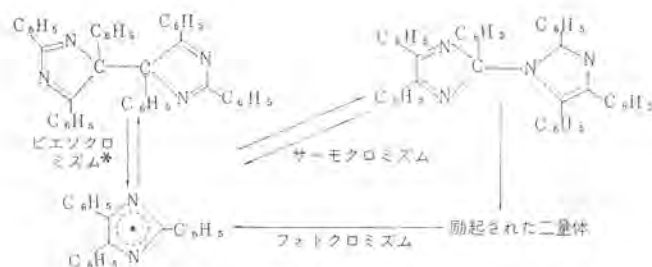


図 3. 8 サリシリジニアニリンのフォトクロミズム機構
Photochromic mechanism of salicylidene-aniline.



図 3.9 ヘキサフェニルビイミダゾールの フォトクロミズム 機構 (1)
Photochromic mechanism of hexaphenyl-biimidazole (1).



(注) *ビエゾクロミズムとは室温で固体を押しつぶすかすりつぶすと変色し、少し温度をあげて放置しておくともとの色にかわる可逆的現象をいう。

図 3.10 ヘキサフェニルビイミダゾールの フォトクロミズム 機構 (2)
Photochromic mechanism of hexaphenyl-biimidazole (2).

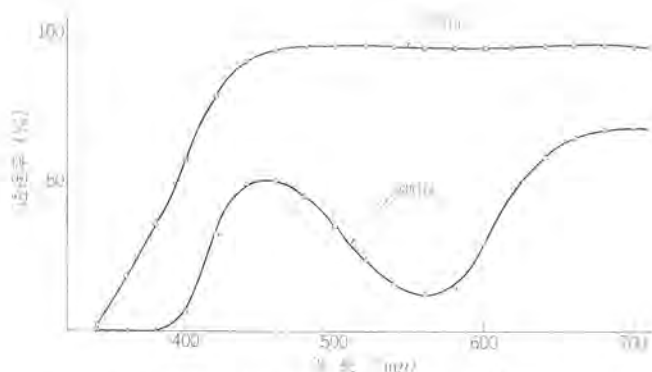


図 3.11 試料Dの フォトクロミック 特性 (有機溶媒中)
Photochromic spectrum of specimen D in the methanol-benzene solvent.

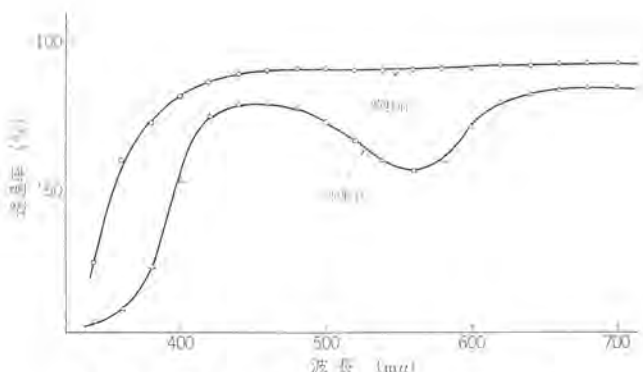


図 3.12 試料Dの フォトクロミック 特性 (タックシート 中)
Photochromic spectra of specimen D in plastic sheet.

で、紫外線を照射すると オレンジ 色に変色する。この試料Cをメタノールに溶解し、染色液としたものでシートを染色した結果はストロボで照射しても フォトクロミック 特性は示さなかった。結晶 (固体) では フォトクロミック 特性を示していたので、シートに染色したために示さなくなったと考えてよいであろう。その原因はいろいろ考えられるが、実験的には追求しなかった。

染色時間と染色量の関係は アジ 染料A、Bとほぼ同じ傾向を示す。同一条件における染色性はBよりもさらに劣る。

3.3 イミダゾール類

林氏の研究⁽¹⁰⁾によれば、代表的な イミダゾール である ヘキサフェニルビイミダゾールの溶液は図 3.9 に示すように光の照射または加熱によって N-N 結合が開裂して遊離基を生成し、暗所では逆に遊離基2個が再結合してもとに戻る。いわゆる ラジカル 解離によって フォトクロミック 特性を示す。その変色は有機溶媒中だけでなく固体でも淡黄色から暗紫色に変わる。

林氏は上記の機構を分子量および ESR 測定から提案したのであるが、最近になって D. M. White および J. Sonnenberg⁽¹¹⁾ は赤外吸収スペクトルより図 3.10 のような機構を提案した。

筆者らが合成し、試料とした イミダゾール (試料D) も ラジカル 解離によって フォトクロミック 特性を示すものと思われる。

試料Dはベンゼンによく溶けるがアルコール類にはあまり溶けない。今までの結果から、ベンゼン 単独溶媒よりも メタノール-ベンゼン 系混合溶媒にしたほうが染色度も大きいので、初めからメタノール-ベンゼン系溶媒で検討した。混合溶媒中の フォトクロミック 特性を図 3.11 に示す。濃度が低くてもかなり大きな変色度を示し、無色透明から 560 mμ 付近に吸収ピークをもつ赤紫色に変色し、全可視域にわたって透過率が降下する。代表的な染色条件における染色結果をまとめると表 3.3 のようになる。表中シートへの含浸量の換算は吸収ピークが 350 mμ 以下であるため、400 mμ における値を基準とした。

シートに染色後の フォトクロミック 特性の一例を図 3.12 に示す。かなり大きな色変化を示すことがわかる。

また、20°C における復元速度を測定してみると図 3.13 のようになる。暗所放置における 560 mμ 付近の吸収ピークの透過率経時変で表わした。30 分ぐらいでほとんど色が消えている。30 分後における分光透過特性を図 3.14 に示す。

3.4 金属キレート化合物

金属を配位子とした金属キレート化合物中には有機溶媒中で フォトクロミック 特性を示すものがある。それらのうち3種類 (E, F, G) を選びだし、合成して試料とした。試料Eはベンゼン、クロロホルム、塩

表 3.3 各染色条件におけるシートへの染色量 (試料D)
Dyeing condition and its effects (specimen D).

溶 溶 媒	染色条件		浴 濃 度 mol/l	タックシートへの含浸量*	
	温度 °C	時間 h		mol	浴濃度
メタノール:ベンゼン	75	0.5	7.2×10^{-3}	6.0×10^{-2}	8.3
メタノール:ベンゼン	75	1	7.2×10^{-3}	9.0×10^{-2}	12.5
メタノール:ベンゼン	25	2	1.0×10^{-2}	7.0×10^{-2}	7.0
メタノール:ベンゼン	50	0.5	1.0×10^{-2}	9.4×10^{-2}	9.4
メタノール:ベンゼン	55	2	1.0×10^{-2} 以下	11.5×10^{-2}	—
メタノール:ベンゼン	80	1	1.0×10^{-2}	14.6×10^{-2}	14.6

注 * 1.7×10^{-2} mol/l の染色液濃度における 400 mμ の吸光度を基準とした。

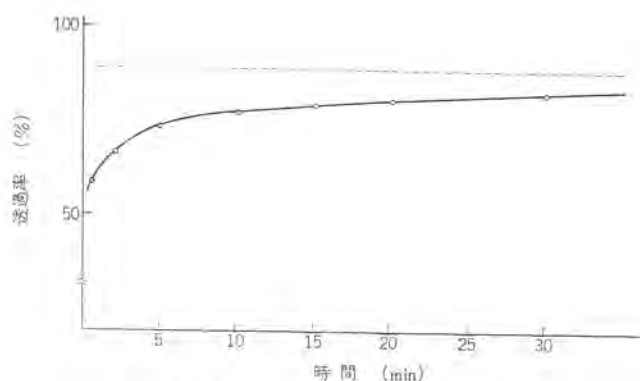


図 3.13 試料 D の復元速度 (1)
Return speed of specimen D in plastic sheet at 20°C.

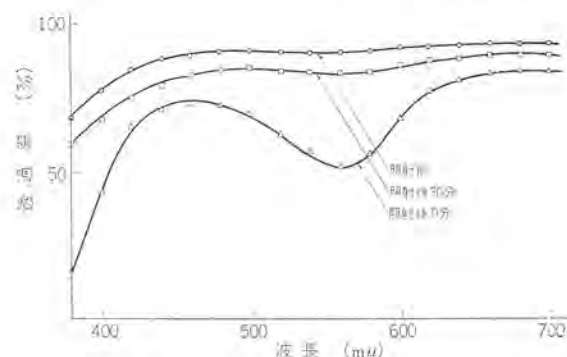


図 3.14 試料 D の復元速度 (2)
Visible spectra of return reaction of specimen D in plastic sheet at 20°C.

化メチレンなどに溶解し、Fはテトラヒドロフランに、Gはベンゼン、四塩化炭素に溶解する。しかし、一般に溶解度は小さい。したがって、染色はすべて飽和濃度溶液中でおこなった。溶媒はEとGについてはメタノール-ベンゼン系およびエタノール-ベンゼン系を使用し、Fについてはモレキュラー-シブで脱水したテトラヒドロフランを使用した。

予備実験でE、F、Gがそれぞれ各溶媒中でフォトクロミック特性を示すことを確認してから室温で染色し、ふたたびフォトクロミック特性を測定してみるとEだけ変色した。また、固体におけるフォトクロミック特性を測定してみると、これもEだけ変色した。これは、筆者らが各種フォトクロミック物質についての染色条件結果から学んだ経験則——固体および溶媒中でフォトクロミック特性を示す物質はシートに染色してもその特性を失わない——によく一致している。実験は試料Eに重点をおいて進めた。

最初メタノール-ベンゼン系で実験を進めていたが、ある染色条件で染色するとシートが膨潤することが判明したので、エタノール-ベンゼン系に変更した。混合比(1:1)における染色時間、色染液温度の影響を図 3.15、3.16 に示す。かなり染色性のよいことがわかる。また、フォトクロミック特性の一例を図 3.17 に示す。光照射によりオレンジ色から暗かっ色に変色する。復元速度も比較的速く、図 3.18 に示すように変色のとき現われる吸収ピーク 600 mμ の透過率経時変化において 1/2 にまで復元する時間は約 3 分である。

3.5 耐光性

試料DおよびEが比較的染色性もよく、フォトクロミック特性も良好な結果を示したので耐光性テストをおこなった。同時に改良テストもおこなう予定で、まず、予備実験として、試験管内でエタノール-ベンゼン系に溶解したDおよびEに紫外線吸収剤を少量添加し、溶媒中でのフォトクロミック特性を調べてみると、試料Dは変色せずEだけ変色

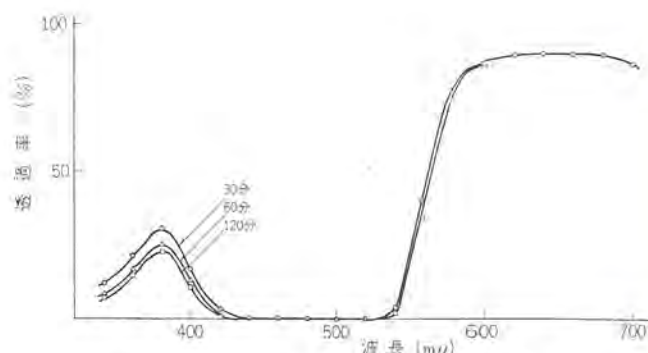


図 3.15 染色時間の影響 (試料 E)
Effect of immersion time into dyeing bath.

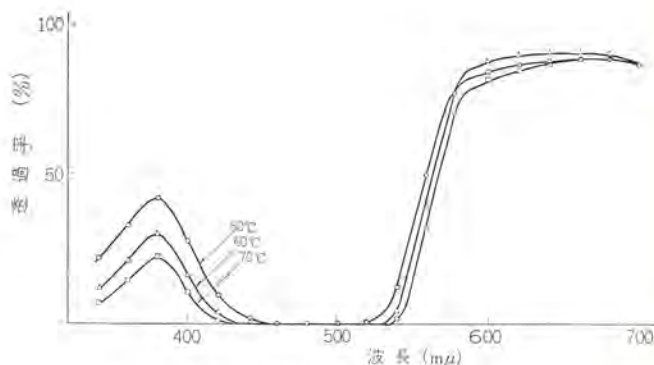


図 3.16 染色液温度の影響 (試料 E)
Effect of dyeing bath temperature.

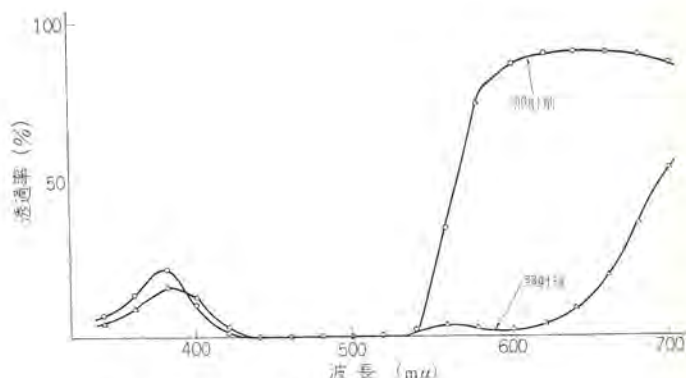


図 3.17 試料 E のフォトクロミック特性
Photochromic spectra of specimen E in plastic sheet.

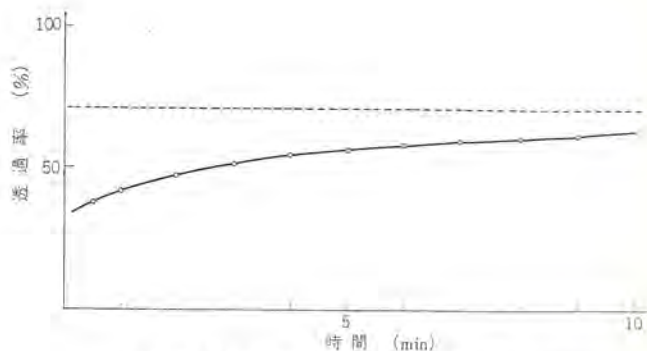


図 3.18 試料 E の復元速度
Return speed of specimen E in plastic sheet at 20°C.

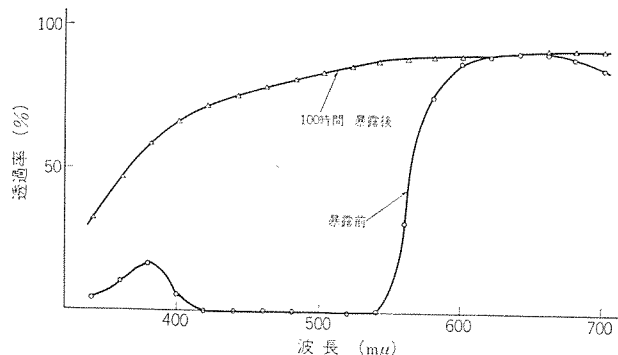


図 3.19 フォトクロミックプラスチックシートの耐光性 (1)
無処理
Weatherability of photochromic plastic sheet (1).
No coating.

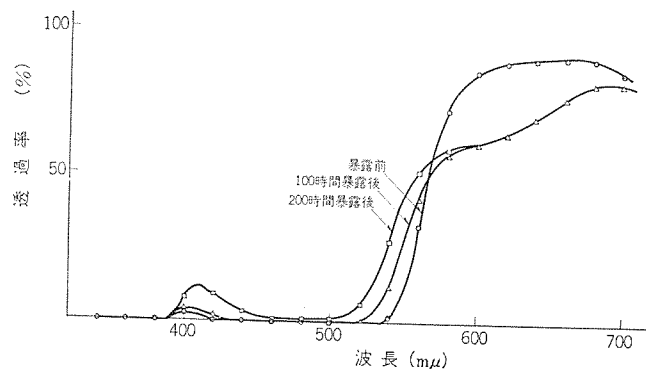


図 3.20 フォトクロミックプラスチックシートの耐光性 (2)
耐紫外線処理
Weatherability of photochromic plastic sheet (2).
Anti-ultra-violet light treatment.

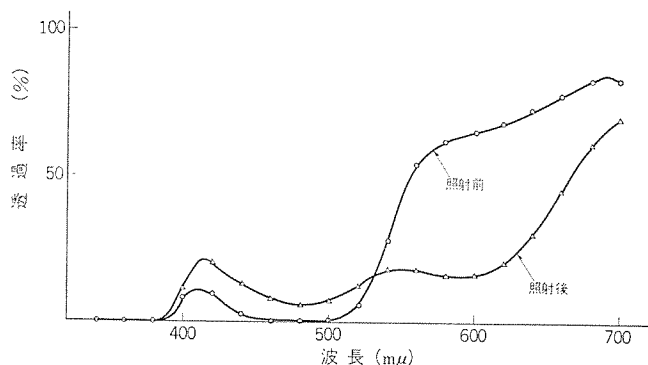


図 3.21 200 時間暴露後における フォトクロミック 特性
Photochromic spectrum of anti-ultra-violet light treated
photochromic plastic sheet after 200 h, exposure by
weather-o-meter.

した。紫外線吸収剤としてもちいた物質は前述したようにほとんどの化合物と反応しないので、Dがフォトクロミック特性を示さなくなったのは明らかに紫外線吸収剤の影響による活性光線のしゃ断のためと考えてよいであろう。したがって、Dを染色したシートに紫外線吸収剤を併用し、耐光性を高めることはやや無理であることが判明した。なお、Dだけを染色したシートの耐光性は非常に悪く、ウェザオメータにかけると室内に2～3日放置しておくだけでフォトクロミック特性を示さなくなった。

一方、Eは紫外線吸収剤を添加しても依然 フォトクロミック 特性を示しているの、紫外線吸収剤の併用による耐光性への影響を検討した。試験結果の一部を図 3.19～3.20 に示す。

Eだけを染色したものは耐光性悪く、80 時間暴露でEはほとんど分解され、シートは透明になっている。これに反し、紫外線吸収剤を併用したものは耐光性が著しく改良され、ウェザオメータ 暴露時間で少なくとも2倍以上に伸びている。使用条件のよいものは200 時間暴露しても見かけ上の劣化はほとんどわからないほどである。

図 3.21 にウェザオメータで200 時間暴露後のシートのフォトクロミック特性を示す。十分変色することがわかる。

4. 結果の考察

フォトクロミック特性を示す有機物質はその種類も多く、いろいろあるが、それらのうちから数種類を選びだし、三酢酸繊維シートをプラスチック基材として使用したときの染色法によるフォトクロミック物質の導入を検討した。その結果、つぎのような考察ができる。

(1) シートの染色において、非極性溶媒よりも極性溶媒のほうが染色性が高い。とくに極性溶媒でもメタノールの染色性が非常に大きい。また、非極性溶媒に極性溶媒を添加すると染色性は急激に増大する。

(2) 固体および有機溶媒中でフォトクロミック特性を示す物質はシートに染色してもその特性を失なわないようである。これは筆者らがいろいろな実験結果から得た経験に基づくもので、今後、染色法でフォトクロミック物質をプラスチックシートへ導入するときフォトクロミック特性を示すかどうかを判定する際の基準となるであろう。

(3) フォトクロミック物質と紫外線吸収剤の併用により、耐光性が著しく改良され、染色法でも実用可能なフォトクロミックプラスチックシートを製作することができる。

5. む す び

筆者らは有機フォトクロミック物質をプラスチックシートに導入する方法として、一番簡単に着手でき、しかもそれほど大きな設備を必要としない染色法について検討し、いろいろな種類の有機フォトクロミック物質による染色実験から、染色法で十分実用可能なフォトクロミックプラスチックシートの製作ができることをみいだした。また、ある物質においては、紫外線吸収剤の併用により耐光性がウェザオメータ暴露時間で2倍以上にも伸び、200 時間暴露後でも十分使用できることが判明した。

(昭和 43-9-2 受付)

参 考 文 献

- (1) A. R. Gradner : Materials that change color, Product Engineering, 37, [3], 50～54 (1966)
- (2) Photochromism, Modern Plastics, 42, [12], 94～95, 165 (1965)
- (3) R. Exelby and R. Grinter : Phototropy (or Photochromism), Chemical Review, 65, [2], 247～260 (1965)
- (4) 第4回サマーセミナー：これからの光学機械
- (5) 富士写真フィルム株式会社 カタログ：フジタックフィルム
- (6) W. R. Brode, J. H. Gould and G. M. Wyman : The Relation between the Absorption Spectra and the Chemical Constitution of Dyes. XXV. Phototropism and cis-trans Isomerism in Aromatic Azo Compound, J. Ame. Chem. Soc., 74, 4,641～4,646 (1952)
- (7) W. R. Brode, J. H. Gould and G. M. Wyman : The Relation between the Absorption Spectra and the Chemical

- Constitution of Dyes. XXVI. Effect of Solvent and of Temperature on the cis-trans Isomerization of Azo. Dyes, J. Ame. Chem. Soc., 75, 1,856~1,859 (1953)
- (8) A. A. Burr, E. J. Llewellyn and G. F. Lothain : Phototropic Properties of Salicylidene-m-Toluidine and Salicylidene-Aniline, Trans of Faraday Society, 60, [504], 2,177~2,188 (1964)
- (9) M. D. Cohen and G. M. J. Schmidt : Topochemistry, Part VI, Experiments on Photochromy and Thermochromy of Crystalline Anils of Salicylaldehydes, J. Chem. Soc., 1914, 2,041~2,051 (1964)
- (10) 林太郎 : 化学発光と フォトクロミズム の機構, 化学と工業, 17, 598~604 (1964)
- (11) D. M. White and J. Sonnenberg : Oxidation of Triarylimidazoles. Structures of the Photochromic and Piezochromic Dimers of Triarylimidazyl Radicals, J. Ame. Chem. Soc., 88, 3,825~3,829 (1966)
-

ガスレーザとその応用

谷口 一郎*・樋口 隆一*・宮沢 淑子*・佐竹 正章*

Gas Lasers and Their Applications

Central Research Laboratory

Ichiro TANIGUCHI・Takaichi HIGUCHI

Toshiko MIYAZAWA・Masaaki SATAKE

Since the invention of helium neon gas lasers by A. Javan and his collaborators in 1961 and the success in the oscillation of infrared rays, gas lasers have made marvelous developments and a good many devices have been turned to products in the world. Nevertheless, they are not necessarily completed units for practical use and there still remain a number of technical points to be improved.

This article describes the constitution of helium neon gas laser, argon ion laser and carbon dioxide gas laser, laser output characteristics, technical problems and simple applications.

1. ま え が き

1961年に A. Javan らによって初めてヘリウム-ネオンガスレーザが発明され⁽¹⁾, 赤外光 (1.15 μ) のレーザ発振に成功して以来, 数多くのレーザ発振が広いスペクトル領域 (紫外-遠赤外) で得られており⁽²⁾, レーザ出力も大幅に増大している。

数多いガスレーザの中で現在最もよく使用されているのは, ヘリウム-ネオンガス(He-Ne)レーザ, アルゴンイオン(Ar⁺) または クリプトンイオン(Kr⁺)レーザおよび炭酸ガス(CO₂)レーザである。

He-Neレーザは発振出力が数十 mW とそれほど大きくはないにもかかわらず, スペクトルが可視光領域の赤色 (0.63 μ) であり, かつスペクトルの可干渉性が大きいという特長を持ち, 装置が比較的小形軽便であるという理由もあって, 最も実用に供されている。

Ar⁺レーザは発振出力が発振全波長を合せて数 W と大きく, 可視光領域の青色から緑色 (0.46~0.52 μ) にわたって同時に数本の波長で発振し, Kr⁺レーザでは前者よりも出力は小さく発振スペクトルは青色から赤色 (0.46~0.64 μ) と広いが, いずれも装置が大形で大電力を要し, He-Neレーザほど一般的に使用されていない。

CO₂レーザは数あるレーザの中で最もエネルギー変換効率 (入力電力対レーザ光出力) が高く, 出力数十 W から数百 W 程度のものが実用化されている。発振スペクトルは眼には見えない赤外領域 (10.6 μ) にあるが, この波長は大気の吸収がない透過帯であるために, 伝ば (播) 中の減衰が小さいのでレーザ・通信に用いられるほか加工装置の光源としても重要である。

これらのレーザ装置はいずれも実用的な光源として各社で製作販売されているが, まだ電子管や電子機器に比べ完成された装置になっておらず, 出力・安定度・寿命など検討すべき問題点は多いと思われる。

当社においても電子機器の飛躍的發展をレーザ応用機器開発に期待する立場からガスレーザの開発研究を進め, たとえば出力については He-Neレーザで 50 mW 以上, Ar⁺レーザで 1.5 W 以上および CO₂レーザで 100 W 以上を得ている。本報告はこれら 3 種類のガスレーザの構成・諸特性・実用上の諸問題・応用について概略を述べたものであるが, まだ開発途上であり今後も検討改良すべき点は多い。応用機器の一部として要求されるレーザの特性は, その機器によって異なり新たな問題点を生じることとも予想されるが, これらは随時検

討を加えてレーザの特性向上に努めなければならないと思われる。

2. 概 説

ガスレーザの原理・構成・出力⁽¹⁾・レーザビーム径と広がり角・共振器の理論・実用的使用方法などについては他の報告^{(3)~(5)}や解説^{(6)~(8)}に譲ることにして, 3 章以下の説明に必要で実用上重要なレーザ出力とビームの性質について簡単に記しておくことにする。

2.1 レーザ出力

ガスレーザはガスレーザ管・共振器・放電励起用電源から構成される発振装置であり, おのおのが増幅系・正帰還系・電力供給系に相当する。したがって, レーザ管の利得と共振器内の損失により出力の大きさの見当をつけることができる。

レーザ管 (直径: $2r$ mm, 管長: L m, 有効放電長: L_0 m) の単位長当たりの最大不飽和利得が g_0 で, レーザ光ふく射密度が P になったときの利得 g は, ほぼ次式で近似してよいことがわかっている。

$$g = \frac{1}{P} \frac{dP}{dz} = \frac{g_0}{1 + P/P_0} \quad (2.1)$$

ここに z は管方向の長さ, P_0 は飽和パラメータ (W/cm²) である。定常発振状態ではレーザ管全利得と共振器全損失 (共振器内損失 A と透過損失 T の和) とが平衡していると考えられ, 一般に利得 g があまり大きくないことを考慮すれば共振器外へ取り出すことのできる出力 P_{out} は, レーザ光断面積を S として次式に近似できる。

$$P_{\text{out}} = STP_0 \left(\frac{g_0 L_0}{A + T} - 1 \right) \quad (2.2)$$

式 (2.2) から取りうる最大出力 $P_{\text{out}}^{\text{max}}$ とそのときの最適の透過率 T_{opt} が容易に求まる。

$$P_{\text{out}}^{\text{max}} = SP_0 (\sqrt{g_0 L_0} - \sqrt{A})^2 \quad (2.3)$$

$$T_{\text{opt}} = \sqrt{g_0 L_0 A} - A \quad (2.4)$$

式 (2.3) から出力を大きくするためには g_0 , L_0 を大きくして A を小さくすることが有効であることがわかる。 L_0 を大きくしても一般に A は不変であり, 有効な手段ではあるが装置が大形になるので実用的でなくなってくる。 g_0 は L_0 と異なり任意に選べず, 使用するガスの種類・組成・圧力・管径・放電電流によって最大値が決まるが, 最適の圧力 (p)・管径 ($2r$)・放電電流 (I) を実験的に求める以外にない。ただし最適の条件では $p \cdot r$ と $g_0 \cdot r$ がそれぞれある一定値になることが実験的に確められるので, 任意の r に対

する最適の P とそのときの g_0 の値は大体見当をつけることができる。 A はレーザ管のブリュスタ窓板の反射・吸収・散乱、共振器反射鏡の反射・散乱、共振器内のレーザ光束中のじんあいによる散乱などの損失によって決まる。 A を小さくするためにはいずれの損失もできるだけ避けなければならない。このために良質のブリュスタ窓、散乱の小さい反射鏡を使用し、共振器内をダストシールドしなければならない。特に室内じんあい数はほぼ $\delta^{-2.5}$ で大きくなり (δ : 粒子径)、散乱光損失はレーザ波長が短くなるほど大きくなり、かつ窓板や反射鏡面上に積層して経時変化を招くので十分な注意が必要である。

2.2 共振器とレーザ光の特性

レーザ光の発振波長・ビーム径・ビーム広がり角などの特性は近似的に共振器(反射鏡の曲率半径と共振器の間隔)で決まり、出力安定性・ビーム方向安定性は共振器の機構・電源の安定性・環境条件によって影響を受ける。

レーザは一般的には縦(軸)方向および横方向に多重モードで発振しているが、共振器の条件によって縦方向多重モードだけで動作させることができる。これを uniphase モードまたは横方向単一モードと呼び、実用的には重要である。レーザ管径と共振器を適当に選べば、横方向モード動作時の出力に比べてあまり出力低下を受けずに uniphase モードをうるることができる。このときの共振器の周波数 ν_c は $\nu_c = NC/2nd$ で与えられ、隣接モード $\Delta\nu_c$ は $\Delta\nu_c = C/2d$ である。(C : 光速, N : 整数, n : 屈折率 ~ 1 , d : 共振器間隔)。注目するレーザ波長の原子・分子のスペクトル線はドップラー幅 $\Delta\nu_D$ を持っており、スペクトル線分布が利得曲線を表わしていると考えてよく、したがって、 $\Delta\nu_D > \Delta\nu_c$ の場合には一般的に縦方向多重モードで発振している。

曲率半径 R_c の反射鏡を間隔 d だけ離し $R_c \sim d$ とした場合のいわゆる共焦点形共振器でのふく(幅)射の振幅分布は、uniphase モードのとき

$$E(x, y) = E_0 \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right\} \quad (2.5)$$

で与えられる。 w は E_0/e になる点でスポットサイズと呼び、 $2w$ をレーザビーム径と呼んでいる。焦点位置からの距離(軸方向) z のところでの $w(z)$ は、 w_0 を焦点でのスポットサイズとして

$$w(z) = w_0 \left\{ 1 + \left(\frac{2z}{R_c} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

$$w_0 = \left(\frac{\lambda R_c}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

であり、反射鏡面上 ($z=d/2$) のスポットサイズ w_c は

$$w_c = \left(\frac{\lambda R_c}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

である。このときのビームの広がり角は次式で与えられている。

$$\theta = 0.94 \left(\frac{\lambda}{R_c} \right)^{\frac{1}{2}} \text{rad} \quad (2.9)$$

図 2.1 に関連ある波長についての w_c と θ を示した。

曲率半径 R_1, R_2 を d だけ離れた共振器は等価的に R_c の共焦点形共振器になることが示された⁽⁵⁾。

$$R_c = \{4s(R_1 - s)\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

$$s = d(R_2 - d)/(R_1 + R_2 - 2d) \quad (2.11)$$

式(2.8)(2.10)から uniphase モード動作に有効な共振器配置が導き出せる。

平面 ($R_2 \rightarrow \infty$)—球面 ($R_1 = R$) 形共振器において平面鏡上のスポットサイズを w_p 、球面鏡上のを w_s とすれば次式が得られる。

$$\frac{w_p}{w_d} = \left(\frac{R-d}{d} \right)^{\frac{1}{2}} = (R/d-1)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

$$\frac{w_s}{w_d} = \left\{ \frac{R^2}{d(R-d)} \right\}^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{R}{d} \right)^{\frac{1}{2}} (R/d-1)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

$$w_d = (\lambda d/\pi)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

図 2.2 に式(2.12)(2.13)を図示した。 w_d は図 2.1 から求められるので、 w_p と w_s は図 2.2 からすぐに求められる。 $R/d \sim 1$ の半球面形では w_s が大きくなるのがわかる。

球面—球面 ($R_1 = R_2 = R$) 形共振器の反射鏡面上のスポットサイズを w_R とすれば次式が得られる。

$$\frac{w_R}{w_d} = \left\{ \frac{R^2}{2d^2(R/d-1/2)} \right\}^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{R}{d} \right)^{\frac{1}{2}} (2R/d-1)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

図 2.3 に式(2.15)を図示した。 w_d は図 2.1 から求められて w_R も図 2.3 からすぐに求められる。 $R > d$ の大曲率形では $w_R =$

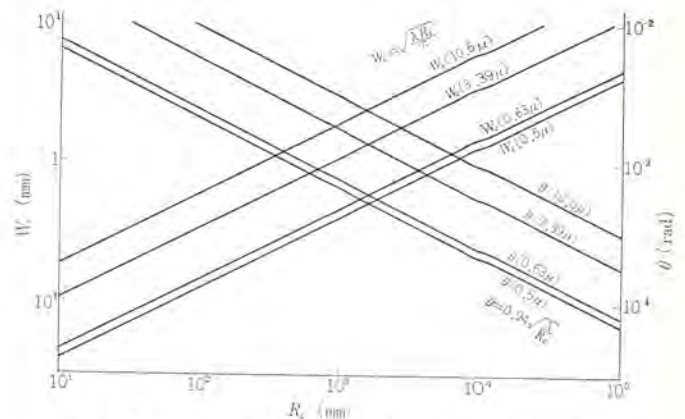


図 2.1 共焦点形共振器のスポットサイズと広がり角
Spot size and beam divergence of confocal resonator.

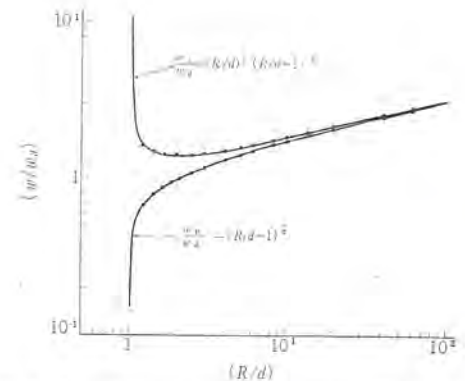


図 2.2 平面—球面形共振器の規格化スポットサイズ
Normalized spot size of plane-concave resonator.

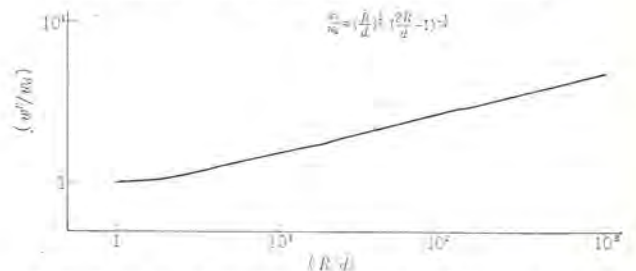


図 2.3 球面—球面(等曲率)形共振器の規格化スポットサイズ
Normalized spot size of concave-concave resonator with reflectors of equal curvature.

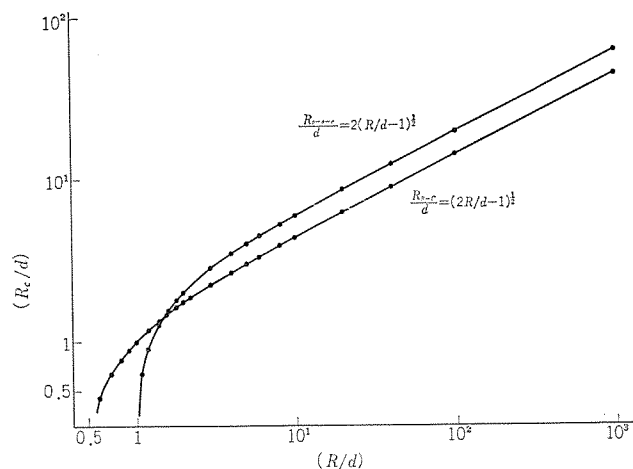


図 2.4 平面—球面，球面—球面形共振器の共焦点形共振器規格化等価曲率半径
Normalized equivalent curvature of confocal resonator in plane-concave and concave-concave resonators.

$w_d \cdot (R/2d)^{1/2}$ になり， w_R は大きくなる。

平面—球面鏡形および等曲率球面—球面形共振器の等価共振器曲率半径は，式 (2.10) よりおのおの次式で与えられる。

$$\frac{R_{p-s-c}}{d} = 2(R/d - 1)^{1/2} \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\frac{R_{R-c}}{d} = (2R/d - 1)^{1/2} \dots\dots\dots (2.17)$$

図 2.4 に式 (2.16) (2.17) を示す。 d と R を決めれば R_{p-s-c} ， R_{R-c} が求められ，式 (2.9) または図 2.1 より θ が求められる。共焦点形よりも θ が小さくなることは明らかである。

r に比べて w_c は小さくモード体積比⁽⁹⁾ (レーザ管の有効体積と uniphase モードが占める体積との比) が小さいので，uniphase モード出力が小さくなる。 $r \lesssim w$ になるようにしてモード体積比を大きくすれば出力も低減しないので，平面—球面，球面—球面形で用いることが有効となり，かつ θ も小さくなって実用的価値は高まる。ただし半球面形が共焦点形に次いで調整が容易であることが知られているが， θ が大きいので平面—球面形共振器が θ の小さい uniphase

表 3.1 レーザ装置一覧

List of laser equipments.

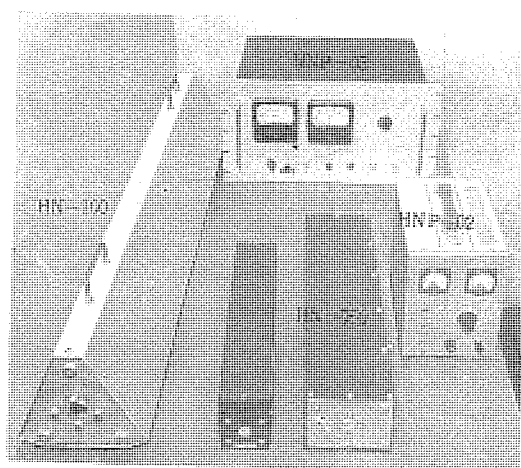
項目	機種名	He-Ne ガスレーザ				アルゴンガスレーザ	炭酸ガスレーザ
		HN-030	HN-050	HN-100	HN-200	IGL-100	CO 2-200
使用レーザ管		HNT-020	HNT-040	HNT-090	HNT-190	IT-050	CO 2 T-200
全長	mm	300	500	1,000	2,000	1,000	2,100
共振器間隔	mm	260	460	960	1,960	850	2,000
出力	発振波長 μ	0.63	0.63	0.63	0.63	0.4880, 0.5145 (0.4756, 0.5017)	10.6
力	発振出力 (mW) 多重モード 単一モード	>1.0 >0.7	>3.5 >2.5	>15 >10	>50	>1.5 W	>50 (W)
ビームの広がり (半頂角) 多重モード 単一モード	mmrad	2×10^{-3}	3×10^{-3} 1×10^{-3}	3×10^{-3} 7×10^{-4}	5×10^{-4}	4×10^{-3}	5×10^{-3}
ミッ リ 器	多重モード	曲率半径 M 透過率 %	0.6, 0.6 0.5, 0	1, 1 1.5, 0		1, 1 6.0, 0	2.7, 2.7 5 mm ϕ 出力孔
	単一モード	曲率半径 M 透過率 %	2.5, ∞ 0.5, 0	2.5, ∞ 1.0, 0	5.0 ∞ 1.5 0	5.0 ∞ 3.0 0	
安定度	リップル 120 Hz 安定度 (長時間)	0.5 % ~2 %	0.5 % ~2 %	0.5 % ~1 %	0.5 % ~1 %		
使用電源		HNP-02	HNP-02	HNP-03	HNP-04	IS-01	CO 2 P-200
その他		磁界印加 ダストシールド	磁界印加 ダストシールド	磁界印加 ダストシールド	磁界印加 ダストシールド	磁界印加 (1 kG) ダストシールド	flow type. ガスボンベ，排気系 内蔵
特長		○小形・軽量・取扱いが簡単 ○長時間安定度がよい ○単一モードで比較的高出力がえられる		○高出力で安定度がよい		○波長が青・緑色の 範囲にあり高出力が えられる ○水冷式	○高出力の赤外線 ○水冷式
おもな用途		○アラインメント用光源 ○光学機器への応用		○レーザ通信への応用 ○物性研究 ○ホログラフィ ○ラマン分光			○加工 ○通信

表 3.2 レーザ管一覧

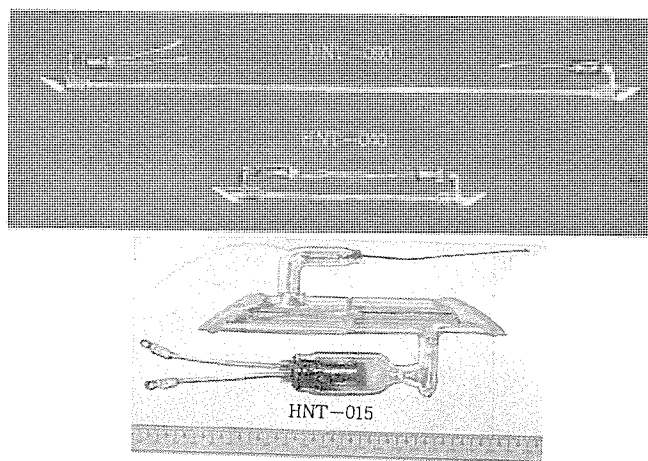
List of laser tubes.

項目	管名称	He-Ne レーザガスレーザ					アルゴンイオンレーザ		炭酸ガスレーザ		
		HNT-015	HNT-020	HNT-040	HNT-090	HNT-190	IT-020	IT-050	CO 2 T-100	CO 2 T-200	CO 2 T-300
出力	発振波長 μ	0.63	0.63	0.63	0.63 ⁽²⁾	0.63	0.4880	0.4880, 0.5145 (0.4765, 0.4965) (0.5017)	10.6	10.6	10.6
力	発振出力 多重モード (mW) 単一モード	>0.5 >0.3	>1 >0.7	>3.5 >2.5	>15 >10	>50	>0.2 (W)	>1.5 (W)	>25 (W)	>50 (W)	>100 (W)
全長	(mm) L	150	200	400	900	1,900	500	800	1,000	2,000	3,000
有効長	(mm) L ₀	110	140	340	840	1,840	200	500	770	1,760	2,520
管径	(mm)	1 ϕ	1.5 ϕ	2 ϕ	3 ϕ	3.5 ϕ	2 ϕ	2 ϕ	19 ϕ	19 ϕ	44 ϕ
ヒーター電力		6.3 V \times 1 A	6.3 V \times 1 A	6.3 V \times 1 A	6.3 V \times 2.5 A	6.3 V \times 2.5 A	5 V \times 25 A	5 V \times 25 A	—	—	—
管内電圧降下	kV	0.9 ⁽¹⁾	1 ⁽¹⁾	1.4 ⁽¹⁾	2.0 ⁽¹⁾	2.4 ⁽¹⁾	0.15	0.3	8	8 \times 2	10 (AC)
標準陽極電流	mA	4	8	14	18	25 \times 2	15 A max	18 A max	30	30	100 (AC)
封入ガス組成および ガス圧力	mmHg	He ³ :Ne=6:1 2.4	He ⁴ :Ne=6:1 1.6	He ⁴ :Ne=6:1 1.4	He ⁴ :Ne=6:1 1.3	6:1 1.2	0.5	0.5	(flow type)	(flow type)	(flow type)
共振器ミラー	多重モード	曲率半径 M 透過率 %	0.6, 0.6 0, 0.5	1, 1 0, 0.5	1, 1 0, 1	1, 1 0, 1.5	0.6, 0.6 6, 0	1, 1 6, 0	2, 2 出力孔 4 ϕ	2.7, 2.7 出力孔 5 ϕ	3.2, 3.2 出力孔 11 ϕ
	単一モード	曲率半径 M 透過率 %	1, ∞ 0.5, 0	2.5, ∞ 0.5, 0	2.5, ∞ 0.5, 0	5.0, ∞ 1.5, 0	5.0, ∞ 3, 0				

注) 1. レーザヘッド内の安定抵抗 20 k Ω ~30 k Ω . 2. 石英製ミラーを使用すると 3.39 μ 1.5 mW が得られる。



(a)



(b)

図 3.1 He-Ne レーザ 装置 (a) および He-Ne レーザ 管 (b) の外観

Exterior view of He-Ne laser equipment (a) and He-Ne laser tubes (b).

モードをうるのに最適である。

3. He-Ne レーザ

3.1 構成

製作した He-Ne レーザはレーザ管、共振器、支持調整機構部からなるレーザヘッドと電源から構成される外部鏡形共振装置で、装置とレーザ管を表 3.1 および表 3.2 にまとめて記した。HN-050 と HN-100 の外観および HNT-040 と HNT-090 の外観を図 3.1 に示す。

3.1.1 レーザ管

(1) 構造

レーザ管は熔融石英製のガス封入管で直流放電形であり、概略構造は図 3.1 に示すとおりである。中央細管部が増幅作用を持つ領域で有効放電長 L_0 であり、管両端にブリュスタ窓板を取り付けている。また外管から枝管により電極部を接続している。内容積を大きくして長寿命化を配慮しているのが特長である。

(2) ブリュスタ窓板

レーザ出力増加のためには式 (2.3) より A が小さいことが要求されるが、レーザ管のブリュスタ窓板の損失は重要な要素である。窓板材料はレーザ波長で透過率が大きく、気泡や異物などの散乱体がなく、光路を乱す脈理がない（一様性）こと、表面上の散乱損失がない光学研磨面であることなどが必要である。図 3.2 にブリュスタ窓

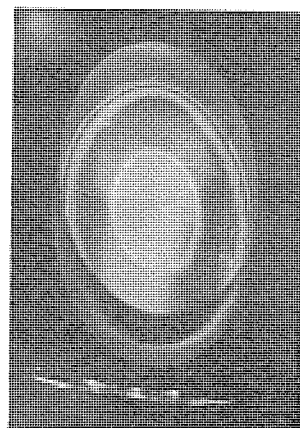


図 3.2 ブリュスタ窓板と接着面の干渉しま
Interference fringes between Brewster window and contact plane.

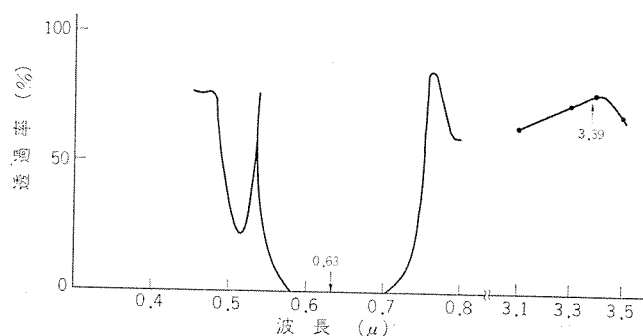


図 3.3 He-Ne レーザ用共振器の分光透過率
Spectral transmission of resonator for He-Ne laser.

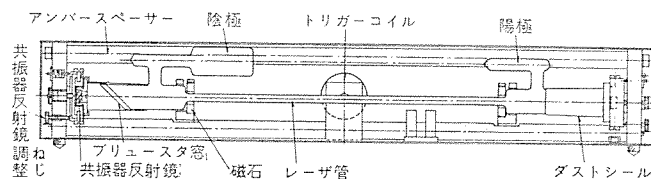


図 3.4 He-Ne レーザ (HN-050) の構造概略
Construction schema of He-Ne laser of type HN-050.

板と接着面の干渉しま（縞）写真を示したが、ほぼ零フリッジで平面度の良好さを示している。

(3) 管の製作

レーザ管の形状を決めれば封入ガスの最適組成と圧力は決まるので、この組成の He-Ne 混合ガスを用いている。レーザ管を排気炉で長時間高温ベーキングを行ない、さらに長時間放電洗浄をおこなった後に最適ガス圧力でガス封入して管を製作している。

3.1.2 共振器

使用している共振器反射鏡は曲率半径 $R=604, 1080, 2500, 5000$ および ∞ (平面鏡)、面精度 $\lambda/10$ 、外形寸法 $10\phi \cdot 20\phi$ 、厚さ $5t$ である。使用目的によって適当な R の反射鏡を用いればよいが、2.2 節で述べたように uniphase モードが必要なときでもこれらの中の適当な反射鏡の組合せて間に合う。

反射鏡の反射率は損失 A に大きく影響する要素である。レーザ波長 (0.63μ) で高反射率をうるために誘電体多層膜コーティングしてあるが、通常の透過率 (図 3.3) 測定からは測定できない微小な損失が問題になる。透過率が 0% であっても散乱損失が無視できない値であって反射率は 99% 程度である。今後レーザ出力増大に関して解決すべき技術的な問題点である。

表 3.3 レーザ用電源一覧
List of power sources for lasers.

項目 電源名称		陽極電圧 無負荷時	電流可変範囲 mA	電流リップル 120 Hz	電流安定度
ヘリウムネオンレーザー用	HNP-02	2.5 kV 以上	5~20	1×10^{-3}	1×10^{-3}
	HNP-03	4.0 kV 以上	10~40	5×10^{-4}	1×10^{-4}
	HNP-04	5 kV	20~60	5×10^{-4}	1×10^{-4}
イアレオロンレーザー用	IP-01	1 kV	5~20 A	1×10^{-2}	—
炭酸ガス用	CO2P-200	20 kV	0~100	5×10^{-2}	—

3.1.3 レーザヘッド

レーザー管とその調整固定用支持具、共振器角度調整機構、放電用安定抵抗、放電起動用トリガークoil および磁石を内蔵している。一例として HN-050 の概略を図 3.4 に示す。共振器は基準板に対してジッパル機構で 2 軸角度調整をおこない、両端の基準板は温度変化による共振器間隔および角度変化を小さくするためスーパーインバー（熱線膨張係数： $8.7 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ）で固定している。反射鏡とプリースタ窓板の空間をダストシールドでおおい、空気の揺らぎやじんあいによるレーザー出力変動と出力の経時変化を防いでいる。

3.1.4 電源

He-Ne レーザ専用の電源は HNP-02, -03, -04 でその仕様を表 3.3 に記した。いずれもレーザー出力を安定するために定電流化電源になっている。

3.2 特性

3.2.1 発振波長

レーザー光の発振波長は Ne の $3s_2 \rightarrow 2p_4$ (Paschen 表示) 遷移に相当する 6328 \AA (a) である。共振器の損失 A はこの波長で最小であり、他の波長では大きい。 $3s_2 \rightarrow 3p_4$ 遷移に相当する波長 3.39μ の利得がきわめて大きいため、通常は同時に 2 波長発振している。故に 3.39μ 線の発振を抑制して 6328 \AA 線の出力を大きくしている。

3.2.2 レーザ管の電気的特性

レーザー管の電気的特性を左右する因子は管構造、 L_0 , r , 封入ガス圧力などである。レーザー出力が最大になるような最適ガス組成と圧力で封入したレーザー管の電気的特性を図 3.5 に示す。図から明らかなようにレーザー管は一種の定電圧放電管で、放電開始電圧は放電管電圧の約 1.5 倍以上が必要で、放電起動用トリガーク電圧が約 10 kV 以上になる。

3.2.3 レーザ管の入出力特性

レーザー管の放電電流 (I) を増加するとレーザー出力 (P) は増加して最大値にまでなりふたたび減少する。 P_{max} になる I_{opt} は電気的特性に与えるのと同じ因子および共振器の反射率によって異なる式 (2.4)。各レーザー管の I - P の関係を図 3.6 に示す。

3.2.4 レーザ管利得と最適反射率

出力取り出し側反射鏡の T_{opt} は式 (2.4) から各レーザー管の g_0 , L_0 , A が求まれば与えられる。一例として HNT-090 の g_0 の測定結果を図 3.7 に示す。測定結果を総合すると $g_0 = 15 \% \text{ mm/M}$ で

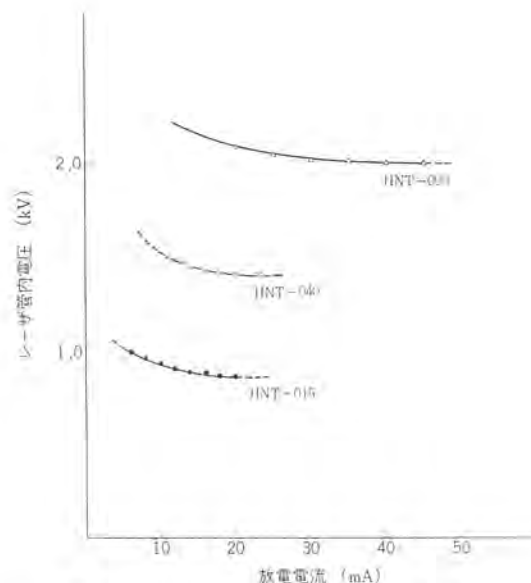


図 3.5 He-Ne レーザ管の電気的特性
Electrical characteristics of He-Ne laser tubes.

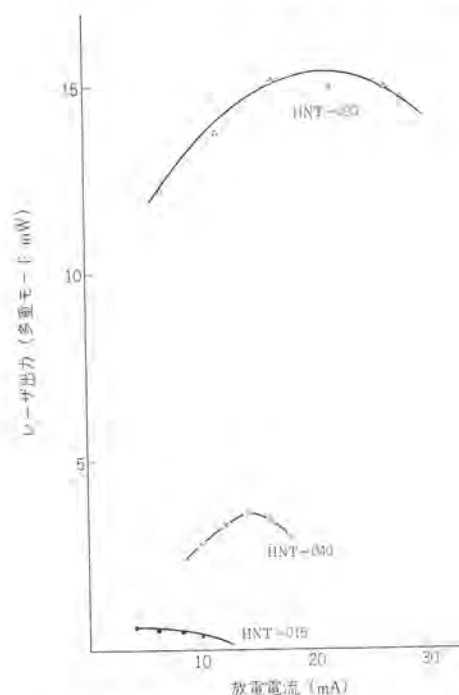


図 3.6 He-Ne レーザ入出力特性
Output-discharge current characteristics of He-Ne lasers.

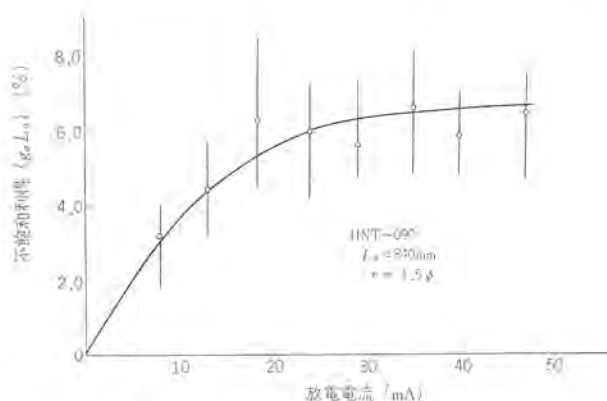


図 3.7 不飽和利得の測定 (HNT-090)
Measurement of unsaturated gain (HNT-090).

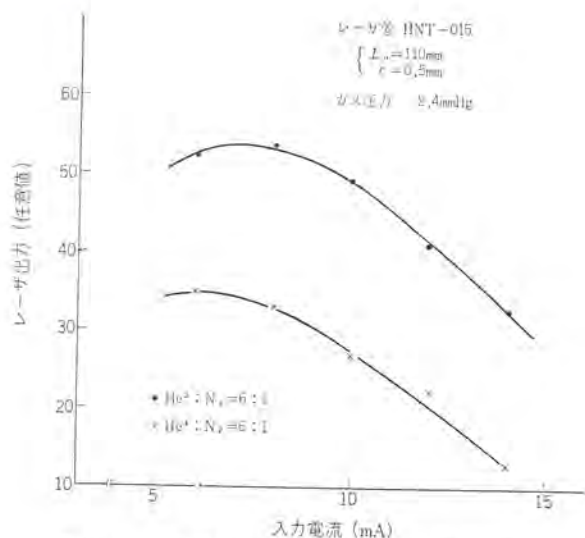


図 3.8 He³ 封入レーザ管によるレーザ出力の増加
Increase of laser output with He³ isotope filled tube.

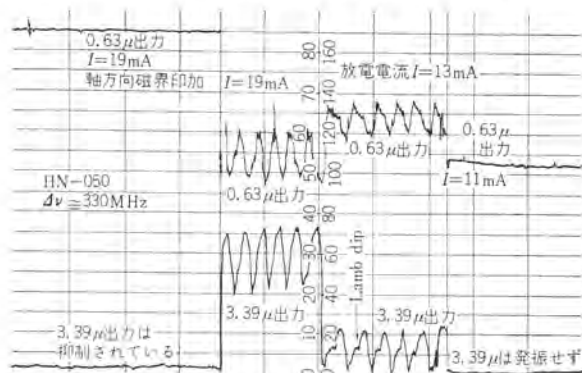


図 3.9 He-Ne レーザの 0.63 μm と 3.39 μm の同時発振
Simultaneous oscillation at both 0.63 μm and 3.39 μm of He-Ne laser.

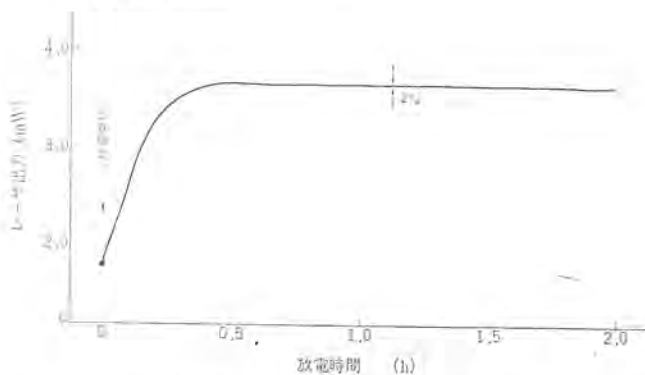


図 3.10 He-Ne レーザ (HN-050) 出力の長時間安定性
Long term stability of laser output of type HN-050.

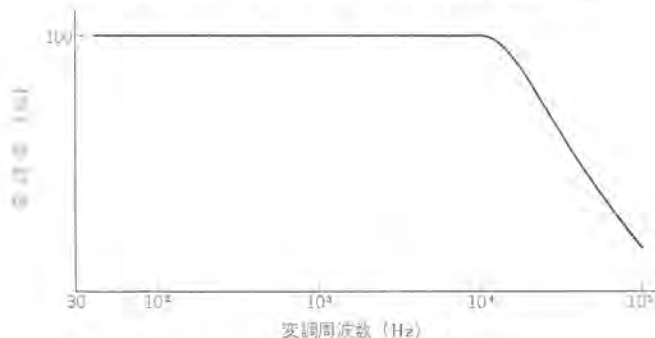


図 3.11 電流変調によるレーザ光の変調率周波数特性
Frequency characteristics of laser output modulated by current.

$A_{\max}=2.5\%$ であり, HNT-090 ($L_0=0.84\text{ M}$) については $T_{\text{opt}}\cong 1.4\%$ である。各レーザ管についても同様にして T_{opt} を決めることができる。図 3.6 は出力側に呼称 99.5, 99.0, 98.5 % の反射鏡を用いたときの値である。

3.2.5 出力の増大

(1) プリュースタ窓

前述したとおり溶融石英製窓板が今のところ最も損失が小さいのでこれを使用している。

(2) 封入ガス

He ガスを He³ アイソトープガスに換えると HNT-015, -040 でおの約 50, 20 % の出力増加が認められる。この結果を図 3.8 に示す。これはすでに報告されているように⁽¹⁰⁾, 衝突効果によるものである。利得の小さい短小レーザ管にはこの He³ アイソトープを封入して出力増加をはかっている。

(3) 不均一磁界効果

0.63 μm と 3.39 μm レーザ波長はレーザ遷移エネルギーの上位準位が同じであり、同時に発振しているときには出力を相殺している。各レーザ波長の利得 $g_0(0.63\mu)$, $g_0(3.39\mu)$ の電流依存性は異なり、一般に $g_{0\max}(3.39\mu)$ のほうが $g_0(0.63\mu)$ よりも大電流側で得られる。0.63 μm 波長だけが必要な場合が多くかつ出力を大きくしたい場合には適当な手段で $g_0(3.39\mu)$ を小さくして $g_0(0.63\mu)$ を大きくするのが有効である。 $\Delta\nu_D(3.39\mu)\sim 280\text{ MHz}$, $\Delta\nu_D(0.63\mu)\sim 1,500\text{ MHz}$ であるからレーザ管軸方向に不均一磁界 (約 200 G) を印加する⁽¹¹⁾ と、 $g_0(3.39\mu)$ は著しく低下して $g_0(0.63\mu)$ が大きくなり $P(0.36\mu)$ の増加が達成できる。

図 3.9 は磁界印加の効果を示したものである。 $I=11\text{ mA}$ では $P(0.63\mu)$ のみであるが、 $I=13\text{ mA}$ では $P(3.39\mu)$ が得られ、かつ $\Delta\nu_C(d=460\text{ mm})\sim 330\text{ MHz}$ であるため、3.39 μm は単一軸モードで発振して Lamb dip⁽¹²⁾ が観測される。さらに I を増加すると $P(0.63\mu)$ は減少し $P(3.39\mu)$ は増加するが、磁界印加により $P(0.63\mu)$ の急激な増加が見られる。HN-形レーザには最適磁石を内蔵してレーザ出力の増大と出力変動の減少をはかっている。

3.2.6 出力安定性

レーザ機構部の消費電力は使用するレーザ管によって異なるが、放電電力、ヒータ電力、安定抵抗消費電力合わせて数十 W 程度である。このため機構部に熱的変形を生じて共振器間隔と角度変動を与えて出力変動を生ずる可能性がある。HN 形レーザではスーパーアンバーを用いてこれらの変動をきわめて小さくしている。さらにダストシールドおよび磁石の併用によりレーザ出力の安定化をはかっている。図 3.10 は HN-050 の出力の時間的変化を示したものである。起動後 30 分間程度は機構部の温度上昇のために出力変動が認められるが、以後は温度平衡に達して出力が安定になり変動は 2 % 以内になる。またビームの方向性も出力の安定性と同等にきわめて安定になっている。

3.2.7 Uniphase モード

実用的には uniphase モード出力が必要な場合が多い。2.2 節で述べたようにレーザ管径と共振器を適当に選択すればレーザ出力の減少があまりなく uniphase モードにすることができる。表 3.2 に uniphase モード選択に必要な反射鏡の曲率および広がり角を記した。レーザ出力は多重モードの場合の 70 % 程度が得られている。

3.2.8 レーザ光の電源変調

図 3.6 の入出力特性から容易に推測されるように、電流変調に

よりレーザー光出力を変調することができて簡単に変調レーザー光が得られる。レーザー出力が最大になる最適電流値よりも小さい電流領域で変調するほうが電力が小さくてよいが、低電流では管電圧が高く放電が不安定になるのであまり電流を小さくできず変調度を大きくできない。最適電流値よりも大きい電流領域で変調すれば変調度が大きく(100%)安定である。図 3.11 は電流変調によるレーザー出力変調の周波数特性を示したものである。

3.2.9 寿命

一般に小形レーザー管のほうが大形レーザー管よりも寿命(現在明確な定義はまだないようであるが出力が初期値の半分になる時間としておく)が長く、実績 1,000 時間以上である。管容積の増大と最適ガス圧力よりも大きいガス圧力で封入することはレーザー管の長寿命化に効果がある。内部鏡形レーザー管(レーザー管の両端に反射鏡を取りつけたレーザー管)では反射面がイオンや電子衝突により劣化するためブリュスタ窓付レーザー管よりも寿命は短い。

3.3 応用

各種光学系のアライメント、粒子径測定装置、ラマン分光分析装置、レーザー応用無接触な装置⁽¹³⁾などの光源として当社においてすでに応用しているが、ライナー(直線度探知機)・精密測距・簡易通信・速度計・ホログラフィーの光源としても応用できる。

He-Ne レーザーは小形軽便であり、出力光は赤色で眼に見えてしかも広がり角が小さく指向性が良いため、光学機器や光学系のアライメントには最適である。単色性と高輝度の特長を利用して、ラマン分析装置やなげ装置の光源として応用したものである。レーザー光の指向性を利用すれば精密な直線度探知機や変調器を併用して精密距離測定機・簡易通信用の光源として有力である。レーザー光のコヒーレンスを用いれば物体からの反射光の振幅と位相の情報をうることができ、いわゆるホログラム作成・再生をおこなうことができる。

4. イオンレーザー

4.1 構成

イオンレーザーはレーザー管・共振器・機構部・電源から構成される外部鏡形レーザー装置であるが、大電流励起を必要とするので水冷および風冷するようになっている。製作したレーザー管は IT-020, IT-050 でレーザー装置は IGL-100 である。IGL-100 イオンレーザーの概略を図 4.1 に、実験中のレーザー管 IT-050 を図 4.2 に示す。

4.1.1 レーザー管

(1) 構造

イオンレーザーは Ar^+ , Kr^+ などのイオン準位を用いたもので、励起状態を作り出すために数〜数十 A の電流が必要である。IT-020, IT-050 レーザー管は $L_0=200, 500 \text{ mm}$, $2r=2\phi \text{ mm}$ の溶融石英製細管を有効放電領域としてその外側に円筒水冷管を持ち許容電流を大きくできるようにしている。ブリュスタ窓板を細管末端から離して取り付けて温度上昇による影響を避けているので L は L_0 よりもかなり大きい。大電流放電のためカタホルシス効果が大きく細管部のガス圧力が一定でなくなるので、陽極陰極間に側路を付けてこれを防いでいる。ガスの管壁への吸着が大きいので管内容積を大きくすること、管材料の選択が重要である。このため電極部を大きくしてガスだめとして利用している。

(2) ブリュスタ窓

He-Ne レーザー管とまったく同じ性質が要求され、とくに違ったところはない。

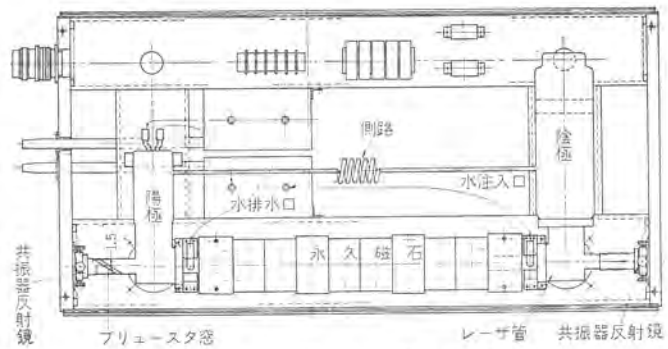


図 4.1 イオンレーザー (IGL-100) の構造概略
Construction schema of ion laser of type IGL-100.

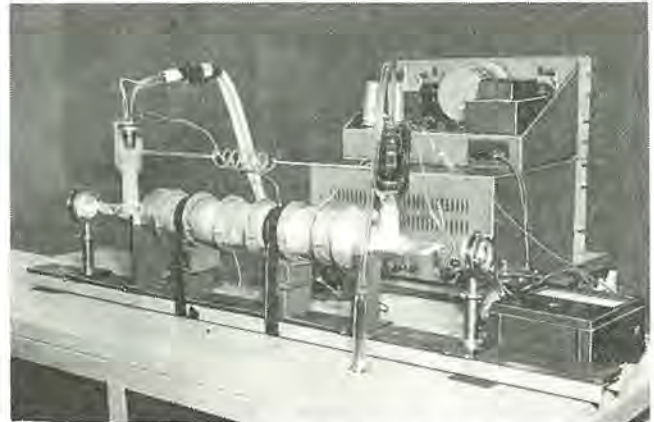


図 4.2 Ar^+ レーザー管 (IT-050) 外観
Exterior view of Ar^+ laser tube (IT-050).

(3) 電極

陽極は無酸素銅、陰極は大電力管用 Impregnated-cathode を使用した。ヒータ電力は約 125 W ($5 \text{ V} \times 25 \text{ A}$) で許容電流は 20 A 以上である。

(4) 管の製作

Ar ガス封入で放電したレーザー管に Kr ガスを封入して放電させると、長時間 Ar ガスの放出が認められ、逆の場合も同様でありガスの管壁吸着の大きいことがわかる。高温ベキング・放電洗浄を十分おこなった後に最適ガス圧でガス封入をおこない管を製作している。

4.1.2 共振器

使用している反射鏡は $R=604 \cdot 1080 \cdot 2500 \cdot 5000 \text{ mm} \cdot \infty$ で、

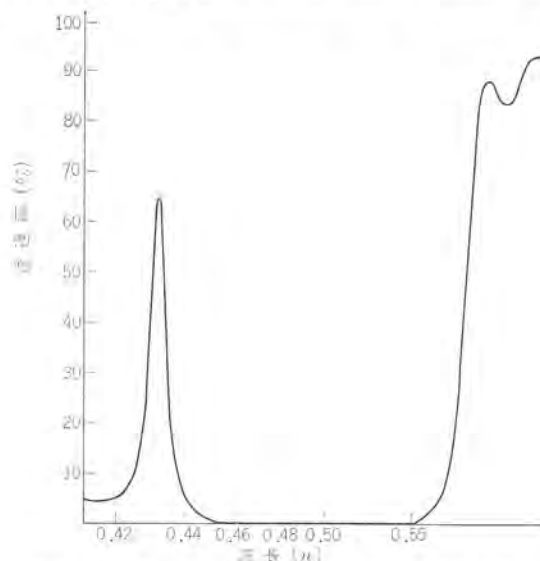


図 4.3 Ar^+ レーザー用共振器の分光透過率
Spectral transmission of resonator for Ar^+ laser.

その分光透過率特性を図 4.3 に示す。Ar⁺ レーザ波長で全反射側は ~100 %，出力取り出し側は ~94 % (呼称反射率) である。反射率の技術的問題点は He-Ne 用反射面と同じである。イオンレーザの g_0 が大きく最適反射率は低くなる (式 (2.4))。

4.1.3 レーザヘッド

機構は He-Ne レーザと同じものが必要であるが，イオンレーザ管はかなり大きいので，スペーサロッドを用いず装置基台に共振器支持具を取り付けている。レーザ管の細管は水冷しているがヒータ電力・放電電力がかなり大きいのでファンで冷却している。レーザ管の水冷管に同心状ツレノイドコイルまたは永久磁力を取り付ける支持台を備えている。

4.1.4 磁石

レーザ管軸方向に磁界を印加してイオン密度を増加するとレーザ出力が増加することが知られている⁽¹⁴⁾。このため約 1,500 G まで発生できるツレノイドコイルまたは 1,200 G の永久磁石を用いた。

4.1.5 電源

レーザ管の電気的特性から，イオンレーザ用電源は無負荷電圧約 1 kV・電流容量 20 A_{max} でトリガー電圧発生回路・ヒータトランスを備えている。

4.2 特性

Ar⁺ イオンレーザ IGL-100 の諸特性について述べる。

4.2.1 発振波長

図 4.3 の反射鏡を使用した場合のレーザ発振波長は放電電流によって変わるが，4579, 4765, 4880, 4965, 5017, 5145 Å⁽²⁾ であり，とくに 4880 Å ($4p^4 D^{\circ}_{3/2} \rightarrow 4s^2 P_{3/2}$) (青) と 5145 Å ($4p^4 D^{\circ}_{5/2} \rightarrow 4s^2 P_{3/2}$) (緑) が強い。図 4.4 に放電電流 15 A・磁界 1,000 G で全出力 1 W のときの発振スペクトルを示す。

4.2.2 レーザ管の電気的特性

レーザ管の電気的特性は管構造， L_0 , r , ガスの種類，ガス圧力，印加磁界によって異なる。IT-050 に Ar ガスを最適ガス圧力 (0.5 Torr) 封入したときの特性を図 4.5 に示す。放電開始電圧は 850 V，起動にはトリガー電圧 (10 kV) が必要である。

4.2.3 レーザ管の入出力特性

Ar⁺ レーザの全出力 P_T は放電電流 I を増加すると非線形的に増加し， P_T の飽和は $I=18$ A までは認められない。0.5 Torr 封入の IT-500 における P_T と I の関係を図 4.6 に示す。共振器は $R=1080$ ，反射率 100-94 % である。図から $P_T \propto I^{3.5}$ の関係があることがわかる。

各発振波長のレーザ出力 P_λ の I 依存性は P_T-I の関係とは異なり，図 4.7 に示すようになる。 $I < \sim 12$ A では $P(0.48 \mu)$ が強く， $I > \sim 13$ では $P(0.51 \mu)$ が強くなることがわかる。

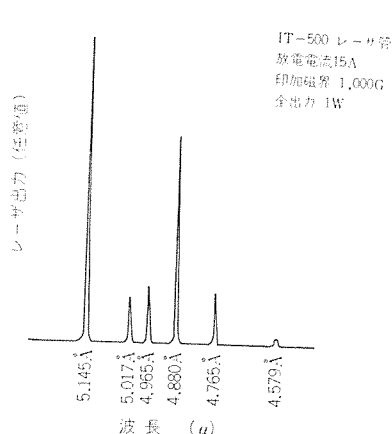


図 4.4 Ar⁺ レーザの発振スペクトル
Output spectra of Ar⁺ laser.

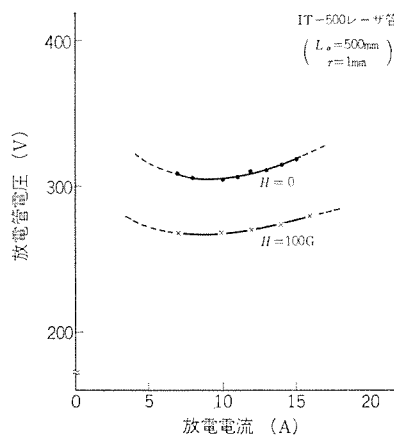


図 4.5 Ar⁺ レーザ管 (IT-050) の電気的特性
(磁界印加・無印加時)
Electrical characteristics of Ar⁺ laser tube of type IT-050 (with and without magnetic field).

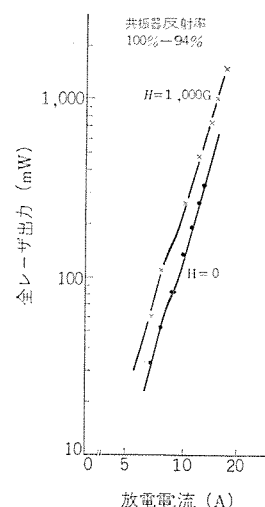


図 4.6 Ar⁺ レーザ (IGL-100) の入出力特性
(磁界印加・無印加時)
Output-discharge current characteristics of Ar⁺ laser of type IGL-100 (with and without magnetic field).

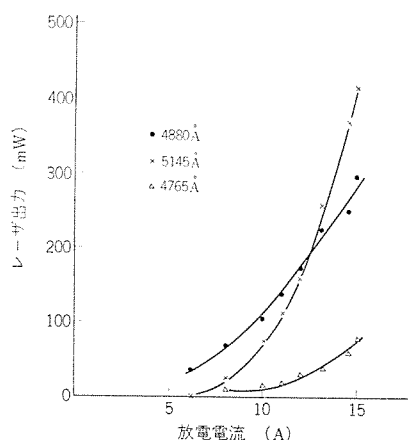


図 4.7 Ar⁺ レーザの分光出力-入力特性
Spectral output-discharge current characteristics of Ar⁺ laser.

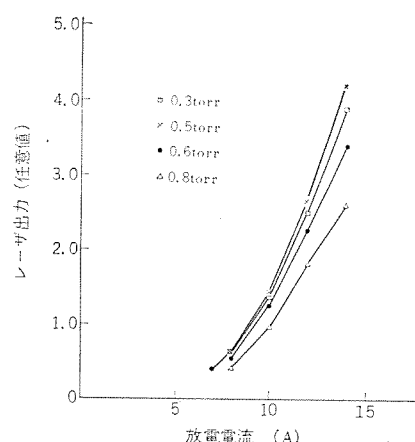


図 4.8 Ar⁺ レーザ出力のガス圧依存性
Output dependence of Ar⁺ laser on filled gas pressure.

4.2.4 出力の増大

(1) 最適ガス圧力⁽¹⁵⁾

Arガス圧力をパラメータにして P_T の I 依存性を測定すれば最適ガス圧力を決定できる。図4.8はガス圧力による出力変化の測定結果を示し、これから最適値は0.5 Torrであることがわかる。

(2) 磁界の効果⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾

レーザ管軸方向に磁界を印加するとレーザ出力は大幅に増大する。図4.6に磁界印加時の出力を示したが、無印加時の約1.5倍になっていることがわかる。 r が3φmmのときには4~5倍の効果が認められる。最適磁界を決定するためにはソレノイドコイルがよいが、磁界決定後は実用的な永久磁石を使用している。

(3) 許容電流の増大

図4.6からわかるように I を大きくすれば P_T は $I^{3.5}$ で大きくなり、 I を大きくすることが重要である。高熱伝導度製管の使用、磁界印加により I が増大できて高出力が期待できる。

(4) 最適反射率

イオンレーザの g_0 は I により大きく増加するので T_{opt} (2.4)も変化する。 P_T を最大にするためには T_{opt} の反射率を使用しなければならない。現在は94%反射鏡を使用している。

4.2.5 Uniphase モードと波長選択

Uniphase モードは2章で述べた共振器配置を使用すればよく、IT-050では $R=5,000$ と ∞ の共振器で得られる。

Ar⁺レーザは6本のスペクトルで同時発振しているが、単一波長のレーザが必要な場合には溶融石英製ブリュスタ角プリズムを共振器内へそう入して波長選択をすることができる。

4.2.6 Kr⁺レーザ

IT-050 Kr⁺レーザ管の電気的特性は放電開始電圧約600 V、放電管電圧200 VでAr⁺に比べて低い。Ar⁺レーザ用共振器を用いた場合の発振スペクトルは0.46~0.52 μ で6本⁽²⁾であり、 $I=15$ Aで $P_T=150$ mWである。Kr⁺用共振器を使用すれば0.56~0.64 μ で P_T

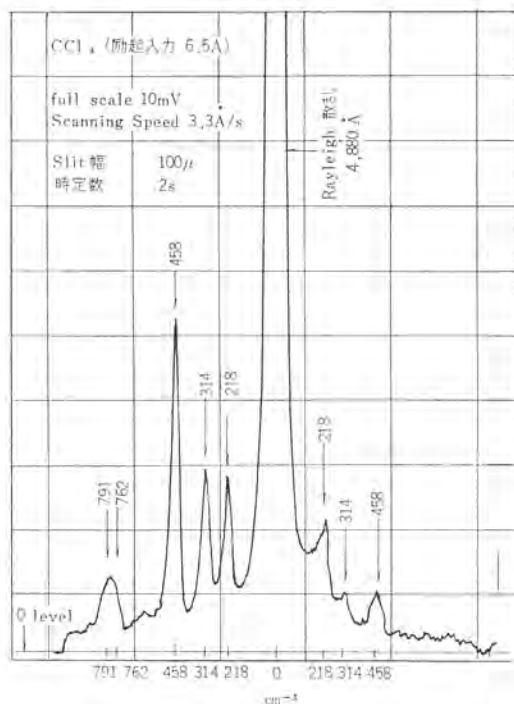


図 4.9 Ar⁺レーザ線 4,880 Å による CCl₄ のラマンスペクトルの一例
Example of Raman spectra of CCl₄ excited by 4880 Å line of Ar⁺ laser.

も大きい。

4.3 応用

Ar⁺レーザ光は He-Ne レーザ光よりも波長が短かく出力もけた(桁)違いに大きく、ラマン分光分析装置用光源として最適である。図4.9は0.48 μ レーザ光による CCl₄ のラマン散乱光の測定結果を示したもので、ストークス線・反ストークス線が容易に観測されることがわかる。高出力特性はホログラム・フォトリソ・光合成・物性研究などの光源としても有望である。また Kr⁺レーザは赤・黄・緑・青色光の同時発振ができるのでカラーディスプレイやカラーホログラフの光源として有望である。

5. CO₂ レーザ

5.1 構成

CO₂レーザはレーザ管とこれに取り付けた調整可能な共振器、ガス導入および排気装置、電源から構成されている。製作したレーザ装置は管長 (cm)・管径 (mm) 表示で、CO 2-300-44, CO 2-200-19, CO 2-100-19 の内部鏡形と CO 2-100-19-E の外部鏡形である。図 5.1 に CO 2-300-44, 100-19, 100-19-E の外観写真を示す。

5.1.1 レーザ管

(1) 構造

CO 2-300-44, CO 2-200-19 のレーザ管は共振器間隔 300, 200 cm, 内径 44, 19 mmφ のパイプ 2 重管構造をしており外管は水冷をするためのものである(図 5.2)。両端にはフランジ(I)・ベローズ・フランジ(II)が接合されていて、フランジ(I)を光学ベンチに固定し、これを基準として反射鏡を取り付けたフランジ(II)を微動して角度調整をおこなう。主管に側管を設けてステンレス製のホローカソードを取



図 5.1 CO₂レーザ装置の外観 (CO 2-300-44, -100-19)
Exterior view of CO₂ laser equipments of type CO 2-300-44 and -100-19.

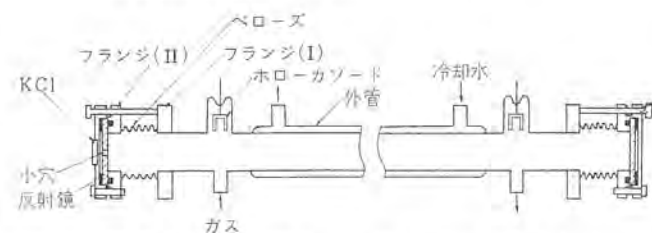


図 5.2 CO 2-300-44 レーザ管の構造概略
Construction schema of laser tube of type CO 2-300-44.

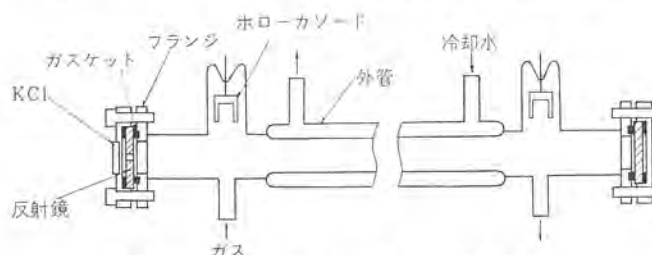


図 5.3 CO 2-100-19 レーザ管の構造概略
Construction schema of laser tube of type CO 2-100-19.

付けた。有効放電長は 252, 176 cm である。

CO 2-100-19 のレーザ管は共振器間隔 100 cm, 内径 19 mmφ のパイレックス製 2 重管構造である (図 5. 3)。パイレックス管の両端はフランジタイプになっていてネオプレン角形ガスケットの弾性で共振器の角度調整をおこなう。有効放電長は 77 cm である。CO 2-100-19-E のレーザ管は両端にブリュスタ窓 (KCl) を付けている以外は CO 2-100-19 とまったく同様である。これは CO₂ レーザのジャイアントパルス発生実験用のものである。

(2) 共振器

共振器反射鏡の曲率半径は $R=320$ cm (CO 2-300-44), 270 cm (CO 2-200-19), 200 cm (CO 2-100-19) を用いた。いずれも面精度 λ_D 程度であり, 反射面は金の真空蒸着膜である。

反射鏡はパイレックス製であるため CO₂ のレーザ波長 (10.6 μ) では吸収が大きく出力が外部へ取出されない。このため出力取出し側反射鏡に孔をあけ, 赤外透過材 KCl (透過率 95 %) を高真空接着剤で取付けた。

(3) 封入ガス

CO₂ レーザの出力増大には N₂, He ガスを混合して用いることが有効であることが報告されている⁽¹⁶⁾。最適ガス組成決定後はその組成ですでに混合されたボンベ (120 気圧, 3.6 l) 入りガスを使用した。

5. 1. 2 ガス導入および排気装置

CO₂ 分子は放電励起により分解しやすく, 封じ込みレーザ管の寿命は短いといわれている。この欠点を改良する方法も提案されているが⁽¹⁷⁾, 本報告の装置はガスフロー (flow) を採用しているため, 最適組成ガス封入ボンベ・ガス導入系・排気装置を備えている。

5. 1. 3 電源

CO 2-300-44 には 60 Hz 交流電源 (20 kV_{max}, 200 mA_{max}), CO 2-200-19 には直流電源 (20 kV_{max}, 100 mA_{max}, リップル 5 %), CO 2-100-19 には直流電源 (20 kV_{max}, 60 mA_{max}, リップル 10 %) を使用した。トリガー電圧は不要である。

5. 2 特性

5. 2. 1 発振波長

CO₂ レーザの発振波長は $\sim 10.6 \mu$ で $\Sigma_u^+(00^21) \rightarrow \Sigma_g^+(10^20)$ の遷移に相当することが知られている⁽¹⁸⁾。この波長はちょうど大気中のガスの吸収帯がないところにあり, このため CO₂ レーザの利用価値が高くなっている。

5. 2. 2 レーザ管の電気的特性

レーザ管の電気的特性はレーザ管・ガス組成・ガス圧力によって異なる。ほぼ最適ガス組成 (CO₂ : N₂ : He = 1 : 2.9 : 14.6) で最適ガス圧力近くの圧力で封入したときの CO 2-300-44, CO 2-100-19 のレーザ管の電気的特性をおおの図 5. 4 a および b に示す。

5. 2. 3 出力の増大 (混合ガス組成と全圧力の最適値)

CO 2-300-44 により混合ガス組成と全圧力の最適値を実験的に求めた。

(1) CO₂-N₂ 混合ガス

CO₂-N₂ の 2 成分の分圧を両軸とする平面上に等出力線を描くと図 5. 5 のようになる。なお出力は最適放電電流のときの相対値である。図 5. 5 から最適組成は CO₂ : N₂ = 1 : 2.5 ~ 3 であり, 全圧力 1.8 Torr で CO₂ 分圧が 0.5 Torr であることがわかる。

(2) CO₂-N₂-He 混合ガス

CO₂ : N₂ = 1 : 3 に固定した混合ガスに He の混合比を変えて出力の変化を調べた。図 5. 6 は He の混合比をパラメータにして全圧

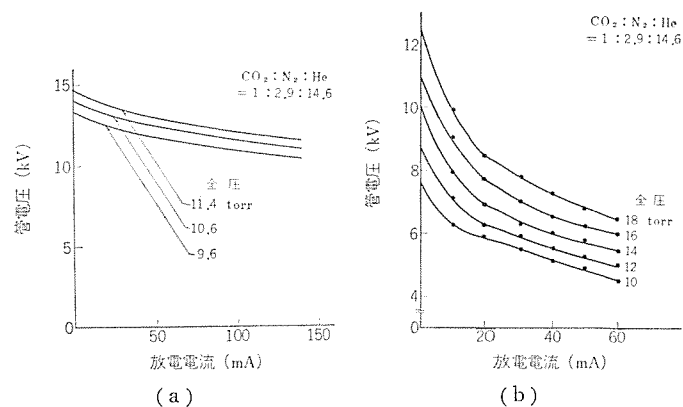


図 5. 4 CO₂ レーザ管の電気的特性 (a) CO 2-300-44, (b) CO 2-100-19.

Electrical characteristics of CO₂ laser tubes of (a) CO 2-300-44 and (b) CO 2-100-19.

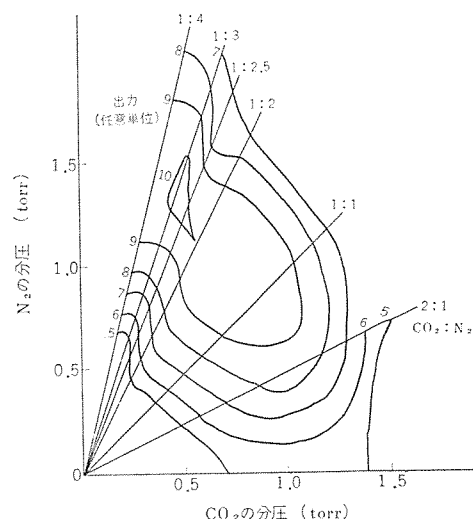


図 5. 5 CO₂-N₂ 成分系の等出力線
Lines of equal output power of CO₂-N₂ system.

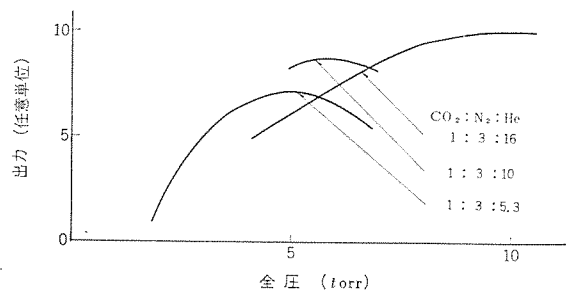


図 5. 6 CO 2-300-44 の全圧と出力
Output power vs. total pressure in type CO 2-300-44.

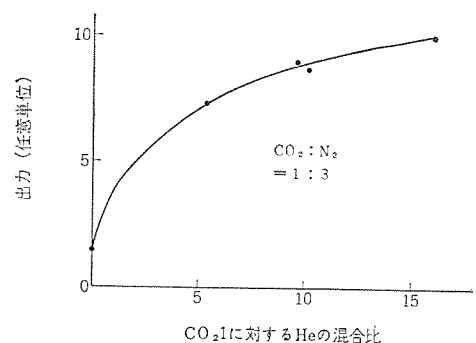


図 5. 7 He の混合比と出力
Output power vs. mixing ratio of He.

力と出力の関係を示し、図 5.7 は He の混合比に対する出力の関係を示す。図 5.6 から CO_2 の分圧は 2 成分のときと同じく 0.5 Torr であること、図 5.7 から He 混合の出力に与える効果が大きいこと、混合比 10 以上では徐々に効果が一定になってきて 15 以上で飽和してきていることがわかる。

N_2 の混合効果は CO_2 レーザ波長の上位準位の選択励起であり⁽¹⁰⁾、He の混合効果は下位準位の緩和時間の短縮であると説明されている⁽³⁰⁾。

5.2.4 入出力特性と効率

最適ガス組成 ($\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 2.9 : 14.6$) で全圧力を最適値近くで封入したときの放電々流とレーザ出力の関係を図 5.8 (a) ($\text{CO} 2-300-44$)、および (b) ($\text{CO} 2-100-19$) に示す。出力取り出し孔はおおの 11 ϕ , 4 ϕ である。 $\text{CO} 2-300-44$ では全圧力 9.6 Torr のとき放電々流 100 mA で最大出力 100 W、 $\text{CO} 2-100-19$ では 18 Torr のとき 30 mA で 25 W を得た。

レーザ装置の効率 (レーザ管の管電圧と放電々流で決まる電力とレーザ出力の比) と放電々流の関係を図 5.9 (a) ($\text{CO} 2-300-44$)、および (b) ($\text{CO} 2-100-19$) に示す。最大レーザ出力をうる放電々流と最大効率をうる放電々流値は必ずしも一致しない。

5.2.5 出力安定性

$\text{CO} 2-100-19$ に最適組成混合ガス ($\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}$) を $0.24 \text{ l} \cdot \text{atm} / \text{min}$ でフローしたときの、レーザ出力の時間的変動を調べた結果を図 5.10 に示す。放電開始後 30 分間程度までは出力変動が認められるが、以後の変動はかなり小さくなる。 $\Delta \nu_D (\text{CO}_2) \sim 50 \text{ MHz}$ で、

$\Delta \nu_C \sim 150 \text{ MHz}$ であるから初期の変動は共振器長の温度変化によって、異なるスペクトル (振動一回転準位が多いため) で発振していると考えられる。出力安定性を良くするには共振器長の温度制御・放電々流の安定化が必要になる。

5.2.6 ビームの広がり角

モードパターンの観測により広がり角は約 6 mrad であった。 λ が大きくて w, θ は同じ管長の He-Ne・Ar レーザに比べて大きい。

5.3 応用

CO_2 レーザは他のレーザでは得られない高出力と高い効率を持っている。100 W のレーザ光を反射鏡で集光しスポット径が 1 mm ϕ であれば電力密度は 10^4 W/cm^2 にもなり高融点材料 (耐火物) の加工も容易である。図 5.11 (a) は溶融石英を集光したレーザ光で加工中の様子を示しており、図 5.11 (b) は切断加工した溶融石英リングを示す。今後は加工溶接・穴あけ装置のほか検出器の開発研究が進めばレーザ通信の有力な光源となると考えられる。

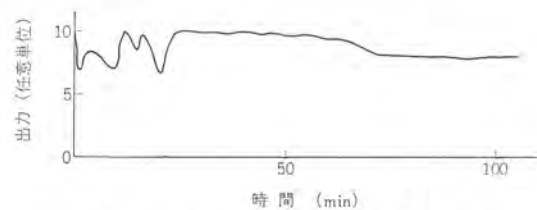
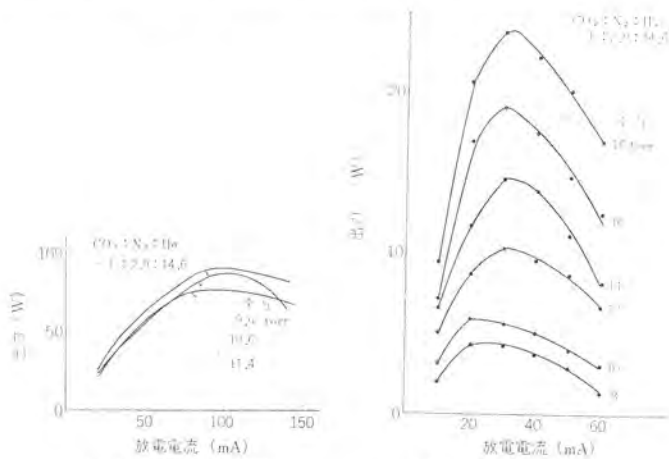
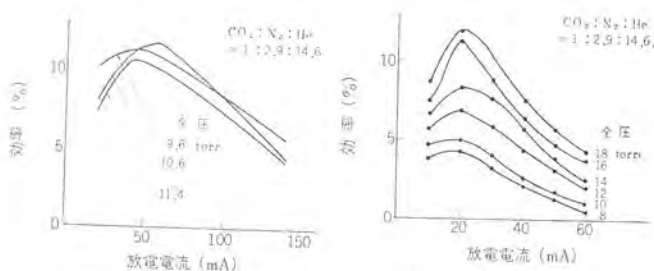


図 5.10 $\text{CO} 2-100-19$ の出力変動
Variation of output power of type $\text{CO} 2-100-19$.



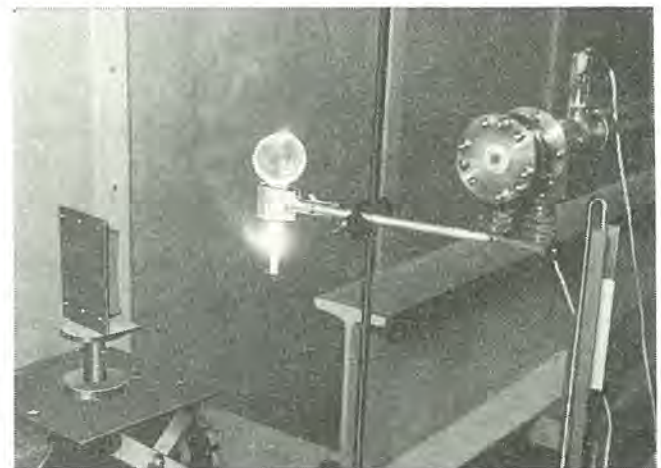
(a) $\text{CO} 2-300-44$ (b) $\text{CO} 2-100-19$

図 5.8 CO_2 レーザ入出力特性
Output-discharge current characteristics of types of CO_2 lasers.

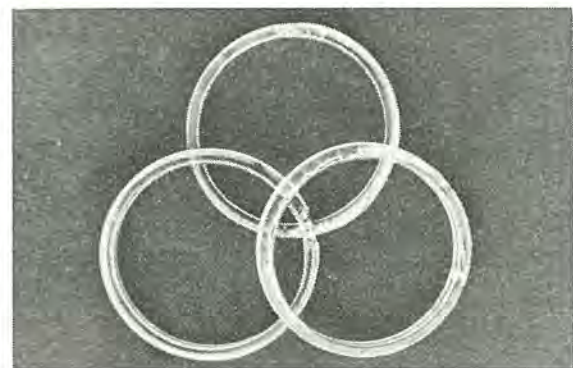


(a) $\text{CO} 2-300-44$ (b) $\text{CO} 2-100-19$

図 5.9 CO_2 レーザの効率
Efficiencies of CO_2 laser.



(a)



(b)

図 5.11 溶融石英の加工 (a) 実験と (b) 切断リング
Machining of fused quartz by CO_2 laser beam.
(a) experiment and (b) cut ring.

6. む す び

He-Ne レーザ (HN-050) で 3 mW 以上, 大形で 50 mW 以上, Ar⁺ イオンレーザ (IGL-100) で 1.5 W 以上, CO₂ レーザ (CO₂-100-19) で 25 W 以上, 大形で 100 W 以上のレーザ出力を得た。とくに HN-050 は小形・軽便・高安定 uniphase モードで利用価値が高いと思われる。ガスレーザの出力特性 (レーザ出力・ビーム特性・出力およびビーム方向安定性・寿命など) はレーザ管 (構造・ガス組成・ガス圧・ブリュースタ窓材料・電極)・共振器 (曲率半径と配置・反射率)・機構部 (レーザ管, 共振器の固定支持法) やその他の条件 (磁界印加・ダストシール使用) により影響されることを示し, これらの効果の試験結果を述べた。さらに高出力・高安定・長寿命の実用装置を目標としてレーザ管の構造とその要素および機構部の改良に努めているが, 応用機器の光源として必要十分な特性を満足するガスレーザの開発研究をすすめている。なおレーザの応用に関しては本誌の詳細な解説⁽²¹⁾を参照願いたい。

参 考 文 献

(数が多いのでごく一部のみにとどめた)

- (1) A. Javan, W. R. Bennett, Jr., and D. R. Herriott : Phys. Rev. Letters, 6, 106 (1961)
- (2) W. R. Bennett, Jr., Appl. Opt. Supplement on Chemical Lasers, 3 (1965)
- (3) A. G. Fox and Tingye Li : Bell System Tech. J., 40, 453 (1961)
- (4) G. D. Boyd and J. P. Gordon : ibid., 40, 489 (1961)
- (5) G. D. Boyd and H. Kogelnik : ibid., 41, 1,347 (1962)
- (6) W. R. Bennett, Jr. : Appl. Opt. Supplement 1, 24 (1962)
- (7) C. G. B. Garrett : Gas Lasers (1967), McGraw-Hill Book Company.
- (8) 小倉 : 応用物理, 36, 739 (昭-42)
- (9) Douglas C. Sinclair : Appl. Opt., 3, 1,067 (1964)
- (10) E. I. Gordon and A. D. White : Appl. Phys. Letters, 3, 199 (1963)
- (11) W. E. Bell and A. L. Bloom : Appl. Opt., 3, 413 (1964)
- (12) W. E. Lamb : Phys. Rev., 134, 1,429 (1964)
- (13) S. Ando, et al : Appl. Opt., 5, 1,961 (1966)
S. Ando, et al : IEEE J. of Quantum Electronics, QE-3, 576 (1967)
- (14) E. F. Labuda and E. I. Gordon : IEEE J. of Quantum Electronics, QE-1, 273 (1965)
- (15) I. Gorog and F. W. Spong : RCA Rev., 28, 38 (1967)
- (16) C. K. N. Patel, P. K. Tien, and J. H. McFee : Appl. Phys. Letters, 7, 290 (1965)
- (17) W. J. Wittenman : Appl. Phys. Letters, 11, 337 (1967)
- (18) C. K. N. Patel : Phys. Rev., 136, A 1,187 (1964)
- (19) C. K. N. Patel : Phys. Rev. Letters, 13, 617 (1964)
- (20) P. K. Cheo : J. Appl. Phys., 38, 3,563 (1967)
- (21) 安東 : 三菱電機技報, 42, No. 7, No. 8, No. 9 (昭 43)

滴下処理用絶縁ワニス (DRV) の特性

柴山 恭一*・鈴木 康弘**

Properties of New Insulating Varnishes Designed for Drip Method

Central Research Laboratory Kyoichi SHIBAYAMA・Yasuhiro SUZUKI

A drip or trickle method for a varnish treatment of rotating machines ranging from small to large sizes is now highlighted because the processing time can be cut down dramatically compared with the conventional impregnation method. Varnishes used for the drip method are required to have properties mentioned below : rapid curing, good penetration, superior electrical and mechanical character at a cured state and low cost.

A series of solventless varnishes (DRV) specially designed for the drip method has been developed recently. This article describes the design philosophy and excellent performance of DRV varnishes.

1. ま え が き

小形回転機の製造体系は長い歴史を経て進歩し、過去においてすでに完成した形をもっていた。したがってこの分野で競合者に対し優位を占めるためには、これまでの壁を破って製造工程を合理化することが重要な要素になる。回転機の製造工程中とくに長時間を要するのは巻線後のワニス処理工程であって、工場内に大きな面積を占有し、高熱や不快蒸気など改善に対する要求度の高い作業が行なわれていた。

これに対し、各種の点で高度に能率化された滴下絶縁処理が数年前から、欧米をはじめわが国でも急速に実用化が進められているのは当然の経過といえよう。滴下絶縁プロセスについては、すでに各所に公表されており^{(1)~(4)}詳しく述べる必要はないが、これまでの含浸処理に比べ 1/10 程度の時間で処理が完了することが最大の特長で、不必要な部分にワニスが付着しないことや、装置の小形化による加熱コストの節減などの副次的な効果がある。

滴下絶縁を現実的な工作法として採用しうるかどうかはその工場の現有設備、生産量、機種などに由来する固有の事情と処理に使用しうるワニスの性能によって定まる。滴下処理に関してはよく自動化された処理装置が市販されているが、上記のように各工場の特殊性があるので、これに合わせて設備とプロセスに各種の変形法をくふうする余地が十分にある。盲目的に定形にとらわれない柔軟な考え方を必要がある。この点について方針が定まればあとはいかに優秀なワニスを使用するかによって勝負が定まる。

滴下法にふつう使用されるワニスは、無溶剤系のエポキシまたは不飽和ポリエステル樹脂であるが、最近の傾向として不飽和ポリエステルのほうが優勢になっている。ワニスに関しても^{2, 3}の市販品があるが、これまでのプロセスで各種の目的に使用されていた含浸ワニスを置き換えるための品種の多様性は、まだ十分ではなく性能や価格の点でもすべての目的に満足とはいえない。われわれは滴下絶縁処理方式が将来いっそうさかんになることを予想して、この方式に適したワニスの研究を数年にわたって行なった結果、一連の滴下絶縁用ワニス (DRV シリーズ) を開発することができた。表 1. 1 に代表的な DRV ワニスと参考例 (不飽和ポリエステル) を示した。

開発に際して目標としたことは、滴下絶縁のプロセス上のメリットを十分発揮しうる作業適性を備えることと、プロセスの特長をさらに積

表 1. 1 各種滴下用ワニス
Varnishes of drip method.

ワニスの種類	備 考
DRV-100	硬質系
DRV-110	硬質系
DRV-111	中硬質系
DRV-200	軟質系
DRV-210	軟質系
DRV-220	軟質系
PE-A	硬質系、米国製ポリエステル
PE-B	中硬質系、西独製ポリエステル
PE-C	軟質系、西独製ポリエステル

表 1. 2 不飽和ポリエステルとエポキシ樹脂の長短の比較
Characteristic features of polyester and epoxy resins.

特 性	不飽和ポリエステル		エポキシ	
	特 長	判 定	特 長	判 定
粘 度	低	○	高	×
可 使 時 間	長	○	短	×
硬 化 速 度	速	○	遅	×
硬化時の欠陥発生度	大	×	小	○
高温電気特性	優	○	劣	×
基材との付着性	小	×	大	○
耐 薬 品 性	低	×	高	○

極的に生かして、処理後の性能に関してもこれまでのワニスより一段すぐれたものにすることの2点である。ふつうに用いられるエポキシと不飽和ポリエステルの長短は、表 1. 2 のように示される。DRV ワニスは両者の長所を採り、欠点を排除した現段階で極度に合理化された無溶剤ワニスを目指すものである。以下に滴下作業に関係のあるワニス特性と硬化後の諸特性について紹介する。

2. ワニス特性

予備加熱された被処理物体にワニスを滴下した際、ワニスは物体上で十分の流動性と浸透性をもって微細な間隙(隙)まで完全にみた

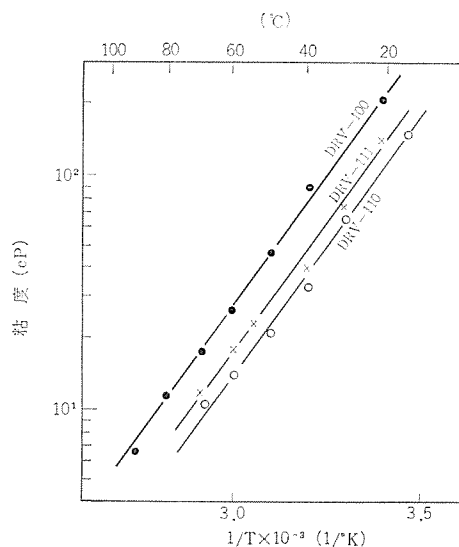


図 2.1 粘度-温度関係
Viscosity vs. temperature relations.

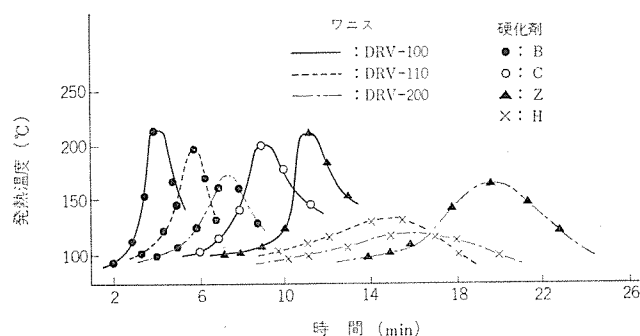


図 2.2 ギャル化特性 (100°C シリコン油浴)
Effects of hardeners on polymerization exotherms.

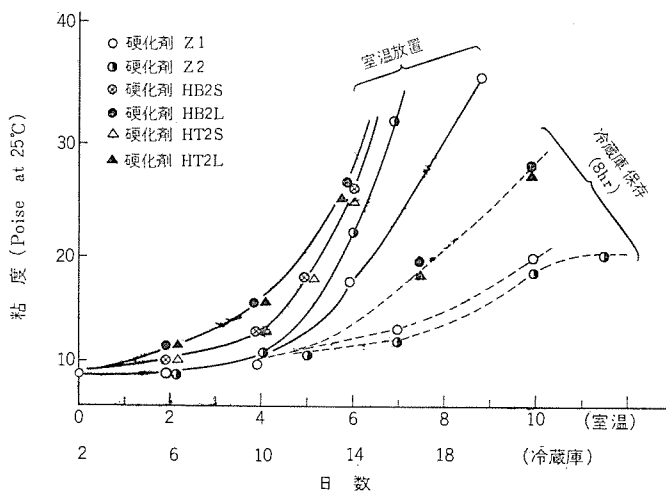


図 2.3 DRV-110 の粘度変化におよぼす硬化剤の影響
Effects of hardeners on viscosity changes of DRV-110 during storage.

することが必要である。そして必要な部分にワニスが供給された時点では、すでに硬化がある程度進んで流動性を失っており、その後できるだけ短時間のうちに硬化が完了することが、処理の速度とワニスの使用効率を高めるために必要である。

図 2.1 に粘度の温度特性を一部について例示した。通常の液状高分子や樹脂溶液ととくに変わったものではないが、実験の結果では 0.2 mmφ 程度のマグネットワイヤのつくる間げきに速かに浸透するためには、数十 cp 以下の粘度であればよく、DRV ワニスは広い予

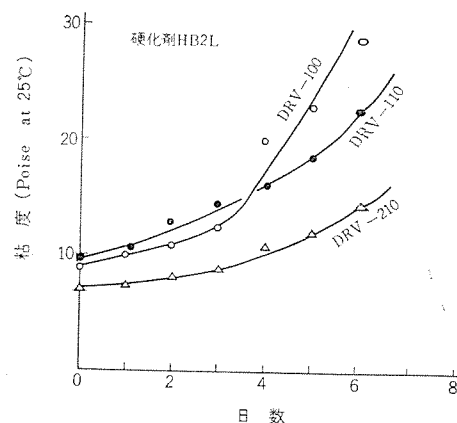


図 2.4 硬化剤添加ワニスの粘度変化
Viscosity changes of catalyzed varnishes during storage.

熱温度範囲に対し適合できるように調節が可能である。

滴下処理ワニスとして最も重要なのは硬化特性である。1 章で述べたように、対象によって最適条件はかなりの範囲で異なることを前提とするのが現実的であり、硬化速度もただ早ければ早いほどよいとはかぎらない。各種の場合に対処してある範囲で調節できることが望ましい。図 2.2 に示したように、DRV ワニスは硬化剤の選択によって広い範囲に硬化特性を調節できる。対象となる回転機の大きさ、コイルの形状・材質、工場の諸条件から定められるプロセスの内容などによって、図 2.1 の流動特性と図 2.2 の硬化特性の組み合わせを選択すればよい。

次に問題になるのは硬化剤を加えてからの可使時間である。図 2.2 にはかなりおそい硬化速度の例も示したが、一般的には速硬化形を使用する機会が多いので可使時間はそれほど長くはできない。

滴下処理は浸漬処理とはちがって、滴下直前に小容量の混合室で主剤と硬化剤を所定量計量混合してもよいわけで（自動装置が使われる）、可使時間の非常に短いものも使用できる。原理的には実際に付着する以上の量のワニスを用意する必要はないわけであるから、作業の区切りの時間（ふつう 1 日）より可使時間が長ければ自動計量混合機は不要であり装置は簡単になる。図 2.3、2.4 に示したように、DRV ワニスは夏季でも 3 日間可使範囲にある。夜間だけ 5°C に冷蔵すれば、約 15 日間顕著な粘度変化はない。通常のエポキシ樹脂に比べて、可使時間がこのように長いことが、装置的には切りつめたものによってもゆりの多い作業を可能にしている。

3. 硬化ワニスの力学的性質

絶縁ワニスを構成する高分子物質は特異な力学的性質をもっており、逆に力学的性質からその高分子の内部構造を特長づけることが可能である⁽⁵⁾⁽⁶⁾。また絶縁の目的に使用する場合にも、振動や衝撃その他の力学的刺激に対して所定の形状を保つことがまず必要であり、硬化した絶縁ワニスの力学的性質はワニスをデザインする立場から基本的に重要である。

不飽和ポリエステルやエポキシ樹脂のような無定形網目高分子には、性質の非常にちがった 3 種類の状態がある。これらの状態はあらくは温度によって区別できる。高温では分子鎖中の微小単位(セグメント)の熱運動が活発になり、ゴム状の高弾性を示すゴム状態にある。この状態での弾性挙動は網目密度や分子鎖のからみ合いと密接に関係している。温度が下がってくると、あるセグメントの運動は周囲のセグメントによって妨害を受けるようになり、このために弾性に粘性が

表 3.1 橋かけ高分子の存在状態を規定する要因
Factors which determine the state of existence of crosslinked polymers.

平均網目鎖長	トポロジカルな条件	充てん状態→性質 (Excess Volume) の分配
網目鎖長分布		
非有効鎖 (閉環, 末端)		
トラップされたからみ合い		
分子鎖の対称性	分子鎖の個性	
分子鎖の剛直性		
分子間相互作用		

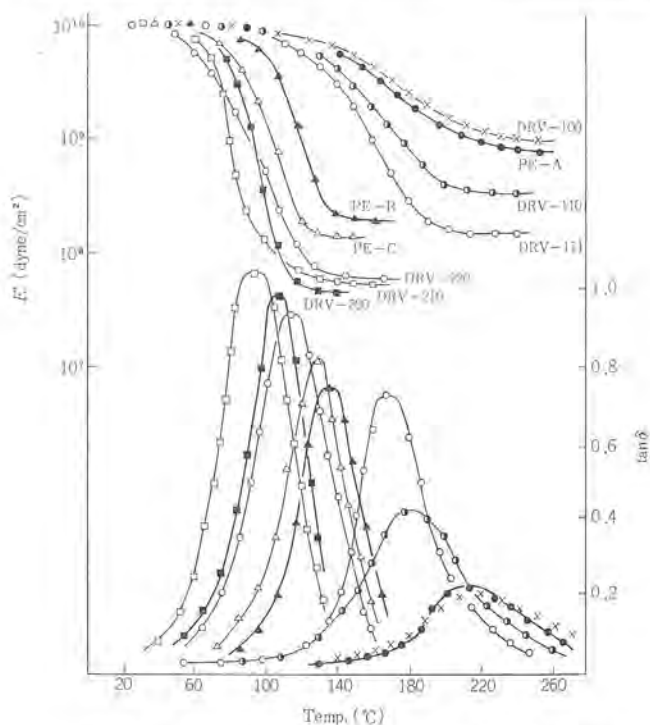


図 3.1 各種 DRV ワニスの粘弾性温度分散 (138 Hz)
Dynamic mechanical properties of DRV varnishes.

加味された性質を示すようになる。このために力学定数は時間依存性が顕著になり、また動的測定では力学損失が観察されるようになる。この領域では、柔軟な革状の外観をもち高分子として最も特長的な領域である。さらに温度が下がるとセグメントの大規模運動が凍結されたガラス状態に入る。ガラス状態では高い弾性率をもち、近似的には平衡弾性を示すが、詳しい観察では分子鎖の局所的な運動による粘弾性が見られ、これがガラス状態での粘り強さや耐衝撃性と重要な関係にある。

以上のように高分子の特長的な力学性質は、分子鎖の各種の様式の運動に基づいており、分子鎖運動はまた分子鎖によって実際には占められていない過剰体積 (excess volume) の量、分布、およびその熱的なゆらぎによって影響をうける。分子鎖運動と過剰体積や自由体積の問題は力学的性質だけでなく誘電的性質、絶縁破壊、もれ電流、さらに低分子物質の拡散現象などを理解するためにも重要な基礎を与える。

力学的性質に例をとれば、ある高分子において皮革状態がどのような温度範囲で現われるか、そしてそれが温度や時間尺度によって示す変化などの高分子の個性は、さらに分子的な要因に立ち入って解明する必要がある。そうすることによって、材料開発が合成技術と試行錯誤のみによって行なわれていた過去の泥沼から脱脚し、明確な設計図を手にして材料を設計するという境地に近づくことが可

能となる。網目高分子について性質を決定する要因は、表 3.1 のようになる。いくつかの網目のトポロジカルな条件と、分子鎖の種類に固有の要因が組み合せて分子鎖が空間を充てんする状態を定め、これによって系の巨視的性質が規定される。この最後の段階で重要なのが過剰体積と分子鎖運動の問題である。

DRV ワニスは表 3.1 のような要因の詳細に関する最新の知識によって、1 章でのべた目標実現の設計図を描き、これと現在、世に知られている広範囲の化学合成技術を手段として活用することによって、高度な内容に比べては短時間に効率的に開発された材料システムである。

図 3.1 に代表例の力学性質を示した。可とう(撓)性に富み適度の熱弾性を示すものから 200°C 近くまで剛直なガラス状態であるものまで、広い範囲に性質を調節することが可能である。小形で温度条件のきびしい目的には、一般的にいえば高温タイプ用途が多いと思われるが、振動や熱衝撃の吸収、後工程の操作を容易にすることなど各種の付加条件を考えると、図 3.1 に示した程度の品種をもつことが必要であろう。

4. 硬化ワニスの電気的性質

図 4.1 に誘電率 ϵ と $\tan \delta$ の温度特性を示した。誘電性質と力学性質が相関関係にあることは、各種の例について知られている。図 3.1 と比較して明かなように、共通の温度域に誘電分散と力学分散が存在する。

$\tan \delta$ 曲線と温度軸の囲む面積の中で双極子の配向によるもののみを評価するためには、 $\tan \delta$ から高温のもれ電流による分を差引かねばならない。双極子の配向による $\tan \delta$ のピークは、それがある限界内であれば実用的には問題ではない。ある網目高分子が絶縁ワニスとして満足なものかどうかを $\tan \delta$ 曲線から見分ける一つの方法は、双極子配向によるピークと高温のもれ電流による急上昇が、どれほどよく分離されているかを調べることである。 $\tan \delta$ の極大を示す温度は、ガラス状態から皮革状態への移行変わりを示す温度であって、この付近から自由体積が急増をはじめる。

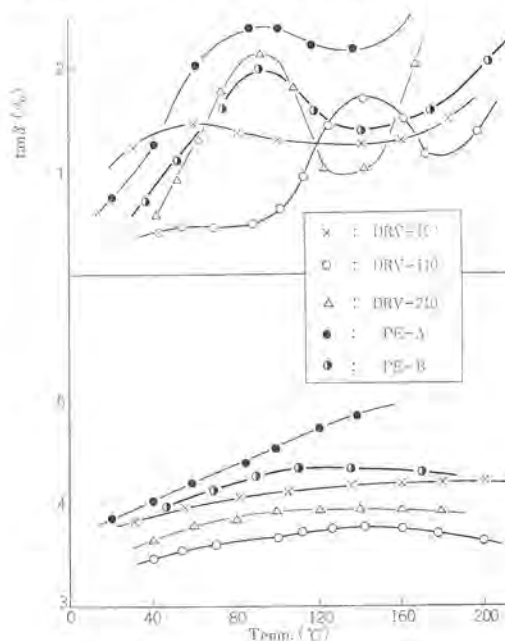


図 4.1 誘電性質の温度変化
Temperature dependences of dielectric properties of DRV varnishes.

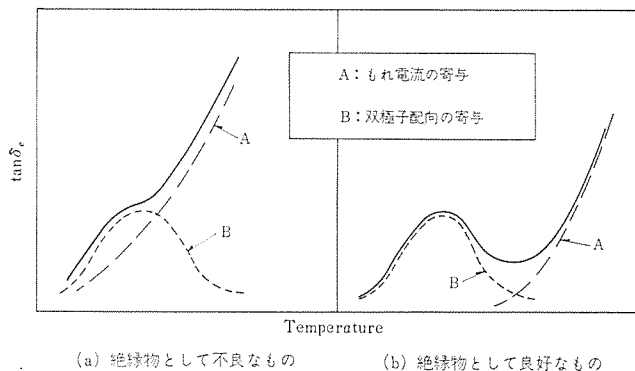


図 4.2 模式的に現わした絶縁物の $\tan \delta$ 特性
Schematic representation of $\tan \delta$ characteristics of insulating materials.

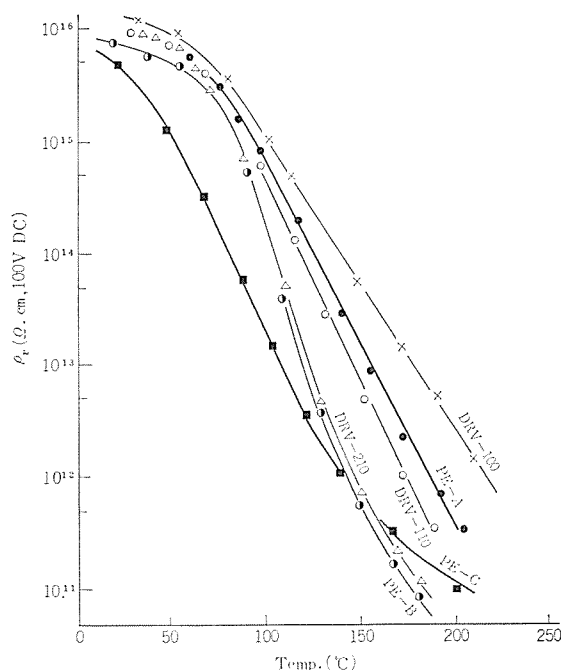


図 4.3 体積固有抵抗の温度依存性
Volume resistivity vs. temperature.

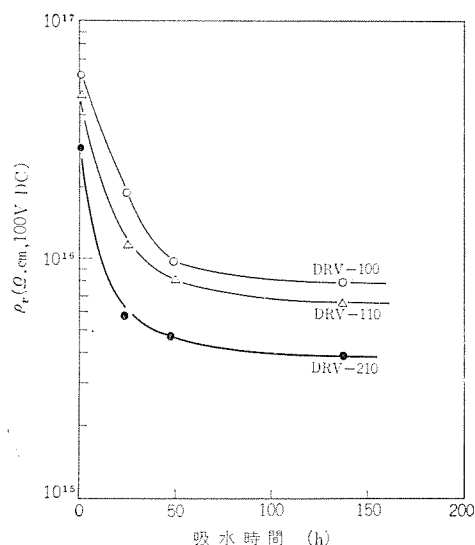


図 4.4 吸湿による体積固有抵抗の変化 (23°C, 水中)
Changes of volume resistivity by immersion in water.

表 4.1 ワニスの絶縁破壊電圧
Dielectric strength.

ワニス	温度 (°C)	破壊電圧 (kV/0.1 mm)		
		25	100	150
DRV-100		10.5	9.5	8.8
DRV-110		10.8	10.0	9.0
DRV-210		8.0	7.5	6.7
DRV-211		7.5	7.0	6.9
DRV-220		7.5	7.0	6.5
PE-A		9.0	9.0	8.5
PE-B		8.5	7.3	6.9
PE-C		9.0	7.0	6.8
エポキシ*		9.0	5.0	3.0

* ビスフェノール A ジグリシジルエーテル/BF₃-モノメチルアミン

自由体積の増大は荷電担体の移動を容易にするから、もれ電流もこの付近から増加する。したがって両者は相関があるわけであるが、その相関から由来する制約の下で $\tan \delta$ 極大ともれ電流の急増の温度域が、よく離れているものが絶縁材料としてのできがよいといえる。この間の事情は模式的に図 4.2 のように示される。図 4.1 で明らかなように、DRV ワニスはこの条件をよくみたしている。

図 4.3 に絶縁抵抗の温度依存性を示した。ガラス転移温度の低いものが、絶縁抵抗が低下をはじめる温度域が低いのはやむを得ないが、これまでに最もよく使われたアルキッド系溶剤 ワニスに比べ良好である。

図 4.4 に吸湿による絶縁抵抗の変化の例を示した。DRV ワニスは吸湿性が少なく、高湿度条件でも高い絶縁抵抗をもつことが大きな特長の一つである。吸湿性は高分子中に含まれる極性基を少なくすれば改善されるが一方、接着性、ガラス状態での強度、低温での破壊電圧などは極性基が多いほうが良好であって、一方的に極性基の少ないものは現在の目的に適しない。DRV ワニスでは適量の極性基をその分子中の分布にくふうをこらすことによって、他の性質を高水準に保ちながら吸湿性を少なくするように配慮されている。

表 4.1 に破壊電圧値を示した。高温でも高い値を保持している。

5. 電線と協調性

5.1 一般的事項

小形回転機にかぎらないが、マグネットワイヤを導体として用いる場合、ワニスと電線皮膜の組み合わせには、特別の注意を必要とする。その理由の一つは、ワニスのもつ溶解力がとくにワニス処理時の高温と重なる場合に電線皮膜に損傷を与え、その結果処理完了後の電気的、機械的性能を低下させることであってはならないことである。しかし、この問題は比較的容易に試験片テストで確認することができる。

第2のさらに入り組んだ問題としては、長時間の使用に耐えるための耐久性があげられる。初期特性は満足なものであっても、耐久性が組み合わせによって意外に低下することがときに経験される。電線およびワニスそれぞれ単体での耐久性をはるかに下回る組み合わせというものがありうる。信頼性の高い良好な組み合わせに関して経験的なルールは、それぞれの立場で、必ずしも人によって一致しないようであるが、確実なことは実験の結果によらざるを得ない。ここでは試験片の段階での結果を報告するととどめるが、2, 3の機種における実機試験の結果は、それらの試験片テストから示され

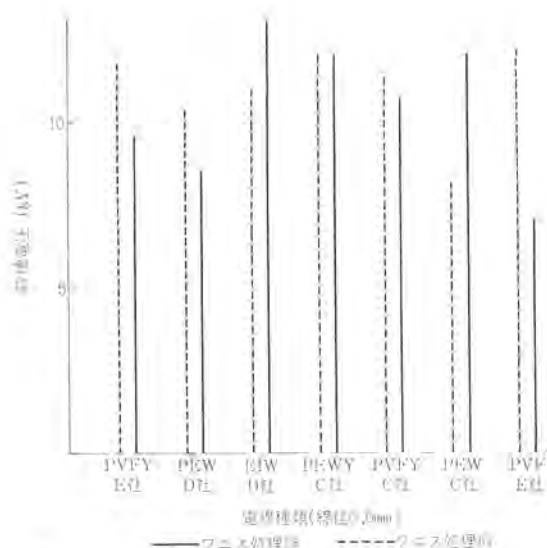


図 5.1 各種電線の DRV-110 ツニス処理による破壊電圧の変化
Compatibility with magnet wires as measured by changes in breaking down volutage.

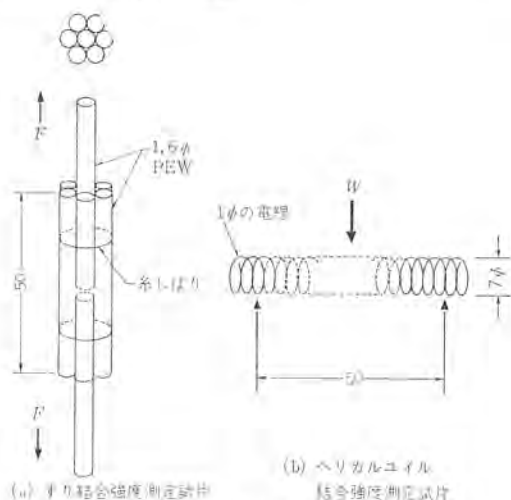


図 5.2 結合強度測定法
Bond strength measurement.

表 5.1 ヘリカルコイル 結合強度*
Helical coil bond strength.

ツニス	条件	結合強度 (kg)		
		25°C	100°C	150°C
DRV-100		6.8	4.0	1.9
DRV-110		7.5	3.8	1.7
DRV-111		7.6	3.0	1.5
DRV-210		8.0	2.5	1.0
DRV-221		6.5	2.5	0.9
DRV-200		6.8	2.2	1.0
DRV-220		15.0	1.8	1.0
PE-A		6.0	1.2	0.5

* 1.0φ PEW 使用 (5本の平均値)

る傾向と一致するものであった。電線試料の記号は次のとおりである。

- PVF (ホルマル)
- PVFY (ナイロンホルマル)
- PEW (ポリエステル)
- PEWY (ナイロンポリエステル)
- EIW (エステルイミド)

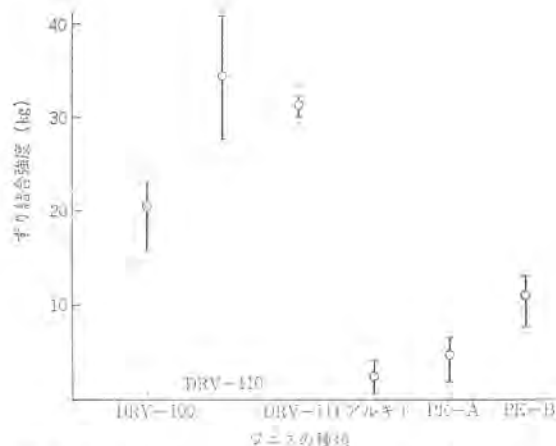


図 5.3 各種ツニスのずり結合強度 (1.6φ, PEW 使用)
Shear bond strength.

5.2 初期特性

各種電線との組み合わせでツニスが電線皮膜をおかす程度を調べた。試験方法は、電線を交差させ2枚のガラス板の間にはさみその間げきにツニスを注入し、ガラス板に一定の荷重(電線の径によって調節)を加えた状態で加熱硬化させた後、線間の破壊電圧値を測定しツニス処理をしない試料と比較することによって。結果は図 5.1 のように一部でわずかに空試料より低下が見られるが、それも実用には支障はない程度である。広範囲の電線に関して DRV ツニスは安全に使用できる。

5.3 コイル結合強度

小形回転機の処理ツニスは電気的性質以外にコイルを結合する機械的強度が重要である。振動によりコイル導体相互、または導体とスロットが相互運動を行なって絶縁皮膜が破壊したり、回転子では高速回転による遠心力に耐えてコイルエンドが広がることをツニスの結合力で押えなければならない。とくに運転中高温になることが一般的であるので、高温における結合力が高いことは大きなメリットになる。コイル結合強度の評価は、図 5.2 に示したようにヘリカルコイル強度とずり結合強度の二つの方法によって一般的に行なわれる。表 5.1、図 5.3 のように室温、高温ともに満足な強度を示している。

また回転子におけるコイルエンドの変形の問題は、ここでのべた二つの方法による破壊強度ではなく、3章でのべた弾性率の温度依存性がより直接的な効果をもつと考えられる。図 3.1 に示した高温タイプは、この観点から現在のこの種のツニスの中で最高の水準に属するものである。表 5.1、図 5.3 の結果は1種類の電線に関するものであるが、電線の種類を変化させた場合の結果は熱耐久性の項でふれる。

5.4 熱耐久性

電線との組み合わせから生じる問題の中で、耐久性が実用的にもまた判定のむずかしさからも最も重要と考えられる。長時間劣化後の試片では、ツニス皮膜と電線皮膜は完全に一体化し、劣化が単独の材料の耐久性からは推定できないことを先にのべた。さらに今一つの問題としては、劣化の尺度となる性能の種類によっても一様でない事実がある。たとえば破壊電圧の強さと機械的強度をとり上げた場合、両者は必ずしも平行関係がなく、どちらの性能が早期に低下するかは組み合わせによって異なる場合がある。

機能が最終的に停止するのは、絶縁破壊であってもそれに至る直接原因が振動などによって生じた機械的破壊である場合が、かなり

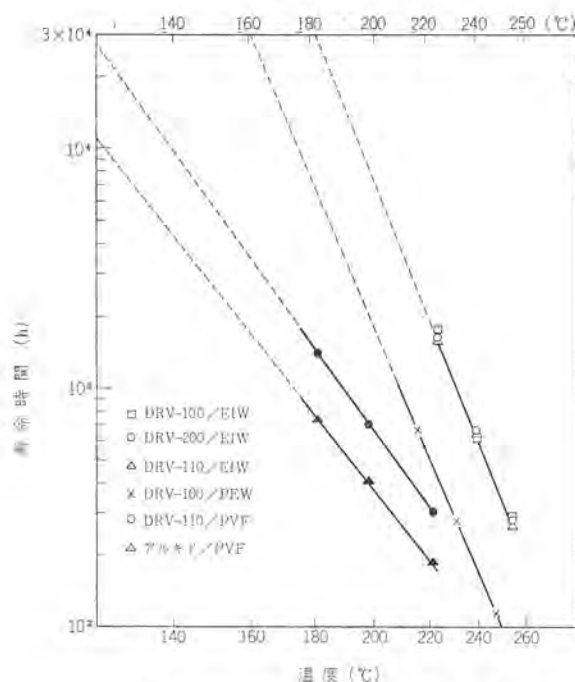


図 5.4 ヲニス/電線系の耐熱寿命
Thermal endurance for combinations of varnish and magnet wire by IEEE No. 57.

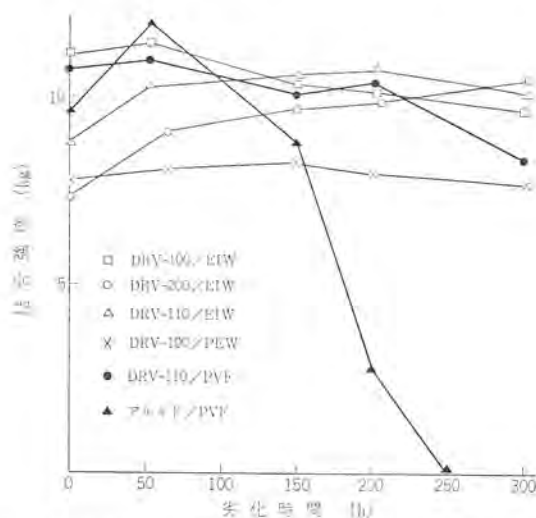


図 5.5 熱劣化 (250°C) によるヘリカルコイル 結合強度の変化
Changes of helical coil bond strength by thermal degradation at 250°C.

一般的であると考えられる。機器の破壊は時間軸に対しある統計的分布で生じるが、その短時間側のすそはこのような機構に支配される可能性が大きい。

電線とヲニスの組み合わせた系の熱耐久性の標準的評価方法は、IEEE No. 57 法であるが、上述の理由によりヘリカルコイル試片を用いて結合強度の劣化をも調べた。結果は図 5.4、5.5 に示したが、図 5.4 からエステルイミド系電線と組み合わせた場合、DRV ヲニスは 160~180°C 級の耐熱性をもって判定される。ホルマル線との組み合わせでも、これまでの 135°C 級とされたヲニスに比べ高い耐熱性を

示しうる。結合強度で見ても図 5.5 のように長時間高い強度を示す。2, 3 の場合には強度が漸増の傾向を示す。また結合強度で見ると、ホルマル線でもかなり長時間良好な性能を保持すると考えられる。

以上のように DRV ヲニスは、この実験の範囲では各種の電線とよく適合し、ふつう各種の問題を生じる電線との組み合わせに関して特別の困難は生じないと考えられる。

6. 耐水, 耐薬品性

電気および機械的な耐久性以外に、特殊な用途では水中や腐食性薬品の影響下で使用されることがある。DRV ヲニスは表 6.1 に示したように、各種化学環境下で通常のポリエステルはもちろんエポキシ樹脂よりもすぐれた耐久性が期待できる。

表 6.1 耐薬品性 (30 日浸漬後の硬度減少率 %)
Chemical resistance ; percent decrease in hardness after immersion for 30 days.

薬品	DRV-100	DRV-110	DRV-210	PE-A
水	0.0	0.0	0.0	10.0
トルエン	1.0	1.5	1.8	5.0
25% 硫酸	2.0	1.8	1.6	4.0
5% 苛性ソーダ	2.5	2.2	2.5	23.0
25% 酢酸	1.0	1.0	1.2	9.0
セービルオイル	0.0	0.0	0.0	1.5

7. む す び

今後いっそう実施がさかになると予想される、滴下絶縁処理に適した一連の無溶剤ヲニスを開発した。現在の科学水準で可能な最高水準を目標としたが、電気的性質、機械的強度、耐薬品性などの諸性能において目標に近いものが得られている。電線との組み合わせに関しても困難は少なく、広い範囲の仕様を設定することができる。価格的にもこれまで一般的用途に使用されてきた溶剤形ヲニスと同等である。滴下絶縁処理の方式は、工場の実情に応じて総合的に諸条件を最適にするよう定めることが必要である。開発したヲニスは、方式、装置面の変化にも十分に応じうる柔軟な作業適性をもっている。

参 考 文 献

- (1) R. M. Elsworth : Insulation, Sep., 98 (1965)
- (2) G. L. Johnson : Insulation, Decem., 47 (1966)
- (3) D. E. Nourse : Insulation, Aug., 58 (1967)
- (4) 土屋, 金沢 : 日立評論, 9, 938 (昭 42)
- (5) 柴山 : 高分子, 15, 1,036 (昭 40)
- (6) 柴山 : 高分子, 17, 272 (昭 43)

ドリル樹脂成形品の性質

西崎 俊一郎*・古橋 靖夫*

Properties of Doryl Resin Molds

Central Research Laboratory

Shun-ichiro NISHIZAKI・Yasuo FURUHASHI

"Doryl" resin is a new heat resistant polymer developed as class H insulating material. Doryl resin has high thermal stability with mechanical strength and bonding power at high temperature, being impregnable to chemicals and solvent attack. Doryl resin molds have been newly developed from Doryl varnish and glass fiber or asbestos fiber. It has been revealed that these molds have excellent properties as high temperature insulating materials.

1. ま え が き

モールド成形品は電気機器の部品として多く使用されているが、これはその成形の量産性ととも、すぐれた電気的性質、機械的性質などの特性によっている。成形材料に用いられる合成樹脂としては、フェノール・ホルムアルデヒド樹脂がもっともよく知られているが、ほかのウレアホルムアルデヒド、メラミンホルムアルデヒド、ジアリルフタル系、エポキシ系の熱硬化性樹脂も要求される特性にしたがって用いられる。

これら樹脂の特性の一つに熱安定性があげられ、とくに機器の小形軽量化、高性能化、過酷な使用条件では、これら電気絶縁部品の耐熱性の要求が大きくなってくる。Hクラス耐熱性樹脂にはシリコンが知られているが、これからモールド成形品材料をうるにはまだ至っていない。新しい耐熱性高分子の開発研究は内外においてさかんであり、とくに芳香族系ポリマーで実用化の段階に至っているものは少なくない。

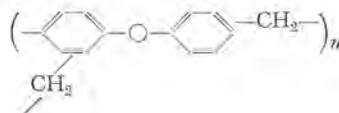
これらの一つにあげられるものにドリル樹脂があり、ドリル樹脂はHクラス電気絶縁材料として開発された新しい芳香族系耐熱性樹脂であり、その名称"DORYL"はDiphenyl OxideとAryl(芳香族の意)からとったもので、主鎖にジフェニルオキシド基($\text{—C}_6\text{H}_4\text{—O—C}_6\text{H}_4\text{—}$)を含む独特の化学構造をもつことから、別名ジフェニルオキシド樹脂あるいはジフェニルエーテル樹脂と呼ばれる。この樹脂はWestinghouse社、Dow Chemical社などで開発されたが、当社においても各種の特性の要求に応じて、それぞれ標準タイプV-505、フレキシブルタイプV-510、積層用V-520などのドリルワニスを開発、量産化に移り多くの機器へ適用してきた。さらに成形性の特性を改良したワニスの開発によって、ドリル成形材料が開発されたのでその性質について述べる。

2. ドリル樹脂

耐熱性樹脂に必要な条件には、熱劣化の小さいことと高温での諸特性が低下しないことがあげられるが、前者では熱分解や熱酸化に安定な構造、後者では分子の剛直性や分子間力などの関与する構造の観点から、主鎖にベンゼン環やヘテロ環を導入した芳香族ポリマーが実用、開発化の一分野を占め、芳香族ポリイミド、芳香族ポリアミドなどが開発されている。

ドリル樹脂は前述のようにベンゼン核をエーテル結合で連結したジフェニルオキシドを主成分とする芳香族ポリマーの一員で、このジフェニルオキシドをメチレン架橋化によって熱硬化タイプの樹脂としたものである。

ドリル樹脂の特性として知られている加水分解に対する抵抗や耐薬品性においてすぐれていることは、つぎの化学構造の寄与によるものと考えられる。



ジフェニルオキシドは熱安定性の大きいことと、工業的に比較的容易に入手しうる点から現在熱媒体の主成分として多く使われているが、これはドリル樹脂が原料面においても有利である点といえよう。

ジフェニルオキシド誘導体を出発物質とするポリマーはDow Chem.社より発表されている耐熱耐炎樹脂があるが、重縮合硬化中に塩化水素ガスを発生し、あわ状物質を形成し、この熱硬化性樹脂は不燃性の点では特異であるが、金属などの腐食の問題によって電気絶縁用材料としては適しない。ドリル樹脂はかかるガスの発生もなく、ワニスとして安定な形で得られるように独特の合成法によって、電気機器用に研究開発されたものである。

ドリル樹脂は前述のように剛直な芳香族環を主鎖に含み、その架橋密度、重縮合の方法などによって樹脂の伸びは小さく、可とう(撓)性の小さい性質を示すが、モールド成形材料、積層成形材料用の樹脂にはこれらの特性はむしろ適しているものと考えられる。モールド成形材料はよく知られているように熱硬化性樹脂と無機質充填(填)剤、木粉、細布片、無機質繊維、内部離型剤を混合、加熱乾燥して半硬化のBステージとしたものである。

本報では耐熱性成形材料をうる目的で、ドリルワニスと無機質繊維としてガラス繊維およびアスベスト繊維を用いた成形品の性質をしらべた。前者をGタイプ、後者をAタイプと呼ぶ。

3. ドリル成形品の性質

3.1 成形条件と性質

ドリル成形材料のモールドは、通常の加熱プレスによって170°C加熱、100 kg/cm²の加圧の条件で行なわれる。試料厚さ2 mmのものの成形時間と曲げ強度、あるいは曲げ弾性率との関係を図3.1、3.2に示した。フェノール樹脂では一般的に160~170°C、2~10分の成形条件で十分であるのに対して、ドリル成形材料では少なくとも15~20分を必要とし、フェノール樹脂の硬化反応にくらべて反応性の小さいことを示している。したがってドリル樹脂では、このプレス硬化の後に200°C以上のオープン硬化によって曲げ強度、曲げ弾性率

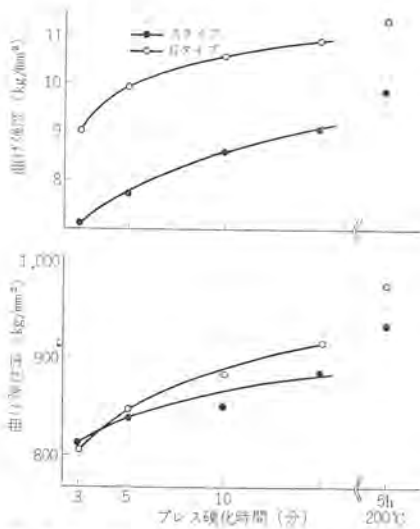


図 3.1 プレス硬化時間と常温における機械的強度の関係 プレス温度 170°C
Relation of the press curing time with the mechanical strength at room temperature.

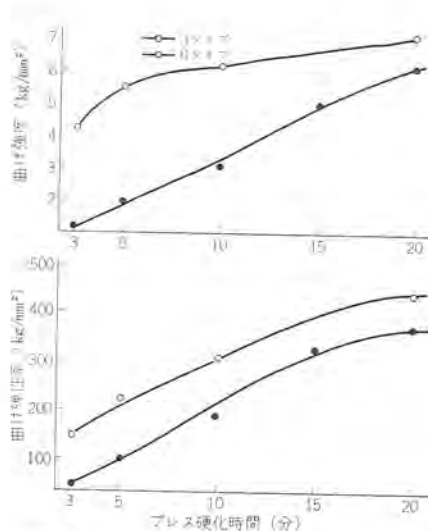


図 3.2 プレス硬化時間と 100°C における機械的強度の関係 プレス温度 170°C
Relation of the press curing time with the mechanical strength at 100°C.

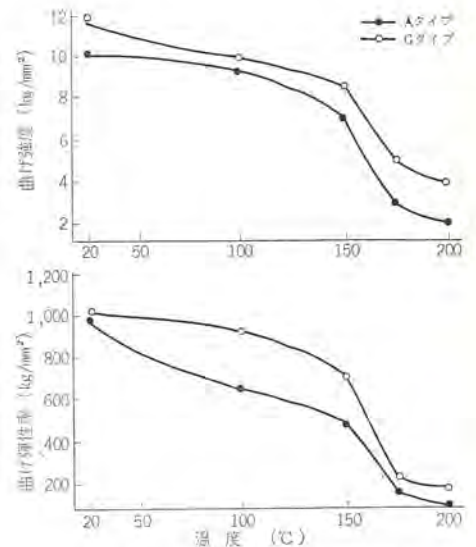


図 3.3 機械的強度の温度依存性
オープン硬化 150°C 10 hr
Temperature dependency of mechanical strength.

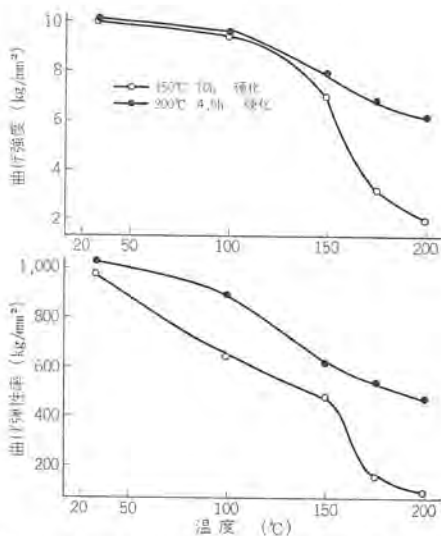


図 3.4 機械的強度の温度依存性(A タイプドリル成形品)
Temperature dependency of mechanical strength.

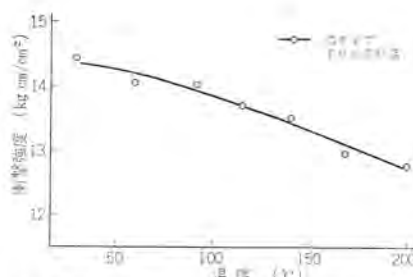


図 3.5 衝撃強度(シャルピー)の温度特性
Relation between impact strength and temperature.

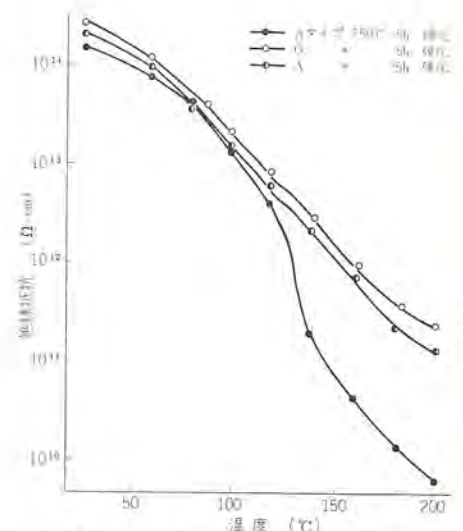


図 3.6 ドリル成形品の絶縁抵抗の温度依存性
Temperature dependency of volume resistivity of doryl molds.

表 3.1 ドリル成形品の一般的性質
Properties of doryl molds.

項	目 ⁽¹⁾	G タイプ	A タイプ
比重	25°C	1.76~1.85	1.85~1.95
成形収縮率	%	0.35~0.50	0.70~0.90
吸水率	25°C, 24h	0.10~0.16	0.10~0.18 ⁽²⁾
絶縁破壊電圧	kV/mm	13~16	13~15
絶縁抵抗	Ω	2.0×10 ¹² 以上	2.0×10 ¹¹ 以上
浸水	24h	2.0×10 ¹⁰ 以上	2.0×10 ⁹ 以上
誘電正接	60 Hz	0.01~0.015	0.06~0.08
耐アーク	秒	10~20	10~20
曲げ強度	kg/mm²	10.0~13.0	9.0~10.0
圧縮強度	kg/mm²	18~21	
衝撃強度(シャルピー)	kg cm/cm²	14.0~19.0	6.0~9.0

(1) JIS K-6911 による。

(2) 室温 20 日後 0.94% の吸水率を示した。

ともに上昇する(図 3.1, 3.2)。

170°C でプレス硬化したものを後硬化するとき、厚物では急激に 200°C 以上のオープンに入れるとき裂を生ずることがあるから、130~150°C で数時間硬化したのち、200~250°C 処理したほうがよい。オープン硬化の効果は、その機械的性質(曲げ強度、曲げ弾性率)の温度特性を図 3.3, 3.4 に示したように顕著であって、高温における特性が向上する。150°C 12 時間では不十分で、200°C 以上の後硬化が必要である。

成形収縮率は G タイプで 0.4%, A タイプで 0.8% 程度である。

3.2 ドリル成形品の一般的性質

ドリル成形品の一般的性質をガラス繊維充てん(G タイプ)、アスベスト繊維充てん(A タイプ)のものについて表 3.1 に示した。

機械的強度は通常の成形品のレベルであり、G タイプのほうがやや

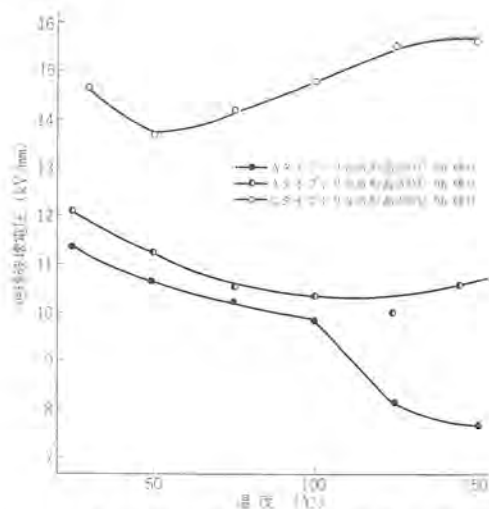


図 3.7 絶縁破壊強度の温度特性
Relation between dielectric strength and temperature.

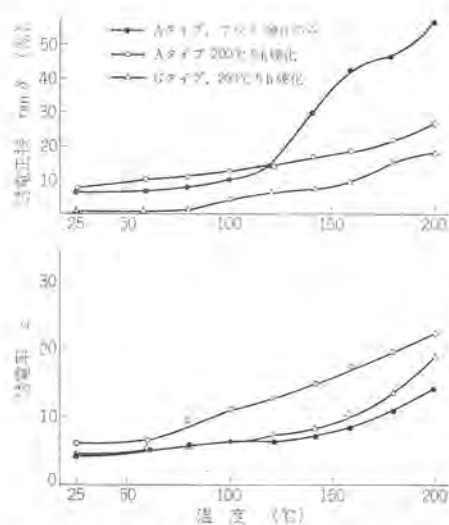


図 3.8 電気的性質 ($\tan \delta$, ϵ) の温度依存性
Temperature dependency of electrical properties ($\tan \delta$, ϵ).

すぐれ、とくに衝撃値では G タイプのガラス繊維充てんの効果がはっきりと認められる。機械的強度の温度特性は前述したが、衝撃値の温度特性は図 3.5 に示した。

絶縁抵抗、絶縁破壊電圧、誘電正接など電気的性質もふつうの電気用成形品のレベルを有しているが、ガラス繊維充てんの G タイプのほうがすぐれている。耐アーク性はフェノール樹脂の場合と同様に低い値を有しているが、これは芳香族系ポリマーの化学構造の寄与によると考えられる。絶縁抵抗、破壊電圧、誘電正接の温度特性は、それぞれ図 3.6、3.7、3.8 に示したが、一般的に言えば硬化が十分に進んだものほど高温特性がすぐれている。オープン硬化が不十分なものにおいては、100~150°C の温度領域においてポリマーの転移に対応する変化がみとめられる。

吸水率は G、A タイプいずれも 24 時間では 0.13 % 程度である。しかし、アスベスト充てんのものは長期間水中に浸しておくくと吸水率が大きくなる。これは、水中浸せき (漬) 後の絶縁抵抗の測定結果として図 3.9 にみられるように、G タイプのほうが耐水性がすぐれていることと一致している。

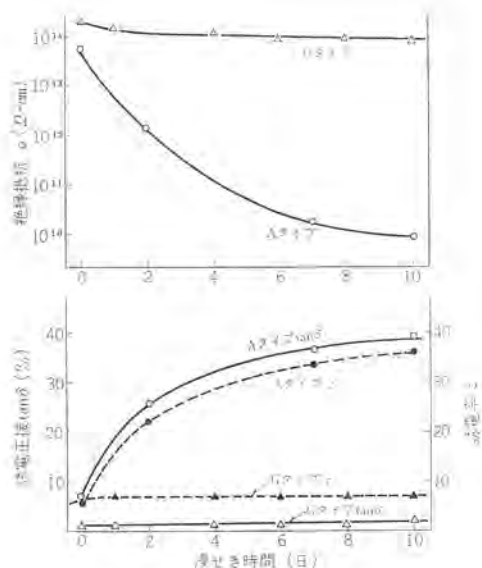


図 3.9 浸水後の電気的性質
Electrical properties (ρ , $\tan \delta$, ϵ) after dipping in the water.

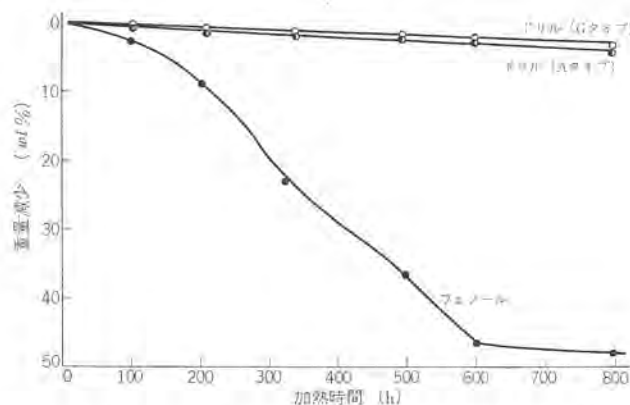


図 3.10 ドリル成形品の加熱重量減少 (250°C 空气中)
Weight decrease curves of doryl molds.

3.3 耐熱性

耐熱性の評価は、成型品の諸性質の熱劣化後の値を比較して行うことはもちろんであるが、加熱による重量減少を測定する方法は、熱安定性の目安の一つとして考えられる。ドリル樹脂単独の熱天びん (秤) 曲線、あるいは 250°C 定温における加熱減量を他の H クラスのシリコン樹脂などと比較してすぐれていることは、前報において示したが、ドリル成形品の 250°C、空气中における加熱減量を図 3.10 に示した。無機質充てんのフェノール成形品にくらべて、ドリル成形 A、G タイプいずれもすぐれていることがわかる。

また、空气中 250°C で劣化後の機械的強度の変化を図 3.11 に示した。無機質繊維充てんフェノール成形品では大きな低下がみられるが、ドリル成形品ではすぐれた耐熱性をあらわすことがわかる。

3.4 耐薬品性

耐熱 H クラスの熱硬化性樹脂 シリコン は、耐溶剤性がいちじるしく劣ることが知られている。一方、ドリル樹脂は耐溶剤性、耐油性、耐酸、耐アルカリ、耐フロンなどシリコンにくらべて格段とすぐれていることは、コイル接着強度などのデータを前報で示した。このような溶剤や薬品に対する抵抗は、ドリル成形品においてもすぐれている。これらの結果は表 3.2 に示した。また、この場合にも G タイプのほうが A タイプよりもすぐれている。

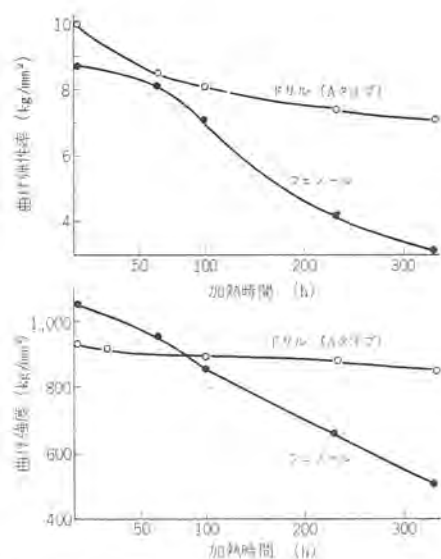


図 3.11 加熱劣化後の機械的強度 (250°C 空气中)
Mechanical strength of doryl molds after deterioration
with heat at 250°C.

4. む す び

新しく開発したドリル成形品の耐熱絶縁材料としての特性について述べた。

ドリル樹脂の特長である耐熱性、耐溶剤性、電気的性質は成形品の性質においても発揮され、H クラス成形材料として有用であることを示した。しかし、高温における特性を十分にあらわすためには後硬化が必要であり、吸水性や電気的性質の点からはガラス繊維充て

表 3.2 ドリル成形品の耐薬品性
Chemical resistance of doryl molds.

化学薬品	常 態 ⁽¹⁾			熱劣化後 ⁽²⁾		低い硬化物 ⁽³⁾		
	曲げ強度 kg/mm ²	曲げ弾性 率 kg/mm ²	重量変化 %	曲げ強度 kg/mm ²	曲げ弾性 率 kg/mm ²	曲げ強度 kg/mm ²	曲げ弾性 率 kg/mm ²	重量変化 %
無 処 理	9.39	858		9.00	863	9.89	865	
四塩化炭素	9.59	880		8.29	861			
トルエン	9.33	830	+0.19	8.05	864	10.95	916	+0.13
エタノール	10.15	857	+0.06	8.99	834			+0.04
ジメチルアセトアミド	10.07	875	0	8.51	855	11.28	915	+0.09
酢酸エチル	10.15	865	+0.13	8.27	835	10.28	790	+0.20
メチルエチルケトン	10.28	841	+0.27	7.51	832	10.73	776	+0.39
ジオキサン	10.09	884	+0.12	8.80	911			+0.07
m-クレゾール	10.06	859	+0.04	8.45	872			
5% NaOH	8.63	511	+0.97	8.13	643			+0.67
10% HCl	7.24	394	-0.16	5.86	338			-0.20
10% H ₂ SO ₄	7.13	422	-0.38	6.78	386			-0.59

(1) アスベスト充てん A タイプ、オープン硬化 200°C 5 h.

(2) 250°C 120 h 劣化後

(3) 150°C 10 h 硬化後

※ 2 mm 厚さ試片を試薬中に室温で 10 日間浸せき

んの G タイプのほうがすぐれ、また価格の点では アスベスト 繊維充てんの A タイプのほうが有利であると考えられる。

参 考 文 献

- (1) 西崎、江藤、小山、坂井：ドリルワニスおよび積層品の諸性質、三菱電機技報、40, 1,091 (昭 41)

厚板鋼板用点溶接機

山本 利雄*・奥田 滝夫**

馬場 利彦***・越智 紀明***

A Spot Welder for Heavy Gage Steel

Central Research Laboratory

Toshio YAMAMOTO・Takio OKUDA

Itami Works

Toshihiko BABA・Toshiaki OCHI

A spot welder has been built for trial to work on heavy gage steel above 6 mm in thickness. Power source systems, specification and sequence of this welder are described first; then through the operation of this machine effects of welding current, electrode force, weld time, hold time and welding pitch on the shape of the weld nugget and weld strength are studied so as to determine a recommended welding schedule for heavy gage mild steel. Thirdly, mention is made on the mechanical properties of the spot-welded joint.

The result of the experiment has clarified that good weld properties are made available with this welder of mild steel below 25 mm in thickness.

1. ま え が き

従来点溶接は板厚 3 mm 以下の薄板の接合法として広く用いられてきたが、最近わが国においても建築・造船などの工業分野で厚板鋼板の接合に点溶接を利用することが検討されだした。われわれは厚板鋼板用点溶接機の開発に着手し、わが国では最大の厚板鋼板用点溶接機の試作を完成した。本文ではこの試作機を中心に、その性能および厚板鋼板の点溶接現象について述べる。

2. 厚板鋼板用点溶接機

抵抗溶接機の電源方式には

- (1) 単相交流式
- (2) 三相低周波式
- (3) 三相整流式
- (4) 静電蓄勢式
- (5) 電磁蓄勢式

などがあるが、後に述べるように厚板鋼板の点溶接には、比較的長い通電時間が必要であるので、(4)、(5)は厚板鋼板用としては適当でない。(2)、(3)は(1)に比較して次のような長所がある。

- (a) 2次回路のリアクタンス降下が小さいため、溶接変圧器および受電設備の容量が小さい。
- (b) 三相平衡負荷になる。
- (c) 力率がよい(三相：約 0.85, 単相：約 0.3)。
- (d) 溶接機のふところ(懐)内部への鋼板そう入による電流変動がほとんどない。
- (e) 隣接溶接点への分流効果に対して自己制御作用がある。

(b)を除いてはいずれも周波数が低いことに基づく利点であるが、これらについて少し詳しく説明する。試作点溶接機は後述のように単相交流電流と三相低周波電流の切換えが可能であるので、この溶接機を例にとって(a)について考える。試作機の溶接変圧器の巻数比を一定(2次無負荷電圧を一定)に保って、電流の位相制御を 100%にして短絡電流を測定すると(ふところ深さ：750 mm)、単相交流の場合は 21,400 A(実効値)、三相低周波で 150,000 A(実効

値：128,000 A)となる。すなわち同じ2次無負荷電圧では、三相低周波式は単相交流式の約6倍の電流が流れ、約36倍の発熱量が得られる。

逆に単相交流式で三相低周波式と同じ2次電流を流すためには、溶接変圧器の2次電圧を6倍(巻数比を1/6)にしなくてはならず、1次電流は三相低周波式の6倍となり、溶接機への配線導体に太いものが必要となる。また、三相低周波式の電気容量は $\sqrt{2}EI$ (E 、 I ：1次実効電圧・電流)であるので、受電設備は単相交流式の1/4ですむ。この傾向は溶接機のふところ深さが大なるほど、また溶接機のふところ内への磁性体のそう入量が大なるほど著しくなる。

(b)については後に説明する。(c)、(d)については(2)(3)方式の電流波形が単相交流式に比べて直流に近いことを思えば容易に理解できる。

(e)については、2次回路の抵抗分は(2)(3)方式と単相交流式は同じであるが、前者は2次電流の周波数が低いのでリアクタンス分が小さいため、電極間の電源特性は単相交流式の場合にくらべて定電圧特性になる。したがって隣接溶接点がある場合は被溶接材の電極間の抵抗が小さくなるので、電流のセッティングが同じでも自動的に大きな電流が流れる。

これらの長所は厚板鋼板の点溶接に対して有利であるので、溶接機としては(2)(3)の電源方式が適していると考えられる。

試作機としては上記2者のうち三相低周波方式を採用した。次に三相低周波式の原理について簡単に説明する。

三相低周波式の溶接変圧器は、3組の1次コイルと1組の2次コイルより成り立っている。イグナイトロン(またはSCR)の点弧を適当に制御して、この3組のコイルに120°づつの位相差のある同方向の三相電圧を加えると、2次コイルには三相半波整流電圧が誘起される。この直流起電力により2次電流は回路のRとLによって決まる時定数に従って漸次増加するが、鉄心の飽和現象のため、この状態を長時間保つことはできず、鉄心断面積、1次コイル巻数、1次電圧によって決まる時間以内で同方向に励磁する(この1時間をヒートタイムと呼ぶ)。

しかる後別の3個のイグナイトロンを点弧して、逆方向の電圧を1次

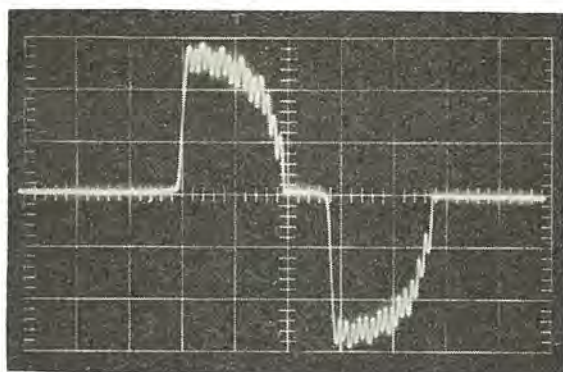


図 2.1 三相低周波式溶接機の電流波形
Current wave form of the three phase frequency converter type welder.

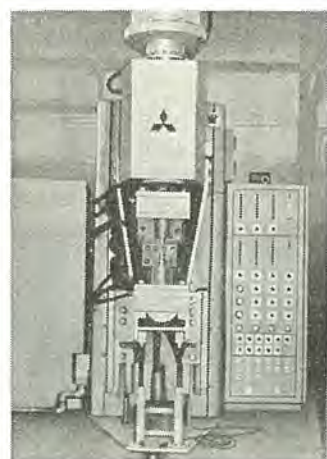
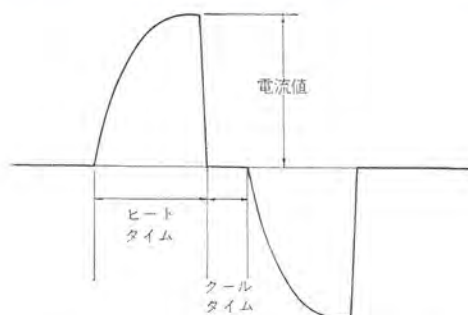


図 2.2 試作点溶接機の外観写真
Photograph of the test welder.

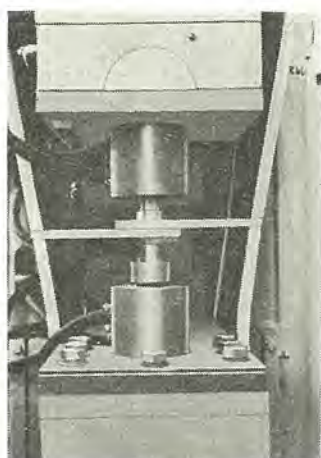


図 2.3 厚板鋼板の溶接状態
Photograph of the test piece during welding.



図 2.4 断面マクロ写真 (20 mm+20 mm)
Macro photograph of weld nugget (20+20 mm).

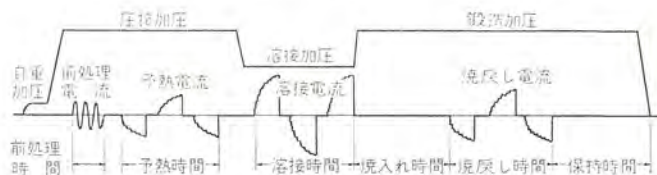


図 2.5 試作機のシーケンス図
Full sequence diagram of the test welder.

コイルに加え、励磁方向を切換えて次の2次電流を流す。この操作を繰返すことにより2次回路には3~15サイクル(たとえばヒートタイムが5サイクルのときは6サイクル)の低周波電流が得られるのである。実際には正方向と逆方向の電流の切替点で電流を流さない時間(クールタイム)を設けるので、溶接電流はパルス電流となる。図 2.1 に溶接電流のオシログラフを示す。

図 2.2 は試作機の外観写真、図 2.3 は溶接中の写真、図 2.4 は試作機で溶接した 20 mm+20 mm 鋼板の断面マクロ写真である。

試作厚板鋼板用点溶接機の仕様は次のとおりである。

【本 体】	定格容量：	150 kVA
	最大入力：	1,000 kVA
	最大短絡電流：	150,000 A
	最大加圧力：	20,000 kg (可変加方式)
	ふところ深さ：	750 mm
	ストローク：	90 mm
	電極径：	40 mm, 50 mm

【制御装置】

方 式： トランジスタ式・デジタル計数方式

時間制御範囲

ヒートタイム： 1~9 サイクル

クールタイム： 1~9 サイクル

カレントデュータイム： 1~19 サイクル

前処理・予熱・溶接・焼戻し電流通電時間： 1~399 パルス

自動降下時間： 0~10 s

圧接時間： 0~360 サイクル

焼戻し時間： 0~4 min (2 段切換)

保持時間： 0~30 s (2 段切換)

鍛造遅れ時間： 溶接電流通電完了時と同期

図 2.5 はこの点溶接機のフルシーケンスダイヤグラムである。足踏みスイッチを押すと、電極は自重降下し被溶接材に接触する。この時点で加圧シリンダ上部室に圧縮空気を導入し圧接加圧を加える。圧接加圧が所定の圧力に達すると前処理電流が流れる。前処理電流は被溶接材表面のさび(錆)や汚れを取り除いて、後続の予熱・溶接電流を流しやすくするためのもので、この電流のみ単相交直流電流を使用する。

その理由は、被溶接材表面にさびや汚れがあると電極間の抵抗が高くなり三相低周波式ではその2次電圧が低いため、さびや汚れを

取除くに十分な電流を流しえない。かといって2次電圧を増加すると、さびが取り除かれて電極間の抵抗が減少すると急激に大電流が流れて中チリを発生する。

この点単相交流式は前述のとおり、電源特性が三相低周波式にくらべて垂下特性（定電流特性）であるので、電極間の抵抗が減少しても2次電流はあまり増加しない。この単相交流電流は別の変圧器を用いて流すのではなく、制御器の巧みな動作により、三相のうちの一相のみを通电して単相交流電流を得ている。前処理電流が流れ終わると次に予熱電流が流れる。

予熱電流は被溶接材の急加熱を防ぐために流すもので、したがって電流値は溶接電流よりも低く、この電流では被溶接材は溶融しない。次に予熱が完了する直前に加圧シリンダ下部室に上部室の約1/2の圧力の圧縮空気を導入し、加圧力を溶接圧力まで減少せしめる。溶接時に加圧力を減少させるのは、発生熱を有効に利用するためである。

すなわち加圧力が大きいこと、接合面での通電面積が大きくなることと、被溶接材から電極モップへの熱伝導が大きくなるため、被溶接部を溶融するに有効な熱量が減少するのである。加圧力が溶接圧力に達すると、溶接電流が流れ、被溶接材を溶融・接合する。溶接電流が流れ終わると同時にシリンダ下部の空気を排気し、加圧力をもとの加圧力まで上昇させる。この鍛造加圧はナゲット内部のブローホールや割れなどの欠陥を除去するために加えるものであり、したがってナゲット金属が凝固しない前に動作させることが必要である。

このため試作機では、排気専用の大形マグネットバルブを加圧シリンダに直結して排気している。これで溶接は一応完了するのであるが、被溶接材が硬化性鋼材の場合、このままの状態では冷却速度が大きいため溶接部が硬化する。したがってこのような被溶接材に対しては焼入れ（冷却）時間の後に、溶接電流の70～90％の電流を再通电して焼戻しを行なう。焼戻し完了後、保持時間の間加圧力を鍛造加圧力に保って、溶接が完了する。

以上は前処理の十分でない、硬化性鋼板を溶接する場合に用いられるフルシーケンスであるが、酸洗した軟鋼板の場合は3章で述べるように、前処理電流、予熱電流、焼戻し電流を使用せず、また加圧方式も定加圧方式で満足すべき溶接結果が得られる。制御装置はイグナイトロンを除いて全トランジスタ式であり、ヒートタイム、クールタイム通電時間（パルス）および鍛造加圧時期は計数制御、その他の時間制御はCR制御である。この制御器の基本動作については参考文献（1）に詳細に述べられているので、本文では省略する。

3. 厚板鋼板の点溶接現象

厚板鋼板の点溶接現象は、基本的には薄板鋼板の場合と同様と考えられるが、時間的、幾何学的に薄板鋼板の現象が拡大されて現われるところに、厚板鋼板の点溶接現象解明の意義がある。ここでは主として板厚12mmの軟鋼板について、溶接条件がナゲット形状や溶接強度におよぼす影響について述べる。

3.1 被溶接材

実験に使用した被溶接材は板厚6, 9, 12mmの一般構造用鋼（SS41P）で、表3.1に化学組成および機械的性質、図3.1に試験片の寸法を示す。溶接前の表面処理として酸洗いを行ない表面の黒皮を除去した。

3.2 実験方法

実験に使用した溶接機は2章で述べた試作機で、電極は外径40

mm、チップ先端半径150mmのクロム鋼製R形電極を用いた。電流の測定は2次回路にそう入したトロイダルコイルの出力を積分し、メモリスコープに記録して行ない、加圧力はロードセルにより測定した。トロイダルコイル+積分器の出力はあらかじめ同軸分流器に溶接電流を通じて校正した。また、溶接電流は第1パルスの最高値（図2.1参照）で表示した。ヒートタイム5サイクルの場合の実効値は、最高値の70～85％（位相制御角によって異なる）であり、溶接中電流は図3.2のように変化するので、平均溶接電流は上記の表示値よりはい

表 3.1 被溶接材の化学組成および機械的性質
Chemical composition of welding material and its mechanical properties.

化 学 組 成					機 械 的 性 質		
C	Mn	Si	P	S	強 度	伸 び	硬 度
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(kg/mm ²)	(%)	(VHN)
0.12	0.62	0.043	0.012	0.018	45.5	40.8	155

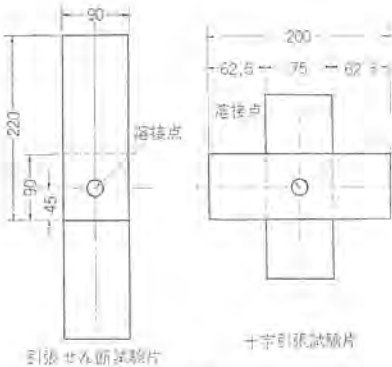


図 3.1 試験片の形状
Dimensions of the test piece.



図 3.2 溶接中の溶接電流の変化
Amplitude variation of welding current during welding.

表 3.2 厚板軟鋼板の点溶接条件
Spot welding condition of thick mild steel plate.

板 厚 (mm)	溶接電流 (A)	通 電 時 間			加圧力 (kg)	電 極 形 状 (mm)	ナゲット 径 (mm)	引張せん 断強度 (t)
		ヒート (サイ クル)	タール (サイ クル)	パルス (パルス)				
4.5+4.5	47,000	5	3	12	1,800	40φ, 150 R	15	7
6+6	55,000	5	3	19	2,600	40φ, 150 R	19	17
9+9	66,000	5	3	36	5,500	40φ, 150 R	25	21
12+12	71,000	5	3	62	7,500	40φ, 150 R	28	32
16+16	75,000	5	3	75	10,500	50φ, 200 R	32	—
19+19	82,000	5	3	96	12,700	50φ, 200 R	37	—
22+22	86,000	5	3	118	16,000	50φ, 200 R	41	—
25+25	91,000	5	3	146	20,000	50φ, 200 R	45	—

く分小さくなる。

溶接後各試験片について引張せん断試験、十字引張試験、断面マクロ試験、硬度試験を行なった。

3.3 実験結果

3.3.1 ナゲットの生成過程

まず厚板鋼板におけるナゲットの生成過程を調べるため、板厚 12

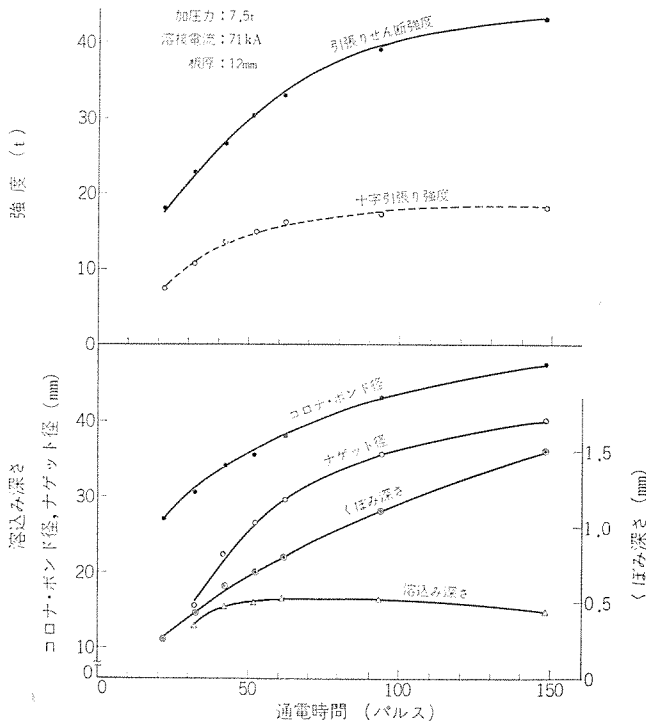


図 3.3 溶接時間によるナゲット形状および溶接強度の変化
Variation of nugget dimensions and weld strength with weld time.

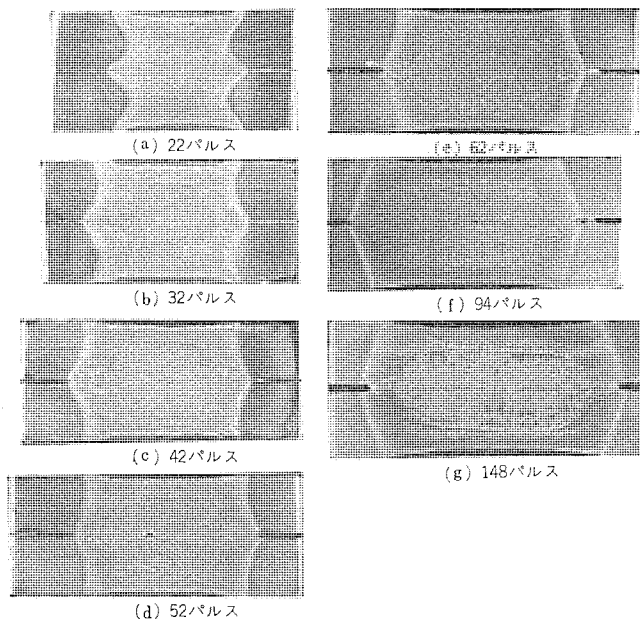


図 3.4 図 3.3 に対応した断面マクロ写真
Macro photographs of weld nuggets corresponding to Fig. 3.3.

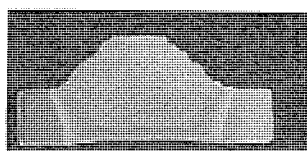


図 3.5 十字引張試験後の断面写真
Macro photograph of weld nugget after cross tension test.

mm の鋼板を溶接電流 71,000 A、加圧力 7.5 ton に保って通電時間 (1 パルスはヒートタイム 5 サイクル、クールタイム 3 サイクル) を変化して溶接した。図 3.3 はその結果で、通電時間と引張せん断強度、十字引張強度、ナゲット径、コロナボンド径、溶込み深さ、およびくぼみ深さの関係を示している。また、図 3.4 (a)~(g) はこれに対応した断面マクロ写真である。図にみるとおり、ナゲットは 32 パルス目から形成されはじめ、ナゲット径はその後通電時間とともに大きくなる。

板厚 1 mm の薄鋼板ではナゲット径は 12 サイクル付近で飽和し、その後の通電によってほとんど増加しないが、12 mm の厚鋼板では 150 パルス (ヒートタイムの合計は 750 サイクル) においてもなお増加の傾向にある。熱伝導論によれば⁽²⁾、点溶接の熱時定数は板厚の 2 乗に比例するので、もし 1 mm 厚鋼板の定常状態に達するに要する時間を 12 サイクルとすれば、12 mm 厚の鋼板では 1,728 サイクルとなり、ヒートタイム 5 サイクルでは 346 パルスも必要となる。

このように厚板鋼板の熱時定数は著しく大きい。一方溶込み深さは 42 パルス付近でほぼ飽和し、その後ほぼ一定の値になるが、90 パルス以上の通電時間においてはくぼみ深さが大きくなるため、溶込み深さは逆に減少している。

引張せん断強度はナゲット径またはコロナボンド (ナゲットの周囲の圧着部) 径にほぼ比例して通電時間とともに増加する。破断形式は 22 パルスでせん断破断、32~94 パルスでナゲットのせん断破断、148 パルスでは母材破断である。52 パルスの試験片について (引張せん断強度) / $(\frac{\pi}{4} d_n^2)$ を計算すると、54.6 kg/mm² となり、この値は表 3.1 の母材の最大引張強度 46.5 kg/mm² よりも大きい。また、ナゲットの形成されていない 22 パルスにおける (引張せん断強度) / $(\frac{\pi}{4} d_c^2)$ は 32.2 kg/mm² であり、十字引張強度もかなり大きい (延性比: 0.42)。このことから厚板鋼板の点溶接においては、ナゲット周囲の圧着部が溶接強度に大きく寄与していることがわかる。

しかしナゲット径が 20 mm 以上の領域では、薄板の場合と同様に引張せん断強度はナゲット径にほぼ比例し、その値は 1,100~1,200 kg/mm (1 mm 厚の鋼板では 110~120 kg/mm) である。

十字引張強度は 62 パルス付近でほぼ飽和し、その後あまり増加しない。破断形式は 22~42 パルスで面断、52 パルス以上でせん (栓) 状破断である。図 3.5 は十字引張試験後の断面写真であるが、コロナボンドの周囲から割れが始まり、ナゲットの周囲にそって破断していることがわかる。十字引張強度を引張せん断強度で除した延性比は 0.4~0.5 で薄板鋼板の 0.8~0.9 に比較して小さい。くぼみ深さは通電

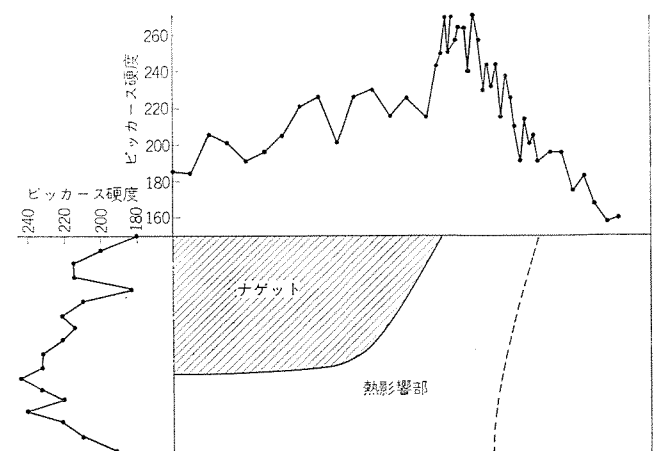


図 3.6 通電時間 62 パルスの試験片の硬度分布
Hardness survey of the test piece with 62 weld pulses.

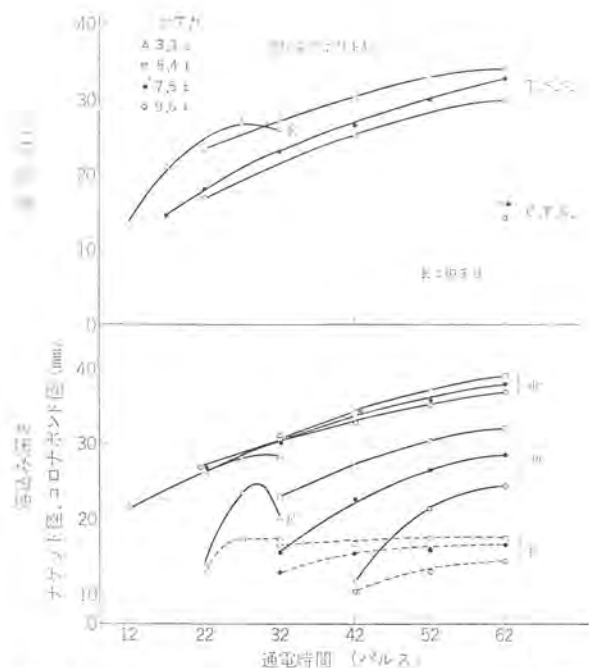


図 3.7 加圧力がナゲット形状および溶接強度におよぼす影響
Effect of electrode force on nugget dimensions and weld strength.



(a) 加圧力: 3.3t
通電時間: 27 パルス

(b) 加圧力: 5.4t
通電時間: 62 パルス



(c) 加圧力: 9.6t
通電時間: 62 パルス

図 3.8 図 3.7 に対応した断面マクロ写真
Macro photographs of weld nuggets corresponding to Fig. 3.7.



図 3.9 1 枚板におけるブローホールの発生
Macro photograph showing occurrence of blow holes in single plate.

時間とはほぼ比例して大きくなっている。

図 3.6 は 62 パルスの試験片の硬度分布図である。熱影響部の硬度は母材硬度 160 (ビッカース硬度) より漸次増加し、ナゲットの近傍で最高硬度 270 に達する。ナゲットの硬度は周辺で高く、中心ほど低くなる傾向にある。ナゲットの平均硬度は 210 で、1 mm 厚鋼板の 280~300 に比べてかなり低い。

3.3.2 加圧力の影響

図 3.7 は溶接電流を 71,000 A に保って加圧力を変化させた場合の通電時間と引張せん断強度 (T. S. S.), 十字引張強度 (C. T. S.),

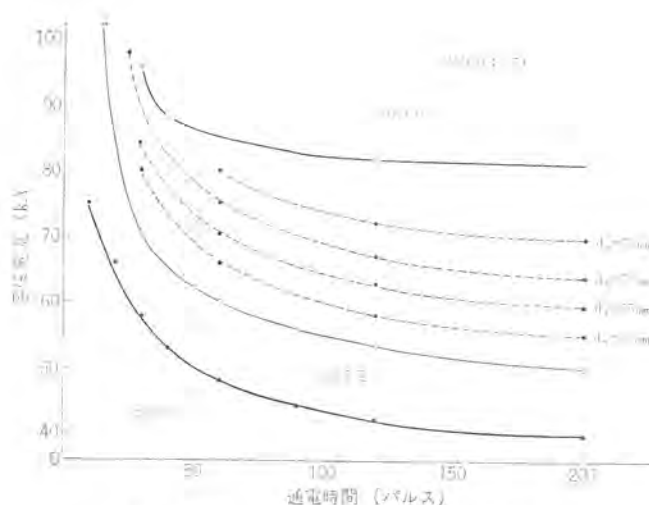


図 3.10 12 mm 厚鋼板の電流—時間曲線
Current-time curves for 12 mm thick steel plate.

ナゲット径 (d_n), コロナボンド径 (d_c) および溶込み深さ (P) の関係を示したものである。図に見るごとく、ナゲット径は加圧力の増加とともに著しく減少するが、コロナボンド径はあまり変化しない。

また、溶込み深さは加圧力の増加とともに減少している。このことから加圧力の増加に伴う被溶接材に与えられる熱量の減少は、通電面積の増加よりもむしろ被溶接材と電極との熱伝導が良くなることにもとづくものであると考えられる。3.3.1 項で述べたように溶接強度はナゲット径およびコロナボンド径の両者によって決まるので、加圧力が増加してナゲット径が著しく減少してもコロナボンド径があまり変化しないので、引張せん断強度、十字引張強度はナゲット径の変化ほど著しくは減少しない。

加圧力のもう一つの影響としてブローホールの発生がある。図 3.8 は図 3.7 に対応した断面マクロ写真であるが、加圧力 3.3 ton のものでは大きなブローホールが発生しており、加圧力の増加に従ってブローホールの発生は少なくなる。このように一般的な傾向としては加圧力の増加にともない、ブローホールは減少するが、加圧力を増加させるだけではブローホールを完全に防止することはできない。

図 3.9 はブローホールの発生原因を調べるために、25 mm の 1 枚板を加圧、通電して溶融せしめたものであるが、1 枚板においてもブローホールが発生している。このことからブローホールの発生原因は被溶接材の表面状態によるものでなく、材料内部に固溶している酸素、窒素などが溶融時に気化するためであることが推察される (3.3.3 項参照)。

3.3.3 溶接電流、通電時間の影響

被溶接材で発生する抵抗熱は $0.24 RI^2T \text{ cal}$ (R : 被溶接材の電極間の抵抗, I : 溶接電流, T : 通電時間) であるが、被溶接材、電極形状および加圧力が同じであれば R が等しいので、発熱量は I^2T に比例する。しかし、被溶接材で発生した熱量の一部は電極および溶接部以外の被溶接材に逃げ、その熱量は通電時間とともに増加するので、結局ナゲット形成に有効に利用される熱量は I^2T が同じであれば、 T が大なるほど減少する。

図 3.10 は加圧力を 7.5 ton に定めて溶接電流と通電時間の組合せを種々変えて溶接し、同一ナゲット径を与える溶接電流と通電時間の関係 (電流—時間曲線) を求めた結果である。図中、上の実線は中チリの限界曲線、中の実線はナゲット生成の開始点、下の実線は圧接開始点を示している。図にみるように厚板鋼板は非常に広い条

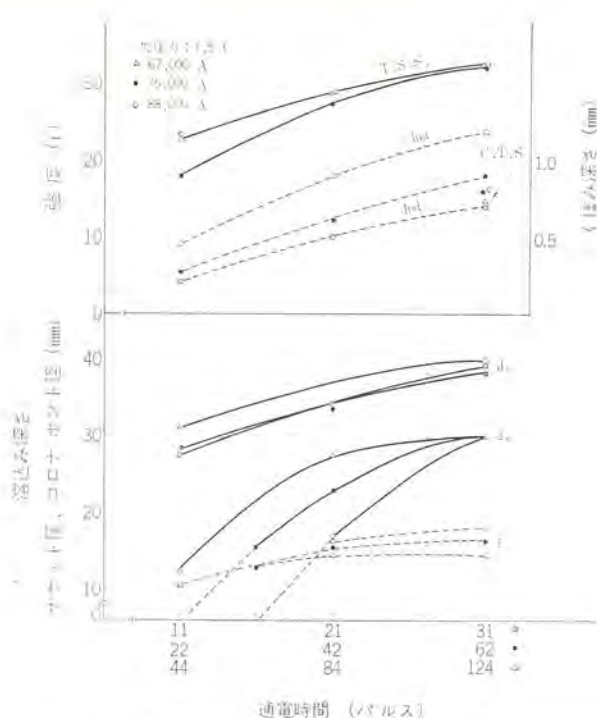


図 3.11 溶接条件によるナゲット形状および溶接強度の変化
Variation of nugget dimensions and weld strength with welding conditions.

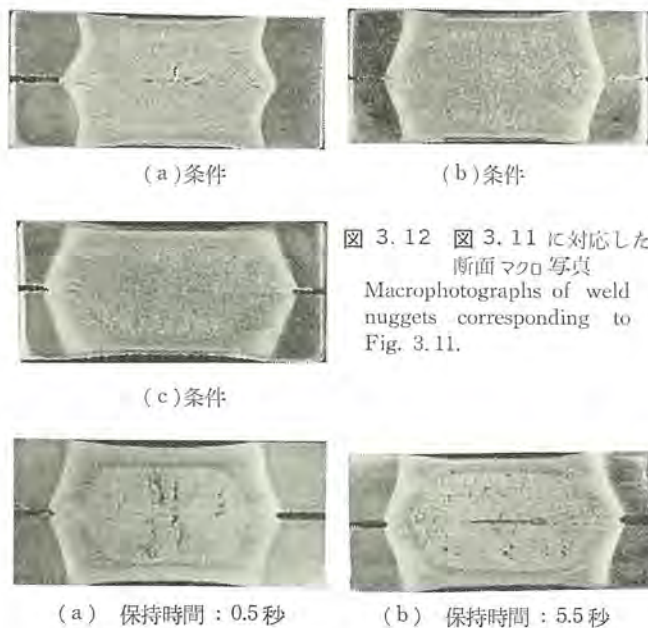


図 3.12 図 3.11 に対応した
断面マクロ写真
Macro photographs of weld
nuggets corresponding to
Fig. 3.11.

図 3.13 保持時間が十分でない場合の断面マクロ写真
Macro photographs of weld nuggets in case of insufficient
hold time.

件範囲を有している。そこで溶接条件と溶接結果の関係を調べるため、ナゲット径 (d_n) が 30 mm となるような

- (a) 大電流短時間通電条件 (88,000 A, 31 パルス)
- (b) 中電流中時間通電条件 (75,000 A, 62 パルス)
- (c) 小電流長時間通電条件 (67,000 A, 124 パルス)

の条件で溶接した。

図 3.11 は (b) 条件の通電時間 T に対して、(a) 条件の通電時間を $T/2$ 、(c) 条件の通電時間を $2T$ とした場合の溶接結果を比較したものである。ナゲット径は短時間通電領域において (c) 条件 $>$ (b) 条件 $>$ (a) 条件となっているが、これは通電時間の減少とともに小

電流条件の熱伝導損が減少するためである。これに対しコロナボンド径はあまり差がなく (c) 条件がわずかに大きい。

引張せん断強度は $d_n=30$ mm ではほぼ等しいが、短時間領域では (b) 条件が少し低い。(c) 条件が (b) 条件よりも強いことは、ナゲット径の大なることから容易に理解できるが、ナゲット径の小さい (a) 条件の強度が高いのはコロナボンドの強度の差によるもので、(a) 条件は電流密度が大きいので (d_n はほぼ一定) 圧着部の平均温度が高く、その接合強度が大きいためである。

逆のことは (c) 条件の 124 パルスでのコロナボンド径が大きいのにもかかわらず、その十字引張強度が小さいことから明かで、(c) 条件の十字引張試験片はナゲットの周囲から破断している。溶込み深さは電極への熱伝導損の少ない (a) 条件が大きく、(b) 条件、(c) 条件の順で小さくなっている。また、くぼみ深さは同一ナゲット径に対して通電時間の長いものほど大きい。

図 3.12 は $d_n=30$ mm の (a)、(b)、(c) 条件の断面マクロ写真である。写真にみるように、(a) 条件のナゲットはたいこ形の角ばった形状で溶込み深さも大きい、(c) 条件のナゲットは薄板鋼板の点溶接でよくみられるどし状のなめらかな形状となっている。また、(a) 条件においてはブローホールや割れの内部欠陥が発生しやすく、逆に (c) 条件ではブローホールはほとんど発生しない。(a) 条件は急加熱条件であるので、溶融金属の温度も (c) 条件のものよりは高く、局部的には沸点に達することがブローホールの発生原因になっていることも考えられる。

図 3.12 (a) と (c) を比較すると、(a) はナゲット形状および熱影響部の形状が電流密度の分布に対応した形状になっているが、(c) は電極への熱伝導の影響を受けた形状 (熱伝導形) となっている。1 mm 厚の鋼板を標準条件で溶接した場合は、ナゲットの形成される時点 (5 サイクル) から熱伝導形のナゲット形状になるが、12 mm 厚の鋼板では (c) 条件で 60 パルス (300 サイクル)、図 3.3 の条件では 90 パルス (450 サイクル) 付近から熱伝導形のナゲット形状となる。なおナゲットの硬度は (a) ~ (c) 条件でほとんど差がない。

厚板鋼板の熱時定数が大きいので、被溶接材を冷却する保持時間についても注意を要する。図 3.13 は保持時間が不十分な場合の断面マクロ写真であるが、ナゲット内部に熱間割れが発生しているのが見られる。最小保持時間は溶接条件や冷却水量によって多少異なるが板厚 12 mm で 7 秒、9 mm で 5 秒、6 mm で 2 秒程度である。

3.3.4 溶接ピッチの影響

多点溶接継手の溶接に際しては、隣接点への分流が問題になる。実用上分流が無視できる“最小溶接ピッチ”は 3.2 mm 以下の鋼板では板厚の 15~20 倍を取っている。

板厚 12 mm の鋼板の分流効果を調べるため、幅 500 mm、長さ 1,000 mm の鋼板の中心線上に、加圧力 7.5 ton、溶接電流 71,000 A、通電時間 62 パルスの条件で第 1 点を溶接し定められたピッチをへだてて同じ溶接条件で第 2 点目を溶接し、第 3 点目以後は同じピッチで溶接電流のみを徐々に増加して溶接した。溶接ピッチ 60, 90, 120, 200, 300 mm について上記の試験片を作成し、断面試験によりそのナゲット径の変化を調べた。

図 3.14 はその結果であり、図の実線は第 1 点目と同じナゲット径 (26.5 mm) を得るために必要な電流の第 1 点目の電流値 (71,000 A) に対する増加分を示し、点線は第 1 点目のナゲット径に対する第 2 点目のナゲット径の割合を示している。図を検討すると、溶接ピッチ 60 mm の場合は第 1 点目と同じナゲット径を得るためには電流を

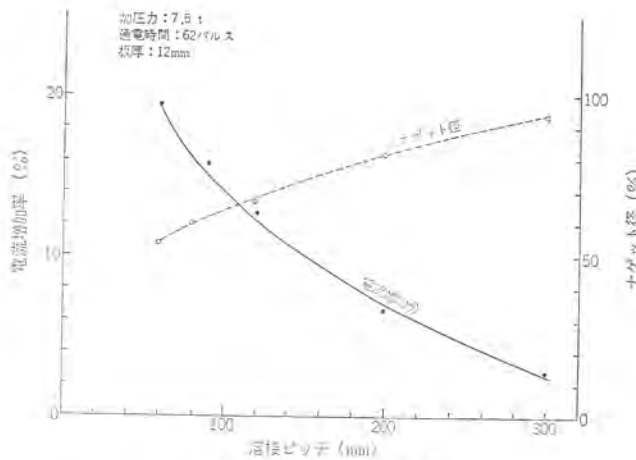


図 3.14 溶接ピッチの影響
Effect of weld pitch.

約 20 % 増加する必要がある。もし、同じ電流値で溶接すると、ナゲット径が第 1 点目の約 50 % に減少することになる。溶接ピッチ 300 mm では電流の増加率は約 3 %、ナゲット径は約 95 % であるので、この溶接ピッチでは分流効果がほとんど無視できることがわかる。

3.3.5 溶接条件

以上の実験結果にもとづいて、各板厚の軟鋼板の点溶接条件を求めた結果を表 3.7 に示す。これらは代表的な値であり、3.3.4 項に述べたように、厚板軟鋼板は広い適正溶接条件範囲を有している

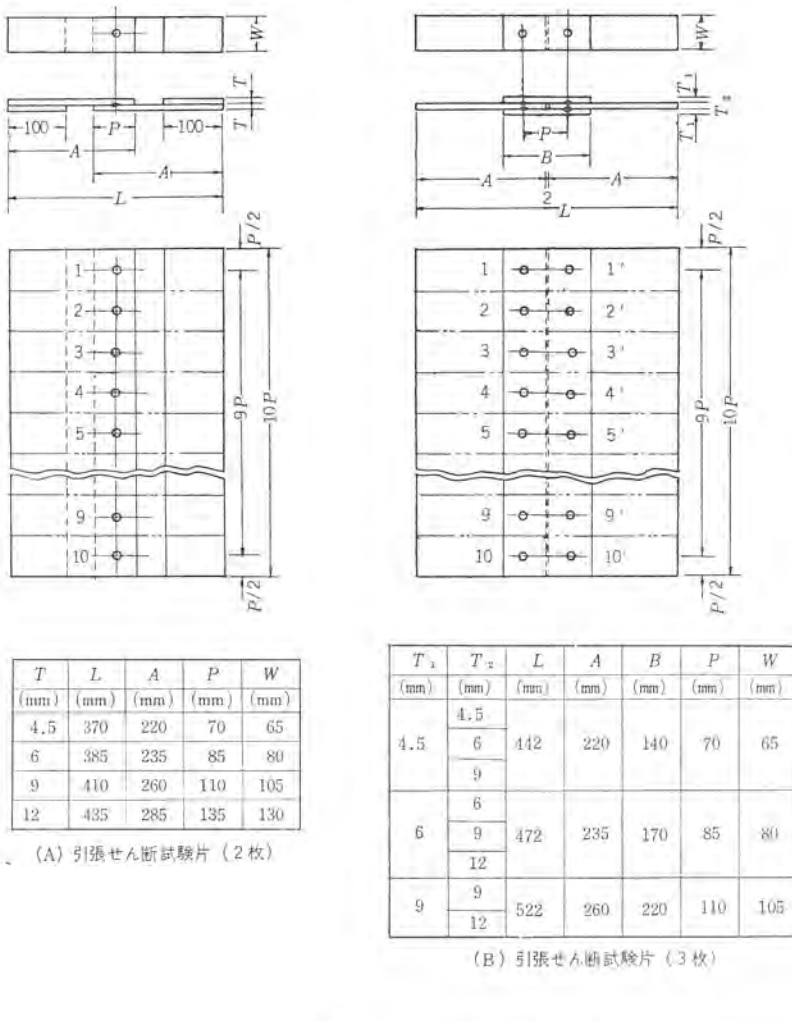


図 4.1 試験片の形状・寸法

ので、使用目的や溶接機の容量に応じて溶接条件を選定することが好ましい。

4. 点溶接継手の機械的強度

われわれは厚板鋼板の点溶接の基礎研究を行なうと同時に、建築学会・構造標準委員会・点溶接研究小委員会に参加して、点溶接継手の機械的強度に関する実験を行なった。ここではこれらのうち、本試作機で溶接し、武蔵工業大学建築学科で試験した結果を記す。

被溶接材は板厚 4.5, 6, 9, 12 mm の一般構造用鋼 (SS 41 P) で、溶接前に酸洗処理を行なった。各板厚の組合せについて、次の試験を行なった。

- (A) 引張せん断試験 (2 枚板)
- (B) 引張せん断試験 (3 枚板)
- (C) 圧縮せん断試験
- (D) 十字引張試験

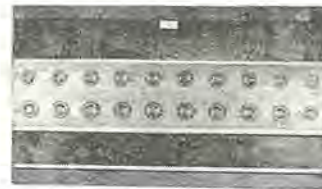


図 4.2 溶接後の試験片の外観写真
Photograph of welded test piece.

Dimensions and shapes of test pieces.

表 4.1 試験片の製作に用いた溶接条件
Welding condition for making test piece.

板 厚	溶接電流	通 電 時 間			加圧力	電 極 形 状	くぼみ 深さ
$T_1+(T_2)+T_1$ (mm)	(A)	ヒート (サイ クル)	クール (サイ クル)	パルス (パル ス)	(kg)	(外径 40 φ)	(mm)
引 張 セ ン 断 試 験 片 (2 枚)							
4.5+4.5	52,000	5	3	12	2,200	C形, 14 φ	0.35
6+6	67,500	5	3	19	3,000	C形, 17 φ	0.35
9+9	74,500	5	3	36	6,100	C形, 22 φ	0.57
12+12	82,500	5	3	62	8,100	R形, 150 R	0.66
引 張 セ ン 断 試 験 片 (3 枚)							
4.5+4.5+4.5	55,000	5	3	16	2,200	C形, 14 φ	0.20
4.5+6+4.5	55,500	5	3	18	2,200	C形, 14 φ	0.29
5.5+9+4.5	58,000	5	3	22	2,200	C形, 14 φ	0.36
6+6+6	63,000	5	3	28	3,000	C形, 17 φ	0.46
6+9+6	67,500	5	3	34	3,000	C形, 17 φ	0.39
6+12+6	66,000	5	3	44	3,000	C形, 17 φ	0.47
9+9+9	74,500	5	3	56	6,100	C形, 22 φ	0.36
9+12+9	77,000	5	3	66	6,100	C形, 22 φ	0.62
圧 縮 セ ン 断 試 験 片							
9+12+9	81,000	5	3	66	6,100	C形, 22 φ	0.53
引 張 , ね じ り 試 験 片							
4.5+4.5	49,000	5	3	12	2,200	C形, 14 φ	0.36
6+6	60,500	5	3	19	3,000	C形, 17 φ	0.52
9+9	67,500	5	3	36	6,100	C形, 22 φ	0.93
12+12	73,000	5	3	62	8,100	R形, 150 R	0.78

(E) ねじり試験

試験片の形状寸法, 溶接条件, 試験片の外観写真および試験結果をそれぞれ図 4. 1, 表 4. 1, 図 4. 2 および表 4. 2 に示す。

5. む す び

われわれは試作点溶接機を用いて厚板軟鋼板を溶接し, その溶接現象や機械的性質について検討した結果, 適正な溶接条件で点溶接

表 4. 1 試験結果の要約
Summary of test results.

板 厚		4.5+4.5	6+6	9+9	12+12
引張せん断試験	最大荷重 (kg)	7,560	11,330	20,680	21,330
	ナゲット径(mm)	16.7	20.6	24.3	23.2
	試験片数	20	20	20	20
引張試験	最大荷重 (kg)	—	3,660	7,910	12,910
	降伏荷重 (kg)	—	3,190	7,280	10,880
	ナゲット径(mm)	—	24.6	29.4	30.7
	試験片数	10	10	10	10
引張最大荷重/引張せん断荷重		—	0.323	0.382	0.605
ねじり試験	最大モーメント (kg-cm)	6,500	13,200	26,000	—
	降伏モーメント (kg-cm)	4,700	10,300	21,700	—
	ナゲット径(mm)	18.5	23.5	31.2	—
	試験片数	10	10	10	10
板 厚		4.5+4.5+4.5	4.5+6+4.5	4.5+9+4.5	6+6+6
引張せん断試験	最大荷重 (kg)	11,460	15,460	17,160	19,650
	ナゲット径(mm)	13.5	14.6	14.7	15.5
	試験片数	20	20	20	20
板 厚		6+9+6	6+12+6	9+9+9	9+12+9
引張せん断試験	最大荷重 (kg)	23,290	26,580	24,550	25,580
	ナゲット径(mm)	17.6	18.4	16.9	17.9
	試験片数	20	20	20	20

された継手は, リベット継手やアーク溶接継手に比べてそんな色のない継手強度を有することの確信を得た。今後, 建築・造船・車両などの工業分野で厚板鋼板の新しい接合法として点溶接が利用され, 作業能率の向上, 原価低減にその威力の発揮されることを望む次第である。

参 考 文 献

- (1) 馬場, 越智, 大賀: 三菱電機技報 40, 1,547 (昭 41)
- (2) 安藤, 中村: 溶接学会誌 26, 558 (昭 32)

遅延列車の回復運転法

山崎 英蔵*・小畑 甫**

Schedule Adjustment for Transit System

Kamakura Works

Eizô YAMAZAKI・Hajime OBATA

The performance of an apparatus to automatize the train operation has been sharply improved recently, the study being nearing completion. A future problem is a study on the centralization of the operation. It is then a world trend to make investigation on the central control of the train operation by various methods. The objective of the central control is to optimize a systematic operation of a transportation system. It aims at not only transport plans, prevention of operation disorder, early recovery of operation delays, automatic gathering of operation information and automatic dispatch of instructions but also setting the control among trains and on individual trains by means of computers. This paper discusses the problem of the restoration of delayed trains, one subject of the central control, viewed from a group of trains. This is for the purpose of minimizing the disturbance of train operation due to high traffic density.

1. ま え が き

高密度な列車運転系では、何らかの原因で列車が遅れた場合、駅での乗客が増加し、この乗客を乗車させる時分だけさらに列車の停車時分を伸ばさねばならないため、列車の遅れはますます増大し輸送系に混乱を招く。したがって、遅延列車が発生した場合、できるだけ短時間に正常ダイヤにもどす必要があり、この問題は、列車計算制御の主要目的の一つとされている。

列車遅延と信号機による後続列車への遅延伝播(播)は石合・新木・荒井⁽¹⁾によって論じられている。遅延列車による輸送系のみだれ防止には、鳥居氏が遅延列車に前後する列車群の運転間隔を等しくする方法を提案している。本論文は遅延列車の回復可能限界を解析し、いかなる場合にも回復可能な方法として、遅延列車に先行する列車群を制御することを提唱するもので、2, 3の関数形で、先行列車群を制御した場合の制御列車台数、回復予定点などの回復性能を解析している。本論文の解析には、列車の走行中における回復運転能力だけでなく、乗客の乗降時分をも考慮しているのでより実用的な方法の一つを与えるものと考えられる。

2. 列車の遅延と原因⁽¹⁾

列車の運転は多数の要素で構成されており、1構成要素にマイナスが発生した場合、他の構成要素でこれを補ない安全と確実を守っている。しかし、これらの構成要素のいくつかがくずれ、他の要素で補いきれなくなったとき、列車の遅延となってあらわれる。

この故障要因を分類すると、

- (1) 列車自体の故障条件(動力・制御・発電・連絡等の車両装置の故障)
- (2) 内部故障条件(電源・架線・信号・保安装置・通信・線路・橋・トンネル等の故障)
- (3) 外部故障条件(気象による直接被害、踏切障害・乗客時分増加等)
- (4) 列車誤運転・取扱い条件(乗務員の誤運転・取扱いによる列車衝突・転覆等)

となり、列車の遅延の大きさも脱線・転覆による終日ないし数日におよぶものから、徐行区間の減速・駅乗降時分の増加等による僅少

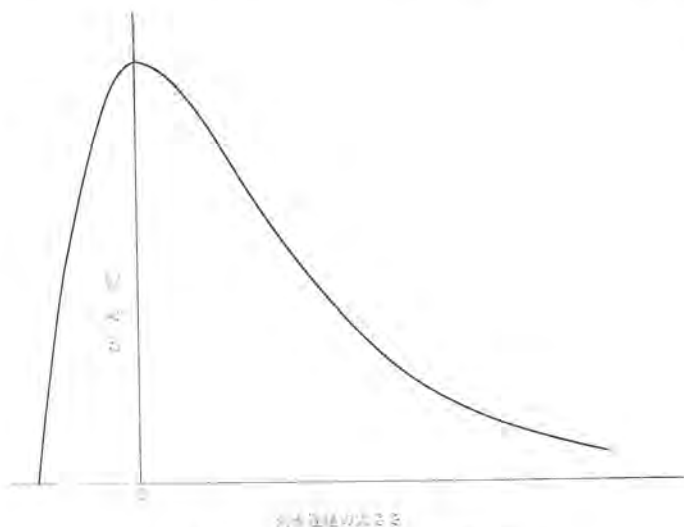


図 2.1 列車遅延の発生ひん度分布
Frequency distribution of train delays.

なものまである。このように列車遅延の原因はきわめて広範囲にわたり、その大きさも一様でない。しかし、上記故障原因による列車遅延の大きさと、そのひん度が図 2.1 の如くであることが推定される。すなわち、多数の構成要素による列車の運転では、運転上の誤差ともみられる正負の微細な遅延は決して避けられないものであり、したがって、そのひん度は非常に大きな値になるが、大きな遅延はそれほど起こっていないから、そのひん度は小さくなる。また、列車運転間隔を短かく高密度運転にするほど、微細な遅延のひん度はより大きな値を示すことが推定される。

3. 輸送系のモデル

従来、列車遅延に対する対策としては、運転ダイヤ作成の際に運転曲線から標準運行時分を査定し、これに一定の余裕時分を加えている。この場合、一駅間の走行時分が長いほど、その間に回復しうる時分(以後、駅間回復時分と呼ぶ)は大きく、東京―大阪間の如き長距離列車においては、前章で示した列車遅延の比較的大きいものまで回復せしめる。しかし、山手線にみられるような通勤輸送区間においては、駅間回復時分は小さくひん度の多い微少な列車遅延も回復させることが困難となる。(この場合の回復可能限界は後述



図 3.1 列車輸送系のモデル
Model of transit system.

する)さらに、通勤輸送においてはラッシュ時に輸送量の増大をはかるため、高密度な列車運転を強要される場合が多く、微小な列車遅延のひん度が大きくなり、回復不能な遅延列車が続発するため輸送系の乱れが生じ、最初のもくろみとは逆に輸送量の減退をきたすことにもなる。

本論文は、駅間距離の短小な高密度運転の輸送系における遅延列車の回復を目的としているが、普通の列車区間または長距離列車区間においても、根本的には相異はないので他の列車区間にも適応できるのもちろんである。さて、われわれは思考上列車輸送系を単純化して図 3.1 に示すような列車輸送系モデルを採用した。すなわち、等間隔に駅が配され、一方向輸送がなされている列車区間において、一駅区間に一列車が運行している路線を考える。列車の運転性能は等しく、同一の駅間回復時分を持ち、各駅での乗客が駅に到達する割合は等しいものとする。

4. 列車遅延の推移と回復可能限界

本論文では、正常ダイヤを基準として考え、列車の遅延は列車が駅を発車する時刻を正常ダイヤにおける当該駅発車時刻と比較して、その偏差をその列車の当該駅での遅れ時分と定義している。

また、以下の論義において、列車がどこで遅れを発生しようとも、上記に定義した駅発車時刻の遅れとして表わすことが可能であり、どの駅でどの列車が遅れを生じても前章の輸送モデル系では等価となるので、最初に何らかの原因で遅れを招いた駅を 0 駅とし、その列車を 0 列車と名付ける。以後、列車の進行方向に数えて 0 駅より第 n 番目の駅を n 駅、0 列車より第 n 番目に先行している列車を n 列車と呼ぶ。さらに、共通の定数として、一駅区間の列車走行中に回復可能な時分を駅間回復時分、 α と定義し、単位時分に駅に到達した乗客の乗降時分を乗降遅延時分、 β と定義する。すなわち、乗降遅延時分 β は、単位時分に駅に到達する乗客数を P 人、列車の乗降口が l 個、乗客 1 人が乗降するに要する時分を t 秒とすれば、

$$\beta = \frac{P}{l} t \dots\dots\dots (4.1)$$

で表現することができる。一般に、駅間回復時分 α は列車の駅間走行時分の 10% 程度であり、乗降遅延時分 β は (0, 1) 区間にあるが、1 以上の場合も十分実現可能である。

4.1 先行列車群が定刻運転をしている場合

列車遅延の回復対策として従来主体的に取られてきた方法で、遅延列車が単独で回復運転をする場合に相当している。この場合、遅延列車は図 4.1 に示す如き推移をたどり、回復不能となる場合もあることがわかる。図 4.1 は 0 列車のダイヤを表示するもので、実線が正常ダイヤを示し、点線が 0 駅で ΔT_0 の遅れを生じた場合を示す。もちろん ΔT_0 は後続列車が 0 駅に到着する時刻以上に大きな値となる場合は、本論文では考慮外としている。(この場合には後続列車への遅延伝ばを考慮する必要が生ずる)

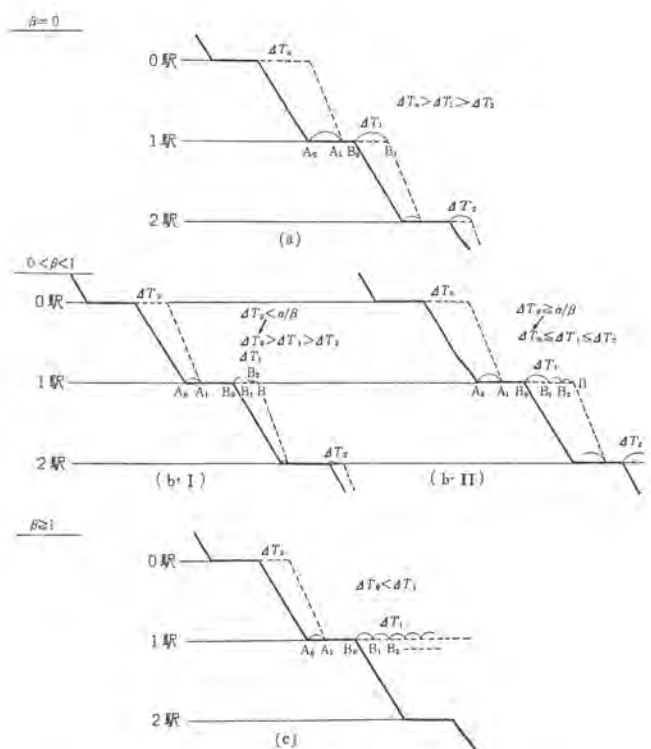


図 4.1 先行列車が定刻運転時における遅延列車の運行状況
Transition state of delayed trains when the former trains were operated on the standard schedule.

以下に、図 4.1 を順を追って説明する。

(1) $\beta = 0$

これは、列車の遅延によって次駅で増加した乗客を乗車させるに要する時分が 0 であることを意味しており、正常ダイヤにおいて、列車の駅停車時分に十分な余裕時分が含まれているときに実現する。いま、0 駅で ΔT_0 だけ遅れて発車した 0 列車は次駅である 1 駅まで走行する間に、駅間回復時分 α だけ遅延を回復して 1 駅に到着する。しかし、列車遅延によって生じた 1 駅での乗客増加分の乗降時分を 0 列車の 1 駅停車時分に加える必要はないので、0 列車は正常ダイヤに定められた停車時分だけ停車後、1 駅を発車する。したがって、0 列車の 1 駅での遅れは $(\Delta T_0 - \alpha)$ となり、数駅後には 0 列車は正常ダイヤに復帰できる。(ある駅の遅れは前駅の遅れより α だけ常に小さい)

(2) $0 < \beta < 1$

ほとんどの場合がこの範囲に属し、列車遅延に起因する次駅の乗客増加分の乗降時分を駅停車時分に加えなければならない場合である。図の (b-I) を説明すると、0 駅で ΔT_0 遅れた 0 列車は $\beta = 0$ なら 1 駅に A_1 時刻に到着、 B_1 時刻に発車できる。しかし、本例の場合は B_1 時刻に発車すると、 B_0 時刻までに 1 駅に到達した乗客は乗車できるが、 B_0 時刻から B_1 時刻に到達した乗客は積み残しのまま発車することになる。この増加乗客を乗車させるには列車の発車時刻は B_2 にする必要がある。すると、さらに B_1 時刻から B_2 時刻間到達の乗客を乗車させるため発車は B_3 時刻になる。以後、無限級数的に発車時刻は遅れるが、 β が (0, 1) 区間では定点 B に収束する。そこで、最終的に 1 駅での列車遅延 ΔT_1 は B_0 時刻から B 時刻まで、0 列車が正常ダイヤに復帰できるかいないかは、 ΔT_1 と ΔT_0 の比較で決定される。図の (b-I)・(b-II) はそれぞれ、回復可能・回復不能の場合を示している。

(3) $\beta \geq 1$

前述のことから容易に推論できるように、この場合には、0 駅の遅れに起因する 1 駅での増加乗客の乗降時分の増分は、増加乗客を誘起する列車遅れより大きくなり、1 駅で 0 列車は発車不能となる。したがって、もちろん正常ダイヤへの復帰は不可能である。

以上、図 4.1 を参照しつつ遅延列車の推移をみたが、これを数式で表わすと次のようになる。0 例の如く、0 列車が 0 駅にて初めて ΔT_0 の出発遅れを生じたとすれば、0 駅より第 n 番目の駅での 0 列車の出発遅れ ΔT_n は、第 $(n-1)$ 番目の駅の出発遅れ ΔT_{n-1} の漸化式として、

$$\Delta T_n = (\Delta T_{n-1} - \alpha) + \beta(\Delta T_{n-1} - \alpha) + \beta^2(\Delta T_{n-1} - \alpha) + \dots (4.2)$$

ただし、 α : 駅間回復時分

β : 乗降遅延時分

を得ることができる。第 1 項目は前駅での出発遅れの内、走行時分内に回収し得なかった遅れで、第 2 項目以下は乗客増加による第 n 駅での遅れを表わしている。式 (4.2) で表わされた無限級数 ΔT_n が有限確定で、かつ単調減少数列となるとときに、われわれは 0 列車の遅延を回復させようといえる。この観点から回復可能限界を決定すれば次の 2 項にまとめられる。

(a) 乗降遅延時分が次の条件を満たさねばならない。

$$0 \leq \beta < 1 \dots\dots\dots (4.3)$$

(b) 初期遅延 (0 駅での列車遅延) が次の条件を満たさねばならない。ただし、 $\beta=0$ のときは、この項の制限は不要である。

$$0 \leq \Delta T_0 < \frac{\alpha}{\beta} \dots\dots\dots (4.4)$$

以上、先行列車を正常ダイヤに沿って定刻運転させるかぎりにおいて、回復不能となる場合が、 $0 < \beta < 1$ のときですら $\Delta T_0 \geq \alpha/\beta$ で生ずることが現実に起こりうることに留意されたい。

4.2 先行列車を遅らせる場合

前節で述べた如く従来の列車遅延の回復対策では、回復可能域が存在し、回復不可能となる遅延列車が発生する。この場合、従来は運行列車の間引き、遅延列車の前後に運行している列車の時間調整等を現場員の勘と経験とから行なっていた。しかし、列車の高密度化に伴い列車運転の相互作用は密に、輸送系は複雑となり、さらに列車調整の判断は瞬時に、かつ適確になされることが要求される。ここに、列車計算制御の活躍の場があり、われわれはこの計算制御に適したアルゴリズムを求めめるため、列車遅延の回復運転法として遅延列車に先行する列車群を故意に遅らせ、いかなる条件の下にも遅延列車を正常ダイヤに復帰させようことを解析した。

図 4.2 は 0 駅において 0 列車が出発遅れを生じた際に、0 列車に先行する第 m 番目までの列車群に対し故意に出発遅れを与えた場合の遅延列車群の推移を示すグラフである。説明の都合上、0 列車と 1 列車の関係を示したが、 $(m+1)$ 台の遅延列車の相隣る 2 台の列車間には同様の関係が成立する。図 4.2 の実線は各列車の正常ダイヤを示し、波線は遅延発生時の各列車の推移を示す。前節にならって図 4.2 の説明を次に示す。

(1) $\beta=0$

各列車は遅れが発生していても、正常ダイヤの駅停車時分だけ停車すればよいので、先行列車が定刻運転をしているときの遅延列車と同じ推移を各列車はたどる。

(2) $0 < \beta < 1$

0 列車の 0 駅での遅れが $\Delta T_0 (=f_0(x_0))$ であるとき、0 列車に

$\beta=0$

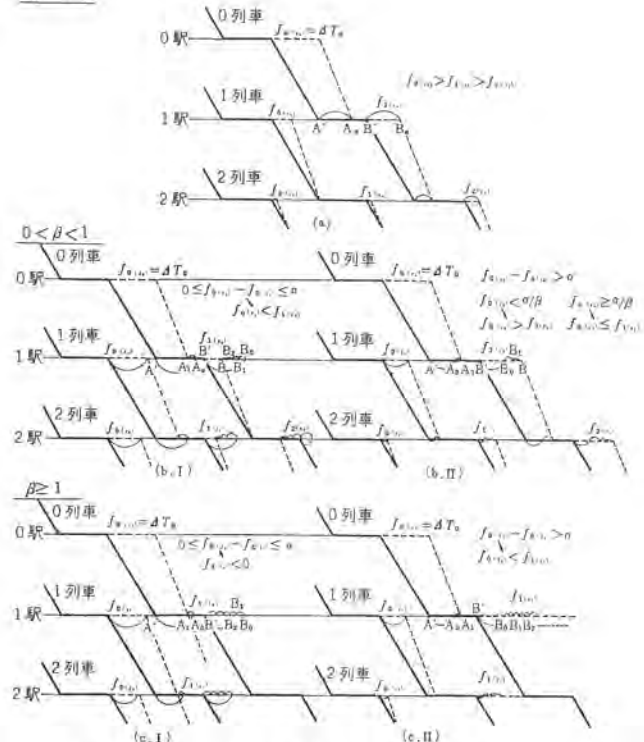


図 4.2 先行列車が制御されたときの列車運行情況
Transition state of delayed trains when the former trains were operated on the controlled schedule.

先行する列車を順に、 $f_0(x_1)$ 、 $f_0(x_2)$ 、 \dots 、 $f_0(x_m)$ だけ故意に遅らせる。今、1 列車は 1 駅を $f_0(x_1)$ だけ遅れて発車するため、0 列車が 1 駅に $f_0(x_1)$ だけ遅れた、 A_0 時刻に到着すれば正常ダイヤに定めた停車時分の停車後、 B_0 時刻に発車して乗客の積み残しは生じない。しかし、1 列車の遅れ $f_0(x_1)$ を 0 列車の 1 駅での到着遅れ $(f_0(x_0) - \alpha)$ より大きく取れば、(b・I) に示す如く 0 列車は A_0 時刻より早い A_1 時刻に 1 駅に到着する。この時正常ダイヤ停車時分後の B_1 時刻に発車するとすれば、 B_1 時刻から B_0 時刻間に到達した乗客は乗車させなくともよいので、この乗客乗降時分だけ早い B_2 時刻に 0 列車は発車できる。さらに、 B_2 時刻に発車すれば、 B_2 時刻から B_1 時刻間の乗客乗降時分だけ早い B_3 時刻に発車できる。以下 0 列車の 1 駅発車時刻は、 β が $(0, 1)$ 区間なら収束し、 B 時刻となり、発車遅れは B' 時刻と B 時刻の偏差分、 $f_1(x_0)$ で表わせる。 $f_1(x_0)$ は $f_0(x_1)$ より小さく、 $f_0(x)$ は $f_0(x_0)$ より小さく取れるので、0 列車の 1 駅での遅れは 0 駅での遅れより小さくでき、列車遅延の回復が初期遅れのいかんにかかわらず可能であることがわかる。

(b・II) は 1 列車の遅れを少なく取り過ぎたために、初期遅延の大きさと回復可能と回復不能の場合があることを示している。

(3) $\beta \geq 1$

根本的な考え方は前項と同じであるが、 β が 1 以上であるため B 時刻が収束をしない。(c・I) の場合、0 列車が A_1 時刻に 1 駅に到着すると $-\infty$ の遅れで発車することができる。すなわち、これは、0 列車が 1 駅に到着する以前に 1 駅を発車することを意味し現実には即さないことである。しかし、ここで意味されていることは、0 列車が 1 駅に A_1 時刻に到着すると乗客がないということで、1 駅を 0 列車は通過できる。この場合に列車遅延の回復できることは、1 駅での 0 列車遅延が $(\Delta T_0 - \alpha - \tau)$ となり、0 駅での遅れより小

さくすることから明らかである。ただし、 τ は正常ダイヤに定められた列車の駅停車時分である。

(c・II) は 0 列車が 1 駅を発車できず回復不能の場合を示している。

以上、先行列車の遅延を適当に選択することにより、いかなる場合にも回復可能にできることが分かる。以下、先行列車群に遅延を与える制御法に関して検討を加える。

5. 遅延列車および先行列車群の遅延モデル

われわれは、何らかの原因により遅延列車が発生した場合、先行する列車群に適当な遅延を与えることで、いかなるときにも遅延の回復が可能となることを知った。ここで、われわれは先行列車群に与える遅延を詳細に検討するため、図 5.1 の如き遅延モデルを作成した。

0 列車が 0 駅で ΔT_0 だけ出発が遅れたとする。このとき 0 列車に先行する列車群も、 $(0, \Delta T_0)$ を通る $f_0(x)$ で与えられる遅れだけ遅れて各駅を発車させる。ただし、 x は 0 列車から各先行列車までの距離を表わす。一駅間距離を Δx 、0 列車より第 m 番目を先行する列車を x_m で表わせば次のようになる。

$$x_m = m(\Delta x) \dots \dots \dots (5.1)$$

今、0 列車が、0 駅より数えて第 n 番目の n 駅を発車するとき、0 列車およびその先行列車群の遅れが $f_n(x)$ で表わせるとして、その推移を示したものが図 5.1 である。以後、われわれは $f_n(x)$ を遅延配列関数と呼ぶ。すなわち、ある列車がある駅を発車し次駅を発車するまでの時分を 1 時限と定義するなら、 $f_n(x)$ は 0 列車より距離 x だけ先行している列車の n 時限 (列車に初期遅延が生じたときより数えて) めの出発遅れを表わす。したがって、われわれは $f_n(x)$ を $(n-1)$ 時限めの遅延配列関数の漸化式として次式をうる。

$$f_n(x) = f_{n-1}(x) - \alpha + \beta[f_n(x) - f_{n-1}(x + \Delta x)] \dots \dots \dots (5.2)$$

ただし、 $f_n(x)$: 0 列車より距離 x を先行する列車の n 時限めの遅延

$f_{n-1}(x)$: 0 列車より距離 x を先行する列車の $(n-1)$ 時限めの遅延

$f_{n-1}(x + \Delta x)$: 0 列車から距離 $(x + \Delta x)$ を先行する列車の $(n-1)$ 時限めの遅延

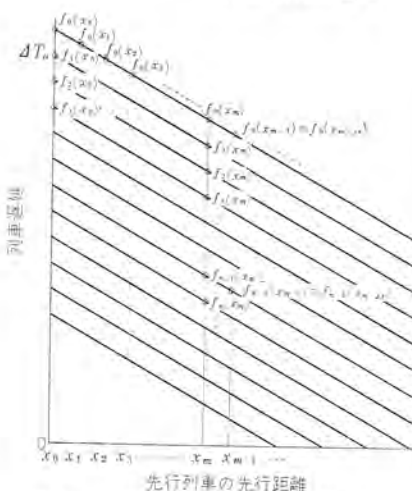


図 5.1 先行列車群を制御した場合の遅延モデル

Model of train delay when the former traines were operated on the controlled schedule.

α : 駅間回復時分

β : 乗降遅延時分

式 (5.2) を図 4.2 を参照して物理的に表現すれば、

$$f_n(x) = [f_{n-1}(x) - \alpha] + \beta[f_{n-1}(x) - \alpha - f_{n-1}(x + \Delta x)] + \beta^2[f_{n-1}(x) - \alpha - f_{n-1}(x + \Delta x)] + \dots \dots \dots (5.3)$$

となり、第 1 項は前駅発車遅れの内、走行中に回収し得なかった遅れであり、第 2 項以下は乗客増加による遅れを示している。

式 (5.3) より、 $f_n(x)$ が有限確定でかつ単調減少となる場合は、次の三つの場合のいずれかに限られ、この場合にのみ遅延列車の回復が可能であるといえる。

(a) $(n-1)$ 時限までの相隣なる列車間の遅れに次式の関係が成立するとき

$$f_k(x) - \alpha \leq f_k(x + \Delta x) \dots \dots \dots (5.4) \\ (k=0, 1, 2, \dots, n-1)$$

(b) 乗降遅延時分が次式を成立させるとき

$$\beta = 0 \dots \dots \dots (5.5)$$

(c) 次の 3 式が同時に成立するとき

$$\left. \begin{aligned} f_k(x) - \alpha &> f_k(x + \Delta x) \\ (k=0, 1, 2, \dots, n-1) \\ 0 < \beta < 1 \\ f_0(x) &< \frac{\alpha}{\beta} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5.6)$$

6. 回復可能限界と回復予定点(時限)

われわれは、前章までに種々の回復可能限界を知った。たとえば、先行列車が定刻運転をしているときの回復可能限界、先行列車群を制御するときの不適當な遅延配列関数を用いたことによる回復可能限界等である。これらの回復可能限界を初期列車遅延と乗降遅延時分との関連の下に図示すれば、図 6.1 になる。図 6.1 の黒わくでかこんだ部分は回復可能域を意味する。図 6.1 からわかるように、ある条件下で種々の回復運転法が可能となる場合がある。

これら運転法の相互を比較するため、図 6.1 に各回復運転法による回復予定点(時限)を表示した。図 6.1 において、先行列車群制御で $0 \leq \Delta f_k(x) - \Delta f_k(x + \Delta x)$ という制限を設けている。もし、 $0 > \Delta f_k(x) - \Delta f_k(x + \Delta x)$ であれば、遅延配列関数のこう配は正と

条件	制御法	先行列車を制御			
初期遅延	乗降充電時分	先行列車定刻運転	$0 \leq f_k(x_i) - f_k(x_{i+1}) < \alpha$	$f_k(x_i) - f_k(x_{i+1}) = \alpha$	$f_k(x_i) - f_k(x_{i+1}) > \alpha$
$\Delta T_0 \leq \alpha$	$\beta = 0$	1	1	1	1
	$0 < \beta < 1$	1	1	1	1
	$\beta \geq 1$	1	1	1	1
$\alpha < \Delta T_0 < \frac{\alpha}{\beta}$	$\beta = 0$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$
	$0 < \beta < 1$	$\frac{\log(1 - \beta \Delta T_0 / \alpha)}{\log(1 - \beta)}$	$\frac{\Delta T_0(1 - \beta)}{\alpha} \sim \frac{\Delta T_0}{\alpha}$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha} \sim \frac{\log(1 - \beta \Delta T_0 / \alpha)}{\log(1 - \beta)}$
	$\beta \geq 1$		$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$	
$\Delta T_0 \geq \frac{\alpha}{\beta}$	$\beta = 0$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$
	$0 < \beta < 1$		$\frac{\Delta T_0(1 - \beta)}{\alpha} \sim \frac{\Delta T_0}{\alpha}$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$	
	$\beta \geq 1$		$\frac{\Delta T_0}{\alpha + \tau}$	$\frac{\Delta T_0}{\alpha}$	

図 6.1 回復可能限界および回復予定点(時限)
Expected recovery limit and point (time) referring to the standard schedule.

なり、後続列車より先行列車をより遅らせるように制御しなければならず、列車群全体の回復を考慮する場合には不適当である。

7. 数種の遅延配列関数による回復運転

先行列車群をある遅延配列関数に従って回復運転制御をする場合、大別して二つの方法が考えられる。その一つは、0列車に初期遅延が発生したときにのみ、先行列車群をある遅延配列関数に従って配列し、後は正常ダイヤになるまで放置する方法である。他の一つは、先行列車群の遅れを初期遅延発生時はもちろん、以後数回にわたって制御する方法で、前者を初期制御、後者を暫時制御と名付ける。

7.1 初期制御

初期制御の例として、遅延配列関数に一次、二次および指数曲線を用いた場合を取り上げ、乗降遅延時分 β が(0, 1)区間として、時限ごとの列車遅延パターンを図7.1、7.2および図7.3に示した。遅延配列関数が直線の初期制御をする場合には、各列車は各時限で同じ大きさの遅延回復をする。遅延配列関数のこの配がけわしいほど時限当たりの遅延回復量は小さくなるが、それに伴い制御対象となる先行列車台数も少なくなる。このため、時限当たりの遅延回復量が最も大きくなるのは、初期遅れ ΔT_0 が0列車に発生したとき先行列車すべてに ΔT_0 だけの遅延を与えた場合で、時限当たり、 $\alpha/(1-\beta)$ の遅延回復量をうる。しかし、この場合制御対象となる列車は、その路線を運行する列車すべてとなる。遅延配列関数に二次曲線を採用した場合の大きな特長は、他の遅延配列関数の場合のように各時限での最大遅延列車が0列車に決まっているのではなく、順次より先行する列車に各時限での最大遅延が移行している点にある。このため各列車の遅延回復の推移は異なり、0列車は時限が進

むにつれ遅延回復量は大きくなり、急速に正常ダイヤに復帰するが、先行列車の大部分は一度遅延量が大きくなり、極値を経て急速に減少するという過程を踏む。ただし、各時限における列車遅延パターンの最大値は直線的に減少し、制御対象とする先行列車台数が各時限で異なるため完全な初期制御とは呼べない。指数曲線を遅延配列関数に取る場合には、遅延配列関数が時限の進みにつれ急しゅんとなり、0列車の遅延は指数曲線の選択に依存したある遅延量に収束する。このため0列車の収束遅延量が、0または0以下となるように指数曲線を選定する必要がある。

以上、三つの初期制御例を示したが、これらの相互比較をするため、初期制御時の制御列車台数を等しくとり、各時限における列車遅延パターンの最大値の推移をケース1として図7.4に示した。二次曲線の遅延配列関数の場合、初期制御の列車台数が $1/(1-\beta)$ に等しければ、直線遅延配列関数の場合と同じ列車群の回復状況を示すが、この値より大きい列車台数を制御すれば、直線遅延配列関数の場合より早く列車群は回復することがわかる。

7.2 暫時制御

5章で得た式(5.2)および式(5.3)を詳細に検討すると、1時限で回復しうる遅延量は、遅延配列関数のこの配がゆるやかなほど大きいことがわかる。いま0列車が0駅で遅れたとき、先行列車群を図7.5に示す如く直線関数 $f_0(x)$ に従って配列すれば、1時限後には点線で示した遅延配列となる。ここで、さらに先行列車群を遅らせ $f_1(x)$ の遅延配列関数をあらためて設定するほうが、点線で示される遅延配列関数よりこの配がゆるやかとなり、次時限での遅延回復量はより大きくなる。以後、各時限ごとに新たなこの配のゆるい遅延配列関数を設定することが、より早く列車群を正常ダイヤに復帰できると推定される。このように数回にわたって先行列車を制

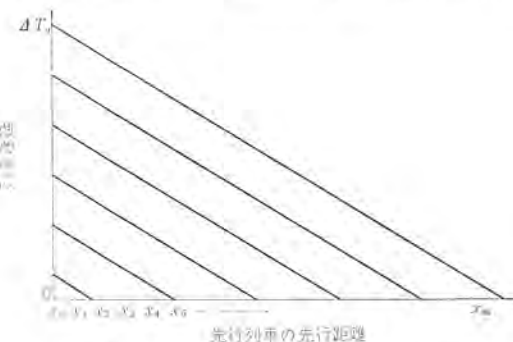


図 7.1 遅延配列関数の推移 —一次関数—
Transition of arranged-delay function
—Linear function—.

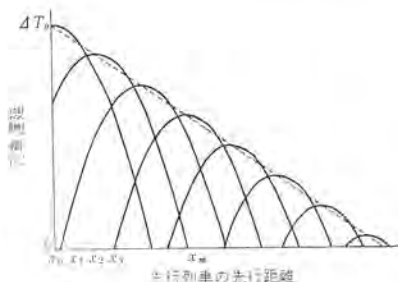


図 7.2 遅延配列関数の推移 —二次関数—
Transition of arranged-delay function
—Parabola function—.

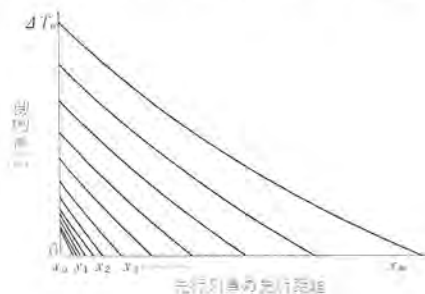


図 7.3 遅延配列関数の推移 —指数関数—
Transition of arranged-delay function
—Exponential function—.

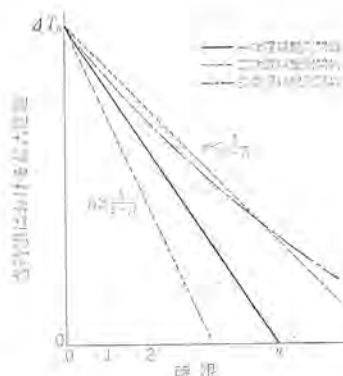


図 7.4 最大遅延の推移 —I—
Transition of the maximum delay in
case I.

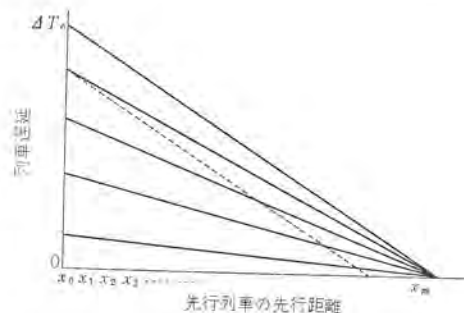


図 7.5 暫時制御
One by one control for the former
trains.

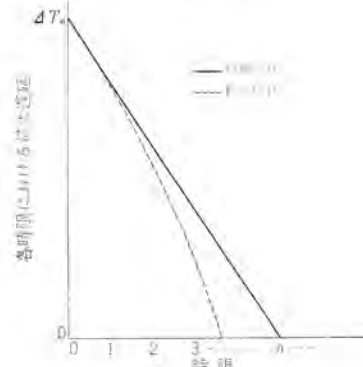
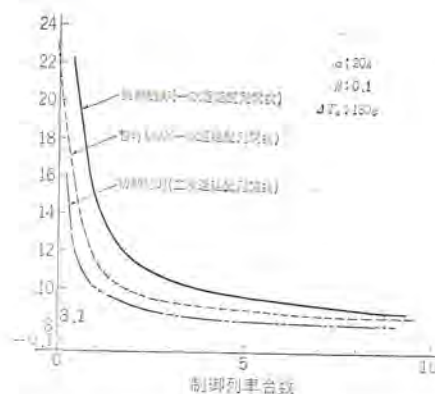


図 7.6 最大遅延の推移 —II—
Transition of the maximum delay in
case II.



制御法 制御列車 台数	先行列車無制御	二次遅延配列関 数初期制御	一次遅延配列関数	
			初期制御	暫時制御
0	22(21.9)	22(21.9)	22(21.9)	22(21.9)
1		11(10.8)	15(14.7)	12(11.4)
2		10(9.1)	12(11.6)	10(9.8)
4		9(8.4)	10(9.9)	9
9		9(8.2)	9(8.8)	9(8.5)
∞		9(8.1)	9(8.1)	9(8.1)

図 7.7 制御列車台数による回復予定点(時限)
Expected recovery point (time) vs. controlled train number.

御する方法を暫時制御と呼ぶことは前述のとおりであるが、本論文では図 7.5 に示す直線を遅延配列関数としたときの暫時制御のみを試みた。前節と同様、直線を遅延配列関数とした初期制御と暫時制御の比較を、同数の制御列車台数に対する遅延回復推移で行なった。図 7.6 から明らかに暫時制御が初期制御より有利であることがわかる。

7.3 制御列車台数と回復予定点(時限)

前節でも述べた如く、制御列車台数により列車群の回復速度が異なる。この関係を明らかにするため、列車群の回復予定点(時限)を制御列車台数の関数で図 7.7 に示した。

ここに例示したものは、遅延配列関数に直線を仮定し、初期制御の場合と暫時制御の場合を示した。また、先行列車を制御しない場合と比較できるように、諸定数としては、初期遅延、 $\Delta T_0 = 180$ 秒、駅間回復時分、 $\alpha = 20$ 秒、乗降遅延時分、 $\beta = 0.1$ を仮定している。先行列車を制御しない場合の列車の運行状況が、先行列車制御の場合の制御列車台数 0 と同じ運行状況であることは容易に理解できる。このため図 7.7 において、先行列車無制御と先行列車暫時制御の制御列車 0 の場合は回復予定点(時限)で同じ値をとる。ここにあげた例でわかるように、先行列車を制御する場合にも、その制御列車台数はある値以上はとっても無意味である。(この例では制御列車台数 5 台以上は効果が上がらない)これは、本論文に述べた回復運転法の現実への応用をより容易にしてくれるものである。

8. 結果および検討

われわれは本論文で、何らかの原因で発生した列車遅延を先行列車の制御で迅速に、かつ適確に回復させることを論じた。しかし、あらゆる場合にこの方法を適応することは、時として系を複雑にする以外何らの利点を生まない場合がある。そこで、列車の初期遅延の大きさで類別し、より容易に、かつ適確に列車遅延を回復させる運転法を結論付けると、次のように記述できる。

(1) $\Delta T_0 \leq \alpha$ のとき

先行列車無制御で次駅にて回復しうる。

(2) $\alpha < \Delta T_0 < \alpha/\beta$ のとき

$0 \leq \beta < 1$ でのみ先行列車無制御で $\left[\log \left(1 - \frac{\beta \cdot \Delta T_0}{\alpha} \right) \right] / [\log(1-\beta)]$ 時限に回復しうるが、先行列車を制御することによりいかなる場合にも回復可能となり、かつ回復予定点(時限)も遅延配列関数の選択いかんでは $\Delta T_0(1-\beta)/\alpha$ まで短縮できる。

(3) $\Delta T_0 \geq \alpha/\beta$ のとき

先行列車無制御では回復不能で、制御すれば遅延配列関数の選択いかんでは $\Delta T_0(1-\beta)/\alpha$ 時間に回復しうる。

先行列車を制御して回復運転をやらせる場合、最大の問題点は遅延配列関数をいかなる関数形にするかである。本論文でも、その最適関数形はこれだと結論付けることはできない。(もちろん、その評価基準に何を取るかによっても異なることではあるが)しかし、われわれが例示した 2, 3 の遅延配列関数から次の結論は得ることができよう。

(1) いかなる遅延配列関数を採用しようとも、列車群としての回復予定点(時限)を $\Delta T_0(1-\beta)/\alpha$ 以上に短縮することは不可能である。

(2) 列車群の回復予定点(時限)と制御列車台数との間には、逆比例の関係が存在し、制御列車台数を増せば回復予定点(時限)は短縮できるが、ある有効な制御列車台数は定めうる。(この性質は、遅延配列関数のこの配がけがわしいほど、時限当たりの回復遅延量が小さいことに起因している)。

(3) 初期制御と暫時制御方式を比較すれば、暫時制御方式のほうが一般には列車遅延の回復を早めると推定される。

(4) 簡単な制御法として、直線および二次曲線しか遅延配列関数に採用できない初期制御だとすれば、制御列車台数を十分取れるときには二次の遅延配列関数を採用し、さもなくば直線の遅延配列関数を採用すべきである。

以上、本論文に示した回復運転法の問題点として、最適遅延配列関数について少々触れたが、この他にこの回復運転法の実用上への今後に残されている点は、

- (a) 列車制御の性能と回復予定点(時限)の信頼性
- (b) 乗客の駅への到達が時間分布を持っている場合の回復予定点(時限)の信頼性
- (c) 評価基準に、輸送力・全列車遅延総合計・列車制御パワー等を考慮した場合の、最適遅延配列関数の決定
- (d) 一列車の輸送量に制限があるとき、および急行・特急等が同一路線を運行する場合等の問題点を考えることができる。

9. むすび

以上、遅延列車の回復運転に関して一方法を提唱したが、この問題は単に列車系にかぎらず、あらゆる輸送系に応用することが考えられる。また、この問題の解決は輸送系の分野に貢献するのはもちろんであるが、計算機の一利用分野を広げることにもなり、今後の発展が大いに期待される。

参考文献

- (1) 石台、新木、荒井：鉄道技術研究報告、No. 332, 3 (昭 37)

極低温におけるオーステナイト系ステンレス鋼の機械的性質

小俣虎之助*・平田 郁之**・菅原 宏**

Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel at Low Temperatures

Central Research Laboratory Toranosuke KOMATA・Ikuyuki HIRATA・Hiroshi SUGAHARA

In large superconducting magnets used for MHD generators, thorough attention is to be taken in selecting materials as enormous electro magnetic force is worked on their structural members. Ordinarily such materials as aluminum alloy, titanium alloy and austenitic stainless steel which are not subject to bringing about low temperature brittleness as members. There is, however, little information about the mechanical properties at very low temperatures. Studies have been made on the mechanical properties of austenitic stainless steel on sale in the domestic market, the results being as follows: SUS 27 is subject to martensitic transformation and needs caution. As for SUS 27 and SUS 32, heat treatment after welding gives them the same strength as the principal parts, but welded strength of SUS 42 and SUS 42 H is fairly inferior to that of the base materials.

1. ま え が き

1911年オランダの K. Onnes によって発見された超電導現象はきわめて魅力ある現象にもかかわらず、その理論的解明の困難なことおよび低温工学 (Cryogenics) の未発達から 1950 年代前期まで工業的にほとんど利用されなかった。しかし、1957 年に発表された B. C. S 理論による基本現象の理論的解明およびその後の低温工学の発達によって急速な進歩をとげ、1961 年に Kunzler や Matthias らが世界最初の超電導マグネットを発表するにいたった。以来、世界各国で研究が進み、わずか数年で超電導マグネットが実用化され、今日では高磁界を必要とする多くの研究分野でなくてはならない存在となっている。そして、内径 1~5 cm、発生磁界 60 kG 程度の小形超電導マグネットは物性研究用として用いられており、内径 10 cm 以上の大形超電導マグネットは MHD 発電や原子核研究用泡箱の磁界発生用マグネットとして用いられている。

将来の発電方式として期待されている MHD 発電では大形の高磁界マグネットを必要とするが、従来の銅-鉄マグネットを用いるとジュール熱による電力損失が大きいために発電コストが高くなり、MHD 発電の経済性がそなわれない。ところが最近、安定化複合超電導線の出現によって MHD 発電用の大形超電導マグネットを作ることが可能となった⁽¹⁾⁽²⁾。このため MHD 発電計画は急速に進み、わが国でも工業技術院の大形プロジェクトとして取り上げられ、大形超電導マグネットの開発もその計画の一端をになっている。MHD 発電用の大形超電導マグネットは蓄積エネルギーおよび重量が従来の小形超電導マグネットに比べて数百~数千倍にもおよぶものである。このため、使用される超電導線、銅材、構造材、クライオスタットなどに従来の材料の性質とは著しく異なる特性が要求される。

すなわち、超電導マグネットが絶対に超電導破壊を起こさないための保護方法の採用、さらにマグネットが巨大な電磁力や冷却時の熱応力に耐えるようにマグネットの材料および構造を選ぶことが要求される。前者は安定化複合超電導線の開発によって一応解決されている。すなわち、超電導線の表面に電気伝導、熱伝導のきわめて良い銅やアルミニウムを大量に被覆することによって局部的に超電導破壊が生じても電流を銅やアルミニウムにバイパスさせることにより、常電導

部分のジュール発熱を少なくし、超電導破壊がマグネット全体に波及するのを防ぐことができる。後者のマグネットの機械的強度については、金属の極低温における機械的強度に関するデータが少ないために、十分な検討がなされておらず、詳細なデータの発表が望まれている。

当社では、いち早く極低温領域の開発に着手し、ヘリウム液化機の開発、合金系で世界最高の臨界磁界を持つ Ti-Nb-Ta 合金の開発、国産最初の超電導マグネットの試作に成功した⁽³⁾。以来、多くの超電導マグネットを製作し、各方面の研究室へ送り出した。一方、大電流用大形線材や大形マグネットの開発も行っており、現在では工業技術院の MHD 発電用大形超電導マグネットを製作中である。これらのマグネットでは用いられる線材や銅材および構造材の電気伝導・熱伝導、比熱、磁気変態、機械的強度などがマグネットを設計するとき重要なパラメータとなる。

われわれは、これらのことを重視し、早くから各種金属の電気的性質・熱的性質・機械的性質について調べ、超電導マグネットの特性向上を計ってきた。ここでは超電導マグネットの構造材として一般に用いられているオーステナイト系ステンレス鋼の極低温における引張強度および加工による磁気変態について述べる。

2. 超電導マグネットに使用される金属材料

超電導マグネットに使用される金属材料には

(1) 超電導材料

合金系……Ti-Nb-Ta, Nb-Ti, Nb-Zr

化合物系……Nb₃Sn, V₃Ga, V₃Si

(2) 高導電材料

銅、アルミニウム

(3) 構造材料

オーステナイト系ステンレス鋼、アルミニウム-チタン合金

などがある。

超電導線の素材である超電導材料は、この材料の良否によって線材に流し得る電流とマグネットの発生磁界が決まるから、マグネットに使用される材料の中で最も重要なものである。当社では世界最高の臨界磁界を持つ Ti-Nb-Ta 三元合金を用いている。

高導電材料は超電導 マグネットの種々の不安定性 (ディグラデーション、トレーニング効果、低磁界不安定性)⁽²⁾⁽³⁾を除去する働きをする。すなわち、超電導線の表面に銅やアルミニウムなどの電気抵抗が小さく、熱伝導率の大きい金属を被覆することによって、超電導線の一部が超電導破壊を起こして常電導部分が発生しても電流を銅側にバイパスさせることによって超電導領域の波及を防ぐのである。したがって電気抵抗が小さく、熱伝導の大きいことが要求される。

構造材はマグネットの巻きわく(枠)やフランジ、クライオスタットなどを作るのに使用される。線材に働く巨大な電磁力、室温から極低温に冷却する際生じる熱ひずみ(歪)による応力などを構造材によって支えなければならない。したがってこれらの応力に十分応える強度が要求される。また、これらの構造材は磁氣的に完全な常磁性体であることが要求される。もし、磁性を帯びると構造材自身に電磁力が働け、マグネットが破壊するおそれがある。また、発生した磁界の分布が設計された分布からずれる。大形超電導マグネットにおいて、全重量の1/3~1/4を構造材がしめており、銅などの高導電材料が2/3~1/3をしめる。そして、超電導材料は銅材の1~2割程度である。超電導 マグネットを運転する際は、構造材や銅材すべてを液体ヘリウムで4.2 Kに冷却しなければならないために、液体ヘリウムの消費が膨大な量となり、大形超電導 マグネットの経済性を弱めている。したがって構造材や銅材の使用量をできる限り少なくすることが望まれるが、このためには構造材の極低温における機械的性質および銅材の電氣的・熱的性質について十分に検討しておく必要がある。ここでは機械的性質について検討した結果を報告する。

3. 構造材の機械的性質

低温領域で金属を構造材として用いるとき問題となるのは低温ぜい(脆)性である。たとえば、常温での構造材として最も多く用いられている炭素鋼は常温以上の温度領域で伸びおよび断面収縮率の大きい延性破壊を起こす。しかし、温度が低くなるにつれ、降伏強度や引張強さは増大するが、伸びおよび断面収縮率が減少し、ある温度以下では伸びおよび断面収縮率がほとんどゼロになってしまう。このような破壊様式をぜい性破壊といい、この破壊が起こる温度領域では衝撃値もほとんどゼロになり、もはや構造材として用いることができなくなる。延性破壊からぜい性破壊へ移る温度(あるいは温度領域)を遷移温度(あるいは遷移温度領域)という。 α 鉄の遷移温度は -150°C であり、他の体心立方金属の遷移温度もこの温度付近あるいはこれ以上である。

しかし、銅・アルミニウムあるいはオーステナイト鋼のような面心立方金属では遷移温度が存在せず極低温まで延性破壊を起こす。しかし、面心立方金属でも、その結晶構造が低温で面心立方から体心立方あるいはちゅう(稠)密六方へ相変態を起こすと、低温ぜい性を起こす可能性が生じる。

大形超電導 マグネットの構造材として一般に用いられているオーステナイト系ステンレス鋼のある種ものは低温で相変態が生じ低温ぜい性を起こすようになる。この場合の相変態はおもにマルテンサイト変態である。マルテンサイト変態は原子の長距離の移動を伴わず、各原子が隣接原子に対して同位に動くことによって新しい結晶構造が得られるもので、ある範囲の部分が瞬時に相変化を起こす急速変態であると考えられている。すなわち拡散を伴わない無拡散変態と考えられる。低温でのマルテンサイト変態の発生因子としては温度、応力、化学組成がある。マルテンサイト変態の生じる温度 M_s は化学組成によって

決まるが、一定組成の材料でも、応力が加われれば M_s より高い温度でも生じるようになり、変態も促進される。また、磁界が存在すると M_s は高くなることが報告されている。

大形超電導 マグネットの構造材は4.2 Kの極低温のもとで数十~百kGにおよぶ高磁界にさらされ、しかも電磁力による巨大な応力を受けた極限状態に置かれる。この極限状態での構造材の機械的性質について十分な知識を持つことはマグネットの安全性および信頼性を増すことになり、さらに適切な構造材の選定によって、その使用量を減らすことが可能となり、超電導 マグネットの経済性を高める結果となる。われわれはこれらの観点から国内で一般に市販されているオーステナイト系ステンレス鋼の極低温での引張強度、引張応力によるマルテンサイト相の生成量さらに溶接に伴う引張強度の変化について調べた。

3.1 オーステナイト系ステンレス鋼の引張強度

(1) クライオスタット

極低温で引張試験を行なうためのクライオスタットは外国で数例報告されているが、いずれもヘリウム消費量が多く、また試験片の取換えに多くの時間を必要とするなどの欠点があり、液体ヘリウムの価格が高いわが国には適していないので、われわれは新しい形式のクライオスタットを試作した。その装置を図3.1に示す。このクライオスタットは液体ヘリウム温度、液体水素温度あるいは液体窒素温度でしか試験できないが、試験片の交換が容易で、液体ヘリウムの消費量がきわめて少ない特長を持っている。試験片の両端はねじになっており、試料上端は引張棒(SUS 42)にねじ込まれ、50トン引張試験機の可動台に取り付けられている。試料下端は支持円筒下端にねじ込まれ、支持円筒(SUS 42)を通じて引張試験機固定台に固定されている。この装置を使えば液体ヘリウム5Lで5~9本の試験片を4~5時間にわたって調べることができる。引張試験は毎分1mmの引張速度で行ない、ひずみ量はチャック間距離から求めた。このクライオスタットを50トン引張試験機に取り付けたときの様子を図3.2に示す。

(2) 試料

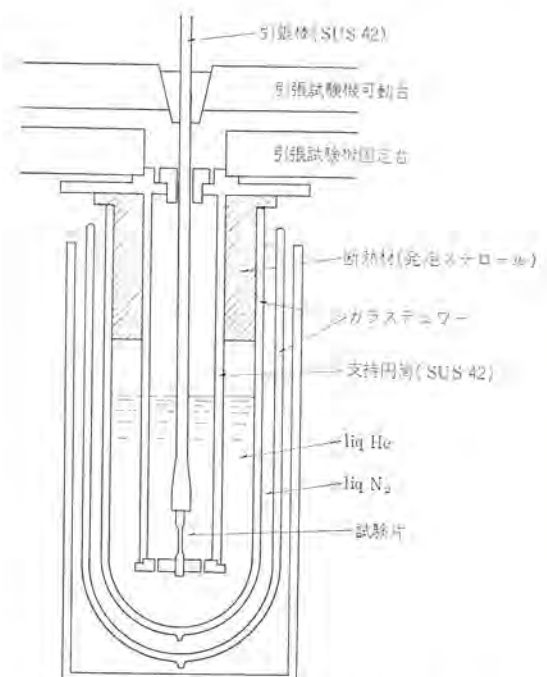


図 3.1 極低温引張試験装置
Apparatus for tensile tests at low temperatures.

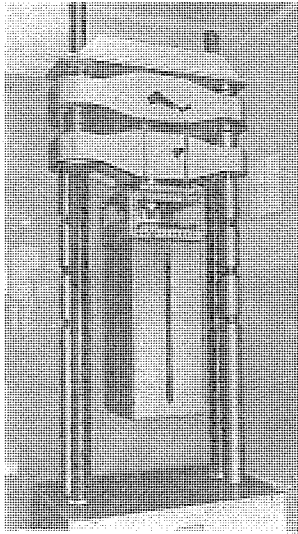


図 3.2 クライオスタット 外観
Cryostat for tensile tests.

表 3.1 引張試験片の化学組成
Chemical compositions of specimens for tensile tests.

試 料	化 学 組 成 (%)							
	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	P	S
SUS 27	0.08	19.2	9.2	1.49	0.1	0.62	0.034	0.018
SUS 32	0.07	17.7	12.0	1.48	2.8	0.59	0.030	0.005
SUS 41	0.06	22.7	13.5					
SUS 42	0.08	25.1	20.0	1.47		0.97	0.021	0.008
SUS 42 H	0.23	24.9	19.4	1.05	0.11	0.68	0.029	0.037

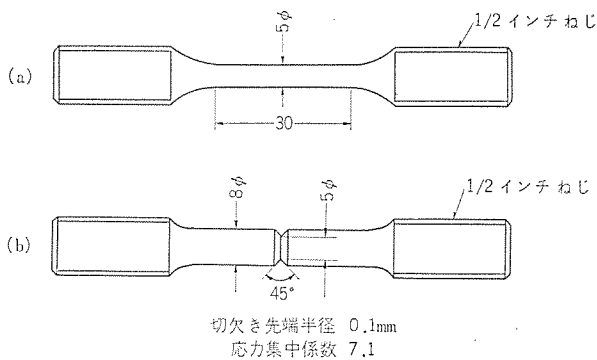


図 3.3 引張試験片 (a) 丸棒試験片 (b) 切欠き試験片
Test pieces for tensile tests.

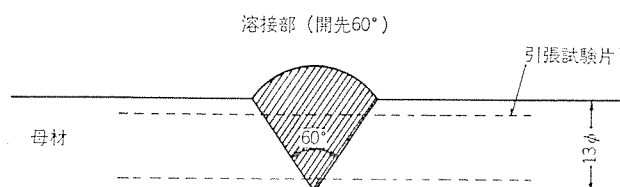


図 3.4 溶接試験片
Test piece of welded sample for tensile test.

試料は市販の SUS 27, SUS 32, SUS 41, SUS 42 および SUS 42 H (高炭素濃度) の 5 種類である。その化学組成の分析値を表 3.1 に示す。素材は 1,100°C で 30 分間焼鈍したあと、水中急冷の処理をほどこした。引張試験は丸棒試験片、切欠き試験片および溶接試験片について行ない、切欠きの影響、溶接による強度変化について検討した。試験の形状を図 3.3 に示す。構造材料の中に析出物、介在物、収縮孔、鍛造傷などが存在したとき、それらの近傍できわめて大きな応力集中が起こり、ぜい性破壊へ移る遷移温度が高くなる。この効果を調べるため切欠きを付けた試験片を作り引張試験を行なった。切欠きの形状を図 3.3(a) に示す。切欠き先端半径は 0.1 mm とし、そのときの応力集中係数は $K_T=7.1$ である。

マグネットの構造材はその形態上溶接構造をとることが望ましいが、溶接は低温ぜい性に大きな影響を与え、実際、過去において溶接構造物が低温でぜい性破壊を起こした事故が少なくない。これらは溶接の際に生じる介在物、クラック、ブローホールなどが上記の切欠き効果を生じ、さらに残留応力の存在も効いて母材や溶着金属全体の性質だけからは予測できない遷移温度の上昇が現われるからである。残留応力や炭化物などの析出は、溶接後の熱処理によって除去できるが、大形の構造材では熱処理を施すのは困難であり、溶接されたままの状態で用いられるから大きな問題となる。われわれは溶接の影響を調べるため溶接した材料について引張試験を行なった。溶接は図 3.4 に示された開先で行ない、表 3.2 に示す被覆アーク溶接棒を用いた。

(3) 引張強度

図 3.5 に室温、液体窒素温度 (77°K)、液体ヘリウム温度 (4.2°K) における各種 オーステナイト系 ステンレス 鋼の引張強さおよび伸びの値を示す。4.2°K での引張強さはすべて室温での値 2 の倍程度に増大し、各種鋼間の差も大きくなる。特に SUS 27 は 4.2°K での引張強さは最も大きい、伸びは室温での 78% から 46% へ大きく減少する。これに対して、SUS 41 と SUS 42 の伸びは室温と 4.2°K とでほとんど変化しない。高炭素濃度の SUS 42 H の引張強さは室温では各鋼種の中で最大であるが、4.2°K では最小となる。図 3.5 中に 4.2°K における Serrated yielding の開始応力も同時に示した。Serrated yielding についてはあとで述べるが、塑性変形が著しく大きくなる点であるから、一種の降伏点と考えることができる。降伏点は SUS 42 が最も高く、引張強さが最大の SUS 27 は最も低い。SUS 27 が、降伏点が低いにもかかわらず大きい引張強さを持つのは図 3.8 にみられる著しい加工硬化のためである。

図 3.6 に切欠き試験片の引張強さおよび切欠き強度対丸棒強度比を示す。切欠き引張強さも低温になるにしたがい増大するが、SUS 27 は他に比べてかなり小さい。各 ステンレス 鋼の切欠き強度対丸棒強度比はいずれも 4.2°K では室温よりも減少している。特に

表 3.2 溶接棒の化学組成
Chemical compositions of welding rods.

溶接母材	溶接棒	被覆系統	棒径	化 学 組 成 (カタログ) %					
				C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si
SUS27	A社	チタニヤ	2.6φ	≤0.06	18~21	9~11	1~2	—	<0.03
SUS32	B社	ライムチタニヤ	2.6φ	≤0.08	17~20	11~14	1.0~2.4	2.00~2.75	0.30~0.60
SUS42	C社	ライムチタニヤ	2.6φ	0.10	26.29	21.08	1.48	—	0.39

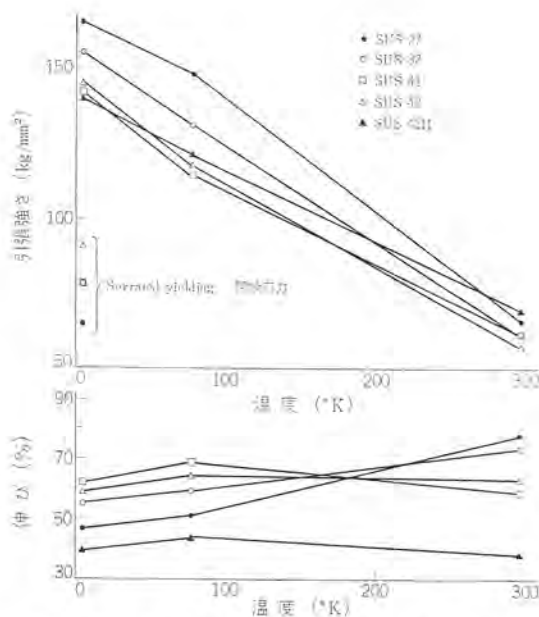


図 3.5 オーステナイト系ステンレス鋼の丸棒試験片の引張強さと伸び
Tensile strength and elongation of unnotched test pieces of austenitic stainless steel.

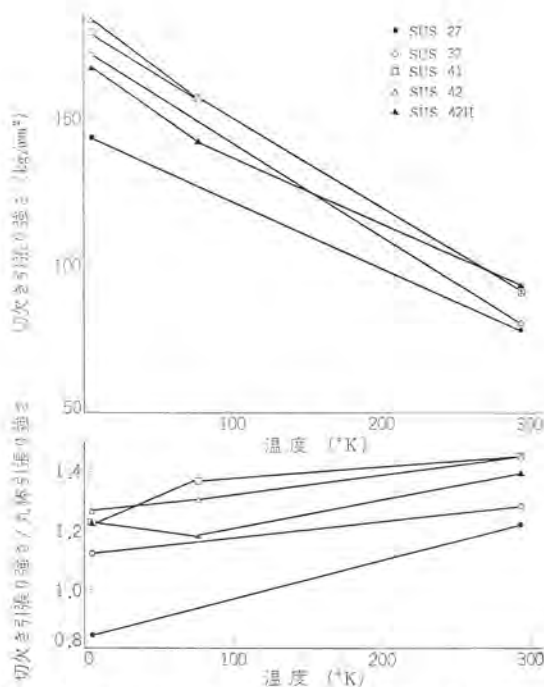


図 3.6 オーステナイト系ステンレス鋼の切欠き試験片の引張強さ
Tensile strength of notched test pieces of austenitic stainless steel.

SUS 27 では減少が著しく 1 以下である。このように、SUS 27 は 4.2°K でのぜい化が大きく、構造材として使用するには十分注意を払わなければならない。

図 3.7 に 4.2°K における溶接強度を示す。SUS 27 の溶接強度は大きなばらつきを示すが、熱処理をすることにより、ばらつきはなくなり、強度も母材と同じ程度になる。SUS 32 も同様であるが、SUS 42 と SUS 42 H は溶接後熱処理をほどこしても引張強さは母材よりかなり劣り、溶接部の伸びも非常に小さく 5 % 以下である。SUS 42 と SUS 42 H の溶接強度の低下は溶接の際生じた柱状デンドライト組織によるものと考えられる。

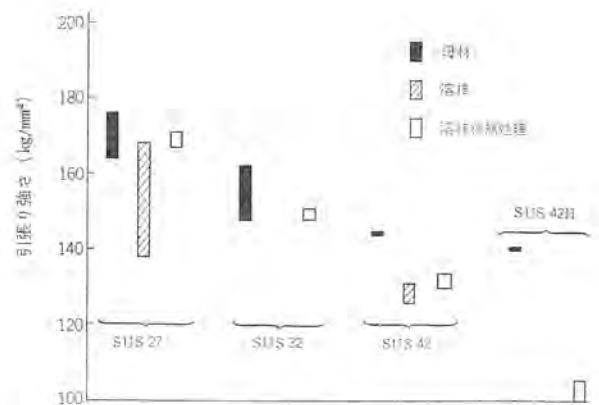


図 3.7 オーステナイト系ステンレス鋼の 4.2°K における溶接強度
Tensile strength of welded test pieces of austenitic stainless steel at 4.2°K.

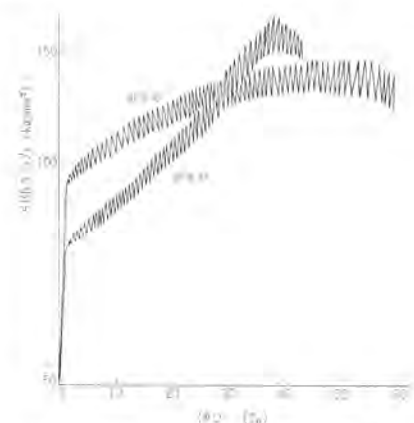


図 3.8 オーステナイト系ステンレス鋼の 4.2°K における応力-ひずみ曲線
Stress-strain curves for austenitic stainless steel at 4.2°K.

なお、SUS 27 と SUS 32 の母材の引張強さにかかなり幅があるのはマルテンサイト変態と関連していると考えられる。

(4) Serrated yielding⁽⁴⁾⁽⁵⁾

図 3.8 は SUS 27 と SUS 42 の 4.2°K における応力-ひずみ曲線である。極低温での引張試験では応力-ひずみ曲線が常温におけるものと著しく異なり、Serrated yielding と呼ばれる特殊な降伏現象が現われる。引張試験機のチャック間距離は一定速度で大きくなっていることに注意すれば、ごくわずかの伸びで荷重が急激に減少するのは弾性的な歪量が減少し、塑性的なひずみ量が増大したことを意味する。

この Serrated yielding の現象の原因としてマルテンサイト変態⁽⁴⁾から説明する説と熱的不安定説⁽⁵⁾（極低温では金属の比熱が常温の数百～数千分の一になっており、熱伝導も小さいために局部的な温度上昇が生じ、降伏力が減少するとする考え方）の二説があるが、まったくマルテンサイト変態を起こさない SUS 42 でも図 3.8 に示すように Serrated yielding が現われることからマルテンサイト変態だけでは説明できない。

(5) マルテンサイト変態と磁気的性質

オーステナイト系ステンレス鋼は磁気的には常磁性体であるが、マルテンサイト変態に伴って生成した α' 相は強磁性体である。したがって、オーステナイト系ステンレス鋼がマルテンサイト変態を起こせば強磁性体となる。強磁場を発生している超電導マグネットでは、構造材が強磁性体に変態すると強大な磁気応力を受ける。このためマグネットが破壊す

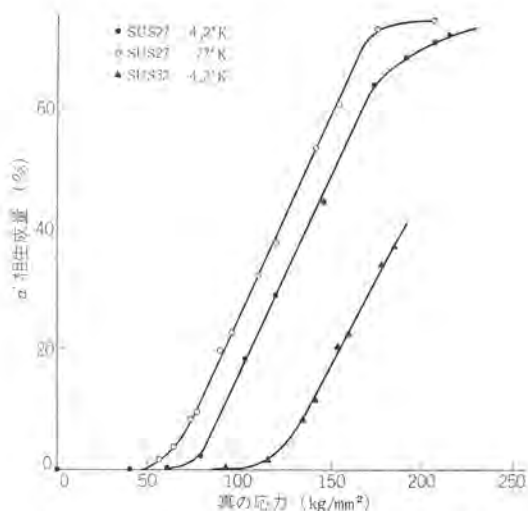


図 3.9 オーステナイト系ステンレス鋼の真の応力と α' 相生成量との関係
Relation between true stress and α' phase content for austenitic stainless steel.

るおそれがあり、マグネットの磁界分布も大きな影響を受ける。したがって、マルテンサイト変態に伴う磁気変態は重要な問題である。

図 3.9 は引張試験片を 4.2°K および 77°K の温度で引張試験したとき発生する α' 相の生成量を真の応力に対して表わしたものである。ステンレス鋼のある種のは応力を加えなくても極低温まで冷却することによってマルテンサイト変態が生じることが報告されている。Reed 等⁽⁶⁾は 18Cr-8Ni ステンレス鋼を液体窒素温度に冷却するとマルテンサイト変態が生じることを報告しているが、われわれが調べた結果では数十時間液体窒素に浸漬してもほとんど変態が起こらなかった。しかし、C や N の含有量が変態に関係するので種々の材料について調べる必要がある。

4. む す び

極低温の構造材として使用される オーステナイト系ステンレス鋼の機械的性質を液体ヘリウム温度と液体窒素温度で検討した。この結果を要約すると、

(1) SUS 27 は 4.2°K での引張強さは大きい、伸びは小さく、切欠き強度対丸棒強度比が 1 より小さくなるから、構造材として使用する場合十分な注意を要する。

(2) SUS 42 は降伏点が高く、切欠き強度対丸棒強度比も大きいので構造材として最適である。

(3) SUS 27 と SUS 32 は溶接後熱処理をすれば母材と変わらない強度が得られる。

(4) SUS 42 と SUS 42 H は溶接後熱処理をしても強度はかなり低下する。

低温工学 (Cryogenics) の発展につれて金属材料が構造材として用いられることが多くなる。ステンレス鋼以外の種々の金属についても、その極低温での性質を十分に知っておく必要がある。われわれは種々の金属の機械的性質、熱的性質、電気的性質についてさらに検討を加えることによって大形超電導マグネットの特性を向上させることができると考えている。

参 考 文 献

- (1) Z. J. J. Stekly and J. L. Zar : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-12 367 (1965)
- (2) 岩本, 金関 : 三菱電機技報, 41, 1,480 (昭 42)
- (3) 小俣, 石原, 橋本 : 三菱電機技報, 41, 745 (昭 42)
- (4) J. F. Watson and J. L. Christian : Tran. Trans. Met. Soc. AIME 224, 998 (1962)
- (5) Z. B. Basinski : Proc. Royal Soc. London 240, 229 (1957)
- (6) R. P. Reed and R. P. Mikesell : Advance of Cryogenic Engineering 6, 84 (1960)

非破壊検査用電子ライナック “ML-15R 形” の性能

源 進^{*}・逢坂 誠司^{*}・浦田 和義^{*}・長井 俊彦^{**}
 秋葉 稔光⁺・入江 浩一⁺・鈴木 敏允⁺・上田 孝寿⁺・美濃和芳文⁺
 藤田 彪太⁺⁺・上 富 勇⁺⁺・大林 愛弘⁺⁺・光森 弘之⁺⁺

Some Characteristics of Electron Linac for Non-Destructive Inspection “Model ML-15R”

Mitsubishi Heavy Ind., Ltd., Kôbe Ship. & Engine Works Shin-ichi MINAMOTO・Seiji ÔSAKA・Kazuyoshi URATA
 Mitsubishi Heavy Ind., Ltd., Nagoya Aircraft Works Toshihiko NAGAI
 Mitsubishi Electric Corp., Central Res. Laboratory Toshimitsu AKIBA・Koichi IRIE・Toshimitsu SUZUKI
 Kôjyu UEDA・Yoshifumi MINOWA
 Mitsubishi Electric Corp., Comm. Equipment Works Hyota FUJITA Isamu UETOMI
 Yoshihiro ÔBAYASHI・Hiroyuki MITSUMORI

Design and performance of non-destructive inspection apparatus with electron linac is herein reported. Main feature of this apparatus, using a 5 MW klystron as the microwave power source, is its ample output and steady operation. The accelerator unit, about 3 m in length, can be driven in three direction and rotated in horizontal and vertical planes. The maximum energy of electron beam is 12 MeV, and X-ray output is continuously varied in the wide range from 2,000 to 10 R/min at 1 m. The focal spot size is not larger than 2 mm in diameter, and the sensitivity of flaw detection is better than 1 percent. The performance of this machine, which enables us to inspect steel plate of 350 mm thickness within 10 minutes, and its characteristics of radiography are described.

1. ま え が き

従来高エネルギーの放射線透過検査装置としては、コバルト 60・ベータトロン・共振変圧器形加速器等が使用されてきたが、いずれも一長一短であり、特に原子炉压力容器・化学プラント用压力容器のように超厚板の検査では、いずれも X 線強度が低く、撮影時間が長くなり難点とされていた。最近この難点を解決するものとして電子ライナックが注目されている。しかしながら、電子ライナックは X 線強度の点では上記の装置にくらべずれているが、焦点サイズが大きく放射線透過検査の性能が悪く、また装置の不安定であること等が欠点とされていた。

最近当社が三菱重工の協力を得て、新しく開発した ML-15R 形非破壊検査用ライナックは、これらの問題点を解決し、焦点のサイズは直径 2 mm 以下と小さく、エネルギーは 12 MeV 一定で、最高の X 線出力は 2,000 R/min (1 m の距離において) であり、しかも最低出力は 10 R/min まで連続可変となっており、そのうえ、装置全体は小形化され可搬式である。

以下に装置の概要と、ラジオグラフィの試験結果について報告する。

2. 加 速 器 部

2.1 基本設計

RF 電力源として、最大出力 5 MW のクライストロンを用い、最大エネルギーは 15 MeV 以上である。加速管の基本的な特性は、電圧減衰定数 0.28 Neper/m、シャントインピーダンス 60 MΩ/m であるから、長さは約 1.7 m が必要である。全体の構成を単純にするために、バンチャは高電界強度の定位相速度形とし、加速管と一体構造としている。加速管部の構成の詳細とビームダイナミックスの計算結果を図 2.1 に示

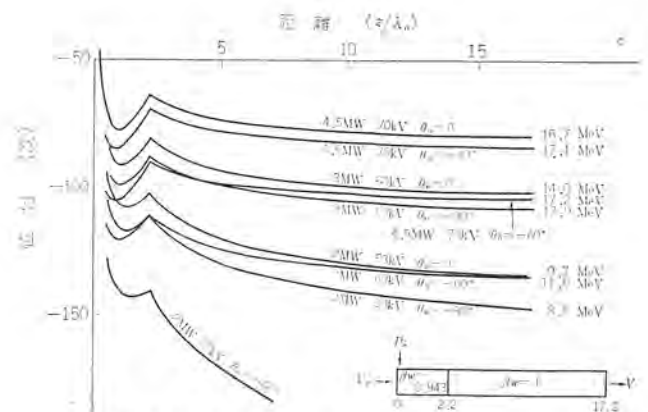


図 2.1 加速管内の電子の運動 (位相変化)
 Beam dynamics in the accelerating structure
 (phase relation).

してある。

加速管のビームローディング特性を、位相変化を無視して近似的に取扱うと、4 MW 入力するとき X 線の出力が最大となるのは、エネルギー 11.2 MeV、ビーム電流尖頭値 200 mA であるが、電子ライナックでは、尖頭ビーム電流を大きくすることは種々な困難をともなうこともあるので、動作点は 12 MeV 160 mA に選んだ。イコライザで平坦化された X 線出力で 2,000 R/min-m を得るのが目標であるから、イコライザでの減衰を 40% とし、加速器出力では 3,400 R/min が必要であり、ターゲットでの変換効率を 46 R/min-μA とし、必要な平均電流は 74 μA となる。必要なパルス率は、尖頭電流 160 mA として最大 0.47×10^{-3} 、したがってパルス繰返しを最大 200 pps とすれば、ビームのパルス幅は 2.3 μs が必要となる。しかし余裕をもたせてパルス幅は最大 4 μs まで可能の設計とした。X 線出力を最小 10 R/min-m ま

* 三菱重工(株)神戸造船所 ** 三菱重工(株)名古屋航空機製作所
 + 三菱電機(株)中央研究所 ++ 三菱電機(株)通信機製作所

の温度こう配による電子エネルギー変化を、ビームダイミックスの計算結果で示したものである。

2.2.2 パルス繰返しによるパルサ出力電圧の変化

PFN に充電された電圧は、シャント ダイオード および チャージング ダイオードの バランス 抵抗および PFN の絶縁抵抗を通して放電する。等価回路的に $R=7.9\text{ M}\Omega$, $C=0.25\text{ }\mu\text{F}$ であるから、最小繰返し 10 pps のときは、出力電圧の低下は約 5 %である。

2.2.3 電子銃へのパルス電圧伝送方式

パルサと電子銃は、直線距離で約 15 m、ケーブルの長さで約 40 m 離れているので、パルス電圧の伝送方式が問題となる。パルスの波形ひずみについて検討の結果、パルストランスを電子銃のすぐ近くに置き、かつ電子銃と並列に $2.3\text{ k}\Omega$ の抵抗負荷を設け、パルサとパルストランス間は同軸ケーブル RG-19/V を用いて接続している。

2.2.4 加速管

加速管は、長さ約 1.8 m である。パルス幅 $4\ \mu\text{s}$ でビーム電流尖頭値 200 mA を得るために、BBU 防止策として、サプレッサ孔つきのディスクを用いている。パンチングセクションとしては、定位相速度形、しかもなるべく光速に近い位相速度をもち、高電界強度形としている。これらによって、RF 単一給電方式となり立体回路系の構成が簡単になること、加速管の製作が容易になること、すぐに高速度に加速されるのでビームの集束が容易であること、などの利点がある。一方欠点としては、電子のトラッピング効率の悪いことであるが、これは電子銃のエミッション能力の点で十分カバーできる。

2.3 構成

RF 電力源は尖頭出力 5 MW の クライストロン で、この出力が長さ約 1.8 m の加速管に供給される。グリッドは無く、RF は単一給電方式となっている。パルスの出力は、クライストロン と電子銃に並列に供給される。おのおのに必要な電圧とその設置場所が離れているので、パルストランス は 2 個使用している。図 2.4 は全体の ブロックダイアグラムである。

ラジオグラフィに用いるので、X線源は広い可動範囲が必要である。パルサは天井走行クレーン上に設置され、これからクライストロンと本体音がつり下げられ、上下動する。さらに、導波管ロータリジョイントを2個使用して、本体部はクライストロンの下で水平面と垂直面の2種の回転が可能である。図2.5は全体の外観図である。

クライストロン PV-2012 W は、5 空胴の パルス 増幅用の クライストロンで、2,856 MHz で尖頭出力 5 MW 以上、平均出力 10 kW 以上が得られ、イオンポンプ がついており、長寿命を特色としている。パルサ は、パルス トランス と組合せて、クライストロンに 140 kV、電子銃に 70 kV のパルス

電子銃

ビームモニタ

磁場レンズ

ステアリングコイル

加速管

ターゲッ

イコライザ

線量計

集束電磁石

パルストランス

パルサ

IVR

無反射終端器

窓

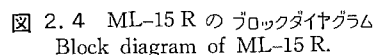
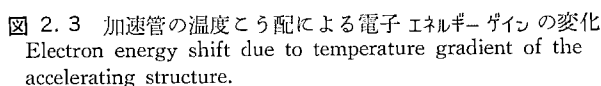
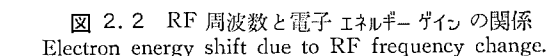
方向性結合器

集束コイル

イオンポンプ

ロータリジョイント

方向性結合器



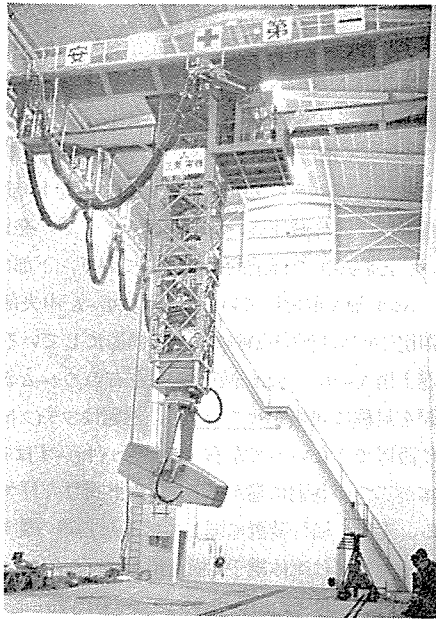


図 2.5 ML-15 R の外観
General view of ML-15 R.

電圧を供給する。スイッチ用のサイatron 以外は半導体化されている。IVR により入力電圧は $\pm 1\%$ 以下に制御され、かつ PFN のコイルの調整によりパルス電圧の平たん度も 1% 以下となっている。

クライストロン励振用の発振器は、板極管 3 CP \times 100 A 5 に正帰還をほどこしたもので、帰還ループに周波数標準用の空洞をそう入し、発振周波数の安定化をはかるとともに、加速管冷却水をまずこの空洞を通すことにより、発振周波数と加速管の必要な周波数を、ある程度温度に無関係に自動的に一致させる方式をとっている。主排気ポンプは 50 l/sec のイオンポンプであり、バルブやガasket はすべて金属化されている。電子銃からでた電子ビームは、まず磁場レンズで集束されて加速管に入り、最後に集束電磁石でターゲット上に最小スポットとなるよう集束される。

X線出力は、高出力と低出力の2段に切換えられ、さらにパルス繰返しによって 10 \sim 2,000 R/min-m の範囲をカバーする。この切換えは電子銃ヒータ電圧とともにクライストロン出力をも切換えて、電子エネルギーは 12 MeV 一定に保っている。

クライストロン・電子銃とも高圧パルスを印加した状態で、発振器の増

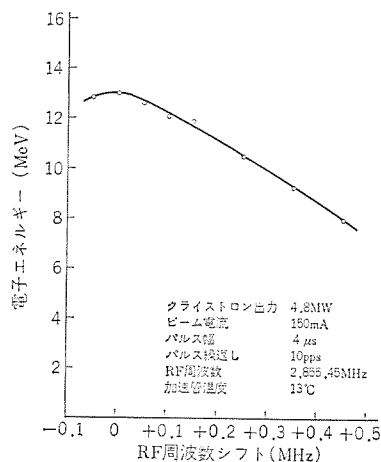


図 2.6 RF 周波数による電子エネルギー
ゲインの変化
Electron energy change due to RF
frequency shift.

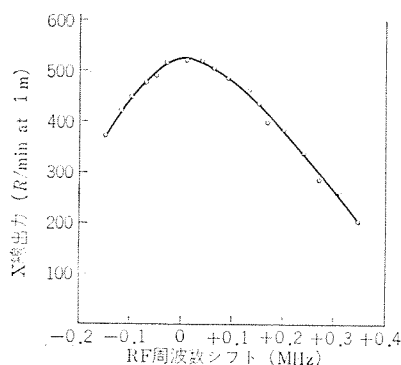


図 2.7 RF 周波数による X 線出力
の変化
X-ray intensity change due to RF
frequency shift.

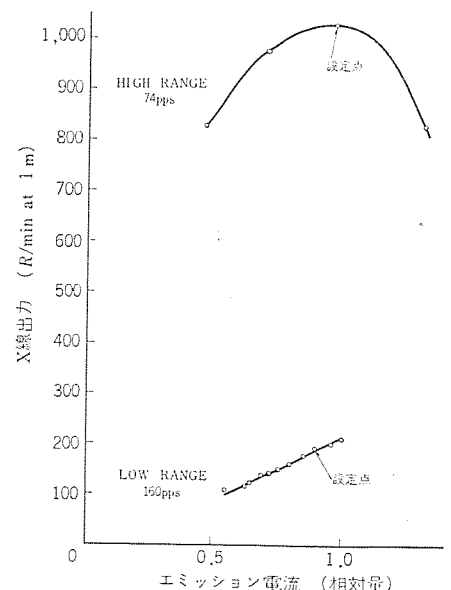


図 2.8 電子銃エミッション電流による X 線出力
の変化
X-ray intensity change due to gun emission
current change.

幅管にトリガパルスを供給するゲート回路によって、X線出力の起動と停止をおこなう。また停止は、時間および積算線量のいずれかによってプリセットできる。

2.4 性能

HIGH レンジと LOW レンジの設定は、HIGH レンジでは 150 mA、LOW レンジでは 15 mA の電子ビームが 12 MeV となるよう、クライストロン出力と電子銃エミッション電流を調整している。最適のビーム透過率とビーム径を得るために、磁場レンズ励磁電流と集束コイル励磁電流をきめたが、実用上集束コイルもステアリングコイルも必要としなかった。RF 周波数を変えて、エネルギー・エネルギー幅・透過率を測定し、最適の RF 周波数をきめた。加速管の発熱、すなわち運転のパルス率によって、RF 周波数の最適値は、わずかながら同一周波数でも実用上十分である。結果をまとめると次のようになる。

	HIGH レンジ	LOW レンジ
クライストロン出力 (MW)	4.8	3.0
ビーム電流 (mA)	150	15
ビームエネルギー (MeV)	12.2	12.2
エネルギー幅 (%)	10	7
RF 周波数 (MHz)	2,855.16 (10 $^{\circ}$ C)	2,855.16 (10 $^{\circ}$ C)
ビームパルス幅 (μ s)	4	4

ターゲット位置でのビーム径は、感光紙での測定では 2 mm ϕ 以下であり、X線源の大きさとしての測定でも同様の結果を得ている。

RF 周波数の変化に対する電子エネルギーの変化と X 線出力の変化の測定結果が図 2.6 と図 2.7 である。設定点の付近では、50 kHz の変化で X 線出力の変化は約 4% である。電子銃エミッション電流の変化に対する X 線出力の変化の測定結果が図 2.8 である。エミッション電流の変化 10% に対し X 線出力の変化は、HIGH レンジでは 0.7%，LOW レンジでは 12% である。

試験結果では、1,000 R/min-m の出力で、連続 6 時間以上にわたって安定に実動した。X線出力の安定度は HIGH レンジで約 2%，LOW レンジで約 15% である。図 2.9 は X 線出力の長時間安定度測定の結果の一部である。

X線発生装置として直接の起動は、加速管に RF 電力を供給する

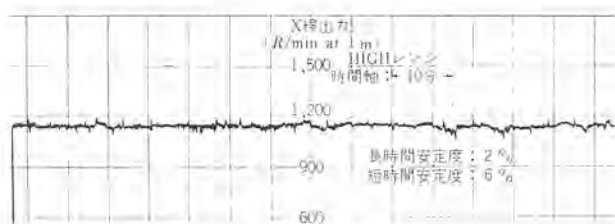


図 2.9 X線出力の安定度
Stability of X-ray intensity.

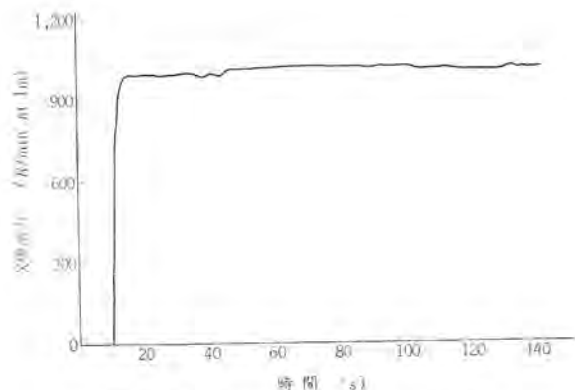


図 2.10 X線出力の立上り特性
Switch-in characteristics of X-ray intensity.

ことであるので、必然的に加速管の温度上昇の時定数だけ、周波数のずれにもとずくX線出力の立上がり特性を生ずる。これは最大出力のときに著しくなるが、あらかじめRF周波数をずらせておくことで十分改善される。立上がり特性の例を図2.10に示してある。

3. 駆 動 部

任意の被検査部位にX線を照射できるよう建屋天井には、走行・横行・巻上げの三運動する移動機、移動機下部には、本体を上下方向に案内するしゅう動装置、水平回転させる水平駆動装置、垂直回転させる垂直駆動装置、その他配線・配管からなる。各装置の駆動は床上で押しボタン操作できる構造になっている。以下装置の仕様および構造について述べる。

3.1 仕 様

(a) スパン：	12 m
(b) 巻上速度：	1.8 m/min
(c) 走行速度：	6 m/min
(d) 横行速度：	3 m/min
(e) 水平回転速度：	0.5°/s
(f) 垂直回転速度：	0.5°/s
(g) 可動範囲：	走行 18 m 横行 6 m
(h) 揚 程：	7.5 m(床上1 m から)
(i) 巻上荷重：	7.5 t
(j) 水平回転範囲：	±90°
(k) 垂直回転範囲(水平0°より)：	0°～120°
(l) 床から走行レール上面までの高さ：	14 m
(m) 操 作：	床上押しボタン操作
(n) 電 源：	220 V 60 Hz

3.2 構 造

3.2.1 移動機(特殊天井クレーン)

移動機は巻上装置・横行装置・走行装置・けた関係からなっている。天井に設置した2条のレール上をけた全体が走行し、そのけた上にはトリがあって走行・横行・巻上げの3運動をする。トリはトリフレームを基にして、その上部に巻上電動機、巻上減速機2個の巻胴、横行電動機、横行減速機、取付機器としてRF発信機、コイル電源、ジャンクションボックスを機能的に配置しており、下部にはしゅう動わく(枠)、パルシ架を取付けている。トリフレーム中央部には、クライストロン交換用穴をあけ保守点検に便利な構造にしている。巻上げ・巻下げは巻上用モータ、ヘリカル減速機、左右のウォーム減速機により二つの巻胴を対称に回転させて行なう。巻胴はクライストロン交換のため中央部に設置できないので左右に設け、ワイローブは8本掛けでそのうち4本が二つの巻胴に巻かれる。(ワイ掛けだけで1:2の伝導比になる。走行・横行装置に関しては、起動時の衝撃を小さくするために、走行用には流体継手、横行用にはパウダーカップリングを使用している。制動装置はコーン形ブレーキとマグネットブレーキを併用し、確実な制動を行ない、安全装置としては、巻上げの上限に過巻防止リミットスイッチを2個、下限に1個のリミットスイッチを設けている。また、走行・横行のストップには、直接あたらないようにストップ前でリミットが働くようになっている。

3.2.2 しゅう動装置

本体の上下運動を案内する装置で、このしゅう動わくの運動精度は本機の精度に直接影響する。1個の固定わくと3個のしゅう動わく、72個の軸受等からなる。固定わくは移動機のトリフレーム下部に固定され、わく内側の四つのかどには2個ずつ計8個の軸受が固定され、上下方向に3段に取付けられ、しゅう動わくを案内する。巻上げは下部しゅう動わくから始まり、下部のストップがしゅう動わく中部にあたると中部が上がり始め、次に上部と順次上がる。巻下しは逆に、自重で上部・中部・下部の順に下りる。しゅう動わくは1,200 mm□～1,600 mm□。長さ3 mで、かどの各2面には長さ方向に8本のステンレスレールを溶接している。そして精度を長期間にわたって維持するために焼鈍し、溶接後のひずみをなくすように努め、レール面の平行度・面粗度には特に注意して設計、製作を行なった。軸受には、これが高所にあり、すべり面部分の潤滑がきわめて悪条件になることも考えて、PV値が高く機械的強度の大きい、完全な無潤滑状態で摩擦・摩耗特性のすぐれている「プラスチック 自己潤滑性材料」を使用した。

3.2.3 水平駆動部

しゅう動わく下部にあてて、本体の水平回転(±90°)を行なう装置で、減速装置、外歯歯車付き旋回軸受およびリミット装置からなっている。減速装置にはハーモニック減速機と2段の歯車減速ユニットを使用し、コンパクトにした。また、モータにはブレーキを取付け、任意の角度でオーバーランすることなく停止できるようにした。

3.2.4 垂直駆動部

本体を垂直回転(0°～120°)させる装置で、減速装置・本体支持軸受・リミット装置からなっている。減速装置は水平駆動部と同様に、ハーモニックの減速機と歯車減速ユニットを使用し、その後最終段にはウォーム歯車を使用して減速している。

4. 制 御 器

前述のように電子ライナックは、運転操作が複雑であるという欠点

を本装置ではすべて解決している。ライナック本体の被検査物に対する照準が終わると、X線シールドされた工場から出て、あとは制御器の押しボタン一つを押すという簡単な操作で撮影を行なうことができる。

制御器の外観図を図4.1に示す。制御器は主副の2個に分れており、操作は主制御器のみで行なうことができる。副制御器は主として保守点検用であり、日常の運転操作のためには監視する必要はない。

露出時間の決定は、露出曲線より線量率決定と同時に決められるが、本装置ではタイマーによるプリセット自動停止のほかに、総線量プリセット自動停止も行なうことができる。この場合には線量率つまりは適当な位置にあれば、自動的に総線量制御で写真撮影を行なうことができる。

押しボタン一つで最高 2,000 R/min という強力なX線が放射されるゆえ、安全面には十分な考慮が払われている。工業用テレビによる工場内監視、X線発生前に1分間の警報ベルをならす等、建家出入口のドアインターロック系と合せて重要である。

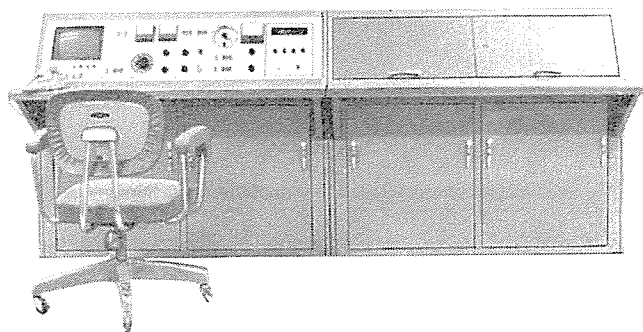


図 4.1 制御器 Control console.

5. 非破壊検査性能

ML-15 R 形電子ライナックのX線発生部の構成と、それによってえられたX線の特性、およびそのX線を用いて行なった鋼板の透過試験性能に関して述べる。

5.1 X線発生部の構成

電子ライナックで12 MeVに加速された高速電子線は、強収れん(斂)方式の集束電磁石で真空中のタングステンターゲット上に集束される。この集束された電子線は小さな線源のX線を発生する。このX線は電子ライナックの加速軸方向が最大強度となる空間分布をもっているが、ターゲットの周りを囲む鉛で24°コーンの空間内にコリメートされる。さらに、ターゲットからの距離が1.5 mの位置で直径400 mmのX線照射野(約16°コーン)内のX線強度分布は、銅イコライザにより強度差12%以内に平坦化される。

平坦化されたX線の照射線量率および積算線量は透過形イオンチェンバ(三菱照射線量(率)計)により自動的に計測される。ML-15 Rによるラジオグラフィでは線量計に必要な照射線量をプリセットするか、またはタイマに照射時間をプリセットすることにより、自動的に写真撮影が終了する。

ターゲットを透過した電子線はX線の二次発生源となってラジオグラフィの性能を低下させる。これを避けるために、透過電子線はX線発生効率の低い46 mmの厚さの水とアルミニウム窓で構成された吸収体に吸収除去される。この電子線吸収体はターゲットの直後に置かれており、電子線による発熱量12 MeV×100 μA=1.2 kWの約90%

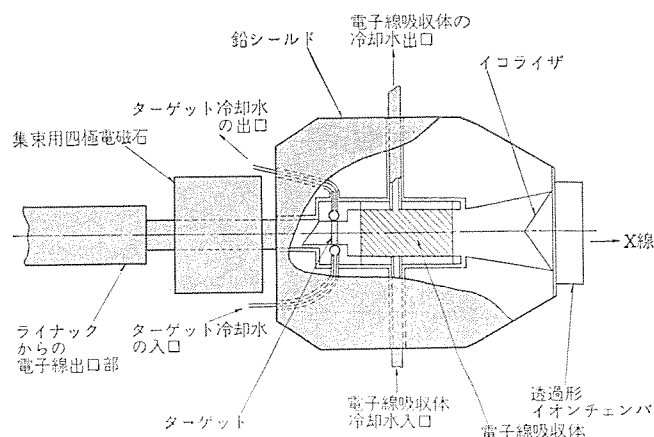


図 5.1 X線発生部の構成図
Construction around target.

の発熱量を水により除去している。

ターゲットの周りを囲む鉛コリメータは上記の24°コーンの前方照射野を規定すると同時に、シールドとして照射野外のX線強度を照射野内の平坦化されたX線強度の1/1,000に減衰させている。

ML-15 R 形電子ライナックのX線発生部の構成を概念的に図5.1に示した。

ターゲットは0.75 mm (0.22 Radiation Length) のタングステンを真空中に用いて周辺水冷構造とした。0.22 R. L. は12 MeVの電子線によるX線発生効率が最大の厚さであり、このターゲットは120 μAの電子線が2 mmφに集束されて当たっても十分耐えることができた。

5.2 出力X線の特性

5.2.1 X線源の大きさ

ライナックで12 MeVに加速された電子線は強収れん四極電磁石の集束作用によってターゲット上に2 mmφ以内の大きさの焦点を結ぶ。焦点内の最高平均電流は約100 μAであり、イコライザなしで前方中心強度が約4,000 R/min-mまでのX線を発生することができた。12 MeVの電子線が0.22 R. L.の厚さのタングステンターゲットに当たって発生する制動放射X線の線源の大きさは、その電子線の焦点の大きさと同一である。しかし、2 mmφのような小さな焦点の電子線の大きさを測定するのはかなり困難な問題である。さらに、透過電子線吸収体あるいはイコライザによってX線の線源の大きさが広がって、電子線の焦点の大きさと違った結果となることも予測される。

したがって、X線の線源の大きさは下記に述べるピンホール法および積層板コリメータ法により、ラジオグラフィに使用するX線そのものに関して測定を行なった。すなわち、図5.1に示したとおり、吸収体、銅イコライザ、線量計および鉛コリメータを付けた完全な形のX線発生部で発生するX線の線源の大きさを測定した。

(1) ピンホール法で測定した線源の大きさ

ピンホール法とは光学におけるピンホール写真撮影と同一である。0.5 mmφのピンホールをあけた厚さ3.2 mmの鉛板スクリーンを、X線源(ターゲット)とX線フィルム面との中点に置いてX線によるピンホール撮影を行ない、得られた像の大きさからX線の線源の大きさを決定する方法である。

図5.2に示したように、線源の大きさを X_0 、ピンホールの径を a とし、X線フィルム面での像の大きさを X とすると、図から明らかに次の関係

$$X_0 = X - 2 \cdot a$$

によって線源の大きさが求まる。

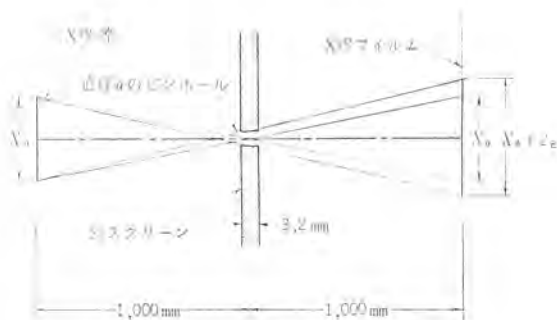


図 5.2 ピンホール写真撮影配置図
Arrangement of source size measurement by the pin hole method.

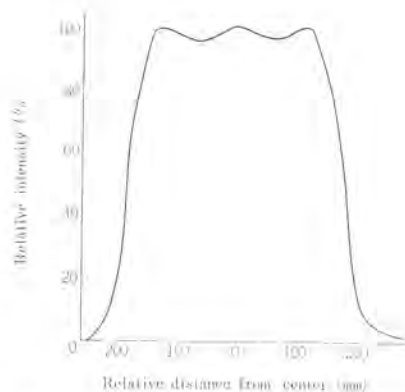
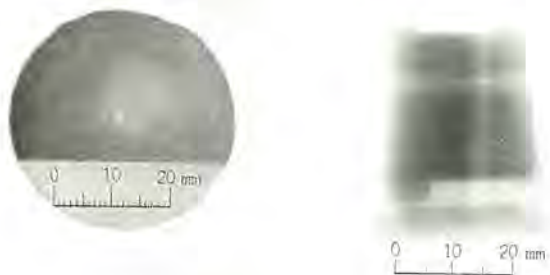


図 5.4 平たん化された照射野内のX線強度の分布
Equalized X-ray distribution in irradiation field.



(a) ピンホール写真によるX線源の大きさ (b) コリメータ法で測定したX線源の大きさ

図 5.3 X線源の大きさ
Source sizes of X-ray measured by two methods.

この方法で撮影したX線ピンホール写真の像を図5.3(a)に示した。この像からはX線線源の大きさは1mmφ以内と判断できる。

(2) コリメータ法で測定した線源の大きさ

コリメータ法はX線の吸収係数が極度に異なる2種の材質の薄い板を交互に積層したコリメータを用いて、線源から発生するX線の平行成分のみの像を撮影して線源の大きさを測定する方法である。

測定に使用したコリメータは厚さ0.15mmのマイラ板2枚と厚さ0.26mmの銅板の積層で構成され、40mm×30mm、長さ20mmの寸法であった。このコリメータを用いて撮影したX線源の像を図5.3(b)に示した。図中明るいしま(縞)の線がマイラ板、暗いしまの線が銅板の像を示しており、直交するしま模様は積層板コリメータをビーム軸を中心に90°回転して二重撮影を行ない、直交する2方向でのX線源の大きさを求めたものである。

コリメータ法による像からはX線源の大きさは約2mmφと判断できる。

X線源の大きさは、銅イコライザによって平たん化した場合でもイコライザなしの場合でも変わらなかった。ラジオグラフィにおいては、このX線源の大きさは幾何学的鮮鋭度として解像度に大きく寄与する。このことに関しては後で述べる。

5.2.2 X線照射野と平たん度

ターゲットからの距離が1.5mの位置で、400mmφ(約16°コーン)の照射野内のX線強度分布を銅イコライザを用いて平たん化した。銅イコライザは高さ33mmの円すい形であり、照射野内の線量分布は図4.4に示したごとく88%の平たん度が実現できた。しかし、ラジオグラフィに必要なのは、銅板を透過撮影したX線フィルムの濃度分布の平たん性である。このフィルム濃度分布の平たん度はX線強度分布の平たん度と同一にはならない。このずれと原因については次節で述

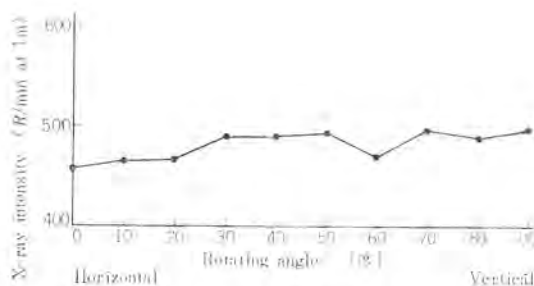


図 5.5 装置の回転に対する出力特性
Output characteristics for machine rotation.

べる。

5.2.3 出力線量と安定性

尖頭電流値約150mA、パルス幅4μs、繰返し200pps、エネルギー約12MeVの電子線を厚さ0.75mmのタングステンターゲットに衝突させて、2,000R/min-mの平たん化されたX線をえた。

1時間に1回あるいは数時間に1回の数分間の運転休止を含む24時間の連続X線発生試験によれば、X線出力の安定性および出力の再現性はいずれも10%以内に制御された。

このX線発生部の平たん化する以前のX線出力は、水とアルミ窓による補正を加えると43.3R/min/m/μAとなり、設計値とよく一致した。

上記の出力安定性の試験は装置を水平面内に固定して行なった。この装置をクレーンにより移動・回転させた場合の出力安定性が真に重要なものである。この回転に対する出力安定性の測定結果を図5.5に示した。このデータから装置の安定性は設計値を満足している。

5.3 照射特性

この装置を水平面内に設置し、30mmから400mmの厚さの銅板の透過試験を行ない、露出曲線と照射野内のフィルム濃度分布および欠陥識別度を求めた。

5.3.1 露出曲線

露出曲線の測定はサクラRR X線フィルムの前後面にそれぞれ1mmの厚さの鉛増感紙を置いて、銅板の透過撮影後、20°Cで5分間のさら現像を行なってフィルム濃度を求めた。図5.6の露出曲線装置の出力を変えた場合は、FFD(線源・フィルム間距離)1.5mでフィルム濃度2.5を与える照射時間と銅板の厚さとの関係を示している。このデータから、装置の出力が1,000R/min-mの場合、FFD=2.5mで350mm厚の銅板の透過試験が15分間で可能である。また出

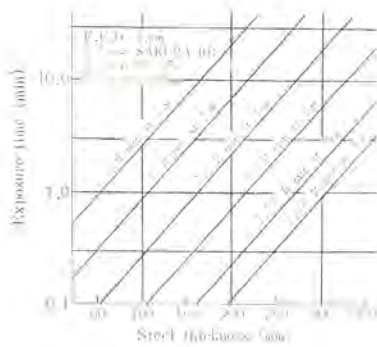


図 5.6 露出曲線
Exposure curve.

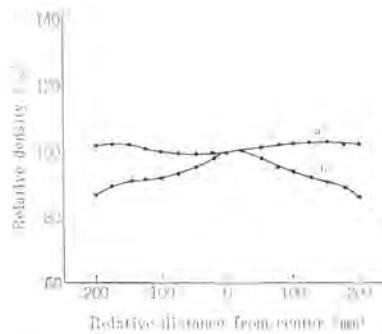


図 5.7 フィルム濃度分布
Film density distribution.

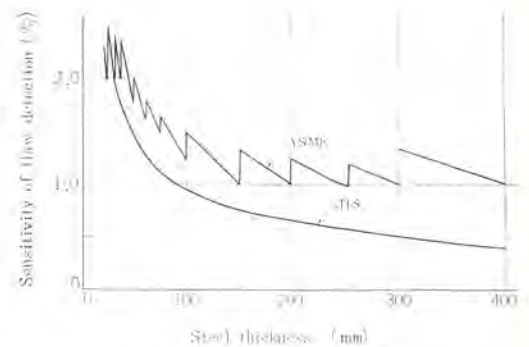


図 5.8 欠陥識別度
Sensitivity of flaw detection.

力 10 R/min/m では、FFD=1.5 m で 25 mm 厚の鋼板の透過試験が 30 秒以上で可能である。これらの性能はラジオグラフィについての要求を完全に満足するものである。

5.3.2 照射野内のフィルム濃度こう配

露出曲線を測定したフィルムの数枚について照射野内の濃度分布を測定した。濃度計は 0.01 の濃度まで識別できる東京光電社製の Model ANA 82 T No. 8051 を規準濃度フィルムで校正して用いた。結果を図 5.7 に示した。曲線 (a) は厚さ 36 mm の鋼板、曲線 (b) は厚さ 325 mm の鋼板を FFD=1.5 m で透過撮影した場合の濃度分布である。前者の濃度分布は X 線強度分布 (平たん度) に類似の分布傾向を示しているが、板厚の厚い後者の濃度分布は、照射野周辺部の濃度が小さくなって X 線強度分布と違った傾向である。この結果は厚板に対しては中心部と周辺部では、(1) X 線が透過する鋼板の厚さが違うこと、(2) ビルドアップが違うことに起因すると考えられる。これについてはさらに詳細な実験検討を重ねる必要がある。厚さ 150 mm での濃度分布ではこの傾向はまだ現われず、X 線強度分布と同じであった。

5.3.3 欠陥識別度

ラジオグラフィにおける解像度は欠陥識別度によって決定されるが、識別できる欠陥の大きさは鮮鋭度によって制限される。今、被検査体の厚さを d cm、欠陥の厚さを Δd cm とすると欠陥識別度は

$$\Delta d/d = C \cdot \delta \cdot B / \mu \cdot d \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

で与えられる。ここで C は定数、 δ は識別可能な最小のフィルム濃度差、 B は回復率、 μ は被検査体の質量吸収係数である。

鮮鋭度は固有鮮鋭度 U_f と幾何学的鮮鋭度 U_g に分けることができる。固有鮮鋭度 U_f はフィルム乳剤中や増感紙内で生ずる二次電子による像の広がり、X 線のエネルギーの平方根に比例し、 $U_f = 0.15 \sqrt{E}$ mm で表わされる。X 線エネルギー 12 MeV では $U_f = 0.52$ mm となる。

幾何学的鮮鋭度 U_g は線源の大きい S と線源とフィルム間距離 a および被検査体の厚さと欠陥の位置、すなわち欠陥とフィルム間距離 b によって次の式で与えられる。

$$U_g = S / \{ (a/b) - 1 \} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

識別できる欠陥の厚さ Δd は $V \equiv a/(a-b)$ とおいて、

$$V \cdot \Delta d \geq U_0 \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

$$U_0 = (U_g^3 + U_f^3)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

で与えられる。

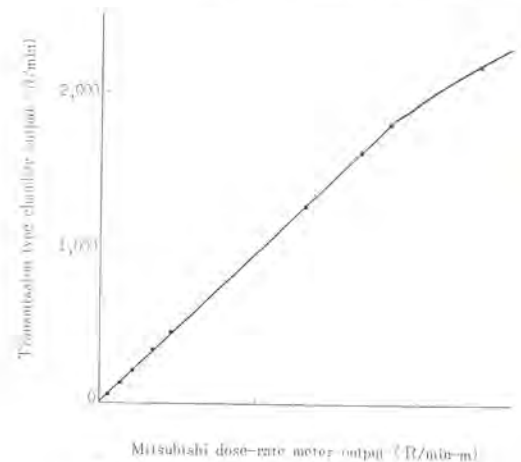


図 5.9 透過形チェンバの線量率特性
Characteristics of transmission type chamber.

JIS に規定された線ベネトラメータを用いて測定した鋼板に対するこの装置の欠陥識別度を図 5.8 に示した。この結果は 25 mm 以上では ASME CODE SECTION III の規定を十分に満足しており、375 mm の鋼板では 0.35 % の欠陥識別度が得られた。

5.4 X 線線量計

上記の測定の際の X 線の線量率と線量は、発生部先端に設置された透過形チェンバと三菱照射線量(率)計の指示回路を用いて測定した。この透過形チェンバは約 10⁵ R/min-m の高線量率まで直線性を保つものである。線量に対し校正された三菱照射線量(率)計で測定したこの装置のチェンバの特性を図 5.9 に示した。

6. む す び

電子ライナックを非破壊検査用装置として利用するため、種々の問題点を解決し、かつ電子ライナック自身の長を大に発揮することに成功した。エネルギーは 12 MeV と高いが、本体部の全長は 3 m であり、コンパクトな設計となった。図 5.8 に見られるように、欠陥識別度は 80~400 mm の厚さの鋼板に対して識別度 1.0 であり、35 mm 厚さ以上のすべての鋼板の透過試験に十分利用できる。また撮影域が 1 m の距離で 40 cm (直径) と大きいことも本装置の特長といえよう。

おわりに当たって、設計に関して種々ご指導を賜った当社中央研究所工博後藤正之、三菱重工(株)名古屋航空機製作所佐野朗・近藤好弘の諸氏に謝意を表します。

技術講座

アナログ計算機のプログラミング (3)

—各種の問題, 自動演算—

桑田 博*・井塚 秀弥*・米谷 光雄*

6. 各種の代表的な問題

これまでに述べたもの以外の代表的な問題の解法を、以下に概説する。

6.1 代数方程式

アナコンでも解くことができ、精度的には不十分ながら、パラメータ変化の容易さ、解の即時性の特長をもつ。工学的には連立線形、または非線形代数方程式を解くことが多く、線形非線形計画法などとして表われる。

(1) 高次代数方程式の解法

$$F(x) \equiv a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_{n-1} x + a_n = 0 \quad (6.1)$$

なる高次代数方程式の実根を求めてみる。(複素根解法は省略)

アナコンで式(6.1)を解くには、関数 $F(x)$ の独立変数 x をアナコンの独立変数 t の関数に置きかえ、次式が成立する時間 t を求めればそれに対応する x が求める実根となる。

$$x = \varphi(t), \quad F[\varphi(t)] = 0 \quad (6.2)$$

たとえば $x = t$ の変換の場合、 $F(x)$ は次のようになる。

$$F(t) = a_0 t^n + a_1 t^{n-1} + \dots + a_{n-1} t + a_n = 0 \quad (6.3)$$

これらの各項の $a_n t^i$ は、単位電圧1を i 回積分して得られる $\frac{t^i}{i!}$ に $a_{n-i} \cdot i!$ をかければ得られるから、これらを加算すれば $F(t)$ が求まり、 $F(t) = 0$ の時間 t が求める実根である。図6.1がアナコンのブロック図である。

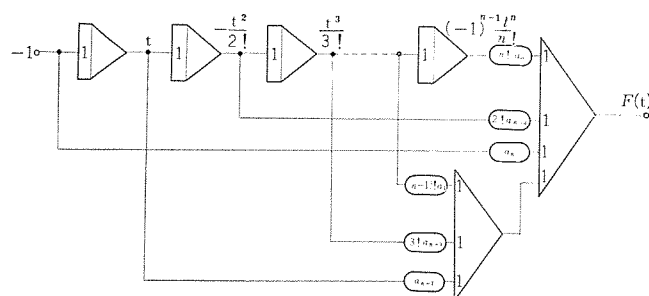


図 6.1 $F(t)$ の発生法

$0 \leq t$ のため、負の実根を求めようとすれば $x = -t$ なる変換をする必要がある。

$x = t$ の変換は $t \rightarrow \infty$ のとき、各積分器出力がフルスケールを越えるため、絶対値の大きな実根が求めにくい。このときは、 $x = e^{-t}$ の変換を行なうと $x^n = e^{-nt}$ となり、時間関数発生項(3.1節)であったように簡単に得られ、 e^{-it} ($i = 0 \sim n$) を係数倍 (a_{n-i}) して各項を加算すれば $F(e^{-t})$ が得られる。

(2) 連立線形代数方程式

連立線形代数方程式

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = c_1 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = c_n \end{cases} \quad (6.4)$$

ただし $a_{ij} \leq 1$ とする。

は、上式の a_{ii} の係数の項のみを左辺に残し、他のすべてを右辺に移項させた等式より、加算器とポテンショメータで表現できる。

別の方法として、式(6.4)を次の微分方程式におきかえて解いてもよい。

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n - c_1 = -\frac{dx_1}{dt} \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n - c_n = -\frac{dx_n}{dt} \end{cases} \quad (6.5)$$

この方法では、定常状態に達した後、すなわち $\frac{dx_i}{dt} = 0$ になった後の x_i の電圧が求める根である。図6.2に式(6.5)によるアナコンのブロック図を示す。

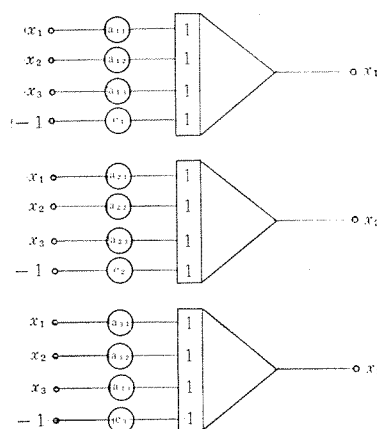


図 6.2 三元代数方程式 アナコンブロック図

(3) 最急降下法による連立代数方程式の解法

前項で述べた連立線形代数方程式は、常に安定に解が求まるとは限らず、振動や発散現象が伴う場合がある。

式(6.4)の連立線形微分方程式の解が安定になる条件は、式(6.4)の各係数による行列 $A(a_{ij})$ に関する固有方程式の根がすべて負の実数でなければならないことである。このため、大規模な方程式になるほど安定に解くことが困難になる。このとき、行列 $A(a_{ij})$ の転置行列を式(6.4)の両辺に乘じた新しい方程式を解けば必ず安定になる。なお実用的な安定化の手法に、最急降下法がある。

最急降下法は、ある評価関数 $J(x_1, x_2, \dots, x_n)$ をパラメータ $(x_1,$

x_2, \dots, x_n に関し極小あるいは極大にするためには、各パラメータ x_i の変化幅を、 J が最も大きく変化するようにしながら変化させていく、すなわち、

$$\frac{dx_i}{dt} = \mp K \frac{\partial J}{\partial x_i} \quad (6.6)$$

$i=1, 2, \dots, n$ (K は正の定数。－は極小、＋は極大)

なるように x_i を変化させていけばよいという手法である。

この手法を代数方程式に利用する場合には、評価関数 J として

$$J = \sum_{j=1}^n (a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jn}x_n - c_j)^2 \quad (6.7)$$

とにおいて、極小値 $J=0$ が求めれば、それが式 (6.4) を満足することから解が求まる。このとき、式 (6.6) は

$$\frac{dx_i}{dt} = - \sum_{j=1}^n K \{ 2a_{ji}(a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jn}x_n - c_j) \} \quad (6.8)$$

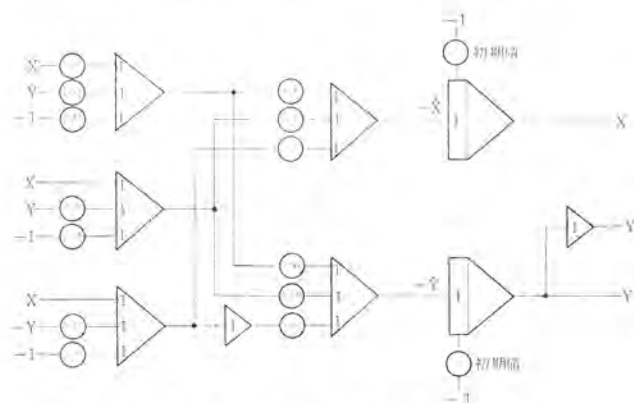


図 6.3 最急降下法による代数方程式の解法アナコンブロック図

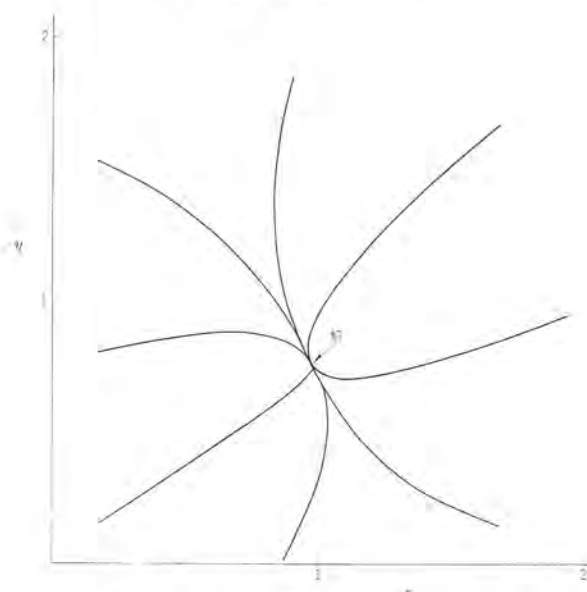


図 6.4 最急降下法による代数方程式の演算解

$i=1, 2, \dots, n$

となるから上式をアナコンで解けば、その定常解が求める解となる。この方法で行なえば必ず x_i が求まるが、 $J=0$ の極小値をもつ場合もあり、これが真の解かどうかは、式 (6.7) または (6.8) に対応する入力電圧を調べてみなければならない。

具体例として、未知数より方程式の数のほうが多い代数方程式

$$\begin{cases} 0.5x + 0.665y = 0.94 \\ x + 0.71y = 1.55 \\ x - 0.52y = 0.58 \end{cases} \quad (6.9)$$

を最急降下法で解く。

x および y の変化方向は、式 (6.8) より次式のようになる。ただし、アナコンのフルスケール内におさめるために $2X=x$, $2Y=y$ と変換、また $K=\frac{1}{20}$ とする。

$$\begin{cases} -\frac{dX}{dt} = (0.5X + 0.665Y - 0.47) \times 0.05 + (X + 0.71Y - 0.775) \times 0.1 + (X - 0.52Y - 0.29) \times 0.1 \\ -\frac{dY}{dt} = (0.5X + 0.665Y - 0.47) \times 0.0665 + (X + 0.71Y - 0.775) \times 0.071 - (X - 0.52Y - 0.29) \times 0.052 \end{cases} \quad (6.10)$$

図 6.3 は上式の アナコンブロック図である。図 6.4 はその演算解で、 x および y の初期条件をいろいろかえた場合の解への収れんの様子を示したものである。

(4) リニアプログラミング

リニアプログラミングとは、負でない値をとる変数に関する連立一次不等式で表現された制限条件内で、それらの変数に関する一次式（目的関数）を最大あるいは最小にする問題である。すなわち、

$$\begin{cases} \text{変数 } x_j \geq 0 \\ \text{制限 } y_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \leq a_{i0} \\ i=1, 2, \dots, m \\ \text{目的関数 } v = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \end{cases} \quad (6.11)$$

において目的関数 v を最小あるいは最大にする。

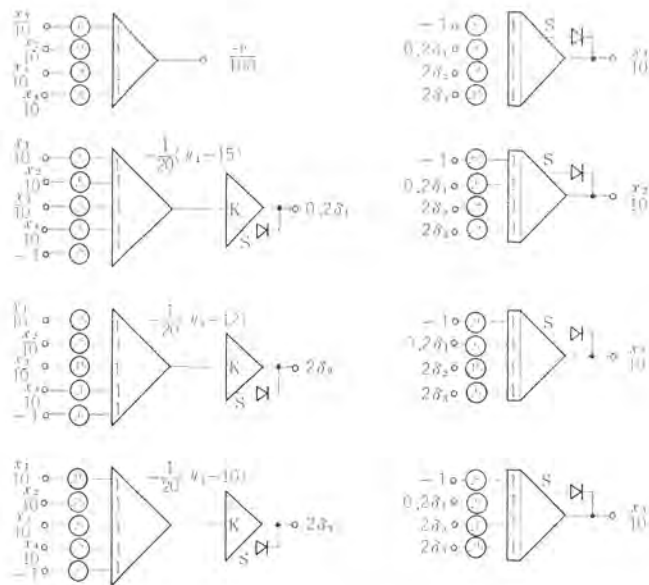
アナコンでこれを解く場合、先に述べた最急降下法の手法を適用して、 v の変化が最も大きくなるように最大こう配にそって x_i を変化させる。ただし、 x_i が制限条件にぶつかれば、これと直角の方向に反力を与えて制限領域を越ないようにする。以上の方法を数式で表現すれば次のようになる。

$$\begin{cases} \pm \frac{dx_k}{dt} = c_k - \sum_{i=1}^m a_{ik}\delta_i(y_i - a_{i0}) \\ \delta_i = 0(y_i - a_{i0} \leq 0) \\ = K(y_i - a_{i0} > 0) \end{cases} \quad (6.12)$$

ただし、 K は非常に大なる正の定数

ここに、 \pm は最大のときに正、最小のときは負の符号をとる。

この解も他の最急降下法による解と同じく、変数の初期値によっては最大または最小でない極値点に到達する場合がある。



実験	A	B	C	D	制約
人員 y_1	1	1	1	1	≤ 15
費用 y_2	7	5	3	2	≤ 120
日数 y_3	3	5	10	15	≤ 100
評価 v	6	5.5	9	8	max
回数	x_1	x_2	x_3	x_4	

図 6.5 リニアプログラミング・アナコンブロック図

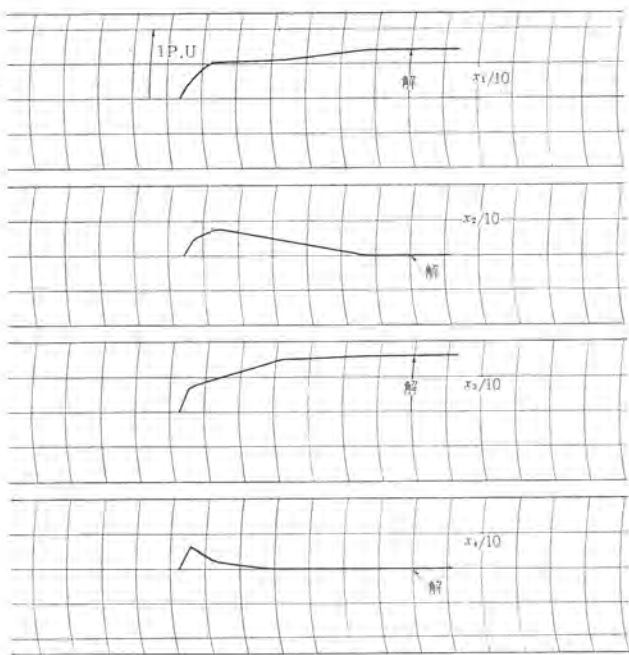


図 6.6 リニアプログラミング演算解

最大効用実験計画の具体例を考える。図 6.5 の人員・費用・日数を要し評価をもつ実験 A・B・C・D をそれぞれ何回行うのが最も効果的かという問題である。それぞれの実験回数を x 回とした場合、制限と目的関数は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{(人員)} \quad & y_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \leq 15 \\ \text{(費用)} \quad & y_2 = 7x_1 + 5x_2 + 3x_3 + 2x_4 \leq 120 \\ \text{(日数)} \quad & y_3 = 3x_1 + 5x_2 + 10x_3 + 15x_4 \leq 100 \\ \text{(評価)} \quad & v = 6x_1 + 5.5x_2 + 9x_3 + 8x_4 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.13)$$

x_i の変化方向として式 (6.11) に対応し、次式が得られる。ただし、アナコンのフルスケール内に収めるため $10y_2 = y_2'$ 、 $10y_3 = y_3'$ に変換。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= 6 - [\delta_1 + 7\delta_2 + 3\delta_3] \\ \frac{dx_2}{dt} &= 5.5 - [\delta_1 + 5\delta_2 + 5\delta_3] \\ \frac{dx_3}{dt} &= 9 - [\delta_1 + 3\delta_2 + 10\delta_3] \\ \frac{dx_4}{dt} &= 8 - [\delta_1 + 2\delta_2 + 15\delta_3] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.14)$$

図 6.5 はアナコンブロック図で図 6.6 が解である。変数が多いため XY 表示はできないが、変化のようすがわかる。定常値が解である。上述の方法は、目的関数 v が x_i の一次式でなくても、また制限条件が非線形であっても同様に有効である。

6.2 固有値問題

行列における固有値は連立方程式の形になるので前項の方法で求めることができる。

偏微分方程式の変数分離形における未知パラメータを、微分方程式の境界条件を満足するよう定めるのを固有値問題と言い、パラメータ値を固有値、固有値による微分方程式の解は固有関数と呼ばれる。この固有値、固有関数は無数にあり、固有値の少ない値から順に第 1 モード、第 2 モードなどと呼ぶ。元の偏微分方程式の解は、これら固有関数の無限級数の和で表わされる。

固有値問題は本質的には境界値問題であり、一例を 5.3 節で述べたが、他の一般例を 7 章で述べる。

6.3 境界値問題

微分方程式でも初期値問題ばかりでなく、問題によっては初期値が未知で、そのかわり独立変数 x が 0 でない境界値が条件として与えられている場合があり、これを境界値問題と呼ぶ。

境界値問題をアナコンで解くことはそれほど困難でなく、自動演算機能のあるアナコンでは最急降下法の手法を適用できて特に有効な場合がある。7 章の例題がそうである。

線形の場合は、境界値問題を重畳の理によって初期値問題におきかえることができ、もっと簡単であるが詳細は省略する。

6.4 波形解析への応用

波形分析、波形処理において、フーリエ変換、相関関数、パワースペクトル密度計算等の、時間領域と周波数領域間の変換が要求されるこ

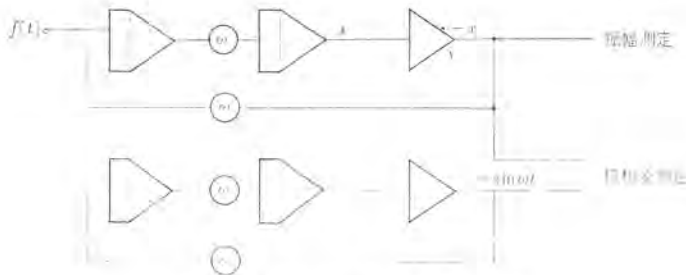


図 6.7 フーリエ変換演算回路

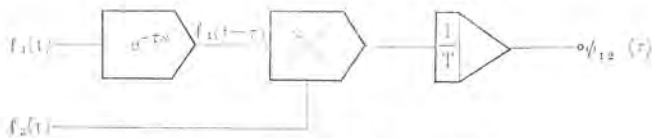


図 6.8 相関関数の演算回路

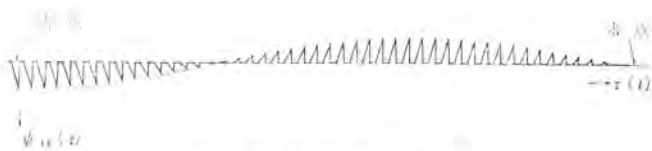


図 6.9 相関関数計算

とがあるが、アナコンの安価なこと、解の即時性を利用し、テーク式むだ時間発生器、時間関数発生器、テークレコーダ等を併用して、これらの処理がされることも多い。

(1) フーリエ級数、フーリエ変換

周期関数と仮定しての時間関数 $f(t)$ の $-T \sim T$ の級数展開をフーリエ級数展開とし、周期関数でない一般の時間関数の周波数スペクトルを求めるのをフーリエ変換とする。一般形について述べる。

フーリエ級数についても積分区間が異なるだけで同一の演算回路と式で与えられる。

$$F(j\omega) = \int_{-T}^T f(t) e^{-j\omega t} dt \quad \dots\dots\dots (6.15)$$

この定義式を展開すると次式になる。

$$\left. \begin{aligned} F(j\omega) &= F_R(\omega) + jF_I(\omega) = \sqrt{F_R^2 + F_I^2} e^{j\phi} \\ \text{ただし、} \phi(\omega) &= \tan^{-1} \left(\frac{F_I(\omega)}{F_R(\omega)} \right) \\ F_R(\omega) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T f(t) \cos \omega t dt \\ F_I(\omega) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T f(t) \sin \omega t dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.16)$$

したがって正弦波発生器、乗算器および積分器を用い定義どおり演算すればよいが、非線形要素誤差の積分から精度的には次の方法がよい。

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = \omega f(t) \quad \dots\dots\dots (6.17)$$

この微分方程式の解は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} x(T) &= \int_0^T f(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau \\ &= \sin \omega t \int_0^T f(\tau) \cos \omega \tau d\tau - \cos \omega t \int_0^T f(\tau) \sin \omega \tau d\tau \quad \dots\dots (6.18) \\ &= \sqrt{F_R^2(\omega) + F_I^2(\omega)} \sin [\omega t - \phi(\omega)] \end{aligned} \right\}$$

となる。これより、この微分方程式の解の定常状態（正弦波的に振動する）における振幅と位相を測定すれば、それがフーリエ変換における絶対値と位相になる。図 6.7 に演算回路を示す。

これは、1回の演算で一つの角周波数に対してしか求まらないため、所要の周波数帯域まで ω あるいは $f(t)$ のタイムスケールを変化させて多数回演算を行なわねばならない。また $f(t)$ が $t < 0$ でも定義されているときには、時間軸を移動させて $t \geq 0$ のみで $f(t)$ が存在するようにする。

(3) 相関関数およびスペクトル密度関数

二つの関数 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ の相関を表わす相関関数は

$$\phi_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f_1(t) f_2(t+\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (6.19)$$

と表わされる。これをアナコンで組むと図 6.8 のようになり、 τ に対して必要な時間だけ 0 から $2T$ まで、たとえば 1 分間演算をする。

むだ時間要素にはテーク式むだ時間発生器を使い（時間軸を縮めて再生し、演算時間を短縮できるものがある）専用の場合は、 τ のひとつの値での演算がすむごとに、自動的に演算がリセットし、 τ が 1 ステップ大きくなる。図 6.9 は実際に演算した波形例である。

周波数領域における性質を表わすスペクトル密度関数 $\Phi(\omega)$ は、相関関数計算で得られた波形を時間関数発生させ、次式により得られる。この手法自体はすでに述べたので省略する。

$$\Phi(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau \quad \dots\dots\dots (6.20)$$

7. 自動演算

7.1 自動演算について

固有値問題・境界値問題・極値問題等試行法によるものは、初期値問題等のように 1 回の演算で終わらなくて、何回か演算を繰返さねばならない。このような繰返し演算の過程を一般的に分析してみると、フローチャートとして大略図 7.1 のように示される。境界値問題を例にとっても考えると、ある与えられた境界値と不明の初期値等の条件を設定して 1 回計算を行ない、その結果が与えられた条件を満足しているかどうかを判断し、境界条件が満足されるまで条件の設定を変更して繰返し計算を行なう形になる。このときフローチャートに示されている繰返し演算を自動的に行なう機能、計算結果を記憶する機能、これを判断する機能および条件の設定の自動変更機能があるならば、これらの問題を自動的に解くことができる。

このように、ある問題を解くにあたって上記のような機能を計算機自身がもっていてプログラムにより計算機が自動的に演算を実行し

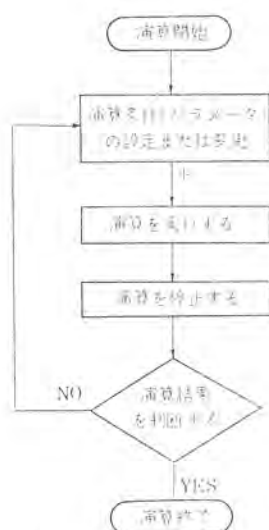


図 7.1 自動演算のフローチャート

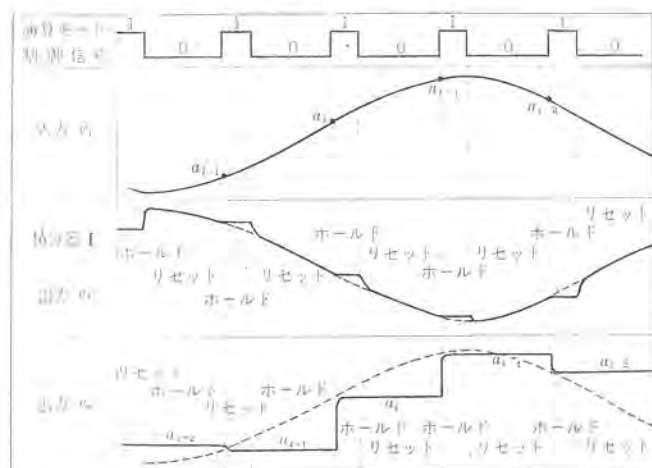


図 7.2 サンプルホールド回路とその動作

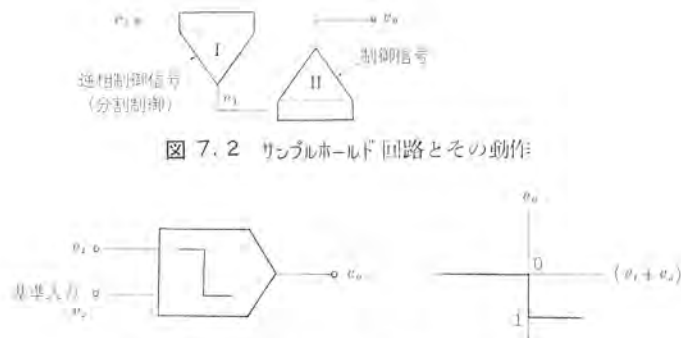


図 7.3 比較器ブロック図とその入出力特性

解を求めることを自動演算といっている。

計算機が自動演算を行なうために必要な機能は、上記の例あるいは他の種々の問題のフローチャートから、下記のようにまとめられる。

- (1) 記憶要素
 - (2) 判断要素
 - (3) パラメータ自動変更回路
 - (4) 繰返し演算機能
 - (5) プログラムに従って演算を制御する機能
- 逆に、これらの機能を用いて、自動演算が可能になるばあいは演算が簡単になる問題としては、
- (1) 固有値問題・境界値問題・極値問題などの試行法を用いたもの。
 - (2) 相互演算
 - (3) 最適値問題等の最急降下法を用いるもの
 - (4) 二重積分・積分方程式の解などの多時間軸演算
 - (5) 多パラメータのランダム変化
 - (6) 統計処理のような高速繰返し演算
 - (7) 外部制御を必要とする相関関数計算
- などがあげられる。

7.2 基本回路

(1) 記憶

アナログ量の記憶装置には、種々の方式があるが、自動演算において基本的に用いられるものは、積分器を利用したものである。

すなわち、2台の積分器を用いて1台を分割制御したサンプルホールド回路といわれているものである。図7.2はサンプルホールド回路とその動作図である。ここに、演算制御とは積分器の初期値設定(リセット)、積分(コンピュータ)、保持(ホールド)の三つのモードを制御信号で指定することをいい、分割制御とは各積分器に対して異なった演算モードを指定することをいう。

サンプルホールド回路は、動作図から明らかなようにホールドモードが記憶の働きをしていることを利用したものである。この出力が一周期前の入力信号を保持していることから、前の演算結果との比較、前の演算結果による次回のパラメータ変更、遅延回路などに使われる。

(2) 判断

アナログ信号の大小の判断はすべて電圧比較器を用いる。(図7.3) 自動演算ではこの出力により、リレーや電子スイッチを駆動して、回路変更や演算モードの変更、パラメータの変化幅の修正や極性変換に用いる。

(3) 変更

リレーや電子スイッチを用いて多くの方法があるが、ここではパラメータ変更に関して、積分器を利用した二つの例をあげる。

(a) 積分器制御

回路とその動作図を図7.4に示す。

この積分出力が入力値に応じて演算ごとにその値が変化することを利用して、パラメータや初期値などの設定にこの出力を使用する。

入力信号としては一定値、比較器で符号切換が可能な一定値、前回の演算結果などを利用する。



図 7.4 パラメータ変更回路 I—積分制御

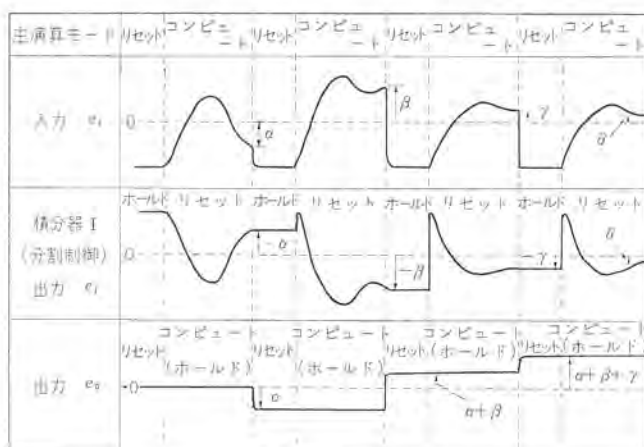


図 7.5 パラメータ変更回路 II—アキュムレータ

(b) アキュムレータ

アキュムレータ回路は制御信号に同期して入力値を累算していくもので、入力値一定の場合にはパラメータの一定間隔変更、入力値が演算結果の場合にはパラメータの自動修正として利用できる非常に重要な回路である。

アキュムレータの動作図と回路を図 7.5 に示すが、その動作はサンプルホールド回路と同じで、ただ積分器 I が二つの IC 端子をもっていて、その一つに出力から帰還がかけられているため累積動作を行なうものである。

7.3 最急降下法と最適値問題

最急降下法は、代数方程式のところで簡単に述べたが、この手法は自動演算の主要な応用例である。微分方程式で表わされている系の最適値問題に対して非常に有効である。

例として、未知のパラメータ ζ, ω をもつ二次系

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -2\zeta\omega x_2 - \omega^2 x_1 \end{cases} \quad (7.1)$$

を与えられた関数 $g(t)$ にできるだけ近づける問題について考える。

評価関数を、誤差の 2 乗平均

$$J(\zeta, \omega) = \int_0^t \{x(\zeta, \omega, t) - g(t)\}^2 dt \quad (7.2)$$

ここに $g(t), x(t)$ とともにベクトル表示である。

とすると、問題は J を最小にする ζ, ω を求めることになる。

そのためには、 ζ, ω を最急降下法により、1 回の演算ごとに

$$\frac{d\zeta}{dt} = -K \frac{\partial J}{\partial \zeta}, \quad \frac{d\omega}{dt} = -K \frac{\partial J}{\partial \omega} \quad (7.3)$$

の方向に変化させればよい。ここに式 (7.2) より

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \zeta} &= 2 \int_0^t \{x(\zeta, \omega, t) - g(t)\} \frac{\partial x}{\partial \zeta} dt \\ \frac{\partial J}{\partial \omega} &= 2 \int_0^t \{x(\zeta, \omega, t) - g(t)\} \frac{\partial x}{\partial \omega} dt \end{aligned} \quad (7.4)$$

と表わされる。この式の中の $\frac{\partial x}{\partial \zeta}, \frac{\partial x}{\partial \omega}$ は影響関数と呼ばれ、 $\frac{\partial x_i}{\partial \zeta} = u_{i1}, \frac{\partial x_i}{\partial \omega} = u_{i2} (i=1, 2)$ とおくと、式 (7.1) を偏微分することにより下記のような微分方程式をうる。

$$\begin{aligned} \dot{u}_{1j} &= u_{2j} \\ \dot{u}_{2j} &= -2\zeta\omega u_{2j} - \omega^2 u_{1j} - \begin{cases} 2\omega x_2 (j=1) \\ 2(\zeta x_2 + \omega x_1) (j=2) \end{cases} \end{aligned} \quad (7.5)$$

以上より、式 (7.1) および式 (7.5) の微分方程式の演算回路を構成し、その出力より式 (7.4) を求め、その値から次回の演算のパラメータ (ζ, ω) の修正を行なえば、何回かの繰返し演算の後、評価関数 J を最小にする ζ, ω が図 7.6 の接続で自動的に求まる。

最急降下法は、パラメータの変化のステップ幅さえ適当なら、極値は必ず安定に求めるられ、また、定まったプロセスで解が求まり、パラメータが多くなっても取扱いが変わらないというような利点がある。しかし、最急傾斜を求めるために $\frac{\partial x}{\partial \alpha} (\alpha: \text{パラメータ})$ なる影響関数を別の微分方程式から求めねばならず、パラメータ数が多いときに計算規模が増大する欠点がある。また $\frac{\partial J}{\partial \zeta}$ などが陽関数的に求まらない場合がある。

最急降下法は、極値問題のみならず、固有値や境界値問題においても、影響関数との関連において用いられる。

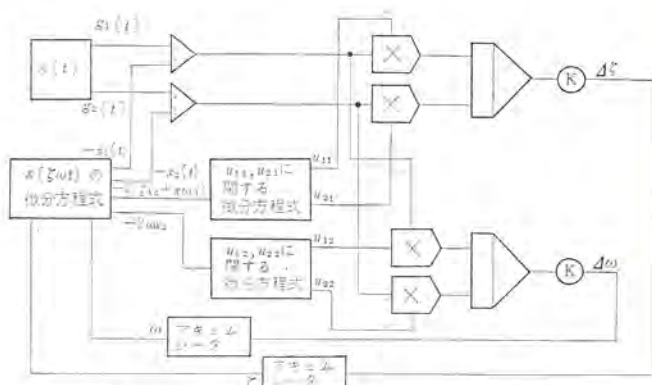


図 7.6 最急降下法による最適値問題の解法アナコンブロック図

以上、最適値問題における最急降下法について説明したが、固有値、境界値問題を含めて最適値問題を解く手法として、その他の代表的なものに次のようなものがある。

- ☐ 近似最急降下法
- ☐ シーケンシャル 法
- ☐ パターベジション 法

近似最急降下法は，最急降下法において $\frac{\partial J}{\partial \alpha}$ が数式的に与えられない場合に， $\frac{\partial J}{\partial \alpha} = \frac{\Delta J}{\Delta \alpha}$ として ΔJ を適当な方法で求めるものである。

シーケンシャル法は、パラメータ (α) が二つ以上ある場合、ある α の変化が J を極値にむかう方向に変化させている間はそのままの変化を何回も続け、 J の変化が反転したときに、次のパラメータを変化させるというシーケンスを繰返していくものである。

パターン検索法は、パラメータをランダムにかえて J の変化をみて、その変化が最適値に向うような方向にパラメータの値をかえていくものである。図 7.7 に各手法の探索過程を示す。

実際には、上記の手法を基にして個々の問題により適当な探索過程を7.2節に述べた要素や論理要素を用いて組み立てればよい。

7.4 演算例

はり(梁)の固有値問題の自動求解の例を示そう。方程式は次式である。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (7.6)$$

x : はりの水平距離 y : はりの振動変位

EI : 屈曲剛性率 ρ : はりの単位長当たりの質量

境界条件は、はりの終端の状態で決まり、たとえば固定端なら、 $y=0, \dot{y}=0$ となる。ここでは一端固定で、他端 $x=l$ で質量をもつ、つまり次の境界条件をもつ場合を考えよう。

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} + \left(ML - \frac{EI\rho}{KG} \right) \frac{\partial^3 y}{\partial t^3} + J \frac{\partial^3 y}{\partial x \partial t^3} &= 0 \\ EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} - \left(ML - \frac{EI\rho}{KG} \right) \frac{\partial^3 y}{\partial t^3} - M \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.7)$$

ここで $y = X(x) \cdot T(t)$ と変数分離をし、固有値 λ を導入すれば、式 (7.6) は次の二つの常微分方程式となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^4 X}{dx^4} - \rho \lambda^2 X &= 0 \\ \frac{d^2 T}{dt^2} + \lambda^2 T &= 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7.8)$$

境界条件は、変数分離し、式(7.8)の関係を用い、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{d^2 X}{dx^2} - J \lambda^2 \frac{dX}{dx} - \left(Ml - \frac{EI\rho}{KG} \right) \lambda^2 X &= 0 \\ EI \frac{d^3 X}{dx^3} + \left(Ml - \frac{EI\rho}{KG} \right) \lambda^2 \frac{dX}{dx} + M \lambda^2 X &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7.9)$$

式(7.8)の X に関する方程式のブロック図は図7.8のようになるが、一義的にこの解が定まるためには、四つの初期条件が与えられ

ていなければならない。ところが $x=0$ で $X=0$, $\dot{X}=0$ の二つの初期条件しか与えられていず, λ^2 , \ddot{X}_0 , \ddot{X}_0 を適当にかえて, $x=l$ の境界条件を満足するものをみつけねばならない。(なお, T に関する方程式はすでに何度もでている形で, 正弦波振動であることがわかる)。ところで線形微分方程式では未知の初期条件 \ddot{X}_0 , \ddot{X}_0 の変化に対する解の変化は, \ddot{X}_0 と \ddot{X}_0 の比で変わるだけであるから, どちらかは一定にでき, 未知パラメータは λ^2 , \ddot{X}_0 のみとなる。

原理的には λ^2 を適当に演算ごとにかえ、 x をアナログの独立変数の時間と考え、演算の所定時間後の値が所望のものになるまで、つまり境界条件を満足するまで、何度も試行して求める。

しかし、これでは大変であるから、最急降下法の原理を適用して自動演算機能を使って自動修正したい。

ところが式 (7.9) の条件式をそれぞれ $I(\lambda, \ddot{X}_0)$, $II(\lambda, \ddot{X}_0)$ とし

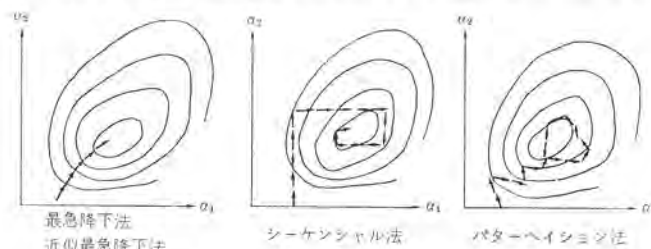


図 7.7 最適値問題の各種の手法

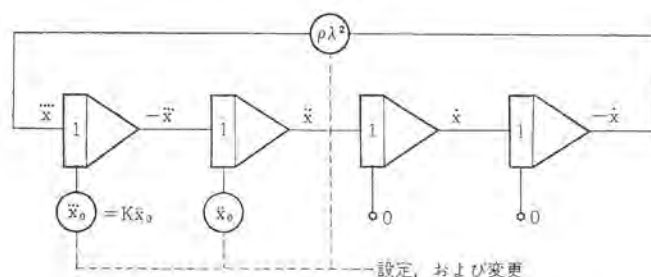


図 7.8 はり(梁)の固有値問題の アナロジブロック 図

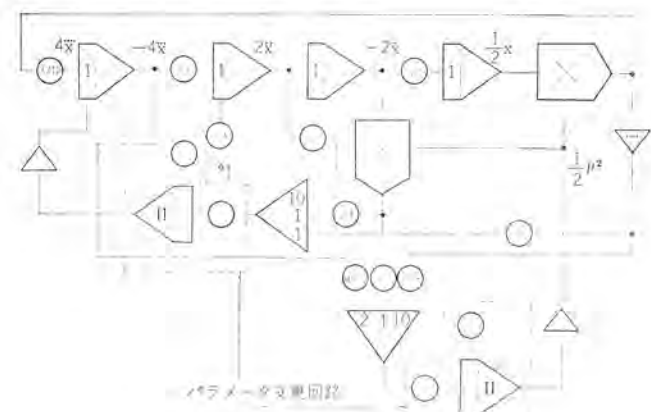


図 7.9 はりの固有値問題の アサコンブロック 図
(自動 パラメータ 変更)

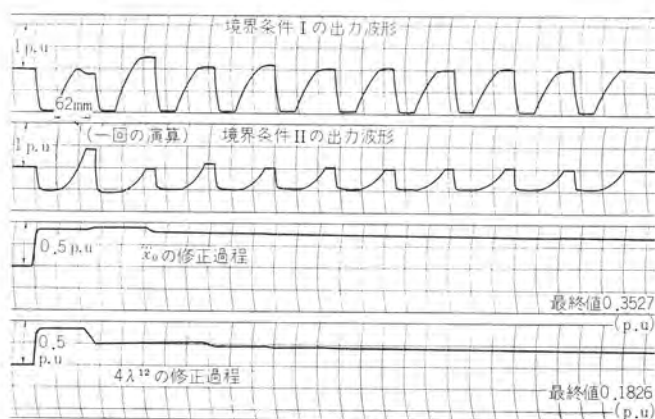


図 7.10 はりの固有値問題の演算解 (モード 1)

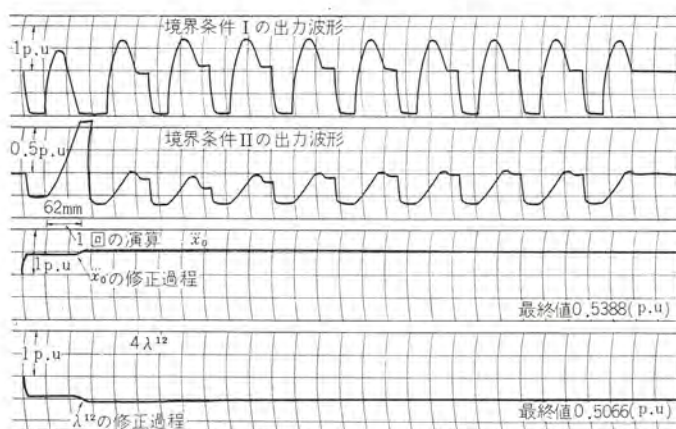


図 7.11 はりの固有値問題の演算解 (モード 2)

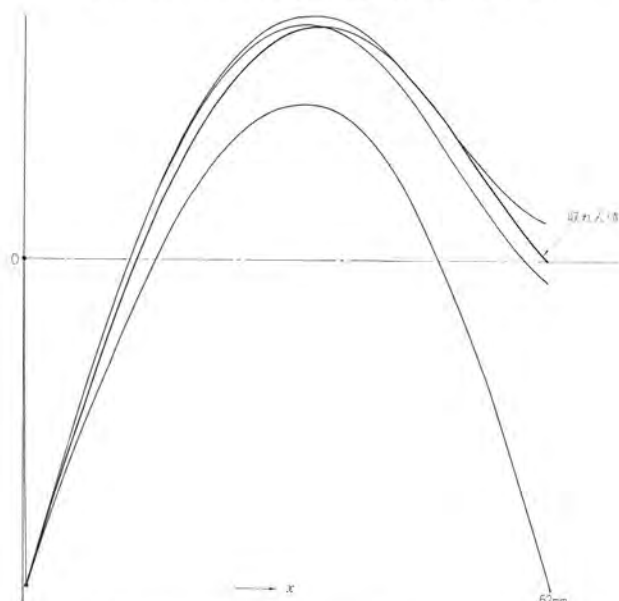


図 7.12 はりの固有値問題の演算解 (モード 2)
境界条件 I の出力波形

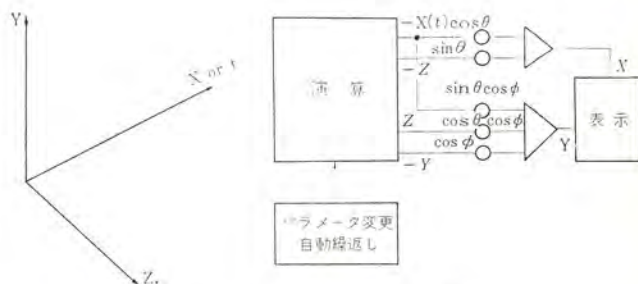


図 7.13 立体表示系

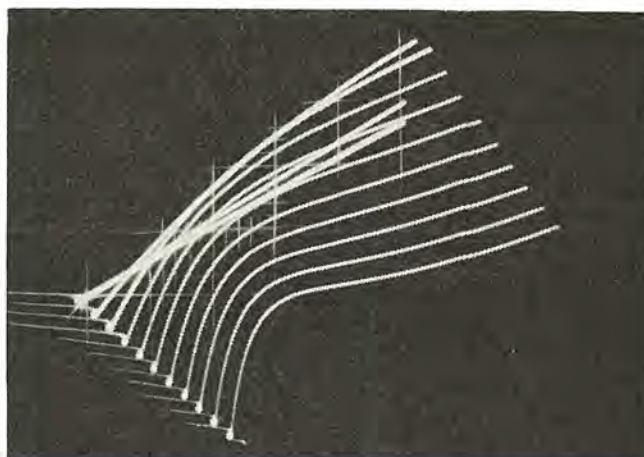


図 7.14 立体表示の演算例

て、これらの λ および \ddot{X}_0 による偏微分表現式は求められないため、I が \ddot{X}_0 に、II が λ に、相互に影響をおよぼすと考えて組んだのが図 7.9 である。これには EI, ρ, M, L, KG などの実際の数値がはいっており、スケール変換もされている。

λ の値は実際には基本モード (第 1 モード)、とせいぜい第 2 モードだけでよいので、演算はこの二つのみ求めた。図 7.10~7.12 は演算結果である。数回の演算で (人間は何もしないでも) 正しい解が得られるのがわかる。図 7.12 は第 2 モードの境界条件 I の波形を演算に同期して XY レコーダ上に描かせたものである。

7.5 立体表示

パラメータ変化による影響を知るとか、2 変数の関数波形を知りたい場合、立体表示をすれば直観的に知ることができる。詳細は省略するが、たとえば図 7.13 のように座標系をとり、繰返しごとに少しずつパラメータを変化させる。(ブラウン管上に静止像を得るためには、一連のパラメータ変化が終われば、また当初のパラメータ値にもどして繰返し操作をし、高速で演算することが必要である)。

図 7.14 はその一例である。これも自動演算の一応用例である。

8. む す び

このようにアナコンでの演算は解が直観的であり、パラメータ変化に対するデータ量が非常に多く短時間のうちに得られる。単に定性的

な値を知ることができるばかりでなく、少し注意すれば非線形問題でも実用上十分な精度で解を得ることができ、解の余裕度やパラメータのおよぼす影響を知っておくことが可能である。

またくふうすれば各種の問題がアナコンで解析可能であることもわかる。

今後、アナコンの動特性の良さとディジコンの大容量の記憶と精度の良さを利用したハイブリッド計算機も多くなると思われる。

以上3回にわたってアナコンのプログラミングについて解説したが、これを機会に、アナコンを理解していただき、多用してもらえれば幸いである。

また、アナコンで解く際の考え方というのは、ディジコンなどのプログ

ラムと同様であり、アナコン的なプログラムが大いに役に立つと確信している。

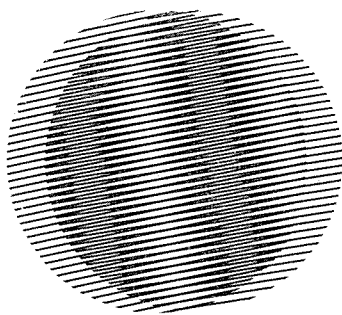
参考文献

- (1) 柴谷, 多田, 持田, 井塚, 佐藤: MELCOM EA-7200 シリーズ 全トランジスタ式 アナログ計算機, 三菱電機技報, 42, No. 3 (昭43)
- (2) KORN & KORN: Electronic Analog and Hybrid Computers, Mc Graw-Hill (1964)
- (3) 山下英男監修: 電子計算機 アナログ計算機編, オーム社, (昭34)
- (4) 藤田広一: アナログ計算機のプログラム, 昭晃堂, (昭41)

正 誤 表

43巻2号掲載の論文「メキシコ 納め衛星通信用大口径アンテナ」, 「人工衛星打上げロケットの誘導制御」および「液体ヘリウム冷却パラメトリック増幅器システム」に誤記がありましたので、つつしんでつぎのように訂正いたします。

ページ	誤	正
245の著者名	阿部 修*	阿部 修**
245の左下欄外	* 通信機製信所 * 鎌倉製作所	** 通信機製作所 *** 鎌倉製作所
276の題名	人工衛星打上げロケットの誘動制御	人工衛星打上げロケットの誘導制御
313の左下欄外	** 北伊丹製作所	*** 北伊丹製作所



新製品紹介

ZKG-B 形マイクロパウダクラッチ

マイクロパウダクラッチは高速応答性、大きな熱容量、トルク制御の容易さなどの特長をもっている。これらの特長をいかして、高ひん度の起動停止をはじめ、張力制御、緩衝起動などの用途に使用されてきた。今回、よりいっそうの耐久性を目標に新シリーズとして ZKG-B 形シリーズを完成した。従来のものに対して、改良したおもな点は次のとおりである。

特 長

- (1) ベアリングをサイズアップしたので、グリスの封入量が多くなり一段と耐久性が向上した。
- (2) パウダのシール部分に特別の構造を採用したので、空転トルクが小さくなるとともに、性能が一段と安定した。
- (3) ステータの外周にフランジ部をもうけたので、取付方法が容易となり、簡単な部品をとりつけるだけでブレーキとしても使用できる。

仕 様

表 1 はこのおもな仕様である。また図 1 は ZKG-5 B 形マイクロパウダクラッチを示す。

表 1 ZKG-B 形マイクロパウダクラッチ仕様

電源 DC 24 V

形 名	公称伝達 トルク (kg-cm)	電 流 (A/75°C)	主要外形寸法 (mm)			スリップ 工 率 (W)	※ トルク立ち 上り時定数 (ms)	重 量 (kg)
			最大外径	全 長	軸 径			
ZKG-5 B	5	0.63	50	77	5	15	33	0.65
ZKG-10 B	10	0.66	56	83	7	20	43	0.85
ZKG-20 B	20	0.83	65	95	9	30	63	1.25
ZKG-50 B	50	1.1	80	111	12	40	95	2.25

※ 電源のスイッチイン後公称トルクの 63% に達するまでの時間であり、無応答時間 (8~15)ms を含んでいる。

なお電源を特殊として過励磁方法を採用すれば、トルク立ち上り時定数は半分以下にすることが可能である。

[姫路製作所]

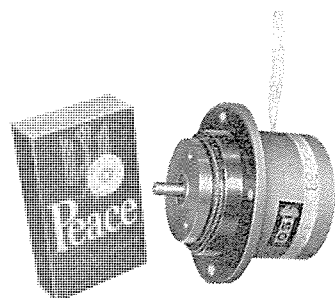


図 1 ZKG-5 B 形 マイクロパウダクラッチ

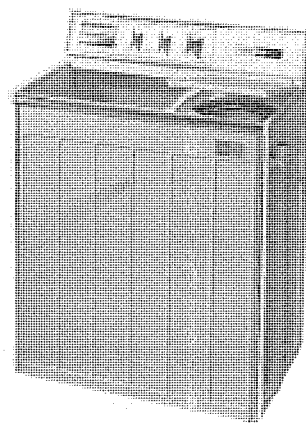


図 1 超高級樹脂製 ABS 千曲現品写真

世界で初めてボディに高級 ABS 樹脂を使用した 「PW-2000 形三菱脱水洗たく機 (愛称 ABS 千曲)」発売

当社では、従来より水と電気を使う洗たく機により適した新材料の研究・開発を行っていた。従来の洗たく機は外装が鉄板製であるため、どうしてもさびに弱いという欠点があり、需要家の要望でも「さびない洗たく機が欲しい」という声が圧倒的に多く、その声は当社の需要者の要望調査では 70% 近くで第 1 位であった。当社ではこの点に着目し、三菱グループとの共同研究により、このたびじょうぶでさびない、かつ電気的には絶縁体である画期的な高級 ABS 樹脂を開発し、これを使用して、「PW-2000 形三菱脱水洗たく機 (愛称 ABS 千曲)」を発売することになった。

形 名

PW-2000 形脱水洗たく機 (愛称・ABS 千曲)

価 格

現金正価 ￥38,500 月賦正価 ￥41,600 (12 回払)

発売期日

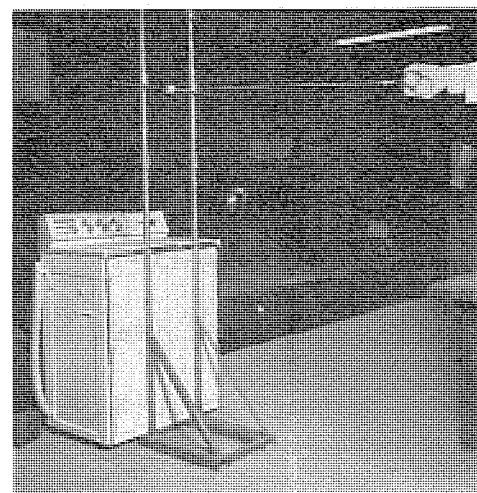


図 2 ABS 千曲耐衝撃テスト

新製品紹介

3月3日

■ 特 長

- (1) ボディはじょうぶでさびない世界で初の高級 ABS 樹脂を使用し、洗たくそうももちろんさびないポリプロピレンを採用している。
- (2) 2kg の大形そうを使用したため、一度に多くの洗たくが可能である。
- (3) 水位2段調節装置と、お知らせブザーにより、むだなく洗うことができる。
- (4) 強弱4段水流により、洗たく物に合わせて水流調節ができる。(IWS 国際羊毛事務局選定品)
- (5) 当社独特の高速ビード式脱水機により、脱水率が良くなった。
- (6) 心臓部であるモートルは、無給油式なので寿命が長くなった。
- (7) 30mm の大口径ホースにより、スピード排水ができる。(左右付け替え自由の1本ホース付き)
- (8) 人間工学的に考え出された使いやすい設計・デザインを採用している。

■ 仕 様

- 洗たく脱水容量： 2kg
- 洗たく方式： 強弱4段水流切り換え
- 脱水方式： 遠心脱水（専用タイマー付き）
- 外形寸法： 幅70×奥行41.5×高さ92.2cm
- 重 さ： 29kg



図3 “ABS千曲” しゃく熱のタイ・バンコックにおける耐熱使用テスト風景



図4 “ABS千曲” 厳寒零下の北海道における耐寒使用テスト風景

17 形直角画面の “17 TS-6700 形三菱ソリッドステートテレビ (愛称・桂 17)” 発売

当社は、従来より インテリア 調の白黒 テレビ「桂」シリーズ を発売していたが、このたび「桂」シリーズの一貫として、17 形の「17 TS-6700 形三菱ソリッドステートテレビ（愛称・桂 17）」を発売することになった。

「桂 17」は、信頼度の高いシリコントランジスタを全面的に採用したソリッドステート方式で、きわめて信頼性の高いものである。

また、デザイン的にも桂離宮の日本美を取り入れた インテリア 調のおちついた製品である。

■ 形 名

17 TS-6700 形三菱ソリッドステートテレビ（愛称・桂 17）

■ 価 格

現金正価 ￥49,800 月賦正価 ￥53,800 (12 回払)

■ 特 長

- (1) パノプライトタイプの 17 形直角明視 ブラウン 管を採用しているので、四すみが切れない迫力ある映像が得られる。
- (2) 信頼度の高い超高耐圧シリコントランジスタを 100% 使用した新ソリッドステート回路なので、従来にくらべて耐圧は約 5 倍になり、水平回路・垂直回路の電圧を大幅にアップした

ことと合わせて、信頼性・寿命が飛躍的に伸びた。

(3) 2本のねじをはずすだけで容易にシャシ全体が引出せる新設計なので、修理が容易にできる。

(4) トランスレス方式の採用により重量が約1kg軽減された。

(5) 電子頭脳「MFT」の採用により、めんどろな微調整がいらなくなった。

(6) 消費電力は50Wなので、電気代が安く経済的である。

(7) インスタントオン回路により、スイッチを入れると同時に映像が得られる。

(8) キードAGC回路により画面が安定しており、ノイズの心配がない。

■ 仕様

電源： 交流100V 50/60Hz

消費電力： 50W

トランジスタ： 20石（シリコン）

ダイオード： 18石

ゼナーダイオード： 1石

ブラウン管： 直角17形明視ブラウン管

真空管： 1球（高圧整流）

スピーカー： 1個（15×10cm）

音声出力： 2.0W

外形寸法： 幅630×高さ380（脚付き高さ710）×奥行300mm

重量： 14.0kg



17 TS-6700 形三菱ソリッドステートテレビ

[京都製作所]

三菱けい光灯器具「ルミフラワー・シリーズ」発売

当社は、今までのけい光灯器具のイメージをまったく変え、白熱灯器具なみのムードをプラスした光の花びらとも言えるべき三菱けい光灯器具、「ルミフラワー・シリーズ」38種を開発し、3月1日より発売することとなった。

この「ルミフラワー・シリーズ」は、最近の傾向である部屋のムード作りというところに基点をおいたもので、従来、ムード照明の代表であった白熱灯器具の短所である高価格、低照度、わずらわしさを取り除いたもので、各部屋にマッチした各種デザインと、それに明るさ、ムードをプラスした画期的なけい光灯器具で、将来につながる現代の照明器具である。

■ 品名

三菱けい光灯器具「ルミフラワー・シリーズ」

■ 形名、愛称、仕様、価格

(a) 明るさにムードをプラスした画期的な照明器具。

(b) 好みに応じてセードの取り替えができる。

(c) セードは組み立て式なので完全に水洗いができる。

(d) コンパクトな化粧箱入りなので、輸送・持ち運びが簡単で、保管スペースが少なく



LF-614 形ルミフラワー

新製品紹介

愛 称	形 名	ワット数 (W)	仕 様 全機種とも豆球、プルスイッチ付き	正 価 (¥)	最適使用場所(ご参考までに)
ルミフラスター 「チェリー」	LF-31	30	乳 白 色 チェーンペンダント	4,200	子 供 部 屋 居 間 ダイニングキッチン 商 店 喫 茶 店
	LF-31 CP	30	乳 白 色 コードペンダント	4,200	
	LF-31-Y	30	イエロー チェーンペンダント	4,200	
	LF-31 CP-Y	30	イエロー コードペンダント	4,200	
	LF-31-P	30	オレンジ チェーンペンダント	4,200	
	LF-31 CP-P	30	オレンジ コードペンダント	4,200	
	LF-61	60	乳 白 色 チェーンペンダント	5,200	
	LF-61 CP	60	乳 白 色 コードペンダント	5,200	
	LF-61-Y	60	イエロー チェーンペンダント	5,200	
	LF-61 CP-Y	60	イエロー コードペンダント	5,200	
	LF-61-P	60	オレンジ チェーンペンダント	5,200	
	LF-61 CP-P	60	オレンジ コードペンダント	5,200	
ルミフラスター 「ガトレア」	LF-32	30	乳 白 色 チェーンペンダント	4,500	応 接 間 居 間 ホ テ ル
	LF-32 CP	30	乳 白 色 コードペンダント	4,500	
	LF-62	60	乳 白 色 チェーンペンダント	5,500	
	LF-62 CP	60	乳 白 色 コードペンダント	5,500	
ルミフラスター 「エリカ」	LF-63	60	クリスタル チェーンペンダント	5,500	ダイニングキッチン 居 間
	LF-63 CP	60	クリスタル コードペンダント	5,500	
ルミフラスター 「ダリヤ」	LF-34	30	乳 白 色 チェーンペンダント	4,500	居 小 供 部 屋 ダイニングキッチン パ ー フ 喫 茶 店 ホ テ ル
	LF-34 CP	30	乳 白 色 コードペンダント	4,500	
	LF-34-Y	30	イエロー チェーンペンダント	4,500	
	LF-34 CP-Y	30	イエロー コードペンダント	4,500	
	LF-64	60	乳 白 色 チェーンペンダント	5,500	
	LF-64 CP	60	乳 白 色 コードペンダント	5,500	
	LF-64-Y	60	イエロー チェーンペンダント	5,500	
	LF-64 CPY	60	イエロー コードペンダント	5,500	
ルミフラスター 「ローズ」	LF-35	30	乳 白 色 チェーンペンダント	4,500	居 応 接 間 ホ テ ル
	LF-35 CP	30	乳 白 色 コードペンダント	4,500	
	LF-65	60	乳 白 色 チェーンペンダント	5,500	
	LF-65 CP	60	乳 白 色 コードペンダント	5,500	
ルミフラスター 「カンナ」	LF-66	60	クリスタル チェーンペンダント	5,800	ダイニングキッチン 居 間 商 店 パ ー ラー
	LF-66 CP	60	クリスタル コードペンダント	5,800	
	LF-66-R	60	レッド チェーンペンダント	5,800	
	LF-66 CP-R	60	レッド コードペンダント	5,800	
ルミフラスター 「リリー」	LF-67	60	乳 白 色 チェーンペンダント	5,800	応 接 間 居 間
	LF-67 CP	60	乳 白 色 コードペンダント	5,800	
ルミフラスター 「チューリップ」	LF-68	60	乳 白 色 チェーンペンダント	5,500	和 室 寢 室
	LF-68 CP	60	乳 白 色 コードペンダント	5,500	

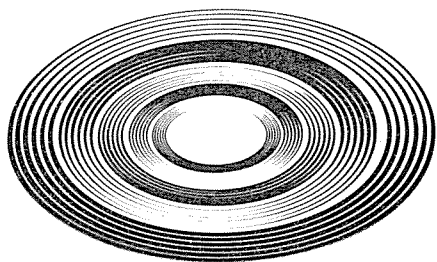
すむ。

(e) コードは20~60cmまで自由に簡単に伸縮ができる。

(f) コードペンダントにはフリーストップ構造の化粧カバーがついているので、きれいで、便利である。

(g) チェーンペンダントにはコードのみだれを防ぐコードバンド付きで、しかも丸形コードを使用し伸縮が自在である。

[大船製作所]



NEWS FLASH

「レーザ式座標測定装置」日刊工業新聞社

10大新製品賞を受賞

当社鎌倉製作所では、中央研究所の協力を得て新日本工機と協同で、世界でも初めて、レーザ光線を用いたモデル測定機（レーザ式座標測定装置）を完成し、このたび当社で初の日刊工業新聞社1968年度10大新製品賞を受賞した。

従来物体の形状を計測する方法として、機械触針式が一般に考えられているが、この装置は自動車のモデルなど複雑な曲面を持つ物体の三次元座標値を、モデルに無接触でならい測定する機構になっており、高精度かつ高速度でデータを収集・記録するので、自動車用金型の製作に際してのモデル測定に大きな威力を発揮する。

本装置の主原理は、He-Neレーザ光を対物レンズを通してモデルに照射し、このレンズの焦点位置でのレーザ光微少スポットが、常に被測定モデル面上にあるようにレーザ検出器をならい制御し、同時に他の二次元をMELDAS-4200で位置決めして、モデルの座標数値を得ている。収集された座標数値データを電子計算機や数値制御工作機械に連動させれば、自動設計・自動加工システムを組むことができる。レーザによる位置検出方法は、すでに日本をはじめ各国に特許出願中であり、自動車、船舶、あるいは航空機や精密加工部品などの測定にその応用範囲は広い。

(1) 特長

- (a) モデルに接触しないで測定できる。
- (b) 精度が高い。(最大10ミクロン)
- (c) モデルの材質に制限されない。
- (d) 作業を完全に自動化でき、連続的に走査するので測定時間が大幅に短縮できる。

(2) ならい制御仕様

モデル検出器：	レーザ使用非接触形
検出器光学系：	送受共用単光学系で首振り機構により9方向測定可能
検出精度：	再現精度 ± 0.01 mm, ばらつき ± 0.003 mm
追従速度：	最大 1,000 mm/min
焦点スポット径：	± 0.3 mm ϕ

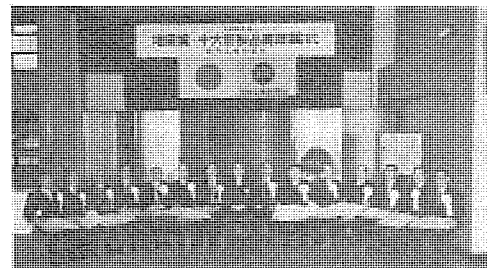
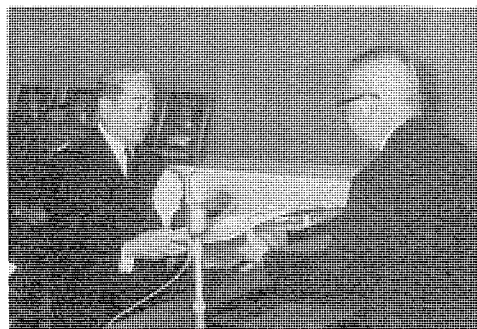
(3) 位置決め制御仕様

使用装置：	全IC化数値制御装置 MELDAS-4200
最小指令単位：	0.01 mm
送り速度：	10~999 mm
測定間隔速度：	8単位紙テープにより指令
位置検出方式：	リニヤインダクトとによるアナログフィードバック方式

(4) 出力制御機能

出力形式：	表示、印字、紙テープせん孔
出力座標値：	X, Y, Z 3軸、絶対値または相対値（切換えにて使用）
表示：	10進6けた（3軸）
印字せん孔速度：	500字/分

[鎌倉製作所]



“FT 800 A形サイリスタ” および

“FD 1000 B形シリコン整流素子” を開発

当社では、このたび電力容量において世界最大、耐圧において世界最高の記録品である

4,000 V 600 A のサイリスタ (FT 800 A 形) と 6,000 V 800 A のシリコン 整流素子 (FD 1000 B 形) を、それぞれ当社北伊丹製作所で開発に成功した。

従来、大電力シリコン 整流素子は、交流電力を直流に変換する整流装置として、電気化学工業や電鉄用直流変電所、さらに新幹線を初めとする交流電気車などに多数使用されているが、素子 1 個当たりの変換容量に限度があるため、使用する装置の電流・電圧に応じて多数の素子を並列あるいは直列に接続する必要があった。

したがって、このような場合には素子 1 個当たりの電流容量および耐圧が大きいほど素子の使用数が少なくてすみ、それだけ装置が簡単となり、信頼度向上、保守上の点からもきわめて有利になる。わが国における大電力シリコン 整流素子は、この点現在でも世界で最高レベルにあるとはいえ、当社では 2,500 V 800 A あるいは 4,000 V 400 A クラスのシリコン 整流素子を、すでに 1 年以上前から量産している。

サイリスタはシリコン 制御整流素子ともよばれ、ゲートトリガによるすぐれた電力制御ができるので、この 2 年ほどの間に各種重電機器への応用が急速に増加した。その筆頭は、鉄鋼設備投資の波にのった製鉄用分塊 ミル・圧延 ミルなどで、何千馬力という直流電動機を多数のサイリスタでもって制御し、すぐれた性能を発揮している。

サイリスタの場合も直並列の数を少なくするため、1 素子当たりの電流容量および耐圧の大きいものが望まれる。現在、わが国では 2,500 V 400 A クラスのサイリスタが多量に使用されているが、シリコン 整流素子と同様欧米の水準より一歩進んでいると思われる。

今回当社が開発した高耐圧・大電力サイリスタならびにシリコン 整流素子は、1 素子当たり変換あるいは制御しうる電力容量および耐圧の世界記録をさらに更新した画期的なものであり、これによって工業用・電鉄用重電機器はもちろん、現在活発に研究が進められている直流送電や高圧交流制御などの電力機器への半導体化傾向は、一段と促進されるものと考えられる。

とくに直流送電用変換装置などの場合は、従来、高圧水銀整流器が使用されていたが、近來スイッチング速度が早く、制御特性のすぐれたサイリスタを使用する意向が強くなってきた。直流送電の場合は電圧が数万ボルト以上ときわめて高いので、たとえ 4,000 V のサイリスタでも数十個直列につなぐ必要がある。

なお、FT 800 A 形サイリスタは、当社が通産省の昭和 43 年度重要技術研究開発補助金を受けて、実施中の「高耐圧大電力用サイリスタの研究」に関連して開発されたもので、同補助金による最終目標に到達するまでには、さらに若干の研究が残されているが、今年度末までには開発完了の予定である。

(1) 仕様

FT 800 A 形サイリスタ		FD 1000 B 形シリコン 整流素子	
せん 頭 逆 耐 電 圧	4,000 V	せん 頭 逆 耐 電 圧	6,000 V
せん 頭 順 阻 止 電 圧	4,000 V	過 渡 せん 頭 逆 耐 電 圧	6,300 V
平 均 順 電 流	600 A	平 均 順 電 流	600 A
1 サイクルサージ電流	10,000 A	1 サイクルサージ電流	15,000 A
トリガゲート電圧	4 V	動 作 接 合 温 度	-40 ~ 150°C
トリガゲート電流	350 mA		

(2) 開発品の概要

FT 800 A 形サイリスタおよび FD 1000 B 形シリコン 整流素子は、ほぼ共通の外装構造をしており、素子は両側から冷却されるいわゆる平形構造ではあるが、従来の平形素子とことなり、冷却をより効果的に行なうために、素子とその両側に当てるべき冷却体とを一体構造とし、素子自体の発熱部であるシリコンウエハーにもっとも近い部分を直接絶縁性液体で冷却するようにしてある。また電流容量を大きくするためには、それだけ大きい直径のシリコンウエハーを使用せねばならないが、それにとまってシリコンウエハーにかかるストレスは大

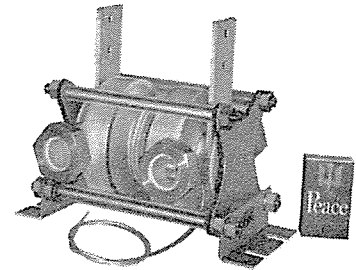


図 1 FT 800 A-80 形サイリスタ

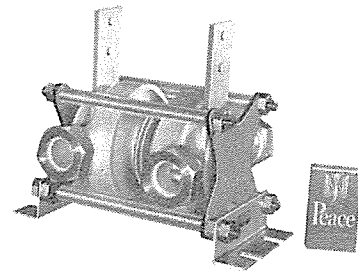


図 2 FD 1000 B-120 形シリコン 整流素子

きくなり、そのストレスを少なくするための設計はきわめて困難となる。今回開発された両素子はこの点従来の設計とまったく概念の異なる新手法を採用しており、(現在日本および欧米各国へ特許出願中) その困難を解決した。

[北伊丹製作所]

画期的な電着絶縁電線 (MEDIS 電線) の開発に成功

現在電着塗装は、自動車のボディ・電気器具などの塗装に利用され、脚光を浴びているが、この方法は金属のような導体表面に均一な保護皮膜を安価に作る有力な手段である。

今回当社が開発し、大日本電線・第一電工で発展確立した電着塗装絶縁電線製造法 MEDIS(Mitsubishi Electro Deposition Insulating System) は、電着塗装法の技術に基づき電線への応用面の難点を解決して、電線製造の高能率化を促進するものである。

電着塗装法が合成樹脂エナメル電線への応用で遅れたのは、電線の皮膜として必要な厚さが得られない、皮膜形成がおそい、皮膜の性能が絶縁物として要求される電気的・機械的特性を満足しないなど幾多の難問題があったため、MEDIS の開発により実用化に至ったものである。

(1) 基本的原理

(a)媒体中に分散させた合成樹脂微粒子に、特殊な処理を施して、均一な電着を可能にするプロセスと、(b)電気導体に電着析出した合成樹脂が焼付時に、き裂が発生することを防ぐための特殊なあと処理の二つに集約される。(日本、英、米、独、仏特許出願中)

(2) 一般的概要

現在わが国で生産されている電気機器用の合成樹脂エナメル電線は、年間約 10 万トンにも達しており、その大量生産方式は合理化しつくされたものとみられていたが、塗装焼付工程での発泡、皮膜の流れなどのために、一回の塗布による皮膜の厚さに制限があり、5～10 回の反復塗布焼付を必要とする宿命的欠点をのがれることができなかった。

今回開発した電着塗装絶縁電線製造法は、ただ一回の塗装焼付によって必要な厚さの絶縁皮膜を形成することが可能となった。したがってほぼ定形化した大量生産方式は大幅に革新されるであろう。

量産体制については、大日本電線・第一電工の両社で、現在の業界の最新鋭機の月産 100 トン (1 ヶリ径換算) とほぼ同一の大きさ、熱容量の設備で約 6 倍の量産が可能となる装置の青写真を検討している。

(3) 特長

- (a) 絶縁皮膜厚さを印加電圧の調節によって自由に変更でき、制御も容易である。
- (b) 一回の電着塗装で 150 ミクロン程度の絶縁層が得られる。
- (c) 平角・条などの導体にも偏肉のない均一な絶縁層が得られる。
- (d) 電気的塗装のためピンホールなどの欠陥がない。

(4) 仕様の一例

導体サイズ：	1.0 mm 径
絶縁皮膜厚さ：	0.05 mm
ピンホール：	なし
皮膜の偏肉：	なし
絶縁破壊電圧：	10,000 V 以上
絶縁皮膜の強度：	自動コイル巻機に適用可能

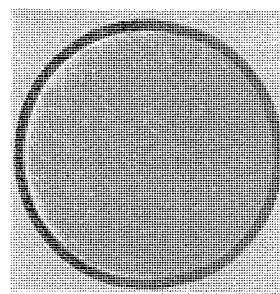


図 1 MEDIS 電線の均一皮膜 (断面)

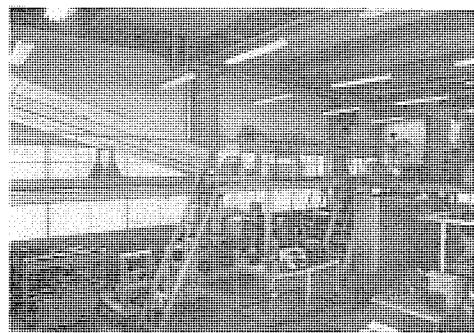


図 2 MEDIS のパイロット・プラント

アプセッタ用全自動バーエンドヒータ完成

かねてより製作中であった、全自動バーエンドヒータをこのほど完成し納入した。このバーエンドヒータは、ストレートまたはテーパ状の棒材の片側端を一定の長さ、所定の温度に加熱することを目的とした装置である。このヒータで加熱された棒材は、プレスに搬送されて所定の形状にアプセツトされる。

このヒータの大きな特長は、プレスとの全自動無人運転ができる点にある。すなわち棒材が積載されたパレットをフォークリフトマンが所定の位置にのせるだけで、あとは自動的に1本ずつ棒材が加熱鍛造され、この設備の導入によりラインの合理化に大きく貢献するものと期待が寄せられている。

この装置は、加熱機と素材自動供給取出装置および電源設備より構成されている。素材自動供給取出装置はパレット内の棒材を自動的に取出し、1本ずつ加熱機に搬送し供給する装置である。加熱機は供給された棒材を連続的に加熱し、1本ずつプレス側に送出する装置である。

おもな仕様は下記のとおりである。

- (1) 加熱機形名： EM-UC 3 形
- (2) 加熱機定格： 2.5 kHz 1,200 kW 1 台
- (3) 発電機容量： 2.5 kHz 400 kVA 3 台
- (4) 加熱材料： 炭素鋼の丸棒とテーパ棒
 - ： 直径 36φ~44φ
 - ： 長さ 530~970 mm
 - ： 加熱長さ 280~360 mm
- (5) 加熱温度： 1,200^{+50°C}_{-0°C}
- (6) 加熱処理量： 6 秒/本

[伊丹製作所]

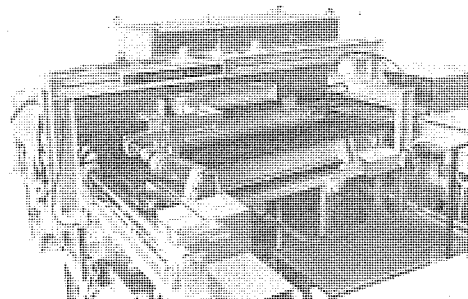


図 1 加熱機

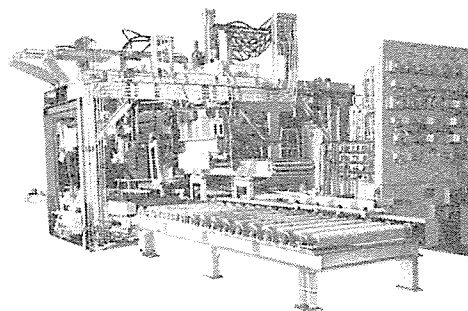


図 2 素材自動供給取出装置

世界最大容量の鹿島電解向けサイリスタ整流装置を受注

当社では、かねてより関係業界で注目されていた鹿島電解(株)向けソーダ電解用整流装置を、このほどサイリスタ方式で受注した。

このサイリスタ整流装置は、103,500 kW、230 V、450,000 A というあらゆる用途を通じて、わが国はもちろんのこと世界でも最大容量のサイリスタ整流装置であり、同時にソーダ電解用整流設備としても記録的なものである。

また、本機の電流容量 450,000 A も世界最大のものであり、大電流化の傾向をたどるソーダ電解工業においても画期的なものといえる。その概要はつぎのとおりである。

納入先： 鹿島電解株式会社本社工場

主な仕様： 容 量 103,500 kW

： 電 圧 230 V

： 電 流 450,000 A

： 使用素子 大電流平形サイリスタ

(従来の素子数に比較して 1/2~1/3 に減少し、信頼度・電流平衡などの特性が大幅に向上した)

完成時期： 昭和 44 年 12 月 (昭和 45 年春より運転開始)

備 考： 本機に使用する電解そうはイタリア・デノラ社より導入される予定

[伊丹製作所]

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) 100 (電) 東京 (03) 212局 6111番		
大阪営業所	大阪市北区梅田町8番地(西阪神ビル) (電) 530	(電)	大阪 (06) 312局 1231番
名古屋営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル) (電) 450	(電)	名古屋 (052) 561局 5311番
福岡営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル) (電) 810	(電)	福岡 (092) 75局 6231番
長崎出張所	長崎市丸尾町6番14号 (電) 852	(電)	長崎 (0958) 23局 6101番
札幌営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル) (電) 060-91	(電)	札幌 (0122) 26局 9111番
札幌工場	札幌市北2条東12丁目98番地 (電) 060	(電)	札幌 (0122) 23局 5544番
仙台営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル) (電) 980	(電)	仙台 (0222) 21局 1211番
富山営業所	富山市桜木町1番29号 (電) 930	(電)	富山 (0764) 31局 8211番
広島営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル) (電) 730	(電)	広島 (0822) 47局 5111番
岡山出張所	岡山市西長瀬字村北122番地の1(三菱電機岡山ビル) (電) 700	(電)	岡山 (0862) 24局 0331番
高松営業所	高松市鶴屋町5番地の1 (電) 760	(電)	高松 (0878) 51局 0001番
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) 100	(電)	東京 (03) 212局 6111番
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) 100	(電)	東京 (03) 212局 6111番
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) 112	(電)	東京 (03) 944局 6311番
城南家電営業所	東京都世田谷区池尻3丁目10番3号(三菱電機世田谷ビル) (電) 154	(電)	東京 (03) 411局 8181番
城西家電営業所	国分寺市南町2丁目16番14号(秀美ビル) (電) 185	(電)	国分寺 (0423) 22局 1881番
横浜家電営業所	横浜市中区富士見町3番地4 (電) 232	(電)	横浜 (045) 251局 2226番
大宮家電営業所	大宮市寿能町1丁目37番地(大宮公園ビル) (電) 330	(電)	大宮 (0486) 41局 5324番
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) 280	(電)	千葉 (0472) 42局 5485番
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1 (電) 530	(電)	大阪 (06) 344局 1231番
洲本出張所	洲本市上物部2丁目6番33号 (電) 656	(電)	洲本 (07992) 2局 0631番
名古屋商品営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル) (電) 450	(電)	名古屋 (052) 561局 5311番
静岡出張所	静岡市七間町9番地の10(池田ビル) (電) 420	(電)	静岡 (0542) 53局 9186番
福岡商品営業所	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル) (電) 810	(電)	福岡 (092) 75局 6231番
札幌商品営業所	札幌市北2条西4丁目1番地(北海道ビル) (電) 060-91	(電)	札幌 (0122) 26局 9111番
仙台商品営業所	仙台市大町4丁目175番地(新仙台ビル) (電) 980	(電)	仙台 (0222) 21局 1211番
富山商品営業所	富山市桜木町1番29号 (電) 930	(電)	富山 (0764) 31局 8211番
広島商品営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル) (電) 730	(電)	広島 (0822) 47局 5111番
岡山出張所	岡山市西長瀬字村北122番地の1(三菱電機岡山ビル) (電) 700	(電)	岡山 (0862) 24局 0331番
高松商品営業所	高松市鶴屋町5番地の1 (電) 760	(電)	高松 (0878) 51局 0001番
新潟営業所	新潟市東大通1丁目12番地(北陸ビル) (電) 950	(電)	新潟 (0252) 45局 2151番
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地 (電) 661	(電)	大阪 (06) 491局 8021番
商品研究所	鎌倉市大船2丁目14番40号 (電) 247	(電)	鎌倉 (0467) 46局 6111番
神戸製作所	神戸市兵庫区和田崎町3丁目10番地の1 (電) 652	(電)	神戸 (078) 67局 5041番
伊丹製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (電) 661	(電)	大阪 (06) 491局 8021番
三田工場	三田市三輪町父々部85番地 (電) 669-13	(電)	三田 (07956) 局 4371~5番
長崎製作所	長崎市丸尾町6番14号 (電) 850-91	(電)	長崎 (0958) 23局 6211番
稲沢製作所	稲沢市井之口町1100番地 (電) 492	(電)	稲沢 (0587) 32局 8111番
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地 (電) 640-91	(電)	和歌山 (0734) 23局 7231番
鎌倉製作所	鎌倉市上町屋325番地 (電) 247	(電)	鎌倉 (0467) 46局 1111番
通信機製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (電) 661	(電)	大阪 (06) 491局 8021番
北伊丹製作所	伊丹市大鹿字主ヶ池1番地 (電) 664	(電)	伊丹 (0727) 72局 5131番
熊本工場	熊本市竜田町弓削720番地 (電) 862	(電)	熊本 (0963) 62局 7211番
名古屋製作所	名古屋市中区矢田町18丁目1番地 (電) 461	(電)	名古屋 (052) 721局 2111番
福岡製作所	福岡市今宿青木690番地 (電) 819-01	(電)	福岡今宿 (09295) 6局 0431番
福山製作所	福山市緑町1番8号 (電) 720	(電)	福山 (0849) 21局 3211番
姫路製作所	姫路市千代田町840番地 (電) 670	(電)	姫路 (0792) 23局 1251番
相模製作所	相模原市宮下1丁目1番57号 (電) 229	(電)	相模原 (0427) 72局 5131番
世田谷工場	東京都世田谷区池尻3丁目1番15号 (電) 154	(電)	東京 (03) 414局 8111番
静岡製作所	静岡市小島110番地 (電) 420	(電)	静岡 (0542) 85局 1111番
中津川製作所	中津川市駒場町1番3号 (電) 508	(電)	中津川 (05736) 5局 2121番
大船製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号 (電) 247	(電)	鎌倉 (0467) 46局 6111番
郡山製作所	郡山市栄町2番25号 (電) 963	(電)	郡山 (02492) 2局 1220番
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地 (電) 370-04	(電)	太田 (0276) 22局 4311番
藤岡工場	藤岡市本郷字別所1173番地 (電) 375	(電)	藤岡 (02742) 2局 1185番
京都製作所	京都府乙訓郡長岡町大字馬場小字図所1番地 (電) 617	(電)	京都西山 (075) 921局 4111番
ラジオ工場	尼崎市南清水字中野80番地 (電) 661	(電)	大阪 (06) 491局 8021番

次 号 予 定

三菱電機技報 Vol. 43. No. 4.

発 電 機 特 集

《特集論文》

- 原子力用 4 極タービン発電機
- 最近の水車発電機
- ガスタービン発電機
- タービン発電機の励磁系
- 水冷却タービン発電機の基本設計
- 水冷却発電機の固定子コイルと絶縁ホース
- 水冷却発電機の水系統と運転
- 水冷却発電機における腐食
- 水冷却発電機モデルコイル長期総合試験

《普通論文》

- 東京大学物性研究所納め中性子散乱回析装置
- 長時間運転用 MHD 発電ダクトの実験的研究
- 愛知用水公団納め大入・振草両頭首工向けゲート集中管理制御装置
- 加速管(平板形)および Einzel 形収束 Lens 内における電位分布および荷電粒子軌道(I)
- 400 A, 2,500 V 平形高電圧大電力サイリスタ
- コアギレータ用レーザ装置

三 菱 電 機 技 報 編 集 委 員 会

委員長	小 倉 弘 毅	常任委員	鈴 木 正 材
副委員長	片 岡 高 示	"	祖 父 江 晴 秋
常任委員	明 石 精	"	山 田 栄 一
"	石 川 理 一	"	横 山 茂
"	上 田 重 夫	委 員	尾 畑 喜 行
"	宇 佐 美 重 夫	"	北 垣 成 一
"	大 野 寛 孝	"	南 日 達 郎
"	神 崎 遼	"	林 昇 寿
"	北 川 和 人	"	松 元 雄 蔵
"	小 堀 富 次 雄	"	和 田 義 勝

(以上 50 音順)

昭和 44 年 3 月 22 日印刷 昭和 44 年 3 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 12 番地
(郵便番号 162)

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 12 番地

高 橋 武 夫

発 行 所

東京都千代田区丸の内 2 丁目 12 番地(郵便番号 100)

三菱電機株式会社内 「三菱電機技報社」

(電) (03) 212 局 6111 番(内線 3118)

発 売 元

東京都千代田区神田錦町 3 の 1 (郵便番号 151)

株式会社 オーム社書店

(電) 03-291-0912 振替東京 10018