

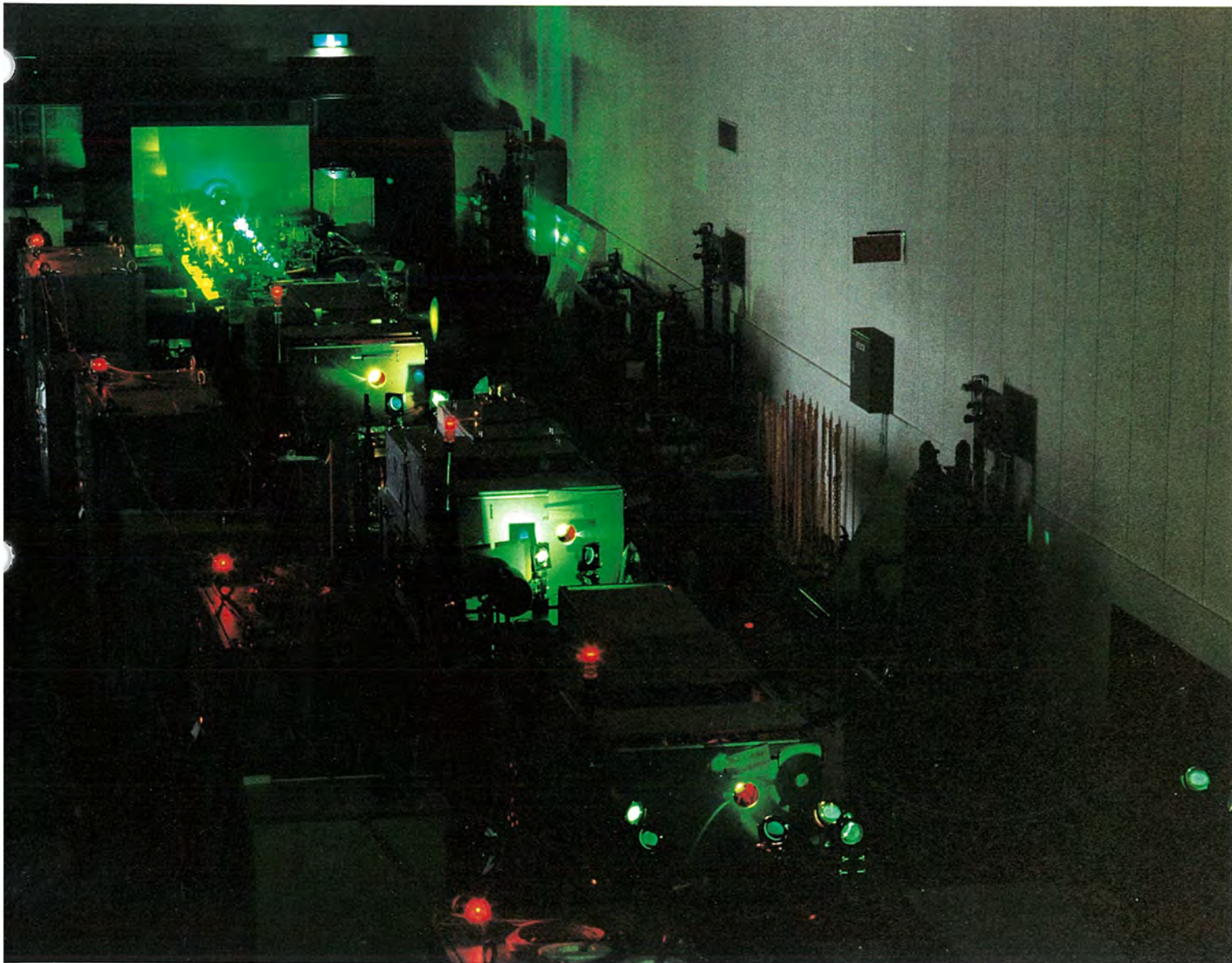
MITSUBISHI

三菱電機技報

MITSUBISHI DENKI GIHO Vol.63 No.4

4
1989

レーザー応用技術特集



訂正のお知らせ

63巻3号24ページ及び29ページの図の挿入に誤りがありました。
ここに謹んでお詫びし、次のとおり訂正いたします。

1. 「投写表示型グラフィックパネル」 24ページ 図10～図12

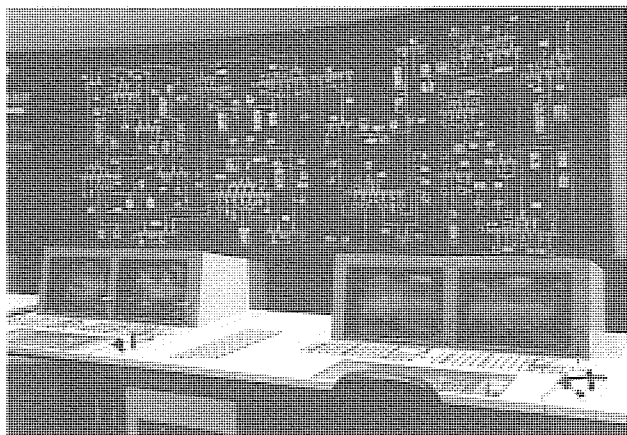


図10. 8面マルチ プロジェクション システム



図12. 3面マルチ プロジェクション システム

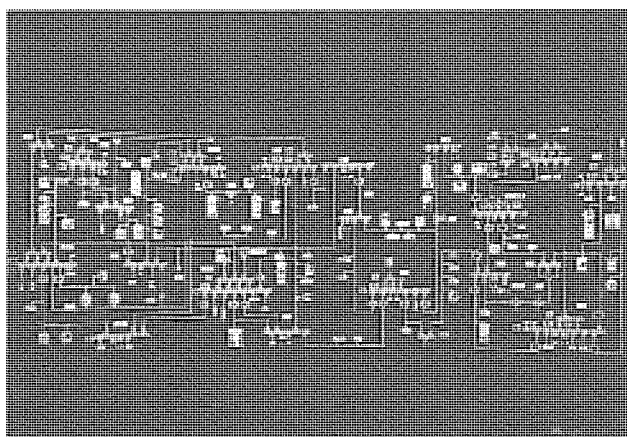


図11. 8面マルチ表示画面

2. 「タッチタブレット付き液晶ディスプレイ端末」 29ページ 図1

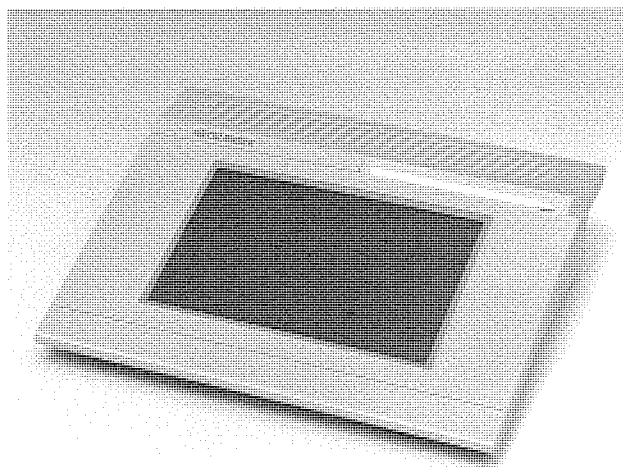


図1. フラットビジュアル ターミナルXT-1000の外観

レーザ応用技術特集

目次

特集論文

レーザ応用技術と我が国の立場.....	1
山中千代衛	
レーザ応用技術の現状と将来展望.....	2
伊藤利朗	
「超先端加工システム」とエキシマレーザ.....	5
吾妻健国・春田健雄・永井治彦・田畑則一	
露光ステッパ用エキシマレーザ.....	9
江浦 隆・中谷 元・坪井俊吾・若田仁志・永井治彦	
ウラン濃縮用銅蒸気レーザ.....	13
美濃和芳文・吉田寿夫・益田博之・殖業成夫・原 一彦	
炭酸ガスレーザの新応用.....	17
木谷 基・林 栄吉・金岡 優・森安雅治	
LD励起固体レーザとその応用.....	23
葛本昌樹・八木重典・池田健志	
レーザ応用測距装置.....	27
高嶋和夫・金田 一・植木勝也・穂積雄二	
レーザドップラ振動計.....	31
田代秀夫・小池敦美・矢部利郎・久間和生・田井修市	
レーザ応用きず検査.....	35
亀井光仁	
半導体レーザ応用光ディスク装置.....	39
渡辺勢夫・山田康一・中田正矩	
レーザ応用ニューロコンピュータ.....	43
太田 淳・小島啓介・久間和生	

普通論文

メタノール改質100kW級燃料電池発電システム.....	47
菅 伸之・加藤俊一・留井英明・水本洋一	
新1ループコントローラ《MACTUS 210シリーズ》.....	51
古屋健司・森 俊吾・森山達朗・平松伸一・島田隆志	
個人住宅用エレベーター.....	57
吉川 博・杉山美樹・水野公元・吉田研治・小林 一	
6.3~400Mbpsデジタル光通信装置.....	61
手島邦夫・飛田康夫・丹治秋人・谷本敏明・部谷文伸・水川繁光	
I-SMD-B形加入者線多重伝送装置.....	66
部谷文伸・関川一彦・谷本敏明・水川繁光	
火力発電所 中央制御室のトータルデザイン.....	69
田中宏毅・森川勝司・須山 勉・白石元勝	

特許と新案

半導体スタック、流量制御弁の制御装置.....	77
偏波切換器.....	78

スポットライト

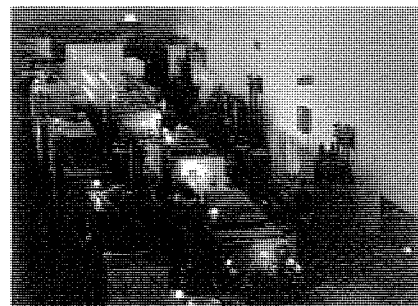
高精細静止画伝送システム“HRG-100”.....	75
クウェートMEW納め三相250MVAR, 275kV	
外鉄形ギャップ鉄心構造分路リアクトルの完成.....	76
総合デジタル計装制御システム《MELTAC-Cシリーズ》.....	(表3)

表紙

ウラン濃縮用銅蒸気レーザ

MOPAチェーン

鮮やかなグリーン銅蒸気レーザ光線が、写真の右下から、発振器、第1段・第2段・第3段の増幅器を通過するにつれて、その輝きを増している様子が分かります。最終段の出力は、約200Wです。写真の左上の黄色い光は、この銅蒸気レーザ光線によって励起された色素レーザ光線です。右下から、第1段・第2段・第3段・第4段と増幅をされ、最終段では約40Wの出力が得られています。左側には、赤いランプをともした4台の銅蒸気レーザ制御装置が、発振器と増幅器に対応して、整列しています。光ファイバケーブルにより、各制御装置は連結され、同期をとって運転されています。21世紀のエネルギーを産み出す光が、今ここに輝き始めました。



アブストラクト

レーザ応用技術の現状と将来展望

伊藤利朗

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P2～4

気体レーザ、固体レーザ、半導体レーザ、液体レーザについて、実用化の観点から、応用を含めた技術の現状と課題を述べた。さらに、現状技術の発展動向を踏まえ、レーザの基本的性質に基づいて大出力化と高効率化・高機能化・波長可変・短波長化の技術について将来動向を展望した。

LD励起固体レーザとその応用

葛本昌樹・八木重典・池田健志

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P23～26

固体レーザ励起に適した発振波長で、出力1Wの半導体レーザ(LD)を開発した。このLDを用いた端面励起型YAGレーザ装置でCW出力120mW(光変換効率29%)の出力を得た。さらに、軸外し励起方式、光学的透明材料によるレーザ媒質の冷却方式を開発し、側面励起方式でCW1W(効率12%)のレーザ出力を安定に得ることに成功した。本論では、今後更に広範な分野への展開が有望視されるLD励起固体レーザの応用についても概説した。

「超先端加工システム」とエキシマレーザ

吾妻健国・春田健雄・永井治彦・田畑則一

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P5～8

独自の沿面予備電離放電方式を用い、平均出力110WのXeClレーザを開発した。この技術を基盤として、通産省の大型プロジェクト「超先端加工システム」に参画し、材料の表層改質や薄膜加工用の平均出力2kW、発振効率4%の大出力高効率エキシマレーザの開発を進めている。この目標達成のために、上記放電方式に加え、低電力ガス循環、大出力用高効率放電励起、大容量スイッチング、大出力発振制御などの各要素技術を軸とした開発を行っている。

レーザ応用測距装置

高嶋和夫・金田 一・植木勝也・穂積雄二

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P27～30

レーザ光の持つ高指向性や集光性、単色性などの特長を利用した多くの測距装置が発表されている。当社においても各種産業分野向けに、三角測量方式と時間差方式に基づくレーザ測距装置数機種を開発し、実用化している。三角測量方式レーザ測距装置は、測定距離が数cmの汎用型と、1.5mの鉄鋼用とがあり各々高精度、高速化されている。時間差方式レーザ測距装置は、主に測量分野向けに開発されたもので100m～10kmの距離を±5mの精度で測れる。

露光ステッパ用エキシマレーザ

江浦 隆・中谷 元・坪井俊吾・若田仁志・永井治彦

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P9～12

16M～64MDRAM対応ステッパ用光源として、狭帯域KrFエキシマレーザを製作した。スペクトル幅3pm以下、波長の安定度±1pm以下、繰り返し周波数200ppsで平均出力3Wが得られる実用的なステッパ用エキシマレーザである。要素技術として、①沿面予備電離放電技術、②狭帯域化技術、③中心波長制御技術などを開発し、放電の安定化、ガスの長寿命化、狭帯域化、波長の安定化などを十分に図った。

レーザドップラ振動計

田代秀夫・小池敦美・矢部利郎・久間和生・田井修市

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P31～34

レーザ光のドップラ効果を利用して、振動を非接触測定するレーザドップラ振動計(LV-301)を製品化した。このレーザドップラ振動計は、半導体レーザを使用することでプローブの小型・軽量化を実現し、操作性に優れているため、非接触測定のメリットを十分発揮した高精度測定が可能である。本稿では、レーザドップラ振動計の測定原理と構成・特長・性能・適用例などについて概要を紹介する。

ウラン濃縮用銅蒸気レーザ

美濃和芳文・吉田寿夫・益田博之・殖栗成夫・原 一彦

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P13～16

原子レーザ法ウラン濃縮用色素レーザの励起源として、大出力銅蒸気レーザを開発した。高出力及び高指向性を兼ね備えるために、発振器と増幅器とから成るMOPA(Master Oscillator Power Amplifier)チェーンシステムの構成とした。銅蒸気レーザ管の熱特性、電気特性並びにMOPAシステムの増幅、指向性などを明らかにした。現在までに、単機117W効率1.51%、MOPAチェーン292Wの出力が得られている。

レーザ応用きず検査

亀井光仁

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P35～38

レーザを利用した表面きず検査の動作原理と、各種表面検査への適用例について述べる。この技術には二つの特長がある。一つは回折現象によって高い分解能を実現したこと。もう一つは、オプティカルファイバを利用して、各種の表面検査に柔軟に対応できるようにしたことである。これまでの適用例においても、シート材、線材、棒材、ねじ等の各種表面きず検査が実現しており、今後の工場のFA化推進のキーテクノロジーとなることが期待される。

炭酸ガスレーザの新応用

木谷 基・林 栄吉・金岡 優・森安雅治

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P17～22

炭酸ガスレーザ加工機は切断・溶接・熱処理に広く応用されているが、本稿では一般的な応用例以外で加工性能の向上に貢献した最新の技術と応用例について紹介する。切断・穴あけ加工ではアシストガスにエアを用いた金属切断、セラミックス切断、紙への微細高速穴あけの応用例について示し、溶接ではビームスキャナを応用したレーザ溶接について記述する。

半導体レーザ応用光ディスク装置

渡辺勢夫・山田康一・中田正矩

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P39～42

光ディスク装置の実用化に半導体レーザの果たした役割は大きい。ここでは、波長780nmの半導体レーザを使った光磁気ディスク用光ヘッドで130mmの追記型光ディスクと書換型光ディスクの特性を評価した。これらのディスクの分解能とジッタ特性は、ISO規格のフォーマットで300Mバイト/片面の記憶容量を確保できる能力を持っていることを示した。今後の半導体レーザへの期待についても述べた。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 23 ~ 26 (1989)

An LD-Pumped Solid-State Laser and Its Applications

by Masaki Kuzumoto, Shigenori Yagi & Kenji Ikeda

This 1W power semiconductor laser (LD) has an oscillation wavelength suitable for the excitation of a solid-state laser. End-pumped YAG laser equipment incorporating this LD can provide a CW output of 120mW (equivalent to an optical conversion efficiency of 29%). Also, off-centered side-pumped equipment using multiple LDs and with cooling by an optically transparent material provides a stable output power of CW 1W (equivalent to an optical conversion efficiency of 12%). The article also discusses the application of LD-pumped solid-state lasers, considered most promising for a wide range of applications.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 2 ~ 4 (1989)

The Present Status and Future Trends of Laser-Application Technologies

by Toshio Ito

The article discusses the present status of laser technology, including practical applications of gas, solid, semiconductor, and liquid lasers. Probable future development trends are considered by highlighting, on the basis of the fundamental properties of lasers, the growth potential of these technologies to upgrade laser output, efficiency, performance, and wavelength variability as well as to achieve lasers emitting at shorter wavelengths.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 27 ~ 30 (1989)

Distance-Measurement Systems Using Laser Light

by Kazuo Takashima, Hajime Kanada, Katsuya Ueki & Yuji Hozumi

These systems, based on triangulation and time-of-flight methods, are available for various industrial fields. Both versions are distinguished by high accuracy and a fast speed of measurement. Triangulation-method laser distance meters are available as universal systems for a measurement range of a few centimeters and for recording within a range of 1.5m. In contrast, laser distance-meters using the time-of-flight method are more specialized devices for surveying with an accuracy of ± 5 m for a measurement range of 100m~10km.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 5 ~ 8 (1989)

Applications of an Excimer Laser in an Advanced Material-Processing and Machine-Technology Research Project

by Kenkoku Azuma, Kenyu Haruta, Haruhiko Nagai & Norikazu Tabata

This laser features an average output of 110W and uses an original surface-corona-discharge preionization method. Using this technology, the Corporation is participating in MITI's Advanced Material-Processing and Machining Technology Research Project for the development of a high-output, high-efficiency excimer laser with a 4% generating efficiency. Development is concentrated on the above discharge system as well as the essential technologies for achieving low-power gas circulation, highly efficient discharge excitation for high output, high-capacity switching, and high-output oscillation.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 31 ~ 34 (1989)

A Laser Doppler Vibrometer

by Hideo Tashiro, Atsumi Koike, Toshiro Yabe, Kazuo Kyuma & Shuichi Tai

The LV0301 laser Doppler vibrometer, using the Doppler effect of laser light, has been developed for contactless vibration measurement. The use of a semiconductor laser makes this high-accuracy vibrometer very compact and lightweight and permits remote, contact-free measurement for superior ease of operation. The article outlines the principle of vibration measurement with laser Doppler vibrometers, and introduces the new vibrometer's configuration, features, performance, and possible applications.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 9 ~ 12 (1989)

A Narrow-Bandwidth KrF Excimer Laser for Stepper Lithography

by Takashi Eura, Hajime Nakatani, Shungo Tsuboi, Hitoshi Wakata & Haruhiko Nagai

This laser serves as a light-emission source for stepper lithography of 16~64M DRAMs. With a maximum bandwidth of 3pm, a wavelength stability better than ± 1 pm, a repetition rate of approximately 200pps, and an average power output of 3W, the laser is suited to practical stepper applications. The development of technologies for surface-corona-discharge preionization, bandwidth narrowing, and wavelength stabilization successfully stabilized the discharge, achieved a longer gas life, narrowed the bandwidth, and achieved a stable lasing wavelength.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 35 ~ 38 (1989)

Surface-Flaw Inspection Using a Laser

by Mitsuhiro Kamei

The article presents the principle of surface-flaw inspection using a laser and the applications of this method. This technique has two major advantages: high resolution, allowing the detection of fine flaws by laser light diffraction, and superior flexibility, achieved by the use of optical fibers, for any type of surface inspection. The method has proved practicable in the detection of surface defects on a variety of materials including sheets, wires, rods, and screw threads. Laser flaw detection is highly promising as a key technology to meet advancements in factory automation.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 13 ~ 16 (1989)

The Development of a Copper-Vapor Laser for Atomic-Vapor Laser Isotope Separation

by Yoshihumi Minowa, Hisao Yoshida, Hiroshi Masuda, Shigeo Ueguri & Kazuhiko Hara

This high-power copper-vapor laser is applied as a dye-laser excitation source for atomic vapor laser isotope separation. To combine a high power with a high directivity, a MOPA (master oscillator power amplifier) chain-system configuration was chosen. The thermal and electrical characteristics of copper-vapor lasers and the amplification and directivity of the MOPA system have been established. So far it has been possible to achieve a 117W output with an efficiency of 1.51% from a single unit and a 292W output from the MOPA chain.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 39 ~ 42 (1989)

Optical-Disk Drives Using Laser Diodes

by Isao Watanabe, Koichi Yamada & Masanori Nakada

Laser diodes have made a significant contribution to the practical application of optical-disk systems. The signal characteristics of a 130mm write-once optical disk and a rewritable disk were tested with an optical head designed to read a magneto-optical disk and using a 780nm laser diode. Performance tests in terms of resolution and jitter have demonstrated that this type of disk has a single-side storage capacity of 300MB on the basis of an ISO signal format. This makes laser diodes a very promising technology for the future.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 17 ~ 22 (1989)

CO₂-Laser Applications

by Motoe Kitani, Eikichi Hayashi, Masaru Kanaoka & Masaharu Moriyasu

The article presents the latest developments that have contributed to enhanced laser machining performance by introducing some practical application examples. These examples include cutting and perforating machining, such as the cutting of metals by using air in the assist gas, ceramics cutting, and the perforating of paper to produce minute holes at high speed. The article also discusses welding applications in which a beam scanner is used.

アブストラクト

レーザ応用ニューロコンピュータ

太田 淳・小島啓介・久間和生

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P43～46

知的情報処理を目指したニューラルネットワークモデルを、空間並列性を有するレーザ等の光技術を用いてハードウェア化した光ニューロコンピュータについて述べる。まず、ニューラルネットワークモデルについてまとめ、次に、キーデバイスである面発光レーザ等の要素技術について述べ、最後に、試作した光ニューロコンピュータについて、その基本構成、連想特性について述べる。

6.3～400Mbpsディジタル光通信装置

手島邦夫・飛田康夫・丹治秋人・谷本敏明・部谷文伸・水川繁光

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P61～65

近年、通信網のディジタル統合化が進展し、通信需要も増大している。このディジタルネットワークの中継伝送系を構成するディジタル光通信装置についても大容量化と併せて、小型化・経済化が求められている。今回、最新の光伝送回路技術、高速LSI技術により大幅な小型・低消費電力化を図った6.3Mbpsから400Mbpsまでのディジタル光通信装置新シリーズを製品化したので、その概要について報告する。

メタノール改質100kW級燃料電池発電システム

菅 伸之・加藤俊一・留井英明・水本洋一

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P47～50

北海道電力㈱と三菱電機㈱は、共同研究により電気事業用のリン酸型燃料電池発電システムの開発を行っている。

メタノール改質100kW級リン酸型燃料電池発電試験設備を1987年9月に伊達発電所に建設し、通商産業省の完成検査に合格した。運転試験と性能評価を11月上旬から開始して、1988年10月末で発電時間は1,800時間を越えており、性能目標値を達成している。この運転研究は、1989年3月まで継続の予定である。

I-SMD-B形加入者線多重伝送装置

部谷文伸・関川一彦・谷本敏明・水川繁光

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P66～68

日本電信電話㈱の御指導のもとにI-SMD-B形加入者線多重伝送装置を開発した。この装置は、INSネット64 (ISDN基本インタフェース) のサービス提供地域を経済的かつ早期に拡大するためのもので、既に実用に供されている。

本稿では、方式概要、装置構成、実装技術及び部品について紹介する。

新1ループコントローラ《MACTUS 210シリーズ》

古屋鍵司・森 俊吾・森山達朗・平松伸一・島田隆志

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P51～56

最新技術を駆使し、新たに1ループコントローラ《MACTUS 210シリーズ》を開発した。

高性能・高機能・多機能化とともに小型・軽量化を実現し、また操作性・保守性なども飛躍的な改善を果たした。

本稿では、開発に際しての基本方針、《MACTUS 210シリーズ》の特長・機能及び採用した新技術について述べる。さらに、小規模システム構成についても言及する。

火力発電所 中央制御室のトータルデザイン

田中宏毅・森川勝司・須山 勉・白石元勝

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P69～74

最新鋭大容量の火力発電所向け制御システムでは、マンマシンインタフェースを人間と機械との関係に限定せず、人間・装置・作業空間の関係に拡大して心理的欲求をも満足させる高度な技術が必要となってきた。関西電力㈱と三菱電機㈱との共同研究により、インダストリアルデザイン、人間工学、空間デザインなどを総合的に適用調和させ、作業空間の機能性と情緒性を向上させる技術が開発できたので、その研究結果の概要を紹介する。

個人住宅用エレベーター

吉川 博・杉山美樹・水野公元・吉田研治・小林 一

三菱電機技報 Vol.63・No.4・P57～60

当社は、昭和62年7月に個人住宅用エレベーターの第一号機を住宅展示場に納入した。その後の需要の多様化にこたえ、今回システム全般を改良し、デザインも一新した新しい個人住宅用エレベーターを開発した。このエレベーターは、豊富な種類を用意して多様な住宅との整合性を向上させ、インバータ制御により滑らかな乗り心地と正確な着床を実現した。さらに、住宅内への配置を容易にするなど、個人住宅への適合性をより一層高めた。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 61 ~ 65 (1989)

6.3~400Mbps Optical-Fiber Communication-Equipment Series

by Kunio Teshima, Yasuo Tobita, Akihito Tanji, Toshiaki Tanimoto, Fuminobu Hidani, & Shigemitsu Mizukawa

The communication-network field has seen the progressive introduction of digital technology and increased demand for telecommunication facilities. There is also great demand for equipment with a digital-network transmission configuration offering high capacity, great compactness, and reasonable cost. This digital optical-fiber communication-equipment series, with a capacity range from 6.3~400Mbps, is designed for outstanding compactness and low power consumption through the use of state-of-the-art optical transmission circuitry and high-speed LSI technology.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 43 ~ 46 (1989)

An Optical Neurocomputer

by Jun Ota, Keisuke Kojima & Kazuo Kyuma

The article describes an optical neurocomputer and the development of a hardware system incorporating a neural-network model. This was achieved by using optical technology, including optics with space parallelism properties, to realize a neurocomputer capable of performing intelligent data-processing tasks. After summarizing the basics of a neural-network model, the article details the relevant technologies employed, including the surface-light-emitting laser, which is the key device in the future system. A description of the prototype neurocomputer and its basic configuration and associative capabilities are also given.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 66 ~ 68 (1989)

I-SMD-B Subscriber Line Multiplexing and Transmission Equipment

by Fuminobu Hidani, Kazuhiko Sekikawa, Toshiaki Tanimoto & Shigemitsu Mizukawa

Under the direction of the Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT), Mitsubishi Electric has developed an I-SMD-B subscriber line multiplex transmission system. This system is already being supplied to permit the early and economically acceptable extension of the INS-Net 64 (ISDN Basic Interface) service area.

The article gives an outline of the system, its configuration, mounting technology, and component parts.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 47 ~ 50 (1989)

A 100kW Methanol Reformed Fuel Cell Power Plant

by Suga Nobuyuki Shun'ichi Kato, Hideaki Tomei & Yoichi Mizumoto

Hokkaido Electric Power Co. and Mitsubishi Electric are engaged in the joint development of a phosphoric acid fuel cell (PAFC) power plant for use by electric utilities.

A 100kW methanol reformed PAFC pilot plant was constructed at the Date Thermal Power Plant in September 1987. After MITI inspection, trial operation and plant evaluation commenced in November 1987. Operating time as of October 1988 was 1,800 hours and the design objectives were achieved. The test run of the pilot plant is scheduled to continue until March 1989.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 69 ~ 74 (1989)

A Total Design Approach for Control Rooms of Modern Thermal-Power Plants

by Hiroki Tanaka, Katsuji Morikawa, Tsutomu Suyama & Motokatsu Shiraishi

State-of-the-art control systems for modern high-capacity thermal-power plants require sophisticated technology to meet psychological requirements. These presuppose an expanded relationship between the human operator, the machine, and the operating space rather than only a man-machine relationship.

The Kansai Electric Power Co. and Mitsubishi Electric are jointly working to improve the functional and psychological aspects of the operating environment by creating an overall harmony between all factors, such as the industrial design, human engineering, and space design. The article presents the results obtained from this study.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 51 ~ 56 (1989)

New MACTUS 210 Series Single-Loop Controllers

by Kenji Furuya, Shungo Mori, Tatsuro Moriyama, Shin'ichi Hiramatsu & Takashi Shimada

These controllers have been developed with the use of state-of-the-art technology. Greatly improved performance and more and better functions have been achieved along with increased compactness, lighter weight, and improved operability and maintenance.

The article outlines the development of the new MACTUS 210 Series and its features with a brief discussion of the functions available and the new technologies used. It closes with a description of a small-scale system configuration.

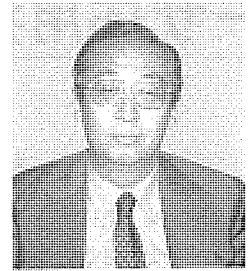
Mitsubishi Denki Giho: Vol. 63, No. 4, pp. 57 ~ 60 (1989)

Elevators for Private Residences

by Hiroshi Yoshikawa, Yoshiki Sugiyama, Masamoto Mizuno, Kenji Yoshida & Hajime Kobayashi

Mitsubishi Electric supplied its first private-residence elevator to the Homes Exhibition in July 1987. This was followed by general system improvement and design revision to develop private-residence elevators meeting the wide diversity of user demand. These elevators are available in a broad model range for a better match of the elevator with the residence. For superior riding comfort, an inverter control system achieves accurate level-with-floor landing. Care has also been taken to facilitate elevator installation and improve its compatibility with a private residence.

レーザー応用技術と我が国の立場



レーザー技術総合研究所
所長 山中 千代衛

1960年にメイマンが発振させたルビーレーザーは米国科学技術の先進性を示す輝きであり、パックスアメリカナの象徴そのものであった。1987年になって彼は日本賞の榮譽を受けたのであるが、何か時代の変遷を感じさせるものがある。

そもそも量子効果というものは我々の五感の外にあって、直接感知できるものではない。しかるにレーザーによれば原子分子内のミクロの現象が集約的に発現し、マクロの世界にのさばり出て、我々の知覚に訴えるのである。このような現象は実にレーザーと超電導しかない。これこそレーザーが今世紀最大にして、最後の発明といわれる所以である。レーザーの光は元来がコヒーレントであり、単色性に優れ、平行性が良く、集中性は抜群であって、従来の光では到底実現不可能な極限現象を容易に引き起すのである。

波長1ミクロン、出力1テラ（兆）ワットのレーザーを一点に集光すると、焦点のパワー密度は1億兆ワット/cm²、電界は3兆ボルト/cm、磁界は100億エルステッドに達する。これは原子内の極微の世界で電子が受ける電界の100倍にあたる。そこではもはや中性の原子は存在できない。また、レーザーの発生する極短パルスはサブピコ秒（1兆分の1秒以下）からフェムト秒（千兆分の1秒）へと縮小してきた。光速は3億メートル/秒であるから、フェムト秒の光パルスの長さは0.3ミクロンとなり1波長を切ってしまう。波長以下の光子が果たして存在するのであろうか。これらのトピックスはレーザーがいかに極限状態と密接に関連しているかを如実に示している。したがって、レーザーを駆使すれば途方もないことができそうである。

筆者がこんな夢にとりつかれ、三菱電機にレーザーの共同研究を提案したのは、今を去る20年の昔、米国に対抗して大出力ガラスレーザーの開発を考えたのである。関係者の御盡力により我が国最初の大出力ガラスレーザー激光Ⅰ号、出力50ギガ（500億）ワットが1970年に実現した。その後営々とした努力が続き、1983年には激光Ⅱ号レーザーが完成し、出力は40テラ（兆）ワットに達し、世界第一級の性能を達成している。このようなレーザー建設にはレーザー光学機材にまつわる多くの周辺技術の確立が要請される。そのため、研究実施による技術波及効果は極めて大きいのである。今日のレーザー応用技術は科学研究用レーザーの領域からその外側に大きな展開を見せており、今後両者は互いに関連しつづまます発展するものと思われる。

ところで先端技術開発力であるが、先年フォーチュン誌が論評した記事によると、総合力においては米国を10点とすると日本が4.3点、ヨーロッパが2.1点であるという。種目別の採点では電子計算機において米国10点、日本7点、ヨーロッパ4点。バイオテクノロジーでは米国9点、日本6点、ヨーロッパ5点。新素材では米国8点、日本6点、ヨーロッパ6点。驚いたことに、オプトエレクトロニクスでは日本10点、米国8点、ヨーロッパ6点という。フォーチュン誌はもとより経済誌ゆえ、市場効果が採点の基準であり、純粹の科学技術評価とは言い難いが、それにしても大変面白い内容である。我が国の技術開発もキャッチアップ型から先行型に変化しつつある。これこそ21世紀において我々が果たすべき大きな夢であらう。電子の時代から光子の時代へ大きな曲り角にさしかかったのである。

レーザ応用技術の現状と将来展望

伊藤利朗*

1. ま え が き

1960年のメイマン (T.H.Maiman) によるルビーレーザの発振成功以来、数千と言われるレーザ発振線が発見されているが、He-Ne, Ar, CO₂, YAG, 半導体など今日実用化されている有力なレーザは1964年までに発振が実現されている。その後もダイ (色素) レーザ, エキシマレーザ, 半導体レーザの室温連続発振など急速な技術の発展と広がりを見せたが、並行して様々な応用技術の開発が試みられ、実用化が進んだ。現在レーザの応用はあらゆる産業分野に及ぶが、主な応用は計測・加工・通信・光情報処理の分野である。

レーザ光の特長は、単色性・指向性・干渉性にある。上述した応用の大半は指向性に基づいたエネルギー利用に限られており、レーザの持つ特質をまだ十分に生かしきっていないと言える。しかし、最近、銅蒸気レーザ励起ダイレーザによるウラン濃縮やエキシマレーザによる光化学加工、あるいはコヒーレント光通信にみられるように、エネルギーのみならず単色性や干渉性を利用する応用へとすそ (裾) 野を広げつつある。

2. 技術の現状と課題

レーザは媒体の種類により、気体レーザ、固体レーザ、半導体レーザ及び液体レーザに大別される。気体レーザにはHe-Ne, Ar, Kr, He-Cd, CO₂, エキシマ, 銅蒸気, N₂など多数あり、特に、CO₂はレーザの中で最も高効率・大出力のレーザである。固体レーザにはYAG, ルビー, ガラスなどがあるが、最近新しい結晶のレーザが開発されており、新世代の固体レーザの開発が進んでいる。半導体レーザは、赤外域の通信用レーザと可視域の光情報処理用レーザとに大別される。液体レーザの代表はダイレーザである。

これらのレーザのうち、現在実用化されている主なレーザとその用途を表1に示す。波長は、紫外域の0.19 μ mから遠赤外域の10.6

μ mに及ぶ。これらの波長は固定であるが、ダイレーザでは0.2~1.0 μ mの範囲で、連続的に波長を変えることができる。以下に実用化されているそれぞれのレーザ技術の特徴や現状、課題などについて述べる。

2.1 気体レーザ

気体レーザは、CO₂やエキシマのような分子レーザ、He-Neや銅蒸気のような中性原子レーザ、Ar⁺やHe-Cd⁺のようなイオンレーザに分けられる。

CO₂レーザは、波長10.6 μ mの遠赤外線レーザであり、発振効率が10~20%とレーザとしては際立って高く、大出力であることが特徴である。このため、連続発振出力0.5~5 kW級を中心に切断・穴あけ・溶接・表面処理などの熱加工用に幅広く実用化されている。熱加工にとって重要なことは、加工対象物への入熱の調整である。これはレーザ出力をパルス化し、そのピーク値やデューティなどのパラメータを制御する方法により行われている。このような制御が、熱影響層の小さい高品質切断や溶接には特に重要である。レーザ出力のパルス化は、放電を点滅させる方法により行われているが、加工用CO₂レーザではピーク出力10kW級まで実用化されている。また、マーカなどの蒸発除去加工用に実用化されているTEA (Transversely Excited Atmospheric Pressure) CO₂レーザではMW級のピーク出力が得られている。

加工用CO₂レーザの課題は、連続発振出力10~20kW級の大出力ビームの応用開発である。現在、鉄鋼ラインの溶接用として10kW出力の加工機が実用化されており、実用レベルでは最大出力のものである。しかし、通産省の大型プロジェクト「超高性能レーザ応用複合生産システム」では、連続発振の最大出力26.5kWの装置が開発されており、応用技術の基礎研究も行われた。このような大出力の応用としては、厚板の溶接や表面焼入れのほかに、クラッディング (肉盛り) や合金化のような付加価値の高い、新しい表面処理技術の開発が期待される。

もう一つの分子レーザはエキシマレーザである。上述したCO₂レーザとは対称的に、実用化されているレーザのなかでは最短の波長を持つ紫外線のレーザである。エキシマ (Excimer) とはExcited Dimer, つまり励起された2量子体を意味し、励起状態のみ形成される分子である。Ar, Kr, Xeなどの不活性ガスは放電により励起されて活性化し、ハロゲンガスと反応してArF, KrF, XeClなどの化合物を形成する。エキシマレーザは、これらの分子の発光を利用した高せん (尖) 頭値のパルスレーザである。波長の短いエキシマレーザ光は、その高い光子エネルギーにより分子結合を分解させたり、原子・分子の励起や電離を起こすことができる。

この特性を利用して、原子や分子の反応を制御することができ、エキシマレーザCVDによる薄膜の形成やエッチング、ドーピングなどの研究が活発に行われている。このように、エキシマレーザによる応用は光化学反応を利用したものであり、CO₂レーザによる熱加工とは本質的に異なり、化学加工と言われるゆえん (所以) でもあ

表1. 実用的各種レーザの特性と用途

媒体	レーザ	波長 (μ m)	用途	備考
気体	CO ₂	10.6	物理加工, PVD	実用的効率が最高
	He-Ne	0.63	計測, ジャイロ	波長/出力の安定性良好
	エキシマ	0.19~0.31	CVD, エッチング, リソグラフィ	波長が最短
	Ar ⁺	0.46~0.52	分析, 眼科用	低効率
	He-Cd	0.33~0.64	回折格子の製作	低効率
	銅蒸気	0.52/0.57	ウラン濃縮	可視光では最高効率
結晶	YAG	1.06	物理加工, 分析	成分はY ₂₋₉₂ Nd ₀₋₀₃ Al ₃ O ₁₂
半導体	InP系	1.3~1.5	通信	
	GaAs系	0.7~0.9	光ピックアップ, プリンタなど	
液体	ダイ	可変	分析, 化学加工	波長可変範囲は0.2~1.0

注 (1) 分析はダイレーザとAr⁺/YAG (SHG) /エキシマとの結合の場合が多い

(2) 物理加工とは切断/穴あけ/溶接/表面処理をいい、高せん (尖) 頭値パルス利用が主流

る。最近話題の16Mビットメモリを対象としたKrFエキシマレーザ(波長248.4nm)リソグラフィーもその応用の一つである。エキシマレーザ露光では狭スペクトル化された、短波長のエキシマレーザを光源として用いるため、色収差の補正が不要なレンズ系で、解像度の高い微細パターンの形成が可能になる。

エキシマレーザは現在開発中のレーザであり、技術課題は多い。最も緊急な課題は寿命や信頼性である。特に、腐蝕性の強いハロゲンガスを使用しているので、安定な出力を維持できるガスの長寿命化はエキシマレーザの本格的な普及に欠かせない。さらに、大出力化、高繰り返し化、スペクトルの狭帯域化などの技術課題がある。通産省の大型プロジェクト「超先端加工システム」は、昭和61年度に発足したが、これらの課題はこのプロジェクトでも取り上げられている。

He-Neレーザは、1960年の末にルビーに続く第2番目のレーザとして誕生した。連続発振出力で0.1~50mWの小出力レーザであるが、単色性・指向性・干渉性などのビーム品質に最も優れたレーザである。この特性を利用して、長さ・速度・流速などの各種の計測あるいは位置決めや検査などに幅広く利用されている。He-Neレーザの寿命は1万時間以上もあり、技術的には確立されたレーザである。最近、緑色発振のHe-Neレーザが製品化され、注目されている。

イオンレーザでは、 Ar^+ 、 He-Cd^+ が実用化されている。イオンレーザは、He-Neレーザと同様にビーム品質に優れたレーザであり、その特性を利用して、分析や計測あるいはホログラフィー用光源など科学研究用に使われることが多い。また、 Ar^+ レーザは眼科治療にも使われている。

Ar^+ レーザは、銅蒸気レーザの出現以前には緑色光の唯一の大出力レーザとして多用されていた。 Ar^+ レーザの励起には大電流のアーカ放電を利用せねばならず、これによるヒートサイクルの繰り返しを受けて起こるレーザ管の破壊が短寿命の原因である。特に、数W級の大出力機の信頼性が乏しい。

He-Cd $^+$ レーザは金属蒸気レーザでもあるが、波長0.4416 μm の青色光のレーザ光で、出力数十mWから100mW級の連続発振のレーザである。また、連続発振のレーザとしては最短の波長0.3250 μm の紫外線も発生できる。

このようなイオンレーザの欠点は、イオンを効率良く形成させることが難しいため、発振効率が極めて低く、寿命や信頼性に問題を抱えていることである。

銅蒸気レーザは銅の蒸気中で放電励起し、レーザ発振を起こさせる中性原子レーザである。低効率の Ar^+ レーザに代わる可視域の高効率レーザとして期待されている。最近、原子法ウラン濃縮用ダイレーザの励起源として、大出力化の研究が精力的に進められているレーザである。銅蒸気レーザは、1,500°C程度の高温で金属銅を蒸気に変え、レーザ発振を起こさせるが、その間の待ち時間が長く、実用上の最大の課題である。また、レーザ管の寿命や出力の安定性にも改善が必要であり、今後の発展が期待される。

2.2 固体レーザ

YAG結晶を媒体としたYAGレーザは固体レーザの代表である。初期のころはルビーレーザが穴あけなどの用途に利用されていたが、効率が低く、室温で連続発振ができないため、現在は産業用には使われていない。また、ガラスレーザは核融合実験などに使われているが、熱伝導率が低く、高繰り返し発振ができないため、産業用と

して実用化には至っていない。

YAGレーザの特徴は、Qスイッチングによる出力の制御性にある。この特性を利用した半導体や電子部品の微細加工が、YAGレーザの主たる用途である。具体的にはICのトリミングやフォトマスクの修正、あるいは各種電子部品のシール溶接やスポット溶接、はんだ付けなどが挙げられる。このような物理加工に加えて、最近では光化学反応を利用した加工も行われている。マスクリペアの白欠陥の修正がその一例であるが、これはYAGレーザの高調波を発生して得られる可視あるいは紫外光を用い、CVD (Chemical Vapor Deposition)法により欠如した配線を修復するものである。また、YAGの高調波は各種の分析や計測にも使われている。

YAGレーザの技術課題は、高品質ビームの大出力化である。YAGレーザの出力はkW級にも及ぶが、発散角が大きく、集束性が悪い。集束性の良いシングルモード(TEM₀₀モード)では、高々15W程度しか得られない。これはYAGロッドが熱ひずみを起こすためである。このような課題に対して、GGG(ガドリニウム・ガリウム・ガーネット)のような板状結晶を媒体として利用したスラブレーザの研究が世界的に行われている。また、半導体レーザ励起YAGレーザは、小型化とともに発振効率の向上にも有効であり、ロッドの熱ひずみが軽減され、ビーム品質の向上が期待される。

2.3 半導体レーザ

半導体レーザは、GaAsなどの結晶化した半導体を媒体として用い、広がりのある伝導帯と価電子帯のエネルギー帯の間での電子遷移を利用している。このため、結晶の組成を変えればバンドギャップエネルギーが変わり、発振波長を変えることができる。

半導体レーザは、赤外域の波長1.3~1.5 μm のInP系と可視域の波長0.7~0.9 μm のGaAs系とに分けられる。InP系は、石英系光ファイバを伝送路とする長距離通信用の光源として使われている。GaAs系はデジタルオーディオディスク、ビデオディスク、光ディスクメモリ、レーザプリンタなどの光情報処理用光源あるいは各種の計測用光源などに幅広く使用されている。

半導体レーザの特長は、他のレーザに比べて超小型・高効率なことであり、電流により出力の高速変調が直接できることもメリットである。

半導体レーザの欠点は、大きな発散角とその非対称性であり、短波長化と大出力化が技術課題である。現在赤色光まで短波長化が進んでいるが、情報処理用としては緑色の半導体レーザが期待されている。また、固体レーザの励起用として、W級の大出力半導体レーザの開発が待たれる。

2.4 液体レーザ

液体レーザの中で実用性の高いレーザは、色素すなわちダイレーザだけである。ダイレーザは波長可変レーザの代表と言ってもよく、分光分析の光源として重要である。レーザ発振が確認された色素の数は600種にものぼるが、ダイレーザの特長はこれらの色素を順次選定することにより、広い波長域での発振が可能なことである。また、共振器内に回折格子などの波長選択素子を入れる方法により、スペクトルの狭帯域化と同調を行うことができる。ダイレーザ励起には、フラッシュランプや他の固定波長レーザ、すなわちエキシマレーザやYAGレーザの高調波、銅蒸気レーザなどが用いられる。

ダイレーザの問題点は、色素の退色すなわち劣化である。このため、色素を循環させて使用するが、大出力を発生させる場合などは特に問題である。

3. 将来展望

前章では実用化の観点から現状技術の展望と課題について述べた。発明以来28年、レーザと応用の技術は予想以上の広がりを見せ、1990年代に向けて本格的な実用化の時代に入りつつある。

さらに、21世紀を念頭に、レーザ応用技術の拡大・発展を想定する場合、今後レーザに求められている特性、性能は何であろうか。次に、現状技術の発展動向を踏まえ、レーザの基本的性質に基づいて技術の将来動向を展望する。

3.1 大出力・高効率化

レーザの応用が拡大するにつれ、出力の増大や高効率化が必ず(須)の課題になっている。現在大出力化の研究・開発は、エキシマレーザ、銅蒸気レーザ、新固体レーザ、半導体レーザなどで進められている。

エキシマレーザの大出力・高効率化は、先に述べた国家プロジェクトで推進されている。平均出力kW級のエキシマレーザが開発されれば、CVD技術により大面積の精密薄膜形成が可能になる。

銅蒸気レーザの大出力・高効率化はウラン濃縮用として、やはり国家プロジェクトで進められている。銅蒸気レーザとダイレーザの増幅システムの開発は、21世紀のウラン濃縮技術のかぎ(鍵)を握っていると言えよう。

半導体レーザの大出力化は、従来ガスレーザで行われていた応用の半導体レーザへの置換を進めるものである。現在、プリンタに使用されているHe-Neレーザは、半導体レーザに置き換わりつつある。また、固体レーザの高効率化には励起用の大出力半導体レーザが求められている。

3.2 高機能化

レーザの応用は、指向性に基づいたエネルギー主体の応用から、単色性や可干渉性などを利用した高度な応用へと広がりつつある。レーザ光の波長・位相・振幅の制御に対する要求は次第に高くなっており、最近の例としては、リソグラフィ用のエキシマレーザに対する狭スペクトル・波長安定化技術の開発が挙げられる。

ガスレーザでは振幅制御の高性能化に向かっており、RFやマイクロ波による放電励起方式の開発が重要になっている。また、光共振器や伝送光学系の改良、あるいは位相共役法などによる位相の制御が、ビームの指向性の向上に不可欠な技術課題となろう。

半導体レーザの最近の動向としては、レーザの振幅だけでなく周波数と位相を高速に変調する技術や、集積化構造を用いた高速光スイッチング素子などの技術が、従来の強度変調をりょうが(凌駕)する高感度コヒーレント光通信や光ニューロコンピュータを目的として研究されている。

3.3 波長可変

波長可変レーザとしては、既に述べたダイレーザが挙げられ、その他にもカラーセンターレーザや半導体レーザなども含まれる。また、非線形光学効果を利用した高調波の発生技術は、既に非線形結晶を使ったものについては実用化されているものもある。しかし、ガスの非線形光学効果を利用し、数十nmから百nm前後の短波長光の発生研究は緒についたばかりであり、今後の研究進展が期待されている。

レーザ光の波長を自由に変えたいという欲求は、レーザの利用者のニーズのみならずレーザ研究者の永年の課題でもある。レーザの本質とは一見相反する課題であるが、これに答えるものとして最近注目されているレーザが自由電子レーザである。従来のレーザが、原子や分子、あるいはイオンの束縛電子のエネルギー準位を使うのに対し、自由電子レーザは自由電子のエネルギー遷位を利用するものである。このレーザの進展は、SORリングなどの加速器技術の開発とともに研究が加速され、発振波長も各種の方法により可視域まで短縮されている。実用化はこれからであるが、今後発展が期待される夢のレーザである。

3.4 短波長化

短波長化はレーザ研究の必然的な方向である。また、微細加工、光化学応用、生化学応用など世の中のニーズとも歩をそろえるものである。しかし、原子や分子の自然放出寿命は波長の3乗に比例するため、短波長になるほどレーザ発振、特に連続発振が困難になる。それにもかかわらず、レーザの発振線はエキシマレーザなどの出現により紫外域まで短縮され、さらに、上述した高調波発生技術などにより、真空紫外から極端紫外域までのコヒーレント光が得られるようになってきている。X線やγ線は、レーザ光としては究極のものになるだろうが、X線に関しては既に米国のローレンスリバモア国立研究所でレーザ発振が実現されている。しかしこれは、核融合研究用に建設された大型のガラスレーザシステムを励起源として使用した実験であり、今後産業用にも使用できる規模のX線レーザの開発が期待される。

4. むすび

発明から28年、レーザ技術の進歩と応用技術の多様な広がりには発明者達の予想をはるかに越えたものではなかろうか。21世紀に向けて、既存レーザの高性能化や高機能化の技術は一段と進歩するであろうが、同時に、必然的な道としてレーザの短波長化や波長可変技術が急速に進むと思われる。応用技術についても、指向性に基づいたエネルギー利用の応用から、単色性や可干渉性を利用した高度な応用が産業レベルで発展すると予想され、既に、その徴候を示す応用技術の実用化が始まっていると言えよう。

「超先端加工システム」とエキシマレーザー

吾妻健国* 田畑則一+
春田健雄**
永井治彦***

1. ま え が き

次世代の我が国産業の中心となるべき先端技術産業、すなわち宇宙、オプト エレクトロニクス、新エネルギー、海洋開発などの基盤技術として超先端加工技術が注目され、通商産業省工業技術院の大型プロジェクトとして「超先端加工システム」が1986年度に発足した。

量子レベルの制御を目指す超先端加工は、従来の加工精度の極限を追及するだけでなく、材料創成と加工の融合による新プロセスを創造するものである。加工の手段としては、エキシマレーザービームやイオンビームなど、励起ビーム源が主役を占め、超精密機械加工がその前加工を支える。これら超先端加工技術に、超精密計測、評価などの支援技術が加わり、「超先端加工システム」を構成することになる。

励起ビーム源の中でも、最も開発に力が注がれているのがエキシマレーザーである。数十W級のエキシマレーザーは既に市販され、実験室レベルで使われているが、これを生産プロセスで実用化できるように、数kW級への大出力化、高繰返しなどの高機能化、及び長寿命化を行う必要がある。

この大型プロジェクトには、研究開発の委託先として18社3団体が参加している。このうち、大出力エキシマレーザーの研究開発に三菱電機㈱も参加しており、1993年度の最終目標として、繰返し周波数1kHz、レーザー出力2kWのXeClエキシマレーザーの開発を担当している。このプロジェクトへの参加に先立ち、三菱電機㈱では100W級のXeClエキシマレーザーを試作し、2kWレーザーで提案している新技術の実証を行った。

「超先端加工システム」におけるエキシマレーザーの役割、開発目標である2kWレーザーの概要、先行開発の100W級エキシマレーザー、及び2kWレーザー開発のための大出力化基本技術に関する研究結果について述べる。

2. 「超先端加工システム」におけるエキシマレーザーの役割

2.1 「超先端加工システム」

「超先端加工システム」プロジェクトで研究開発される超先端加工とは何であろうか。現在使われている先端加工とは、電子ビームやレーザービームを使った精密ビーム加工、精密機械加工などによるミクロンから超ミクロン級の精度をもつ穴開け・切断・切削・研磨などを意味するものである。

それでは超先端加工とは、更に精度をナノメートル級に高めた加工であろうか。精度の追及のみを考えるとそうであるが、ナノメートル級になると原子、分子のオーダーに近づくので、加工の意味も自から変わってくる。すなわち、バルクの材料から除去加工により必要とする形状を得る従来の加工プロセスより、表層改質や薄膜形成による材料創成とパターニングなどの形状形成を同時に行うプロセスの方が有効となる。超先端加工は二次元的な微細化に対応し、厚さ

方向も微細化され、表層や薄膜の加工になる。表層や薄膜の場合には機能材料の創成がすなわち加工になり、それに二次元的なロケーションが加わって、「必要な所に必要な機能の材料を創成する。」プロセスが加工処理ということになる。したがって、超先端加工の“超”が意味するものは単なる精度の極限だけではなく、材料創成プロセスの融合した新加工処理プロセスの創出も含まれているといえる。

“超”の意味に含まれる材料創成には、従来の熱平衡プロセスでは出来なかった“超材料”の生成や、“超プロセス”の創出も含まれる。Si₃O₂のnやmが整数でない物質の生成や、500℃以下の低温におけるダイヤモンド薄膜の生成がその例である。この非熱平衡プロセスに有効なエネルギー源は、レーザービーム、イオンビームなどの励起ビーム源であり、レーザーでは分子間結合エネルギーに相当するエネルギーをもつ紫外線レーザーが重要となる。

2.2 エキシマレーザー応用加工

エキシマレーザーを応用した加工には、アブレーション加工と呼ばれる蒸発除去加工、基板の近傍でガスを分解してその分解生成原子を基板内に拡散させるドーピング、同じく基板の近傍でガスを分解してその分解生成原子あるいは分子を基板上にたい(堆)積させるCVD (Chemical Vapor Deposition) などがあるが、材料創成という観点からはレーザーCVDが特に重要である。ガスをレーザーで分解し、その分解生成物が化学反応により反応生成物を作る過程はCVD成膜に限られるものではなく、非平衡過程による材料合成法として利用可能である。この場合には加工という分野に入らないかもしれないが、エキシマレーザーの応用として期待の大きな分野である。

レーザーCVDは、赤外レーザー光で基板や原料ガスを加熱して熱分解で膜を生成する方法と、紫外レーザー光で原料ガスを直接励起し、光分解で膜を生成する方法に分類される。熱分解法ではレーザー光の指向性、収束性を利用した微小領域での膜生成が特徴であり、光分解法では更に、低温膜生成、レーザー光の波長選択による選択反応性膜生成、高速膜生成、大面積膜生成などの特徴が期待されている。

光分解反応に用いるレーザーは、励起しようとする原料ガスの分子の結合エネルギーよりも大きな光子エネルギーを持ち、しかもその波長域に吸収帯を持たなければならない。図1にレーザーの波長と光子エネルギーと分子間結合エネルギーの関係を示す。レーザーCVDに

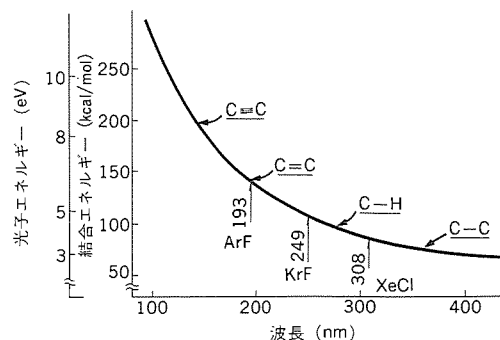


図1. 波長と光子エネルギー及び分子間結合エネルギーの関係

におけるエキシマレーザの有用性が明らかである。レーザ光の場合には、ビーム密度を高めることによって二光子吸収と呼ばれる光子エネルギーの2倍のエネルギーを必要とする反応も可能になるので適用範囲は更に広がる。

レーザCVDが実用プロセスで使われるためには、エキシマレーザの大出力化、長寿命化、ビームの高品質化などが必要であり、「超先端加工システム」プロジェクトで主要開発項目に選ばれている。

3. 大出力エキシマレーザの開発目標

3.1 開発計画

「超先端加工システム」における三菱電機機担当の研究開発計画を図2に示す。発電施設用部材への高品位薄膜の高速成膜や高速表層改質などの応用を目的とし、平均出力2kW、発振効率(レーザ出力/放電電力)4%、放電電極や電気回路部品の寿命 $10^9 \sim 10^{10}$ ショットの高効率大出力エキシマレーザの開発が最終目標である。この最終目標の達成のために、平均出力500Wの中出力エキシマレーザ開発が中間目標として設定されている。このため、1987年度から1990年度まで、①低電力ガス循環技術、②大出力用高効率放電励起技術、③大容量スイッチング技術、④大出力発振制御技術の四つの要素技術開発を並行に進め、これらの成果を統合した中間目標の中出力エキシマレーザを開発する。1990年度の間評価を経て、さらに1993年度には最終目標の平均出力2kWのエキシマレーザ開発を計画している。

この計画における最大の課題は、発振効率4%の高効率で、2kW

の平均出力を達成するための技術開発にある。通常エキシマレーザの発振効率は1%程度で、均質・一様な主放電を起こさせるための予備電離放電としては、スパーク放電が発する紫外線が利用されている。この計画ではガスや光学部品の長寿命化にも有効な独自の沿面予備電離放電方式に、高効率発振用の電気回路として研究されているプリパルス回路とPFN(Pulse Forming Network)回路とから成る組合せ回路で放電エネルギーを供給し、上記の課題を解決しようとするものである。

具体的な手順としては、1987～1988年度に単パルス発振で1Jの出力を達成し、1989年度にこれの高繰り返し発振実験を行い、1990年度に500W出力を実現する。この500W機には、高繰り返し発振に不可欠な高速ガス流速と磁気シール技術、固体スイッチング素子を採用したプリパルス回路、固体素子化PFN回路、短パルス・大出力発振用レーザ共振器、光学部品実装評価などの並列に開発された要素技術が盛り込まれている。

3.2 目標仕様と技術開発項目

表1に、目標仕様と技術開発項目との関連をまとめて示す。大出力エキシマレーザを薄膜の高速成膜や高速表層改質の実生産ラインに適用する場合、その処理能力から考えてkW級の出力が必要である。2kWエキシマレーザを実用性の高い産業用装置として完成するために、放電励起方式により達成可能な最高の発振効率4%を目標として設定した。2kWの出力を発振効率4%で実現するためには、50kWの放電電力の投入が必要である。このため、大断面の放電

表1. 目標仕様と技術開発項目との関連

目標仕様	技術開発項目
平均出力2kW (2J/P)	大断面放電励起方式——沿面予備電離放電方式 (投入電力50kW…50J/P)
発振効率4%	高効率発振技術——プリパルス+PFN組合せ回路 短パルス・大出力発振用共振器
繰り返し周波数 1kHz	高繰り返し発振技術——高速ガス流循環 (60m/s)——ブロー電力 (50kW)——軸シール 高繰り返し放電安定化 高繰り返しスイッチング技術——磁気パルス圧縮 固体スイッチング素子
寿命 $10^9 \sim 10^{10}$ ショット (放電電極、回路部品)	部品の長寿命化——長寿命沿面予備電離放電電極 ——スイッチング素子の固体化

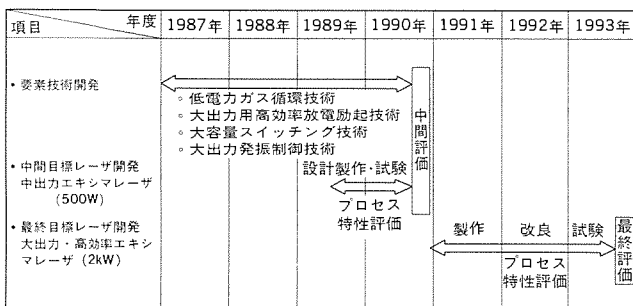


図2. 「超先端加工システム」における三菱電機研究開発計画

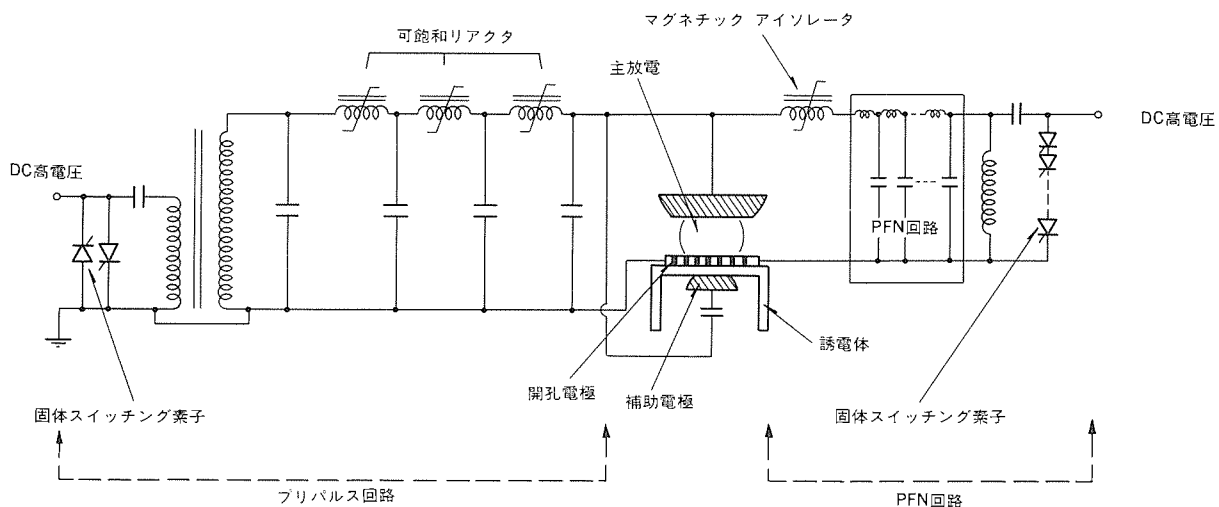


図3. 大出力・高効率エキシマレーザ励起用放電回路

励起技術の開発が不可欠であり、これを沿面予備電離放電方式で行う。この放電方式の構造や特性については、従来の紫外線予備電離放電方式と比較して次の4章で述べる。沿面予備電離放電方式は、誘電体を介して金属の補助電極と開孔電極との間の沿面コロナ放電を予備電離源として利用する方式であり、大断面の放電励起に適した方式である。また、レーザガスや光学部品の長寿命化にも有効である。

効率4%の高効率発振を実現するためには、図3に示すように、ブリパルス回路とPFN回路との組合せで放電用エネルギーを供給する回路方式の開発が必要である。この回路は、主放電の開始をブリパルス回路からの高電圧パルスで行い、それに続くエネルギー注入を主放電部とインピーダンス整合されたPFN回路から供給し、高効率のレーザ発振を実現しようとするものである。

さらに、2kWエキシマレーザを産業用装置として実用化する際に重要な要素は総合効率である。エキシマレーザの高繰り返し発振には放電部において高速のガス流が不可欠であるが、3～5気圧の高気圧ガス中でガスを循環するので、ブロワ駆動用のモータで消費される電力が極めて大きくなる。このため一つの基準として、この消費電力の最大限度を投入放電電力と同じ50kWとすると、これにより得られる放電部ガス流速は60m/s程度となる。このガス流速で可能な発振の繰り返し周波数は1kHz程度と予想され、したがって、平均出力2kWをパルス当たりのエネルギー2J、繰り返し周波数1kHzで実現することを目ざした。1kHzの高繰り返し発振には固体スイッチング素子が不可欠である。しかし、固体スイッチング素子の立ち上がりは遅く、過飽和リアクタを使用した磁気パルス圧縮回路の開発が必要になる。また、10⁹ショット以上の寿命の実現にもこの開発は欠かせない。

以上のような技術課題が解決され、2kWの高効率エキシマレーザが開発された場合の構想図を図4に示す。

4. 現在までの開発成果

4.1 100W級エキシマレーザ

エキシマレーザは、数気圧のレーザガス圧力で放電励起を行うため、均一なグロー状放電を得るには主電極間へのパルス電圧の印加より前に放電の種となる電子を、放電空間全域に均一に分布させておくための予備電離が必要となる。

100W級エキシマレーザの開発は、kWレベルへの大出力化をねらってその基盤を構築することを目的としたもので、新規な予備電離技術が用いられているのが特徴である。図5に従来の紫外線予備電離放電方式と新規な沿面予備電離放電方式とを示した。紫外線予備電離方式は同図(b)に示すように、主電極の両側面に複数個のピンを並べ、そこで起こるスパーク放電から発生する紫外光を利用してレーザガスを電離することにより種電子を与えるものである。これに対し、同図(a)に示した沿面予備電離放電方式は、主電極の一方が開孔電極と誘電体、及び補助電極のサンドイッチ構造となっており、開孔電極と補助電極に電圧を印加し、開孔部内周壁にそって誘電体表面上にコロナ放電を起こして、これを予備電離源として用いるものである。その特長は次のとおりである。

- (1) 主電極背面から予備電離するため、放電幅の方向に電子密度のこう配が生じることなく、幅の広い大断面積放電が実現でき、大出力化が可能である。
- (2) 予備電離領域が主放電領域と同一であり、主放電領域の両側に

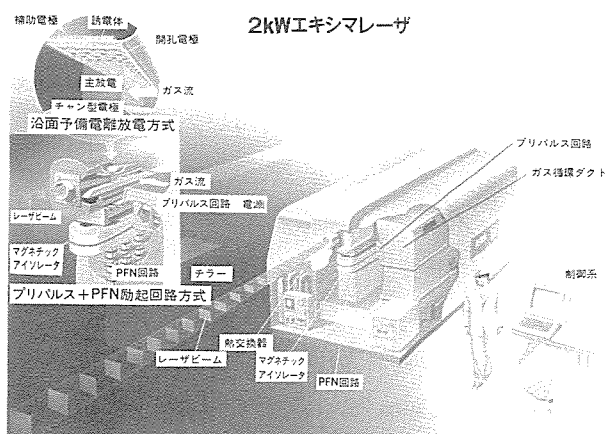


図4. 2kWエキシマレーザ構想図

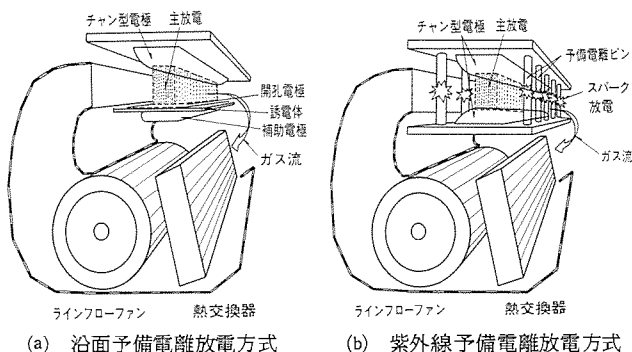


図5. 予備電離放電方式の比較

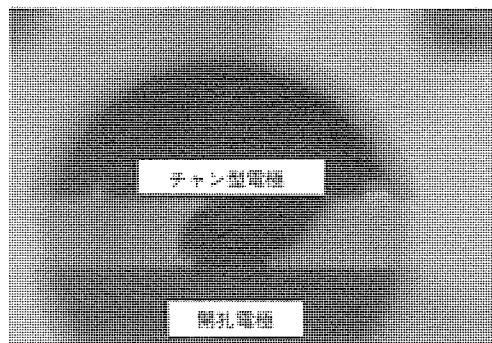


図6. 沿面予備電離放電方式エキシマレーザにおける主放電写真(中央の影は主放電ループの導電路である。)

更に予備電離用のスパーク放電が存在している紫外線予備電離放電方式に比べて、パルス放電ごとに置換すべきガス空間が狭く、必要ガス流速の観点から高繰り返し発振に適する。

- (3) スパーク放電を用いないため、レーザガスの劣化や光学部品の汚染が少ない。

図6に、光軸に直交する方向から見た主放電写真を示す。図から明らかなように、主電極間の全域にわたってグロー状の放電を形成することが可能である。詳細にみれば、開孔部近傍で放電の集束が観測されるが、放電部中央へ進展するに従って互いに重なり合い、均一なグロー状放電が形成されている様子がわかる⁽¹⁾。

上記の特性を備えた沿面予備電離放電方式を用いて、20×20mm²の幅広ビームの実現と、ガス封じりの条件下で5×10⁶ショットの長寿命を20W級XeClエキシマレーザで確認した⁽²⁾。

図7は、さらに100W級への高出力化を図った結果である。主電極として、チャンネル電極と開孔平板電極の組合せを用いており、ギャップ間隔は25mm、有効放電長は1mである。励起用回路としては、

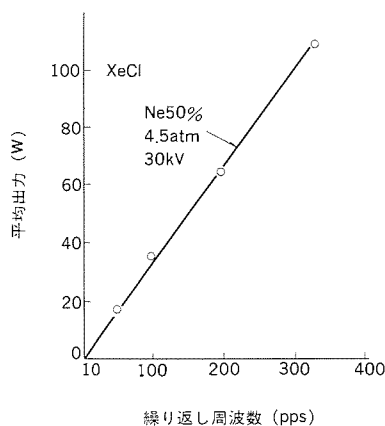


図7. XeClレーザ (100W機) 出力特性

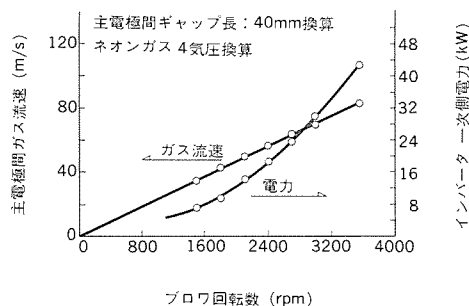


図8. 主電極間ガス流速, 電力vs. ブロフ回転数

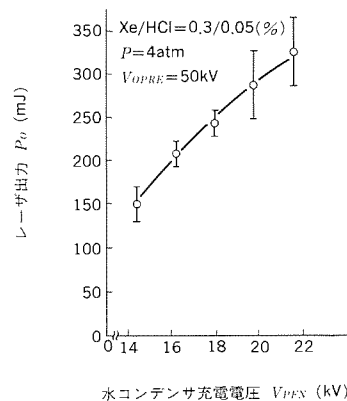


図9. レーザ出力のPFN充電電圧依存性

容量移行型回路を採用し, 第1, 第2 キャパシタは, それぞれ96 nF, 86nFである。バッファガスとしてネオンガスを用い, 330Hzで110Wの平均出力を達成した。330Hzの高繰り返し発振時においても, 発振繰り返し周波数に対して, 直線的に平均出力が増加しており⁽⁴⁾優れた繰り返し特性が得られている。

4.2 大出力化の基本技術

平均出力をkWクラスにまで高めようとする, 中核技術の沿面予備電離放電方式に加えて, 前述の四つの基本技術の開発が必要となる。以下, 各技術ごとにこれまでの開発成果を述べる。

(1) 低電力ガス循環技術

kWクラスのエキシマレーザでは, レーザガスの媒質として4気圧のネオンを用い, 放電場において60m/s以上のガス流速が求められる。図8に, 2kW機の1/2モデル(放電長が半分)で行った高密度ガス高速循環実験の結果を示す。ブロフは上記仕様に対し, 比速度の観点から最も適した片吸込みターボブロフを用いており, 耐ハロゲン性を持たせるために, 接ガス部はニッケルをコーティングしている。また, モータは循環ダクト外に設置し, 磁性流体軸シール機構により回転翼に動力を伝達している。

図から分かるように, 60m/sは, 24kWの電力で達成されており, 最終目標の2kWレーザにおいてブロフ電力を50kW以内にするという課題に対して, 十分な見通しがえられた。

また, モータ1次側電力から見た循環効率は, 約70%であった。

(2) 大出力用高効率放電励起技術

励起回路を, 放電を主電極全域にわたって均一にスタートさせるためのプリパルス回路(容量移行型回路)と, 電力を放電場に効率良く投入するためのPFN(水コンデンサ)とに分離し, これらを自爆型レーザギャップスイッチで連結した高効率励起回路を試作して, その単パルス放電特性を明らかにした。

今回の装置の特長は, この高効率励起回路方式によるレーザ発振動作を, 高繰り返し動作が可能な沿面予備電離放電方式を用いて行った点であり, 予備電離源に放電を用いたプリパルス/PFN回路は他に例がない。単パルスレーザ出力は, 図9に示したように, PFN充電電圧に対して単調に増加し, 22kV充電で320mJが得られた。また, 超短パルス電圧・電流波形の2現象同時測定, 放電現象のナノ秒時分割測定及びこれらの結果に基づいた計算機シミュレーションを行い, 各部回路定数を算出するとともに, 単パルス出力1Jを達成

するためにはPFNから主電極に至る部分の浮遊インダクタンスを20nH以下に低減する必要があることを明らかにした。また, 上記実験と平行して, 水コンデンサに代わる高繰り返し用のPFN素子として同軸型誘電体コンデンサを, さらにレーザギャップスイッチに代わる過飽和リアクトル(マグネチックアイソレータ)としてコバルト系アモルファスを用いたレーストラック状コアを開発した。

これらの成果と上記ガス循環技術とを融合させ, 新しい高効率励起回路方式による高繰り返し発振実験を進めている。

(3) 大容量スイッチング技術と大出力発振制御技術

各種磁性材料のスイッチング特性及び電力損失を明らかにし, 大容量スイッチング技術の基盤を確立した。また, 大出力発振制御技術開発の一環として, 取出しミラー透過率とレーザ出力の相関を, 共振器内ロスパラメータとして測定し, 共振器最適カップリング基準を確立した。これらの成果は, 中間目標の500W機に反映する予定である。

5. む す び

通産省の大型プロジェクト「超先端加工システム」に参画し, 2kWの大出力エキシマレーザの開発を進めているが, このプロジェクトにおけるエキシマレーザの役割, 2kWレーザの概要, その中核となる大出力化基本技術について述べた。

エキシマレーザによる加工は, 化学反応制御を利用した化学的加工である。これに対して, CO₂レーザやYAGレーザによる加工は熱加工であり, 熱影響層が加工微細化の究極の制限となる。分子の結合を分離させるエキシマレーザ加工は, 短波長であることも加わって本質的に熱加工より微細化に適している。さらに, エキシマレーザは化学反応制御により, 材料の表層改質や薄膜加工を行うことができるので, 材料創成と加工の融合による新プロセスの創造を目指す超先端加工にとって不可欠な技術といえる。

このような認識の下に, 大出力エキシマレーザとその応用技術が「超先端加工システム」プロジェクトの中で取り上げられ, 研究開発が推進されていることは適切かつ必然的な選択といえよう。

来るべき21世紀を前に, エキシマレーザ応用技術が次世代の先端技術産業の基盤技術として広範な分野で応用され, 大きなインパクトを与える技術に発展すると期待される。

露光ステッパ用エキシマレーザ

江浦 隆* 若田仁志***
中谷 元** 永井治彦+
坪井俊吾*

1. ま え が き

ウェーハプロセス技術の中で、最も重要とされるリソグラフィ技術は、半導体デバイスの高集積化に伴い画期的な進歩を遂げてきた。既に、1 MDRAMが量産化に入り、16MDRAMが研究室レベルで試作されているが、従来の水銀ランプのg線（波長436nm）を露光光源に用いたステッパ（縮小投影型露光装置）の改良では高NA化にも限界があり、より短波長のi線（波長365nm）を用いたとしてもレンズ設計が難しく、現状では、解像度0.5 μ m程度が限界と言われている。焦点深度の低下を抑えながら更に解像度を上げるためには、i線よりも更に波長の短いエキシマレーザ（KrFで波長248nm）に期待するところは大きく、16MDRAM（解像度0.5 μ m）、及び64MDRAM（解像度0.3 μ m）の2世代にわたる超・超LSI（大規模集積回路）の実現に対し、エキシマステッパによる研究開発が既に開始されている。しかしながら、エキシマレーザの波長のスペクトル幅はおよそ400pmと広く、いわゆるこのような広帯域では色消しレンズの設計が比較的難しいとされており、現状では、ステッパに単色レンズを使用した狭帯域エキシマレーザの採用が主流になっている。

このたび、スペクトル幅3pm以下、波長の安定度 ± 1 pm以下で、200ppsまでの高繰り返しで3Wの平均出力を得ることができる狭帯域エキシマレーザを製作した。ここでは、狭帯域KrFエキシマレーザの装置構成、基本性能及び特長、並びに開発された主要要素技術について、それらの概要を述べる。

2. 狭帯域KrFエキシマレーザ

2.1 装置構成

図1に装置の外観写真を、図2に装置構成図を示す。装置設計に当たっては、狭帯域化をベースにした波長・出力の安定化、高出力・高繰り返し化及び長寿命化に特に考慮を払った。発振器本体は狭帯

域化ユニット、電源・制御部、ガス制御部を含めて一体化されており、設置面積、操作性、メンテナンス性、耐ノイズ性にも考慮が払われている。

装置上部は、発振器本体、サイラトロン及びコンデンサから成る高電圧回路、波長選択素子及び波長モニタを備えた狭帯域化ユニット、並びに出力モニタから構成されている。一方、装置下部は、電源部、波長・出力制御部及びガス制御部から構成されており、上下共に極力ユニット化を図っている。

発振器本体の内部は、レーザ発振が行われる主放電部、主放電を形成するための予備電離部、主放電部のレーザガスを置換するためのガス循環系、主放電部から効率的にレーザエネルギーを取り出すための光共振器から構成されている。なお、予備電離方式としては当社独自の浴面予備電離放電方式を採用しており、特に、放電の安定化、ガスや光学部品の長寿命化にその効果を発揮している（浴面予備電離放電技術については、3.1節参照）。発振器内部の構成材料としては、レーザガスの寿命の観点から、極力ハロゲンガスとの反応性の低いニッケル、セラミック、テフロン系の樹脂などを使用している。ウインド材質としては、例えばCaF₂を採用しているが、ウインド交換時は、ウインド内側のゲートバルブを閉めることにより、きょう体全体を大気にさらすことなく速やかにウインドを交換することができる。このとき、ウインド \leftrightarrow ゲートバルブ間のHeガスによる置換は、ゲートバルブ閉後、自動的に行われる。

狭帯域化ユニットは、波長選択素子と波長モニタから構成されているが、光共振器内に装着された波長選択素子により所定のスペクトル幅を保持するとともに、波長モニタ及び波長制御部により、常に中心波長が安定するように制御している（狭帯域化技術については3.2節、中心波長制御技術については3.3節参照）。

出力制御としては、単発エネルギー一定制御、又は充電電圧一定制御の選択ができるとともに、発振dutyを設定できるので、任意の

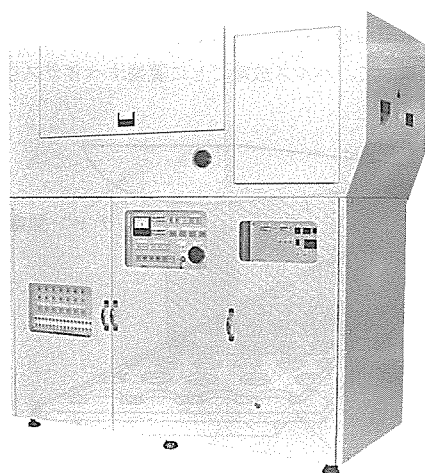


図1. 狭帯域KrFエキシマレーザの外観

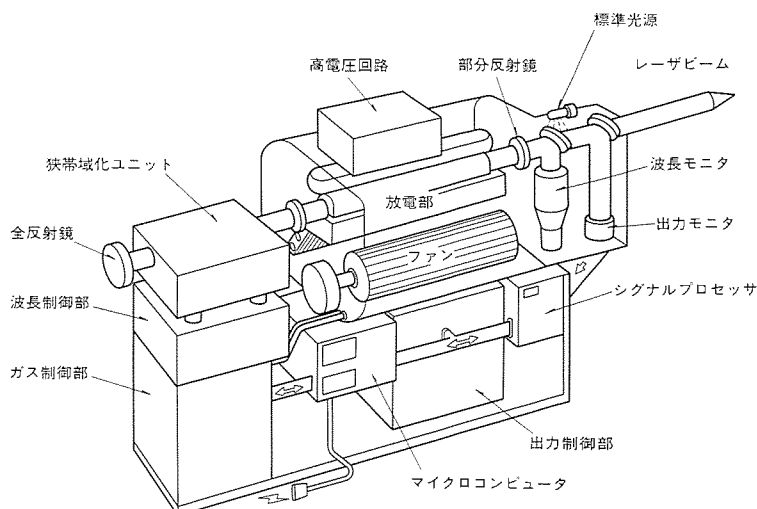


図2. 狭帯域KrFエキシマレーザの装置構成

モードで露光することが可能である。さらに、単発エネルギー一定制御の場合は、APC（自動出力制御機構）により、長時間にわたり、設定エネルギーを保持することができる。なお、これらのモードは、オフラインからオンラインへの切換えにより、ステッパ側から任意に制御することができる。

2.2 装置の標準性能

表1にこの装置の標準性能を示す。安定した解像度を得るためには、狭スペクトルかつ中心波長及びスペクトル分布の安定していることが最大の課題であり、この装置では、スペクトル幅 3 pm以下 (FWHM)、波長の安定度 ± 1 pm以下を達成している。ここで、中心波長は、例えば248.38nmから248.39nmの範囲で任意の値に設定することができる。1チップごとのトータル露光量の精度を上げ、スループットを向上させるためには、高繰り返しで高出力が必要であり、この装置では、最大パルスエネルギー15mJ、最大繰り返し数200pps、最大平均出力3Wを標準性能としている。ビーム形状については、露光領域をできるだけ広くとるためにサイズが大きく、かつ、出力分布が一定であることが重要であり、この装置では、最大強度の50%以上の領域がおおよそ6mm \times 10mmである。なお、ビーム発散角は3 mrad以下である。

次に連続運転特性であるが、図3に示すように、APC制御にF₂ガスインジェクション（手動）を施すことにより、繰り返し200pps、平均出力2Wレベルで、長時間にわたり出力を安定に保持できる実験データが得られた。なお、この場合、中心波長が ± 1 pm以下に制

表1. 狭帯域KrFエキシマレーザの標準性能

中心波長	248.38~248.39nm
スペクトル幅	3pm以下 (FWHM)
波長の安定度	± 1 pm以下
パルスエネルギー	最大15mJ
繰り返し周波数	最大200pps
平均出力	最大3W
ビーム形状	最大6mm \times 10mm
発散角	3mrad以下

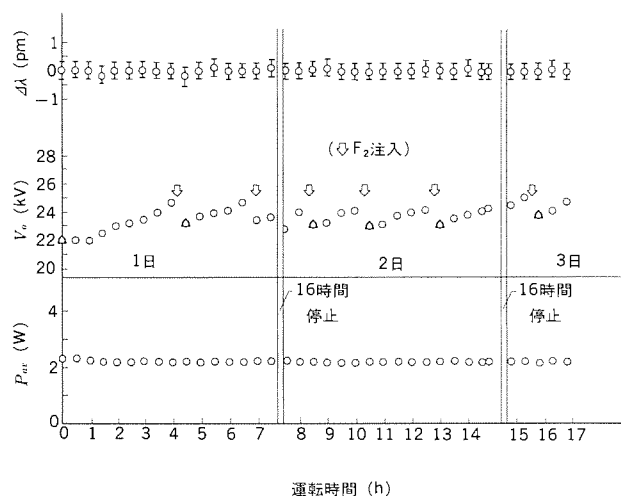


図3. 連続運転特性

御されていることは言うまでもない。このように、この装置には、ステッパ用エキシマレーザに必要な基本性能が十分に取り入れられており、これからの16M~64MDRAM開発に対し期待されるところは大きい。

2.3 装置の特長

ここで、この装置の特長をまとめると次のとおりである。

基本性能面では、

- (1) 沿面予備電離放電方式の採用により、放電の安定化、及びガスや光学部品の長寿命化が十分に図られている。
- (2) 波長選択素子の最適化、及び中心波長制御の最適化により、狭帯域化及び波長の安定化が十分に図られている。
- (3) APC制御により、出力の安定化が十分に図られている。

構造面では、

- (4) 発振器本体、狭帯域化ユニット、電源・制御部、ガス制御部を一体化するとともに、各々の構成要素を極力ユニット化しているので、設置面積・操作性・メンテナンス性・耐ノイズ性に優れている。

3章では、基本性能を達成するために開発された要素技術のうち、沿面予備電離放電技術、狭帯域化技術、中心波長制御技術についてそれらの概要を述べる。

3. 要素技術の開発

3.1 沿面予備電離放電技術

エキシマレーザは、通常、大気圧以上の条件下でレーザ光軸に垂直な方向から放電励起される。この際、1対の主電極間の全体にわたって均一なグロー状放電を得るためには、両主電極へのパルス電圧の印加に先立って、放電の種となる電子を放電空間に均一に分布させておく予備電離が必要である。

図4は、今回の狭帯域KrFエキシマレーザに採用されている独自の沿面予備電離放電方式の放電部構成図である。電極の一方を開孔電極とし、その背後に誘電体を介して補助電極を配置した構造となっている。この方式では、主放電に先立って開孔電極と補助電極との間に電圧を印加し、開孔部内周壁に沿って誘電体表面上にコロナ放電を起こし、これを予備電離源として用いる。

この方式の特長は、次のとおりである。

- (1) 予備電離にスパーク放電を用いないため、ガスや光学部品の長寿命化が容易である。
- (2) 放電部構造が簡易で信頼性が高く、保守性に優れている。
- (3) 予備電離領域が主放電領域と同一であり、主放電領域の両側面に、さらに予備電離用のスパーク放電が存在している紫外線予備電離放電方式と比較して、パルス放電ごとに置換すべきガス空間が狭

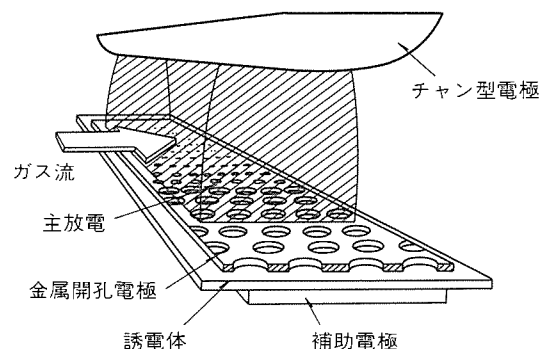


図4. 沿面予備電離放電方式放電部構成図

く、必要ガス流速の観点から高繰返し発振に適する。

図5は開孔部における沿面放電の写真である。誘電体上の沿面放電が開孔エッジ部から開孔中央に向かって進展している様子がわかる。予備電離には、この放電から発生する紫外光と主電極間に電圧が印加された際に、電子の一部が沿面放電場から主放電場に引き出されるという二つの効果が関与していると考えられる。

開孔径を大きくするほど、主放電は安定化するがレーザービームの強度分布にむらができる。一方、開孔径を小さくしていくと、強度分布は改善されるが、主放電が不安定になり、レーザーの単パルス出力のばらつきが大きくなってしまう。これらを考慮し、上記狭帯域KrFエキシマレーザーでは、(ピッチ/開口径)比をパラメータとして最適化がなされている⁽¹⁾。図6に狭帯域における繰返し周波数特性を示す。ピーク値ではあるが、200ppsで6Wの出力が得られている⁽²⁾。なお、ガス寿命は、封じ切りの状態で 5×10^6 パルスが得られている。

3.2 狭帯域化技術

400pmの発振スペクトル幅の3pm以下への狭帯域化は、通常、波長選択素子をレーザー共振器内に設置することにより達成される。このための波長選択素子としては、プリズム、回折格子、エタロンな

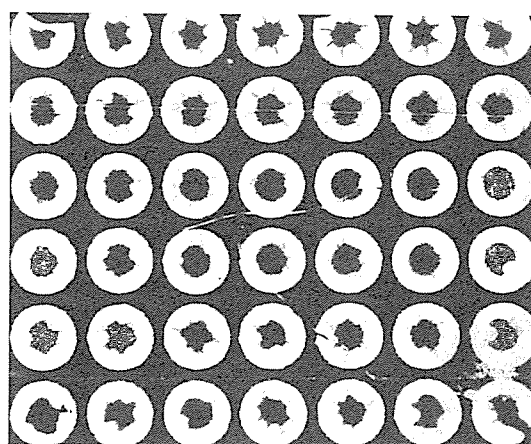


図5. 開孔電極での沿面予備電離放電

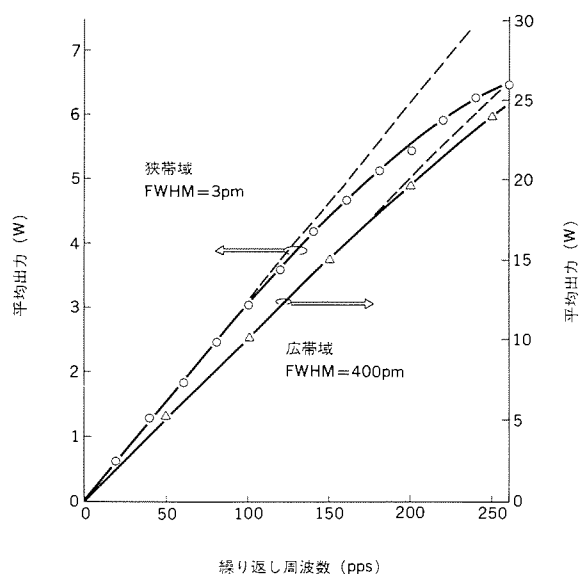


図6. 繰返し発振特性

どが一般的に用いられる。

プリズムを波長選択素子として用いた場合のスペクトル幅 $\Delta\lambda$ は次式で表される⁽³⁾。

$$\Delta\lambda = (\lambda \cos\theta / 2m\gamma \sin(A/2)) (dn/d\lambda)^{-1} \dots\dots\dots(1)$$

ここで θ は出射角、 m はプリズムの個数、 γ はビーム径、 A はプリズムの頂角、 n は屈折率である。今、入射角と出射角が等しく、 A が 60° 、 γ が3mm、 $(dn/d\lambda)$ が $1,600\text{mm}^{-1}$ (石英)の代表的な値を代入すると、プリズム1個で $\Delta\lambda$ として約30pmの値が得られる。3pm以下に狭帯域化するためには、10個以上のプリズムが必要であることがわかる。

回折格子を波長選択素子として用いた場合のスペクトル幅 $\Delta\lambda$ は、次式で表される⁽³⁾。

$$\Delta\lambda = \lambda \cos\theta / Mpy \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 M は回折の次数、 p は回折格子のグループ数である。 M を1次、 γ を3mm、 P を2,400 groove/mm、斜入射角を 85° とすると、 $\Delta\lambda$ として3pmの値が得られる。回折格子をレーザー共振器内に設置するときの留意点は、角度変化に対する波長の不安定性が大きいこと、共振器ロスが大きくなることなどである。

エタロンを波長選択素子として用いた場合のスペクトル幅 $\Delta\lambda$ は、次式で表される⁽³⁾。

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / 2nDF \cos\theta \dots\dots\dots(3)$$

ここで D はエタロンギャップ長、 F はフィネスである。今、 D を100 μm 、 F を90とすると、 $\Delta\lambda$ として約3pmの値が得られる。フィネスは、エタロンの反射率 R や面精度、光の透過回数 α などの関数であり、次式で与えられる。

$$F = \pi(R)^{1/2} / (1-R) (2^{1/\alpha} - 1)^{1/2} \dots\dots\dots(4)$$

透過回数が6回とすると、反射率は90%以上が要求される。

図7は、エタロンの透過率とフィネスとの関係をプロットしたものである。図からわかるように、高いフィネスを得る目的で、反射率を上げ過ぎるとエタロンの透過率が減少しレーザー共振器内のロスが増えることになる。しかし、エタロンはプリズムや回折格子に比較して入射角度の影響を受けにくいので、レーザービームの広がり角やビーム径を比較的裕度を持って選ぶことができる。アパーチャなどで絞ることなく、ビーム径を大きく保ったまま狭帯域化を実現すると、高次横モードの発振が得られ、ウェーハ上で干渉しま(縞)

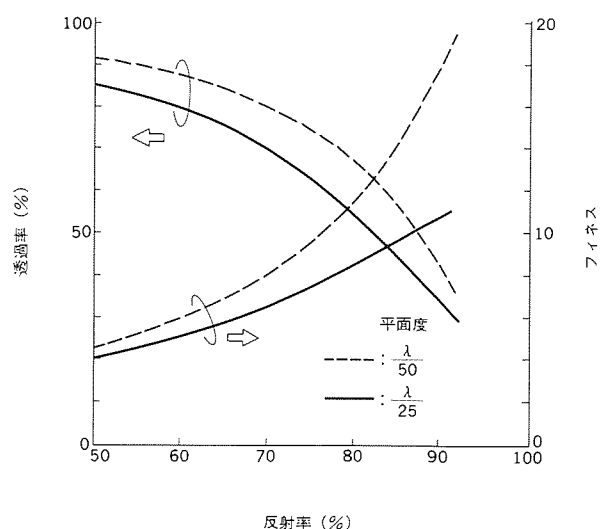


図7. エタロン特性

(スペックルパターン)ができにくいという露光用光源としては優れた特性を持たせることができる。この点で、エタロンはステップ用エキシマレーザの波長選択素子としては好ましい。

これらの波長選択素子の適切な組合せと、エタロン反射率の最適化により、6mm×16mmの大口径ビームで2.8pmの発振スペクトル幅を得ることができた⁽²⁾。

3.3 中心波長制御技術

波長選択素子をレーザ共振器内に設置すると、レーザ光の吸収加熱により熱ひずみを起こす。

エタロンの場合について考えると、ギャップ長の変化 ΔD は、

$$\Delta D = 2 (\beta \epsilon P / 4\pi(1-R) \zeta) (1 - 2 \ln(\gamma/b)) \dots\dots\dots(5)$$

で与えられる。

ここで β は線膨脹率、 ϵ はエタロンの吸収率、 P はレーザ入力、 ζ はエタロンの熱伝導率、 b はエタロンの直径である。

代表的な条件下で、 ΔD は 10^2 nmオーダーになり、これに対応する中心波長のシフトは、 10^{-2} nmオーダーになる。狭スペクトル幅と比較しても、中心波長シフト量を更に1けた小さくする中心波長制御技術が必要になる。

まず、レーザビームの一部をビームスプリッタで分岐し、モニタエタロンを通すと、図8に示すような干渉縞が観測される。

各干渉縞の直径 d_m は、

$$d_m = 2f \cdot \cos^{-1}(m\lambda / 2nD) \dots\dots\dots(6)$$

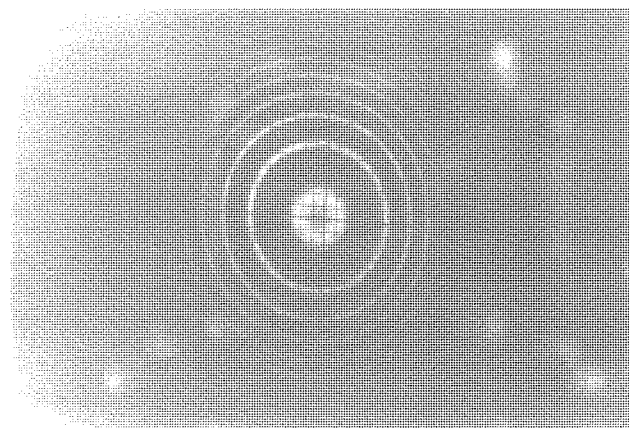


図8. モニタエタロンによる干渉縞

で与えられる。ここで、 f はモニタ系レンズの焦点距離である。同式から、中心波長のシフト量が干渉縞の直径の変化量 Δd_m として関連付けられることがわかる。したがって、 Δd_m が所定の範囲内に収まるように、波長選択素子を制御すればよい。プリズムや回折格子は入射角度制御、またエタロンは入射角度若しくはギャップ長か、ギャップ間の屈折率を変えることにより中心波長を動かすことができる。

干渉縞の直径をモニタし、これをもとにエタロンギャップ内のガス圧力を変えることにより屈折率を変化させて、中心波長を制御した結果、平均出力3.6Wにおいて、1時間当たりの中心波長変動幅±0.5pm以下を達成した⁽⁴⁾。

4. む す び

製作した狭帯域KrFエキシマレーザの装置構成、基本性能、特長及び主要要素技術について述べた。スペクトル幅3pm以下、中心波長の安定度±1pm以下、繰り返し周波数200ppsで平均出力3Wが得られる実用的なステップ用エキシマレーザである。沿面予備電離放電方式の採用により、ガスや光学部品の寿命も大幅に改善されており、これからの16M～64MDRAMの試作開発における期待は極めて大きい。

今後、

- (1) スループット向上のための高繰り返し化、高出力化
 - (2) 解像度向上のための狭帯域化、中心波長の安定化
 - (3) 長寿命化、低ランニングコスト化
- などの課題に対し、更に性能を高めていく。

参 考 文 献

- (1) 春田ほか：レーザー学会研究会報告，RTM-86-29（昭61）
- (2) 若田ほか：第49回応用物理学会学術講演会予稿集，5p-Q-3（昭63）
- (3) 柿内ほか：光学，丸善
- (4) 中谷ほか：第49回応用物理学会学術講演会予稿集，5p-Q-4（昭63）

ウラン濃縮用銅蒸気レーザ

美濃和芳文* 殖栗成夫***
吉田寿夫* 原 一彦***
益田博之**

1. ま え が き

レーザ法ウラン濃縮は、ウランの同位体であるウラン235とウラン238とのエネルギーレベルの差を利用し、レーザ光によってウラン235と同調、選別するものである。レーザ法は、原理的には一段で濃縮度を上げることができるので、ガス拡散法や遠心分離法のような巨大なカスケードを必要とせず、濃縮に要するコストが安く、次世代の濃縮法として内外共に注目されているものである。レーザ法は大きく分けて、ウラン蒸気を用いる原子法とUF₆を用いる分子法の2通りがある。特に1985年6月に米国エネルギー省から、ウラン濃縮の次世代生産技術として原子法を選択するとの発表があって以来、我が国でも原子法に関する研究開発が急がれるようになった。すなわち、1987年春、電力会社を中心にレーザ濃縮技術研究組合が設立され、原子法のための要素技術開発と実験プラントの設計作業が精力的になされている。

原子法において、ウラン同位体を分離するためのレーザの機能としては、まずその同位体シフトに同調できるように波長可変であることが必要で、かつ高速で蒸発・移動するウラン蒸気を残らずイオン化させるために、レーザのパルス繰り返し周波数及び出力の高いことが望まれる。そのレーザとしては、色素レーザとそれを励起する励起レーザとの組合せの適用が最有力と考えられている。通常、分離に必要な可視域の色素レーザを得るための励起レーザには、銅蒸気レーザ (CVL: Copper Vapor Laser) のほか、YAGレーザの2倍高調波、エキシマレーザの適用が考えられるが、YAGレーザは出力もパルス繰り返し周波数も低く、またエキシマレーザはパルス繰り返し周波数が低く、かつ紫外域での色素の劣化が問題となるので、CVLの適用が有力視されている。図1に、CVL励起色素レーザを用いた場合の原子レーザ法ウラン濃縮のプロセス概念図を示す。

我々は、原子レーザ法ウラン濃縮用レーザシステムの開発の一環として、CVL単機、及び発振器と増幅器とから成る銅蒸気レーザMOPA (Master Oscillator Power Amplifier) チェーンシステムの開発を行い、その結果、単機出力では、口径65mmのモデルで117

W (効率1.51%)、口径80mmのモデルで110W、MOPAチェーンシステムで292Wを達成している。この論文では、CVLの単機及びMOPAチェーンシステムについて、現在までの開発結果を紹介する。

2. CVLの諸特性

2.1 原理と構成

CVLは蒸気化した中性銅原子が、放電中の電子との衝突によって上準位に励起され、この励起原子が下準位に遷移するときに放出する光を利用するものである。上準位の原子の寿命は準安定状態である下準位の原子の寿命に比べて短いので、レーザ発振に必要な反転分布を作るには、急しゅんなパルス励起が必要となる。

図2にCVL管の縦断面構造と主電気回路を示す。CVL管は、両端に円筒状の電極をもつ放電管で、放電空間には、圧力が数十Torrのネオンガスが毎分数十cmの速さで流れており、中央からやや両電極寄りに銅粒子が置かれている。周囲には、真空層がありその内部にふく射熱を遮断するためのふく射シールド板がある。数十kVの直流高電圧電源から、充電抵抗Rを通してコンデンサC₁に充電された電荷は、サイラトロンを介してピーキングコンデンサC₂に移り、両電

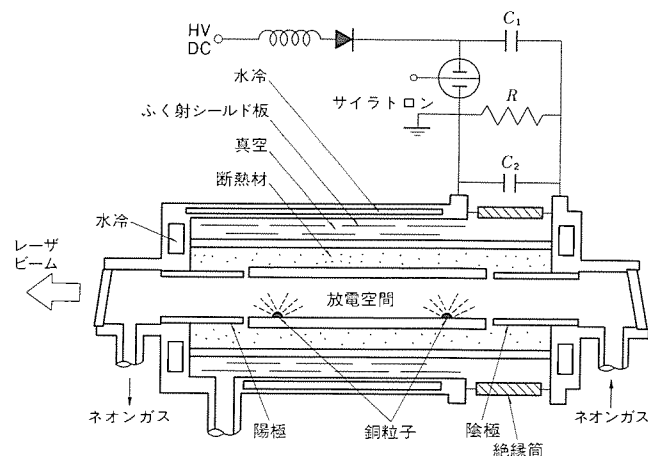


図2. CVL管の縦断面構造図と主電気回路

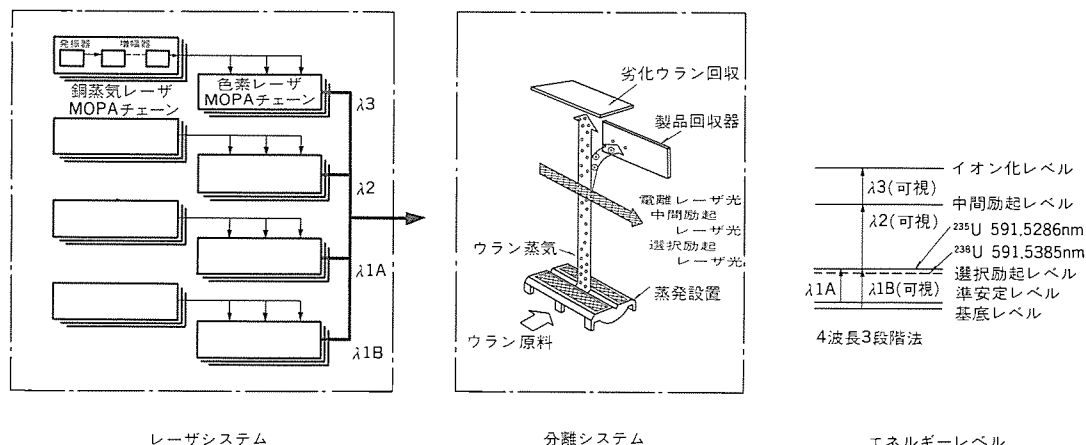


図1. 原子レーザ法ウラン濃縮のプロセス概念図

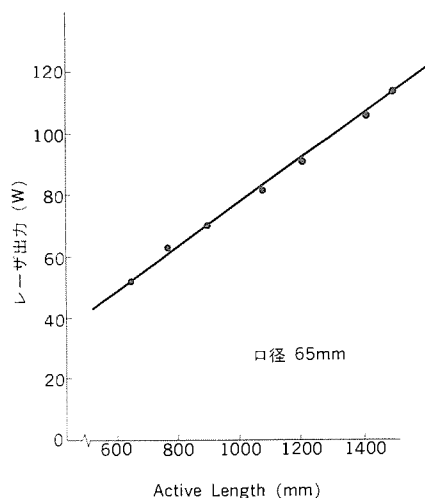


図 3. Active Lengthとレーザ出力との関係

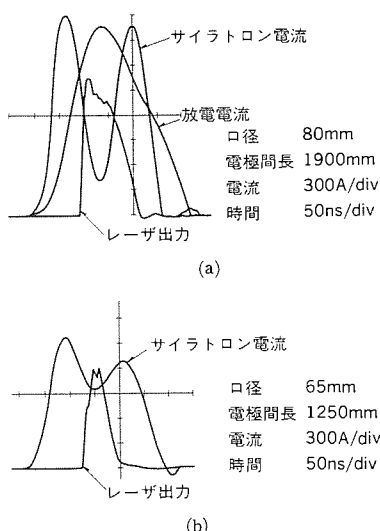


図 4. サイラトロン電流、放電電流及びレーザ出力波形

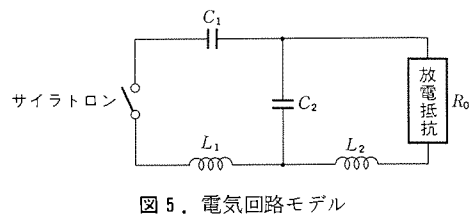


図 5. 電気回路モデル

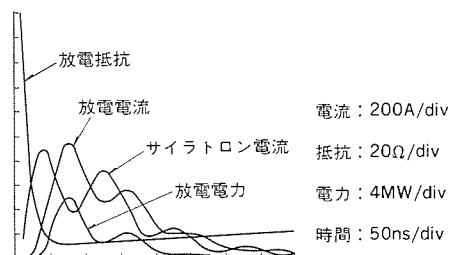


図 6. 放電電力波形のシミュレーション

極間に急しゅんな立ち上がり的高電圧を発生させ、放電空間に急しゅんな立ち上がりのパルス電流となって放電する。このパルス放電のエネルギーによって銅粒子は加熱され、蒸発し、その原子は急しゅんに励起される。

CVLは、このように動作するので、効率良く大出力を得るには、一定の銅蒸気密度を確保するために高温保持を行う断熱特性と、急しゅんなパルスエネルギーを注入するための電気特性を良くすることが重要である。

2.2 熱 特 性

CVLの発振に必要な銅蒸気密度を確保するためには、放電空間の器壁温度は1,450~1,500°Cになることが必要といわれている⁽¹⁾。また、逆に温度を高くし過ぎると、銅蒸気密度が高くなり、放電空間の電子温度が低下してレーザ出力が下がる。CVL管の断熱構造を軸方向に一様としたとき、放電空間の器壁温度は両端部付近を除きほぼ一定の分布が得られる。銅蒸気密度が十分に保たれる温度を1,450°C以上として、温度1,450°C以上となる軸方向の長さを、Active Lengthと呼ぶことにする。図3は口径65mmモデルにおけるActive Lengthとパルス繰り返し周波数が5 kHzのときのレーザ出力との関係を示したものである。出力は、Active Lengthにほぼ比例して増加していることがわかる。これまでに、電極間長1,800mmのCVL管でActive Lengthが1,500mmのとき、出力117W、効率1.51%を得ている。

このときのコンデンサ C_1 への平均電気入力力は7.76kWで、器壁温度は中心部で1,535°Cである。

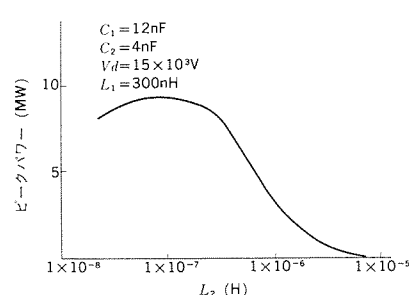


図 7. L_2 に対する放電電力のせん頭値の変化

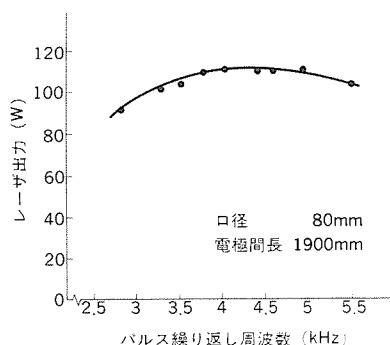


図 8. レーザ出力のパルス繰り返し周波数依存性

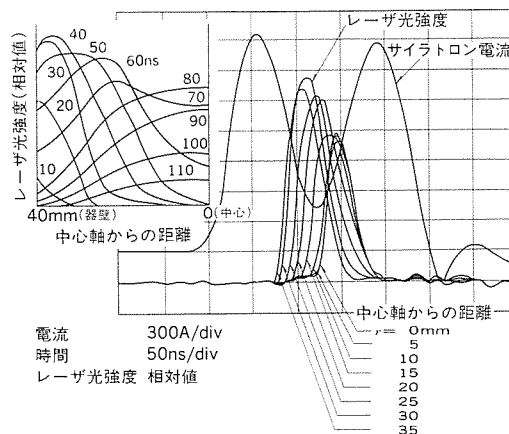


図 9. レーザ光強度の径方向分布

2.3 電気特性とレーザ出力波形

口径80mmモデルでのサイラトロン電流、放電電流及びレーザ出力波形を図4(a)に示す。レーザ出力波形は、放電電流波形のピーク値を中心とした約80nsの幅をもつパルスである。また、同図(b)には口径65mmモデルのサイラトロン電流波形とレーザ出力波形とを示す。両者は、充電電圧、コンデンサの容量値は異なるが、口径80mmの場合のレーザ出力波形は、口径65mmの場合に比べて一般にパルス幅が広い。

コンデンサ C_1 に蓄えられたエネルギーを急しゅんにかつ効率良くCVL管に注入するために、放電電力波形のシミュレーションを実施した。図5に電気回路モデルを示す。ここで、 L_1 はサイラトロンからCVL管までの配線のインダクタンス、 L_2 はCVL管自身が持つインダクタンスである(ただし、充電抵抗 R は放電開始後の放電抵抗に比べて大きいので、無視している)。サイラトロンをスイッチとして、サイラトロン電流の計算波形と実測波形とを一致させるようにCVL管の放電抵抗の変化を求め、それを基に放電電力波形を求めると図6のようになる。この方法を用いて、CVL管が与えられたときに、それに注入される放電電力のせん頭値を最大にするための L_2 の条件を求めた。図7に L_2 の変化に伴う放電電力のせん頭値の変化を示す。この場合、 L_1 は300nHとした。計算に用いた条件では、放電電力のせん頭値を最大にするには、 L_2 は約300nH以下すなわち L_1 と同程度以下にしなければならないことがわかる。

図8には、口径80mm、電極間長1,900mmのモデルにおけるレーザー出力のパルス繰り返し周波数依存性を示す。これは、充電電圧、コンデンサの容量値を一定に保ち、短時間の間にパルス繰り返し周波数のみを変化させて測定したもので、放電空間の器壁温度はほとんど変わらない状態での測定とみてよい。パルス繰り返し周波数の増加に伴い出力は上昇し、110Wに達しているが、4～5 kHzでほぼ一定となり、それ以上になると低下している。これは、パルスの繰り返し周期が、下準位の原子の寿命に比べて短くなると、下準位の原子が増加し、反転分布が形成できなくなるためと考えられる。

2.4 レーザ出力波形の径方向分布

口径80mmモデルにおいて、レーザービームを直径4mmのピンホールで切り出してパイプラナ光電管に入射させ、ピンホールの位置を径方向に移動させることにより、レーザー出力波形の径方向分布を求めた。図9にその測定結果を示す。右下の図は、径方向距離をパラメータとした時間波形であり、左上の図は、径方向のレーザー光強度分布が時間をパラメータとしてどう変化するかを示すものである。レーザー光は管壁に近い所からまず立ち上がり、ほぼ一定のパルス幅を保って順次中心方向に移り、約50ns後に中心軸部分のレーザー光が立ち上がる。これは、Skin Effectによって中心部分の電界強度が時間的に遅れて立ち上がるという報告例²⁾と同じ現象と考えられる。

3. MOPAチェーンシステム

色素レーザーを効率良く励起するには、CVLは高出力かつ高指向性を兼ね備える必要がある。これには、高指向性の発振器と大容量増幅器との組合せから成るMOPAチェーンシステムの構成が実用的と考えられる。

3.1 システムの概要

図10に、200W銅蒸気レーザーMOPAチェーンシステムと、これによって励起される40W色素レーザーMOPAチェーンシステムの鳥瞰図(概)図を示す。CVL発振器は、指向性を重視して、口径18mm、電極間長500mmのCVL管を用いて、共振器長の短かい不安定型共振器

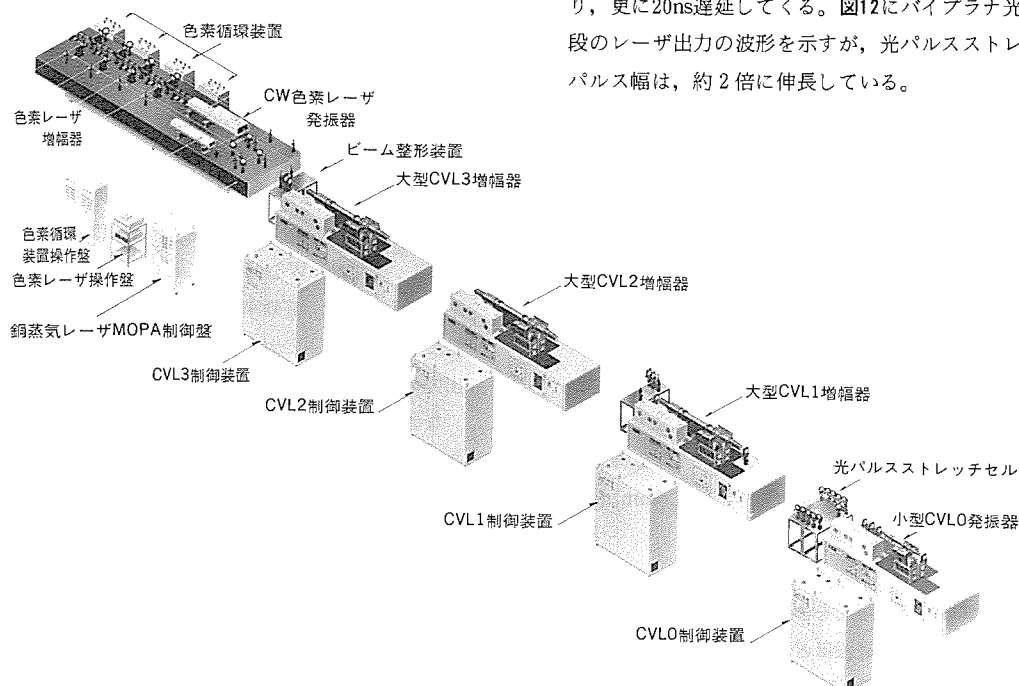


図10. 200W銅蒸気レーザーMOPAチェーンシステム・40W色素レーザーMOPAチェーンシステムの鳥瞰図

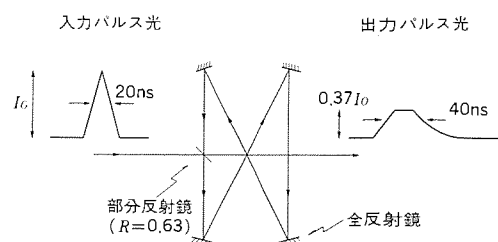


図11. 光パルスストレッチセルの構成

としている。出力パルス幅が約20nsと狭いので光パルスストレッチセルを設けて、約2倍に伸長し、増幅器へ入力している。増幅器は、口径65mm、電極間長1,800mmのCVL管を用いた装置を3台で構成している。発振器と3台の増幅器の光路差を考慮した同期を図るため、銅蒸気レーザーMOPA制御盤を設け、ここから各装置へ駆動パルスを送信している。また、ここで各装置の電圧、パルス繰り返し周波数、パルス位相の設定と監視を可能にしている。

3.2 発振器の構成と性能

CVL発振器は、CVL管のビーム出口側に、口径の小さい凸面鏡を、反対側に口径の大きい凹面鏡を置き、不安定型共振器を構成している。指向性が良くかつ出力も得られやすいように、二つのミラーの口径比を選び、パルス繰り返し周波数が5 kHzのとき、出力が5 W、発散角が0.18mrad以内に50%以上が含まれるビームを得ている。

3.3 光パルスストレッチセルの構成と性能

光パルスストレッチセルは、図11に示すように1枚の部分反射鏡と4枚の全反射鏡で構成し、部分反射鏡を透過したレーザーに対して、部分反射鏡で反射されたレーザーが20ns遅延するように6mの光路長をとっている。部分反射鏡の反射率を $R=0.63$ 、各反射鏡を1回透過又は反射する際の損失を $L=0.01$ とすると、直進するレーザーのピーク値 $(1-R) \cdot (1-L)$ と遅れたレーザーのピーク値 $R^2 \cdot (1-L)^4$ は、ほぼ等しくなり、ストレッチする前の約37%となる。全反射鏡を2巡するレーザーのピーク値は $R^2 \cdot (1-R) \cdot (1-L)^{11} \approx 0.13$ となり、更に20ns遅延してくる。図12にパイプラナ光電管で測定した各段のレーザー出力の波形を示すが、光パルスストレッチセルのあとのパルス幅は、約2倍に伸長している。

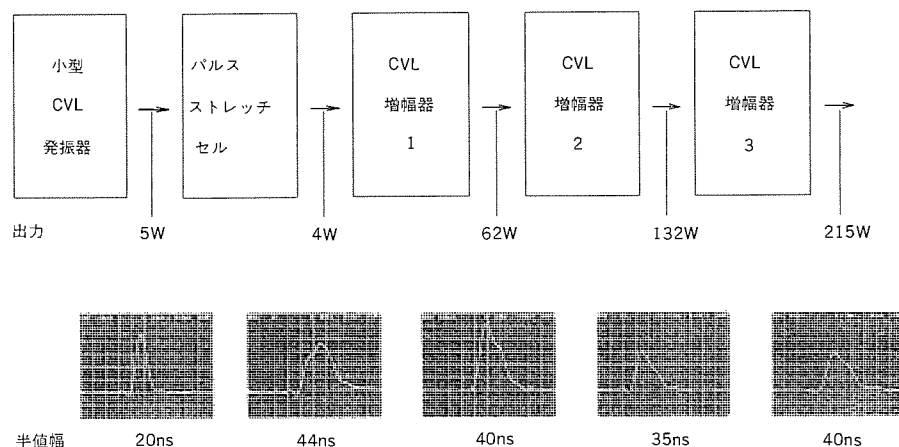


図12. システムの構成及び各段の出力と波形

表1. システムの主構成要素の諸元

	発振器	増幅器1	増幅器2	増幅器3
口径(mm)	18	65	65	65
電極間長(mm)	500	1,800	1,800	1,800
繰り返し周波数(kHz)	5	5	5	5
ガス圧力(Torr)	100	50	50	50
単機発振出力(W)	5	52	53	57
パルス幅(ns)	20	40	40	40

3.4 増幅器の構成と性能

増幅器として用いる前に、CVL管のビーム出口側に反射率が20%の平面反射鏡と、反対側に平面全反射鏡を置き、安定型共振器を構成して、単機の発振出力及びパルス幅を確認している。パルス繰り返し周波数が5 kHzのとき、出力は52~57W、パルス幅は40nsである。図13に増幅特性を示す。これは、各段の増幅器への入力(P_{in})を変えて、出力(P_{out})を測定し、増幅量($P_{out}-P_{in}$)に対する利得($G=P_{out}/P_{in}$)の関係をグラフにしたもので、米国リバモア研究所(LLNL)の増幅器、口径73mm、電極間長1,220mm発振出力37W⁽¹⁾及び口径70mm、電極間長1,520mm、発振出力75W⁽²⁾のデータも記載してある。一般に、増幅器の特性は、次式で表される。

$$\ln G = g_0 L_{eff} - \frac{P_{out} - P_{in}}{E_s \cdot \pi (D/2)^2 \cdot f} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで g_0 : 小信号利得

E_s : 飽和エネルギー密度

L_{eff} : Active Length

D : 口径

f : 繰り返し周波数

単機の発振出力は、平均54Wであるから、Active Lengthは図3から $L_{eff}=680\text{mm}$ とし、 $D=65\text{mm}$ 、 $f=5\text{kHz}$ として式にフィットさせると $g_0=1\%/mm$ 、 $E_s=78.5\mu\text{J}/\text{cm}^2$ となる。これは、米国リバモア研究所の口径73mmの増幅器のデータ⁽¹⁾ $g_0=1\%/mm$ 、 $E_s=70\mu\text{J}/\text{cm}^2$ にほぼ等しい値である。

3.5 システムの構成と性能

表1にシステムの主構成要素の諸元をまとめる。システムの構成と各段の出力を図12に示したが、後段ほど増幅量が増して最終段の出力は215Wで単機発振出力の総和(167W)の129%となっており、MOPA方式の有効性がわかる。なお、図14に、MOPAの出力ビームの発散角を、1mの焦点距離の凸レンズと可変ピンホールを用いて

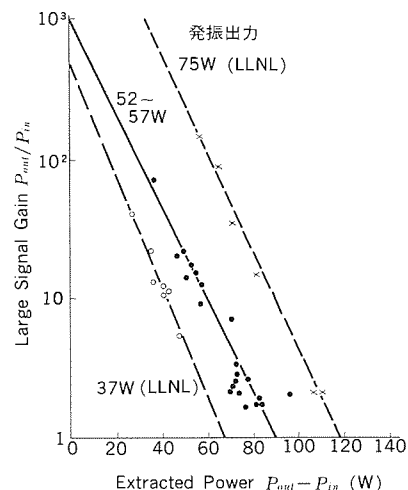


図13. 増幅器の特性

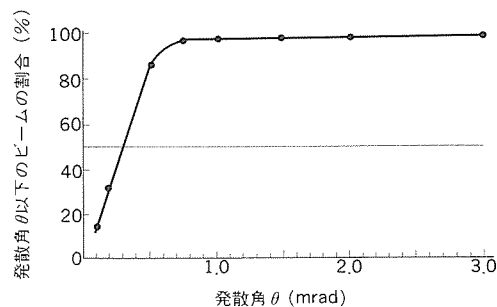


図14. MOPAの出力ビームの発散角

測定した結果を示す。これによると、発散角が0.3mrad以内に50%以上のビームが含まれていることがわかる。また、これまでに増幅器の出力の向上を図り、最大出力が292Wで、276W以上では連続的に5時間以上の運転を記録している。

4. む す び

原子レーザー法ウラン濃縮用色素レーザーの励起源として、大出力、高パルス繰り返し周波数、高効率期待できる銅蒸気レーザーを開発した。これまでに得られた結果と今後の課題をまとめると次のようである。

- (1) CVL単機としては、口径65mm、電極間長1,800mmのCVL管で117W(効率1.51%)、口径80mm、電極間長1,900mmのCVL管で110Wを得た。軸方向及び径方向の温度分布の均一化などによる高出力化、高効率化、及び長寿命化が今後の課題である。
- (2) 高指向性の発振器と54W級の増幅器3台でMOPAチェーンを構成し、出力215Wを得た。これは、単機発振出力の総和の129%であり、大出力化、高効率化にMOPAチェーンシステムの有効性が実証できた。増幅器の出力の増加により最大292Wを得ているが、更に出力の向上と高効率化、長寿命化が今後の課題である。

なお、この開発の一部は、レーザー濃縮技術研究組合の委託によりなされたもので、御指導いただいた同組合の関係各位に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) Laser Program Annual Report-1980 LLNL, Livermore Calif. UCRL-50021-80, p.10-17 (1981)
- (2) M.J.Kushner, et.al.: J.Appl.Phys., 54, (6), p.2970(1983)
- (3) Laser Program Annual Report-1979, LLNL, Livermore, Calif. UCRL-50021-79, p. 9-5 (1980)

炭酸ガスレーザの新応用

木谷 基* 森安雅治**
林 栄吉*
金岡 優*

1. ま え が き

加工用のCO₂レーザ加工機は、高エネルギー密度に集光された赤外領域のビームを応用するため、他の熱加工法では得られない高品質な加工が可能である。CO₂レーザ加工機の現状における加工用途は、平板の金属や非金属などを中心に三次元を含めた切断と高速溶接が多く、この傾向は今後も続くと思われ。

本稿では、これらの用途の中で最近の新しい加工応用に的をしぼり、切断に関してはエアをアシストガスとして用いる切断、新素材の一つであるセラミックスの加工、高速微細穴あけ技術に応用したレーザ式チップペーパー開孔装置を紹介し、溶接ではビームをスキヤニングさせて行う溶接について紹介する。

2. エアをアシストガスに使用した切断

金属材料のレーザ切断では一部の材料を除いて、そのほとんどがアシストガスに酸素を使用しているが、その役割はレーザ照射で加熱された被加工物表面を酸素と反応させてレーザ光の吸収率を高める酸化物を生成させたり、発熱反応を利用して厚板の安定加工や高速度切断を可能にするなどの加工能力向上を図るものである。しかし、酸素はこのような加工の能力を高めるために不可欠である反面、ランニングコストが高いこと、必然的に生じる加工面上の酸化膜が塗装などの後工程に悪影響を及ぼすことなどの欠点もある。

以上のような欠点に対して、アシストガスにエアを使用する加工法が最近とられるようになった。エアを用いる技術は、従来から非金属材料の切断では広く応用されていたが、金属材料の切断の場合は加工部で溶融した金属が切断溝の裏面側に付着する、いわゆるドロス発生が大きな問題であった。このドロス発生の問題に対して、く形ハイピークパルスを出力形態として使用することにより、被加工物裏面に付着するドロス量を大幅に低減させることができたようになった。

図1(次ページ)はアシストガスにエアを使用し、板厚2mmのステンレス鋼(SUS304)を、平均出力を一定にしてパルスピーク値のみを変化させたパルス切断において、加工部から排出される“火花”とドロスの付着状態を示したものである。パルスピーク値が高いほど“火花”はストレートに排出され、また裏面に付着するドロスの量は少なくなり、逆にパルスピーク値が低いほど“火花”の量は減少しドロス付着量は増加する。CW切断では溶融金属のほとんどがドロスとして被加工物裏面に付着し、除去は困難になる。これらの加工現象は、ステンレス鋼や軟鋼の板厚が1.5mm以下の薄板では顕著に現れないが、板厚が2mm、3mmと厚くなるほどパルスの効果が発揮される。一方、ステンレス鋼と軟鋼の材質別では軟鋼の加工での裏面へのドロス付着が起りやすく除去も困難であるため、ハイピークパルスの効果が大きくなる。

ピーク値の高いパルス波形を用いることでドロス付着の少ない切断が可能になる理由としては、以下のことが考えられる。図1に示

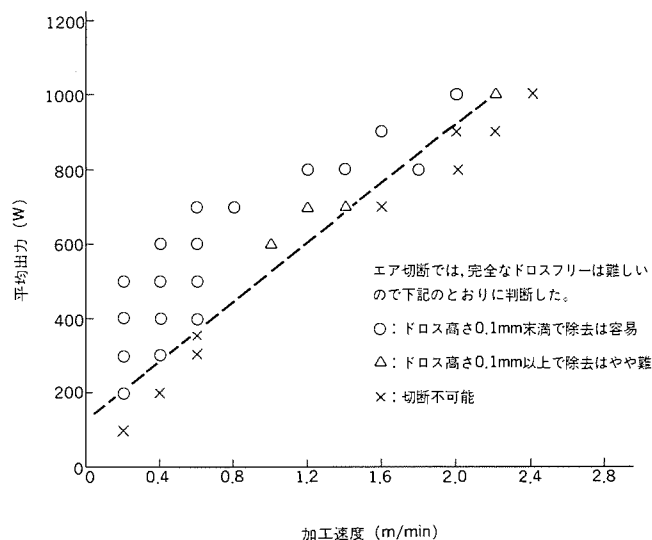


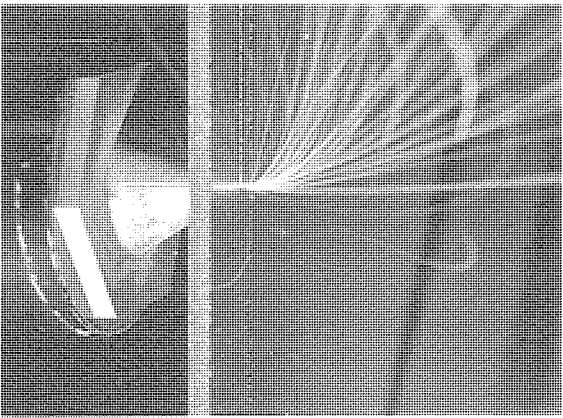
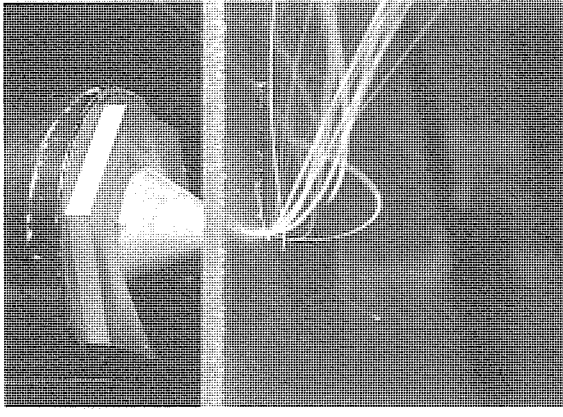
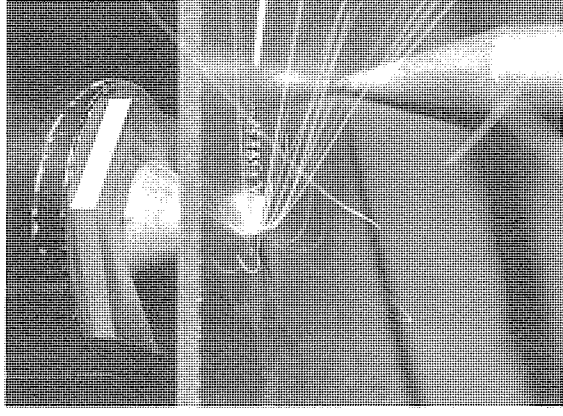
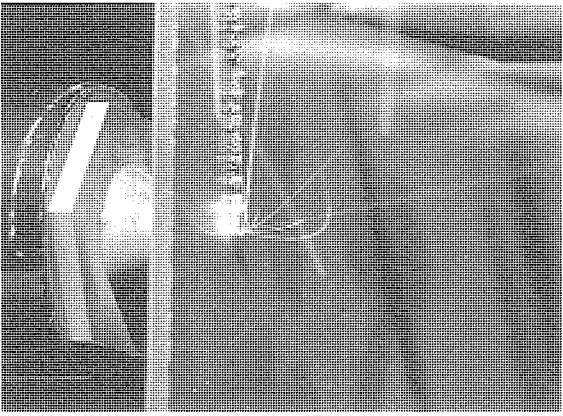




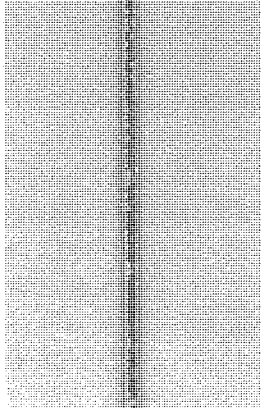
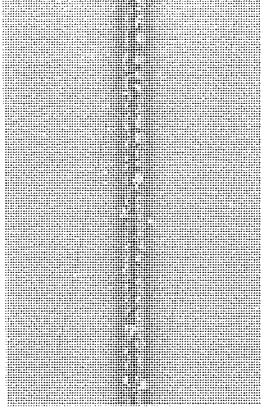
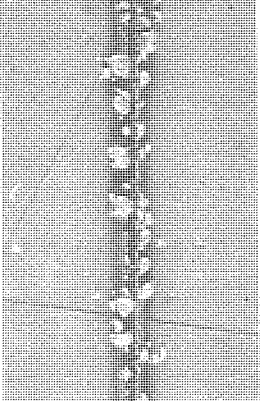
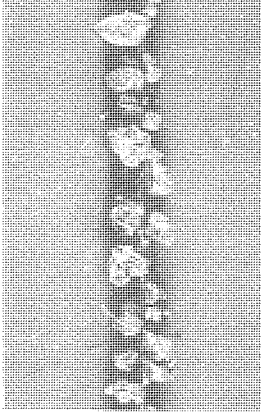
図2. SPCC 2.0mmのエア切断可能領域

した実験結果では平均出力と加工速度が一定であるため、加工部の単位長さ当たりの入熱量はすべて同じであるが、ピーク出力値の高いパルスではパルスON時には高出力であるため、溶融金属は温度が高くなり粘性が低くなるために容易に除去される。さらに、被加工物の切断溝周囲への入熱が少なく母材温度が低い⁽¹⁾ため、溶融金属のぬれ性が悪くなりドロス付着力は低下する。

図2は、板厚2mmの軟鋼をエアを用いて切断したときの裏面に付着するドロス量が比較的少なく、かつ付着があっても除去が容易な加工条件範囲を示したものである。アシストガスを酸素からエアに替えることでガスコストは大幅に削減できるが、酸化発熱反応が抑えられるため、出力に対する最大加工速度能力の低下を招き生産性は幾分下がることになるが、現状のレーザ加工機の動的精度を考慮するとこれは大きな問題ではない。図2に示す実験結果では、出力1kW(パルスピーク2.5kW)のレーザ加工機において約2m/minまでの加工が可能である。

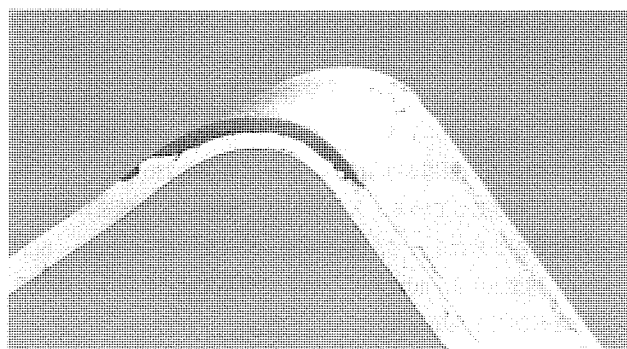
レーザ切断サンプルの塗装膜はく離の問題も、アシストガスにエアを使用し切断面に発生する酸化膜層を減少させることで改善される。図3(a)は、アシストガスに酸素を使用した切断後に塗装を施したサンプル、(b)はエアを使用し塗装を施したサンプルであり、酸素を使用したサンプルでは曲げ加工部の、すなわち、酸化膜が最もはく離しやすい場所で塗装膜はく離を起こしている。アシストガスに窒素を使用する無酸化切断の方法でも塗装膜はく離を防止できるが、ランニングコストを考慮すると、エアによる切断が実用的である。

厚板に小穴を加工する場合にも、エアを使用する技術を応用することができる。厚板の小穴加工で酸素を用いるとバーニングが発生しやすく、通常は板厚と同じ寸法の穴径が安定加工の限界値になる。しかし、エアを使用することで図4に示すように、板厚6mmの軟鋼に直径1mmの小穴加工をすることが可能になる。

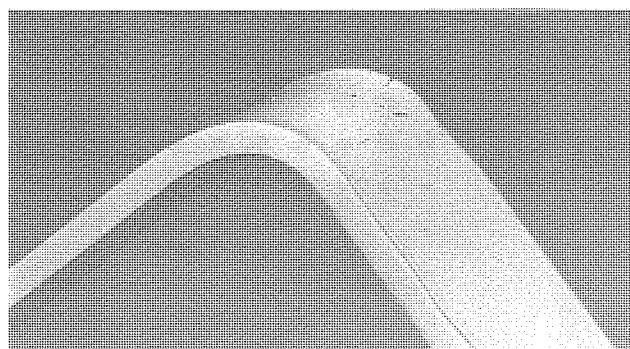
	ハルス切断 (ピーク値2500W)	ハルス切断 (ピーク値1500W)	ハルス切断 (ピーク値1000W)	CW切断
切断時のドロス付着状況				
切断面				
切断部裏面				

加工物 : SUS304, 2mmφ
共通加工条件 : 平均出力700W 加工速度0.8m/min

図1. アシストガスにエアを用いた切断



(a) アシストガスに酸素を使用（塗装膜のはく離発生）



(b) アシストガスにエアを使用（塗装膜のはく離発生せず）

図 3. レーザ切断サンプルの塗装状態

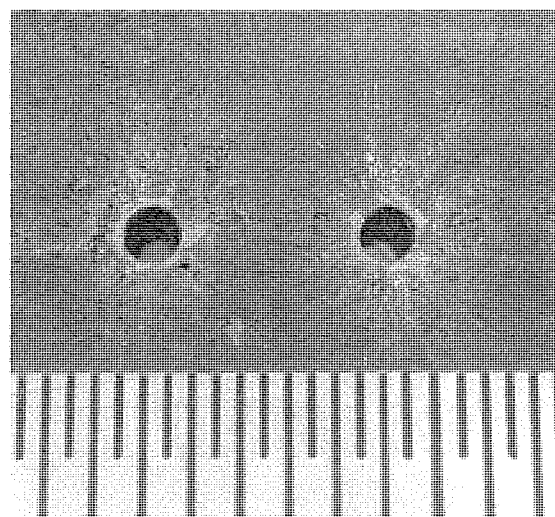
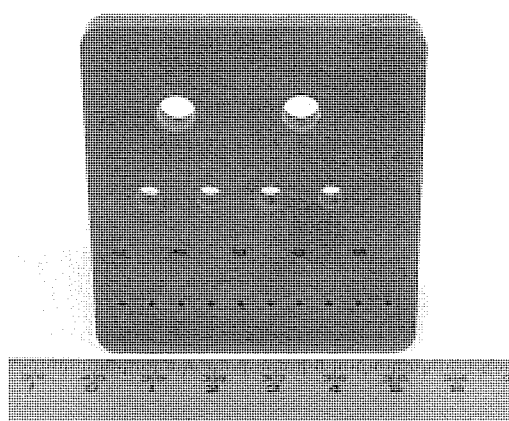
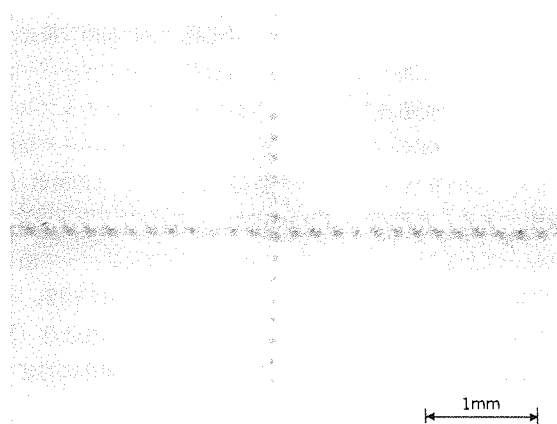
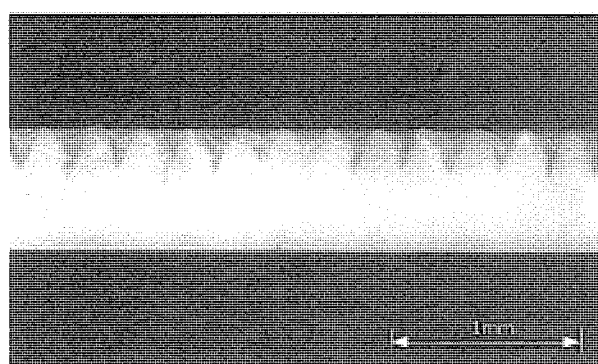


図 4. 板厚 6 mm の軟鋼に直径 1 mm の小穴を加工した例（板厚 6 mm，直径 1 mm）



(a) 表面



(b) 破断面

図 5. アルミナセラミックスのスクライビング (Al_2O_3 : 0.635t)

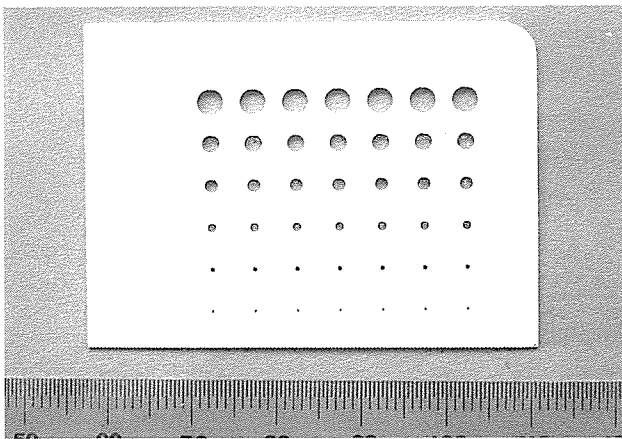
3. セラミックスの加工

セラミックスのような焼結材料は、焼結時に大きく収縮するので、高い精度を得るためには後加工が必要となるが、一般に硬くてもろ（脆）いので機械加工が難しく時間がかかるなどの問題がある。レーザー加工は、集光したレーザー光を用いて溶融または蒸発が非接触で行えるので、機械加工に代わる新しい加工手段としての期待が大きい。

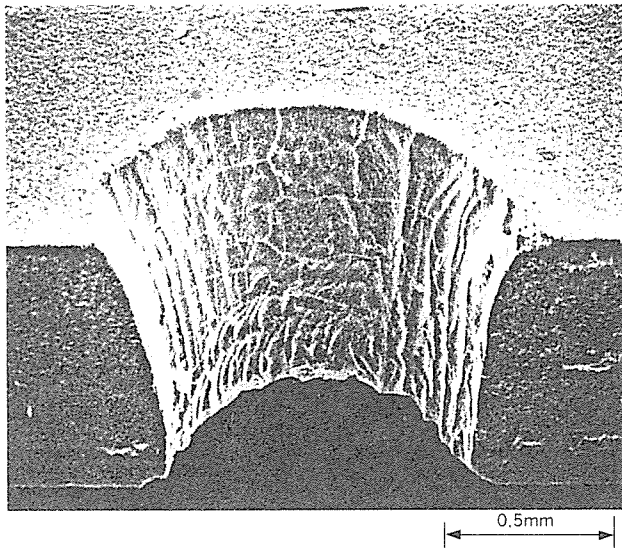
CO_2 レーザー光の波長 $10.6\mu m$ は、一般に絶縁物によく吸収されるのでセラミックスの加工に適しており、スクライビングや切断、穴あけなど幅広い応用が期待されている。

(1) スクライビング

ハイブリッドICなどの回路基板用セラミックスとしては、アルミナ (Al_2O_3)、炭化けい素 (SiC)、窒化けい素 (Si_3N_4) や窒化アルミ (AlN) があり、基板の分割方法として CO_2 レーザーによるスクラ



(a) 外観



(b) 加工面のSEM写真

図6. アルミナセラミックスの穴あけ (Al_2O_3 : 0.635t)

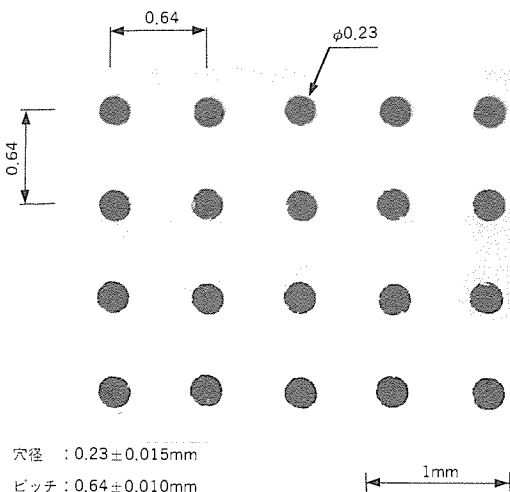


図7. CO_2 レーザによる高精度穴加工例

イピングが広く普及している。図5に Al_2O_3 のスクライビング例を示す。

(2) 穴あけ

回路基板のスルーホール加工(穴あけ)の実用化も進んでいる。図6に Al_2O_3 の穴加工例を示す。 Al_2O_3 は、熱膨張率が大きく耐熱

衝撃性が低いので、加工面には微細クラックの発生も観測されており、微細加工性には限界がある。図7に CO_2 レーザによる $ZnOSiO_3-B_2O_3$ (ZSB)系セラミックス《ミオセラム》の微小穴の高精度加工例を示す。《ミオセラム》はレーザ加工性が優れており、割れることなく加工できる。板厚が0.4mmの基板に直径0.23mmの穴を0.64mmピッチで加工している。入熱をパルス制御により精密に制御し極力抑制することによって、穴径精度(真円度) $\pm 0.015\text{mm}$ 、位置(ピッチ)精度 $\pm 0.01\text{mm}$ のドリル加工と同等又はそれ以上の高精度かつ高効率加工を実現した。

(3) 切断

図8に Si_3N_4 の切断例を示す。 Si_3N_4 や SiC などは、機械構造物材料や金型材料として期待されており、 Al_2O_3 と比べて大きなエネルギーを必要とするが加工性は優れている。しかし、 Al_2O_3 と同じように加工面は変質しミクロクラックが生じるため曲げ強度は低下するが0.1mm程度研削すると強度は回復する。

4. レーザ式チップペーパー開孔装置

紙巻たばこフィルターのチップペーパーに CO_2 レーザによって微細な孔を高速であけた例を次に示す。

チップペーパーの開孔は、たばこの喫味をよりマイルドにするために行われるが、従来は主に機械開孔が利用されていた。より高速で、かつ微細な穴をあけ、また、たばこの銘柄に応じて開孔仕様を容易に変更しうる装置として計10セットのレーザ開孔システムが導入された。

レーザ式チップペーパー開孔装置の1セット当たりの概要を図9に示す。装置はチップペーパー原反の巻出し機、開孔機、切断巻取り機及び5台の1kW CO_2 レーザ発振器で構成され、チップペーパー原反の送り速度をレーザ光のパルス発振と同期させ、原反に40列の微細開孔を行ったあと、所定の幅に切断し巻き取るものである。開孔機は、1台のレーザ発振器からのレーザ光を3段のスプリットミラーにより8本のビームに分割する光分配器、合計40個の集光ヘッド、紙を案内する定盤を備え、高速で通過するチップペーパーの紙面に同時に40列の開孔を行う。巻取り機は開孔されたチップペーパーをたばこ用の所定の寸法に切り出し巻き取る。 CO_2 レーザ発振器は、5台の三軸直交型SD式レーザ発振器で、発振パルス周波数は0.1~4kHzである。装置写真を図10に示す。

CO_2 レーザ発振器のレーザ出力、パルス周波数及びパルス幅などの動作条件の設定、並びに開孔機におけるビーム位置の調整、紙送り速度の設定などで、容易にたばこの銘柄に応じて開孔仕様(開孔径、開孔ピッチなど)を調整でき、将来的な極微細開孔に対応できる。

5. ビームスキヤニングによるレーザ溶接

レーザ溶接は、高速でしかも低ひずみな溶接性を必要とする部品の加工に応用されているが、突合せ溶接でのギャップ裕度が少ないことや、ねらいずれが起りやすいこと、重ね溶接では継手の強度不足などの問題がある。ねらいずれに対しては、溶接線ならいセンサの適用が考えられるが、装置が高価であることやギャップを持つ加工物にはその適用が困難であるなどの問題がある。重ね溶接での継手強度改善のための接合部幅の拡大には、ビームをディフォーカスする方法もあるが、この場合は表面ビード幅は広がるが、内部ビード幅は狭くなる、いわゆるワインカップ状のビード形状になり、

接合部幅の拡大は望み難い。

ここでは、溶接方向と垂直な方向にビードを揺動運動させるビームスキャニング法を用いて、薄板の溶接性能を改善した結果を紹介する。

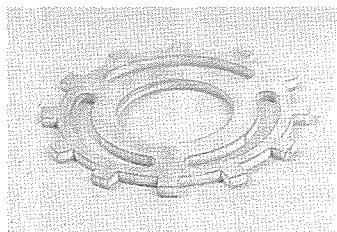


図8. 窒化けい素の切断 (Si_3N_4 : 2 t)

装置の構成

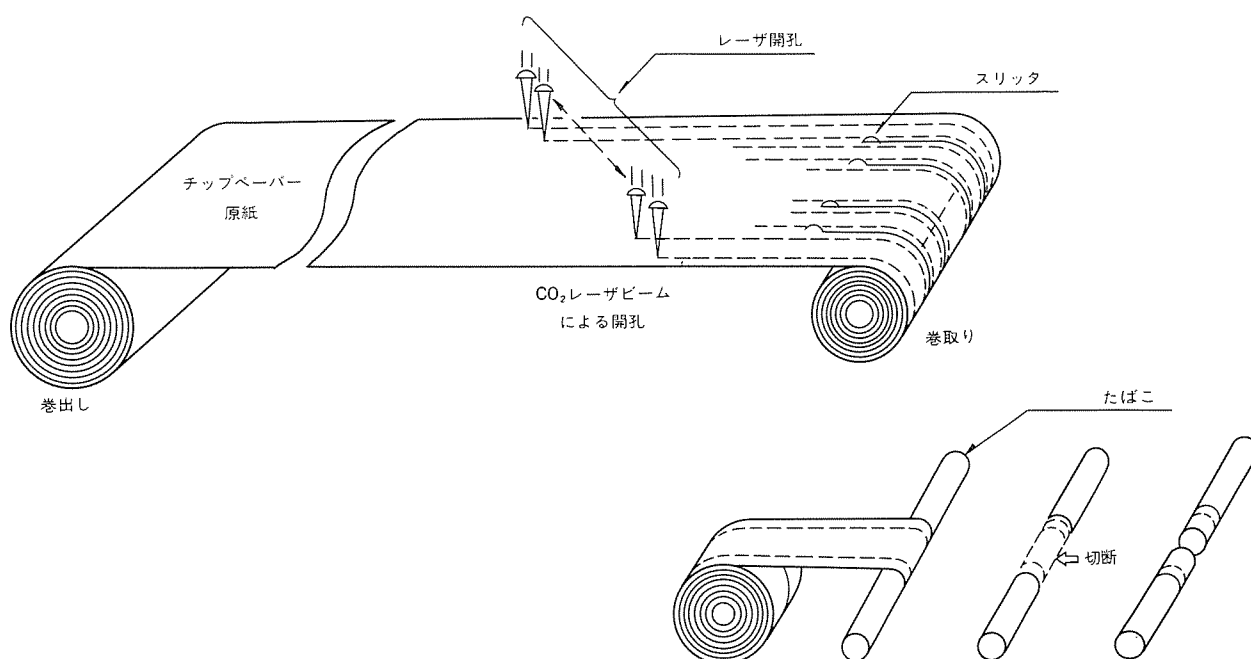
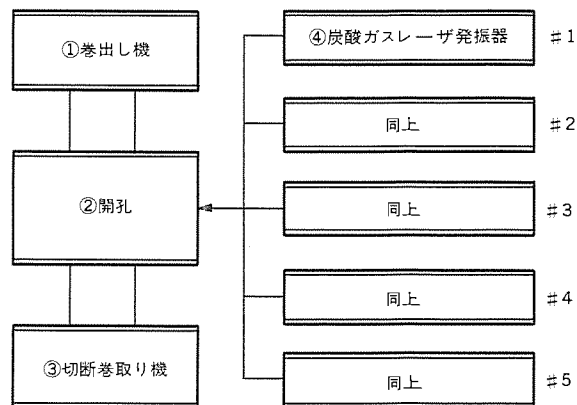


図9. レーザ式チップペーパー開孔装置の概要 (1セット)

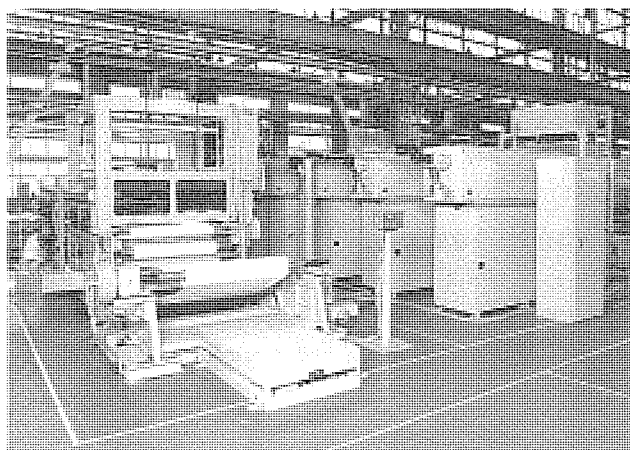


図10. レーザ式チップペーパー開孔装置の外観

5.1 重ね継手強度の改善

図11は、板厚1mmのSUS304と2mmの軟鋼 (SPCC) の重ね溶接におけるスキャニング溶接の結果を示す。界面の接合幅は、スキャニング幅の増加に伴い広がっており、両者の間にはほぼ比例関係が

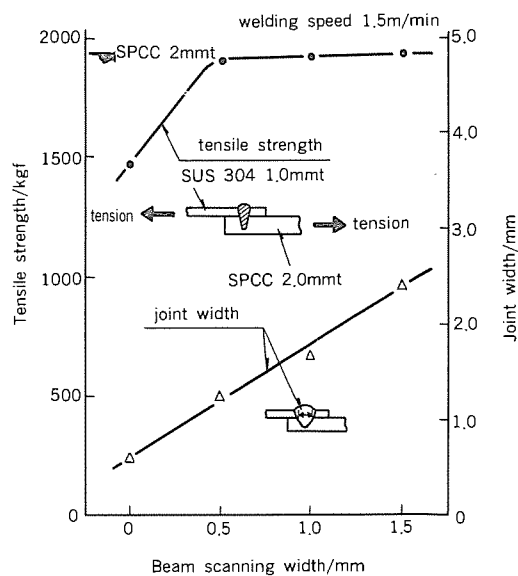
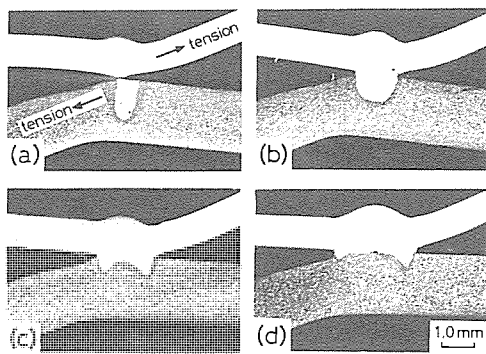


図11. スキャニング幅と引張強度の関係



Results of tension test.

- (a) scanning 0 mm $W_2=0.60$ mm
- (b) scanning 0.5 mm $W_2=1.25$ mm
- (c) scanning 1.0 mm $W_2=1.68$ mm
- (d) scanning 1.5 mm $W_2=2.42$ mm

図12. ビームスキャン重ね溶接のビード断面

gap (mm)	Macrosections (SPCC 1.0mmt) single mode			
	non-scanning	Beam scanning		
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm
0.1				
0.3				
0.5				
0.6				
welding condition	800w 1.0 m/min	850w 1.0 m/min	950w 1.0 m/min	1000w 1.0 m/min

図13. ビームスキャン溶接：スキャン幅とギャップ裕度の関係

ある。接合部強度は、スキャンなしではSPCCの母材強度よりも低い値となり、図12(a)に示すように溶接部が破断する。0.5mmのスキャンで界面の接合幅は1.25mmになり、引張強度も母材強度まで向上した。スキャンが1.0mmと1.5mmでは界面の接合幅は1.68mm, 2.42mmになり、接合幅には十分な強度が得られる。

5.2 突合せギャップ裕度の改善

レーザ溶接においては、開先のギャップが板厚の15%以上になるとアングカットが避けられないという報告があり⁽³⁾、高精度な継手精度の管理が必要になる。現状ではギャップのある継手のレーザ溶接ではフィラーワイヤを送給して溶接する手段がとられている⁽⁴⁾。

図13はビームスキャナを使用し、板厚1mmのSPCCの突合せ溶接におけるギャップ裕度改善の実験結果を示す。ギャップ幅が0.3mm以上になると、スキャンなしではレーザ光がギャップを通過してしまい、溶接不可能になる。一方、スキャンによってビードがアングフィル状態になるが、スキャン幅の増加とともにブリッジ限界も改善される。1.5mm幅のスキャンにおいては、ギャ

Focus beam / joint line offset (mm)	Macrosections (SPCC 2.0mmt) multi mode		
	non-scanning	Beam scanning	
		0.5 mm	1.0 mm
0			
0.25			
0.5			
0.75			
welding condition	2400W 1.0 m/min		

図14. ビームスキャン溶接：

スキャン幅とねらいずれ裕度の関係

ッ幅が0.6mmでも溶接が可能である。

5.3 ねらいずれ裕度の改善

板厚2mmのSPCCを用いて、ねらいずれに対するビームスキャンの効果調べた結果を図14に示す。スキャンなしの場合、0.25mmのねらいずれで融合不良を生じ、0.5mmのねらいずれで溶接不可能となった。一方、スキャン幅0.5mmでねらいずれ0.25mm, スキャン幅1.0mmでねらいずれ0.75mmまで融合不良のない良好な溶接ビードを得ることができる。さらに、スキャン幅を大きくすることで、ねらいずれ裕度もより改善されることが期待できる。

以上のように、ビームスキャナをレーザ溶接に応用することで、レーザ溶接では本来不利とされていた重ね継手強度、突合せギャップ、ねらいずれなどの問題を改善することができ、レーザ加工の溶接用途分野への応用がより一層期待される。

6. む す び

以上、CO₂レーザ加工の新応用について紹介した。レーザ加工の普及にはレーザの優れた特性を生かした新たな加工分野を広げることと、エアを切断に利用するなどのコスト低減を図り生産性を増すための技術が重要になる。この両技術がある程度のバランスを保ちながら伸展することが、今後のより一層のレーザ加工の普及に必要であろう。

参 考 文 献

- (1) 木谷ほか：三菱電機技報，61，No.6（昭62）
- (2) ファインセラミックス協会：FC REPORT 4，No. 7，p. 9（1986）
- (3) S. L. Enged：Weld Design and Fabrication，62（1978）
- (4) 川澄：レーザ加工技術（1985）110，日刊工業新聞社

LD励起固体レーザとその応用

1. ま え が き

レーザ技術は、加工・情報処理・計測・医療など、広範な分野への応用が広がっている。特に、Nd:YAGレーザ及び炭酸ガスレーザに代表されるパワー関連の応用は、最も実用化の進んでいる分野の一つである。一般に、光ファイバが利用でき、炭酸ガスレーザよりも一けた発振波長の短いYAGレーザは、電子部品や半導体の微細加工に多用されており、高効率で大出力が得られる炭酸ガスレーザは各種材料の切断・溶接・表面処理に威力を発揮している。YAGに代表される固体レーザでは、熱的要因によるレーザ媒質のひずみが出力ビームに与える影響が大きく、集光性の観点からみると、その特長を十分に生かし切れていない状況であった。しかし、近年、新結晶の開発、スラブ型レーザ、LD(Laser diode)励起などの新技術の開発が相次ぎ、“固体レーザのルネッサンス”とも呼ばれるほどの急速な技術進歩がみられる。

LDによる固体レーザの励起方式は、1960年代に既に液体窒素の温度下において実験された例があるものの、一般的なフラッシュランプ励起に比べ大幅な効率の改善はみられなかった。ところが、80年代のMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)技術の導入により、高効率、大出力LDが開発されるとともに、LD励起固体レーザの研究は一気に実用段階のものへと変化した。特に、AlGaAs系のLDはその出力波長が、Ndイオンの強い吸収帯である810nm付近に同調が可能であり、固体レーザ励起用光源として有望である。LDによる固体レーザ励起方式には、従来の一般的なランプ励起方式と比較すると、次の利点がある。

- (1) 総合励起効率が高い。
- (2) レーザ媒質への入熱が低く、良質のビームが得られる。
- (3) 励起光源の寿命が長い。

本論では、励起用に開発した高出力LDと、それを応用したLD励起YAGレーザの開発状況について述べ、さらにその応用について展望する。

2. 固体レーザ励起用LDの開発

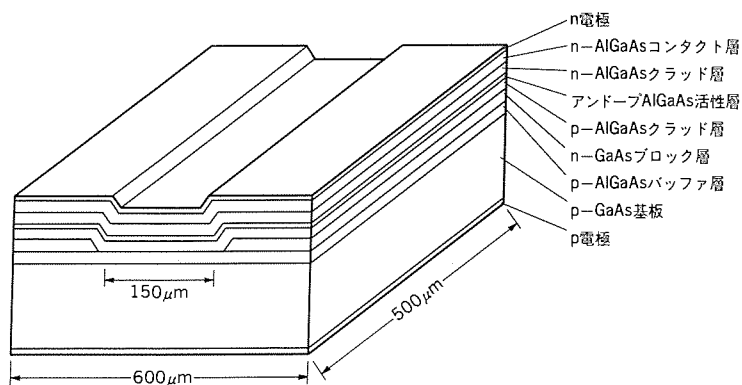


図1.(a) 固体レーザ励起用SBA型半導体レーザの構造図

現在、使用されているLDの多くは連続動作で数十mWまでの光出力を単一基本横モード発振するものがほとんどである。一般に、LDの光出力の限界は、

- (1) 光密度が高くなるとLDの光出射端面自身が破壊される現象(COD: Catastrophic Optical Damage)
 - (2) 横基本モード発振を保障するためのレーザ導波路寸法を大きくできないという制限
 - (3) 活性部温度上昇による利得の熱飽和現象
- とから決められている。固体レーザを端面励起(End pump)方式で励起し、その基本モード発振を期待する場合には、励起用LDの横モードも基本モードであることが望ましいが、側面励起(Side pump)方式を採用する場合には、横モードはほとんど問題にされない。以下に、側面励起用を中心に端面励起用にも触れながら開発状況を概説する。

2.1 LDの構造

Nd:YAGの強い吸収が810nm近傍にあることから、励起用LDにはAlGaAs系の材料を用いることになる。この場合、CODと寿命を考慮して1MW/cm²に内部光密度を抑える必要がある⁽¹⁾。高出力化のためには、出射端面の反射率を数%に下げることがよい⁽²⁾。この場合、出力と内部光とは同程度となるので、出力1Wを実現するには100μm²程度の出射面積が必要になる。これまで、我々は5mW級の基本モードレーザとしてSBA(Self-Aligned Bend Active Layer)型LD⁽³⁾を開発して、製作プロセスや寿命についてのデータを蓄積してきている⁽⁴⁾。活性領域の幅を図1(a)に示すように、従来の1.5μmから150μmに広げ、これに対応することにした⁽⁵⁾。活性領域の長さ(共振器長)は、動作電流密度の低減のため通常より長い500μmにした⁽⁶⁾。

LDの高出力化におけるもう一つの問題は、接合部の温度上昇をいかに避けるかである。発熱をさけるのはもちろんであるが、発生し

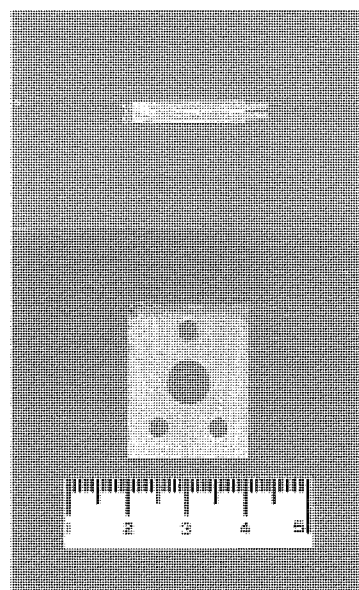


図1.(b) 1W級LD写真

た熱を効率良く逃がすことも重要である。特に、側面励起の場合には、多数のLDを高密度に並べて動作させる必要がある。図1(b)に示す写真は、このような思想で試作した1W級LDの一例である。接合に近い面をヒートシンク面に、はんだ付けして熱抵抗を低減すると同時に、放熱体の金属にも水を流す工夫がしてある。

2.2 光出力-電流特性

図2はこのLDの光出力-電流特性である。25°Cにおける連続(CW)動作のしきい値電流は約1Aで、約2.1A流すと1Wの出力が得られる。幅0.2msのパルス動作では、2Aで1.2W、3Aで2W以上の光出力が得られる。

2.3 発振スペクトル

図3は発振スペクトルの一例を、Nd:YAGの吸収スペクトルと対比して示したものである。LDの縦モードは多モードで発振しているため、そのスペクトルには5nm程度の広がりがある。ピーク波長が $807\pm 3\text{nm}$ であればYAGレーザ励起用に十分使えると考えられる。側面励起方式で励起する際には、多数の素子を直列に接続して駆動するので、同一電流に対してほぼ同程度の光出力と波長が同時に得られる組合せを選ぶ必要がある。発振波長の温度依存性は、 0.35nm/deg であることが確認されたので、全体の波長は温度を加減することで、ある程度調節することができる。

2.4 発振横モード

図4は固体レーザ励起用高出力LDの遠視野像を示す。活性層の垂直方向の半値全角は25度でガウス型に近いが、平行方向のそれは12度で小さなピークの集りであることがわかる。近視野像にも活性層に平行方向には数個から20個程度の輝点が見られ、これは活性領域の幅が $150\mu\text{m}$ と広いのに対して、多数の高次横モードが許容されていることで説明できる。

端面励起方式で励起する場合には、励起用LDも基本横モードである方が望ましい。我々は、LDの射出端面に部分的な高反射率コーティングを施し、これをモードフィルタとして作用させ横モードの基本化を図っている⁽⁷⁾。初期的な検討結果では、光出力0.4Wでも半値全幅1.5度程度の単峰性の遠視野像を得ている⁽⁸⁾。

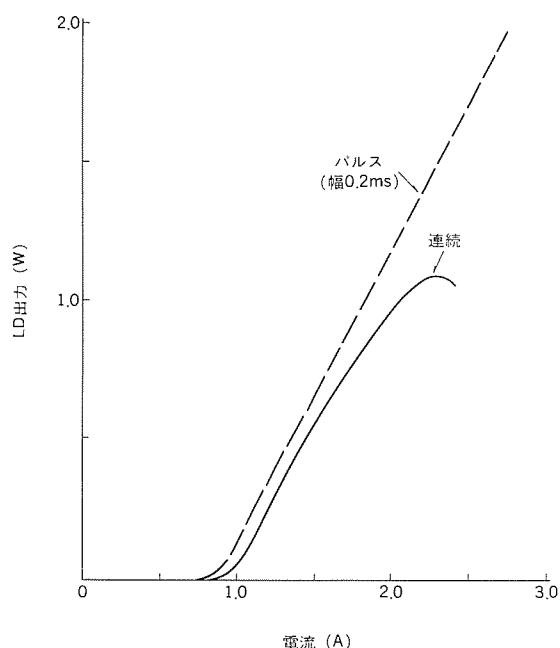


図2. 光出力-電流特性

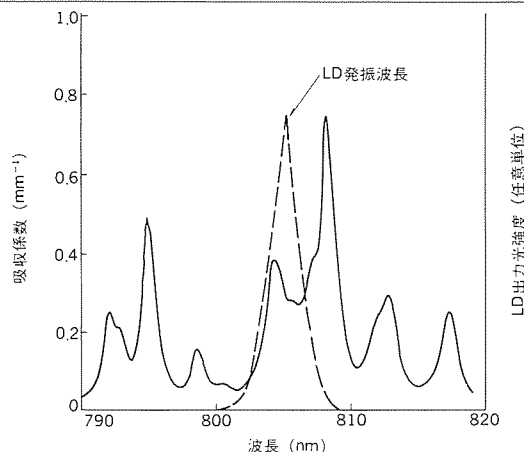


図3. Nd:YAGの吸収スペクトル (Bingkun Zhou et al.: OPTICS LETTERS, 10, p. 62 (1985) による。)

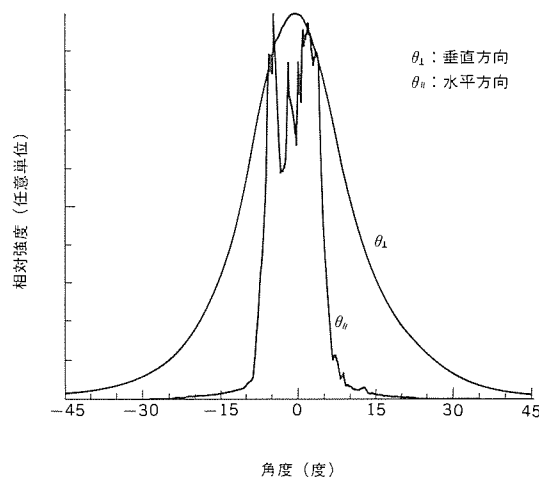


図4. 遠視野像

3. LD励起固体レーザの開発

LDを用いて固体レーザを励起する方法は、励起光を光軸と同軸方向に照射する端面励起方式と、側面から照射する側面励起方式に大別できる。端面励起方式は、LD光をレンズなどにより固体レーザ媒質に集光照射するもので、固体レーザのモードボリューム内に効率的に励起光を注入できる特長をもつ。このため基本モードを高効率で発振することが容易にできる。一方、側面励起方式は、LD光をレーザ媒質の側面から直接照射するもので、光軸方向に複数のLDを配置できることより大出力化に適している。

3.1 端面励起型発振器

端面LD励起YAGレーザ発振器の構成図を図5に示す。LD光をコリメートレンズ ($f=6.5\text{mm}$, $\text{NA}=0.615$) で拡大平行化した後、集光レンズ ($f=65\text{mm}$) でYAGロッド ($\phi 3\times 7\text{mm}$, Nd濃度1at%) に集光照射し、レンズ励起を行う。ロッド端面は共に平面であり、入射側端面は、LD光 ($0.8\mu\text{m}$) に対し全透過、YAG光 ($1.06\mu\text{m}$) に対し全反射コートが施されている。このロッド端面と取出し鏡 (反射率95%, 曲率50mm) により光共振器が形成され、励起エネルギーはYAGレーザ光に変換され、取出し鏡から出力される。なお、LD光の波長、出力安定化のため、ペルチェ素子によりLDの温度制御をしている。この温度制御により、LDの中心波長をそれぞれ802, 805, 808.5nm (半値全幅5nm) と変化したときの発振特性を図6に示す。図からレーザ励起効率に対応する物理量を示す微分効率、励起波

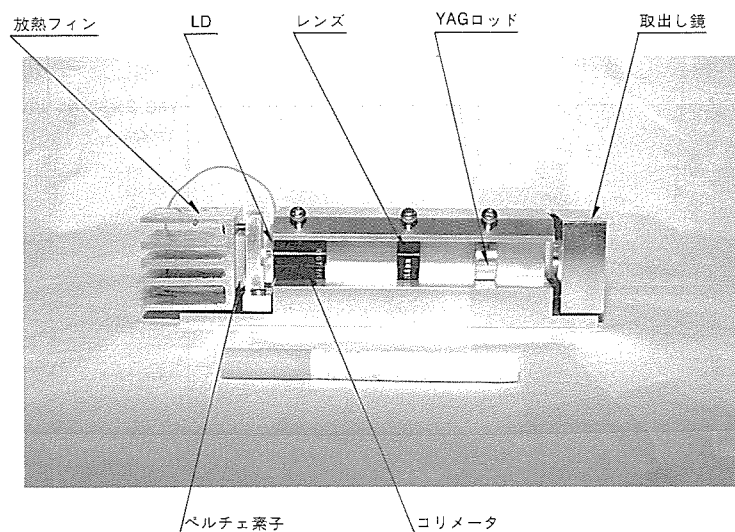


図 5. 端面励起型発振器の構成

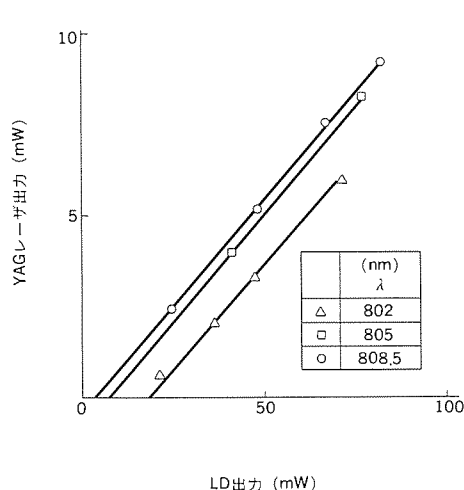


図 6. 発振特性に与える励起波長の影響

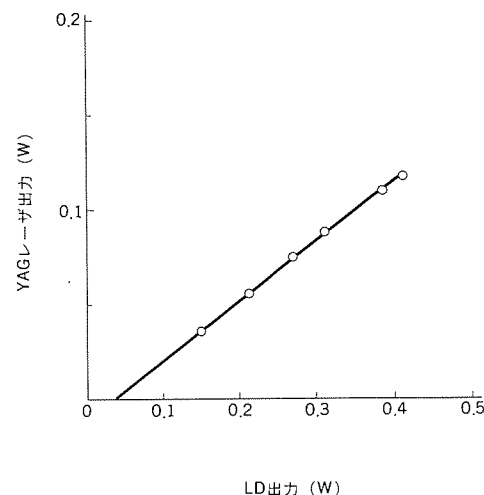


図 7. 端面励起型発振特性

長によらずほぼ一定である。この微分効率と共振器損失を考慮して励起効率を見積もると、LDによるYAGレーザー励起効率は約40％程度と評価される。また、発振しきい値は808nmに近いほど低くなっている。各励起波長におけるYAGロッドへの吸収率を実測した結果、約5nmの波長広がりをもつLDの吸収係数は中心波長802, 805, 808.5 nmにおいて、それぞれ約0.1/mm, 0.275/mm, 0.375/mmと評価された。実験範囲において、808nmに近いほどYAGロッドへの吸収係数が高く、吸収長が短くなる。吸収長が短い場合、励起光の集光点位置で主に吸収が行われ、したがって実効的な励起断面積は小さくなる。発振しきい値は、励起断面積（励起強度の逆数）に比例する。以上により、図 6 に示す発振しきい値の励起波長依存性は説明される。発振特性に与える励起波長の影響を要約すると次のようになる⁽⁹⁾。

- (1) レーザ励起効率は励起波長に依存せず、ほぼ一定であり約40％程度と評価される。
- (2) 発振しきい値に与える励起波長の影響は、吸収長の違いによる実効的励起断面積の差として現れる。励起波長と吸収波長のマッチングにより発振の低しきい値化が実現される。

現在、端面励起型発振器において図 7 に示すように、最大420mWのLD出力において、120mWのYAGレーザー出力が得られている⁽¹⁰⁾。

3.2 側面励起型発振器

LD励起固体レーザーとその応用・葛本・八木・池田

側面LD励起YAGレーザー発振器の構成図を図 8 に示す。レーザー共振器は、全反射鏡（平面鏡）と取出し鏡（曲率30cm, 反射率98％）からなり、共振器長は約10cmである。YAGロッド（ $\phi 2 \times 35$ mm, Nd濃度1at％）の両側面に置かれた合計15個のLDによりレーザー励起される。両側のLDは光軸方向に互い違いに配置され、LDの入射位置はYAGロッドの中心軸からそれぞれ0.6mmずつ外した構成となっている。LD光の導入孔及びロッドハウジングの内面は金コートが施され、ロッドとハウジングの間には、励起光に対し透明で、かつ熱伝導性の高い材料が充てんされている。これらの構成により、励起強度分布の均一性の向上、LD光の反射損失の抑制、YAGロッドの応力のかからない有効な放熱がなされている。

得られた発振特性を図 9 に示す。最大8.4WのLD出力により1WのYAGレーザー連続出力が安定に得られている⁽¹¹⁾。実験から得られた微分効率は23.5％である。この値は、約2％の共振器損失を考慮すると、端面励起のそれに匹敵すると評価される。この技術により、側面励起による高効率、高出力YAGレーザー発振器開発の見通しが得られたと考える。

4. LD励起固体レーザーの応用

LD励起固体レーザーの製品化の歴史は浅く、その応用分野は、現在のところ小型の研究用光源としての用途にほぼ限られている。今後、

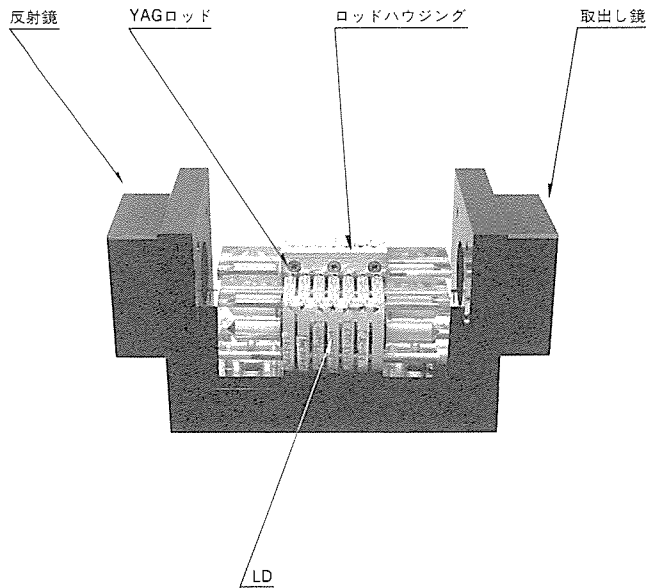


図8. 側面励起型発振器の構成

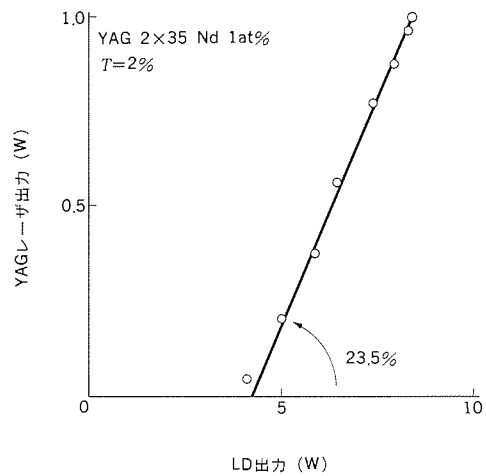


図9. 側面励起型発振特性

高効率、コンパクト、長寿命で集光性の良いレーザとして、通常のYAGレーザをりょうが(凌駕)する精密加工用レーザ熱源、あるいはレーザメスへの応用がまず第一に考えられる。さらに、LDの制御によって高速のレーザ出力制御が可能であること、ビーム品質が良く、いわゆる雑音の少ないレーザが実現できることから、レーザレーダや通信用の光源としての応用も期待される。

また、近年進歩の著しい波長変換素子との組合せによる可視～紫外固体レーザ⁽¹²⁾は、新しいレーザ応用分野を開拓するものとして大きな期待が寄せられている。例えば、2倍高調波 ($0.53\mu\text{m}$) ではアルゴンレーザなどに代わる小型固体レーザとして、レーザプリンタ、光ディスク書込み光源、ディスプレイ、医療用、計測用など、また4倍高調波 ($0.25\mu\text{m}$) ではエキシマレーザに代わるステッパ用光源など広範な分野が展望される。さらに、高出力化してプラズマによるX線発生装置の光源、原子法ウラン濃縮用の光源、さらにレーザ核融合の超高出力ドライバ光源として、その応用を考える壮大なプラン⁽¹³⁾も提案されている。

5. む す び

LD励起固体レーザの技術の進歩を、LDそのものの開発を含めてまとめ、さらにこの方式のレーザに期待される応用分野を概説した。LD励起固体レーザは、大きな可能性を持つものであるが、今後の進展は、LDの量産、低価格化にかかっている。見方をかえれば、量産を先導する強力な応用分野の発掘が極めて重要なかぎ(鍵)であるといえよう。いずれにしても、LD励起固体レーザはその進展が高性能、高出力LDそのものの発展を促すものでもあり、“固体レーザのルネッサンス”を担う重要な旗手として、熱い期待を寄せられているものである。

参 考 文 献

- (1) W. Susaki and K. Ikeda: High Power AlGaAs and InGaAsP Laser Diodes, OEC'86, (held at Tokyo on July 1986), A5-1
- (2) 池田ほか: 高効率, 高出力 AlGaAs/GaAs半導体レーザ, 信学技報, OQE81-121, p.57 (1982)
- (3) Y. Mihashi et al.: A Nobel Self-Aligned Laser with Small Astigmatism Grown by MO-CVD, in Proc. of 17th. Conf. Solid-State Devices and Materials (held at Tokyo), p.60
- (4) 永井ほか: レーザプリンタ用SBAレーザ, 信学技報, OQE87-171, p.15 (1988)
- (5) 鴨原ほか: 高出力SBAレーザ, 63年度春季応物関係連合講演会, 30P-7Q-16, p.903 (1988)
- (6) T. Aoyagi et al.: High-Power Operation of Long-Cavity Phase-Locked Laser Arrays, Electron. Lett.22, p.1396(1987)
- (7) N. Kaneko et al.: Transverse Mode Control in Wide-Single-Stripe Lasers by Loading Modal Filters, IEDM (held at San Francisco, Dec. 1988)
- (8) 鴨原ほか: モードフィルタを装荷した高出力半導体レーザ, 電子情報通信学会, 技術研究報告 (1988-11)
- (9) 葛本ほか: LD励起YAGレーザ, 電気学会, 光・量子デバイス研究会, OQD-88-9 (1988)
- (10) 葛本ほか: LD励起YAGレーザ, 電気・情報関連学会連合大会, 16-5 (1988)
- (11) M. Kuzumoto et al.: CW Operation of YAG Laser by Off-Centred LD Side Pumping, CLEO '89
- (12) R. L. Byer: Diode Laser Pumped Solid-State Lasers, SCIENCE, 12, 239, p. 742 (1988)
- (13) 金辺ほか: 固体レーザの高効率, 高出力化, 電気・情報関連学会連合大会, 16-7 (1988)

レーザ応用測距装置

高嶋和夫* 穂積雄二+
金田 一**
植木勝也***

1. ま え が き

各種の産業分野において距離情報は、速度や温度情報などと並んで重要な物理情報の一つである。すなわち、距離情報から、長さ・変位・厚さ・幅・形状など、生産設備類の制御や製品の出荷検査などに不可欠な諸量が判明する。このため、現在では多種多様の距離測定装置が発表されている。特に光方式の測距装置は、原理的に非接触で高精度かつ高速測定が可能であることから広く用いられている。

当社では高指向性や単色性、集光性などの特長を合わせ持つレーザ光を応用した高性能・高機能型測距装置の開発、実用化を進めている。本稿では各種産業分野向けに完成した種々のレーザ応用測距装置について紹介する。

2. レーザによる距離測定の原理

2.1 三角測量法

図1に三角測量法を用いた距離センサの原理を示す。光源から放射される光束を投光レンズにより集束させ、光スポットとして対象物体に照射する。この光スポット像を受光レンズにより撮像し、検出デバイス上に結像する。対象物体が変位すると検出デバイス上での光スポット結像位置が変化するので検出デバイス出力から対象物体の位置を知ることができる⁽¹⁾。

検出デバイスは、CCD (Charge Coupled Device) のような受光面分割型か、あるいはPSD (Position Sensitive Device) で代表される単一受光面型に大別される。どちらを用いるかは距離センサの使用状況により決定するが、一般産業分野においては、高速応答性や高信頼性(変調光を用いた外乱光分離ができる。)を確保でき、かつ、高精度・低コスト化が可能などの利点からPSDを用いることが多い。

一方、光源には半導体レーザが多用されている。これは、半導体レーザが、①集光性に優れるので前記光スポットの径を小さくでき精度向上が図れる、②単一波長であるので光学フィルタにより信号光のみ選択受光でき背景光の影響を受けにくくできる、③小型ながら高出力が得られるので検出ヘッドの小型化が可能、などの点に優れているからである。

この測距方式は、数mmから数m程度の測距に適用でき、高精度化が図れる割には光学系・処理系が簡単で済み、装置が低コストで実現できるので産業分野全般で広く利用されている⁽²⁾。

2.2 時間差法

光波を用いた測距装置としては、発光ダイオード(LED)を用いて比較的近い距離を数mmの精度で測定できる装置が建築関係の分野で用いられている。しかし、この場合の目標としては、コーナキューブ(入射した光の方向に光を反射する光学素子)を用いる必要があり、特定の目標しか測距できない。

遠距離の任意の目標までの距離を測定する場合には、一般的にパ

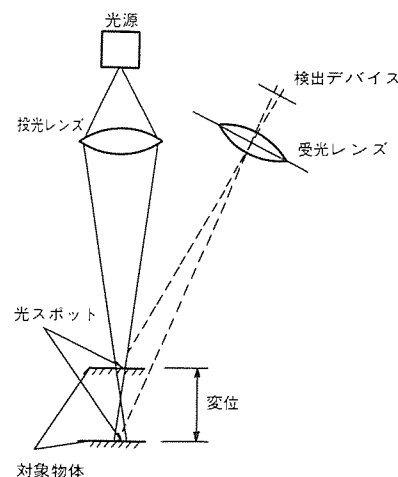


図1. 三角測量方式の測距原理図

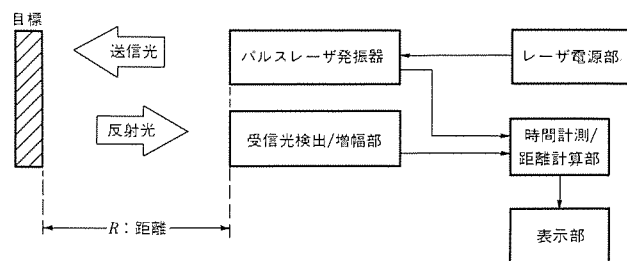


図2. 時間差方式レーザ測距装置の系統図

ルスレーザと時間差法とを組み合わせた装置が用いられている。時間差法による測距の原理は、電波を用いたレーダと同じであり測距装置内部で高いせん頭値を持つレーザパルスが発生させて、これを目標に向けて送信する。ここでレーザパルスを送信した時刻と、目標からの反射光を受信した時刻との時間差を測定すると、目標までの距離は、次の式によって求めることができる。

$$R = c \times t / 2 \dots\dots\dots (1)$$

ただし R : 目標と装置との距離 (m)

c : 光速 ($2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$)

t : 送受信パルスの時間差 (s)

図2に時間差法を用いたレーザ測距装置の系統図を示す。図中のパルスレーザ発振器によって発生した高いせん頭値を持つレーザ光は、大気中を伝搬して目標を照射する。目標からの反射光は、再び大気中を伝搬して装置に入り、受信光検出/増幅部により受信信号に変換される。一方、時間計測/距離計算部は、レーザ光が装置から発射された時刻から受信信号が入力されるまでの時間を計測して距離を計算し、これを表示器に表示させる。

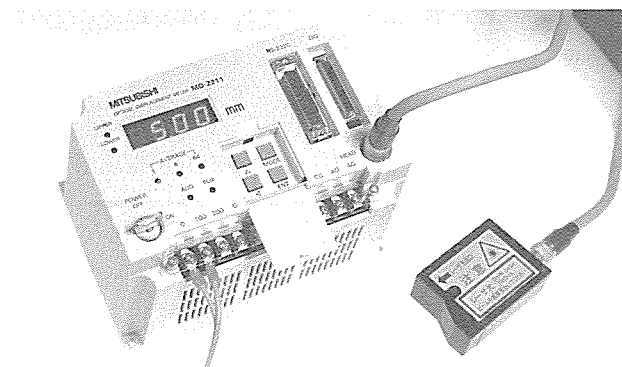
3. 各種用途別レーザ応用測距装置

3.1 汎用

図3に示すレーザ測距装置は、いずれも三角測量方式に基づくものでマイクロプロセッサを内蔵インテリジェントな機能を持って



(a) 高級機MD-1211型



(b) 汎用機MD-2211型

図3. レーザ測距装置の外観

いる。この機能により、ラインの種々のニーズに対応可能となり検査・計測用の非接触計測器としていろいろな業種のFAラインに広く適用できるようになる。MD-1211型は、精度と測定速度の点で高性能な高級機であり、MD-2211型は、コストパフォーマンスに優れた小型・軽量の汎用機である。

三角測量式のレーザ測距装置をFAラインに広く適用する場合、次の技術的課題があると考えられる。

- (1) 測定面又はセンサヘッドの一方を移動させると、測定面上で光スポットの移動に伴い、測定面の不均一性や面の傾きなどにより、受光量が極端に変化する。
- (2) 周囲環境の温度変化に伴うセンサヘッドを構成する材料の伸縮や電子回路のドリフトにより、温度ドリフトが生じる。
- (3) FAラインの環境は業種によって大きく異なり、温度ドリフトのほか、外乱光、電磁ノイズ、じんあいなどに影響されやすい。

(1)の問題は、マイクロプロセッサで光位置検出素子への受光量を常時モニタし、半導体レーザの放射パワーを高速に制御する方法及び受信回路のアンプのゲイン（利得）を自動で最適設定する方法で解決した。また、(2)と(3)の問題については、半導体レーザの駆動にパルス変調方式を採用し、マイクロプロセッサの処理で外乱光や電子回路のドリフトを除去した。また、センサを構成する材料の伸縮などに起因する温度ドリフトが小さくなるように光学系の設計を工夫した。センサヘッドの振動やじんあいなどに対する耐環境性についても、設計及び組立ての両方で種々の工夫・配慮を行った。

MD-1211型、MD-2211型の特長及び機能を次に示す。

- (1) 高精度（測距範囲の0.1%）で温度安定性（0.01%/℃）に優れている。
- (2) 反射光量自動調整機能、ゲイン調整機能により、移動する対象物でも精度良く測れる。
- (3) 2台の組合せにより、シート材などの厚み計測や部品の段差測

定を行うことができる。

- (4) デジタル インタフェース（並列とRS-232C）、設定値（上限、下限）に対する超過検出機能など、付属機能が付いている。

図4に高級機MD-1211-40を用いた人間の歯が（牙）模型の三次元形状計測の例を示す⁽³⁾。この応用例では、歯牙模型の複雑な三次元自由局面をかなり精密に計測かつ再現できている。

3.2 鉄鋼分野

鉄鋼分野における三角測量式レーザ測距装置の代表応用例として熱延平たん度計について紹介する。熱延鋼板の形状は、圧延時の板幅方向圧下量の不均一などにより、耳波あるいは中のびと呼ばれる（総称して以後板波と呼ぶ）形状不良が発生する。図5(a)に鋼板の走行方向に発生している板波の断面を示す。熱延平たん度計は、このような鋼板の形状不良を非接触で測定するもので、図5の板波をレーザ測距装置で計測し、ある一定走行区間における板波の弧長を演算することが原理である。図6に熱延平たん度計の構成図を示す。熱間圧延ライン上の板幅方向にレーザ測距装置を複数台設置し、走行する鋼板の複数箇所において変位を測定する。鋼板の一定走行距離ごとの変位量から板波の弧長を式(1)に基づき演算し、板幅方向の複数弧長データの差から鋼板ののび率を式(2)で演算する。

$$L_n = \sum_{i=1}^n \sqrt{(Y_i - Y_{i-1})^2 + V_i^2 (t_i - t_{i-1})^2} \dots\dots\dots(2)$$

$$\beta_n = \frac{L_n - L_{\min}}{L_{\min}} \times 100 \dots\dots\dots(3)$$

L_n : 板幅方向 n 点における弧長

L_{\min} : L_n の中での最短弧長

β_n : のび率

ところが、板波の弧長は鋼板の振動を含んでおり、この振動が板幅方向において同相同量と仮定できる場合のみ、板幅方向の複数箇所の弧長差演算により鋼板振動分を除去することができる。しかし、実際の圧延ラインでは、この仮定は成立しがたく実用的な振動除去対策が必要とされる。この平たん度計では、走行方向に Δl 離れた2点間の変位差を同時測定するツインビーム方式を採用することにより、鋼板振動の影響を効果的に除去している。その原理図を図7に示す。鋼板上 Δl 間の変位差 Δh を同時測定できるように、2本のレーザ光を照射し、その反射光を二つの受光系で結像し2点の距離を同時演算する。二つの距離データの差から振動分が除去された変位差 Δh が求められる。この Δh から式(1)、式(2)により鋼板弧長及びのび率を演算すれば、振動を除去した真の鋼板の形状を測定することができる。

また、板波を正弦波と仮定し、その波形に振動分が重畳しているとした場合、その微分演算は板波形状の傾きを求めたことになる。すなわち、微分値は板振動が除去された状態の板振幅の周期関数となる。ツインビーム方式における Δh は、板波の傾きを求めたことに相当し、このデータの軌跡は前述の板振幅の周期関数に等しい。このデータから板振幅を求めて急しゅん度を演算することも可能である。急しゅん度はのび率と並ぶ形状不良度の尺度であり、板の波高値を波ピッチで除した値で定義される。

この熱延平たん度計に使用しているレーザ測距装置の最大の特長は、測定対象物体と測距装置間の距離を1.5mと大きく取れることである。このほか高周波変調光による熱鋼板のふく射ノイズの除去や、ツインビームの相互干渉回避処理などの工夫のほかに、レーザチップの温度制御や低熱膨脹材の採用などの熱対策が施されているなどの特長を持っている。

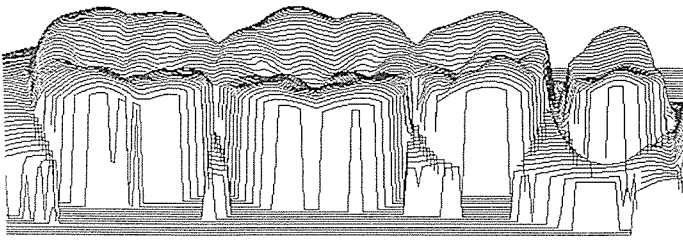


図4. MD-1211型による歯牙模型形状計測例

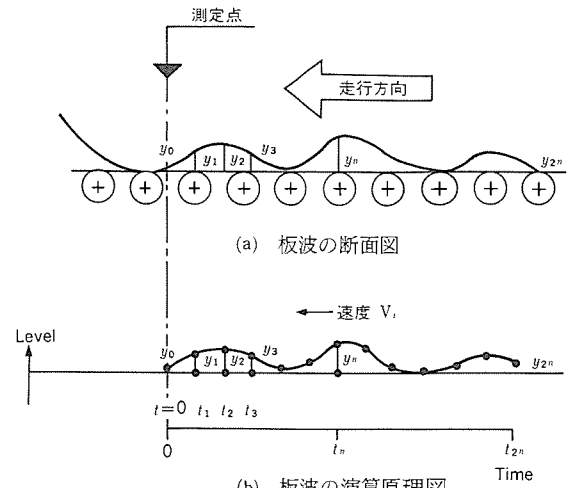


図5. のび率の演算原理

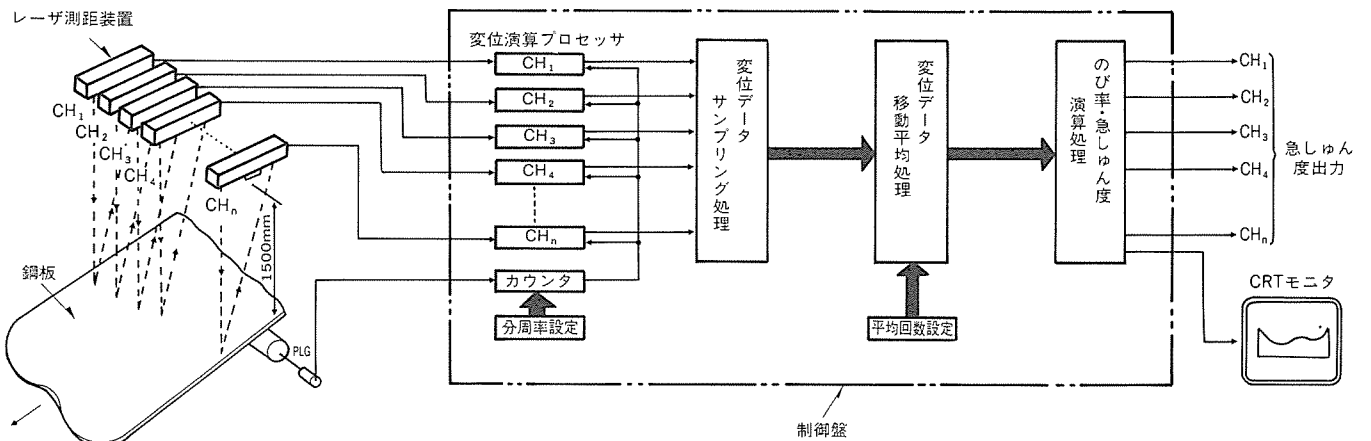


図6. 平たん度計の構成図

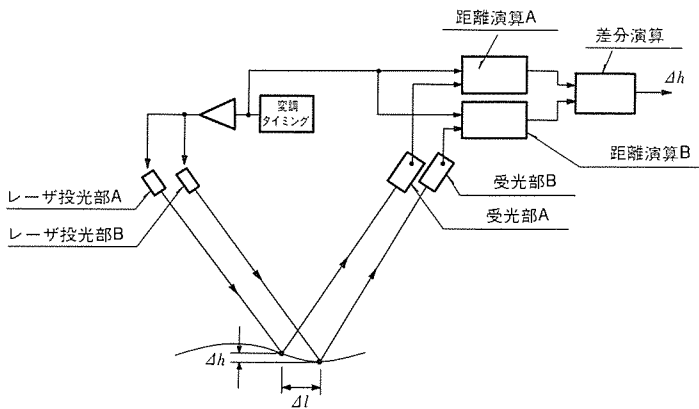


図7. ツインビーム方式レーザー測距装置の原理図

3.3 測量分野

ここでは、測量分野のうちでも時間差法を用いて、100mから9,997mまでの距離を、 ± 5 mの精度で測定することのできる装置について説明する。図8にこの装置の機能系統図を示す。

パルスレーザー発振器は、Nd:YAG (発振波長 $1.06\mu\text{m}$) レーザであり、パルス幅14ns以下で発振し、このときのピーク出力は400kW以上である。パルスレーザー発振器単体でのレーザービーム広がり角は 3.5mrad 程度であり、遠距離でのレーザー光の広がりを抑えるために、送信光学系を用いてビーム広がり角を 1mrad 以下にしてある。レーザー光が発射されたタイミングは、レーザー光の一部をシリコンフォト

ダイオードを用いて検出している。

視準光学系は、口径50mmの対物レンズを受信光学系と共有しており、焦点距離200mm、視野7度、倍率は7倍である。測距値及びその他の情報(後述)は、視準視野内に光学的に合成されて表示される。

受信光学系は、口径50mmであり、焦点距離100mm、受信視野は焦点位置に設置されたアパーチャで 2mrad 以下に制限してある。受信光は、 $1.06\mu\text{m}$ の干渉フィルタで受信視野内の背景光による雑音を低減された後、アバランシェフォトダイオードで検出(光/電気変換)される。この信号を増幅して受信信号とし、前述のレーザー光発射のタイミングと、この受信信号までの時間差とにより目標までの距離を計算し、結果を表示部にて表示する。

高いせん頭値を持つレーザー光を用いた測距装置では、近距離からのエアロゾルなどによる後方散乱光や近距離にある高反射物による受信回路の飽和による誤測距を避けるために、受信回路の増幅度を距離(すなわち時間)に応じてコントロールしている。

また、この装置には、例えば目標との間に木々の細い枝などの障害物がある場合でも目標の測距が可能のように、設定した距離までの反射光を無視して測距を行う最小距離制限機能が備えてある。これは、“最小距離制限つまみ”によって100mから5,000mまで連続可変にて設定できる。装置は設定された距離の後の最初の反射光までの距離を表示する。なお、最小距離制限期間内に反射光がある場合は、“前エコー”表示が点灯する。表示は視準視野内に赤色LEDで示

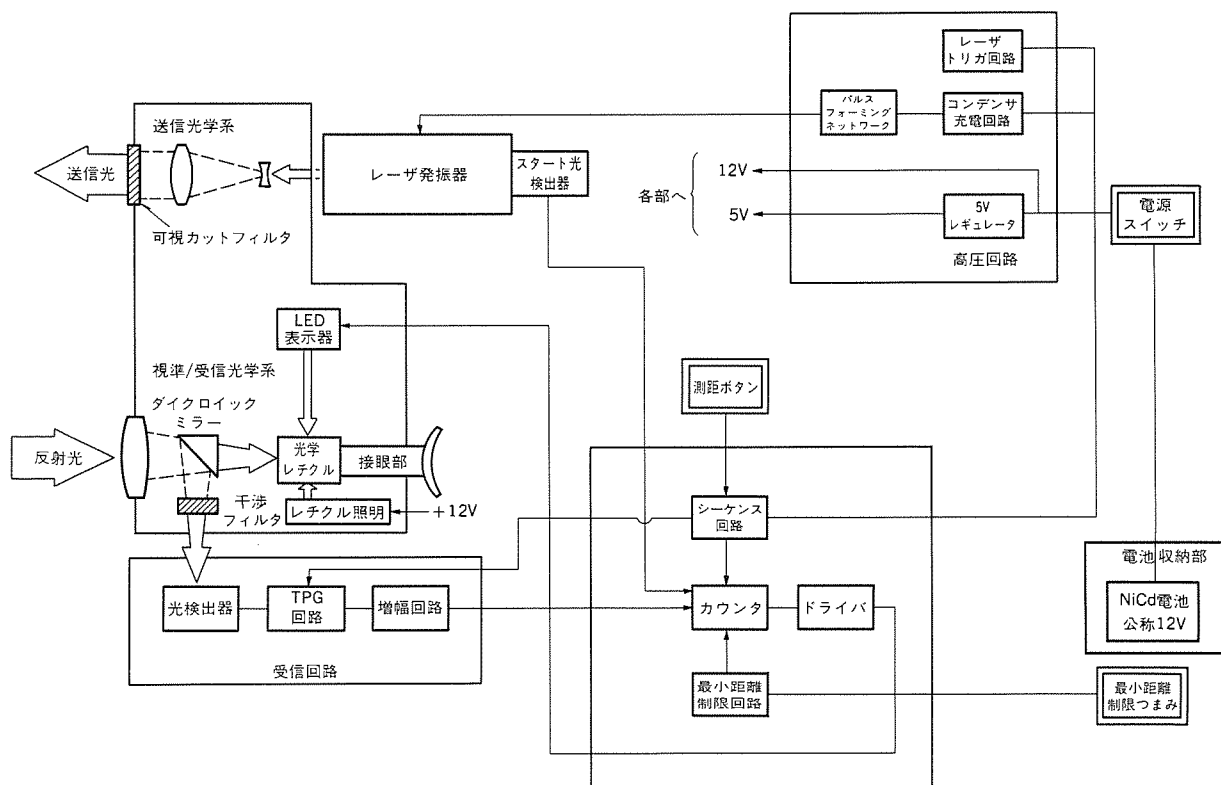


図8. 時間差方式レーザ測距装置の機能系統図

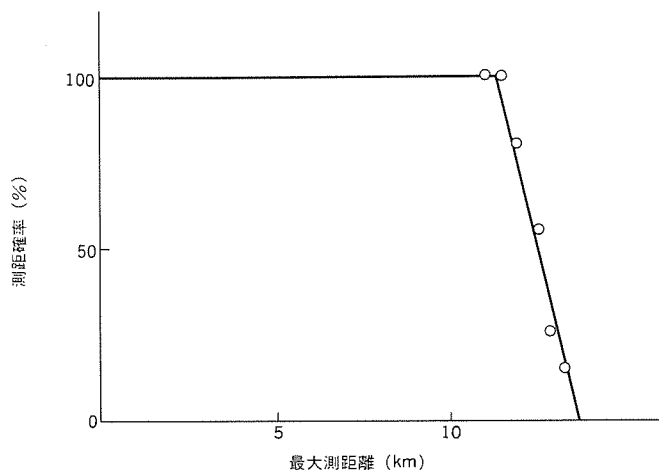


図9. 測距能力

され、測距値と“前エコー”表示のほか、装置内の状態を示す“準備中”表示、“準備完了”表示、及び電池の交換時期を知らせる“電池電圧低下”表示がある。

なお、この装置の寸法は185mm×80mm×222mm以下（突起物を除く）また電池を含む重量は、2.3kg以下である。

この測距装置の誤差は、次のとおりである。

カウンタ部のクロック周波数は約60MHzであり、このクロック周波数での1カウントエラーによる誤差は、測距距離に換算して2.5m

となる。測距装置の誤差としては、このほかに受信光の強度の違いによって生じる誤差が、約2m以下となる。その他温度による誤差などを総合して±5m以下の精度を達成している。

なお、この装置の測距能力を測定した結果を図9に示す。

4. む す び

以上述べたように、レーザ光の持つ高指向性や単色性、集光性を利用して各種の測距装置が実用化されている。ここで述べた以外にも干渉法を用いたサブナノメートル精度の超精密計測や、位相差法を用いた月までの距離を測る超長距離計測などもレーザ光を応用することにより実現されている。

今後も、半導体レーザの高出力化や短波長化などレーザデバイスの進歩と、非線形光学素子や光検出素子など光学部品の発達により、更に高性能・高機能を持つ測距装置の出現が期待できる。

参 考 文 献

- (1) 高嶋ほか：レーザ距離センシング，O plus E, No.82 (昭61-9)
- (2) 高嶋ほか：レーザ距離センサ，三菱電機技報，60, No.5 (昭61)
- (3) 荘村ほか：歯牙形状の三次元計測（第2報）—計測精度について—，齒科理工学会 (昭63-9)

レーザドップラ振動計

田代秀夫* 久間和生**
小池敦美* 田井修市***
矢部利郎*

1. ま え が き

自動車、電機、精密機械などの一般工業分野では、製品の小型・軽量・低騒音・低振動・高性能化の動向にあり、これらの開発・試験の計測・解析ツールとして、高精度・高応答で省力化の図れる振動計の要求が高まっている。このような背景から、従来の接触式振動ピックアップに比べ、非接触測定、高精度、高応答、高空間分解能、こう(較)正不要、被測定物の温度・電氣的性質に影響されないなどの、優れた特長を持っているレーザドップラ振動計の要求が高まっている。

当社では、既に鉄鋼・非鉄金属を中心に圧延制御用センサとして、レーザドップラ速度計を製品化してきており、各種プロセスラインに利用されている。このような実績・技術背景から、このたび、一般工業分野向けに、レーザドップラ速度計の関連製品として、半導体レーザを使用したレーザドップラ振動計を製品化した。

この論文では、レーザドップラ振動計の測定原理と構成・特長・性能・適用例などについて概要を紹介する。

2. 測定原理と構成⁽¹⁾

図1はドップラ効果の原理を示す図である。レーザ光を移動する物体に照射すると、その散乱光の周波数は、ドップラ効果によって照射光の元の周波数からシフトする。このシフト量すなわちドップラ周波数 f_d は、移動物体の速度ベクトル V 、照射光・散乱光の波数ベクトル K_0 、 K_s を用いて、

$$f_d = \frac{(K_s - K_0) \cdot V}{2\pi} \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。したがって、 f_d を測定することにより速度 V を知ることができる。レーザドップラ振動計は、光学系の構成により、参照

光型と差動型に分類され、参照光型は垂直振動計測用として、差動型は水平振動計測用として使用される。

2.1 参照光型レーザドップラ振動計

参照光型レーザドップラ振動計の光学系基本構成を図2に示す。半導体レーザからの出射光は、コリメートレンズによってコリメートされ、ビームスプリッタ1によって反射光と透過光に分岐される。反射光は、音響光学変調器によって周波数が f_m だけシフトされ、ビームスプリッタ2、フォーカスレンズの光路を通り、参照光として受光ファイバへ入射する。光源の周波数を f_0 とすれば、参照光の周波数 f_L は、

$$f_L = f_0 + f_m \dots \dots \dots (2)$$

となる。一方、透過光は、偏光ビームスプリッタ、凹レンズ、 $\lambda/4$ 板、カメラレンズを通して被測定物に照射され、その散乱光が再び偏光ビームスプリッタに返る。散乱光は、 $\lambda/4$ 板を往復することで偏波面が90度回転しており、偏光ビームスプリッタで反射した後、ミラー、ビームスプリッタ2、フォーカスレンズの光路を通り、信号光として受光ファイバへ入射する。このとき、被測定物の振動速

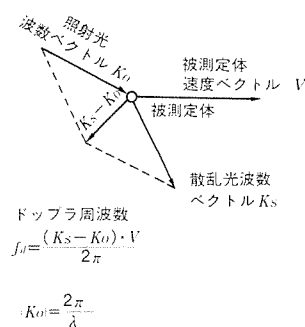


図1. ドップラ効果の原理

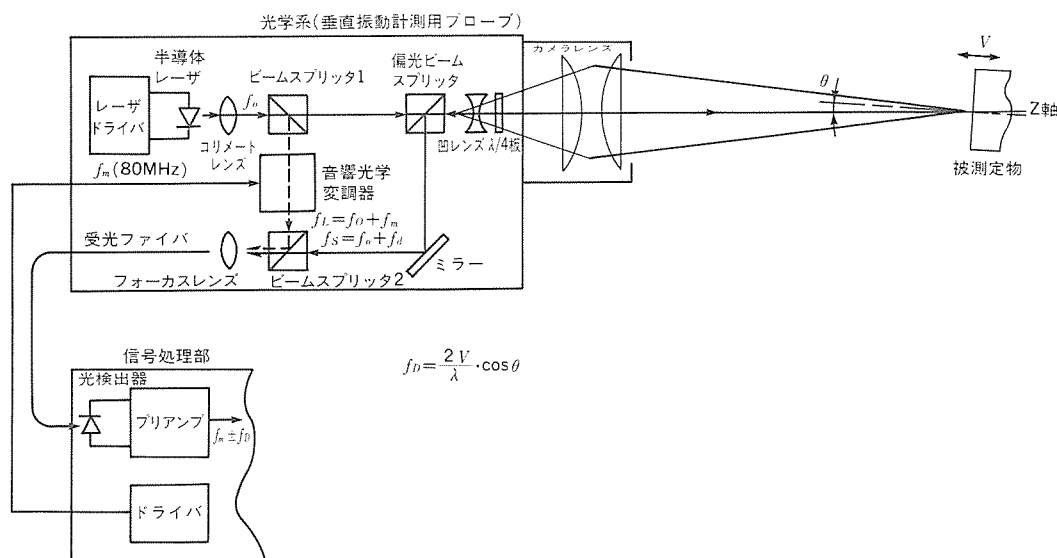


図2. 参照光型光学系

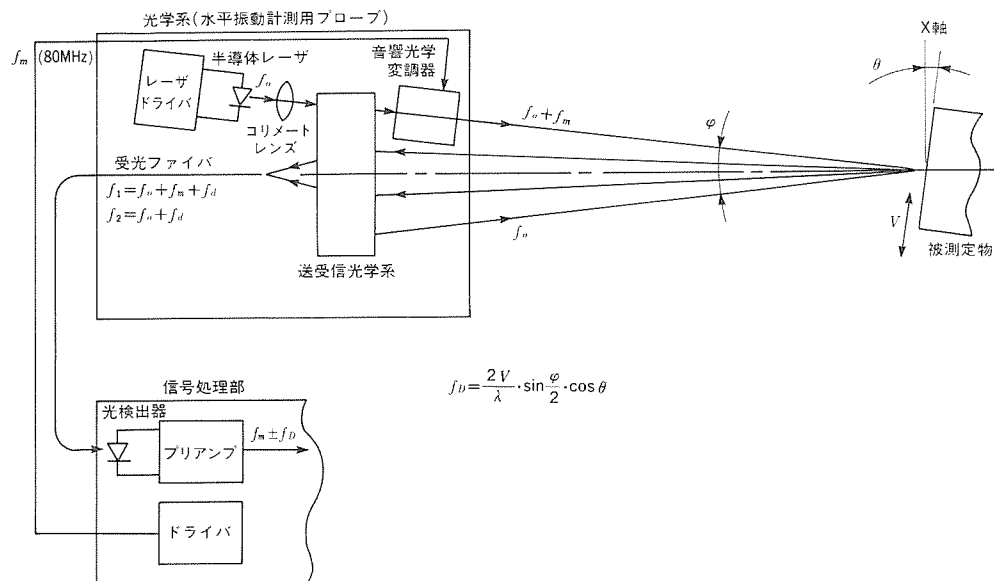


図 3. 差動型光学系

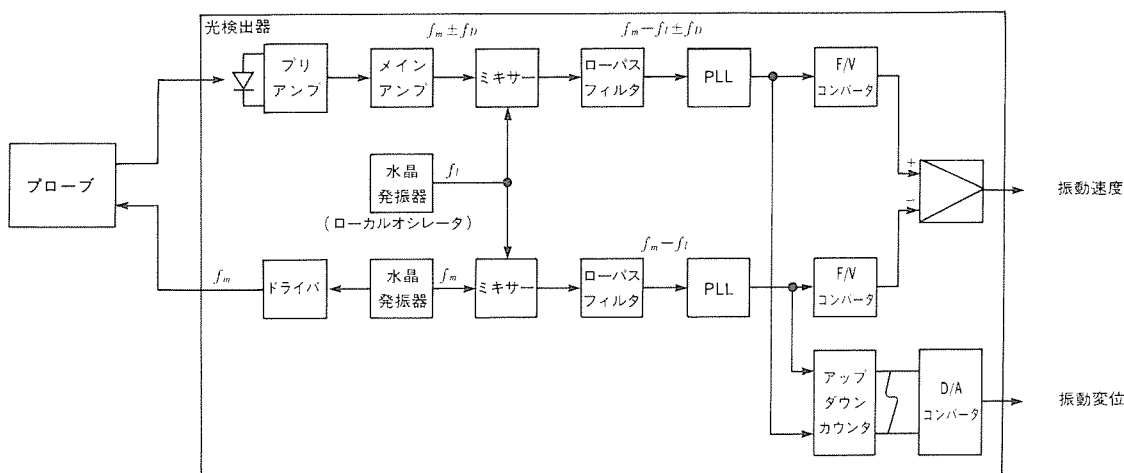


図 4. 信号処理機能系統図

度を V 、半導体レーザの発振波長を λ とすれば、信号光の周波数 f_s は、式(1)によって、

$$f_s = f_0 \pm f_d = f_0 \pm \frac{2V}{\lambda} \cdot \cos \theta \quad \dots (3)$$

となる。ここで、角度 θ は光学系と振動方向の相対的設定誤差角を表している。式(2)、式(3)で示される、周波数の異なる参照光と信号光は、受光ファイバで信号処理部の光検出器に導かれる。光検出器から得られる、二つの光の周波数差に相当するビート周波数 f_b は、

$$f_b = |f_1 - f_2| = f_m \pm \frac{2V}{\lambda} \cdot \cos \theta \quad \dots (4)$$

となる。式(4)により、 f_b を測定することによって垂直方向の振動速度を知ることができる。

2.2 差動型レーザドップラ振動計

差動型レーザドップラ振動計の光学系基本構成図を図 3 に示す。半導体レーザからの出射光は、コリメートされた後、送受信光学系で 2 分割され、交差角 ϕ をもって被測定物に照射される。この照射光の一方は、音響光学変調器によって周波数が f_m だけシフトされている。2 本の照射光の散乱光は、送受信光学系を介して受光ファイバに入射され、光検出器に導かれる。このとき、2 本の照射光に対する散

乱光の周波数 f_1, f_2 は、それぞれ式(1)によって、

$$f_1 = f_0 + f_m \pm f_d = f_0 + f_m \pm \frac{2V}{\lambda} \cdot \cos \frac{\phi}{4} \cdot \sin \left(\frac{\phi}{4} - \theta \right) \quad \dots (5)$$

$$f_2 = f_0 \pm f_d = f_0 \mp \frac{2V}{\lambda} \cdot \cos \frac{\phi}{4} \cdot \sin \left(\frac{\phi}{4} + \theta \right) \quad \dots (6)$$

で与えられる。ここで、 ϕ は 2 本の照射光の交差角、 θ は光学系と振動方向の相対的設定誤差角である。また、式(5)中の λ は、実際にはシフト周波数 f_m (80MHz) 分だけ変化しているが、 $f_0 \gg f_m$ で十分無視できるオーダーであるので、半導体レーザの発振波長をそのまま使用して記している。式(5)、式(6)で示される周波数の異なる 2 種類の散乱光を、ヘテロダイン検波して得られるビート周波数 f_b は、

$$f_b = |f_1 - f_2| = f_m \pm \frac{2V}{\lambda} \cdot \sin \frac{\phi}{2} \cdot \cos \theta \quad \dots (7)$$

となる。参照光型と同様に f_b を測定することにより、水平方向の振動速度を知ることができる。

2.3 信号処理

信号処理機能系統図を図 4 に示す。プローブからの信号光は光検出器で検波され、式(4)若しくは式(7)で示した周波数変調信号となる。この周波数変調信号は、周波数 f_l のローカルオシレータの出力とビ



図 5. レーザドップラ振動計の外観

ートを取り、ビート周波数をPLL式周波数トラッカで検出して、F/V変換することで、FM復調される。また、音響光学変調器のシフト周波数 f_m も、同様にしてリファレンス電圧に変換される。上記のFM復調信号からリファレンス電圧を減算した信号が、振動速度信号として出力される。一方、振動変位は、オフセット周波数 $f_m - f_e$ を基準として、ドップラ周波数 f_D をアップダウンカウンタ、D/A変換することで求めている。レーザドップラ振動計の外観を図5に示す。

3. 特 長

このレーザドップラ振動計は、従来の振動ピックアップに比べ以下に示す特長がある。

(1) 非接触測定

レーザドップラ振動計は、非接触測定が行えるので、次に示す振動計測に適している。

- (a) ピックアップを取り付けると振動モードが変化する物体、及びピックアップを取り付けられない物体の振動計測
- (b) ピックアップの特性が変化する高温物体の振動計測
- (c) スキャン装置と組み合わせた自動振動モード計測
- (d) 回転・移動物体の振動計測

(2) 感度較正

垂直振動計測用レーザドップラ振動計は、式(4)から分かるとおり、感度が $2/\lambda$ で決まるので、原理上感度較正を行う必要がない。

(3) 空間分解能

垂直振動計測用レーザドップラ振動計は、測定点での照射ビーム径を $100\mu\text{m}$ 前後まで絞っているため、空間分解能が高く、小型物体の振動解析が可能である。

表 1. 仕様・性能

項 目	垂直振動計測用 (LV-301-FB)	水平振動計測用 (LV-301-LR)
1. プローブ (1) 方式 (2) 使用レーザ (3) ビーム交差角 (4) 設定距離 (mm)	参照光方式 半導体レーザ：波長780nm、出力20mW ——— 200～1,000可変	差動方式 半導体レーザ：波長780nm、出力20mW $\varphi = 20^\circ, 10^\circ, 6^\circ, 3^\circ$ 100±2, 200±5, 300±10, 600±20
2. 測定レンジ	(1) 速度：1, 0.3, 0.1, 0.03, 0.01 m/s FS (2) 変位：100, 30, 10, 3, 1 mm FS	動作領域は図6、参照
3. 周波数応答	(1) 速度：DC～20kHz (高域20Hz～20kHz可変LPF) (2) 変位：0.5Hz～20kHz (高域20Hz～20kHz可変LPF)	
4. 測定精度	±0.5%FS	
5. 分解能	(1) 速度：0.05mm/s (2) 変位：0.4 μm ($\lambda/2$)	(1) 速度：0.05/sin($\varphi/2$)mm/s (2) 変位：0.4/sin($\varphi/2$) μm
6. 出力	①ドップラ信号(周波数出力)、②速度出力、③変位出力 ④速度、変位の実効値及び最大値	
7. 表示 (1) メータ表示 (2) デジタル表示	①速度、変位の実効値 ①速度、変位の実効値 ②フィルタ帯域	

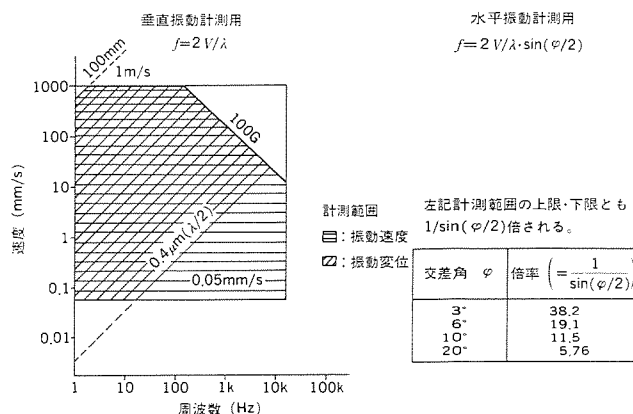


図 6. 計測範囲

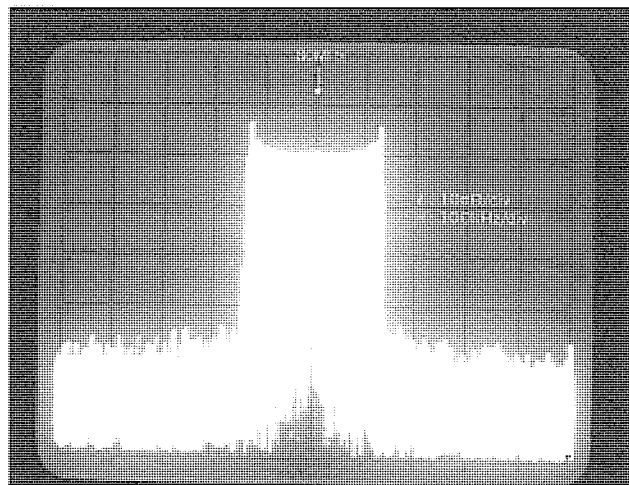


図 7. ドップラ信号スペクトラム

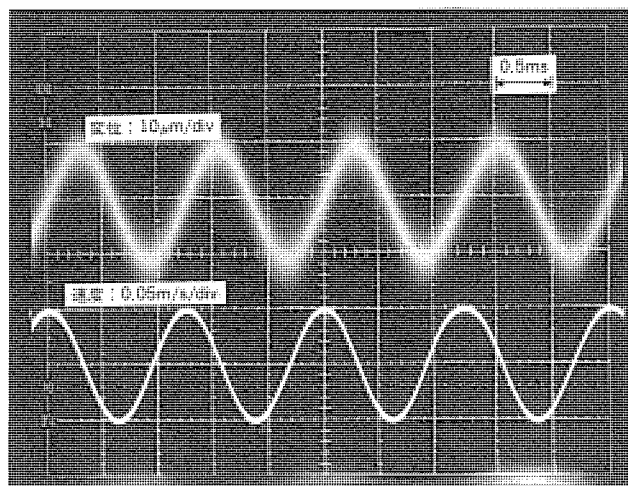


図 8. 変位・速度出力例

(4) 操作性・拡張性

光学系が、小型軽量なプローブとなっているので、取扱操作性に優れている。このため、垂直振動計測用と水平振動計測用を組み合わせた、三次元振動計測などへの拡張も可能である。

4. 仕様・性能

レーザドップラ振動計の仕様及び性能を表1に、計測範囲を図6に示す。この振動計では、発振波長780nm、出力20mWで連続発振する、単一縦モード半導体レーザを使用している。変位の分解能は、

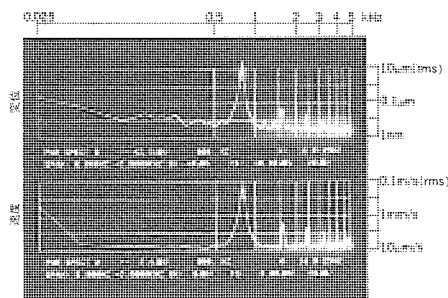


図9. パワースペクトラム測定例

ドップラ信号の1パルス成分で決定され、垂直振動計測用は $\lambda/2$ 、水平振動計測用は $\lambda/2 \sin(\phi/2)$ で与えられる。したがって、短波長レーザを使用するほど分解能が向上する。また、速度測定範囲の上限は周波数トラッカのトラッキング範囲によって決定され、下限はドップラ信号S/N比によって制限される。測定可能な最大加速度は、周波数トラッカのスループットで決まる。

圧電振動体を800Hzで振動させて、垂直振動を計測したときのドップラ信号スペクトラムを図7に、変位・速度出力の時間波形を図8に示す。また、変位・速度出力のパワースペクトラムを図9に示す。

この振動計は、16ビット マイクロプロセッサを搭載しており、オプションカードを追加すれば、次の機能を組み込むことができる。

(1) FFT機能

FFT (Fast Fourier Transform) 機能を追加することで、振動スペクトラム観測、卓越周波数及びパワースペクトラム表示、時間波形メモリなどが可能となる。

(2) 計算機インタフェース

計算機インタフェース (GP-IB) を追加することで、操作パネル設定の外部制御、及びFFT処理データの外部出力が可能となる。

5. 適用例

このレーザドップラ振動計は、3章に示した数々の特長を持っているので、あらゆる方面での適用が考えられる。以下に、この振動計を使用した、機械構造物などの振動解析適用例を示す。

- (1) エンジン、自動車ボデーの振動モード解析
- (2) CDの面振動、ピックアップの動解析
- (3) VTRテープ、スピーカーのダイアフラムなど音響機器の振動解析
- (4) FDD, HDD, ODDなどの情報機器の振動測定
- (5) プラント設備、工作機械などの設備診断

代表例として、スピーカー振動モード測定時のブロック図を図10に示す。スピーカーの振動モードは、振幅の大きい低周波領域ではストロボで観測可能であるが、振幅の小さい高周波領域になると有効な計測手段がなかった。そこで、レーザドップラ振動計を、スピーカー振動モード測定に適用している。この振動計のプロブは、リニアアクチュエータ2台で構成されるXYテーブルに取り付けられ、スピーカー振動面をスキャンする。電力増幅器を経由したランダムノイズ信号で、スピーカーのボイスコイルを駆動し、ラン

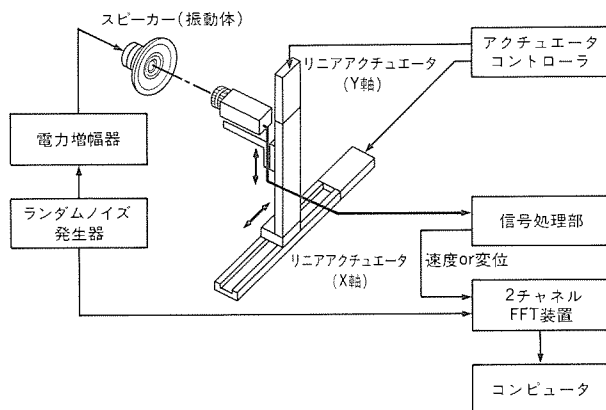


図10. 振動モード測定系

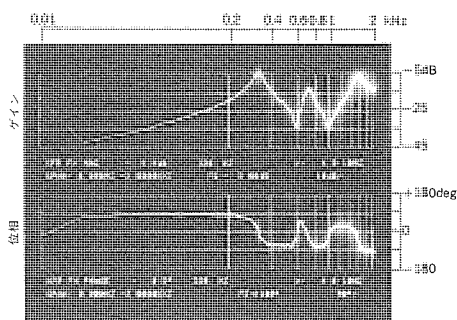


図11. 伝達関数測定例 (振動速度)

ダムノイズ信号と計測した振動速度 (又は振動変位) 信号を2チャンネルFFT装置に入力して、スピーカーの振動モードの伝達関数を求めている。XYテーブルを各測定点ごとに移動させ、各測定点における伝達関数をコンピュータに入力して、モーダル解析プログラムを実行させれば、振動モードが立体的に表現されたモードアニメーションなどを得ることができる。

圧電振動体の駆動電圧と振動速度の伝達関数 (ゲイン, 位相) 測定例を図11に示す。

6. むすび

以上、半導体レーザを使用したレーザドップラ振動計について述べた。ここで述べたレーザドップラ振動計は、光学系が小型軽量化され、取扱操作が容易となり、非接触測定のメリットを最大限に発揮できる製品となっている。

一方、振動解析は、機械構造設計における性能・信頼性評価法として重要な位置を占めており、CAEによる振動シミュレーションと同様に、加振実験によるモーダル解析ニーズが高まっている。ここに紹介したレーザドップラ振動計の数々の特長は、そのニーズにこたえ、振動解析の省力化・高性能測定に大きく貢献するものと考えている。

参考文献

- (1) 久間ほか：光ファイバーレーザドップラ速度計の原理と応用，O plus E, No.68 (1985-9)

レーザ応用きず検査

亀井光仁*

1. ま え が き

表面きず検査はFAの中での検査工程の自動化項目として位置付けられ、各種の製品表面に発生するきず、汚れ等の異常を検出することを目的としている。一方、これまでの表面きず検査は主に人間の目視によって賄われてきており、自動検出装置の性能は人間が持つ検査能力と比較されるケースが多かった。このような比較において、自動検査装置の性能が人間の検査より優れているとされてきた項目としては、単能検査における高速性(例えば、直径50 μ mのきずを目視で検査できる限界速度は30m/分程度であるのに対し、後述する自動検査装置では720m/分が可能である。)と、繰返し検査における再現性(自動検査装置ではダイナミック条件でのSN比が3を超えるきずに対しては、検出率、再現性共に100%を実現可能であるが、目視では個人差や体調等によって同一きずの検出再現性が50%を切るケースもある。)があるが、各種の検査対象に適用できるという意味でのフレキシビリティに関しては、遠く人間に及ばないのが現状であった。このような表面きず検査装置の中で唯一高い分解能を持ち、オンラインへの適用が可能で、しかも各種の検査対象への適用のフレキシビリティを持つものとして注目されているのが、レーザを利用し、検査対象表面からの反射光をオプティカルファイバによって空間的にフィルタリング受光する方式の検査装置である。

本稿では、このファイバ受光式のきず検査装置の動作原理及び実際の適用例について述べる。

2. レーザ光によるきず検査の特長

レーザ光は表1にまとめたように、従来の熱光源からの不規則な光とは異なった性質の光であることから、各種計測現場において積極的に活用されてきた。きず検査の分野も、レーザ光を利用することにより検査性能が飛躍的に向上した代表例の一つであり、表1の可干渉性と小さなスポットへの集束性能が大きく寄与している⁽¹⁾。

2.1 可干渉性の利用

金属表面等にレーザ光線を照射した場合、反射パターンとして小さい粒状のパターン(スペックルパターン)を含む特有の図形が形成される。図1は圧延金属板に対して得られた回折パターンの典型例で、圧延・研削等の特定の方向性を持つ加工が施された表面構造

からの反射パターンは、その表面構造の方向と直角方向に伸びた帯状となる。このパターンは表面の持つ性質と一对一の対応を持つことは明らかであり、このパターンから表面構造の概略的な傾向を類推することができる⁽²⁾。

この現象はレーザの出現後すぐに注目され、表面微細構造によるレーザ光の回折として理論的、実験的な取扱いが試みられた⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

図1の回折像を観測する光学系を模式的に図2に示す。図2においてレーザ光を物体面(x, y 平面)に照射し、物体面から鏡面反射方向に距離 h 離れた位置に置かれた観測面(u, v 平面)上で反射パターンを観測する。表面微細構造による回折とは、表面上の光照射下にある各点(光散乱点)から散乱された光波が互いに重畳され、干渉しあう現象であるといえる。いま、物体面上から散乱してきた光波の複素振幅分布を $U(x, y)$ とし、観測面上に到達する光波の複素振幅分布を $A(u, v)$ とすると、 $A(u, v)$ は物体面(x, y)上の各点から発した光の重畳で与えられるため、

$$x^2 + y^2 \ll h/k, \text{ただし } k = 2\pi/\lambda, \lambda: \text{波長}$$

とすると式(1)のようなフラウンホーファ回折を与える式が導かれる。これは、 $A(u, v)$ が $U(x, y)$ のフーリエ変換の形で与えられることを意味している。

$$A(u, v) = (k/2\pi h) \iint U(x, y) \exp\{i(k/h)(ux + vy)\} dx \cdot dy \dots \dots \dots (1)$$

また実際に観測される反射像は光の強度分布であるので、式(1)を2乗した形、すなわち $U(x, y)$ のパワースペクトラムを観測することになる。この現象を実際の表面性状との係り合いで表現すれば、レーザを物体面に照射して得られた回折パターンは、物体表面の細かさを統計的に表現していると考えられ、例えば人間がマクロ的に目視で均一と見た表面に対して、その表面上のすべての場所に対してほぼ均一な回折パターンが得られるように、回折条件を設定すると、人間が正常とみなす範囲の表面変化には応答せず、目視で認められる程度の表面異常(きず)に対しては、回折パターンも対応した変化を顕著に見せる。したがって、この回折パターンの変化を検出することにより、人間の目視に近い分解能を持つ表面きず検査装置が得られる。

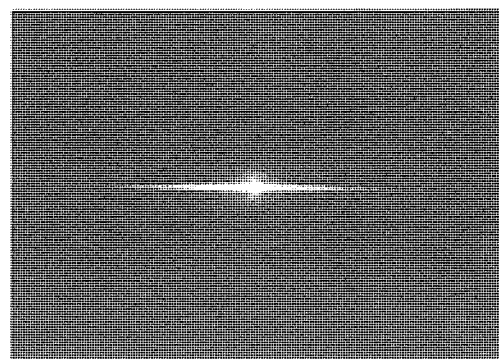


図1. 回折パターン例

表1. レーザ光の特徴と表面検査への利用法

特 徴	性 質	利 用 法
時間的なコヒーレンスが高い	単 色 性	波長フィルタによる外乱光対策(ノイズ対策)
	可干渉性	回折効果を利用した高感度検出
空間的なコヒーレンスが高い	指 向 性	光学系のアセンブルの簡易性
	集 束 性	小スポットによる高分解能
エネルギー密度が高い		外乱光との強度差によるノイズ対策
そ の 他	○出力変動が少ない ○長寿命である ○手軽に使える	

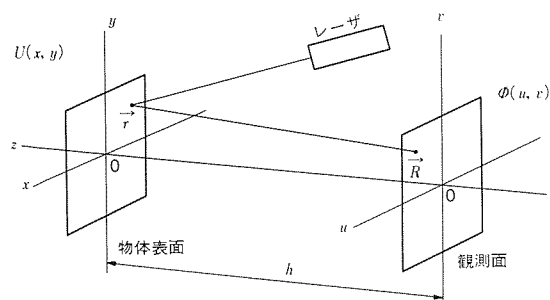


図2. 回折像観測の光学系

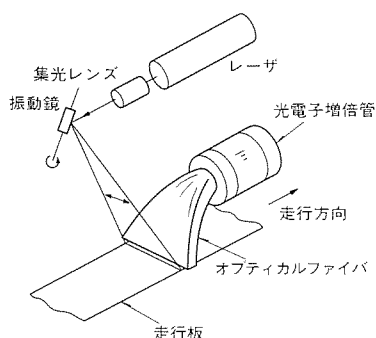


図3. 板材きず検査装置の基本光学系

2.2 良好な集束特性の利用

圧延や切削・研削加工等のように、比較的顕著な表面構造がある表面のきず検査に対しては可干渉性が有効に活用されるが、ガラスや、半導体ウェーハのように滑らかな表面上に発生するサブミクロンオーダーのきず検出のためには、きずからの散乱光のみを検出する方式が有効となる。散乱光受光方式の光学系で検出されるきずからの散乱光量 I_s は式(2)に示される。

$$I_s = I_0 K [1 - \exp(-2d^2/a^2)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで I_0 は入射レーザの全エネルギー、 K は光学条件(受口部開口径、受光部～物体面距離、表面反射率ほか)によって決定される定数、 d はきず半径、 a は物体面上のレーザスポット半径である。

したがって、小さなきず(d が小さい)を検出するためには、 a を小さくすることが有効であり、一般光に比べて小さなスポット径に容易に集束できるレーザ光が有利となる。この方式での分解能の上限値の試算では、5mWのレーザを光源とし、マルチアルカリタイプの光電子増倍管を使用した時のシステムのN.E.P. (Noise Equivalent Power)より、概略0.15 μ m程度と推定され、ポリスチレン粒子を利用した実験でも、この性能が裏付けられている。

3. 表面きず検査への適用例

3.1 板材の表面きず検査への適用⁽²⁾

例えば、圧延中の金属板等のようなシート材や、半導体ウェーハ、アルミ磁気ディスク等の平坦な表面は、被検査物体形状が単純であり、表面きず検査装置の構成は最も基本的なものとなる。

図3に示したのが、オプティカルファイバを利用したレーザ式きず検査装置の光学系基本構成である。図3においてHe-Neレーザ光を集光レンズによって被検査材表面上に集光すると同時に、走査鏡によって表面の移動方向に直交した走査を行う。このとき、被検査材表面から反射した光は、表面の粗さ構造の影響を受け、オプティカルファイバ端面上に、図1に示すような回折パターンを形成す

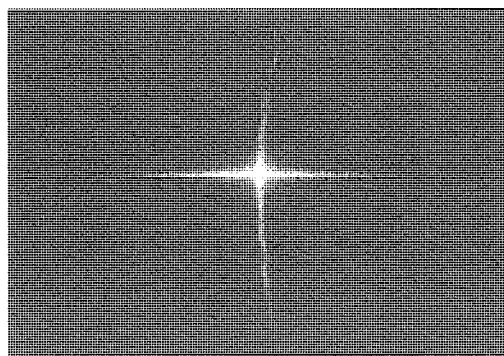


図4. きずに対する回折パターン例

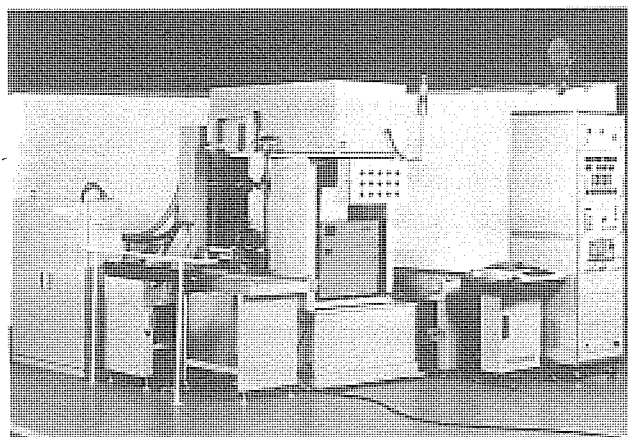


図5. ディスク表面きず検査装置の外観

る。一方、表面にきずが発生すると、図4に示すようにきずに対応した回折パターンが図1の回折パターンに重畳した形で発生する。したがって、オプティカルファイバを図1の回折パターンの形に合わせて短冊形の開口を持つように整形すると、きずによって新しく発生した回折パターンはファイバ端面で空間的に除去(フィルタリング)されることにより、最終的に光電子増倍管に到達する光量に変化が発生する。

この方式は、前述のように回折パターンが原理的に表面粗さオーダーの微細なきずに対しても変化することから、本質的に高い分解能を持っており、圧延金属板に対して20 μ m幅のきず、あるいは特殊な方向に伸びる深さ0.3 μ m程度の擦りきずを各々検出した例があり、圧延板に対する検査装置の持つ最高分解能はこの程度と推定される。また、被検査対象物体の移動速度に対しては、6000Hzの光走査を採用することにより、720m/分のライン速度に対応可能である。

一方、試料表面がガラス板のように滑らかなものに対しては、散乱光を受光する方式を採用するが、光学系は図3の基本構成と同じものを採用し、オプティカルファイバの設置場所を正反射位置から外すだけで対応可能である。図5に、この方式によってアルミ製磁気ディスクの微少表面きず検査を実現した装置の外観を示す。

3.2 円筒状部品の表面きず検査への適用⁽⁶⁾

板材検査用として述べた表面きず検査の基本形(図3)は、普通の板・シート材以外に、等面的に平坦(光の走査に伴う試料表面形状が平坦)とみなせる表面の検査に利用することができる。

図6に示すのがその応用例で、ローラ上で回転する円筒状物体の側面にレーザ光を走査し、反射回折光を受光することによりきずを検出する。この適用例において発生する回折パターンは、試料の

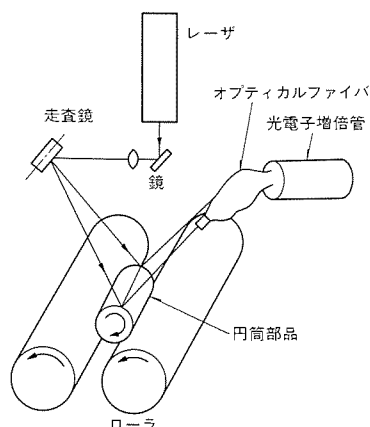


図 6. 円筒部品のきず検査装置

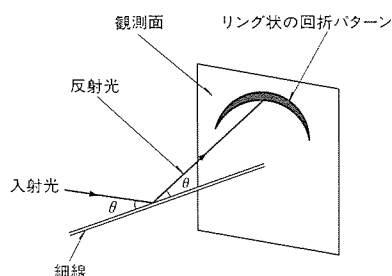


図 7. リング状回折像の形成

曲率によって非線形な拡大を受けるため、オプティカルファイバの端面形状をその形に合わせてやる必要があるが、全体の検査装置の動作原理は板材と同じもので、標準分解能は $30\mu\text{m}$ 程度である。

3.3 線材の表面きず検査への適用⁽⁷⁾

線材は基本的には円筒形状に分類されるが、直径が数mm以下と非常に細く、しかも連続生産ラインにおいて線材の回転をすることは不可能であるため、回折現象の他の性質を利用した光学系を構築する必要がある。ここで着目したのは、レーザを斜入射した時の回折パターンの曲がりである。いま、図 7 のようにレーザ光を線材の長手方向と角度 θ をなす方向にとり、観測面を細線を法線とする平面にとると、回折パターンは円弧状のベルトパターンとなる。これはレーザを斜め入射することにより、回折光の分布が 2θ を頂角とする円錐の母線に沿って分布するため、このことは試料面の各散乱点から観測点に到達する光の位相関係に着目すれば理解できる。この状態で検査領域を拡大するために、レーザ光を線材に直交する方向に直線走査すると、試料形状が細い円柱であるために、反射光の移動軌跡は円弧となる。したがって、レーザの斜入射によって発生した円弧状の回折パターンが、円弧軌跡に沿って移動することになり、最終的に得られる走査回折パターンは円となる。一方、線材表面にきずが発生すれば、回折パターンの形状変化が発生するのは板材の検査と同じであり、したがって、円状の回折パターンの形状変化を検出することによって線材表面きずの検査が可能となる。

図 8 に示す線材表面きず検査は、この考えに基づいて構成されている。図 8 において、レーザ光は集束レンズにより線材表面に焦点がくるように集束されつつ、振動鏡によって線材走行方向と直交して走査させる。線材表面から発生した回折パターンは、線材を中心軸とした円錐の母線に沿って進み、レンズで拡がりを抑制した後に、鏡によってオプティカルファイバ束の端面に投影され、円状の回折

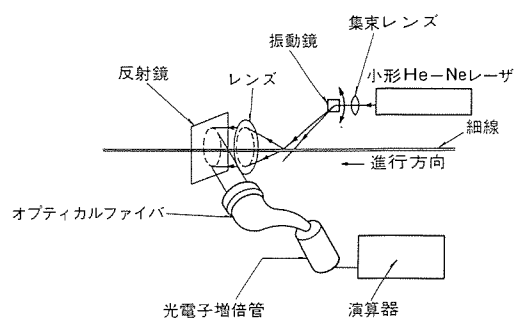


図 8. 細線表面検査装置の構成

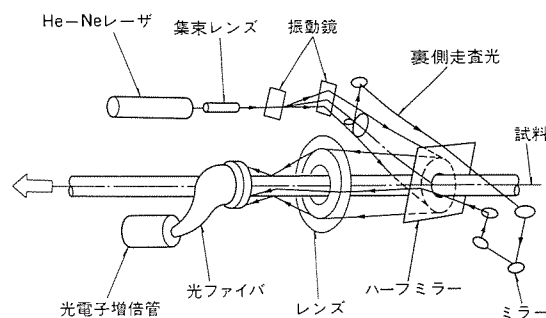


図 9. パイプ表面きず検査装置

パターンの変形を空間的なフィルタリングによって光量変化として光電子増倍管に伝達する。

この例では、従来、被検査物形状が線材であるがゆえに光学的な検査が実施できなかったのに対し、試料が線材であることを逆に利用し、回折パターンの性質を有効に活かすことによってきず検査を可能としたもので、板材の検査と同等の高い分解能が得られる。

3.4 棒・パイプ材表面きず検査への適用⁽⁸⁾

線材の検査装置は、線材が細い円柱形状であることを利用したものであり、一般の棒・パイプ材のように円柱の径が大きくなると、

- (1) 反射回折光の円形パターンが重ならず不明瞭となる。
- (2) 試料面上のビーム径が変化し、棒表面上での検査感度にバラツキを生じる。
- (3) 全周検査のためには、多数の光学ユニットを必要とする。

などの問題が発生する。一方、円筒状の部品検査では部品を回転させる必要があり、連続生産される棒・パイプ材のオンライン検査には適用できないという問題がある。これら問題に対して投・受光系の工夫により、検査対象を回転させずに、しかも板材と同一の原理で検査をすることが可能である。その光学系を示したのが図 9 のレーザ回転走査式のきず検査装置である。図 9 においてレーザ光は棒材表面上で適切なビーム径にするための集光レンズを介し、棒軸が中心となる同心形状に二次元的な走査(リサーチ走査)がされており、更に棒材表面への入射角が一定となるようにレンズ系で集束する。

この場合、棒材表面からの反射回折パターンの移動軌跡は棒軸と同心の円であり、また、レーザ光を斜め入射することによって回折パターン自身も円弧形状に曲げられている。この回折パターンの移動軌跡の曲率と回折パターン自身の円弧の曲率を、実用上問題が発生しない程度に一致させた後、開口形状を試料と同軸の円形状に整形したオプティカルファイバ束によってフィルタリング受光し、光電子増倍管によって電気信号を得る。この場合、きずの検出原理は

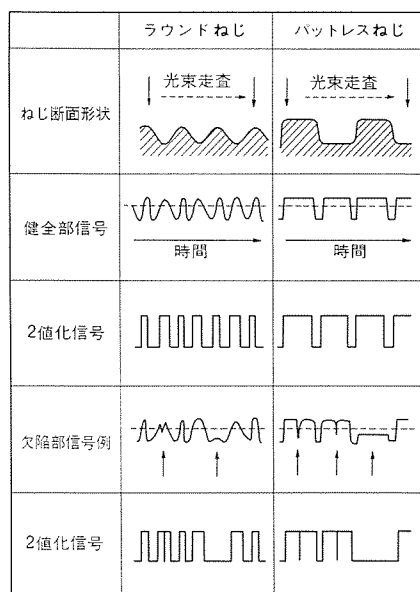


図10. ねじからの信号例

板材と同様に回折パターンの乱れ検知によるものであり、高分解能を備えている。

3.5 ねじの表面きず検査への適用例⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

これまでに述べてきた板材、ベレット、線材、棒材の表面形状は、二次元、三次元の差はあるものの、いずれも単純であった。これに対し三次元の複雑な形状を持つ表面のきず検査への適用例として、ねじ表面きず検査装置がある。

ここで対象とするねじは、油井用のシームレスパイプの端部に加工されたもので、加工具による表面加工痕跡は常に円周方向を向いており、回折像の伸びる方向も安定する。このため、基本的にこれまで述べてきた各種検査への適用例と同様に、回折パターンの乱れからきずの検出が可能である。

一方、ねじの断面形状は複雑な三次元形状をしており、また、パイプの偏心回転に伴う反射パターンの位置ずれが発生することから、反射回折パターンの集光は困難が予想される。しかしながら精密な光線追跡の結果、回折パターンの中からオプティカルファイバを通過する光エネルギーは、図10に示すように光がねじの谷から斜面部分・山部分・斜面部分を経て次の谷に移動する間に、2個のピークを持つことが明らかとなり、しかも、ねじの形状は1ピッチごとに規則正しいプロファイルを繰り返すため、最終的に得られる信号は図10の波形が規則正しく繰り返されたものとなる。したがって、この波形列に何らかの乱れが発生すれば、それはきずによるものと考えられる。このように、このねじきず検査では信号のアナログ的な変化形状の規則性をベースとした検査を行うもので、板材と同程度のきず分解能を持つことが確認されている。また、パイプの偏心に伴う回折パターンの位置ずれについては、オプティカルファイバの柔軟構造を利用して、反射パターンの位置をファイバがトラッキングすることによって解決した。ねじ表面きず検査装置の光学系の構成を図11に示す。

4. む す び

レーザを光源とし、オプティカルファイバを利用した集光系を持つ表面きず検査に関し、きず検査の原理と適用例について述べてき

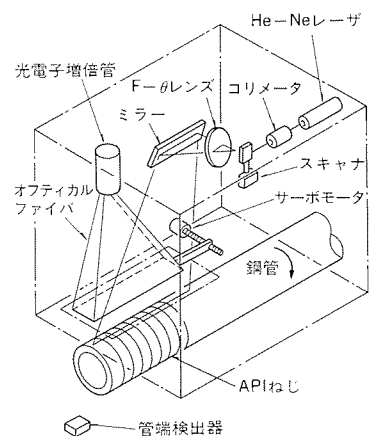


図11. ねじ表面検査装置の光学系

た。オプティカルファイバを利用したきず検査装置の特長としては、

- (1) 回折パターンの空間的なフィルタリングと集光を兼用できる。
- (2) 導光路が閉じられており、メンテナンスが容易である。
- (3) 任意形状に整形可能であり、各種表面のきず検査にフレキシブルに対応できる。
- (4) 柔軟構造を利用し、反射光のトラッキングが可能。

が挙げられる。このため、二次元の板材から三次元の表面に至るまで、回折方式の本来の感度を損なわずに柔軟に対応できる点に注目され、本稿に述べたように各種表面のきず検査用として急速に広がりつつある。その意味においては、回折現象によるきずの分離技術と、オプティカルファイバによる集光技術により、レーザを利用した表面きず検査技術が確立したといっても過言ではない。

今後、各種工場のFA化推進のために本稿で述べたきず検査技術が役に立つことを期待する。

参 考 文 献

- (1) 電気学会編：外観検査の自動化，オーム社（1984）
- (2) 亀井，稲荷：レーザによる表面性状計測，電子通信学会技術研究報告，86-271，37/42（1986）
- (3) R.B. Crane：Use of a laser-produced speckle pattern to determine surface roughness, J.Opt.Soc.Am. **60**, No.12, p. 1658（1976）
- (4) T. Inari：Automatic detection and control of surface roughness by coherent diffraction pattern, Proc. 16th S.P.I.E Ann Meeting, p.47（1972）
- (5) M. Kamei, T. Inari：On-Line monitoring of surface roughness by using laser, Proc. 28th S.P.I.E Ann Meeting, **58**（1984）
- (6) 亀井：FAにおけるセンサ応用，光学技術コンタクト，**25**, No. 10, 21/29（1987）
- (7) 亀井ほか：細線・円筒状ワークの表面検査，自動化技術，**16**, No.3, 69/71（1986）
- (8) 亀井ほか：レーザ式パイプ表面検査装置，三菱電機技報，**58**, No.7, p.505（1984）
- (9) 亀井ほか：レーザを利用したネジ表面欠陥検査装置第一報，第25回計測自動制御学会学術講演会予稿集，p.475（1986）
- (10) 松井ほか：レーザを利用したネジ表面欠陥検査装置第二報，第25回計測自動制御学会学術講演会予稿集，p.477（1986）

半導体レーザ応用光ディスク装置

渡辺勢夫*
山田康一*
中田正矩*

1. ま え が き

光ディスク装置の実用化には、半導体レーザの実用化に負うところが大きい。ビデオディスクは当初He-Neレーザで商品化された。当社は、昭和52年にはレーザ方式PCMデジタルオーディオディスクとプレーヤの発表を行った⁽¹⁾。ついで翌年には、半導体レーザを使ったピックアップを開発しプレーヤに搭載した⁽²⁾。この光ピックアップには、半導体レーザを使った多くの新しい試みが採用され、ピックアップの超小型化が実現した。例えば、半導体レーザを含むピックアップ全体をアクチュエータで加振してトラッキングとフォーカシングを行うなど、それまでのHe-Neレーザ光源では考えられなかった、ユニークな方法を開発した。

その後、半導体レーザは、CDの普及と共に量産化技術が確立されてきた。また、ビデオディスクにも半導体レーザの改良により搭載されるようになった。

現在では、VDからシングルCDまで5種類の光ディスクが一つのプレーヤで選択再生できるようになった。さらに、電流変調で出力パワーが高速変調できるというもう一つの半導体レーザの特徴を生かしたものが、追記型及び書換型光ディスクである。以下、ユーザーが記録可能な光ディスク装置の原理と、光磁気方式の書換型光ヘッドを使って追記型と書換型の光ディスクを記録再生した特性について報告する。

2. 光ディスク装置の構成

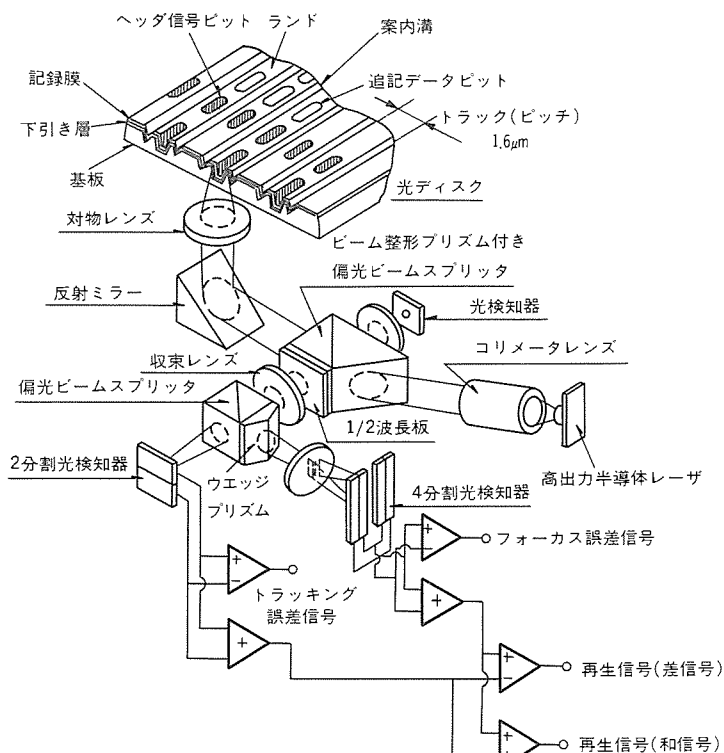


図1. 光ディスクと光ヘッドの構成

光ディスク装置は、光ディスク・光ヘッド・サーボ系・信号処理系・回転・送り系など機構系・コントローラなどから構成される。

このうち、光ディスクと光ヘッドの構成を図1に示す。光ディスク媒体は追記型を示してあり、マスタリングでISOフォーマットを書き込んだスタンパから転写・成形したポリカーボネート基板、スパッタにより成膜したテルルセレン(Te-Se)合金系記録膜と下引き層とを基本構成としている⁽³⁾。書換型の光磁気媒体は同上の基板の上にSiNx膜と二層膜TbFeCo、更に保護膜としてのSiNx膜で構成されている⁽⁴⁾。

光ヘッドは光磁気方式の書換型光ヘッドの構成になっている⁽⁵⁾。すなわち、1.2mmの光ディスク基板を通して直径約1.3μmに集光された直線偏光のレーザビームが記録膜に照射されている。反射光はビームスプリッタで2分割され、一方でフーコー法でフォーカス誤差信号を、他方で案内溝からの回折光を検出するプッシュプル法でトラッキング誤差信号を作っている。同時に、それぞれの差信号で書換型の光磁気ディスクの再生信号、和信号でプリフォーマット信号を読み出す。追記型の光ディスクの場合は、記録データ部・プリフォーマット部共に和信号で信号を読み出すことができる。

半導体レーザは、当社のML6702A型で、波長780nm、最大許容パワー35mWである。

3. 記録再生の原理

3.1 集光スポット

光ディスク上に集光された光スポットの大きさは、集光光学系の

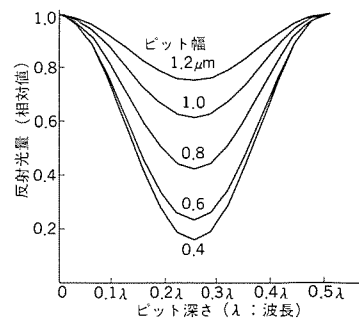


図2. ビット反射光量のビット深さ依存性

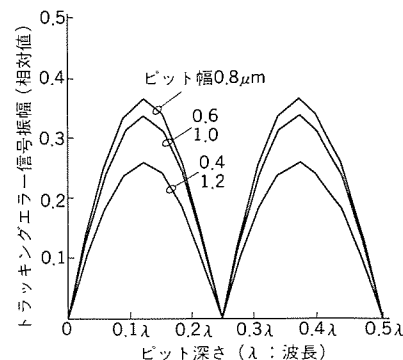


図3. トラッキングエラー信号のビット深さ依存性

特性とレーザ波長で決まり、次の式で表わすことができる。

$$2\omega = K \cdot \lambda / NA \quad \dots\dots\dots(1)$$

2ω : スポット径 (光強度が中心強度の e^{-2} になる径)

NA : レンズの開口数 (レンズの集光能力を表わす)

λ : レーザ波長

K : 定数——けられの係数 (レンズに入射するビームの径とレンズの瞳径の比) から決まる

光ディスクの記録密度を上げるためには、スポット径を小さくする必要がある。レーザ波長を短くし、 NA を大きくすればスポット径は小さくなる。

3.2 位相ビットの再生

レーザ光を対物レンズで集光し、PC基板を通してトラック上にスポットを作る。ディスク面上には記録信号に相当して一定深さの位相ビットが設けられている。位相ビット底面とその周辺からの反射光の間にはビットの深さに相当する位相差が発生し集光レンズの開口外に回折されるので、レンズに入る光量が減り、ビットの深さ、幅によって変化する(図2)。ビットがなければ、すべての反射光はレンズに戻る。この反射光量差からビットの有無、つまり記録信号を検出できる。また、光スポットをトラックに沿って追従させるトラッキングサーボに必要なエラー信号を得る方法として、ディスクからの反射光のファールフィールド領域での強度分布の変化から検出する方法があり、エラー信号の大きさは図3に示すように、ビットの深さ、幅によって変化する。信号の大きさが最も大きくなるのはビット深さが $\lambda/4$ のときで、エラー信号が最も大きくなるのはビット深さが $\lambda/8$ のときである。データ記録に使用するディスクではISOフォーマットに従って、図1に示すように、サーボ用の深さ $\lambda/8$ の連続する溝が設けられており、プリフォーマット信号は連続する溝の間に深さ $\lambda/4$ のビットで記録されている。

3.3 追記型光ディスクの記録再生

追記型光ディスクでは、基板面上につけた記録膜にレーザ光を照射し加熱することにより記録膜を溶融させ、図4に示すようなビットを形成して記録し、低パワーのレーザ光により走査することにより反射率変化として再生する。記録膜に対しては、低記録パワーで残さ(渣)のないきれいなビットとスムーズな形のリムを形成し、かつ再生パワーで劣化しないことが望まれる。当社の追記型光ディスクの記録膜は、スパッタで成膜したTe-Se合金及び基板との間に介在するふっ化炭素系下引き層から成っており、高感度(低パワー記録が可能)、高SN比、かつ高信頼性を実現している。

3.4 書換型光磁気ディスクの記録再生消去

光磁気ディスクの記録原理を図5に示す。光磁気記録では記録層として垂直磁化膜が用いられ、その磁化の向き上下によって情報が記録される。あらかじめ、一方向に磁化された垂直磁化膜に逆向きのバイアス磁界を印加しておき、記録情報に対応してレーザ光を強度変調し、磁化膜を局部的に加熱する。加熱により昇温した部分はキュリー温度 T_c を越して非磁性になり、レーザ光照射がやんで常温までに冷却される間に外部磁界によって磁化方向が逆向きとなる。消去時にはバイアス磁界を反転しておき、レーザ光を連続照射し一様に加熱すれば、磁化方向はもとの向きに戻る。

再生原理を図6に示す。直線偏光レーザ光を垂直磁化膜に照射すると、反射光の偏光方向が入射光に対してカー回転角 θ_k だけ回転し、その回転する方向は垂直磁化膜の磁化方向に対応して逆になる。したがって、記録トラックを直線偏光で走査しながら反射光を偏光子

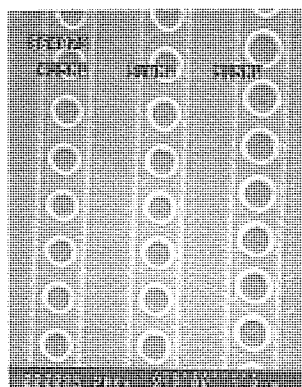


図4. 追記型光ディスクの記録ビット

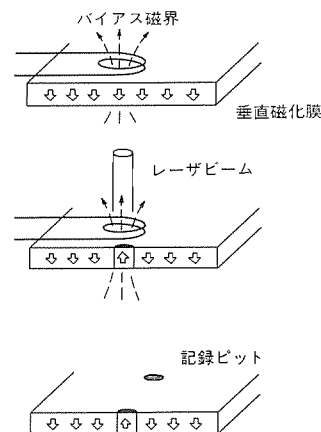


図5. 光磁気ディスクの記録原理

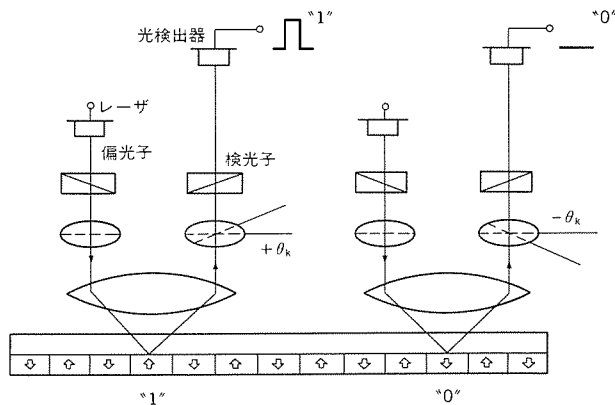


図6. 光磁気ディスクの再生原理

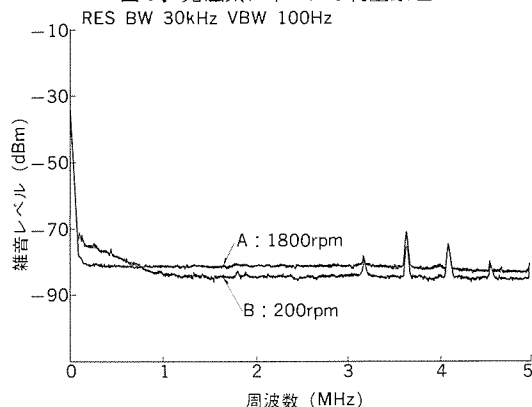


図7. 戻り光雑音の実装評価

を通して検出すると、偏光方向の回転を光強度の変化としてとらえることができるため、記録信号(磁化方向の反転)を再生することができる。

4. 光ヘッドの特性と記録再生特性

4.1 光ヘッドの戻り光雑音

図1に示した光ヘッドは、直線偏光をディスクに照射し、さらに半導体レーザからディスクまでの光学系透過率を高くするために、三角プリズムを用いてビーム整形し、ビームスプリッタも透過率を60~80%と高くしている。このためディスクからの戻り光が大きく、これによって誘起される雑音のためSN比が低下する。光ヘッドの良否はこの戻り光雑音を低く抑えられているかどうかで決まる。図7に戻り光雑音の評価例を示す。Aは1800rpmで回転中のディスク雑音(消去後)、Bは200rpmに回転数を落した場合のスペクトラムで、低速回転ではディスク雑音が低域に分布するため1MHz以上では

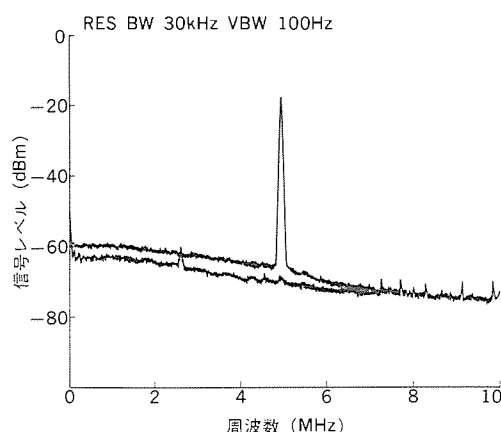


図8. 再生信号スペクトル

ディスク雑音を含まない戻り光雑音を見ていることになる。実際の光ディスク装置では戻り光雑音のレベルNbはディスク雑音（消去後）Ndに比べ少なくとも3dB以下でなければならない。

図8に、この装置で130mm書換型光ディスクの最内周（半径30mm）に周波数4.95MHzで記録した時の、再生信号のスペクトルを示す。

4.2 追記型・書換型光ディスクの記録再生特性

図1の構成の光ヘッドで構成された記録再生装置で追記型光ディスクと光磁気書換型光ディスクの最内周（30mm）にそれぞれISOで決められたRZ変調の最高周波数と最低周波数の信号をパルス幅47nsで記録した特性を次に示す。

実験条件は、ディスク回転数は2400rpm、再生パワーは追記型の場合は0.9mW、書換型の場合は1.5mWである。

図9にC/Nの記録パワー依存性を示す。追記型光ディスクの最高周波数（4.95MHz）の場合はパワーの増加に対して明確なスレッシュホールドがあるのに対し、書換型の場合は緩やかに飽和している。この違いは、記録膜が追記型では半金属であるのに対し光磁気膜は金属膜で熱伝導が大きいためである。

図10に分解能とジッタの記録パワー依存性を示す。ここで、分解能は最高周波数の再生信号振幅と最低周波数の同信号の比で定義する。最適記録パワーは、これらの特性から追記型ディスクで6mW、書換型ディスクで9mWであり、どちらも、分解能60%、ジッタ2～3nsを得られた。これらの特性は、追記型・書換型共に、130mmISOフォーマットで、300Mバイトの記憶容量を確保できる能力を示している。

5. 光ディスクの将来技術

5.1 磁界変調方式オーバーライト

光磁気ディスクにおいて、情報をオーバーライトする方法として磁界変調方式がある。この方式では、図11に示すようにレーザー光を連続的に照射しつつ、外部磁界の向きを信号に応じて反転することによって記録を行う。レーザー光によって加熱された領域は、ディスクの回転に伴いレーザー光の照射領域から外れていく。それにつれて、この領域の温度は低下し、磁性層のキュリー温度を下回った時点で外部磁化の向きに磁化される。この方式では、記録前の磁化方向に関係なく記録されるため、オーバーライトが可能になる。

図12にオーバーライトした結果を示す。(a)は1MHz信号を記録パワー7mWで磁界変調記録したときの再生スペクトルで、(b)はその上に1.5MHz信号を初期記録と同じパワーでオーバーライトした結

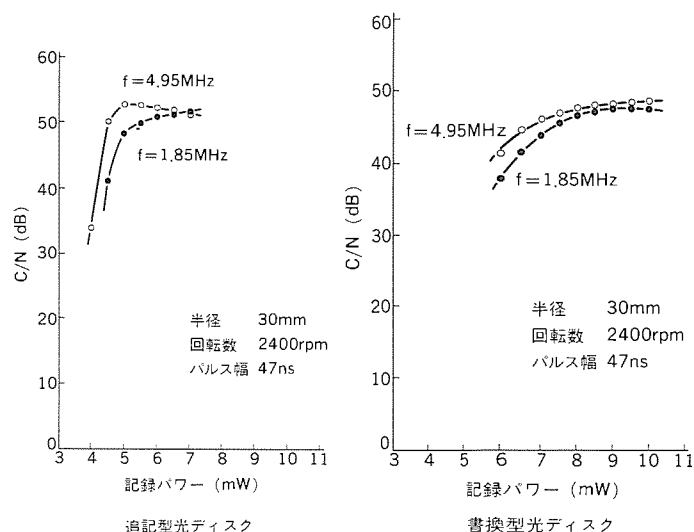


図9. C/Nの記録パワー依存性

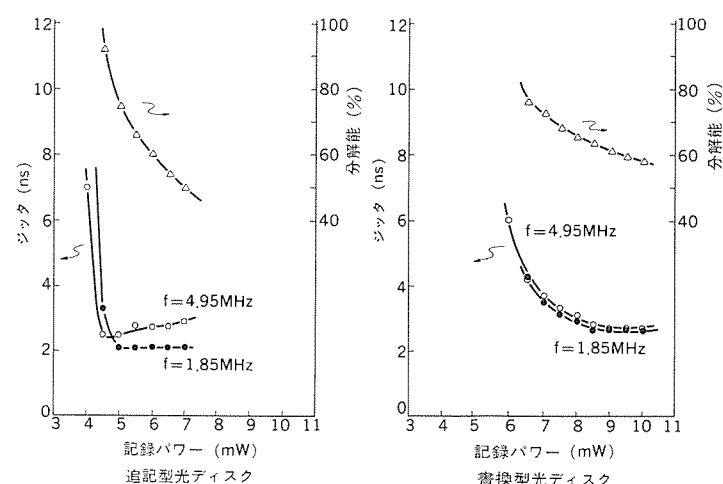


図10. 分解能・ジッタの記録パワー依存性

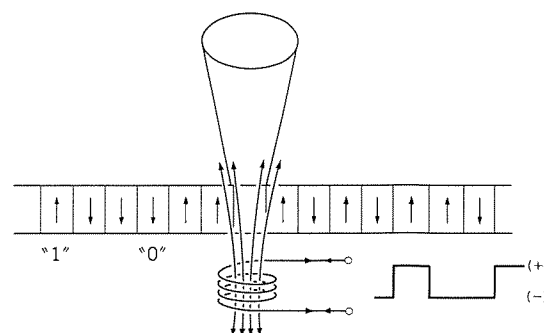


図11. 磁界変調方式の概念図

果である。オーバーライト後、1MHz信号は観測されていない。図13にオーバーライトパワーと残留信号成分の関係を示す⁽⁶⁾。1MHz信号記録後、1.5MHz信号をパワーを変化させてオーバーライトした結果である。オーバーライト後の初期記録信号（1MHz）の残留成分は、オーバーライトパワーが大きくなるにつれて小さくなり、最初の記録パワー（7mW）以上になるとノイズレベルと等しくなり、オーバーライトが完全に行われたと判断できる。図中の実線は、記録過程の熱解析により求めた記録ビットの再生過程を理論計算した結果であり、実験結果とよく一致していることが分かる。

この方式の実用化には、印加磁界の高周波化、ディスクの耐環境信頼性の向上、記録磁性層の最適化などが今後の課題である。

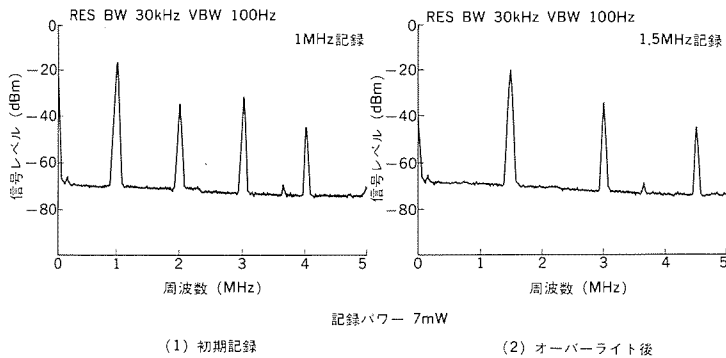


図12. 磁界変調によるオーバーライト記録

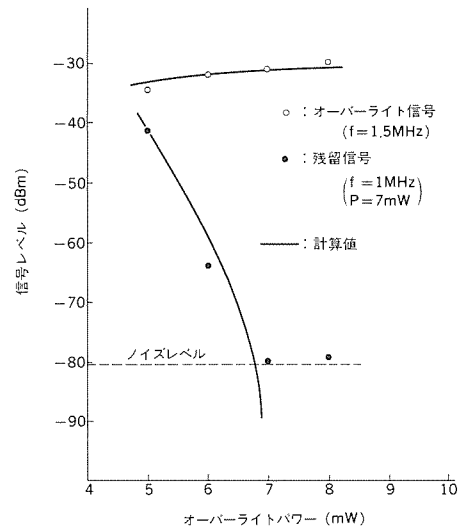


図13. オーバーライトパワーと残留信号の関係

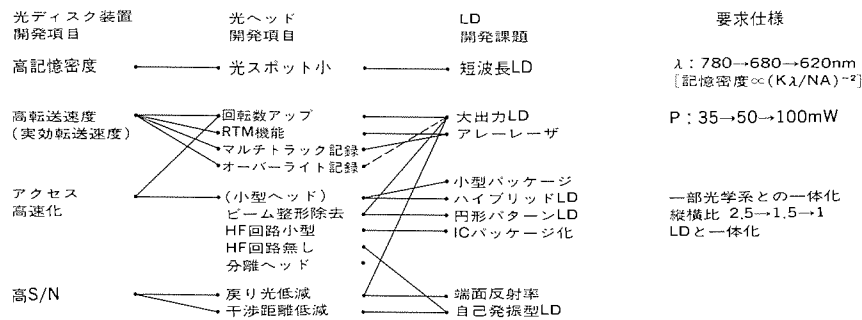


図14. 光ディスク装置からみた半導体レーザの課題

5.2 半導体レーザへの期待

光ディスク装置の高性能化には記録密度の向上、データ転送速度の向上、アクセス時間の短縮、装置の小型化がある。これらは半導体レーザの性能向上に期待するところが大きい。図14に光ディスク装置から見た半導体レーザの課題を相関図で示す。

記録密度はスポット径の2乗に反比例するため、半導体レーザの短波長化が進められている。当面600nm台がターゲットである⁽⁷⁾。

データ転送速度の向上には、ディスク回転数を上げることが有効であり、早い時期に、磁気ディスク並の3600から5400rpmの回転数が必要となる。そのとき、ディスクの記録感度向上を見込んでも50mW以上の出力パワーが必要となる。

システムとしての実効転送速度を速めるには、オーバーライトの実現とともにマルチビームによるマルチトラック記録が有効である。これにはアレイレーザの開発が必要になる⁽⁸⁾。

アクセス時間の短縮には、光ヘッドの小型・軽量化が最も求められている。ビーム整形部を除去できれば、ヘッドの組立性が向上するとともに小型化が可能である。それには楕円ビームの中央部を使って円形にするため半導体レーザの高出力化が必要である。また、レーザの放射角の縦横比を1:1に近づける方向での新しい半導体レーザの開発もパワーの有効利用の面からも望まれる。また、半導体レーザの戻り光雑音対策と兼ねて、半導体レーザと一体化した高周波重畳回路のIC化や逆に高周波重畳の不用な自己発振型の半導体レーザや可干渉距離の短い半導体レーザなどによる小型化も望まれる。さらに、ホログラフィや導波路型集積回路など、半導体レーザと光学部品との集積化も進むものと考えられる。

6. むすび

光磁気記録媒体の記録再生に用いられる光学系の光ヘッドで、穴開け方式の追記型光ディスクと光磁気方式の書換型光ディスクの特性を評価し、分解能とジッタ特性から130mmISOフォーマットで300 Mバイトの記憶容量を確保できる能力を持っていることを確認した。

CDから追記型、追記型から書換型と半導体レーザの高出力化とともに再生専用から出発して、画像ファイル更に計算機のメモリに使用できる機能を持った光ディスクが実現されてきた。今後大出力、短波長化と半導体レーザへの期待は大きい。光ディスク装置の大容量化、アクセス速度の向上、データ転送速度の向上という命題の鍵を半導体レーザが握っている。

参考文献

- (1) S.Itoya, M.Nakada, T.Kubo: IEEE Transactions on Consumer Electronics, CE-24, No.3 (1978-8)
- (2) K. Okada et al. : 61st AES Convention No.1409 (1978)
- (3) 土橋ほか: 三菱電機技報, 62, No.7, p.6 (1988)
- (4) 堤ほか: 三菱電機技報, 62, No.7, p.10 (1988)
- (5) 藤田ほか: 三菱電機技報, 62, No.7, p.18 (1988)
- (6) K.Yamada, I.Watanabe, K.Tanaka, M.Nakada: Proc. SPIE, 899, 160 (1988)
- (7) 山中ほか: 第48回応用物理学会講演会予稿集, 17a-zp-1 (1987)
- (8) 常包ほか: 第49回応用物理学会講演会予稿集, 5 p-zc-9 (1988)

レーザ応用ニューロコンピュータ

太田 淳*
小島啓介*
久間和生**

1. ま え が き

最近、生物の脳の優れた情報処理能力を模倣したニューロコンピュータ（神経回路網模擬計算機）の研究が盛んである^{(1)~(4)}。ニューロコンピュータは、多数のニューロン（神経細胞）と呼ばれる素子で構成されたネットワークの結合パターン（ニューロン間結合強度の時間的・空間的パターン）に着目した学習能力を持つ超並列コンピュータで、現行のコンピュータが苦手とする処理能力、例えば音声、手書き文字、画像などのパターン認識や連想機能等を潜在的に持っている。逆に、数値演算のような精度を要求する分野には不向きであり、現行のコンピュータと相補関係にあるとも言える。

ニューロコンピュータの研究には、生物の脳のモデル化や学習アルゴリズムの研究、現行のコンピュータを用いた仮想ニューロシステムのロボティクスなどへの応用研究、LSIやレーザ等の光技術を用いた専用ハードウェアの研究がある⁽⁵⁾。

レーザ応用の光ニューロコンピュータは、LSIを利用したものと比較して、次のような潜在的な利点を持っている。

- (1) レーザ光は空間並列性を持っているので、本質的に完全並列コンピュータであるニューロコンピュータとの整合性が良い、すなわち、ホログラムや空間光変調器などを用いた空間光配線技術により、膨大な数のニューロン間の配線が可能である。また、ニューロン間の結合（シナプス結合）の強さを動的（ダイナミック）に制御・変更可能である。
- (2) 光波は互いにクロストークをうけることなく伝搬し、またその伝送容量も大きい。
- (3) 超高速演算が期待される。

これらの中でも、(1)の特長は、以下に述べる理由により、重要である。ニューロコンピュータは、ニューロン数が増えると、ニューロン間配線数が天文学的に増大するという問題点がある。例えば、10⁴個のニューロンで構成されるネットワークでは、最大10⁸個の配線数が必要になる。このような膨大な配線数は、現在のLSI技術を用いても実現が困難である。また、学習機能を持つニューロコンピュ

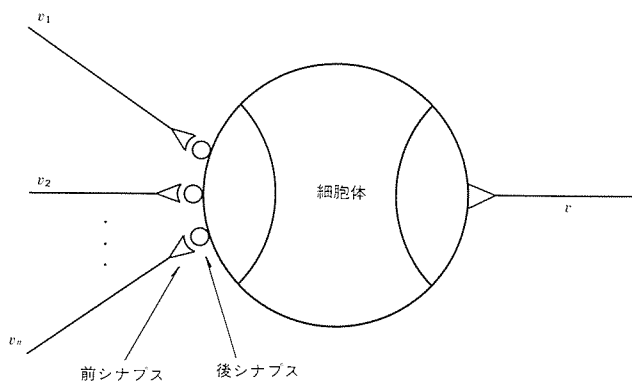


図1. ニューロンのモデル

ータでは、シナプス結合強度が修正信号によって可変の動的ネットワークが必要とされる。このような動的ネットワークをLSIで作製すると、集積されるニューロン数が急激に減少してしまう。これに対して、レーザ等の光技術を用いれば、このような膨大な数のニューロン間配線を、空間配線技術によって動的にかつ超高速に行える可能性がある。

本稿では、まず代表的なニューラルネットワークモデルについて述べ、次にハードウェア化の例として当社が研究を進めている光技術を用いたニューロコンピュータ（光ニューロコンピュータ）の特長、原理、光キーデバイス及びシステム構成について述べる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

2. ニューラルネットワークモデル

2.1 ニューロンの機能とモデル

脳の中で情報処理を担っている基本素子はニューロン（神経細胞）である⁽¹⁾⁽³⁾。ニューロンは図1に示すように、多入力／1出力型のしきい値特性を持つ飽和型非線形素子とみなせる。すなわち、ニューロンはその膜電位（各ニューロンからの入力の重みづけ加算値） v_i がある一定値（しきい値）以下の時には出力がゼロであるが、しきい値以上になるとパルスが発生し、他のニューロンに信号を送る。一つのニューロンはシナプスを介して10³～10⁴もの他のニューロンと結合している。ニューロンを数式でモデル化する場合、各ニューロンの出力は、その興奮の度合いに応じて0と+1のデジタル値を取るものとする。この時*i*番目のニューロンの出力状態 v_i は、これに接続されている*N*個のニューロンの出力状態 v_j ($j = 1, \dots, N$)とシナプス結合強度 T_{ij} との積 $T_{ij}v_j$ の総和及び自己固有のしきい値 h_i を用いて次式で近似される。

$$v_i = \theta \left(\sum_{j=1}^N T_{ij} v_j - h_i \right) \dots\dots\dots (1)$$

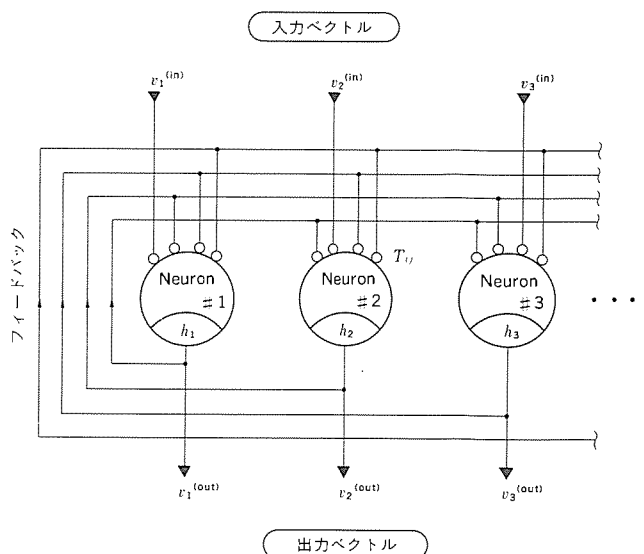


図2. フィードバックモデル

*中央研究所**同（工博）

ここで、 j 番目のニューロンが i 番目のニューロンに及ぼす程度を表す T_{ij} は、その値が正の時に興奮性、負の時は抑制性シナプス結合に対応する。また、 $\theta(x)$ は $x > 0$ のとき 1、それ以外では 0 の非線形な関数である。

2.2 フィードバックモデル

図 2 に示されているように、ネットワークに含まれるニューロンが互いに接続されており、各ニューロンの出力信号がフィードバックして再び他のニューロンに入力するモデルを、ここではフィードバックモデルと呼ぶことにする。このモデルを用いた代表例として、連想メモリを考える⁽¹⁾⁽⁹⁾。

いま、 N 個のニューロンで構成されるネットワークにおいて、記憶する完全情報の数を M 、また、 m 番目の完全情報に対するニューロンの状態を 2 値 (0, 1) の列ベクトル $v^{(m)}$ で表現する。次に、シナプス結合行列 T_{ij} を $v^{(m)}$ の外積により

$$T_{ij} = \sum_{m=1}^M (2 v_i^{(m)} - 1) (2 v_j^{(m)} - 1) \dots\dots\dots (2)$$

ただし $T_{ii} = 0$

で定義する。これは、分散多重記憶の一例で、他の代表例としてはホログラムがある。

Hopfield はこのモデルをスピン系と対応させて考え、記憶されたという現象がネットワークの安定状態、すなわち、次式で与えられるエネルギー E の極小値となることに対応することを示した⁽⁸⁾。

$$E = - (1/2) \sum_{i,j=1}^N T_{ij} v_i v_j - \sum_{j=1}^N b_j v_j \dots\dots\dots (3)$$

したがって、記憶情報を完全情報と考えると、任意の不完全情報がニューロンの状態ベクトルとして入力されたとき、式(2)で与えられる非線形しきい値処理及びフィードバック作用により、ニューロンの状態ベクトルは入力情報に最も類似した記憶情報に自発的に変化して、結局、安定状態に達したときのベクトルを完全情報として

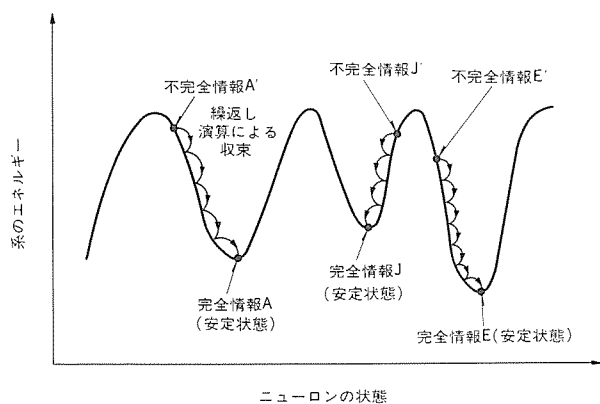


図 3. ニューロンの状態遷移の概念図

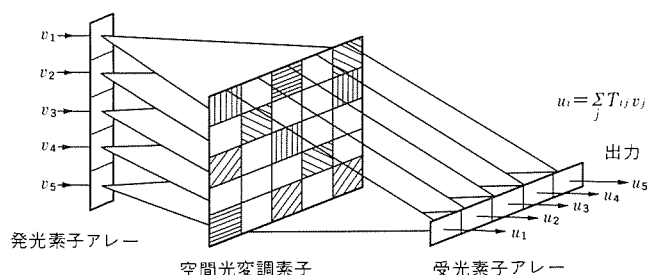


図 4. 光学的ベクトル・行列乗算の基本構成

出力することになる。図 3 はその様子を模式的に示したものである。

しかし、連想機能を精度よく得るためには、ニューロン数 N は記憶する情報の数 M に比べて十分大きいこと、また、各記憶状態ベクトル間には直交性が成り立つことが望ましい。これらの条件が満足されている場合でも、非線形処理によって、一般的にエネルギー関数 E は、 N 次元ベクトル空間において、記憶情報に対応する極小点 (グローバルミニマと呼ぶ) のほかにも、望ましくないローカルミニマと呼ばれる多くの浅い谷底が存在して、初期条件によっては、これらのローカルミニマにトラップされてしまうことも示されている。

3. 要素技術

ニューロコンピュータをレーザ等を用いた光学的ハードウェアとして実現するには、膨大なニューロン間の光インタコネクション素子、光源としてのレーザアレー、しきい値素子及びこれらの素子を用いた光学系が必要である。

3.1 行列—ベクトル乗算器 (ニューロン間配線技術)

まず、式(1)で表現される行列—ベクトル積を演算する光学系を紹介しよう。図 4 に基本的な構成例を示す。ベクトル情報 v は、LED (発光ダイオード) や LD (レーザダイオード) などの発光素子アレーから光強度として放射される。各発光素子からの出力、例えば v_j ($j = 1, 2, \dots, N$) はレンズ系 (図中では省略されている) を用いて扇状ビームとなるように波面変換され、行列 T に対応する光学マスクの j 列成分のみを一様に照射する。 T の (i, j) 成分の T_{ij} の大きさを光透過率として与えておくと、その出力は $T_{ij} v_j$ に比例する。次に、この光学マスクからの出力光はレンズ系によって、今度はすべての i 行成分が受光素子アレーの一つに集光される。したがって、 i 番目の受光素子出力 u_i は、

$$u_i = \sum_{j=1}^N T_{ij} v_j \dots\dots\dots (4)$$

となり、受光素子出力の行列—ベクトル積が得られることが分かる。ここで重要なことは、光学的手法を用いると、上述の演算が極めて高速に並列に実行されることである。例えば、 $100 \times 100 = 10^4$ 個の成分の行列を仮定し、発光素子を 100MHz で駆動すると、毎秒 10^{12} 回の演算が成されることに相当する。しかし、図 4 に示したシステムは、行列成分は基本的に固定された値に限られる欠点がある。より汎用性の高い行列—ベクトル乗算器を得るには、電気的又は光学的に行列成分の値を高速に書き換えることの可能な二次元空間光変調素子の開発が必要である。また、扇状ビームにするためのレンズ系等が必要になり光学系が複雑になる。

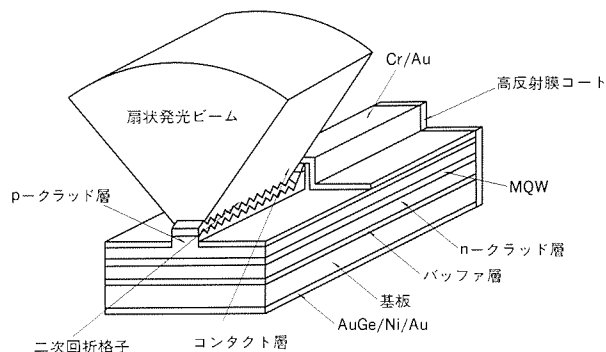


図 5. 回折格子結合型面発光レーザ構造模式図

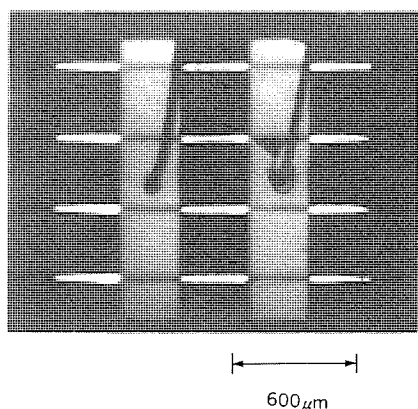
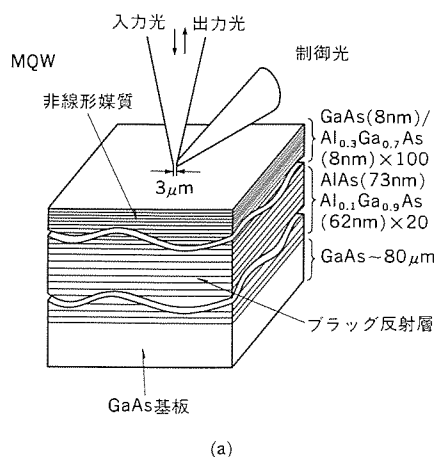


図6. 面発光レーザーアレー (3×4) 発光パターン

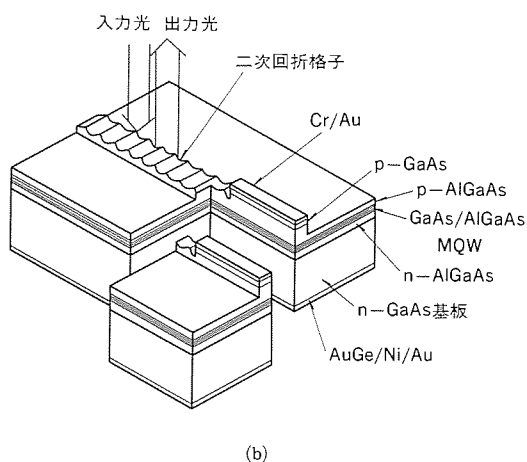
3.2 面発光半導体レーザーアレー⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

3.1節で述べたベクトル行列乗算には、レーザービームを扇状にする必要がある。回折格子結合型面発光半導体レーザーは、ビーム形状が典型値として $0.15^\circ \times 10^\circ$ 程度の扇状であるため、シリンドリカルレンズ等の光学系なしで上述の演算に用いることができる。当社では、幾つかの種類の回折格子結合型面発光半導体レーザーを開発し、室温連続発振に成功している。

図5はGaAs/AIGaAs多重量子井戸(MQW)構造を用いた分布ブラッグ反射(DBR)型の面発光レーザーである。分布ブラッグ反射構造により簡単にビームを面に垂直方向に取り出すことができる。しきい値電流は38mA、室温連続動作時及びパルス動作時の、面発光



(a)



(b)

図8. 全光型しきい値素子

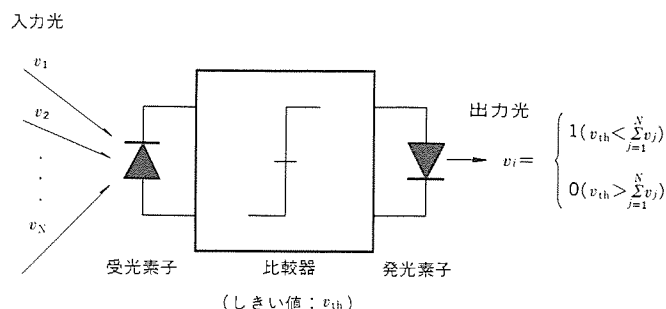


図7. 光電子ハイブリッド型しきい値素子

パワーは各々6mW及び100mW以上である。回折格子ラインに直角方向のビーム広がり200μm開口での回折限界である 0.17° であった。

この面発光レーザーを12個二次元アレー化(=3×4)した。図6はその発光パターンである。パルス動作時の出力として500mW以上、量子効率32%と高い値が得られた。このような面発光素子の二次元アレーは、光ニューロコンピュータのキーデバイスとして将来使われるであろう。

3.3 光しきい値素子(光ニューロン)

光しきい値素子も光ニューロコンピュータ不可欠である。最も簡単な光しきい値素子は、図7に示されているように、受光素子と、電気的に動作する比較器、及びレーザー等の発光素子で構成される。ここでは、将来の全光ニューロコンピュータを目指して、現在当社で開発段階にある図8に示す全光方式の光しきい値素子の例を紹介しよう。図8(a)の素子は、10nm程度の膜厚のGaAsとAlGaAs層とを交互に積層成長したMQW層の強い非線形光学効果を利用する⁽¹¹⁾。ここで言う非線形光学効果とは、入力光強度によって屈折率が変化する現象である。このMQW層を2枚の部分ミラーでサンドイッチ構造にした非線形光共振器を作る。この素子では、入力レーザー光強度でMQW層の屈折率を変えると光共振器の特性が変わるので、プローブ光の出力状態をスイッチできる。応答速度も速く、ナノ秒以下で動作する。筆者のグループでは、直径3μm、厚さ3μmの非線形光共振器を作製して、入力パワー10mW以下で動作する光しきい値素子を得ている。この光共振器を、例えば素子間隔10μmで二次元アレー化すると、1cm²のウエーハ状に10⁶個の光しきい値素子が得られる。

図8(b)に当社で開発した他の方式による全光しきい値素子の構成図を示す⁽¹²⁾。二次回折格子を利用した面発光双安定MQW-DBR

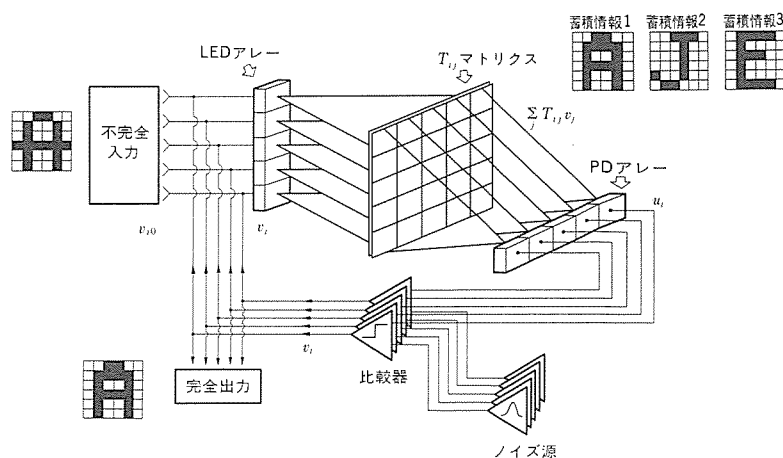


図9. 連想光ニューロコンピュータの基本構成

レーザで、3.2節で述べたレーザとほぼ同一構造である。まず、レーザへの注入電流よりわずかに低くバイアスしておく。次に、可飽和吸収体として働くDBR領域に注入光（制御光）を照射すると、レーザの発振しきい値が低下し、その結果、レーザは発振（スイッチオン）する。この現象を利用した光しきい値素子では、立ち上がり時間約30ピコ秒、スイッチングエネルギー約10ピコジュールの特性が得られている。この素子は、超高速応答特性、利得を有する、二次元アレー化が可能など多くの特長を持っており、今後動作エネルギーの一層の低下、素子寸法の低減などが期待される。

4. 光技術によるハードウェア化（光ニューロコンピュータ）

Psaltisらは、フィードバックモデルに基づいた連想メモリを光学的に実現することを提案し、その基礎実験を行った⁽¹³⁾。また、当社では、途中の浅い谷底（ローカルミニマ）にトラップされることなく記憶情報に対応した極小点に収束するように、外部から雑音を加えてニューロンの状態を確率的に遷移させていく、一種のSimulated Annealingの考え方を導入した光連想メモリを試作した⁽¹⁴⁾。当社の試作したシステムを図9に示す。図10はその外観写真である。3.1節で述べた光学的な行列ベクトル乗算器を基本構造に用いたニューロン数 $N=32$ 、記憶状態ベクトル $M=3$ のシステムである。ニューロンは、図9に示されているように、フォトダイオード（PD）と比較器及びLEDで構成されている。PDアレーで光電変換された信号は、比較器でしきい値処理され、LEDアレーにフィードバックされる。この繰返し演算によって、不完全入力 A に対して、蓄積された完全情報 A, J, E の中で最も類似した A を選択し、完全出力が得られる。

ただし、行列 T_{ij} は興奮性、抑制性シナプス結合に対応する、正負の成分を有する双極性である。したがって、実際のシステムでは T_{ij} の正成分のみを集めた $T_{ij}^{(+)}$ と負成分のみを集めた $T_{ij}^{(-)}$ に対応した2チャンネルの光学系を構成している。

また、前述したローカルミニマにトラップされることなく完全情報に相当するグローバルミニマに収束するように、互いに相関のない雑音源を比較器の参照端子に与えている。その結果、図11に示すように、文字認識率が大幅に向上した。

5. む す び

これまで述べてきたように、光技術は、電子技術と比較して、ニューロコンピュータをハードウェア化する手段として、潜在的に魅力のある特徴を有している。しかし、電子技術がVLSIという形で、その能力の限界に近づいているのに対して、光技術はようやく単体のレーザ素子が気軽に使われ始めた時代である。電子の世界にたとえれば、トランジスタの時代に相当する。したがって、光の特徴を十分利用したシステムを構築するには、優れたニューラルモデル、学習アルゴリズムや光ニューロコンピュータのアーキテクチャの研究はもちろんのこと、本稿でも紹介した面発光素子アレー、光しきい値素子アレーなどの新しい光素子や、それらの材料、プロセス技術に関する研究が不可欠であろう。

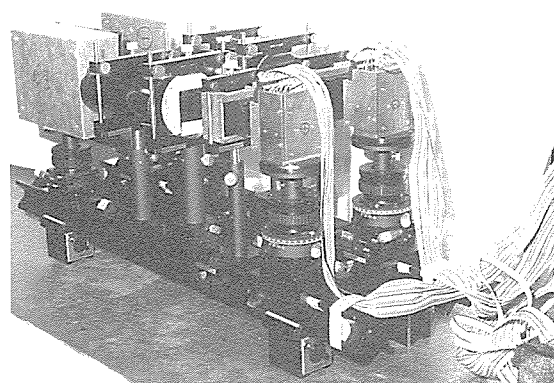


図10. 連想光ニューロコンピュータの外観写真

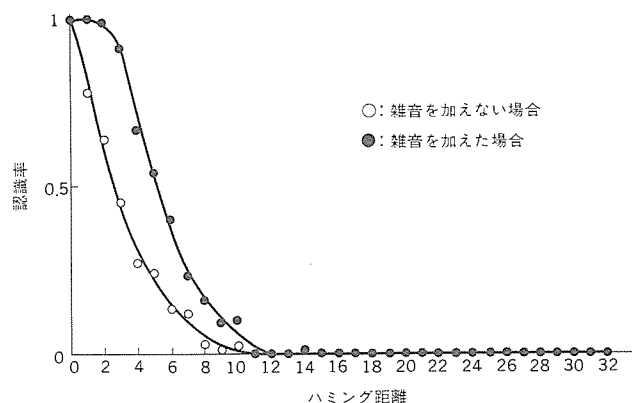


図11. 統計的雑音導入による連想精度の改善

参 考 文 献

- (1) 甘利：神経回路網の数理，産業図書（1978）
- (2) 甘利：数理学，286，p.61（1987）
- (3) D.E. Rumelhart, J.L. McClelland and the PDP Research Group：Parallel Distributed Processing I, II, MIT Press（1986）
- (4) Appl. Opt., (ニューラルネットワーク特集号), 26, No.23（1987）
- (5) 臼井，米津：応用物理，57，p.668（1988）
- (6) 久間：bit，20，No.2，p.155（1988）
- (7) 久間，田井：テレビジョン学会技術報告12，p.13（1988）
- (8) J.J. Hopfield：Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 79, p.2554（1982）
- (9) K. Kojima et al.：Appl. Phys. Lett., 50, p.1705（1987）
- (10) K. Mitsunaga et al.：Appl. Phys. Lett., 50, p.1788（1987）
- (11) J. Ohta et al.：Electron. Lett., 24, p.216（1988）
- (12) K. Kyuma, K. Kojima：Proc. 6th International on Ultrafast Phenomena, FB 2（1988）
- (13) N.H. Farhat：Opt. Lett., 12, p.448（1987）
- (14) 太田ほか：電子情報通信学会，OQE, 87-174（1988）

メタノール改質100kW級燃料電池発電システム

菅 伸之* 加藤俊一* 留井英明** 水本洋一**

1. ま え が き

燃料電池発電システムは、発電効率が40%以上、熱利用も含めた総合熱効率は80%以上が期待できる。また、小規模でも効率が高く、環境安全性も良好なので都市近郊設置の分散形発電設備として適する。さらに、部分負荷運転でも高い発電効率を維持し、負荷変化に対する応答速度も速く、起動時間も短いので、オンサイト形から火力代替形まで幅広い分野で導入可能な発電設備と評価されている。

燃料電池はその電解質の種類により、幾つかのタイプに分類される。なかでも、天然ガスやメタノールを原燃料とするリン酸型燃料電池発電システムの実用化が最も早いと考えられており、各方面で精力的な研究開発が進められている。

このたび、北海道電力㈱と三菱電機㈱とは、共同研究の契約を結び、メタノールを燃料とする100kW級リン酸型燃料電池発電試験設備の設計・製作・運転を実施し、各種の実証試験研究を行っている。特に、次の5項目の研究開発項目について、リン酸型燃料電池の実用化に向けての技術課題の解明、基本技術の確立、さらに寒冷地での排熱利用技術の修得などの技術開発を目的とした実証試験を行っている。

- (1) 運転性能評価
- (2) 保守・保安・信頼性の実証
- (3) システム連系・所内単独試験
- (4) 環境特性評価
- (5) 排熱特性利用評価

以下にシステムの概要と特長を述べ、現在までに得られた運転特性について報告する。

2. システムの概要

この研究開発では、将来においてコージェネレーション システムとしての適用性及び使用燃料の入手性を考えて、メタノールを燃料とする100kW級リン酸型燃料電池発電試験設備を開発し、伊達発電所構内において実証試験を実施している。この設備の基本仕様を表1に示す。建設工程は、昭和61年12月に電気事業法第70条に基づく「自家用電気工作物工事計画の認可」を受け工事に着手し、昭和62年9月に現地掘付け工事を行い、10月に試運転を開始した。同年11月5、6日に電気事業法に基づく使用前検査（完成検査）に合格し、引き続き運転研究を実施している。

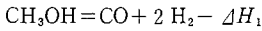
2.1 システムの基本構成

発電システムの基本構成を図1に示す。主要機器は、燃料であるメタノールを燃料電池の燃料となる水素ガス（改質ガス）に改質する燃料改質装置、この水素と空気中の酸素とから直流電力を発生する燃料電池本体、発生した直流電力を所定の交流電力に変換する直交変換装置とから構成される。制御装置は、マルチループコントローラ〔MELSEP 500〕を使用し、マンマシンインタフェースとしては専用の燃料電池操作盤及びメンテナンスパネル〔MELSEP 1100〕で

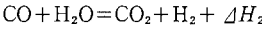
構成した。試験データの採取・処理には、ワークステーション“M3305”で構成したデータ処理装置を使用している。なお、交流電力は、発電所構内系統との連系運転又は単独負荷運転とし、排熱利用は冷房／暖房の空調及び給湯などとしている。

2.2 プラントの主要系統

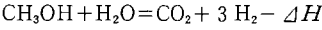
プラントの主要系統図を図2に示す。原燃料メタノールは、燃料ポンプによって貯蔵タンクからこの設備に供給する。図中で、改質系統では、メタノールと水とを混合し、蒸発器及び加熱器によって気化・加熱した後、改質器へ送入する。改質器では、熱媒加熱方式を採用しており、加熱炉内に設けた熱媒加熱器によって反応熱を供給し、改質反応が行われる。この反応は、メタノールと蒸気の混合気体が触媒のもとで次の反応により、水素・炭酸ガスを主成分とする改質ガスを生成する水蒸気改質法である。代表的な反応機構は、メタノールの分解反応、



及び一酸化炭素の変成反応、



との二つの反応が同時進行し、総括的には次式で表される。



この反応は、触媒・温度・圧力・水蒸気比が相互に関係して平衡状態となり、反応全体としては吸熱反応である。改質ガスは、熱交換器及び改質ガス気水分離器によって、未反応余剰蒸気の凝縮分離と温度調節を行った後、燃料電池の燃料極に送られる。

加熱炉系統では、電池排ガス中の残留水素を燃料とし、改質反応に必要な反応熱を供給する。図中で熱媒は、熱媒循環ポンプにより昇圧され、加熱炉で所定温度まで昇温され改質器に熱を供給する。なお、起動時には原燃料メタノールの一部を加熱炉の燃料としている。

水・蒸気系統では、電池冷却水から回収される電池発生熱及び電池排ガスの燃焼により加熱された熱媒の余剰熱により、改質系統に必要な蒸気を供給する。図中で冷却水は、冷却水循環ポンプによって電池本体及び熱媒の冷却器に供給され、回収熱は水蒸気分離器から蒸気として放出されて改質系統に供給される。改質反応などで消費した水は、電池本体内の電気化学反応に伴う生成水分を空気極出口ガス冷却器において凝縮して回収することにより、通常状態では外部から水の補給は必要としない。水蒸気分離器の冷却水は、高純度の水を必要とするので、水処理装置により純水・脱気の処理工程

表1. 試験設備の基本仕様

項 目		基本仕様
型 式	力	リン酸型
出 力		100kW（交流発電端）
発 電 効 率		36%（発電端、HHV）
起 動 時 間		2時間以内
応 答 速 度		25～100% 5分
制 御		全自動
燃 料		メタノール

*北海道電力㈱**三菱電機㈱神戸製作所

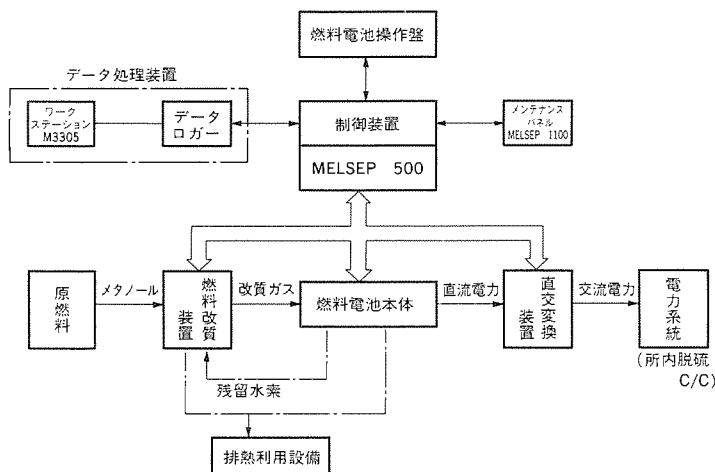


図1. 発電システムの基本構成

を経て給水ポンプにより供給される。

空気系統では、燃料電池内で水素と電気化学反応を行う反応用空気と加熱炉内でメタノール、又は電池排ガスを燃焼させるための燃焼用空気を供給する。図中で反応用空気は、電池用空気ブロウにより燃料電池の空気極に供給され、空気極出口側で反応生成水を分離した後で大気に排出される。燃焼用空気は、電池用空気ブロウとは異なるもので、加熱炉空気ブロウにより所定の空燃比の空気量が供給される。

排ガス系統では、燃料電池の空気極出口ガス及び加熱炉の燃焼排ガスを合流させて、通常火力と同等の温度、湿度で排気筒により大

気に放出している。

窒素ガス系統を保安上から設けており、燃料電池スタック槽へ供給するとともに、設備停止後の改質系統などの可燃性ガスを置換するために必要な窒素ガスを供給する。

プラントからの排熱回収は、水蒸気分離器からの余剰蒸気、排ガス熱回収器からの高温水、空気極出口ガス冷却器からの中温水などにより行っている。排熱側に貯湯タンクを設けて、高温水は熱交換したものを直接に、中温水は熱交換後に電気式ヒートポンプ“CRH-8EQ”により昇温して貯蔵する系統としている。

排熱利用の系統は、一重効用の吸収式冷凍機により冷水を供給した冷房及び高温水直接利用の暖房からなる空調システム、高温水の熱交換した給湯システムから構成した。また、低温水については、冬期のロードヒーティングに利用する。

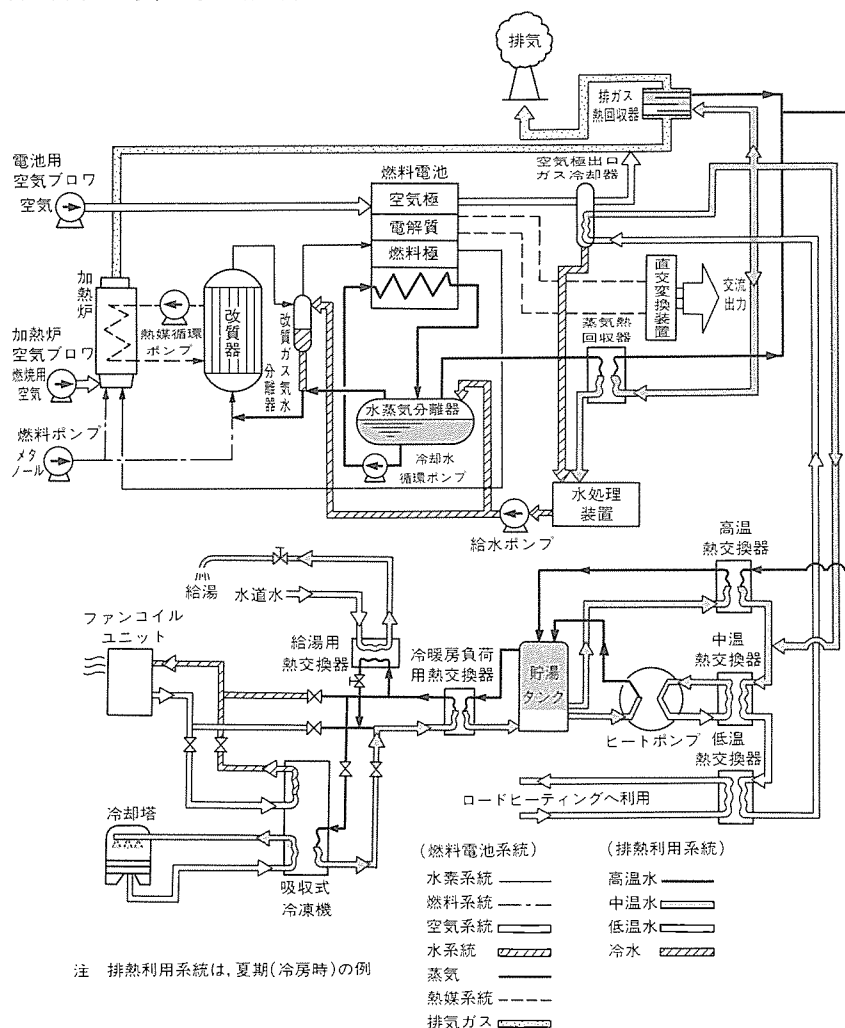
2.3 試験設備の仕様及び特長

実証試験用に開発した100kW級リン酸型燃料電池発電試験設備の機器仕様を表2に示す。現地に据え付けた試験設備のプラント機器全景を図3に、排熱利用設備全景を図4に示す。

この試験設備の使用目的から、運転の容易さ、安全性の確保及び点検・保守の簡便さを考慮して設計・製作を行い、次の特長がある。

(1) 発電効率・総合熱効率

改質装置、燃料電池、直交変換装置などの主要機器の変換効率向上とともに、機器配置の最適化及び放熱量の低減により、高い発電効率を得ている。また、排熱回収系は、熱交換器の最適配置及び冷却水系統の2段構成により、高温で高い回収率を得ている。



注 排熱利用系統は、夏期(冷房時)の例

図2. プラントの主要系統図

表 2. 試験設備の機器仕様

項 目	仕 様
型 式	リン酸型
出 力	100kW (交流発電端)
燃料電池	冷却方式 動作圧力 動作温度
改質装置	プロセス 燃料
交流出力	電圧 接続 電圧波形ひずみ
運転性能	発電効率 総合熱効率 起動時間 応答速度 制御
設置場所	北海道電力伊達発電所構内
環境特性	NOx SOx
排熱利用	

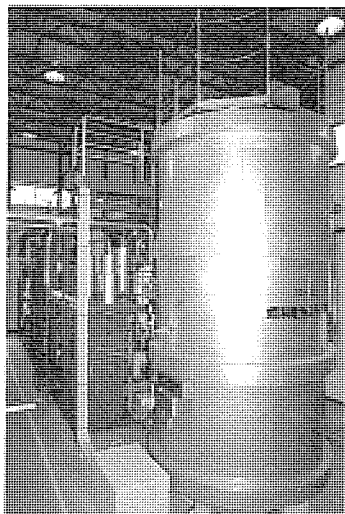


図 3. プラント機器全景

(2) 起動時間

加熱炉のメタノールバーナ及び水蒸気分離器内の電気ヒータの加熱容量を検討し、両者の協調制御により、冷機状態からの起動時間が最短になるようにした。

(3) 応答速度

系統連系での運転条件を考慮して、通常火力発電の応答速度の3倍以上早くなるように、改質系統及び水・蒸気系統の動的な運転特性を向上させた。

(4) 制御

マルチループコントローラによるDDC (Direct Digital Control)方式を採用し、系統連系時に電気出力制御又は熱出力制御の運転が無人・自動で可能である。また、単独運転は定電圧制御として、無人・自動の運転とした。

(5) パッケージ構成

改質系統、水・蒸気系統、燃料電池、直交変換系、制御系の5分割のパッケージ構成とし、工場での全系統試験終了後に分割輸送ができるようにして、設備の性能・品質確保及び現地での据付け・調整

メタノール改質100kW級燃料電池発電システム・菅・加藤・留井・水本

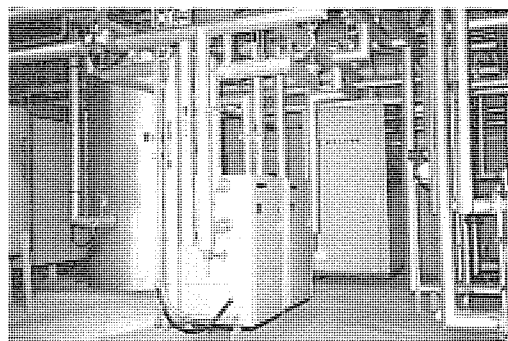


図 4. 排熱利用設備全景

表 3. 運転実績

昭和63年10月末

項 目	実 績 値
発電時間	1,869h
発電電力量	130,926kWh
起動停止回数	187回
運転パターン	DSS又はWSS
起動時間 (冷機)	2.0h以内
〃 (暖機)	1.5h以内
応答速度	25~100% 5分
発電効率 (定格負荷にて)	37.1%

期間を短縮した。

排熱利用設備は、寒冷地での排熱の有効利用を図った構成とし、次の特長がある。

(1) 高温水の熱供給

電力と排熱の負荷曲線の差異が通常であるので、貯湯タンクを設けて高温水による熱供給システムの構成とした。

(2) 中温水の高温水化

高温水の供給量を増やすため、電気式ヒートポンプにより、中温水から熱回収をする系統を採用した。

(3) 低温水の有効利用

冬期、ロードヒーティングへ低温水を利用して、排熱の利用率を高めている。

3. 運 転 特 性

昭和62年10月の初発電以来の運転実績を表3に示す。運転パターンは、毎日起動停止のDSS運転又は週間起動停止のWSS運転を原則としており、運転試験は順調に進んでいる。

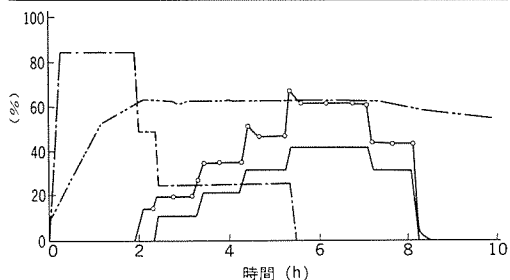
3.1 発 電 効 率

燃料であるメタノールは、JIS K 1501相当品を使用しており、運転初期である昭和62年11月の定格負荷運転のときに、発電端での発電効率は37.1%であった。このとき、主要機器である改質装置、燃料電池及び直交変換装置の各々の変換効率は、76%、52%及び94%であり、各機器とも設計値を達成している。燃料電池発電システムの発電効率については、改質触媒の活性低下及び燃料電池の経時特性によって、一般に長期的には低下傾向を示すものである。この試験設備では、DSS運転の影響もあり若干の低下現象を示しているが、著しい性能変化もなく良好な特性である。

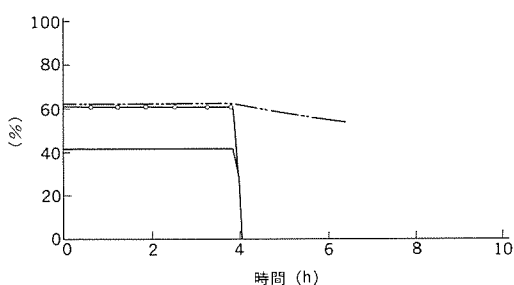
3.2 起動停止特性

通常運転での起動停止特性の一例を図5(a)に示す。室温状態からの冷機起動時間は2時間以内であり、設計値を満足している。この時間は、起動時において、加熱炉メタノールバーナ及び水蒸気分離器内電気ヒータによる加熱を両者の協調制御によって最短化したもので、この設備の加熱容量からは限界に近い値である。一方、停止

測定項目	縦軸0……100(%)	表示線
加熱炉出口熱媒温度	0……400 (°C)	—
原燃料メタノール流量	0……100 (L/h)	○
加熱炉供給メタノール流量	0……40 (L/h)	—
発電端有効電力	0……240 (kW)	—



(a) 起動停止特性



(b) 負荷遮断特性

特性は、発電停止後から30分以内で系統内の窒素置換を完了しており、設計値を満足している。

また、暖機からの起動時間は、加熱炉の熱媒温度及び水蒸気分離器の冷却水温度に強く依存しているが、およそ1.5時間以内となることを確認している。

3.3 負荷遮断特性

定格負荷運転からの負荷遮断特性の一例を図5(b)に示す。この試験は、緊急停止スイッチの手動操作によって実施したものであり、15分以内に系統内の窒素置換が完了し、試験設備が安全に停止したことが確認できた。同様に、数十回の自動緊急停止試験や制御電源の喪失試験においても、試験設備は安全に停止し、機器に何らかの損傷が発生しないことを確認した。

3.4 再起動特性

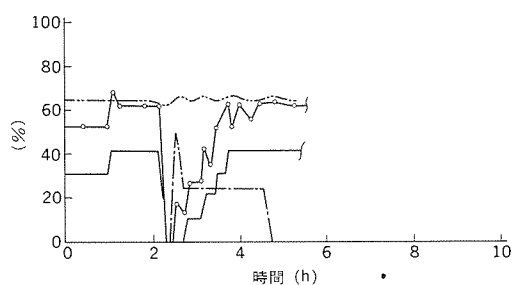
定格負荷運転から停止した後、即時に起動した場合の再起動特性の一例を図5(c)に示す。この試験設備は、無人・自動運転を想定した設計として待機状態を特に設けていないので、通常又は緊急停止のとき必ず一度停止状態に入った後、手動での起動操作により再起動する。緊急停止後の再起動試験では、30分以内に系統併入状態となり、非常に短いことを確認できた。

3.5 負荷追従性

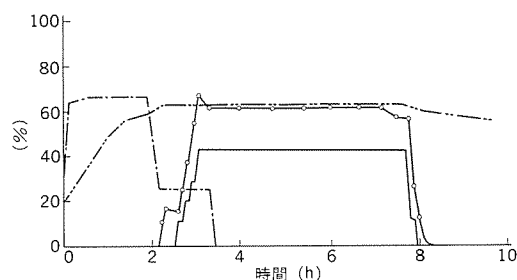
負荷追従特性の一例を図5(d)に示す。この試験は、系統連系において、25%ステップごとの負荷指令を与える方法で実施し、プラント全系は安定に動作し、負荷変化率15%/分の設計値を満足している。一般に、燃料電池発電システムの負荷応答は、燃料改質装置の応答速度に依存し、特に液体燃料の場合はガス化のための蒸発速度に左右される。今回、改質ガス系統内にバッファタンクを設置しないで、15%/分の高い値を達成したが、制御パラメータの最適化により一層高い値が得られる見通しである。

3.6 環境特性

定格負荷運転における環境特性を表4に示す。試験設備から排出されるガスは、燃料電池の排空気及び加熱炉の燃焼排ガスであるが、



(c) 再起動特性



(d) 負荷追従特性

図5. 運転特性

表4. 環境特性

測定項目	設計目標	実績	備考
排ガス中 NOx SOx	20ppm以下 0	1ppm以下 0	JIS B 7982 (定電位電解法) JIS B 7981 (定電位電解法) JIS K 0103 (比濁法)
騒音	—	60dB以下	建屋1.5m 暗騒音50dB

窒素酸化物、硫黄酸化物、一酸化炭素及びダストなどは検出レベル以下（1 ppm以下）であり、環境特性に優れていることが実証された。騒音については、音源が空気ブロワ、小型ポンプ類であり、プレハブの建屋外1.5mにおいて60dB以下で、極めて良好であった。

4. む す び

メタノール改質100kW級燃料電池発電試験設備の開発及び運転試験により、燃料電池発電システムがコージェネレーションシステムとして最適な特性を持つことを実証した。特に、メタノールを燃料としていることもあり、燃料改質装置の小型化、プラント起動時間の短縮、発電効率の向上などが実現できた。また、試験設備をパッケージ構成とすることにより、工場試験による品質確保及び現地据付け・調整期間の短縮が可能となることを示した。

今後とも、燃料電池発電システムの実用化のために、設備製作の低コスト化とともに、一層の性能向上、信頼性向上及び運転・保守技術の確立に取り組んでいく予定である。

参 考 文 献

- (1) 岸田ほか：三菱電機技報，55，No. 7，p.475（昭56）
- (2) 岸田ほか：三菱電機技報，57，No. 5，p.362（昭58）
- (3) 佐々木ほか：三菱電機技報，58，No. 6，p.433（昭59）
- (4) 永島：北海道火力原子力発電ニュース，28，No.1，p.1（昭60）
- (5) 好田：北海道火力原子力発電ニュース，30，No.1，p.1（昭62）
- (6) 永島ほか：第8回アルコール燃料国際シンポジウム，Abs. No. 162（1988-11）

新 1 ループコントローラ《MACTUS 210シリーズ》

古屋鍵司* 森 俊吾* 森山達朗* 平松伸一* 島田隆志*

1. ま え が き

1979年4月に業界初のマイクロプロセッサを搭載した1ループコントローラを発表してから、今年で10年になる。

当時は、汎用8ビットマイクロプロセッサ応用機器の多い(黎明期であったが、この10年にわたる半導体技術の革新により、今ではあらゆる装置にマイクロプロセッサが組み込まれるまでに至っている。これは、マイクロプロセッサが容易に高付加価値製品を生み出すことができ、同時に高集積化による小型・軽量化が可能となることに起因していると考えられる。

こうした時代背景のもとに新技術を駆使し、新たに1ループコントローラ《MACTUS 210シリーズ》を開発した。高機能・高性能・多機能化とともに小型・軽量化を実現し、かつ操作性・保守性が飛躍的に改善されている。

本稿で紹介する《MACTUS 210シリーズ》は、システムの規模にかかわらず、汎用の計装制御用コントローラとして様々な分野に適用できるものである。

2. 開発の基本方針

当社従来機種である《MACTUS 200シリーズ》は、発売以来好評を得ているものの、様々な要望・指摘事項なども受けてきた。これらの事項を踏まえ、すべての問題点を解消すべく、次の各項目を基本方針として《MACTUS 210シリーズ》(図1)を開発した。

- 最新のマイクロプロセッサの採用で処理能力を高め、多機能・高性能化を図り、オートチューニング機能を実現する。
- プロセスの監視操作を容易にするために、前面操作パネルの視認性を向上し、このパネルからのパラメータのモニタチューニングを可能にする。
- カスタムIC化、複合機能内蔵LSIの採用、表面実装部品の採用によりプリント基板の集積度を向上し、またユニット内部構造の徹底した簡素化により小型・軽量化を図る。
- 自己診断機能の充実により、可能な限り異常項目を識別できることとし、また寿命部品を必要最小限とすることにより保守性を向

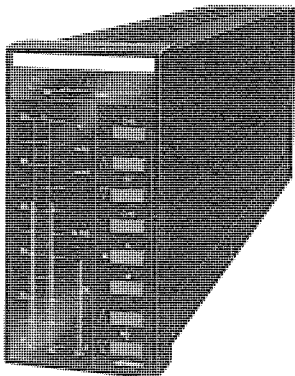


図1.《MACTUS 210シリーズ》の外観

上する。

- パネル形状は144mm×72mmになるDIN (IEC) 規格に準拠し、国際規格化を図る。

3. 新 1 ループコントローラ

3.1 《MACTUS 210シリーズ》

《MACTUS 210シリーズ》では、汎用型と高機能型を用意しており、各々にオートチューニング機能を付加することができる。

汎用型は、一般に数多く使用される制御形態を4種類標準装備しており、これらのいずれかを選択し、さらに変更可能な機能について該当するものを指定するだけで、プログラムレスに制御機能を構築できる。高機能型は、多彩な制御演算命令群により、単純なものから複雑多岐にわたる制御機能の構築を容易に実現できる。高機能型のプログラムは、液晶タッチパネルで操作する、可搬型プログラミングユニットにより生成する。表1にこれらの主な仕様を示す。

3.2 ユニット構成

従来のPID制御機能を持つ計装機器は、パネルにハウジングを固定し、この中に内部ユニットを収納していた。制御パラメータの設定変更などの操作は、内部ユニットを手前へ引き出し、右側面に用意されている操作部で行っていた。内部ユニットとハウジングは、フラットケーブルなどにより接続され、内部ユニットが引き出されても信号は接続されたまま伸び縮みするなど、この接続機構は種々工夫が凝らされていた。

小型・軽量化を実現するために、このような従来構造の踏襲では限界があると判断し、VA(Value Analysis)的発想に基づいて見直した。内部ユニットは、周囲がケースで覆われており、これをハウジングに収納すると二重に保護されることになる。また、内部ユニットの引き出しは、何らかの操作をするためであり、操作部のみ引き出せば、内部ユニットとハウジングのケーブル接続は不要となる。このような検討の結果、内部ユニットを操作部と制御部に分離した。また、ハウジングとケースを一体化し、制御部はこの中に固定したままで操作部のみ引き出せる構造とした。さらに、プロセスの状態監視をしながら制御パラメータの設定変更を可能とするため

表1.《MACTUS 210シリーズ》の仕様

	汎 用 型		高 機 能 型	
型 名	MACTUS 210	MACTUS 210AT	MACTUS 211	MACTUS 211AT
オートチューニング機能	無し	有り	無し	有り
入出力	アナログ入力	5点 1～5VDC	73種類	
	アナログ出力	4点 4～20mADC(2点), 1～5VDC(2点)		
	デジタル入力	6点 20～30VDC, 10mA(24Vのとき)		
	デジタル出力	7点 20～30VDC, 100mA以下		
	パルス出力	2点 20～30VDC, 100mA以下		
制御周期	指定機能による(100ms又は200ms)		100ms～1s(50msきざみ)	
制御機能ブロック数	4種類の制御形態のいずれかを選択する		73種類	
使用可能ブロック数	PID, PID-PID, R-PID, R+PID		200ステップ	
エンジニアリング サポートツール	チューニングパネル操作		プログラミングユニット (可搬型液晶タッチパネル)	
外形寸法・重量	144mm×72mm×400mm・2.5kg, 外形寸法はDIN(IEC)規格準拠			

に、設定操作面を引き起こせるよう配慮した。図2に簡素化されたユニット構成を示す。

3.3 ハードウェア内部構成

前述のユニット構成に対応し、図3に示すように操作部と制御部に各々マイクロプロセッサを設けることとした。マイクロプロセッサは、共に通信機能が内蔵されており、BSC(Binary Synchronous Communication)方式で交信しデータの授受を行う。操作部は、主に表示制御とキー入力制御を行い、また制御部は主に演算制御とプロセス入出力制御を行う。特に制御部は、機能・性能を向上するために最新のデバイスを採用している。マイクロプロセッサは、周辺LSI内蔵の16ビットCPUを、EPROMは1Mビット品を1個、SRAMは256Kビット品を2個、EEPROMは64Kビット品を2個使用して

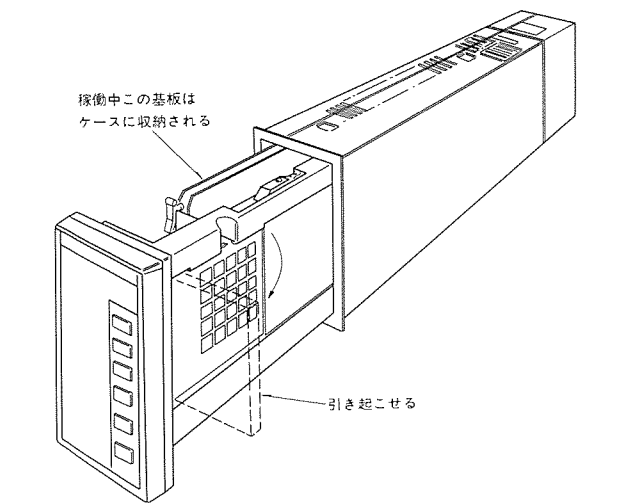


図2. ユニット構成

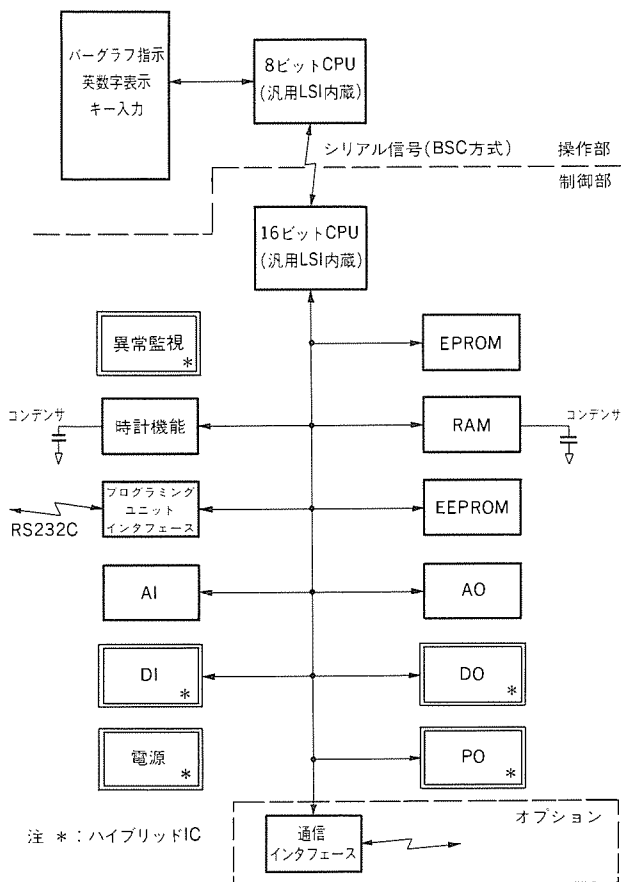


図3. ハードウェア内部構成図

り、低消費電力化のために製造プロセスはいずれもCMOSとしている。

EEPROMは、電氣的書き込み可能な不揮発性ICメモリであり、供給電源がOFFしても、内容は長期保存されるので、アプリケーションプログラムの格納領域として使用する。RAMにはEEPROMと同一のプログラム情報、演算に使用する過去値などが格納されており、CPUは通常このRAMを参照して演算制御する。また、RAMは大容量コンデンサでバックアップされており、約3日間の停電が起きたとしても情報が失われることはない。このことから、短時間停電、長時間停電のどちらでも再起動が可能であり、従来RAMのバックアップ用に使用していたリチウム電池の必要性がなくなった。

3.4 特長的機能

《MACTUS 210シリーズ》には数多くの特長的機能がある。この節では特に高性能型の制御機能の中で、従来と比べ大幅に改善されているものについて以下に示す。

(1) 制御形態

PID制御を主体とし、表2(a)に示す6種類の制御形態のいずれかを選択することができる。比率カスケードセクタ制御を選択したときでも、PID命令のPV(Process Variable: 測定値)、SV(Set Point Variable: 目標値)と比率命令のPV、R(Ratio: 比率)はすべて簡単なキー操作により前面操作パネルでのバググラフ指示が可能である。同時に、これらのデータは前面の英数字表示器で高精度に工業量表示できる。

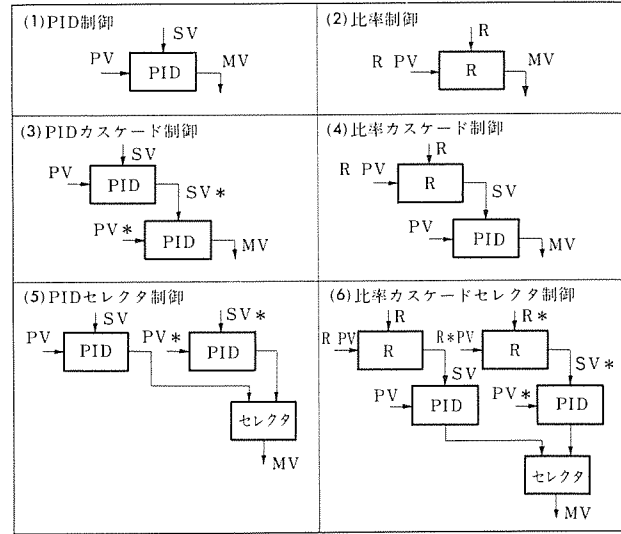
また、演算式は表2(b)に示す方式を採用しており、PIDは4種類のいずれかを選択使用する。

(2) 命令構成

四則演算、論理演算などは、5入力1出力の命令構成としており、

表2. PID, 比率制御機能

(a) 制御形態



(b) 演算式

基本PID	<ul style="list-style-type: none">● 微分先行型 $\Delta MV = K_p \{ (EV_n - EV_{n-1}) + \frac{\Delta T}{T_d} EV_n + D_n \}$$D_n = D_{n-1} + \frac{M_d \cdot T_d}{M_d \cdot \Delta T + T_d} \{ (PV_n - 2PV_{n-1} + PV_{n-2}) - \frac{\Delta T}{T_d} D_{n-1} \}$● 偏差微分型 $\Delta MV = K_p \{ EV_n - EV_{n-1} \} + \frac{\Delta T}{T_d} EV_n + D_n$$D_n = D_{n-1} + \frac{M_d \cdot T_d}{M_d \cdot \Delta T + T_d} \{ (EV_n - 2EV_{n-1} + EV_{n-2}) - \frac{\Delta T}{T_d} D_{n-1} \}$	出力 = $\sum_{i=1}^n \Delta MV_i$
サンプルPI	<ul style="list-style-type: none">● サンプル期間 $\Delta MV = K_p \{ (EV_n - EV_{n-1}) + \frac{\Delta T}{T_i} EV_n \}$● ホールド期間 $\Delta MV = 0$	
I-PD	$\Delta MV = K_p \cdot \frac{\Delta T}{T_d} EV_n + (PV_n - PV_{n-1}) - D_n$ D_n は微分先行型と同一	
ブレンドPI	$\Delta MV = K_p \cdot \Delta T \{ EV_n + \frac{\Delta T}{T_i} \sum EV_n \}$	

加算命令とAND命令のブロック図と一般式を図4に示す。多入力を扱える命令構成としたことで、使用する命令数を大幅に削減することができ、またベクトル、マトリクス演算を容易に扱えることから、現代制御理論に基づく制御機能の構築にも適している。

(3) 時計機能

時計用LSIを搭載したことにより、ある時刻に至った時点で自動的に制御を開始するなどの時刻制御を可能とした。現在の年、月、日、時、分、秒をデータとして読み込めるので、比較命令と組み合わせることで起動指令などを生成する。また、24時間のプログラムパターン発生機能を内蔵しており、タイムパターン テーブルに最大で24種類の時刻と出力値を指定することにより、パターンを発生できる。

(4) ICカード

アプリケーション プログラムは、プログラミング ユニットにより生成するが、生成したプログラム情報をICカード内に長期間保存することができる。従来は、内部ユニット右側面のICソケットにEPROMを装着していたが、これと比べると素手でICに触れることがなく、取扱いが容易となった。

4. オートチューニング機能

4.1. ファジィ推論の応用

PIDオートチューニング機能を実現するに際し、プロセスに対し外乱となるテスト信号を出力しなくて済み、プロセスのモデル化の必要がなく、簡易で少量の演算で済むなどの点で有利であるファジィ推論を応用することとした。ファジィ推論は、人間のあいまいな思考・判断の過程を定量的に模擬することが容易で、従来、試行錯誤で行っていたチューニングの自動化の実現に適している。

このオートチューニング機能は、当社独自の方法であり、機能構成を図5(a)に示す。特徴量抽出部は、測定値・目標値・操作出力値・偏差の各波形を常時観測し、特徴量を抽出してファジィ推論部へ送る。ファジィ推論部は、知識として内蔵しているルール及びメンバーシップ関数を用いて、特徴量を評価し、その評価の度合いに応じて重み付けする。さらに、今回の評価結果を前回までの評価結果と加え併せて得た値を、PID制御部に対しチューニング命令として与える。

また、動作を図式化したものを図5(b)に示す。ルールは、IF～THEN形式で記述され、例えば“偏差が振動的であり、その振幅減衰比が大き過ぎるならば、現在の比例係数は大き過ぎる”というものである。この場合、振幅減衰比が特徴量である。このルールが励起したとき、振幅減衰比を評価するために、あらかじめ用意されているメンバーシップ関数を参照し、振幅減衰比が大き過ぎる度合いを求める。さらに、前回までのチューニング動作により形成されている学習メンバーシップ関数に、今回求めた度合いを加え併せ、新たな学習メンバーシップ関数を形成すると同時に比例係数を下げるよう動作する。

図6にこの様子を示している。同図(a)で振幅減衰比が0.6であったとすると、この度合いは0.5と求められる。さらに、同図(b)で、比例係数がPの位置において0.5なる不満の度合いが生じたと判断し、この領域を埋めると同時に比例係数はPの位置より左側へ移動する。

このように、複数存在するルールのいずれかの励起は、望ましくない状況が生じたことを意味しており、より満足できる方向へPID定数は自動的に修正されていく。また、どのルールも励起しないと

きは満足できる状況にあるので、PID定数の修正は行われない。

以上述べたように、この方式は前回までの総合推論結果を現在に

$$\text{出力} = K_1 X_1 + K_2 X_2 + K_3 X_3 + K_4 X_4 + K_5 X_5 + B$$

$$\text{出力} = x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \wedge x_5$$

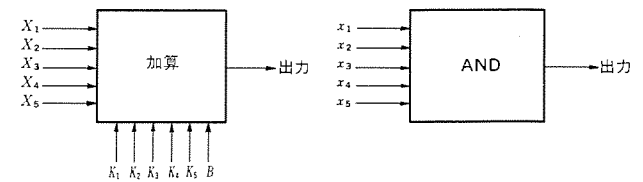
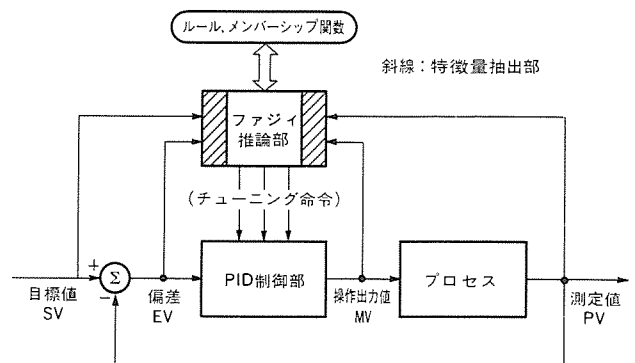
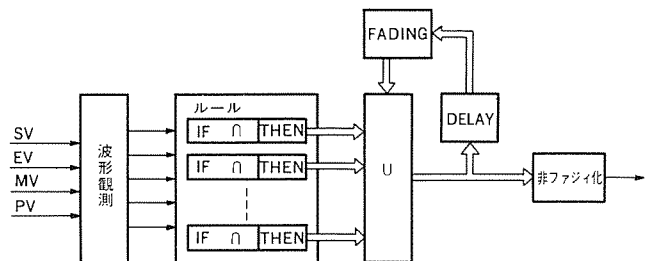


図4. 多入力命令

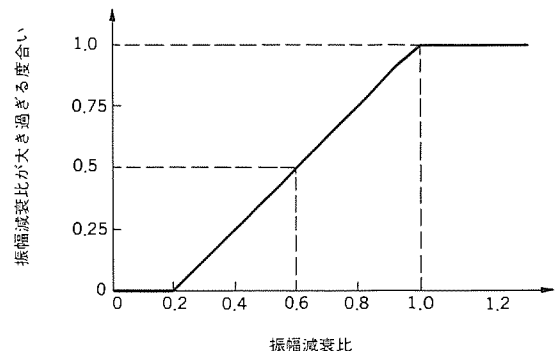


(a) 機能構成

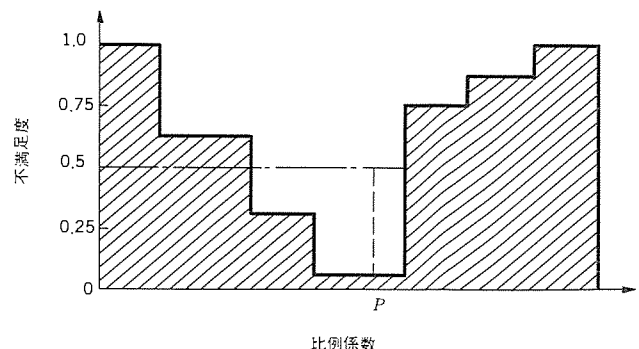


(b) オートチューニング動作

図5. オートチューニングの機能と動作



(a) 振幅減衰比を評価するメンバーシップ関数



(b) 学習メンバーシップ関数

図6. メンバーシップ関数

再帰させ、各ルールによる今回の推論結果と合成したものを今回の総合推論結果とすることから、再帰型ファジィ推論法に基づいているといえる。

4.2 適用に際しての考え方

ルールは従来からの経験則、すなわち熟練オペレータPID定数をチューニングする際の思考過程を集約したものであり、合計20種類程度用意されている。この方式の動作原理から、このルールに記述された範囲において、望ましくない制御状態の検出、又は何らかの状態変化の検出によりいずれかのルールが励起され、よりよい方向へPID定数のチューニングがなされる。

前述のルール以外で代表的なものを以下に示す。

- 目標値がステップ変化し、これに対する測定値の行き過ぎ量が大き過ぎるならば、現在の比例係数は大き過ぎる。
- 目標値がランプ変化中で、これに対する測定値の追従が鈍く、このとき操作出力値がリミットにかかっていなければ、現在の比例係数は小さ過ぎる。

このように偏差の振動を抑える動き、目標値のステップ及びランプ変化に対する応答を改善する動きなど、一般に必要とされる動特性の改善効果はすべて盛り込まれているので、プロセスの適用分野を限定することなく汎用的な使用が可能である。

また、ルールが励起したとき、特徴量を評価するためにメンバーシップ関数を参照するが、プロセスに応じてその度合いを変えなければならない場合がある。例えば、図6(a)において、振幅減衰比が0.8のときにその度合いを1.0にする場合である。メンバーシップ関数は、経験上最も一般的なデフォルト値が設定されているが、こうしたときでも柔軟に対応できるようにするために、制御パラメータの設定と同等の操作方法で設定変更できるよう配慮している。

なお、オートチューニング機能の起動・停止はボタン操作で容易に行うことができ、停止中は通常のPID制御機能が従来どおり動作する。

5. 小型化の手法

ユニット構成は前述したとおり簡素化したが、同時にプリント基板を小型化するために、実装部品の高集積化と基板の高密度実装化を図った。

5.1 カスタムIC化

高機能化と同時に小型化するためにカスタムICを開発した。CPU周辺のロジック部をゲートアレー化し、プロセス入出力部及び故障検出部をハイブリッドIC(HIC)化した。

ゲートアレーは、現在2万ゲートを超えるものの製造が可能となっているが、ピン数の制約、開発期間の短縮、開発コストの低減などを考慮し、小容量のものを3品種開発した。ゲートアレーによりロジックのスイッチング速度が早くなり、最高速でのCPU動作が可能となることで、高性能化にも寄与した。

ハイブリッドICは、短期間で安価に開発することができ、独立した機能の高集積化に適している。図3のハイブリッドICで示す部分に6品種開発した。プリント基板の実装効率を上げるため、SIP(Single Inline Package)の形状としている。

5.2 表面実装

近年の軽薄短小化を受けて、表面実装するプリント基板が急速に増えてきている。表面実装化によるメリットは、プリント基板の小型化、部品実装の自動化、自動化による高信頼度化と低価格化など

である。

《MACTUS 210シリーズ》では、これらのメリットを生かし、可能な限り表面実装化を図った。CPU、ゲートアレーはQFP、汎用LSI、汎用ICはSOP、トランジスタ、ダイオードはミニモールド、抵抗、コンデンサは角チップのパッケージを各々選定した。パッケージの形状を表3に示す。プリント基板を製造する上で、すべて表面実装部品であることが望ましいが、コネクタ、スイッチ、表示器などは表面実装困難であるので、表面実装型部品と挿入型部品の混載基板としている。また、プリント基板の両面に表面実装部品を実装しているが、表面側にLSI、ICなどの半導体を、裏面側に抵抗、コンデンサを装着している。

6. システム拡張

6.1 《MELSEC-NET》接続機能

《MACTUS 210シリーズ》は、オプションとして《MELSEC-NET》接続機能を付加することができる。《MELSEC-NET》と接続することにより、1ループコントローラ間及び他の《MACTUSシリーズ》との機器間通信が可能となり、協調した制御システムの構築が可能となる。

《MELSEC-NET》は表4に示す仕様であり、ノイズフリーの光ファイバケーブル接続と経済性の高い同軸ケーブル接続のいずれかを選択できる。《MELSEC-NET》上には1,024点のワード信号と、1,024点のビット信号が巡回しており、全局でこれらの信号を共有する。

6.2 小規模システム

小規模システムは、近年になってにわかに脚光を浴びてきているが、これは多品種少量生産システムの進展と、産業用に使用可能なパソコンの出現により、安価でフレンドリーな監視制御システムの要求が高まっていることに起因すると考えることができる。

こうしたニーズに対応すべく、小規模システム向けの監視制御シ

表3. パッケージ形状

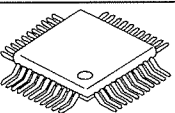
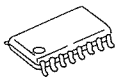


パッケージ	形状
QFP (Quad Flat Package)	
SOP (Small Outline Package)	
ミニモールド	
角チップ	

表4. 《MELSEC-NET》の仕様

項 目	光ケーブル	同軸ケーブル
通信速度	1.25Mbps	
通信方式	半二重ビットシリアル	
同期方式	フレーム同期	
伝送路形式	二重ループ形式	
最大伝送ケーブル長	局間500m(総延長10km)	局間1km(総延長10km)

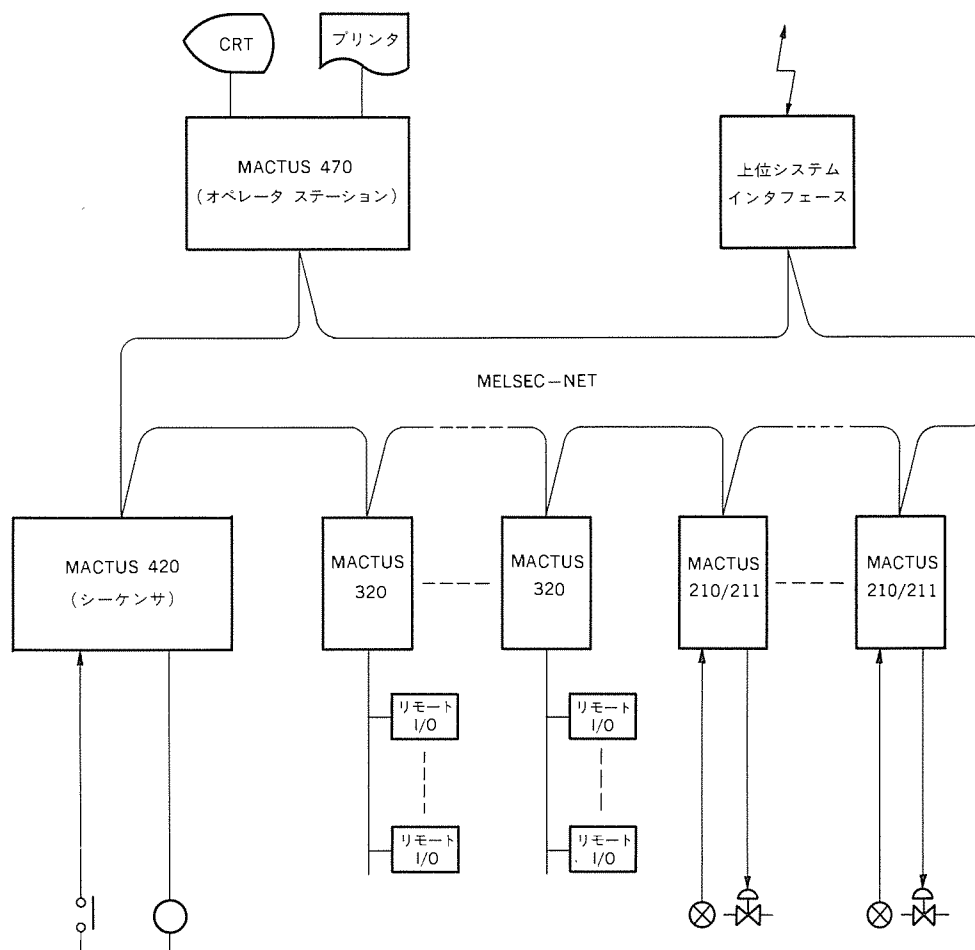


図 7. 小規模システム構成例

表 5. システム仕様

項 目	仕 様
システム規模	監視系局数
	MACTUS 470 など
	最大 4 局
	制御系局数
	MACTUS 420
	MACTUS 320
	MACTUS 210 シリーズ
	最大 16 局
MACTUS 470	外部入力
	ディジタル入力
	384 点
	パルス入力
	128 点
	アナログ入力
	128 点
	CRT 出力
	系統図画面
	入力全点
	トレンドグラフ画面
	128 点
MACTUS 420	128 点用
	入力 96 点, 出力 32 点, 外部タイマ 5 点
MACTUS 320	256 点用
	入力 192 点, 出力 64 点, 外部タイマ 10 点
MACTUS 320	1 ユニットシーケンサ
	機械・負荷のシーケンス制御を執行
	リモート I/O ユニット
	MACTUS 320 と CDL バスで接続, 各種入出力タイプあり
MACTUS 320	EMC 型
	マルチコントローラ
	コントロールセンター内に収納, 各種保護・表示機能を保持

システムを用意しており、構成例を図 7 に、また仕様を表 5 に示す。

6.3 小規模システムの特長

(1) 水平分散の基本思想

小規模システムながら水平分散の基本思想を踏襲しており、システムの規模・機能に対応し適切なコントローラを必要台数、分散配

置することができる。このことにより、安価で信頼性の高い監視制御システムを構築できる。

(2) システムの拡張性

分散化及び階層化が可能なシステム構成としているので、増設・変更に対して柔軟に対応することができ、また上位システム・広域システムとの接続が容易である。このため、小規模システム対応のみならず、大中規模システムのサブシステムとしての応用も可能となる。

(3) 中央から現場までの電子化

コントロールセンターをはじめとする現場機器との信号授受を、専用の伝送バス (CDLバス) により行うこととしており、機器全体を統合したシステムとして構築できる。このことで中央から現場までの電子化が実現でき、システムの信頼性が向上する。

6.4 適用例

小規模ポンプ場での台数制御と圧力一定制御を行う場合の一例を図 8 に示す。各系統のポンプ、吐出弁、及び共通の封水ポンプに 1 台ずつ 1 ユニットシーケンサ《MACTUS 320》を配置し、圧力一定制御を《MACTUS 211》で実現した例である。《MACTUS 211》は、設定された圧力になるよう操作量を出力する一方、《MELSEC-NET》を介してポンプ運転台数制御指令を《MACTUS 320》に伝える。《MACTUS 320》はこの指令を受け、リモート I/O を介して各操作器を制御する。

この例では、1 ユニットシーケンサ《MACTUS 320》を適用したが、グループ単位の制御を可能とする《MACTUS 420》を適用することもできる。

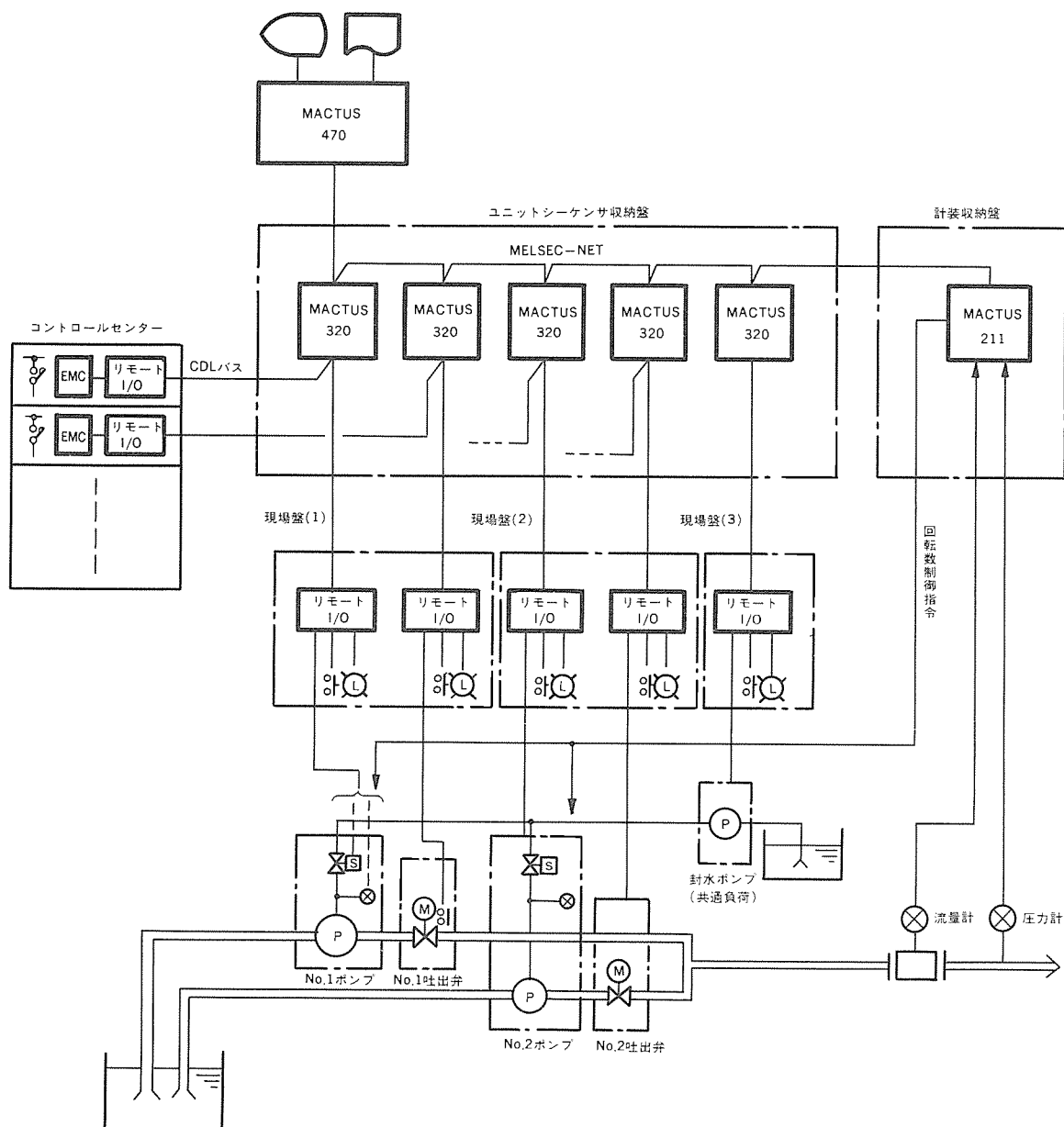


図 8. 適用例

また、《MELSEC-NET》で上位のマルチループ コントローラ《MACTUS 710》と直接情報交換することができ、前述の各機器を大中規模システムに導入することも可能としている。

7. む す び

新規に開発した《MACTUS 210シリーズ》の特長・機能とともに、小規模システム構成について紹介した。

マイクロプロセッサを応用したデジタル計装制御の分野は、半導体技術の進歩に比例して機能・性能が向上している。今後は、ネットワーク化、特にフィールドバスとの接続に関する統合化が促進されると予想される。

今後とも最新技術を積極的に採用し、《MACTUSシリーズ》の充実を図りたく考えている。

個人住宅用エレベーター

吉川 博* 杉山美樹* 水野公元* 吉田研治* 小林 一**

1. ま え が き

近年、宅地供給の停滞に伴って住宅の立体化が進み、都市部では個人住宅も2階建てから3階建てへと移行する傾向が見られる。一方、医療体制の充実その他により、最近高齢者の人口が急速に増加している。高齢者の増加は2世帯同居の増加へつながり、住宅の立体化を更に促進すると考えられる。高齢者にとって、階段の昇降は大きな負担であると同時に危険である。そこで、立体化する住宅における利便性の向上と、階段事故の防止など安全性向上の観点から、最近個人住宅へのエレベーターの設置が強く望まれてきた。昭和62年3月には、建設省の要請により(財)日本建築センターが“個人住宅用エレベーターの設計指針”を作成し、法規の面からも個人住宅へのエレベーターの普及を図っている。

このような社会的要請にかんがみ、当社では個人住宅用エレベーターの研究を積極的に推進してきた。そして、昭和62年8月には第一号機を積水ハウス㈱枚方住宅展示場に納入し、国内で初めて稼働させた。その後の需要の多様化にこたえ、今回、デザインを一新し、システム全般を改良した新しい個人住宅用エレベーター“WELL”を開発、昭和63年9月に発売した。

本稿では、この個人住宅用エレベーター（以下、ホームエレベーターと称す。）“WELL”の主な特長と構成を紹介する。

2. 特 長

このエレベーターは次に示すように、個人住宅に適合する優れた特長を持っている。

(1) 省スペース

昇降路内下部に駆動装置を設置して機械室を不要にするとともに、巻胴式駆動方式を用いて釣合いおもりを不要とし、設置スペースを縮減した。

表1. 主な仕様

基 本 仕 様	用途	個人住宅用
	積載荷重／定員	車いす兼用型：200kg／3人乗り、 乗用型：130kg／2人乗り
	速 度	12m/min
	駆動方式	巻胴式
	制御方式	インバータ制御式
	エレベーター ルーム内法	3人乗り：間口900mm×奥行1,200mm×高さ2,000mm 2人乗り：間口900mm×奥行750mm×高さ2,000mm
	ドア形式	電動2枚戸片引き式、 ドアセーフティシュー付き(ルームドア)
	出入口寸法	間口800mm×高さ1,900mm
	停止箇所	最大 4箇所
	昇降行程	最大 10m(最小階間距離：2,500mm、 最大階間距離：3,850mm)
	巻上ロープ	直径 8mm×2本(高強度ロープ使用)
	電動機	1.5kW
	電 源	単相3線式200V{動力用(200V)、照明用(100V)}
	間口内法	1,650mm
	奥行内法	3人乗り：1,650mm、2人乗り：1,200mm

昇 降 路	オーバーヘッド	2,700mm以上
	ピット深さ	最小600～最大650mm
	駆動装置位置	昇降路内部(機械室不要)

(2) 建物負担荷重の軽減

駆動装置その他すべての機器をガイドレールに取り付けて上下方向荷重をガイドレールで支持し、建物はわずかな水平方向荷重のみを負担すればよいようにした。

(3) 単相電源の使用

駆動制御方式としてインバータ方式を採用することにより、家庭内に容易に設置できる単相3線式200V電源での運転を可能とした。

(4) 正確な着床、滑らかな乗り心地

インバータ制御方式を用い、一般用エレベーターと同様の正確な着床と滑らかな乗り心地を確保した。

(5) 住宅にマッチしたデザイン

柔和でワイドなエレベータールーム、高級な質感をもつエレベーターホールなど個人住宅とのマッチングを重視したデザインとした。

3. 仕 様

表1にこのエレベーターの仕様を示す。主な仕様は、“個人住宅用エレベーターの設計指針⁽²⁾”に沿って定めた。例えば、速度12m/min、昇降行程max10mは、同指針の上限値としたものである。積載量、かごの大きさは車いす兼用形と乗用とで2種類に分け、それぞれの目的に適合させた。また、出入口幅は、車いすが容易に通過できるように定めた。

4. 構 成

4.1 駆動システム及び機器の配置

図1に、このエレベーターの全体構造を示す。また、図2に昇降路平面図、図3に昇降路縦断面図を示す。このエレベーターでは、

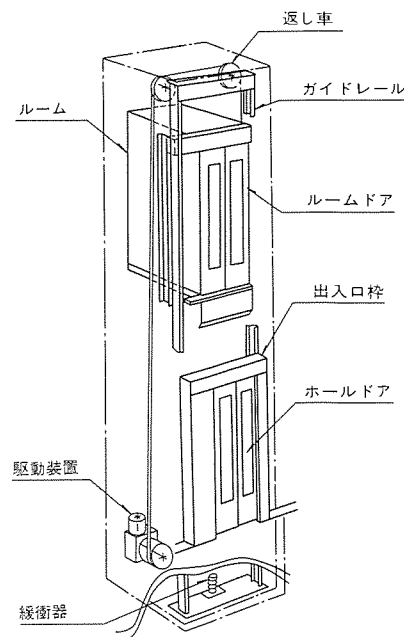


図1. 全体構造

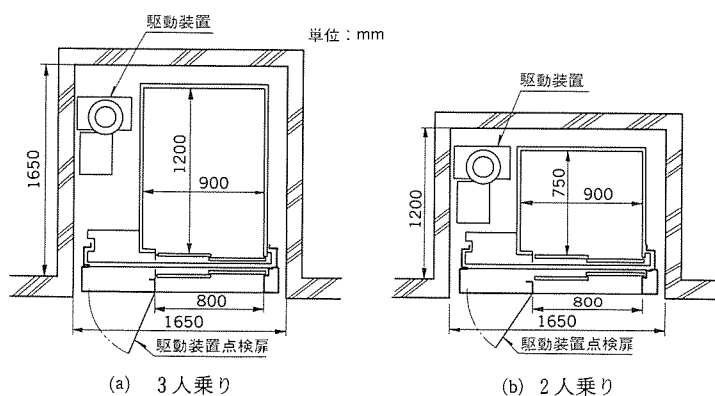


図 2. 昇降路平面図

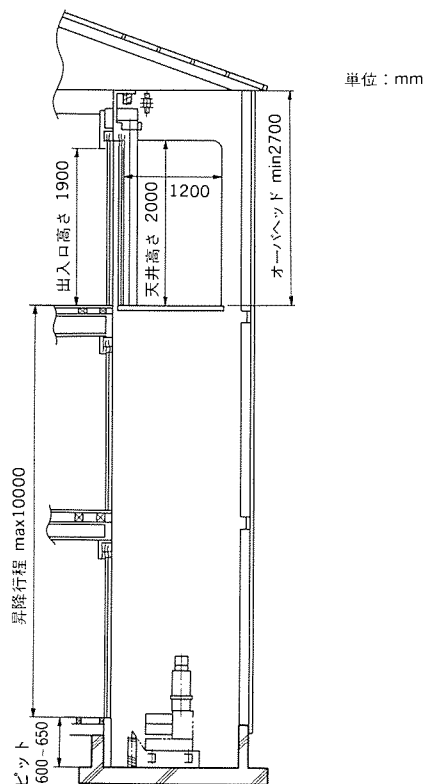


図 3. 昇降路縦断面図

昇降路内下部に駆動装置を設置し、上部に設けた返し車を介してロープでかごをつ(吊)り上げた。ガイドレールは、鋼板製で昇降路の乗場ホール側に配置し、出入り口枠その他の機器が取り付けられている。

エレベーターの駆動方式には、巻胴式、つるべ式、スクリュー式、パンタグラフ式その他様々な種類がある。このうち、巻胴によってロープを巻き取ってかごを昇降させる巻胴式は、構造がシンプルで釣合いおもりを不要にできるため、昇降路の平面積を小さくできる特長を持っている。そこで、今回は巻胴式を採用し、さらに図 2 に示すように駆動装置を昇降路内の戸袋側の空間に納めた。これにより機械室を不要とし、車いすが使用できる大きなかごを含め、すべての機器をわずか一坪の平面内に設置できるようにした。

また、一般に個人住宅では寝室などのプライベートスペースを 2 階、3 階など上方階に配置することが多く、これらの場所に保守員があまり頻繁に出入りすることは好ましくない。そこで、駆動装置を最下階付近に設置し、図 2 のように出入り口枠に駆動装置の点検扉を設けた。これによって、ほとんどの保守・点検作業を最下階の乗場ホールと昇降路内でできるようにした。

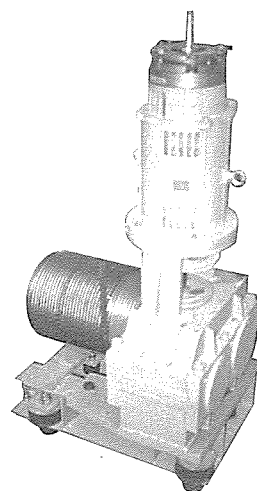


図 4. 駆動装置の外観

従来のロープ式エレベーターでは、このエレベーターのように駆動装置を下部に設置した場合、駆動装置に発生する上向き荷重は建物で負担していた。この荷重は、一般のビルではさほど問題にならないが、軽量鉄骨などから成る個人住宅の建物には大きな負担である。そこで、今回は駆動装置と返し車をガイドレールに取り付けて、エレベーターのすべての上下方向荷重をガイドレールで負担し、建物には上下方向荷重を加えないようにした。

4.2 駆動装置

図 4 に、このエレベーター用に開発した駆動装置の外観を示す。“個人住宅用エレベーターの設計指針”に基づいて巻胴の直径をロープ径の 30 倍まで低減し、これにより巻上トルクを軽減して駆動装置の小形化を図った。さらに、電動機を縦形にして平面寸法を小さくし、昇降路内の戸袋側の空間に配置できるようにした。

4.3 制御装置

このエレベーターの電動機制御方式は、インバータ方式とした。これにより高効率化、高性能化を図るとともに、単相電源での運転を可能にして家庭内に容易にエレベーターを設置できるようにした。そして、ホームエレベーターの制御装置に必要な“小形”、“低騒音”、“高信頼性”の実現と“安全性”の確保を図った。

図 5 に、この制御装置の制御ブロック図を示す。速度指令発生部からのエレベーター速度指令と、電動機に設けられたエンコーダからの速度信号を入力とし、トルク指令発生部は電動機の発生すべきトルクを演算し出力する。そのトルク指令をもとに電流指令発生部は、電動機に供給すべき電流を演算する。力行運転時は非干渉制御を行い、制動運転時は再生電力（機械エネルギー）を電動機内で消費する臨界制動制御を行った。この制動方式は、再生電力がインバータ側に返ってこないため、再生電力を消費するための抵抗とトランジスタを不要にできる特長を持っている。電流の制御には正弦波近似 PWM 制御方式を採用し、零速度近くから定格速度まで滑らかな乗り心地を実現した。また、主回路に高周波スイッチング素子 (MOSFET) を採用し、PWM 制御部のスイッチング周波数を 15kHz と高くして“低騒音”化を図った。

これらの制御回路は、二つの高性能 16 ビット ワンチップマイコンで構成されており、前記制御アルゴリズムのほとんどが二つのマイコンにより最適に分担されている。インバータ制御のほか、エレベーターの運行を制御するシーケンス制御も一部の安全回路を除き、すべてソフトウェア化した。このように、主回路の再生電力消費装置の不要化と制御回路のソフトウェア化により部品点数を徹底的に

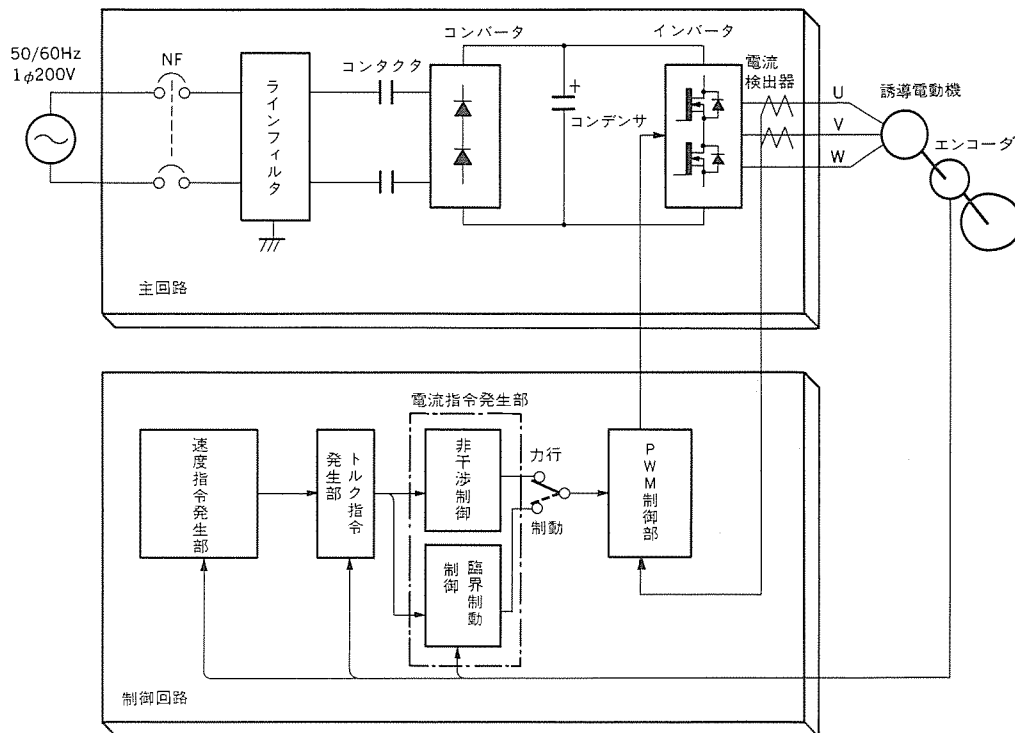


図5. 制御ブロック図

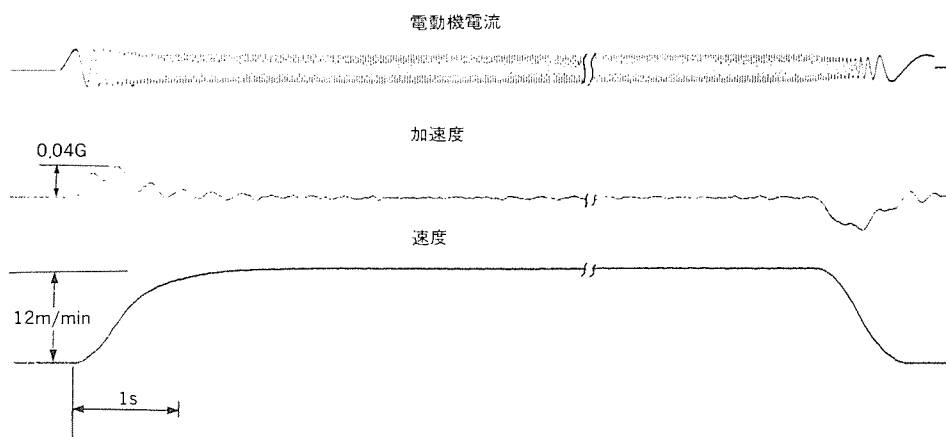


図6. 定格負荷上昇時の運転特性

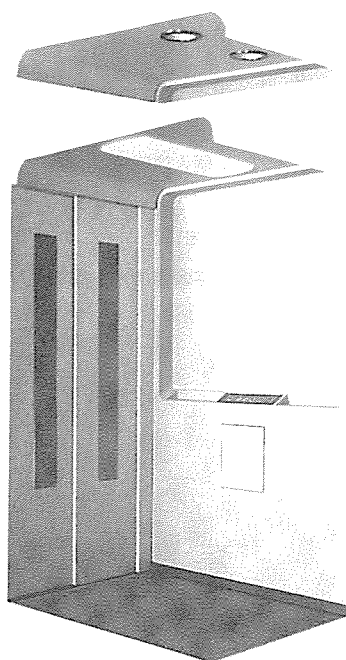


図7. エレベータールーム

削減し、“小形”で“高信頼性”の制御装置を実現した。また、制御装置の受電端にはラインフィルタを設け、インバータの電磁ノイズが他の家庭内電気機器に障害を与えないようにした。

“安全性”の面では、一般ビル用エレベーターと同等の安全回路を設けるとともに、エレベータールーム内にモジュラープラグの付いた電話機収納ボックスを用意した。これにより、万一乗客がエレベータールームの中に閉じ込められた場合にも、エレベーター保守会社に直接連絡可能な電話機を設置できるようにした。また、停電時には自動的に安全を確認したうえ、バッテリーで速やかに最寄り階に自動着床させる停電時自動着床装置をオプションとして用意した。

図6に定格負荷上昇運転時の電動機電流、エレベータールームの速度、加速度特性を示す。電流波形は非常に滑らかであり、電動機の低騒音、低振動化が図られている。エレベータールームの加速度も0.04G以下であり、快適な乗り心地となっている。

4.4 デザイン

ホームエレベーターは、住宅内のインテリアと調和しつつ、快適で、品格のあるデザインでなければならない。また、一般健常者のみならず、高齢者や身体障害者にも安心して利用できるように、デザイン面からも十分に配慮されたものでなければならない。このエ

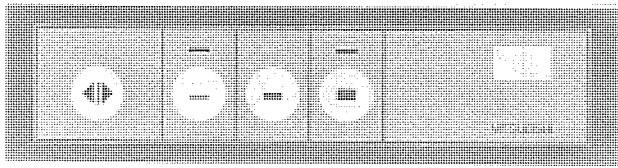


図 8. 操作パネル

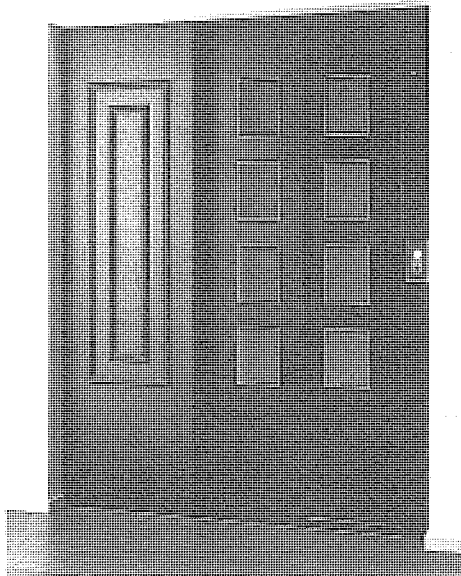


図 9. エレベーターホール

エレベーターでは、これら社会的ニーズの実現を基本コンセプトとしてルーム、ホール、操作パネルなどのデザイン展開を行った。以下、その特長を述べる。

(1) ルームデザイン

図 7 に、エレベータールームを示す。コーナーに丸みをつけた天井、ふくらみを持たせたガラス繊維強化プラスチック（FRP）製の立体壁、800mmのワイドな出入口、そして、ルームドアにはホールドアとともに大きな窓をつけて、広々としたゆとり感やわらかみのあるデザインとした。ルーム内のデザインポイントとなる天井照明には、清（楚）なイメージのグローブ照明と、壁面との光の演出効果をねらったダウンライトの 2 種類を用意した。また、立体壁以外の周囲の壁やドアのパネルには化粧鋼板を用い、カラーコーディネートを検討した色柄を選定し、種類の充実を図った。これらの天井照明、化粧鋼板の色柄、床カーペットとの組合せにより標準タイプを 5 種類とし、幅広い顧客ニーズにこたえられるものとした。

図 8 に操作パネルを示す。操作パネルは、車いすでの利用も考慮し、前述した立体壁の中央傾斜部分、床面から 940mm の高さに組み込んだ。また、操作パネル上の行先ボタン・戸開ボタンなどは、押

したときにクリック感があるシートスイッチを採用した。大きく見やすいグラフィック表示、発光ダイオードの応答ランプ表示と相まって、操作性と視認性を向上させた。さらに、異常時などに必要な電話器・常備灯・照明スイッチなどは、操作パネル下部に設けた収納スペースに納め、デザイン面の配慮をしながら機能の集約を図った。

(2) ホールデザイン

エレベーターホールのデザインは、洋風・和風など様々なインテリアとの調和が最も重要である。一つの建物であっても各フロアごとにデザインが異なる場合もあり、エレベーターホールを構成する出入口枠やドアは、フロアごとに自由に選択できるものでなければならない。このエレベーターでは、これらの多様性と生産性を両立させるため、出入口枠とドアパネルに高級な質感を持つ化粧鋼板を用い、チーク・オークなどの木目や石目など 6 種類の色柄を用意した。さらに、オプションとして、化粧モール付きの出入口枠、多くの小窓を配したドアなど重厚なイメージのデラックスタイプ（図 9）も用意した。

出入口の敷居は、ダークブロンズのアルミ成形材を用い、建物内で使用されることの多い他のアルミサッシ類と色調を合わせた。また、素足での利用にも配慮し、敷居の表面に同色の硬質プラスチックシートをは（貼）った。

エレベーターを呼び寄せるコールボタンは、操作パネルと同形式のスイッチを適用し、小形でシンプルなデザインにまとめ出入口枠に配置した。取付け高さは、車いすの利用を考慮し、床面から 1m とした。

5. む す び

以上、ホームエレベーター“WELL”について、その特長と構成を紹介した。なお、このエレベーターは、建設大臣によるホームエレベーターの一般認定を、63年 8 月に国内で初めて取得している。

このエレベーターは、今後ますます進展する住宅の立体化と高齢者の増加に対応する“幸福な、生活のためのエレベーター”，すなわち“Welfare Elevator for Living”であると考えている。

参 考 文 献

- (1) 吉川ほか：個人住宅用エレベーター，三菱電機技報，61，No. 11，p.13（昭62）
- (2) 財団法人建築センター：個人住宅用エレベーターの設計指針（昭62）
- (3) 野村ほか：回生電力制御VVVF方式の研究 エレベーターへの応用，昭和61年電気学会全国大会講演前刷集，p.758

6.3～400Mbpsデジタル光通信装置

手島邦夫* 飛田康夫** 丹治秋人** 谷本敏明* 部谷文伸** 水川繁光*

1. ま え が き

近年、電力・交通・自治体などの自営通信網においても、ネットワークのデジタル化が急速に進展してきている。さらに、コンピュータ間通信の拡大や画像通信の普及により、デジタル通信需要は増大の一途にあり、大量のデジタル信号を長距離伝送する光中継伝送装置の一層の大容量化と小型・経済化が求められている。

一方、光ファイバ通信は、その優れた特長である無誘導性・広帯域性に加え、近年の半導体デバイスの高信頼度化⁽¹⁾や長波長帯シングルモードファイバ伝送の実用化が進み、長距離の無中継伝送がより容易となり、従来にも増して高品質・大容量・長距離のデジタル中継伝送路を提供できるようになってきた。

また、半導体の微細加工技術の進歩による集積回路の高集積化と高速化及び各種回路部品の小型・高性能化は、従来装置を実装面から大きく変えつつある。

このような周辺技術の進歩と市場ニーズにより、これまでの光中継伝送装置の回路構成・実装方式を大幅に見直し、新たに幅130mmの小型の通信架実装による6.3Mbpsから400Mbpsまでの“デジタル光通信装置”新シリーズを開発・製品化したので、その概要を報告する。

2. 新デジタル光通信装置

2.1 システム構成

システム構成は、国内の標準デジタル ハイアラーキに準拠して

おり、これを図1に示す。1次群(1.544Mbps)から5次群(397.2Mbps)に至る5階てい(梯)のハイアラーキ(Hierarchy)構造となっており、各階梯の多重変換装置で多重化した信号を光端局中継装置により、光ファイバケーブルに接続して、長距離のデジタル光通信システムを構成する。

2.2 特 長

(1) スリム架実装による装置シリーズ化

従来からの幅520mm又は幅260mmの通信架実装に代えて、新シリーズでは幅130mmのスリム架実装を統一的に採用した。小型、軽量のスリム架の採用により、フロアスペースの低減が図れるほか、建設工事も容易となる。

(2) 装置のユニット・モジュール化

多重変換装置、光端局中継装置、電源などの各機能ごとにユニット・モジュール化し、プラグインで架枠に実装する方式とした。ユニット・モジュール寸法は、系列化を図っており、要求システムに合わせて装置実装を柔軟に対応できる。例えば、小規模システムでは、1架に多重変換装置ユニット・モジュールと光端局中継装置ユニット・モジュールを実装でき、大規模システムの場合には、多重変換装置ユニット・モジュールを2台1架に実装し、列架することにより、従来の架実装に比べ効率的で、増設やシステム構成の変更への柔軟性のある実装が可能となっている(図2、図3)。

(3) 回路の集積化

装置をプラグイン方式のユニット・モジュール化するに当たり、装置の小型・軽量化が必要となる。特に、高速回路の場合、動作速

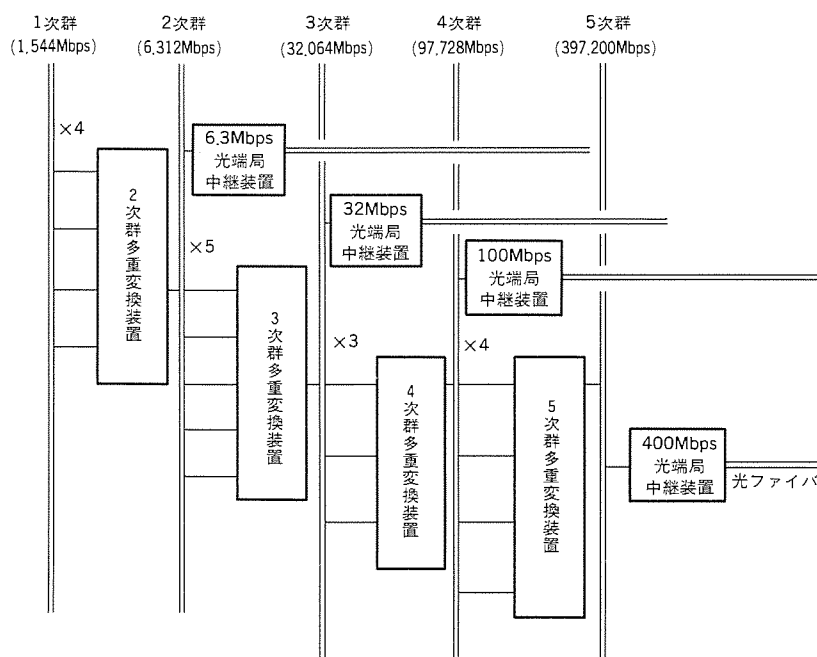


図1. デジタル光通信システムの構成図

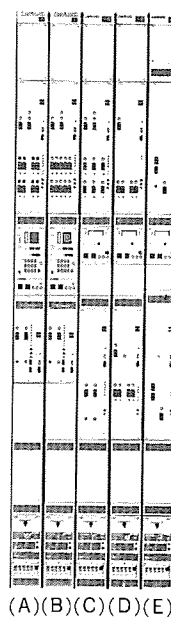
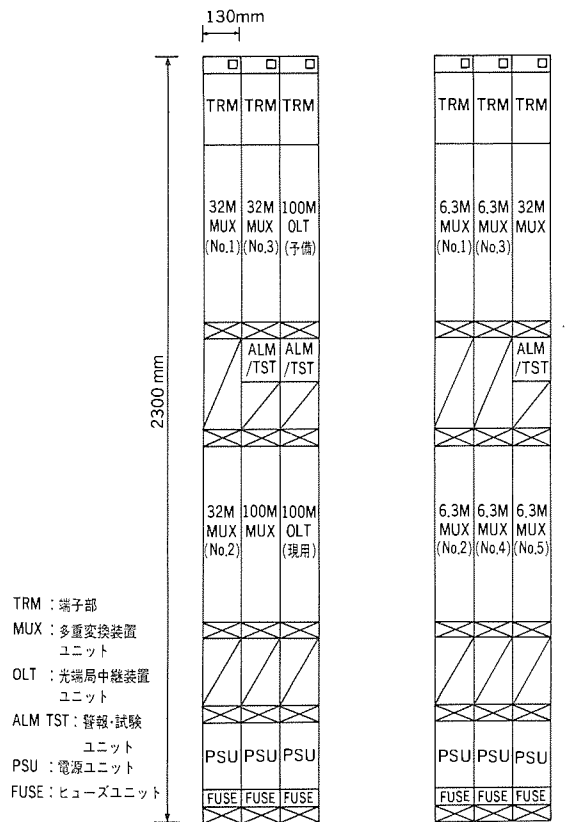


図2. デジタル光通信装置の外観

- (A): 6.3Mbpsデジタル光通信装置
- (B): 32Mbpsデジタル光通信装置
- (C): 100Mbpsデジタル光通信装置
- (D): 400Mbps多重変換装置
- (E): 400Mbps光端局中継装置



(a) 100Mbps多重化光通信システム (b) 32Mbps多重化システム

図 3. デジタル光通信システムの構成例

表 1. デジタル光通信装置用IC

IC名称	形 名	適用速度	機 能	種 別
LD DRIV	M54186FP	6.3M	LD駆動	バイポーラ リニアIC
	M54182FP	32M,100M	自動出力制御	
OPT REC	M54187FP	6.3M	等化増幅	
	M54183FP	32M,100M	自動利得制御	
TIM/DEC	M54188FP	6.3M	タイミング抽出	C-MOS ゲートアレイ LSI
	M54184FP	32M,100M	識別再生	
CMI CODEC	M60005-0222FP	6.3M	CMI 符号化	
	M56712-504AS	32M	復号化	
8B1CENCOD	M56712-505AS	100M	符号化	
8B1CDECOD	M56712-506AS		復号化	
10B1CENCOD	M56725-802AS		符号化	
	M56725-803AS		復号化	
10B1CDECOD	M56725-804AS	400M	符号化	
	M56725-805AS		復号化	
MEM S/R	M56712-511AS	32M,100M	バッファメモリ	
100M MPX	M56712-512AS	100M	スタンプ制御	
400M MPX	M56712-507AS	400M	多重化	
100M DMPX	M56712-513AS	100M	フレーム同期	
400M DMPX	M56712-508AS	400M	デスタンプ制御	
400M SYNC	M56725-806AS		多重分離	

度の上昇により消費電力が増大し、発熱が問題となる。また、配線容量による高周波特性の劣化や信号伝ば(播)遅延による高速論理回路動作の信頼度劣化の問題を解決することが必要であり、ディスクリット部品による回路構成では限界がある。このため、新シリーズでは回路の大幅な集積化を行っている。

新シリーズ用に開発した各種IC⁽²⁾を表 1 に示す。高速の多重変換回路・符号変換回路などの論理回路にはECLゲートアレイを用い、

回路の小型・低消費電力化、高信頼度化を図った。インタフェース回路・光送受信回路などの高周波リニア回路では、カスタムIC・ハイブリッドICにより小型・高性能化を実現した。

(4) プリント基板数の削減

回路の集積化による小型・低消費電力化により、ディスクリット回路主体の従来装置では、多数のプリント基板に細かく分割されていた回路機能を集約・統合し、少数の簡潔なプリント基板構成を実現することが可能となった。これにより、従来のプリント基板間の接続コネクタ、インタフェース回路が削減されるとともに、配線遅延差による回路ブロック間の位相差の減少、伝播波形の改善が図られ、安定な高速動作が確保できるようになった。

(5) 自然空冷に対応した熱設計

回路の集積化、機能の集約・統合による消費電力の低減と併せて、装置ユニット・モジュール内の自己発熱に対し、同一架内の下方のユニット・モジュールの発熱が上方のユニット・モジュールの温度を上昇させないように通風経路を設定し、対流誘導能力を高める構造設計を行った。これにより、保守性・信頼度上望ましい自然空冷の条件において、装置雰囲気温度0~40℃に対し、ユニット・モジュール内の使用回路デバイスが信頼度保証温度範囲内で動作するようにしている。

(6) 耐震性

スリム架は、従来の架に比べ架幅が小さいため、耐震性の面で厳しい条件となるが、架柱構造、ユニット・モジュールの固定部分の設計に耐震性を考慮した結果、耐震試験において、自己共振周波数を10Hz以上とする要求条件をクリアしていることを確認している。

(7) 伝送路符号化

情報のデジタル化に対応して、伝送路のトランスペアレncyを保つことが重要である。32Mbps以下の光端局中継装置では、伝送路符号としてCMI (Coded Mark Inversion) 符号を用い、“0”や“1”の同符号連続を抑圧することにより、伝送信号に無関係に安定したタイミング抽出再生が行えるようにしてBSI (Bit Sequence Independence) を確保している。

CMI符号は、同符号連続が3ビット以下に抑えられるのでBSIに有効であるが、伝送路クロック周波数が2倍となるため、100Mbps以上の信号に対しては、回路動作上不利となる。100Mbpsの光端局中継装置では、8ビットごとに相補ビットを挿入し、伝送路クロック周波数が約9/8倍になる8B1C (8 Binary 1 Complementary) 符号が、400Mbpsでは10B1C (10 Binary 1 Complementary)⁽³⁾が国内で標準的に用いられており、この製品シリーズでも採用した。

(8) 無中継伝送距離の長距離化

光中継伝送装置としては、高速信号を無中継で伝送できる距離が長いことが要求される。光ファイバによる伝送距離は、損失制限と帯域制限により決定される。損失制限による伝送距離は、送受間の許容損失と光ファイバ単位長当たりの伝送損失で決定されるため、送受間の許容損失が大きいことと、使用光ファイバの伝送損失が小さいことが必要となる。

一方、帯域制限による伝送距離は、主に光ファイバの構造によるモード分散と伝送信号の速度により決定される。このため、従来よく使用されていたGI (Graded Index) ファイバのような多モードファイバに代えて、伝播モードが単一であるシングルモードファイバの使用により、モード分散の影響はなくなり、帯域制限による距離

制限は大幅に緩和される。

400Mbps以上の伝送系では、レーザ光源のスペクトラム幅や光ファイバの波長分散特性による帯域制限も考慮しなければならないが、400Mbpsまでのこの装置シリーズでは、1.31 μ m零分散シフトファイバを用いれば、多縦モード型レーザダイオードを光源としても、伝送距離制限は光ファイバの伝送損失が支配的である。

したがって、この装置シリーズには、伝送路としてシングルモードファイバ、光源としては、信頼性の確立した1.31 μ m多縦モードレーザダイオード⁽⁴⁾を標準として採用することとした。

(9) 監視警報機能の充実

ネットワークが複雑になるに従って、障害点の切分けと波及防止対策が伝送路の保守上重要な課題となっている。新シリーズの各装置は、障害時にオールマーク信号をAIS (Alarm Indication Signal) として発出する機能と、AISを検出する機能を持たせ、対局警報

(SEND) 転送機能も装備した。これにより、上位装置の障害発生の波及防止と障害点の特定を容易に行えるようにした。

3. 装置概要

3.1 架 構 成

今回採用したスリム架の寸法は、幅130mm、奥行225mm、高さ2,300mmとなっており、装置ユニット・モジュール2台と電源ユニット・モジュール2台及び警報・試験ユニット・モジュール1台を必要に応じて実装することが可能である。警報・試験ユニット・モジュールは、システム警報の表示を行うとともに、ユニット・モジュール内回路の動作レベルを試験する機能を持っている。架の最上部は外部接続の端子部となっており、最下部には電源フューズを収容している。電源ユニット・モジュールは、AC入力用・DC入力用を用意しユーザーの電源条件に合わせて選択できる。

3.2 多重変換装置

表2に装置主要諸元を示す。装置構成は、100Mbps以下では同様のなので、図4の100Mbpsの装置構成図を例に装置概要を述べる。

この装置は、多重化盤、多重分離盤、3枚の送受メモリ盤、警報盤、電源盤の7枚のプリント基板で構成される。多重化方式として、スタフ同期多重化方式を用い、互いに非同期な三つの3次群信号(32.064Mbps)を各々3枚の送受メモリ盤内の送信メモリに書き込み、多重化盤に内蔵した97.728MHzのクロックから生成した32.576MHzの同期化低次群クロックによりメモリから読み出し、この二つのクロックの周波数差を吸収するためのパルス(スタフパルス)を挿入することによって三つの3次群信号の同期化を行う。多重化盤において、ビット多重及びフレーム生成を行って97.728Mbpsの4次群信号を送出する。

多重分離盤では、入力する4次群信号のビット同期、フレーム同期をとり、32.576Mbpsの三つの同期化3次群信号に多重分離し、送受メモリ盤の受信メモリに書き込み、スタフパルスの除去(デスタフ)を行って3次群信号を再生する。

各回路機能は、表1に示したICに集積化されており、送受メモリ

表2. デジタル光通信装置の主要諸元

光 端 局 中 継 装 置	項 目	6.3Mbps装置		32Mbps装置	100Mbps装置	400Mbps装置
	光 変 調 方 式	直接強度変調				
	光 波 長	1.3μm				
	発 光 素 子	LED	LD (レーザダイオード)			
	受 光 素 子	Ge-APD				
	発 光 出 力 レ ベ ル	-24dBm以上 -4dBm以下	-4dBm以上	-5dBm以上	-5dBm以上	-5dBm以上
	最低受光レベル($P_r=10^{-11}$)	-44dBm以下	-39dBm以下	-37dBm以下	-35dBm以下	-35dBm以下
	ダイナミックレンジ	25dB以上	25dB以上	20dB以上	20dB以上	20dB以上
	伝 送 路 符 号	CMI	CMI	8B1C	10B1C	
	伝送路クロック周波数	12.624MHz	64.128MHz	111.689MHz	445.837MHz	
副 信 号 伝 送 方 式	符号則バイオレーション方式		補助ビット方式			
監 視 項 目	光出力断、光入力断、LD電流異常、誤り率劣化、信号入力断、信号出力断、AIS受信、対局警報受信、電源断、システム障害					
多 重 化 変 換 装 置	多重化システム数	4	5	3	4	
	多重化同期方式	スタフ同期方式				
	低次群出力パルス	1.544MbpsAMI/B8ZS	6.312MbpsAMI/B8ZS	32.064MbpsAMI	97.728MbpsAMI	
	高次群出力パルス	6.312MbpsAMI/B8ZS	32.064MbpsAMI	97.728MbpsAMI	397.200MbpsAMI	
	スクランブラ	5段リセット型スクランブラ				
監 視 項 目	クロック断、受信障害、誤り率劣化、AIS受信、対局警報受信、低次群入力断、低次群出力断、電源断、システム障害					

注 CMI : Coded Mark Inversion 8B1C : 8 Binary 1 Complementary
AMI : Alternate Mark Inversion 10B1C : 10 Binary 1 Complementary
B8ZS : Bipolar with 8 Zeros Substitution

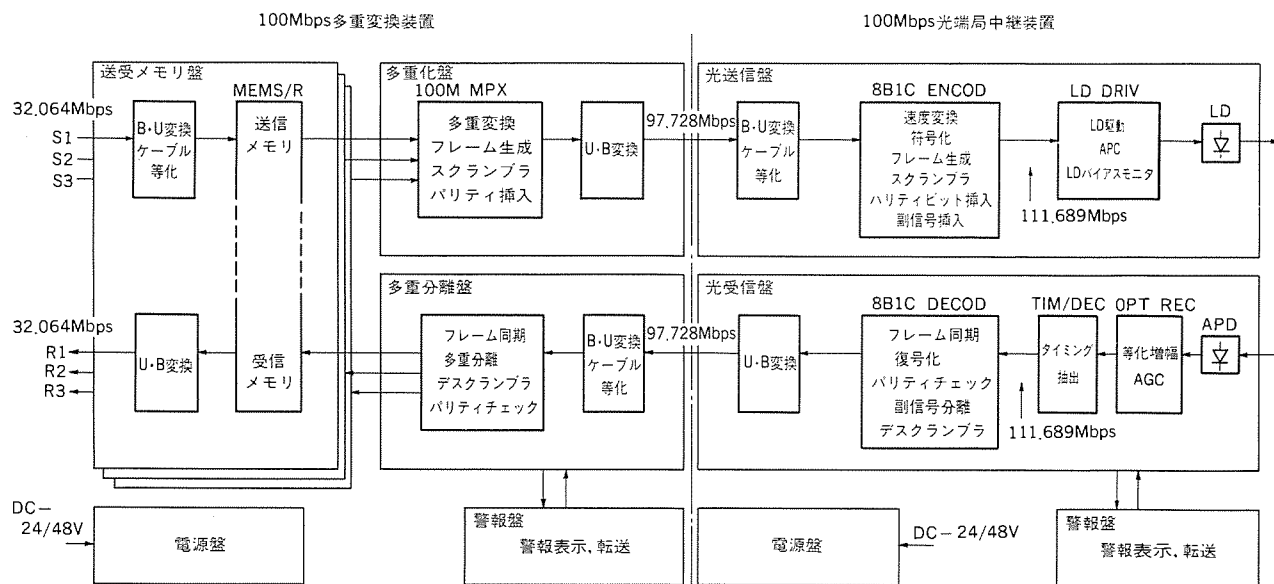


図4. 100Mbpsデジタル光通信装置の構成図

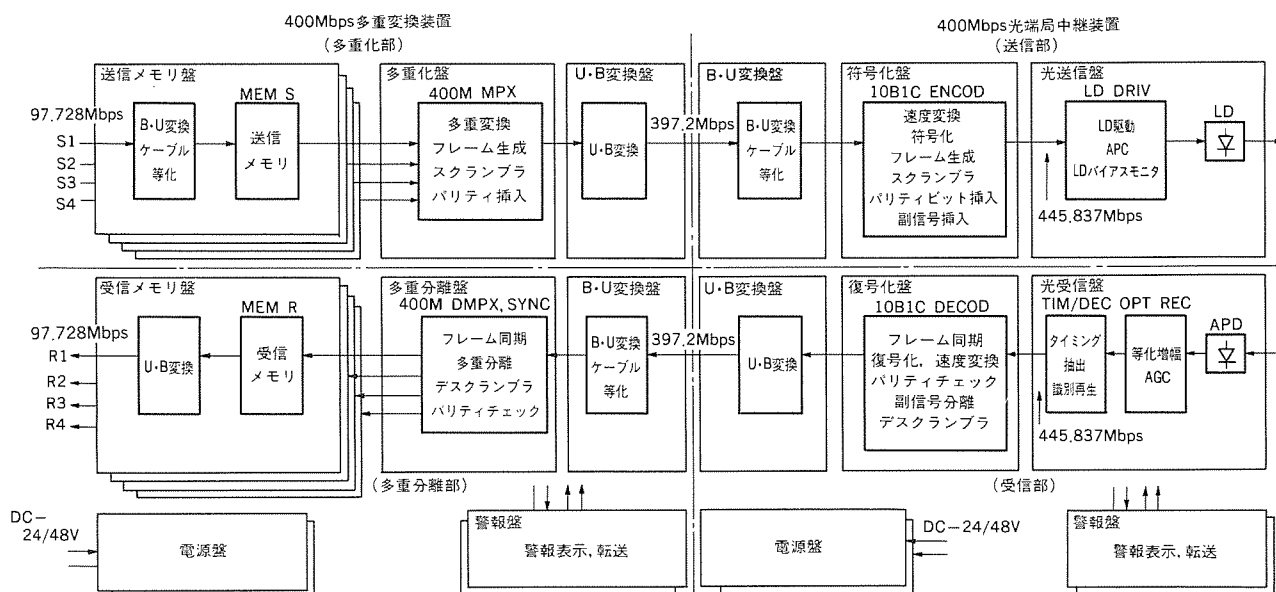


図 5. 400Mbpsデジタル光通信装置の構成図

表 3. デジタル光通信装置の消費電力

伝送速度	光端局中継装置		多重変換装置	
	送信部	受信部	多重化部	多重分離部
100Mbps	25W		37W	
400Mbps	32W	38W	40W	41W

は必ずペアで用いられることから、送受メモリ盤としてプリント基板1枚にまとめている。消費電力は、ユニット・モジュール総合で37W以下とディスクリート回路で構成した場合の45%に低減された。

回路性能については、デスタップにより方式上生じる再生クロックの位相とびは、受信メモリに付随するPLL(Phased Lock Loop)回路で平滑し、残留デスタップジッタ0.2タイムスロットp-p以下の良好な性能が得られている。また、外部装置とのインタフェースは、同軸ケーブルを用いたバイポーラ信号で行われ、回路内にはユニポーラ信号との変換回路を搭載している。同軸ケーブルは、伝送信号の周波数の平方根及び伝送距離に比例した減衰特性を示し、32Mbps以上のバイポーラ信号は数百mの伝送による波形の減衰とひずみが伝送上支障のあるレベルになるので波形等化機能が必要となる。このため、専用のハイブリッドICを開発し、0～500mの同軸ケーブル配線長に対して、自動的に減衰特性を補償することができるようにした。

図5の400Mbpsの装置についても同様に回路の集積化を行っているが、消費電力は表3に示すように100Mbpsに比べて大きくなる。自己発熱に対する信頼度マージンを確保するため、二つのユニット・モジュールに分割した。

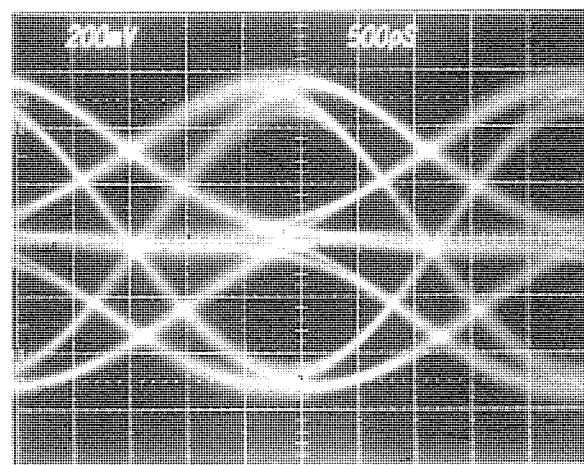
図6に400Mbpsのバイポーラ信号の等化後の波形を示す。

3.3 光端局中継装置

表2に装置主要諸元を示す。装置構成は、100Mbps以下の装置は同様の構成となっており、図4の100Mbpsの装置を例にとり概要を述べる。

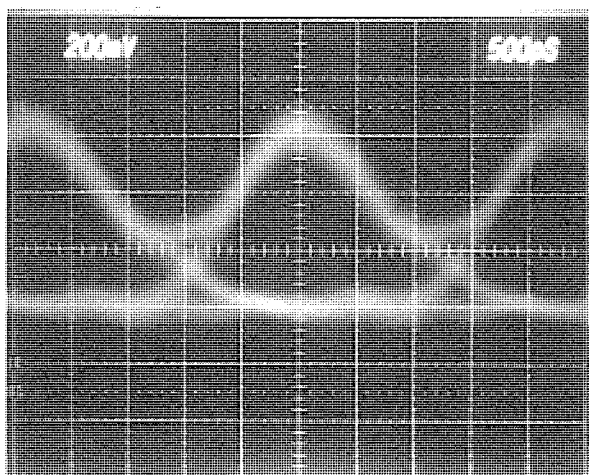
この装置は、光送信盤・光受信盤・警報盤・電源盤の4枚のプリント基板により構成される。光送信盤では100Mbps多重変換装置から同軸ケーブルを介して入力するバイポーラ信号を受信し、ユニポーラ信号に変換する。さらに、8B1C符号化回路により、伝送路符号に変換してBSI化し、レーザダイオードの直接強度変調(IM: Intensity Modulation)を行いシングルモード光ファイバに送出する。光受信盤では、Ge-APD(Germanium Avalanche Photodiode)により受信光信号を電気信号に変換し、等化増幅、タイミング識別を行い、8B1C復号化回路によりユニポーラ信号に変換し、さらにバイポーラ変換を行って多重変換装置に送出する。

各回路は集積化され、装置ユニット・モジュール総合の消費電力は25W以下であり、ディスクリート回路による場合の約1/3に低減した。図5に示す400Mbpsの装置についても、各回路を同様に集積化しているが、表3に示すように100Mbpsの装置に比べ消費電力が大きく、400Mbps多重変換装置と同様、二つのユニット・モジュールに分割して信頼度を確保している。



局内伝送路符号: AMI(PNパターン入力)
伝送速度: 397.2Mbps
伝送距離: 3C-2T同軸ケーブル100m

図 6. 400Mbpsバイポーラ等化波形



伝送路符号：10B1C, RZ(PNパターン入力)
伝送速度：445.837Mbps
平均受光電力：-40dBm

図7. 400Mbps光受信等化波形

また、伝送路符号の冗長性を利用し、32Mbps以下の装置では、CMI符号に対する故意の符号則違反（CRV：Coding Rule Violation）により、100Mbps以上の装置では8B1C、10B1C符号化フレームの補助ビットにより低速の副信号を主信号に重畳して伝送する機能を付加している。この副信号伝送機能を用いて、監視制御信号や打合せ音声信号の伝送が可能である。打合せ音声信号のアナログ／デジタル変換回路の装置内搭載も可能な設計をしている。

伝送路の符号誤りの監視として、32Mbps以下の装置ではCMI符号の符号則違反で、100Mbps以上の装置では伝送路符号フレーム内にパリティを挿入し、パリティチェックにより誤り検出を行っている。

図7に400Mbpsの光受信等化波形を、図8に光受信符号誤り率特性を示す。室内実験においては、シングルモードファイバ70kmまでの無中継伝送を確認しており、実際の伝送路においても50km程度の無中継伝送距離が得られると考えられる。

4. む す び

回路の大幅な集積化とスリム架による新実装方式の採用、機能の集約とプリント基板の枚数削減を行い、大幅な小型化と低消費電力化を図ったデジタル光通信装置シリーズの概要について述べた。

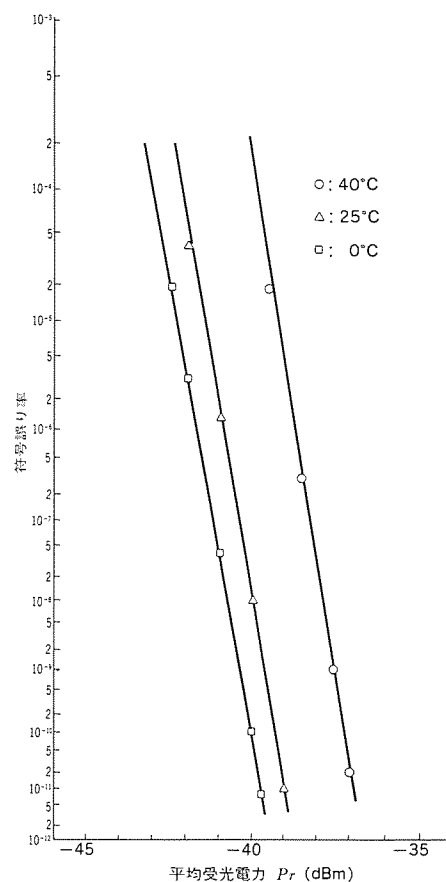


図8. 400Mbps光受信符号誤り率特性

参 考 文 献

- (1) 樋口ほか：通信用光半導体デバイス，三菱電機技報，**61**，No. 9，p.4（昭62）
- (2) 瀬上ほか：光送受信器用IC，三菱電機技報，**61**，No.9，p.14（昭62）
- (3) 吉開ほか：mB1C符号の伝送特性，信学技報，CS82-10（昭57）
- (4) Y. Sakakibara et al.：Journal of Light Wave Technology，LT-3，p.978（1985）

I-SMD-B形加入者線多重伝送装置

部谷文伸* 関川一彦* 谷本敏明** 水川繁光**

1. ま え が き

日本電信電話(株) (NTT) は、昭和63年4月19日から次世代通信網の中核となるサービス総合デジタル網 (ISDN) “INSネット64”のサービスを開始した⁽¹⁾。

I-SMD-B形加入者線多重伝送装置は、加入者系に多重伝送技術を適用することにより、このINSネット64 (ISDN基本インタフェース) のサービス提供地域を経済的かつ早期に拡大するための装置で、NTTの御指導のもとに開発し、既に実用に供されている。本稿では、方式概要、装置構成、実装技術及び部品について紹介する。

2. 方 式 概 要

ISDNでは、End-to-Endにデジタルサービスを提供するため、加入者系のデジタル化が必ず (須) となる。ISDN用のインタフェース加入者線交換機については、既に導入が進められているD70形自動交換機にインタフェース加入者系モジュール (ISM) を付加することにより実現される⁽²⁾。一方、加入者線伝送方式については、既存の電話加入ケーブル (2線メタリック線路) を使用し、ユーザーごとに個別にデジタル伝送を行うメタリック加入者線伝送方式と、複数の基本インタフェースを多重化してデジタル伝送する多重伝送方式がある⁽³⁾。

多重伝送方式の基本構成を図1に、主要方式諸元を表1に示す。この方式には、インタフェース加入者線交換機が設置されていない電話局管内のユーザーに対し、基本インタフェースを提供するための1形と、同一ビルなどに複数の基本インタフェースを提供する2形がある。1形は、遠隔多重伝送技術の適用により既存中継伝送路を使用して、インタフェース加入者線交換機との接続を行うことにより、INSネット64サービスエリアの早期拡大及び小需要規模領域の経済性の向上を図る。2形は、光ファイバケーブルを使用した多重伝送技術により、ビルなどに集中した需要に対する加入者収容の経済化を目的としている。

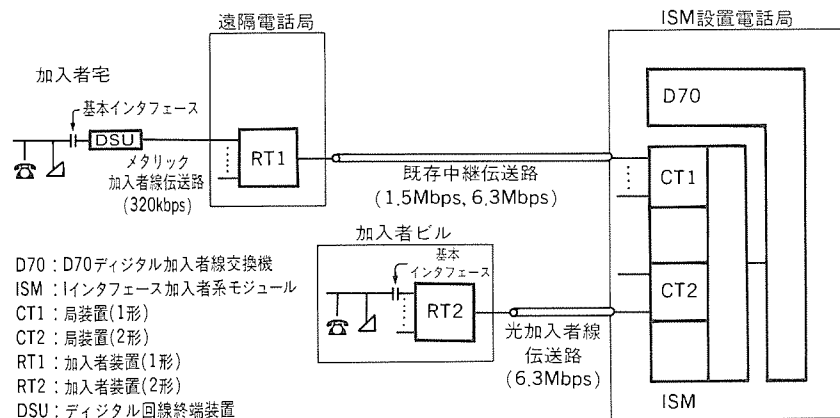


図1. I-SMD-B形加入者線多重伝送方式の基本構成

3. 装 置 構 成

I-SMD-B形加入者線多重伝送装置は、方式概要で述べた適用用途に対応して、1形と2形があり、それぞれ局装置 (CT) と加入者装置 (RT) から構成される。

このうち局装置については、同一の電話局 (インタフェース加入者線交換機設置局) に設置されることを考慮して、1形と2形とで共用可能な機能 (局内クロックの受信・分配機能、監視警報の収集・表示・局内転送機能、保守試験機能) について、別ユニット (局装置共通部ユニット) 化されている。このユニットは、最大16システムの1形の局装置又は2形の局装置の共通部機能をつかさどる。

この局装置共通部ユニット (CT COM) と1形の局装置 (CT1) ユニットの2形の局装置 (CT2) ユニットの総称として、多重加入者線端局装置 (MSLTB) と呼び、インタフェース加入者系モジュール架 (ISM架) に搭載構成される。図2に多重加入者線端局装置 (MSLTB) の外観を示す。

3.1 I-SMD-B形加入者線多重伝送装置 (1形)

I-SMD-B形加入者線多重伝送装置 (1形) は、インタフェース加入者線交換機の設置されていない電話局に加入者装置を設置することにより、この電話局管内のユーザーをメタリック加入者線伝送方式により収容、多重化しデジタル多重伝送路を介してインタフェース加入者線交換機に接続する。

加入者装置は、サービス需要規模と適用伝送路により、1伝送路当たり最大8加入収容のもの (デジタル1次群伝送路を適用) (RT1B) と1伝送路当たり最大36加入収容のもの (デジタル2次群伝送路を適用) (RT1A) の2種類がある。これに対向する局装置 (CT1) は、これら2種類の加入者装置と伝送路インタフェースパッケージのみの交換により対向可能な構成となっており、1ユニット当たりデジタル1次群伝送路8本又はデジタル2次群伝送路2本が収容され、最大60加入の基本インタフェースが収容可能である。なお、交換機とのインタフェースは、標準インタフェース (4

Mハイウェイ) であり、このインタフェースは60加入単位となっている。

加入者装置 (RT1A) の外観を図3に、加入者装置 (RT1B) の外観を図4に示す。

3.2 I-SMD-B形加入者線多重伝送装置 (2形)

I-SMD-B形加入者線多重伝送装置 (2形) は、ユーザーの宅内又はビル内に設置する加入者装置 (RT2) とこれに対向する局装置 (CT2) で構成される。

加入者装置 (RT2) は、最大36加入を収容可能であり、局装置 (CT2) は、1ユニット当たり2台の加入者装置 (RT2) と直接光ファイバケーブルにより対向し、最大60加入の基本インタフェースが収容可能である。交換機とのインタフェースは、1形の

表 1. 方式主要諸元

項 目	内 容	
	1 形	2 形
収容回線	INSネット64 最大60回線システム (信号伝送速度144kbps)	
RT収容加入者数	最大60加入/RT	最大36加入/RT
接続交換機	D70形自動交換機	
交換機インタフェース	基本アクセス1信号装置インタフェース(4Mハイウェイ)	
使用伝送路	デジタル2次群又はデジタル1次群伝送路 光加入者線伝送路(6.312Mbps)	
信号圧縮	(256kbps→160kbps) / 加入	
保守試験方法	直接収容の場合とほぼ同一	直接収容に比べ大幅に簡略化
故障OCU対策	遠隔で故障OCU切替え可能	(遠隔で故障回線終端回路を暫定切替え可)
警報転送方式	CT: 局内情報転送網(CAP NET) RT: CAP NET又は従来方式	CT: 局内情報転送網(CAP NET) RT: 伝送路フレーム中のシステムデータリンクによりCTへ転送

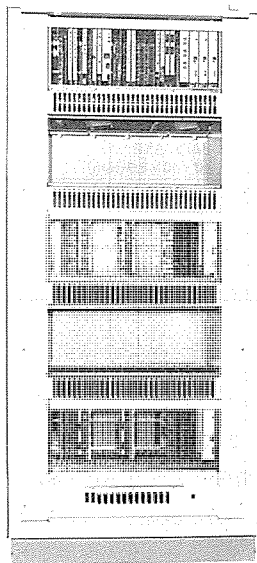


図 2. 多重加入者線端局装置 (MSLTB) の外観

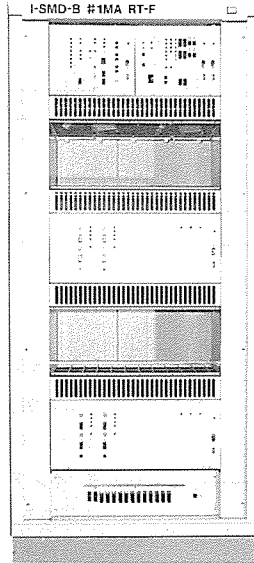


図 3. 加入者装置 (RT 1A) の外観

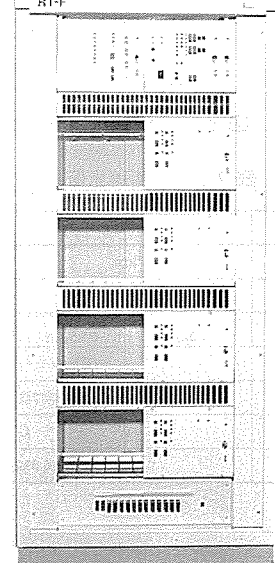


図 4. 加入者装置 (RT 1B) の外観

局装置と同じく 4 Mハイウェイ標準インタフェースで60加入単位で接続する。

なお、加入者装置 (RT 2) は、商用電源で動作する場合の停電対策としてバックアップ用バッテリーをオプションとして付加できる構成となっており、バックアップ時間は、全ユーザーが通信状態で 3 時間以上である。加入者装置 (RT 2) の外観を図 5 に示す。

局装置 (CT 2) と加入者装置 (RT 2) との対向接続に使用されている加入者線光伝送系の主要諸元を表 2 に示す。加入者距離に応じて、光源をLED (適用距離 7 km) とLD (適用距離15km) とで選択するが、さらに遠隔の加入者の収容のため、1 形の加入者装置 (RT 1A) にCT 2 / RT 2 をタンデム接続することもできる。

4. 実装技術

この装置は、実装架としてNTTにおいて新たに開発されたINS用装置実装架 (INSキャビネット架) を採用している⁽⁴⁾。

INSキャビネット架は、今後、NTT局舎に設置される交換・伝送・無線・画像・電力などの各種装置を実装するNTT標準の自立・低架であり、NTT通信機械室や一般ビルへの設置が可能で、かつ通信装置の高度化、多様化に柔軟に対応でき、また作業安全性や装置保守性に優れている。

各装置ユニットは、デジタルシステム実装化されており、このINSキャビネット架に搭載実装される。

デジタルシステム実装法は、LSI技術、デジタル技術、光技術などの進展に伴い、これら技術を基盤として通信網のデジタル化が進められるなかで、これらデジタルシステムに適合する新たな

実装方式として、NTTにおいて標準化されたもので、以下の特長がある⁽⁵⁾。

- (1) 各機能単位は、完全ユニット化されており、電源、信号の接続は、すべてコネクタで行っている。このため、設計・製造・検査が各ユニットで自己完結に行えることとなり、架に搭載後は、最終性能の確認のみ行えばよく、効率的でかつ建設・保守・増設性の向上が図れる。
- (2) 各ユニットのバックワイアリングボードは、プレスフィットと呼ばれる無はんだ接続でコネクタ (パッケージコネクタ、ユニット間など接続ケーブルコネクタ) を形成し、パッケージコネクタとケーブルコネクタは、1 本のプレスフィットピンの前後を共用して構成するので、信頼性の向上が図れる。
- (3) 対流が促進される空気流整流板の付加により、高能率な自然空冷が可能である。

なお、加入者装置 (RT 2) については、ユーザーオフィスなどに設置されることから専用キャビネットを開発した。

5. 部 品

加入者系設備、特に加入者系伝送装置は、ユーザーごとに設置されるため、使用効率が低く固定的なコストを要する。このため、LSI 化、モジュール化による装置の小型化、低消費電力化、経済化が必ず(須)である。

5.1 L S I

表 3 は、この装置のために開発した主要LSIを示しており、以下にその主要点を述べる。

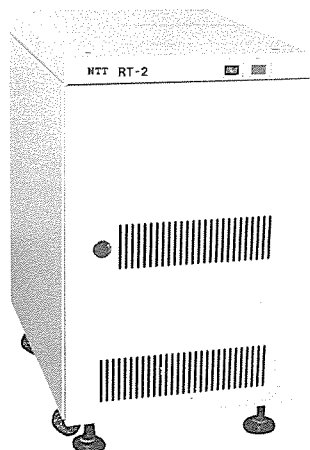


図 5. 加入者装置 (RT 2) の外観

表 2. 加入者線光伝送系の主要諸元

項 目	短距離型		長距離型	
適用距離	7km		15km	
光源	LED		LD	
波長	上り 1.3 μ m	下り 0.85 μ m	上り 1.3 μ m	下り 1.2 μ m
伝送媒体	GI形多モード光ファイバ			
伝送形式	双方向2波長多重伝送			
符号形式	CMI			
伝送路容量	6.312Mbps			

(1) デジタル 1 次群インタフェース LSI

1.544Mbps デジタルリンク終端用 LSI で、送信フレームフォーマットの構成、受信フレーム同期などの機能を持っている。フレームフォーマットは、12 マルチフレーム / 旧 24 マルチフレーム / 新 24 マルチフレームがモード選択可能であり、他の装置への適用も可能としている。なお、この装置では、24 マルチフレームモードで使用している。

この LSI の回路機能を個別部品で構成した場合と比較すると、汎用 TTLIC 200 個、消費電力 8 W であったインタフェース機能が LSI 1 個、消費電力 40mW で実現される。

(2) デジタル 2 次群インタフェース LSI

6.312Mbps デジタルリンク終端用 LSI で、送信フレームフォーマットの構成、フレーム同期などの機能を持っている。この LSI においても上記 LSI と同等の小型化、低消費電力化が可能となっている。

(3) ライントランスコーダ LSI

ライントランスコーダ LSI は、汎用的 LSI として各種装置への適用を考慮し、3 値符号用と 2 値符号用の 2 種を開発した。

3 値符号用は、AMI (Alternate Mark Inversion) 符号及び AMI 系 BSI (Bit Sequence Independence) 符号である B 8 ZS (Bipolar with 8 Zeros Substitution) 符号、B 6 ZS (Bipolar with 6 Zeros Substitution) 符号、HDB 3 (High Density Bipolar 3) の各伝送符号変換が可能である。

2 値符号用は、CMI (Coded Mark Inversion) 符号、MD (Modified Dipulse) 符号をサポートする。なお、MD 符号におけるフレーム同期及び保護回路も内蔵している。

(4) 256 ビット エラスティックストア LSI

256 ビット エラスティックストア (256ES) は、同期多重化回路において必須の LSI であり、CMOS フルカスタムにより実現した。

表 3. 新しく開発した主要 LSI

品 名	型 名	機能 / プロセス
デジタル 1 次群 インタフェース LSI	M60008 -0102S	1.544Mbps デジタル伝送路信号終端 CMOS マスタスライス
デジタル 2 次群 インタフェース LSI	M60008 -0101S	6.312Mbps デジタル伝送路信号終端 CMOS マスタスライス
ライントランスコーダ (3 値符号) LSI	M60007 -0201FP	伝送符号変換 (NRZ → AMI, B8ZS, B6ZS, HDB3) CMOS マスタスライス
ライントランスコーダ (2 値符号) LSI	M60005 -0222FP	伝送符号変換 (NRZ → CMI, MD) CMOS マスタスライス
256 ビット エラスティックストア LSI	M5M5C001S	256 ビット 可変容量 FIFO メモリ CMOS フルカスタム

表 4. 標準インタフェース モジュール

モジュール名	機能 / 外形寸法
1.5M-INF (B8ZS) モジュール	1.5M 伝送路インタフェース モジュール 伝送符号: B8ZS/AMI 外形寸法: 40 × 60 × 8.9 (mm)
6.3M-INF (B8ZS) モジュール	6.3M 伝送路インタフェース モジュール 伝送符号: B8ZS/AMI 外形寸法: 40 × 60 × 8.9 (mm)
1M-INF (CMI) モジュール	CAP NET 用 トランシーバ モジュール 伝送符号: CMI 外形寸法: 40 × 60 × 8.9 (mm)

5.2 モジュール

この装置が持つ標準インタフェースとしては、デジタル 1 次群インタフェース、デジタル 2 次群インタフェース、4 M ハイウェイインタフェース及び局内情報転送網 (CAP NET) インタフェースがある。標準インタフェースは、機能としてのまとまりが良く、かつ汎用回路であることからモジュール化が有用である。このため、4 M ハイウェイインタフェースを除く各インタフェース回路のモジュール化を図った。

モジュール化に当たっては、パッケージの実装間隔からモジュール高さを 8.9mm 以下とする必要があり、特にこの点に大きな配慮を払っており、表面実装部品及び技術により実現している。表 4 に開発したモジュールをまとめる。

6. む す び

I-SMD-B 形加入者線多重伝送装置は、既に幾つかの電話局で順調に稼働しており、今後 INS ネットの全国拡大に伴って導入が促進されていくものと予想される。このためには、更に小型化、低消費電力化、経済化を図った装置の実現が必要であり、NTT の御指導のもとで現在、鋭意開発を続けている。

最後に、常日頃から多大の御指導を賜っている NTT ネットワークシステム開発センターをはじめとする NTT の関係各位に深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 村田: INS ネットサービスの概要, 施設, 40, No. 5, p. 4 (昭 63)
- (2) 小林: INS ネットサービスの提供を可能とした D70 形自動交換機, 施設, 39, No. 11, p. 45 (昭 62)
- (3) 小宮ほか: I インタフェース加入者線伝送システム, 施設, 40, No. 2, p. 22 (昭 63)
- (4) 古川: INS キャビネット架の開発について, 施設, 40, No. 5, p. 38 (昭 63)
- (5) 金子ほか: デジタルシステム実装法, 通研実報, 33, No. 10, p. 2383 (昭 59)

火力発電所 中央制御室のトータルデザイン

田中宏毅* 森川勝司* 須山 勉** 白石元勝***

1. ま え が き

最新鋭大容量の火力プラントでは、運転操作性や信頼性を飛躍的に向上させる目的で、最新の自動化技術を基盤としたマンマシンインタフェースが要求されてきた。このうち、操作機能に関しては人間工学に基づいた技術検討がなされ、多くの成果が実用化されている⁽¹⁾。

しかし、最近の状況として次の二つの動向がある。第一に、運転操作におけるヒューマンエラーを未然に防ぐためには、これまでの機能面の検討に加えて、人間の心理的欲求を満たす高度な技術が必要であるとの認識が生まれてきたことがあげられる。

第二に、巨大プラントがこれまでのように比較的なじみが少ない施設ではなく、一般の人々にも親しまれる施設であろうとする電力会社からの要請が大きくなってきたことである。

この中央制御室のトータルデザインは、制御システムにおけるマンマシン インタフェースの検討範囲を従来の人間と機械だけの関係から、人間・装置・作業室空間の関係領域にまで拡大したものであり、インダストリアル デザイン、人間工学、空間デザインの総合技術分野の検討である。したがって、これは作業空間の機能性と情緒面を共に高度化する技術と定義できよう。

ここで紹介する内容は、関西電力㈱と三菱電機㈱との間で実施された共同研究の事例報告である。

2. 中央制御室のトータルデザイン

中央制御室のマンマシン インタフェースに関する〔人間・装置・

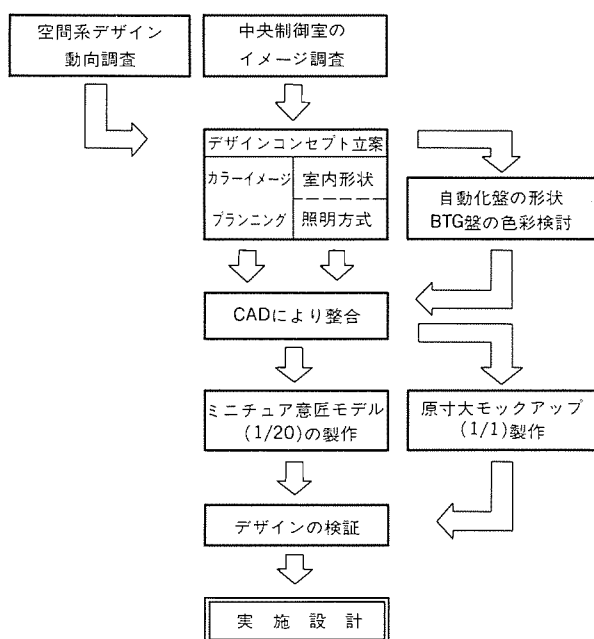


図1. 中央制御室トータルデザインのプロセス

作業空間]系の質の向上を目的とするトータルデザインにおいては、従来から行われてきた機能性の検討を踏まえたうえで、次のアプローチが必要となる。

2.1 制御室における緊張水準の維持

トータルデザインを検討するにあたり、これまでのマンマシンシステムの研究や最近のインテリジェントビルのオフィス空間の設計コンセプトの調査などにに基づき、次の基本的な考え方を導入した。

(1) 応用心理学や疲労の研究結果⁽²⁾から、新しい信号が与えられない場合に、人間の緊張水準は比較的短時間で低下することが分かってきた。このため、作業空間を構成する色彩や照明条件だけに頼って、高い緊張水準を常時持続させることは困難である。

(2) ある程度快適な作業環境のもとで、要求される緊張水準に高めるために、警報やCRTなどによる適切な信号をトリガとして作業者に与える方法が好ましい。なお、こうした信号や情報の提供手段については、「警報の集約化とCRT個別表示について」などの研究成果が既に数多く発表されている。

2.2 トータルデザインのプロセス

こうした目的達成のための具体的なプロセスを図1に示す。このプロセスにおける特記事項として、

(1) デザインなどに関係する感覚面を定量的に捕らえることのできる手法を用いて、従事する人々のし(嗜)好イメージを調査しその結果をデザインに反映する。

(2) 人間工学的に推奨されている原寸大モックアップを使用して、タッチパネル付きCRT卓やBTG盤のデザイン及び人間工学的特性について評価する。

(3) ミニチュアモデルを用いて空間デザインや照明効果をシミュレーションし、検証と評価の精度を高める。

3. トータルデザインの基礎技術

作業空間に対するトータルデザインを実施するために開発した基礎的技術の主なものには、次のものがあげられる。

3.1 イメージの定量的把握

イメージやデザインなど感覚面と大きくかわりあう分野は、これまでは定性的な概念として扱われブラックボックス視されてきた。また、それらを評価する人のカリスマ的判断にゆだねられる面もあった。トータルデザインでは、感覚面の効果をとらえる方法として評価を得ているSD法⁽³⁾ (Semantic Differential法：意味微分法)を基本とした定量的手法を導入することにより、従事する人々のイメージの嗜好を抽出し、提案デザインの評価を行った。

3.2 好ましい色彩イメージの抽出

中央制御室の作業環境の設計に関しては、従来から提案する側の判断にゆだねられて従事する人々の色彩イメージの嗜好に関する調査がなかった。トータルデザインでは、日本カラーデザイン研究所がSD法を用いて開発した手法⁽⁴⁾を採用して、中央制御室の好ましい色彩イメージを抽出することに成功した。具体的な方法とステップ

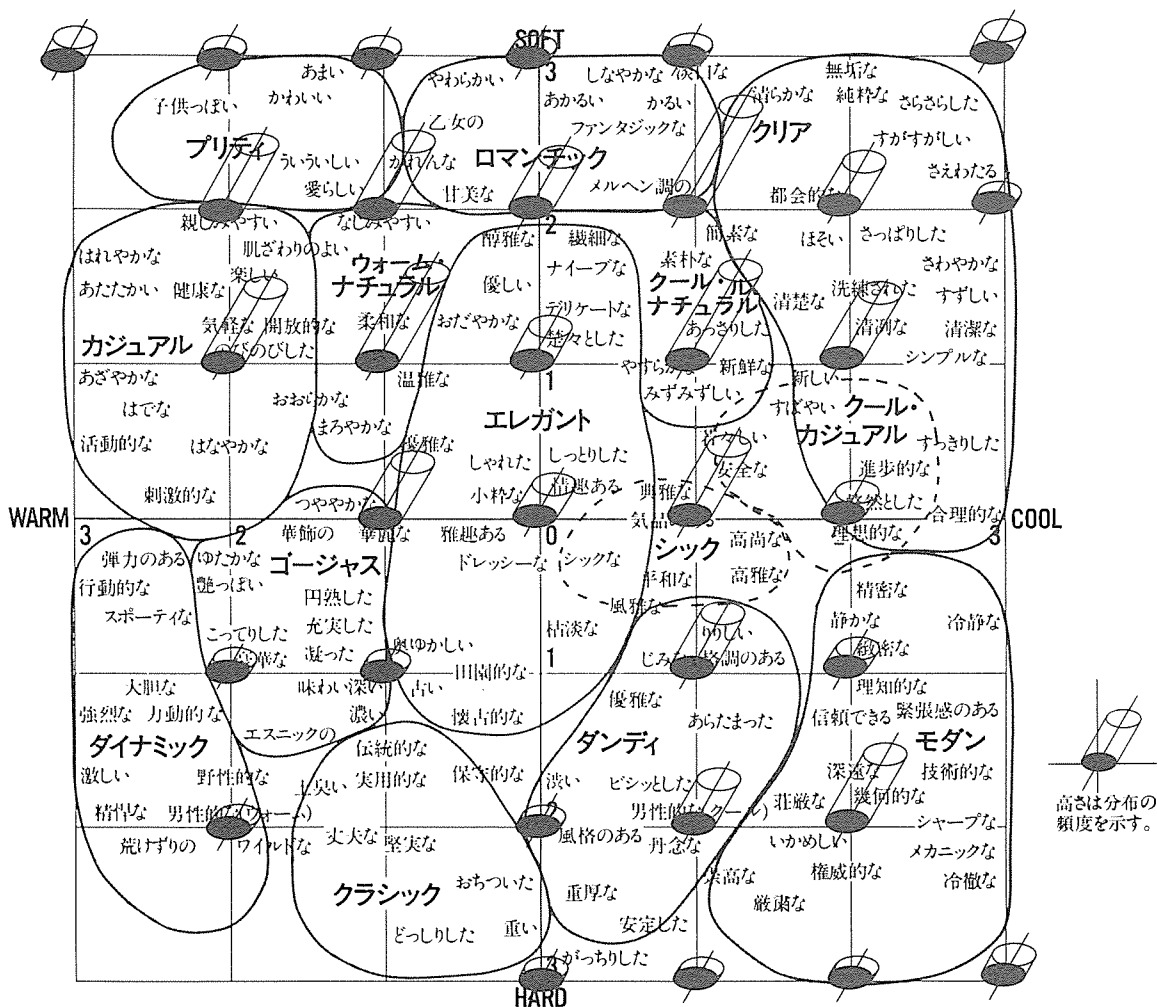


図2. 言葉で表現した好ましい色彩イメージ

は、

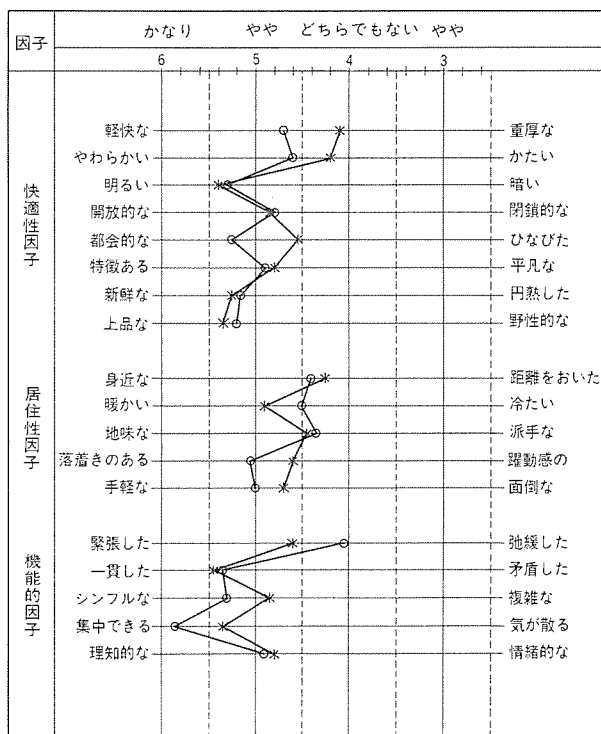
- (1) 火力発電所に勤務する9名の管理者と104名の運転実務者を対象に、“明るい—暗い”など16種の形容詞対で構成されたアンケート調査を実施し、そこで得られた結果を図2に示すイメージスケール上に、言葉（形容詞が中心）で表現した好ましいイメージとしてプロットする。
- (2) このイメージスケールと重なり合うことが確認されている、“配色イメージスケール”上に、好ましい色彩イメージとして抽出する。
- (3) この結果、従来から使用されていた青灰色の機器標準色（マンセル値：7.5BG6/1.5）に比べると、色彩イメージの嗜好は“ソフト”化の傾向が強く“ウォームナチュラル”と“クールナチュラル”に2極化される。これらの明るく親しみやすい色彩を好む傾向は、現在の建築やデザインの一般的な傾向と一致すると考えられ、この結果をデザインコンセプトの策定に大きく反映させることにした。

3.3 好ましいデザインイメージの抽出

中央制御室のデザインに関しても、好ましいイメージの研究・調査がないため、同様にSD法を用いてイメージの抽出を行った。

(1) アンケート調査の方法

アンケートの設問に使う意味尺度（前述の“明るい—暗い”などの形容詞対をさす。）の選定には厳密さが要求されるため、建築デザイン、室内デザイン、情緒工学などの研究分野の文献を調べ、使用実績をもつ94対の意味尺度を新しく選出した。関係者の予備実験を経て、最終的に18対に絞ってアンケート用紙を作成した。



管理者(9名) 非管理者(104名)

図3. 好ましいデザインイメージ

色彩イメージと同様に113名を対象に調査し、得られた結果を主成分分析にかけて図3に掲げるとおり、快適性因子、機能性因子、居住性因子の3因子に類別することができた。

(2) 好ましいデザインイメージ

機能性への嗜好が高いのは制御室の性格上当然と考えられ、“集中できる”イメージを反映するデザインとした。

“明るさ”“暖かさ”“落ちつき”などのイメージは快適性や居住性をもつ作業空間の実現に結びつく重要な要素と考えられ、デザインコンセプトの策定と実施デザインに大きな示唆となった。

また、“ウォームナチュラル”“クールナチュラル”の色彩イメージもデザインに反映すべき傾向と考えてコンセプトに加えた。

3.4 制御室の空間デザインの提案

トータルデザインの目的を、運転作業に従事する人々の作業空間の質的向上とする立場から次のアプローチを行った。

3.4.1 デザインの要求

(1) オフィス環境のデザイン動向の調査報告⁽⁶⁾などから、作業空間の新しいあり方として、次の三つのトレンドを参考に検討した。

- リビング化現象：快適性の重要視、リフレッシュのための空間。
- アーバン化現象：自由に集える空間、利便性の高い装置の導入。
- メディア化現象：作業空間そのものが情報発信基地となる。

(2) また、既に得ている好ましいイメージの調査結果をあわせて検討し、キーワードとして機能性、快適性、居住性をとりあげて空間デザインを行った。

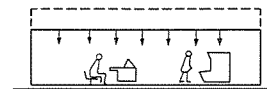
3.4.2 室内の基本デザイン

労働の場として長時間作業での集中力や緊張水準の維持が求められる中央制御室に対して、これまでの検討を踏まえた快適性の実現のためには、室内の表面的な処理にとどまらず建築的な空間デザインを含む総合的な検討が重要である。

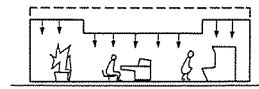
(1) 室内空間の基本形

中央制御室の建築的条件を考慮すると、室内空間の基本形の特徴は、主に室内の断面形状に現れる。断面形状のイメージは大きく分けて、次の三つのタイプに分類することができる(図4)。

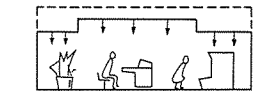
(a) スクエアフラットタイプ(□形)



スクエアフラットタイプ



コンケーブタイプ



コンベックスタイプ

図4. 室内空間の基本形

デザイン処理によっては極めてハイテックなイメージの空間創出が容易であるが、直線的処理の多用による変化の少ない直截的デザインは、ストレスを感じやすい空間となることが考えられる。

(b) コンケーブタイプ(凹形)

低い中央部が空間の天地を近づけるので落ち着いた雰囲気を作られるが、処理の方法によっては圧迫感を与える原因となる。

(c) コンベックスタイプ(凸形)

中央部が高い空間は、圧迫感の少ない開放感と同時にドーム的シンボル感を演出させるが、反面よりどころのない落ち着かない空間ともなる。

(2) デザインの提案

天井全面にルーバを用いた光天井方式が従来の中央制御室では一般的なデザインであり、フラットスクエアタイプの断面形状が、ややストレスを感じさせた原因とも考えられる。今回のイメージ調査結果を反映するとストレスをなくする方向がデザインコンセプトと一致し、提案デザインはコンベックスタイプ(凸形)による快適性重視形とした。

4. トータルデザインの要素技術の開発

デザイン、人間工学、照明工学など従来から用いられてきた技術

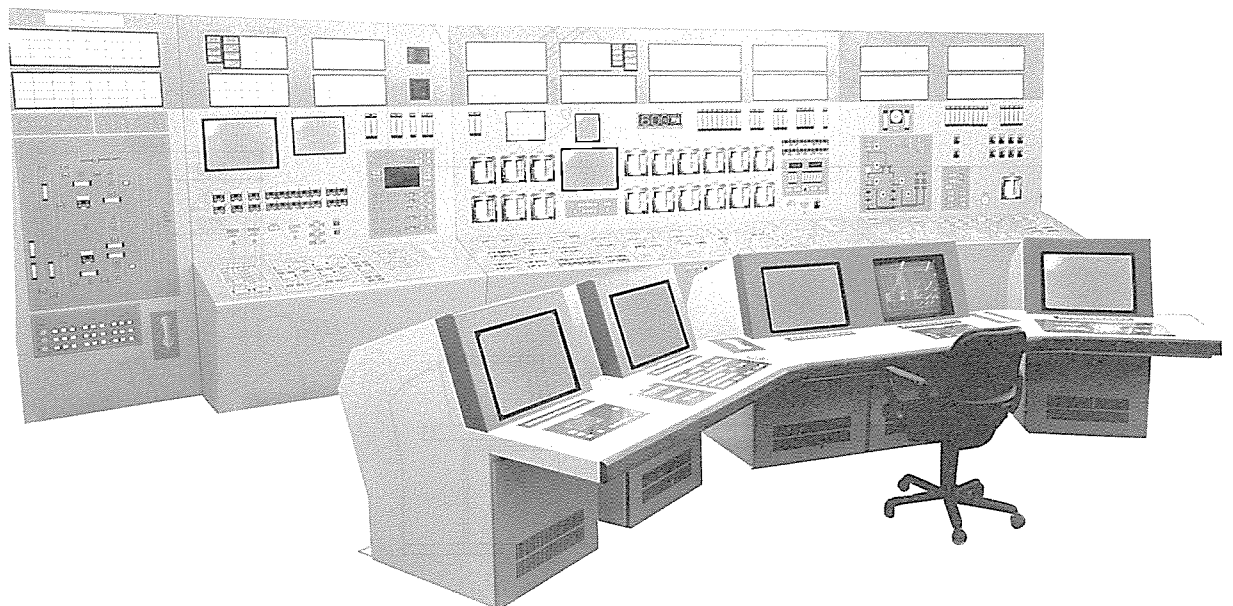


図5. 原寸大モックアップによる検証

を総合して、これまでに述べたトータルデザインの基礎技術を具体的に展開し、実施するための要素技術を確立した。

4.1 制御室の配置と寸法

トータルデザインに関連する室内の配置については、

●運転制御装置の最適配置

●制御室の最適形状（縦・横・高さ比と寸法）

制御室の形状に関しては、この共同研究では建築設計が終了しており、装置の最適配置について次の検討を行った。

(1) BTG盤（ボイラ、タービン、発電機の集中制御盤）とCRT付き自動化盤の相互距離について、人体計測値に基づき盤面表示文字の視認距離、盤面との視方角、運転員の視野角と作業域を中心に検討した。

(2) 検討の成果を原寸大モックアップを製作して運転経験者を混えて検証し、すべての点で良好な結果を得た（図5）。

4.2 BTG盤の色彩計画

三つの発電システムを一つの中央制御室で制御するため、室内に設置される装置の数は多く、その色彩面積の占める割合は極めて大きい。このため、盤面の輝度や表示物の視認性を中心とする色彩機能面の検討と、色彩イメージ嗜好を反映した色彩情緒面の検討とを併せ行った。この結果、主調色に新JEM色（5Y7／1）を採用し、操作卓面と警報表示灯面には低明度のツートンカラーを施して快適な印象と同時に機能感を強調するデザインとした。

4.3 自動化盤のデザイン

システム設計の結果、タッチパネル付きCRT 4台を使用する自動化盤について、人間工学とデザインの検討を行った。

(1) 平面形状について

●直線状：横方向に4台のCRTが一行に並ぶ（従来タイプ）。

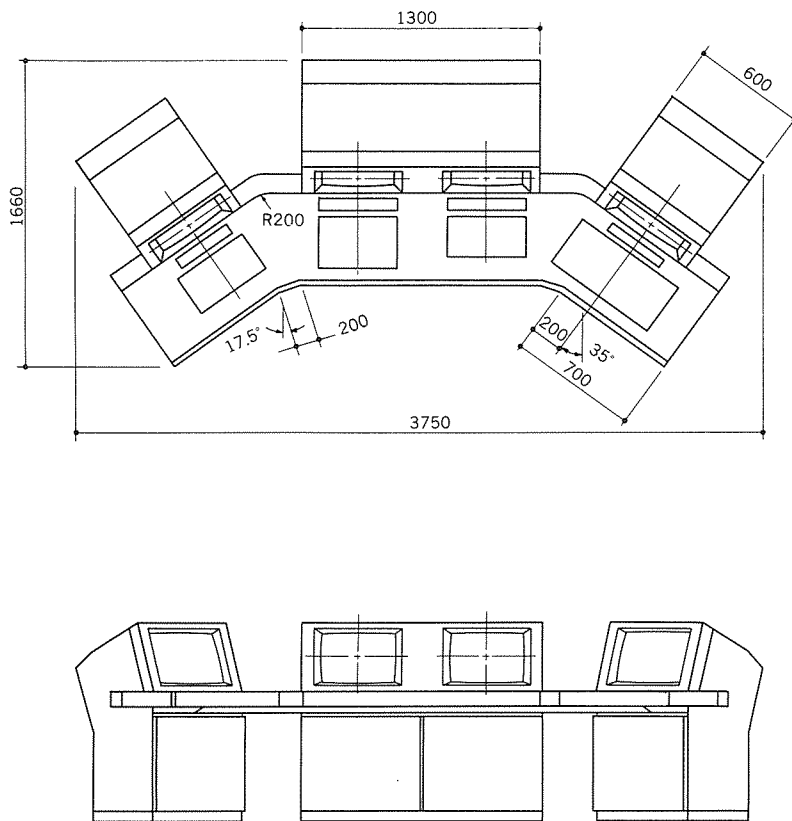


図6. 自動化盤の人間工学的寸法

●半円状：半径1.5メートルの半円弧状にCRTがとり囲む。

●折線状：中央に2台のCRTが横並びし、左右は35°下方に折れ曲がる。

の各形状を操作性、快適性並びにアピール度について評価し、折線状に決定した。

(2) 断面形状についてはタッチパネルの操作性を中心に検討して、図6に示す人間工学的寸法を与えた。

4.4 室内の照明デザイン

照明デザインがトータルデザインに及ぼす影響が大きいことは、関連分野の研究などから知られているが、快適性を指向するコンベックスタイプの基本形に従った照明デザインを実施した。

(1) BTG盤上の在来形計器の視認性を損なわず、CRTの視認性を確保する必要性があり、自動化盤、BTG盤、室内中央部、室内周辺部の四つの異なるエリアごとの個別の最適照明方式を初めて確立した。

(2) 各々の照明を快適な室内照明として統一感あるデザインにするため、凸形に中央部を一段高い形状としOAルーバとダウンライトを設置し、周辺部との境界面の四隅に大きな曲面を採り入れてゆるやかなイメージを持つデザインとした（図7）。

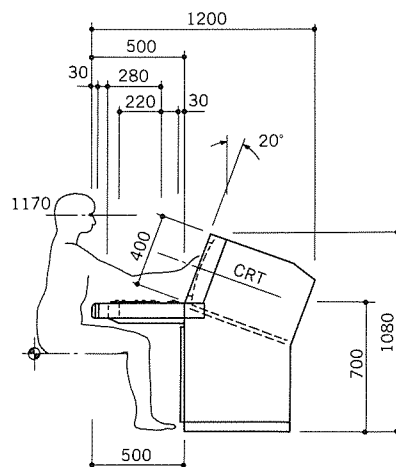
4.5 室内の色彩計画

室内の色彩要素としてウエートの大きい床面を重視して、

(1) “ウォームナチュラル” “クールナチュラル” のイメージを持つ配色としてY系、R系、YR系の色相を選択した。

(2) 床面の中央部を周辺部に比べてやや低い明度のツートンカラーを施して、通常状態の作業エリアと異常時エリアを明りょうに識別できるようにして、快適さの中にもハイテックな機能感をアピールするデザインとした。

単位：mm



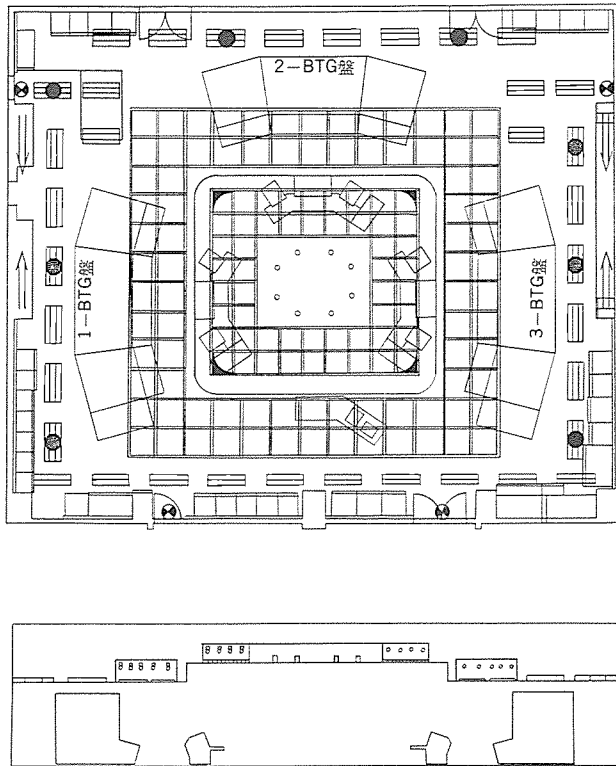


図7. 天井構成と照明

(3) 室内の基本配置や機器の形状と、室内配色とのマッチングをシミュレーションする目的で、CADを用いた検討を繰り返し、決定した。

4.6 什器類のデザイン

中央制御室には装置以外にも多くの家具・じゅう（什）器が使われるが、特に直長机やいす（椅子）については中央部で目立つ位置に配置されることもあり、トータルデザインの視点での提案が必要

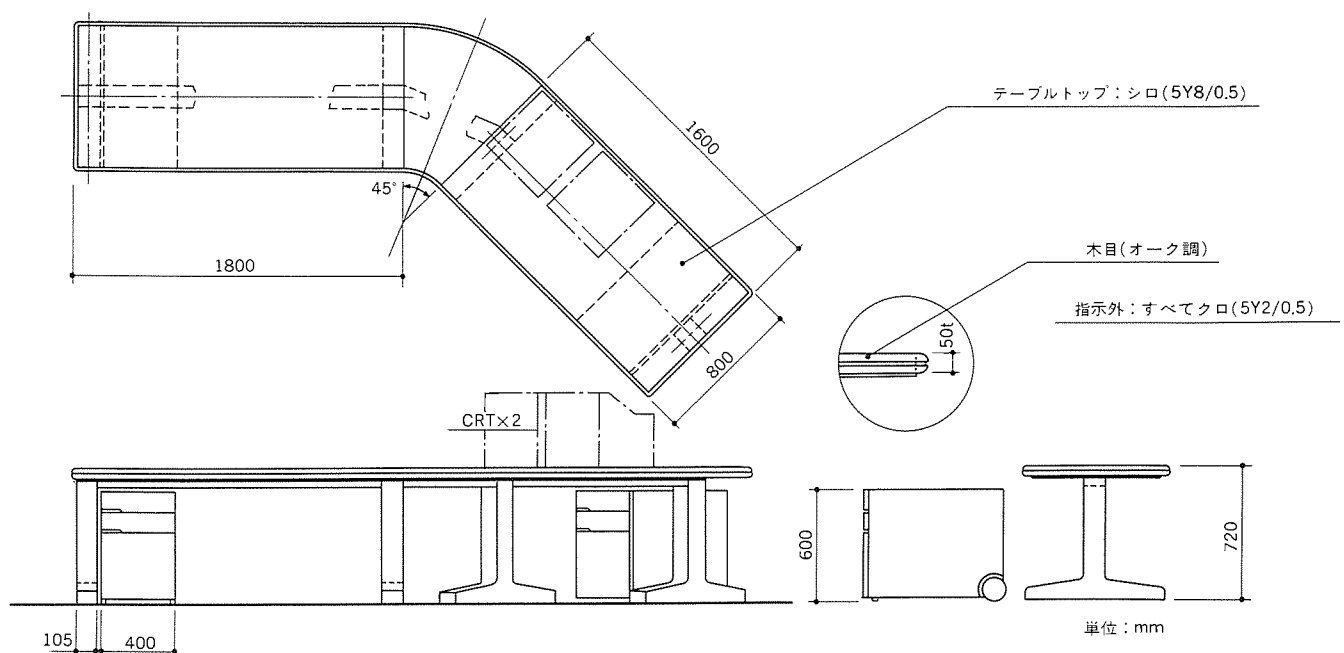


図8. 直長机の外形図

である。このため、デザインコンセプトにマッチする製品を検討して選択した。図8に外形図を示す。

4.7 ミニチュアモデルによる総合検証

トータルデザインの最終段階では、実施設計案をまとめ上げる前段階までの総合検証が必要である。ミニチュアモデルの利用による検証・評価の技術を確認した。その特徴となるのは、

(1) 各種文献から1/15～1/20スケールのミニチュアモデルを使用しての空間デザインの検証の有効性が既に確かめられている。今回は、天井照明部と床面を変更することのできる1/20スケールのミニチュアモデルを製作して次の項目の評価を行った。

- トータルデザインの提示各案の総合的印象やデザインコンセプトの反映度

- 室内の色彩

- 機器・什器類のデザインと相互配置の人間工学的特性

(2) 評価の方法には、評価する人の直観的印象を集約する簡易法と、前述したSD法などを用いる定量的方法とがあるが、今回は簡易法を用いて実施した。いずれの方法においても、評価者は、

- 制御室背後の入口近くに立った状態を想定してミニチュアモデルに対する目の高さ設定して観察する。

- 天井を取り外した状態で、制御室全体を観察する。

これらの2通りの観察を行う。

(3) この結果、トータルデザインのデザインコンセプトに基づく“ウォームナチュラル”案に多数の評価が集中し、評価を決定づけた。最終決定されたミニチュアモデルを図9、図10に掲げる。

5. 今後の検討課題

イメージ調査から始めてトータルデザインを構成する技術の各ステップの全容を紹介したが、今後の検討課題としてはトータルデザインの要素技術としてとりあげた分野を更に精ち（緻）化する必要がある。一例をあげれば、

- 室内配置に関する空間デザインの方法論を検討し確立する。

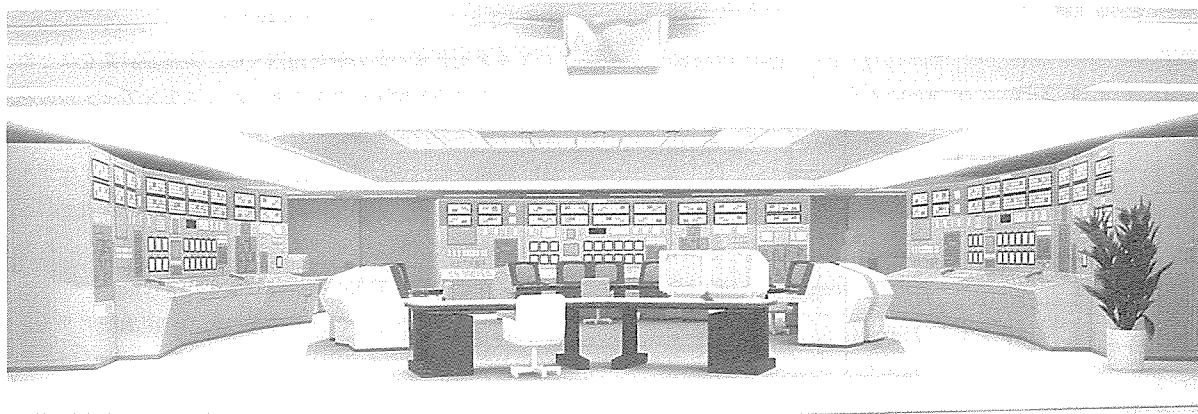


図9. ミニチュアモデルによる総合評価（室内デザイン）

6. む す び

以上の経過をたどり、火力発電所の中央制御室のトータルデザインの研究は終了し、1990年10月の運開予定の関西電力㈱南港火力発電所を対象に現在実施設計が行われている。約6か月の短い期間で完成できたのは、他分野向けに同様のアプローチを行った実績を持ち、貴重なノウハウを有効に活用できたことと、関係者各位に絶大な御協力が得られたことがその理由であった。

終わりにこの研究の機会を与えられ、その遂行にあたり多大の御協力をいただいた関西電力㈱と三菱重工業㈱の関係各位に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 森ほか：最新鋭大容量火力プラントの中央制御盤，三菱電機技報，54，No.5，p.49（昭55）
- (2) 大島：疲労の研究，同文書院（昭56）
- (3) 近江：造形心理学，福村出版（昭59）
- (4) 小林：インテリアシリーズ4，日本カラーデザイン研究所（昭56）
- (5) 大熊：オフィス空間の新潮流を語る，日経アーキテクチャ，1987-9-21号からシリーズ企画（昭62）

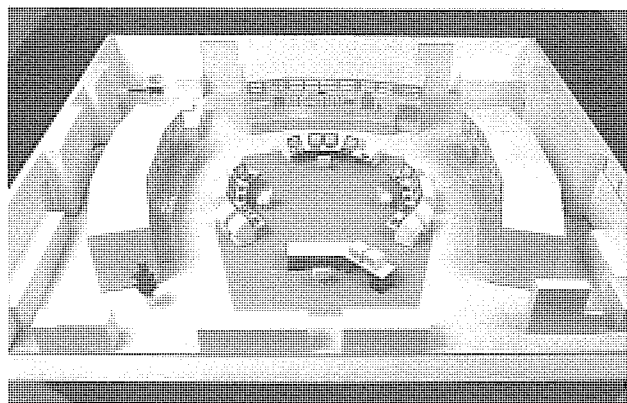


図10. ミニチュアモデルによる総合評価（室内配置）

- ミニチュアモデルを補完する目的で，空間系デザインのシミュレーションにCADを適用して効率化を図る。
- プラントへの適用後の運転実績を踏まえた定量的検証と評価。などがあげられる。

高精細静止画伝送システム

スポットライト “HRG-100”

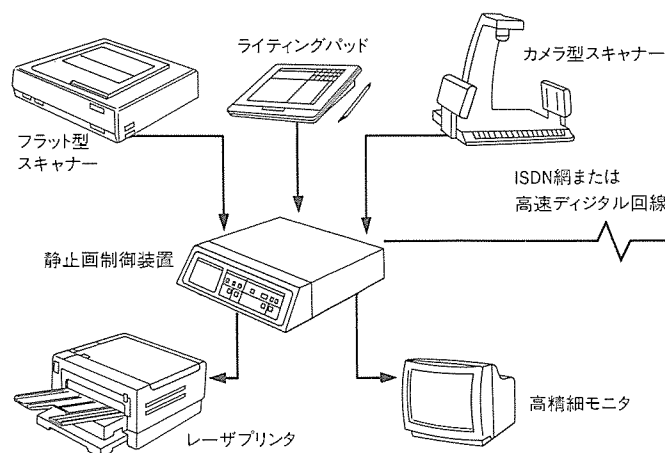
近年、ディジタルの通信網の整備に伴い、テレビ会議システムの導入が増えてきました。現在のテレビ会議システムは動画主体のものです。最近では動画+静止画(高解像度)システムの要求が強くなっています。そこで会議資料等を高速・高精細にて伝送する、高精細静止画伝送システム“HRG-100”を開発しました。

特長

- 入力は白黒2値/中間調(64階調)で解像度300DPI(12本/mm)の高解像度です。
- 高精細モニタにより、1024ドット×768ラインでノンインタレース表示をすることにより、高品質表示することができます。
- レーザプリンタにより、普通紙に鮮明なプリントアウトができます。
- 画面のズーム、スクロール、手書き文字入力、消去、ポインター指示が、電子ペンによりワンタッチで操作できます。
- 画像伝送は、ディジタル回線を使用し、高速に伝送します。A4サイズ原稿を約8秒で伝送します(64kbps時)。
- 市販の音声装置と組み合わせることにより、手軽な打ち合わせシステムが実現できます。



システム構成図

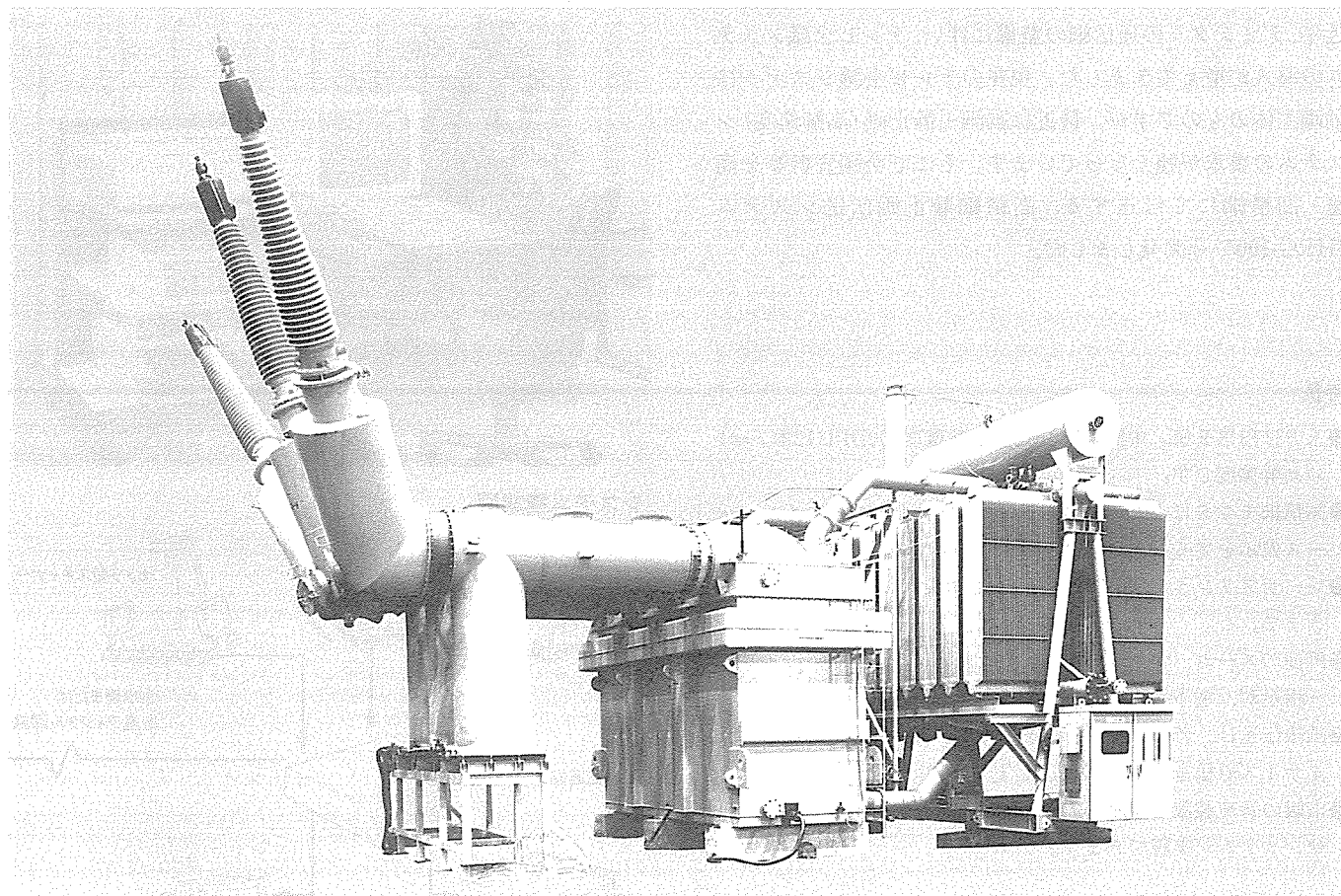


仕様

静止画制御装置 HRG-100	画面解像度	300DPI (12本/mm)	A 4 2464(H)×3472(V)ドット B 4 2992(H)×4208(V)ドット A 3 2992(H)×4208(V)ドット
	表示信号出力	48kHz (H) 60Hz (V)	アナログRGB ノンインタレース方式
	表示制御	1、2、3、4、5倍ズーム 部分消去・全消去	スクロール 背景色選択(白/青) 手書き文字入力(赤/緑)
	イメージ表示方式	モノクロ 2値/中間調(64階調)*1	
	プリント出力	イメージ/イメージ+手書き文字	
	回線インタフェース	RS-449 X, 21 RS-232C(同期)	9.6kbps~64kbps 2.4kbps~9.6kbps
	伝送時間	標準 約8秒(A4・300DPI・64kbps) 高速 約4秒(A4・150DPI・64kbps)	
ドキュメント スキャナー	形 式	カメラ型スキャナー	フラット型スキャナー
	最大入力サイズ	A 4、B 4	A4、B4、A3 (スキャナー内でB4に縮小)
	入力解像度	300DPI (12本/mm) (中心部)	300DPI (12本/mm)
	入力時間	約8秒 (A4)	約5秒 (A4)
レーザープリンタ	印刷方式	PPC 電子写真方式	
	印字解像度	300DPI (12本/mm)	
	記録色	黒	
	用紙サイズ	A 4 / B 4	
	出力時間	A 4 / 約10秒	
高精細モニタ	CRT	20インチ	
	表示解像度	1024(H)×768(V)ドット	
	操作方法	パッド面ペンタッチ方式(ワイヤレスペン方式)	
ライティングパッド	操作機能	グラフィック処理 スクロール/ズーム/手書き入力/消去/中間調切替/背景色選択	
	パッド面サイズ	304.8×304.8 正方式	
	接続台数	最大4台	

*1 フラット型のみ

クウェートMEW納め三相250MVAR, 275kV スポットライト 外鉄形ギャップ鉄心構造分路リアクトルの完成



このたび三菱電機では、クウェートMEW殿ジャブリエ変電所向けとして、三相器としては世界最大容量の250MVAR, 275kV分路リアクトルを完成し、良好な試験結果を得ることができました。本リアクトルは外鉄形ギャップ鉄心構造を採用し、最新の設計・工作技術により、最高水準の低損失化とコンパクト化を実現しました。また、写真では線路側に工場試験用気中ブッシングを取り付けていますが、現地ではOFケーブルに接続されるため、エレファント構造になっています。

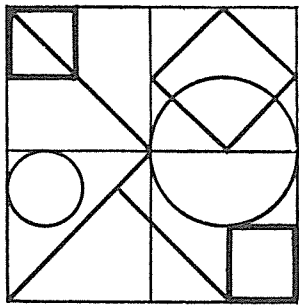
特長

- 従来の空心構造にかえて、非磁性銅板と短冊形鉄心とを一体化させた独自のギャップ鉄心構造を採用。低損失化(従来比約85%)とコンパクト化(従来比約80%)を実現しました。
- 鉄心・タンク間絶縁油の影響を考慮したタンク振動解析技術の確立により、合理的なタンク設計をはかりました。
- 線路側にはHV仕切板を採用。従来のコンデンサ形油中貫通ブッシングに比べ、大幅な油量低減(従来比約85%)と据付スペースの縮小化(従来比約80%)を実現しました。

- 冷却装置は、別置形自冷式冷却器下部に大風量冷却扇を配置するなど、合理的な冷却設計をはかり、補機損の低減・据付スペースの縮小化を実現しました。

仕様

項 目	仕 様
形 式	外鉄ギャップ鉄心形
相 数	3 相
周波数	50Hz
定格容量	250MVAR
定格・電圧/結線	275kV/λ
絶縁階級	線路側 BIL1050kV
	中性点側 BIL170kV
冷却方式	油入風冷式
製造年月	昭和63年11月



特許と新案 有償開放

有償開放についてのお問合せ先 三菱電機株式会社 知的財産渉外部 TEL (03) 218-2139

半導体スタック (特許 第1464555号)

発明者 山本 博

この発明は、特に半導体素子と冷却フィンの締付けに絶縁用ネジボルトを用いる高電圧用半導体スタックに関するものである。

すなわち、図示の如く、半導体スタックの絶縁両ネジボルト(3)の絶縁物(5)の表面に半導体性樹脂からなるシールド電極(9)が塗布され、その両端はシールド効果を増すため曲面形状にされている。このシールド電極(9)を冷却フィン(2)に接続するには、シールド電極(9)のほぼ中央に軟銅線を巻回し、その端部をハンダ付けにて固定すると共に、上記軟銅線他端には圧着端子を接続して冷却フィン(2)にナベネジにて固定する。又、金属性両ネジボルト(4)上に、半導体性の収

縮チューブ(10)を加熱装着した後、絶縁物(5)を注型すると、収縮チューブ(10)が収縮して金属製両ネジボルト(4)と絶縁物(5)との間でクッション材になり、注型後の残留応力を緩和し両者の密着性が高まる。

したがって、この発明によれば、スタックの高耐電圧化を図ることができ、直列素子数が多く全長が長いスタックであっても、シールド電極(9)によってコロナ放電の発生が防止され、又、収縮チューブ(10)によって絶縁物(5)にクラックが発生しないので、従来より高耐電圧の半導体スタックが容易に実現可能となる。

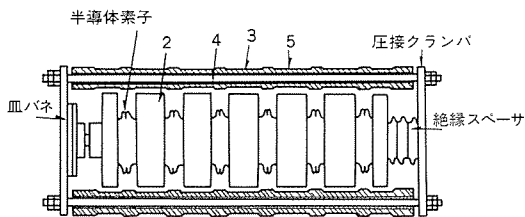


図 1.

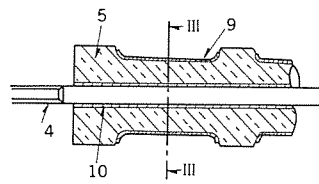


図 2.

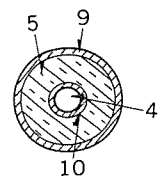


図 3. (図2のIII-III断面)

流量制御弁の制御装置 (特許 第1376969号)

発明者 藤原 通雄, 野沢 栄治, 高橋 基裕

この発明は、電磁石を備えた流量制御弁の電磁石への通電量を、検出手段からの制御信号により増減制御させて流量制御弁の吐出二次圧を制御するようにした流量制御弁の制御装置に関するものである。

すなわち、図示の装置において、先ず流量制御弁(11)の電磁石部への通電開始に際して、時限信号発生器(15)が所定時間動作してこれにより演算増幅器(14)は流量制御弁(11)の電磁石部に最大通電量 I_M が通電されるよう制御信号を出力する。最大通電量 I_M が通電されて上限二次圧 P_{2M} を得た流量制御弁(11)には、その後燃焼装置の熱交換部(12)の

検出温度と設定温度との温度差に応じた通電量の電流が通電されて二次圧が制御される。このとき、流量制御弁の制御装置では上記二次圧 P_{2M} と燃焼装置のバーナーの特性に応じて定まる下限二次圧 P_{2L} との制御幅内で流量制御弁(11)の二次圧が制御される。つまり、一度最大通電量 I_M まで通電した後に通電量を増減しても、最小通電量 I_L における下限二次圧 P_{2L} は一定値を得ることができることになり、燃焼装置のバーナーは逆火されることがない。また、二次圧の制御幅を拡大することができる。

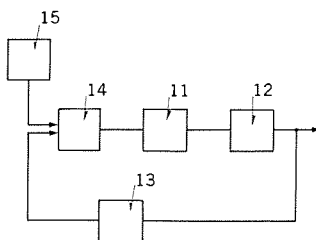


図 1. ブロック図

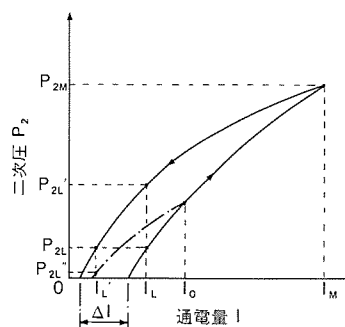


図 2. 動作特性図

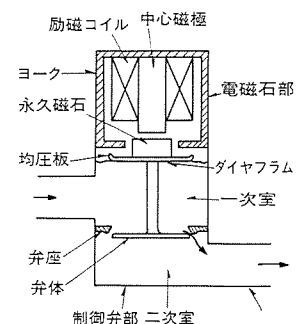


図 3.

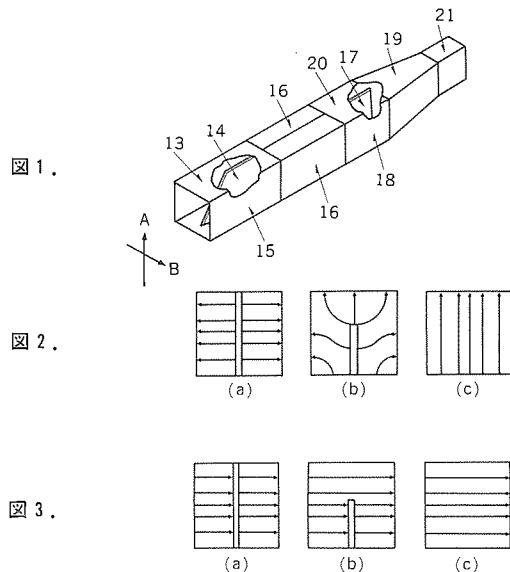
偏波切換器 (特許 第1419045号)

発明者 磯田 陽次, 武田 文雄, 石田 修巳

この発明は、直線偏波の偏波面を90°切り換えるマイクロ波帯及びミリ波帯で用いられる偏波切換器に関するものである。

すなわち、図1の如く構成されたものにおいて、方形導波管(1)から入射した電界は、導波管(1)を面積の等しい2つの方形導波管に分割する金属板(17)に垂直であるため、導波管(1)と導波管アダプタ(19)とで構成される電力分配器(20)で、向きが同じで振幅の等しい2つの電界に分割され、導波管形移相器(16)に入射する。今、導波管形移相器(16)のうち片方だけを動作させ、180°の移相量を与えたとする。この場合、テーパ状に増大する金属板(14)とこの金属板(14)により面積の等しい2つの長方形断面に分割された正方形導波管(13)とからなる電力分配器(15)には、電界の向きが互いに逆である等振幅電界が入射する。図2はこの時の電界の分布を示すもので、逆向きの電界はa, b, cの順に変化し、金属板(14)に平行な直線偏波Aとなる。一方、導波管形移相器(16)の移相量が0°の場合は、電力分配器(15)には電界の向きが同じである等振幅電界が入射する。図3はこの時の電界の分布を示すもので、同じ向きの電界はa, b, cの順に変化し、金属板(14)に垂直な直線偏波Bとなる。以上のように、この発明に係る偏波切換器では、直線偏波の切換えを電気的に行うため、偏波切換速度が速く、ひねり

導波管、曲がり導波管等を用いないため、構造が簡単となる。



〈次号予定〉三菱電機技報 Vol. 63 No. 5 三菱工業用統合制御システム特集

特集論文

- 三菱工業用統合制御システムに寄せて
- 製造業におけるIAシステムの現状と動向
- 統合制御システム《MELTAS》
- 統合制御システム《MELTAS》のマンマシン インタフェース
- 統合制御システム《MELTAS》のエンジニアリング支援
- 統合制御システム《MELTAS》のアドバンスド制御
- 統合制御システム《MELTAS》の石油化学分野への適用
- 統合制御システム《MELTAS》の食品分野への適用
- 統合制御システム《MELTAS》の製紙分野への適用
- 統合制御システム《MELTAS》の鉄鋼分野への適用

普通論文

- 北海道電力株式会社気象情報処理システム
- 電力系統事故復旧支援エキスパートシステム
- 三菱新型トラベーター
- カラービデオ コピープロセッサ
- 高性能光通信用単一モード半導体レーザー
- 3～5μm帯赤外線光学装置の低雑音化
- CVDプロセスの気相・界面反応

三菱電機技報編集委員

委員長	鶴田 敬二
委員	峯松 雅登
〃	福岡 正安
〃	堀切 賢治
〃	風呂 功
〃	村田 豪
〃	藤井 学
〃	紅林 秀都司
〃	高橋 誠一
〃	鳥取 浩
〃	柳下 和夫
幹事	長崎 忠一
4月号特集担当	田畑 則一

三菱電機技報63巻4号

(無断転載を禁ず)		1989年4月22日 印刷
		1989年4月25日 発行
編集兼発行人	長崎 忠一	
印刷所	東京都新宿区榎町7 大日本印刷株式会社	
発行所	東京都港区新橋六丁目4番地9号(〒105) 三菱電機エンジニアリング株式会社内 「三菱電機技報社」Tel.(03) 437局2338	
発売元	東京都千代田区神田錦町三丁目1番地(〒101) 株式会社 オム社 Tel.(03) 233局0641代, 振替口座東京6-20018	
定価	1部721円(本体700円)送料別 年間予約は送料共9,373円(本体9,100円)	

総合デジタル計装制御システム

スポットライト 《MELTAC-Cシリーズ》



最先端の画像技術、情報技術、マンマシン技術を駆使して完成されたCRTオペレーション型総合デジタルコントロールシステム、それが《MELTAC-Cシリーズ》です。原子力発電所向け主要制御監視システムの設計思想をベースに、高信頼性・高機能性・高保守性を達成するとともに、経済性を追求した汎用シリーズです。このシステムは原子力周辺設備(ユーティリティー設備、廃棄物処理設備、水処理設備等)をはじめとして、燃料再処理設備、研究用原子炉設備等の原子力関連施設の計装制御装置に適用できます。

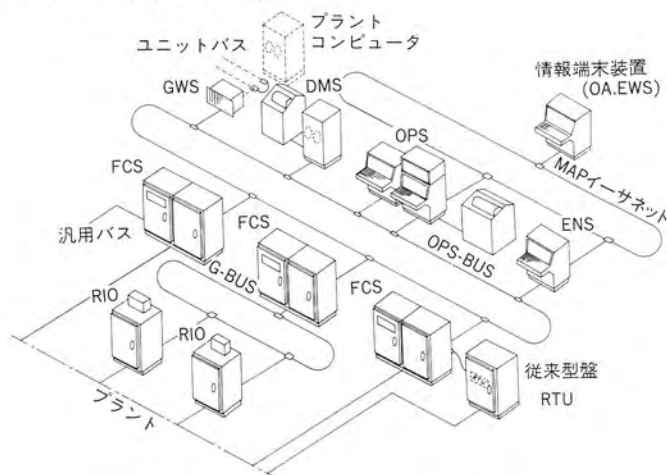
特長

- 20インチ高密度CRTを採用することにより、高いマンマシン機能を有しています。ハードワイヤード計器(制御スイッチ、指示計等)を必要とせず、画面からの直接タッチオペレーションにより、プラントの補機、弁の操作および系統等の集中監視が可能です。
- CRT画面はマルチウィンドウ機能、スクロール機能、自動表示機能を備えるとともに、ワンタッチで任意の画面を高速(0.5~1.0秒)で呼び出すことができ運転操作性に優れています。
- CRT画面の作成はビュービルダ機能により、プログラムを意識せずに、作画の感覚で容易にできます。
- 制御プログラムはエンジニアリングステーションのCRT画面上でブロック図を書く感覚で作成でき、しかもカラー表示によりプラントの制御状態をモニターできます。
- 自己診断機能によりオンラインでカードレベルまで故障を検

知し、自動的に表示することにより保守が容易となります。

- システムの信頼度要求に応じて、二重化構成あるいは一重化構成を任意に選択できるので、最適なシステム構築が可能です。
- 現場に光多重伝送機能を有するリモート入出力ステーションを設置することにより、配線工事量の低減と設備の追加が容易となります。

MELTAC-Cシステム概念



ENS : エンジニアリングステーション
 OPS : オペレータズステーション
 GWS : ゲートウェイステーション
 FCS : フィールドコントロールステーション
 RIO : リモート入出力ステーション
 RTU : リモートターミナルユニット