


MITSUBISHI DENKI GIHO

三菱電機技報



Vol.58 No.7

光応用特集

 未来を開発する
三菱電機

7
1984

光応用特集

目次

特集論文

光通信技術の展望.....	1
中原昭次郎	
通信用半導体光デバイスの展望.....	2
岡 久雄	
光応用計測技術の展望.....	3
大野栄一・布下正宏	
通信用半導体光デバイス.....	8
須崎 渉・高宮三郎・池田健志・浪崎博文・高橋和久	
光通信用光部品とその応用.....	14
竹居敏夫・伊東 尚・三宅良雄・笠原久美雄・金城益夫	
光受信器とその応用.....	18
伊東克能・関川一彦・北山忠義・手島邦夫	
4波長多重通信システム.....	23
関川一彦・伊東克能・杉村滋夫・竹居敏夫・藤原謙一	
光ファイバセンサ —強度変調形—	29
久間和生・田井修市・井田芳明・滝岡孝司・吉永 淳	
光ファイバセンサ —レーザ干渉形—	34
久間和生・田井修市・布下正宏・福田 稔・永尾俊繁	
レーザ式パイプ表面検査装置.....	39
亀井光仁・中島利郎・西川 啓	
近赤外線撮像暗視システム.....	43
安西良矩・西勝健夫・山際豊行・三村和洋	

普通論文

大容量タービン発電機の回転子制動回路.....	47
免太 享・前田 進・平尾俊樹・野村達衛	
トルクセンサ内蔵電動機.....	52
国分元宏・柳内芳彦・森 邦雄	
国際電信電話(株)向けDS-11形非同期端末パケット集線装置 (CPAD)	57
長尾 朋・棋本龍夫・加藤真名井・木村俊弘・溝越 豊	
GDS-70モデルDS図面作成支援システム.....	61
酒元登志克・土屋完二・西井龍五・井上 進・稲葉 徹	

特許と新案..... 67, 68

ガス濃度計
電気装置用タンク
加熱装置

スポットライト

三菱マイコンゴルフ練習器GL-300形..... (表3)

表紙

躍進する光応用技術

美しいスカイラインを描いて林立するビル群。これらのビルそのものも、ビル内のビジネス活動も、高度の情報技術に支えられて多様化・高度化の方向に向っている。更にビルを結び工場を結び都市を結ぶ巨大な情報通信網が、高度情報社会に向けて構築されようとしている。

この高度情報社会への環境作りにおいて、光応用技術が重要な役割を果たそうとしている。ビル管理に、オフィスシステムに、計測制御に、情報通信ネットワークに、各種光センサや画像センサが工場やビルに使われはじめている。

本号は広範な光応用技術の中から、光通信関連技術と光応用センサ技術のフロンティアを特集した。



アブストラクト

通信用半導体光デバイス

須崎 渉・高宮三郎・池田健志・浪崎博文・高橋和久

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P8～13

レーザダイオードを中心とする半導体光デバイスは、今後の情報化社会を支える光通信のキーデバイスとして実用化が進められている。

ここでは当社が開発・製品化してきた短波長帯（0.8～0.9 μm ）及び長波長帯（1.2～1.6 μm ）の通信用半導体光デバイスであるレーザダイオード（LD）、発光ダイオード（LED）、アバランシホトダイオード（APD）、pinホトダイオード（pin-PD）についてその概要を述べる。

光ファイバセンサ ー強度変調形ー

久間和生・田井修市・井田芳明・滝岡孝司・吉永 淳

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P29～33

電力系統や各種工業プラントの計測システムに適用することを目的として、無誘導特性、耐絶縁性、本質安全防爆性などにすぐれた各種光ファイバセンサ及びそれらの計測器を開発した。これらの計装器では、計測信号の伝送路に光ファイバを使用しているため、遠隔計測が可能である。本稿では、光電流（磁界）計、光電圧（電界）計、光温度計、光圧力計、光加速度計の原理、諸特性について述べる。

光通信用光部品とその応用

竹居敏夫・伊東 尚・三宅良雄・笠原久美雄・金城益夫

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P14～17

光ファイバ通信の多様化、高度化を実現するとともに、その低価格化を図るために開発した光部品について、特長、構成、並びに用途を述べている。光部品の信頼性向上のためメタル固定を採用したレーザダイオードモジュール、波長多重伝送用光合波器、並びに光伝送系の多様化に有用なスターカップラ及び多端子LDモジュールについてその特性を述べる。

光ファイバセンサ ーレーザ干渉形ー

久間和生・田井修市・布下正宏・福田 稔・永尾俊繁

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P34～38

当社で開発した光ファイバレーザドップラ速度計（LDV）及び光ファイバジャイロの原理、性能について紹介する。光ファイバLDVに関しては、まず、既に製品化しているHe-Neレーザ、Arレーザを光源に用いた装置を、次に開発中の半導体レーザを用いた装置について述べる。一方、光ファイバジャイロに関しては、光個別部品による位相変調方式によるものと、3：3光ファイバカップラを用いたオール光ファイバジャイロについて述べる。

光送受信器とその応用

伊東克能・関川一彦・北山忠義・手島邦夫

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P18～22

光ファイバ通信システムの最重要ハードウェアである光送受信器について、ディジタル及びアナログ伝送用に分けてその概要と応用例を紹介する。それぞれ特長的な所要機能・性能についてなるべく詳細に説明し、その実現方法を述べる。ディジタル送受信器LSI及びアナログ伝送用レーザダイオード駆動回路HICの紹介を行い、今後の光送受信器の開発方向の一端を紹介する。

レーザ式パイプ表面検査装置

亀井光仁・中島利郎・西川 啓

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P39～42

レーザ光を用いるパイプ材料の表面検査装置について紹介する。この装置はレーザ光を特殊な光学装置でリサーチ図形を描くように走査し、この走査光線をパイプ表面に集束し、かつ反射光をファイバ束を用いた受光系で検出する。これによりパイプ材を回転させることなく、一方向に送る搬送方式での検査が可能となり、この種の検査として初めてオンライン化の可能性を得ることができた。表面の均質な対象の微細欠陥の検査に適合している。

4波波長多重通信システム

関川一彦・伊東克能・杉村滋夫・竹居敏夫・藤原謙一

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P23～28

光ファイバ通信システムを効果的に構成するためには波長多重伝送技術が必要である。今回事業所間のTV会議システムなどを対象に、高速ディジタル信号と映像信号を多方向伝送できる4波波長多重通信装置を開発した。開発の目的は波長多重伝送技術、アナログ伝送技術及び監視制御方式の確立にあり、いずれも所期の目標を達成できた。

近赤外撮像暗視システム

安西良矩・西勝健夫・山際豊行・三村和洋

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P43～46

人間の目には見えない近赤外線を照射し、暗闇の中の物体をモニタテレビに鮮明に映し出すことができる、簡単な汎用性のある暗視システムを製品化した。このシステムは、明るい場所はもちろん、暗闇の中でも容易に撮像できるため、従来の可視光線だけで撮像するITV市場を一変させ、照明を意識させないITVとして多くの用途が期待できる。システムの構成、特長、用途などについて述べる。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 29 ~ 33 (1984)

Fiber-Optic Sensors Using Intensity Modulation

by Kazuo Kyuma, Shuichi Tai, Yoshiaki Ida, Takashi Takioka & Kiyoshi Yoshinaga

Mitsubishi Electric has developed fiber-optic sensors and measuring instruments using them. They are outstanding in their noninductive, isolating, and inherently safe nonexplosive characteristics, and are ideal for use in monitoring electric-power systems and industrial plants. Using optical fibers for the measurement-signal transmission path, the sensors can be used for remote monitoring applications. The article discusses the principles and characteristics of an optical ammeter (magnetic field), optical voltmeter (electric field), optical thermometer, optical pressure gauge, and optical accelerometer.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 8 ~ 13 (1984)

Semiconductor Sources and Detectors for Optical-Fiber Communications

by Wataru Susaki, Saburo Takamiya, Kenji Ikeda,
Hirobumi Namizaki & Kazuhisa Takahashi

Optical semiconductor devices, particularly laser diodes, are proving to be key devices in the practical implementation of optical-fiber communications to meet the needs of the information-oriented society of the future. The article introduces devices developed and marketed by Mitsubishi Electric, including laser diodes for both the short-wavelength ($0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$) and long-wavelength ($1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$) regions, light-emitting diodes, avalanche photodiodes, and pin photodiodes.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 34 ~ 38 (1984)

Interferometric Fiber-Optic Sensors

by Kazuo Kyuma, Shuichi Tai, Masahiro Nunoshita,
Minoru Fukuda & Toshishige Nagao

The article discusses the principles and performance of fiber-optic laser doppler velocimeters (LDVs) and fiber-optic gyroscopes developed and marketed by Mitsubishi Electric. The fiber-optic LDVs use He-Ne or Ar laser units already developed as light sources. The article also covers a velocimeter still under development that will use a semiconductor laser. Two types of gyroscope are discussed: units using phase-modulation techniques with discrete fiber-optic components, and those using a 3:3 fiber-coupler in an all-optical-fiber configuration.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 14 ~ 17 (1984)

Optical-Fiber Components and Their Application to Communications

by Toshio Takei, Sho Ito, Yoshio Miyake, Kumio Kasahara & Masuo Kinjo

Research and development in the field of fiber optics is moving to more diversified, sophisticated, yet lower-cost components. The article discusses the features, structures, and applications of these components. It also describes a laser-diode module, metallized for high reliability, and an optical wavelength divider for wavelength multiplex communications, and gives the performance characteristics of a star coupler and multiterminal laser-diode module useful in diversified optical-communications systems.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 39 ~ 42 (1984)

Pipe-Surface Inspection Using Laser Techniques

by Mitsuhito Kamei, Toshiro Nakajima & Kei Nishikawa

The article discusses surface-inspection equipment that uses lasers to inspect pipe materials. It features a special optical device that performs Lissajous-figure scanning with the laser beam. The photo-detector system uses an optical-fiber bundle and detects the surface reflections of the scanning beam from the pipe. This enables the equipment to scan pipe material using a linear pipe-transport mechanism, without rotating the pipe. This unusual capability makes it possible, for the first time, to incorporate into production lines scanning for fine defects in materials with uniform surfaces.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 18 ~ 22 (1984)

Optical Transceivers and Their Applications

by Katsuyoshi Ito, Kazuhiko Sekikawa, Tadayoshi Kitayama & Kunio Teshima

Optical transceivers are one of the most important hardware building blocks for optical-fiber communications systems. The article gives a detailed description of their characteristic features, functions, and performance for applications in digital and analog systems. The article also introduces a digital transceiver LSI and laser-diode drive-circuit HIC for analog transmission, and surveys trends in optical-transceiver development.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 43 ~ 46 (1984)

A Near-Infrared Radiation Imaging System

by Yoshinori Anzai, Takeo Salkatsu, Toyoyuki Yamagiwa & Kazuhiro Mimura

Mitsubishi Electric has successfully developed a simple, near-infrared radiation imaging system. Using radiation outside the visible spectrum, it provides a clear video display of objects in darkness. The system thus readily extends imaging facilities from the brightly lit areas catered for by conventional ITV equipment to those in darkness, considerably expanding the potential ITV applications and market. The article introduces the system configuration, features, and applications.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 23 ~ 28 (1984)

A Four-Wavelength-Division Multiplex-Transmission System

by Kazuhiko Sekikawa, Katsuyoshi Ito, Shigeo Sugimura, Toshio Takei & Ken'ichi Fujiwara

To configure effective optical-fiber communications systems requires the adoption of wavelength-division multiplex-transmission techniques. Mitsubishi Electric has developed four-wavelength-division multiplex-transmission equipment for use in video-conference systems for in-company communications between branches, etc. It features bidirectional transmission of high-speed digital and video signals. The initial development objectives were to establish the techniques for wavelength-division transmission, analog transmission, and the monitoring and control system. These objectives have been fulfilled.

アブストラクト

大容量タービン発電機の回転子制動回路

免太 享・前田 進・平尾俊樹・野村達衛

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P47～51

近年のタービン発電機の大容量化、電力系統の複雑化・大規模化に伴い、不平衡負荷耐量をはじめ、系統事故時の挙動、SSR現象、発電機の回転子制動回路に課せられる責務はますます厳しくなっている。これに対応するため、当社では詳細な解析研究を進めるとともに、実機並びにモデル機による検証試験を実施してきており、この度、その検討を終えた。ここでは、そのうち特に不平衡負荷耐量に着目して検討した結果を、実測データも含めて報告する。

国際電信電話(株)向けDS-11形非同期端末パケット集線装置 (CPAD)

長尾 朋・榎本龍夫・加藤真名井・木村俊弘・溝越 豊

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P57～60

国際電信電話(株)向けDS-11形非同期端末パケット集線装置 (CPAD) は、調歩式端末をパケット網に収容するための装置である。このCPAD装置は国際電信電話諮問委員会 (CCITT) の勧告に準拠したPAD装置として、KDDと三菱電機(株)が共同開発したものであり、昭和58年7月に商用運転を開始した。

本稿では、CPAD装置のシステム概要 (主要機能、特長、性能) を紹介する。

トルクセンサ内蔵電動機

国分元宏・柳内芳彦・森 邦雄

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P52～56

近年インバータの普及により電動機の交流機化が進んでいるが、メンテナンスフリーの利点をもつ交流機の欠点として、制御性の問題があげられる。特に直流電動機からの交流電動機化においては、電動機軸に加わるトルクの変動に対する精度の良い検出制御は困難であり、交流機化の阻害要因の一つになっている。今回トルク変動による軸のねじれ角度を電気信号として取り出す非接触形のセンサを内蔵させた工作機主軸駆動用電動機を開発したのでその内容を述べる。

GDS-70モデルDS図面作成支援システム

酒元登志克・土屋完二・西井龍五・井上 進・稲葉 徹

三菱電機技報 Vol.58・No.7・P61～66

ミニコンピュータ《MELCOM 70シリーズ》と、高解像度グラフィックディスプレイ装置を組み合わせ、図面作成支援システム・パッケージのシリーズ化を図った。特に、下位モデルは、省スペースと低価格化を指向しており、小規模な事務所での設計作業効率化もねらっている。この論文では、特に機能と操作性を中心に紹介し、関連機器への意識向上と、設計作業効率化の橋渡しとしたい。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 57 ~ 60 (1984)

A Character Packet Assembly and Disassembly Unit for KDD

by Akira Nagao, Tatsuo Umemoto, Manai Kato, Toshihiro Kimura & Yutaka Mizokoshi

The character packet assembly and disassembly (CPAD) unit for Kokusai Denshin Denwa (KDD) Co., Ltd. allows start-stop mode data-terminal equipment to be used in the packet network. The CPAD unit has been developed and manufactured by Mitsubishi Electric in cooperation with KDD in compliance with the recommendation of the International Telegraph and Telephone Consultative Committee (CCITT), and went into commercial operation in July 1983. The article's description of the CPAD unit includes its major functions, features, and performance.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 47 ~ 51 (1984)

The Performance of the Damper Circuit in Large Turbine-Generator Rotors

by Susumu Uda, Susumu Maeda, Toshiaki Hirao & Tatsuei Nomura

Recent demand for increased turbine-generator capacity and larger and more complex power-distribution systems entails stringent requirements with respect to unbalanced loading, response to failure, and subsynchronous resonance of generator rotor-control circuits. Mitsubishi Electric has been seeking to upgrade the rotor-damper circuits, and has now completed a series of tests using actual large turbine-generator rotors or models of them in parallel with exhaustive theoretical analyses. The article reports the measurement results of these tests, in which particular attention was given to unbalanced loading capacity.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 61 ~ 66 (1984)

The GDS-70 Series Model DS Computer-Aided Design System Exclusively for Two-Dimensional Layout

by Toshikatsu Sakemoto, Kanji Tsuchiya, Ryugo Nishii, Susumu Inoue & Toru Inaba

The GDS-70 Series consists of packaged combinations of high-resolution, high-density graphic display units with Mitsubishi MELCOM 70 Series minicomputers. The low-end members of the series are low-cost, space-saving models ideal for improving the efficiency of small design offices. The article introduces the Model DS design system, concentrating on functions and operability in order to increase awareness of this type of equipment and its potential for improving the efficiency of design work.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 7, pp. 52 ~ 56 (1984)

An Induction Motor with a Torque Sensor

by Motohiro Kokubun, Yoshihiko Yanai & Kunio Mori

The increasingly widespread use of inverters is accelerating the replacement of DC motors by AC motors. Despite their comparative freedom from maintenance requirements, AC motors suffer problems with respect to control capability. One such problem that arises when AC motors replace DC motors is the difficulty of monitoring and accurately controlling variations in the torque applied to the motor-driving shaft. The article introduces a machine-tool spindle motor developed by Mitsubishi Electric that incorporates a noncontact sensor that derives an electrical signal from the angle of shaft torsion.

通信技術の課題は常に情報を大量に、遠くへ、正確に伝達することであった。情報の大量伝達は換言すれば情報の高速伝達であり、広帯域かつ多重化の容易な伝送技術を必要とする。情報の遠方への伝達は情報伝送における距離の克服であり、無中継伝送距離が長く、安価な費用で長距離伝送を可能とする伝送技術がかぎ(鍵)となる。更に、情報の正確な伝達には伝送路上での雑音発生が少なく、かつ、雑音が発生してもそれによる誤った情報の伝達を防ぐ誤り訂正機能を内包しうる伝送方式を必要とする。通信技術はこれらの高速、長距離、高品質という3項目の技術課題を軸として発展してきたといえる。

一方、近年のコンピュータ技術とLSI技術の発展によりもたらされた、大量かつ高速の情報処理を可能とする大形コンピュータ及びローコストの分散処理を可能とするマイクロプロセッサが、大量の情報伝達を可能とする通信システムと結合されるとき、高度情報社会のインフラストラクチャとなる情報ネットワークを形成することが可能となる。この情報ネットワークではあらゆる種類の情報を一元的に正確かつ秘匿性を保持しつつ伝送することが要求される。

上記の通信技術の開発課題と、高度情報社会の情報ネットワークに対する要求と、光ファイバ通信技術の広帯域、低損失、無誘導及びデジタル通信との親和性とを比較対照するとき、光ファイバ通信技術が上記の課題解決と情報ネットワーク構築というニーズに対するシズとして、如何に大きな能力を包含しているが明らかとなる。すなわち、光ファイバの広帯域性と細心性は高速変復調、波長分割多重伝送及び多心ケーブル化により、高速大容量伝送を可能とした。光ファイバの低損失性は100 km以上の無中継伝送という従来の銅ケーブルに比べて100倍近い中継距離を実現した。また、光ファイバの無誘導性は、送電線の架空地線内へのファイバの格納や、電力ケーブルと同一管路内の布設を行っても、何ら雑音を生じないことにより実証されており、電力系統保護、鉄鋼プラント制御などへの光ファイバ通信の適用の主要理由の一つもこの無誘導性にある。

ここで、光ファイバ通信システム実用化の跡をたどると、最初に実用化されたシステムは光ファイバでなければ実現できないもので、コストはそのシステムの実現によりカバーされるものであった。具体的には上記の電力、鉄鋼などのシステムがそれである。次いで、公衆通信の中継系における中容量伝送方式、大容量伝送方式がその導入により、従来システムよりコストが低減されるという新しいタイプとして登場し、昭和59年度中には日本列島縦断の400 Mb/s(メガビット/秒)シングルモード伝送網が完成する予定とされている。この中で技術的には0.8 μm 帯一マルチモード光ファイバの第一世代の技術から、1.3 μm シングルモードファイバの第二世代技術を経てきている。

このように、公衆通信と大規模なプラントのFA (Factory Auto-

mation)を中心に拡大してきた光ファイバ通信システムは、近年LANに代表されるOA (Office Automation)などの構内システムへの適用領域拡大が目立っている。今後もこれらの分野は公衆通信では、1.6 Gb/sシステムなどの超大容量システムを含む発展が予想され、構内網もリング形、スター形、バス形の各種のLANがEPBXと互いに補完しあいながら発展して行くものと思われる。

今後新しく発展が期待される分野として、CATVなどの画像伝送システムがあり、加入者系に光ファイバが導入されれば、その発展はより加速されるであろう。

このような光ファイバ通信システムの発展拡大をサポートする技術は、安価にデジタル伝送を可能とする部品、方式技術と、画像情報を中心としてこれからますます増加が予想される情報伝送のニーズに対応可能な、大容量伝送技術である。今後の技術開発は、この二つの方向が互いにかみ合いながら展開されると予想される。安価な伝送を可能とする部品、方式についてはLSI化、光半導体と回路との複合化、光ファイバとの結合部の合理化を図るとともにプラスチックファイバ、多成分系ファイバを使用した低価格の光伝送による利用面の拡大も重要である。

大容量伝送はシングルモードファイバ伝送を経済的に実現するのが第1の目標である。そのためには、変調時もシングルモード動作するレーザダイオード(DSM-LD)、その光ファイバの結合と伝送系を構成するLDモジュール、光コネクタなどの光回路部品、高速変復調を可能とする電子回路、など多くの課題がある。また高速信号の多重化/多重分離方式も重要なテーマである。高速信号を扱うため電子回路は集積化され、発光受光素子との結合を浮遊リアクタンスなく行うため、必然的に光電子集積回路(OEIC: Opto Electronic Integrated Circuit)に向かわざるを得ないと考えられる。

更に、中継距離の拡大を図るための高感度伝送方式、低損失光ファイバの開発も大容量化と並行して行われるべき研究テーマである。ヘテロダイン方式については、方式的には着実な進歩が見られており、今後周波数安定化レーザなどデバイスの進歩と合わせて、広帯域化などの開発が進められよう。長波長超低損失光ファイバについてはファイバ材料はもとより、発光受光素子の材料も含めた総合的な開発を行う必要があり、相当長期的な課題となろう。

石英光ファイバと近赤外発光受光素子を組み合わせた強度変調方式光通信は、経済化の課題は残すものの技術的には一応の完成を見つつあり、その通信システムに与えつつある影響は甚だ大きい。この経済化の達成は、より広範な光通信の普及を促し、光波の持つ広帯域性と光ファイバ伝送の低損失性は、将来の大量情報伝送に対して研究者の夢をかきたてるものである。

レーザダイオードを主体とする半導体光デバイスは、超 LSI とともに今後の高度情報化社会を支えるシステム構築に必ず(須)となるキーデバイスである。超 LSI が情報処理の中核となる論理演算や記憶の機能を果たすのに対し、半導体光デバイスはシステム間の情報伝送、システム端末における情報の入出力処理の役目を担っている。

レーザダイオードの実用化の契機となったのは、1970 年に低損失石英光ファイバの出現と時を同じくして、AlGaAs/GaAs ダブルヘテロ構造により室温 CW 動作が実現されて以来のことである。レーザダイオードは光ファイバと伝送路、APD や pin-PD を光検出器とする光通信用光源として、にわかに大きな注目を浴びるようになった。

レーザダイオードは 1957 年に東北大学の西沢教授によって発明され、1962 年に米国で GaAs pn 接合により実現された。最初の素子は、液体窒素で冷却し、かつパルスでないと動作しないものであった。実用化には室温 CW 動作を達成するための動作電流の低減が不可欠であり、ヘテロ接合レーザの提案が 1963 年になされた。当社では 1963 年に国内に先がけてレーザ発振を確認し、1965 年には室温パルス発振を実現した。更に 1967 年には内外に先がけて GaAs と格子整合する $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ で、 x が 0~0.4 の広い組成範囲で GaAs レーザと同程度の電流密度で発振する素子を実現するとともに、翌年には液体窒素による冷却ではあったが、AlGaAs/GaAs ヘテロ接合によるレーザ発振を確認した。この結果は当時レーザダイオードの開発が大きな壁にぶつかっていたためにわかに注目され、その後のダブルヘテロ構造による室温 CW 動作実現に大きな影響を与えた。

AlGaAs ダブルヘテロ構造レーザダイオードを実用化する上で問題となったのは、極端に短い寿命と発振の不安定性であった。当社はこれらの問題も内外に先がけて解決してきた。すなわち、短寿命の原因は酸素の関連する結晶欠陥であることを突き止め、結晶成長時に酸素混入を極力抑えることにより、結晶欠陥を大幅に低減させて極端に早い劣化を除去できることを示した。また、発振横モード制御に TJS (Transverse Junction Stripe) 構造を用いて基本モードのみで発振する素子を実現できることを示した。この TJS 構造がきっかけとなって、内外で各種の横モード制御素子構造が開発されるようになった。実用上でまず問題となったこれらの壁が取り除かれ、高性能化と高信頼度化に向けて本格的な改良が行えるようになったといえよう。

AlGaAs 系 (0.75~0.9 μm) に続いて、InGaAsP 系 (1.2~1.6 μm) のダブルヘテロ構造のレーザダイオードが、1976 年に室温で CW 動作できるようになった。InGaAsP レーザの発振波長は石英光ファイバの低損失で広帯域となる波長帯と一致するため、長距離・広帯域の光源として実用化が進められている。InGaAsP 系では AlGaAs 系に比べ、

高温では発振に要する電流密度が大きくなるため、低電流で動作する埋込導波路が用いられる。この埋込導波路には断面が三日月形のものや短形のものがあり、これらを基本構造とする素子が開発されている。前者は当社、後者は(株)日立製作所によって導入されたものである。

光通信用光源では実用化の目安として 50°C、5 mW 動作での平均寿命が 10 万時間以上であることが要求される。これが実現されたのは極く最近になってからのことである。特に AlGaAs 系では InGaAsP 系に比べ共振器端面が劣化し、動作中に一定光出力を得る電流が増加し、ついには共振器端面が破壊してしまう欠点があった。当社は共振器端面付近にレーザ光を吸収しない領域を設けることによってこれを克服し、耐サージ性も InGaAsP 系と同程度まで向上させることに成功した。

以上に述べたように、AlGaAs 系と InGaAsP 系レーザは、光通信用光源としてなんとか使える性能と寿命を持つようになった。今後は更に、波長多重用などの光源として発振波長の高精度制御、発振波長範囲の拡大、高出力化、縦モード制御による低雑音化、低コスト化など多くの課題を解決していく行く必要がある。

現在実用化されているレーザダイオードの結晶成長には、結晶欠陥の少ない液相エピタキシャル成長 (LPE) 法が用いられている。しかし、LPE 法では組成と層厚の制御精度に限界があり、これによる特性のばらつきが大きい。又、大面積化にも限界があり、量産による低コスト化があまり期待できない。現在、量産に適した有機金属気相成長 (MO-CVD) 法、超精密な組成と層厚制御に適した分子線エピタキシャル (MBE) 法の実用化が急ピッチで進められている。これらの新しい結晶成長技術の導入は、イオンビーム技術など各種の超微細加工技術の適用を可能にし、素子特性の均一性向上と低コスト化のみならず、縦単一モードで発振する分布帰環形レーザや温度安定性の向上と、しきい電流の大幅な低減をねらった量子井戸構造レーザの実用化を可能にしていくであろう。更に、レーザダイオードを中心とした光子素子と IC など周辺電気回路素子を同一基板上にモリシックに形成する OE-IC (Opto-Electronic Integrated Circuit) へと発展するであろう。

レーザダイオードは、半導体工学、量子論、電磁波工学、マイクロエレクトロニクスなど総合の産物である。そのため、レーザ発振成功以来 20 年を経過した現在でも、ようやく実用化の緒についたに過ぎない。将来の情報化時代に向けてレーザダイオードを主体とする半導体光デバイス技術は、超 LSI 技術とともに重要な役割をになっており、着実な製作技術の開発と、光通信のみならず各種応用分野への応用を強力に推進していく必要がある。

光応用計測技術の展望

大野 栄一*・布下 正宏**

1. ま え が き

近年、大規模・複雑化しつつある電力系統、交通システム、各種工業プラントの監視制御は、コンピュータ、マイクロプロセッサ、LSIなどのエレクトロニクス技術の飛躍的進歩に支えられて、これまでになく高度なものとなっている。一方電機、機械、自動車などの生産工場では省力化、無人化、自動化のためのFA革命が急速に進んでいる。これらの新しいコンピュータ監視制御システムや、自動化生産工程の計装制御に必要とされる主な基本技術は下記のとおりである。

- (1) 計測技術（センサ技術とデータ処理技術）
- (2) コンピュータネットワーク技術（信号伝送技術）
- (3) マンマシンインタフェース技術（音声画像入出力技術）
- (4) アクチュエータ技術

特にFAにおいては、NC工作機械や産業用ロボット、CAD/CAM、無人搬送システムなどを組み合わせた多品種少量生産向けのFMSが中核となり、加工・組立機械の精密制御、製品の検査、プロセスのモニタなどのために、計測技術の重要性が高まっている。そのためのセンサやマイクロコンピュータ及びその応用アルゴリズムを含む、インテリジェントセンサなどの新しい計測技術の研究開発が盛んに行われている。

一方、1970年に半導体レーザーと光ファイバの開発を契機にしてデータ伝送への光（レーザー）応用が始まり、高度情報通信システム（INS）、光LAN（Local Area Network）などニューメディアの担い手として光技術、光産業の最近の発展は目を見張るものがある。更に通商産業省大型プロジェクト「光応用計測制御システム」や「超高性能レーザー応用複合生産システム」の開発に見られるように、通信分野のみならず各

種工業分野への光技術の拡大が図られている。なかでも光を利用した計測技術は、従来の電気計測では困難な高電圧、強電磁界、引火爆発性環境下でも非接触、高速、高感度、高精度の計測を可能にするため、電力系統、交通システムや鉄鋼、石油化学などの工業プラント、FA生産工程への適用が期待されている。光による計測は古くから測光・測色、分光分析、顕微鏡、望遠鏡、写真などとして使われてきたが、現在ではレーザ、光センサ、イメージセンサ、光ファイバなどのオプトエレクトロニクス技術の進歩によって新たな段階に達した。すなわち単に光を媒体とするだけでなく、光のもつ特質；光の強度、波長（周波数）、位相、直進性、回折、干渉あるいは二次元画像情報などを幅広くかつ有効に応用して諸量の計測がなされるようになった。

この論文では、光応用計測技術の特長と全般的技術動向を紹介し、当社におけるその研究開発、製品化の現状と将来の展望を示す。

2. 光応用計測の概念

光応用計測技術は非常に幅広い横断技術であり、まだその統一概念は明確ではないが、その構成概念図を図1に示す⁽¹⁾。ここでは、

- (1) 計測対象に光源から光ビームを照射し、
- (2) 計測対象によって反射、吸収、回折、散乱など光の強度、位相、波長、偏光、コヒーレンスなどが変調を受け、
- (3) その変化量を各種の光センサで検出し、電気信号に光電変換し、
- (4) その電気信号に含まれる情報をマイクロコンピュータなどによってアナログ的、デジタル的に信号処理し、必要とする値として表示、

表 1. 計測用の主なレーザー⁽²⁾

種 類	He-Ne レーザ	Ar レーザ	CO ₂ レーザ	半導体レーザ	ルビーレーザ	YAG レーザ	He-Cd レーザ	色素レーザ
代表的波長(μm)	0.6328 (赤)	0.4880 (青) 0.5145 (緑)	10.6	0.78 帯～ 1.5 帯	0.6943	1.06	0.4416 0.325	0.32～1.2 (紫外)～(赤外)
特 長	安定した連続出力、 取扱い容易。	安定した連続出力、 出力やや大。	高効率、 大出力、 パルス発振可。	小さい、 安価になる、 高効率、 長寿命。	高出力パルス	連続もパルスも 可。 第2高調波 (0.53 μm) 可	紫外の連続光。	波長選択可、 パルス可。
出 力	0.1～50 mW	5 mW～20 W	1 W～15 kW	～10 mW		～100 W (連続)	10～50 mW	～2 W (連続)
計測などへの応用例	直線・面基準、 干渉測長、 変位測定、 ホログラフィ、 スベックル計測、 ドップラ流速計、 電流・電圧測定、 ディスプレイ。	ホログラフィ、 スベックル計測、 トップラ流速計。 ディスプレイ (製版)	大気汚染測定。 (材料加工)	プリンタ、 ビデオディスク。 (光通信)	測 距、 プラズマ計測、 瞬間写真。	レーザレーダ、 プラズマ計測。	蛍光分析。 (記録)	分 光、 瞬間写真。

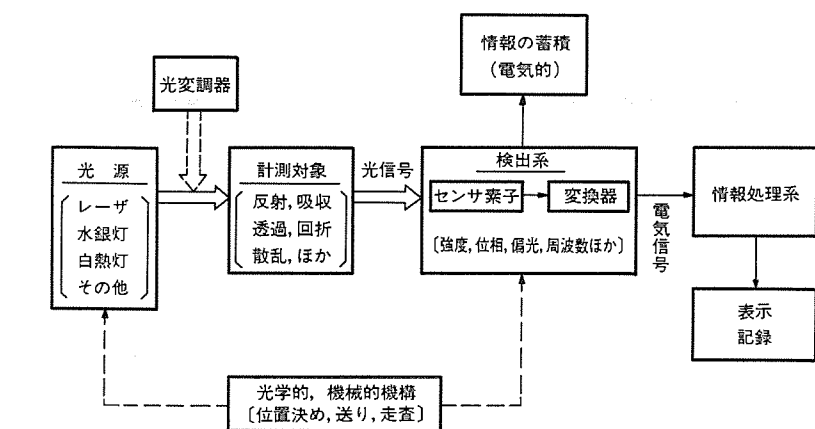


図 1. 光応用計測 システム の構成概念図⁽¹⁾

表 2. 光 センサ の種類 と 特長⁽³⁾

(a) ポイントセンサ

原 理	光 センサ 種 類	特 長
管 球 形	真 空 光 電 管	低感度, 大面積可, 直線性良, 高速応答
	ガ ス 入 光 電 管	低感度, 低速, 出力電流大, UV に対しメモリ
	バイ プ ラ ナ 光 電 管	超高速応答 (≤ 0.1 ns), 印加電圧高 (1 kV)
	光 電 子 増 倍 管	低雑音, 高感度 (10^3 増倍), 高電圧, DC~数 MHz
固 体 形	光 導 電 効 果	CdS(CdSe) セ ル 高圧 (100 V), 低速応答 (10 ms), 極性なし, 安価
	光 起 電 力 効 果	ホ ト ダイ オード 応答速度 2~30 μ s (受光面積に比例), 出力 0.4 V
		PIN ホ ト ダイ オード 高速応答 3 ns, 低雑音, 直線性良, 電圧 50 V
		APD 高電圧 ≤ 180 V, 暗電流小, 低雑音, 高利得, 高速 ≤ 1 ns
		ホ ト ト ラ ン ジ ス タ 位電圧 10 V, 高感度, 応答速度 3 μ s
		位 置 検 出 セ ン サ 位置検出分解能 ≤ 10 μ m, 応答速度 8 μ s
		色 識 別 セ ン サ 2~3 個の PD を縦又は横に集積化 3 mm \square
	焦 電 効 果	赤 外 線 セ ン サ $D^* = 1 \sim 6 \times 10^8$ cm \cdot Hz $^{1/2}$ /W (全赤外域)
	ホ ト カ プ ラ	光 複 合 セ ン サ LED-CdS (~ 20 ms), LED-PTTr (~ 4 μ s)

(b) イメージセンサ

イメージセンサの種類		用 途 ・ 特 長
撮 像 管	ビ ジ コ ン	放送用, 工業用, 赤外線用 TV カメラ, 蓄積形
	シ リ コ ン ビ ジ コ ン	工業用, 高感度 TV カメラ, 蓄積形
	イ メ ー ジ デ ィ セ ク タ	高速現象二次元計測, 非蓄積形, 応答数 ns
	撮 像 蓄 積 管	瞬間像の蓄積と繰返し読出し, 蓄積時間 10 h
	イ メ ー ジ コ ン バ ー タ	暗視用 限界分解能 60 lp/mm
	バ イ リ コ ン	赤外線用サーモビジョン, 限界分解能 6 lp/mm
固 体 イ メ ー ジ セ ン サ	MOS 形イメージセンサ	家庭用カラーカメラ, 視覚センサ, XY アドレス方式, 速応性
	CCD 形イメージセンサ	同 上 自己査走方式
	CPD 形イメージセンサ	同 上 MOS 形と CCD 形と組合せ
	IR-CCD	宇宙, 防衛, 環境計測, 不純物励起形
	IR-CID	同 上 InSb, HgCdTe

記録される。

光源から光ビームを計測対象に有効に照射したり, あるいはその対象からの信号光を光センサまで導くためには, レンズ, ビームスプリッタ, 光ファイバなどの光学系が必要であり, また光源, 光学系, 計測対象, 光センサなどの配置上の高精度な位置決め, 送りには機械的機構が活用される。光源には従来からタングステンランプやハロゲンランプが用いられ, 最近では各種のレーザーが実用されるようになった。計測に用いられるレーザーを表 1. に掲げる⁽²⁾。

光センサは表 2. に示すように, 一点の光情報を時系列の電気信号に変換するポイントセンサと, 空間的に広がりをもつ二次元に分布した光情報を時系列の電気信号に変換するイメージセンサとがある⁽³⁾。これらの光センサは用途によって感度, ダイナミックレンジ, 応答速度, 分解能などの特性を考慮して選択されるが, 最近では管球形より固体形光センサが主流になりつつある。固体形光センサなど光半導体素子の当社開発状況とその展望は本特集の他の論文にゆずる。

光応用計測 システム においても, 通常の計測 システム と同様に, 最終的にはマイクロコンピュータなどを用いて電気信号による デジタルデータ 処理が行われる。画像など二次元光情報の処理には, 光の空間並列性を利用して光学的アナログ処理を行えば高速演算が可能であるが, 現状ではそのハードウェアの不足, 耐雑音性, 扱いやすさなどから電気的な処理を行わざるを得ない。現在多用されている計測の信号処理の基本構成は 図 2. に示すように, 通常センサ部からのアナログ信号を A/D 変換し, 前処理部において真に必要な情報のみを抽出し, 主処理部ではそれらのデータ群から総合的な判断や情報の最終的な集約編集を行う⁽⁴⁾。制御部では自動補正動作やセンサ部位置決めなどを行う。以上のような諸機能によって構成される光応用計測 システム は, 将来 A/D 変換や光情報処理などの信号処理素子及び制御用 アクチュエータの光化が進み, 既に光化されている光センサと光伝送とともにすべて光化されるものと期待される。

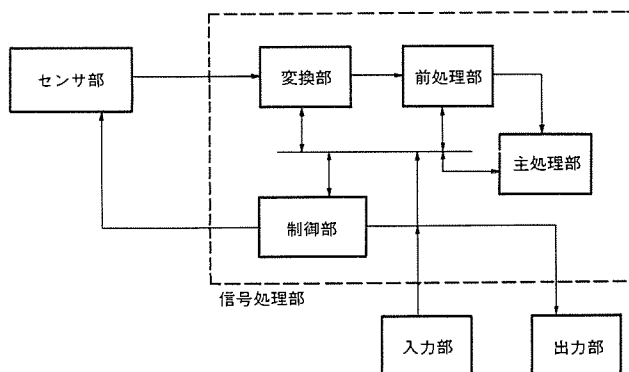


図 2. 光応用計測 システム の信号処理の基本構成⁽⁴⁾

3. 光応用計測の種類と実際⁽⁵⁾

この論文では、光応用計測技術を次のように分類する。

(1) 自然光による光応用計測

(2) レーザ応用計測⁽⁶⁾

(3) 光ファイバを用いる光(レーザ)応用計測⁽⁷⁾

上記の各光応用計測技術の原理、特長と技術動向を簡単に紹介する。

3.1 自然光による光応用計測

これは、計測対象からのふく射、反射、透過、散乱による自然光の強度、波長(色)、直進性、空間的分布(画像、図形)など光の基本的機能を利用した計測である。表2.に掲げた光センサを用いて、点(位置)、一次元(線)、二次元(面、画像)更に三次元(立体)の状態の計測が可能である。

点での計測として、照度計、濁度計、表面粗さ計測、更に分光器と組み合わせた色彩計測、ガス・溶液分光分析、赤外線ふく射温度計、半導体の組成・不純物分析などが実用化されている。また光複合素子(ホトカプラ、ホトインタラプ)による回転体の回転速度計測、製品の個数・移動速度・方向の測定、製品種分け用マーカ検出、板幅、加工品の高さ、間げきなどの制限測定などの広範囲の工業計測に使用されている。一次元の計測では一次元 CCD のようなリニアセンサが採用され、早くから生産工程において製品の個数、位置、幅、径、変位、振動、表面欠陥、光切断法による断面形状などの計測が行われてきた。

最近では高性能 ITV 用ビジコン管カメラや CCD 形、MOS 形固体撮像素子などのイメージセンサの実用化が進み、極めて多量の情報をもつ二次元光情報すなわち画像計測の重要性が高まっている。無人化プラントの保全・点検・監視、自動化生産工場での品質検査・選別、産業用ロボットの対象物の二次元、三次元の位置決め、形状認識などのために、人間の目の代替のビジョン(視覚)センサ、あるいは人間の目では感知し得ない高速現象や不可視画像の情報を得るためのイメージセンサ、及びマイクロコンピュータ応用デジタル画像処理・認識技術の進歩は著しい。

このような画像計測技術の進歩に伴って、二次元画像あるいは三次元位置・物体形状認識などの高度の計測が数秒～数十秒の実時間で可能になった。その結果、生産工程での製品・部品の移動位置、形状、寸法、角度、面積、平坦度、傷欠陥、粒子の個数、炉内溶融状況の実時間モニタのみならず、産業用ロボットの視覚センサ、ICパターン認識・自動ボンディング、農水産物の品種品質検査・選別、表面傷・欠陥検査、鋼板クロップ形状認識、織物模様・印刷物・図面の検査、更に X 線 CT、顕微鏡によるミクロ構造(細胞、血液、合金組成)観察、気象解析、航空写真分析など、広い分野で欠くことのできない計測技術として今後更にその進展が期待される。

3.2 レーザ応用計測

レーザや光センサの性能向上に伴ってレーザ応用計測の実用が進んでいる。レーザは通常の熱光源からの自然光と異なり全く人工的な光源であり、表3.に示す特長を備えた光を発する。計測用レーザの種類は表1.に掲げたが、この中では He-Ne レーザが最も長寿命で安定した信頼性の高い光源として多用されている。近い将来には半導体レーザの性能向上とその実用化によってレーザ応用計測は一層有効になるだろう。

レーザ応用計測は表3.に示すような光の波動的特性を巧みに利用するものである。計測対象にレーザ光を照射し、その作用の結果生

表 3. レーザ光の特長と計測への応用

特 長	利用する性質	応 用 の 例
高 い 時間的コヒーレンス	単 色 性	長の基準、分光分析
	可 干 渉 性	干渉計測、スペックル応用計測 ホログラフィ応用計測、ドップラ計測 測距、測長、重力加速度計測
	回 折 性	線径測定、すきま測定、表面検査 フーリエ変換(情報処理)応用計測
高 い 空間的コヒーレンス	指 向 性	レーザトランシット、直線・面基準、光切断法 レーザセオドライト、表面検査、外径測定
	集 光 性	光触針、マーカ(位置検出)、粒径計測
高エネルギー密度	光パルス性	測距、瞬間写真、ピコ秒パルス物性計測
	光スポット性	発光分析、物質評価、プラズマ計測

じる反射エコー、回折、干渉、スペックル模様、ドップラ・シフトなどの現象を光センサで検出し、その情報を処理することによって高感度、高精度の諸計測が実現できる。

レーザ光ビームの指向性、直進性を利用した計測法は、レーザ光ビームの広がり角を 1 m rad 程度にできるために、レーザセオドライトと称する測量機、レーザレベル計、測距儀、ビーム走査による光切法断面計測装置、鋼管外径計測装置などとして実用化されている。

干渉効果を利用した計測は最もレーザ光らしいコヒーレントな波動性を用いるもので、光波干渉計測、スペックル干渉計測、ホログラフィ干渉計測、リング干渉計測、ドップラ効果計測などによって速度、変位、ひずみ、変形、振動、回転角速度などの高精度の計測ができる。

回折効果を利用した計測例としては、フ라운ホッフ回折による細線外径、スリット幅、変位の精密計測装置や IC メモリパターン欠陥、圧延鋼板や金属棒の表面傷検査装置などがある。

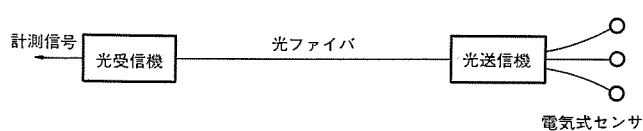
超短光パルスの反射エコーを利用したレーザ・レーダが、人工衛星や月などまでの測距用や排煙監視環境計測用など、天文、測地、気象、環境汚染の計測に欠かせないものである。

3.3 光ファイバ利用光(レーザ)計測

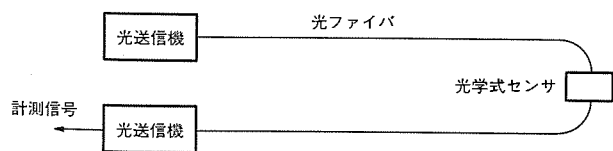
光ファイバの高絶縁性、無誘導性、低損失広帯域性、安全防爆性、細径可とう性など優れた性質に注目して、電力系統や鉄鋼・石油化学プラント内の光応用計測システムの研究開発と実用化が活発に進められている。特に動作状態の電力機器内や引火爆発性の悪環境下の生産プロセスにおける温度、圧力、電圧、電流、振動などの計測、モニタには各種光ファイバ利用センサが有効である。

光通信用に開発された光ファイバは、高純度溶融シリカ製の単一モード形、多モード・グレイデッドインデックス(GI)形、多モード・ステップインデックス(SI)形である。特殊用途として偏波面保存単一モード光ファイバ、赤外線用光ファイバ、樹脂系多モード光ファイバ、バンドル形又はマルチコア形光ファイバなどが開発されており、光応用計測にも目的に応じて種々使われている。光ファイバ利用計測技術の基本構成はおおむね図3.に示す四つのカテゴリに分類される。

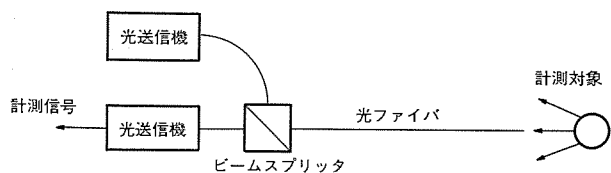
図3.(a)は熱電対やひずみゲージなどの電気式センサを用いる光・電気ハイブリッド方式で、光学系は発光ダイオード(LED)と多モード光ファイバからなるアナログデータリンクである。ITV システムや雷波形測定装置などがこのカテゴリに入り、光ファイバは単なる光信号の伝送路として用いられる。



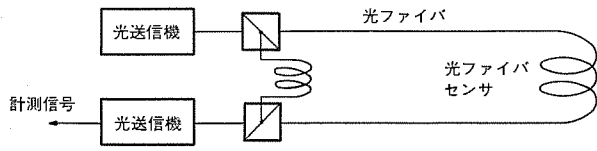
(a) 光/電気ハイブリッド方式



(b) 光学式センサ方式



(c) ピックアッププローブ形センサ方式



(d) 光ファイバ機能形センサ方式

図 3. 光ファイバ応用計測の基本構成⁽⁷⁾

表 4. 光ファイバ応用計測の原理⁽⁷⁾

計測物理量	光の変調	光学現象	分類
電流・磁界	偏位	ファラデー効果	b, d
	光相	干渉現象(磁気ひずみ)	d
電圧・電界	偏	ポッケルス効果	b
	位相	干渉現象(電位)	d
温度	光強度	遮へい板による光路遮断 半導体の透過率変化 蛍光放射	b b c
	光強度・スペクトル	発熱体の放射	c
	偏	複屈折変化	b
	光相	サグナック効果	d
角速度	位相	サグナック効果	d
速度・流速	周波数	ドップラー効果	c
振動 加速度 圧力	光強度	マイクロバンド損失 遮へい板による光路遮断 ダイアフラムによる反射強度変化	d b b
	偏	光弾性効果	b
	位相	干渉現象(光弾性効果)	d
	周波数	ドップラー効果	c
	光強度分布	画素信号の伝送	c

注 a～d: 図 3. の(a)～(d)の各方式

図 3. (b)は光学式センサ方式で、主に LED と多モード光ファイバが用いられる。送受光用光ファイバ間に挿入されたセンサ部において表 4. に示すような光学現象に基づき計測量による光強度変調を受ける。電圧、電流、温度、圧力などの計測装置が開発され実用化も近い。

図 3. (c)のピックアッププローブ形センサ方式では、計測対象から放射される光情報又は計測装置側から光学系を介して計測対象に照射し反射・散乱された光情報を、直接に光ファイバプローブで受光して光受信機及び信号処理部へ導く。前者の例は光ファイバふく射温度計、光ファイバスコプ、後者の例では光源としてレーザーが主に用いられ、光ファイバレーザードップラ速度計、光ファイバスペックル計、レーザー方式表面傷検査装置などが開発されている。いずれも多モード GI 形、バンドル形又はマルチコア形光ファイバが用いられている。

図 3. (d)の光ファイバ機能形センサ方式では、光源としてレーザー、光ファイバとして主に単一モード又は偏波面保存光ファイバが用いられる。これは光ファイバ自身が計測対象から外力を受けてその長さ、屈折率、コア径を変化させ、その結果光ファイバ内の導波光の位相や偏波面が変化することを利用するものである。特にこの位相変化の検出は、マイケルソン干渉計、マッハツェンダ干渉計、リング干渉計、ファブリペロー干渉計などを光ファイバで構成して二分した光波を干渉させ、APD などの受光素子を用いて光ホモダイン法又は光ヘテロダイン法によって行われる。この方式の計測例として光ファイバハイドロフォン、光ファイバ変流器、光ファイバレーザージャイロスコプなどが研究開発されている。

また非干渉計による例として、偏波面回転による光ファイバ変流器、マイクロバンド損失による光ファイバ圧力計などの開発が報告されている。これらの図 3. (d)のカテゴリ計測技術は、まだ研究開発段階にあり、今後の研究の進捗が期待される。

4. 光応用計測技術の当社製品への応用

当社における光応用計測技術関連の代表的製品及びその開発中の例を表 5. に掲げる。これらの詳細な説明は省略するが、表から見られるように光応用計測技術適用製品は多種多様であり、各種プラント内の工業計測のみならず、産業ロボット、医療、宇宙、防衛、環境用計測あるいは民生機器、ビデオディスクなどの電子商品といずれも当社の基幹製品に直結していることが展望される。すなわち、これらの技術は当社の幅広い基幹製品の付加価値を高める横断基盤技術であり、現在、従来からの事業分野に加えて FA、OA、HA などの新事業展開のキーテクノロジーとして INS、光 LAN などの光通信技術や光半導体素子の研究開発と歩調を合せて一層の技術開発が進められている。

5. むすび

光応用計測技術に関してその原理、特長及び技術動向を紹介し、当社におけるその代表的製品と研究開発品について展望を行った。光関連技術は、エレクトロニクス、メカニクスと結合してオプトエレクトロニクス、オプトメカトロニクスとしてますます重要度を高めつつあり、計測・制御分野への応用もここに紹介したものに加えて更に今後急速に広範囲に展開するものと期待される。そのために光応用計測として今後進められるべき技術開発課題を展望すると、

(1) マイクロコンピュータやマイクロプロセッサなどの情報処理技術と有機的に結合するアルゴリズムの開発と、インテリジェントセンサ化

表 5. 光応用計測技術関連の当社製品と開発品の例

技 術 分 類	装 置 名	計 測 量	原 理 ・ 特 長
光 応 用 計 測	光ボンピング磁探装置	磁 界	He ランプ, He ガスの磁気共鳴
	光電式クランク角センサ内蔵配電器	回 転 数	エンジン回転数, ピストン位置検出センサ
	磁気浮上式鉄道用高さ検出光センサ	距 離	LED の反射光の変調位相差法
画 像 計 測	溶接ロボット用視覚センサ*	位 置	LED 光ビーム走査による光切断法
	三次元物体・位置認識装置	形 状	2 台の TV カメラ使用, ハイライトパターン
	汎用, 簡易ビジョンセンサ フレキシブル部品供給システム (FPFS) TR, IC, HIC 全自動ボンディングシステム プリント基板パターン検査装置*	文 字 図 形 画 像 形 状	ビジョンカメラ, 8 ビットマイクロプロセッサ, 輪郭追尾法 汎用ビジョンセンサ使用, 部品選別組立て TV カメラ, ミニコンによる 2 値化画像法 TV カメラ, ミニコン 2 値化図形法
	産業ロボット用視覚センサ (MELFA) 農水産物自動選別装置 (MELSORT) 赤外線板クロップ形状認識装置		固体カメラ, 16 ビットマイクロプロセッサ, スタンフォード・アルゴリズム 一次元又は二次元イメージセンサ, 2 値化画像法
	赤外線追尾装置 光学文字読取り装置*		Si-PD アレイ, 温度分布画像メモリ, 画像 2 値化 IRCCD 又は FRIR, ミラー走査
	印鑑照合システム*		CCD リニアイメージセンサ採用 フライングスポットスキャナ採用
	手書き図面自動読取り装置*		ファクシミリで読取り, ミニコンで点列データ処理
	近赤外撮像システム		近赤外用 MOS 形イメージセンサ, 常温動作
	空瓶検査装置*	傷	ハログランプ照明, 一次元イメージセンサ 2 個
	変圧器油もれ検知装置*	油 も れ	アントラセンの蛍光検知
レ ー ザ 応 用 計 測	レーザスペックル速度計	速 度	He-Ne レーザのスペックル模様
	レーザ測距装置 レーザメス用誤照射防止装置*	距 離	Q-スイッチ YAG レーザ, パルスエコー法 He-Ne レーザの反射光量の検出
	CD 用光ビックアップ 追記形光ディスクメモリ装置用光ビックアップ*	位 置	LD, オートフォーカシング, オートトラッキング 高出力 LD, オートフォーカシング, オートトラッキング
	POS バーコード読取り装置	パ タ ー ン	He-Ne レーザ, ホログラムスキャナ
	細線表面検査装置 レーザ式パイプ表面傷検査装置	傷	He-Ne レーザ光走査, 回折像直接受光法 He-Ne レーザ光走査, 回折像直接受光法
	排煙監視用レーザレダ	大 気 汚 染	Q-スイッチ YAG レーザ, ミイ散乱とラマン散乱
光ファイバ応用光計測	雷・サージ波形計測装置 光ファイバ応用電圧・電界センサ	電 圧 電 界	容量分圧, LED と光ファイバ採用 ボックルス効果 (BGO 結晶), LED
	光ファイバ応用電流・磁界センサ	電 流・磁 界	ファラデー効果 (鉛ガラス), LED
	光ファイバ応用温度計*	温 度	GaAs 光学吸収端, LED-2 波長方式
	光ファイバ方式エンコーダ*	回 転 数	回転体スリット, LED とプラスチックファイバ
	タービン発電機内振動計測装置 光ファイバ応用振動加速度計* 光ファイバ応用圧力計*	振 動 圧 力	電気式振動センサと光ファイバアナログリンク 光弾性効果又は力学的慣性系遮光, LED 光弾性効果, LED
	駅構内, 道路流監視 ITV システム	画 像	ITV カメラ, 光ファイバアナログリンク
光ファイバ応用レーザ計測	光ファイバレーザドップラ速度計	速 度	ドップラー効果, He-Ne 又は Ar レーザ
	光ファイバレーザジャイロスコープ*	回 転 角 速 度	サグナック効果, 光位相変調法, LD
	金属板表面傷検査装置	傷	He-Ne レーザ光走査, 回折像受光, 光ファイバ集光

注 *印は研究開発中又は製品化中のもの

- (2) 光応用計測用高性能半導体 レーザの開発とその実用化
(3) 光情報処理素子の開発, 例えば光 A/D 変換素子, 光空間並列処理素子, 光論理回路などのオプトエレクトロニック IC の開発
(4) 光ファイバ機能形センサ用特殊光ファイバの開発
(5) 光 LAN や光ファイバ伝送との結合による光応用計測制御システムの構築と光アクチュエータ, 光エネルギー伝送技術の開発などが重要である。

最後にこの論文をまとめるに当たり, 社内各部門の多くの関係者に資料提供など御協力に対し深く感謝する。(昭和 59-4-11 受付)

参 考 文 献

- (1) 吉澤: オートメーション, p. 18 (昭 56-8)
(2) 吉澤: オートメーション, p. 19 (昭 57-9)
(3) 布下ほか: 「センサ応用の現状と将来」日本材料学会講習会テキスト, p. 185 (昭 59-1 大阪)
(4) 稲荷: 自動化技術, p. 45 (昭 57-5)
(5) 精機学会編: 「光技術応用システム」昭晃堂 (昭 58)
オートメーション, p. 17 (昭 56-8), 特集「光センサによる計測の自動化」, ibid, p. 19 (昭 57-9), 特集「実用化進むレーザ応用計測技術」
(6) 田幸: 「レーザ計測」Electro-optics/Laser Intern Japan '83, レーザ学会 Seminar-4 (昭 58-3)
(7) 布下ほか: 昭 57 年 レーザ学会学術講演会第 2 回年次大会, 22p II-1, 布下ほか: レーザ研究, p. 271 (昭 58-4)

1. ま え が き

光ファイバ通信、光ディスク、レーザプリンタなど、レーザダイオードを中心とする半導体光デバイスは今後の高度情報化社会を支えるキーデバイスとしてその実用化が進められている。当社では、これらの応用に適した各種半導体光デバイスの実用化を進めてきた。通信用半導体光デバイスではレーザダイオードの特性の安定化と長寿命化が実用化のための大きな壁であったが、横モード制御素子構造の開発、劣化要因究明とその除去技術の開発によりこれらの問題を解決してきた。0.8～0.9 μm で発振する AlGaAs レーザではクラック形 TJS (Transverse Junction Stripe) 構造を、1.3 μm 帯で発振する InGaAsP レーザでは BC (Buried Crescent) 構造を採用することにより、発振特性の優れた低しきい値・長寿命素子を実現した。

ここではレーザダイオードを中心に、当社が開発・製品化している通信用光デバイスの概要を述べる。

2. 発 光 素 子

2.1 短波長発光素子

通信用発光素子には大別して 0.8 μm 帯の短波長発光素子と、1.2～1.6 μm 帯の長波長発光素子がある。AlGaAs を材料とする短波長レーザは技術の進展度や価格において長波長に優っているが、材料自体の性質によって耐サージ性が低く、また長時間の通電で結晶端面が酸化するなどの問題があった。図 1 はクラック形 TJS レーザの構造を示す。端面のレーザ光出射部を吸収の少ない n 形領域とすることにより、これらの問題を解決した信頼性の高い短波長レーザである⁽¹⁾⁽²⁾。

液相エピタキシャル法によって半絶縁性 GaAs 基板上に n 形の AlGaAs、GaAs の多層結晶を成長させたウェーハに境界がクラック形となるよう不純物の Zn を選択的に拡散した構造となっている。発振波長は活性層の Al 濃度によるが、高密度に添加された Zn のために GaAs の禁制帯幅に相当する波長よりも長い 0.87～0.90 μm の波長

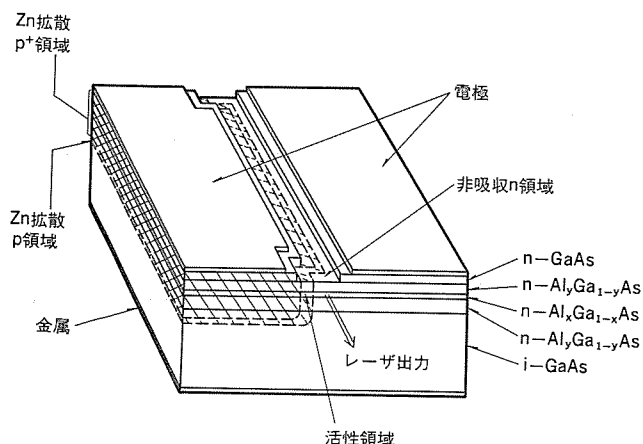


図 1. クラック TJS レーザの構造

をも実現でき、0.8 μm 帯の全域をカバーする。典型的な出力-電流特性を図 2 に示す。室温でのしきい値電流はおよそ 30 mA、電流密度にして約 80 kA/cm² である。横方向発振モードは単一基本モード、出射ビームの半値全幅は成長層に水平、垂直方向にそれぞれ 11°, 35° 程度である。屈折率による光ガイド機構のなくなるクラック腕部の長さ 15 μm に対応した約 5 μm の非点収差が存在する。直流動作時における縦モードは単一モードとなる。

このようないわゆる屈折率ガイド形の単一モードレーザでは温度や電流の変化に伴って縦モードは飛び飛びに変化し、モードの飛びや、二つのモードの競合によって、大きな雑音が発生することが知られている。バイアス電流とともに数百 MHz 以上の高周波電流を印加する高周波重畳法はこの雑音を低減する有力な手段である。高周波重畳

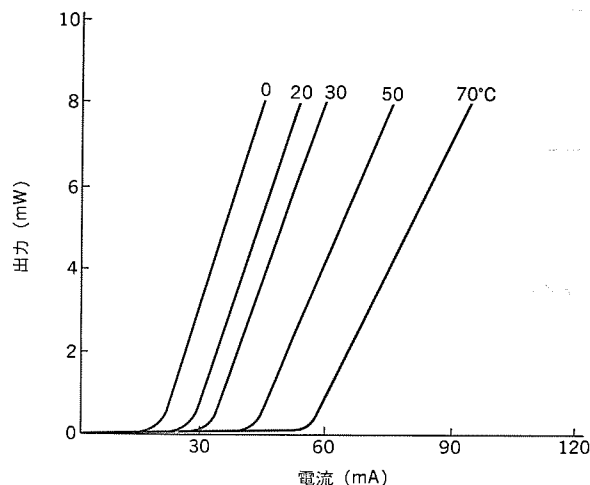


図 2. 出力-電流特性

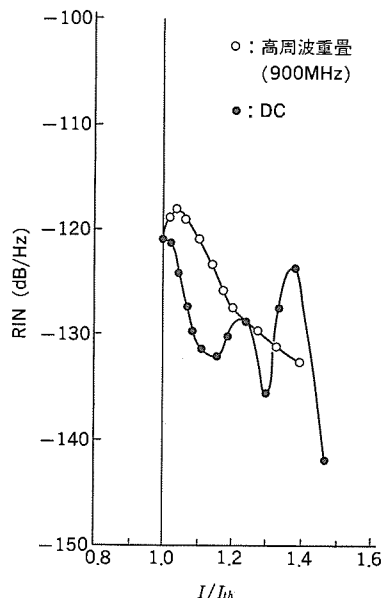


図 3. 高周波重畳をしたときと、しないときの RIN の電流依存性

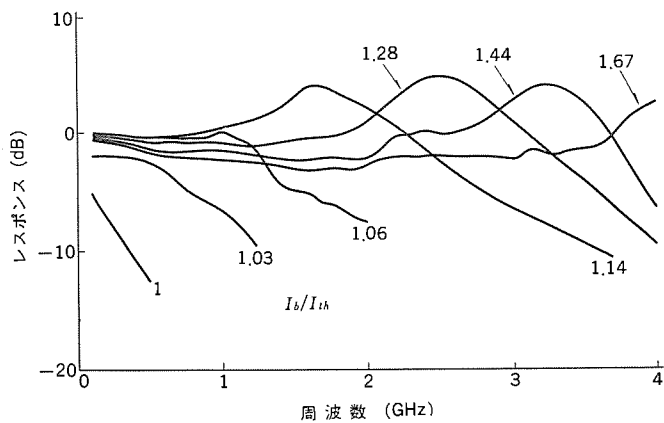


図 4. 周波数応答特性

表 1. 短波長レーザの電気的・光学的特性

記号	項 目	測 定 条 件	特 性 値			単位
			最小	標準	最大	
I_{th}	しきい値電流	CW,		30	50	mA
I_{OP}	動作電流	CW, $P_L=8\text{ mW}$		55	90	mA
V_{OP}	動作電圧	CW, $P_L=8\text{ mW}$		1.8	2.5	V
P_L	光出力	CW, $I_F=I_{th}+25\text{ mA}$		8		mW
λ_L	発振波長	CW, $P_L=8\text{ mW}$	795	850	905	nm
θ_{\parallel}	水平ビーム半値全角	CW, $P_L=8\text{ mW}$	8	12	18	deg
θ_{\perp}	垂直ビーム半値全角	CW, $P_L=8\text{ mW}$	20	35	50	deg
I_m	モニタ出力電流	CW, $P_L=8\text{ mW}$, $V_{OPD}=1\text{ V}$, $R_L=10\Omega$	0.3			mA
I_R	ホトダイオード暗電流	$V_R=10\text{ V}$			0.5	μA
C_t	ホトダイオード端子間容量	$V_R=0\text{ V}$, $f=1\text{ MHz}$		7		pF

をした場合としない場合の RIN (Relative Intensity Noise) の電流依存性を図 3. に示す。ピーク出力 3 mW 以上で $\text{RIN} \leq 130\text{ dB/Hz}$ が得られ、良好なリニアリティとともにこのレーザがアナログ伝送にも適していることを示している。図 4. に一例を示すように、基板に半絶縁性 GaAs を用いているため寄生容量の少ないこのレーザは高速変調性に特に優れている。表 1. に特性を一覧表として示す。

クランク形 TJS レーザは活性領域が端面に露出した従来形レーザに比べて端面が安定なため、通電による特性変化が極めて少ない。一例として 50°C , 5 mW, 10 素子の通電経過を図 5. に示す。APC (Automatic Power Control) 回路で出力を一定に保っているので劣化は動作電流の上昇となって表れるが、約 1 万時間の動作でほとんど変化がみられない。変化率を従来形と比較すると図 6. のようになり、従来形では端面の酸化により数%/kh の漸増傾向がみられるのに対し、クランク形ではほぼ一定となる。50 素子の通電試験によって、これまでに 50°C での MTTF 10^5 時間以上の値が得られている。図 7. はサージ耐量を調べたもので、従来形に比べクランク形は 10 倍近い耐量を持っていること

がわかる。これは、端面近傍に大きな吸収を有する従来形に対し、クランク形ではほとんど吸収がなく、高密度の光パワーにも結晶が溶融破壊することがないためである。

短距離の通信で、それほど高速伝送を必要としない場合には、取扱の容易さや信頼性の点で LED が優れている。図 8. に GaAlAs LED の構造を示す⁽³⁾。ダブルヘテロ接合を用い、それに垂直な方向に出力光を取り出す、いわゆる面発光形の LED である。出力を集束し、ファイバへの結合を容易にする球レンズが発光部に自動的に位置合わせされる構造となっている。発光部の直径は $35\text{ }\mu\text{m}$ 、球レンズは直径約 $100\text{ }\mu\text{m}$ で屈折率は 1.9 である。出力-電流特性を図 9. に、放射パターンを図 10. に示す。代表的な周波数応答特性は図 11. のようになり、交流光出力が -3 dB となる遮断周波数はおよそ 50 MHz である。コア $50\text{ }\mu\text{m}\phi$, $NA=0.2$ の GI ファイバへは -15 dBm 以

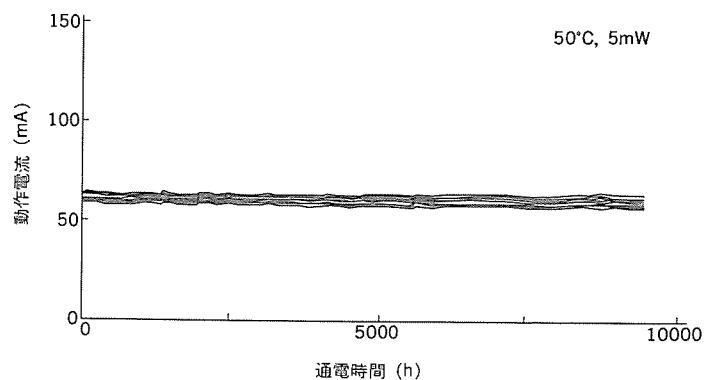


図 5. 通電による動作電流変化の一例

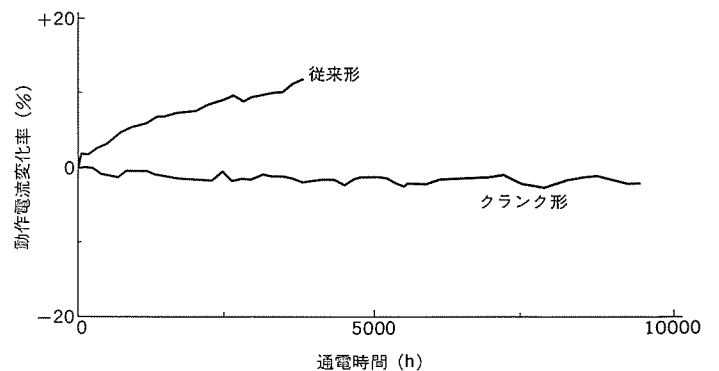


図 6. クランク形と従来形の動作電流変化率の比較

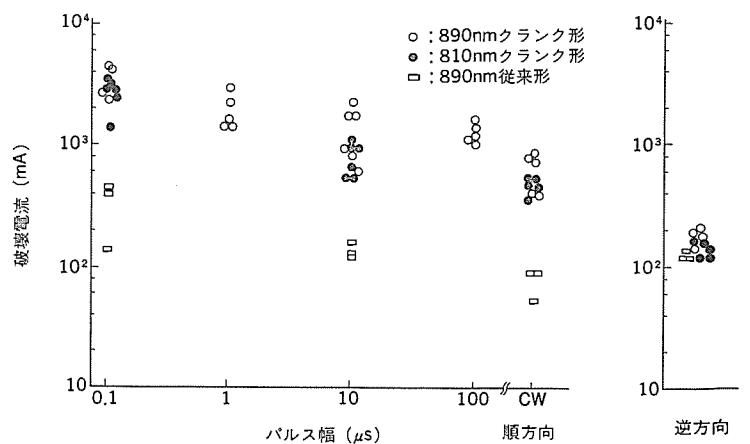


図 7. サージ耐量

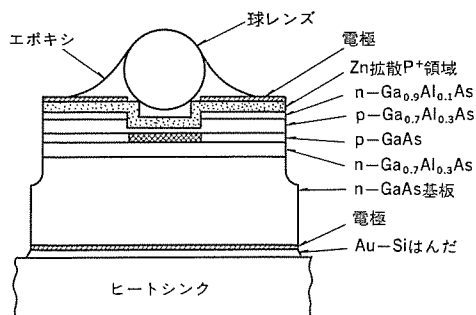


図 8. AlGaAs LED の構造

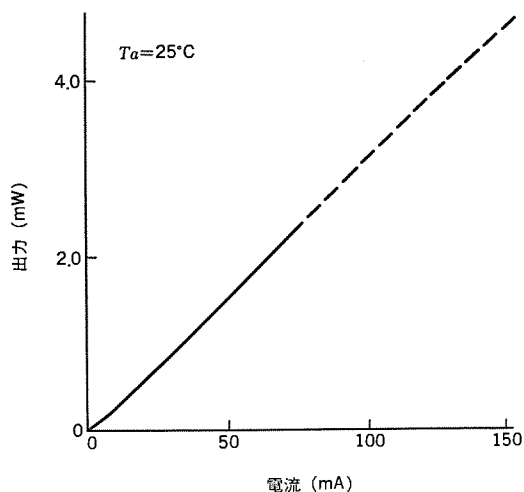


図 9. LED の出力-電流特性

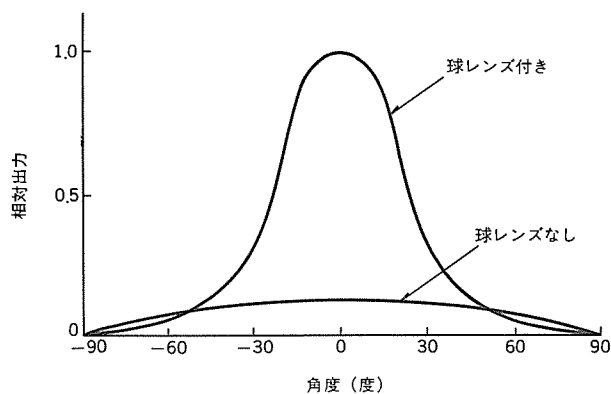


図 10. LED の放射パターン

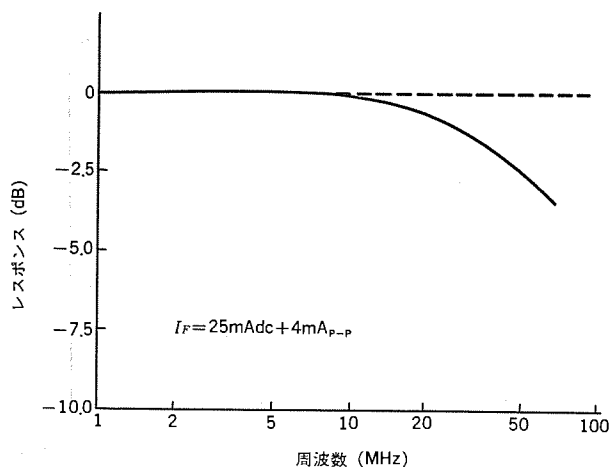


図 11. LED の周波数応答特性

表 2. LED の電氣的・光学的特性

記号	項目	測定条件	特性値			単位
			最小	標準	最大	
λ_P	ピーク波長	$I_F=50\text{ mA}$	780		875	nm
$\Delta\lambda$	スペクトル半値幅	$I_F=50\text{ mA}$		45		nm
P_L	光出力	直 流 $I_F=50\text{ mA}$	1.0	1.5		mW
		パルス* $I_F=100\text{ mA}$	2.0	3.0		
L_E	放射輝度	$I_F=50\text{ mA}$	15	22		W/Sr/cm ²
$\Delta\theta$	ビーム広がり角 (半値全角)	$I_F=50\text{ mA}$		40		deg
f_c	遮断周波数	$I_F=25\text{ mA}, I_{RF}=4\text{ mA}_{p-p}$ (-1.5 dB)	(-3 dB) 25	50		MHz
			(-1.5 dB) 15	30		
V_F	順電圧	$I_F=50\text{ mA}$		1.6		V
I_R	逆電流	$V_R=3\text{ V}$			10	μA
R_{th}	熱抵抗	接合-ケース間		150		$^{\circ}\text{C/W}$
		接合-周囲雰囲気間		250		

* デューティ=50%, 繰り返し周波数=100 kHz

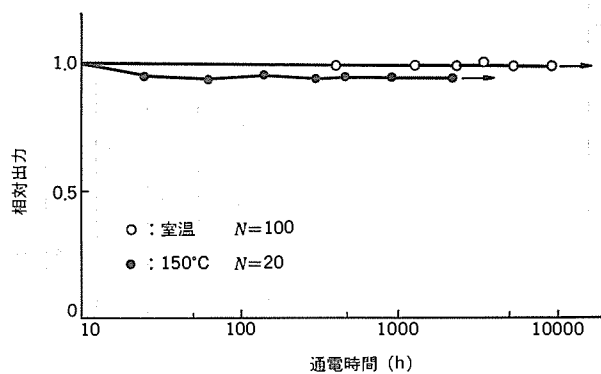


図 12. LED の通電による出力変化

上の出力を結合することができる。表 2. に特性を示す LED の出力は長時間の通電にも極めて安定である。図 12. に示すように 150 °C においても安定に動作し、室温での寿命は 10⁶ 時間以上と推定されている。

2. 2 長波長発光素子

石英光ファイバの損失が小さい長波長帯は光通信に最適な波長である。なかでもファイバの分散が零となる 1.3 μm はスペクトル幅の比較的広い現在の光源では最も高速・長距離伝送のできる波長となる。図 13. は波長 1.3 μm の BC (Buried Crescent) レーザの断面構造を示したものである⁽⁴⁾。三日月形をした InGaAsP よりなる活性領域が InP 中に埋め込まれているためこの名がある。この構造は 2 回の液相エピタキシャル成長によって作られる。まず電流ブロック層となる n-p-n の InP 層を成長した後、幅約 2 μm の溝をエッチングにより形成する。次に活性領域他の各層を 2 回目の結晶成長によって形成する。活性領域の厚さ分布は液相成長の性質によっておおむね二次曲線となり、幅と最大厚さを高次モードが遮断されるように選ぶことができる。この条件下では発振モードは広い温度範囲にわたって安定で、

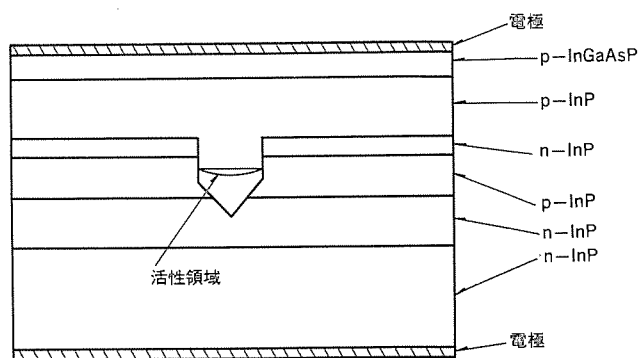


図 13. BCレーザの構造

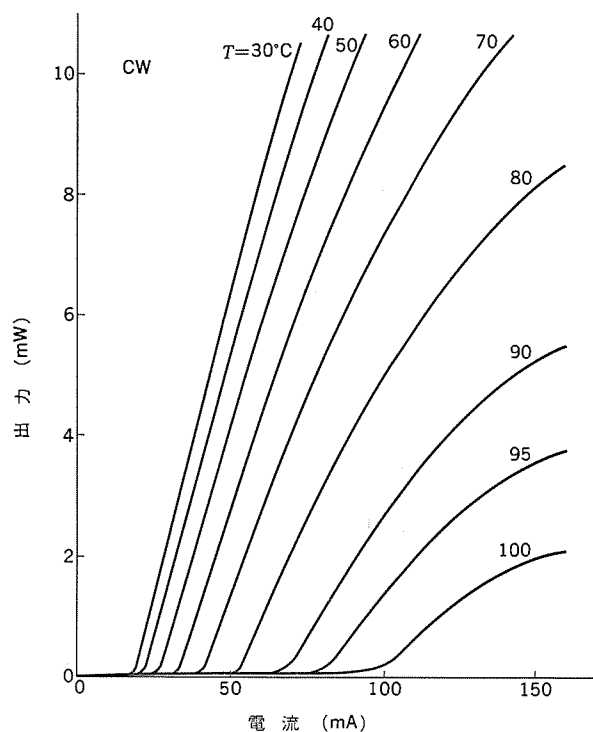


図 14. 出力-電流特性

低しきい値電流、リニアリティのよい出力-電流特性が得られる。出力-電流特性の一例を図 14. に示す。

InGaAsP 系のレーザは一般に短波長レーザに比べて特性の温度変化が大きく、高温での動作に不利であるが、電流ブロック層など各層のキャリア密度の最適化によって 100°C 以上までの発振も可能となった。室温での平均しきい値電流は 15~20 mA、しきい値電流密度はおよそ 3 kA/cm² となる。横モードは単一基本モードであり、出射ビームは図 15. に示すように水平方向半値幅約 25°、垂直方向約 30° と比較的円形に近い。縦モードの数は出力に依存するが、5 mW 出力時には 3~5 本のモードで発振することが多い。雑音低減のための高周波重畳はの場合にも有効で、短波長レーザと同様良好なアナログ伝送特性が得られている。図 16. は周波数特性の一例で、電流ブロック層の寄生容量のため短波長レーザほどの高速応答性はないが、それでも 2 GHz 近くまでの実用上十分な応答性をもっている。表 3. に特性を示す。

長波長レーザの劣化機構は短波長とはかなり異っており、端面劣化や結晶欠陥に基づく DLD (Dark Line Defect) の生成は通常の動作条件ではほとんどみられない。しかし高温、特に 70°C 以上において活性領域外を流れる無効電流の増加がしばしば観測される。

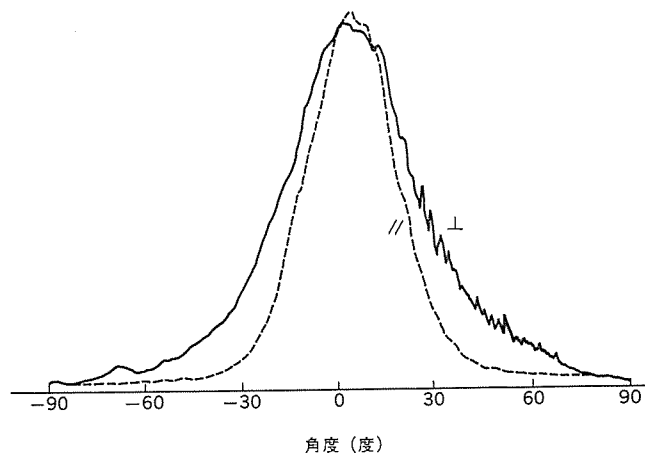


図 15. 放射パターン

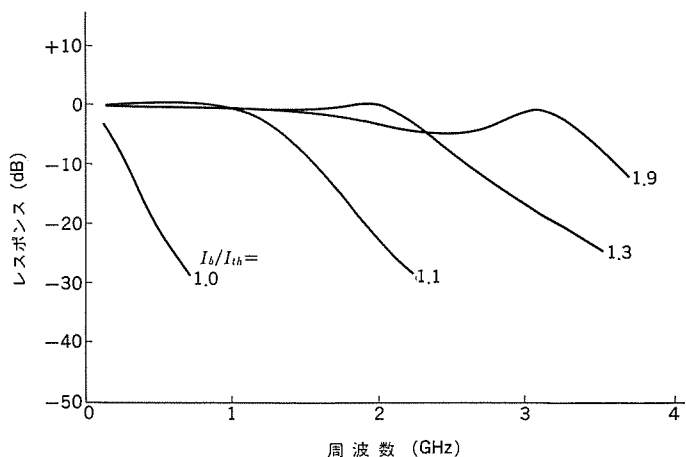


図 16. 周波数特性

表 3. 長波長レーザの電気的・光学的特性

記号	項目	測定条件	特性値			単位
			最小	標準	最大	
I_{th}	しきい値電流	CW,		20	40	mA
I_{OP}	動作電流	CW, $P_L=5$ mW		45	75	mA
V_{OP}	動作電圧	CW, $P_L=5$ mW		1.2	1.5	V
P_L	光出力	CW, $I_F=I_{th}+25$ mA		5		mW
λ_L	発振波長	CW, $P_L=5$ mW	1.27	1.30	1.33	μ m
θ_{\parallel}	水平ビーム半値全角	CW, $P_L=5$ mW		25		deg
θ_{\perp}	垂直ビーム半値全角	CW, $P_L=5$ mW		35		deg
I_m	モニタ出力電流	CW, $P_L=5$ mW, $V_{OPD}=1$ V, $R_L=10$ Ω	0.2			mA
I_R	ホットダイオード暗電流	$V_R=10$ V			1	μ A
C_t	ホットダイオード端子間容量	$V_R=10$ V, $f=1$ MHz		20		pF

我々はこれが2回目成長時に高温雰囲気中にさらされた界面に形成された p-n 接合の電位低下によることをつきとめ、p-n 接合をこの界面からわずかに変位させることによって、高温でも安定な動作を可能にした⁽⁵⁾。図 17. はその一例を示すものである。初期に若干の動作電流の増加がみられるが、劣化の割合はほぼ時間の -2/3 の乗に

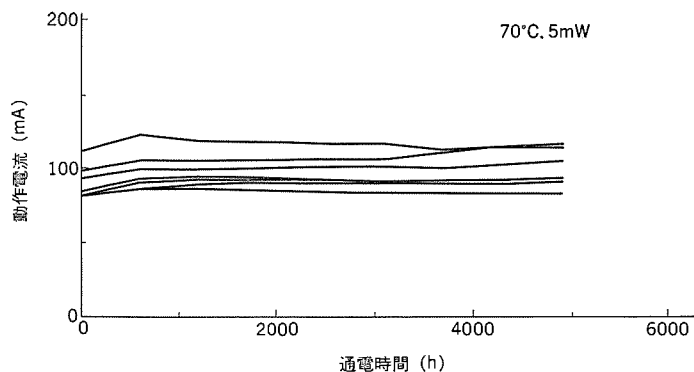


図 17. 通電による動作電流変化の一例

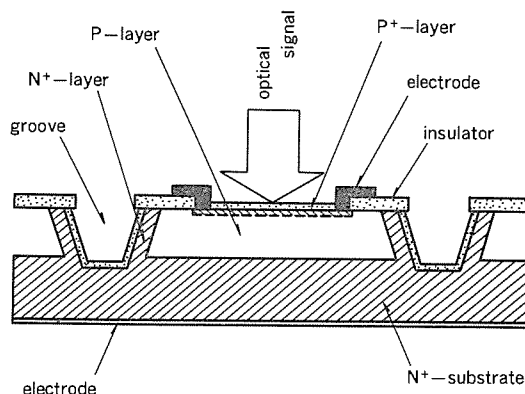


図 18. プレーナ形 Si-APD の断面構造図

従って減少する。この傾向を外挿すると動作電流が初期値の1.5倍に達するまでの時間は13万時間と推定される。長寿命の素子を選別する手法としてEL通電テスト法を開発した。これは100°C、200 mAの条件下でレーザ発振をさせずに通電するもので、数～数十時間の通電で良否を判定できる。またこの通電により、初期の比較的大きな増加分をあらかじめ取り除くことが可能となった。

3. 受光素子

3.1 Si-アバランシホトダイオード (APD)

光通信用受光素子は短波長用と長波長用とに分類される。短波長用受光素子としては古くからSi-APDが研究され、既に開発が完了して広く実用に供されている。図

18.に当社が開発・製品化しているプレーナ形Si-APD (PD 1000シリーズ)の断面構造図を示す。この構造ではAPDの主要な性能として要求される高感度、高速応答、低雑音を実現する最適設計を行っている。

APDは光電変換機能と内部増幅機能とを併せ持った受光素子で内部増幅率分だけ感度は高くなる。高い内部増幅率を得るためには、雪崩降伏がp-n接合面全域で均一に生じる必要があり、これを実現するためにp-n接合の形状をメサ形にしてある。これにより1,000倍以上の内部増幅率を得ている。APDの応答速度を遅くするのは非空乏領域での光の吸収による拡散電流、殊に正孔による拡散電流に大きく起因している。この素子は高速応答を得るため表面非空乏領域を薄くし、かつ拡散電流が電子電流となるようp形層で形成している。APDの雑音には暗電流及び光電流によるショット雑音、負荷抵抗による熱雑音、及び内部増幅過程で新たに加わる過剰増倍雑音がある。過剰増倍雑音の大きさは電子と正孔のイオン化率比により大きく変化する。Si-APDでは電子のイオン化率(α)の方が正孔のイオン化率(β)よりも大きく($\alpha/\beta \sim$

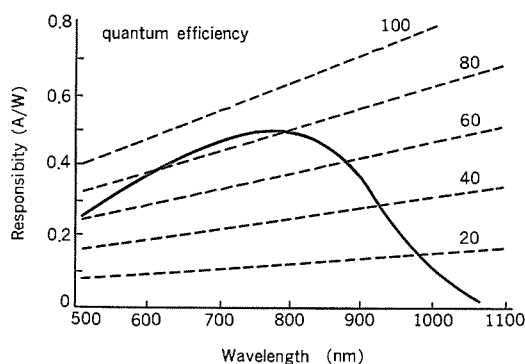


図 19. Si-APD の分光感度特性

表 4. Si-APD の電氣的・光学的特性

記 号	項 目	測 定 条 件	定 格 値						単 位
			PD 1002, PD 1302			PD 1005, PD 1305			
			最 小	標 準	最 大	最 小	標 準	最 大	
A_s	受光部面積			3×10^{-2}			2×10^{-1}		mm ²
$V_{(BR)R}$	降伏電圧	$I_R = 100 \mu A$	100	150	200	100	150	200	V
β	同上温度系数			0.12			0.12		%/°C
C_t	端子間容量	$V_R = 0.9 V_{(BR)R}$		1.5	2		5	7	pF
I_D	暗電流	$V_R = 50 V$		0.3	1		0.3	1	nA
R	感 度	$V_R = 50 V, \lambda = 800 nm$	0.4	0.45		0.4	0.45		A/W
η	量子効率		70	77		70	77		%
M_{max}	最大増倍率	$I_{PO} = 10 nA, R_L = 1 k\Omega$		1,000			1,000		
f_c	応答周波数	$M = 100, R_L = 50 \Omega, -3 dB$		2			0.4		GHz
NEP	雑音等価光電力	$\lambda = 800 nm$		1×10^{-14}			1×10^{-14}		W/ \sqrt{Hz}
NF	増倍雑音指数	$M = 100$		$M^{0.25}$			$M^{0.25}$		

100), この素子のようにp形層側から光が入射する構造とすることが過剰増倍雑音の低減に有利である。この素子ではGB積800 GHz, 過剰増倍雑音指数 $x=0.25$ を実現している。なお高信頼化を図るため、p-n接合周縁部は表面絶縁膜下で終端するようプレーナ化しており、30 Fit (@ 50°C)の信頼度を実現している。図19.に分光感度特性を、表4.に電氣的・光学的特性を示す。

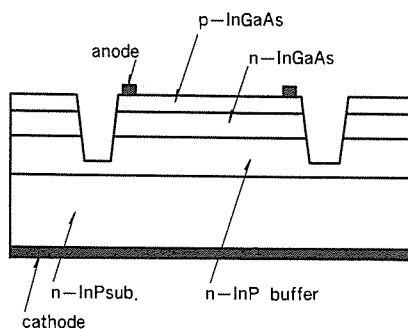


図 20. InGaAs/InP Pin-PD の断面構造図

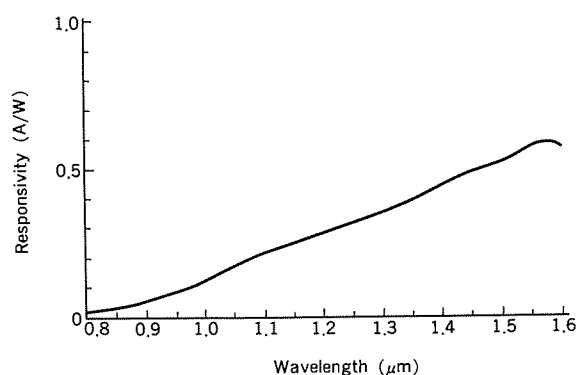


図 21. InGaAs/InP pin-PD の分光感度特性

3. 2 InGaAs/InP pin ホトダイオード (PD)

長波長帯の受光素子としては従来より Ge-APD の開発が進められているが、雑音が大きという難点があり、これに代わるものとして現在 InP を基板とした InGaAs 又は InGaAsP を用いた pin-PD 及び APD の開発が活発に行われており、pin-PD については試験的に使われだしている。図 20. に当社が開発している InGaAs/InP pin-PD (PD-7001) の断面構造を示す。液相エピタキシャル成長法により、n 形 InP 基板上に n-InP バッファ層、i-InGaAs 層及び p-InGaAs 層を形成している。pin 構造であるため内部増幅機能はもっていないが、10 V 前後で動作する。図 21. に分光感度特性を、表 5. に電氣的・光学的特性を示す。InGaAs は Si に比べ吸収係数が大きく ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$)、表面再結合による感度の低下が著しい。これを避けるために、長波長帯の光を吸収しない InP を InGaAs 層の上に形成した窓層付構造の検討がなされている。InGaAs の APD は、トンネル電流が大きい、電子と正孔のイオン化率比が 1 に近いことなどが実現を妨げている。これを避けるために、現在光電変換機能を InGaAs で、内部増幅機能を InP で持たせる構造の検討を行っている。

表 5. InGaAs/InP pin-PD の電氣的・光学的特性

記 号	項 目	測 定 条 件	特 性 値			単 位
			最 小	標 準	最 大	
A_s	受光部面積			8×10^{-3}		mm^2
I_D	暗電流	$V_R = 15 \text{ V}$			5×10^{-8}	A
C_t	端子間容量	$V_R = 15 \text{ V}$			2	pF
f_c	応答周波数	$R_L = 50 \Omega$, $V_R = 15 \text{ V}$, -3 dB	1×10^9			Hz
λ	受光波長領域			1.0~1.6		μm
R	感 度	$\lambda = 1.6 \mu\text{m}$		0.6		A/W

る。

4. む す び

光通信の実用化にはレーザダイオードを中心とする半導体光デバイスの高性能化と高信頼度化が必要である。短波長帯の AlGaAs レーザで問題となっていたサージ耐性が低く、長時間通電での結晶端面での劣化は、クランク形 TJS 構造の採用により改善された。長波長帯の InGaAsP レーザでは BC 構造の採用により、発振特性の安定化とともに低しきい値・長寿命素子が実現された。これらの素子は 50°C 5 mW の使用条件で平均寿命が 10 万時間を越えることが確かめられた。

レーザダイオードの使用上の問題となる雑音は、高周波重畳による多縦モード化により低減でき、これらのレーザダイオードはアナログ変調光源としても有用であることが示された。

半導体光デバイスは長年の研究成果が実り、光通信や DAD で本格的な実用期を迎えている。更に光ディスクメモリやレーザプリンタなど新分野への用途が拡大されつつあり、製造技術の改善、新結晶成長、微細加工技術の導入による性能の改善と量産化が進むに伴い、光通信、民生機器、OA 機器のキーデバイスとして急速に普及していくであろう。

参 考 文 献

- (1) H. Kumabe et al : Japan, J. Appl. phys p. p.347-351 (1982)
- (2) 門田ほか：電子通信学会，光・量子エレクトロニクス研究会資料，OQE 83-86 (1983)
- (3) S. Horiuchi et al : IEEE Trans ED p. p.986-990 (1977)
- (4) E. Oomura et al : IEEE J. Quantum Electron., p. p. 646-650(1981)
- (5) R. Hirano et al : Appl. phys. Lett p. p.187-189 (1983)

1. ま え が き

光ファイバ通信は、高度情報システムの担い手として期待されており、公衆通信の基幹回線での実用が進むと同時に加入者回線への適用が積極的に進んでいる。また、専用通信においても各種の監視・制御用通信回線をはじめ、オフィスオートメーション(OA)やファクトリオートメーション(FA)、CATVなどの伝送手段として幅広く適用され、その地歩を固めようとしている。

これに伴い、光ファイバ通信の形態が、2地点間を結ぶ伝送からリング形ネットワーク、バス形ネットワーク、更に分配形ネットワークなど多様化するとともに、伝送機能が、高速化、異種情報の混在化など高度化している。また、従来の銅線による通信回線と比較して経済性をだすには、光ファイバ通信、なかでも、光部品の低価格化が必要である。我々は、このような光ファイバ通信の多様化、高度化並びに低価格化を実現するための各種の光部品を開発し、製品化している。

2章では、シングルモードファイバ伝送及びシングルモードファイバ伝送用光源として開発したレーザダイオード(LD)モジュール、並びに分配形ネットワーク用光源である多端子LDモジュールについて述べる。3章では、波長多重伝送のキーデバイスである光合分波器について述べる。4章では、バス形ネットワークの一つであるスター状光ファイバ伝送網を構成するために開発したスターカプラについて述べる。

2. レーザダイオード(LD)モジュール

LDモジュールは、電気信号を光ファイバ中を伝搬する光信号に変換する機能を持つ発光モジュールの一つである。レーザダイオードを発光素子に用いているので、光出力が大きく、応答速度が速く、発光スペクトル幅が狭いという特長を持っている。このため、長距離の伝送、100 Mb/s(メガビット/秒)以上の高速伝送、あるいは波長多重伝送の光源として不可欠なデバイスである。

LDモジュールは、出力光ファイバとしてマルチモードファイバを用いるもの(マルチモードファイバ用LDモジュール)とシングルモードファイバを用いるもの(シングルモードファイバ用LDモジュール)とがあり、また、出力光ファイバが単一のものと複数のもの(多端子LDモジュール)とがある。

2.1 マルチモードファイバ用LDモジュール

マルチモードファイバは、公衆通信、ローカルエリアネットワークをはじめとする広い範囲で使用され、現在の光通信の中心的役割を担っている。これら光通信用光源としてのLDはLED(発光ダイオード)に比べ、光出力が大きく、応答速度が速く、発光スペクトル幅が狭いという特長がある。このことから、広帯域伝送や波長多重伝送の需要が増大するに伴い、マルチモードファイバ用LDモジュールの重要性が高まっている。マルチモードファイバ用LDモジュールとして、小形、高性能で、耐環境性に優れたモジュールを開発した。LDモジュールの構成を図1に示す。

LDと光ファイバと、これらを結合する球レンズ、並びにモニタPDで構成される。キャップに装着した球レンズとLDとを軸合せした状態でLDヘッダとキャップとを溶接することにより、ハーメチックシールし

ている。球レンズを装着したLDと光ファイバとは、更に軸合せ溶接により固定している。このように、LDモジュールの結合光学系部分の固定には、従来から用いられている樹脂などによる接着を用いず、溶接、融着などによる固定(メタル固定)を採用している。これにより、温度変化に対し安定で、耐環境性、耐久性に優れたLDモジュールを得ている。モニタPDは、LDヘッダに装着され、LDの後方出射光を直接受光するので、大きなモニタ出力が得られる。

波長0.89 μm 帯のGaAlAs-TJSレーザ、及び波長1.3 μm 帯のInGaAsP-BCレーザを用いたLDモジュールを開発した。LDモジュールの特性を表1に、また、光出力特性の一例を図2に示す。コア径40 μm のGIファイバに対して、結合効率が、短波長LDモジュールの場合に-3.5 dB、長波長LDモジュールの場合に-4.3 dBと高い値を

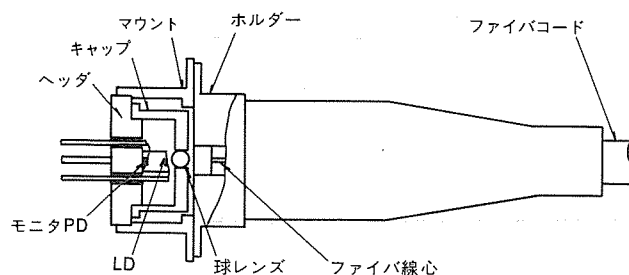


図1. マルチモードファイバ用LDモジュールの構成

表1. マルチモードファイバ用LDモジュールの特性

項 目	短波長LDモジュール	長波長LDモジュール
	平 均 値	平 均 値
LD の 種 類	TJS・LD	BC・LD
ビグティルファイバ	コア径40 μm , クラッド径125 μm GI	
ファイバ内入力 (dBm*)	1.0	2.4
駆 動 電 流 (mA)	46	45
しきい値電流 (mA)	30	20
結 合 効 率 (dB)	-3.5	-4.3
波 長 精 度 (nm)	890 \pm 5	1,300 \pm 10
出力変動(0~50°C dB**)	0.5	0.5
モニタPD出力 (μA)	310	540

* コネクタ接続損(1箇所)含む, ** APC駆動時

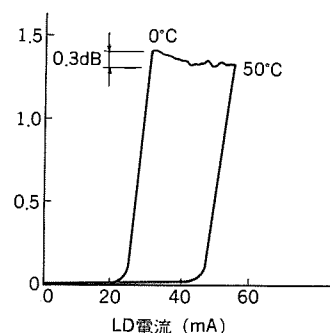


図2. マルチモードファイバ用LDモジュールの光出力特性

表 2. マルチモードファイバ用 LD モジュールの耐環境特性

項 目	条 件	出 力 変 動
振 動 試 験	JIS C 5025 種類 A (10~55 Hz)	0.1 dB 以下
衝 撃 試 験	JIS C 5026 条件 G (50 G)	"
ヒートサイクル	0~50°C, 6h 周期, 100 サイクル	"

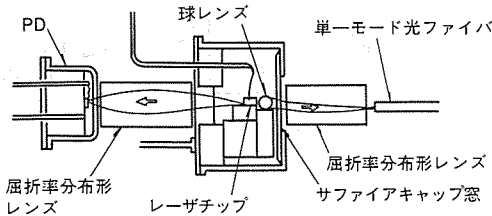


図 3. シングルモードファイバ用 LD モジュールの構成

示している。モニタ PD の出力を規準に自動出力調整するように駆動した状態で温度を 0~50°C と変化させたときの光ファイバ出力の変動は 0.5 dB であり、LD モジュールが安定に動作していることを示している。また、モニタ PD 出力が大きく光電気負帰還をかけて LD の非直線ひずみなどを改善するのに適している。なお、この LD モジュールに対して行った耐環境試験とその結果は表 2. に示すとおりである。

この LD モジュールの特長をまとめると次のようになる。

- (1) 結合効率が高く、光ファイバ出力が大きい。
- (2) LD への戻り光が少なく、安定した動作を行う。
- (3) メタル固定により、耐環境性、耐久性に優れている。
- (4) モニタ出力が大きく、光電気負帰還に適している。

2.2 シングルモードファイバ用 LD モジュール

波長 1.3 μm のシングルモードファイバ用 LD モジュールは、長距離、広帯域伝送を可能にするシングルモードファイバ伝送を実現するためのキーデバイスである。シングルモードファイバはコア径が約 10 μm と非常に細く、接続における軸ずれの許容値が 0.5 μm 以下と厳しい。このため、LD モジュールは機械的に安定であるとともに、組立時における軸合せ調整の許容誤差ができるだけ大きいことが望ましい。ここでは、新しく開発したオフセット共焦点レンズ結合系を用いたシングルモードファイバ用 LD モジュールについて述べる。LD モジュールの構成を図 3. に示す。

LD、結合光学系、ファイバが同軸状に並ぶ構造とした。結合光学系については多くの方式が提案されているが、軸合せ調整における自由度が高く、結合効率の良い、共焦点レンズ結合系を採用した。LD は第 1 レンズとともに窓付パッケージ内にハメチックシールしている。共焦点レンズ系の二つのレンズ間にガラス窓を配置しているが、これによる反射光がちょうど LD の位置に収束され LD の動作を不安定にする。このため、LD を共焦点レンズ系の光軸からオフセットすることにより、反射光が直接 LD に戻らないようにした。LD は波長 1.3 μm 帯の InGaAsP-BC レーザ、光ファイバはコア径 10 μm 、 $\Delta n=0.2\%$ のシングルモードファイバ、共焦点レンズ系の第 1 レンズは球レンズを、第 2 レンズは GRIN レンズを使用した。球レンズ表面からの反射光の影響と結合効率とのトレードオフにより、LD と球レンズとの間隔を約 30 μm に、LD のオフセット量は LD の接合面に垂直な方向に約 30 μm に設定した。LD の後方出射光はレンズを介して PD に導びかれている。LD モジュールの光出力特性の一例を図 4. に示す。結合効率は -5.5 dB である。同図 (a) は室温における駆動電流対光出力特性を示す。同図 (b) は LD モジュールのモニタ PD 電流により自動出力

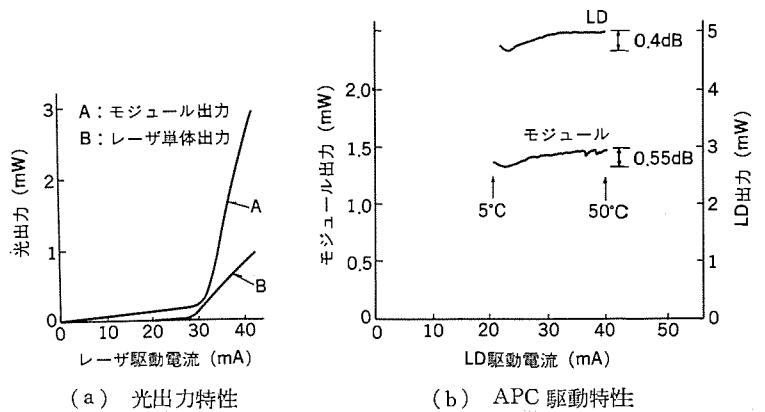


図 4. シングルモードファイバ用 LD モジュールの光出力特性

表 3. シングルモードファイバ用 LD モジュールの特性

LD の 種 類	InGaAsP BC-LD
ビグティルファイバ	コア径 10 μm , クラッド径 125 μm $\Delta n=0.2\%$
ファイバ内入力 (mW)	1.4
しきい値電流 (mA)	16
駆動電流 (mA)	28
結合効率 (dB)	-5.5
波 長 (nm)	1,300
APC 駆動時の出力変動 (5~50°C) (dB)	0.7 以内

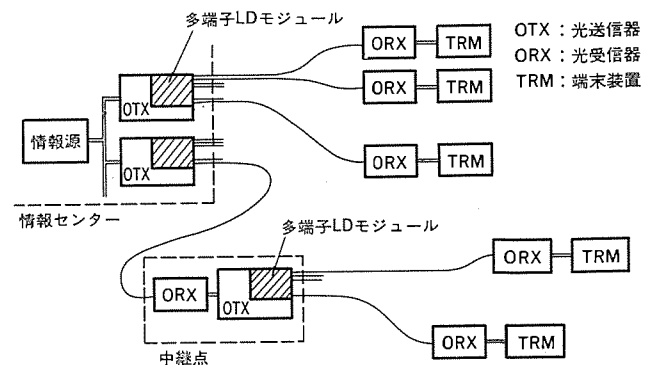


図 5. 多端子 LD モジュールを用いた光ファイバ同報伝送網

調整するように駆動した状態で温度を 5~50°C に変化させたときの駆動電流対光出力曲線である。光出力の変動幅は 0.4 dB 以下、反射の影響による細かなリップルは 0.2 dB 以下であり、LD モジュールが安定な性能を持つことを示している。表 3. は LD モジュールの性能を示す。

2.3 多端子 LD モジュール

多端子 LD モジュールは、複数の出力用光ファイバを持ち、LD に入力された電気信号を光信号に変換し、すべての出力光ファイバに同じ光信号を出力する機能を持っている。CATV や緊急画像連絡網など複数の端末に同一の情報を伝送することが必要な伝送系、すなわち、光ファイバ同報伝送網の構成において装置の簡素化と経済性をもたらすことができる。

多端子 LD モジュールを用いた光ファイバ同報伝送系の構成例を図 5. に示す。情報センターに設置された光送信器に多端子 LD モジュールが使われており、1 台の光送信機により複数の端末に同じ情報を送ることができる。多端子 LD モジュールの構成を図 6. に示す。LD の出力光をミキサに導びき、その出力端に一律な光分布を作ることによ

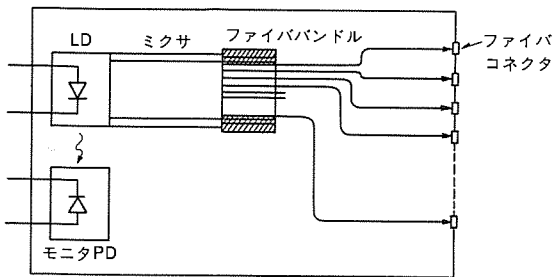


図 6. 多端子 LD モジュールの構成

表 4. 10 端子 LD モジュールの特性

出力端子数	10 端子
適合ファイバ	コア径 50 μm , GI ファイバ
ファイバ入力* (dBm)	-19 以上
APC 駆動時の出力変動* (0~50°C) (dB)	1.2 以内

注 * 高周波重畳時

り、複数の光ファイバに均等分配し、出力する。一例として、10 端子 LD モジュールの性能を表 4. に示す。このモジュールの特長は、広帯域、高出力で、各端子の出力ばらつきが小さいことである。また、高周波重量と光負帰還によるひずみ補償を併用することにより、アナログベースバンド画像伝送が可能であり、CATV などの映像分配伝送に有効である。

3. 光合分波器

光合分波器は、1 本の光ファイバにより伝送されてきた複数の異なる波長の光信号を分離したり、複数の異なる波長の光信号を 1 本の光ファイバに合わせたりする機能を持つ。2 地点間を結ぶ 1 本の光ファイバの両端に光合分波器を用いる波長多重伝送は、伝送容量の増大のみならず、双方向の信号伝送、アナログ信号とデジタル信号など異なる種類の信号の同時伝送が行えるので、光ファイバの敷設数に制約のある光加入者線などへの適用が期待されている。

光合分波器には、プリズム形、回折格子形及び誘電体多層膜フィルタ形がある。なかでも、誘電体多層膜フィルタを用いたものは、プリズムや回折格子を用いたものに比べて通過波長域や帯域幅などに対する設計の自由度が大きいため、光通信に適している。最近では誘電体多層膜フィルタとして SiO_2 や TiO_2 を用いた、いわゆるハードコートフィルタが使えるようになり、誘電体多層膜フィルタの信頼性が向上したため、この形の光合分波器が普及すると期待される。我々は、誘電体多層膜フィルタ形の 2 波、3 波及び 4 波波長多重伝送用光合分波器を開発した。ここでは、4 波の光合分波器について述べる。

4 波波長多重伝送用光合分波器は、アナログ信号 2 波、デジタル信号 2 波のそれぞれの双方向伝送を可能にするものである。この光合分波器の構成を図 7. に示す。ガラスブロックの側面に誘電体多層膜フィルタを配置した多重反射形の構成である。光ファイバ、GRIN レンズ、くさび状ガラスなどの光学部材を光学接着剤によりガラスブロックに接着した一体構造とした。これにより、光ファイバ間の結合状態が温度変化などに対しても極めて安定となり、高い信頼性が得られる。また、光路の途中での反射が極めてわずかで、各端子の光ファイバに斜め研磨コネクタを装着しており、各端子の反射減衰量が 28 dB 以上で半導体レーザを用いたアナログ伝送に適用することができる。開発した光合分波器の性能を表 5. に示す。また、光合分波器の波

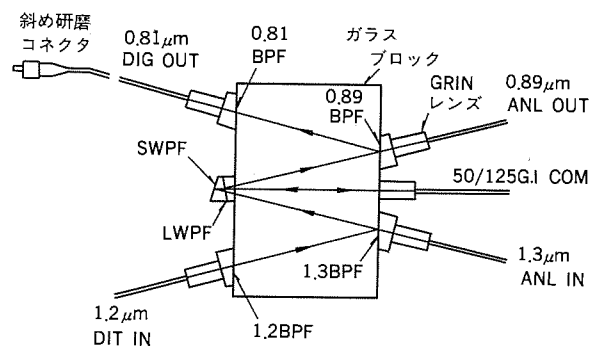


図 7. 4 波長合分波器の構成

表 5. 4 波長合分波器の特性

中心波長 (nm)	810, 890, 1,200, 1,300
挿入損失(合波・分波損失の和) (dB)	2.5 以下
他チャネルへのクロストーク (dB)	-50 以下

表 6. 4 波長合分波器の耐環境特性

試験内容	挿入損失変動 (dB)	反射減衰量変動 (dB)
温度 (0~50°C)	±0.1 以下	±0.5 以下
ヒートサイクル (1~50°C, 40 cyc)	±0.2 以下	±0.5 以下
高温高湿 (50°C, 95%, 3 日間)	±0.2 以下	±0.5 以下
振動 (10~55 Hz, 振幅 1.5 mm, 3 軸, 各 1 時間)	±0.1 以下	±0.3 以下
衝撃 (30 G, 3 軸, 各 5 回)	±0.1 以下	±0.3 以下

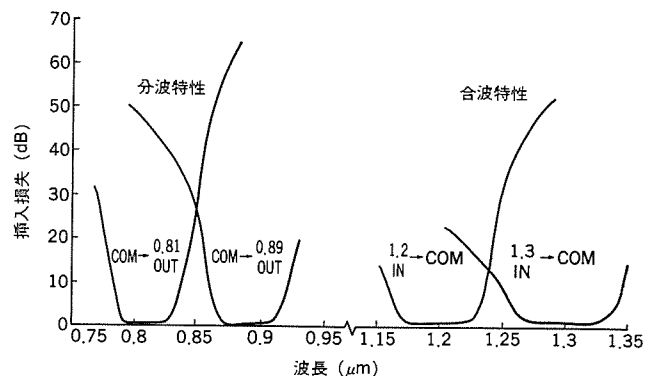


図 8. 4 波長合分波器の合分波特性

長損失特性の一例を図 8. に示す。耐環境特性については表 6. に示す試験を実施し、それぞれにおいて挿入損失変動 ± 0.2 dB 以下、反射減衰量変動 ± 0.5 dB 以下という優れた特性を持っていることが示されている。

この光合分波器の特長は、①通過域における挿入損失が小さいこと、②他チャネルとの干渉量が少なく分波特性に優れていること、③温度変化などに対し安定な特性を持ち信頼性が高いこと、④各端子における反射減衰量が大きくレーザダイオードを用いたアナログ伝送に使用できることである。

4. スターカプラ

スターカプラは、多数の入力端子と出力端子を持つ光回路であって、任意の入力端子から入力された光信号をすべての出力端子に均等に分

配する機能を持っている。スターカプラを用いることにより、図 9. に示すようなスター状の光ファイバ情報伝送網を構成することができる。この伝送網により任意の端末間で通信を行うことができ、OA や FA など、ローカルエリアネットワークの一つの形態としての適用が期待されている。

スターカプラの構成法には受動形と能動形があり、また、受動形は透過形と反射形に分けられる。能動形は任意の端子からの入力光信号をいったん電気信号に変換し、これを再び光信号に変えて多数の出力端子から出力するものである。これに対し、受動形は入力部から出力部まですべて受動形の光回路部品で構成するもので、能動素子がなく信頼性が高いこと、電源を必要としないことなどの特長がある。図 10. に受動形スターカプラを使用したスター状光ファイバ情報伝送網の構成例を示す。同図(a)は透過形スターカプラを用いた場合であり、スターカプラと各端末とを 2 本の光ファイバで接続して構成される。同図(b)は反射形スターカプラを用いた一例であり、スターカプラと各端末との接続は 1 本の光ファイバでよいが、各端末に送受信分離用

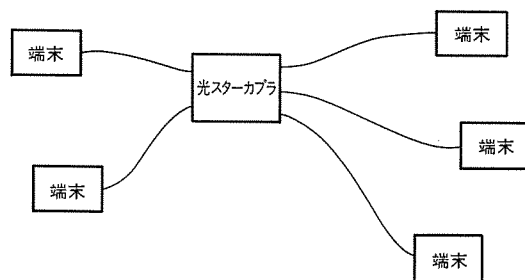
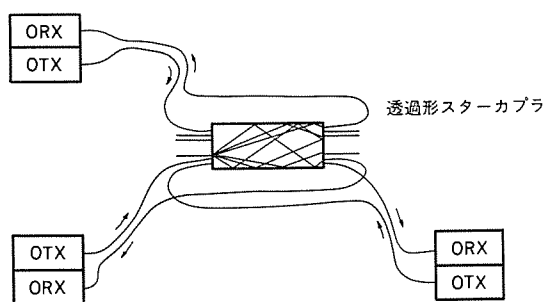
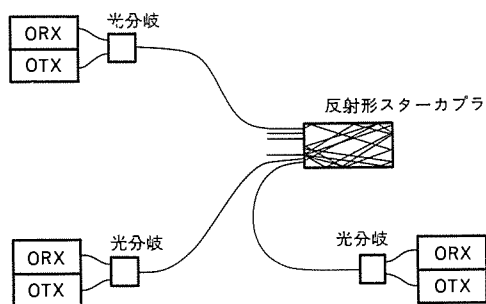


図 9. スター状光ファイバ情報伝送網



(a) 透過形スターカプラを用いた光伝送系



(b) 反射形スターカプラを用いた光伝送系

図 10. 受動形スターカプラを用いた光ファイバ伝送網

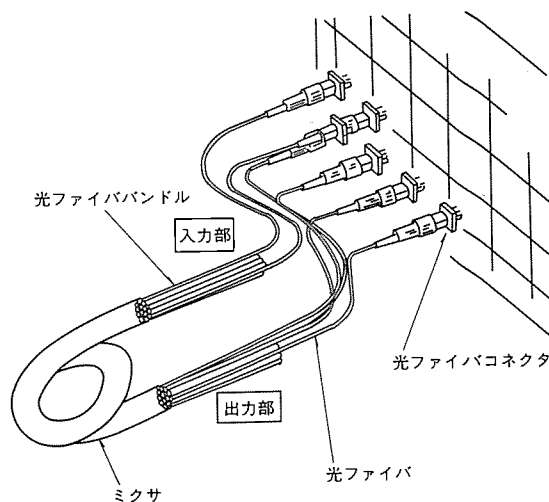


図 11. スターカプラの構成

表 7. スターカプラの特性

項 目	32×32 ポートスターカプラ	10×10 ポートスターカプラ
方 式	大口径光ファイバをミキサとして用いた透過形スターカプラ	
入出力端子数	32×32	10×10
挿入損失 (dB)	22.2	13.2
分配ばらつき (dB)	±0.8	±0.6
接 続	FC 形光コネクタ	
適 合 フ ァ イ バ	コア径 80 μm GI ファイバ、又はコア径 80 μm SI ファイバ	

の分岐が必要である。

このことから、スターカプラとして受動形で透過形のものを開発した。スターカプラは図 11. に示すように、入力部、出力部及びミキサ部で構成される。入出力部は、複数の光ファイバとミキサを接続するために光ファイババンドルを形成し、各ファイバには外部光回路との接続のための光コネクタを装着している。ミキサ部は信号光に対して高い透明度と優れた可とう性を持つ大口径光ファイバを用いている。開発した 32×32 ポートスターカプラ及び 10×10 ポートスターカプラの性能を表 7. に示す。これらのスターカプラの特長は、①低損失であること、②分配パワーの均一性が良いこと、③温度変化や振動に対し性能が安定していること、④外部光回路との接続が光コネクタにより簡単に行えることである。

5. む す び

最近開発した光通信用光部品のいくつかについて、その用途、特長を述べた。高精度位置合せを要する部分における精密メタル固定技術、光学部品の接差部分における耐久性のある接着技術、及び高効率結合技術の開発により、信頼性の高い、高性能な光部品の製造が実現できた。これらの光部品は、既に実システムに使用され、その有効性を実証している。

光ファイバ通信の多機能化、適用領域の拡大は今後更に進展すると考えられるが、これに対処できるように、光部品の性能はもとより、量産性、信頼性を一層向上させるための開発を継続している。

光送受信器とその応用

伊東克能*・関川一彦**・北山忠義**・手島邦夫**

1. ま え が き

光送受信器は、光信号／電気信号の相互変換という光ファイバ通信システムにおける最も重要な機能を果たすサブシステムであり、光半導体素子、光回路部品が集約的に使用される部分である。その中心機能である電気／光及び光／電気変換は、電気信号振幅に比例して光信号出力を変化させる強度変調方式及び光信号強度に比例した光電流を得る光電効果がそれぞれ実用化されている。伝送信号にはデジタル及びアナログの二つの形態がある。光ファイバの伝送帯域の広さを最大限に活用するには、LSI、コンピュータ技術の進歩によるデジタルシステムの増加という技術動向に対応し、無中継伝送距離が大きく中継時の伝送品質劣化が少ないという特長をもつデジタル伝送方式の方がアナログ方式より優れている。しかし、ITVなどの画像伝送にはアナログ伝送方式の方が経済的であり、計測情報、FDM伝送などを含めて当面広く用いられるものと予想される。

本稿ではデジタル伝送用として、その代表的応用例であるLAN及びデジタル通信システム用を、アナログ伝送用として直接変調方式及びPFM変調方式の画像伝送用を取り上げ、その概要と応用例について紹介する。その中でCSMA/CD網用バースモード光送受信器及びレーザダイオードを用いたアナログ伝送について若干詳細にふれることとする。

2. デジタル光送受信器とその応用

デジタル光送受信器の特性は、信号の伝送速度と伝送距離で代表される。伝送速度と伝送距離とを決定する要因には発光・受光素子(使用波長を含む)、光ファイバ、光受信器形式などがある、図1.はこれらの要因と光送受信器の伝送速度と伝送距離の関係を示す。更に、図1.にデジタル光送受信器の適用分野と当社製品を記入した。当社製品の主要諸元を表1.に示す。

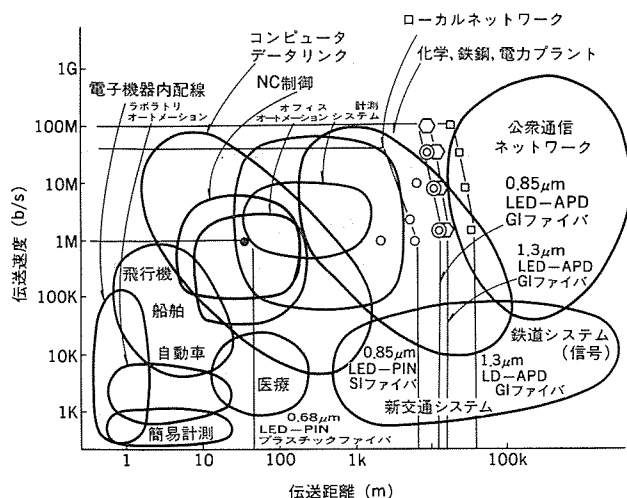


図1. デジタル光送受信器の適用分野と当社製光送受信器

表1. 当社製デジタル光送受信器の主要諸元

形 名	MF-015DS	MF-063DS	MF-32DS	MF-100DS	MF-32 DS-L
伝 送 速 度 (Mb/s)	1.5	6.3	32	100	32
発 光 素 子	LED/LD				
発 光 波 長 (μm)	0.85 帯				1.3 帯
受 光 素 子	Si-APD				Ge-APD
ファイバ内光出力 (dBm)	-14 以上(LED)▲／-5 以上(LD)				-18 以上 (LED) -5▲ 以上 (LD)
最低受信光入力 (dBm)	-58▲	-54▲	-45▲	-42▲	-38▲ 以上
適 合 コ ネ ク タ	FC 形				
電気インタフェース	TTL レベル		ECL レベル		
電 源 (V)	±6				
寸法(D×W×H) (mm)	T _x : 120×70×31, R _x : 120×200×31				
備 考	AGC レンジ 30 dB 以上				

●符号誤り率 1×10^{-9} 以下 注 1.3 μm 帯を使用した光送受信器もある。
▲はピーク値である

デジタル光送受信器の適用分野の代表としてLAN及びPCM通信システムを取りあげ、各適用分野において光送受信器に対する特徴的要素事項とその具現化及び応用システム例について述べる。

2.1 LAN用光送受信器

OA、FAの進展に伴いコンピュータと端末とを結ぶ通信ネットワークの重要性はますます高まり、ローカルエリアネットワーク(LAN)がそのような機能を果たすものとして開発が進められている⁽¹⁾⁽²⁾。

光ファイバ伝送を用いるLANの代表的トポロジーとしてリング及びスターの二つの形態があり、それぞれ独特の構成をもつ光送受信器が必要である。リング形LANでは信号が連続的に送受信されるのに対して、後者では中心制御装置なしにバース的に送受信される方式が通常使われる点に大きな方式的な違いがある。

2.1.1 リング形LAN用光送受信器

リング形LANでは、各ノードステーションで信号を中継伝送する方式が一般に採用される。そのため、ノードステーションの故障がシステム全体に波及しない伝送系が要求される。

(1) 光送受信器の構成と特長

リング形LANでは上記の故障波及防止対策として図2.に示すバイパスループバック機能が伝送路に付加され、光送受信器はバイパス光スイッチと組み合わせて使用される。このため、光送受信器の送受間許容損失は隣接するステーション間の伝送損失を満足するだけでは不足し、数ステーション離れたステーション間(バイパス光スイッチの挿入損失も当然追加される)の伝送損失以上でなければならない。また、このようなバイパスを行うときに変化する受信光レベルの変動はAGCで吸収する必要がある。更に、信号のマーク率変動があっても安定な通信

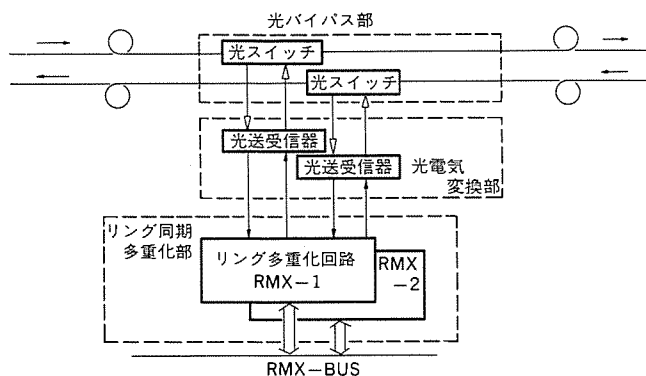


図 2. リング形 LAN における光送信器周辺構成

を可能とする BSI (Bit Sequence Independency) の保持が要求される。表 1. に示した MF-DS シリーズ⁽³⁾ はリング形 LAN、データウェイに開発された光送受信器で下記の特長をもち上記の要求条件を満足するものである。

- (a) 大きな送受間許容損失
- (b) 30 dB 以上の AGC ダイナミックレンジ
- (c) マーク率変動補償 LD 駆動回路 (MF-100 DS)
- (d) タイミング再生機能, キャリア検出機能
- (e) 20 km 以上の長距離無中継伝送可能な $1.3 \mu\text{m}$ 帯 LED, LD 使用の送受信器

(2) 応用例

リング形 LAN への応用例として MF-32-DS (32.064 Mb/s) の《MEL-NET R 32 LAN》⁽⁴⁾ があり、ノード間最大 2 km、ノード数量最大 64 を接続することができる。ループ状データウェイ《MDWR-30 S》及び 500 システムには FM-32-DS (15.36 Mb/s) が使用されており、両データウェイを結合した新日本製鐵 (株) 八幡製鐵所向け熱間圧延プラント制御システムでは合計 53 台のノードが含まれている⁽⁴⁾。

2. 1. 2 スター形 LAN 用光送受信器

同軸ケーブルを用いるバス形 LAN に用いられるカプルのような低挿入損失の光ファイバ用の分岐結合器は考案されておらず、光ファイバを伝送路とするバス形 LAN としては、スターカプルの用いるスター形の LAN が実用に最も近い段階にある。

(1) 光送受信器の構成と特長

スター形 LAN ではアクセス方式として CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection) 方式が最も一般的である。

CSMA/CD 方式では伝送路を各端末が共用するため、同時に 2 局以上の送信を行うとデータが判別できず受信不能 (衝突と称する) となる。そのため通信を行いたい端末は伝送路上の信号の有無を確認 (キャリア検出) して送信を開始する。このとき信号は非同期のバーストとして送出される。送信開始時に伝送路上に信号が無くても、伝送遅延のため他局も送信を開始し衝突が生ずる可能性がある。このため各端末は衝突の有無を確認し、衝突が生ずれば直ちに送信を中止し、無作為な時間間隔をおいて再び送信を開始する。このように CSMA/CD 方式に用いる光送受信器にはリング形 LAN 用にはない、①バースト信号の送受信、②キャリア検出、③衝突検出、などの独特な機能が要求される。

バースト信号の受信には高速の AGC、同期再生機能が要求される。この信号のダイナミックレンジは伝送路損失差の適用範囲を規定し、衝突検出もこのダイナミックレンジを満足しなければならない。衝突検出法には受信信号レベルで衝突を識別するレベル検出法⁽⁵⁾、衝突により

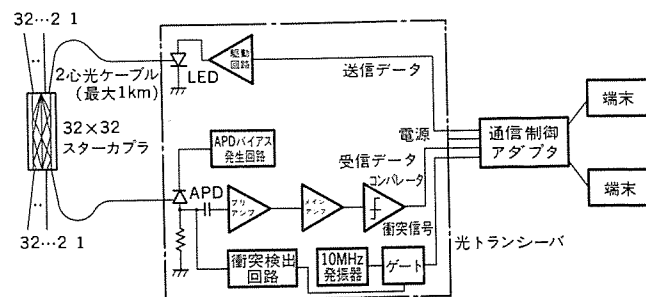


図 3. 光スターネットワーク用トランシーバのブロック図

表 2. 光スターネットワーク用トランシーバの主要諸元

伝 送 速 度 (Mb/s)	10
伝 送 路 符 号	Biphase code
発 光 素 子	GaAlAs-LED ($0.85 \mu\text{m}$)
光 出 力 (dBm)	-2 (peak)
(コア径 $80 \mu\text{m}$ ステップイン) (デックスファイバ)	
受 光 素 子	Si-APD
最 小 受 光 電 力 (dBm)	-38.8 (peak)
(符号誤り率 = 10^{-9})	
符 号 ひ ず み (%)	± 13
ダイナミックレンジ (dB)	12
検 知 可 能 衝突信号レベル差 (dB)	5

生ずる信号の符号則違反を検出する CRV 法⁽⁶⁾、自局の信号がスターカプルの折り返されて受信されるまでの時間帯に信号を受信すれば、衝突と判断する遅延ゲート方式⁽⁷⁾などがある。方式の選択は検出可能信号レベル差、調整の容易さ、拡張性 (他局間の衝突検出、リモータの伝送など) により行われる。

図 3. に衝突検出にレベル検出法を用いた光スターネットワーク用光送受信器 (トランシーバ) のブロック図を示す。このトランシーバは Ethernet® の同軸ケーブル用トランシーバとプラグコンパティブルであり、表 2. に示すような諸元をもっている⁽⁸⁾。なお、バースト送受信方式はトークンパッシング方式のリング形 LAN において使用される動きがあり、また TDMA 方式の受動形ループ状伝送路のシステムに適用する研究が行われている⁽⁸⁾。

(2) 応用例

図 3. に示した光送受信器と 32 ポートの光スターカプルの結合して、半径 1 km 以内に 32 のノードを設置可能な電子メールシステムが開発されている⁽⁹⁾。

2. 2 デジタル多重通信システム用光送受信器

デジタル多重通信システムでは、可及的長い無中継伝送距離と多中継を行っても、符号誤り率及びジッタの増大の少ない伝送を行わなければならない。したがって、光送受信器に対する基本的要求はリング形 LAN 用のそれに対する要求と同じく、じゅう分大きな送受間許容損失及び AGC ダイナミックレンジ並びに BSI の保持などである。このほかにデジタル多重通信システムでは監視制御用信号を主信号に重畳して伝送する必要があり、その方法として FM 重畳等のアナログ方式と CRV (符号則違反) 法及びパルス挿入法などのデジタル方式がある。32 Mb/s (メガビット/秒) 以下では伝送路符号として CMI (Coded Mark Inversion) 符号が一般的となりつつあり、CRV 法が使用される傾向にある。

光送受信器の構成は個別部品によるものから次第に LSI 化される方向にあり、それによって小形化、低消費電力化が図られている。この傾向はデータリンク用の比較的低速・低許容損失のものから LAN 用、デジタル通信用に広がってきている。

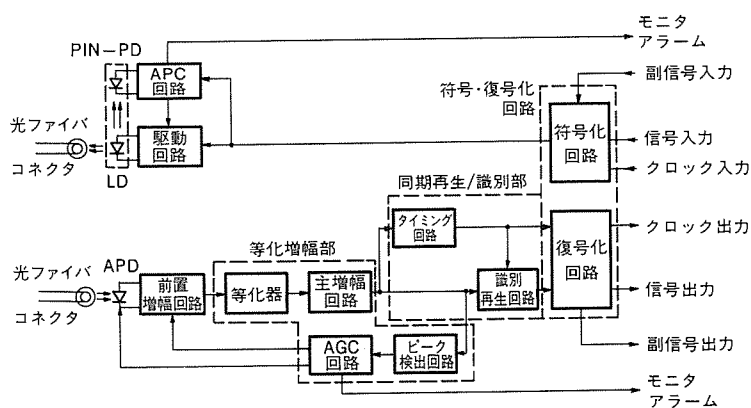


図 4. デジタル多重通信システム用光送受信器の構成

表 3. 6.3 Mb/s CMI 光送受信器用 LSI の主要諸元

機能	等化増幅回路	同期再生/識別回路	CMI 符号/復号回路
形 名	M 54180 S	M 54181 S	M 56307-027 S
符 号 形 式	CMI (BINARY)	CMI (BINARY)	CMI↔NRZ
帯 域	16 MHz (-3 dB)	—	最大 10 Mb/s (クロック 20 Mb/s)
利 得 (dB)	39~74	—	—
ダイナミックレンジ (dB)	35	10 以上 ($f=12.6$ MHz)	—
出力振幅制御誤差 (dB)	1 以下	—	—
AM-PM 変換特性	—	5° 以下 ($f=12.6$ MHz)	—
インタフェース	—	TTL	TTL
電 源 電 圧	+5 V ± 5 %		
消 費 電 力 (mW)	390	180	100 @ 6.3 Mb/s
回 路 形 式	バイポーラ	バイポーラ	CMOS ゲートアレー
チップサイズ (mm ²)	1.91 × 2.67	2.50 × 4.06	7.13 × 7.13
パ ャ ケ ー ジ	22 ピン DIP (セラミック)	22 ピン DIP (セラミック)	40 ピン DIP (セラミック)
備 考	—	—	○多点サンプリングによる副信号重畳機能 ○CRV によるフレーム同期回路内蔵 (フレーム長 200 ビット)

2. 2. 1 光送受信器の構成と LSI 化

(1) 構 成

図 4. にデジタル通信用光送受信器のブロック図を示す、性能諸元は表 1 に示したものと同一である。実装形状は LAN 用がプリント基板上に取り付ける形状であるのに対して、デジタル通信は架にプラグインするパネル構造となっている。

(2) 回路の LSI 化

回路の LSI 化の例として 6.3 Mb/s PCM 2 次群用送受信器の LSI 化の例について述べる。図 4. において点線で囲んだ等化増幅部、同期/識別再生部及び符号/復号化部をそれぞれ LSI 化した。各部の諸元を表 3. に示す。この LSI 化により従来送信器及び受信器の 2 パネルで構成されていたものが 1 パネルとなり、部品点数が 40%、消費電力が 60% にそれぞれ低減された。ここで、符号/復号化部の LSI には監視制御信号を多点サンプリングした信号を CRV で伝送

するための CRV 重畳、フレーム同期 (フレーム長 200 ビット、フレーム保護段数可変 [最大 8 段])、連続パルス化などの機能をもっている^{(9) (10) (11)}。

2. 2. 2 応用例

公衆通信システムの中で最も発展が期待される、加入者系の一系態として開発した事業所用システムの例では、CMI 符号を用いた 6.3 Mb/s PCM 2 次群信号の双方向伝送用チャネルがあり、0.81 μ m の LED 及び 1.3 μ m の LD を用いて 4 MHz 画像音声信号チャネルと共に波長分割多重双方向伝送を行っている⁽¹²⁾。

関西電力(株)の泉北—南大阪間の PCM キャリアレー用に納入したシステムではスクランブルド 2 値符号、0.8 μ m 帯 LD を用いて 8 km の 6.3 Mb/s 信号伝送を行っている⁽¹³⁾。

3. アナログ光送受信器とその応用

中継数が少ない場合の CCTV などの映像音声信号の光ファイバ伝送では、アナログ方式がデジタル方式より経済的である。アナログ方式には直接変調方式と予変調方式とがある。予変調方式の各種方式のうち実際に使用されているものの大部分は PFM 方式であり、予変調方式イコール PFM と考えてよい。これらの各方式の性能諸元を表 4. に、適用領域をに図 5. 示す。直接変調方式は PFM 方式より短距離伝送のシステムに適用される。

3. 1 直接変調方式アナログ光送受信器

直接変調方式アナログ伝送では光源のコヒーレンシと、マルチモード光ファ

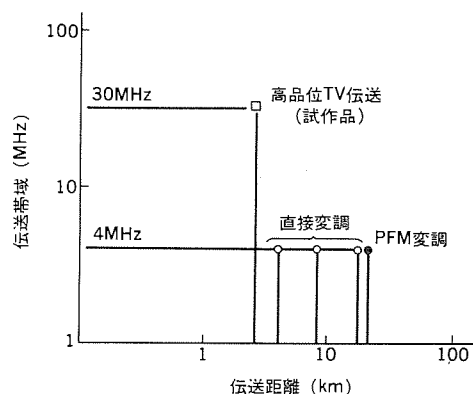


図 5. アナログ光送受信器の適用分野と当社製光送受信器

表 4. 当社製アナログ光送受信器の主要諸元

形 名	MF-TVSIA	MFTVA1/MFTVPB1
伝 送 信 号	カラー TVICH + 音声 ICH	
変 調 方 式	直接強度変調	PFM 変調
発 光 素 子	LED/LD	LD
発 光 波 長 (μ m)	0.8 帯	0.8 帯/1.3 帯
受 光 素 子	APD	APD
ファイバ内光出力 (dBm)	-17(LED)/-7(LD)	-6/-8
最低受信入力* (dBm)	-35(APD)	-47/-38
DG・DP	5% 以下 3° 以下	
適合コネクタ	FC-OIPN-(L)	
電気インタフェース	IVP-P/75 Ω	
電 源 (V)	+15(V)	
寸 法 (D×W×H) (mm)	175×38×149 (プラグイン構造)	

* 注無評価 S/N 42 dB 以上

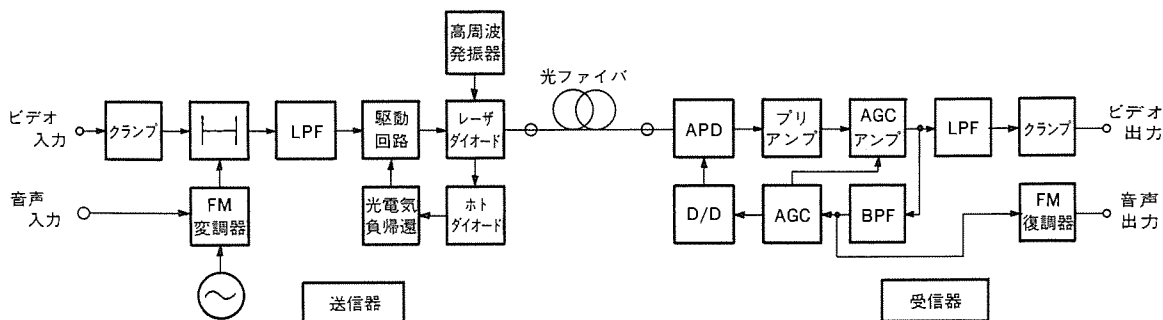


図 6. 直接変調方式 映像音声信号伝送用 光送受信器の構成

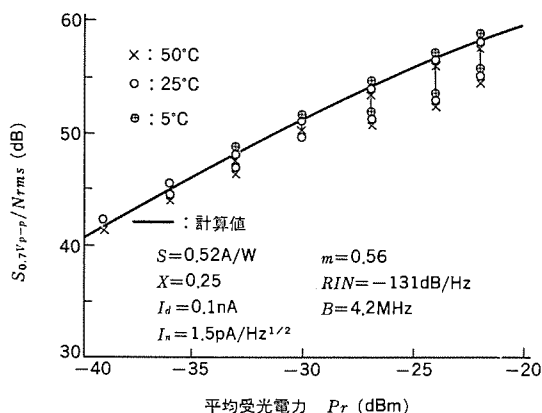


図 7. レーザダイオードを用いた直接変調 アナログ 光送受信器の S/N 特性 (ファイバ振動時の S/N 変動)

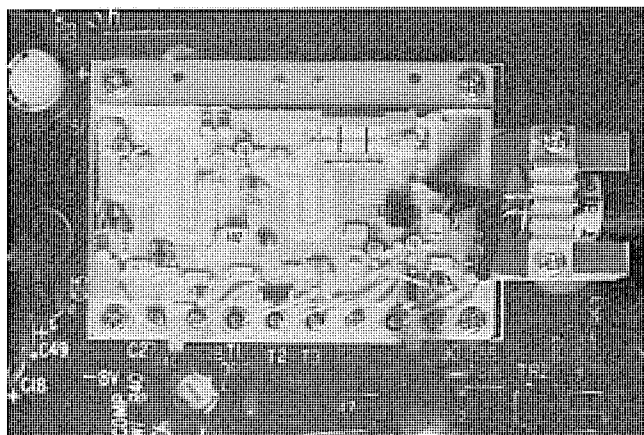


図 8. 直接変調 アナログ 光送信器用 レーザダイオード駆動回路 HIC (右端 レーザダイオードモジュール)

ファイバにおけるモード変換に起因するモードノイズ⁽¹⁴⁾のため、コヒーレンシの高いレーザダイオードは使用されることは少なく、多モードのレーザダイオードを用いた例がわずかに報告されているだけであった⁽¹⁵⁾。しかし、高周波重畳法によるレーザダイオードの多モード発振技術及び光電気負帰還法によるひずみ低減技術の確立により、レーザダイオードを用いた直接変調方式アナログ伝送方式は実用化の領域に入ってきた⁽¹⁶⁾。

3. 1. 1 光送受信器の構成

直接変調方式の映像音声伝送用光送受信器の構成を図 6. に示す。当社製 ME 1303 形 GaAs-LED は良好な直線性をもち、前置ひずみなどの補償なしに十分低い DG, DP 特性が得られる。

レーザダイオードを用いる場合は数百 MHz の高周波でレーザダイオードの発振をオンオフし、レーザ発振立ち上り時にマルチモード発振している状態の間に励起を止め、単一モード発振をさせないことによりレーザダイオードの多モード発振を可能にする高周波重畳法を用いる。この動作により十分コヒーレンシを低減し、モードノイズを抑圧するには、重畳する高周波の周波数は 900 MHz 付近に選ぶのがよいことがわかっている⁽¹⁷⁾。

しかし、高周波重畳を行うと動作の線形性が損なわれ DG, DP は劣化する。これを補償するため、レーザダイオードの自動出力制御 (APC) 用のホットダイオード出力の映像信号帯域以上の成分まで、レーザダイオードの駆動回路にフィードバックさせる光電気負帰還法を確立した⁽¹⁸⁾。光電気負帰還のルーブ利得を大きく、かつ平坦な周波数特性を得るため、APC 用ホットダイオードの感度、レーザダイオードとの結合及び周波数特性を改良し、回路の位相特性についても吟味した。その結果、図 7. に示すようなモードノイズの少ない S/N 特性及び十分低い高調波ひずみ特性が安定して得られるようになった。これには図 8. に示す高周波発振器を内蔵したレーザダイオード駆動回路の HIC 化

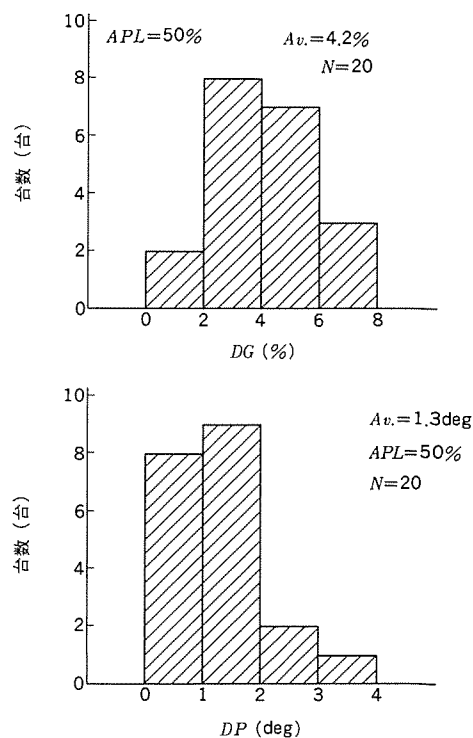


図 9. レーザダイオード駆動回路 HIC を用いたアナログ光送受信器の DG, DP 分布の測定例 (波長 0.81 μm , クラック TJS レーザ使用)

が特に有効であった⁽¹⁸⁾。図 9. に 20 台の送信器の DG, DP の分布例を示す。平均値、分散ともに十分小さな値である。

このようにして大きなファイバ内入力得られるレーザダイオードの

ナログ伝送への適用が可能になったので、これと多分配器とを組み合わせ多端子 LD モジュール⁽¹⁸⁾を用いた同報システムの実用化が可能となった。

3. 2. 2 応用例

LED を用いた装置は、阪神道路公団松原線用交通監視システム⁽¹⁹⁾を始め数多くの納入例がある。マルチモードレーザを用いた例としては、日本国有鉄道鉄道技術研究所へ納入した ITV 伝送装置がある⁽¹⁹⁾。波長 1.3 μm のレーザダイオードを用いて中央線沿線に布設された GI ケーブルを用いて 16.5 km の無中継伝送後の S/N 42.3 dB を得ている。

高周波重畳法と光電気負帰還法とを併用した例としては、前述の広帯域光専用システムのアナログチャネルがある。波長 0.89 μm 及び 1.3 μm のレーザダイオードを用いてデジタルチャネルとの 4 波長多重双方向伝送システムを構成し、5 km 伝送後の S/N として 50 dB という高い値が実現された⁽¹⁹⁾。LED を用いた伝送帯域 30 MHz の高品位 TV 伝送装置も開発されている⁽²⁰⁾。

3. 2 PFM 方式アナログ光伝送装置

PFM 方式は映像信号の振幅を一定パルス幅のパルスに繰り返し周波数に変換（予変調と称す）し、変換した信号でレーザダイオードを駆動する方式である。受信は受信パルスを単安定マルチバイブレータに通してパルス幅を揃え、低域濾波器を通す方式が一般的である。この方式の特徴は広帯域利得により、送受間許容損失が直接変調方式より大きくできる点とモジュールノイズの影響が少ない点である。

阪神高速道路公団神戸西宮線に納入したシステムは、0.8 μm 帯 LD を用い光スイッチにより全台 2 系統選択方式を実現するもので、光ファイバより光スイッチ、光分岐の挿入損失が主要な損失となるシステムに有効な構成となっている。また住宅整備公団にプラットホーム遠隔監視用として納入したシステムは、1.2 及び 1.3 μm の波長多重同方向伝送システムを構成し 12 km を無中継伝送している。これは光ファイバの伝送損失が主要な損失であるため、長波長レーザダイオードを用いている。

4. む す び

光送受信器の構成とその応用という観点で LAN 及び PCM 多重通信システム用のデジタル光送受信器、並びに映像信号伝送用の直接変調方式及び PFM 変調方式のアナログ光送受信器について紹介した。

適用分野ごとの必要機能及び性能はほぼ固まりつつあり、今後はその小形化、低消費電力化、価格低減のため集積化が全面的に推進されて行くものと予想される。その一例として 6.3 Mb/s デジタル光送受信器用 LSI 及び直接変調方式アナログ伝送用光送受信器 HIC についても紹介した。

本稿に述べた各光送受信器及び応用システムの開発に当たり、御指導いただいたユーザー関係各位に深く謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 中塚ほか：三菱電機技報，58，No. 2，P. 139（昭 59）
- (2) 水野ほか：三菱電機技報，58，No. 2，P. 144（昭 59）
- (3) 北山ほか：三菱電機技報，55，No. 3，P. 180（昭 56）
- (4) 小藪ほか：三菱電機技報，57，No. 2，P. 162（昭 58）
- (5) T. Kitayama et al：9th Europ. Conf. on Optical Commun.，(1983)
- (6) 小口ほか：CSMA/CD 制御を用いた 32 Mb/s 光スター伝送方式の検討，電子通信学会技術研究報告 CS 83-110（昭 58）
- (7) H. Maustakas：Passive Optical Star Bus with Collision Detection for Local Area Network，6th Int. Conf. on Integrated Optics and Optical Commun.，29 C 2-3（1983）
- (8) 大島ほか：パースト TDMA 方式による受動形光ローカルネットワーク，昭和 59 年度電子通信学会総合全国大会，S 17-7
- (9) 大島ほか：CMOS ゲートアレイによる CMI 符号変換回路 LSI，同上，No. 2,674（昭 59）
- (10) 瀬上ほか：6.3 Mb/s CMI 光送受信器用 IC（同期再生／識別用 IC），同上，No. 2,675（昭 59）
- (11) 本島ほか：6.3 Mb/s CMI 光送受信器用 IC（等化増幅用 IC），同上，No. 2,676（昭 59）
- (12) 関川ほか：三菱電機技報，57，No. 7，P. 23（昭 59）
- (13) 畑田ほか：三菱電機技報，57，No. 12，P. 850（昭 58）
- (14) R. E. Epworth：4th Europ. Conf. on Optical Fiber Commun.，P. 492（1978）
- (15) K. Ito et al：Optical Fiber Transmission of ITV Video Signal by Analog Baseband Modulation of Laser Diodes. 5th Europ. Conf. on Optical Fiber Commun.，Postdeadline paper 16-5（1979）
- (16) K. Sskikawa et al：Optical Analog Baseband Transmission Using Opto-electronic Negative Feedback and RF Superposition，Topical Meeting on Optical Fiber Commun.，WH 2（1984）
- (17) 松下ほか：多端子半導体レーザモジュールによるアナログベースバンド画像伝送，昭和 57 年度電子通信学会通信部門全国大会，No. 572
- (18) 松下ほか：高周波重畳と光電気負帰還とを併用した広帯域アナログ伝送用 LD 駆動回路 HIC，昭和 59 年度電子通信学会総合全国大会，No. 2,620
- (19) 手島ほか：三菱電機技報，55，No. 3，P. 185（昭 56）
- (20) 丹治ほか：高品位 TV 信号光伝送装置の特性，昭和 59 年度電子通信学会総合全国大会，No. 2,623

4波波長多重通信システム

関川一彦*・伊東克能**・杉村滋夫***・竹居敏夫**・藤原謙一*

1. ま え が き

波長多重通信技術は伝送路を有効に活用し、経済的なシステムを構成するために重要である。今回事業所間で高速デジタル信号と映像信号の双方向伝送ができる装置の試作開発を行った。開発の目的は、4波波長多重伝送技術、アナログ伝送技術及び監視制御方式の確立にあり、所期の目標を達成したのでここに紹介する⁽¹⁾。

表 1. 主要方式諸元

項 目	内 容
光 伝 送 系 伝 送 信 号	6.3 Mb/s デジタル信号 (双方向)
	ベースバンドアナログ信号 (双方向)
	監視制御信号 (双方向)
	打合せ電話 (双方向)
変 復 調 形 式	直 接 変 調
伝 送 形 式	4 波波長分割多重・双方向伝送
光 源 及 び 波 長	種 類
	波 長 (μm)
	主 伝 送 信 号
	伝 送 方 向
	LED
	0.81
	6.3 Mb/s デジタル
	上 り
	L D
	0.89
	4 MHz-TV アナログ
	上 り
	1.2
	6.3 Mb/s デジタル
	下 り
	1.3
	4 MHz-TV アナログ
	下 り
受 光 素 子	短波長帯: Si-APD, 長波長帯: Ge-APD
光合波・分波器	4 波波長分割多重 多重反射形 (多層膜フィルタ使用)
伝 送 特 性	信 号 種 別
	特 性
	ディジタル信号
	誤り率 10^{-8} 以下
	映像 $S_{0.7} V_{pp}/N_{rms} \geq 48$ dB (無評価)
	アナログ信号
	音声 $S_{rms}/N_{rms} \geq 48$ dB (無評価)
	DG 8% 以下: DP 4° 以下
	ラインスロープ フレームスロープ 4% 以下
光 コ ネ ク タ	斜め研磨形光コネクタ (FCT-P)
光 ファ イ バ	GI 50/125 μm ファイバ
伝送距離 (km)	5 以上

2. 4 波波長多重伝送システムの概要

1本の光ファイバで事業所間を結び、ディジタル系及びアナログ系両方式の双方向伝送を行う。ディジタル系では6.3 Mb/s (メガビット/秒)のPCM 2次群信号の伝送を行い、アナログ系では4 MHz-TV信号の伝送を行う。また装置の監視制御のための情報を両系に重畳して伝送する。打合せ用音声信号はアナログ系に重畳している。伝送内容は、電話、高速ディジタル信号、テレビ会議などが考えられる。

システム構成の一例を図1.に示す。波長は0.81 μm, 0.89 μm, 1.2 μm, 1.3 μmの4波で下り方向に長波長、上り方向に短波長を割り当てている。主要方式諸元は表1.のとおりでである⁽¹⁾。波長多重構成とするためには、十分な選択特性を持った光合分波器と波長精度の良い発光素子が必要である。図2.に今回採用した光合分波器の外観を示す⁽²⁾。アナログ伝送系は回路構成が簡単でコスト的に有利なベースバンド直接強度変調方式である。発光素子は高い出力が得られるレーザダイオード(LD)が使用されるが、この場合その出力光の可干渉性に起因するモード雑音が発生する。またコネクタなどからの反

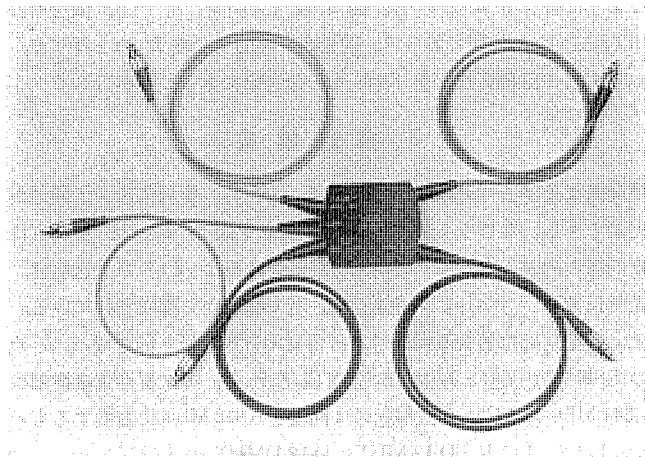


図 2. 4 波波長多重用光合分波器

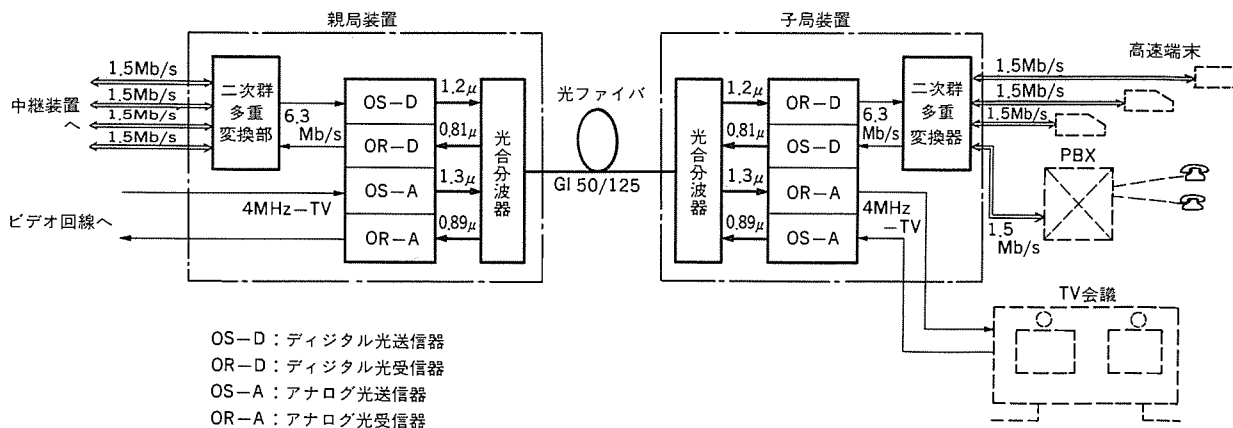


図 1. 4 波波長多重システムの構成例

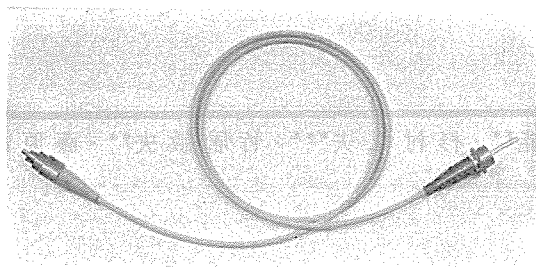


図 3. メタル 固定 LD モジュール

表 2. 回線設計表

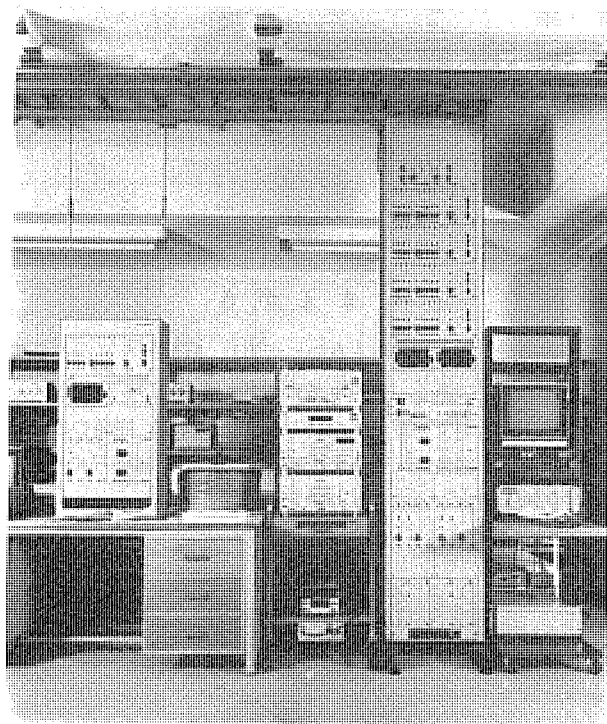
		デジタル信号		映像信号	
		0.81 μm	1.2 μm	0.89 μm	1.3 μm
送受間 許容損失	平均ファイバ内入 力 (光源の劣化を 含む)	-16.0 dBm	-10.0 dBm	-6 dBm	-6 dBm
	最小受光電力 (設計目標値)	-56.7 dBm	-47.7 dBm	-31.9 dBm	-30.1 dBm
		(40.7)	(37.7)	(25.9)	(24.1)

射光により LD のひずみ特性や雑音特性が劣化する。このような問題を克服するため、斜め研磨コネクタが採用されているほか、光送信器において高周波重畳による干渉性の低減及び光-電気帰還回路によるひずみ、雑音の改善を行った⁽³⁾。このため LD モジュールは単に波長精度を良くするだけでなく、効果的な光負帰還量が得られるように設計されている。図 3. は今回開発したアナログ伝送用の LD モジュールの外観である⁽²⁾。送受間許容損失は表 2. のとおりで、アナログ系で目標伝送距離 5 km を十分達成できることが分かる。

3. 装置構成

親局装置及び子局装置の外観を図 4. に示す。親局には 4 子局分が実装できる。このうち 1 システム分の構成を図 5. に示す。子局もほぼ同様の構成となっている。光-電気変換部はアナログ系光送信盤、光受信盤及びデジタル系光送信盤、光受信盤から構成されている。アナログ変換部は監視制御信号と打合せ音声信号を伝送するための FSK 変復調器と等化器から構成される。2 次群多重変換部は 1.544 Mb/s の PCM 1 次群信号 4 回線を 6.312 Mb/s に変換するもので、D1S, D1R, D12 MUX, D12 DMUX の 4 種類とクロック供給部で構成される。監視制御部は SV-CONT, SV-MDX, CLK-GEN, TEL-INF の 4 種類で構成される。親局装置は局内の -48 V 電源を受けて架下の FUSE 盤から各システムに供給され、子局装置は商用電源 AC 100 V を受けて予備電源装置によりバックアップされた DC -48 V に変換され供給される。親局装置は架高 2,750 mm の標準搬送架で、各フレームのパネル間配線はバックボードによりパターン配線を行った。

図 6. は送信側の信号の流れを示すものである。デジタル系は、1.544 Mb/s 4 本の切口を持ち 2 次群多重変換部で 6.312 Mb/s のデジタル信号に多重化された後、デジタル光送信盤内で CMI 符号化され電気-光変換部で光信号となる。CMI 符号器は周期 200 b/s の CRV (Coding rule violation) がかけられ、等価的に 31.56 Kb/s の副信号の伝送路を構成する。監視制御情報は 1,200 b/s の伝送速度で出力されるので、これを 31.56 Kb/s で多点サンプリングすることでデジタル系に重畳して伝送する。アナログ系では 1,200 b/s を 8 Kb/s で多点



子局装置 親局装置

図 4. 4 波長多重通信装置

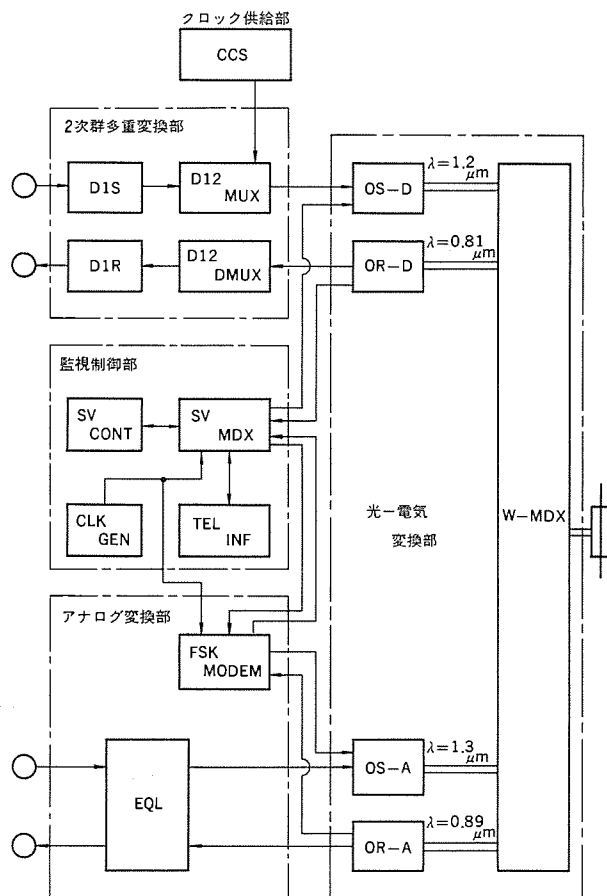


図 5. 親局装置系統略図

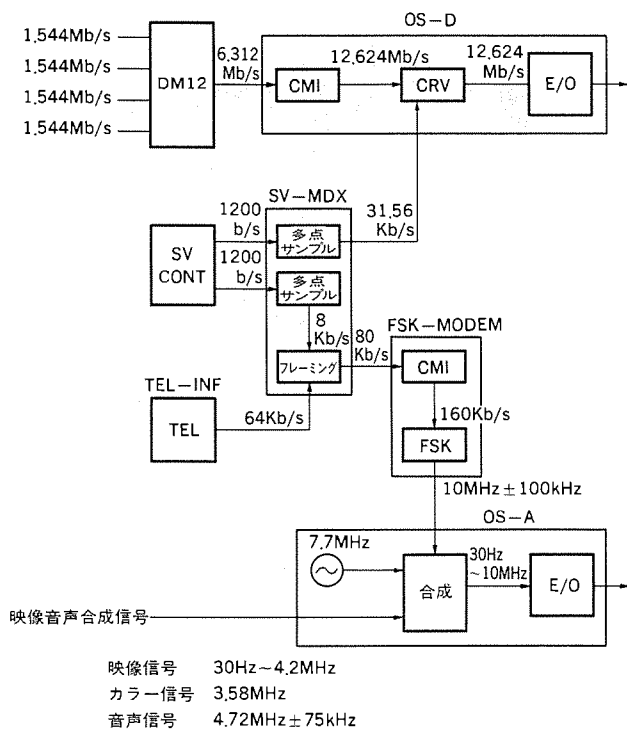


図 6. 送信側信号の流れ

サンプルし、これと打合せ用音声の PCM 化信号 64 Kb/s を多重化し 80Kb/s にした後 CMI 符号化され 160 Kb/s の速度で FSK 変調がかけられる。中心周波数は 10 MHz、偏移 ± 100 kHz である。アナログ光送信機ではこの FSK 信号と、7.7 MHz のパイロット信号及び 5.25 MHz の映像音声合成信号を多重化し、30 Hz~10 MHz のベースバンド信号にした後、電気-光変換部で光信号に変換する。受信側は以上の逆の操作を行って元の信号に復調する。

4. アナログ系の伝送特性

4.1 目標性能

アナログ系の目標性能を表 3. に示す⁽¹⁾。S/N 48 dB を得る回線設計値は $0.89 \mu\text{m}$ の場合最小受光電力 -28.75 dB, $1.3 \mu\text{m}$ の場合 -22.8 dB であるが、設計目標は製造マージンを見込み以下の検討結果から $0.89 \mu\text{m}$ で -31.9 dBm, $1.3 \mu\text{m}$ で -30.1 dBm とした。

APD の増倍率を最適化した場合の直接強度変調方式の S/N は次式から求めることができる。

$$S_0 \cdot 7V_{\text{pp}}/N_{\text{rms}} B [2e(SP_r + I_d) M_{\text{opt}}^{2+\alpha} + i_n^2] + (SP_r M_{\text{opt}})^2 B \cdot RIN$$

$$M_{\text{opt}} = \left[\frac{i_n^2}{e^{\alpha}(SP_r + I_d)} \right]^{\frac{1}{2+\alpha}}, S = \frac{\eta e}{k\nu}, i_n^2 = \frac{4kTN}{R}$$

記号の意味は次のとおりである。ここで () 内に示した値は、設計目標値算出にあたり実現可能値として設定したものである。

P_r : 平均受光電力

m : 変調度 (0.56)

M_{opt} : APD の最適増倍率

α : APD の過剰雑音指数 ($0.89 \mu\text{m} \cdots 0.3, 1.3 \mu\text{m} \cdots 1.0$)

I_d : APD の暗電流 ($0.89 \mu\text{m} \cdots 0.3 \text{ mA}, 1.3 \mu\text{m} \cdots 0.3 \mu\text{A}$)

S : APD の感度 ($0.89 \mu\text{m} \cdots 0.54 \text{ A/W}, 1.3 \mu\text{m} \cdots 0.73 \text{ A/W}$)

η : APD の量子効率 (70%)

ν : 光の振動数

表 3. アナログ系の方式と目標性能

項目	内容
方式	変調方式
	ベースバンド直接強度変調
	駆動方式
	高周波重畳光電気負帰還方式
	APC方式
	平均光レベル検出制御
目標性能	AGC方式
	送信パイロット信号検出 増幅器利得制御
	伝送信号周波数
	下図参照
	警報項目
	(1) LD バイアス電流増加 (2) 送信平均光出力レベル低下
	中心発光波長 (nm)
	885~895又は1,290~1,310
	平均光出力電力 (dBm)
	-6以上
	所要 S/N (dB)
	(無評価値) 48以上
	全変調度
	0.67 ± 0.03
	AGC圧縮特性
	$\pm 5\text{dB}$ に対し $\pm 0.5\text{dB}$ 以内
	振幅周波数特性
	10kHz~5.25MHz まで $\pm 0.5\text{dB}$ 以内
	非直線ひずみ (%)
	DG 8, DP 4 (APL=10, 50, 90%)
	結合波ひずみ (dBr)
	-60以下
	波形特性
	フレームスロープ、ラインスロープ4%立上り300ns

e : 電気素量

h : プランク 定数

i_n : 入力換算雑音電流 ($1.5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$)

R : APD の負荷抵抗

T : 絶対温度

N : 増幅器の雑音指数

k : ボルツマン 定数

B : 雑音帯域幅 (4.2 MHz)

RIN : レーザダイオードの雑音 (-132 dBm)

4.2 回路構成と伝送特性

LD と多モード光ファイバを用いたアナログベースバンド伝送⁽⁵⁾ではモードルノイズ対策として高周波重畳法が効果的である⁽⁶⁾。しかし高周波を LD に重畳すると、S/N 及びひずみが劣化するため各種の信号を複合化した画像伝送では高品質の特性が得られない。この解決策として今回のアナログ系では、高周波重畳と光-電気負帰還とを併用することで伝送特性の改善を行った⁽⁷⁾。実現した回路は図 7. に示すような LD 駆動回路で、簡単な構成で安定な高品質のアナログ伝送が行えた。図 8. は光-電気負帰還によりひずみ特性が改善されている状況を示すもので、高周波重畳により本来の LD のひずみ特性が劣化し、それが帰還量分だけ改善されていることを示している。

図 9. はシステム総合試験の受光電力対 S/N 特性である。設計目標値と同程度以上の特性が得られ仕様値を十分満足していることが分かる。光ファイバを強制的に振動させてもモードル雑音による S/N の変動量は 0.5~1.0 dB におさまる実用化可能であることが明らかにできた。図 10. にアナログ送信器の内部構造を示す。

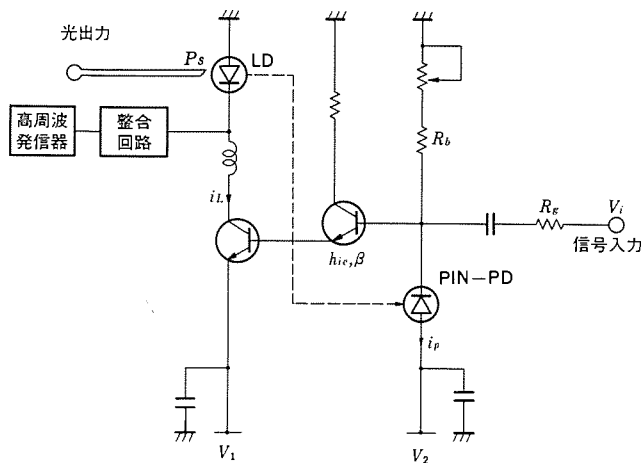


図 7. アナログベースバンドレザ 送信器駆動回路

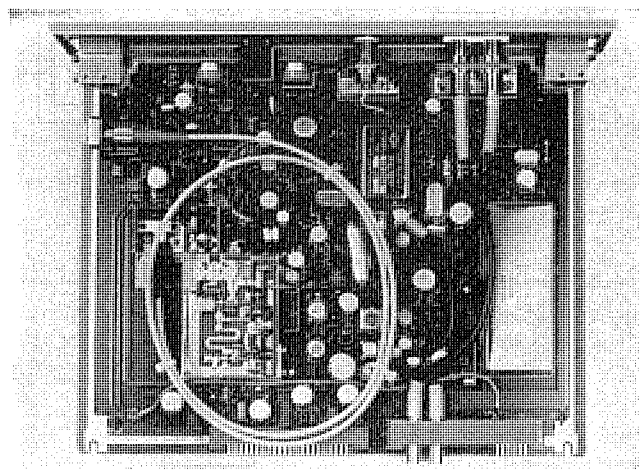


図 10. アナログ 光送信器 (OS-A)

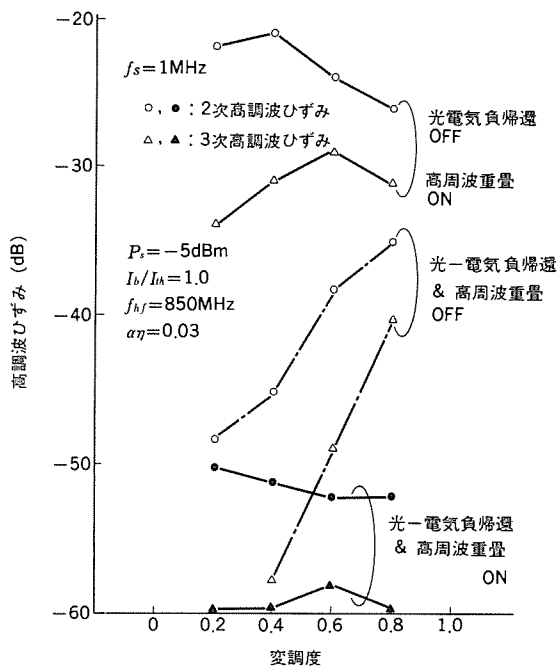


図 8. 光-電気負帰還によるひずみ特性の改善

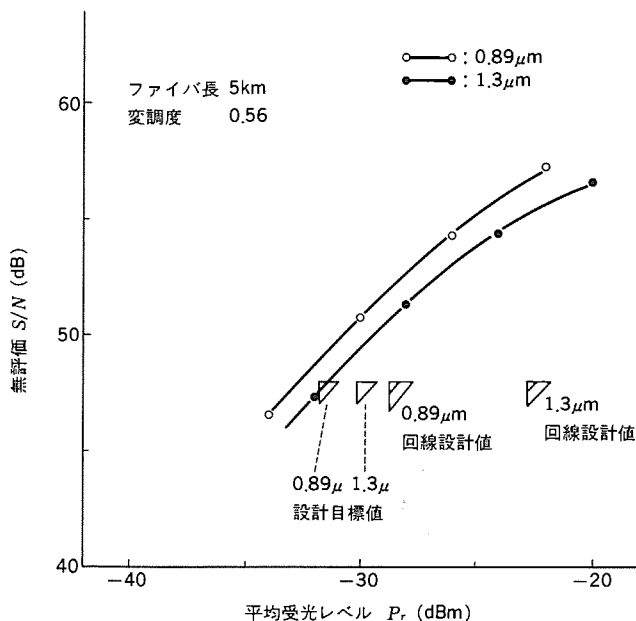


図 9. 受光レベル 対 \$S/N\$ 特性

5. デジタル系の伝送特性

デジタル系の目標性能を表 4. に示す⁽¹⁾。符号誤り率 (BER) 10^{-8} となる平均受光電力の設計目標値は以下のとおり設定した。

マーク率 1/2 の受信光信号に対し、規定の受信 S/N を得るのに必要な平均受光電力は次式から求めることができる⁽²⁾。

$$\bar{P}_r = \frac{eQ}{2S} \left(2M^2 QB_s + \frac{2Z}{M_b} \right)$$

$$Z = \{ i_n^2 + 2e(I_{D0} + I_{DM} M^{2+x}) B_0 \}^{1/2}$$

$$Q = 0.5 \times (SNR)$$

記号の意味は次のとおりである。

表 4. デジタル系の方式と目標性能

方式	項目	内容	
	変調方式	直接強度変調	
方式	APC方式	平均光出力検波バイアス電流制御方式	
	AGC方式	ピーク値検波によるAPD増幅器利得制御	
	タイミング抽出	タンク回路による自己抽出方式	
	伝送路符号	CMI符号	
	CMIブロック同期保護	前方6段, 後方0段	
	替報項目	(1) 送信タイミング (3) LD・バイアス電流 (2) 受信タイミング (4) LD平均光出力	
目標性能	中心発光波長 (nm)	805~815	1,190~1,210
	平均光出力電力 (dBm)	-16以上	-10以上
	スペクトル半値幅 (nm)	40以下	5以下
	消光比 (dB)	13以上	
	立ち上がり時間及び立ち下り時間 (ns)	15.8以下	
	ダイナミックジッタ	5.5rms以下 ($f_0=6,312\text{MHz}$)	
	最小受光電力 ($\frac{\text{BER}}{10^{-4}}$) (dBm)	-56.7	-47.7
	最大受光電力 ($\frac{\text{BER}}{10^{-4}}$) (dBm)	-15	-15
	ダイナミックレンジ ($\frac{\text{BER}}{10^{-4}}$) (dB)	41.7	32.7
	OS-D OUT信号の規格		
OS-D OUT	端子名	符号形式	接続
	CMI	ON OFF デューティ: 50% $f_c: 6,312\text{MHz} \pm 30\text{PPM}$	FC-P形 アダプタ

B_s : 光信号依存性 ショット 雑音に対する雑音等価帯域幅

ここでは, Gauss フィルタを用いた。

デューティ 50% 短形波の場合 $B_s = 1.06 f_c$

I_{D0} : 増倍されない APD 暗電流

I_{Dm} : 増倍される APD 暗電流

B_o : 信号依存のない雑音に対する雑音等価帯域幅

$B_o = 1.04 f_c$

初期劣化を考慮し, 各 パラメータ を次のとおり設定して計算した。

M : APD の増幅率

x : APD の過剰雑音指数 ($0.81 \mu\text{m} \cdots 0.3$, $1.2 \mu\text{m} \cdots 1.0$)

I_D : APD の暗電流 ($0.81 \mu\text{m} \cdots I_{D0} = 0.2 \text{ nA}$, $I_{DM} = 0.1 \text{ nA}$,
 $1.2 \mu\text{m} = 0.3 \mu\text{A}$)

S : APD の感度 ($0.81 \mu\text{m} \cdots 0.43 \text{ A/W}$, $1.2 \mu\text{m} \cdots 0.68 \text{ A/W}$)

η : APD の量子効率 ($0.81 \mu\text{m} \cdots 65\%$, $1.2 \mu\text{m} \cdots 70\%$)

ν : 光の振動数

e : 電気素量

i_n : 入力換算雑音 ($1.4 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$)

結果は, $0.81 \mu\text{m}$ で $P_r = -56.7 \text{ dBm}$, $1.2 \mu\text{m}$ で $P_r = -47.7 \text{ dBm}$ となりこの値を設計目標値とした。開発した装置の システム 総合試験のデータは図 11. に示すとおりで, 目標値を達成し回線設計値に対し十分な マージン が得られていることが分かる。

6. 監視制御方式

監視制御部は, 親局装置と子局装置の各 SV-MDX 盤が 1 : 1 で対向して最大 4 システム まで組み合わせ, 親局装置の警報試験盤 (SV-CONT) によって局選択し監視制御を行う。伝送路は デジタル 回線とアナログ 回線で二重化され相互に バックアップ できる構成となっている⁽¹⁾。動作概要は次のとおりである。

(1) 監視

- (a) 子局側の状態を親局側で監視する。
- (b) 子局側, 親局側それぞれ自局の状態を監視する。
- (c) 伝送路の状態を監視する。

(2) 制御

親局側から子局側を制御し, ループバック 試験を行う。SV-CONT 盤は監視制御の表示及び スイッチ 操作を行うものであり, SV-MDX は対向局との情報伝送及び処理を行う。SV-CONT と SV-MDX 間は $1,200 \text{ b/s}$ の速度でデータ 転送 を行い, 親局 SV-MDX と子局 SV-

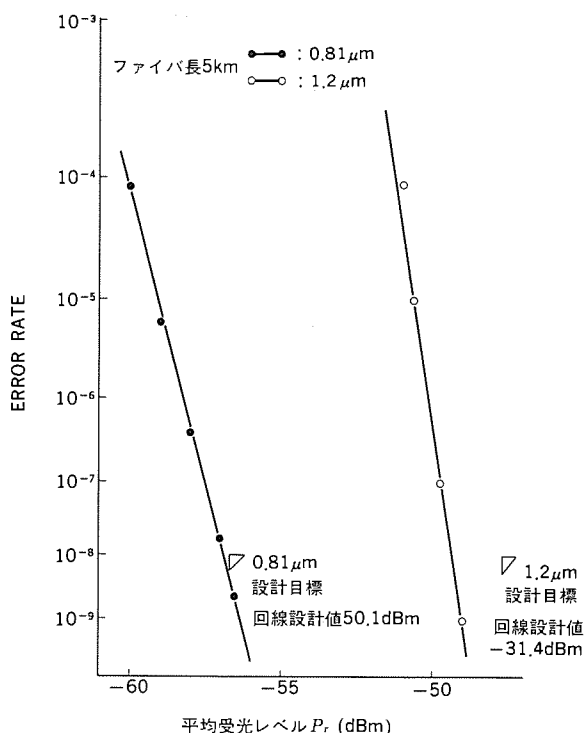
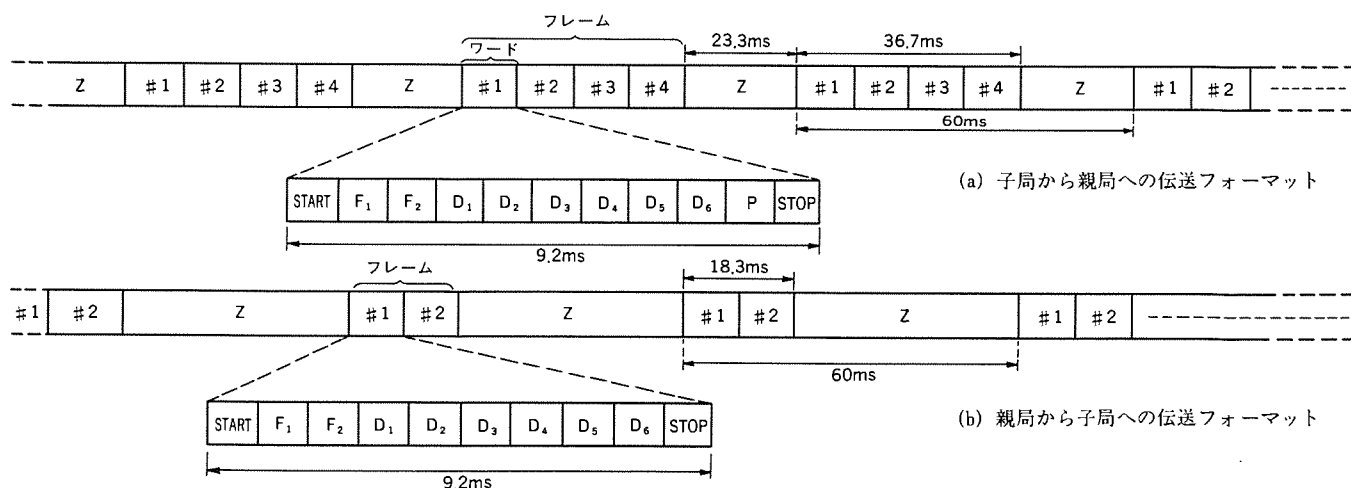


図 11. 受光レベル対 BER 特性



(a) 子局から親局への伝送フォーマット

(b) 親局から子局への伝送フォーマット

	#1	#2	#3	#4
F ₁	1	1	0	0
F ₂	1	0	0	1

(c) ワード識別ビットの指定

Z : オールマーク
START : スタートビット
F : ワード識別ビット
D : データビット
P : パリティビット (偶数パリティ)
STOP : ストップビット

図 12. データ 伝 送 フォー マ ッ ト

MDX 間は光伝送路を介して、1,200 b/s のデータ伝送をデジタル系、アナログ系両系で行う。データ伝送のフォーマットを図 12. に示す。

監視制御の方式をまとめると次のとおりである。

- (1) 監視子局数 最大 4 子局
- (2) 親局—子局間伝送方式
 - (a) 伝送形態 : 常時サイクリック伝送
 - (b) 伝送速度 : 1,200 b/s
 - (c) 同期方式 : 調歩同期
 - (d) ワード構成 : スタート 1 ビット, データ 8 ビット
 パリティ 1 ビット, ストップ 1 ビット
 - (e) 誤り検定 : パリティチェック (偶数)
 ワードシーケンスチェック
 3 回連続フレーム一致照合
- (3) 親局装置 SV-CONT~SV-MDX 間データ転送
 - (a) 転送形態 : 選択中の子局——サイクリックポーリングによる監視制御
 選択されていない子局——最大 16 秒ごとのポーリングによる局診断呼出し応答
 - (b) 伝送速度, 同期方式, ワード構成は (2) 項に同じ。
 - (c) 誤り検定 : パリティチェック (偶数)
 ワードシーケンスチェック
- (4) 監視制御方式
 - (a) 監視 : 常時監視
 - (b) 制御 : 子局選択による手動制御
 - (c) 項目数 : 監視 親局 18 点/システム
 子局 22 点
 制御 5 点/子局

7. む す び

今後発展が期待される光加入者系には、伝送路の有効活用を図るため波長多重通信方式が通信技術の重要技術の一つと考えられる。システム総合試験の結果 5 km のサービスエリアが実現できることが明らか

となり所期の目標を達成することができた。またアナログ光伝送においてベースバンド直接変調方式を用い簡単な回路構成で高品質の伝送が行えることも明らかとなった。装置は方式性能の確認に重点をおいて設計されたものであり、実用化にあたっては更に小形化、低消費電力化により装置実装密度を上げることが必要である。この点については現在 IC 化を中心に開発を推進中である⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

参 考 文 献

- (1) 渡辺ほか: 通研実報, 33, No. 3, P. 427 (昭 59)
- (2) 竹居ほか: 光通信用光部品, 三菱電機技報, 58, No. 7 (昭 59)
- (3) 鈴木ほか: 無反射・低損失光コネクタ, 通研実報, 33, No. 3, P. 503 (昭 59)
- (4) 佐藤ほか: 広帯域アナログ光伝送技術, 通研実報, 33, No. 3, P. 457 (昭 59)
- (5) 伊東ほか: 光送受信器とその応用, 三菱電機技報, 58, No. 7 (昭 59)
- (6) 佐藤ほか: Trans. IECE, 63-B, No. 11, P. 1,086 (1980)
- (7) K. Sekikawa et al: Optical Analog Baseband Transmission Using Opto-electronic Negative Feedback and RF Superposition, Topical Meeting on Optical Fiber Commun., (1984)
- (8) 岡野ほか: 通研実報, 27, No. 2, P. 359 (昭 53)
- (9) 大島ほか: CMOS ゲートアレイによる CMI 符号変換回路 LSI, 同上, No. 2,674 (昭 59)
- (10) 瀬上ほか: 6.3 Mb/s CMI 光送受信器用 IC (同期再生/識別用 IC), 同上, No. 2,675 (昭 59)
- (11) 本島ほか: 6.3 Mb/s CMI 光送受信器用 IC (等化増幅用 IC), 同上, No. 2,676 (昭 59)

光ファイバセンサ —強度変調形—

久間 和生*・田井 修市**・井田 芳明***・滝岡 孝司***・吉永 淳+

1. ま え が き

光の様々な属性(干渉, 偏光, 吸収, 反射など)を利用した光計測技術は, 非接触, 高速, 高精度な計測手段として, 1960 年代にレーザが発明されて以来, 急速に発展した。最近, これらの光計測技術に低損失光ファイバ, 半導体光素子を導入するための研究・開発が盛んになされている⁽¹⁾⁽²⁾。光ファイバは, 無誘導性, 高絶縁性, 広帯域性, 軽量・細径性などにすぐれているので, 電磁誘導雑音, 絶縁破壊, 引火爆発の危険性がある電力系統や各種工業プラントの計装システム

における計測信号の伝送路に用いれば, 高精度, 高速, 安全な計装システムを実現できる。

図 1. はプラント構内に広く分散する計算機間を結合し, 高速に情報の統合化を図る光データウェイと光ファイバ計測技術を組み合わせた光応用計測制御システムの概念図である。このような光ファイバ計測システムにおいて悪環境下での計測に光ファイバセンサを用いることにより, システムの安全性と信頼性が大幅に向上するものと期待される。当社は, 上述した電力系統や工業プラントに適用するために, 光ファイバ電流(磁界)計⁽²⁾⁽³⁾, 電圧(電界)計⁽²⁾⁽⁴⁾, 温度計⁽²⁾⁽⁵⁾, 圧力計⁽⁶⁾, 振動加速度計⁽⁷⁾⁽⁸⁾などの開発, 製品化を進めている。本稿では, これらの光ファイバセンサの原理, 性能などについて紹介する。

2. 光ファイバ電流(磁界)計⁽²⁾⁽³⁾⁽⁹⁾

図 2. にファラデー効果を用いた光ファイバ電流(磁界)計及び光電流(磁界)センサの原理図を示す。光源からの出射光は, 多モード光ファイバによって光センサ部に導かれる。偏光子を通過した直線偏光波は, 光ファラデー素子内を伝搬する間に, 導体を流れる電流が発生する磁界によりその偏光面が回転する。また, 旋光性をもつ光ファイバを用いた場合は, 旋光性によっても偏光面が回転する。したがって, 偏光面回転角 ϕ は一般的に次式で表せる。

$$\phi = \phi_F + \phi_A$$

$$= V_F H l + \theta l \dots \dots \dots (1)$$

ここで, ϕ_F , ϕ_A は, それぞれファラデー効果, 旋光性による回転角を表す。また, V_F はファラデー素子のベルデ定数, θ は旋光能, l は素子長, H は印加磁界を表す。回転角 ϕ は, 検光子によって光強度に変換される。このとき, 偏光子と検光子の偏光方向の相対角度を ϕ_B として, 出力光強度の磁界に対する直線性が最適になるよう光学的バイアス($\phi_B - \phi_A$)を 45° に設定すると, 検光子出力光強度 P は,

$$P = P_0 (1 - \sin 2V_F H l) \dots \dots \dots (2)$$

となる。 P_0 は無電流(無磁界)時の出力光強度である。この出力光は, 多モード光ファイバによって光受信機に導かれて電気信号に変換される。この装置では, 光受信機において交流出力電圧($\propto P_0 \sin 2V_F H l$)

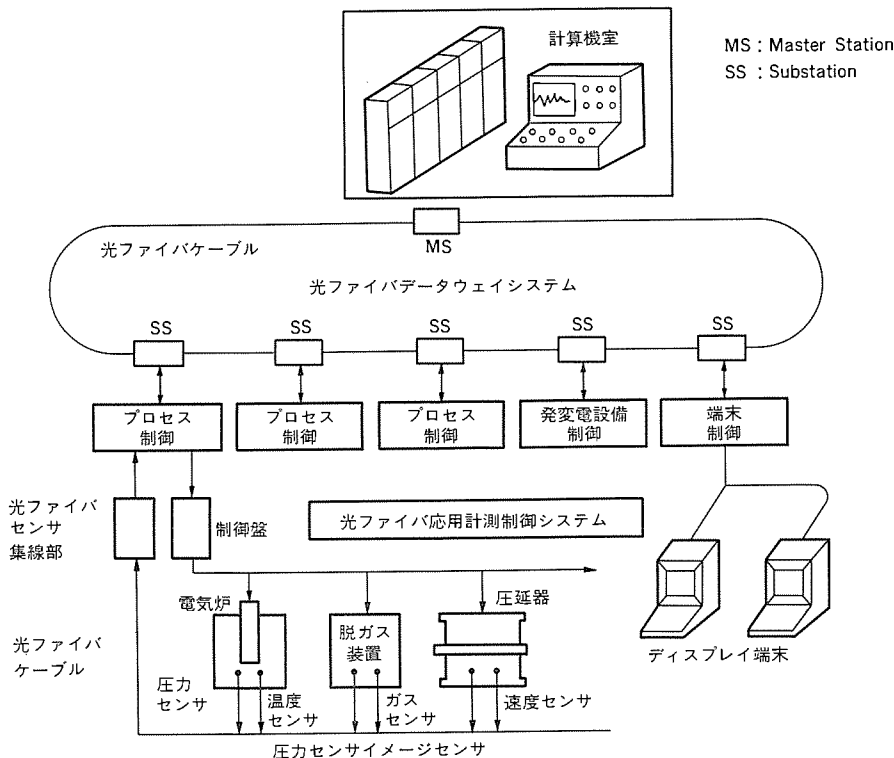


図 1. 光ファイバセンサのプラント内光データウェイシステムへの応用例(概念図)

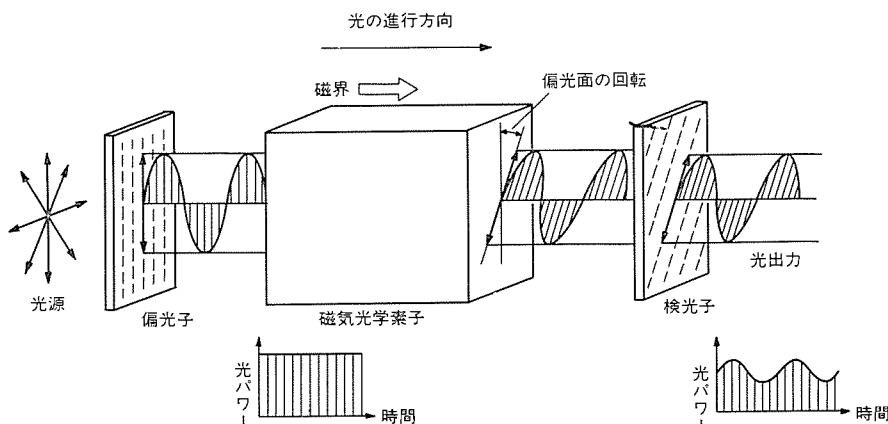


図 2. 光ファイバ電流(磁界)センサの原理図

を直流出力電圧 ($\propto P_0$) で電氣的に除算することにより、光源の出力変動や光ファイバコネクタ損失変動などによる測定誤差要因を除去している。

ファラデー素子は、反磁性体、常磁性体、強磁性体材料に分類できる。一般的に、反磁性体材料のベルデ定数 V_F は比較的小さいがその温度依存性はほとんど無視できるのに対し、常磁性体、強磁性体のベルデ定数は大きい温度特性に問題がある。そこで、当社では、温度特性の良好な鉛ガラス及び $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) 単結晶 (いずれも反磁性体材料) を用いた光電流 (磁界) センサを開発した。鉛ガラス、BGO を用いたセンサとも、 20Oe の磁界で S/N 比 40 dB 以上を得ている (帯域 1 kHz)。また、 $10\sim 400\text{ Oe}$ の範囲で、振幅誤差 $\pm 0.25\%$ 以下、位相角誤差 ± 20 分以下の良好な特性を得ている。鉛ガラスを用いた

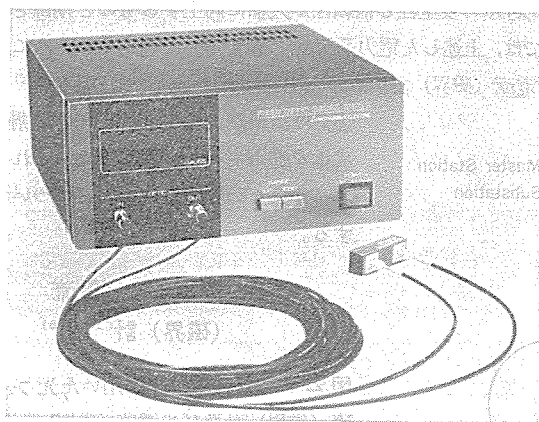


図 3. 光ファイバ磁界計の外観

表 1. 光ファイバ電流 (磁界) 計の仕様

光 源	AlGaAs-LED	
受 光 素 子	Si-PINPD	
光 フ ァ イ バ	石英系ファイバ	
光 セ ン サ 原 理	鉛ガラスの磁気光学効果 (ファラデー効果)	
測 定 範 囲	電 流 測 定 器	磁 界 測 定 器
	$10\sim 1,000\text{ A}$	$30\sim 300/300\sim 3,000\text{ Oe}$
精 度	$\pm 1.5\%$	
周 波 数 帯 域	$10\text{ Hz}\sim 10\text{ kHz}$	
温 度 特 性	$0\sim 40^\circ\text{C}$ で $\pm 1.5\%$ 以下	

センサの特長は、その温度特性が極めて良好なことである ($-25\sim +85^\circ\text{C}$ で出力変動 $\pm 0.5\%$ 以下)。一方、BGO センサの特長は鉛ガラスを用いたセンサと比較して小形化されたことである (センサ寸法 $4\times 4\times 11\text{ mm}^3$)。図 3. に、鉛ガラスを用いたセンサ及び計測器本体の外観写真を示す。また、表 1. に鉛ガラスを用いた光電流 (磁界) センサの仕様を示す。

3. 光ファイバ電圧 (電界) 計⁽²⁾⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾

図 4. にポッケルス効果を用いた光ファイバ電圧 (電界) 計及び光電圧 (電界) センサの構成図を示す。LED からの出射光は多モード光ファイバでセンサ部に導かれる。偏光子を通過した直線偏光波の偏光方向をポッケルス素子の二つの主軸に対して 45° に設定しておく、素子両面透明電極への印加電圧 V による複屈折効果により、ポッケルス素子からの出射光はだ円偏光波に変換される。このだ円偏光波は光学パイアス用 $1/4$ 波長板を介して検光子で光強度に変換され、光ファイバで光受信機に導かれる。このとき、受光素子 (Si-PINPD) 面上での光強度 P は、

$$P = P_0 \left(1 + \sin \pi \frac{V}{V_\pi} \right) \dots \dots \dots (3)$$

で表せる。 P_0 は無電圧時の光強度、 V_π は半波長電圧である。

当社は温度特性の良好なポッケルス材料として、チョコラスキー法により育成した BGO 結晶を用いている。図 4. に示すように、BGO 単結晶の (001) 面を光入射面とした縦形変調方式の光電圧センサでは、 V_π は、

$$V_\pi = \frac{\lambda_0}{2n_0^3\gamma_{41}} \dots \dots \dots (4)$$

で表せる。ここで、 λ_0 は光の波長、 n_0 は屈折率、 γ_{41} は電気光学係数を表す。 $\lambda_0 = 0.85\text{ }\mu\text{m}$ における V_π は約 9.8 kV である。

図 5. に BGO 単結晶を用いた光電圧センサ及び計測器本体の外観写真を示し、また、表 2. にその仕様を示す。光受信機の帯域を 1 kHz としたとき、 5 V 以上の印加電圧に対する出力電気信号の S/N 比は 40 dB 以上である。 $5\sim 200\text{ V}$ の印加電圧範囲における振幅、位相角誤差は、それぞれ、 $\pm 0.25\%$ 以下、 ± 2 分以下である。また、 $-25\sim +85^\circ\text{C}$ の温度範囲での測定誤差は $\pm 0.5\%$ 以下であり、BGO 単結晶を用いた光電圧センサが温度に対して極めて安定していることがわかる。

当社は、上述した光ファイバ電圧センサのほか、電波形などのサージ電圧を測定するために、帯域 1 MHz の広帯域光電圧 (電界) センサも開発している。

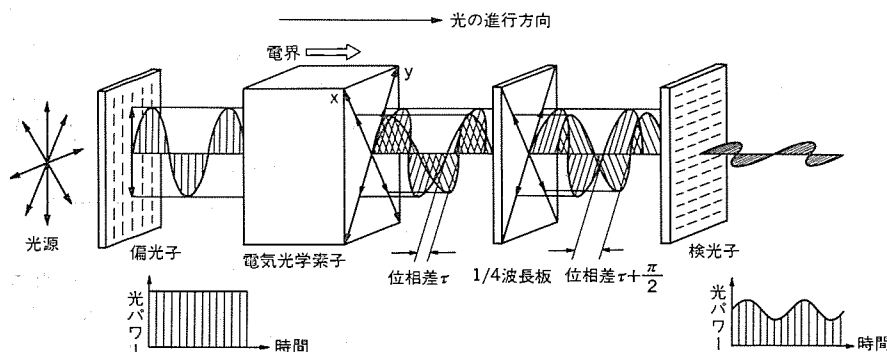


図 4. 光ファイバ電圧 (電界) センサの原理図

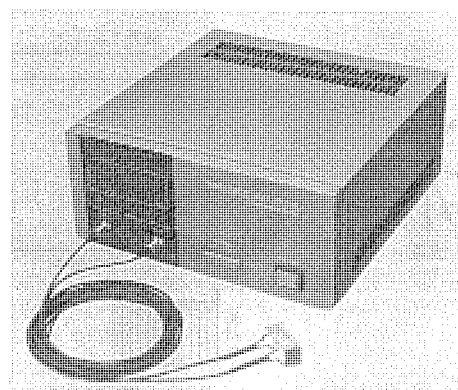


図 5. 光ファイバ電圧計の外観

表 2. 光ファイバ電圧（電界）計の仕様

光 源	AlGaAs-LED	
受 光 素 子	Si-PINPD	
光 フ ァ イ バ	石英系ファイバ	
光 セ ン サ 原 理	Bi ₁₂ GeO ₂₀ 単結晶の電気光学効果（ポッケルス効果）	
測 定 範 囲	電圧測定器	電界測定器
	2～20/20～200 V	10～100/100～1000 V/cm
精 度	±1.5%	
周 波 数 帯 域	10 Hz～10 kHz	
温 度 特 性	0～40°C で ±1.5% 以下	

4. 光ファイバ温度計⁽²⁾⁽⁵⁾⁽¹¹⁾

図 6. に当社で開発した半導体の光物性を利用した光温度センサの原理図を示す。半導体は光学的基礎吸収端波長 λ_g をもち、これにより短波長の光をほとんど吸収する。また、 λ_g は温度上昇と共に長波長側に移行する。したがって、 λ_g が光源の発光スペクトル内にあるような半導体材料を選んで半導体材料と光送受信機を光ファイバで連結すれば、半導体の透過光強度は温度上昇と共に減少するので、光ファイバからの出射光強度を測定することにより温度を測ることができる。

この装置では測定用光源に AlGaAs 系 LED を半導体材料には室温における λ_g が 0.9 μm 程度の GaAs を、また、光ファイバには耐熱性のすぐれた テフロンジャケット をもつ石英 ガラス 系ファイバを使用して

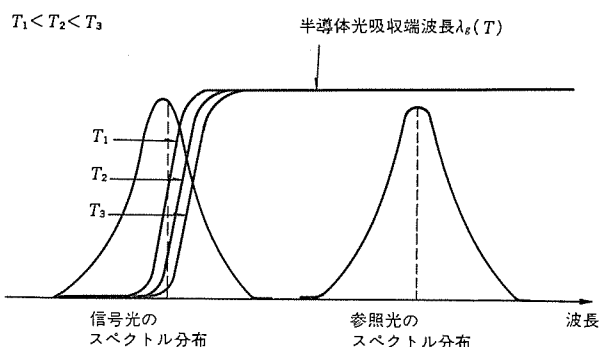


図 6. 半導体を用いた光温度センサの原理図

表 3. 光ファイバ温度計の性能

項 目	内 容
光 源	AlGaAs 系 LED ($\lambda_1 \approx 0.86 \mu\text{m}$) InGaAsP 系 LED ($\lambda_2 \approx 1.3 \mu\text{m}$)
受 光 素 子	Ge-APD
光 フ ァ イ バ	石英ガラス系 SI 形ファイバ
原 理	GaAs 単結晶の光吸収特性
測 定 範 囲	-30～+300°C
精 度	±0.5°C

いる。一方、光コネクタ損失や光ファイバの伝送損失の変動などによる測定誤差を除去するために、透過光強度が温度に依存する AlGaAs 系 LED の出射光パルスとほぼ一定の透過光強度をもつ長波長の InGaAsP 系 LED からの出射光パルスを交互に光温度センサ部に送り込み、前者を信号光、後者を参照光とする 2 波長方式を採用している。更に、光源の発光スペクトル変動による測定誤差を除去するため、LED は温度制御されている。表 3. に示すように、-30～+300°C の温度範囲を ±0.5°C の精度で測定できる。また、応答速度が速く、小形であることも特長である。

当社では、この光温度センサを日本国有鉄道の車両搭載用変圧器に組み込み、車両走行時の変圧器内巻線温度の計測などに成功している⁽¹¹⁾。

5. 光ファイバ圧力計⁽⁶⁾

図 7. に、光弾性素子を用いた光ファイバ圧力計及び光圧力センサの構成図を示す。光弾性素子への応力印加は両端を封じたベローズによって行う。すなわち、被測定雰囲気気の圧力が変化した時、ベローズが伸縮して光弾性素子に圧力を加え、これによって内部応力が変化することを利用している。図 7. に示すように、圧力センサ部は、偏光子、光弾性素子、 $\lambda/4$ 波長板、検光子で構成されている。偏光子を通過した直線偏光波が光弾性素子を通るとき、印加応力による光弾性効果に伴う複屈折により、光弾性素子出射端では円偏光波となる。この円偏光波を $\lambda/4$ 波長板と検光子で光強度に変換し、光受信機で検出すれば、素子に印加された応力、すなわち、圧力を測ることができる。このとき、検光子の透過光、反射光に対する受光素子面上での光強度を P_1 、 P_2 とすると、

$$P_1 = P_0 \left(1 + \sin \pi \frac{T}{T_\pi} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$P_2 = P_0 \left(1 - \sin \pi \frac{T}{T_\pi} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。ここで、 P_0 は無応力時の光強度、 T は印加応力、 T_π は半波長応力である。光弾性素子として非晶質材料を用いると

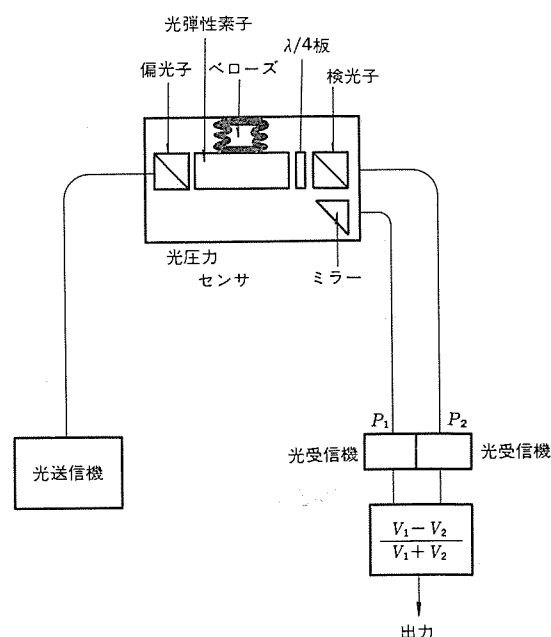


図 7. 光ファイバ圧力計の構成図

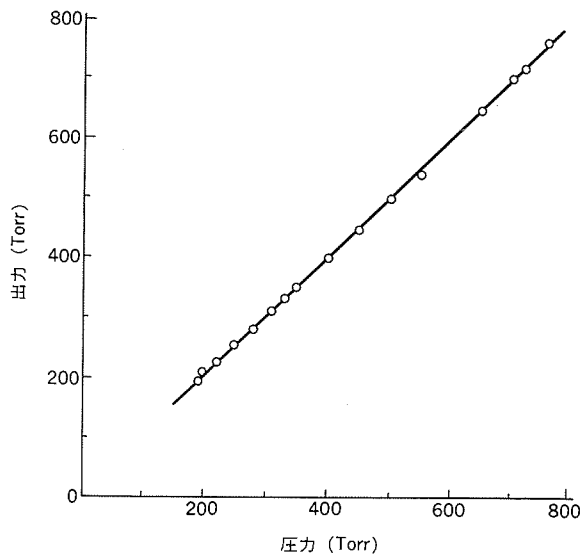


図 8. 光ファイバ圧力計の特性例

き, T_π は,

$$T_\pi = \frac{\lambda}{Cl} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表せる。ここで, λ は光の波長, C は光弾性定数, l は素子長である。

図 7. のように, 受光素子面上における光強度 P_1, P_2 に対する出力電圧 V_1, V_2 の和と差をとった後, それらの比をとると,

$$\frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} = \sin \pi \frac{T}{T_\pi} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となり, 圧力信号以外の直流光強度の変動に起因する測定誤差を除去できる。

この装置では, 式(8)の比を演算するための割算器出力の利得を調節して, 測定圧力を Torr 単位で直読できるようにしてある。また, 発光素子, 受光素子, 光ファイバには, AlGaAs 系 LED, Si-PINPD, 石英系多モードファイバを各々使用している。

光弾性素子としてガラス ($C=6.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, 応力印加面の面積 $=4 \times 10 \text{ mm}^2$) を用いたときの, 印加圧力と最終的なセンサ出力 (割算器出力) の関係を図 8. に示す。200~760 Torr の範囲で良好な直線性が得られている。今後, 最適な光弾性材料の選定, センサ構造の改善, 耐環境特性の検討を進める予定である。

6. 光ファイバ振動加速度計⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹²⁾

6.1 慣性系を利用した方式⁽⁷⁾

この方式の光ファイバ振動加速度計及び加速度センサの構成図を図 9. に示す。このセンサは, おもりと板ばねで慣性系を構成している。これに光遮へい板を取り付けマイクロレンズからの平行光線の一部を振動に応じてさえぎる。その結果, 遮へい板透過光強度が変調される。

いま, 振動体の変位 $h(t)$ を,

$$h(t) = A \sin(2\pi f t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

と仮定する。 A, f は, それぞれ振動振幅, 振動周波数を表す。このとき, おもりに取り付けられた光遮へい板の変位 $g(t)$ は, 運動方程式を解くことにより,

$$g(t) = \frac{-\left(\frac{f}{f_n}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right\}^2 + \left(\frac{2\zeta f}{f_n}\right)^2}} A \sin(\omega t - \phi) \quad \dots\dots\dots (10)$$

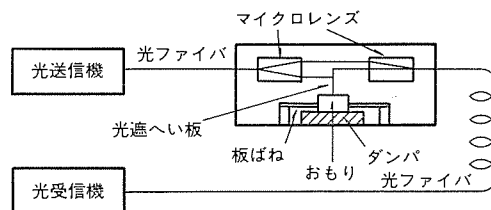


図 9. 慣性系を用いた光ファイバ応用振動・加速度測定装置の構成図

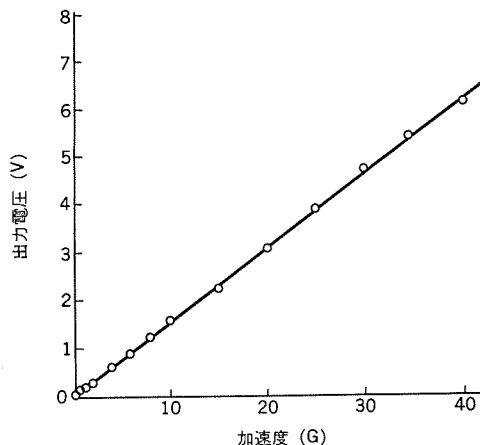


図 10. 加速度と光受信機出力電圧の関係

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{2\zeta \left(\frac{f}{f_n}\right)}{1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2} \right] \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここで, f_n, ζ は, それぞれ慣性系の固有周波数, ダンピング係数を表す。

振動体の振動数が $f \ll f_n$ を満足するとき, 式(10)は,

$$g(t) = -\left(\frac{f}{f_n}\right)^2 A \sin 2\pi f t \frac{1}{f_n^2} \frac{d^2 h(t)}{dt^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

となり, $g(t)$ は振動体の加速度に比例する。すなわち, 光遮へい板を通過する光強度は, 振動加速度に比例する。

以下, 一例として, 慣性系の固有振動数 f_n を 2 kHz に設計したときの光加速度計の特性について述べる。図 10. は, 振動体の加速度と光受信機出力電圧の関係を示したもので, 40 G まで優れた直線性を示している。このとき, 0.1 G 以上の加速度に対して 40 dB 以上の S/N 比を得ている。また, 数 Hz~1 kHz にわたって平坦な周波数特性を得ている。

6.2 光弾性素子を利用した方式⁽⁸⁾⁽¹²⁾

この方式は, 基本的には 5 章で述べた光圧力センサと同じである。光弾性素子上におもりを取り付け, 振動によっておもりの質量と加速度の積に比例した応力が素子に印加されるようにしている。このセンサの透過光の受光素子面上における光強度 P は, 圧力センサと同様に, P_0 を振動がないときの光強度とすると,

$$P = P_0 \left(1 + \sin \pi \frac{T}{T_\pi} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

で与えられる。光弾性素子に印加される応力 T は, 応力印加面の面積を S , おもりの質量を m , 重力加速度を G , 振動振幅を A , その周波数を f とすると,

$$T = \frac{mG}{S} \left\{ 1 - \frac{(2\pi f)^2 A}{G} \sin 2\pi f t \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

で与えられるので、式(7)、式(14)を式(13)に代入すると、

$$P \doteq P_0 \left\{ 1 + \frac{\pi C l m G}{\lambda S} (1 - \alpha \sin 2\pi f t) \right\} \dots\dots\dots (15)$$

となる。 $\alpha = \frac{\omega^2 A}{G}$ は重力単位で表した加速度である。式(15)から、振動加速度による光変調度 β は、

$$\beta \doteq \frac{\pi C l m G \alpha}{\lambda S} \dots\dots\dots (16)$$

で与えられる。したがって β/α に比例する検出感度は、質量 m 及び光弾性定数 C に比例することがわかる。また、検出される振動加速度を電氣的に積分すれば速度や変位を測ることもできる。

以下、光源に AlGaAs 系 LED、受光素子に Si-PIN PD、光ファイバに石英系多モードファイバ、また光弾性素子にエポキシ樹脂 ($C=5.2 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, $l=2.8 \text{ cm}$, $S=0.5 \times 2.8 \text{ cm}^2$) を用いた時の実験例を述べる。 $m=25 \text{ G}$, $f=250 \text{ Hz}$ のとき、 $\alpha=30 \text{ G}$ まで優れた直線性が得られる。また、同一質量で $f=3 \text{ kHz}$ までは平坦な周波数特性が得られている。

7. む す び

本稿では、当社で開発した各種光ファイバセンサの原理、性能について述べた。これらの中で、光ファイバ電流(磁界)センサ、電圧(電界)センサ、温度センサに関しては、既に製品化段階にある。その他のセンサについても、今後、長期的な安定性、信頼性を検討し、順次製品化する予定である。

光ファイバセンサの特長は、前述したように、高電磁界、化学雰囲気、

狭間げきなどの悪環境下でも、安全、高精度に計測できることである。今後、個々の光ファイバセンサの特性を更に改善し、低価格化を図ることにより、光ファイバセンサは、電力系統や工業プラントのみならず軍用機器、医療機器、車両など様々な分野に応用されるものと思われる。

参 考 文 献

- (1) 久間ほか：電気学会誌, 102, No. 5, P. 380 (昭57)
- (2) 久間ほか：三菱電機技報, 57, No. 10, P. 62 (昭58)
- (3) K. Kyuma et al : IEEE J. Quantum Electron, QE-18, 10, P. 1,619 (1982)
- (4) K. Kyuma et al : IEEE J. Lightwave Technol., LT-1, 1, P. 93 (1983)
- (5) K. Kyuma et al : IEEE J. Quantum Electron., QE-18, 4, P. 676 (1982)
- (6) 田井ほか：弾性波デバイス小委員会, 京大, (昭59-1)
- (7) S. Tai et al : Proc. of the 1st Sensor Symposium, P. 255 (1981)
- (8) S. Tai et al : Appl. Opt., 22, No. 11, P. 1,771 (1983)
- (9) 久間ほか：電気学会, 光量子デバイス研究会資料, OQD-82-71 (1982)
- (10) 滝岡ほか：センサ技術, 2, No. 11, P. 51 (昭57)
- (11) 佐藤ほか：昭和58年電気学会全国大会, No. 839
- (12) 田井ほか：電子通信学会技術研究報告, OQE 81-110 (昭56)

光ファイバセンサ —レーザ干渉形—

久間 和生*・田井 修市**・布下 正宏*・福田 稔***・永尾 俊繁+

1. ま え が き

最近、国内外において、温度、圧力、磁界などの各種物理量を光学的に計測する光ファイバセンサの研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁽²⁾。光ファイバセンサは、従来の電気式センサに比べ、電源を必要とせず、絶縁性、無誘導性、本質防爆性、軽量・小形などのすぐれた特長を持っており、電力分野、工業プラント、軍用機器、航空機など幅広い分野での応用が期待されている。

光ファイバセンサは、①光ファイバ自身を信号ピックアッププローブ又はセンサに用いる光ファイバ機能形センサ方式と、②光ファイバ以外の光センサで強度変調された信号の伝送路に光ファイバを使用する光ファイバ伝送路形センサ方式に分類できる⁽³⁾。特に光ファイバ機能形センサは、一般的に被測定物理量によって光波の周波数や位相を変調することが多いので、高感度特性が得られる利点がある。本稿では、当社で開発した光ファイバ機能形センサとして、光ファイバレーザドップラ速度計、光ファイバジャイロを取り上げ、これらの原理、性能、今後の問題点について述べる。

2. 光ファイバ LDV

当社では、小形 He-Ne レーザ（発振波長 $\lambda_0 = 0.6328 \mu\text{m}$ 、出力 $P_0 = 2 \text{ mW}$ ）を光源に用いた汎用形光ファイバレーザドップラ速度計（光ファイバ LDV）、及び黒色物体や高温物体の速度測定を目的として高出力 Ar イオンレーザ（ $\lambda_0 = 0.5145 \mu\text{m}$ 、 $P_0 = 2 \text{ W}$ ）を用いた高感度光ファイバ LDV を製品化している。また、小形、軽量、安価で直接変調が可能な半導体レーザを用いた光ファイバ LDV の研究・開発を進めている。以下、これらの光ファイバ LDV の構成、原理、性能、今後の問題点について述べる。

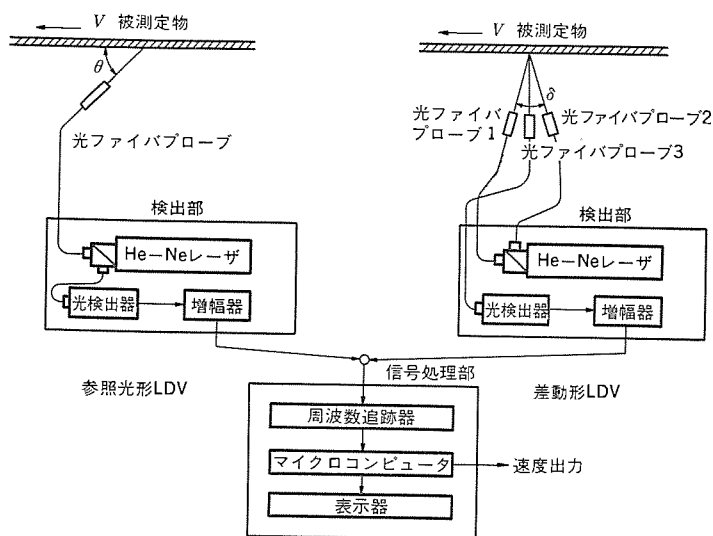


図 1. He-Ne レーザを用いた光ファイバ LDV の構成図

2.1 He-Ne レーザを用いた光ファイバ LDV⁽⁴⁾⁽⁵⁾

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入射光の元の周波数からシフトする。このレーザ光のドップラ効果を利用し、光の伝送路及び信号ピックアッププローブに光ファイバを用いた速度計を光ファイバレーザドップラ速度計（光ファイバ LDV）と呼ぶ。光学系の構成法によって光ファイバ LDV は参照光形と差動形に分類できる。

図 1. に示すように参照光形光ファイバ LDV では、光ファイバプローブ（光プローブ）からの出射光を計測対象に照射し、ドップラ効果を受けた後方散乱光を信号光として同一光プローブで受光する。この信号光と光プローブ先端で反射された参照光とを受光素子に導いて光ヘテロダイン検波することによりドップラ計測信号を得る。このとき、被測定体の速度を V 、その運動方向と照射光ビームの角度を θ とすると、検波された電気信号の周波数 f_D は、

$$f_D = \frac{2n}{\lambda_0} V \cos \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここで n は被測定体周辺媒体の屈折率である。上式より f_D を測定することにより V を知ることができる。

一方、図 1. の差動形光ファイバ LDV では、光プローブ 1, 2 から出射され計測対象で正負逆に同じ量だけ周波数シフトをうけた散乱光を、光プローブ 3 で検出し受光素子でヘテロダイン検波する。このとき、光プローブ 1, 2 からの出射光ビームのなす角度を δ とすると、検波信号の周波数 f_D は

$$f_D = \frac{2n}{\lambda_0} V \sin \frac{\delta}{2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。

式(1)又は式(2)で与えられる検波信号を周波数追跡器で信号処理することにより、被測定体の速度 V を知ることができる。

昭和 58 年に当社で製品化した光ファイバ LDV の外観写真を図 2. に、また特性仕様を表 1. に示す。光源には、出力約 2 mW の小形 He-Ne レーザを使用している。参照光形、差動形光ファイバ LDV とともに、1~2,000 m/min の範囲の速度を

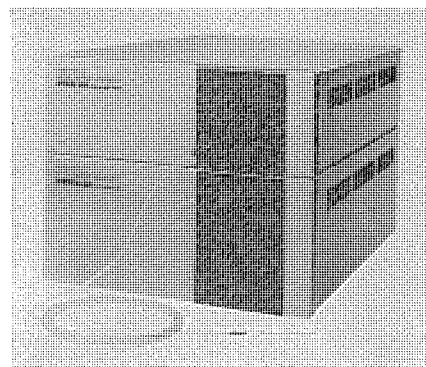


図 2. He-Ne レーザを用いた光ファイバ LDV の外観

表 1. He-Ne レーザを用いた光ファイバ LDV の仕様

1. 測定方法	レーザドップラ方式
2. レーザ	He-Ne ガスレーザ 出力約 2mW
3. 光検出器	APD (アバランシェフォトダイオード)
4. 測定範囲 (m/min)	3レンジ手動切換 (1) レンジ1 1~ 20 (2) レンジ2 10~ 200 (3) レンジ3 100~2,000
5. 測定精度	(1) シングルビーム方式 (LV-101 S 形) $\pm 0.5\%$ FS (2) 差動方式 (LV-101 T 形) $\pm 0.2\%$ FS
6. 出力信号	アナログ出力 (各レンジのフルスケールで DC 10 V)
7. 表示	デジタル表示 (BCD 4けた)
8. 所要電源	AC 100 V ± 10 V (50/60 Hz) 200 VA 以下
9. 寸法(mm)・重量(kg)	検出部 430×430×150 約 12 信号部 430×430×200 約 17
10. 周囲温度(°C)・湿度(%RH)	+5~+50 90 以下

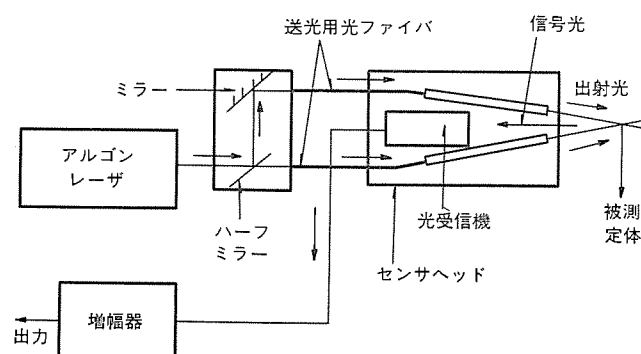


図 3. Ar レーザを用いた光ファイバ LDV の構成図 (光プローブ (a) 使用時の構成)

$\pm 0.5\%$ 以下の高精度で非接触計測できる。この光ファイバ LDV は、鉄、非鉄金属、紙、繊維、フィルムなどプラント内の製品の移動速度測定用機器として実用化されている。今後は、物体の非接触微小振動計測、液体・気体の流速計測への実用化が期待される。

2.2 Ar イオンレーザを用いた光ファイバ LDV⁽⁶⁾

散乱光が微弱な黒色物体や高温物体、あるいはガス流体など、He-Ne レーザでは測定が困難な計測対象への応用を目的として、高出力の Ar イオンレーザ ($\lambda=0.5145 \mu\text{m}$, 最大出力パワー=2 W) を用いた光ファイバ LDV を開発した。

図 3. に装置の構成図を示す。光プローブとして、

- (a) 送受光プローブを共用させた参照光形 LDV 用光プローブ
- (b) 交差角 5° の 2 本の送光プローブと 1 本の受光プローブを一体化した差動形 LDV 用光プローブ
- (c) 交差角 10° の 2 本の送光プローブと光受信機とを一体化した差動形 LDV 用光プローブ

を開発した。いずれの場合も、送光用光ファイバにはコア径 $50 \mu\text{m}$ の GI ファイバを使用し、被测定体による散乱光は Si-APD を受光素子に用いた帯域 60 MHz の光受信機で受光している。図 4. に装置の外観写真を示す。

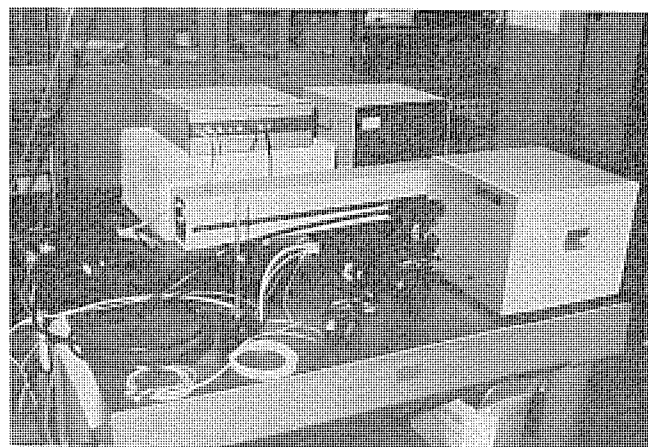


図 4. Ar レーザを用いた光ファイバ LDV の外観

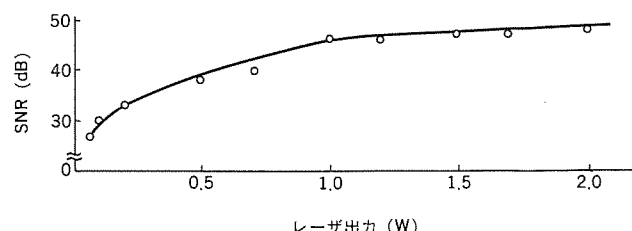


図 5. Ar レーザ出力パワーとドップラ計測信号の S/N 比 (光プローブ (c) 使用時)

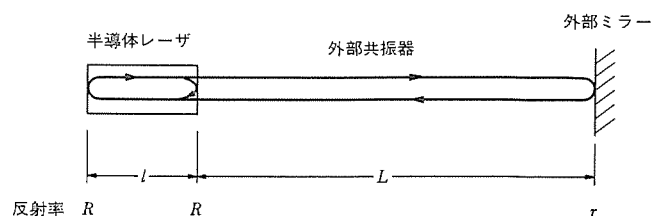


図 6. 外部共振器形半導体レーザの基本構成図

図 5. に、光プローブ (c) を用いた LDV の送光プローブ 1 本当たりのレーザ出射パワーと、スペクトルアナライザで観測されたドップラ計測信号の S/N 比の関係を示す。被测定体には Al 製回転円板を用いた。この円板と光プローブ先端との距離は約 100 mm である。図に示すように、光プローブ出射パワーを 0.2 W、速度を 8.9 m/s としたとき、S/N 比は 40 dB 以上得られている。この値は、前述した小形 He-Ne レーザを用いた光ファイバ LDV による S/N 比と比較して約 15 dB 程度大きい。光プローブ (a), (b) に関しても同様の結果が得られた。なお、この装置では、広帯域光受信機を使用しているので最大 18,000 m/min の速度測定が可能である。

2.3 半導体レーザを用いた光ファイバ LDV⁽⁷⁾⁽⁸⁾

光ファイバ LDV をはじめとする光ファイバセンサの分野では、周波数安定性に優れ (低雑音)、発振スペクトル線幅 $\Delta\nu_{SL}$ の狭い (高コヒーレンス) 半導体レーザが必要である。ところが、現状の縦単一モード発振半導体レーザは、発振波長が温度に対して $2\sim 3 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$ 程度変化し、 $\Delta\nu_{SL}$ が数 $\sim 100 \text{ MHz}$ 程度で十分な特性を持っていない。当社では、半導体レーザの発振スペクトルを高品質化する一つの方法として、外部共振器形半導体レーザを検討し光ファイバ LDV への適用を進めている。

外部共振器形半導体レーザの基本構成図を図 6. に示す。同図にお

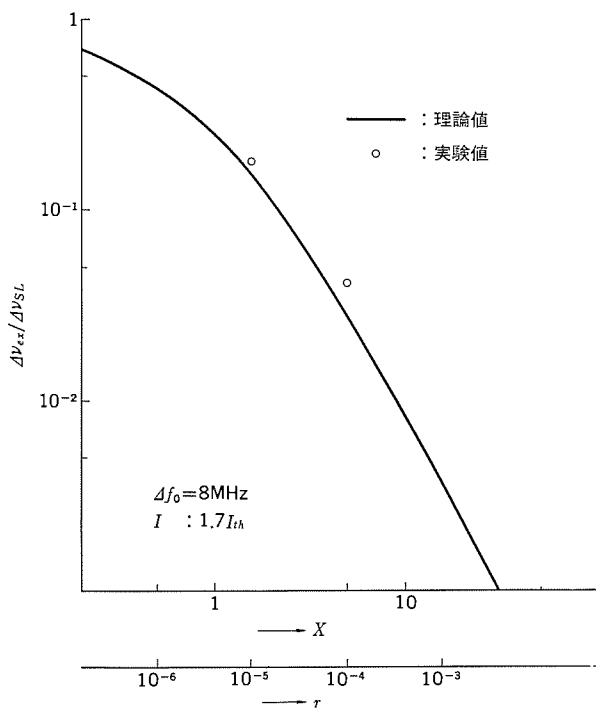


図 7. 光帰還パラメータ X と規格化発振スペクトル線幅 $\Delta\nu_{ex}/\Delta\nu_{SL}$ の関係

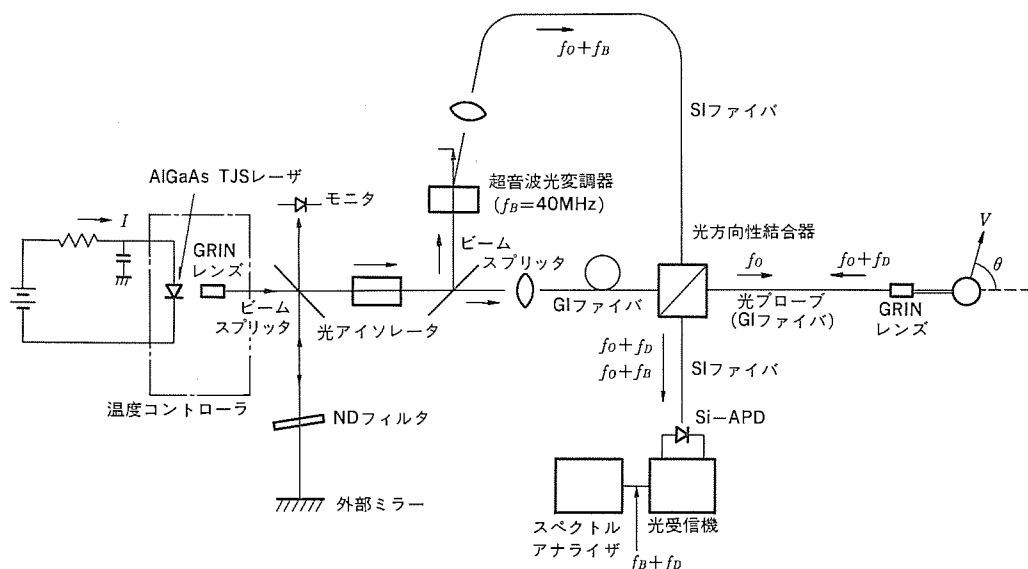


図 8. 外部共振器形半導体レーザーを用いた光ファイバLDVの構成図

いて、外部共振器長 L が半導体レーザーの実効的共振器長 $l' (=nl, n: \text{屈折率})$ の整数倍、すなわち、外部ミラーからの光が、レーザー共振器内の光電界に対して“in phase”の状態で帰還する場合、 $\Delta\nu_{ex}$ は、

$$\Delta\nu_{ex} \approx \frac{\Delta\nu_{SL}}{(1+X)^2} \quad (3)$$

で表せる⁽⁹⁾。ここで、 $\Delta\nu_{SL}$ は半導体レーザー単体の発振スペクトル線幅⁽¹⁰⁾、 X は光帰還パラメータ⁽⁹⁾であり、 $\Delta\nu_{ex}$ は X^2 に反比例することが分る。図 7. に、発振波長 $0.83 \mu\text{m}$ の AlGaAs 系 TJS (Transverse Junction Stripe) レーザを用いた外部共振器形半導体レーザーの、発振スペクトル半値全幅 $\Delta\nu_{ex}$ と X の関係の実測値を示す。 $\Delta\nu_{ex}$ は

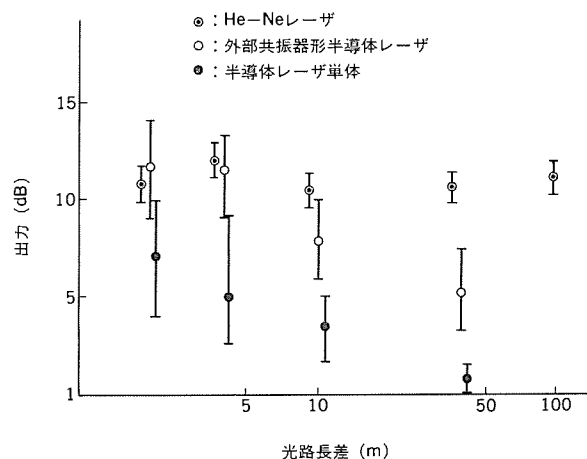


図 9. 光路長差 OPD と検波出力の関係

遅延ヘテロダイン法によって測定した⁽¹¹⁾。半導体レーザー単体の $\Delta\nu_{SL}$ は、レーザー駆動電流を $I=1.7 I_{th}$ の時約 8 MHz である。図 7. から $X \approx 6$ のとき、外部共振器形半導体レーザーの $\Delta\nu_{ex}$ は $\Delta\nu_{SL}$ と比較して約 1/20 (約 0.5 MHz) に減少していることがわかる。このとき、コヒーレント長 $l_c (=C/2\pi\Delta\nu_{ex})$ は約 100 m である。 $X > 6$ にすると半導体レーザーは縦多モード発振をした。

外部共振器形半導体レーザーを用いた参照光形光ファイバLDVの構

成図を図 8. に示す。この光ファイバLDVでは、外部共振器形半導体レーザーからの出射光(周波数 f_0)は、光アイソレータを介してビームスプリッタで2分岐される。2分岐された一方のレーザー光は信号光として光方向性結合器を介して光プローブ(GIファイバ)に入れられる。一方、他方のレーザー光は速度方向を区別するために超音波光変調器で40 MHzだけ周波数シフトされた($f_0 + f_D$)後、参照光として光方向結合器に入れられる。光プローブから出射され被測定体でドップラ効果をうけた散乱光($f_0 + f_D$)は、同一光プローブで受光され光方向性結合器に導か

れる。これらの信号光と参照光は合波された後、受光素子面上(Si-PINPD)でヘテロダイン検波される。この検波信号($f_B - f_D$)の周波数を測定することにより被測定体の速度と方向を知ることができる。このとき、検波信号レベル V_D は、光源のコヒーレント長によって、信号光と参照光間の光路長差(OPD: Optical Path Difference)に依存する。図 9. に OPD と V_D の関係を、それぞれ半導体レーザー単体、外部共振器形半導体レーザー、He-Ne レーザに対して示す。同図から、 V_D が OPD=0 のときの値の $1/e$ となる OPD は、半導体レーザー単体の場合約 4 m であるのに対し、外部共振器形半導体レーザーでは約 50 m であることがわかる。これらの値は、前述した $\Delta\nu_{SL}$ 、 $\Delta\nu_{ex}$ の値から予想されるコヒーレント長 l_c とほぼ一致する。

以上のように、外部共振器形半導体レーザを用いることにより、光ファイバ長 25 m で、速度の方向を識別できる参照光光ファイバ DV を実現できることが分る。今後、以上の実験結果に基づいて機械的、熱的に安定した外部共振器形半導体レーザの開発を進める計画である。

3. 光ファイバジャイロ스코ープ

ロケット、人工衛星、航空機などの姿勢制御を行うためにはジャイロ스코ープを使用した慣性航法装置が不可欠である。最近、光ファイバや半導体発光素子の著しい進歩に伴い、光ファイバを用いた光学式ジャイロの研究が活発に行われている。光ファイバジャイロでは、光源からの光を2分し、単一モード光ファイバループ内を各々右回り、左回りに伝搬させたとき、回転により生ずる左右両光間の位相差 ϕ から回転角速度 Ω を検出する。この ϕ は次のように表される⁽¹²⁾。

$$\phi = \frac{4\pi L_f a}{c\lambda_0} \Omega \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 L_f は光ファイバ長、 a はそのループ半径、 c は光速、 λ_0 は光の波長である。通常の方法で左右両回り光を互いに干渉させた干渉縞から検出される干渉強度は $\cos \phi$ に比例するため、微小の ϕ に対する検出感度が低い。感度向上のために左右両光間に $\pi/2$ の位相差を与えて干渉強度が $\sin \phi$ に比例するようにして感度の最適化が図られる。この感度最適化法として、周波数変化法、位相変調法、光ヘテロダイン法などが考案されている⁽¹³⁾。光ファイバジャイロの理論検出限界は極めて高く、例えば、光ファイバ長 4.3 km、ループ径 30 cm、減衰定数 2 dB/km、光パワー 1 mW、帯域 1 Hz としたとき、 10^{-8} rad/s の回転角速度が検出できる⁽¹²⁾。本稿では、当社で開発中の光ファイバジャイロについて説明する。

3.1 位相変調方式光ファイバジャイロ

図 10. に位相変調方式の光ファイバジャイロの構成図を示す⁽¹³⁾。位相変調器としては $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶のポッケルス素子を使用している。光源は発振波長 $0.83 \mu\text{m}$ の半導体レーザ、受光素子は Si-APD、光ファイバはループ径 20 cm、長さ 1 km の単一モード光ファイバを使用している。レーザからの光はビームスプリッタで2分され、一方は位相変調器、偏光子を通過したのち光ファイバに結合され、他方は偏光子を通

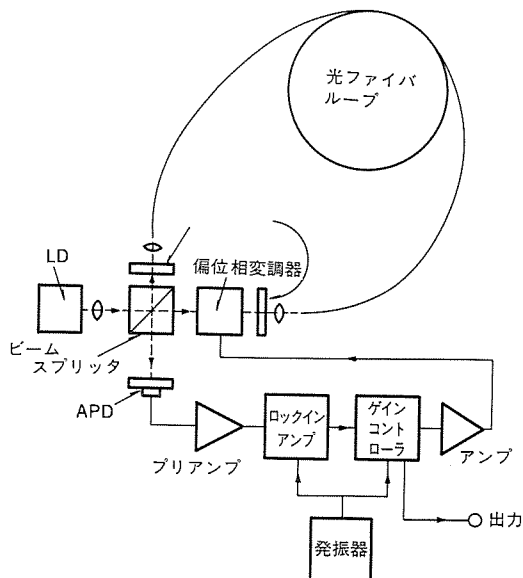


図 10. 位相変調方式光ファイバジャイロの構成図

過したのち光ファイバに結合される。二つの偏光子は光ファイバ入射出光の偏光面をそろえるために使用される。二つの光ファイバ出射光は、再びビームスプリッタによって合波され APD 受光面上で干渉する。

いま、位相変調器が周波数 f_m で駆動されており、位相変調振幅が ϕ_0 であるとする。このとき、APD 受光面上での右回り光、左回り光の干渉強度のうちの周波数 f_m なる基本波成分のみを同期検波すると、その出力は A を定数として

$$V = AJ_1(2\phi_0) \sin \phi \approx AJ_1(2\phi_0) \phi \quad (\because \phi \ll 1) \dots\dots\dots (5)$$

となり、感度の最適化がなされる。 J_1 は 1 次のベッセル関数であり、この V は系が静止しているときはゼロである。信号の検出は、系が回転しても常に $V=0$ となるように制御された位相変調器の駆動電圧をモニターすることにより行う。位相変調器の変調周波数 f_m は光ファイバ長が 1 km ($\tau \approx 5 \mu\text{s}$) のため、100 kHz に設定される。

図 11. はジャイロ系の出力電圧と回転角速度との関係をプロットしたものである。回転角速度の短期分解能は 9×10^{-5} rad/s であり、 10^3 程度のダイナミックレンジを持っている。このジャイロ出力信号のドリフト特性を図 12. に示す。途中で $\pm 6 \times 10^{-4}$ rad/s に相当する回転を与えてある。図 12. によれば、短期的な雑音レベルは 10^{-5} rad/s のオーダーであり、長期的な分解能は 5×10^{-4} rad/s に相当するドリフトによって制限される。このジャイロはビームスプリッタ、位相変調器などの個別光学部品で構成されているので、作製が容易な反面、各素子端面からのフレネル反射が雑音源となり、また光軸ズレが生じやす

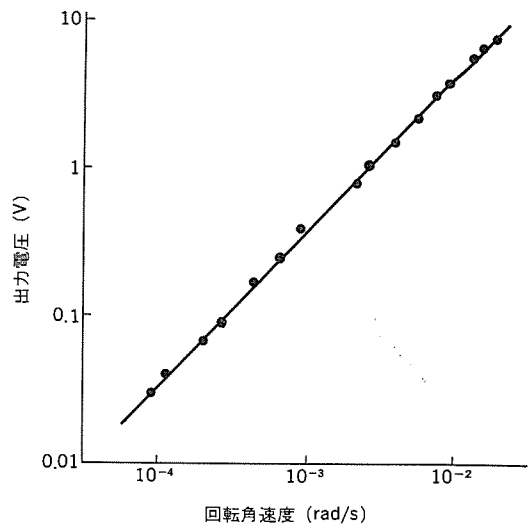


図 11. 回転角速度とジャイロ出力の関係

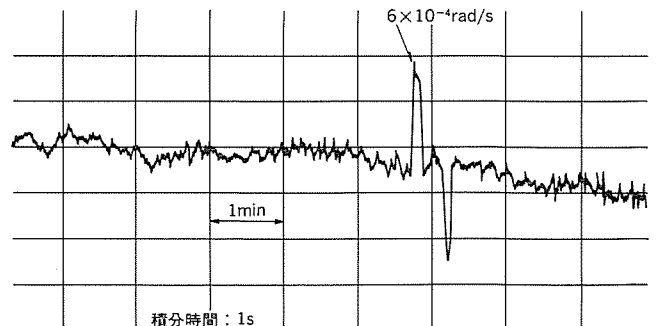


図 12. ドリフト特性

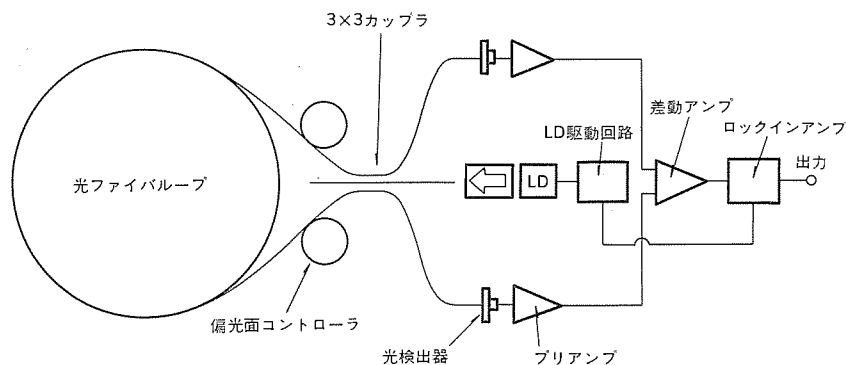


図 13. オール 光 ファイバジャイロ の構成図

いなど信頼性の面で更に改善を要する。

3.2 オール光ファイバジャイロ

当社では、上述の問題点を除去するために、光源から受光素子に至る全光路を光ファイバで構成した図 13. に示すようなオール光ファイバジャイロを開発中である⁽¹⁴⁾。図 13. に示すような 3×3 カップラを使用すれば、光ファイババルブの左右両回り光に自動的に $\pi/2$ の位相差が与えられ、感度が最適化される⁽¹⁵⁾。3×3 カップラは、3 本の光ファイバ心線を互いにねじり、若干の張力を加えた状態で固定してバッファ弗酸 ($\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}=1:4$) でエッチングすることにより作製される。このカップラの挿入損失は約 3 dB である。半導体レーザは 150 kHz でパルス駆動されており、二つの光ファイバ出射光は APD で電気信号に変換されたのち、差動増幅され同相雑音が除去される。プリアンプのゲインを調節し、静止の状態で差動増幅器出力をゼロにしておけば、回転が与えられたとき二つの信号の一方は増加、他方は減少するので、差動増幅器出力は回転に応じて変化する。この出力をレーザ駆動パルスに同期させて検出することにより回転角速度が分かる。現在、このジャイロ検出分解能は $10^{-4}\sim 10^{-5}$ rad/s である。

以上説明した二つのタイプの光ファイバジャイロの検出感度は、どちらも理論検出限界に達していない。この原因として、光ファイバ中の後方レーザ散乱光と信号光とが干渉することにより生ずる雑音、光ファイバ中を伝搬する光の偏光面が変動することにより生ずる雑音な

どが挙げられる。今後は、上記の問題点を解決し、さらに高感度で高精度のジャイロの実現を目指す予定である。

4. む す び

本稿では、当社で開発した光ファイバ LDV 及び光ファイバジャイロの構成、原理、性能、今後の問題点について述べた。今後は、これらの光ファイバセンサの性能向上を進めるとともに、高品質半導体レーザの開発、計測システムの光源の固体化を更に進める予定である。

参 考 文 献

- (1) T. G. Giallorenzi et al : IEEE J. Quantum Electron, QE-18, No. 4, p. 626 (1982)
- (2) 久間ほか：電気学会誌, 102, No. 5, p. 380 (昭 57)
- (3) 久間ほか：電子通信学会誌, 65, No. 5, p. 563 (1982)
- (4) K. Kyuma et al : Appl. Opt., 20, No. 14, p. 2,424 (1981)
- (5) 久間ほか：オプトロニクス, 1, No. 1, p. 40 (1982)
- (6) 久間ほか：昭和 59 年春季応用物理学学会発表予定
- (7) K. Kyuma et al : OFC '84, Technical Digest, TuJ2, New Orleans (1984)
- (8) 久間ほか：電子通信学会誌, 67, No. 2, p. 224 (1984)
- (9) S. Saito et al : IEEE J. Quantum Electron., QE-18, No. 6, p. 961 (1982)
- (10) C. H. Henry : IEEE J. Quantum Electron., QE-18, No. 2, p. 259 (1982)
- (11) T. Okoshi et al : Electron, Lett, 16, No. 16, p. 630 (1980)
- (12) 保立ほか：計測と制御, Vol. 20, No. 10, p. 937 (1981)
- (13) S. Tai et al : Proceedings of the 3rd sensor symposium 179 (1983)
- (14) 田井ほか：昭和 59 年度電子通信学会総合全国大会発表予定
- (15) S. K. Sheem : Appl. Phys. Lett., Vol. 37, No. 10, p. 869, (1980)

レーザ式パイプ表面検査装置

亀井 光 仁*・中島 利 郎*・西 川 啓**

1. ま え が き

生産ラインの自動化が進んでいる中で、表面きず(疵)の検査は視覚検査特有の難しさがあり、目視検査が主流であった。しかしながら製品の品質化・製造ラインの省力化の要請を受けて、最近ではこれら検査の自動化が進められており、いろいろな光学検査装置が開発されてきた。この光学表面検査装置の代表例として挙げられるのが、レーザ光による板材・シート材の表面検査装置であり、視覚代替検査装置の中では数少ない成功例とされている⁽¹⁾。しかしながら、板材に次いで生産量が多い棒材・パイプ材・線材などの表面検査は、試料形状が円筒状であるために、投光・受光の光学系の構成が難しく、実用化には多くの問題点があった。

これに対し、ここで紹介するパイプ表面検査装置は、パイプ表面に小さく集束したレーザ光を、パイプ円周方向に回転走査させることにより、均一・高感度な分解能を得ると同時に、パイプを回転せずに走行させることを可能にしたもので、この種の検査としては初めてオンライン化が検討できる段階に達した。ここでは、このパイプ表面検査装置の特長、装置概要などについて紹介する。

2. 仕様及び特長

レーザ光の回転走査方式によるパイプ表面検査装置の標準仕様を表1に示す。この装置は3mmφから40mmφまでの径を持つパイプ材・棒材の検査が可能であり、1ヘッドで試料全周の検査が可能である。その他この装置の主な特長を表2に示す。

3. 装置の概要

前述のように、このパイプ表面検査装置は、これまでの表面検査装置では得られなかった数多くの特長を持っている。ここではこの装置の詳細に関して、光学系信号処理系の構成及びその動作原理を紹介する。

3.1 検査原理

レーザ光は、金属表面などの粗面に照射した場合、その表面粗さ構造の統計的性質に対応した回折を受ける。この回折現象については従来から理論的な説明が与えられているが⁽²⁾⁽³⁾、回折像自身の形状、光強度分布が表面粗さオーダーの微細構造に影響を受けるため、その変化は数10μmオーダーの微細な表面変化(表面疵)にもよく対応する。したがって、板材の検査の場合と同様に回折パターンの形状に対応した反射光集光系を用意し、回折パターンの形状・強度の変化を検出することにより、板材検査と同程度の疵分解能を得ることは原理的に可能である。

一方、回折現象を利用して、試料全域にわたって均一な疵分解能を実現するには、その領域全体に対し均一な径のレーザ光を走査する必要がある。しかしながら、板のように平坦な試料では、これが可能であるが、パイプ材のように表面が曲率を持つ場合、レーザのスポット径は曲率に依存した大幅な変化を見せる。このため曲率の影響

表 1. 装置の標準仕様

No.	項 目	仕 様
1	検 査 方 式	レーザ円周走査方式
3	光 源	He-Ne レーザ (出力 5 mW)
3	光 電 変 換 器	光電子増倍管
4	検 査 対 象	パイプ, 棒, 電線など
5	感 度 (注1)	欠陥大きさ $\phi 0.1 \text{ mm}$ 以上
6	パ イ プ 径	約 $\phi 3 \sim \phi 40 \text{ mm}$
7	検 査 域	全 局
8	検 査 速 度 (注2)	30 m/min
9	判 定 基 準	要求に応じ設定できるように設計する。
10	良 否 判 定	判定基準に従い良品・不良品の区分けを行う。
11	環 境 条 件	温 度 0~40°C 湿 度 90% 以下
12	出 力 方 式	要求に応じ操作部パネル面に表示及びタイプライタにより印字できる。
13	動 作 及 び 制 御	全自動で運転制御できるものとする。但し、点検・調整時及び故障・異常の発生時には所要の部分を手動で操作できるものとする。
14	異 常 時 表 示	装置の搬送系に異常が発生した場合ブザーを鳴動する。また非常停止可能とする。
15	点 検 機 能	(1) ON-LINE 次を自己点検する。 (a) 受光レベル (b) 走査用ガルバ電流 (c) 位置検出用 PLG (2) OFF-LINE (a) CPU チェックサム (b) テストピースによる感度チェック (c) ビームスポット・チェック なお、点検用オシロスコープを信号処理装置に組み込むものとする。
16	外形寸法 (mm)	1700(W)×800(H)×630(D)
17	所 要 電 源	電 圧 AC 100 V \pm 10% 周 波 数 50/60 Hz 消費電力 1 kVA 以下 (但し、搬送系を除く)
18	接 地	特別第3種

(注1) 被検査物の表面状態が鏡面または数μmの表面粗さで、反射率が1様である場合。

(注2) 検査速度は被検査物の形状・寸法、検出すべき欠陥の性状、大きさによる。

表 2. 装置の主な特長

- | | |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) 欠陥検査分解能が高い | ……レーザ方式であるため分解能が高い。(φ0.1 mmの欠陥検出が可能) |
| (2) 非接触で検査が可能 | ……非接触であるために被検査材の損傷、汚損がない。 |
| (3) マイクロプロセッサによる高速多線処理が可能 | ……マイクロプロセッサの使用により、欠陥の有無・クラス分け判定まで高速処理が可能である。 |
| (4) ラインの高速化が可能 | ……目視検査では、ラインスピードが制限されるが、自動化により高速オンライン化できる。 |
| (5) 必要なデータアウトブッ | ……欠陥の位置、程度など、ライン管理資料の出力がトが可能
プリントアウトできる。 |
| (6) 運転操作が容易 | ……オペレーションパネルですべての操作を容易に行うことができる。また、欠陥発生時あるいは装置その他の異常時は、すべてオペレーションパネルに表示され、オペレータは容易にそれらを確認できる。 |
| (7) 検査の定量化が図れる | ……従来の目視検査に起因する疲労、見のがしが無くなり、品質の均一化が得られる。 |

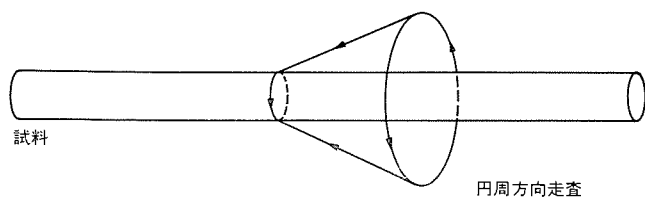


図 1. 投光法の原理図

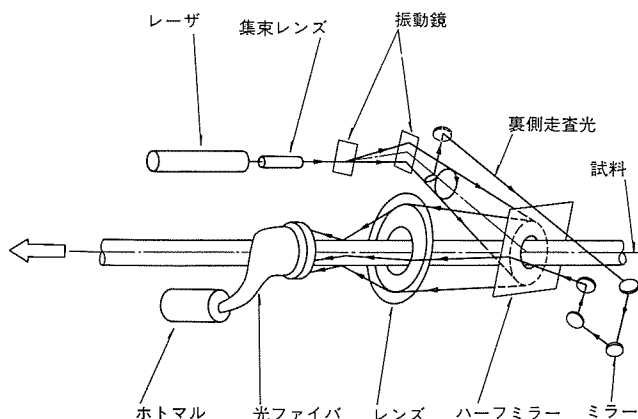


図 2. 光学系の構成

響を受けないような光走査、すなわちパイプ表面に対して同一の条件で光を入射させるような走査法が必要となる。パイプ全表面に対してこのような条件を成立させられる光路は、図 1. に示すように、明らかにパイプ中心軸に中心を持つ同心円上の各点から、パイプ中心軸に向かって光を照射する投光法によってのみ確保できる。

3. 2 光学系構成

前述の仕様を実現するため、この装置において採用した光学系の構成を図 2. に示す。レーザーは出力 5 mW の He-Ne ガスレーザー(波長 6,328 Å)を用いている。レーザーから出た光はパイプ上で適切なスポット径に集束するための集束レンズに入射する。この集束レンズは 2 群構成の複合レンズになっており、レンズ相互間距離を変えることによりスポット径が変えられるようになっている。集束レンズから出た光は、それぞれの回転軸が直交するように対向して設置された 2 個の電磁振動鏡に入射する。ここで、それぞれの電磁振動鏡を互いに位相が 90 度ずれている正弦波信号 ($\sin \omega t$, $\cos \omega t$) によって駆動させると、電磁振動鏡を出た光は円形のリサーチパターンを形成する。このリサーチパターンは、ハーフミラーによってパターン中心をパイプ軸中心に一致させるとともに、その進行方向をパイプ軸方向に変更し、レンズによってパイプ表面上に一定入射角で集束させる。また図 2. において明らかなように、この投光法はパイプ外部で形成した円形リサーチパターンをパイプ軸上に移しているため、ハーフミラーに到達する円形パターンはパイプ自身によってさえぎられ、図 3. に示す“陰”すなわち検査不感帯が発生する。このため、この装置では図 2. に示す裏側走査光を用いて、この“陰”部分を検査している。裏側走査光は円形パターンの“陰”に該当する部分をあらかじめ鏡によって切り出し、試料を迂回する光学系を介して、ハーフミラーの裏側より“陰”に相当する部分に入射させ、不感帯部分をカバーする。このとき、裏側走査系は表側走査系に比較して光路が長く設定されているため、ハーフミラー上での裏側光の走査長は、“陰”の長さより長くなっており実質の検査領域は、表裏境界域でオーバーラップしている。

このような走査によってパイプ表面から発生する回折パターンの移

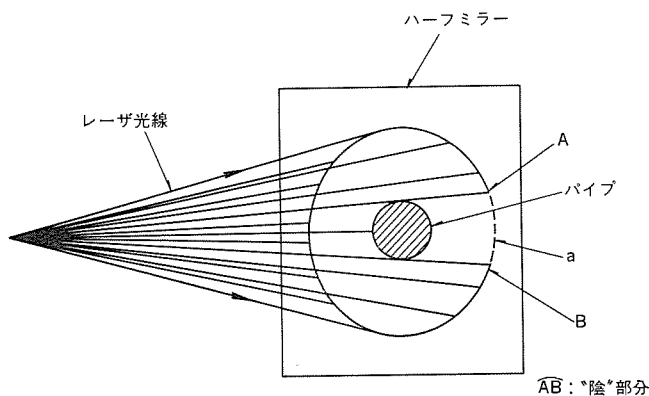


図 3. “陰”部分の説明図

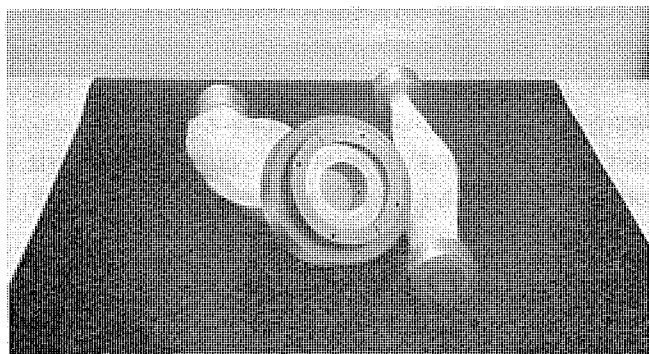


図 4. 光ファイバ束の外観

動軌跡は明らかにパイプ軸を中心とした同心円形状をとる。したがって、この回折パターンを図 4. に示すような開口形状が同じくパイプ軸と同心になるように整形配置された、光ファイバ束によって受光し、光電子増倍管(ホトマル)によって電気信号に変換する。このとき、ファイバ束によって回折パターンを空間的にフィルタリングしている。この状態でパイプを軸方向に搬送することにより、レーザー光はパイプ上に“らせん”状に全面走査される。疵の検出はこれまでの板材の疵検査と同様に回折パターンの乱れに伴う光量変化によるもので、この装置では二重の同心円形状に設定された光ファイバにより、正反射受光、拡散反射受光の二つの系を組み、各々で検出された信号の正負両方向のレベル変化が検出される。なお、光電子増倍管で検出された信号は所定の電圧レベルに増幅された後、高速 AGC (自動利得調整) にかかけられ、波形補正された後に後段の信号処理回路に送られる。なお、図 2. の光学系において光はパイプ表面に斜め入射されるため、反射回折パターンが円弧形状となるが⁽⁴⁾、この円弧の曲率径と回折パターン移動軌跡として得られる円の曲率径を合わせる作業、及び裏側走査光を“陰”の部分に一致させる作業は共に容易である。

3. 3 信号処理系の構成

この装置に採用した信号処理系のブロック構成図を図 5. に示す。同図における主要各部の機能は下記のとおりである。

(1) ガルバドライバ

同期信号発生器からの信号を受けて、位相が正確に 90° ずれた正弦波信号を発生する。円形リサーチパターンの真円度を確保するために、位相差と正弦波電圧の変動を所定の精度以下に抑制している。

(2) アンプ、波形補正

プリアンプを通った後の検査信号を、増幅、AGC の処理を施した後、波形のひずみを補正する。補正信号は適当なスライスレベルによって 2 値化され、マイクロコンピュータシステムに取り込む。

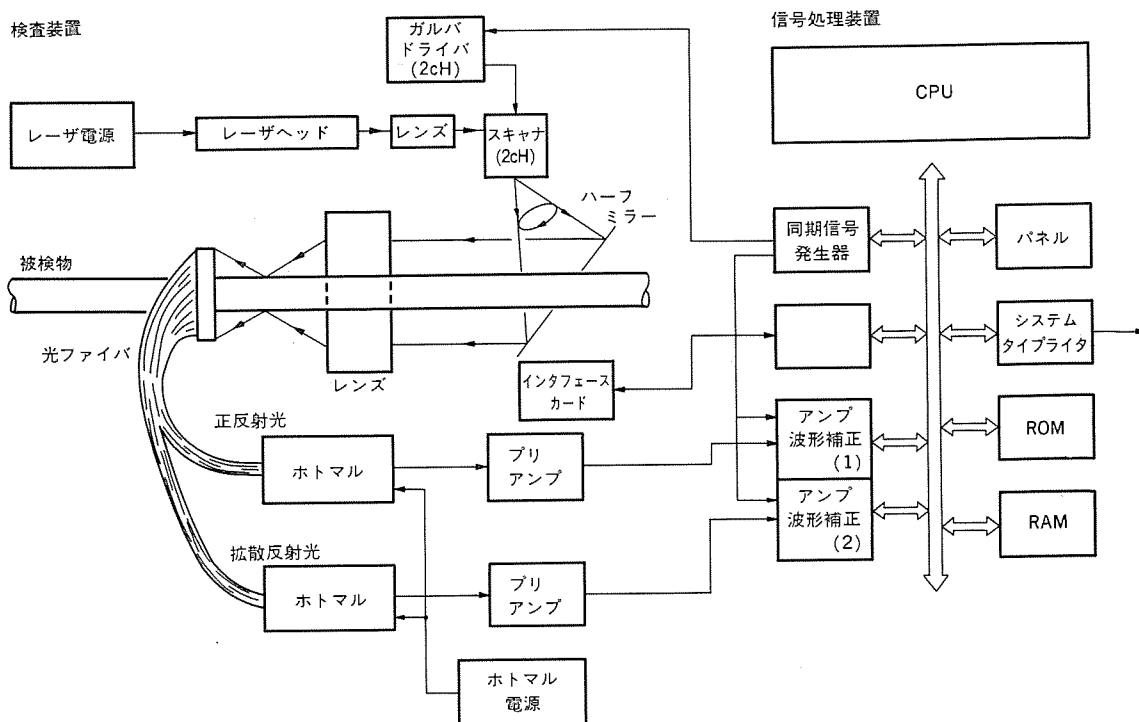


図 5. 信号処理系のブロック構成

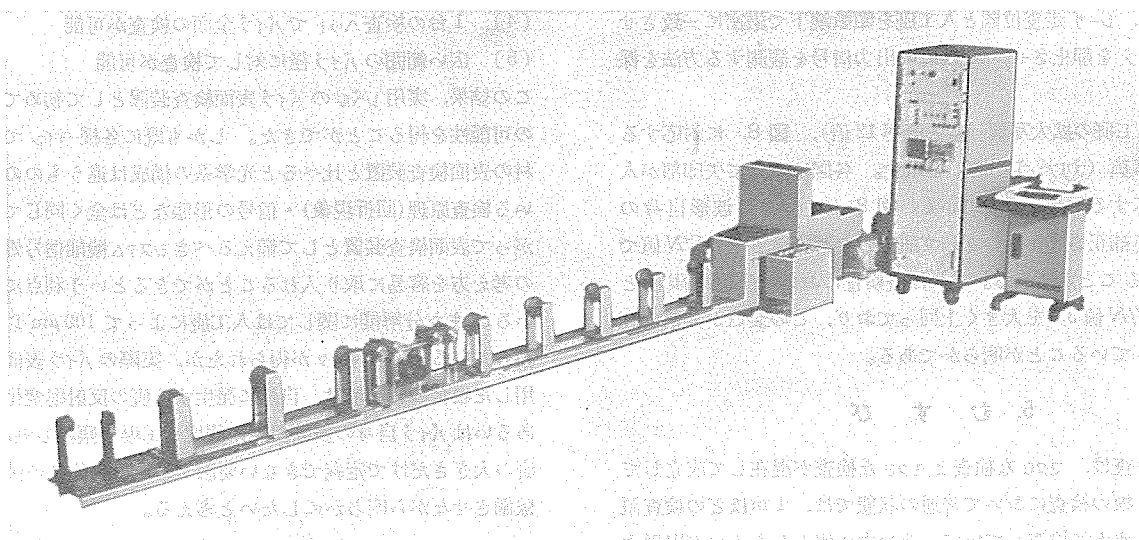


図 6. 装置全体の外観

(3) I/O コントロール

パイプの搬送系とのタイミングをとる機能を持っており、パイプの搬入可否、搬出可否などの信号の受渡しを行う。また必要に応じて被検査パイプの合否判定結果を出力することができる。

(4) パネル

ロット単位での検査総数、合格数の表示、2値化スライスレベルの設定、検査のスタート指令、CPU モードの表示など、日常の使用に必要なマンマシンインタフェース機能がまとめられており、作業者は通常このパネル操作だけで装置の運転をすることができる。

(5) CPU

上記の I/O コントロール、パネル制御、疵判定、検査結果の編集、自己診断など、すべてのデータの処理・制御を統括している。またシステムタイプライタを利用して、対話形式で直接データの入力・操作をすることや、疵発生時にその程度・発生位置をプリントアウトするための、

各種処理・制御を行っている。

3.4 システム動作

このパイプ疵検査装置は、光学的検出部、信号処理部、パイプ挿入機構から構成されており、その全体の外観を図 6. に示す。被検査パイプが搬送機構から送り込まれると、パイプ挿入機構が動作し、パイプを一定速度で光学系の中に挿入する。このとき、パイプ移動用のローラに取り付けられた PLG により、パイプ位置信号がマイクロコンピュータに送られ、疵位置判定の基準信号として利用される。検査結果はパイプ 1 本ごとに集計され、そのパイプの合否判定結果が搬送系への搬送指令信号として出力されると同時に、不良判定品に関しては欠陥のランクと発生位置がプリントアウトされる。一方作業員は通常の検査時において、パイプの搬送及び検査のスタート指令をパネルから与えるだけでよく、操作ミスによる誤動作の可能性をなくすように配慮している。また検査システム全体の信頼性に関しては、電源投入時及び

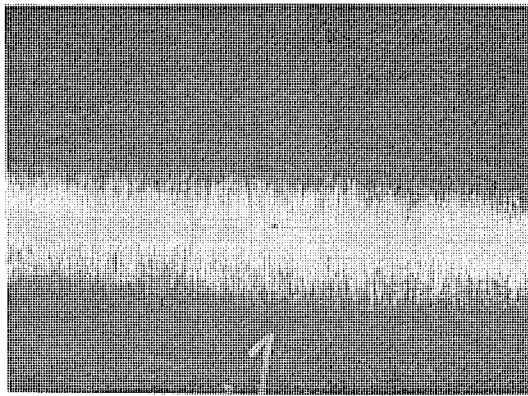


図 7. 人工疵 (100 $\mu\text{m}\phi$)

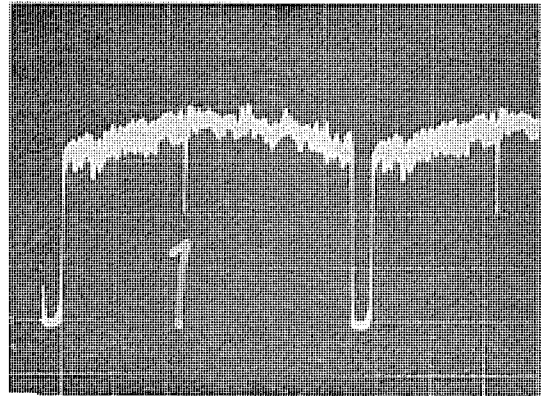


図 8. 疵 信 号

チェックモード選択時において自己診断機能が動作し、異常時にはアラームを出すことによって常に一定のレベルに維持している。

4. 疵の分解能

表面検査装置の分解能は通例として再現性のある人工疵によって定義している。ここでは電氣的に加工条件を容易に設定できる理由から放電加工法により、直径およそ 10 mm ϕ のパイプ表面に 100 $\mu\text{m}\phi$ の疵を作り、装置の分解能を測定した。測定は図 2. の光学系にパイプを挿入し、レーザ走査位置と人工疵を顕微鏡下で厳密に一致させた位置でパイプを静止させ、その時の出力信号を観測する方法を採用した。

図 7. に人工疵の拡大写真 (拡大倍率 12 倍)、図 8. に対応する出力信号の写真 (リアンプ出力) を示す。各図において矢印部が人工疵及び対応する信号を示している。図 8. において、波形自身のシェーディングが補正されたものとして疵信号を評価すると、 S/N 値で 8.7 の値を得ることができる。これは疵検査において疵検出限度とされている S/N 値 3.0 を大きく上回っており、この装置が非常に高い感度を持っていることが明らかである。

5. む す び

人間の目視検査は、マクロな検査とミクロな検査が混在して成立している。例えば板の検査において普通の状態では、1 m ほどの検査領域全体をおおまかに検査していて、その中に疵らしきものが出現すると、その部分を注視してのランク・種類を判定することができる。このために処理 (検査) 速度を落さずに、しかも一定の検査レベルを維持することが可能となっている。しかしながら、何らかの理由でマクロな検査ができない、すなわち検査領域全体を見通せない場合、一定の検査レベルを維持するための検査速度は極端に低下する。パイプ材のように、検査表面が 3 次元形状を持っている場合がこれに該当する。このため、これまでに各種の光学的検査装置が開発されてきたが、分解能が低い・分解能にムラがある・パイプの回転送りが必要など、多くの問題を持っていた。

これに対し、ここに紹介したパイプ表面検査装置は、パイプの周囲をレーザ光が回転走査するという新しい試みを取り入れることによって、従来のこの種の検査機にはない次のような特長を持つことができた。

- (1) 検査原理として光の回折現象を利用することができ、高感度な検査が可能
- (2) パイプ全周に対し感度が均一
- (3) パイプの回転送りが不要
- (4) 1 台の検査ヘッドでパイプ全面の検査が可能
- (5) 広い範囲のパイプ径に対して検査が可能

この結果、実用レベルのパイプ表面検査装置として初めてオンライン化の可能性を得ることができた。しかも既に各種ラインで稼働中の板材の表面検査装置と比べると光学系の構成は違うものの、利用している検査原理 (回折現象)・信号の形態などは全く同じであり、したがって表面検査装置として備えるべきシステム機能信号処理方法などの考え方を容易に取り入れることができるといふ利点にも恵まれている。また分解能に関しては人工疵によって 100 μm 以下の感度を持っているというデータが得られたが、実際のパイプ表面疵検査に適用した場合の分解能は、自然に発生する疵の反射率変化や形状変化、あるいはパイプ自身の表面粗さの程度や工場の塵埃レベルなど、単に疵の大きさだけで定義できない要因があり、今後この装置を実際に稼働させながら明らかにしたいと考える。

参 考 文 献

- (1) 鈴木ほか：三菱電機技報，56，No. 5，P. 353 (昭 57)
- (2) T. Inari：Proc. 16th, S. P. I. E., Annual Meeting, Vol. 47, No. 53, P. 1,658
- (3) 稲荷ほか：三菱電機技報，51，No. 5，P. 334 (昭 52)
- (4) 稲荷ほか：計測自動制御学会論文集，13，No. 1，P. 64 (昭 52)
- (5) 柳沼ほか：第 21 回 SICE 学術講演会予稿集，P. 211 (昭 57)

近赤外撮像暗視システム

安西良矩*・西勝健夫*・山際豊行**・三村和洋**

1. ま え が き

産業用テレビジョン (ITV) システムの昭和55年～57年度の市場動向は、最近の景気の低迷と普及の一巡により大きな伸長は見られなかった。しかし、最近の社会環境は、防災・保安体制の充実、安全確保のためのシステム化などへの欲求に根強いものがある。また各産業分野では現在設備投資が抑制されてはいるものの、低成長経済を乗り切って次の高度情報化社会に適合して行くために、省力・合理化への投資と光通信システムを軸としたコンピュータ情報システムへの対応を今後着実にやるものと考えられる。これらへの対応には、ますます ITV システムが多くの係り合いを持ってくるので、今後は今まで以上に ITV システムに新技術を投入し社会ニーズを掘り起こすとともに、社会の要求に的確にこたえてゆくことが必要となる。

こうした状況に対処するため、ITV システムに画像処理技術や新しい伝達方式などを採用し活用されてきているが、今回更に新技術として近赤外線を利用し暗視機能を付加した「近赤外撮像暗視システム」を開発した。明るさに関係なく撮像でき、しかもコストパフォーマンスの良い汎用性のあるシステムにしたことに特長があり、ITV システムの用途拡大を図り、潜在ニーズの具現化をねらったものである。以下このシステムの概要を紹介する。

2. 開発のねらいと特長

現在の ITV システムは、ごく特殊な装置を除き何らかの可視光の下でなければ使用できない、これを赤外線を利用し明るさに関係なく映像化する機能を付加すれば、従来の可視光を対象とした ITV 市場を一変させ、暗闇で映すという潜在ニーズに対応する新用途開発が可能になると考えられる。赤外線を利用して暗闇の物体を映像化する暗視システムには、大別するとパッシブ方式とアクティブ方式の2方式がある。パッシブ方式は、あらゆる物体の表面から赤外線が放射されているのに着目し、この放射分布をリモートセンシングして表面温度パターンとしてとらえ、物体を映像化する方式であり、2～14ミクロン帯の赤外線を利用している。これに対してアクティブ方式は、可視光線を出さない赤外光源と赤外撮像デバイスとを組み合わせ、光源から放射され被写体から反射されてくる赤外線を撮像デバイスでとらえ映像化する方式で、一般の可視領域の映像化手法と類似したものである。前者のパッシブ方式では、最近の半導体技術の進歩で TV フォーマットの実用可能レベルの画像を得るものも開発されてはいるが、現状ではデバイスの動作温度 (−196℃以下) が低く、また解像度、特性の安定性など解決すべき点が多く、広く一般用として使用されるまでに至っていない。

一方暗視システム利用分野の中で監視用など幾つかの分野では、アクティブ方式のシステムが十分利用できる。アクティブ方式は、常温で動作が可能な赤外域に感度をもつ一般の撮像装置に近いものが使用できるので、非常に安価で高解像度の暗視システムを構成できる。以上の理由から、汎用性のあるシステムにするためアクティブ方式の近赤外

線を利用したシステムを取り上げ、特に近赤外撮像に重要な高効率近赤外照明器とそれに適合した近赤外撮像カメラなどを新たに開発し、明るさに関係なく常に鮮明な映像を得る汎用性のある暗視システムを製品化することができた。

近赤外撮像暗視システムは次の特長を持っている。

(1) 明るさに関係なく撮像可能

明るい条件から暗闇の中まで明るさに関係なく鮮明な映像が得られる。

(2) 撮像装置は常温使用形

特別な冷却を必要としない、信頼性の高い固体カメラと、解像度と感度に優れた撮像管方式のカメラを完備し、広い用途に対応可能である。

(3) 近赤外照明器は高出力で低劣化

撮像デバイスの高感度領域に効率よく発光する希ガス放電ランプを用いているので高出力で安定した特性が得られる。

(4) フリッカフリー

高周波点灯装置を用いているので撮影時フリッカが生じない。

(5) システムの拡張が容易

一般の ITV システムと互換性があるので VTR など他の映像機器との接続が容易である。

(6) 簡易な汎用性のあるシステム構成

3. システムの構成

3.1 システムの基本構成

この暗視システムの基本構成例を図1に示す。基本構成は、近赤外線が被写体に効率よく放射する近赤外照明器、被写体から反射される近赤外線を感度よくとらえる近赤外撮像カメラ及びその映像を映し出すモニタテレビで成り立ち、必要に応じて時刻信号発生器、文字発生器などの映像機器や長時間 VTR などの記録機器の接続ができる簡易なシステム構成である。近赤外照明器は、被写体範囲や近赤外撮像カメラの感度によって設置台数を決定する。近赤外撮像カメラは、感度と解像度に優れた近赤外増感形の撮像管方式のカメラや、長寿命で信頼性の高い固体撮像カメラが使用できる。モニタテレビなどその他の映像機器は一般の ITV 用機器が使用でき、監視方式、信号伝送方式、表示方式などで一般 ITV システムと同様に広い拡張性をもっている。

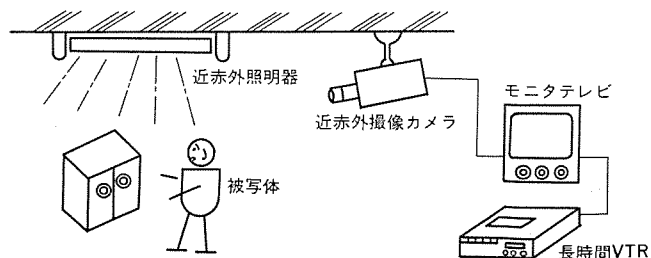


図1 システムの基本構成例

3. 2 構成機器の特性と仕様

(1) 近赤外照明器

アクティブ方式の撮像に重要な近赤外照明器には、可視光線をほとんど出さず、近赤外線領域に集中して放射する近赤外希ガス放電ランプを開発し使用した。このランプは、汎用性を持たせるため、広く利用されている蛍光ランプと類似した形状としたが、その発光原理は蛍光ランプの原理（低圧水銀放電で紫外線を発生させ、蛍光体を励起発光させる）と異なり、ランプに封入した希ガス原子そのものを発光させて利用する全く異った発光現象を利用した。そのため、ランプは点灯に伴う光出力の劣化がほとんどなく、特性の温度変化も無視でき、光の高速応答性があるなど今まで得られなかった特長を持っている。

また、この近赤外放電ランプの点灯装置には、撮影時のフリッカ発生を防止し、同時にランプを高効率に点灯するため 30 kHz の高周波点灯装置を用いている。照明器は、防犯・防災などの監視用に多用されることを想定し、近赤外光の照射方向を用途に合せ変えられる照射方向可変化としている。このランプと点灯装置を組み込んだ近赤外照明器は、高効率・長寿命の特性を持ちながら、一般の蛍光灯照明器と同じように設置できるなど使い勝手の良いものにした。図 2、図 3、及び表 1. に各々近赤外照明器の外観写真、放射分光分布図及び仕様を示す。

(2) 近赤外撮像カメラ

近赤外領域に感度をもつ撮像デバイスには、近赤外増感形撮像管と固

体撮像素子があるが、現在のところ一長一短があり要求・用途によって使い分ける必要があるため、この暗視システムでは両デバイスを使用したカメラを製品化し幅広いニーズに対応可能とした。図 3. に近赤外増感形撮像管と固体撮像素子の分光感度特性を示す。一般の撮像管は可視領域（約 760 nm まで）しか感度はないが近赤外増感形撮像管及び固体撮像素子は図 3. に示すように 750～850 nm に感度のピークがある。このシステムでは使用する撮像デバイスの分光感度特性と近赤外放電ランプの放射分光分布とをよく一致させ、システムを高効率なものにした。

近赤外増感形撮像管には管径が 1 インチ、2/3 インチの 2 種類があり、1 インチ管は感度・解像度が高い点、2/3 インチ管は小形軽量化できる点が主な特長である。撮像管カメラは現在のところ固体撮像カメラに比べ感度・解像度の点で優れており、1 インチ管で 2 倍以上の感度があり、水平解像度も 550 本以上が得られ高感度・高精細度を必要とする場合に適する。固体撮像素子は、現在 MOS 形、CCD 形、CPD 形が実用化されているが、このシステム用としてはまず MOS 形を採用した。素子は PN 2 層構造 MOS 形の 2/3 インチイメージサイズの撮像板で、画素数は 320 (H) × 244 (V) 画素と、384 (H) × 485 (V) 画素のものをを用いた。固体撮像カメラは、長寿命で保守が容易であると共に、小形軽量、低消費電力、クイックスタート、画像ひずみや焼付けがない、耐振・耐衝撃性、耐磁気特性が良好など数々の特長を持っており、今後半導体微細加工技術の進展と共に更に高解像度化とコストダウンが期待できる。カメラの構成は標準のビデオカメラと類似したものである。

このカメラは各種 C マウントが使用できる。被写体の近赤外照度が一定であれば手動絞りレンズで設定でき、可視光を含め被写体照度が変化する場合は映像信号帰還方式の EE レンズを使用する。近赤外撮像カメラとその仕様を図 4.、表 2. に示す。

(3) モニタテレビ

近赤外撮像カメラからの信号は、標準テレビジョン映像信号であるので

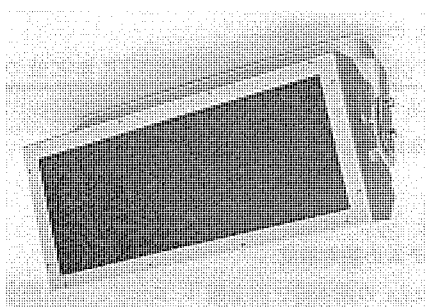


図 2. 近赤外照明器

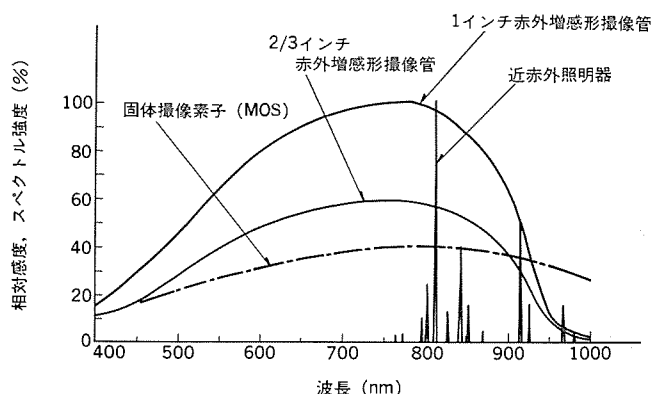


図 3. カメラの分光感度と近赤外照明器の放射分光分布

表 1. 近赤外照明器の仕様例

ランプ電力	25 W × 2 灯
点灯方式	高周波点灯方式 (30 kHz)
可視光照度	1 m 直下で 0.2 ルックス以下
監視範囲	3 m 下で 4 m 四方
反射板	照射角度可変形
電源	AC 100 V, 50/60 Hz
寸法 (mm)	260 (W) × 160 (H) × 670 (L)

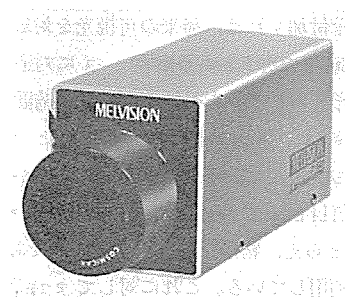


図 4. 近赤外撮像カメラ

表 2. 近赤外撮像カメラの仕様

カ メ ラ	固 体 撮 像 カ メ ラ	撮 像 管 カ メ ラ
項 目		
撮 像 素 子 (管)	2/3 MOS 形素子	1 インチ赤外増感撮像管
走査周波数 (kHz) (水平)	15.72	15.75
(Hz) (垂直)	60	60/50
解 像 度 (本) (水平)	240 以上	550 (画面中央部)
(垂直)	190 以上	350 以上
出 力 信 号	VS 1.4 V_{p-p} , 75 Ω	VS 1.4 V_{p-p} , 75 Ω
電 源	AC 100V \pm 10%, 50/60Hz	AC 100V \pm 10%, 50/60Hz
重 量 (kg)	約 1.5	約 1.6
外 形 寸 法 (mm)	76(W) \times 90(H) \times 181(L)	111(W) \times 95.5(H) \times 230(L)

一般 ITV 用の モニタテレビ に接続し表示できる。モニタテレビ の種類としては、9 形、14 形、17 形、20 形を標準としており、用途や要求により選択する。また、カメラからの映像信号を RF コンバータにより VHF (1 又は 2 ch) に変換すれば家庭用 テレビ も映し出すことができる。

(4) その他の機器

このシステムは、標準 テレビジョン 映像信号によるため一般 ITV 用映像機器が使用でき、それらにより システム の拡張が可能である。

(a) 長時間 VTR (HV-360)

家庭用 VTR (映像入力付き) にも録画できるが防犯 システム などの監視用には長時間 VTR が有効である。HV-360 形 VTR は、標準録画 (2 時間) のほか最高 360 時間まで録画可能で、その他タイマー 予約による自動運転や時刻信号挿入録画が可能など優れた機能を持っている。外観写真と仕様を図 5.、表 3. に示す。

(b) 文字発生器 (X-3687)

映像信号に文字 (アルファベット、数字) 信号をミックスしモニタ画面上に表示するもので、複数のカメラを切替表示するときや VTR 録画するときなどに有効である。仕様を表 4. に示す。

(c) 時刻信号発生器 (VTG-33)

映像信号に時刻 (月・日・時・分・秒) 信号をミックスしモニタ画

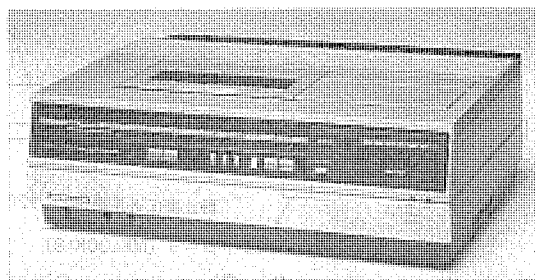


図 5. 長時間 VTR

表 3. 長時間 VTR (HV-360) の仕様

VTR 部	
電 源	AC 100 V 50/60 Hz
録 画 方 式	回転 2 ヘッド記録方式・NTSC 方式
使 用 テ ー プ	VHS 方式カセットテープ
録 画 時 間	2 (連続録画), 24, 48, 72, 120, 360 (間欠録画) 時間 (T-120 E 使用時)
早 送, 巻戻時間	約 3 分 (T-120 E 使用時)
映 像 入 力	複合映像信号 (VBS/VS) 1.0 $V_{p-p}/75 \Omega$, 1 系統/BNC
映 像 出 力	複合映像信号 (VBS/VS) 1.0 $V_{p-p}/75 \Omega$, 1 系統/BNC
解 像 度	240 本以上
外形寸法 (mm)	498(W) \times 162(H) \times 404(L)
重 量 (kg)	約 14
時刻発生部	
ス ー パ ー 文 字	年, 月, 日, 曜日, 時, 分
タ イ マ 設 定	曜日, 開始時・分, 停止時・分, 動作・動作止
電 源 入 力	ニッケルカドミナバッテリー (容量 240 時間) による充電方式

表 4. 文字発生器 (X-3687) の仕様

映 像 入 力	VS 1.0~1.4 $V_{p-p}/75 \Omega$
映 像 出 力	VS 1.0~1.4 $V_{p-p}/75 \Omega$, 2 出力
表 示 文 字 数	最大 16 文字
表 示 文 字 種 類	アルファベット, アラビア数字, カタカナ, 特殊記号
制 御 入 力	BCD コード又は個別入力
制御カメラ台数	BCD 入力時: 99 台 (max) 個別入力時: 24 台 (max)
定 格 電 圧	AC 100 V $\pm 10\%$, 50/60 Hz
外形寸法 (mm)	430(W) \times 85(H) \times 260(L)

面上に表示するもので、文字発生器と共に VTR 録画するときにも有効である。

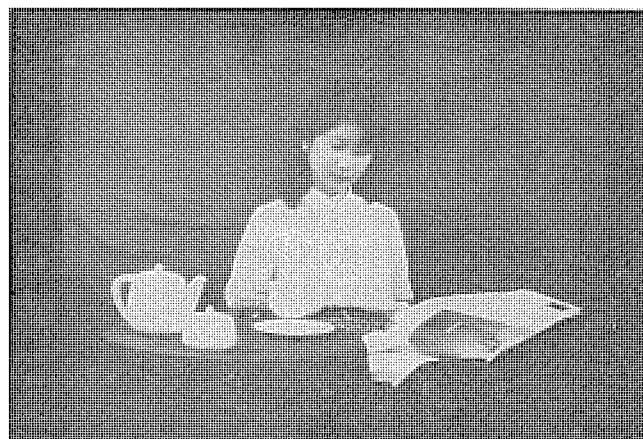
(d) 8 ch カメラ 自動切替器 (S-3192)

8 ch のカメラ映像信号を自動的に切替監視するもので、手動及び外部センサーによる切替、任意のカメラをスキップさせる機能などをもつ。

その他、各種レンズ、カメラケース、回転台、操作器、映像分配器、映像切替器、伝送装置など一般の ITV 機器を使用し種々の拡張機能をもった暗視システムを構成することができる。

4. 暗闇での撮像特性

このシステムを天井高 3 m の暗室内に持ち込み、25 W の近赤外放電ランプ 2 灯を内蔵した近赤外照明器を設置し、撮像特性を評価した。図 6. は近赤外撮像カメラで撮影したモニタテレビの映像写真である。図 6. (a) は 150 ルックスの一般照明下の映像であり、(b) は 0.1 ルックス以下の近赤外照明下の暗闇での映像である。なお、照度は机上での照度値であり、映像はモニタテレビの輝度とコントラストを両者同一設定にして得たものである。映像は近赤外放射下で得られる独特の映像となるが、皮膚・顔・髪の毛など人物に対してはそれほど異和感はなく、鮮明な映像が得られた。解像度は可視光下で使用した場合と大差なく、解像度は、画素数の多い固体式カメラで 250 TV 本、1 インチの撮像管式カメラで 550 TV 本が得られた。またフォーカス特性は、可視光下で使用した場合と比べて若干のずれがあるが、レンズの選択により実用上問題にならない程度に実現できた。な



(a) 一般照明下 (150 ルックス)



(b) 近赤外照明下 (0.1 ルックス以下の暗闇)

図 6. 近赤外撮像システムの撮像例

お、この近赤外撮像カメラを可視光下で使用した場合、撮像デバイスの分光感度特性が視感度特性と異なるため、赤系統が強調され、赤系統の被写体のコントラストが強くなることは否めない。

5. システムの用途と展開例

5.1 暗視システムの用途

このシステムは、次のような広い利用分野に用途が見込める。

(1) 防犯・防災用

周囲環境やその他の制限条件で照明を明るくできない場所の防犯・防災用に最適である。

(a) 金融機関、オフィスなどの侵入者発見システム

(b) 劇場などの避難路や危険個所の監視

(c) もや、霧などが深い気象条件下の監視（飛行場、道路、船舶など）

(2) 医療機関用

明るい照明が無理な重症患者の監視用。

(3) 畜産・動物生態監視用

酪農牛、養豚など夜間の飼育状態や出産前後の状況を明るい照明をせずに鮮明に監視できる。また、動物園や学術用として動物の夜の生態状況の観察に利用できる。

(4) 暗室作業の監視や保守

(5) 学術研究用

壁画や埋蔵文化財などの考古学上の調査、研究に使用できる。

(6) ホームオートメーション用

5.2 システムの展開例

このシステムの具体的な展開例を示す。

(1) 展開例1

複数のカメラを切り換えて録画するシステム（図7.），このシステムは図に示すように、複数の監視場所に近赤外照明器と近赤外撮像カメラを設置し、その映像信号に監視場所の名称や時刻の表示を挿入し、この映像を自動的に切り換えて複数の場所を録画監視するシステムである。拡張機器として文字発生器と長時間VTRを用いている。複数の場所を長時間暗い状態のまま監視する経済的なシステムである。

(2) 展開例2

検知器と連動させて監視するシステム（図8.），このシステムは各種検知器と組み合わせて使用するもので、検知器からの異常信号によって暗視システムを動作させて使用する。必要な時だけ、侵入者などに監視していることを知られずに監視できるシステムである。手動監視もできる。

(3) 展開例3

静止画伝送を用いた遠隔操作で監視するシステム（図9.），このシステムは拡張機器として静止画伝送装置を用い、静止画を日本電信電話公社の回線を利用し遠隔に送信し監視などに利用するシステムである。複数の遠隔場所の監視を中央の監視センターで一括処理するシステム

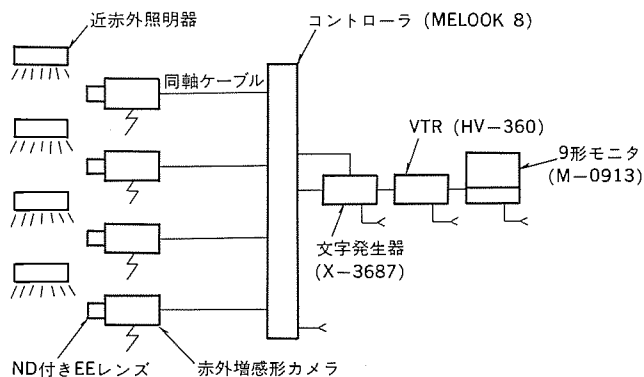


図7. 4台のカメラを切り換えて録画するシステム

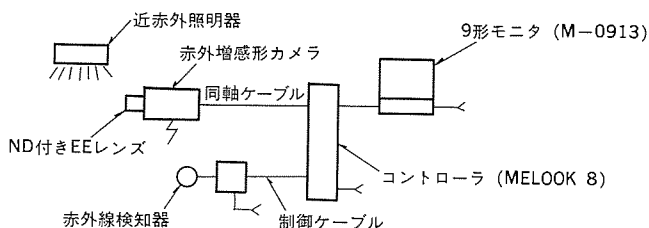


図8. 検知器と連動させて監視するシステム

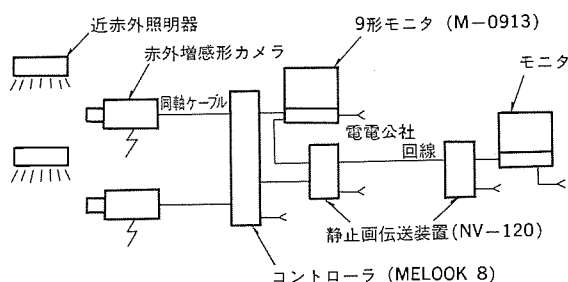


図9. 遠隔操作で監視するシステム——静止画伝送

や、無人の遠隔地の監視などに適している。

以上3種のシステム構成例を示したが、個々のシステムの具体的な展開は、用途により被写体条件や照明条件、カメラの位置や感度、拡張機器など要求される性能が異なるので用途に合った最適なシステム構成にする必要がある。

6. む す び

この近赤外撮像暗視システムは、明るい場所はもちろん暗闇の中でも容易に撮像でき、鮮明な映像を得ることができるため、従来の可視光線だけで撮像するITVシステムの用途を大幅に拡大していくものと確信している。しかし、以上述べてきた監視用などの外に、潜在ニーズとして予想できない数多くの用途があると考えられる。今後はこの潜在ニーズの発掘と、それに対応したシステムをユーザーとの密接な協力のもとに最近の画像処理技術などを活用し開発して行く所存である。

大容量タービン発電機の回転子制動回路

免 太 享*・前 田 進*・平尾俊樹*・野村達衛**

1. ま え が き

電力需要の着実な増加に伴って発電機設備容量の拡充が進み、タービン発電機の単機容量も増大してきた。大容量化の側面の一つは冷却技術の進歩・改良であり、発電機出力密度の増大を伴う。このとき、発電機の各構成要素の熱的容量は等価的に低下する傾向にある。一方、電力系統は複雑・大規模化し、また DC 送電の導入も検討されており、大容量機には、不平衡負荷や短絡事故・負荷変動・高調波負荷などの運転条件が、より一層厳しい形で課せられると予想される。

運転条件が発電機の電機子電流を不平衡にする場合には、回転子表面付近の構成要素を渦電流が循環し、回転子表面各部の温度を上昇させる。今後の超大容量機の製作や通常的不平衡負荷耐力を越える特殊な運転仕様要求に対応するためには、不平衡電流による回転子の制動回路の各種挙動を定量的に把握するとともに、必要に応じて制動回路の強化が必要となる。

当社では、制動回路の電氣的・熱的特性を定量的に解明するために、縮小形のモデル発電機を製作して各種模擬試験を実施するとともに、実機による制動回路検証試験を実施した。併せて、回転子表面渦電流解析・温度解析・損失解析を実施して試験結果の検証も行った。本文では、上記の試験・解析結果に基づいて、制動回路特性とその強化策の効果について検討した結果の概要を示す。

2. 制 動 回 路

電機子電流に含まれる不平衡分は、一般に逆相電流と呼ばれる。逆相電流が回転子に誘起する渦電流は、回転子表面付近の構成要素を

流れる。渦電流が流れる様子を図 1. に示す。

当社の大容量機では、一般に図 2. (a) のような制動回路構成を採用しており、全体の構造はかご形全長制動回路方式である。特長は以下のとおりである。

- (1) 回転子スロット部に銅帯で作ったダンパーを設置し、中央でセンターウエッジにより接続する。センターウエッジは疲労強度・クリープ特性の優れたベリリウム銅合金を使用する。
- (2) 端部では リテーニングリング を短絡環とする。
- (3) ダンパー 端部と リテーニングリング 間には ベリリウム銅合金の エンドウエッジ を設置する。
- (4) エンドウエッジ、センターウエッジ、ダンパー には全面銀めっきを施し、接触抵抗を小さくする。

磁極表面部分では磁極鉄心が制動回路要素として働く。図 2. (b) は、磁極面に低抵抗電流経路をもつスロットを設置したものでポールダ

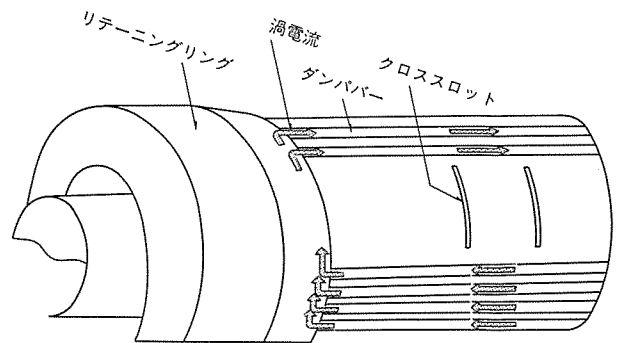


図 1. 渦電流の経路

(a) かご形全長制動回路方式	<p>リテーニングリング エンドウエッジ センターウエッジ フィラ(絶縁物) 界磁コイル (界磁スロット内の構成)</p>	<p>リテーニングリング 胴部制動回路</p>
(b) ポールダンパの適用	<p>リテーニングリング エンドウエッジ ダンパウエッジ ダンパー (ポールダンパスロット内の構成)</p>	<p>リテーニングリング 胴部制動回路 ポールダンパ</p>
(c) ダンパリングの適用	<p>ダンパリング リテーニングリング エンドウエッジ ダンパー 界磁コイル (ダンパリングを適用した回転子端部の構成)</p>	<p>リテーニングリング ダンパリング 胴部制動回路</p>

図 2. 制動回路の種類

ンパと呼ぶ。ポールダンパスロットにはベリリウム銅合金のウエッジを納め、その下に接続導体としてダンパーを配設する。磁極表面及びクロススロット端の渦電流をポールダンパスロットが吸収するため、磁極部での損失密度が低くなる。

図2.(c)は、リテーニングリングの下に銅帯で作った短絡環を設置したもので、ダンパリングと呼ぶ。ダンパリングは渦電流を低抵抗電流経路に導いて端部発生損失を低減する。

3. 制動回路モデル

3.1 モデルの概要

大容量タービン発電機の回転子を縮小した制動回路モデル発電機の外観を図3.に示す。回転子スロット数は16個であり、クロススロットは1極あたり3個設けた。電流分布、温度分布の測定のため、計測素子を総計150点設置した。電流測定は、電流の通る導体を取り囲むロースキーコイルの電圧から求めるほか、表面電流の電圧降下による方法も用いた。試験設備によって電機子電流周波数及び回転速度を変化させ種々の滑り状態を可能とした。なお、モデル発電機は、かご形全長制動回路方式の標準構造から始めて、これにポールダンパ・ダンパリングを順次追設し、各段階で特性試験を実施した。

3.2 回転子表面電流

3.2.1 表面電流特性

(1) 逆相電流-表面電流特性

固定子の逆相電流が回転子表面に誘起する電流のアンパターンは、その波長が空けきに比べて十分に長いので、固定子電流のアンパターンにほぼ等しくなる。すなわち回転子表面の平均的な電流密度は逆相電流の大きさに比例する。したがって抵抗に非線形要素を含まないスロット部の特性は図4.(a)に示すようにほぼ直線となる。ティース

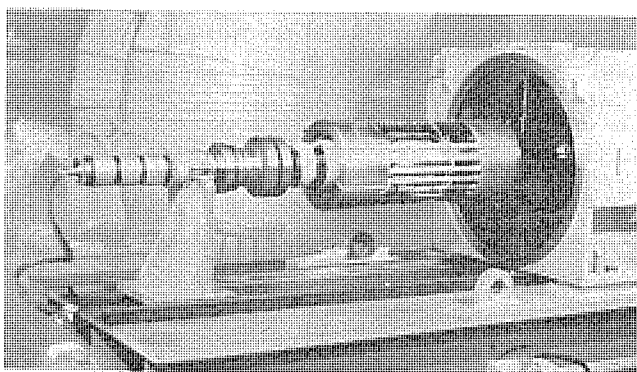
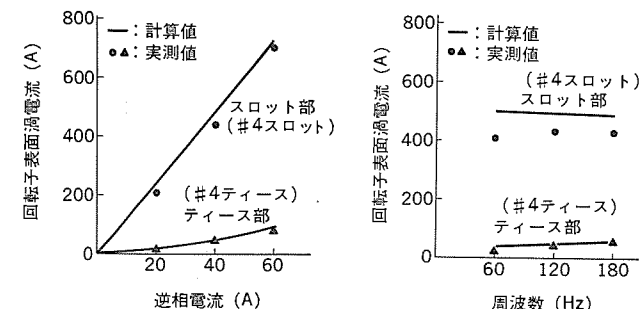


図3. 制動回路モデル発電機



(a) 逆相電流-表面電流特性 (ポールダンパ付き, 120 Hz, 拘束試験)

(b) 周波数特性 (ポールダンパ付き, 固定子電流 40 A, 拘束試験)

図4. 表面電流特性

部は鉄体の飽和によって非線形特性を示す。作用磁界の増加に伴って表皮深さが大きくなり、したがって電導度が大きくなるためである。

(2) 周波数特性

回転子表面の周波数特性を図4.(b)に示す。スロット部の抵抗はこの周波数領域ではほぼ一定であるが、リアクタンスが周波数に比例して大きくなるためインピーダンスは増加する。ティース部のインピーダンスも周波数を増すと大きくなる。全体として流れる電流が同じであれば、インピーダンス増加の大きいスロット部の電流は減少し、ティース部の電流は増加する。

3.2.2 胴部電流分布

(1) 電流分布

回転子胴部の電流分布を図5.に示す。回転子表面電流は表面インピーダンスの低いスロット部に多く流れ、インピーダンスの高いティース部及び磁極部では少ない。ティース部とスロット部がほぼ均等に分布する極間中心付近では、表面電流は、ほぼインピーダンスの逆数に比例して分布する。磁極に近い第1及び第2スロットは、磁極部の電流を一部負担する傾向があるが、磁極部中央はスロットから遠いために電流はやや大きくなる。ポールダンパを設置した場合は、図の破線で示すように磁極部の表面電流のほとんどがインピーダンスの低いポールダンパに流れる。

(2) 電流分担比率

回転子胴部における鉄部(ティース部及び磁極部)と銅部(スロット部)の電流分担比率を図6.に示す。ポールダンパを設置した場合には、鉄部の電流分担割合が通常形の約1/2に低下する。ダンパリングを設けた

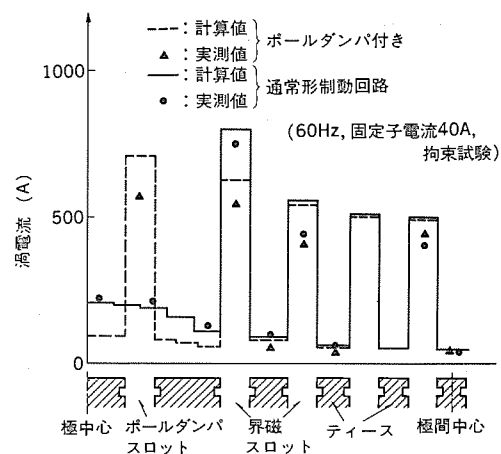


図5. 胴部電流分布

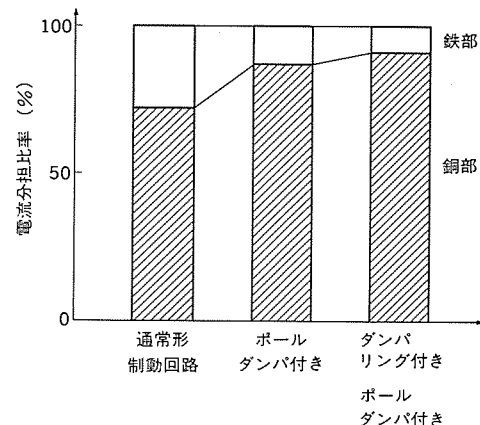


図6. 回転子胴部電流分担比率

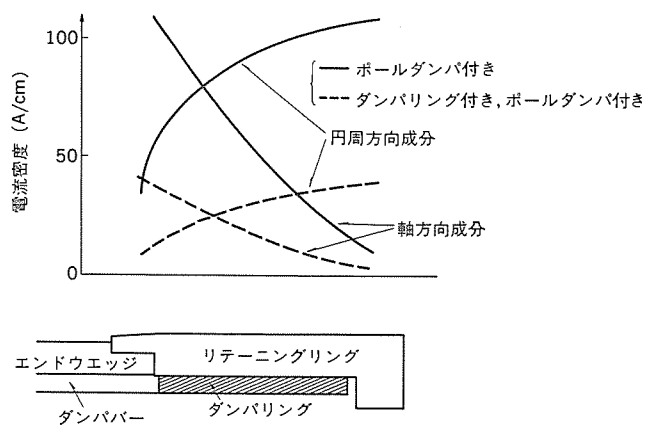


図 7. リテーニングリング 電流分布 (実測値)

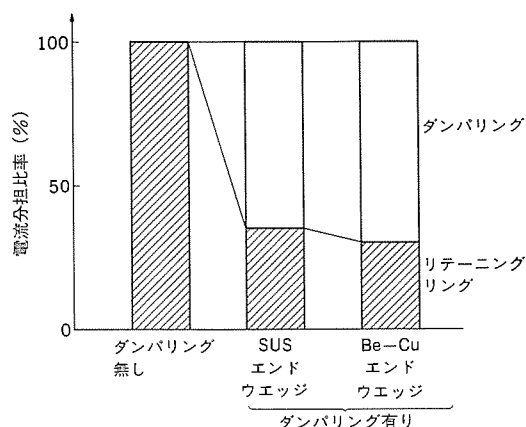


図 8. 端部電流分担比率

場合は、端部の短絡インピーダンスが大きく低下するが、その影響はダンパバーに著しい。このため、胴部の構造はポールダンパ付きと同じにもかかわらず、ダンパリング付きの場合、胴部の電流分担割合は更に増大する。

3. 2. 3 端部電流分布

(1) リテーニングリング 電流分布

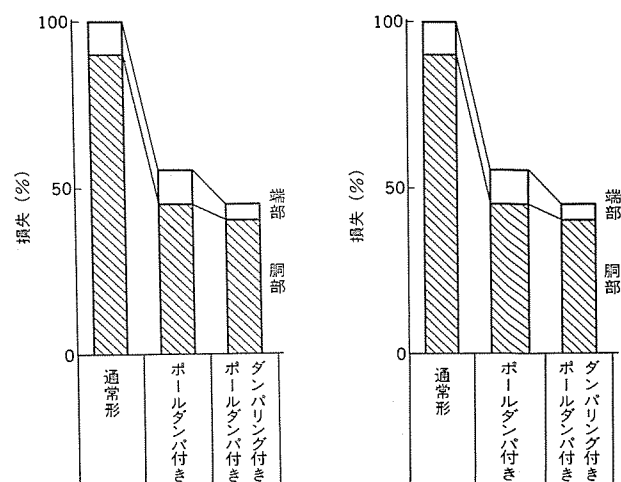
ダンパバーや回転子鉄心表面を流れてきた電流は、リテーニングリングに流入しその表面を流れる。図 7. に示すように、軸方向電流成分は回転子端面から離れるに従って次第に減少する。円周方向電流成分は固定子端部の影響を受けるため、回転子端面から遠ざかるに従い増加するような分布となる。ダンパリングの有無によって電流の大きさは異なるが、電流分布の形状はほぼ同じである。

(2) 端部電流分担比率

ダンパリングのある場合には、電流はダンパリングとリテーニングリングとに分流する。両者の自己及び相互リアクタンスや固定子端部磁束の影響を受け、その分担割合は図 8. に示すように約 2 : 1 となる。また、エンドウエッジをベリウム銅合金からステンレス鋼にかえてもその影響はさほど大きくない。

3. 3 損失

図 9. に損失に対する制動回路構成の効果を比較して示す。制動回路モデルは鉄心長に対する端部長の割合が大きいため、端部損失の割合が比較的大きい。そのため、ポールダンパやダンパリングの効果が拡大された。実機では、ポールダンパの効果は大きい、ダンパリングの効果は小さい。



(a) 制動回路モデルの実測値

(b) 実機の解析値

図 9. 回転子表面損失

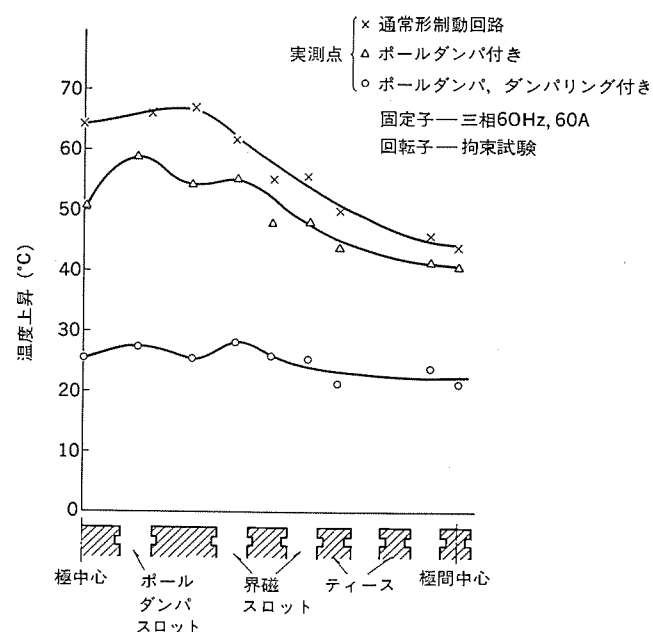


図 10. 回転子表面温度の実測値

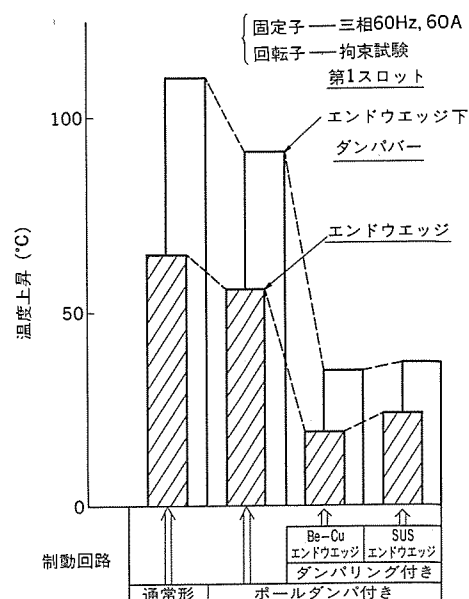


図 11. リテーニングリング 嵌合部付近の温度上昇

3.4 温度分布

(1) 胴部温度分布

図 10. に、制動回路モデルの胴部の円周方向温度分布を示す。温度分布は磁極部で最大となり、損失分布と傾向が一致する。磁極面損失はポールダンパによって低減し、温度を下げる可以降低。ダンパリングを設けた場合、端部損失の減少と伝熱影響とのために胴部温度も低下した。鉄心長の長い実機の温度分布は、後述するようにこれとは異なったものとなる。

(2) 端部温度分布

端部はリテーニングリングのかん(嵌)合部など導体間の接触部分が多く、接触面の状態によっては局部温度上昇が起る。この現象の把握のために、導体の形状と物理特性を考慮して電磁界及び温度について三次元解析を実施した。図 11. に、リテーニングリング嵌合部付近の構成物である第1スロットの、エンドウエッジ及びダンパーの温度測定例を示す。

4. 実機計測

モデル試験結果及び解析手法の妥当性を確認し、実機の現象挙動を把握するため、実機による制動回路特性の検証試験を実施した。供試機は、同一構造の 200 MW, 3,000 rpm タービン発電機 2 台であり、一方には磁極部にポールダンパを設置した。

試験結果の一例を図 12. に示す。これは逆相電流 (I_2) を連続 15 %, あるいは 0.5 p. u. を 40 秒間 ($I_2^2 t = 10$) 印加したときの各点の温度上昇を示したものである。ポールダンパのない通常機においては、磁極部、クロススロット端及び第1スロットの温度が高い。ポールダンパを設置した発電機では、これらが低く抑えられている。

逆相電流が十数 % 以下と少ない場合には、表皮深さの関係から磁極鉄心の表面抵抗は大きい。したがって渦電流は、抵抗の小さいポールダンパに多く流れ、磁極部の温度をポールダンパの無い場合に比べ

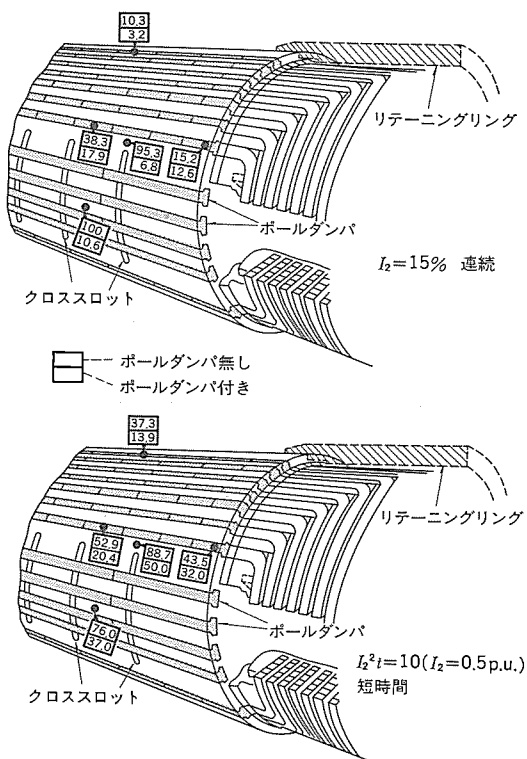
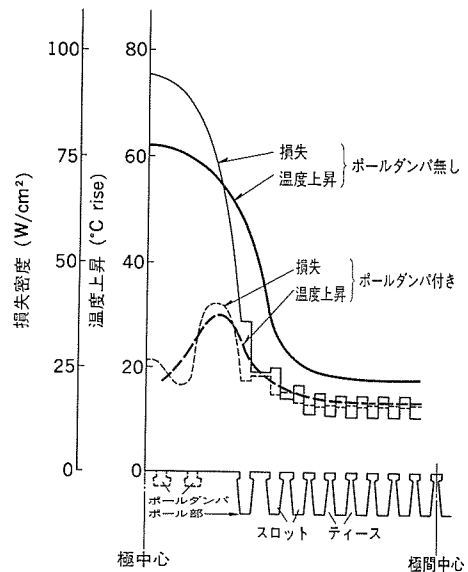
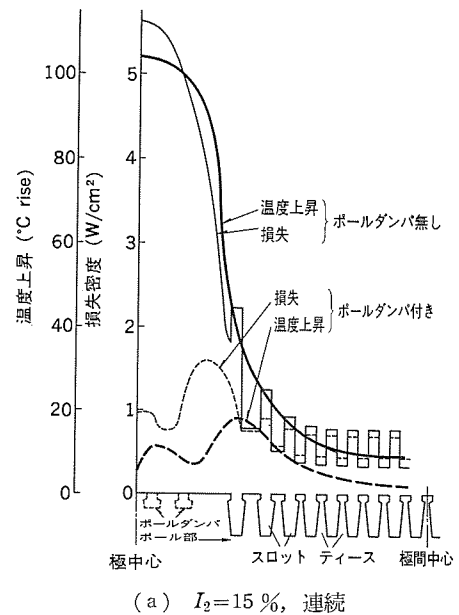


図 12. 不平衡負荷時の回転子表面温度上昇 (°C rise)



(b) $I_2^2 t = 10$, $I_2 = 0.5$ p. u. 短時間
図 13. 不平衡負荷時の温度上昇と損失密度

て抑制される。クロススロット周辺部も同様である。逆相電流が数十 % に達すると、磁極鉄心の表面抵抗は等価的に小さくなってくる。したがって鉄部の負担電流の割合が増加し、温度上昇の低下の割合は前記よりやや小さくなる。

図 13. に温度上昇の円周方向分布を示し、発生損失の計算値を付記する。ポールダンパ設置機の回転子表面損失したがって回転子表面抵抗の実測値は、通常機のおよそ 1/2 であった。

5. 実機への適用

5.1 不平衡負荷耐量

発電機の不平衡負荷耐量は、回転子表面各部の温度許容値と関連する。表 1. にこれを示す。制動回路は、構成物の温度が不平衡負荷許容基準の範囲内において、この温度許容値以下になるように設計される。

大容量タービン発電機の不平衡負荷耐量については、米国規格 AN SI-C 50.13 (1977) 及びこれに準拠して制定された JEC 114 (1979)

表 1. 回転子表面各部の温度許容値

		短 時 間		連 続	
		許容温度(°C)	許容限界理由	許容温度(°C)	許容限界理由
ウェッジ	非磁性銅	300	高温引張強度の低下	200	高温クリープ強度の低下
	Be-Cu	250	同 上	150	同 上
ダンパ巻線		150	同 上	100	同 上
リテーニングリング (回転子胴部焼嵌部)		シャフトとの温度差 45°C	焼嵌め代の減少	ファフトとの温度差 45°C	同 左
軸 材	鉄心自身	425	焼鈍温度以下	425	同 左
	ウェッジとの接合部	250	ウェッジ材の高温引張強度低下	150	高温クリープ強度の低下

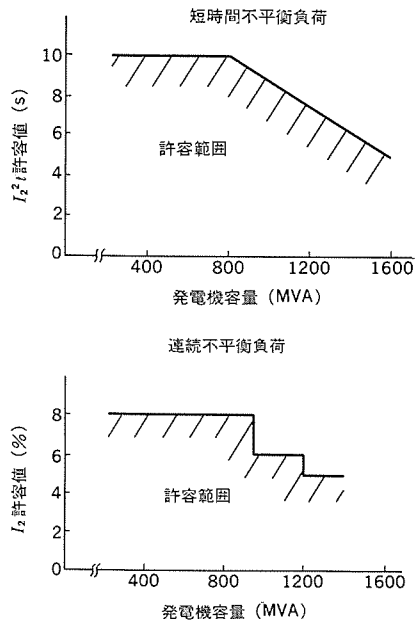


図 14. 不平衡負荷許容基準

に規定がある。連続不平衡負荷許容基準(連続逆相電流 I_2 の許容値)及び、短時間不平衡負荷許容基準(逆相電流 I_2 の自乗と時間 t との積、 $I_2^2 t$ の許容値)を図 14. に示す。これらは、大容量機になるほど、発電機の熱的容量が小さくなる傾向を踏まえたものである。

5.2 高調波負荷

サイリスタなど、負荷に整流器がある場合には、発電機には一般に 5, 7, 11, 13…… など $6n \pm 1$ ($n=1, 2, \dots$) 次の高調波電流が流れ、回転子に $6n$ 倍周波数の渦電流を誘起して、回転子表面を加熱させる。

高調波の影響は、次式の等価逆相電流 I_{2eq} によって評価される。

$$I_{2eq} = \sqrt{\sum_n [(I_{6n+1} + I_{6n-1}) (6n/2)^{1/4}]^2}$$

ここで I は高調波電流である。したがって、高調波電流の許容値は、不平衡負荷許容基準と同じく図 14. で示される。

5.3 系統との関連

系統にリアクタンス補償用の直列コンデンサが接続されると、LC 共振により系統に固有振動数が存在する。この周波数の電流に対して発電機は誘導発電機として動作し、端子から見た発電機の抵抗 R_f/S (R_f : 滑り周波数における回転子抵抗, S : 滑り, $S < 0$) は負となる。したがって、系統の抵抗 R_L を加えた $R_L + R_f/S$ が負となって過渡

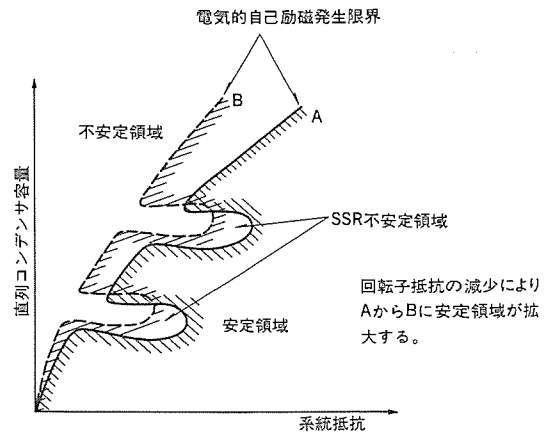


図 15. 安定送電限界曲線

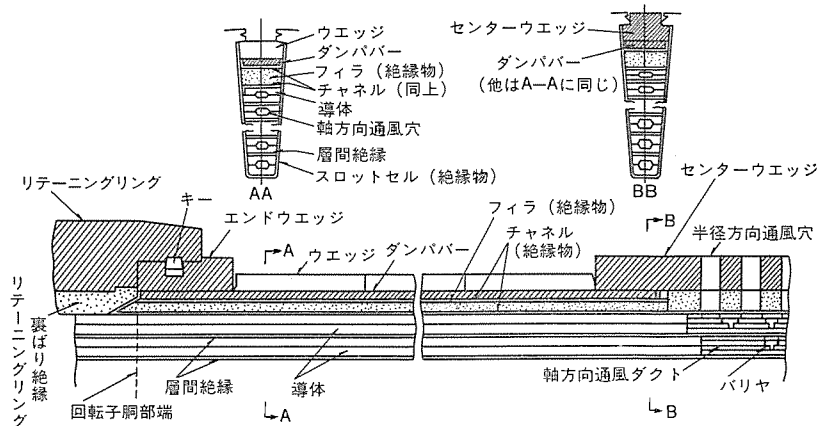


図 16. 大容量タービン発電機の制動回路

動揺に対して電流が発散する自己励磁現象が起こることがある。更に、系統の固有振動数と軸系のねじり固有振動数との和が商用周波数の値に近い場合には、電気系と機械系との正帰還作用により更に不安定領域が広がる。これが通常 Subsynchronous Resonance (SSR) と呼ばれている。

上記の現象の抑制対策としては、系統の制御面からのアプローチ及び発電機側からのアプローチがある。発電機の方策の一つとして、回転子抵抗を減少させることを特殊要求仕様として考えることができる。図 15. に例えば ボールダンパを適用して回転子抵抗を低減したときの、SSR 安定領域の拡大効果を示す。

5.4 制動回路強化策の適用

図 16. に、当社で大容量機に標準的に採用されているかご形全長制動回路方式を示す(図 2. (a)を詳細に示した)。この制動回路方式は、前記不平衡負荷耐量基準を満足する。したがって通常の仕様、運転に関しては上記かご形全長制動回路方式で十分であり、制動回路強化策の適用は、SSR 現象のような系統に関連した特別な要求があった場合や、その他の特殊な運転仕様要求があった場合に限定される。

6. む す び

本稿では、理論解析やモデル機及び実機による実証試験によって得られた制動回路特性研究結果のうち、特に不平衡負荷耐量に重点をおいて報告した。他の異常運転に対する挙動や対系統性能については稿を改めて紹介したい。

1. ま え が き

近年インバータの目覚ましい進歩と普及により、直流電動機からの交流電動機化が急速に進んでいるが、最近の交流機化は単に可変速運転をするだけでなく、メカトロニクスの言葉に代表される工場のFA化、FMS化などに伴うシステム構成の一部としての機能を強く要求されるようになっている。特に無人運転、自動運転を行う機械工場の工作機主軸駆動用電動機においては、運転状況を的確にモニタリングし、その結果をシステム制御にフィードバックするインプロセスの検出機能が不可欠である。

工作機主軸駆動の場合、電動機軸トルクの検出は工具の摩耗と破損の検出並びに加工物の材質と寸法精度及び加工速度の制御などのフィードバックに欠くことのできない項目である。直流電動機では、電流がほぼトルクに比例することから、電流を検出することにより容易にしかも精度良くトルクの検出を行うことができる。しかしながら交流電動機においては、電流とトルクに直線性がないため電流でのトルク検出は困難であり、ひずみゲージ式、磁気ひずみ式、光学方式などの方法によって計測を行っているが、これら検出方法はいずれも計測装置用のスペースを必要とし機械の小形化の大きな障害となっている。

このような問題を解決するために、今回トルクによる軸のねじれ角度を電気信号として取り出す非接触形の小型センサを電動機に内蔵させ精度良くトルクの検出できる工作機主軸駆動用誘導電動機を開発したのでここに紹介する。

2. トルクセンサの概要

電動機が仕事をするとき、動力伝達軸にはトルクに比例したねじれ角が生じる。このねじれ角を軸の両端に取り付けた歯車と、その周辺に設けたピックアップにより交流電圧波形の位相差になおし、電気信号として取り出す位相差方式は、軸と無接触でトルクが検出できる利点があり、かなり昔から、いろいろな測定方法が試みられてきた。

しかし、それらはいずれも位相差をアナログ的に処理するものであり、軸が回転中に数千分の1度というような微小なねじれ角の測定が困難であったことや、測定精度をあげるための検出歯車ピッチなどの加工精度、組立精度などの問題から実用化されるまでに至らなかった。今回開発のトルク検出器とその検出信号処理回路は、これら問題点を解決し実用化を図ったものであり、次のような特長をもつ。

- (1) 位相差の測定基準に水晶発振器から得られる正確かつ分解能の高いクロックパルスを採用し、微小なねじれ角の測定を行っていること。
- (2) 位相差をパルス数に変換して処理するので再現性、信頼性がきわめて高いこと。
- (3) 平均トルク、連続変動トルクの両方が測定できること。

- (4) デジタル処理を採用しているため、歯車のピッチむらなどの工作精度による影響がないこと。

以上のような特長をもつ検出機構の詳細を以下に述べる。

2.1 トルク検出原理

軸がトルクを伝達しているとき、トルク T と軸に生じるねじれ角 θ の間には式(1)の関係がある。

$$T = \frac{\pi d^4 G}{32 l} \cdot \theta = k \theta \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 d ：軸径、 l ：軸長、 G ：横弾性係数、 k ：定数
式(1)からも分かるとおり、ねじれ角 θ を検出できればそのときのトルク T を求めることができる。

図1. にねじれ角の検出原理を示す。図に示されるように軸上に長さ l を隔てて一対の検出歯車を取り付け、その歯先に接近させてそれぞれ電磁式ピックアップを固定する。軸の回転に伴って電磁式ピックアップには、正弦波状の交流電圧が発生する。このとき二つの交流電圧は、組立時に生じる位相差（通常は1/2ピッチ）に比例した位相差 α_0 をもっている。トルクが加わって軸にねじれ角が生じると、二つの交流電圧の位相差が変化し、その変化量はねじれ角に比例す

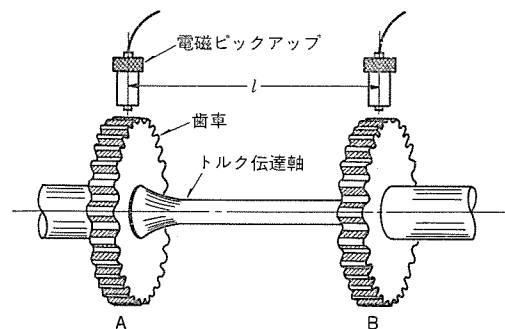


図 1. ねじり角の検出法

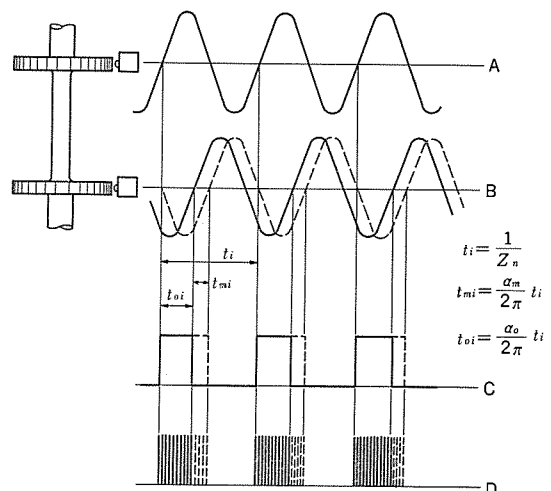


図 2. 作動説明図

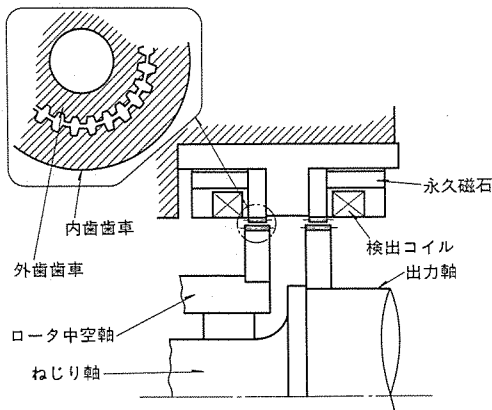


図 3. トルク 検出部構造

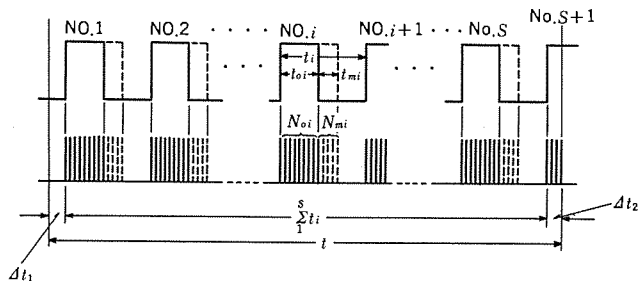


図 4. 位相差 - 計数値変換説明図 (時間隔 - トルク値)

る。その関係は式(2)のようになる。

$$\theta = \frac{1}{z}(\alpha_m - \alpha_0) \quad (2)$$

ここで、 z ：検出歯車の歯数、 α_0 ：無負荷時位相差、 α_m ：負荷時位相差であり、 $0 < \theta < 2\pi$ の条件を満足しなければならない。図 2. はねじれ角の位相差への変換を示す作動説明図である。図で A, B に示される実線の正弦波は、無負荷時の歯車 A, B からの電圧波形であり、B に示される破線は負荷のかかったときの電圧波形である。軸にトルクが加えられ、ねじりが生じたとき B における実線と破線の位相差を測定することによってトルクが検出できる。この位相差の測定には、C に示す矩形波の波幅を D に示す水晶発振器からの標準クロックパルスを用いている。ねじれ角と歯車のピッチ角との比率は、クロックパルスによる時間の比率に変換されることになり、アナログ量である角度差が時間差のデジタル量に変換された信号として取り出すことができる。

図 3. は実際のトルク検出部の構造を示す。外歯歯車と同心に内歯歯車、環状永久磁石を配置し、各対向する外歯、内歯のそれぞれに磁束が通るようにすると同時に、これら各磁束変化の合成によってコイルに交流電圧を誘起させる構造となっている。この構造にすることによって、各歯の一つ一つが電磁式ピックアップの働きをすることになり、軸に生じる横振動や偏心の影響など、外乱による影響と検出歯車のピッチむらの補償効果をもつことになる。

2.2 平均トルクの検出

図 2. において、位相差がクロックパルスに置き換えられ、デジタル化される過程を示したが、図 4. には平均トルクの計測過程を示す。図 2. の D に示されるクロックパルスの詳細を示したものが図 4. である。図に示すように時間 t のゲートを設けることによって、 t 時間内の平均トルクを求めることができる。 t 時間に s 個の矩形波があるとき、 i 番目の矩形波において無負荷時の波幅内のクロックパルスの

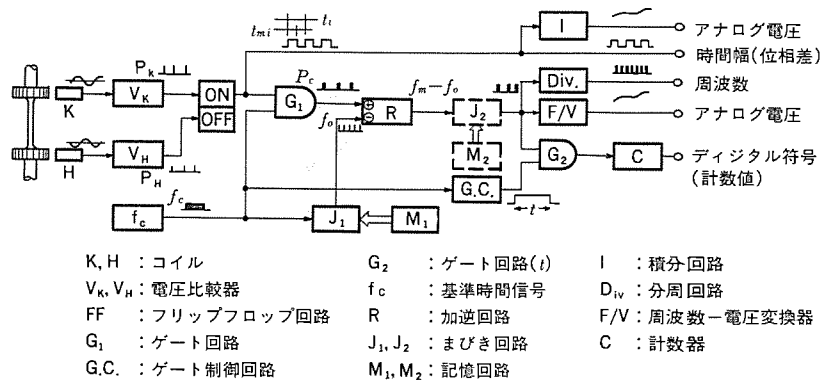


図 5. デジタル 処理回路

数を N_{oi} 、トルクが加わっているときの波幅の増加分に対応するクロックパルスの数を N_{mi} とすると式(3)の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} N_{oi} &= f_c \times t_{oi} \\ N_{mi} &= f_c \times t_{mi} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 f_c ：クロックパルスの周波数、 t_{oi} ：無負荷時方形波の時間幅、 t_{mi} ：トルクが加わったときの方角波の時間幅の増加分

t_{mi} はトルクによって生じるねじれ角 θ_{mi} に比例し式(4)のように表すことができる。

$$\theta_{mi} = 2\pi \times \frac{t_{mi}}{t_i} \times \frac{1}{z} \quad (4)$$

ここで、 t_i は歯車の 1 ピッチに対応する時間幅である。いま平均トルクを T_m とすると式(1)、式(3)、式(4) から式(5)がえられる。

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^s k \theta_{mi} t_i}{\sum_{i=1}^s t_i} = \frac{2\pi k \sum_{i=1}^s N_{mi}}{z \cdot f_c \cdot t} = \frac{2\pi k}{z \cdot f_c \cdot t} (N - N_0) \quad (5)$$

ここで、 N ：負荷時のクロックパルス数の合計 $\left(\sum_{i=1}^s (N_{mi} + N_{oi}) \right)$ 、 N_0 ：無負荷時のクロックパルス数の合計 $\left(\sum_{i=1}^s N_{oi} \right)$

したがって初期条件によってきまる位相差のパルス総数 N_0 をあらかじめ測定して差し引くことで t 時間内の正確な平均トルクを測定することができる。

2.3 変動トルクの計測

図 4. において時間 t_i の中に並べなおしてみたパルス列の周波数 f_0 、 f_m は式(6)で表される。

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \frac{N_{oi}}{t_i} = \frac{t_{oi}}{t_i} \times f_c = \frac{\alpha_0}{2\pi} \times f_c \\ f_m &= \frac{N_{mi}}{t_i} = \frac{t_{mi}}{t_i} \times f_c = \frac{\alpha_m}{2\pi} \times f_c \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)は位相差が周波数信号に変換されたことを表し、この間のトルクすなわち変動トルク T_i は式(7)で求まる。

$$T_i = \frac{2\pi k}{f_c \cdot z} (f_m - f_0) \quad (7)$$

f_0 は初期位相差によって生じる周波数であり、これを可逆回路で差し引くことによってトルクに比例した周波数信号が得られる。図 5. は信号処理回路を示すものである。

3. 開発機概要

3.1 電動機及びセンサ仕様

図 6. は今回開発の上記トルクセンサ内蔵の工作機主軸駆動用電動機の

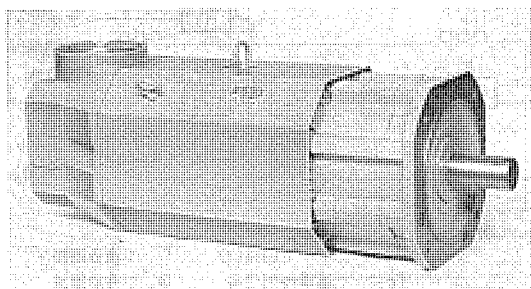


図 6. トルクセンサ 内蔵電動機

表 1. トルクセンサ 内蔵電動機の仕様

	項 目		仕 様
	形 式		全閉他力通風形かご形電動機
電 動 機	枠 番		160 L
	出 力		22 kW
	極 数		4 P
	定 格 ト ル ク		18.6 kg・m at 125 V 40 Hz
	絶 縁		F 種
	駆 動 方 式		正弦波 PWM インバータ電源による可変速駆動
	方 式		位相変換形 (歯車方式)
ト ル ク セ ン サ	検 出 範 囲		300~3,450 rpm
	検出最大トルク		30 kg・m (定格の160%)
	周 波 数 特 性		±0.3% F. S.
	分 解 能		0.1 kg・m
	レ ス ポ ンス		10 Hz

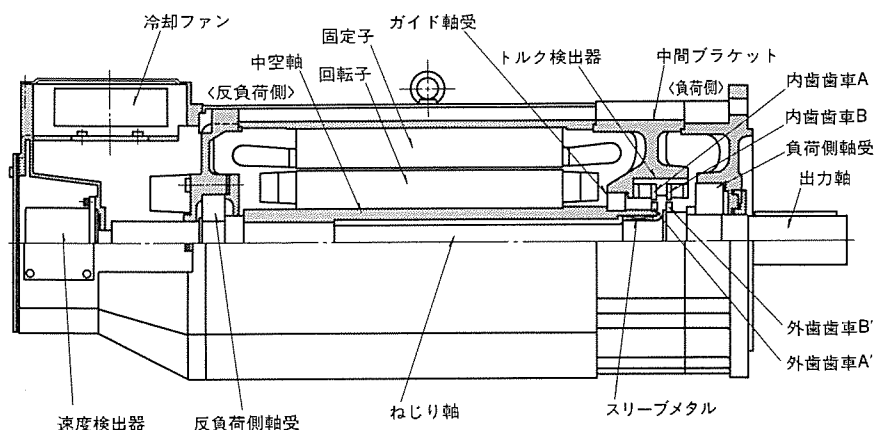


図 7. 電動機構造断面図

外観写真である。電動機はインバータで駆動される可変速形の三相かご形誘導電動機であり、各種仕様は表 1. に示すとおりである。電動機の詳細については、後述参考文献(1)を参照願いたい。

3.2 電動機構造

図 7. は電動機の構造断面図である。前記 2 章で述べたねじり軸の両端の歯車に相当するのが図中の外歯歯車 A' 及び B' である。電動機の回転子は中空軸に装着され、その一端に外歯歯車 A' が、またそれに対応した内歯歯車 A が設けられている。この中空軸は、負荷側で出力軸と一体となったねじり軸と接続されている。中空軸とねじり軸は、スリーブメタルを介してある空けき長に保たれている。ねじり軸の一端には上記外歯歯車 B' とそれに対応する内歯歯車 B が装着されており、この両歯車間で出力軸に加わるトルクをその相対的なねじれ角として検出する構造になっている。

このような構造の採用によって、従来の方式のようなトルク計測装置のスペースは不要となり、在来の電動機と比べて図 7. に示されるセンサ内蔵のための中間ブラケットの追設した分だけ軸長方向が長くなるだけで済み、機械のコンパクトな設計が可能となる。検出トルクの中には衝撃的な異常トルクも含まれるが、この場合電動機軸端には大きな異常ラジアル荷重として働くことになるが中空軸とねじり軸との間にスリーブメタルを設けることにより、正常時はねじり軸と接触せず摩擦トルクの発生による検出誤差を防止し、この異常荷重に対しては軸受として働き軸のたわみ量の増加を抑えることができる構造を採用している。

4. 機械強度の検討

今回採用のトルクセンサは、上述のとおり軸に加わるトルクによる軸のねじれ角度を検出するため、トルクの検出精度の向上を図るにはねじり軸の機械的ヒステリシス特性をできるだけ小さくし検出値の再現性を高め、更にねじり軸のねじれ角度を大きくすること、すなわちねじり軸を細く長くする必要がある。この場合、軸のばね定数は小さくなりトルクの検出の面では都合がよいが、回転子の機械系としては問題が発生する。したがって、これら相反する要素を加味した機械強度の検討が必要であり、以下それについて述べる。

4.1 ねじり軸のたわみについて

ねじり軸を細長くし、ばね定数を小さくすることによって発生する問題は、①軸の剛性の低下による応力増加、②軸のたわみ量増加、③軸の固有振動数の低下(ねじり共振の危険)が考えられる。こ

こで、①の応力は上述のとおりトルクの検出精度から決まってしまう、ねじり応力の低減には限界があり、軸の応力を小さくするためには曲げ応力を小さくして対応しなければならない。今回の開発ではロータ軸を中空とすることによってこの問題に対応している。この中空軸によって、回転子鉄心重量及びロータ、ステータ間に発生する磁気吸引力を受け持ち、ねじり軸は軸に加わる荷重による曲げモーメントとねじりトルクを分担して受け持つようにしている。

更に電動機の軸端に加わるトルクは一定ではなく変動し、時には異常な過大トルク(特に異常ラジアル荷重として働く場合)として加わ

るケースも考えられるため、この保護対策を考慮する必要がある。この対応としては、中空軸とねじり軸の間にスリーブメタルを装着し、両者の間に一定の空けきを設けるようにしてある。ねじり軸が異常荷重によって設定値以上にたわんだとき、ねじり軸はスリーブメタルと接触して軸受として働き、ねじり軸のたわみ量の増加を防止するこ

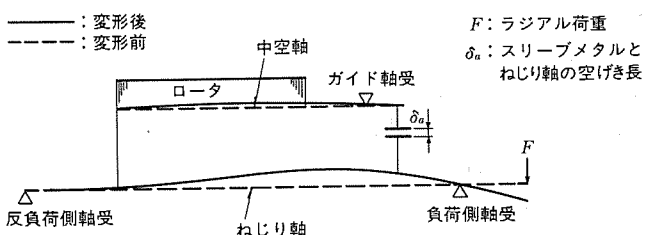


図 8. 軸変形解析モデル

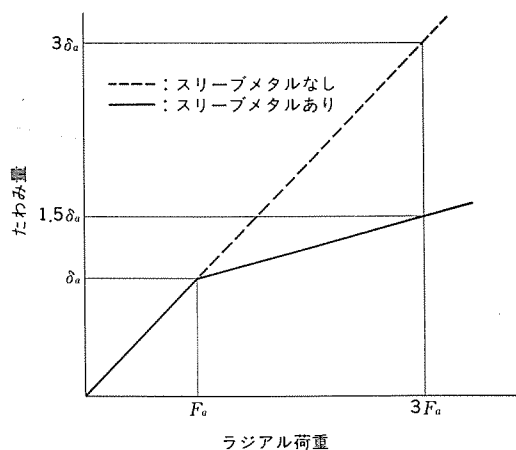


図 9. ラジアル 荷重と軸端たわみの関係

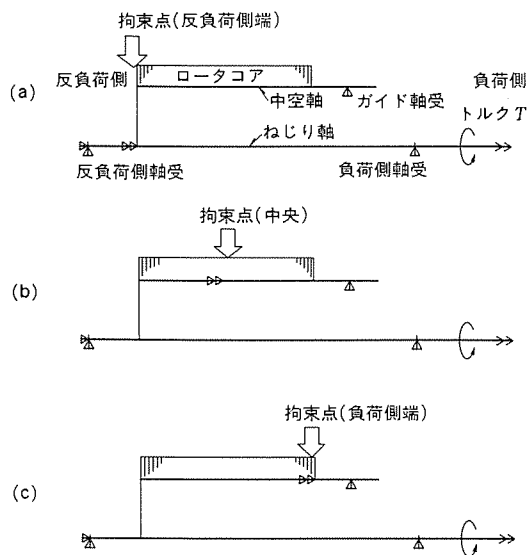


図 10. ねじりの解析 モデル

とができる。

図 8. はこの軸変形解析 モデル である。この解析 モデル に基づいて計算した荷重とたわみ量を図 9. に示す。図で F_a は軸端に加わる最大許容 ラジアル 荷重であり、 そのときの軸端のたわみ量が δ_a である。中空軸とねじり軸の間にスリーブメタルが無い場合、ラジアル 荷重とたわみ量はほぼ比例関係にあり、軸端に加わる ラジアル 荷重に比例して軸がたわむことが分かる。スリーブメタル がある場合は、最大許容ラジアル 荷重までは比例関係にあるが、許容値以上の荷重に対しては軸受として働き、たわみ量を半減することができ、細いねじり軸の構造であっても異常荷重の保護が十分行えることが分かる。

4. 2 軸系の固有振動数について

軸系の固有振動数はねじり方向と曲げ方向が考えられるが、ここで問題となるのは、ねじり方向のばね定数を小さくしていることに起因するねじり固有振動数である。

まず第 1 の問題は、トルクを発生する ロータから出力軸に至るトルク伝達系について、そのねじりの起点を求めることである。図 10. はトルク 伝達系を簡単に モデル 化したものであり、ねじりの起点を(a) (b) (c) の 3 通り考えている。(a) はねじりの起点を ロータの出力軸とは反対の端面と考えたもの、(b) は ロータの中央とした場合、(c) は ロータの出力軸側端面とみなしたときのモデルである。ねじりの起点を回転の拘束点と考え、軸端にトルク T を加えた場合のそれ

表 2. 軸のねじりばね定数計算結果

	ねじりばね定数 (kg・m/rad)		
	軸 全 体	歯 車 AB 間	ね じ り 軸 間
(a)	4,902	5,376	5,952
(b)	4,831	5,263	5,952
(c)	4,651	5,076	5,952

表 3. ねじりの固有振動数

単位: Hz

		$J_L=0.3 J_M$			$J_L=0.07 J_M$		
		軸 全 体	歯 車 間	ね じ り 軸 間	軸 全 体	歯 車 間	ね じ り 軸 間
計 算 値	(a)	216	226	238	168	176	185
	(b)	214	224		167	174	
	(c)	210	220		164	171	
測 定 値		250.7			188.3		

注 ((a), (b), (c)) は図 10. 参照

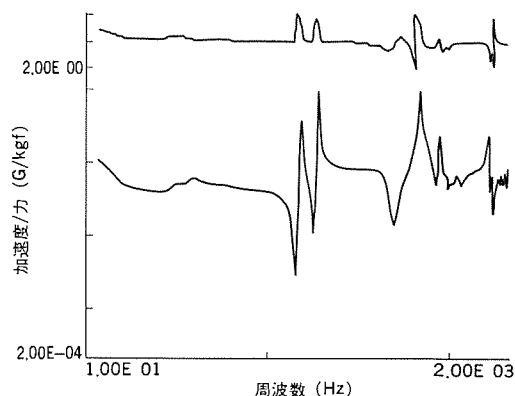


図 11. ねじりの伝達関数 ($J_L = 0.3 J_M$ の場合)

それぞれのケースのばね定数の計算結果は表 2. に示すとおりである。このばね定数を使ってねじり固有振動数は式(8)で与えられる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k(J_M + J_L)}{J_M \cdot J_L}} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 k : ねじりばね定数 (kgm/rad), J_M : 回転子の慣性モーメント (kgm・s²), J_L : 負荷の慣性モーメント (kgm・s²)

式(8)からも明らかのように、ねじり固有振動数はねじりばね定数と負荷の慣性モーメントによっても変化するため、負荷の慣性モーメントを想定する必要がある。ここでは、 $J_L = 0.3 J_M$ 及び $J_L = 0.07 J_M$ の二つのケースを考え、上述 3 種類のねじりの起点について固有振動数を検討した。その計算結果と実機での測定結果は表 3. に示されるとおりである。

図 11. は $J_L = 0.3 J_M$ の場合のねじり振動の伝達関数である。この結果から、トルク伝達系のねじりばね定数はねじり軸系のばね定数だけを考えればよく、ロータは剛体とみなせることが分かる。この結果に基づいて実際の使用状態におけるねじり固有振動数を考察すると、負荷の慣性モーメントを電動機の慣性モーメントの 2 倍と仮定してもその固有振動数は 143 Hz であり、回転周波数に対して十分高い固有値となっており共振の危険はないと言える。

以上の検討から、トルク検出のために細くて長いねじり軸を使用し

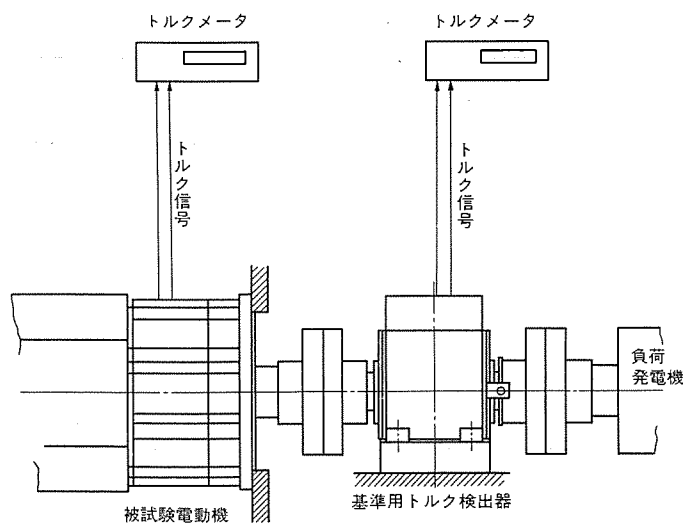


図 12. 試験装置

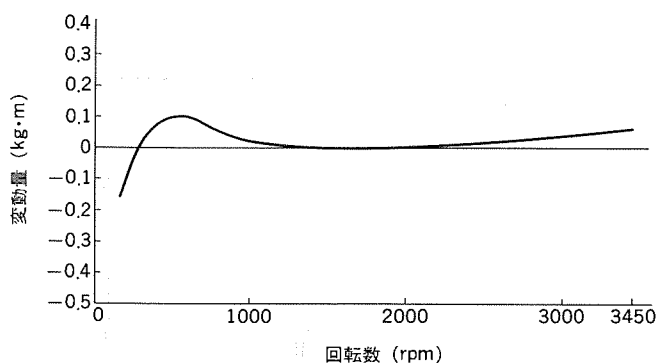


図 13. N-O 特性

ていても、機械強度の面、振動の面で実用上問題のない構造であることが分かる。

5. 開発機の検出精度と試験結果

5.1 試験方法

図 12. に示すように負荷として発電機を使用し、発電機と試験機の間に基準トルク検出器を取り付け、負荷トルクに対する試験機からの検出トルクと、基準トルク検出器による測定値との比較によって今回の開発機のトルク検出精度の検証を行った。

5.2 検出トルク精度

図 13. は各回転数に対する検出トルクの零点の変動量 (N-O 特性) の測定結果である。回転数 300~3,450 rpm の速度範囲における零点の変動幅は、約 0.1 kg・m であり最大検出トルク 30 kg・m に対して 0.3 % であり、回転数に対するトルク検出の再現性・精度の高いことが分かる。図 14. は各トルク値 (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 kg・m) に対する各回転数における検出トルクの平均誤差 (定格トルクに対する誤差の比率) をプロットしたものである。図 14. から

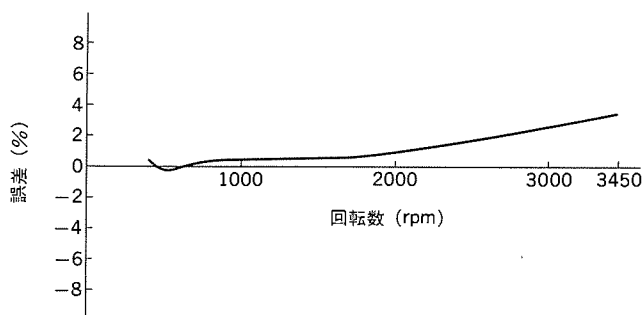


図 14. トルク検出誤差

明らかなように零点の変動分も含め、今回の開発機のトルク検出精度は大略 -0.3 % ~ +3.5 % になっている。

5.3 検出精度結果の考察

上述のとおり測定結果は大略良好であるが、零点の変動及び検出精度の変動が認められ、その原因としては次の項目が考えられる。

(1) 温度変化によるもの

電動機の使用状態により電動機の温度は一定でなく変化し、その温度変化により、①軸のねじり角が変化する、②検出器コイルの抵抗値が変化する、③検出歯車のギャップが変化する、などによるものと考えられる。

(2) 軸材のヒステリシスによるもの

今回の開発機のねじり軸には、機械的ヒステリシスの少ないニッケルクロム鋼を使用しているが、わずかなヒステリシスの影響が出ているものと思われる。

これらの原因が単独あるいは複合されて、今回の検出精度になっているものと考えられる。

6. む す び

以上、トルクセンサ内蔵電動機について述べたが、今後も電動機の交流化はどんどん拡大され、それに伴い電動機に要求される機能も従来の単なる動力源だけではなく、システム構成の一部として多岐にわたるものと思われる。

今回開発のものは、検出精度の高いコンパクトなトルクセンサを交流電動機に内蔵させたものであり、十分従来の直流電動機の代替として使用できるものと考え、技術革新の著しい昨今、一層の研究を続け、より経済的で信頼性の高い製品を作るよう努力していきたい。需要家各位の御支援、御指導をいただければ幸いである。

参 考 文 献

- (1) 松本ほか：三菱電機技報，56，No. 5，p. 56 (昭 57)
- (2) 小野：日本機械学会，No. 426 (昭 51)

国際電信電話(株)向けDS-11形 非同期端末パケット集線装置(CPAD)

長尾 朋*・榎本 龍夫*・加藤眞名井**・木村 俊弘**・溝 越 豊**

1. ま え が き

調歩式端末をパケット網に收容するためのパケット組立分解機能をもつ装置として、PAD (Packet Assembly Disassembly) 装置がある。

国際電信電話諮問委員会 (CCITT) では、調歩式端末をパケット交換網へ收容する方法として、PAD 機能とそのプロトコルを、勧告 X. 3, X. 28, X. 29 に規定している。既に、三菱電機(株)では国際電信電話 (KDD) 研究所と調歩式端末用プロトコル変換装置⁽⁷⁾の試作装置を完成していた。

今回、端末用プロトコル変換装置の技術蓄積を基本に、1980年版 CCITT 勧告に準拠した KDD 向け非同期端末パケット集線装置 (DS-11 形非同期端末パケット集線装置、以下 CPAD と称す) を完成し、昭和 58 年 6 月に納入した。

本稿では、CPAD の概要、機能、特長、性能について紹介する。

2. CPAD の概要

2. 1 CPAD の目的

CPAD は、調歩式端末に CCITT 勧告準拠のパケット交換方式による KDD のデータ伝送サービスである国際公衆データ伝送サービス (VENUS-P) を提供する装置であり、国際標準に基づく調歩式端末の收容及び、既存の網設備に対する影響を最小にすることを主眼に開発された。調歩式端末をパケット網に接続するためのパケット組立分解機能 (PAD) に関して、CCITT では PAD の制御パラメータを勧告 X. 3 で、調歩式端末と PAD 間のインタフェースを勧告 X. 28 で、PAD とパケット端末又は PAD 間のインタフェースを勧告 X. 29 でそれぞれ規定している。

CPAD は、KDD のパケット交換設備である DS-1 システムの 1 サ

システムである端末インタフェースサブシステム (TIS-A)⁽¹⁾ と、勧告 X. 25 を基本とした KDD の局間プロトコル⁽²⁾ で回線接続する方式が採用された。このプロトコルを、X. 25 トラUNKプロトコル (X. 25T) と呼称する。図 1. に、CPAD の位置づけを示す。

2. 2 CPAD の構成

CPAD は高実装性、操作の容易性、経済性、ユニット形式による拡張性を考慮し設計した。

中央処理装置は汎用ミニコンピュータ《MELCOM 70 シリーズ》モデル 30 C を用い、固定プログラム記憶機構による初期立ち上げ方式とした。システムタイプライタ装置などは、保守運転装置とし通常運転には用いず、保守時のみ接続する方式とした。これにより複数の CPAD に 1 式の保守運転装置で運用可能としている。

CPAD は、1 台でユーザーの調歩式端末 16 台を收容する。架実装として、加入者線経由の調歩式端末を收容し、待機予備方式をとる 1 架に 2 台の A 架構成と、国内公衆電話網経由の調歩式端末を收容し 1 架に 3 台の B 架構成とすることとなった。

CPAD のソフトウェアは、ベーシックソフトウェアを《MELCOM 70 シリーズ》の RTMS (Realtime Monitor System) とし、X. 25 トラUNKプロトコルのリンクレベルを実現する LAPB、パケットレベルを実現する VCP と、勧告 X. 3, X. 28, X. 29 を実現する PAD 及び CSP、その他各種運用プログラムから構成した。図 2. に A 架形式のハードウェア構成を、図 3. にソフトウェア構成を示す。

3. CPAD の機能

3. 1 交換機能

CPAD の交換機能を、以下の 3 フェーズに分けて説明する。

(1) 呼の設定

調歩式端末からの発呼に対し、TIS-A を経由し該当外国ホスト又は PAD 経由の調歩式端末と接続する。パケット端末からの着呼に対し、該当調歩式端末と接続する。

(2) データの送受信

調歩式端末からの受信キャラクタに対し、パケット送出文字、パケット送出タイミング、パケットフルなどのパケット送出条件によりパケットに組み立て、パケット端末に送出する。このとき、調歩式端末からの受信キャラクタに対する伝送路上の保証手段がないため、PAD パラメータの指定によりエコーを応答する。一方、パケット端末からの受信パケットに対し、キャラクタに分解し調歩式端末に送出する。このとき、調歩式端末との整合性を取るため PAD パラメータの指定により 1 行文字数の設定及び復帰、改行後の動作時間を保証している。

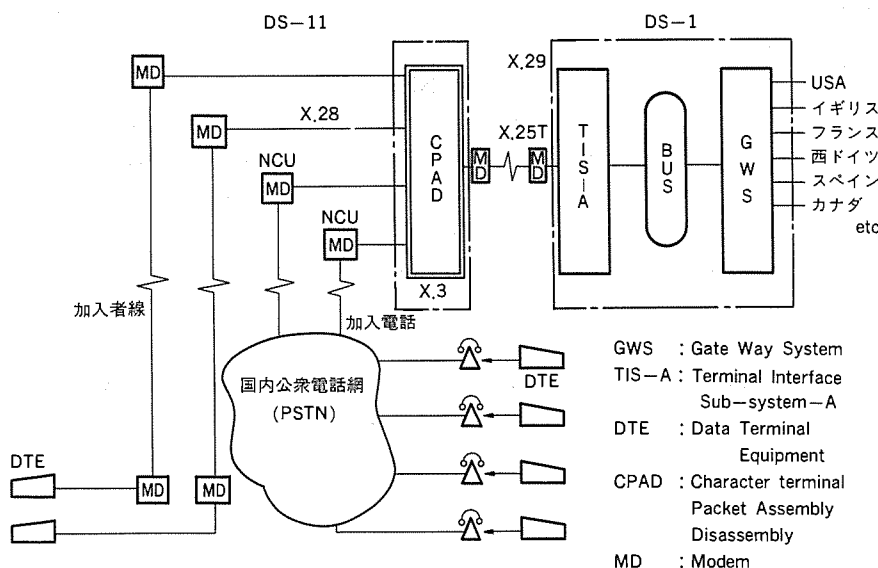


図 1. CPAD の位置づけ

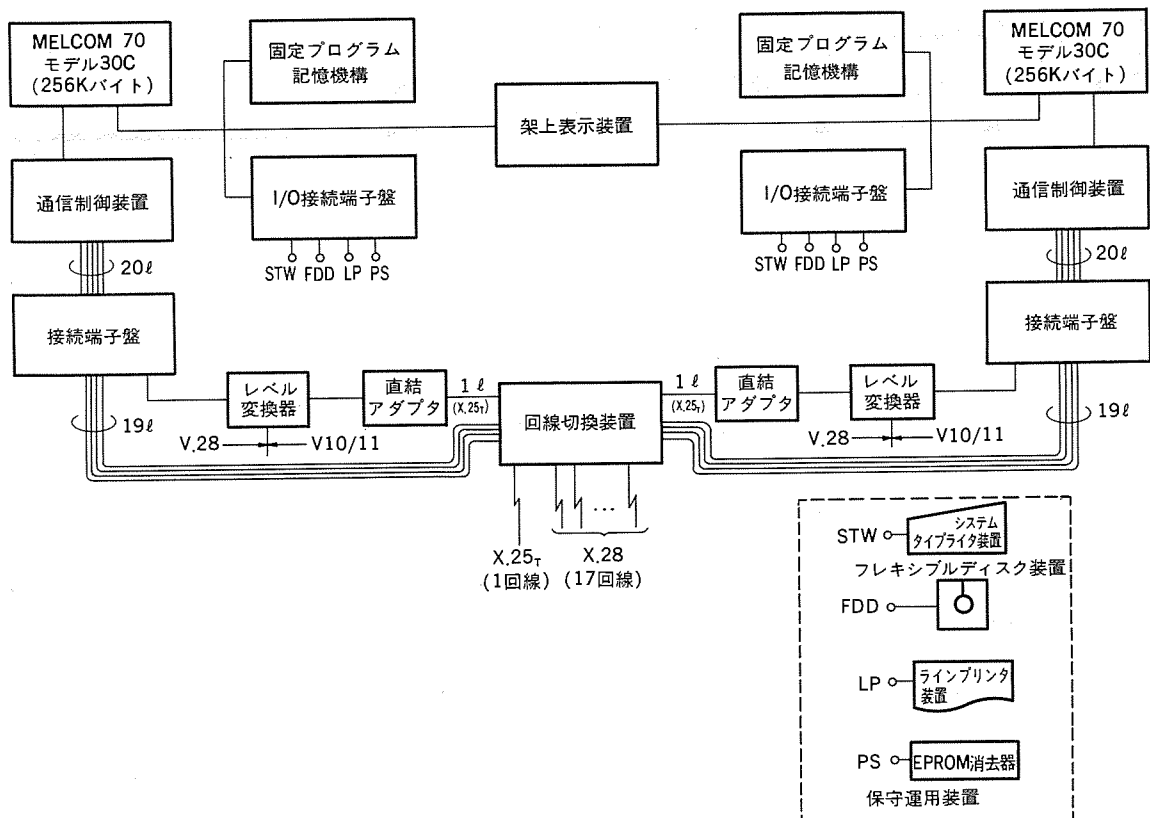


図 2. CPAD A 架 (待期予備方式) のハードウェア構成

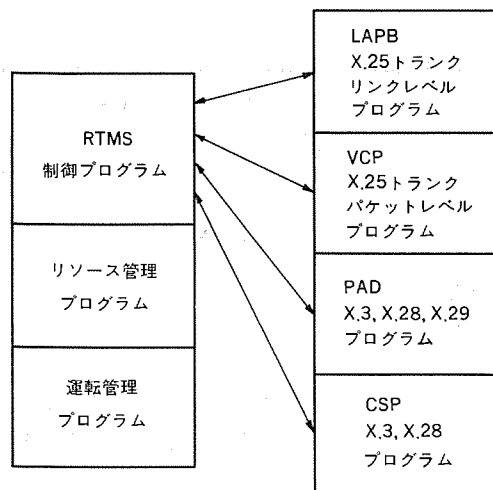


図 3. CPAD のソフトウェア構成

(3) 呼の解放

調歩式端末からの復旧、又はパケット端末からの切断及び解放勧誘 PAD メッセージに対し、調歩式端末とパケット端末間の呼を解放する。

3.2 サービス機能

CPAD は、CCITT 勧告 X.28 で規定されている PAD コマンド信号、PAD サービス信号、編集機能、付属機器制御機能及び回線対応機能をもつ。CPAD のサービス機能設計上、調歩式端末手順の簡略化と多様な端末に対し考慮している。収容する端末は、文字符号を IA No. 5、通信回線を全二重としているが、すべてのパリティ及び 100 b/s (ビット/秒) から 1,200 b/s までの 6 種の通信速度を可能としている。以下に各機能を説明する。また、図 4. にアクセス手順例図を示す。

(1) PAD コマンド 信号

PAD コマンド 信号は特定文字列からなり、調歩式端末 に対し発呼要求 (選択)、復旧要求、状態問合せ、リセット、 割り込みの呼制御機能と プロファイル 指定、パラメータ 値変更、パラメータ 値問合せ、パラメータ 値変更問合せの PAD パラメータ 制御用機能を提供する。

(2) PAD サービス 信号

PAD サービス 信号は特定文字列からなり、調歩式端末 に対し PAD コマンド 信号の応答、網状態の表示、入力可の表示を行う。PAD サービス 信号の送出は PAD パラメータ の指定により制御している。

(3) 編集機能

編集機能は、PAD コマンド 信号又は調歩式 DTE が送出しようとするパケット 送出条件内の 1 行に対し、文字削除、行削除、行表示の機能を提供する。

(4) 付属機器制御機能

付属機器制御機能は、フレキシブルディスク、カセット 磁気テープなどの付属機器をもった調歩式端末を制御する機能であり、文字符号 DC 1 (X-ON)、DC 3 (X-OFF) を用いている。

(5) 発呼手順の簡略化

発呼手順の簡略化として、短縮 アドレス やダイレクトコール、リポート 指示の機能を設けている。

(6) 速度・パリティ の自動検知機能

速度・パリティ の自動検知機能は勧告 X.28 に規定するサービス要求信号によって実現したもので、5 キャラクタから構成されるサービス要求信号から速度、パリティ、初期プロファイル を決定する。

(7) 各種端末への対処

各種端末への対処として、半二重 (ローカルプリント) モードで使用する端末を考慮して発呼時パスワードのぬりつぶしを行う選択 PAD コマンド、端末対応の各種 プロファイル を準備することとなった。

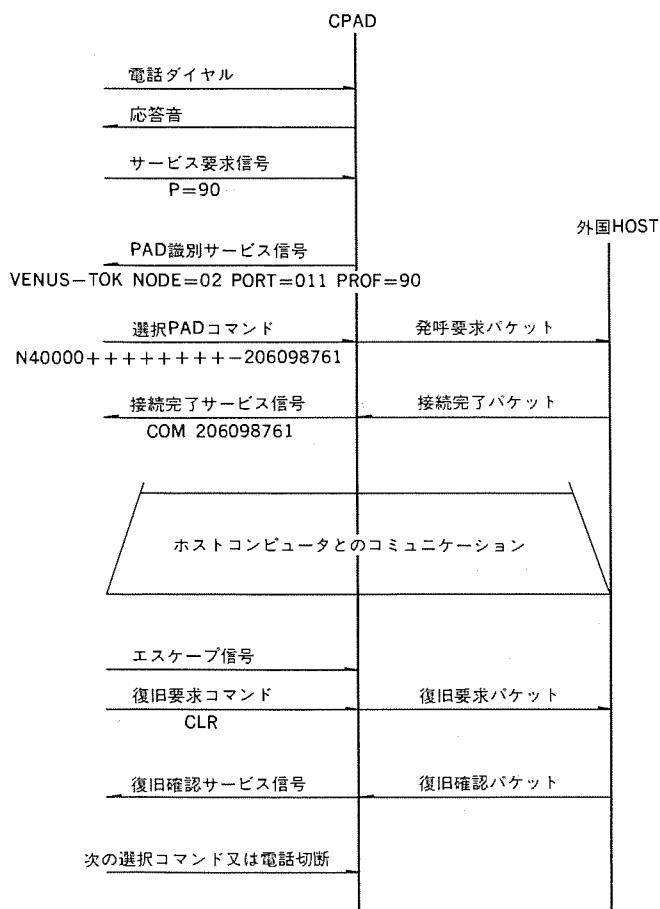


図 4. 電話網経由によるアクセス手順例図

3.3 保守運転機能

保守運転機能として、システムタイプライタコマンド、システム状態表示、CPU 使用率表示、エラーログ機能がある。以下に各機能を説明する。

(1) システムタイプライタコマンド

システムタイプライタコマンドは、局データ及び加入者データの登録、削除、変更、問合せ、保存とメモリデータの修正、問合せ機能で、ソフトウェアの変更なしに局データ、加入者データの相違に対処可能としている。局データには局を識別するセンターID、局内のノードを識別するノードIDを設定し、加入者データにはDTEアドレス、ポート種別、デフォルトスピード、デフォルトパリティ、サービス要求信号待ちタイマを設けている。上記デフォルト値は、サービス要求信号が投入されない加入者線からのアクセス時の設定値である。

(2) システム状態表示

システム状態表示は、架に収容されている各種装置の状態を表示する架上表示装置と、システム監視席へのアラーム出力機能をもつ。架上表示装置はファン、電源、温度、システム、X.25トランク回線の正常、異常の表示を行い、システムの立ち上げ確認及び異常装置の判別を容易にし、障害復旧の早期化を可能としている。

(3) CPU 使用率表示

CPU 使用率表示は、リソースの一つである CPU 使用率を 10% 刻みで、CPU のデータ表示機構に表示する機能であり、CPAD の稼働状況が目視で簡単に分かるようになっている。

(4) エラーログ機能

エラーログ機能は、パケット端末とのインタフェース上で勧告 X.29 のエラー PAD メッセージが発生したとき、解析を容易にするためにロギングす

る機能である。

4. CPAD の 特 長

CPAD の特長として、主に X.25 トランクプロトコル、各種端末への対処、保守運転装置の共用がある。以下に CPAD の特長を説明する。

(1) X.25 トランクプロトコル

X.25 トランクプロトコルは勧告 X.25 手順を基本に必要な制御機能を追加して KDD で新たに開発された手順である。CPAD と TIS-A 間は回線結合とし、機能分担により高品質の情報交換が可能となっている。CPAD が分担する機能は、バーチャルコールによる網内制御情報及びデータ転送、CPAD で収集した課金情報転送、ダイレクトアドレス指示や短縮アドレス指示などを用いた特殊なアドレスの転送がある。

(2) 各種端末への対処

1980 年版 CCITT 勧告で規定する PAD 機能は全二重、偶数パリティ（データはトランスパレント）の端末を前提としている。我が国の調歩式端末は半二重（ローカルプリント）モードで使用される場合が多い。また端末のパリティと相手端末のパリティのいずれかが異なる場合もあり得る。

ローカルプリントモード端末に対し、加入者識別子の機密保護の観点から発呼時、パスワードのぬりつぶしを行う選択 PAD コマンドを製作することとなった。CPAD はこれを受信して TIS-A に通知する。正当性のチェックは TIS-A が行っている。また、外国ホストとのアクセス中に外国ホストから PAD パラメータを変更する PAD メッセージが来ても CPAD からのエコーを返さないような機能を設ける必要から、ローカルプリントとエコーが二重印出となることを防いでいる。

パリティに対し、CPAD と調歩式端末間の PAD サービス信号は端末に合わせることで、異なるパリティのパケット端末との通信を可能とするためにパリティ変換の指定をできる機能を設けることにした。

(3) 保守運転装置の共用

CPAD の保守運転装置はシステムタイプライタ装置、フレキシブルディスク装置、ラインプリンタ装置、EPROM 消去器からなる。

CPAD の通常運転時は、固定プログラム記憶機構 (ROM) によるプログラム初期立ち上げとし、保守運転装置は不要となる。これにより複数の CPAD に対し、1 式の保守運転装置で運用可能にしている。

5. 性 能 評 価

CPAD のシステム諸元を表 1. に示す。CPAD の処理能力として、パケット処理能力を定義し、8 データパケット/秒以上と規定された。ただし、CPAD の処理は、キャラクタの送受信処理 (X.28 側処理) とパケット送受信処理 (X.25T 側処理) に大別され、かつキャラクタ受信処理においては、1 キャラクタごとに、通信制御装置からの割り込み処理が発生するため、データの方向性 (X.25T から X.28 へのデータを受信とし、その逆を送信と呼ぶ) 及び 1 パケット当りのキャラクタ数により、処理パケット数は大きく影響されることが予想される。そこで CPAD の性能評価は、1 パケット当たり 32 キャラクタ、送受比率を 1:9 の条件とすることとした。

図 5. に CPAD の負荷及び送受比率の変動に対する処理パケット数の実測値を示す。この測定結果から、次のことが推測できる。

(1) 送信パケット処理数が、受信パケット処理数より少ないことから、キャラクタごとの処理が CPU 負荷上昇の要因となる。

(2) CPU 負荷が増大するにつれて、処理パケット数の増加率が上

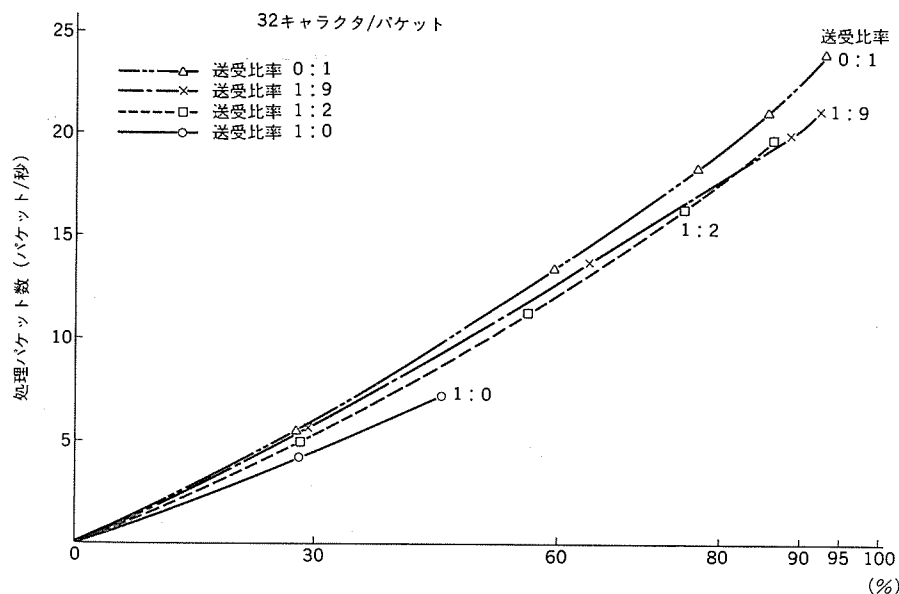


図 5. 処理パケット数 (X.25T ↔ X.28)

表 1. システム諸元

項 目	シ ス テ ム 諸 元	備 考
収 容 回 線 プ ロ ト コ ル	X.28 プロトコル X.25 トランクプロトコル (X.25T)	—
最大 収容 回線 数	X.28 ユーザ用ポート	16 回線 利用契約, 加入契約者用の 2 種を含む。
	X.28 試験用ポート	1 回線 —
	X.25 トランク用ポート	1 回線 —
通 信 速 度	X.28 (b/s)	100, 110, 150, 200, 300, 1,200
	X.25 トランク (Kb/s)	2.4, 4.8, 9.6 通常 9.6 で運用する。
論 理 ポ ー ト 数	1	局内の保守用端末からのみ 着信可能。
最大同時接続呼数 (呼)	18	X.28 回線 16 回線, 試験用 1 回線に加え, CPAD 内 にもつ着呼専用の論理ポ ートを含む。
最大論理チャネル数 (チャネル)	20	論理チャネル群番号は 0 を 使用する。X.28 端末側の 呼が切断された後も課金転 送のため, X.25T 側の呼が 保留されることがあるため 2 チャネル分の余裕を持つ。
パ ケ ッ ト 処 理 能 力 (データパケット/秒)	8 以上	1 パケット 32 キャラクタ 送 受 比 率 1:9 送 信: X.28→X.25T 受 信: X.25T→X.28

がっている。これは、リンクレベルで 1 フレーム受信に対し、1 フレームで応答することにより 1 パケット当りの処理時間が低下するためである。

6. む す び

CPAD は、KDD が昭和 58 年 7 月実用に供し、その後のトラヒック増加により増設が行われるなどを経て、順調に稼働している。

最後に、CPAD を開発するにあたり終始御指導下さった国際電信電話(株)交換部データ通信課、東京国際通信施設局、大阪国際通信施設局の関係各位また社内関係各位に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 長尾ほか：VENUS-P 用調歩式 X.28 端末収容設備の導入，国際通信の研究，118 (昭 58-10)
- (2) 榎本ほか：国際パケット交換システム DS-1 における調歩式端末収容設備，電子通信学会，SE 82-97
- (3) KDD 編：国際公衆データ伝送サービスのインタフェース
- (4) 特集記事“DS-1 形データ通信処理装置”国際通信の研究，113 (昭 57-1)
- (5) CCITT 勧告，X.3, 28, 29
- (6) 長尾ほか，浦野：公衆パケット網キャラクタ端末収容設備の開発，国際通信の研究，115 (昭 58-1)
- (7) 小野ほか：プロトコル変換装置，国際通信の研究，107 (昭 56-1)

GDS-70モデルDS図面作成支援システム

酒元登志克*・土屋完二**・西井龍五**・井上 進**・稲葉 徹**

1. ま え が き

近年、社会の成熟により、要求が多様化するとともに、少品種多量生産から多品種少量生産に移行してきている。これに対し、製造部門ではコンピュータ化により、製造コストの低減や合理化を進めており、このような現場での合理化は一応の成功を収め、現在、国内でのロボットの導入実績は、諸外国のそれを大きくしのぐようになっている。更に、設計部門にもこの動きが波及し、CAD(Computer Aided Design)導入の機運が高まっている。

以上の環境下において、設計部門合理化のためのCAD分野では、これまで大形コンピュータを中心とする大規模なシステムが構成されてきた。これらは、大規模システムなりの効果があるものの、①高額の投資が必要、②CADに対する経験が少ない(投資効果が目に見えない)、③専門家が必要(コンピュータアレルギーがある)、といった理由により、いわゆる富士山の頂上付近に位置する一部の企業に限って使われ、すそ野にあたる中小規模の企業への普及が行われなかった。

そこで、これらの企業でも安心して導入できる低価格で、操作が簡単なCADシステム“GDS-70モデルDS図面作成支援システム”(以下、GDS-70/DSと称す)の開発を計画し、昭和57年10月にその原形の製作を完了した。更に第2ステップとして導入効果を高め、購買層を広げるため、専用機化、シリーズ化を進めてきた。第2ステップの開発が完了したこの機会に、GDS-70/DSの概要を紹介する。(図1.)

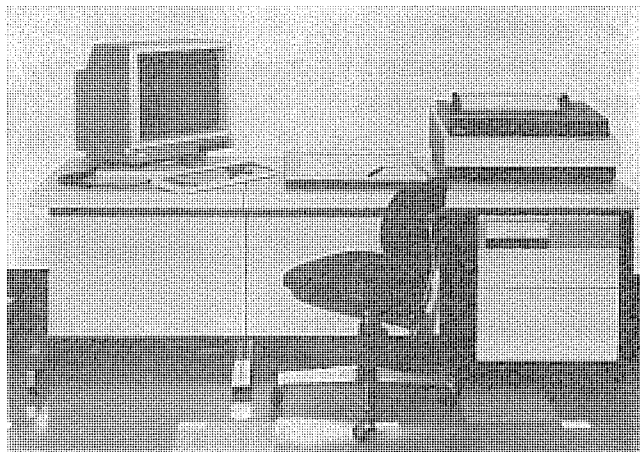


図1. GDS-70/DSの外観

2. 特 長

GDS-70/DSはCAD化の底辺を広げることをねらったシステムであり、次の特長をもっている。

(1) 操作が簡単

ミニコンピュータを使用しているが、その操作のためには、コンピュータやプログラムに関する知識を必要としないよう配慮してある。例えば、

電源を入れれば直ちに、図面作成、製図出力などの作業が開始できる状態になる。また、使用時間の比重の大きい図面作成操作は、次の方式を取り入れ簡単にしている。

(a) 会話形式

グラフィックディスプレイ装置で確認しながら、コマンド入力、図形入力、修正といった図面作成作業ができる。

(b) メニュー方式

コマンド入力も図形入力も、タブレット(座標値入力装置)上の位置をスタイラスペン(座標指示ペン)で指示するだけでできる。

(c) 覚えやすいコマンド

コマンドを必要最低限のものに絞ってあるため、容易に覚えることができる。また、メニューシート上には、漢字と絵で表示してあるためなじみやすい。

(2) 専用機化

二次元配置形(Layout)CADを基本機能(中核)とし、その上に専用機機能をのせることにより専用システムを構築している。このため、無駄な機能がなく、即戦力となるシステムとなっている。また、専用機機能として、図面特性に即した専用コマンドを付加しているため、効率的に図面作成をすることができる。更に設計支援や営業・資材・製造といった他部門向けの帳票出力ができる。

(3) シリーズ化

企業規模の大小、業務内容の拡大に対応できるよう豊富なハードウェア、レパートリをそろえ、上位モデル、標準モデル、下位モデルというようにシリーズ化してある。図2.はモデル構成をまとめたものである。図面作成のメインとなるグラフィックディスプレイ装置は、20インチ形のM4381-2C、M4382、M4383があり、14インチ形のM4381がある。図面製図のためのXYプロッタ装置は、A1サイズとA3サイズがある。また、M460プリンタ装置にハードコピーとして図面出力することもできる。これらを制御する心臓部にあたる中央処理装置には、ミニコンピュータ《MELCOM 70シリーズ》のモデルM、モデル30C、モデル50があり、負荷の量によって最適な構成を実現することができる。

(a) 上位モデル

《MELCOM 70モデル50》を中心としたシステムであり、グラフィックディスプレイ装置を最大5台まで接続できる。また、ディスク装置の容量も480Mバイトまで拡大でき、常時約5000枚の図面を格納できる。設計者の多い中規模の企業に適している。

(b) 下位モデル

ハードウェア モデル	グラフィック ディスプレイ装置	中央処理装置	製図装置
上位モデル	M4382/M4383 グラフィックディス プレイ装置	MELCOM 70 モデル50	M4309 XYプロッタ装置
標準モデル	M4381-2C グラフィックディス プレイ装置	MELCOM 70 モデル30C	M4306 XYプロッタ装置
下位モデル	M4381 グラフィックディスプレイ装置	MELCOM 70 モデルM	M4607 プリンタ装置

図2. モデル構成

《MELCOM 70 モデル M》を中心としたシステムであり、パソコン並みの低価格となっており、いわゆる パーソナル CAD として付置けられる。データ、操作方法とも上位モデルと互換性がある。小規模企業や地方営業所などに適している。

図 1. は《MELCOM 70 モデル M》、M 4381-2 C グラフィックディスプレイ装置、M 4607 プリンタ装置で構成された下位モデルの外観である。

3. 機 能

GDS-70/DS は、図面作成に必要な基本機能と専用機能のための専用機機能を備えている。それぞれ具体的には図 3. に示す機能構成となっている。

3.1 基本機能

中核となる配置形 CAD 機能であり、各専用システム共通の部分である。

(1) 図面編集

グラフィックディスプレイ装置と会話形式で行う。タブレット上にコマンド及び基本図形を配置したメニューシートを載せ、スタイラスペンでこれらを指示することにより、図形表示、編集などができる。コマンドは約 30 あり、次の機能を実現している。

(a) 画面制御

(i) ウィンドー宣言 (ii) 拡大 (iii) 格子点表示と正規化入力

(b) 図形入力

(i) 線分 (ii) 円・円弧 (iii) 長方形 (iv) 基本図形 (シンボル、ピクチャ)

(c) 編集

(i) 移動・反転 (ii) 削除 (iii) グループ化 (iv) レイヤーのマスク指定

(d) 文字入力

(i) 文字列 (JIS 第 1 水準の漢字を含む) (ii) 寸法線 (JIS に準拠した 6 種類)

(e) その他

(i) メニュー交換 (ii) 終了

グラフィックディスプレイ上で編集が終った図面は、ディスク装置に格納する。その際、図面番号以外に、設計者、名称などの図面に付随した情報を付加することができる。また、一度作成した図面は、再度呼び出し訂正したり、別図面作成のため流用したりできる。

(2) 製図出力

ディスク装置に格納した図面を XY プロッタ装置に製図出力する。このとき、次の指定ができる。

- (a) 縮尺
- (b) 図面サイズ
- (c) レイヤー単位のマスク指示
- (d) 製図範囲

(3) 基本図形登録

何度も使用する図形は、あらかじめ基本図形として登録しておくことができる。基本図形には、形状が変更できない図形 (シンボル) と、シンボルの集合 (ピクチャ) がある。ピクチャは図面編集時にシンボル単位の編集ができるので、基本回路などを多くピクチャとしておけば、図面作成の効率を大幅に上げることができる。基本図形の登録は、図面編集と同様にグラフィックディスプレイ装置と会話形で行う。

(4) 慣用句登録

何度も使用する単語や文章は、あらかじめ慣用句として登録しておくことができる。慣用句は、メニューシート上に配置しておき、ワンタッチで呼出せ、縦書き、横書きの指定もできる。慣用句には JIS 第 1 水準の文字が使用できる。また、慣用句として登録していない漢字はその都度漢字タブレットから入力できる。

(5) メニュー登録

基本図形、慣用句をメニューシート上に配置する。メニューシートは、99 種類作成できる。設計の対象ごとにメニューシートを作成することにより、図面作成をより効率的に行うことができる。

(6) データ管理

(a) バックアップ

図面データ、メニューデータなどを、コレキシブルディスクシートや磁気テープにバックアップとしてコピーできる。図面データは物件番号を指定することにより、物件単位 (通常 1 物件は数枚～数十枚の図面からなる) でコピーでき、管理が非常に簡単である。

(b) 標準図ロック

標準的な図面を標準図として登録することができる。この図面は多数の設計者が流用設計のために使用するもので、一般設計者の誤操作などにより修正されては困る。そこで、これら標準図は、特定の管理者以外は修正できないようロックできる。

(c) 生産管理データ

部、課、及び設計者担当により、次の生産管理データを日ごと、月ごとでリストが出力できる。

- (i) 作成図面枚数 (図面サイズごと) (ii) 端末使用時間 (iii) 1 枚の図面作成に要した時間

3.2 専用機機能

専用機化するための機能であり、各専用システム固有の機能である。

(1) 専用コマンド

特定業務の図面特質に合った図面編集コマンドであり、これにより図面作成速度の向上、後処理の実現を図る。

(2) 図面作成の前処理機能

自動設計のための数値計算や、図面の自動生成などがある。

(3) 図面作成の後処理機能

図面チェック機能や、部品表などの帳票出力機能がある。

4. 配電盤専用システム

GDS-70/DS の専用システムの一つとして配電盤専用システムがある。このシステムは配電盤関係のあらゆる図面の作成はもとより、接点表の自動作成という図面加工機能、部品表、端子台帳などの帳票作成機能を持ち、設計部門を大幅に合理化するシステムである。

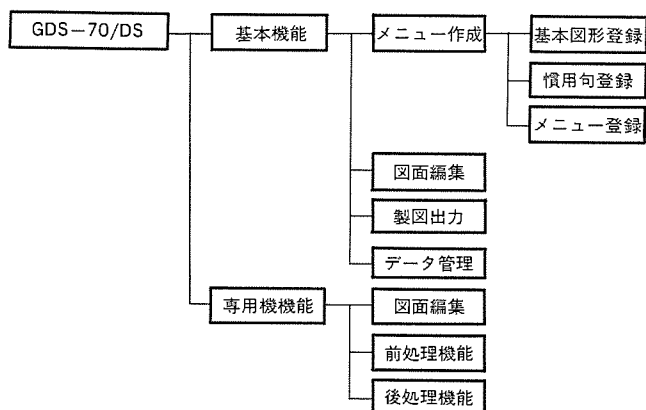


図 3. GDS-70/DS の機能構成

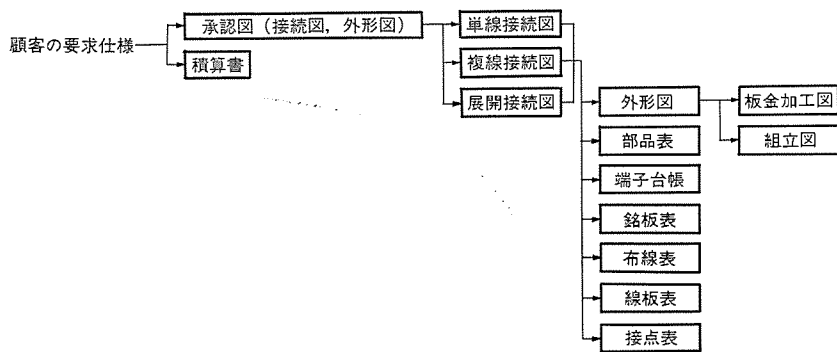


図 4. 配電盤設計の内容

4. 1 配電盤設計の内容

ひとことに「配電盤」といってもその種類は多く、高低圧配電盤、分電盤、端子盤、計装盤、制御盤、操作盤などがある。盤の種類が異なると、当然、設計の成果物（図面、帳票）も異なる。図 4. に盤設計の成果物及び設計の過程を示す。

4. 2 機能

配電盤専用システムは図 4. に示した設計業務のすべてに適用できる。つまり図面では、

(i)外形図 (ii)板金加工図 (iii)組立図 (iv)接続図（単線接続図、複線接続図、展開接続図）

が作成でき、これらの図面から

(i)部品表 (ii)端子台帳 (iii)銘板表 (iv)布線表 (v)線番表 (vi)接点表

の帳票作成ができる。これらの帳票以外に、図面作成前に必要となる積算書の作成もできる。また、資材部門の資材管理用コンピュータに部品表データをオンライン、又は、フレキシブルディスクシートで渡すことができる。

4. 3 専用機能の内容

(1) 基本図形の登録

配電盤関係図面作成に必要な基本図形、慣用句を登録した。

・接続図 シンボル	1,000 種類
・接続図 ピクチャ（基本回路）	500 種類
・機器外形図	300 種類
・慣用句	700 種類

(2) 専用コマンド

配電盤関係図面作成の効率をあげるためのコマンド、後処理用のコマンドを追加した。

(a) 線番コマンド

線番号をふるコマンドであり、線番号が自動的に 1 ずつあがる。また、結線を追加、削除したときはその線番号以降の線番号を自動的に 1 アップ、又は、ダウンさせる。

(b) 布線コマンド

布線表作成のためのデータを作成する。

(c) タグコマンド

図面内の電気記号（シンボル）とそれに付加した定格情報を結合する。これにより、部品表、接点表などが作成できる。

(3) パラメトリック設計

高低圧配電盤や、分電盤の外形図は、取付機器の位置関係や形状が何種類かに限定され、ひな形を作っておけば、パラメトリック設計で何通りもの外形図を描くことができる。図 7. の左側の正面図、側面

図、及び、右側の図の枠の部分は高さ 1,500、幅 700、奥行 150 というパラメータを与えて作成したものである。

(4) 製図出力

基本機能に次の機能を追加した。

(a) 隠面処理

外形図において部品の重なりがある場合、隠れた部分は、破線にするか、消去するかしなければならない。この処理を設計者が図面作成時に行うのは非常に手間がかかる。そこで、図面作成時に重なり処理をしなくても XY プロッタ出力時に、自動的に隠面処理を行うようにした。

(b) 連続出力

計装盤、制御盤では接続図の図面枚数が非常に多く、通常の作業時間では製図出力が終らないときがある。このような場合、人間がついていなくても終夜運転で製図出力できるよう連続出力機能を追加した。

(5) 接点表作成

接点表とは、開閉器や接触器の接点の使われている位置（図面のページ番号と図面内の位置情報）を表にまとめたもので、通常、図面のコイル記号の下、又は、右にかかれる。この接点表の作成は、手作業で行うと非常に時間がかかるだけでなく、拾い抜けや拾いまちがいなどのミスも多く、なかなか神経を使う作業である。接点表作成機能は、この接点表を自動的に作成し、図面に製図出力する機能であり、制御盤などのシーケンス回路の図面に有効である。

(6) 部品表作成

図面から部品データ（部品名称、容量、定格、個数など）を抽出し、これらをキーとして、部品マスタファイルを検索して部品形式を決定する。このとき、メーカー名や、図面にない補足情報を入力して、検索の範囲を絞ることができる。部品形式が決定すると、図 8. のような社外向け部品表、及び、価格、工数情報の入った社内向け部品表が作成できる。継電器、接触器のように、コイルと接点からなる部品は、単純に個数が定まらない。これらは図面内で使用している各種接点（a 接点、b 接点、c 接点）数を拾い出し、その部品の接点構成をもとに演算をし、個数を求める。

(7) 端子台帳作成

各端子に入る線の線番号を、端子の容量別に分類し、かつその線番号を、特殊なルールに従って並びかえた端子台帳を作成する。

(8) 銘板表作成

配電盤に取り付ける銘板の一覧表を作成する。

(9) 布線表作成

線番号に着目し、その線で結線される部品名、端子番号を記載した帳票を作成する。製造部門で結線作業で使用される。

(10) 線番表作成

結線作業を行うとき、電線の両端にワイヤマーク（線番号を記したチューブ）を付ける。線番表は、線番号とそのワイヤマークが何個必要かをまとめた表である。

(11) 積算書

使用部品の形式及び個数を入力することにより、以下のデータを帳票出力する。

(i)部品価格合計 (ii)補助材費用 (iii)板金費用 (iv)塗装費用 (v)工数合計 (vi)工場価格 (vii)営業価格

4.4 適用例

5. ハードウェア

5.1 《MELCOM 70 シリーズ／モデル M》

機能性を持たせつつ、コンパクト性を重視して開発した計算機システムである。LSI を中心とする半導体技術、高密度実装を核として、小規模システムに対し、優れたシステム総合性能を発揮できるように配慮している。《MELCOM 70 シリーズ／モデル M》では、中央処理装置に加えて、5 1/4 インチ固定ディスク装置と 8 インチフレキシブルディスク装置をワンボックスに収納し、小形化、軽量化を図っている。またバーチャルコンソール機能によりシステムの操作性、保守性を大幅に向上させている。以下に主な特長を示す。

容量が 7.7 M バイト（フォーマット時）あり，基本シャーシに内蔵

容量が1 M バイトで、汎用機や他の ミニコンピュータシステム との データ 交換にも使用することができる。

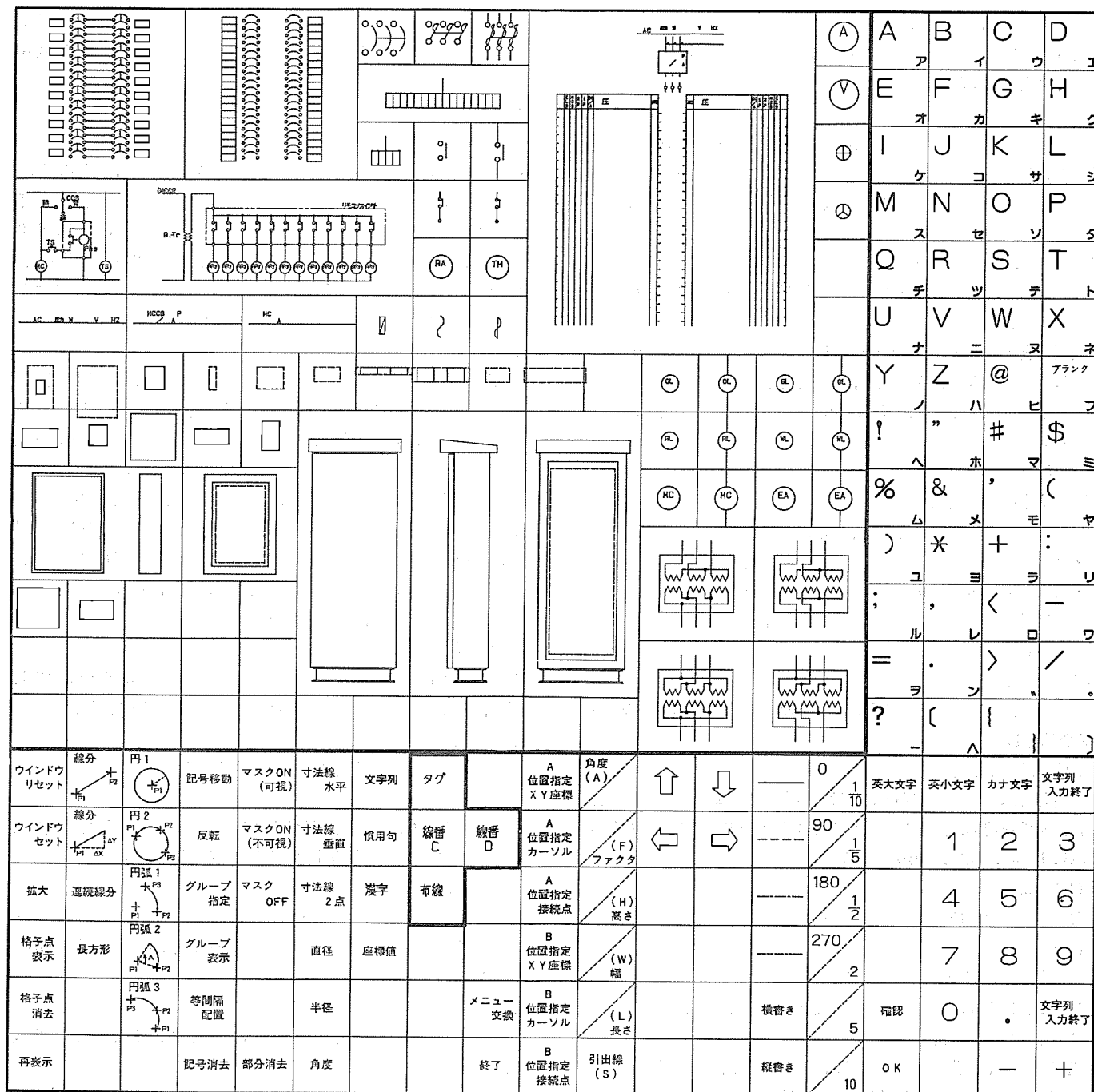


図 5. メニューシート (太枠部分は配電盤専用 コマンド)

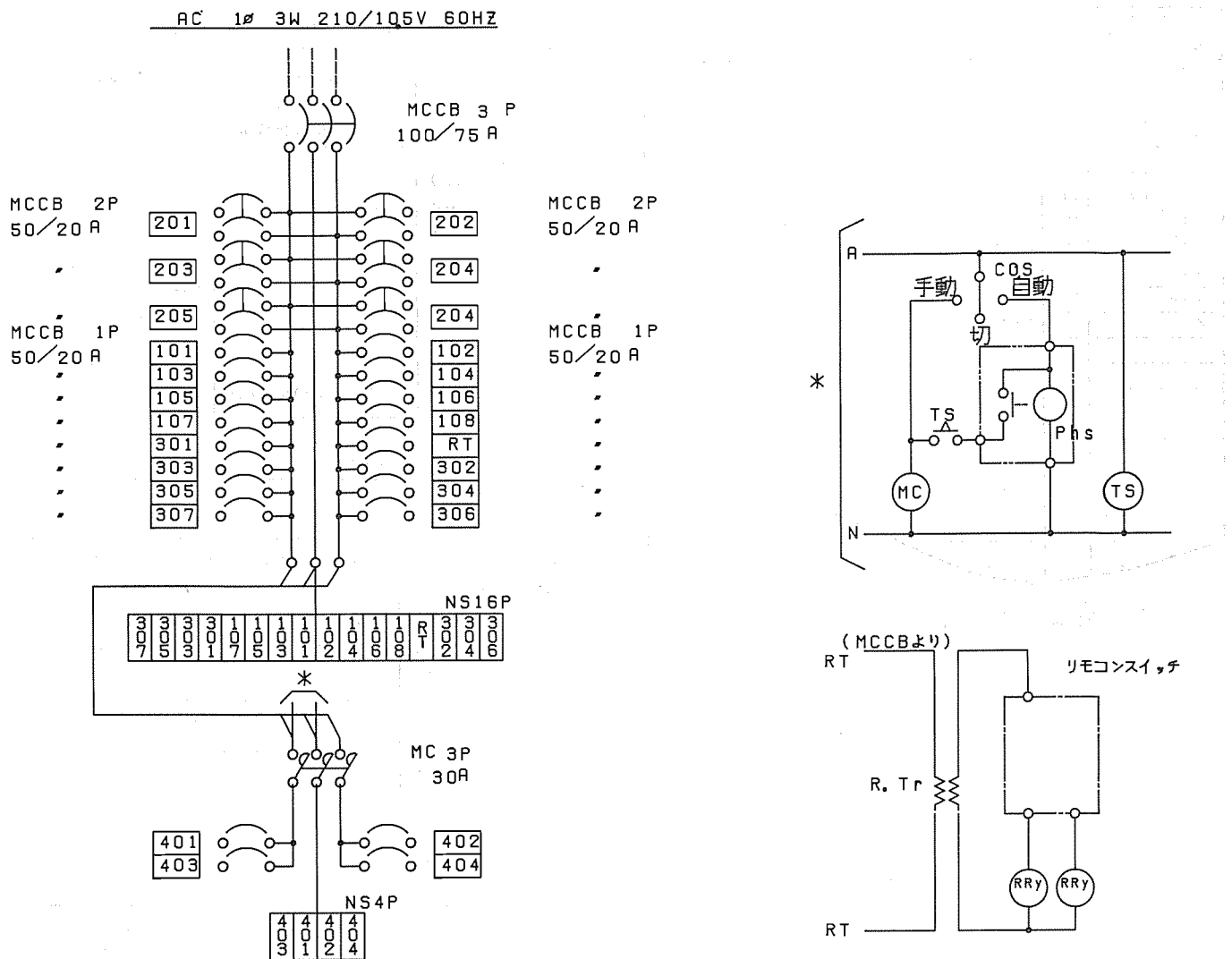


図 6. 分電盤の接続図

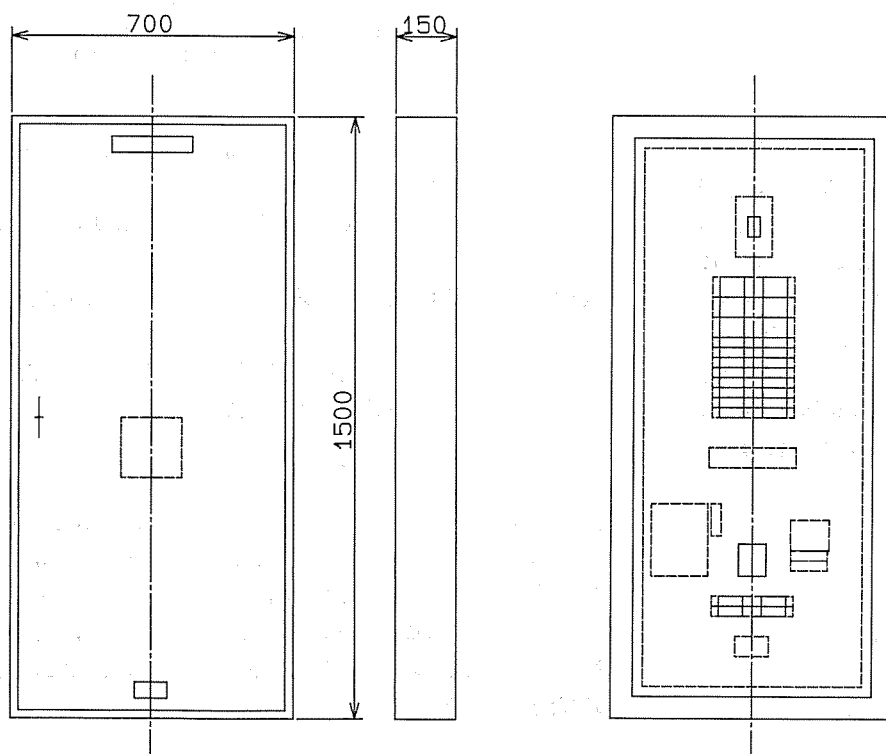


図 7. 分電盤の外形図 (図 6. の接続図と対応)

(3) バーチャルコンソール 機能

従来のランプやスイッチで構成している操作パネルに代って、ディスプレイ装置とキーボードによるハードウェアコンソール機能を実現している。

5.2 XYプロッタ装置, プリンタ装置概略仕様

表 1. に M 4306, M 4309-2 B XYプロッタ装置概略仕様を, 表 2. に M 4607-1 B プリンタ装置概略仕様を示す。

5.3 M 4381/M 4381-2 C ディスプレイ装置

M 4381 及び M 4381-2 C ディスプレイ装置は, コンソールとして使用でき, かつ分解能を従来の M 4380 系ディスプレイ装置の倍にして, 曲線などの表示を滑らかに表現できるようにし, 更に JIS 第 1, 第 2 水準の漢字表示も可能とした高解像度日本語グラフィックディスプレイである。906 文字まで

[illegible]

図 8. 部品表 (図 6. の接続図と対応)

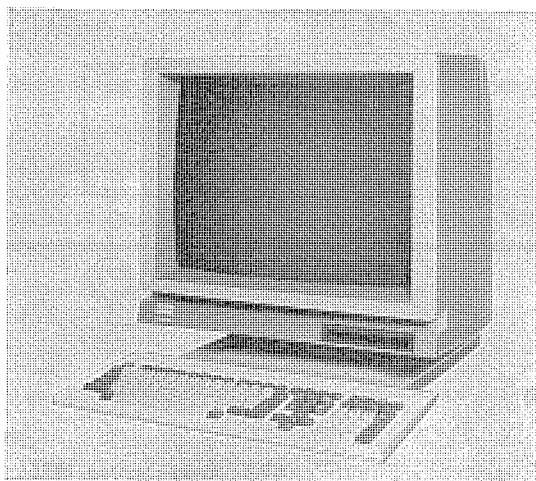


図 9. M 4381-2 C ディスプレイ 装置の外観

の任意の文字パターン（横 32×縦 30 ドットマトリクス）の植え付けが可能
なほか、簡単なコマンド指定により文字の拡大、回転、合成、平行
改行などの表示が行え、かつ $\sqrt{\quad}$ などの算術表示用特殊文字パター
ンも用意されている。また 256 個までの任意の図形を植え付けるこ
とのできる 30 K バイトのグラフィックメモリを持っている。従って、
呼び出す時にコマンド指定することにより、線種、回転、拡大縮小、
位置、色を任意に変えることができる。更に M 4381-2 C ディスプレイ
装置においては、本格的デザインシステム向きに、疲労の少ないノンイン
タレース・カラーモニタ及び薄形キーボードを採用し、回転、チルト機構も備
えている。

主な仕様を以下及び表 3. に示す。

- (a) 表示文字数：ワークエリア 80 字×(30- n) 行
(メモリ 136 字×240 行)
モニタエリア 80 字×(1+ n) 行
(メモリ 136 字×16 行)
 $n=0, 1, 2, \dots, 15$ 可変

表 1. XY プロッタ 装置仕様

形 名 仕 様	M 430s	M 4309-2 B
作 図 範 囲	Y 軸 275mm, X 軸 402mm (A3 版相当)	Y 軸
作 図 速 度 (mm/s)	最大 381	最大 600
分 解 能 (mm)	0.025	0.025
ペ ン 数 (本)	6	8
ペ ン 種 類	ファイバペンのみ (ペンの太 さ 0.3mm, 0.7mm)	ファイバペン (ペンの太さ 0.3 mm, 0.7mm) 水性ボールペン 製図用インクペン (ペンの太さ 0.35mm, 0.7mm)
外 形 寸 法 (mm)	127(H) × 568(W) × 367(D)	1,190(H) × 1,090(W) × 560(D)

表 2. プリンタ 装置仕様

形 名	M 4607-1 B
仕 様	
印 字 方 式	ドットマトリクスインパクト方式
ピ ン 数	24 ピン /
印 字 速 度 (字/秒)	漢 字 70, 高密度印字 100, 高速印字 210
印 字 ドット 構成 (縦×横) (ドット)	漢 字 22×22, 高密度 19×11, 高速印字 18×7
印 字 字 種	高速, 高密度 (A/N, カナ) 160 字種 漢 字 JIS 第 2 水準, 外字
印 字 間 隔 (mm)	高速, 高密度 2.54, 漢字 3.81
行 間 隔 (mm)	4.23, 8.47

表 3. ディスプレイ 装置仕様

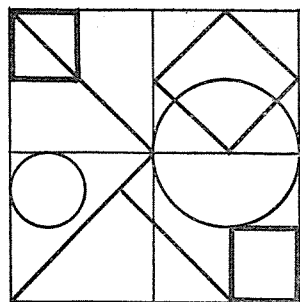
項 目	M 4381	M 4381-2 C
使 用 モ ニ タ	14 インチ・モノクロ インタレース方式	20 インチ・カラー ノンインタレース方式
分 解 能	0.18mm／ドット	0.26mm／ドット
表 示 色	グリーン	キャラクタ・グラフィック 共に 8 色（管面色含む）
インタフ ェース	RS 232-C (0.3～19.2 KB/s)	RS 232-C/RS 422 (1.2～76.8 KB/s)

*漢字表示は英数，カナ 2 文字分で 1 字

- (b) 図形表示： 横 1,280×縦 960 ドット
クロスヘアカーソル 又は タブレット より ポイント 入力
可能
- (c) 漢字表示： 非漢字及び JIS 第 1 水準+JIS 第 2 水準、(R
OM にて装置内に実装)
ローマ字・カナ 漢字変換、区点 データ/漢字 コー
ド 入力により 漢字入力可能

6. む す び

専用機第1号の“配電盤専用 システム”は、操作の容易さ、豊富な専用機能により配電盤業界で非常に好評を博している。これは、最小限の基本機能に専用機機能を追加し、専用機を構築するという開発方式が効果的であることの一つの証明となろう。今後は、他業種向け専用機の開発を進めるとともに、下位モデルの普及による購買層の拡大を図る方針である。



特許と新案 有償開放

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

ガス濃度計 (実用新案 第1363549号)

考案者 中原昭次郎・伊東克能

この考案は一台で亜硫酸ガス、酸化窒素、二酸化窒素の三種のガスの同時検出が可能なガス濃度計に関するものである。

特定のガス成分の濃度を測定する装置は従来も種々開発されており、非分散型赤外線ガス濃度計はその代表的なものである。

この測定器は赤外域における吸収を利用したものであり、波長選択性の装置を介さないため、他の妨害ガスがないときは非常に安定な計測器である。しかし、逆に波長選択性の部分がないため、被測定ガスと同じ吸収帯を一部分でも持つ妨害ガスが混入すると誤差の原因となる。一般に赤外吸収帯は広く種々の波長範囲に広がっているため、吸収帯が重なる確率が多くなると検出器が各ガスに固有のため複数種のガスを同時に検出することはできない。

そこでこの考案においては前記した三種のガスの紫外部の共鳴吸収を利用し、前記した従来の装置の欠点とするところを改善するもので、前記三種のガス以外のガスの吸収の重なりにより生ずる妨害がなく、しかも前記した三種のガスを1台で測定できるガス濃度計を提案するものである。

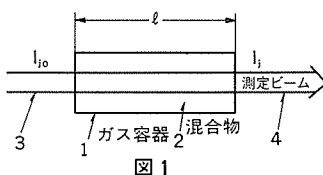


図1

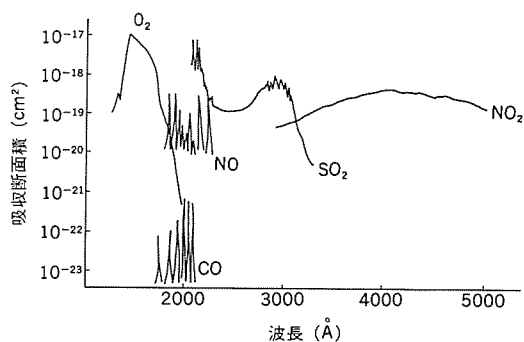


図2

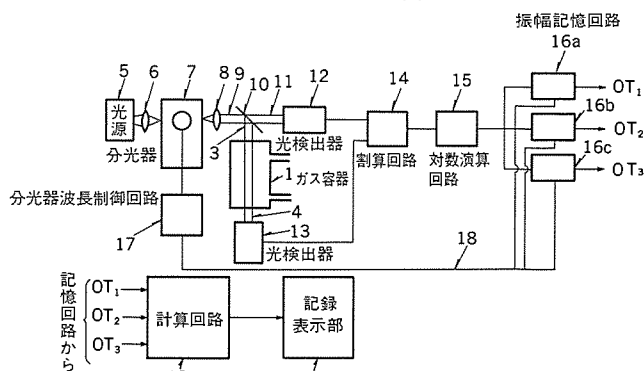


図3

電気装置用タンク (実用新案 第1490189号)

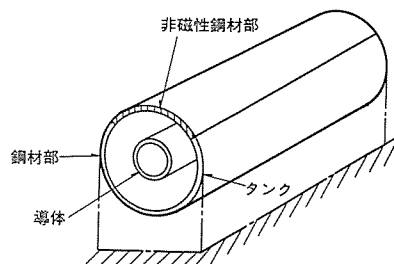
考案者 松田節之

この考案は、電気機器が収容されて水平に設置される円筒形状のタンクに関するもので、例えばSF₆などの絶縁圧縮ガスを封入したガス遮断器やガス絶縁開閉装置に適用される。

一般に、水平に設置したタンクでは内部のガスがタンク内で対流を起こすので、500 kV 機器などの大形になると上下で10°C以上の温度差を生じる。また、夏期の日照による温度上昇はタンク上部約1/4周の部分が最も大きくなっていることが分かっている。

そこで、鋼製タンクの上部の周上1/4以上の範囲に非磁性鋼材を用いることによって、タンク内部でガスの対流による影響及び日照による影響を最も受ける部分の温度上昇を抑制できる。また、タンクの

による影響を最も受ける部分の温度上昇を抑制できる。また、タンクの



最高温度上昇はこのような考慮のない場合に比べて 30°C もの差になることがあるので、タンクの気密接続に使用されるゴム製のリングの寿命を長くするのに非常に効果的で、装置全体の高信頼性と長

寿命化とをもたらすことになる。更に、ガス絶縁電気機器のように人の触れ易い場所に設置されるものでは、人身保護のためにも好都合である。

加熱装置 (実用新案 第1450500号)

考案者 松本金昭

この考案は加熱された液体を液槽に注入して、液槽内の被加熱部材を加熱する装置に関するもので、図1. 及び図2. に示すように、注入管路と排出管路とを同心円筒状に構成し、液槽の底部で連結したものである。

即ち、加熱された液体は注入管路を通して注入口から液槽内へ注入される。この場合、注入された液体は所定の流速を有するので、流体力学の法則に従って注入方向に移動する。そして、この注入された液体は、すでに液槽内にある液体より温度が高く比重が小さくなっているため、浮力を得て自然対流によって液槽内の液体を攪拌しながら上昇する。

一方、排出口から吸出される液体は、やはり流体力学の法則に従って、排出口の近傍で排出口へ向う流速を形成して抜き出されるので、注入口から注入された液体がすぐに迂回して排出口へ吸入されることは殆んどなく、主として温度が低下して液槽の底部近傍に流

下した液体が吸入される。

このように、この加熱装置は加熱された液体を液槽の底部近傍から注入し、同じ個所から排出するので、注入時に与えられた流速と自然対流とによって液槽内の液体を攪拌するため、液体の各部の温度差が小さくなる。したがって、液槽内の被加熱部材を均一に加熱することができる。

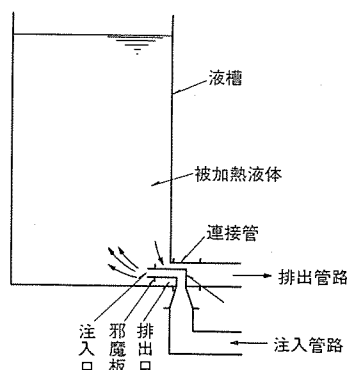


図1

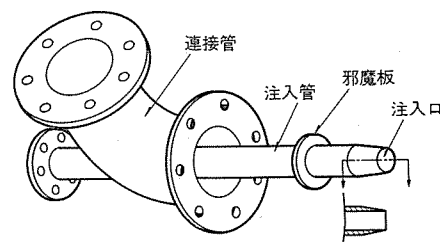


図2

〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol. 58 No. 8 半導体特集

特集論文

- プラスチック封止 256 K ビットダイナミック MOS RAM
- Mixed MOS 形 64 K ビットスタティック RAM
- 高性能 CMOS ゲートアレイ
- CMOS 8 ビットワンチップマイコンシリーズ
- CMOS マイクロプロセッサ周辺用 LSI
- 電圧センサ専用 CMOS 4 ビットマイクロコンピュータ
- フレキシブルディスクドライブ用 LSI
- Bi-FET オペアンプ

●三相ソリッドステートリレーとその応用

普通論文

- 分子科学研究所納め極端紫外光源 (UVSOR) 用電磁石電源
- 1,000 kW 級集中配置形太陽光発電システム
- NC 放電加工機
- M 4234 カラーサーマルプリンタ装置
- 新形ガスファンヒーター GD-30 A 形
- 日本道路公団納め中国自動車道広島中央局遠方監視制御装置

三菱電機技報編集委員

委員長	馬場 準一	委員	柳下 昌平
副委員長	岸本 駿二	"	櫻井 浩
"	三浦 宏	"	徳山 長
委員	峯松 雅登	"	柴山 恭一
"	翠川 祐	"	酒井 靖夫
"	佐藤 文彦	"	武富 大児
"	大年 倉像	"	瀬辺 国昭
"	井上 通	"	倉橋 浩一郎
"	立川 清兵衛	"	小原 英一
"	吉田 太郎	"	尾形 善弘
"	野畑 昭夫	幹事	岡田 俊介
"	田中 克介	7号特集担当	外山 守城
"	的場 徹		藤原 謙一
"	野村 兼八郎		宮沢 生行
"	山内 敦		

三菱電機技報 58 巻 7 号

(無断転載を禁ず)

昭和 59 年 7 月 22 日 印刷
昭和 59 年 7 月 25 日 発行

編集兼発行人	岡田 俊介
印刷所	東京都新宿区市谷加賀町1丁目12番地 大日本印刷株式会社
発行所	東京都千代田区大手町2丁目6番2号 (〒100) 菱電エンジニアリング株式会社内 「三菱電機技報社」Tel. (03) 243 局 1767
発売元	東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 (〒101) 株式会社 オーム社 Tel. (03) 233 局 0641(代), 振替口座東京 6-20018
定価	1部 500 円送料別 (年間予約は送料共 6,700 円)



このたび三菱電機では、マイコンゴルフ練習器GL-300形を発売しました。

昭和57年に当社が世界に先駆けて開発、発売したマイコンゴルフ練習器GL-500形は「科学と感性」の時代へと変化しつつあるゴルフ界の流れを先取りしたユニークな商品としてご好評いただいています。このたびのGL-300形は、これの家庭用普及タイプで、基本機能に集約し、ボディの小形化と低価格化を実現したもの。センサ部と表示部を一体化した乾電池式で、持ち運びに便利であり、場所を選ばず練習できる手軽なゴルフ練習器です。

仕様

電 源	乾電池式(単3×4本) 連続使用時間：30時間以上
マイコン	4ビットCMOSワンチップマイコン 〔マスクROM(2Kバイト)、RAM(512ビット)〕
表 示	専用LCD(1/2バイアス、1/4デューティ)
寸 法	幅460×奥行310×高さ44mm
重 量	2.4kg
付 属 品	ティー(2個)、マグシート(ウッド用6枚、パター用2枚) 練習用ボール(3個)

特長

- 飛距離を伸ばすヘッドスピード表示(測定)
ウッド系の飛距離アップ、アイアン系の安定したスイングづくりに役立ちます。
- “飛び”がひと目でわかるキャリー表示(演算)
ショット時の標準的なキャリーを表示、実打結果と比較することによりロフトの使い方もチェックできます。
- 正しいフェイス角度で打つフェイスアングル表示(測定)
インパクトのフェイスアングルを1度きざみで0～19度まで表示。安定したスイングバランスを得る練習ができます。
- ショットのブレをなくすボール飛出し方向表示(演算)
ボールの飛出し方向を7段階でグラフィック表示。直線表示に近づける練習をします。
- インパクトの正確度を示すダフリ表示(測定)
強いダフリは「E」で表示。ダフリかターフスイングかの判定ができます。
- OB恐怖症を克服するOB表示(演算)
フェイスアングルが19度以下で左右のズレが40m以上のとき「OB」を表示します。