

MITSUBISHI

三菱電機技報

MITSUBISHI DENKI GIHO Vol.64 No.11

11
1990

ドライブエレクトロニクス/センシング技術特集



ドライブエレクトロニクス/センシング技術特集

目 次

ドライブ エレクトロニクス特集論文

ドライブ エレクトロニクスの未来像	1
原島文雄	
ドライブ エレクトロニクスの展望	2
矢野昌雄・矢野頼成	
低騒音インバータ FR-Z300 シリーズ	7
伊藤友隆・杉本重幸・西澤勇治	
誘導型 AC サーボ《MELSERVO-V シリーズ》	13
石川嘉夫・大川義光・島 晶・井川 康	
PG レスベクトル制御インバータ	18
玉井伸三・大上正勝・岩崎政彦・長野鉄明・栗山茂三・今中 晶	
エレベーターにおけるドライブ エレクトロニクスの応用	23
鈴木茂彦・正城孝信・吉田雅之・荒木博司・多和田正典	
ライン制御用インバータと汎用シーケンサによる中小規模プラントの可変速制御	29
小鍛治 稔・村中隆生・溝口昭次・下村弥寿仁・荒木孝浩	
ターボコンプレッサ用大容量超高速可変速電動機システム	34
田島正明・増田博之・江頭英明・後藤久雄・山元 寛	
リニア搬送装置の FA 分野への適用	40
前原利昭・中本道夫	

センシング技術特集論文

センシング オブ センシング	47
山崎弘郎	
イメージセンサの技術動向	48
坪内夏朗・浅井外寿・木股雅章	
熱式空気流量センサ	52
谷本考司・有吉雄二・別所三樹生・大谷七郎・山川智也	
レーザによる複合型異常センシング技術	56
中島利郎・亀井光仁・八木康史・土井 博	
パイプ内面形状センサ	61
高嶋和夫・山口圭一・望月延夫・谷口善昭ほか	
半導体ウェーハ表面欠陥検査装置	65
田中 均・大重豊実・宮崎陽子・市村英男・友田利正	
非接触速度むら測定器とその応用	71
田代秀夫・小池敦美・矢部利郎	
サーマル イメージャ	77
藤野正太郎・西村照弘・三好哲夫・日和佐 淳・柳本重治	
インテリジェント電磁流量計とフィールド ネットワーク	82
長田俊二・春尾弘志・鈴木敏春	

特許と新案

負荷時タップ切換器、液中溶解ガス抽出装置	91
バブリング式液中溶解ガス抽出装置	92

スポットライト

中国・大亞湾原子力発電所向け三相 900MVA, 525/420kV 単巻変圧器	87
マルチスタンダード対応 PLL VIF/SIF IC“M52020SP”	88
TWIN-PLL 方式テレビ中間周波信号処理 IC“M52014SP”	89
三菱はん用インバータ《FREQROL ファミリー》	90
モーションコントローラ“MR-P20”	93
店舗用空調機器集中監視制御システム	94
屋内用高解像度大型映像表示装置《オーロラビジョンマーク II-HR》	(表3)

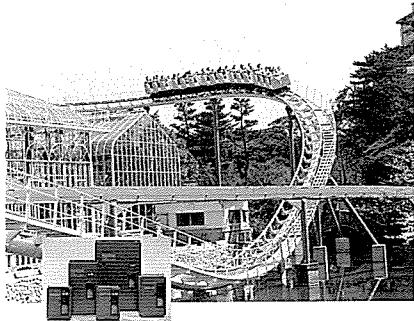
表紙

汎用インバータ

《FREQROL-Zシリーズ》

インバータの普及には目を見張るものがある。省エネルギーからスタートし FA, 鉄鋼, エレベーターなどと進展し, インバータエアコンに至って爆発的に需要が増加している。最近では, 表紙写真のローラコースターを始め, ウォーター シュートやメリーゴーランドなど遊戯施設においても, 加減速時の乗り心地の改善のためインバータが導入され始めている。今後, この種の用途を始め, より身近なところにインバータ, リニアモータ, AC サーボなどドライブ エレクトロニクスを応用した設備が増加するものと思われる。

表紙の《FREQROL-Zシリーズ》汎用インバータは, これらドライブ エレクトロニクス普及のベースとなって活躍している。



アブストラクト

<p>ドライブ エレクトロニクスの展望 矢野昌雄・矢野禎成 三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 2～6</p> <p>交流可変速ドライブは、その性能を十分発揮できるようになり、従来は直流電動機が使用されていた分野まで広く使用されるようになってきた。本稿では、交流可変速ドライブについて、産業分野及びエレベーター分野の技術動向について概説し、今後特に注目される技術の現状と今後の展望について述べる。</p>	<p>ライン制御用インバータと汎用シーケンサによる中小規模プラントの可変速制御 小鍛治 稔・村中隆生・溝口昭次・下村弥寿仁・荒木孝浩 三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 29～33</p> <p>インテリジェント、高機能化されたライン制御用インバータと圧倒的なシェアをもつ汎用シーケンサとを光リンクで結合した。単に制御性の良さを利用するだけでなく、シーケンサシリーズのマンマシンインターフェースを用いて、制御の状態値から故障時データのトレース表示まで可能な高付加価値化システムを簡単に構築できるようにした。これにより、シーケンサを適用する中小規模のプラントでもインバータの持つ機能を十分に生かしたシステムが構築できる。</p>
<p>低騒音インバータ FR-Z300 シリーズ 伊藤友隆・杉本重幸・西澤勇治 三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 7～12</p> <p>電動機から発生する騒音を商用電源駆動並みにとの要求にこたえ、低騒音インバータ《FREQROL-Z300 シリーズ》を開発・量産化した。このインバータは、16ビットマイコンと超LSIの組合せにより、高機能を維持しつつ高周波PWMの制御を実現し、主回路素子にIGBTを採用したものである。また、粘り強い運転を実現するため、電流制限御機能を備えるなど多くの特長を持った使いやすい汎用インバータである。</p>	<p>ターボコンプレッサ用大容量超高速可変速電動機システム 田島正明・増田博之・江頭英明・後藤久雄・山元 寛 三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 34～39</p> <p>最近、高速回転機械を直接駆動できる超高速可変速電動機システムが注目されてきているが、当社でもこのたび昭和四日市石油㈱向けにターボコンプレッサ駆動用3,300kW-11,430rpm超高速可変速電動機システムを製作、納入した。このシステムは、大容量域での適用を可能にしたGTOインバータと解析・検証によって技術的に確立されたかご型誘導電動機から構成されており、大容量機としては世界最高速を達成している。</p>
<p>誘導型 AC サーボ《MELSERVO-V シリーズ》 石川嘉夫・大川義光・島 晶・井川 康 三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 13～17</p> <p>AC サーボは、従来から磁石型同期モータを用いて高精度位置決め用から高頻度運転される分野などを対象として製品展開してきた。今回さらに、サーボの応用分野を広げるため、巻取りや重量物の搬送にも対応できる中～高慣性で堅牢な誘導型 AC サーボを新たに製品化した。従来から好評を得ている SA シリーズと同様オールディジタル化し多機能で使いやすい点はそのまま引き継ぎ、更に小型化・高信頼化を図った上で経済性も追求した点につき述べた。</p>	<p>リニア搬送装置の FA 分野への適用 前原利昭・中本道夫 三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 40～46</p> <p>リニア搬送装置は、リニアモータ及びリニアモータを制御するインバータ、シーケンサ、無接点コンタクタなどのFAコンポーネントの発展によって急速に普及しつつある。特に、高速性・メンテナンスフリー性・クリーン性・フレキシブル性・高信頼性など従来の搬送装置では実現できなかったレベルの搬送装置を構成することができる。本稿では、これらの特長を生かしたFA分野におけるリニア搬送装置の適用例について紹介する。</p>
<p>PG レスベクトル制御インバータ 玉井伸三・大上正勝・岩崎政彦・長野鉄明・栗山茂三・今中 晶 三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 18～22</p> <p>汎用インバータは、一般に出力電圧／出力周波数一定のオープンループ制御が採用されている。この制御は、誘導電動機の特性に左右されることなく運転できる長所があるが、低速時のトルク特性、速度変動、加減速特性などに実用上種々の問題が生じる。ここでは、これらの問題を解決する方法として、モデル規範適応システムを用いたPGレスベクトル制御インバータを開発し、汎用誘導電動機を駆動して良好な特性を得たので紹介する。</p>	<p>イメージセンサの技術動向 坪内夏朗・浅井外寿・木股雅章 三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 48～51</p> <p>当社で開発した、衛星搭載用高解像度リニアイメージセンサ、監視・計測用高解像度イメージセンサ、高解像度赤外イメージセンサ、資源探査用赤外イメージセンサを例にとり、最近のイメージセンサについて概観した。特に、多画素化・高密度化・高感度化・多機能化が進展しており、これらはシリコン超LSIの技術をベースにしてイメージセンサ固有の技術開発によって達成されている。</p>
<p>エレベーターにおけるドライブ エレクトロニクスの応用 鈴木茂彦・正城孝信・吉田雅之・荒木博司・多和田正典 三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 23～28</p> <p>当社は、エレベーターの駆動制御システムとして世界に先駆けてVVVF制御システムを導入し、その性能の良さで好評を得てきた。以来このVVVF制御方式の一層の性能向上を図るとともに、エレベーターにおける駆動制御のすべての領域に適用拡大を進めてきた。本稿では、ロープ式(高速、低速)エレベーターと油圧式エレベーター及びエレベーター用ドアにおける最新のドライブ エレクトロニクスの応用について紹介する。</p>	<p>熱式空気流量センサ 谷本考司・有吉雄二・別所三樹生・大谷七郎・山川智也 三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 52～55</p> <p>自動車の電子制御式燃料噴射システムには、エンジンが吸入する空気量を精度良く計測する空気流量センサが必要となる。熱式空気流量センサは直接質量流量が検出でき、応答性に優れているなどの特長を持っている。ここでは、ホットワイヤとホットフィルム2種類の熱式空気流量センサを取り上げ、センサの構造と動作原理を紹介し、温度・湿度・圧力が変化した時の質量流量検出精度及び応答性と熱損失特性の関係を説明する。</p>

Abstracts

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 64, No. 11, pp. 29~33 (1990)

The Application of Line-Control Inverters and General-Purpose Programmable Controllers to Variable-Speed Control in Medium- and Small-Scale Plants

by Minoru Kokaji, Takao Muranaka, Shoji Mizoguchi, Yasuhito Shimomura & Takahiro Araki

An optical link has been developed for use between an intelligent multifunctional line-control inverter and a widely used general-purpose programmable controller. The link provides much more than remote inverter control. The user interface and malfunction data-trace functions make it easy to build up systems for handling large and complicated tasks. The links are especially helpful in small- and medium-scale plants that can take advantage of the additional functionality inverters provide in existing PC-operated systems.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 64, No. 11, pp. 34~39 (1990)

A Large-Capacity Variable-Speed Motor-Drive System with a High Maximum Speed for Turbo-Compressor Control

by Masaaki Tajima, Hiroyuki Masuda, Hideaki Egashira, Hisao Goto & Hiroshi Yamamoto

The potentials of high-speed machinery and variable-speed direct-drive motor systems with high maximum speeds have attracted much interest. Mitsubishi Electric manufactured a 3,300 kW 11,430 rpm variable-speed drive system for turbo-compressor control and delivered it to Showa Yokkaichi Sekiyu Corporation. The system features the world's highest speed for large-capacity motor-drive systems. It consists of a large-capacity GTO thyristor inverter and a squirrel-cage induction motor. The motor was designed using sophisticated analysis and performance-evaluation techniques.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 64, No. 11, pp. 40~46 (1990)

Linear-Motor-Drive Transfer Systems for FA Applications

by Toshiaki Maehara & Michio Nakamoto

More linear-motor-drive transfer systems are being produced and used as a result of advances in linear motors inverters, programmable controllers, pointless contactors, and other FA equipment. The latest such systems are faster, more flexible in their operation, and more reliable than previous products. They are also clean and nearly maintenance free. The article introduces their applications in an FA setting that exploit these features.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 64, No. 11, pp. 48~51 (1990)

Trends in Image Sensors

by Natsuro Tsubouchi, Sotoju Asai & Masafumi Kimata

The article describes recent image-sensor technology including a high-resolution linear image sensor for satellite use, high-resolution visible and infrared image sensors for monitoring and measurement, and an infrared image sensor for remote sensing of resources. Advances have been made in the count and density of multielement sensors, in element sensitivity, and in design. These developments are the result of research specific to image sensors as well as advances in silicon VLSI technology.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 64, No. 11, pp. 52~55 (1990)

A Thermal Airflow Sensor

by Koji Tanimoto, Yuji Ariyoshi, Mikio Bessho, Shichiro Otani & Tomoya Yamakawa

Electronic fuel-injection systems for vehicles require precise airflow measurements. Thermal airflow sensors provide a direct measure of this quantity and respond rapidly to mass-flow changes. The article examines hot-wire and hot-film sensors. The construction and operating principles of these sensors are described, and the effects of changes in temperature, humidity, and pressure on the mass-flow-detection accuracy discussed. The relationship between response and thermal-loss characteristics is also treated.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 64, No. 11, pp. 2~6 (1990)

The Outlook for Drive Electronics

by Masao Yano & Sadanari Yano

Now that the technology exists to fully exploit the performance advantages of variable-speed AC motors and their drive electronics, applications for these motors are expanding rapidly, including many fields that have long been dominated by DC motors. The article summarizes technical trends in the design of variable-speed AC motors for industrial machinery and elevator applications. The current status of several promising developments in the field is reported, and future prospects are discussed.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 64, No. 11, pp. 7~12 (1990)

The FR-Z300 Series Low-Noise Inverters

by Tomotaka Ito, Shigeyuki Sugimoto & Yuji Nishizawa

The Corporation has developed and is mass producing FREQROL-Z300 Series low-noise general-purpose inverters. These inverters have been designed to minimize noise generation and to operate from commercial power supplies. The inverters use a 16-bit microprocessor and VLSIs to implement a high-performance high-frequency pulse-width-modulation system. An insulated-gate bipolar transistor operates the main circuit. Current-limiting control realizes high adhesion, and several other special functions have been implemented.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 64, No. 11, pp. 13~17 (1990)

MELSERVO-V Series Induction-Type AC Servo Systems

by Yoshi Ishikawa, Yoshimitsu Okawa, Akira Shima & Yasushi Ikawa

Induction-type AC servo motors have been extended in use to electromagnetic synchronous high-precision-positioning and high-use-frequency, etc, applications. The MELSERVO-V Series extends servo use to medium-to high-inertia applications such as winder and conveyors, and features the fully digital design and many easily used functions of its predecessor, the SA Series. The new motors are small, reliable, and economical.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 64, No. 11, pp. 18~22 (1990)

A Vector-Controlled Inverter Without a Pulse Generator

by Shinzo Tamai, Masakatsu Daijo, Masahiko Iwasaki, Tetsuaki Nagano, Shigemi Kuriyama & Akira Imanaka

Most general-purpose inverters employ an open-loop control system in which the output voltage is proportional to the output frequency. This is suitable for driving induction motors because it is unaffected by motor reactance; however, its drawbacks are requirements for low-speed torque, speed regulation, and fast response. The article reports on a new inverter employing vector control that does not require a pulse generator. The inverter exhibited excellent performance driving induction motors in a test system.

Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 64, No. 11, pp. 23~28 (1990)

The Application of Drive Electronics to Elevators

by Shigehiko Suzuki, Takanobu Masaki, Masayuki Yoshida, Hiroshi Araki & Masanori Tawada

Mitsubishi Electric pioneered the use of variable-voltage variable-frequency (VVVF) control in elevator motor-drive systems and gained substantial performance benefits. The latest VVVF control techniques boast further performance improvements and a wider application base. The article introduces new drive electronics for hydraulic elevators, for high-and low-speed traction-drive elevators, and for door operation.

アブストラクト

レーザによる複合型異常センシング技術

中島利郎・亀井光仁・八木康史・土井 博

三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 56~60

移動型の異常検出用複合計測システムを構成する要素技術として、レーザを用いたガス検出技術及び環境認識技術を開発した。

ガス検出技術に関しては、半導体レーザの波長を対象ガスの吸収波長に正確に合わせることにより、100ppmの微量のメタンガスのみを、選択的に遠隔検出することを可能とした。

環境認識技術に関しては、能動方式・受動方式を融合し、位置情報の推定及び物体面の同定の二つの機能を同時に実現した。

パイプ内面形状センサ

高嶋和夫・山口圭一・望月延夫・谷口善昭ほか

三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 61~64

1インチ程度の小径管の内壁面形状を測定する光学式センサを開発した。この光学センサは、①直径13mmの小型センサヘッド、②並列処理プロセッサ搭載の処理回路、③ピストル型でハンディなセンサ移動機構から構成される。測定方式は、スリット光をパイプ内面全周に投影し、このスリット像の乱れから形状を演算するものである。このセンサにより、パイプ内面の形状が高速(1断面:33ms)かつ高精度(±0.1mm)で測定可能となった。

半導体ウェーハ表面欠陥検査装置

田中 均・大重豊実・宮崎陽子・市村英男・友田利正

三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 65~70

高速・高感度で、しかも製造現場に適用しやすい半導体ウェーハ用表面欠陥検査装置を開発した。空間フィルタリング法を採用し、ウェーハの繰り返しパターンを光学的に除去し、微細な異物やランダムなパターン欠陥のみを映像化し、この像を直接TVカメラで取り込んで欠陥を検出している。空間フィルタによる正常パターンの遮光を確実にするため、検査視野ごとにウェーハ表面の傾斜用制御を行っている。サブミクロンの検出感度を持ち、6インチウェーハを約30分で検査できる。

非接触速度むら測定器とその応用

田代秀夫・小池敦美・矢部利郎

三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 71~76

レーザ光のドップラー効果を利用し、回転・移動物体の回転むら・速度むらを非接触で計測する速度むら測定器を製品化し、一般工業計測分野に利用されている。この速度むら測定器は、半導体レーザを使用した小型・軽量プローブに、光変調器を装備することによって、往復動する物体の速度、速度むら、長さ、変位及び振動測定を可能とした多機能な計測器である。本稿では、非接触速度むら測定器の原理と構成・性能・特長・用途例の概要を紹介する。

サーマルイメージヤ

藤野正太郎・西村照弘・三好哲夫・日和佐 淳・柳本重治

三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 77~81

物体から放射される赤外線を検出することにより、夜間でも照明なしで撮像することができ、かつ物体の温度情報を得ることができる。512×512画素の白金シリサイド赤外線固体撮像素子の開発に成功し、標準のテレビ画像と同品位の赤外線映像を得ることができる“三菱サーマルイメージヤ”を完成した。ここでは、その最新モデル“IR-5120C”を紹介する。

インテリジェント電磁流量計とフィールド ネットワーク

長田俊二・春尾弘志・鈴木敏春

三菱電機技報 Vol. 64・No. 11・P 82~86

最近のプラント管理システムは、フィールドから上位管理レベルまで密接に関連した統合システムへと発展しつつあり、フィールドにおけるデジタル ネットワーク化が急がれている。インテリジェント電磁流量計は、この動きに対応した通信機能を持ち、さらに高機能、高精度化を実現している。また、この流量計を始めとして、様々なセンサ、アクチュエータを接続できる公共プラント用フィールド ネットワークシステムを、同時に開発したので報告する。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 64, No. 11, pp. 71-76 (1990)

A Contactless Wow-Flutter Meter and Its Applications

by Hideo Tashiro, Atsushi Koike & Toshiro Yabe

The Corporation has developed and is commercially producing a Doppler-effect wow and flutter meter that employs laser light to measure variations in the angular or linear velocity of moving objects. It is designed as a general-purpose instrument for the industrial engineer's test bench. A small lightweight probe with a semiconductor laser and an optical modulator can measure several parameters including the velocity of objects in periodic motions, velocity variations, length, displacement and vibration. The article introduces the basic principles, configuration, performance, features, and applications of the new instrument.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 64, No. 11, pp. 77-81 (1990)

The IR-5120C Thermal Imager

by Shotaro Fujino, Nobuhiro Nishimura, Tetsuo Miyoshi, Atsushi Hiwasa & Shigeharu Yanagimoto

The thermal radiation of objects can be detected to generate images in total darkness and to measure temperatures. The Corporation has developed a 512×512-element solid-state platinum silicide infrared detector yielding images approximately equivalent in quality to television pictures. The article introduces the newest model, IR-5120C.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 64, No. 11, pp. 56-60 (1990)

A Multifunctional Sensing System Using a Laser

by Toshiro Nakajima, Mitsuhiro Kamei, Yasushi Yagi & Hiroshi Doi

The Corporation has developed a gas-detection technique and an environment-recognition technique using a laser. Rare diffusions of gases (for example 100ppm of methane gas) can be detected selectively by a telemetric method when the laser diode's wavelength is precisely matched to the spectral absorption characteristics of the gas. The environment-recognition system combines active and passive methods to infer object position and surface orientation.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 64, No. 11, pp. 61-64 (1990)

A Sensing System for Pipe Inner Walls

by Kazuo Takashima, Keiichi Yamaguchi, Kazuyoshi Yabuuchi, Katsuya Ueki, Yukio Mashino, Nobuo Mochizuki, Yoshiaki Taniguchi, Junji Fujimoto & Kunikazu Takahashi

An optical sensor system has been developed for checking the configuration of the inner walls of pipes as small as one inch in diameter. The sensor has a small 13mm-diameter sensor head, parallel-processing detection electronics, and a pistol-grip sensor-transport mechanism. The measurement is made by passing light through a slit and into the pipe under test. Distortions in the slit image are then used to calculate the configuration of the pipe interior. The sensor requires just 33ms to measure a pipe cross section and the results are accurate to $\pm 0.1\text{mm}$.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 64, No. 11, pp. 82-86 (1990)

An Intelligent Electromagnetic Flow Meter and a Field Network

by Shunji Osada, Hiroshi Haruo & Toshiharu Suzuki

Recently, digital networks have been incorporated into plant-management systems to tie together all levels of activities from field work to management. The article describes an intelligent electromagnetic flow meter with advanced functions and enhanced precision as well as network-oriented communications functions. A field network for utility plants that can accommodate sensors and actuators was developed alongside the flow meter and is also discussed.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 64, No. 11, pp. 65-70 (1990)

A Surface-Defect Detection System for Patterned Wafers

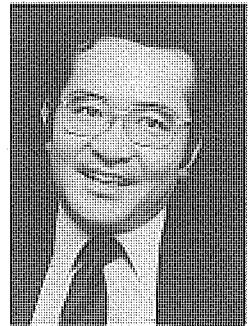
by Hitoshi Tanaka, Toyomi Oshige, Yoko Miyazaki, Hideo Ichimura & Toshimasa Tomoda

A high-speed, highly sensitive surface-defect detection system for semiconductor patterned wafers suitable for use in factory environments has been developed. The system detects submicron surface defects and inspects a six-inch wafer in 30min. The system employs the spatial-frequency filtering technique to optically eliminate the regular repetitive patterns from the wafer image so that only random pattern defects are imaged. Thus, defects are easily detected through simple image processing. The wafer's surface angle toward the image sensor is precisely adjusted for each observation field to ensure that the spatial-frequency filter precisely eliminates the regular repetitive patterns.

卷頭言

ドライブ エレクトロニクスの未来像

東京大学生産技術研究所教授
工学博士 原島 文雄



ドライブ エレクトロニクスとは、 “物体の機械的運動をエレクトロニクスにより制御すること” であろう。まず、 「物体の機械的運動」について考えよう。自然界では、 小さいものでは素粒子の運動、 大きいものでは宇宙全体の運動であろうか。 小さい方はすでに制御できる段階にきている。 大きい方では、 やっと太陽系内で人工物を運動させられるようになったばかりである。 宇宙的スケールの物体の運動を制御することはまだ SF の世界である。 生物界では、 細胞レベルのものから鯨の大きさの物までが自由に意志をもって動いている。 生物のエレクトロニクス制御もまた未来の話であろうか。 人工の物では、 飛行機が世界中をとびまわっており、 エレクトロニクスによって制御されている。 しかし、 地球を動かすという話ではなく、 ジャンボジェット機の大きさはせいぜい 70m である。 エレクトロニクスで直接制御できる最大の人工のものは新幹線列車であろうか。 小さい方では、 最近マイクロ エレクトロニクスが発達しており、 ミクロンサイズの人工構造物の製作とその運動制御が可能になりつつある。

通常ドライブ エレクトロニクスといえば、 電動機、 それに電力を供給する電力用半導体素子及び、 制御のためのコンピュータより構成される。 電力のサイズでいえば、 鉄の圧延機、 揚水発電所の制御が大きい方で数万～数十万 kW、 小さい方では、 アナログ時計の針の運動が数マイクロ W の範囲に分布している。 これらがすべて鉄と銅でできた電動機、 シリコンでできたパワーデバイス、 同じくシリ

コン製の情報処理装置よりなる。 $10^{10} \sim 10^{11}$ のオーダーに分布するパワーサイズを全く同じ構成のハードウェアでカバーしていることは驚くべきことである。

ドライブ エレクトロニクスの応用は、 あらゆる産業そして家庭電器に代表されるあらゆる民生品にとり入れられており、 その応用はさらに広がりつつある。 将来とも近代産業、 現代生活を支える基本的技術の 1 つとして成長するであろう。 近代社会は、 物体をより正確にそしてより速く動かし、 それを制御することを求めている。 いうなれば、 物体の運動を情報の管理下におくことである。 歴史的には、 人間のサイズであるメートル級の物体の制御から始まり、 前述したように大きい方では、 宇宙開発、 新幹線列車、 小さい方ではマイクロメカニクスに及んでいる。 情報化の面からみると個々の物体の制御から群の制御へと向かっている。 多数の知能ロボットを群として扱い、 ロボット群があたかも 1 つの意志をもつように行動するよう制御することも可能である。 人類の歴史において常に独裁者は人間を群として扱い、 その行動を情報によってコントロールすることに熱心であった。 その意味ではドライブ エレクトロニクスにとって独裁者は教師のようなものであるが、 この技術を人間のコントロールに応用することだけは避けたいものである。

ドライブ エレクトロニクスの分野において、 日本は過去十数年世界のリーダーとしての地位を保っている。 今後とも一層の技術革新が続くものと信じる次第である。

ドライブ エレクトロニクスの展望

矢野昌雄*
矢野頼成**

1. まえがき

交流電動機は、可変速電動機としてもその性能を發揮できるようになり、従来は直流電動機が使用されていた分野まで広く使われるようになってきた。

直流電動機は、電機子電圧や電機子電流を調節して、その回転速度やトルクを自由に変化できる優れた特長をもつている。しかし、整流子とブラシという機械的な接点のために構造が複雑で、サイズが大きくなり高価になりがちであり、ブラシや整流子が摩耗するため定期的な保守を必要とする。また、遠心力や整流子片間の耐圧の制約から回転速度や出力の限界が交流機に比べて低く、定格回転速度と定格出力との積は、 $2 \sim 4 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{rpm}$ 程度以下といわれる⁽¹⁾。

これに対して、交流電動機では定格回転速度と定格出力の積の限界は、 $200 \sim 400 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{rpm}$ 程度⁽¹⁾といわれ、しかも、回転子の構造が単純で慣性能率が直流機に比べて小さくできる。そのため、直流機で不可能であった大容量、高速かつ高速応答の可変速システムが実現できる。すなわち、交流電動機を使用した可変速システム(AC ドライブ)適用のねらいは、①直流機に置き換えて省力化、②可変速運転して省エネルギー化、③直流機では困難な大容量・高速化、等である。

本稿では、最近のドライブ エレクトロニクスの動向につき、産業分野及びエレベーター分野の交流可変速について概説する。

2. AC ドライブの技術動向

2.1 AC ドライブの制御方式

図1は、制御方式に重点をおいた分類で、V/f 制御に代表されるオープンループ制御(他制式周波数制御)と、ベクトル制御に代表されるクローズドループ制御(自制式周波数制御)からなる⁽²⁾。

クローズドループ制御では、定常的に滑り周波数を制御する滑り周波数制御方式があるが、車両関係で一部採用されるとどまっている。

ベクトル制御を用いれば、その一次電流を界磁電流成分と電機子電流成分に分解し、界磁電流成分に影響を与えることなく電機子電流成分のみを独立に制御して、直流機と同等のトルク制御ができる。誘導電動機のベクトル制御の場合、誘導機の瞬時電圧電流方程式から界磁電流成分と電機子電流成

分とを非干渉制御する間接型(滑り周波数制御型)と、空げきの磁束を磁気センサで直接測定するか、あるいは一次電流電圧から演算してこれを基準として一次電流を制御する直接型(磁界オリエンテーション型)がある。滑り周波数制御型ベクトル制御は、磁束の演算が容易で、デジタル コントローラによる高精度演算が可能であることにより、広く用いられている。速度センサレスベクトル制御も、制御原理からはクローズドループ制御に類する。

同期電動機の場合、磁極軸を基準とするベクトル制御と一次磁束を基準とするベクトル制御があり、後者は高力率運転に有効である。サイリスタモータあるいはブラシレス DC モータは、同期電動機に磁極の位置の検出器を取り付け、これから得られた信号を用いて周波数変換器のスイッチングのタイミングを制御する。その基本特性は直流機と類似しており、電機子電圧で回転速度を調整できる。

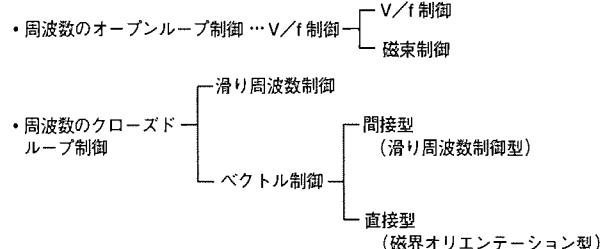
2.2 AC ドライブの各用途における技術動向

表1は、それぞれの機種分野における動向をまとめたものであり、以下にこの状況を述べる。

(1) 汎用インバータ

このインバータでは、電動機の周波数を変化させる際、電動機の空げき磁束を一定に保つように端子電圧もこれに比例して変える V/f 制御が用いられている。用途もファン、ブロワから工作機械など高度な分野への適用が広がっており、

(1) 誘導電動機



(2) 同期電動機

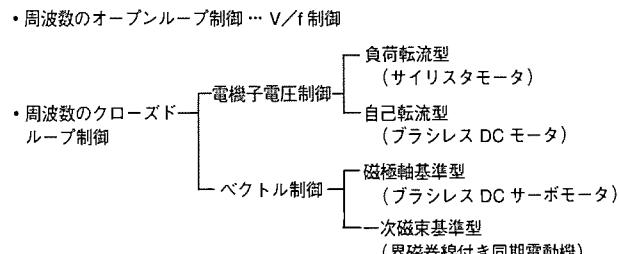


図1. 周波数変換器で駆動される交流電動機の制御方式

用途の高度化・可変速範囲の広域化について、磁束制御を付加して低速時のトルク特性を改善したり、電流制限機能を付加して負荷変動時にも連続運転可能とする改善が行われ始めた。

(2) 一般産業用インバータ

新しい動きとして、速度センサを用いることなく、電圧・電流から誘導したトルク電流及び磁束により、速度の推定を行いベクトル制御を可能とする速度センサレス速度制御システムが最近実用化されてきた⁽³⁾。

さらに、大容量で高速のドライブシステムが要求されるようになり、出力変圧器を用いることなくインバータの出力波形を改善する3ステップインバータの開発や、GTOによるPWMインバータの開発が積極的に行われている。

(3) サーボ、ロボットコントローラ

制御に要求される仕様は、年々厳しくなっており、近年とみに進展著しいDSP (Digital Signal Processor) を使用して、デジタル制御とし、多数台のインバータを1台のコントローラで制御する多軸制御が広がってきた。一般的に、経済性の観点から小容量では同期電動機、大容量では誘導電動機が使用される傾向にある。

(4) 鉄鋼・製紙

圧延ミル主機用として、誘導電動機に加えて力率1制御の可能な同期電動機が適用されるようになってきた。マイクロコンバータは、出力周波数の限界から、電動機容量が1,000～10,000 kWで回転数が1,500 rpm以下のシステムに適用され、それ以上高速なものにはサイリスタモータが使用される。また、400～1,000 kWの領域は、従来電流型インバータが適用されているが、将来は制御性の良い電圧型インバータが期待されており、GTOによるPWMインバータが検討されつつある。

(5) エレベーター

最近は、VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 制御化が進んでいる。IGBTを用いて10kHz程度のキャリア周波数で変調させることにより、機械室騒音を低減させトルクリップの少ない運転が可能となってきた。電源側に高力率コンバータを用いて、電源設備容量の低減が図られる傾向にある。

3. AC ドライブの現状と今後の展望

前章で各用途におけるACドライブの技術動向について述べたが、この章では特に注目されるACドライブ技術についての現状と今後の展望について述べる。

3.1 V/f制御の特性改善

V/f制御が用いられる汎用インバータの性能向上の一方策として、電動機の励磁及びトルク電流を検出し、これを基に一次電圧を制御する方式が研究されている⁽⁴⁾。この方法によれば、低周波域におけるトルク特性の改善、アーム短絡防止時間 T_d による不安定現象の回避、円滑な加・減速運転が可能である。

図2は、改善方式の構成で、マイクロコントローラにインバータの運転角周波数 ω_1 と励磁電流 i_0 に相当する指令 ω_1^* 及び i_0^* が与えられる。検出された電流は、電流変換器で回転座標へ変換され、励磁電流 i_θ 、トルク電流 i_γ が得られる。この方式は、誘導機の一次電圧 v_θ と v_γ を、一次側抵抗と一次側リアクタンスの影響を補償し、励磁電流 i_0 が指令値となるよう与えるものである。したがって、負荷や周波数に無関係にギャップ磁束が所定の値に保たれ、良好な運転特性を得ることができる。

3.2 PWM制御と多重化⁽⁵⁾

トランジスタインバータは、PWM制御と多重化につい

表1. AC ドライブの技術動向

機種	制御方式	容量(kW)	速度ループ応答	技術動向	適用技術
汎用インバータ	V/f制御	0.3～220	—	無騒音化 低速時トルク特性改善 トリップレス	IGBTによる高周波PWM 磁束制御 電流制限機能
一般産業用インバータ	V/f制御 ベクトル制御	20～10,000	10～30rad/秒 (ベクトル制御時)	無保守化 大容量・高速ドライブ	速度センサレス 3ステップインバータによる 直接高圧ドライブ GTOによるPWMインバータ
サーボ	ベクトル制御	0.4～55	500rad/秒	多軸制御 大容量化	DSPによる高速演算 同期機と誘導機の混合
ロボットコントローラ	ベクトル制御	0.1～5.5	500rad/秒	多軸制御 無保守化	DSPによる高速演算 同期機と誘導機の混合
鉄鋼・製紙	ベクトル制御 V/f制御	10～10,000	30～60rad/秒 (ベクトル制御時)	大容量化 高力率化	GTOによるPWMインバータ マイクロコンバータ 誘導機より同期機へ
エレベーター	ベクトル制御	2.2～100	数rad/秒	低トルクリップ化 高力率化	IGBTによる高周波PWM 高力率コンバータ

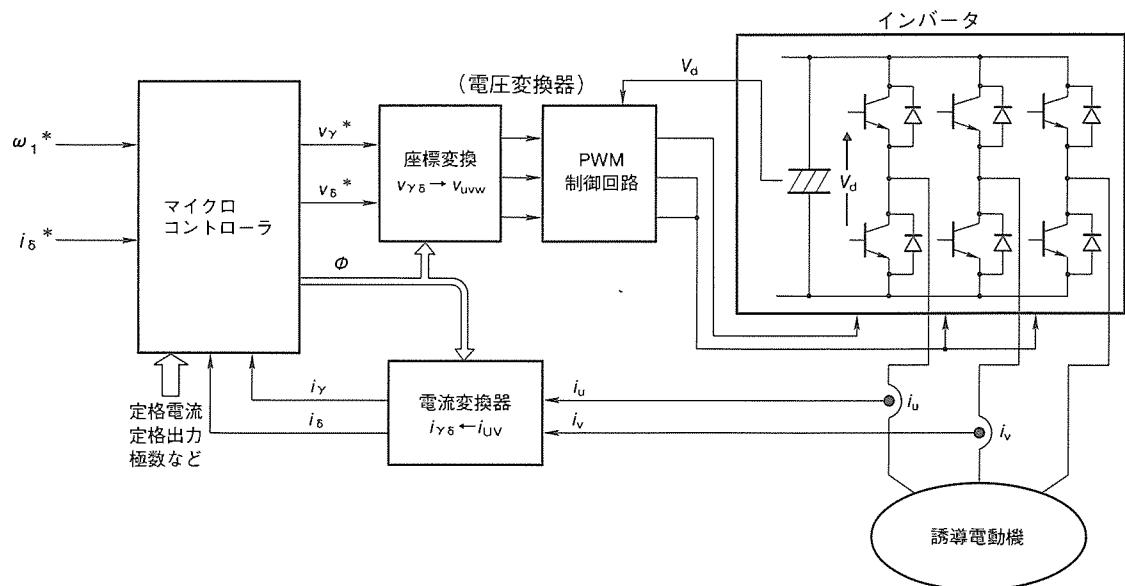
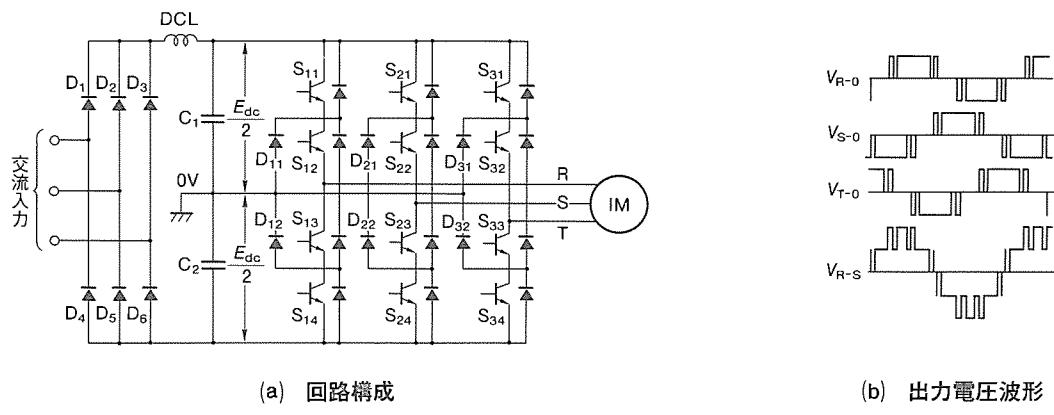
図2. V/f 制御の特性改善

図3. 3ステップインバータ

て各種改善がなされ、高性能化・大容量化が図られてきた。 PWM方式は、従来から三角波比較方式が広く用いられており、多重化する場合はキャリアである三角波を多相化し、高調波を低減する方式が実用化してきた。一方、近年、インバータの各相・各アーム素子のスイッチング状態により、モータ内部に発生し得る空間電圧ベクトルを利用し、電圧ベクトルを発生するスイッチングパターンとその発生時間を制御する電圧ベクトル利用のPWM方式が実用化されてきている。

この方式の特長は、モータの速度・トルク等の所望の制御を行いながら、他の制御諸量（素子のスイッチング数、電流リップル、電力損失など）の評価を関数化して、それを最小化する制御が可能となることである。多重化した場合は、より高度な評価関数制御が実施し得るものと期待される。最近、多重化に関しては、図3に示す3ステップインバータについて研究されている⁽⁶⁾。出力変圧器がなく、出力線間電圧が階段波となる点が注目される。

今後、トランジスタに比べて大容量向きのGTOインバータについてPWM化、多重化による高性能化・大容量化が

期待される。

3.3 ベクトル制御

インバータ、サイクロコンバータを用いた誘導電動機のベクトル制御方式は、高性能な可变速制御を実現し、広く普及し確立された技術となっている。一方、同期電動機についても高性能なベクトル制御方式が開発されている⁽⁷⁾。この制御方式を図4に示す。同図(a)は制御ブロック、同図(b)はベクトルを示す。図に示すように、界磁方向をd軸とするd-q座標軸に対し、電機子鎖交磁束の方向をγ軸とするγ-δ座標軸におけるγ軸上の電機子電流成分が零となるように電機子電流*i*_{γa}を制御し、δ軸上の電機子電流*i*_{δa}をトルクに応じて制御する。これにより、電機子電圧*v*_aと電機子電流*I*_aは同相となり、力率1の制御を行うことができる。

鉄鋼圧延機等の1,000~10,000kWの容量域では、一般的に大容量域は電源容量、効率の点で力率の良い同期機(SM)が、中小容量域は界磁回路の不要な誘導電動機(IM)が適しているといえる。

ベクトル制御方式は、IM、SM方式とも電動機パラメータを正確に設定する必要があり、オフラインチューニングの高

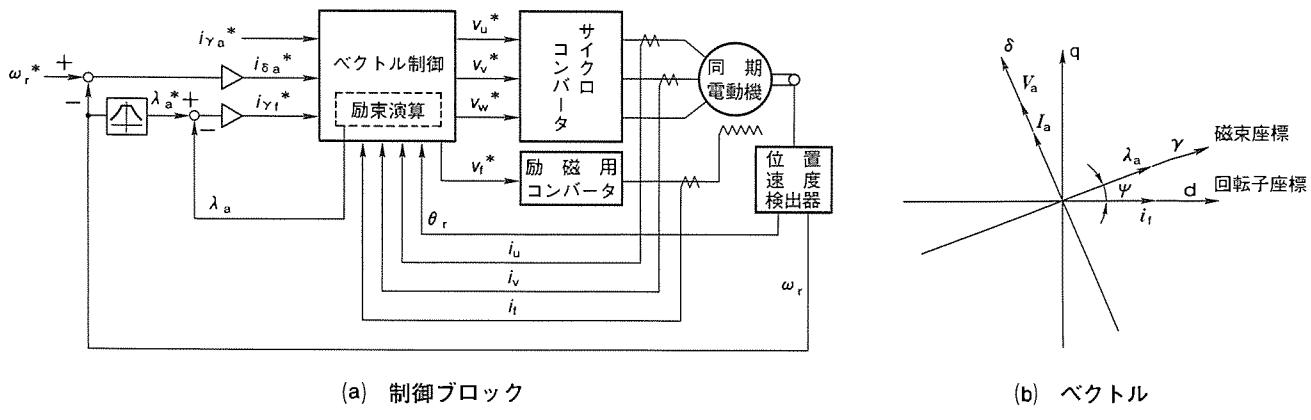


図4. 同期電動機のベクトル制御

精度化と自動化が研究されている。将来は、自動化が進み調整レスとなることが期待される。

3.4 現代制御

電動機駆動系において、電動機と負荷が弾性的な軸により、結合されることによって生じる軸振動、負荷側 GD² が電動機 GD² に対して非常に大きいことによって生じる速度応答性の低下、電動機出力軸にギヤを介することによる機械振動などの問題がある。

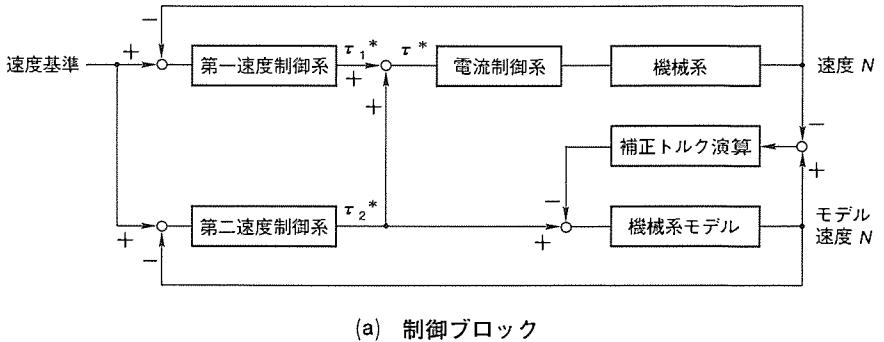
このような問題点を解決するため、オブザーバによって駆動系の軸トルクなどを演算推定し、この状態量をフィードバックし、制御系の自由度を拡大する方式や、制御対象の数学モデルと実プラントの出力誤差が最小となるように、実プラントへの操作量を決定するモデル規範制御方式等の現代制御が採用されてきている。これにより、軸振動制御、ギヤのバックラッシュ補正、オーバーシュートレス化が図られている。軸振動系の応答性を向上するモデル規範制御が開発されている⁽⁸⁾。その制御方式と試験結果を図5に示す。

同図(a)は制御ブロック、同図(b), (c)は負荷外乱時の応答性の試験結果である。モデル規範制御の有効性が確認される。

電動機制御への現代制御の適用は、ベクトル制御と同様に制御対象のパラメータを正確に把握する必要があり、パラメータ同定手法の開発が望まれる。

3.5 エキスパートシステム

可変速装置の普及とともに、保守の省人化を目的として装置故障時に故障箇所を早く発見できるツールの出現が望まれるようになってきた。最近、故障診断のみならず設計支援、



(b) 負荷外乱時の応答性(モデル規範制御無し)

(c) 負荷外乱時の応答性(モデル規範制御有り)

図5. 軸振動系へのモデル規範制御の適用

現地調整支援、モニタリング機能、ファイル管理機能まで含めたAI技術を応用した総合的なエキスパートツールが可変速装置の補助ツールとして実現されるようになってきている。故障診断機能は、可変速装置特有の故障診断が必要であり、可変速システム固有の問題をツールの知識として蓄積する必要がある。このため、市販のAI用言語とは別に、専用インタプリタによる言語を用いた故障診断が行われている例もある。図6にパソコンをインバータに接続し、パソコン上にエキスパートシステムを構成して故障診断機能を活用した画面

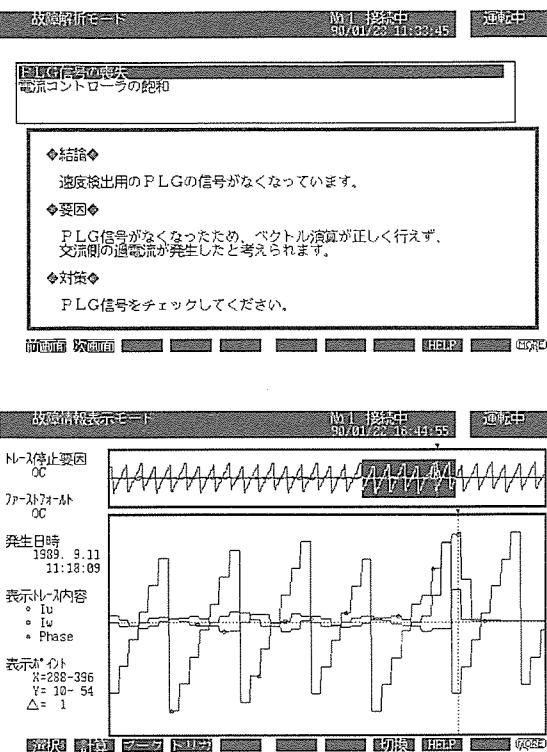


図 6. 可変速装置の故障診断の例

の一例を示す。故障情報を波形として表示することにより、直感的に故障解析を行いやすくするとともに、対話方式によって故障原因の探索及び対策の判断を的確に行うことができる。

今後、より多機能なエキスパートツールに展開し、多彩な表示機能により、調整及び故障復旧について可変速装置の取扱いが容易になり、より親しみの持てるものに発展していくことが期待される。

4. む す び

AC ドライブは、半導体素子の特性向上、プロセッサの高

速化、変換回路技術の進歩により、大容量化・小型化・高性能化・高信頼化が図られ、多くの分野において DC ドライブをりょうが(凌駕)する状況に至っている。現在、性能・機能・保守性の向上への期待はますます大きくなっています。機械系を含めたドライブシステムの高性能化、インバータの大容量化・小型化・多機能化・保守性の向上に一層拍車がかかり、より取り扱いやすく市場の要求にマッチしたものとなり、AC ドライブの適用はますます拡大するものと思われる。

参 考 文 献

- (1) 回転子の超高速化の現状と将来、昭60電気学会全大シンポジウム、S.9 (1985)
- (2) ユーザのための AC ドライブシステム技術、電気学会技術報告、(II部) No.333, 30~49 (1990)
- (3) 玉井伸三、大上正勝、岩崎政彦、長野鉄明、栗山茂三、今井 晶: PG レスペクトル制御インバータ、三菱電機技報、64, No.11, 896~900 (1990)
- (4) 大上正勝、山田秀之、細野 勇、常広 譲: 誘導機駆動用汎用インバータの性能改善の一方法、電気学会論文誌D, 109, No. 5, 333~346 (1989)
- (5) 矢野禎成、溝口昭次: 多重化トランジスタインバータ、電気学会雑誌、108, No. 2, 133~137 (1988)
- (6) Maruyama,T., Kumano,M.: New PWM Control Method for a Three Level Inverter, International Power Electronics Conference Tokyo, April 2 ~ 6, 870 ~ 877 (1990)
- (7) 杉本英彦、藤井俊行: 同期機の非干渉制御法とその特性、電気学会論文誌D, 110, 175~182 (1990)
- (8) 小山正人、神山 功、矢野昌雄: 低剛性な電動機制御系への 2 自由度制御方式の適用、電気学会産業電力電気応用研究会資料、IEA-89-12, 21~30 (1989-2)

低騒音インバータ FR-Z300 シリーズ

伊藤友隆*
杉本重幸*
西澤勇治*

1. まえがき

汎用インバータの登場により、従来、一定速度でしか駆動できなかった交流誘導電動機が、手軽に可変速駆動できるようになった。これによってインバータは、

- (1) ファン、ポンプなどの省エネ用途
- (2) 搬送機器の省力用途
- (3) 可変速運転による各種機械の高機能・高付加価値化用途などを中心に広く使用されるようになった。

さて、汎用インバータで電動機を駆動した場合、電動機からは電磁力による金属音が発生し、その騒音は商用電源で駆動した場合に比べて大きくなることが知られている。この騒音は、事務所・病院などで使用される場合に、特に、問題となることがある。電動機から発生する騒音を商用電源駆動並に抑えることが、汎用インバータの従来からの課題の一つであった。《FREQROL-Z300 シリーズ》(図1)は、この課題を解決した低騒音インバータである。

本稿では、この低騒音インバータ《FREQROL-Z300 シリーズ》の概要、特長及びこれを支える新技術について述べる。

2. Z300 シリーズの概要

インバータ市場の急成長により、インバータに要求される機能はますます多様化している。当社では、これにこたえるべく汎用インバータのシリーズ化を行ってきた。表1は、当社の汎用インバータ《FREQROL-Z シリーズ》の代表機種を示したものである。これらの機種は、その製品が持つ特長に合わせて、様々な用途で使用されている。

前述のように、インバータが事務所・病院などで使用された場合には、その駆動される電動機が発生する騒音が問題と

なることがあった。ところが、最近、産業機器・工場設備においても機械システムなどの静肅運転の傾向が進み、これによって低騒音インバータの需要が高まると同時に、低騒音インバータの高機能化・低価格化が要求されるようになった。

今回、開発・量産化に成功した低騒音インバータ《FREQROL-Z300 シリーズ》は、高機能・多目的インバータ《FREQROL-Z200 シリーズ》をベースに製品化したものであり、《FREQROL-Z200 シリーズ》の上位機種として位置付けし、取付互換性をもたせた汎用インバータである。

2.1 特長

Z300 シリーズは、Z200 シリーズの持つ機能に加えて以下のようないくつかの特長を持っている。

- (1) 商用電源駆動並みの電動機の静肅運転を実現
- (2) 電流制限御による粘り強い運転が可能
- (3) すべり補正機能による過負荷時の安定速度運転の実現
- (4) 計算機とのリンク運転が可能

2.2 仕様

Z300 シリーズの標準仕様を表2に示す。《FREQROL-

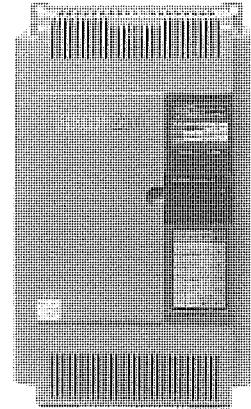


図1. 低騒音インバータ FR-Z300 の外観

表1. 三菱汎用インバータ (代表機種)

シリーズ名	特長	適用モータ	
		電圧クラス (V)	容量範囲 (kW)
FREQROL-Z200	小型・エコノミータイプ (B5版サイズ)	200	0.4~1.5
FREQROL-Z123	省スペースタイプ (ブックタイプ)	200	0.4~1.5
FREQROL-Z100	高機能・普及型	200	0.4~3.7
FREQROL-Z200	高機能・多目的型	200	0.4~55
		400	2.2~55
FREQROL-F400	省エネ用途	200	2.2~55
		400	2.2~55

注 FR-Z300 シリーズは表2に示す。

Z300 シリーズ》は、電源電圧対応で 200V 系電源用として FR-Z320 タイプと 400V 系電源用として FR-Z340 タイプの 2 シリーズから成る。

2.3 回路構成

図 2 は、Z300 シリーズの回路構成を示す。制御回路は、16 ビットマイコンと新たに開発したインバータ専用超 LSI で高周波 PWM (Pulse Width Modulation) 信号を生成すると同時に高機能化に対応している。また、部品点数を減らすことによって高信頼化を達成している。主回路には、当社で開発した高速・低損失パワーモジュール IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を採用している。

3. 低騒音化技術

従来のインバータは、その出力交流電力に含まれる高周波成分 (PWM 変調周波数) が 1~2kHz となっている。このため、電動機の一次巻線には 1~2kHz の電圧パルスが印加されることになり、この周波数成分の電磁音が電動機の固定子

から発生する。この電磁音を低減して商用電源並みの騒音レベルとするためには、電動機に加える交流電力を連續した完全な正弦波にすればよいが、現状の技術では困難である。

Z300 シリーズでは、PWM 変調周波数を人間の耳では聞き取りにくい領域まで高めることにより、騒音レベルを下げるとともに、大幅な電磁音低減を達成している。

運転周波数に対する騒音レベルの比較例を図 3 に示す。低騒音インバータの騒音レベルは、従来インバータ (FR-Z200) に比べて、およそ 15dB 低くなっている。また、インバータの出力周波数が 60Hz では、商用電源駆動時とほぼ同じレベルで電動機の内蔵ファンの騒音相当となっている。

3.1 制御回路技術

3.1.1 高周波 PWM

図 4 は、三角波比較による PWM 信号の生成原理を示したものである。正弦波は、その振幅、周波数がインバータの出力電圧・出力周波数を決定する基準信号となる。三角波は、正弦波に変調をかけるための変調信号で、この周波数が主回

表 2. 《FREQROL-Z300シリーズ》の標準仕様

(1) 200V シリーズ

型式 FR-Z320		0.75K	1.5K	2.2K	3.7K	5.5K	7.5K	11K	15K	22K
適用モータ (kW)	0.75	1.5	2.2	3.7	5.5	7.5	11	15	18.5/22	
定格容量 (kVA)	1.9	3.1	4.2	6.5	9.2	12.6	17.6	23.3	34	
定格出力電流 (A)	5	8	11	17	24	33	46	61	90	
過負荷電流定格				150% 60秒, 200% 0.5秒						
定格出力電圧				3 相 200V 50Hz, 200/220/230V 60Hz						
定格入力交流電圧				3 相 200V 50Hz, 200/220/230V 60Hz						
交流電圧許容変動				180~220V 50Hz, 180~253V 60Hz						
周波数許容変動				± 5%						
電源容量 (kVA)	2.5	4.5	5.5	9	12	17	20	28	34/41	
保護構造 (JEM 1030)				閉鎖型 (IP20)					開放型 (IP00)	
冷却方式		自冷				強制風冷				
概略質量 (kg)	2.5	3.0	6.0	6.5	9.0	9.5	13.5	20	30	

(2) 400V シリーズ

型式 FR-Z340		2.2K	3.7K	7.5K	15K	22K
適用モータ (kW)	2.2	3.7	5.5/7.5	11/15	18.5/22	
定格容量 (kVA)	4.2	6.9	13	23.6	32.8	
定格出力電流 (A)	6	9	17	31	43	
過負荷電流定格			150% 60秒, 200% 0.5秒			
定格出力電圧			3 相 400V 50Hz, 400/440/460V 60Hz			
定格入力交流電圧			3 相 400V 50Hz, 400/440/460V 60Hz			
交流電圧許容変動			360~440V 50Hz, 360~506V 60Hz			
周波数許容変動			± 5%			
電源容量 (kVA)	5.5	9	12/17	20/28	34/41	
保護構造 (JEM 1030)			閉鎖型 (IP20)		開放型 (IP00)	
冷却方式			強制風冷			
概略質量 (kg)	10.5	11	12	25	30	

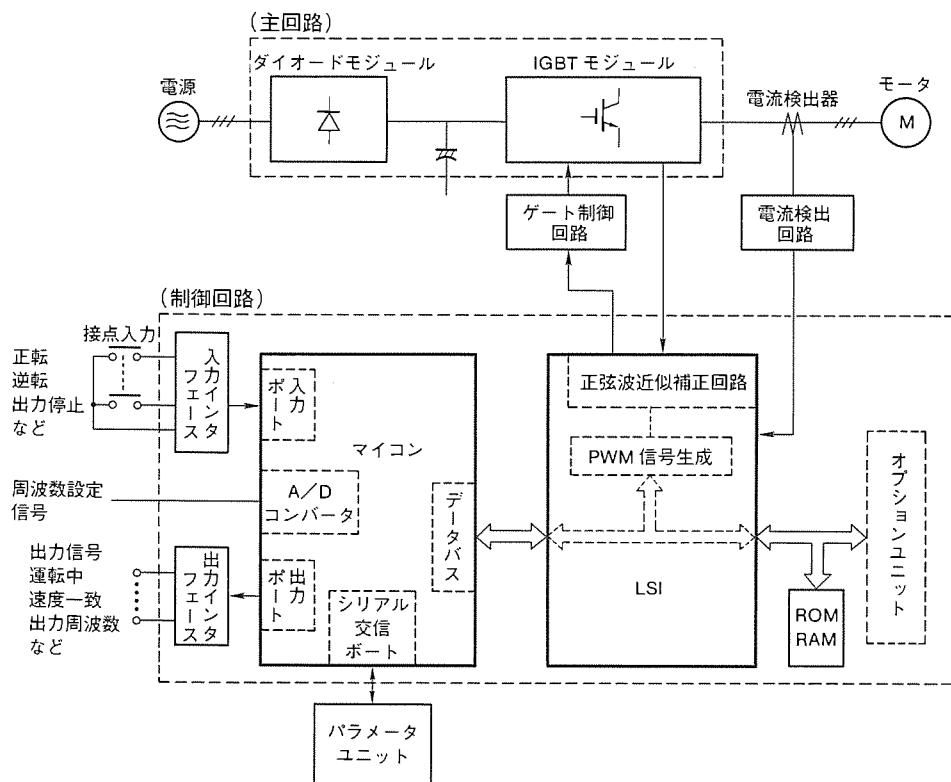


図2. 〈FR-EQROL-Z300シリーズ〉の回路構成

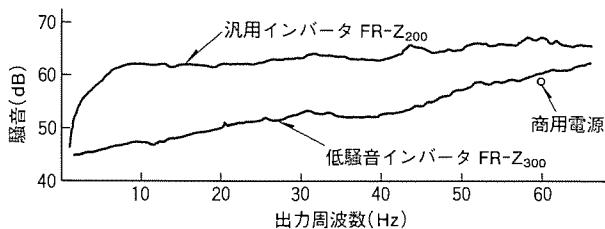


図3. 騒音例：モータ 1.5kW 4P(A特性, 無負荷時)

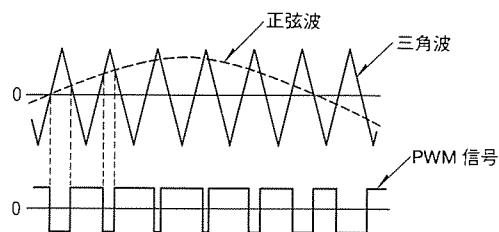


図4. 三角波比較による PWM 制御

路素子 IGBT をスイッチングする周波数となる。高周波 PWM 制御とは、この三角波による変調信号の周波数を人間の耳に聞こえにくい領域まで高めることをいう。

Z300 シリーズでは、この高周波 PWM 信号をマイコンと LSI により作成している。基準信号となる正弦波は、マイコンで直接、演算・作成し、電動機の柔軟な制御を可能にしている。この正弦波データは、16 ビットのデータバスを介して LSI に出力される。LSI 内では、この基準信号と LSI 内で作成した三角波なる変調信号とを比較し PWM 信号を作っている。

以上、高速処理の必要な高周波 PWM 制御をマイコンと LSI で分担処理することにより、インバータの高機能化に必要な多くの制御を同時に一つのマイコンで処理可能としている。

3.1.2 正弦波近似補正回路

制御回路から出力される PWM 信号は、各相上下、計 6 個の IGBT に供給される。この PWM 信号は互いに相補的関係にあり、理論的には上下の IGBT を同時にオンさせることはない。しかしながら、実際は IGBT などのオフ応答遅れにより、上下短絡が発生してしまうため、上下の IGBT 両方ともオフさせる期間（上下短絡防止期間）を設けている。

この上下短絡防止期間は、電動機に与える交流電力を正弦波近似するうえで外乱となり、電動機の回転が不安定となることがある。特に、高周波 PWM 方式ではこの影響が顕著となる。

Z300 シリーズでは、この影響を抑えるために、インバータの出力電圧を検出して上下短絡防止期間を補正する回路を装備することにより、電動機の安定運転を実現している。図 5 は、電動機を 60Hz まで 90 秒で加速運転したときの電動機の出力電流波形と、回転速度を補正回路有無で比較測定したものである。

3.1.3 電流検出回路

電流検出回路には、今回専用に開発した多機能電流検出器を用いている。この電流検出器は、インバータの 3 相出力電流を検出し、この電流情報をもとに電流制限御、電流モニタ機能（出力電流実効値表示、出力電流最大瞬時値表示）、保護機能（過負荷電流検出、地絡過電流検出など）を可能としている。

3.2 主回路技術

3.2.1 IGBT

高周波 PWM 制御を行うと、主回路パワーモジュールのスイッチング損失が急増する。したがって、パワーモジュールの高速化、低損失化が必要となる。従来のインバータでは、主回路パワーモジュールにバイポーラトランジスタを使用しており、応答性・発生損失の面でスイッチング周波数は数 kHz が限度であった。図 6 は、主なパワーモジュールの特性を比較したものである。IGBT の構造は、パワー MOSFET のドレイン側に P^+ を一層設けた構造となっている。

IGBT は、バイポーラトランジスタの特長である高耐圧

大電流特性、及びパワー MOSFET の制御の容易性と高速スイッチング特性を兼ね備えたパワーデバイスであり、低騒音インバータのパワー素子として今後主流を占めていくと考えられる。

3.2.2 IGBT の高周波スイッチング技術

IGBT はバイポーラトランジスタ、パワー MOSFET に比べ、多くの利点を持っているが、スイッチング速度が速いことからターンオフ時のサージ電圧が大きくなるという欠点がある。特に、インバータの出力を短絡させた時に流れる過大電流を遮断保護するときに、このサージ電圧の影響は最もきびしくなる。図7は、インバータの出力配線間が短絡された時の電流経路の一例を示すものである。主回路コンデンサから IGBT 間に配線インダクタンス L_1 があると、電流遮断時に、 $2L_1 \cdot (dI/dt)$ の電圧がターンオフサージ電圧として IGBT に加わる。

このサージ電圧の低減には、IGBT のゲート抵抗を大きくして、IGBT のスイッチング速度を遅くすることにより、 dI/dt を小さくする方法もあるが、IGBT のスイッチング損失が増大するため得策ではない。よって、IGBT の各相にこのサージ電圧を吸収するだけのスナバ回路を複数個入れて対処するのが一般的である。

しかしながら、この方法では、同等のサージ電圧抑制効果を得るためにには、同一配線インダクタンス L_1 に対し dI/dt が倍増すればスナバ回路の個数を倍増させる必要が生じる。実際、IGBT を使用した場合、バイポーラトランジスタに比べ、 dI/dt が2倍以上となり、スナバ回路による対策では装置の大型化につながる。

Z300 シリーズでは、主回路コンデンサと IGBT 間の配線インダクタンスを減少させる当社独自の構造を採用することで、配線インダクタンス L_1 を減らし、スナバ回路を増やすことなく、サージ電圧を減少させることができた。

図8、図9は、出力短絡時の IGBT の電圧 V_{ce} と電流 I_c を示す。図8は、従来の配線構造でスナバ回路が3個の場合、図9はZ300 シリーズの配線構造によるもので、スナバ回路が2個の場合である。短絡電流を遮断した時に発生するサージ電圧は、従来の 360V から 220V に低減することができ、スナバ回路の個数も従来以下にすることができる装置の小型化を達成することができた。

4. 新機能

4.1 電流制限御

Z300 シリーズでは、当社独自のインバータ出力電流制限御を施すことにより、急加速、負荷急増時あるいは、電動

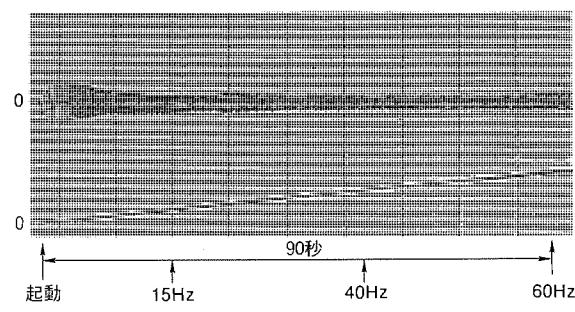
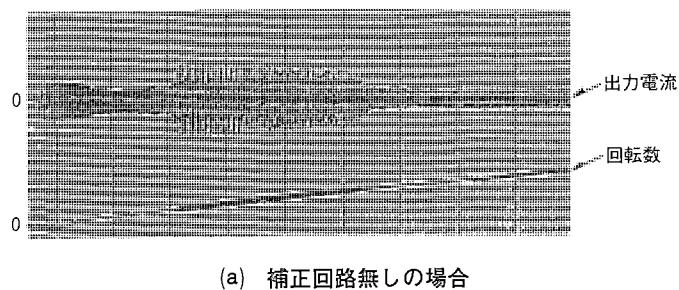
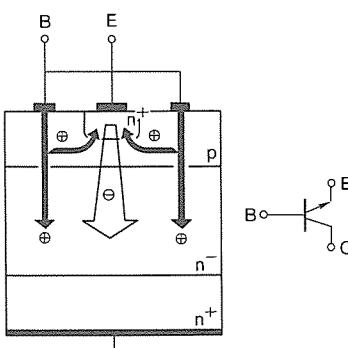
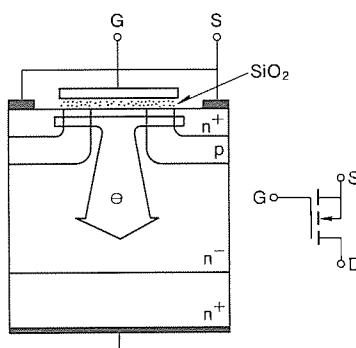


図5. 正弦波近似補正回路の効果



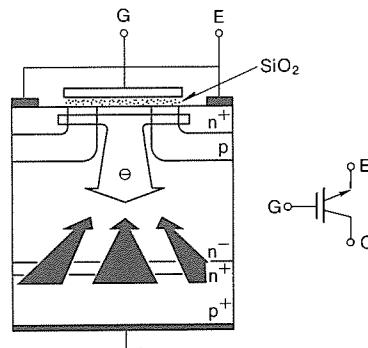
- 伝導度変調効果により、オン電圧降下が低い
- 低入力インピーダンスのため駆動電力大
- 中高速スイッチング

(a) npn 電力用バイポーラトランジスタ



- 多数キャリア電導のためオン電圧降下が高い
- 電圧駆動素子のため駆動電力小
- 超高速スイッチング

(b) n チャネル電力用 MOSFET



- 伝導度変調効果により、オン電圧降下がやや低い
- 電圧駆動素子のため駆動電力小
- 高速スイッチング

(c) n チャネル電力用 IGBT

図6. 各種パワー素子の特長

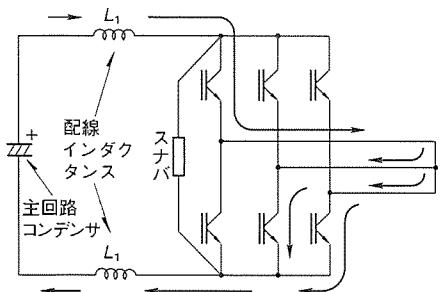


図7. 出力線短絡時の電流経路

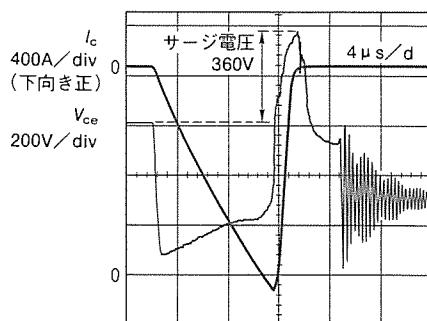


図8. 従来の配線構造によるIGBTの電圧電流波形(出力短絡時)

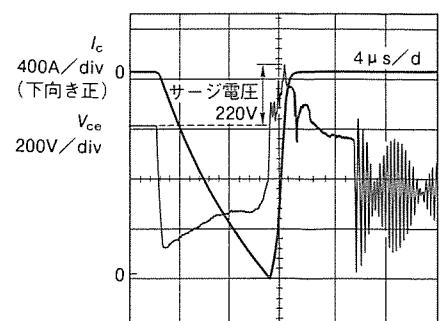


図9. 本インバータ配線構造によるIGBTの電圧電流波形(出力短絡時)

機フリーラン再投入時にインバータが過電流トリップすることなく運転を継続することができる。

図10は、フリーラン再投入時の電流制限御の効果を示すものである。60Hzでインバータ運転している状態でインバータの電源をオフすると、電動機はフリーラン状態となり、次第にその回転速度は減少していく。図10は、フリーラン回転速度が、およそ30Hzとなったところで電動機に再起動をかけたときの様子を表している。

電流制限御ありの場合は、出力電流はある一定値で制限がかかり電動機の回転を引き込んだ後60Hzまで加速している。ここで、インバータの出力周波数の上昇率が一定でないのは、電動機のすべりが大きくなり、電動機が失速するのを防止するために出力周波数を制御しているためである。

電流制限御無しの場合は、出力電流はインバータの過電流保護レベルに達してしまい、インバータは瞬時に保護停止してしまう。こうした電動機のフリーラン中の再投入というモードは、瞬時停電の時に発生しやすく、電流制限御機能を使用することにより、不要なシステムダウンを防止することができる。

図11は、電流制限御の効果を示す別の例である。図は、インバータによる電動機の60Hz直入れ始動を行ったもので、インバータと電動機の間に設置された電磁接触器MCを開いた状態でインバータの出力周波数を60Hzとしておき、その後MCを開じたときの様子を示している。

直入れ始動から、電動機の回転が引き込まれるまでの、およそ1秒間、電流制限御機能によって出力電流値が一定値に制御されている。電流制限御がない場合は、直入れ始動電流がインバータの過電流保護動作レベルを超えててしまうため、インバータは過電流トリップしてしまい、電動機を始動させることができない。

4.2 すべり補正

図12に示すように、誘導電動機は負荷が増大するとすべりが大きくなる。特に、運転周波数の低いところでは顕著となる。Z300シリーズは、このすべりを補正する機能を持っている。図13は、すべり補正機能の効果を示したものであり、運転周波数が10Hz、及び20Hzで、それぞれ負荷をか

(負荷 $GD_L^2 = モータGD_M^2$ の3倍、加速時間の設定0.7秒)
FR-Z320-7.5K, SF-JR7.5kW 4P

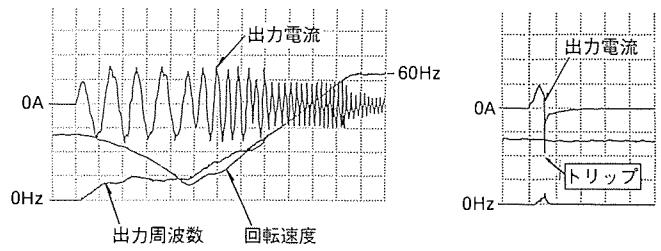


図10. フリーラン再始動時の電流制限御機能の効果

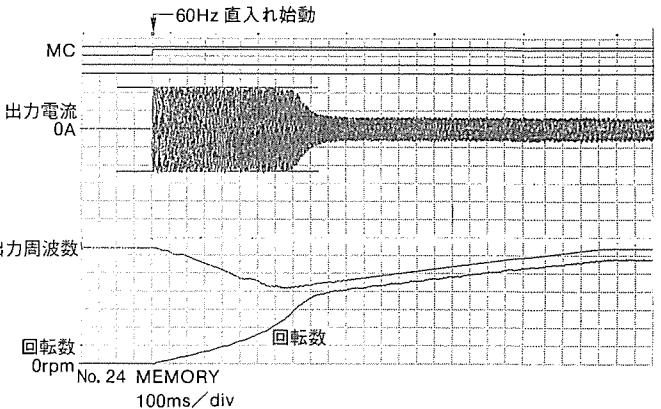


図11. 60Hz直入れ始動時の電流制限御機能の動作

けていたときの電動機の回転数を示している。運転周波数が10Hz(同期回転数=300rpm)で負荷率が100%となると、すべり補正機能無しの場合は、電動機の回転数はおよそ200rpmまで下がり、すべりが、およそ33%となっている。

これに対し、すべり補正機能有りの場合は、負荷率を100%としても電動機の回転数は同期回転数である300rpmをほぼ維持している。すべり補正の補正量については、インバータ本体の表面に装着しているパラメータユニットで任意に設定することができる。

4.3 計算機とのリンク運転

近年のFA化の進展で、インバータもシステムコンポーネントとして使用されパソコンなどの計算機や、プログラマブルコントローラと接続して相互にデータ交信する場合が

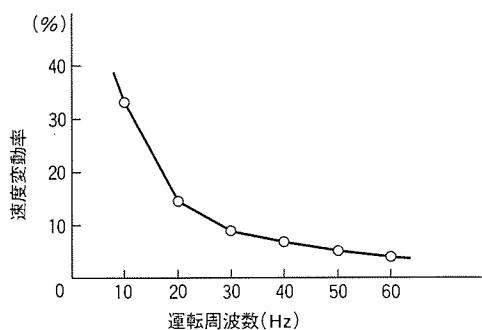


図12. 運転周波数に対する速度変動率(すべり)

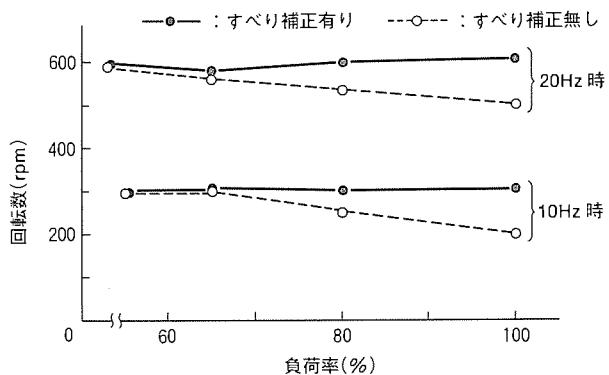


図13. すべり補正機能の効果

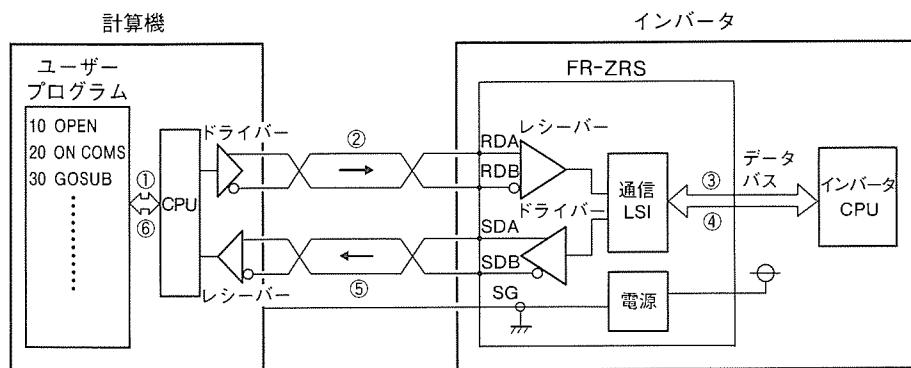


図14. 機能ブロック図

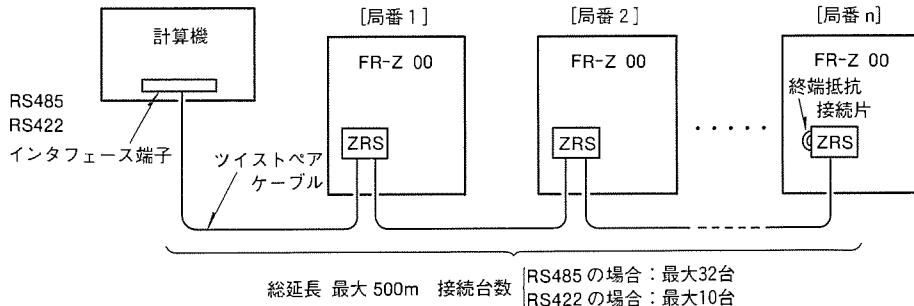


図15. システム構成例(RS485 又は RS422 インタフェースを装備した計算機とインバータを組み合わせる場合)

増えてきている。既に、Z200 シリーズでは、オプションユニット FR-ZDL を内蔵することにより、当社製シーケンサ《MELSEC-A》との光データリンクを可能としている。

Z300 シリーズも Z200 シリーズと同様、インバータ本体内にオプションユニットを最大 2 枚まで内蔵することができる。Z300 シリーズでは、前述の光データリンクユニットに加えて、パソコンなど計算機との交信を可能にするシリアルインターフェースユニット FR-ZRS を準備している。

このオプションユニットを搭載することにより、RS422、RS485 規格 (RS232C 規格は変換器が必要) に準拠した計算機と接続が可能となり、計算機側からインバータの運転・監

視ができるのはもちろん、加減速時間などの各種設定値を変更・確認することができる。

図14に機能ブロック図を、図15にシステム構成例を示す。1台の計算機に対し、ツイストペアケーブルによる渡り配線で最大32台のインバータを接続(総延長 500m)することができ、省配線効果も大きくなっている。

5. む す び

以上、低騒音インバータ《FREQROL-L-Z300 シリーズ》について、特長と主な新技術を紹介した。《FREQROL-Z300 シリーズ》は、16 ビットマイコンとインバータ専用超 LSI の組合せにより、高機能性を保ちつつ高周波 PWM 信号の制御を実現したと同時に、高性能 IGBT モジュールの開発、採用によって低損失で信頼性の高い低騒音インバータである。

そしてさらに、電流制限御機能を充実したことにより、過負荷モードでもトリップせず粘り強い運転が可能となった使いやすいインバータである。

我々は今後も、更にユーザーの要求にマッチした機能・性能を持つ汎用インバータの開発・製品化に努力を重ねる所存である。

参考文献

- (1) 梶田武良、伊藤友隆、杉島栄一、岩崎政彦：オールデジタル汎用インバータ FR-Z シリーズ、三菱電機技報、62, No. 6, 21~26 (1988)

誘導型 AC サーボ 《MELSERVO-V シリーズ》

石川嘉夫* 井川 康*
大川義光*
島 昌*

1. まえがき

サーボドライブの AC 化は、工作機械やロボットなどの分野において、その保守性、信頼性、操作性の向上により急速に普及してきた。

それにつれ、一般産業機械の製造設備や各種搬送設備など高速・高精度の加減速運転や位置決め精度の向上を要求される分野へと AC サーボが幅広く使用されるようになり、市場のニーズもますます多様化してきている。

当社としては、1983年に永久磁石式同期型モータの AC サーボ（ブレシレス DC サーボ）を世に出して以来、用途に応じて各種のシリーズ化を行ってきた。

今回、新たに堅牢で信頼性の高い誘導型モータを高速16ビットCPUによりソフトウェア処理するオールデジタル誘導型AC サーボを製品化した。

本稿では、図1に示す小容量クラスの《MELSERVO-VC シリーズ》と、図2に示す大容量クラスの《MELSERVO-VA シリーズ》について述べる。

2. 新シリーズの位置付けとねらい

当社における永久磁石式同期型サーボモータを大きく層別すると、次の二つに分類できる。

一つは、中慣性タイプの SA シリーズで工作機械や一般産業機械の高精度位置制御用として幅広く使用されている。他方は低慣性タイプで、SC, L, U シリーズと小容量から大容量まであり、特に高精度運転されるプレスフィーダ、小型 X-Y テーブルなどに使用され、高い附加価値を生みだしている。

今回製品化した誘導型 AC サーボは、前者に比べ中慣性か

ら高慣性タイプに分類できる製品で、重量物の搬送、巻取りなど負荷イナーシャの大きな用途でも安定した特性が得られ、永年の汎用誘導電動機の技術を生かして経済性も追求した製品である。従来の高精度・高頻度対応のサーボでは使いづらかった分野でも安心して使用できる特長をもっている。以上から当社のサーボファミリーは、図3に示すとく 50W～22kW までオールデジタルでラインアップできた。

次に新シリーズの開発にあたり注力したポイントを記す。

- (1) 高速16ビットプロセッサ(CPU)の採用で、インテリジェントなソフトウェアサーボとし、従来の《MELSERVO-SA シリーズ》で好評をいただいた高機能で使いやすい点をそのまま引き継ぐ。
- (2) LSI化などによる高集積化と各部の省電力化を図り、アンプの小型化と高い信頼性を得る。
- (3) 小容量シリーズのサーボアンプは、主回路をプリント板化して電線を一掃し、小型化と安定した品質を確保する。
- (4) 小容量モータは、中慣性で従来の SA シリーズと取扱互換とし、大容量モータは汎用誘導電動機などの高慣性で機械側からの制約が少なく、使いやすい製品とする。
- (5) モータ検出器は、堅牢な誘導型サーボモータとマッチした構造とし高い信頼性を確保する。

3. 誘導型サーボの得失

従来から使用してきた磁石式同期型サーボと比較して、誘導型サーボの持つ得失を図4にまとめて示す。

誘導型モータは、回転子に磁石が無く機械的に堅牢なカゴ型構造となっており、回転中の遠心力に強く大容量化・高速回転化が容易で低慣性化も図りやすく、汎用誘導電動機の生産技術などの応用ができる。さらに磁石が無いことから磁極

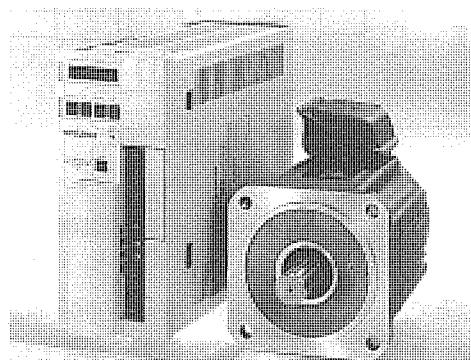


図1. MELSERVO-VC シリーズ

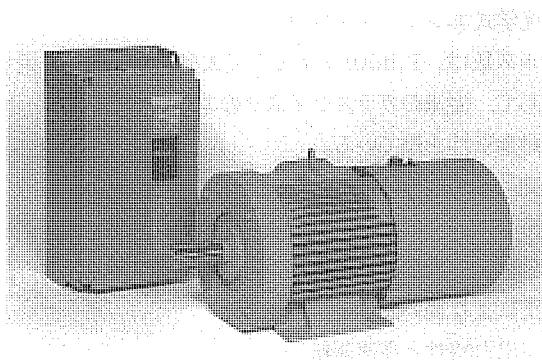


図2. MELSERVO-VA シリーズ

モータ方式		同期型モータ(永久磁石式)			誘導型モータ
制御方式	オールデジタル			アナログ	オールデジタル
指令方式	汎用I/F(パルス列, アナログ)		バス結合	汎用I/F	汎用I/F
絶対値	X		○	X	X
対応制御モード	位置	○	○(指令部内蔵)	○	○
	速度	○	—	—	○
	トルク	○	—	—	○
出力容量(kW)		0.05 0.1 0.2 0.5 1.0 2.0 5.0 10 20 50	MELSERVO-SC MELSERVO-SA (標準) (ホール フィーダ 機能付) MELSERVO-SA-R (ホール フィーダ 機能付) MELSERVO-SA-T (割り出し 機能付)	MELSERVO-SD MELSERVO-SB (絶対位置 移出対応 可能)	MELSERVO-VC MELSERVO-A-KL MELSERVO-VA

図3. MELSERVO ファミリー

検出が不要となり検出器が安価にできるといった利点がある。

一方、磁石が無いため停電などの非常時にダイナミック制動がきかず、常時モータに励磁電流を流すことで無負荷でも発熱し、モータの小型化が難しいといった欠点がある。

サーボアンプでは、ベクトル制御といった高度な制御技術が必要とされ、高性能パーツを採用するなどコスト面で不利といわれてきたが、近年のマイクロ電子技術の進歩により優位差のないレベルに来ている。

4. 誘導型サーボモータ

汎用誘導電動機と工作機械用主軸モータで永年培ってきた技術をもとに製品化した誘導型サーボモータの特長を次に列記する。

(1) 小型軽量化

熱解析プログラムを用いたシミュレーションにより、モータ冷却構造の最適化を行い、コイルエンドのデッドスペースの有効利用と検出器との熱遮へいにより汎用誘導電動機に比べ大幅に小型軽量化を図った。図5にその構造例を示す。

(2) 高信頼化

磁石式同期型モータに比べ誘導型サーボモータは、堅牢な構造のため信頼性と保守性に優れている。検出器もこれとバランスをとるため構造的に強固なメタルディスクを用いた密閉型光学式エンコーダを採用した。

パルス数は、1,000P/Rとして大型の軸受けを採用するなどして、従来のガラスディスクのエンコーダに比べて高い耐衝撃性を得ている。

(3) 高品質化

サーボアンプとキャリヤ周波数などの最適マッチングにより、低騒音・低振動を実現し、誘導型モータと検出器の信頼性向上により高い品質を得ている。

(4) 定出力特性と高速運転

ベクトル制御により励磁分電流とトルク分電流を別々に制

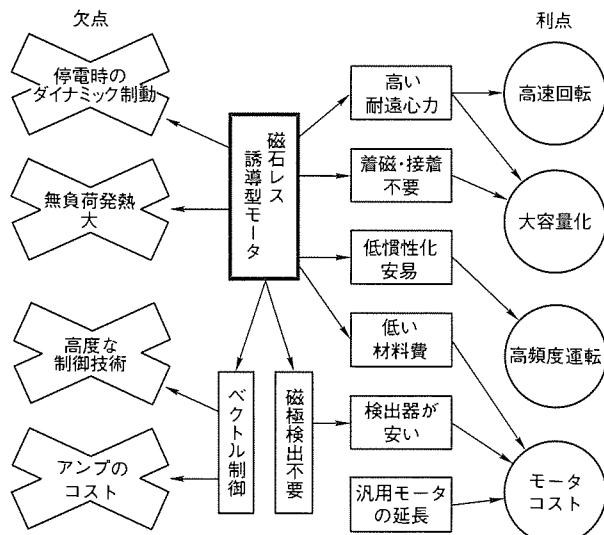


図4. 誘導型サーボの得失

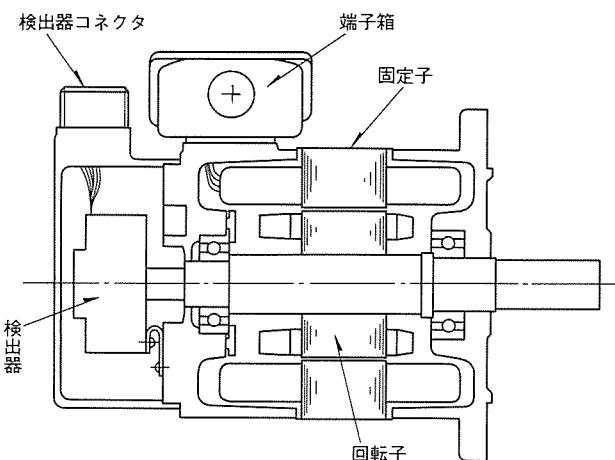


図5. 誘導型サーボモータの構造例

御することで、定格回転速度(小容量は2,000rpm、大容量は1,500rpm)以上は弱め励磁制御を行うことにより、3,000rpmまで定出力特性として高速回転が可能である。

(5) 高いコストパフォーマンス

磁石を使用しない誘導型のため、着磁装置が不要であり生産性に優れている。また、汎用誘導電動機と部品の共用化・標準化を行い巻線の機械巻化などの採用でコストパフォーマンスに優れている。

5. サーボアンプの構成

サーボアンプは、図6に示すとくオールディジタル化しており、小型化と使いやすさを追求したポイントを次に述べる。

(1) 主回路のプリント板化

小容量《MELSERVO-VC シリーズ》では、主回路部品に関しすべてプリント板実装タイプを採用し、図7に示すとく電線をまったく使用しない構造とした。したがって、サーボアンプは主回路を制御回路のプリント板で構成され、非常にシンプルで組立作業も改善でき、信頼性も向上している。

(2) 専用 LSI の採用

制御回路は、高速16ビットCPU、ROM、RAM、A/Dコンバータそして2組の専用LSIで構成されている。今回、特に小型化を実現するために、従来汎用ICで構成していた回路を図8に示すとく面実装フラットパッケージ型専用LSIを開発した。従来のオールディジタルサーボアンプに比

べて部品点数を約2/3と少なくして高信頼化を図っている。

(3) 省電力化

主回路スイッチング素子には、少ないベース電流で駆動できる高 h_{FE} トランジスタを採用するとともに、CPUやLSIなどはCMOS系とすることで、発熱が少なく省電力化を図っている。

制御電源は、AC200~230V±10%に対し高い安定性を持つスイッチング電源とし、省電力化とあいまって小型となっている。

以上より、“MR-VC シリーズ”サーボアンプを従来のアンプと比較すると、取付面積で約1/3、体積で約1/2と非常に小型としている。

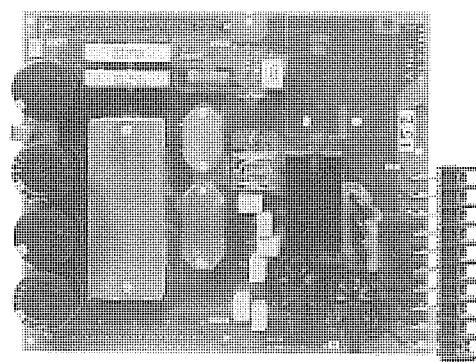


図7. 主回路プリント板

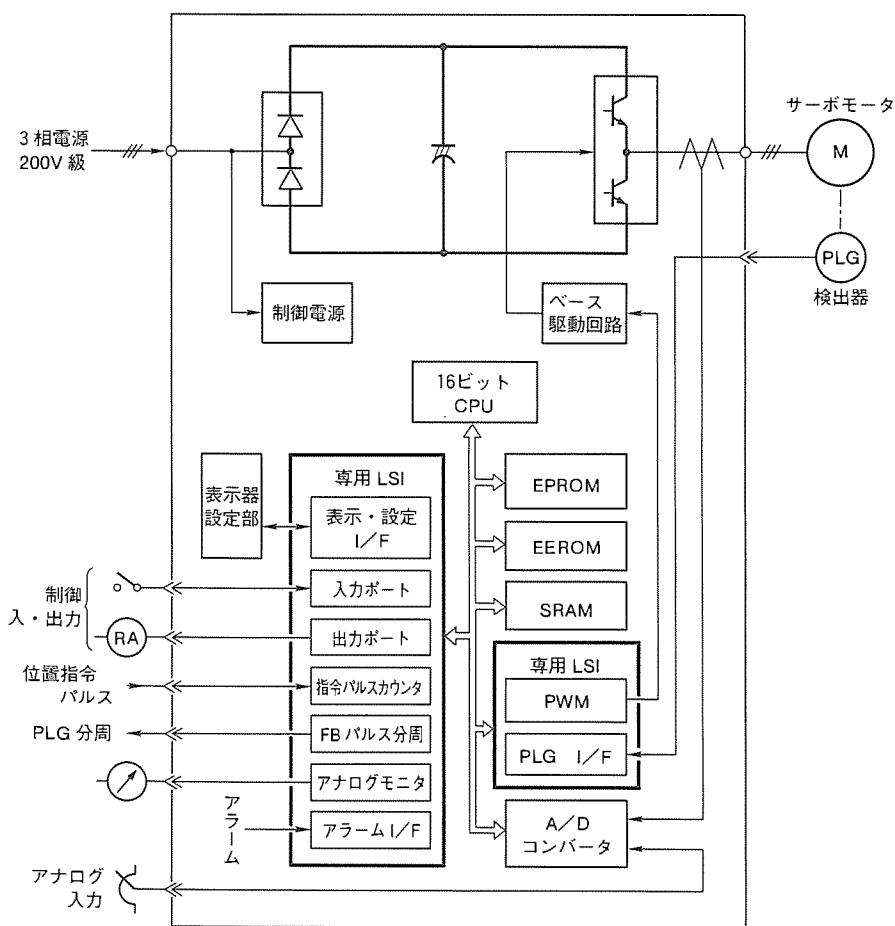


図6. サーボアンプのハードウェア構成

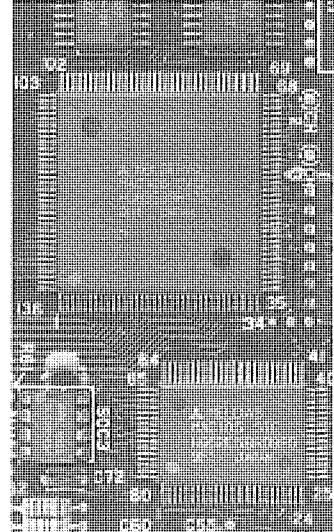


図8. 専用 LSI

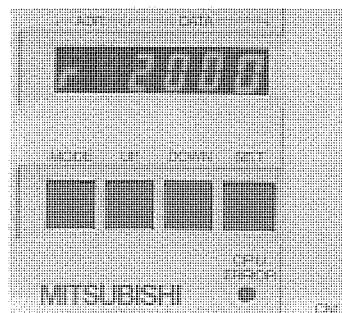


図9. 表示・設定部

(4) 表示・設定部

オールディジタル化したことから各種データを内部に記憶しており、図9に示す表示設定部を操作することで次に示すごとく各種データをワンタッチで読み出したり変更が可能となっている。運転立ち上げや保守点検の際、有効なデータが得

られるといったメリットがある。

- (a) 負荷率や回転速度など運転状態モニタ
- (b) 外部I/F信号のON/OFF状態モニタ
- (c) 過去10回分のアラーム記憶
- (d) 各種パラメータの設定・記憶

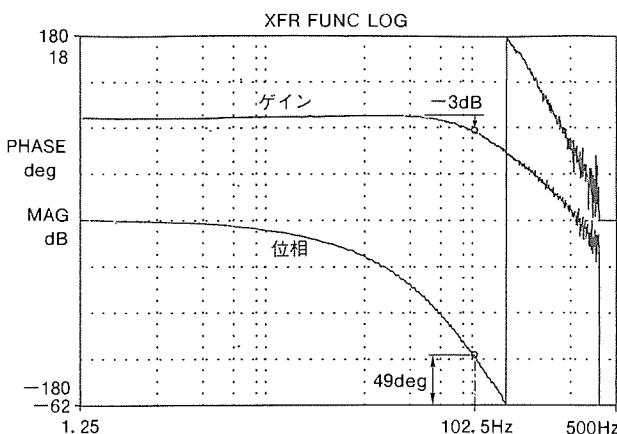
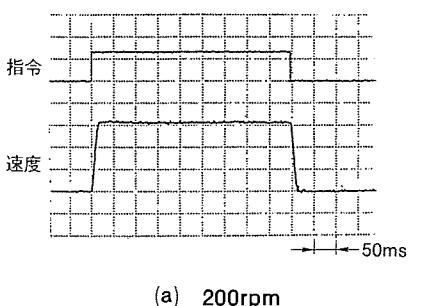
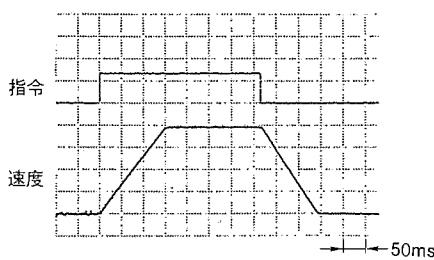


図10. MR-VC152 周波数応答



(a) 200rpm



(b) 2000rpm

図11. MR-VC82 ステップ応答

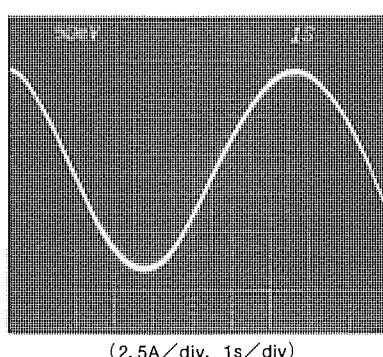


図12. 低速時電流波形 (3rpm)

表1. ソフトウェア処理一覧

ルーチン	処理内容
イニシャル	電源投入シーケンス 各種パラメータ設定 各種H/W診断
フォアグランド	位置ループ フィードフォワード制御 速度ループ ベクトル制御
バックグランド	電子ギヤ 加減速時間 モニタ出力 アラーム検出 状態表示 テストモード 外部入出力信号

表2. 標準仕様一覧

シリーズ		MELSERVO-VC	MELSERVO-VA
出力容量	量 (kW)	0.4	0.75, 1.1, 1.5
回転速度	定格回転速度 (rpm)	2,000	1,500
	最大回転速度 (rpm)	3,000	
	許容回転速度 (rpm)	3,450	
トルク特性	0~2,000rpm 定トルク (2,000~3,000rpm 定出力)	0~1,500rpm 定トルク (1,500~3,000rpm 定出力)	
最大トルク (定格トルク比) (%)	250	220	150
速度・位置検出器	光学式エンコーダ 1,000P/R		
取付	フランジ	足付き	
シヤフト	ストレート	キー溝付き	
冷却方式	全閉自冷	全閉他冷	
電源電圧・周波数	200V, 50Hz 200/220/230V, 60Hz		
制御方式	オールディジタル 正弦波PWM		
電流制御方式	ベクトル制御		
制御モード	位置, 速度, トルク 位置/速度, 速度/トルク, トルク/位置		
速度制御仕様	速度制御範囲	1:1,000	
	指令方式	内部パラメータ: 3速 外部アナログ: 1速	
	外部アナログ指令入力	0~±10V	
位置制御仕様	最大入力パルス周波数	オープンコレクタ: 200kpps 差動レシーバ: 200kpps	
	位置決め帰還パルス	4,000P/R (4倍速にて)	
	電子ギヤ	1/A~B≤20	
トルク制御仕様	トルク直線性	±5%以下	
	外部アナログ指令入力	0~±8V	
トルク制限	トルク制限	10V/Maxトルク	
アナログモニタ	アナログモニタ	速度又はトルク選択	
デイジタルI/O	デイジタルI/O	入力: 6点 (SON, RES, LSP, LSN, CR, D10, D11, D12, ST1, ST2選択) 出力: 5点	
パルス列出力	方	オーブンコレクタ	
	分	1/1~1/256	

(e) 外部信号なしでのテスト運転

6. ソフトウェア処理

サーボのソフトウェアは、高いサーボ性能を得るために高速処理が要求され、すべてアセンブリ言語でプログラミングされており、ベクトル制御から位置制御ループまでのフォアグランド処理、アラーム検出などのバックグランド処理、更に電源投入時のイニシャライズ処理などのプログラムで構成されている。

表1に各ソフトウェア処理内容を一覧表としてまとめて示す。

7. サーボ性能

次に、サーボ性能を示す代表的な特性データを示す。

(1) 周波数応答

図10は、1.5kW サーボモータ単体における速度ループでの周波数応答特性であり、102.5Hz と同期型サーボと比べても同等のサーボ性能を持っているといえる。大容量シリーズは高慣性モータで使いやすく安定とするため約50Hzの応答性としている。

(2) ステップ応答

図11は、0.75kW サーボモータに1.7倍の負荷イナーシャを取り付けた時の速度ループでのステップ応答特性である。200rpm, 2,000rpm ともにオーバーシュートもなく良好な特性を示している。

(3) 電流波形

図12に低速域での電流波形を示す。波形ひずみの出やすい低速域でもひずみがなく、低速域まで安定に制御できることを示している。

8. 仕様と応用例

《MELSERVO-VC シリーズ》と《MELSERVO-VA シリーズ》の標準仕様一覧を表2に示す。

サーボアンプをオールディジタル化して、位置・速度・トルク制御すべてに対応できる多機能仕様となっており、シーケンサの位置決めユニットから張力制御ユニットまで各種制御機器と組み合せてシステム構築が可能となっている。

図13は同期運動システム構成例であり、主コンベアはインバータ駆動され、これに取り付けられた位置検出器(エンコーダ)に基づき従コンベアをサーボによって同期運動をする。両コンベアの比率は、サーボアンプの電子ギヤにより、4,999/5,000 の如く分数による微妙な設定が可能である。

図14にサーボの追従遅れをなくするためにフィードフォ

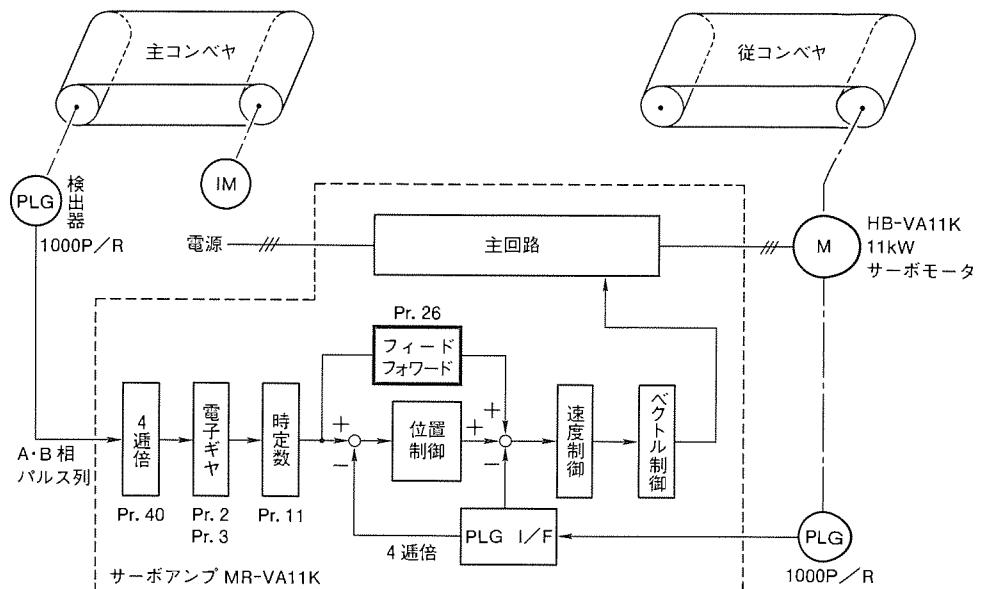


図13. 同期運動システムの構成例

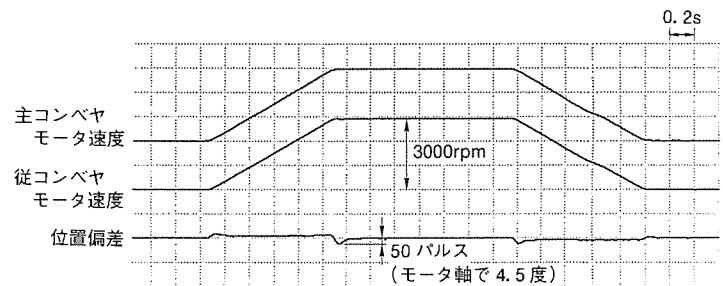


図14. 同期運動特性

ワード制御を有効としたときの同期運動特性を示す。フィードフォワード無しでは3,000rpm時、8,000パルスの位置偏差が出ていたものが、フィードフォワード有効とすることで速度変曲点にて50パルスと位置偏差が激減している。また、主コンベアを連続運動の状態で従コンベアを停止状態より始動する場合、ショックレスで同期運動に引き込めるよう位相偏角も設定できる。

9. むすび

新しい誘導型ACサーボの特長・構成・性能などについて紹介した。本製品は、サーボの革新をねらったオールディジタルサーボであり、今後ますます多様化する市場において広く採用されることを期待している。

当社では、今後ともサーボの機能・性能の向上と高信頼化を図って、更に使いやすい製品を市場に提供すべく、需要家各位の御指導と御協力を得ながら、より一層技術開発に取り組んでゆく所存である。

参考文献

- (1) 石川嘉夫, 堀 清介, 島 晶: オールディジタル三菱汎用ACサーボ《MELSERVO-SAシリーズ》, 三菱電機技報, 62, No. 8, 705~708 (1988)

PG レスペクトル制御インバータ

玉井伸三* 長野鉄明***
大上正勝** 栗山茂三***
岩崎政彦*** 今中晶***

1. まえがき

今日、誘導電動機駆動用の汎用インバータが数多く実用化に供されている。

汎用インバータは、一般に出力電圧／出力周波数一定(V/f 一定)のオープンループ制御が採用されており、このためインバータの容量さえ適切なものを選定しておけば、誘導電動機の特性に左右されることなく運転をすることができる特長がある。しかし、負荷変動に対する対策がないため、低速時のトルク不足、負荷時の大きな速度変動、良好な加減速が得がたいことなど実用上種々の問題を生じる。

このような問題を解決する方法として、PG(速度検出器: Pulse Generator) レスペクトル制御が注目され、幾つかの方式が提案されている。

ここで紹介する方式は、モデル規範適応システムに基づく方式で、誘導電動機の回転速度を同定し、汎用誘導電動機のベクトル制御を行うものである。

今回、このモデル規範適応システムを用いて、汎用誘導電動機駆動用 PG レスペクトル制御インバータの開発を行った。このインバータを搬送システム走行駆動に適用し、これらの問題を解決して良好な結果を得た。

本稿では、まず現状の汎用インバータの問題点と PG レスペクトル制御インバータの特長を述べ、次にモデル規範適応システムに基づく、モータ回転速度同定の原理、システム構成、負荷特性及び上記搬送システムにおける実際の運転特性について紹介する。

2. PG レスペクトル制御インバータの特長

まず、汎用インバータの実用上の技術課題について触れておこう。1章でも述べたように、汎用インバータは、モータの端子電圧 V_1 とその周波数 f の比を一定に制御しており、この制御はオープンループ制御であり、誘導電動機の負荷状態に関係なく、インバータの運転周波数 f によって決まる一

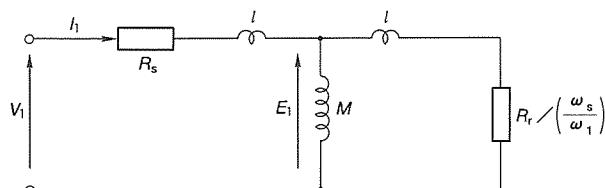


図1. 誘導電動機のT型等価回路

定の出力電圧 V_1 となる。このような制御を行うと、モータ回転数は負荷によって変動し、さらに低速時のトルク不足を生じる。

この現象を誘導機の T 型等価回路図1を用いて簡単に説明する。図において、 M の両端に発生する電圧を E_1 とすると、モータ発生トルク T_e は次式で表される⁽¹⁾。

$$T_e = \left(\frac{\omega_s R_s}{R_s^2 + (\omega_s/l)^2} \right) \cdot (E_1/f)^2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ω_s ：すべり角周波数

式(1)から E_1/f を一定にすることにより、モータ発生トルク T_e はすべり角周波数 ω_s によって決まる。 V/f 一定制御では、ほぼ E_1/f が一定となるが、一次巻線抵抗 R_s と一次巻線漏れインダクタンス l の影響によって若干 E_1/f からずれる。この影響は、 V_1 が特に小さくなる低周波域に顕著となる。この影響を補償するため、インバータの出力電圧を低周波域で高めにしてトルクの改善(トルクブースト)を行っているが、実用上十分なトルクを得られるのは、 V/f 一定制御では 6Hz 以上である。さらに、トルク変動により、すべり角周波数 ω_s が変化するため、負荷変動によってモータ回転数も変動する。

この低周波域でのトルク改善、負荷が増大しても誘導電動機の速度を一定に保つ優れた制御法として、ベクトル制御が広く用いられている。この方法では、後述するようにすべり周波数を制御するため、モータの実回転数を PG を用いて検出する必要がある。

しかし、一般に汎用誘導電動機には PG が付加されていない。この誘導機をベクトル制御などの高精度制御を行う方法として、PG レスペクトル制御がある。このシステムの PG レスペクトル制御法は、PG を用いることなしにインバータ内に設けたマイクロプロセッサに負荷となる誘導機と同一の数学モデルを内蔵させ、インバータの出力電圧電流の状態により、誘導機の実回転数を同定し、ベクトル制御を行わせるものである。

図2に、400V、22kW 汎用誘導電動機駆動用 PG レスペクトル制御インバータの例を示す。このインバータでは、出力周波数が 1Hz 以上で、定格トルクの 150% 以上のトルクを得ることができた。その結果、汎用インバータで実用上十分トルクの得られる変速比は 1:10 であるが、この PG レスインバータでは、変速比 1:30 以上となり、速度制御範囲を 3 倍以上広くすることができた。特に、重量物を運搬する搬

送システムにおいて、高速移動から、高精度の位置決めまでをギヤチェンジすることなく、行うことができるようになった。

特に、適用モータについては、安価・堅ろう(牢)な汎用誘導電動機を用い、PG レスであることを合わせて、経済的にも魅力のある高性能な可変速システムを作ることができた。

3. PG レスベクトル制御方式

3.1 ベクトル制御の原理⁽²⁾

PG レスベクトル制御の原理を説明する前に、従来のベクトル制御の原理について述べる。

誘導電動機は、角周波数 ω で回転する d^e, q^e 座標で次の状態方程式で表される。

$$P \begin{bmatrix} i_{d^e_s} \\ i_{q^e_s} \\ \lambda_{d^e_r} \\ \lambda_{q^e_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r} \\ M \frac{R_r}{L_r} & 0 \\ 0 & M \frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d^e_s} \\ i_{q^e_s} \\ \lambda_{d^e_r} \\ \lambda_{q^e_r} \end{bmatrix} \quad \text{※} \quad \text{※} \quad \text{※}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} & \frac{p \omega_r M}{\sigma L_s L_r} \\ -\frac{p \omega_r M}{\sigma L_s L_r} & \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} \\ -\frac{R_r}{L_r} & \omega - p \omega_r \\ -(\omega - p \omega_r) & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d^e_s} \\ i_{q^e_s} \\ \lambda_{d^e_r} \\ \lambda_{q^e_r} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} v_{d^e_s} \\ v_{q^e_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots \quad (2)$$

ここで、

R_s, R_r : 一次及び二次巻線抵抗 (一次換算)
 L_s, L_r, M : 一次、二次巻線の自己インダクタンス
 及び相互インダクタンス (一次換算)

p : 極対数
 ω_r : 回転角速度 (機械系から見たもの)

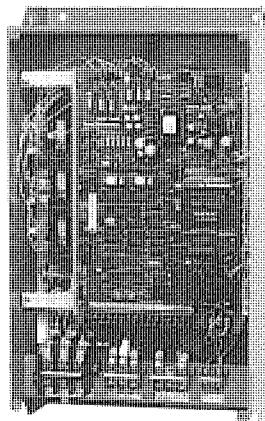


図2. PG レスベクトル制御
インバータの外観

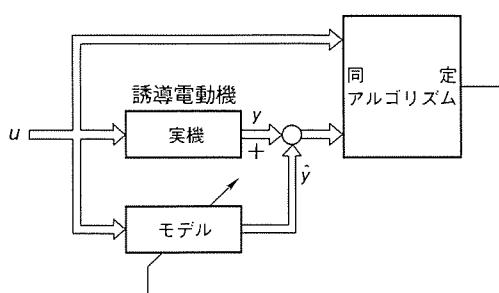


図3. モデル規範適応システム理論に基づく同定器の基本構成

$v_{d^e_s}, v_{q^e_s}$: d^e 及び q^e 軸一次電圧

$i_{d^e_s}, i_{q^e_s}$: d^e 及び q^e 軸一次電流

$\lambda_{d^e_r}, \lambda_{q^e_r}$: d^e 及び q^e 軸二次巻線磁束鎖交数

$P = d/dt$: 微分演算子

誘導電動機のトルクを直流機と同様に制御するために、トルクが一次電流 (q^e 軸) に比例するように磁束を制御する。そのためには、 ω_r を検出し、 ω を次式で制御する。

$$\omega = p \omega_r + p \omega_s$$

$$= p \omega_r + \frac{MR_r i_{q^e_s}}{L_r \hat{\lambda}_{d^e_r}} \quad \dots \quad (3)$$

ここで、 $\hat{\lambda}_{d^e_r}$ は推定 d^e 軸二次巻線磁束鎖交数 (“ $\hat{\cdot}$ ” は推定したものを表す。) で、式(4)で演算される。

$$\hat{\lambda}_{d^e_r} = \frac{M}{(L_r / R_r) P + 1} i_{d^e_s} \quad \dots \quad (4)$$

このとき、 $\lambda_{d^e_r} = \hat{\lambda}_{d^e_r}$ 、 $\lambda_{q^e_r} = 0$ となり、トルク T_e は次式で表されるようになる。

$$T_e = p (M / L_r) \lambda_{d^e_r} i_{q^e_s} \quad \dots \quad (5)$$

つまり、式(3)に従って ω を制御すると、磁束の大きさは式(4)より、 d^e 軸電流によって制御できる。 $\lambda_{d^e_r}$ を一定に制御した場合、トルクは q^e 軸電流に比例するため、直流機と同様な制御が可能である。

3.2 モデル規範適応システム理論による

回転速度同定器の構成

前節で述べたベクトル制御を行うためには、速度を検出しなければならないが、汎用誘導電動機には PG がない。そこで、回転速度の同定を行い、PG なしで汎用誘導電動機のベクトル制御を行った。回転速度同定の理論は、モデル規範適応システム理論⁽³⁾を応用して導出した。

図3は、モデル規範適応システム理論に基づくパラメータ同定器の基本構成である。実機とモデルの出力誤差が0になるように、モデルのパラメータ (推定回転速度) を変化させることによって、回転速度を同定しようとするものである。回転速度同定特性を決定する状態変数には、図4、図5で演算されるような疑似二次巻線磁束鎖交数を用いる。図4は、実機の疑似二次巻線磁束鎖交数演算器で、電動機にかかる電圧と電流から演算する。図5はモデルの演算器で、モデルをベクトル制御するための推定磁束から演算している。モデル

上では、推定回転速度を用いて式(3)と同様のベクトル制御演算を行うため、推定回転速度と実機の回転速度が一致することで、速度の同定を行うと同時に、実機のベクトル制御が可能となるわけである。

さて、速度同定器の高速かつ広範囲な安定性の確保のため、速度同定のアルゴリズムはポポフの超安定論⁽³⁾を利用して導いた⁽⁴⁾。ここでは、詳しい説明は省略し、結果だけ示す。

まず、図4、図5の出力を用いて式(6)で表される実機とモデルの出力誤差を演算する。

$$v = p\hat{\omega}_s (\lambda'_{de_r} - \lambda'_{qe_r}) + (P + R_r/L_r) (\lambda'_{de_r} - \lambda'_{qe_r}) \dots \dots \dots (6)$$

次に、積分器によって出力誤差を0とするように推定回転速度を変える。図6に、回転速度同定器のブロック線図を示す。図4、図5の演算器の時定数TをT=1/|ω|として可変にすることで、図6の回転速度同定器は過渡的にも安定となり、高速応答が可能である。

このPGレスペクトル制御インバータは、この速度同定値を用いてベクトル制御を行っている。

3.3 運転速度の高速域への拡大

汎用誘導電動機は、商用電源での運転を前提にしているため、PGを備えたベクトル制御専用の誘導電動機に比べて定格電圧が高い。そのため、定格回転数付近で速度指令に追従するため、良好なトルク特性を得ようとする場合、PWMインバータを電圧飽和領域まで動作させることになるので、一次電圧指令 $v_{de_s}^*$ 、 $v_{qe_s}^*$ と実際の電動機にかかる一次電圧 v_{de_s} 、 v_{qe_s} との間には誤差が生じる。したがって、図4の λ'_{de_r} 、 λ'_{qe_r} 演算器に $v_{de_s}^*$ 、 $v_{qe_s}^*$ を使った場合、回転速度の同定精度に誤差が生じる。

そこで、電圧飽和を模擬するために、直流母線電圧 V_{DC} の±1/2の値でそれぞれクランプされた三相交流電圧指令 v_u^* 、 v_v^* 、 v_w^* を三相/d^oq^o座標変換することにより、実際の電動機にかかるd^oq^o軸一次電圧 v_{de_s} 、 v_{qe_s} を間接的に求めている。これにより、電圧飽和時にも正確な速度の同定が可能となり、運転速度の高速域への拡大ができた。

3.4 運転速度の低速域への拡大

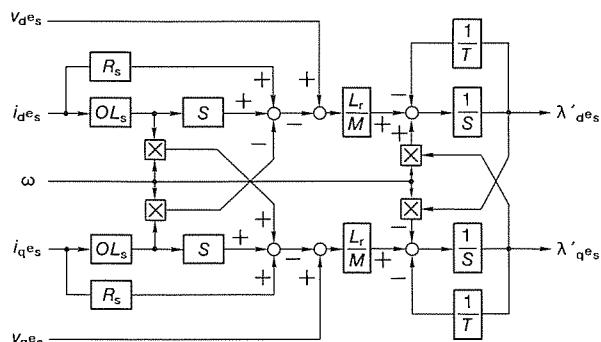


図4. λ'_{de_r} 、 λ'_{qe_r} 演算器のブロック線図

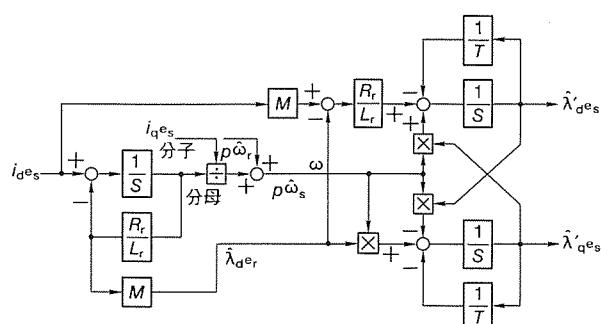


図5. λ'_{de_r} 、 λ'_{qe_r} 演算器のブロック線図

PGレスペクトル制御において、電動機定数の設定誤差が制御特性に与える影響については、文献(5)、(6)に記述があるが、低速回転になるほどインバータの出力電圧に占める一次巻線抵抗による電圧降下分が支配的になり、一次巻線抵抗の設定誤差の影響が最も大きくなる。

その一次巻線抵抗の設定誤差の主要因としては、

- 運転中の一次巻線抵抗の温度変動の影響(負荷条件などにより、定格値の最大±30%程度変動する。)
- インバータから誘導電動機までの配線抵抗の影響(用途によっては、配線長が長くその抵抗値が無視できない場合が多い。)

が挙げられる。(a)については、 λ'_{de_r} と λ'_{qe_r} との誤差に注目して、一次巻線抵抗の設定値 \hat{R}_s をオンライン補正することによって解決している。(b)については、インバータ起動直後の短時間の間に、d^o軸一次電圧 v_{de_s} と演算で求めたその推定値との誤差から、配線抵抗を含んだ一次巻線抵抗値を推定し、それを(a)における一次抵抗設定値 \hat{R}_s の初期値とすることによって解決している。

図7は、回転速度45rpmで定格力行負荷の状態で、途中から一次巻線抵抗をステップ的に定格値の30%増加させたときの実験結果である。一次巻線抵抗補正を行わない場合は、出力トルク不足によって速度制御が不安定になっているのに対し、補正を行った場合は何ら影響を受けていないことが分かる。

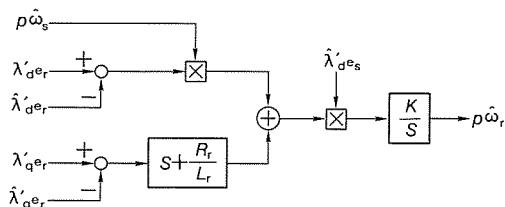
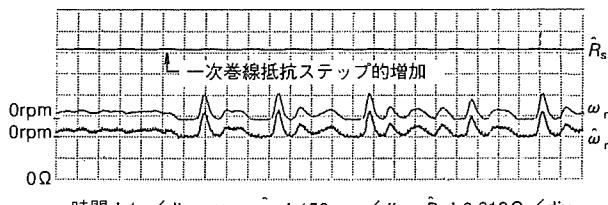
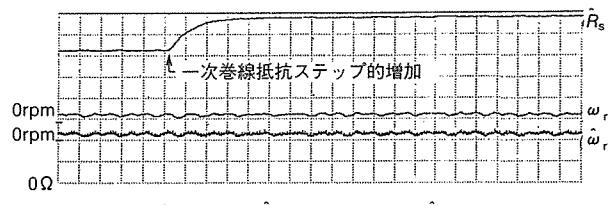


図6. 回転速度同定器のブロック線図



時間: 1s/div, ω_r 、 $\hat{\omega}_r$: 150rpm/div, \hat{R}_s : 0.019Ω/div.

(a) 補正を行わない場合



時間: 1s/div, ω_r 、 $\hat{\omega}_r$: 150rpm/div, \hat{R}_s : 0.019Ω/div.

(b) 補正を行った場合

図7. 一次巻線抵抗補正の効果

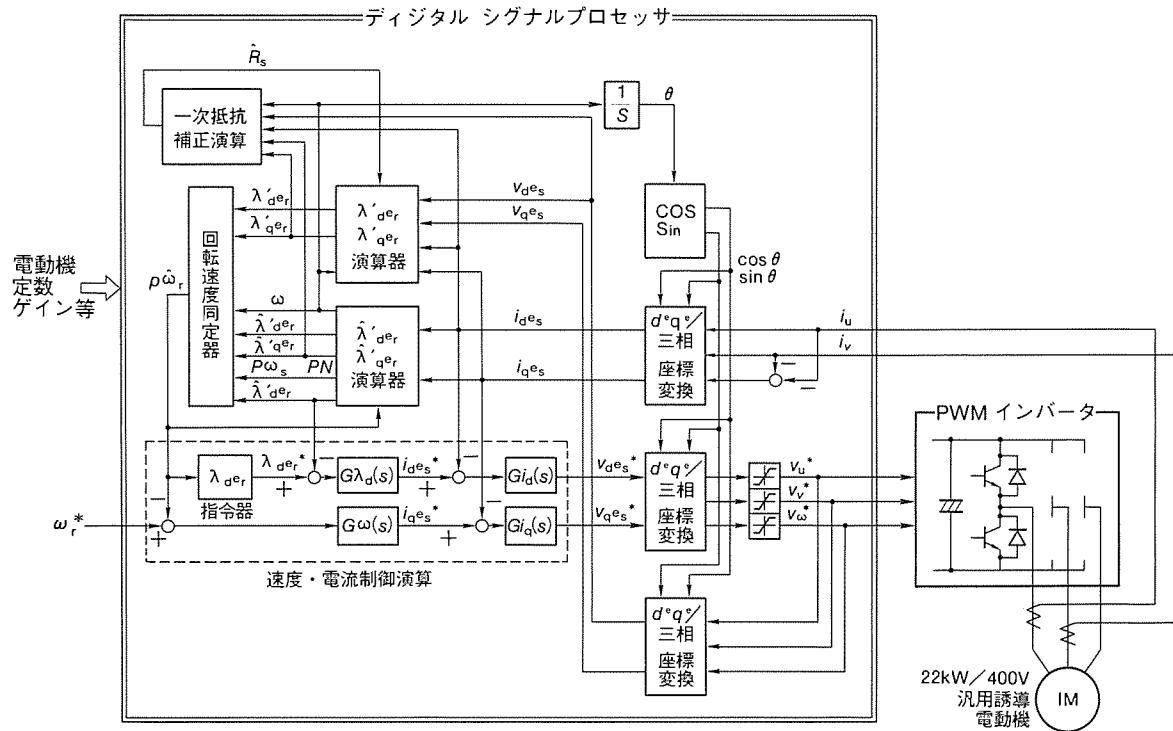


図 8. PG レスペクトル制御インバータシステムの制御ブロック図

以上、当社独特の一次巻線抵抗の補正方法により、低速回転における制御特性に大きな影響を与える一次巻線抵抗の設定誤差を補償することができ、運転速度の低速域への拡大ができた。

4. システム構成と試験結果

4.1 システム構成

図 8 に、このシステムの制御ブロック図を示す。可変電圧可変周波数変換器には、電圧型 PWM インバータを使用している。また、二重線で囲まれた制御演算部は、1 個のデジタル シグナルプロセッサ処理を行っている。図 4 の疑似二次巻線磁束鎖交数の演算に用いる $d^e q^e$ 軸一次電圧値は、三相電圧指令値を $d^e q^e$ 軸座標に変換した値を使用することにより、電圧飽和時においても電圧検出器なしで実電圧によく一致した値が得られている。

この PG レスペクトル制御インバータ装置は、制御カード 1 枚に制御電源、その他の制御回路を収納しており、コンパクトな装置構成となっている。

4.2 試験結果

図 9 に、このシステムのステップ応答を示す。実速度とその推定値は、よく一致しており、電流の飛び出しもなく、 40rad/s の速度応答が得られている。

図 10 は、PG レスペクトル制御インバータと従来の汎用インバータ (V/f 一定制御方式) の回転速度一トルク特性の実測例である。このインバータでは、負荷トルクが増加しても回転速度はほぼ一定に保たれており、速度精度が大幅に

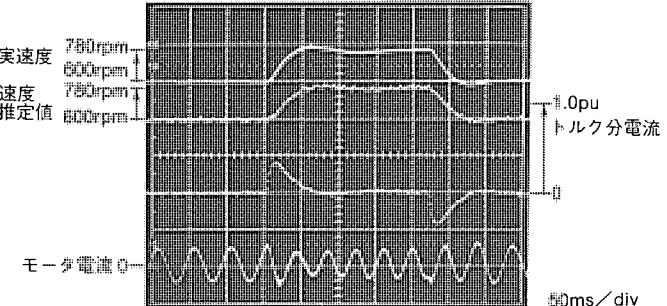


図 9. 回転速度のステップ応答の実験結果

向上している。また、最大トルクは高速から低速回転まではほぼ一定であり、良好なトルク特性が得られていることが分かる。

次に、この PG レスペクトル制御インバータを搬送システム駆動装置に適用した試験例を図 11 に示す。起動と同時にトルクは急しゅん (峻) に立ち上がり、電流は 150% の制限値内で非常に滑らかに加速していることが分かる。

図 12 は、上記搬送システムと同一の等価イナーシャによる四象限運転試験例である。正逆運転切り換わり時にもスムーズな加減速特性が得られていることが分かる。

5. むすび

ここでは、22kW、400V 汎用誘導電動機駆動用 PG レスペクトル制御インバータを例にとって、制御原理、特性、搬送システム走行駆動装置への適用例について紹介した。今後、次のようなテーマを解決することにより、PG レスペクトル

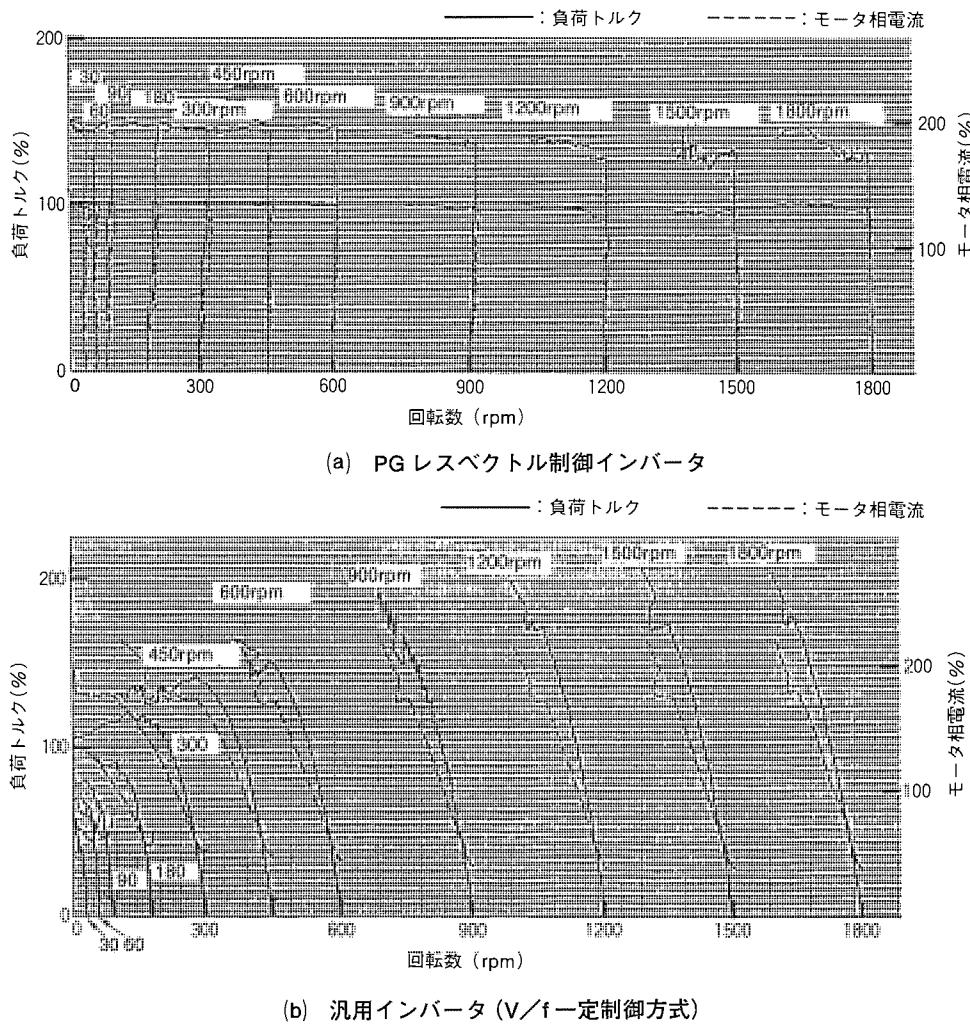


図10. 回転速度 - トルク特性実測例

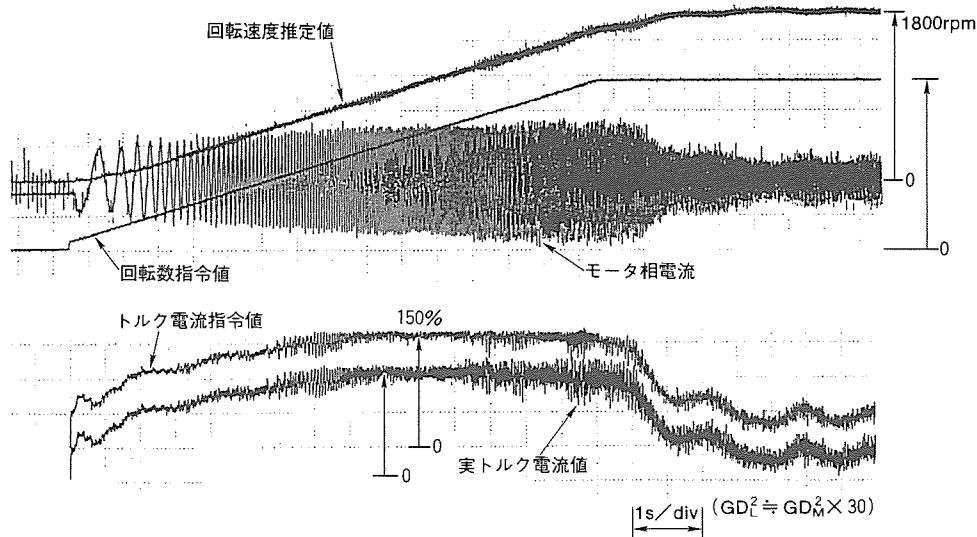


図11. 搬送システム走行駆動装置への適用例

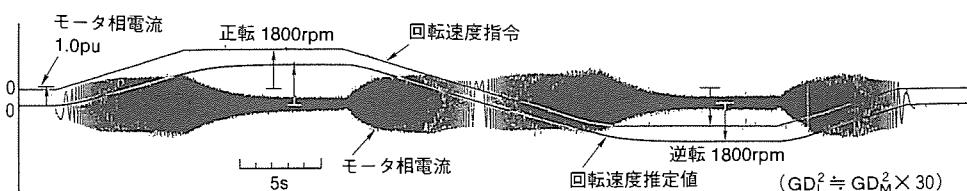


図12. 搬送システム走行駆動装置と等価負荷イナーシャによる四象限運転試験例

制御インバータの適用が飛躍的に拡大することが期待される。

- 使用する電動機の定数を運転前に設定する定数のオフラインチューニング機能を付加し、電動機が変更された場合にも対応可能とすること。
- 負荷トルクの特性が変わっても、最適制御ができるよう、AI機能、FUZZY制御等の新しい制御方法の開発。

参考文献

- 三菱電機(株)編：インバータ応用マニュアル，電気書院 (1985)
- 杉本英彦、大野栄一：VVVF電源で駆動される誘導電動機の非干渉制御とその特性，電学論B, 104, No.11, 781~788 (1984)
- Landau, I.D., Tomizuka, M.：適応制御システムの理論と実際，オーム社 (1981)
- 杉本英彦、玉井伸三、矢野昌雄：モデル規範適応システムを適用した誘導電動機の速度センサレスペクトル制御，電学論D, 108, No. 3, 306~313 (1988)
- 奥山俊昭、藤本 登、藤井 洋：速度・電圧センサレスペクトル制御における制御定数誤差の影響とその補償，電学論D, 110, No. 5, 447~486 (1990)
- 大谷継利：速度センサレスペクトル制御における電動機パラメータの低感度化，電学論D, 110, No. 5, 497~505 (1990)

エレベーターにおける ドライブ エレクトロニクスの応用

鈴木茂彦* 荒木博司*
正城孝信* 多和田正典*
吉田雅之*

1. まえがき

当社は、1983年に世界に先駆けて高速エレベーターの駆動制御にVVVF制御方式を導入し、1984年には低速エレベーターの駆動制御にもこの方式を採用し、エレベーターの駆動制御分野における牽引者としての役割を果たしてきた。その結果、国内のエレベーター業界では既に、低速エレベーターから高速エレベーターまでロープ式エレベーターの駆動制御方式はVVVF制御が主流になっており、海外でもVVVF化が始まっている。

近年当社は、このVVVF制御方式のロープ式エレベーターの一層の改良を進めるとともに、油圧式エレベーターの駆動制御やエレベーター用ドアの駆動制御にも、世界で初めてVVVF制御方式を導入して、各システムの性能向上を図った。

本稿では、エレベーターにおけるドライブ エレクトロニクスに関する最新の技術を、ロープ式エレベーター、油圧式エレベーター及びエレベーター用ドアのシステムについて紹介する。

2. エレベーターにおける駆動制御システムの概要

表1は、エレベーターにおける駆動制御システムとその最近の変遷を示すものである。エレベーターの駆動方式は、かごを昇降させる動力媒体によってロープ式と油圧式に大別される。ロープ式は、速度範囲が30m/minから105m/minまでの低速エレベーターと、速度120m/min以上の高速エ

レベーターに分類される。従来、低速エレベーターは誘導電動機の一次電圧制御、高速エレベーターは直流電動機のサイリスタレオナード制御が最も普及した駆動制御方式であった。しかし、1980年ごろに大電力のパワートランジスタが実用化され、これを用いたVVVF制御技術が急速に進歩した。この技術を駆使して当社は、1980年代前半には高速エレベーター、低速エレベーター共に駆動制御システムとして誘導電動機のVVVF制御方式を採用し、現在ではロープ式エレベーターのほぼ全領域にVVVF制御方式を適用している。

油圧エレベーターの速度範囲は、30m/minから60m/minであり、建物上部に荷重がかからず、機械室も自由に配置できるという特長を持っていることから、設置台数が近年急激に伸びている。従来の油圧エレベーターの駆動制御は、流量制御弁によって油圧ジャッキへ流入あるいは流出する油の流量を制御する方式であったが、当社は今回油圧ポンプ駆動用電動機をVVVF制御し、ポンプの回転数を制御することにより、ポンプの吐出流量を制御する方式の駆動制御システムを開発し、製品化した。

エレベーター用ドアの駆動方式は、大別するとリンク駆動式とベルト駆動式とがあり、それぞれ要求される性能に応じて誘導電動機の一次電圧制御、直流電動機のチョッパ制御が用いられてきた。今回、ドアの駆動制御システムでも、その性能を向上させるためにVVVF制御を導入し、製品化した。

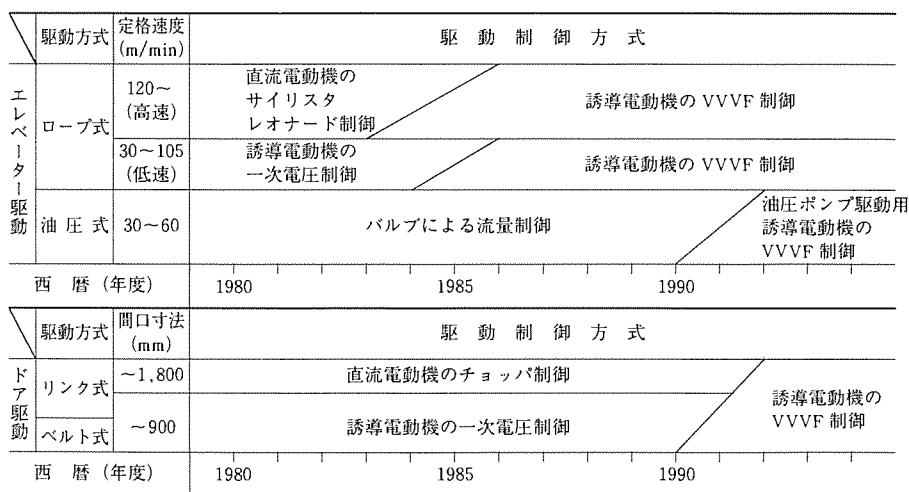
3. 高速エレベーターの駆動制御システム

近年、都市空間の有効活用という観点から超高層ビルの建設が再び活発になってきている。これらの需要に対応して当社は、VVVF制御方式のエレベーターとしては、世界最高速(540m/min)の超高速エレベーターを開発した。以下、この超高速エレベーターの駆動制御システムについて説明する。

3.1 駆動制御システムの構成と特長

図1に、駆動制御システムの構成を示す。三相交流電源は、トランジスタコンバータ

表1. エレベーターにおける駆動制御システム



でいったん直流に変換され、トランジスタインバータで可変電圧可変周波数の交流に変換されて、巻上電動機に給電される。コンバータとインバータは、高耐圧大容量(1,200V, 300A)のトランジスタモジュールを容量に応じて並列接続して使用している。また、コンバータの入力電流とインバータの出力電流は、共にPWM(パルス幅変調)制御によって正弦波となるように制御されている。コンバータとインバータの制御には、高性能なデジタルシグナルプロセッサを使用して高精度な制御を行っている。すなわち、コンバータは、出力電圧を帰還信号とするフィードバック制御を用いて出力の直流電圧を一定値に制御し、かつ電源電圧の位相を検出して入力電流の力率を、力行時は1、回生時は-1となるように制御している。図2に、上述のPWM制御及び力率制御による力行運転時の電源の電圧波形と電流波形を示す。次にインバータは、速度帰還に高分解能のパルス発生器を使用するとともに、電流マイナーループを設け、応答の速い制御を行い、乗り心地性能などを向上させている。この駆動制御システムは、次のような優れた特長を持っている。

- (1) 正弦波PWM制御を用いたコンバータの働きによって入力電流は正弦波となるように制御されるので、高調波含有率が従来機種(サイリスタレオナード制御方式)の1/5以下となり、しかも力率がほぼ1になっている。これらの技術により、電源設備容量は従来機種の約30%減となる。
- (2) 今回開発した大型のギヤレス巻上機は、交流電動機の剛性を強化し、最適なスロット数を選定することにより、電動機から発生する磁気音を低減している。この交流電動機は、従来の直流電動機より効率が良いので、消費電力が従来機種より約5%低減している。

3.2 かごの縦振動低減技術

高速エレベーターでは快適な乗り心地を得るために、振

動・騒音低減技術が不可欠であり、最も重要な技術の一つである。特に超高速エレベーターでは、高揚程化によってロープが長くなり、これに伴ってロープ駆動系のばね定数が小さくなるため、かごの縦振動が発生しやすくなる。

かごの縦振動は、電動機の発生するトルクリップルの周波数と機械系の固有振動数が一致した場合に拡大される。しかし、インバータ制御の場合、電動機の発生するトルクリップルの周波数は回転数とともに変化するので、機械系との共振を避けることは困難である。したがって、かごの縦振動を低減するには、機械系に適度な減衰を附加して共振の先鋒度を低減するとともに、加振源である巻上電動機の発生するトルクリップルを低減する必要がある。そのため、下記の技術によって電動機のトルクリップルを低減している。

- (1) ホール素子を使用した直流電流検出器のオフセット電圧を自動的に補償する機能を設け、インバータの出力に直流成分が含まれないようにしている。
- (2) PWM信号には、トランジスタブリッジの上下短絡が発生するのを防止するため、上下のトランジスタがどちらも導通しない時間、いわゆるデッドタイムが設けられる。このデッドタイムは、電圧外乱となり、電動機が低速で回転するとき振動が発生する要因となる。そこで、インバータの出力電圧を帰還して、この電圧外乱を打ち消すようにPWM信号を補正する機能を設けている。
- (3) 電動機の速度信号からかごの縦振動成分を抽出し、それを帰還することによりかごの縦振動を抑制する振動抑制演算において、演算周期を短くして応答速度を速くするとともに、速度に応じてゲインを変化させることにより、振動抑制の効果を増している。

図3に低速回転時に電動機が発生するトルクリップルを測定した結果を示す。前述の低減技術により、トルクリップル

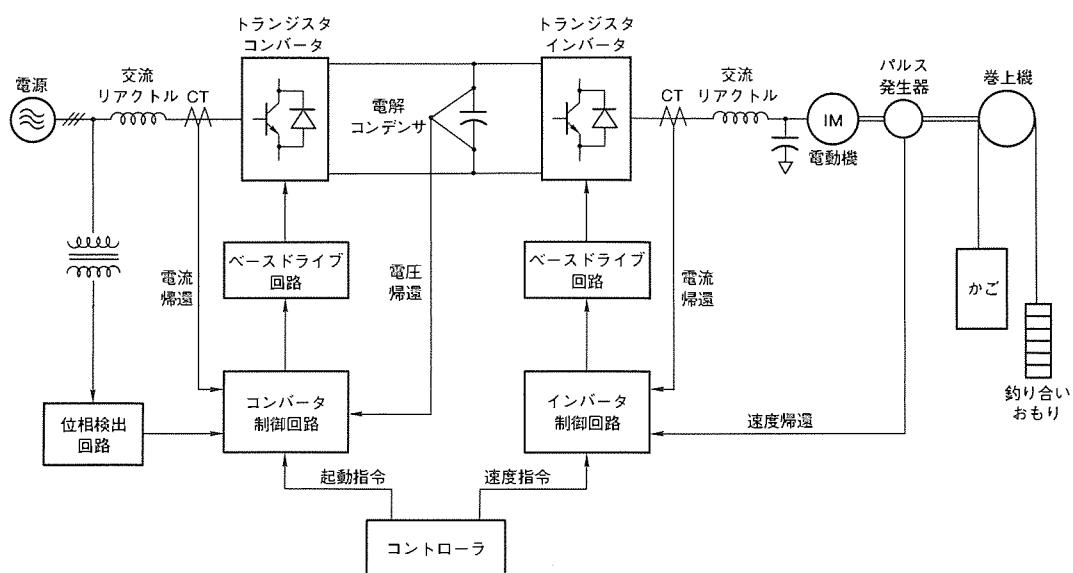


図1. 高速エレベーターの駆動制御システムの構成

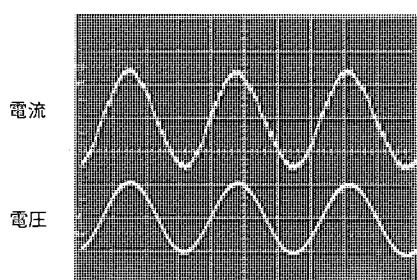


図2. 電源電圧波形と電流波形

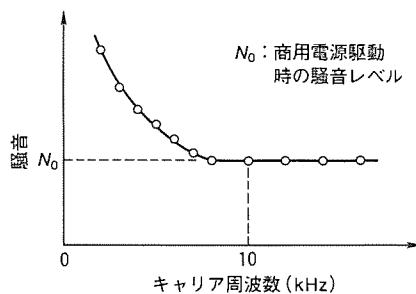


図4. キャリア周波数と騒音の関係

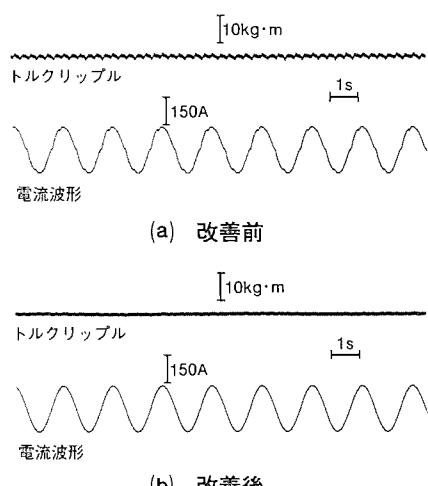


図3. 電流波形とトルクリップル

を1/5以下に低減している。

4. 低速エレベーター用高周波インバータ

当社の低速エレベーターは、1984年以来既に国内・外合わせて2万台以上のVVVF制御方式エレベーターの納入実績があり、その優れた乗り心地性能と省エネルギーにより、好評を得ている。今回更に、性能向上と制御装置のコンパクト化を図るために、新しい高速スイッチング素子を使用した高周波PWMインバータを製品化したので、その内容について紹介する。

4.1 インバータによる電動機騒音の低減技術

インバータで電動機を駆動する場合、PWM制御方式が一般的に採用されているが、周波数 f_c の三角波キャリアでPWM制御すると、 $n \cdot f_c$ ($n = 1, 2, \dots$)とその側帯波の高調波電圧を発生し、これによって電動機騒音が発生する。この騒音を小さくするには、キャリア周波数を可聴周波数以上にする方法があるが、数kW以上の容量の電動機を駆動できる従来の大電力のスイッチング素子では、キャリア周波数は3kHz程度が限界であった。そのため、人間にとて一番耳障りな周波数成分の騒音(金属音)を発生する。この対応策として、従来は電動機電流の高調波成分を吸収するフィルタをインバータと電動機の間に挿入していた。今回当社は、この騒音低減手段として、新しく開発・実用化された大容量の高速スイッチング素子であるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を採用し、低速エレベーター用の低騒音高周波PWMインバータを製品化した。

IGBTのスイッチング速度は、従来のバイポーラトランジスタの数倍であり、スイッチング速度だけから判断すれば、キャリア周波数は20kHz以上にすることができる。しかし、キャリア周波数をあまり高くすると、スイッチング素子及びそのスナバ回路の損失の増加などの副作用が出てくる。一方、キャリア周波数と電動機騒音の関係は、図4に示すようになっており、電動機騒音はキャリア周波数の増加とともに低下していくが、所定周波数以上では、商用電源で電動機を駆動したときとほぼ同じ騒音レベル(N_0)で飽和する。したがって、上述の副作用が実用上問題にならない範囲で、しかも電動機騒音が商用電源で駆動したときと同レベルになるように、インバータのキャリア周波数は10kHzとした。

4.2 インバータのキャリア周波数

IGBT化高周波PWMインバータは、次のような特長を持っている。

(1) 図5に、キャリア周波数3kHzと10kHz時の電動機電流を示すが、このようにキャリア周波数を高周波化することによって電動機電流のリップルが減少し、電動機の騒音を十分小さくすることができた。図6は、インバータと電動機間に騒音吸収用のフィルタを挿入しない場合の電動機騒音の周波数分析結果であるが、図から明らかなように、キャリアの高周波化によって一番耳障りな数kHz成分が大幅に低減しており、騒音吸収用フィルタを廃止しても極めて静謐なエレベーターの駆動が可能になった。

(2) IGBTは電圧駆動型であるため、ドライブ回路の消費電力を低減することができ、駆動回路の信頼度向上と小型化を実現できた。また、IGBTはバイポーラトランジスタに比べてパッケージのサイズが小さいので、インバータ装置の小型化ができた。

上記フィルタの廃止やインバータ装置の小型化により、制御装置がコンパクトになり、機械室機器のレイアウトが容易になった。

5. 油圧エレベーターの駆動制御システム

従来の油圧エレベーターは、流量制御弁の開度を制御することにより、油圧ジャッキへ流入あるいは流出する油の流量を制御し、かごの速度を制御していた。これに対して今回、油圧ポンプ駆動用電動機をVVVF制御で回転数制御し、油圧ポンプの吐出流量を制御してかごの速度を制御する方式を開発し、製品化した。このシステムは、従来型の油圧エレベーターと比較して、エレベーターとしての種々の性能を大

幅に向上させている。以下にこのVVVF制御方式油圧エレベーターの駆動制御システムについて紹介する。

5.1 駆動制御システムの構成

図7に、今回開発した駆動制御システムの構成を示す。図において、VVVF制御装置は当社のロープ式エレベーターで実績のあるダイオードコンバータとトランジスタインバータから構成されている。インバータ制御回路は、電動機を速度指令に正確に追従するように制御し、油圧ポンプの吐出流量を制御する。その結果、油圧ポンプからチェック弁を通って油圧ジャッキに送出、あるいは油圧ジャッキからチェック弁を通って油圧ポンプへ還流する油の量が制御され、かごは起動から着床まで滑らかに制御される。

5.2 駆動制御システムの特長

油圧ポンプの吐出流量を可変制御するに当たって、駆動制御システムには電動機の速度制御ループ以外に次に述べる幾つかの制御ループを附加して、制御性能の向上を図っている。

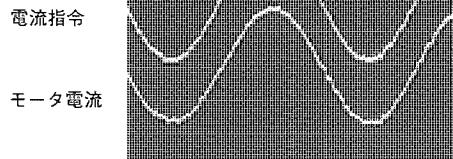
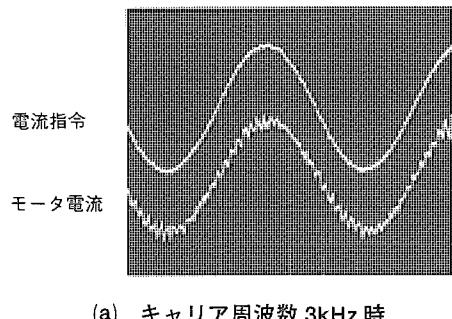


図5. 電動機電流の波形比較

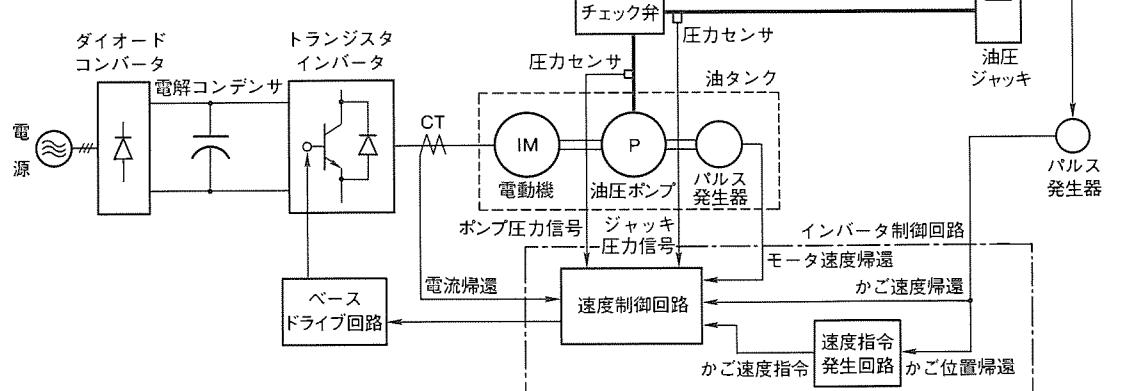


図7. 油圧エレベーターの駆動制御システムの構成

5.2.1 圧力バランス制御

今回の駆動制御システムでは、油圧ポンプと油圧ジャッキの間に設けたチェック弁を開口後、かご速度指令に応じてかごを走行させるので、チェック弁開口時に油圧ポンプ側の圧力がジャッキ側の圧力よりも低いと、かごの起動時にショックを発生し、乗り心地を悪くする。そこで、油圧ジャッキ側圧力がかご内の乗客数や昇降路内でのかご位置によって変化しても、チェック弁開口時にかごを静止保持できるよう、チェック弁の油圧ジャッキ側と油圧ポンプ側との圧力をあらかじめバランスさせる制御を行っている。この圧力バランス制御により、起動ショックを抑制してかごを滑らかに起動するようにしている。

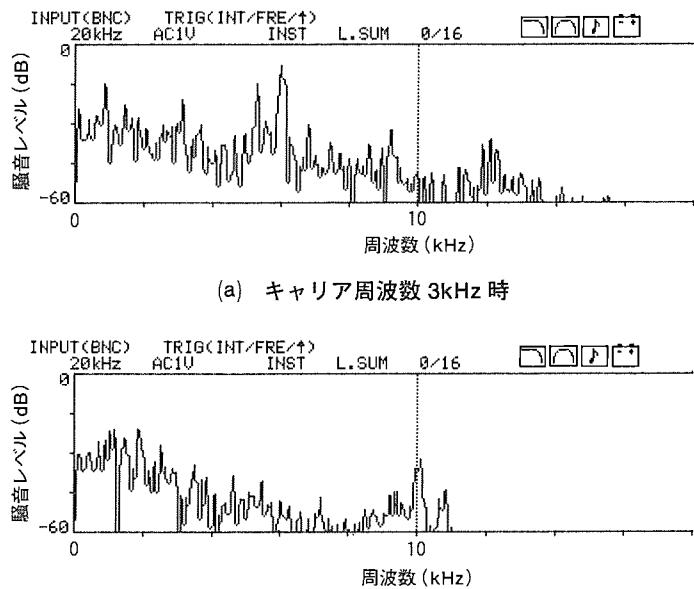


図6. 電動機騒音の周波数分析結果

5.2.2 振動抑制制御

油圧エレベーターの場合、油圧ポンプ駆動用電動機と制御対象であるかごとの間には、油圧ポンプ・配管・油圧ジャッキなどから成る油圧系と、弾性体である主索を含む機械系とが介在している。これらの負荷系を電動機から見た場合、全体として非常に剛性の低い系となっているため、例えば油圧ジャッキ部分やガイドローラとレールとの間で機械的な外乱が発生すると、かごに低周波の振動を誘発して乗り心地が悪化する。この対応策として、今回開発したシステムでは、油圧ジャッキ内の圧油に含まれる振動成分とかごの速度に含まれる振動成分とを抽出して、電動機の速度制御回路にフィードバックする振動抑制制御ループを設け、かごの振動を効果的に抑制している。

5.2.3 漏れ流量補償制御

油圧ポンプには漏れ流量が存在し、この漏れ流量は油圧ポンプの回転速度、吐出圧力及び油温によって変化する。このため、かごの速度はポンプの回転数に必ずしも比例しない。したがって、油圧ポンプ駆動用電動機の速度制御ループだけでは、この漏れ流量の変化によるかごの速度変動を補正しきれない。そこで、かごの速度信号を用いた漏れ流量補償制御ループを設けることによってこの問題を解決し、安定したかご速度制御性能と着床精度を実現している。

図8に、このシステムと従来システムの運転特性の比較を示す。同図に示すように、従来方式からは大幅に改善された滑らかな加減速特性が得られている。また、着床前の低速走行区間もほとんどなく、従来システムと比較して走行時間を約20%短縮できた。また、従来のシステムでは、上昇運動の起動・停止時はポンプの吐出する油の一部を油圧ジャッキに送り、他はタンクに還流させていたが、今回のシステムではポンプの吐出する油はすべてジャッキに送られる。このため、従来方式に比べ約15%の省エネルギーを達成した。

6. エレベーター用ドアの駆動制御システム

ドアはエレベーターの中で、最も利用者とかかわり合う機会の多い箇所であり、また乗場のドアは建物の一部であることから、その駆動制御システムには次のような性能が要求される。

- (1) ドアの開閉速度は、エレベーターの運動効率に大きく影響するため、迅速に開閉すること。
- (2) 乗場やかご内の乗客に不快感を与えないように、静肅で滑らかに開閉すること。特に、ドアを駆動する電動機はかごの上部に設置されるので、低騒音・低振動であること。
- (3) ドアには、乗客がドアに挟まれるのを防止するために、ドアの先端のセーフティシューなどの各種安全装置が設けられているが、これらの安全装置が動作したときは機敏に反転すること。また、乗客がドアに挟まれても負傷するがないように、ドアの開閉力は所定値以下であること。

(4) 意匠的な要求から乗場ドアの重量が階によって異なったり、機械系の負荷が経年変化したりして、ドアを駆動する電動機の負荷が変化しても安定した開閉動作を維持すること。

これらの多様な要求にこたえるために、駆動制御方式としてVVVF制御方式を導入し、その制御にマイコンを採用した新しいドアの駆動制御システムを開発し、製品化した。以下、その内容について説明する。

6.1 駆動制御システムの構成

図9は、今回開発したドア駆動制御システムの構成図である。図に示すように主回路は、ダイオードコンバータ、平滑用コンデンサ及びMOS-FETインバータから構成されている。インバータの制御回路には、高性能ワンチップマイコンが使用され、このマイコンにより、ドアの位置に対応した電動機への速度指令を発生し、この速度指令に従って電動機をVVVF制御している。なお、ドアの開閉指令は、機械室のエレベーター制御盤からインバータ制御回路に送られ、この指令に基づいてドアの開閉制御が行われる。

6.2 駆動制御システムの特長

このVVVF制御を採用したドアの駆動制御システムは、次のような特長を持っている。

(1) 開閉性能の向上

パルス発生器の出力からドアの位置を精度良く演算してドアの各位置に対応した速度指令を発生し、この指令に基づいてドアの開閉速度をフィードバック制御することにより、スピーディでかつ滑らかなドアの開閉制御を行っている。図10に、戸閉時の動作特性を示す。

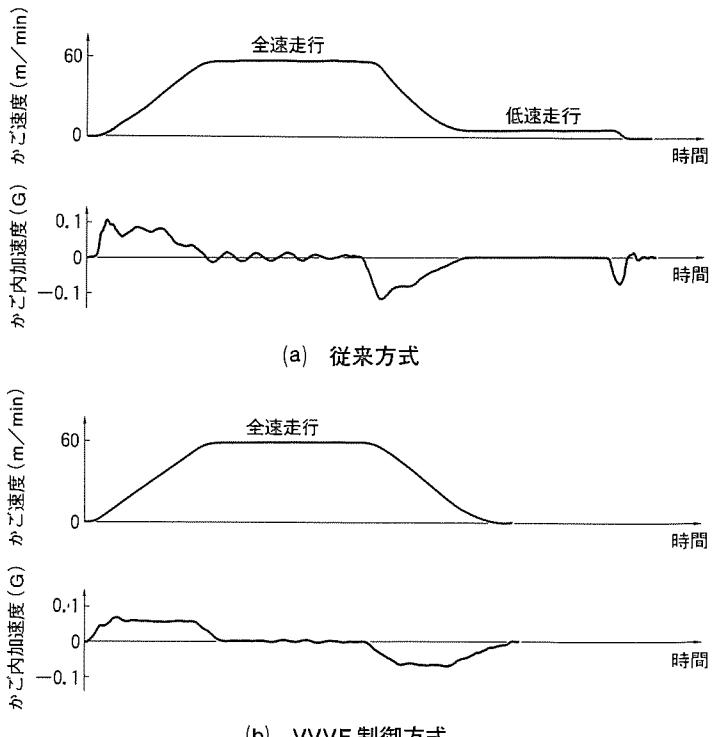


図8. 油圧エレベーターの運転特性
(定格速度: 60m/min, 定格負荷上昇時)

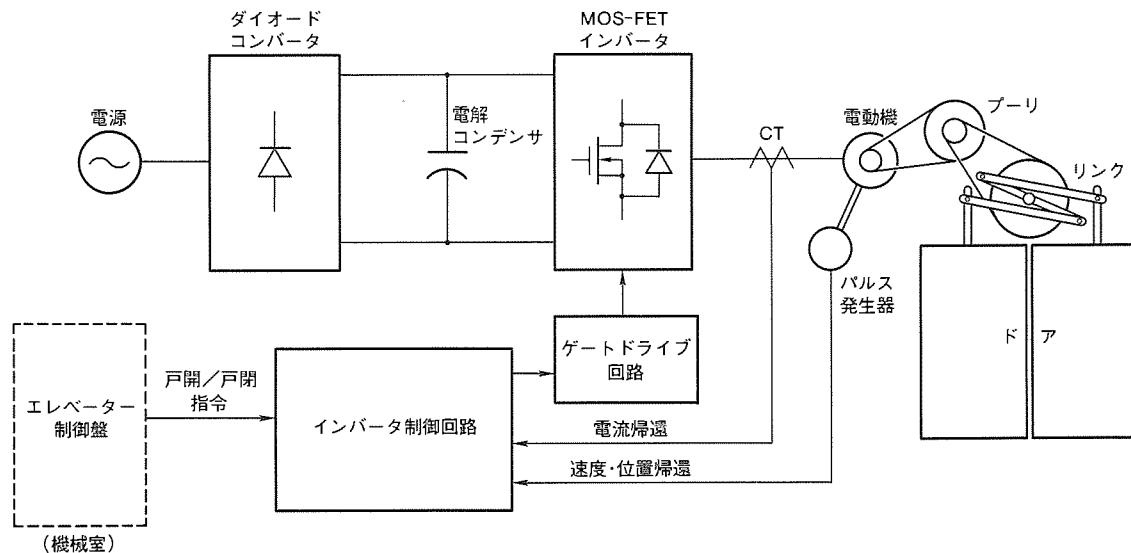


図9. エレベーター用ドアの駆動制御システムの構成

(2) 安定した開閉性能

利用者の安全を確保するために、ドアの開閉力を制限する電動機のトルクリミッタは、ドアの各位置ごとに最適な値にトルクリミッタレベルが設定されている。このため、電動機は安全上許容される最大値までトルクを出すことができ、ドアの重量差や機械系の経年変化によって負荷が変動しても、安定して良好な開閉性能が得られる。

(3) 機敏な反転動作

ドアを反転する場合も、その速度をフィードバック制御するようにしたので、安全装置が動作したときのドアの反転をスムーズにかつ素早く行うことが可能である。

(4) 電動機の無騒音化

インバータのスイッチング素子としてMOS-FETを使用し、キャリア周波数を可聴周波数以上の高周波にした。この高周波PWMインバータの採用により、かご内や乗場で電動機の振動・騒音を全く感じない極めて静謐なドアの開閉を実現している。

(5) 制御装置のコンパクト化

インバータの制御回路にワンチップマイコンやゲートアレー等の高集積素子を採用するとともに、制動時の回生エネルギーを平滑用コンデンサで吸収するようにして、部品点数を低減した。その結果、制御装置の信頼度向上とコンパクト化が可能になり、かご上部の限られたスペースにも容易に設置することができる。

7. む す び

以上、当社のエレベーターにおけるドライブエレクトロニクスの応用について、最新の状況を紹介した。エレベーターにおける電動機の駆動制御は、全領域にわたってVVVF化が進められており、油圧エレベーターやドアの駆動制御もVVVF化することにより、大幅に性能を向上させ

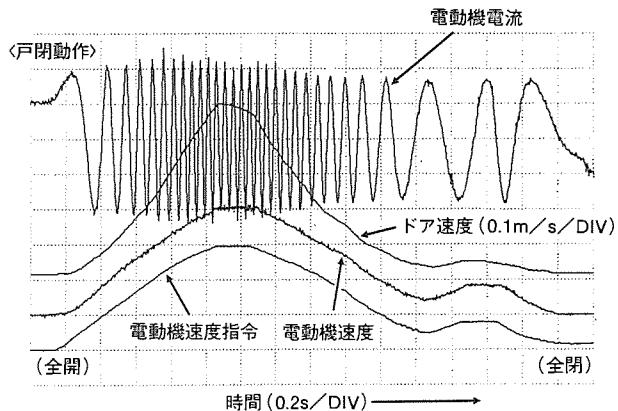


図10. ドアの動作特性

ることができた。今後ともVVVF制御方式の一層の適用拡大と性能・機能の向上に努め、顧客の要求にこたえていく所存である。

参考文献

- (1) 野村正実、棚橋徹：VVVF制御方式エレベーターの最近の動向、三菱電機技報、61, No.11, 847~850 (1987)
- (2) 花木幸一、城健次、鈴木茂彦、勢力峰生、牧野克己：新規格形エレベーター《エレベットアドバンスV》，三菱電機技報、58, No.11, 772~776 (1984)
- (3) 山本友一郎、三宅立郎、神谷代詞男：電子化油圧エレベーター、三菱電機技報、61, No.11, 851~854 (1987)
- (4) 館野健三、植谷健一、棚橋徹、辻伸太郎、平林輝美：アーヴィングビル向け高速新世代エレベーター、三菱電機技報、60, No.5, 314~318 (1986)
- (5) 鈴木育雄、寺園成宏、丸山祥男、加藤久夫：新しい規格形エレベーター《エレベットアドバンス》，三菱電機技報、54, No.4, 319~322 (1980)

ライン制御用インバータと汎用シーケンサによる中小規模プラントの可变速制御

小鍛治 稔* 下村弥寿仁**
村中隆生* 荒木孝浩***
溝口昭次**

1. まえがき

この特集号の各論文に述べているように、最近のインバータの各種高機能化には目を見張るものがある。通信機能の付加やインテリジェント化もその中の一つで、これらの充実した機能は、より高い付加価値をもったシステムの構築には欠かせぬものになってきている。大規模プラントでは、制御装置(コンピュータ、プラントコントローラ等)への投資も十分に考慮されるため、インバータの持つこれらの機能を生かすシステム、すなわち専用リンクでの連絡等が実現化されてきた。

一方、中小規模プラントにおける汎用シーケンサの適用はますます増加し、処理速度の高速化・大容量化に伴い、かなりの規模まで、またいわゆるライン制御と言われるものでもシーケンサが適用されるケースが増えている。また、マシンマシンシステムも充実してきている。

今回、ライン制御用インバータと汎用シーケンサを光ファイバを用いた伝送で連結するリンクを完成したことにより、中小規模のプラントでも、インバータの持つ機能を十分に生かした高付加価値システムが簡単に構築可能となった。

本稿では、ライン制御用インバータの概要と、汎用シーケンサと組み合わせたシステム適用例の特長について説明する。

2. ライン制御用インバータの概要

当社のライン制御用インバータには、中小容量向けの電圧型トランジスタインバータ、大容量向けの電流型サイリスティンバータがある。ここでは、中小規模プラントに用いられる電圧型トランジスタインバータについて紹介する。

2.1 ライン制御用インバータの特長

インバータには、モータを選ばないいわゆる汎用インバータと呼ばれるものと、専用モータを駆動する専用インバータがある。ライン制御用インバータは後者に属しており、モータ定数等の設定が必要である。そのため、テンキー方式の定数設定器が付いており、これをを利用して外部から特別な信号を入力せずとも、速度制御運転等のテスト運転も実施できるようになっている。その他の特長を列挙すると、下記となる。

- (1) 上位プラント(ライン)コントローラからの各種運転指令信号(8ワード/台)の高速受信(約2ms/8台)と、インバータの各種運転状態信号の上位コントローラへの送信。
- (2) リールあるいはワインダーのような鉄板・紙等の張力制御のため、モータ出力トルク制御が可能である。また、寸動運転にも対応できるように、外部信号に従って任意にトルク制御 \leftrightarrow 速度制御の切替えが可能である。
- (3) 速度制御器外部からのゲイン切替機能・速度ドリーピング機能・伝送異常発生時の速度処理機能等の各種アプリケーションに対応できる多機能の標準装備。

2.2 主回路構成

図1に、ライン制御用インバータの主回路構成を示す。同図(a)の1台の可逆コンバータで直流配電系統を供給し、インバータを複数台接続する直流配電方式と(b)のダイオードコンバータとインバータが対応する交流入力方式がある。この両方式の使い分けは、回生運転の有無であり、製紙用途のように回生運転の少ないプラントでは、より安価な(b)の主回路が採用される。

2.3 制御構成

図2に、ライン制御用インバータの制御構成を示す。図のように、各種用途によって、

- 搬送テーブルロール駆動等のように、高い速度制御性は必要でないが、複数台のモータによる複数台ロールのせん(揃)速運転が必要な場合に用いられる。電流制御付きV/f=一定制御方式である。
- 高精度速度制御が必要な場合の制御構成で、ベクトル制御が採用される。
- モータの出力トルク制御が必要な場合の制御構成で、

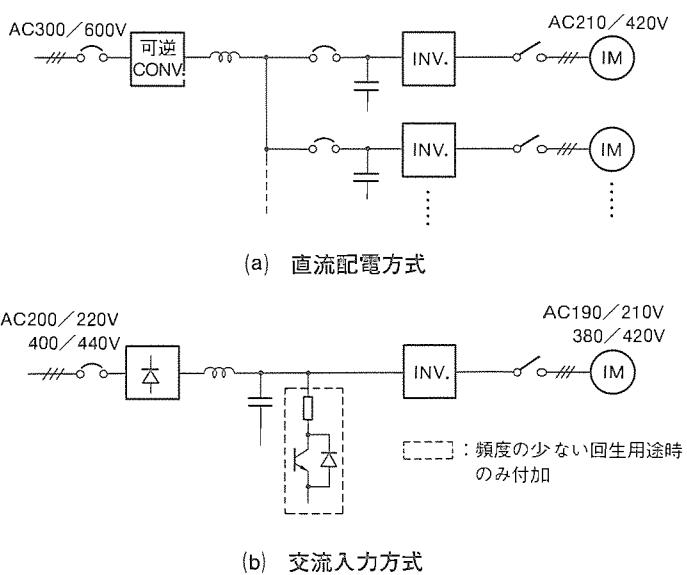


図1. 電圧型インバータの主回路構成

(b) と同様ベクトル制御が採用される。

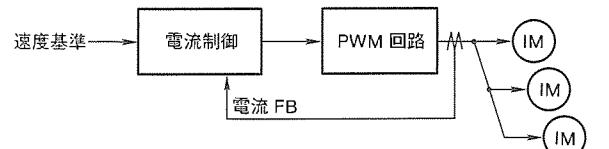
に大別される。

2.4 《MELVEC-1000》系の概要

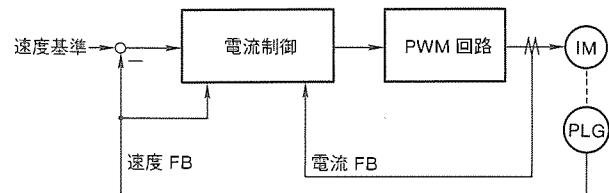
当社のライン制御用インバータは、《MELVEC》の呼称でシリーズ化されており、その中で電圧型トランジスタインバータである《MELVEC-1000》系の諸元を表1に示す。すべてDDC化されており、故障診断及び表示、強力なトレースバック機能等のRAS機能も充実している。特に、《MELVEC-1100》は、完全なボリュームレス化とシリアル伝送による外部パソコンとのエキスパートシステムの構築が可能となっている。その外観を図3に示す。

3. 汎用シーケンサとの光リンク

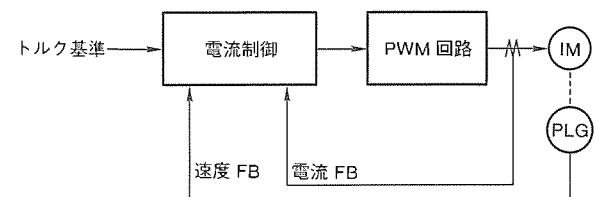
ライン制御用インバータシステムの構築に際しては、システムを構成するインバータ群とライン全体の制御を担当する



(a) 複数台モータの揃速運転(テーブルロール駆動等)



(b) 速度制御(ASR)運転(ライドロール駆動等)



(c) トルク(電流)制御(ATR/ACR)運転
(リール, ワインダ駆動等)

図2. 電圧型インバータの制御構成

表1. 《MELVECシリーズ》の諸元表

	名 称	最大容量(kVA)	最大出力周波数(Hz)	力行/回生	主回路タイプ	制 御
電圧型 インバータ シリーズ	MELVEC-1000	~800	~120	可	直流配電	V/f, ASR ATR/ACR
	△ -100			力行のみ*	交流入力	同 上
	△ -1100		~60	可	直流配電	同 上
	△ -110			力行のみ	交流入力	同 上

注 * 頻度の少ない回生は抵抗回生回路の追加で可能

コントローラとの親和性が重要なポイントとなってくる。従来、上位のコントローラとインバータ群とのインターフェースは、アナログ信号による最小限の情報交換を行う方法が一般に採用されてきたが、インバータシステムのデジタル化とインテリジェント化に伴い、交換する情報量が増大してきたため、今回このインターフェース部の親和性と交換情報量の拡大を目的として、汎用シーケンサ《MELSEC-A》とトランジスタインバータ《MELVEC》との光データリンクシステムを新たに開発した。表2に、この光データリンクシステムの主な仕様について示す。

今回開発した光データリンクシステムは、下記の2種類の伝送モードによってデータリンクを確立している。

(1) サイクリック伝送

シーケンサ↔インバータ群のリファレンスデータ(基準データ)とフィードバックデータ(実績データ)の定周期通信。

(2) イベントデータ伝送

インバータ側で保有する運転トレースデータを一括してシーケンサ側へ送信する(送信要求時のみ)。

4. システム適用例

ライン制御用インバータシステムについて、その適用例と特徴的な制御内容の一例を以下に紹介する。

4.1 システム構成

このシステムは、トラック状のラインに、約80台のテーブル(定盤)を配置し、周回させるシステムの事例で、図4にそのシステム構成を示す。ラインは、中・小合わせて約

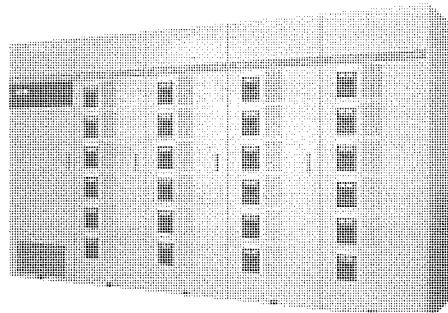


図3. ライン駆動用インバータ《MELVEC-1100》の外観

表2. 通信仕様

通信形態		1:N 通 信	
局 数	メ イ ン	1台 MAX	(注)ただし、メインがモニタ機能を持つ場合はモニタは接続禁止
	モ ニ タ	1台 MAX	
リモート			126台 MAX
伝送速度			1Mbps
再 伝 送			有り
伝 送 路			光ファイバ

300台のモータによって駆動されており、これらのモータを14台のトランジスタインバータ《MELVEC》によって駆動している。上位のコントローラとしては、5台の汎用シーケンサ《MELSEC-A》を位置付け、高速ネット《MELSEC NET》によって結合、またインバータ側とも光データリンクによって接続している。そして、マンマシンインターフェース部にはFAコントローラ“LM7000”を採用し、ラインの運転状況や傾向、及び故障時のインバータ側データ(トレースデータ)を収集・表示し、保全データ管理を行っている。

4.2 特徴的な制御内容

ここで紹介するシステムでは、ライン制御用インバータの制御方式であるベクトル制御方式（速度制御／トルク制御）、 V/f 制御方式の各々の特長を生かし、次のような制御を実施した。

(1) ベクトル制御方式による高精度速度制御（位相同期制御）

ライン上のテーブルは、ピニオンギヤとローラによって搬送されており、特にピニオンギヤの駆動については、進入してきたテーブルのラックの歯に受入ピニオンの歯をスムーズにか（噛）み合わせる必要がある。このために、進入テーブルの速度とラックの

歯の位相に、受入ピニオンギヤの回転速度と歯の位相を同期させる位相同期制御を行っている。

位相同期を行う箇所は、図5に示すような構成をとっており、進入してきたテーブルに付属したドグ(つめ)を、その通過点に設けられたテーブル速度・位相検出用ラックのカムに押し当ててラックを駆動することにより、ピニオンギヤ・減速機を介してパルス発振器・シンクロ発振器を駆動し、テーブルの速度と歯の位相を検出している。位相同期制御は、こうして検出された進入テーブルの速度とテーブルラックの歯の位相に、受入ピニオンの回転速度と歯の位相を同期させ、受入ピニオンの回転速度を制御するものである。なお、同期制御完了後に進入テーブルが受入ピニオンにか(噛)み合うと、テーブル速度・位相検出用ラックのカムとテーブルドグの連結が外れ、ラックは次のテーブルを受け入れるためにラック引戻しモータによって初期位置まで戻される。

歯の位相検出方法は、図6に示すように、テーブル側と受入ピニオン側それぞれに1歯進行することにより、1回転す

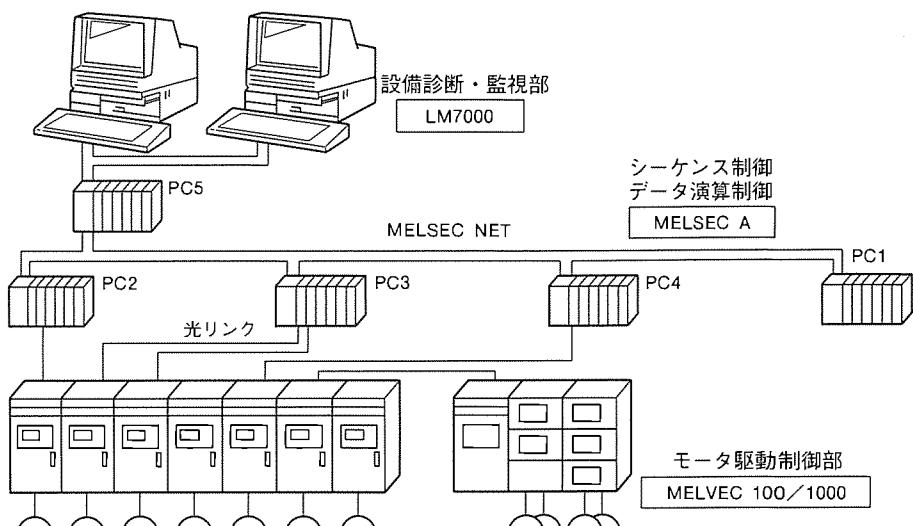


図4 システム構成

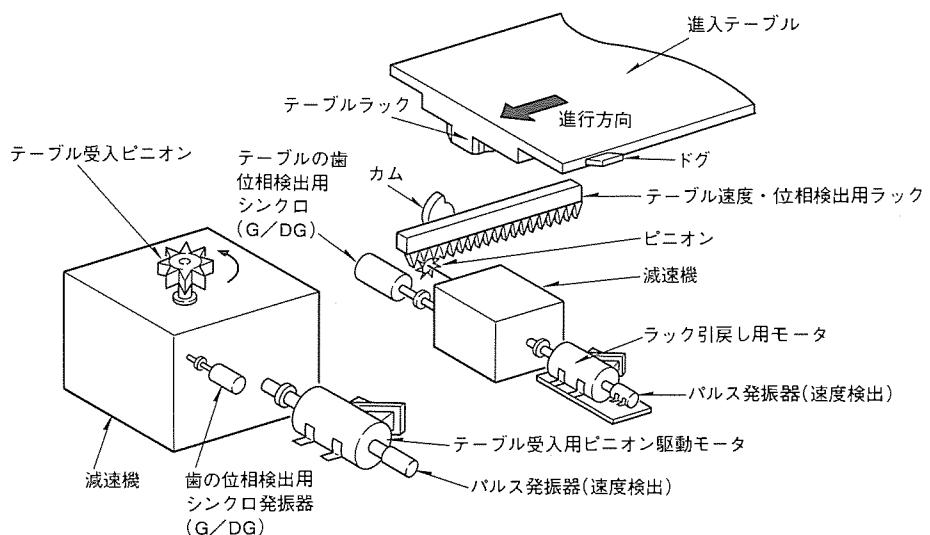
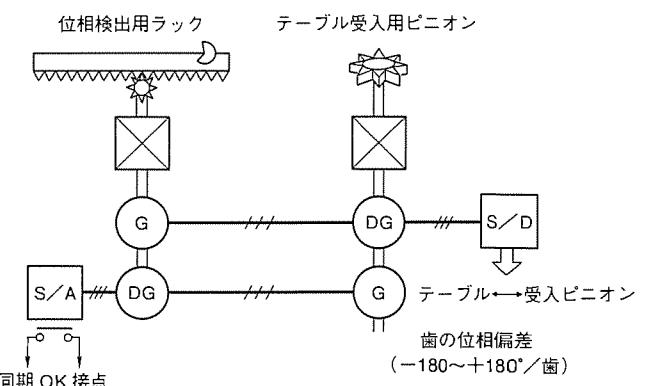


図5 テーブル受入部構成



G : シンクロ発振器(1回転/歯) S/D : シンクローディジタル変換器
 DG : 差動発振器(1回転/歯) S/A : シンクローアナログ変換器

図 6 位相検出用シンクロ構成

るシンクロ(差動)発振器を設け、二つの歯の位相偏差を検出する方法を採用した。一方、シーケンサ側では、この位相偏差信号を受けて受入ピニオン駆動用インバータへの速度基準を生成し、伝送を行っている。

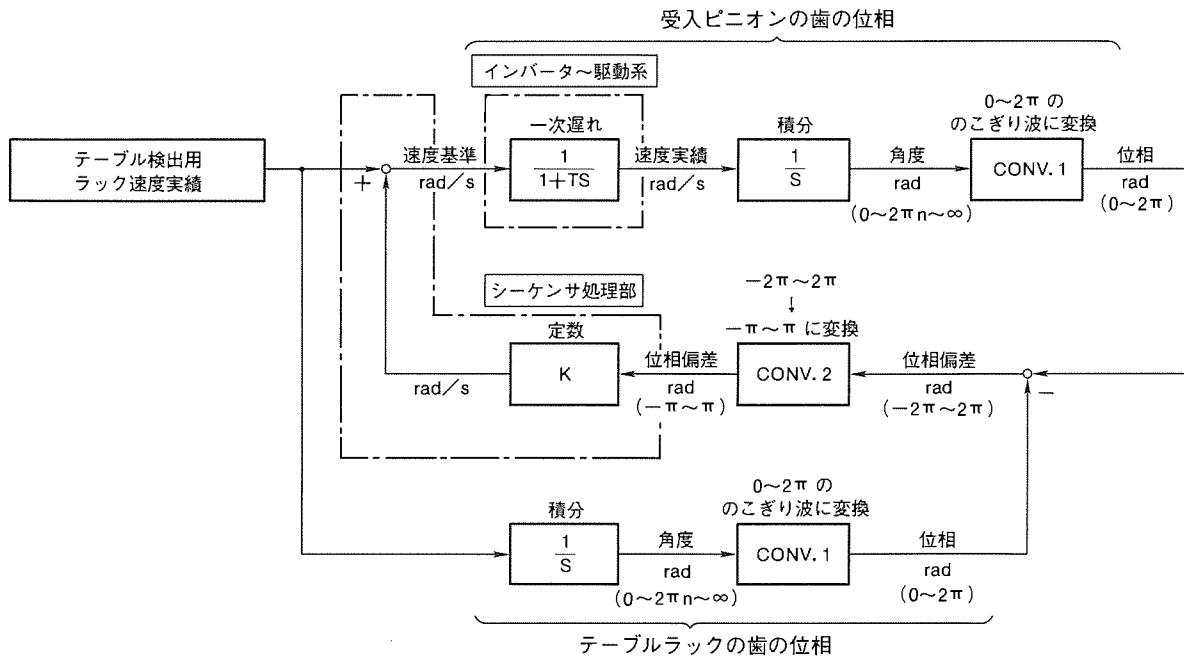


図7. 位相同期制御系

位相同期制御の実施に当たっては、短時間での同期合わせと同期の高精度化が必要であり、応答性と制御性の観点からベクトル制御方式を採用することにより、この問題をクリアしている。なお、参考として図7にこの位相同期制御の制御系を示す。また、4.3節(1)の図10は、この同期制御における各部の波形を示している。

(2) ベクトル制御による負荷配分制御

一般に、複数台のモータが機械的に結合された状態で、一つの負荷を駆動する場合、各々のモータを速度帰還型の速度制御すると、お互いの制御系が干渉して正常に制御を行うことができない。

今回、このような同一負荷の複数駆動系による速度制御を行っており、ベクトル制御方式の速度制御とトルク制御を利用した負荷配分制御を下記のように実施した。ここで、まずベクトル制御における制御ブロックの構成について簡単に説明すると、ベクトル制御の制御ブロックは図8に示すように、速度基準 (N^*) と速度実績 (N^-) の偏差からトルク分電流基準 (I_q^*) を生成する速度コントローラ (SC)，出力されたトルク分電流基準 (I_q^*) に制限をかけて最終的なトルク分電流基準 ($I_q^{*'}$) を発生する電流リミッタ (LMT)，最終のトルク分電流基準 ($I_q^{*'}\right)$ とトルク分電流実績 (I_q^-) から出力電流を発生させる電流コントローラ (CC)，そしてこれらの演算結果を基にパワートランジスタを制御する PWM回路から構成されている。

今回実施した負荷配分制御は、4台のインバータによって单一負荷を駆動するもので、図9に示すように、4台のうち1台を速度制御マスター局として位置付けて速度制御を行い、その速度コントローラ (SC1) の出力であるトルク分電流基準 (I_q^{*1}) を上位シーケンサを介して残り3台のインバータ

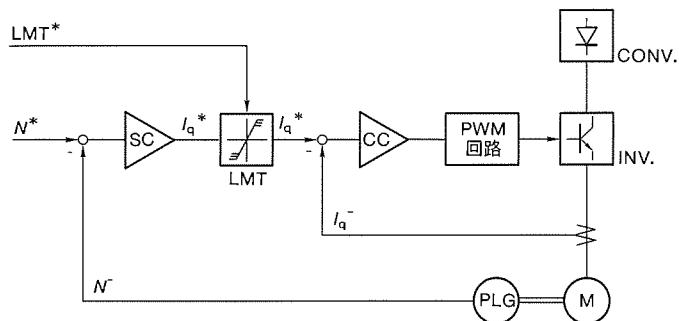


図8. ベクトル制御の制御ブロック図

への電流リミッタ設定値として与えて、速度制御マスターに追従したトルク制御を行わせるという方法を採用した。なお、ここで、追従する3台のインバータに対しては、トルク分電流基準 (I_q^{*1}) を直接与えてトルク制御する手段も有効であるが、速度制御マスターの任意切替えにも容易に対応できることを考慮し、特に電流リミッタによるトルク制御方式を採用している。

(3) 複数台(120台)のモータのV/f制御による一括駆動

テーブル搬送ラインにおけるローラ駆動部分は、小容量モータと直結したローラ合計120台によって構成されており、これらのローラ群を1台のインバータによって一括駆動した。制御方式にはV/f制御方式を採用し、ローラ群全体を一括しての速度制御を実現している。複数モータの一括駆動(V/f制御)において注意すべき点は、

- (a) インバータ \leftrightarrow 各モータ間のケーブル インピーダンスの統一
 - (b) 各モータ個別の保護手段の検討
- 等であり、これらはそれぞれ下記によって対処した。
- (a) ケーブル布設長とケーブルサイズの調整により、上下

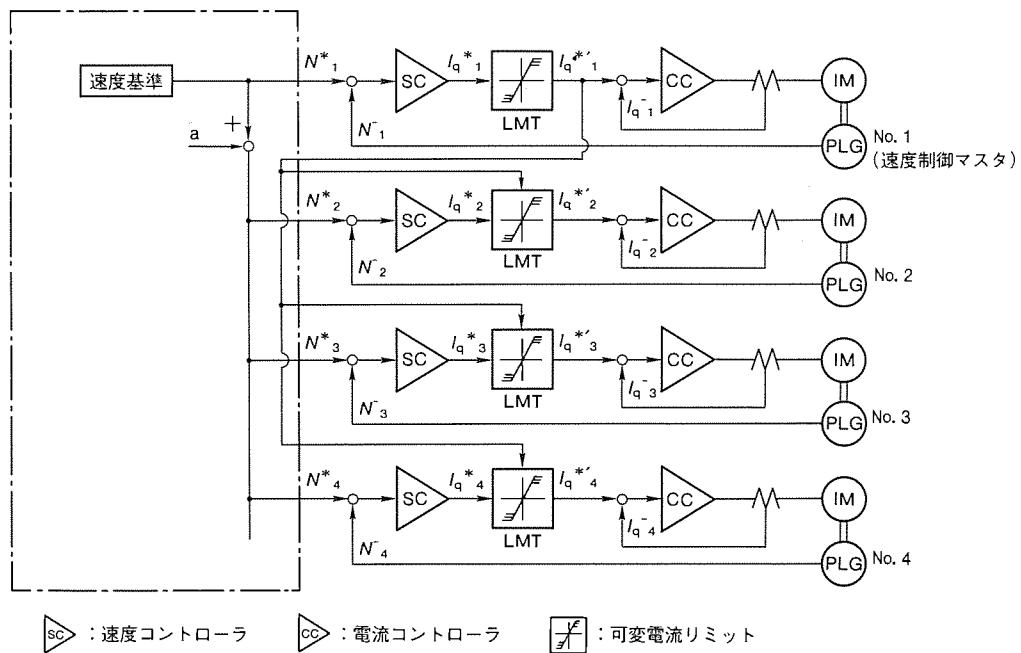


図9. 負荷配分制御ブロック図

限を10%以内とし、各モータの電流バランスの均一化を図った。

(b) 各モータごとにトリップ機構付きモータブレーカを設け、モータ個別の保護を実施した。

4.3 保全データ管理の内容

保全データ管理用として、上位コントローラに付加したマシンマシンインターフェース部には、下位のインバータ群から光データリンクを介して収集した運転情報により、次のような機能を持たせている。

(1) 運転データ表示

各インバータの速度基準(N^*)と速度実績(N^-)、トルク分電流基準(I_q^*)と実績(I_q^-)等を定期的にサンプリングし、運転傾向を示すデータとして表示し、ラインが何らかの要因によって停止した場合には、サンプリングを中断してライン停止原因解析用のデータとしても活用している(図10にCRT表示例を示す。)。

また同様に、前述した位相同期制御における同期の収束状況についても、シンクロからの位相偏差データと速度基準をモニタすることによって実現している。

(2) 故障時データトレース

インバータ側に標準装備している機能である故障トレース機能についてインバータ側でサンプリングされたデータを、光データリンクを介して一括りあげを行い、CRTにモニタすることにより前記(1)より更に詳細な故障原因解析用のデータとして、有効活用できるシステムとしている。

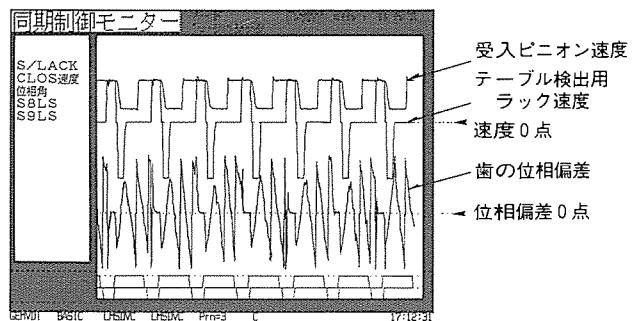


図10. FA コントローラ表示例

(3) その他

その他一般にCRTオペレーションにおいて、付加されているアラームメッセージ機能や、運転一停止表示機能等も合わせて組み込まれている。

5. むすび

以上、ライン制御用インバータの概要と、これを汎用シーケンサと連絡したシステム適用例の特長について説明した。近年、直流機並みの制御性を目指して進歩してきた交流可変速・インバータが、いよいよ直流機以上の付加価値を指向し始めた。本稿は、これに対する一つの方向性を示したもので、制御状況の表示・監視、故障分析等を行ったものである。今後更に機能・性能の向上を目指して努力していく所存である。

最後に、システムの構築に当たって御支援・御協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表する。

ターボコンプレッサ用 大容量超高速可变速電動機システム

田島正明* 後藤久雄*
増田博之* 山元 寛*
江頭英明*

1. まえがき

交流電動機の可变速技術は、インバータの進歩に伴い、様々な方面で実用化されてきている。特に、大容量超高速の範囲では、従来の電動機による駆動システムで必要としていた増速ギヤを使用せずに負荷機械を駆動することにより、省エネルギーと保守の省力化のみならず省スペースをも可能とする直接可变速駆動へのニーズが大きくなっている。当社でもこのニーズを受けて、最新のパワーエレクトロニクス技術と長年培ってきた高速回転機技術の粋を結集し、2,500kW-12,000rpm 機の試作、検証を既に完了していたが、今回、昭和四日市石油(株)向にターボコンプレッサ駆動用 3,300kW-11,430rpm 超高速可变速電動機システムを製作、納入した。このシステムは、大容量機としては世界最高速を達成したもので、かご型誘導電動機と高圧 GTO (ゲートターンオフ サイリスタ) インバータから構成されている。

以下に、このシステムの概要と特長、各種特性について述べる。

2. システムの概要と特長

今回、昭和四日市石油(株)に納入したシステムは、石油精製プロセスで使用されるターボコンプレッサの駆動用として使われる。従来コンプレッサ等の高速回転機械は、スチーム・ガスタービン、又は商用周波数の電動機と増速ギヤの組合せで駆動されているが、超高速可变速電動機システムはインバータによって電源周波数を変化させ、タービンや増速ギヤを使わずに直接負荷機械の可变速駆動ができる。各々のシステム構成を図1に示す。超高速可变速電動機システムの主な特長としては、以下のことが挙げられる。

- (1) 直接超高速駆動により、電動機を含めた機械装置全体の高効率・小型軽量化が可能となる。
- (2) 小型軽量化によって据付け面積が小さくなり、基礎・据付け工事が容易になる。
- (3) タービンや増速ギヤを使用した方式に比べ、保守点検が簡単になる。
- (4) 精度の高い速度制御により、大きな省エネルギー効果が得られる。

超高速電動機システムは、インバータと電動機の組合せにより、図2のように分類される。《MELDRIVE2000》は出

力 530kW までは、既にシリーズ化されていて多数の納入実績があり、《MELDRIVE4000》も数件納入されている。これまで、当社では 2,500kW-12,000rpm の試作機が容量、回転数共に最高であったが、今回のシステムは容量でこれを上回り、出力 3,000kW 以上では世界最高速のシステムとなった。表1にこのシステムの仕様を、図3に電動機の外観写真を示す。

3. 超高速可变速電動機

3.1 電動機仕様

今回納入した電動機は、2極の三相かご型誘導電動機であり、インバータ駆動により、広範囲で精度の高い可变速運転が可能である。また、石油プラント内の防爆区域で使用されるため内圧防爆構造となっている。

3.2 電動機構造

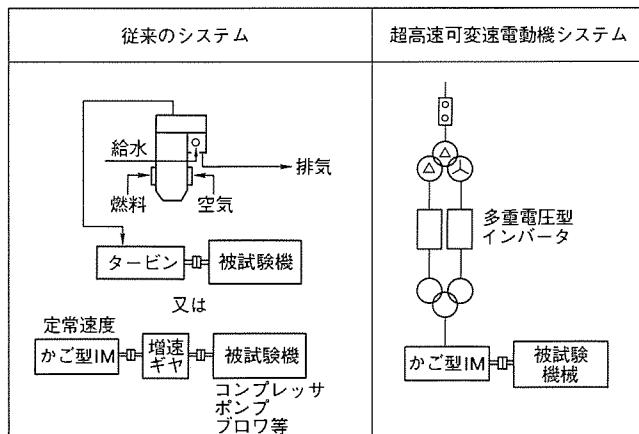


図1. システムの構成

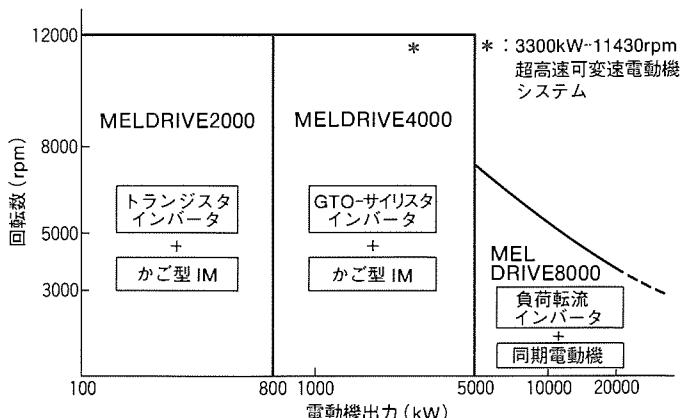


図2. 超高速可变速電動機システムの分類

図4に電動機の構造を示す。超高速可変速電動機では、高周波による電気的損失の低減対策や超高速回転時の大さな遠心力に対する機械的強度等、数々の技術的に重要な課題があるが、大型コンピュータを用いた詳細な強度解析等による検討を行い、最適な構造としている。また、試作機を用いて検証試験を行い信頼性の向上を図っている。以下に、この電動機の構造上の特長と技術的検討について述べる。

3.2.1 通風冷却構造

この電動機は、空気冷却器と他力ファンのユニットを上部に持った他力通風方式を採用しており、広い運転範囲に対して十分な冷却効果を上げることができる。試作機では、他力ファン1個による軸流通風方式を採用していたが、今回は他力ファン2個による両吸込方式とし、電動機内部の圧損やファン騒音の低減を図っている。なお、通風構造の決定に当たっては大型コンピュータによる通風解析を実施し、各部に最適な風量が流れるように設計を行っている。また、運転時の電動機内部の風速分布を実測し、解析の妥当性を確認している。

表1. システムの仕様

項目	定格
入力トランス	型式 三相整流器用変圧器 出力 6,000kVA 周波数 60Hz 電圧 3.3kV/1,100V×2
インバータ	型式 24相電圧型GTOインバータ 出力 4,800kVA 周波数 2~191.5Hz 電圧 936V×8 変調方式 PAM/PWM 制御方式 V/f制御 冷却方式 強制風冷式
出力トランス	型式 24相多重変圧器 出力 4,800kVA 周波数 191.5Hz 電圧 936V×8/606kV
電動機	型式 三相かご型誘電動機 出力 280~3,300kW 周波数 2極 電圧 83.3~191.5Hz 回転数 2,885~6,600kV 冷却方式 5,000~11,430rpm 却方式 全閉内冷型、他力通風方式

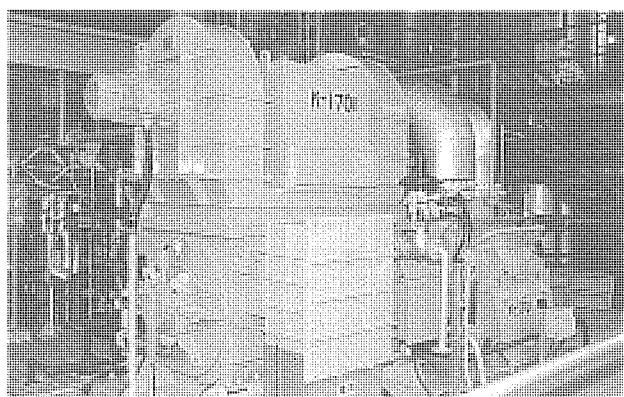


図3. 超高速可変速電動機の外観

3.2.2 回転子強度

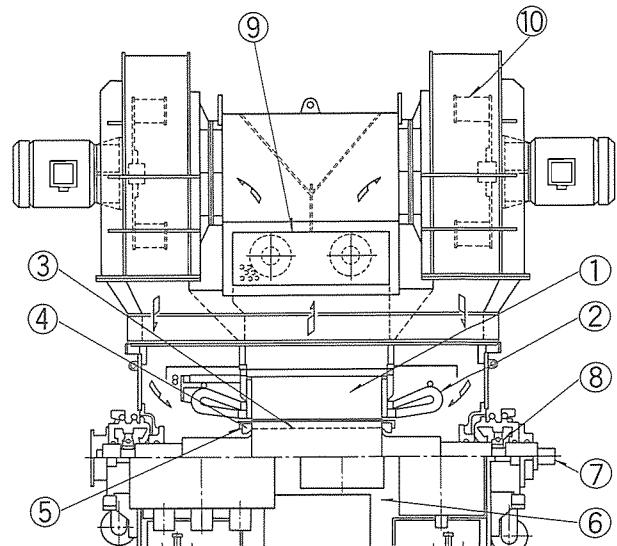
超高速電動機において回転子の設計は、最も重要な項目の一つである。超高速電動機でも、比較的周速が遅いものはラミネートコアを採用しているが、今回のように周速が非常に速くなると大きな遠心力が作用するため、回転子は高強度化が可能なソリッドロータとなる。回転子の設計に当たっては、有限要素法を用いた応力解析により、最適な構造としている。図5に回転子の部分モデルによる強度解析結果を示す。なお、エンドリング及びエンドリング支持環の応力を実測した結果、解析とほぼ同等の値を得ており、この解析手法は技術的に確立されたものと判断される。

3.2.3 軸受

超高速電動機の軸受を選定する際は、オイルホワール、オイルホイップ等の不安定現象を十分考慮した設計が必要である。図6に軸受の選定基準を示す。大型の電動機では運転範囲が広い場合、上記のような不安定領域での運転を避けることが難しく、これに対して有効なティルティングパッド軸受が採用される。今回もティルティングパッド軸受を使用しており、広範囲な可変速運転に対しても軸振動は安定している。また、高速機械では油漏れが発生しやすいが、油切りの形状や段数の最適化によって油漏れを防いでいる。

3.2.4 効率

電動機の損失は、風損等の機械的損失と銅損・鉄損等の電気的損失に分けられる。風損に対しては、回転子表面を円滑な構造とすることによって損失を極力抑えている。電気的損失には、高周波の基本波及び高調波成分による一次銅損、二



1	固定子コア	6	フレーム
2	固定子コイル	7	軸
3	回転子バー	8	軸受
4	エンドリング	9	空気冷却器
5	エンドリング支持環	10	他力ファン

図4. 電動機構造

次銅損、鉄損、漂遊負荷損がある。これらに対しては、コイル素線サイズの最適な選定、磁性くさびの採用、解析による磁路の最適設計、コイル回り部品への非磁性鋼の適用等により損失の低減を図っている。

ところで、ソリッドロータはラミネートコアの場合に比べると力率が低下し、漂遊負荷損が大きくなることが分かっており、通常の等価回路で求めた電動機特性値とは合わない。そこで、ソリッドロータに関して新しい等価回路を提案した。図7に各々の等価回路を示す。今回提案した等価回路は、回転子のティース部への二次電流の分流と主磁束の回転子内でのAT(アンペアターン)消費の考えを取り入れたものであり、後で述べるように試験結果と良い一致を示している。

3.2.5 騒 音

超高速電動機の騒音としては、回転子が回転するときに起る風きり音、ファン騒音、インバータ出力波形のひずみによる電磁音等が考えられる。回転子表面の円滑化によって風きり音を減らし、ファン騒音に対しては、他力ファンの採用、更には他力ファンを2個にして風量を分散し、ファンの回転

数を下げることによって低騒音化を図っている。電磁音に対しては、固定子と回転子のスロット数の組み合わせ、固定子フレーム等の剛性アップ、磁束密度を考慮した設計を行っている。

3.2.6 振 動

超高速電動機では、高調波成分によって電磁振動が増加する傾向にあるが、フレームやカバーの剛性を上げて振動の低減を図っている。また、広い運転範囲において計器類の固有振動数が一致した場合でも振動が低く抑えられるよう効果的な振動絶縁を行っている。軸振動に対しては、残留アンバランスを極力小さくするとともにティルティングパッド軸受の採用により、振動低減を図っている。また、軸受を含めた軸全体系の解析により、危険速度が運転範囲内にあっても軸振動の増加が少なくなるよう設計を行っている。図8に、回転子の固有値解析結果を示す。なお、今回の負荷機械であるターボコンプレッサとは、フレキシブルカップリングによって振動絶縁されている。ねじり振動に関しては、多重インバータによってスムーズな速度制御が行われるため脈動トル

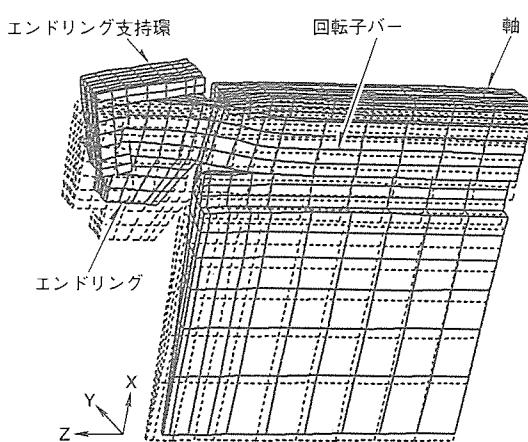


図5. 回転子の強度解析

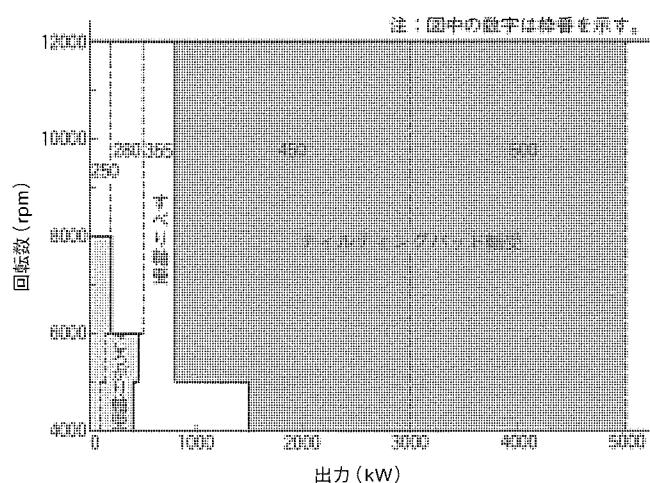


図6. 軸受の選定基準

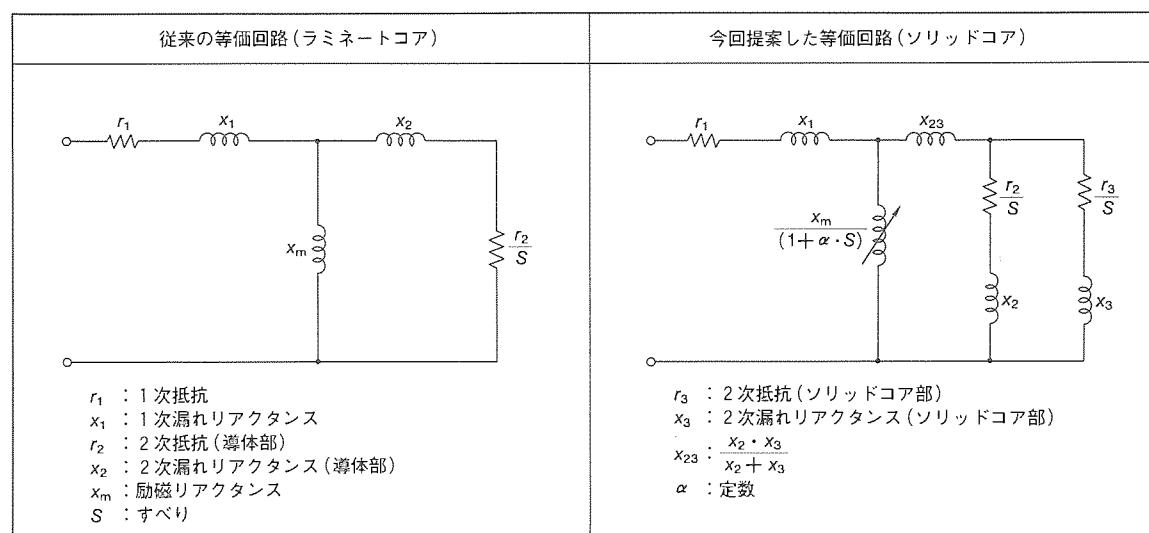


図7. 電動機の等価回路

クは非常に小さく、また解析によって共振周波数は問題ない値であることを確認している。

3.3 試験結果

図9に電動機特性を示す。新しい等価回路で求めた値は、実測結果とよく合っており、今回提案した等価回路がソリッドロータに対し妥当であると考えられる。

24相インバータにより、出力波形のひずみが少ないため、軸電圧は0.25V以下と小さい。

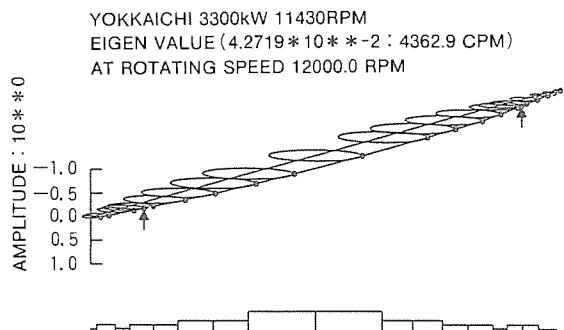


図8. 回転子の固有値解析

○, △, □は、試験結果を示す。

---: 従来の等価回路

—: 新しい等価回路

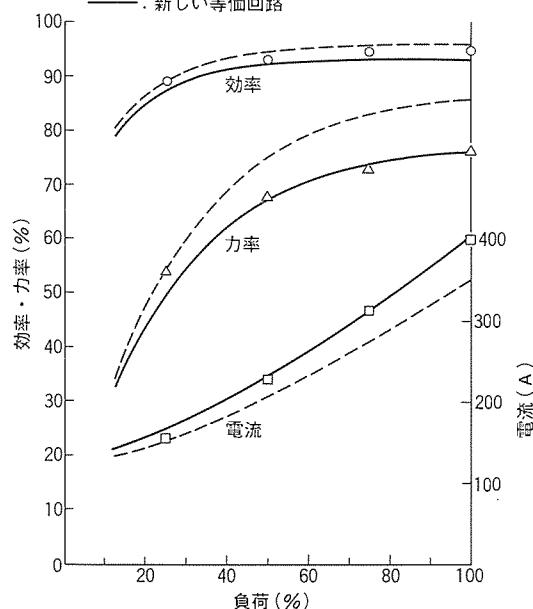


図9. 電動機特性

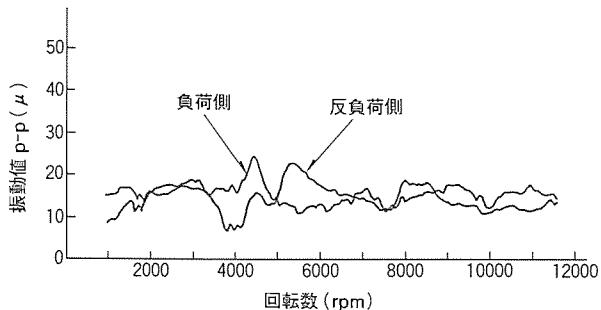


図10. 軸振動の測定値

図10に軸振動の測定結果を示す。危険速度での運転でも軸振動はあまり増加せず、広範囲にわたり安定している。

4. 超高速電動機駆動用 GTO インバータ

4.1 回路構成と特長

高性能高耐圧GTOの出現により、サイリスタインバータでは困難であった高周波大容量インバータの製作が可能になった。図11の外観写真に示すように、コンバータ、直流フィルタ、インバータ、制御装置のすべてを含んで6面で構成されている。転流回路が不要になったこと及びGTOの高耐圧化による電圧定格の上昇の効果により、盤寸法が小型になった。GTOインバータを11,430rpmの超高速電動機の駆動に用いるためには、トルクリップルの低減、低損失スナバ方式の適用、GTO保護回路の高速化等の課題があった。GTOインバータの主回路及び制御回路のブロック図を図12に示し、その特長を以下に述べる。

4.1.1 制御方式

ソリッドロータを採用した大容量の超高速電動機は、一般的にすべりが小さくなるため、PAM方式のV/f制御では低周波領域で制御が不安定になる傾向があった。この装置で

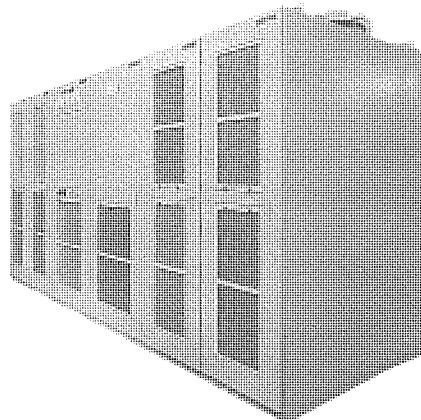


図11. インバータの外観

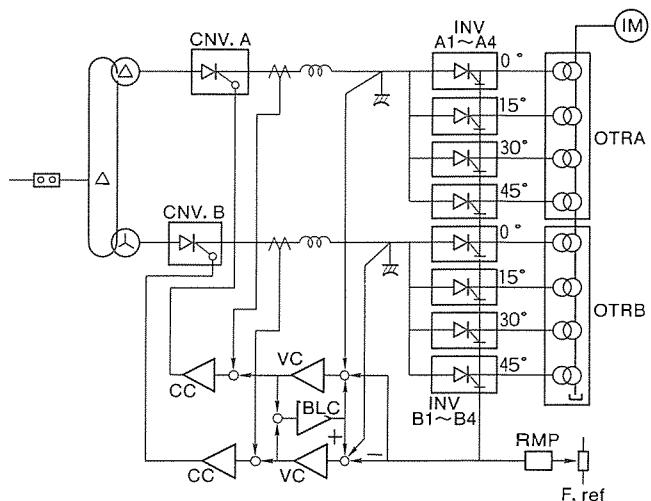


図12. 超高速電動機駆動用インバータブロック図

は、安定性を向上させるため低周波領域では、直流電圧を一定にした多パルス PWM 制御を採用するとともに低減励磁特性を持たせている。図12に示すように、主回路は A, B の 2 グループに分離されており、それぞれの直流電圧は個別の電圧コントローラ (VC) で制御される。2 群のコンバータの電流と直流電圧がバランスするように、電圧コントローラの出力をバランスコントローラ (BLC) に入力し、この出力を電圧指令値を補正している。

4.1.2 2×24相多重インバータ

このVVVF (Variable Voltage, Variable Frequency) の逆変換部は、2 グループの 24 相多重インバータからなり、24 相多重インバータは 4 台の単位インバータを 15° ずつ位相差を持たせて運転し、これらを 4 台の出力変圧器で波形合成するものである。電動機の端子電圧に含まれる高調波成分は、 $24 \times N \pm 1$ 次 ($N = 1, 2, 3 \dots$) となり、含有率はこの逆数となる。これから、最低次の電流高調波は、23 次が 0.8%，25 次が 0.68%，トルクリップルは 24 次成分が定格トルクの 0.12% となる。電動機の運転特性は、理想的な正弦波電源で駆動した場合と同等であり、振動、損失の増加を抑制できる。

出力変圧器は、インバータの出力電圧、電流及び運転周波数 (191.5Hz) を考慮して最適化を図っている。

4.1.3 並列 12 相多重コンバータ

VVVF の容量が大きいため電源への高調波の影響が大きく、これを低減するために 12 相多重コンバータを採用している。2 組の 3 相整流回路を互いに 30° 位相差を持たせて運転することで、VVVF から電源へ流入する電流高調波は $12 \times N \pm 1$ 次 ($N = 1, 2, 3 \dots$) となる。直列 12 相構成になると大電流素子が必要になり、また電流路に 4 個の素子が入るため損失が増加する。コンバータ部の損失を抑制するために、この装置では並列 12 相構成を採用した。

4.1.4 スナバ回路構成

GTO の遮断性能は、アノードとカソード間に設けられたスナバによって決まり、スナバ回路のインダクタンスを小さくすることと、適切な容量のスナバコンデンサを選定することが重要である。スナバロスは周波数に比例するため、標準的な 200Hz 近い出力周波数ではスナバロス自体を低減することが必要になる。この装置で採用したインバータのアーム対の構成を図13に示す。PAM モードでは、スナバ抵抗 (RD) で消費されるエネルギーは少なく、スナバエネルギーの大部分は負荷に還流する。周波数が低い領域では、多パルス PWM 制御を採用しておりスイッチング回数が増加するが、スナバロスは近似的に直流電圧の 2 乗に比例するので、直流電圧が低下した効果が大きく最高周波数時のロスを越えることはない。発生ロスが減少したことと風冷タイプを採用したことによって、スナバ抵抗 (RD) の小型化が可能になり、結果として盤寸法の小型化につながった。

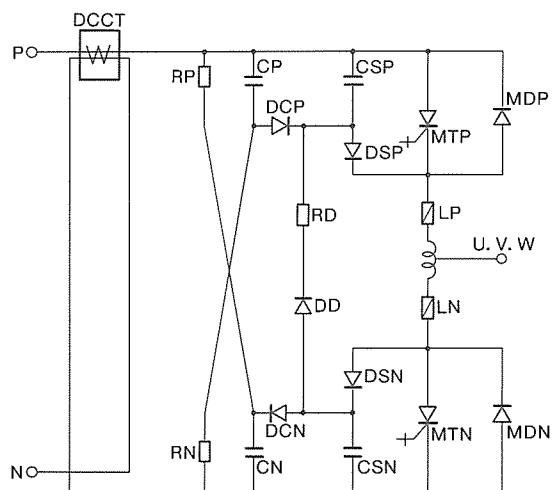


図 13. インバータ主回路構成

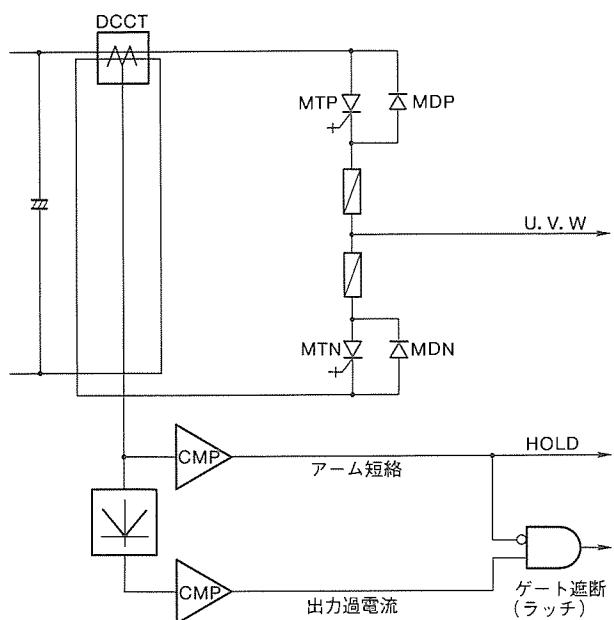


図 14. GTO 保護回路

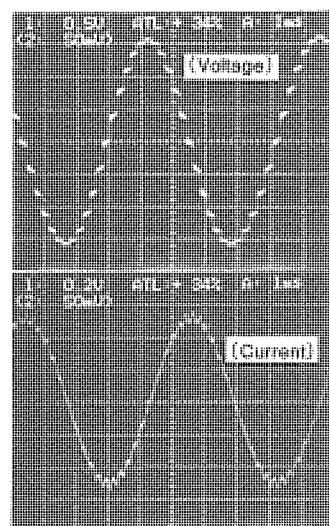


図 15. インバータ出力波形

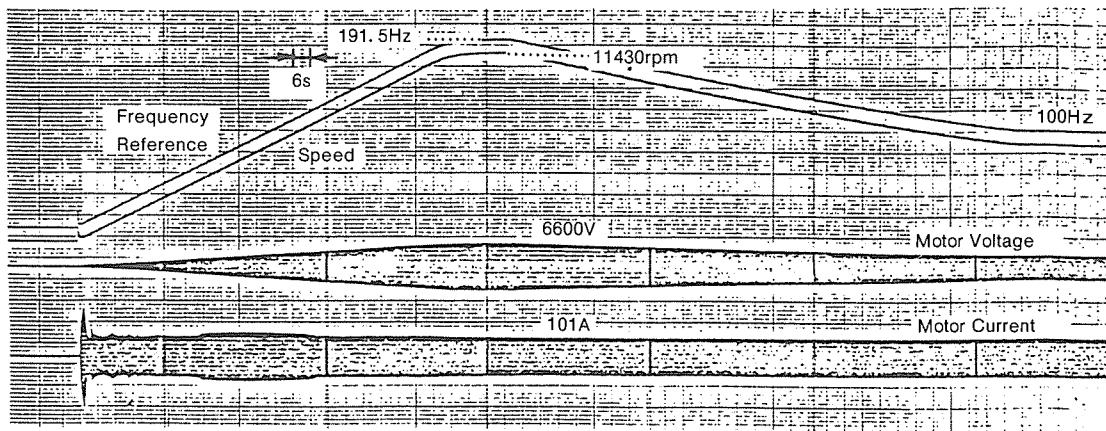


図 16. 加減速オシログラフ

4.1.5 GTO 保護

GTO は、サイリスタに比べて過電流耐量が小さく、また可制御陽極電流 (I_{TGQ}) 以上の電流を遮断できないため、素子の保護には注意を要する。事故時の電流上昇率の小さい出力過電流に対しては、GTO の自己消弧機能を利用して事故電流を遮断する。電流上昇率の大きいアーム短絡に対しては、ゲート信号をホールドして高速ヒューズと協調を取って GTO を保護する。図 14 に GTO 保護回路の構成を示す。電流上昇率の差を利用してアーム短絡電流と出力過電流を 1 個の電流検出器の測定値から識別している。

4.2 運転特性

以下、工場での組合せ試験結果を紹介する。図 15 は、無負荷運転時の超高速電動機の端子電圧と電流である。定格負荷時には電流波形は、より理想的な正弦波に近い形に改善される。図 16 は、無負荷状態での加減速オシログラフである。停止状態から定格周波数 (191.5Hz) まで約 120 秒で加速している。電流、電圧の乱れもなく安定に運転している。起動瞬時の電流のピーク値も定格電流の 75% 程度であり十分な起動トルクが得られている。

5. むすび

以上、大容量世界最高速の可変速電動機システムの主な仕様、特長、システム構成及び運転特性について述べてきた。今回の実プラントでの稼働で確認された有効性は、今後の超高速可変速電動機システムの適用範囲拡大の可能性を示唆している点で意義が大きいと考えられる。今後も市場のニーズにこたえるべく、更にシステムの容量、回転数範囲の拡大やコンパクト化などを図り、技術の向上に努めてゆく所存である。

参考文献

- (1) 沖田哲夫、池田雅博、西 祥男、増田博之、阪部茂一：超高速可変速電動機システム《MELDRIVE シリーズ》，三菱電機技報, 61, No.11, 905~910 (1987)
- (2) Ikeda, M., Sakabe, S., Higashi, K. : Experimental Study of High Speed Induction Motor Varying Rotor Core Construction, IEEE Trans. Energy Conversion, 5, No. 1, 98~103 (1990)

リニア搬送装置の FA 分野への適用

前原利昭*
中本道夫*

1. まえがき

リニアモータのここ数年の発展には、目覚ましいものがある。すなわち、OA機器用の小型のものから、鉄道輸送の大・型超高速の例まで応用分野は実に多様である。特に一般産業分野では、FA化・CIM化の進展とともに、応用・拡大が図られつつあり、工場内の搬送装置として確実な地位を築きつつある。

リニア搬送装置は、高速性・メンテナンスフリー性・クリーン性・フレキシブル性・高信頼性・制御の容易性等多くの特長を持っており、現在の進歩は、そこに構成されるリニアモータはもちろん、FA用コンポーネントである無接点コントакタ、インバータ、シーケンサ等の電気機器の発展によるところが大きい。

本稿では、これら FA 用電気機器コンポーネントで構成されるリニア搬送装置の FA 分野への適用例について紹介する。

2. リニアモータ

2.1 種類

リニアモータの基本的な構成は、図1に示すように回転型モータを軸方向に切り開いて平板状の構造としたものである。リニアモータの場合、回転型モータの固定子に相当する部分を一次側、回転子に相当する部分を二次側と呼び、一次側と二次側の間に直線的な運動をするように推力が働く。したがって、ギヤ・ベルトといった伝達機構を用いずに装置を直接駆動することができ、ダイレクトドライブ装置の駆動源として用いることができる。

リニアモータは、回転型モータと同様に動作原理に従って、いろいろな種類に分類できる。表1に、電気学会におけるリニアモータの分類と応用例について示す。この中で、リニア誘導モータは構造が簡単で推力が大きく、リニアパルスモータはオープンループで高精度位置決めが可能で自己保持力がある。また、リニア直流モータは、推力／重量が大きく、サードボリュームが良い等の特長がある。

2.2 リニア誘導モータの構成と基本特性

ここでは、FA 搬送に最も多く用いられているリニア誘導モータ（以下“LIM”という。）について、その構成と基本特性を説明する。LIM は、一次側と二次側とから成り立っており、一次側は回転型モータの固定子に相当し、鉄心と巻線とから成っている。二次側は回転子に相当し、非磁性導体で

あるアルミニウムや銅などの単一導体か、あるいは強磁性体と組み合わせた複合導体から構成される。LIM は、片側式 LIM と両側式 LIM に分類され、片側式 LIM は、一次側と二次側が各々 1 個であるが、両側式 LIM では、一次側は 2 次側をはさんで対称に配置される。さらに、この両者は短一次方式と短二次方式に分類される。図 2 に LIM の構成を示す。

LIM の動作原理を図 3 によって説明する。図は、一次側固定子の各巻線（同図には描いていないが、各スロットには巻線が埋め込まれている。）に交流電流を流したときに生じる磁束密度 B と渦電流 I_e が、片側式 LIM の長さ方向の距離 x にわたって分布していることを示している。なお、●印と×印は、渦電流が流れる方向が反対であることと電流の大きさを示す。この磁束密度 B は、渦電流 I_e とともにフレミング則による推力 F を発生する。その結果、二次側可動子は、図 3 に示した距離 x の方向に移動を始める。

なお、リニアモータは、一次側、二次側とともに可動子にも

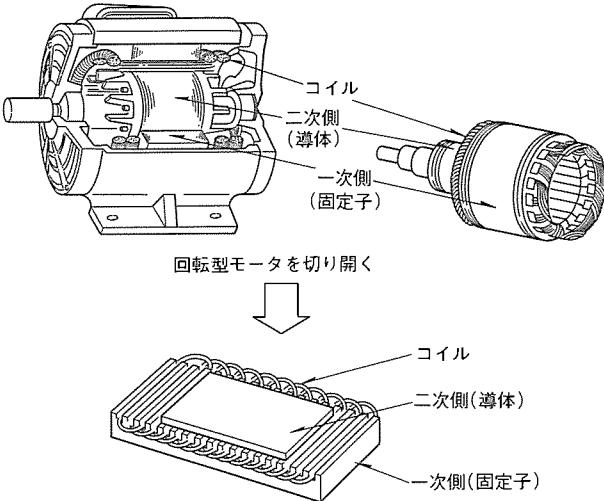


図1. リニアモータの構造

表1. リニアモータの分類と応用例

機種	略称	発生力	応用例
リニア誘導モータ	LIM	電流力	中高速リニアモータカー、搬送装置など
リニア同期モータ	LSM	電流力	超高速リニアモータカーなど
リニア直流モータ	LDM	電流力	磁気ヘッド位置決めモータなど
リニアパルスモータ	LPM	磁気力	プリンタ、プロッタなど
リニア振動アクチュエータ	LOA	磁気力	エアコンプレッサなど
リニア電磁ソレノイド	LES	磁気力	タイプライタ用キー駆動装置など
リニア電磁ポンプ	LEP	電流力	溶融金属ポンプなど

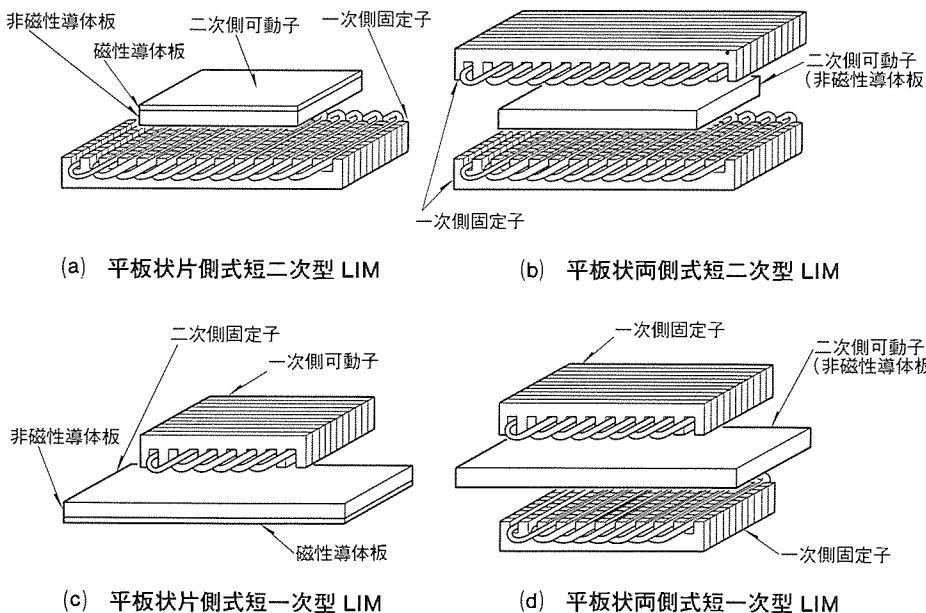


図2. リニアモータの構成

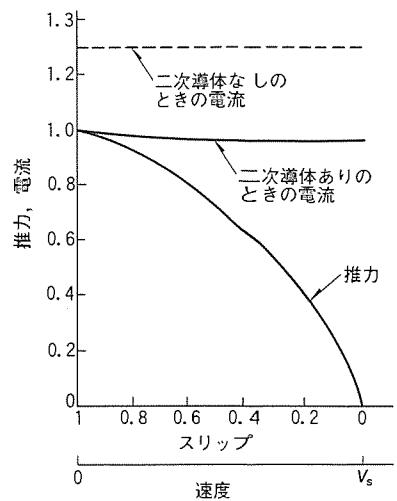


図4. 速度-推力, 電流特性

の関係は次式のようになる。

$$F \propto V^2/f \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

以上のことから、LIM の推力は電圧の二乗に比例し、周波数に反比例するので、インバータを用い周波数と電圧を調整することにより、推力を自由にコントロールすることができる。

2.3 当社リニアモータの仕様

表2に、FA搬送に用いられる当社《MELLINERシリーズ》のリニアモータの仕様を示し、図5に外観を示す。《MELLINERシリーズ》のリニアモータは、数多くの実績から、推力・同期速度・通電率等の特性をFA搬送に最適な値としており、また、近年のインバータの普及を考慮し、インバータ制御に最適な特性・構造としている。さらに、リニア

モータのステータコイルを高性能モールド樹脂で成形処理することにより、耐環境性(水・油・振動等)、取扱性が非常に優れており、安心してFA搬送に使用することができる。

3. リニア搬送装置

3.1 市場動向

リニアモータの種類は、2章に述べたとおり多くの種類があるが、その主なものは、誘導型(LIM)、直流型(LDM)、パルス型(LPM)である。

図6は、これらリニアモータについて、推力と搬送速度の関係及び用途について示したものであり、LIMは高速重量物の搬送、LDMは中程度の速度と重量の搬送、LPMは低速軽重量の搬送に適している。LPMは、OA機器等への実用

固定子にもなり得るので、装置の要求仕様に合わせて選択が可能であり、回転型モータを使用する場合に対し、機械設計の自由度が大きいといえる。

LIMの代表的な速度-推力・電流特性は、図4のようになっており、速度が0の点(スリップ=1)を始動推力と呼び、通常LIMの推力とはこの始動推力を示す。また、定格電流は始動推力発生時の電流を示す。 V_s (スリップ=0)は同期速度であり、回転型モータにおけるトルクと同様、同期速度における推力は0である。同期速度と巻線に印加される電源の周波数の関係は、磁極ピッチを τ 、周波数を f とすると次式の関係となる。

$$V_s = 2\tau f \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

また、推力 F と巻線に印加される電源の電圧 V 、周波数 f

表2. 《MELLINERシリーズ》リニアモータの仕様

型式	相数	電圧(V)	周波数(Hz)	同期速度(m/s)	推力(kgf)	通電率(%)	電流(A)	モータユニット
LM-A002-39M	3	200/220	50/60	3.9/4.68	2.0	10	3.0	片側式
LM-A003-39M	3	200/220	50/60	3.9/4.68	3.5	10	5.0	片側式
LM-A005-39M	3	200/220	50/60	3.9/4.68	5.0	10	7.0	片側式
LM-A007-39M	3	200/220	50/60	3.9/4.68	7.0	10	8.0	片側式
LM-A10-75M	3	200/220	50/60	7.5/9.0	10	10	10.5	片側式
LM-A15-75M	3	200/220	50/60	7.5/9.0	15	10	14.0	片側式
LM-A20-75M	3	200/220	50/60	7.5/9.0	20	10	19.5	片側式
LM-A30-75M	3	200/220	50/60	7.5/9.0	30	10	25.0	片側式
LM-A40-75M	3	200/220	50/60	7.5/9.0	40	10	34.5	片側式
LM-A60-75M	3	200/220	50/60	7.5/9.0	60	10	49.0	片側式
LM-A80-75M	3	200/220	50/60	7.5/9.0	80	10	69.0	両側式
LM-A120-75M	3	200/220	50/60	7.5/9.0	120	10	98.0	両側式

注 上記特性時の二次導体及びバックヨークは次のとおり

方式	厚さ(mm)
片側式	2.5(アルミ板)+6(鉄板)
両側式	6(アルミ板)

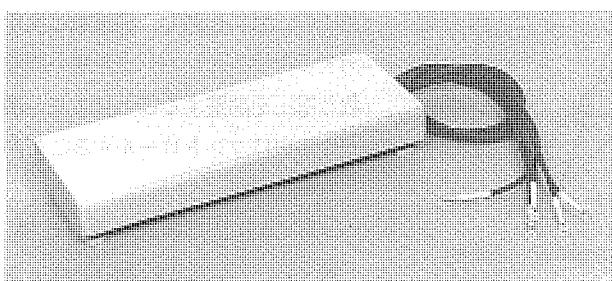


図5. 《MELLINERシリーズ》リニアモータの外観

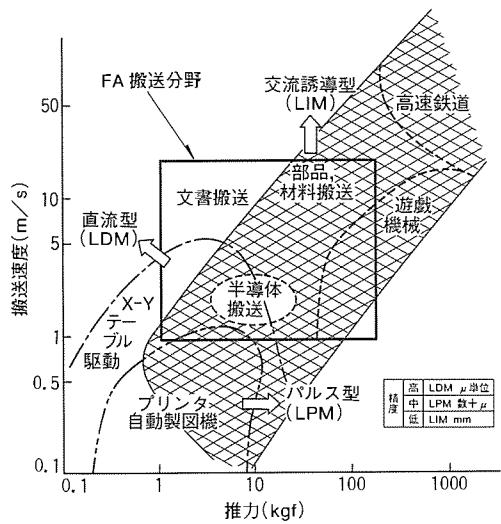


図6. 推力と搬送速度の関係

化が進んでおり(プリンタ、プロッタ等)、今後マイクロステップ化等によって、より高精度の分野へも応用範囲が広がるものと思われる。また、大推力化により、搬送等への応用も試みられているが、現段階では、実用の段階には達していない。LDMは、プリンタ、複写機等のOA分野では実用化されているが、X-Yテーブル駆動などの工作機及びロボッ

トなどの応用事例は発表されているが、普及しているとはい、難く、実用化はこれからと思われる。

LIMは、鉄道輸送用、FA搬送装置用として使用されており、既に実用段階に入っていると考えられる。FA搬送の分野では、リニアモータのもつクリーン性・高速性・メンテナンスフリ一性を生かして、その応用範囲が広がりつつあり、図6に示すように搬送重量で1~数百kg、搬送速度で1~数十m/sの範囲内で使用される場合が多い。表3に、FAユーザーに対

し、使用中あるいは計画中のリニア搬送装置について、その搬送重量と搬送速度を調査した結果を示す。この結果からFA用リニア搬送装置は、搬送重量で1~100kg、搬送速度で1~3m/s程度の範囲が最も多いことが分かる。また、一般産業における使用分野について、調査した結果を図7に示す。この結果から現時点では、特定分野のリニアモータ使用量が多いが、今後は一般工場のFA搬送が増加するものと思われる。

3.2 システム構成

リニア搬送装置を構成する基本コンポーネントは、リニアモータを構成する一次側固定子と二次側導体板を除くと、構造部分と電気部分に分けることができる。構造部分としては、台車、走行路(走行部・モータ取付部)、ブレーキから成り、ブレーキは、ストップ方式、非接触電磁方式、接触方式等いろいろな方式がある。さらに、ブレーキ等を作動させる電磁弁、エアシリンダなどから構成される。リニア搬送装置の構造(走行方式・ブレーキ方式等)は、搬送物の性格(クリーン度・耐衝撃性)、仕様(重量・速度)等から十分検討して決定する必要がある。

電気部分のコンポーネントについては、図8に従って説明する。図は、地上一次方式(走行路側にリニアモータを設置)のリニア搬送装置の構成例を示したものであり、台車の位置を検出する位置検出器、リニアモータへの通電を切り替えるコンタクタ、リニアモータの電源、運転指令、外部条件などに基づいてリニア搬送装置全体を制御するコントローラから構成される。このような構成とすると集電シューなど台車への給電が不要となり、メンテナンス、走行速度、じんあいの発生等に対して非常に有利となる。運転パターンは、図9に示すように、リニアモータのあるステーション部で加速・減速を行い、ステーション間は慣性走行となる。通常切替コンタクタには無接点コンタクタ(当社US-Kシリーズ)、

表3. 搬送重量と搬送速度(ユーザーの動向調査)

速度 重量	1m/s以下	1~2m/s 以下	2~3m/s 以下	3~4m/s 以下	5~10m/s 以下	10m/sを 超えるもの	計
1 kg 以下	1.4	—	—	—	—	2.0	3.4
1~20kg 以下	15.1	21.5	9.2	—	2.3	1.2	49.3
20~100kg 以下	7.2	8.3	4.0	2.1	2.5	—	24.1
100~1,000kg 以下	1.2	2.6	3.0	4.1	—	—	10.9
1,000kgを 超えるもの	1.6	4.3	5.1	1.3	—	—	12.3
計	26.5	36.7	21.3	7.5	4.8	3.2	100

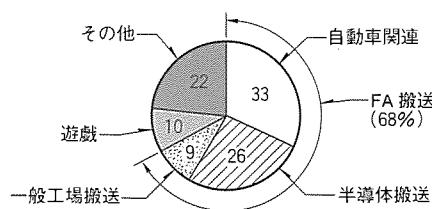


図7. リニアモータの分野別使用量(%)

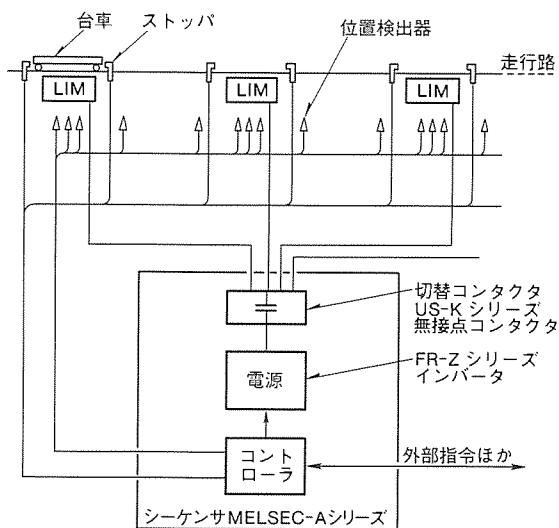


図8. リニア搬送装置の構成例

電源にはインバータ(当社FR-Zシリーズ), コントローラにはシーケンサ(当社《MELSEC-Aシリーズ》)が使用される。また、高精度な運転を行う場合、台車の速度検出を行って制御する必要があるが、この場合の例を図10に示す。

この例では、台車の速度検出データをCPUで処理し、台車の速度に応じてインバータへの指令を調整し、台車の加速制御、減速制御を行い、搬送時間の安定化、停止精度の向上を図っている。また、電磁弁、位置検出器等は、個別にシーケンサを接続すると配線本数が多くなり、配線工数の増加、信頼性の面で問題があるため、データリンク(当社《MELSECNET/MINI》)を用いて、ケーブルを1本(光リンク)としている。

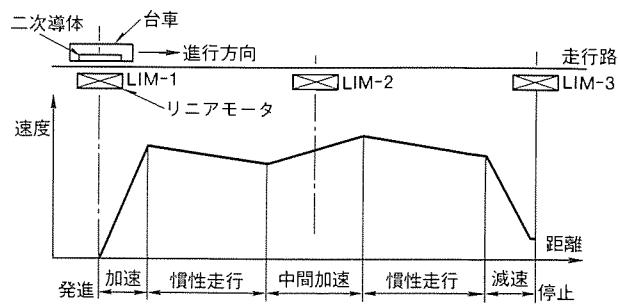


図9. 運転パターン

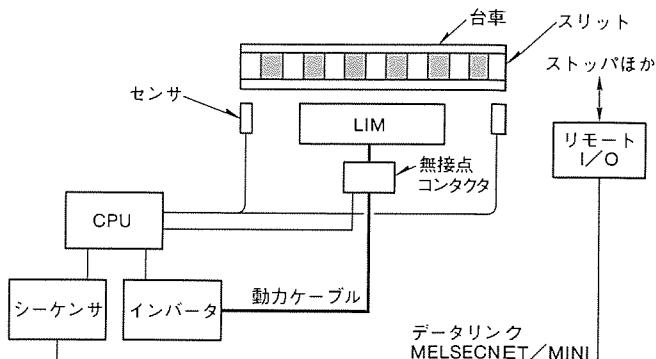


図10. 速度検出方式例

3.3 リニア搬送装置の特長

リニアモータを駆動源とした搬送システムには、従来の搬送装置と比較し、次のような特長がある。

- (1) ベルト・チェーン・油圧・空圧などの動力伝達機構が不要であり、搬送物をダイレクトに駆動できる。
- (2) 機構が簡単なため、信頼性が高く保守、点検が容易である。
- (3) 回転機と異なり、遠心力による速度制限がないため、10m/s以上の高速搬送が可能である。
- (4) ベルト・チェーン・油圧・空圧などの動力伝達機構がなく、また集電装置もないため低騒音かつクリーンな運転が可能である。
- (5) LIMの特性が垂下特性のため、電圧制御や周波数制御による制御性が良い。
- (6) 集電装置のないコードレス搬送が行え、操作性、メンテナンス性が良い。
- (7) 搬送台車がリニアモータ上にきたときのみ通電する間欠通電方式となるため、省エネルギーが可能となる。

また、他の搬送システムとの特性比較を表4に示す。

以上述べたように、リニア搬送装置は、他の搬送方式に比較して優れた点が多い。しかし、リニアモータには端効果(リニアモータ両端部の磁速密度が不均一となり、特に高速域で推力が低下する。)や、固定子と可動子間に働く磁気吸引力といった回転機にはみられない現象があり、これらを考慮しなければ、リニアモータを使用する特長が得られない場合がある。また、システム全体のコストも通常の搬送方式と、ほぼ同じ仕様では従来より高くなる場合が多い。したがって、

リニア搬送装置を使用する場合には、次の点について十分検討する必要がある。

(1) ダイレクトドライブ搬送として、表4の特長が生かせる用途か。

(2) 将来ラインの延長、システムの拡張の計画有無。

リニア搬送装置は、従来の搬送装置に比較して、ラインの延長が容易であり、またシステム化への対応力も大きい。したがって、将来の工場の拡大計画等がある場合は、あらかじめリニア搬送装置を採用しておくと、システムの拡大が容易に行える。

4. FA 分野への応用例

リニア搬送装置は、以上述べたように従来の搬送装置にない特長があり、FA化の進展に伴い、その高速性・メンテナンスフリー性・クリーン性・フレキシブル性を生かして適用範囲が広がりつつあり、今後ますます普及していくものと思われる。ここでは、これらの特長を生かしたFA搬送の適用例について紹介する。

(1) 長距離搬送ライン

クリーン度を要求される長距離搬送にリニアモータを応用するのは、リニアモータの非接触駆動によるクリーン性・高速性を100%発揮した好例である。ここに紹介する例は、走行長130mで6箇所のステーション間を約3m/sの速度で、長距離かつ高速搬送するシステムである。地上一次方式となっており、二次導体を含む台車は車輪によって支持されている。その構造断面を図11に示す。レール上には、LIM3台を1モジュールとして32モジュールのLIMが適宜配置され、モジュール単位で無接点コンタクタを介してインバータに接続されている。台車には、スリット板を設け、レール側の検出器とともに位置及び速度を検出する。また、台車の保持用ブレーキとして非接触電磁ブレーキを採用している。制御CPUには8086を採用し、図8、図10と同様の構成となっており、台車の速度、加速度、停止制御を行い、さらに自動運転時の上位との通信及び各種センサとの交信を行っている。

表5にこの搬送装置の仕様を示す。

表4. 代表的な搬送システムの特性比較

方 式	特 性	特性														
		シス テム 自 動 化 の 容 易 さ	高 速 度	位 置 決 め	機 構 の 单 純 化	省 ス ベ ー シ ス	非 接 触 一 送	保 守 シ ン シ ス	ク リ ー シ ン シ ス	搬 送 物 へ の 衝 撃 度	振 動 ・ 騒 音	昇 り こ う 配 搬 送 ・ 垂 直 搬 送	価 格	信 頼	電 源 ・ 制 御 回 路 の 单 純 化	長 ス ト ロ ー ク 搬 送
コ ン ベ ヤ	×	×	×	×	◎	○	×	×	×	×	×	◎	○	△	○	×
軌 道 台 車	△	○	△	○	○	○	×	△	△	△	△	○	○	○	○	○
リ ニ ア モ テ タ	◎	◎	◎	△	○	○	○	○	○	○	○	△	△	○	△	○

注 ◎は最適、○は適、△はやや不適、×は不適

(2) シャフト搬送ライン

図12、図13は、中容量電動機のシャフト加工ラインに導入した例である。シャフト素材から旋削加工、キー溝加工の工程間を搬送するもので、従来のチェーンコンベヤ(速度0.5m/s)に対し、搬送のスピードアップによる工程間仕切りの減少、メンテナンスフリー化をねらったものである。全長11mのラインの中に五つのステーションがあり、両端が投入、取り出しきーーションであり、中間3箇所が加工ステーションである。加工ステーションから加工機械へは、ローダアンローダでシャフトを移載する。それぞれの加工ステージの加工が終了後、台車を同時に次のステージへ2m/sの速度で送り、シャフトをロード後空台車を元の位置へバックさせる。8台の推力30kgfのLIMによって駆動し、速度制御はインバータ(FR-Zシリーズ)、コントローラにはシーケンサ《MELSEC-Aシリーズ》を用い、インバータへの周波数指令、LIMの切替指令(無接点コンタクタによる)、各種センサとの交信、外部装置とのインターフェースを行っている。表6にシャフト搬送ラインの仕様を示す。

(3) プリント基板搬送装置

図14、図15は、IC型名検査装置と前工程、次工程を接続するためのプリント基板高速搬送装置を組み合わせた例である。IC型名検査装置は、当社が開発したもので、プリント基板に挿入したICの型名をビジョンセンサによって読み

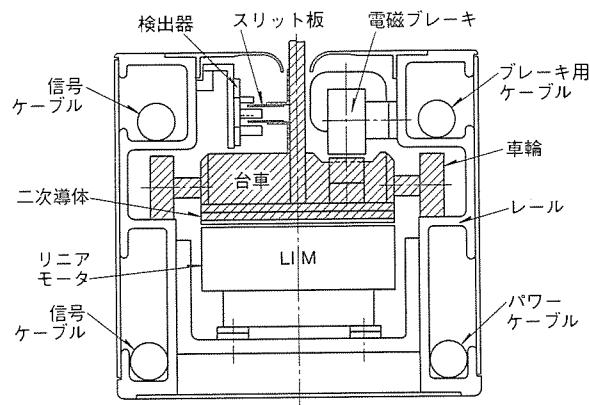


図11. 搬送路構造断面

表5. 搬送装置の仕様

項 目	仕 様
走行路長	130m
ステーション数	6ステーション
台車数	1台
LIM推力	10kgf
LIM台数	96台
搬送重量	40kg(キャリア34kg、ワーク6kg)
搬送速度	3m/s
停止精度	±1mm
加減速度	0.3G以下
速度制御	インバータ制御方式

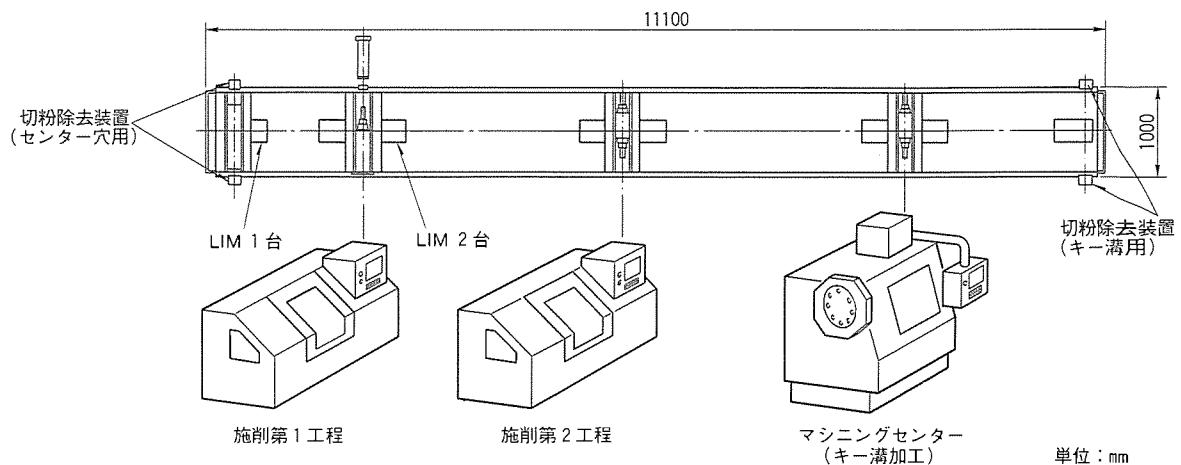


図12. シャフト搬送ラインの構成

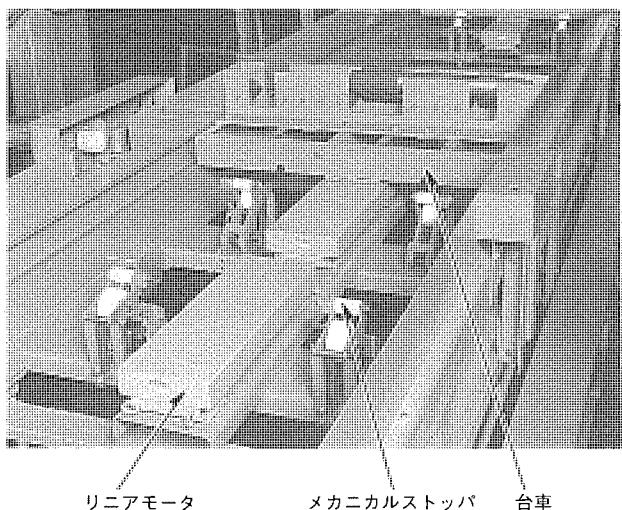


図13. シャフト搬送ライン

表6. シャフト搬送ラインの仕様

項目	仕様	項目	仕様
走行路長	11m	搬送重量	100kg (台車60kg + ワーク40kg)
ステーション数	5ステーション	搬送速度	2m/s
台車数	4台	停止精度	±5mm
LIM推力	30kgf	速度制御	インバータ制御方式
LIM台数	8台	コントローラ	シーケンサ

取り、正しいICが挿入されているかをチェックするものである。搬送全長は5mで、両端に投入ステーション及び取り出しステーションを持ち、中心がIC型名検査ステーションとなっている。さらに、リニア搬送装置と自動挿入機等を接続することにより、ラインを延長することが可能である。推力7kgfのLIM3台により、3m/sの速度でプリント基板を搬送する。LIMの制御は、インバータによる周波数制御であり、無接点コンタクタによってLIMへの通電を切り替えており、台車にはスリット板を設け、レール側の検出器による検出データをCPUによって処理し、インバータに周波数指令を与え台車の加速・減速・速度をコントロールする。

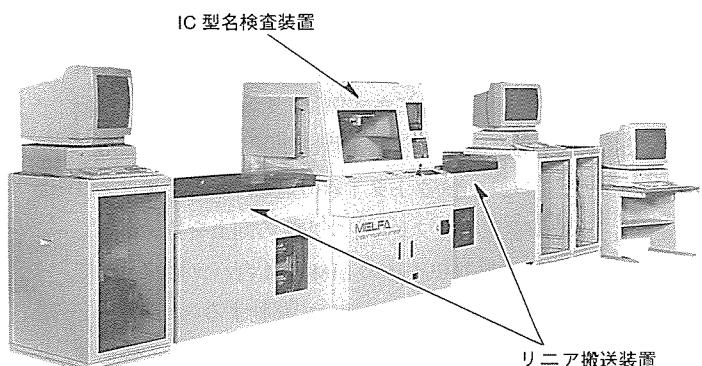


図14. プリント基板搬送装置の外観

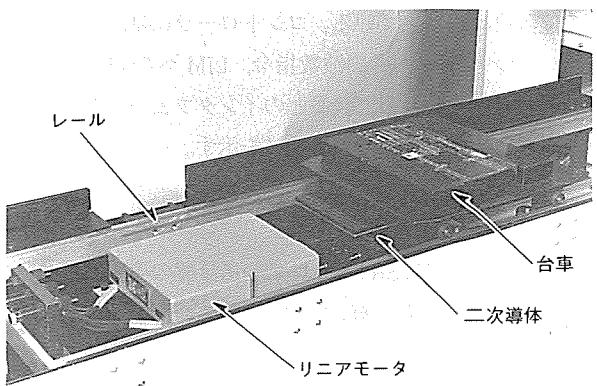


図15. プリント基板搬送装置ステーション部と台車

また、台車の保持には、エアシリンダ動作のメカニカルストッパーを採用している。リニア搬送装置内のセンサ、電磁弁、エアシリングは、省配線リンクシステム《MELSECNET-NINI》によって接続し、配線の簡略化、信頼性の向上を図っている。さらに、生産管理、IC型名検査装置、モニタ等の上位システムは、データリンクシステム《MELSECNET》で接続し、生産情報の一元管理を行っている。表7に搬送仕様を示す。

(4) 溶接加工ライン

FA搬送用のリニアモータは、一般的に推力は大きいもの

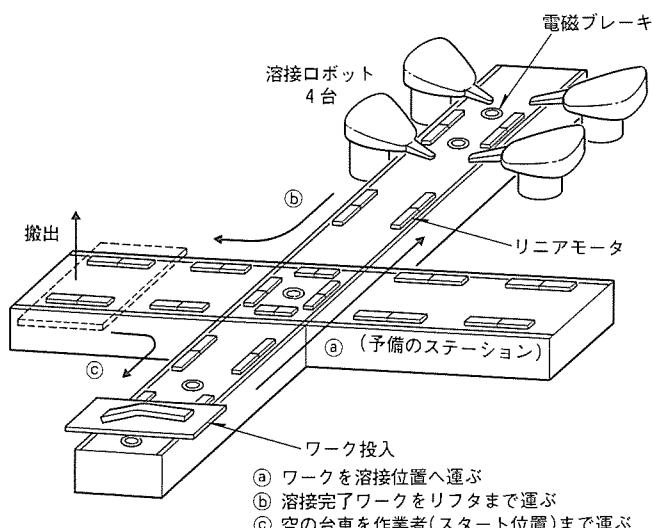


図16. 溶接加工ライン

で100kgf程度であるが、重量が1トン以上ある重量物でも搬送が可能である。図16に示す例は、1.5トンの台車を駆動するもので、板金部品の溶接工程に使用されている。エアシリンダ方式に対し、タクトタイムの短縮、メンテナンス性の向上、ライン変更等のフレキシブル性の向上を目的として製作したもので、推力60kgfのLIMを4台パラ接続として、1.5トンの台車を約1.5m/sの速度で移動する。

速度制御は、インバータによる周波数制御である。停止は、LIMによる制動で速度を低下させた後、電磁ショーブレーキによって、いったん台車を停止させた後クランプ方式で台車の位置決めを行っている。コントローラには、シーケンサを用いインバータへの周波数指令、LIMへの切替指令、各種センサとの交信、外部装置とのインターフェースを行っている。表8に溶接加工ラインの仕様を示す。

5. む す び

以上、FA分野におけるリニア搬送装置の適用例について紹介したが、これらの適用例はまだごく一部の例にすぎず、その特長を生かして熱心に適用を推進しているところと、まだその特長を生かしきれずにいるところでは、相当大きなギャップがあると思える。

表7. プリント基板搬送装置の仕様

項目	仕様	項目	仕様
走行路長	5m	搬送速度	3m/s
ステーション数	3ステーション	停止精度	±0.5mm
台車数	1台	速度制御	インバータ制御方式
LIM推力	7kgf	コントローラ	専用コントローラ
LIM台数	3台	ライン制御	シーケンサ
搬送重量	8kg(台車7kg+ワーク1kg)		

表8. 溶接加工ラインの仕様

項目	仕様	項目	仕様
走行路長	8m×2	搬送重量	1,500kg (台車1,400kg+ワーク100kg)
ステーション数	5ステーション	搬送速度	1.5m/s
台車数	2台	停止精度	±1mm
LIM推力	60kgf	速度制御	インバータ制御方式
LIM台数	42台	コントローラ	シーケンサ

このため、電気学会等でもリニアドライブ技術委員会を設け、その下部組織にFA応用調査専門委員会を据えて、積極的な応用調査活動を行うとともに情報交換や地道な研究発表に努めているので、今後リニア搬送装置のFA分野への適用については、急加速で進展して行くものと思われる。

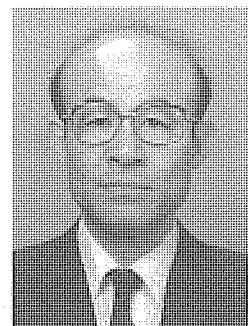
参考文献

- (1) 磁気アクチュエータ調査専門委員会：リニアモータとその応用、電気学会 (1984)
- (2) 正田英介、海老原大樹：産業におけるリニアモータ・アクチュエータの利用動向と展望、電気学会誌, 109, No. 9, 689~693 (1989)
- (3) 阪部茂一、柳内芳彦、中本道夫：誘導形リニアモータ『MELLINER』とリニア駆動装置、三菱電機技報, 60, No.12, 44~48 (1986)
- (4) 田中輝穂、中本道夫：高速リニア搬送システム、ファクトリ・オートメーション, 5 (1987)
- (5) 海老原大樹：搬送システムとリニアモータ、荷役と機械, 7 (1987)

卷頭言

センシング オブ センシング

東京大学工学部
計数工学科
教授 山崎 弘郎



センシング技術は、われわれが関心をもつ対象から有用な情報を取り出す技術である。それは物理法則、広く言えば、自然法則が支配する世界と人間の知の世界とのインターフェース技術でもある。

センシング技術によりもたらされた情報が構造化され、整理されて知識になる。その知識が概念の体系の中に組み込まれて学問となる。したがって、センシング技術なくして知識がなく、知識がなければ自然科学や技術はない。まさにセンシング技術は科学技術の基盤なのである。

センサやセンシングシステムは、元来個別のニーズや問題を解決するために創出又は開発されてきた。そこで、ニーズが充足されれば、その分野の固有技術として埋没し、発展を遂げているにもかかわらず他の分野で広く利用されることが少ない。また、横型技術の宿命で、縦型の専門分野の中に埋没して技術の本質が十分に解明されていなかつた。センシング技術が一層発展するためには、センシング技術自体の本質や構造を明確化し、それらを他分野で理解し活用できるように知識化しなければならない。すなわち、センシング技術のセンシング (Sensing of sensing) が非常に重要である。

そして、この方向の努力の成果が最近のセンシング技術の急速な進歩を支えている。つまり、個々のセンシング技術における知識が一般化され、手法の高精度化、高速度化を実現し、応用範囲を拡大した。さらに、対象とセンサに対する制約を最小にするために接触から非接触へ、そして

リモートセンシングへと手法の重点が変遷しつつある。それに応じて、より多くの知識が必要となり、また、その知識をベースにした知能化センシングシステムが増加してきた。私の研究室では対象表面の硬さを非接触ではかる非接触の触覚システムを開発したが、上述のトレンドを念頭においていた試みであった。

一方、見方を変えれば、本特集号のねらいも実は「センシング オブ センシング」ではないだろうか。広い技術のスペクトラムを持つ企業の中で、種々の問題を解決するために創出・開発された技術をセンシング技術という枠組みの下で集約する。それにより、固有技術とされていた技術を横型の体系の下で手法・特徴などを明確化し、ほかの分野への応用や一層の発展を期待しているとみることができる。

一見脈絡が無いようなセンシング技術が共通の概念の下で構造・手法などの特徴が明確化されるとともに、そこで得られた知見をもとに進歩が加速され、将来の発展が予測できる。これがセンシング技術を専門とするものの目標であり、喜びでもあろう。

また、センシング技術の幅の広さ、奥の深さが企業の技術基盤の深さと強さとを象徴していると思えるのである。そこに集積されている構造化された知識の質と量とを代表しているからである。したがって、センシング技術は企業の技術力をはかる適切なセンシング技術でもある。

イメージセンサの技術動向

坪内夏朗*
浅井外寿**
木股雅章**

1. まえがき

シリコンを基板材料としたイメージセンサは、シリコン超LSI技術の進歩とともに画素数が増大し、性能が向上し、この数年の間に撮像管に代わっていろいろな分野で急激に実用化が進んだ。特に、家庭用のビデオカメラ、ビデオムービーは、完全に固体撮像素子にとって替わられ、その生産台数は1989年で約710万台になった。同時に、従来の撮像管では不可能であった分野に、広範囲に使用されるようになってきている。すなわち、OA機器・FA機器・医用機器・宇宙機器・画像計測機器などである。

本稿では、シリコンを基板材料としたイメージセンサの最近の技術動向を概観した後、各分野への応用の例として当社で開発した、可視及び赤外イメージセンサの二、三を紹介する。

2. イメージセンサの技術動向

シリコン超LSI技術の中で、イメージセンサの技術進歩に最も寄与したのは微細加工技術であろう。しかし、MOS DRAMで代表されるシリコン技術があれば、イメージセンサが容易にできるかというとそうではない。当然イメージセンサに固有の技術が必要であり、特に感度に関係したデバイス構造、暗電流に関係した結晶材料、ゲッタリングプロセス、そしてスマートブルーミングに関係した構造、回路方式など、幾つかの技術開発が併せてなされた結果である。以下には、最近のイメージセンサの技術動向について述べる。

2.1 多画素化、高密度化

NTSC方式のビデオカメラ用には、40万画素が標準的になりつつある。最近は、この画素数を2/3インチから1/2インチのフォーマットで実現されつつある。超LSIの微細加工レベルでは、1μmレベルである。低価格、小形カメラ用に画素数は、25万画素程度であるが1/3インチフォーマットも出始めている。高品位カメラ用には、150万～200万画素が1インチフォーマットで実用化されつつある。

赤外イメージセンサについては、シリコンショットキー型で26万画素のカメラが実用されている。

リニアイメージセンサについては、ファクシミリなどのOA機器用に、2,048ドットで400DPI(Dot Per Inch)が標準的に使用されている。A3用には、5,000ドットのリニアセンサも実用化されている。ドットピッチは、7μm程度で

ある。エリアのイメージセンサに比べてチップが長く、超LSI技術が使い難く、微細加工の程度は2μmレベルである。学会レベルでは、600DPI、7,500ドットが発表されている。これらのリニアイメージセンサは、等倍読み取りであるが縮小光学系もコストなどの点で有利であり実用化されている。

2.2 高感度化

多画素化・高密度化が進むと、必然的に光検出器の面積が小さくなる。このため、光検出器の感度を向上させることとノイズを低減することが重要になってくる。前者の技術として、より微細加工技術の使用によって開口率を上げる積層構造をとり、光検出器にはaSi(アモルファスシリコン)などの光導電膜を使用するマイクロレンズの使用によって集光する、などがある。後者の技術として、より暗電流を低減させる構造、プロセスが試みられている。例えば、埋込みフォトダイオード構造の採用である。プロセス的には、ゲッタリング技術である。回路的には、これまでCDS(Correlated Double Sampling)法でリセット雑音が大幅に低下したが、更に低下させる手法も提案されている。これらの結果、現在家庭用カメラにおいて最低複写体照度2.5lx程度のものが市販されている。

2.3 多機能化

応用の拡大に従って、多機能化が進んでいる。まず、感度波長も可視から近赤外、中間赤外などもシリコン基板で実用化されるようになった。検出器としては、可視・近赤外はpn接合、近赤外・中間赤外はショットキーダイオード(特にPtSi-P型シリコン)である。

電子シャッタ機能も特殊なものは、1/10,000秒まで可能である。

また、高速読出し、特殊読出しが可能なイメージセンサも発表されている。

研究レベルでは、三次元固体撮像素子が発表されている。活性層を積層することによって、生体の視覚に近いインテリジェントセンサの可能性がある。

以上の技術動向を踏まえて、当社で開発した各種イメージセンサを以下に述べ、技術動向を具体的に示す。

3. 可視イメージセンサの技術動向

人工衛星を用いた地球観測は、地球環境監視、鉱物資源探査や、植生の調査などの重要な観測手段になっている。この分野での画像入力の方式は、従来、単素子の光検出器を用い、

ミラー走査と衛星の進行によって二次元画像を得ていた。しかし、画像の一点に割り当てる露光時間が短く、感度不足で高解像度化が難しいこと、機械走査系のための信頼性の低さなどの欠点があった。これに対して、リニアイメージセンサを用いるピッシュブルーム方式が用いられるようになり、高解像度化が進み出した。

この節では、宇宙開発事業団が1995年1~2月の打上げを目指し、開発中の地球観測プラットホーム技術衛星 (ADEOS) に搭載するために、当社が宇宙開発事業団との契約によって開発中の高性能可視近赤外放射計 (AVNIR) に使用予定の高解像度リニアイメージセンサ(図1)について紹介する。

AVNIRは、マルチバンド (Mu) とパンクロマチックバンド (Pa) の2種類の観測バンドを持ち、各々、地表分解能が16m、8mと異なる(表1)。このため、イメージセンサも5,000画素と10,000画素の2種類を使用する。画素寸法は、要求地表分解能、衛星高度及び光学系の焦点距離で決まるが、イメージセンサや光学系の製造技術に制限される。今回の場合、10,000画素を集積するためのイメージセンサチップ長と光学系解像度の観点から Mu, Pa 各々 16 μm と 8 μm を採用した。これにより、チップ長は約 80mm の長尺になるが、5インチ以上のウェーハ径を用いれば製造可能なレベルである。画素配列はスタガー配列であり、これを2行のCCDで並列に走査する構成である(図2)。パンクロマチックバンド用は、さらに各行のCCDを中心で2分割し、左右に読み出すことでCCDの駆動周波数を低くし、駆動波形を安定にすることで読み出し精度の改善を行っている。

マルチバンドでは、近赤外帯 (0.82~0.92 μm) の観測が要求されるが、この波長帯では光がシリコン基板中の深くまで侵入して電荷を発生するために、信号電荷がシリコン基板中を拡散する。この結果、画素配列ピッチを小さくしても所望の解像度が得られなくなる。これは、従来の民生用リニアイメージセンサと大きく異なる点である。この対策として、第1に画素配列をスタガー配列とした。これにより、隣接画素間ピッチが従来のリニア配置の2倍となる。さらに、シリコン基板深部で発生する電荷をフォトダイオードに到達する以前に再結合させるためのシリコン基板条件の最適化を行っている。また、焦点面でのディフォーカスも高解像化の妨げになるため、チップ表面の反りを抑えることが重要になる。これに対

しては、パッケージ構造の検討を行った結果、80mmのチップ長にわたって $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内の平面度が実現可能になった。

通常のリニアイメージセンサの場合、大きな飽和信号レベルと光源調整可能な点からブルーミング対策は特にとられないが、地球観測の場合は、季節変動・緯度変動によって被写体照度の変化範囲が広く、さらに雲からの反射光による妨害

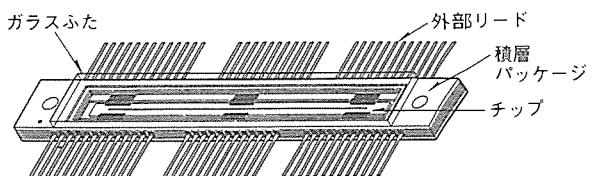
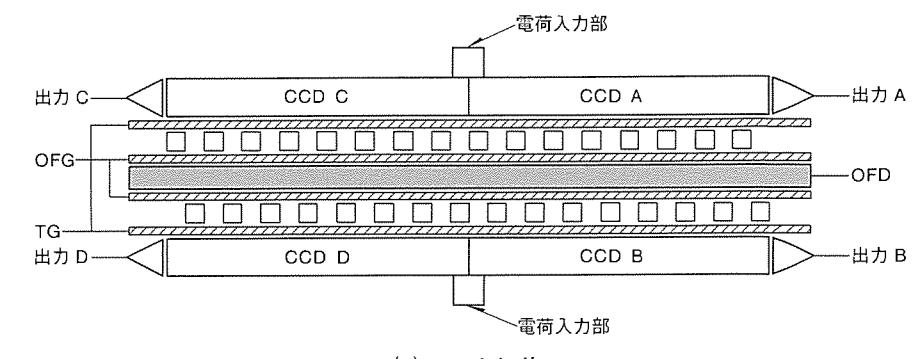


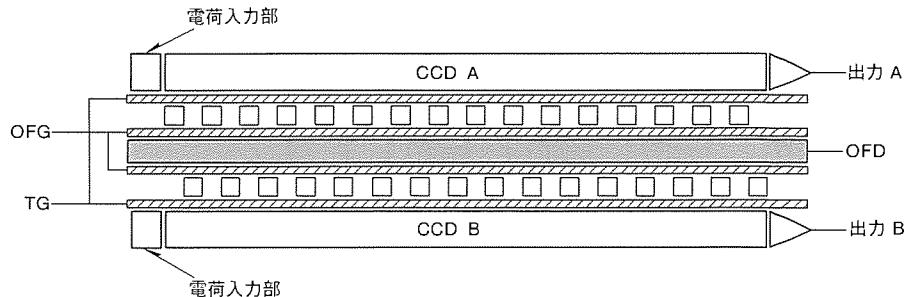
図1. AVNIR搭載用イメージセンサの外観

表1. AVNIRの観測諸元

	マルチバンド (Mu)	パンクロマチックバンド (Pa)
衛星高度(km)	796.75	
視野角(deg)	5.7 (80km相当)	
観測波長(μm)	中心波長	バンド幅
	ch.1 0.45	0.1
	ch.2 0.57	0.1
	ch.3 0.67	0.1
瞬時視野角(μrad)	20	10
	(16m相当)	(8m相当)
撮像周期(ms)	2.4	1.2
有効画素数	5,000	10,000
画素寸法(μm)	16	8
信号出力数	2	4



(a) Pa センサ



(b) Mu センサ

図2. AVNIR搭載用イメージセンサのブロック図

を考慮して、ブルーミング抑制機能が必要になる。可視イメージセンサではウェル構造を用いた縦型オーバフロードラインが使用されるが、この方式は近赤外帯の感度を著しく低下させるので、このセンサでは横型オーバフロードラインを採用している。

4. 赤外イメージセンサの技術動向

4.1 ショットキーバリヤ赤外イメージセンサ

赤外イメージセンサの分野では、1980年代に入ってシリコンVLSI製造技術を利用して作ることのできるショットキーバリヤ赤外イメージセンサが急速に進歩し、実用化レベルのものが入手可能となっている。当社は、1980年にショットキーバリヤ赤外イメージセンサの開発に着手し、これまでに表2に示すような素子を開発している。表に示した素子のうち、512×512画素のCSD(Charge Sweep Device)方式⁽¹⁾を用いた赤外イメージセンサ⁽²⁾は、当社の“サーマルイメージジャIR-5120C”に搭載され、いろいろな分野で活躍している。また、表中最後に示した4,096画素×4バンドのIRCCD(InfraRed Charge Coupled Device)⁽³⁾は、1992年に打上げが予定されている地球資源探査衛星(ERS-1)

表2. 当社が開発した
ショットキーバリヤ赤外イメージセンサ

画素数	方 式	チップサイズ (mm)	画素寸法 (μm)	開口率 (%)	開発年
32×64	IL-CCD	6.12×7.12	133×80	19	1981
32×64	IL-CCD	7.12×7.12	133×80	29	1982
256×256	IL-CCD	10.0×10.0	37×31	25	1983
64×64	MOS	6.12×7.12	80×65	58	1983
100×100	MOS	6.40×7.40	50×50	66	1985
512×512	CSD	16.0×12.0	26×20	39	1987
4,096×4	CCD	49.4×7.00	10×10	100	1987

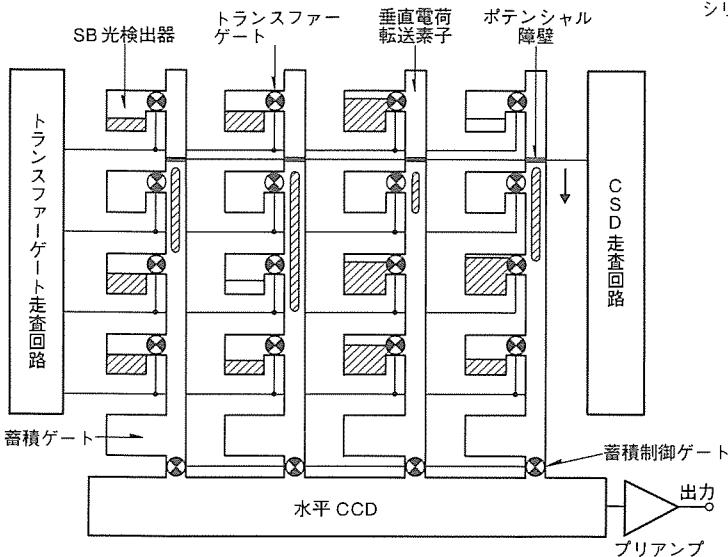


図3. CSD方式のイメージセンサの構成と動作

に搭載される短波長赤外放射計に用いられるもので、既に衛星搭載仕様の素子の開発を完了している。

ここでは、実用化レベルにあるショットキーバリヤ赤外イメージセンサの代表的な素子として、上に述べた512×512IRCSDと4,096×4 IRCCDを紹介するとともに、これらの素子に用いられているキーテクノロジーについて説明する。

4.2 サーマルイメージジャ用赤外イメージセンサ

(26万画素)

この素子は、3~5 μm帯の熱撮像を行うために開発されたものである。表示装置としては、テレビモニタを使用することを想定し、画面のアスペクト比を4:3とするとともに、標準テレビフレームレート(30フレーム/秒)の高速動作が可能なように設計されている。この素子は、F/1.2の光学系を用いた場合の最小検知温度差が約0.1Kであり、この高い性能を実現するために、信号読出し方式や検出器部分に幾つかの工夫をしている。

この素子では、高解像度化に伴う感度低下の問題を図4に示す当社独自のCSD方式⁽¹⁾という読出し方式を採用することによって解決している。CSD方式は、画素から垂直電荷転送素子への信号の転送を1ラインごとに行うラインアドレス方式で、垂直電荷転送の方法を工夫して転送電荷量を非常に大きくしているので、画素に占める垂直電荷転送素子の面積を小さくすることができ、開口率(画素に占める有効検出器面積の割合)を改善することができる。26 μm×20 μmの画素の場合、2 μmの設計基準では従来方式に対するCSD方式の開口率の改善は約50%で、この素子ではCSD方式の採用により、従来方式の約1.5倍の感度改善が達成できたことになる。

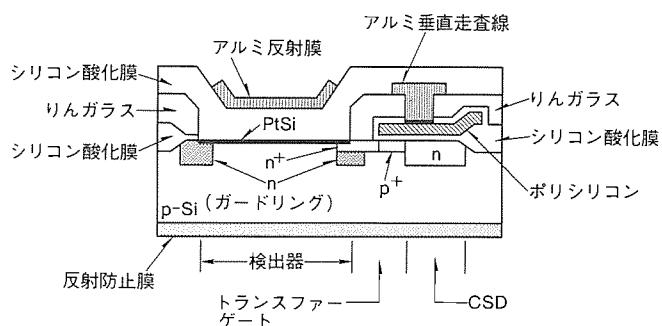


図4. 512×512 IRCSDの画素断面構造

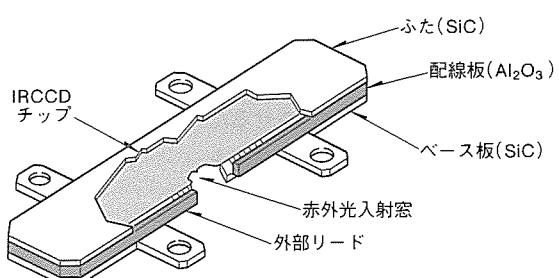


図5. 4,096×4 IRCCDの実装

図4は、画素の断面構造である。検出器としては、白金シリサイド(PtSi)とp型シリコンのショットキーバリヤダイオードを用いている。PtSiの薄膜化は、検出器の量子効率向上に大きな効果がある。例えば、膜厚を80nmから10nmにすることによって、約10倍の改善が達成できる。高性能のショットキーバリヤ赤外イメージセンサの実現には、数十原子層レベルの非常に薄い金属電極を均一性良く形成する技術が不可欠である。

検出器の量子効率は、光学的共振構造を用いることによっても改善できる。この構造は、図4に示すように、PtSi膜上の絶縁膜(SiO_2)とアルミ薄膜によって構成される。この構造では、素子裏面(図4の下側)から入射した光のうち、PtSi膜で吸収されずに透過したものを、アルミ薄膜で反射し再利用することができるため、量子効率が改善される。

512×512 IRCSDでは、以上に述べた感度改善策により、赤外イメージセンサとして最高レベルの性能を実現しており、この素子を用いたカメラの応用分野も急速に広がりつつある。

4.3 衛星搭載用赤外イメージセンサ

(4,096画素×4バンド)

この素子は、衛星の進行と垂直方向のみ電子走査を行うプッシュブルーム方式の短波長赤外放射計のために開発されたものである。検出器には、4.2節に示した512×512 IRCSDと同じPtSiショットキーバリヤダイオードであるが、資源探査に有効な波長は1.5～2.5 μm の短波長赤外域で、この素子ではこの波長域の中の四つの狭帯域のバンドが検出できるよう干渉フィルタによる分光を行っている。

宇宙用センサとして、この素子の開発の重要なポイントとなったのが、高精度・高信頼性実装技術である。この素子は、4バンドのアレーを同一チップ上に集積しているため、チップサイズは通常のLSIでは考えられないほど大きくなつたが、目標とする空間分解能を実現するためには、この大きなチップの反りを10 μm 以下に抑える必要があった。また、この素子の冷却にはスターリングサイクル冷凍器が用いられるが、冷凍器の寿命が十分でないため、素子は必要時のみ冷却されるという運用形態をとるため、4,500回以上熱サイクルに耐えなければならないという厳しい信頼性が要求された。こうした厳しい要求にこたえるため、図5に示すようなシリコンカーバイト(SiC)－アルミナ(Al_2O_3)－シリコンカーバイト(SiC)の三層構造のパッケージと高精度の実装技術を開発している。

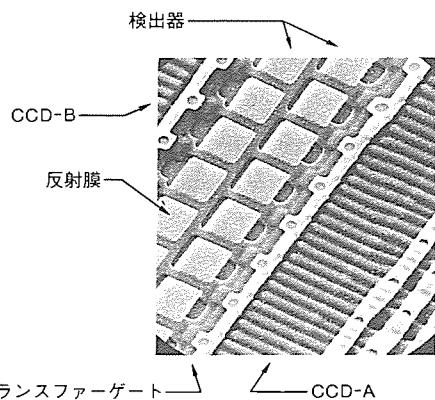


図4. 4,096×4 IRCSDの画素の拡大写真

図6は、画素部分の拡大写真である。図に示すように、検出器はスター配列されており、実質開口率が100%となるよう設計されている。検出器からの信号は、検出器両側に配置した二つのCCDを通して読み出される。

現在、この素子は放射系システムに組み込まれ、打上げに向けて順調に調整が進められているが、既にこれに続く幾つかの衛星搭載用赤外イメージセンサの開発がスタートしており、今後の発展が期待できる。

5. むすび

当社で開発したイメージセンサの具体例に最近のイメージセンサの技術動向を概観した。画素数の増大と性能の向上によって広い応用分野を獲得しつつあるが、今後共、超LSIの技術進歩をベースにして、この傾向は続くと考えられる。しかし、イメージセンサ固有の技術、すなわち感度、ノイズなどの課題はますます難しくなると予測され、材料・構造・回路方式も含めブレークスルー技術が必要となるであろう。

参考文献

- (1) Kimata, M., Denda, M., Yutani, N., Tsubouchi, N. : A 480×400 Element Image Sensor with a Charge Sweep Device, Tech. Digest of ISSCC, 100～101 (1985)
- (2) Kimata, M., Denda, M., Yutani, N., Iwade, S., Tsubouchi, N. : A 512×512-Element PtSi Schottky-Barrier Infrared Image Sensor, IEEE JSSC, SC-22, 1124～1129 (1987)
- (3) Denda, M., Kimata, M., Iwade, S., Tsubouchi, N. : 4×4096- Element SW IR Multispectral Focal Plane Array, Proc. SPIE, 819, 279～286 (1987)

熱式空気流量センサ

谷本考司* 大谷七郎**
有吉雄二* 山川智也**
別所三樹生*

1. まえがき

自動車用エンジンにとって、排気ガスの浄化、動力性能の向上、燃費の改善等は重要な課題であり、マイクロコンピュータを始めとする電子部品の性能向上・低コスト化・信頼性の向上に伴い、エンジンの電子制御の採用が急速に拡大してきた。電子制御式燃料噴射システムの基本的な役割は、エンジンが吸入する空気量と燃料の混合比を精度良く制御してエンジン特性を最適な状態に保つことにある。エンジンの空燃比制御において、吸入空気量を測定するための空気流量センサは重要な構成パーツとなっており、空気流量検出方式やセンサの性能で燃料噴射システムを差別化することができる。

この自動車用空気流量センサの要求仕様は、燃料噴射システムやエンジンにも依存するが、一般的に表1に示すような広い温度とダイナミックレンジ、及び質量流量計測を必要とされる。また、過酷な条件下で経時変化が小さく、脈動流に対しても測定可能な応答性が要求される。

ここで紹介する熱式空気流量センサは、応答性が良く、直接質量流量を検出できることを特長としており、基本的には大気圧補正を要しないため、比較的低コストのシステム構築が可能で急速に普及しつつある。本稿では、まず最初に熱式空気流量センサの構造と原理について説明した後、このセンサにとって重要な質量流量検出精度と流量変動に対する応答性について述べる。

2. 構造

図1に、ホットワイヤタイプ(H/W)の構造を示す⁽¹⁾。発熱体となる熱線は、径が70 μmの白金線から成り、メタリングダクト内にコの字状に張り付けてある。吸気温度よりも120°C高くなるように設定している。温度センサには、アルミナセラミック基板上に白金薄膜を形成したものが用いられ、精密抵抗とともにメタリングダクト内に構成している。熱線に付

表1. 自動車用空気流量センサの要求仕様

動作温度範囲	-30~110°C
動作電圧範囲	8~16 V
ダイナミックレンジ	1:80 以上
精度(対指示値)	± 3 % 以内
圧力損失(最大)	1 kPa
耐久性	20万km以上走行で無補修
耐振性	20G (20~200Hz)

着するじんあい(塵埃)による特性劣化を防止するために、エンジンキーオフ後、一定条件下で1秒間熱線を1,000°Cに加熱して付着物を焼尽させるバーンオフ回路を付加している。発熱体に白金細線を用いているため、応答性に優れているという特長を持っている。

なお、ホットフィルムタイプ(H/F)は、発熱体に温度センサと同様な平板形の白金薄膜抵抗体を用いている。図2に示すように、アルミナセラミック基板上に蒸着した白金薄膜を、パターニングによってくし(櫛)形状の抵抗体とし、所望の抵抗値に調節している⁽²⁾。その後、保護膜を形成し、電極リード線を接続する。ホットワイヤに比べ、応答性では劣る反面、パターニングによって比較的高い抵抗値を形成できるため消費電流が少なく、小型軽量化が可能である。また、発熱体形状を薄板にして、上流側から見た投影面積が小さくなるように、メタリングダクト内に設置することで付着物の堆積量が低減し、汚損特性に優れた構造となっている。

以上のように、熱式空気流量センサは、メタリングダクト内にホットワイヤやホットフィルム等の発熱体と温度センサが取り付けられているだけであって空気抵抗が小さく、また可動部もないため信頼性も高い。

3. 動作原理

熱式エアフローセンサは、白金、ニッケル等からなる感温

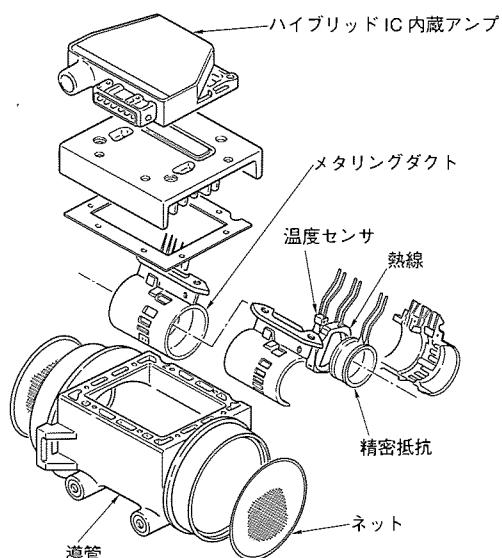


図1. 热式空気流量センサ (H/W) の構造

べ最も大きいため、この変化が流量精度へ大きな影響を与える。

4.1 温度特性

空気温度23°Cのときの流量特性を基準とし、空気温度が-30~80°Cまで変化したときの流量誤差を図5に示す。例えば、流量40g/s以上の流量域で、誤差がほぼゼロになるように温度補償を行ったホットワイヤの場合、図5から明かにように20g/s以下の低流量域で流量誤差が生じる。これは、レイノルズ数44を境に熱線後流にカルマン渦が発生し、熱伝達の様相が大きく変化するために生じる。つまり、レイノルズ数が小さくなるほど式(6)に示すべき指数nが減少するため、係数K_Tの温度係数が流量に応じて変化することに相当する。

なお、上記したような流れの遷移領域を計測流量範囲に含まないホットフィルムの場合、放射熱伝達の温度依存性が流量誤差を招く主な原因となる。放射熱伝達は、絶対温度の4乗に比例するため、温度に対する変動が大きく、また流量が小さいほど放射熱伝達の影響が大きくなることから低流量で流量誤差が生じる。

4.2 圧力特性

上述したように、空気の熱伝導率、粘性係数等は、圧力に対してほとんど変化しないため、図6に示すように標高3,000m相当の気圧変化(760→550mmHg)に対しても流量誤差は小さく、熱式空気流量センサが質量流量計としての機能を果たしていることが分かる。

4.3 湿度特性

乾き空気の流量特性を基準としたときの湿度変化の影響を図7に示す。湿度が高くなるほど、流量誤差がプラス方向に増大する特性を示している。

水蒸気を含む湿り空気の熱伝導率は、単純なモル分率に従わず、乾き空気より熱伝導率が低い水蒸気が混入されると、湿り空気の熱伝導率は増大する特性を示す⁽⁴⁾。このように、湿り空気の熱伝導率が水蒸気量の増加に伴って増大するのに対して粘性係数は反対に減少するために、湿度が高くなると相乗効果的に流量誤差となって現れる。

5. 応答特性

センサの応答性は、発熱体の熱時定数のみならず定温度差制御回路の回路定数にも依存する。例えば、発熱体の熱時定数をτ、一次遅れのオペアンプの時定数をM、直流フィードバックゲインをK₀とすると、流速変動に対する周波数応答特性は次式で近似できる⁽⁵⁾。

$$f_w = (K_0 / M \tau)^{0.5} \quad (11)$$

ただし、f_wは共振周波数を示す。また、発熱体の熱時定数τは熱容量Cに比例し、熱伝達率hと表面積Sに反比例する。

$$\tau = C / hS \quad (12)$$

上式から明かのように、流量が大きいほど熱時定数は小さくなる。例えば、幅x、厚さt、長さLの寸法をもつ平板形発熱体の熱時定数は、熱伝達率hがx^{0.5}に反比例することから次式のような式で表される。

$$\tau = c_0 t x^{0.5} \quad (13)$$

ただし、c₀は比例定数を示す。上式から熱時定数は、発熱体の長さLに依存せず、発熱体の厚さが重要なパラメータとなることが分かる。図8は、一定流量(50g/s)流した状態で、閉ループ回路に正弦波状の電圧を加えて測定した周波

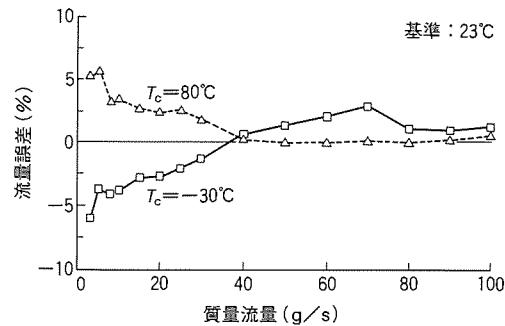


図5. 温度特性(湿度0%, 圧力1atm)

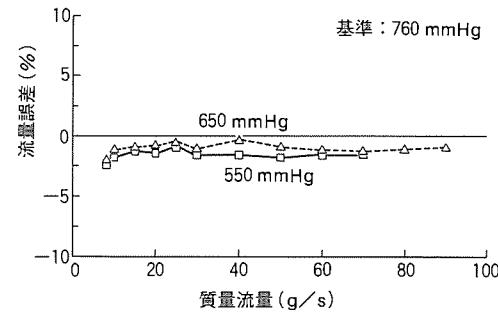


図6. 圧力特性(温度23°C, 湿度0%)

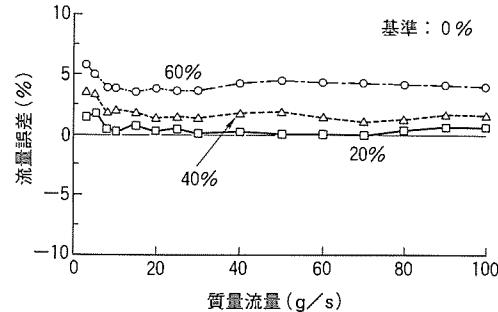


図7. 湿度特性(温度23°C, 圧力1atm)

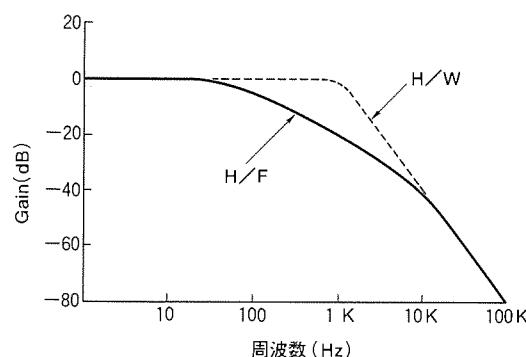


図8. 流量変動に対する周波数応答(Q_m=50g/s)

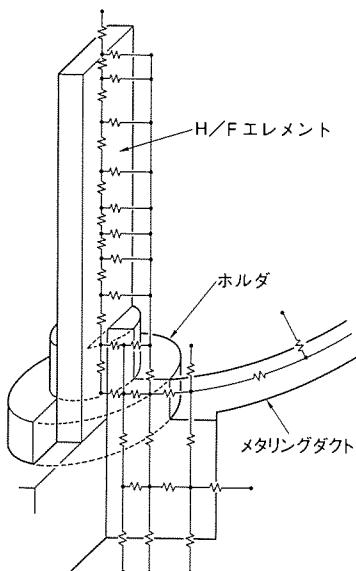


図9. 热回路網モデル (H/F)

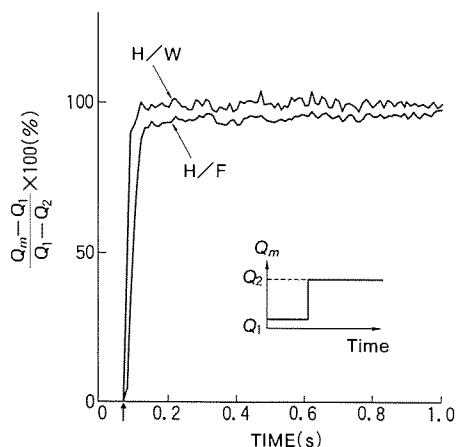


図11. ステップ応答特性 (実測結果)

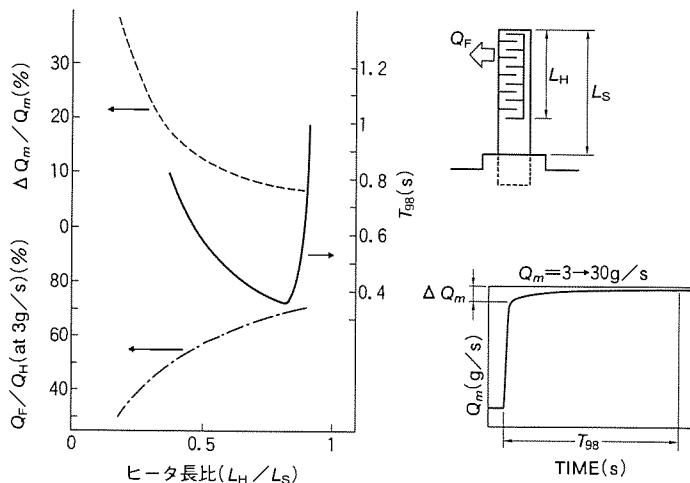


図10. 热損失特性と応答特性の関係 (シミュレーション結果)

数応答から計算によって求めた流速変動に対する周波数特性を示す。周波数10kHz以上で利得が劣化するのは差動アンプの一次遅れの影響である。

なお、ここで示した周波数応答は、比較的小さい流量変動に適応できるもので更に大きい振幅の変動の場合、非線形特性や発熱体から支持部への熱伝導損失特性等の影響を考える必要がある。流量変動に伴いホットフィルムエレメントのヒータ面(パターニングにより抵抗を形成した面)平均温度は定温度差制御回路により、ほとんど変化しないのに対して、エレメント支持部近傍の温度がその熱時定数のオーダーの時間で変化するために応答性が悪化する。

この熱損失特性と応答性の関係を明確にするため、図9に示すような熱回路網モデル(熱容量は図示していない)を考え、熱回路方程式と閉ループ回路の特性式を連立してステップ応答のシミュレーションを行った。ホットフィルムエレメントの厚みとメタリングダクト内突き出し長さ L_s を一定

の条件でヒータ長 L_H を変えたときの熱損失特性とステップ流量変化に対する応答特性の関係を図10に示す。図中 ΔQ_m は、応答曲線の傾きが急変する時点での流量誤差、また T_{98} は流量変化量の98%に要する時間を示す。

図10から、ヒータ長 L_H を長くするほど発熱量 Q_H に対する熱伝達量 Q_f の割合(熱損失効率)が増大し、また同時に流量誤差 ΔQ_m と98%応答時間が減少し、応答性が向上することが分かる。ただし、ヒータ長が長くなるほどその効果も減少し、一定値を越えると逆に98%応答時間が増大する傾向を示す。よって、上記条件ではヒータ長比 $L_H/L_s=0.7\sim0.8$ が最適値と考えられる。

図11にステップ状に流量が変化したときのホットワイヤとホットフィルム($L_H/L_s=0.8$)の応答特性を示す。流量変化量を100%として表している。ホットワイヤに比べ、立ち上がり特性に少し差があるものの要求仕様を満足する応答特性が得られた。

6. むすび

自動車用熱式エアフローセンサの構造、動作原理、及び質量流量検出能力と応答特性について述べた。空気の湿度と温度変化により若干の流量誤差が生じるが、圧力に対しては高精度の質量流量検出が可能であることが明確になった。

ホットフィルムタイプは、発熱体から空気中への熱損失効率を上げることで更に応答性の向上が期待できる。また、構造が比較的シンプルであり、また設計自由度が高いことから、自動車以外での広い範囲での流体計測や空調機制御などの分野への応用拡充が考えられる。

参考文献

- (1) Sauer, R. : Hot Wire Air Mass Meter-A New Air Flow Meter for Gasoline Fuel Injection Systems, SAE Paper 800468
- (2) 緒方一雄、松本和久、谷川秀之、尾中和弘：高速熱応答薄膜白金温度センサ、National Technical Report, 34, No.4 (1988-8)
- (3) Hilpert, R. : Forsh. Gebiete Ingenieurw., 4, 215 (1933)
- (4) 北村健三、小林淑男、三浦哲男：サーミスタ温度センサとその応用、電子材料 (1980-5)
- (5) 斎藤隆雄：定温度型熱線風速計の試作、東京大学宇宙航空研究所報告, 11, No.1(A) (1975)

レーザによる複合型異常センシング技術

中島利郎* 土井 博*
亀井光仁*
八木康史*

1. まえがき

最近の半導体技術、信号処理技術の進展に伴い、計測技術の進歩には目覚ましいものがある。そのなかでも、光計測技術に関しては、半導体レーザ、光ファイバといった光学部品等の周辺要素技術の高機能化によって、光学システムの構成の簡易化、小型化及びフレキシブル性が強化され、光計測技術の幅広い分野への展開が図られている。しかしながら、産業分野への適用を考えると、まだ十分に普及しているとはいえない面がある。このような状況をふまえ、兵庫県は県下の光技術の振興を目的として、昭和63年度から3年間の計画で、“光センサを応用した産業環境・医療検査システムの開発”をテーマに研究プロジェクトを発足させた。当社もこれに参画し、“異常環境検出用レーザ複合センサシステムの開発”を担当している。

当社の担当テーマは、各種プラントなどの産業環境における異常検出の自動化を目的としたものである。このテーマでは、従来から我々が提唱しているレーザを応用した複合計測の概念⁽¹⁾をもとに、移動型の異常検出用複合計測システムを構築する上での要素技術として、火災検出及び検出システムの移動に必要なセンシング技術の開発を行った。

本稿では、兵庫県委託研究の概要を紹介するとともに、このプロジェクトで開発した半導体レーザによる遠隔ガス検出技術及びレーザ投光法による環境認識技術について報告し、複合計測及び今後の展開について述べる。

2. レーザ応用センシング技術

当社の担当テーマでは、産業環境における異常状態の早期発見を目的とした複合計測システムの実現に不可欠な要素技術であるセンシング技術の開発を行った。ここでは、産業環境で発生する異常現象の代表例である火災を早期発見する移動型の検出システムの実現を目的とし、火災発生直前に発生する可燃性ガスを光学的に検出するガス検出技術を開発するとともに、検出システムの移動に必要な環境認識技術の開発を行った。開発した検出技術の詳細について、検出原理、システム構成及び検出性能について以下に紹介する。

2.1 半導体レーザ応用ガス検出技術

2.1.1 検出対象ガス

火災直前に発生する可燃性ガスの技術調査の結果、高分子材料の熱分解過程において、常に二酸化炭素(CO₂)や可燃

性ガスとしてメタン(CH₄)等が発生することが判明した。これらの分光吸収スペクトルを実測した結果をもとに、既に実用化されている半導体光源の中で、価格・重量・ユーティリティ等の面から産業分野への適用が容易に実現できるものを検討した。この結果、この研究ではCH₄を検出対象とし、光源として半導体レーザ(LD)を用いた分光応用ガス検出に関する基本的技術を確立することとした。また、CH₄の検出に当たっては、火災直前の熱分解過程におけるCH₄の発生量に関する調査結果をもとに、火災の早期発見に必要な検出感度として100ppmを設定した。

2.1.2 検出方式

ガスの検出に当たっては、現場において検査領域が広範囲にわたることが予想されるとともに、移動型の検出システムではプラント内の任意の位置で検出可能であることが要求される。これらの要求を満足するため、LD光を検査空間内に投光するとともに、投光方向前面の壁面から発生する散乱光を集光し、光路上のガスの吸光現象による散乱光の特定スペクトル成分の吸収を検出することによって、ガス漏れの有無を遠隔的に検出する方式を開発した。この方式の構成を図1に示す。

このような遠隔検出方式では、壁面からの散乱光を光源として利用することから、壁面の反射率変化等のガス以外の要因による受光強度変化も信号として誤検出するという問題点があった。一方、壁表面の反射率の分光分布は、一般に波長に対して緩やかな変化を示すことから、近接した波長をもつ光に対して反射率は等しいと考えられる。したがって、ガスの検出に当たっては、ガスの吸収スペクトルに同調した波長を持つ光をガス検出用に、この波長に近接しかつガスの吸収の影響を受けない波長をもつ光を参照用に用いる2波長方式

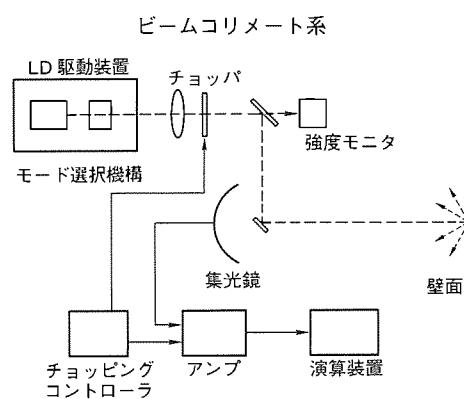


図1. ガス検出方式の構成

をとることにより、反射率変化の影響を除去可能と考えられる。2波長の光を取り出すに当たっては、図2に示すように、LDの発振モードのマルチ性に着目し、一つの縦モード光を吸光スペクトルに同調させて検出モードとして用いるとともに、隣接する縦モード光を参照モードとして用いる新たな方式を開発した。

信号処理では、LDの発光強度のゆらぎが測定結果に及ぼす影響を除去するため、LD光を常にモニタし、散乱体からの散乱光受光強度とモニタ強度との比を測定量として、検出モードと参照モードとの両モード間で比較する方式とした。

2.1.3 装置構成

この装置は、LD光を投射光するための光学系と、信号処理系から構成されている。光学系の外観を図3に示す。

(1) 光学系

光学系は、LD光を投射するための投光部と、構造体からの散乱光を検出するための受光部とから構成されている。投光部は、LD駆動制御部と縦モード分離機構部とから構成されており、以下に詳細について紹介する。

(a) LD駆動制御部：LDをガス検出用の光源として用いるに当たっては、発振強度及び発振波長の安定性が要求されるとともに、CH₄の吸光スペクトルへの同調機能が必要となる。LD発振光の安定性に大きく作用する要因に、温度、駆動電流がある。目標濃度のCH₄を検出するためには、CH₄の吸光スペクトル幅を考慮すると、温度、駆動電流に対し、それぞれ±0.01°C、±1 μAの安定度が必要と考えられる。

これに対し、ここでは、2段ペルチエ素子による温度制御、PID制御方式による電流制御の採用により、温度、電流に対するそれぞれの目標性能を実現した。また、発振波長を変化させるため、温度、電流可変機能をもたせている。図4にCH₄の吸光スペクトルと、同調後のLDの発振スペクトルを重畠させて示す。測定の結果、0.01nmの精度で同調できていることが確認された。また、LDがもつ一つの縦モード光のスペクトルを測定した結果、スペクトル

幅は0.002nmであった。これは、CH₄のもつ吸光スペクトルの半値幅と比較して十分狭いことから、ガスによる吸光現象に対して感度の高いことが期待される。

(b) 縦モード分離機構部：一つのLDがもつ二つの縦モードを、検出用・参照用として利用するには、隣接する二つの縦モードをいかに明確に分離できるかが重要なポイントとなる。ガスによる吸光度を効率良く検出するには、少なくとも隣接縦モード光のピークパワーを1/40以下に抑える必要がある。この方式では、波長分離素子としてエタロンを用いた。縦モードを選択的に分離するに当たっては、回転によってエタロン長を変化させ、エタロンの透過波長を任意に選択する方式とした。図5に示すように、エタロンを透過した光は隣接する縦モードのピークを1/50に抑制できており、ガス検出に当たって十分な分離特性が実現できていると考えられる。

(2) 信号処理系

信号処理系に必要な検出分解能を、CH₄の吸光度の実測値をもとに試算した結果、目標濃度(100ppm、距離5m)のCH₄の検出を実現するには、信号処理系全体において1/1,000の分解能が必要であることが明らかとなった。さらに、このシステムを適用する環境状況及び検査領域を考慮すると、受光できる散乱光の強度は20nW程度(検出素子のNEP (Noise Equivalent Power)の5,000倍)になることが予想される。このため、信号処理系では、NEPレベルまでノイズを低減することが最大の課題となる。ここでは、検出素子の冷却による暗電流の低減、光の変調による外乱除去、信号ラインの誘導ノイズ対策の徹底、ロックインアンプの採用によるフィルタ効果の強化等の対策を施した。この結果、信号処理系のアンプ出力のノイズ幅を最大0.3 μVまで抑制できた。これを入力光強度に換算すると5×10⁻¹²Wとなる。一方、信号処理系のもつ周波数帯域において、検出素子のNEPが4.2×10⁻¹²Wとなることから、信号処理系全体で検出素子の持つNEPと同等レベルまで、ノイズを低減できたことを確認した。

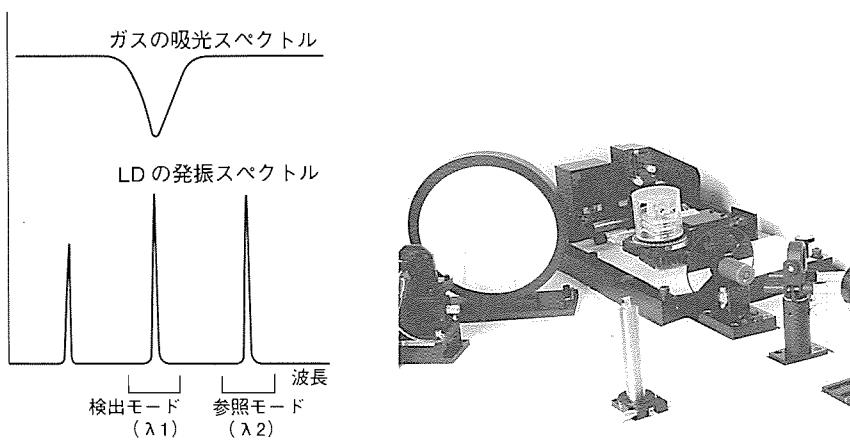


図2. 2波長方式の原理

図3. ガス検出装置光学系の外観

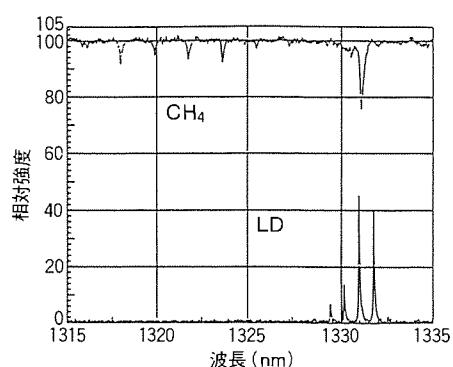


図4. LDの同調特性

以上の結果から、装置を構成する各要素について、ガス検出を行うに当たって満足する性能を持っていることが明かとなつた。

2.1.4 檢出感度

ガスセル内に注入した CH_4 を用いた模擬実験により、この方式がもつガス検出感度の確認を行った。確認に当たっては、散乱面までの距離を 5 m と設定した。測定では、前述したように、モニタ光強度と受光強度の比を測定量とし、これを検出モード、参照モードで交互に測定し、得られた測定量の両モード間の比あるいは差の変化を検出することにより、ガス検出を行う。測定結果を図 6 に示す。同図の縦軸は、モニタ光強度と受光強度との比の測定結果を示しており、実験では、参照モード、検出モードを交互に繰り返しながら、検出モードの途中において、 CH_4 (100 ppm 相当) をガスセル内に封入した。測定結果から、検出モードでは CH_4 の注入により、測定量のレベルに変化がみられる。一方、参照モードでは、 CH_4 の注入にかかわらず測定量のレベルに変化がみられない。つまり、 CH_4 の注入により、両モード間の測定量のレベル差に変化が生じておらず、しかも変化前後のレベル差には有意差があり、分離可能であることから、この検出方式において 100 ppm レベルのガス検出が基本的に可能であることが実証された。

また、この方式に対しての最大の外乱要因の一つに、散乱面状態の変化による受光強度変化がある。この検出方式では、この強度変化の影響を除去するため、ガス検出用の光と、参照用の光を用いる2波長方式をとっており、30nWから3μWまでの受光強度変化に対して、その影響を受けずに安定した測定結果の得られることが確認された。

以上の結果から、この方式によって 100 ppm の CH₄ の安定した検出が、基本的に可能であることを確認することができた。

2.2 環境認識技術

検出システムを移動する方法としては、移動ロボットへの搭載が考えられる。この移動ロボットを誘導するためには、詳細に物体形状を計測する必要はなく、作業環境内の特徴的構造物を注視することで位置情報を獲得し、さらに障害物の

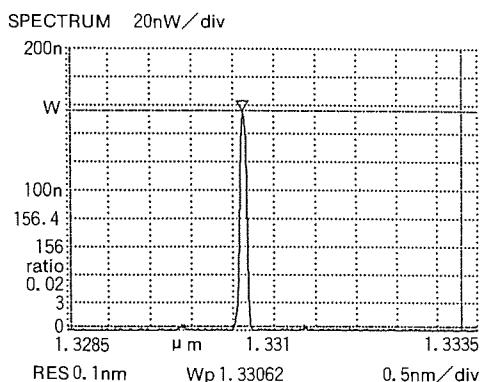


図5. 縦モード分離特性

発生などの変化を検出することが必要である。このような機能実現に、大局的な情報獲得の面で優れた視覚センサは、有効なセンサと考えられる。

視覚センサには、受動方式と能動方式がある。受動方式は、ステレオ視など三角測量の原理を用い、位置を計測する方式である。これは、環境内を大局的に把握する上で優れているが、観測されたエッジ間の状態（通路、壁、障害物など）を判別するには向きである。それに対し能動方式は、光ビームを投光することで、これらのエッジ間の情報を計測できる点で優れた方法である。

そこで我々は、能動・受動の両方式を融合し、環境内構造物の位置情報の推定と、構造物の面の同定機能をもつ方式を提案する。ここでは、この方式を用いた実験結果について報告する。なお、作業環境は建屋内の通路とする。

2.2.1 認識方式

受動方式では、従来から提案の全方位視覚センサを用い、周囲パノラマ状に見える柱等の垂直エッジから、移動しながら位置情報の獲得を行う移動ステレオ視⁽²⁾を利用する。位置情報は、柱等の垂直エッジ成分を特徴量として、連続画像間での特徴量の移動軌跡とロボットの移動量とから求める。

図7(a)に示すように鉛直方向, カメラ光軸をZ軸, 進行方向をY軸とするカメラに固定したO-XYZ 3次元座標系を考える。この時距離計測を行う任意の点P(X, Y, Z)に対する画像面上の写像点 $p'(x, y)$ には, 次式に示す関係がある。

よって Y 軸方向に移動しているときの任意の時刻 t_1, t_2 における方位角 θ_1, θ_2 と移動量 $(0, L, 0)$ を計測することで、三角測量によって時刻 t_1 から見た X_p, Y_p の位置情報を次式で算出する。

$$\left. \begin{aligned} X_p &= -L(\tan \theta_2 - \tan \theta_1) \\ Y_p &= -L_v \tan \theta_1 / (\tan \theta_2 - \tan \theta_1) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \quad (2)$$

なお、詳細については、参考文献(2)を参照されたい。

能動方式では、スリット光投影方式を用い、受動方式で得られる位置情報の間を補間し、壁や障害物などの面の同定を行なう。この面同定により、衝突のおそれがある障害物を発見

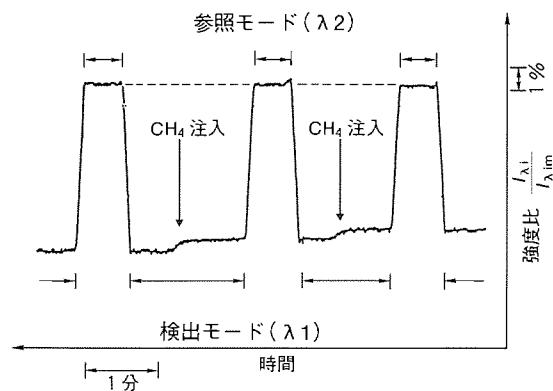


図6. ガス検出結果

し、障害物の大きさなどを推定することが可能となる。

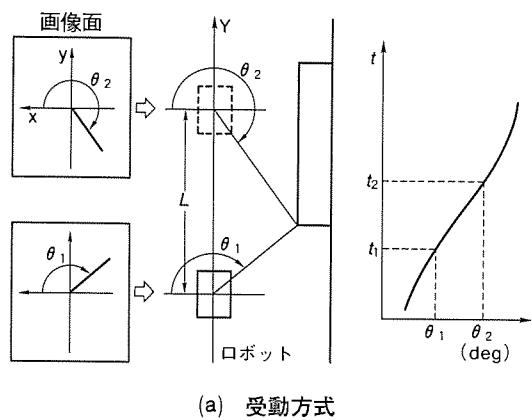
建屋内の壁面は、平たんである場合が多い。そこで面同定は、平たんな面 $k_x X + k_y Y + k_c = 0$ にスリット光を投影した場合、その投影線の方位角 θ がロボットの移動に伴い、次式に示す軌道を描くことを利用する。ここで、 L_s はスリット光一カメラ間距離、 θ_s はスリット投影方位角である。

$$k_y L_s \tan^2 \theta + (2k_y L_s \tan \theta_s + k_x L_s + k_c) \tan \theta + (k_y L_s \tan^2 \theta_s - k_c \tan \theta_s) = 0 \dots \dots \dots (3)$$

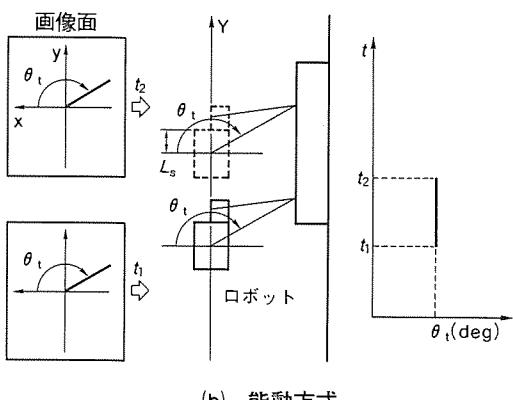
すなわち、式(3)の関係を満たす場合は建屋内の壁面、式(3)の関係を満たさない場合は障害物ないし異常状態と判断する。また、ロボットと観測されたエッジ対の間に他のエッジがなく、さらにスリット光の投影像が観測できない場合は、その間は通路であるとする。例えば、図7(b)に示すように平たんな面に沿ってロボットが移動する場合、スリット光投影線の方位角は変化せず、直線状の軌道を描く。そこで廊下に沿って移動する場合は、ロボットの移動によって光投影線の方位角が変化しないかを観測することで、壁面の同定を行う。ここで、スリット光は1フレームごとに投影し、非投影時と投影時ともに存在するものは垂直エッジ、投影時のみ存在するのは投影線として、光投影線と環境内の垂直エッジ像の区別を行う。

2.2.2 センサ構成と実験結果

実験に用いたセンサの構成を図8に示す。このセンサは、全方位視覚センサ部と能動方式用のスリット光投影部とから構成される。視覚センサ部では、鉛直下向きに設置した円す



(a) 受動方式



(b) 能動方式

図7. 特徴エッジと方位角移動軌跡の関係

い(錐)ミラーにより、水平面下方、鉛直軸回りに360度全周が視野領域となる。スリット光投影部では、ガルバノミラーによって鉛直方向にスリット光を投影している。スリット光の投影像を撮像する受光部は、受動方式の全方位視覚センサ部を利用し、撮像系の共有化を図っている。

実験モデルとして柱等の凹凸のある壁面を設定し、柱等の垂直エッジを手がかりに位置の推定と面の判別の基本実験を行った。図9はロボット移動に伴い、特徴量の方位角をプロットしたものである。また、図10は環境内を移動しながら特徴エッジまでの距離を計算し、環境モデルに重ねて表示したものである。

距離計算に当たっては、測定誤差を1%程度に抑えることができ、通路内を視覚誘導する上では十分な精度と考える。

次に面同定は、ロボット近傍で、観測距離に対し約2%の凸面の区別ができた。遠方の障害物に対しては、高精度の観測はできないが、衝突回避の目的では、近傍で高精度が実現できればよく、実用上問題ないと考える。

3. 複合計測と今後の展開

我々は従来から、計測技術の今後の展開の一つとして、より複雑な現象を把握するため、人間が行っているセンシングを手本とし、目的に対応した幾つかのセンシング技術を併用し、得られた多くのデータから総合的に判断する複合計測システムを提案している。

当社担当のテーマにおいて、開発課題となっている産業環境での異常検出は、計測の立場からみると、従来人間の五感によって得られた多くの情報をもとに、総合的に判断する高度な計測技術として位置付けられる。このような作業を自動化するに当たって必要となる計測装置には、小型軽量であるとともに、複数の異常検出が可能であることが要求され、複合計測システムがもつ特長を最大限に發揮できる分野であるといえる。

上で述べた複合計測は、本来様々な計測情報から総合的に判断するものであることから、これに必要とされるセンシング技術は種類が多く、しかも検出対象に応じて組合せも異なる

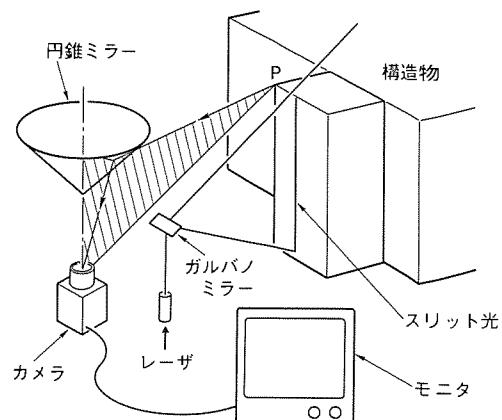


図8. 環境認識方式の構成

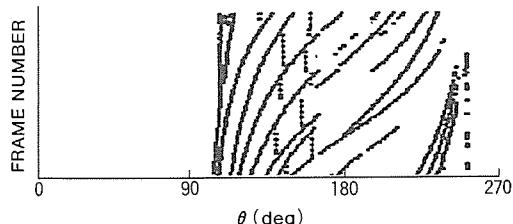


図9. カメラ移動による特徴エッジの移動軌跡



図10. 位置計測と面同定結果

ってくる。このため、複合計測システムの実現に当たっては、目的に応じたセンシング技術の開発、及びセンシング技術の効率的なとりまとめが重要な課題となる。我々は、このようなセンシング技術を実現するに当たって、光の多様性⁽³⁾に着目した。すなわち、光(特にレーザ)では、表1に示すような異なる光の性質を、同時にしかも独立(お互いに相手の計測系に外乱を与えることなく、計測条件を自由に設定)して利用することが可能である。したがって、レーザのもつ個々の性質をセンシング機能に割り当てるならば、1本のビームのみで複数のセンシング機能を実現できる可能性がある。また、光の持つ波動的性質は特定の計測分野でのみ普及しており、別の分野での新計測原理としての可能性があることから、対象に応じて新しい検出方式の実現が期待できる。

このプロジェクトで開発したガス検出技術、環境認識技術は、光の多様性を利用したセンシング技術として、効率的に複合化できることが期待できる。特にガス検出技術は、光の波長を積極的に利用したもので、従来にない複合化の組合せの可能性がある。また、我々はプラントの点検作業のうち、蒸気漏れ検出⁽⁴⁾、油漏れ検出⁽⁵⁾を対象に、光の偏光特性を利用した新しいセンシング技術を既に開発しており、このプロジェクトで開発したセンシング技術とともに複合計測システムへの展開を図っていく予定である。

また、複合計測システム実現に当たっては、得られた情報からいかに判断するかという信号処理技術の開発も必要となってくる。信号処理の内容は、センシングによって入力される情報及びシステムが目的とする対象に応じて異なることから、今後、複合計測システムの具体的対象に応じて開発を行っていく必要がある。

表1. レーザの波動特性

複合化	干渉、回折	各性質を独立に利用可能(他に影響を与えない条件設定)
	単一波長	
	高指向性	
	高エネルギー密度	
	偏波	

4. む す び

兵庫県委託研究“光センサを応用した産業環境・医療検査システムの開発”において開発した、半導体レーザを用いた遠隔ガス検出方式及び環境認識技術について述べた。

ガス検出技術に関しては、LD光をプラント内に投射し、構造体からの散乱光を検出する方式をとるとともに、LD光の発振スペクトルがもつマルチ性に着目した2波長比較方式を新しく開発することにより、構造体表面の反射率変化の影響を受けないガスの遠隔検出が可能となった。さらに、LDの駆動電流、温度を精密に制御することによって波長を安定させ、LDの波長をCH₄の光吸収波長に合致できたことにより、CH₄のみを100ppmという微量濃度で選択的に検出することが可能となった。

また、環境認識技術に関しては、能動方式、受動方式を融合し、環境認識に必要な位置情報の推定及び物体面の同定の二つの機能を同時に実現する方式を開発した。環境モデルによる確認の結果、1%以内の距離検出及び障害物回避に必要な面の同定が可能であることが確認された。

これら開発したセンシング技術は、複合計測システムを構築するに当たって、核となる要素技術として重要な位置付けにある。今後、既に開発したセンシング技術も含めた複合化検討、及び信号処理方式の検討を行い、複合計測システムの構築を図っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 亀井光仁、中島利郎：プラント点検用複合計測、計測と制御、26, No. 4, 323~326 (1987)
- 2) 八木康史、川戸慎二郎：円錐投影による全方位環境認識、信学技術、PRU89-46, 47~53 (1989)
- 3) 小林彬：光計測の特徴、計測自動制御学会第3回センシングフォーラム資料、特1~特9 (1986)
- 4) Nakajima, T., Kamei, M. : A Vapor Leak Sensor using Polarization Property for Plant Inspection, Proc. 32nd S.P.I.E. Ann. Meeting, 965, 68~73 (1988)
- 5) 中島利郎、亀井光仁：プラント点検用油もれ検出器、第26回計測自動制御学会学術講演会予稿集、169~170 (1987)

パイプ内面形状センサ

高嶋和夫* 植木勝也*** 谷口善昭+
 山口圭一* 真篠幸雄*** 藤本純司+
 斎内賀義** 望月延夫+ 高橋国一+

1. まえがき

石油精製や化学プラントなどの各種プラントに多用されているパイプ類は、使用しているうちに内部が腐食したり付着物がたり(堆)積したりして劣化を起こす。この劣化が進めば事故にもつながるため、定期的な検査が必要である。特に、熱交換器用の小径パイプについては各種プラントで大量に用いられるため、高速・高精度で検査をしたいという要望が多い。

従来は、このようなパイプ内面の劣化状況を超音波方式や渦流方式によるセンサで測定していたが、これらのセンサでは水などの検出媒体が必要であったり、感度が低いなどの欠点があった。また、光学方式では、レーザ光利用によるポイント式距離センサをパイプ内で回転させて全周形状を測定する検査装置が開発されているが⁽¹⁾⁽²⁾、この場合回転機構を持つ分だけ検出ヘッドが大型化し、熱交換器などの小径パイプの検査には適用困難であった。

このような背景から、我々は小径パイプを対象として高速・高精度で、かつ検出ヘッドの小型化が可能なサークルパターン方式と呼ぶ光学式のパイプ内面形状センサを開発した⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

このセンサは、パイプ内壁面上全周にリング状の光学的スリットパターンを投射し、このパターンの乱れをTVカメラで撮像して得られた画像をトランジistorによって並列処理することにより、1インチパイプ内面の形状を高速(1断面:30ms)・高精度(±0.1mm)で測定するものである。また、センサをパイプ内で移動させるハンディなピストル型センサ移動機構も合わせて開発しており、操作性に優れた検査システムの構築を目指している⁽⁶⁾。

本稿では、サークルパターン法によるパイプ内面形状測

定原理と、トランジistorによる信号処理方式、及び上記センサをパイプ内で移動させるためのピストル型センサ移動機構などについて紹介する。

2. 測定方式

図1に、小径管用に開発したサークルパターン方式によるパイプ内面形状測定の原理図を示す。

投光器から放射された光束をリング状のスリットパターン(サークルパターン)にし、測定対象のパイプ内壁面全周に投影する。このパターンを対向するレンズによって撮像すれば、撮像素子の受光面上にサークル状の光学像が得られる。今、パイプ内壁面に腐食・付着物による凹凸が無い場合には、同図モニタ(a)に示すように真円に近いサークル像となる。一方、パイプ内面に腐食・付着物などによる凹凸が発生している場合には、同図モニタ(b)に示すようにサークル像にもこれに対応した凹凸が現れる。つまり、撮像後のサークル像の形状から被測定パイプ内面の形状が逆算できるのである。

これらの幾何学的関係を図2に示す。光源の発散点位置をT、発散角度をAとし、受光レンズの主点位置をR、両者の間隔をdとすればパイプ内壁面上のサークル像pの円周方向の位置 p_i は、

$$p_i = \frac{\tan A \cdot \tan B}{\tan A + \tan B} \cdot d \quad \dots \dots \dots (1)$$

として得られる。ここで角度Bは、撮像素子の受光面上でのサークル像位置 q_i と、レンズ・撮像素子間の距離fから

$$B = \tan^{-1}(q_i/f) \quad \dots \dots \dots (2)$$

として求まるサークル像の結像角である。f及び式(1)中の光源の発散角度Aは固定値であるので、変数 q_i を測定すれば p_i が算出できる。

q_i の測定は処理部によって行うが、実際にセンサヘッドで

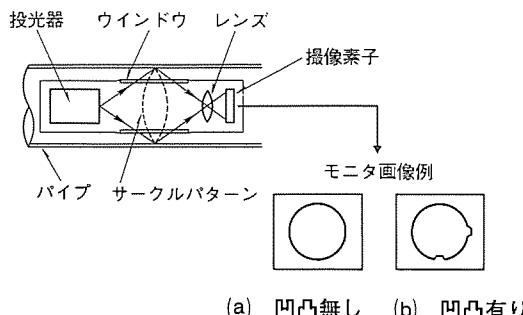


図1. サークルパターン法の原理

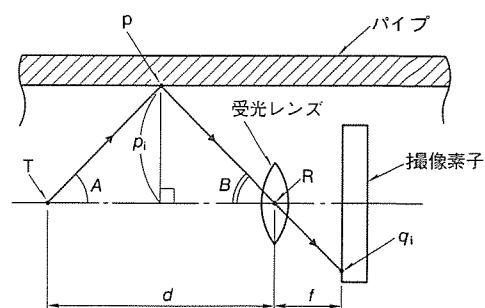


図2. 光学系の幾何学的関係

得られるサークル像は図3に示すように、パイプ内壁面の表面状態や照射光の強度むらなどの影響を受け、像の幅や明るさが不均一になる。このため、このセンサでは、サークル像を円周方向に N 等分にウインドウ分割し、各々の領域ごとにサークル像の重心位置を演算して q_i としている。この処理により、サークル像の線幅や明るさの不均一性に起因する測定精度の低下がなくなる。また、パイプ長手方向にセンサヘッドを移動させながら測定することにより、パイプ全体の形状が測定できる。

3. センサの構成

このセンサは、センサヘッド部、信号処理部、センサ移動機構部に大別される。以下に、各部の構成を述べる。

3.1 センサヘッド部

図4は、熱交換器に多用されている1インチパイプ(外径:25.4mm、内径:19mmから22mm)を対象として開発したセンサヘッド部の構成を示している。

投光部の半導体レーザから放射された光束は、投光レンズで集光光束となり、円すい(錐)ミラーによって円環状に分配反射されて、パイプ内壁面全周にリング状のスリットパターンを描く。このパターンを対向する受光レンズによって撮像すれば、撮像素子の受光面上にサークル状の光学像が得られる。このセンサヘッドでは小型化を達成するため、投光部に半導体レーザを使用した。また、受光部に使用した撮像素子も、このセンサヘッド小型化のため製作した画素数約16万個(水平:355画素、垂直:450画素)の小型二次元CSD(Charge Sweep Device)である。

このCSDは、通常よく用いられるCCD(Charge Coupled Device)に比較して感度が高く、その分、素子を小型化できる利点がある。ここで用いたCSDは、直径10mmの超小型パッケージに納まっている。さらに、投・受光系に使用したレンズ群、及び円錐ミラーもこのヘッド用に特別に製作した小型のものである。また、センサ前・後端部には、被測定パイプとセンサヘッドの中心軸を概略一致させる保持機構を設けている。図5にセンサヘッドの外観を示す。

以上のように、部品レベルから小型化を進めた結果、外径13mm長さ60mm以下(保持機構除く)と極めて小型のセンサヘッドを実現し、1インチパイプへの適用を可能にした。

3.2 信号処理部

図6に信号処理部の構成を示す。センサヘッドからはパイプ1断面分のサークル像を含んだ映像信号を、TVレートの33msごとに送出してくるので、信号処理部でも同等の処理速度が要求される。今、1インチパイプの内面形状を円周方向に1mmピッチで測定するとすれば、測定原理のところで述べた重心演算を約60ウインドウに対して実行することになり、1ウインドウ当たり0.55ms以下の処理時間が要求される。一般に用いられるマイクロプロセッサでは、この処理

速度に対応できないので、このセンサではトランスピュータと呼ばれる並列処理プロセッサを採用している。

トランスピュータは、英国インモス社が並列処理言語“OCCAM”用に開発した16又は32ビットの1チップマイクロプロセッサで、並列処理用に通信・同期機能がチップ内に組み込まれており、トランスピュータ間はもちろん、外部デバイスやバスと高速に接続できる。実際に、図6に示すトランスピュータ5個構成の処理回路で、上述した処理をTVレートで実時間処理し、パイプ1断面の形状を33ms以下の時間で得られるようにした。

このほか、信号処理部ではパイプ全体の測定が終了した後、測定結果を三次元表示したり、データを記憶するなどの機能を持っている。信号処理部は、トランク型ケースに一括して納められ、フィールドへの携帯が容易なように考えている。

3.3 センサ移動機構部

パイプ内面において、センサヘッドを移動させる機構としては、センサヘッド自身に電動モータを搭載した自動走行車型が発表されたりしているが、この方式は、機構が大型化す

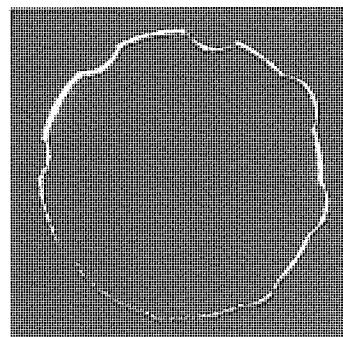


図3. サークルパターン像の例

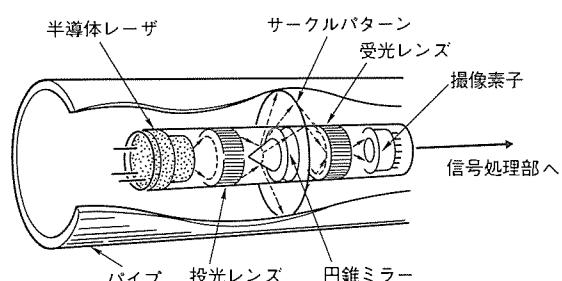


図4. センサヘッド部の構成

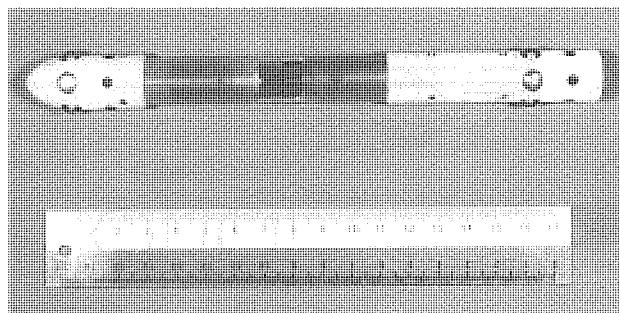


図5. センサヘッドの外観

るため大径パイプへの適用がほとんどであった。今回、1インチ程度の小径パイプ用として、空気・電気駆動方式を用いた小型でハンディなピストル型のセンサ移動機構を開発した。

図7に、今回開発したセンサ移動機構の構成を示す。ピストルの銃身部には、先端に非金属製のけん(牽)引ピグが取り付けられたセンサヘッドが納められている。この銃身部を被測定パイプの端部に押し当て引き金を引くことにより、別に設けられたコントローラからの空気圧が牽引ピグに加わり、センサヘッドが高速に被測定パイプ内に送り込まれる。送り込み速度は、加える空気圧によって制御でき、送り込みの長さはセンサケーブルに取り付けられたストップアによって自由に設定できる。

センサヘッドの引き戻しは、センサ移動機構内の電気モータでセンサケーブルを一定速度で巻き取ることによって行う。パイプ内面の形状測定は、このセンサヘッド引き戻し時に行う。巻取り速度は、パイプ長手方向の測定ピッチを決定する

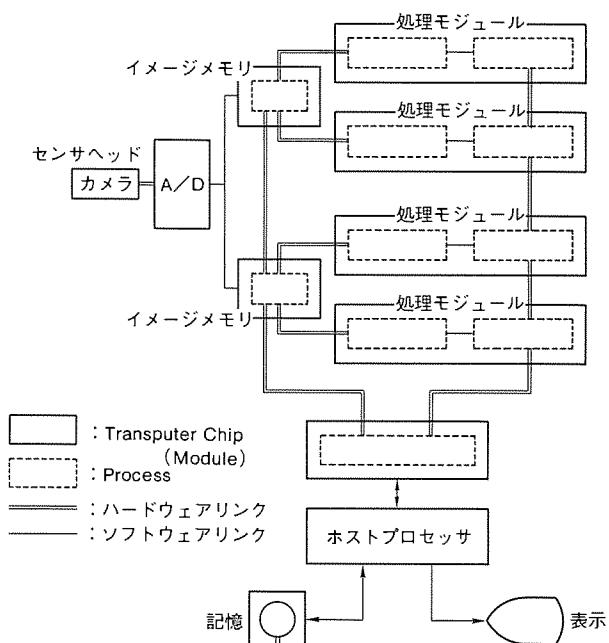


図6. 信号処理部の構成

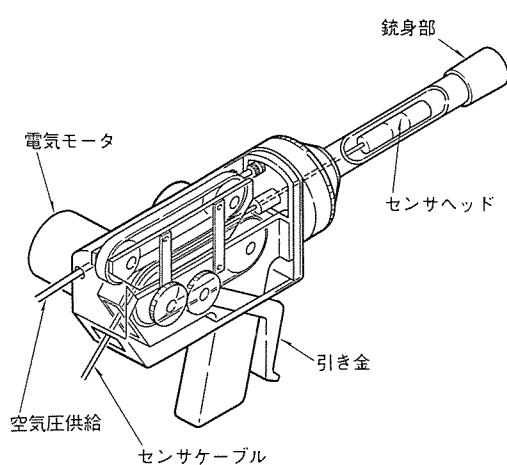


図7. センサ移動機構の構成

ことになり、現状は測定ピッチ1mm又は2mmに相当する30mm/s又は60mm/sに設定できる。このセンサ移動機構は、2kg以下と軽量で、センサヘッドの送り込みと巻取り動作は、センサ移動機構に取り付けられたスイッチで行えるので、一人での操作が可能である。図8にセンサ移動機構の外観を示す。

コントローラは、空気圧の調整や巻取り速度の設定などを行うための電磁バルブや制御回路などから構成され、信号処理部と同様のトランク型ケースに納められている。また、運搬時にはこのケース内にセンサ移動機構を収納できる。

4. 測定精度と実パイプへの適用性の検証

4.1 測定精度の検証

このセンサでは、測定するパイプの最大内径(最大25.4mm)と受光系の倍率、及び撮像素子の画素数、投・受光角度などの光学定数から原理的な分解能が決まる。今回開発したセンサヘッドでは、この値を0.1mm以下として設計しており、上記分解能が実現できているかを実測により確かめた。

実測では図9に示すように、内径19mmのアルミパイプ内面に0.2mmから0.8mmまで(0.2mmピッチ)の凹凸を計8箇所設けたものをテストパイプとして用いた。測定原理の説明のところで述べた図3は、このテストパイプから得られたサー

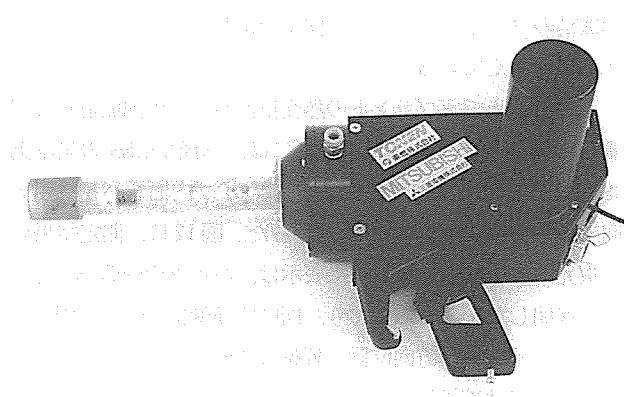


図8. センサ移動機構の外観

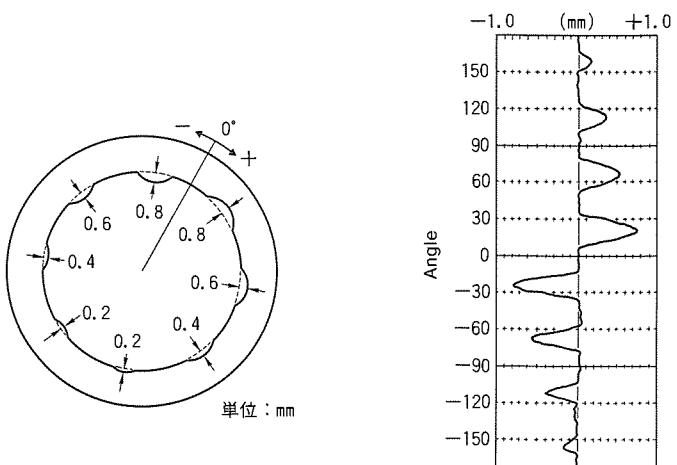


図9. テストパイプの形状

図10. テストパイプ測定結果

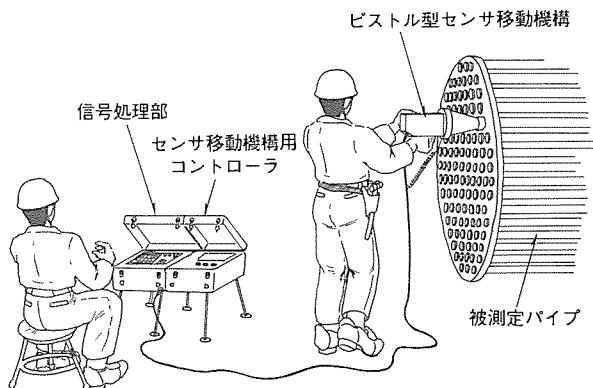


図11. センサ使用イメージ図

クルパターン像を示すものである。図10は、上記サークル像から平均中心を求め、サークル像の各点がこの半径からどれだけ離れているかを演算処理した結果である。図で横軸は、パイプ内面の凹部を+ (右) 方向、凸部を- (左) 方向として表している。同図から測定分解能が±0.1mm 以内であることが読み取れ、目標性能に達していることが分かる。

4.2 実パイプへの適用

このセンサは、熱交換器用1インチパイプの内面測定用として、実フィールドへの適用も考慮して開発を進めている。図11に、フィールドでのセンサ使用イメージを示す。測定作業は、センサ移動機構の操作と、信号処理部及びセンサ移動機構のコントローラ部の操作に分担し、2人の作業員で行えるよう考えている。

このセンサで実プラントの熱交換器パイプの内面形状を実測した例を示す。被測定パイプには、内径20.2mmの炭素鋼(STB35)を用いた。また、測定はパイプ内面をパイプ周方向・長手方向共1mmピッチで行った。図12に、測定結果の三次元的表示例を示す。結果表示は、パイプの円筒形状を平面に展開した形で行っており、同図で横軸はパイプ円周位置、斜軸はパイプ長手方向位置、縦軸は凹凸方向を示す。

センサ移動機構についても実際の熱交換器パイプに適用し、送り込み空気圧1kgf/cm²以下、巻取り電気モータ10W以下で、安定した走行性能が得られることを確認している。

パイプ内面の洗浄方法やセンサヘッドの耐久性など、さらに検討すべき課題はあるものの、総合的に判断して実パイプへ適用できることが検証できた。

5. むすび

熱交換器等の小径パイプの内面形状を測定するサークルパターン方式の光学センサを開発し、測定精度及び実パイプ測定への適用性を検証した。このセンサの測定方式は、原理的に三角測量法の一種である光切断法であり、高精度が得られ

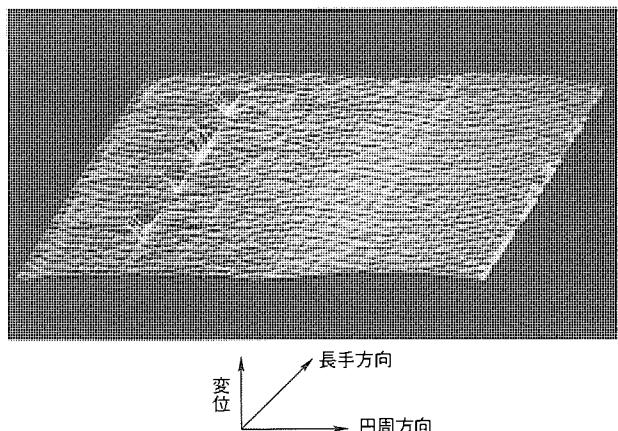


図12. 実パイプの測定結果例

る上、パイプ全周の形状測定が同時に実行可能なので高速測定が可能となる。また、回転機構を必要としないのでセンサヘッドの小型化も図れるなどの特長がある。同時に、センサヘッドをパイプ内で移動させる空気圧・電気モータ利用のピストル型移動機構も開発し、総合的にパイプ内面形状センサとしての有効性を確認した。

このセンサは、今後更に実用性能を向上させ、実プラントへの適用を進めて行くとともに、大口径パイプの内面形状測定に対して応用展開を進めていく所存である。

なお、この研究は通商産業省補助金による石油産業活性化センターの研究開発テーマの一環として実施したものである。

参考文献

- (1) Cunningham, D.L., Doyle, J.L., and Hoffman, D. : Optical Nondestructive Evaluation of Pipe Inner Wall Condition, Rev Prog Quant Nondestr Eval, 4B.
- (2) Diametrical Measurement of Steam Generator Tubes. Anon Sigma Res. Inc., land, Wash Electric Power Res. Inst., Rep. EPRI NP 1244, p.37 (1979-11)
- (3) 高嶋和夫, 山口圭一, 実森彰郎, 松本公雄, 永井慎一, 谷口善昭:サークルパターン法を用いた管内形状測定装置, 第26回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 1, 193~194 (1987)
- (4) 山口圭一, 高嶋和夫, 実森彰郎, 松本公雄, 永井慎一, 谷口善昭, 望月延夫:光学式管内形状測定装置の開発, 第1回電気学会産業応用部門全国大会予稿集 (1987)
- (5) 谷口善昭, 高橋国一, 望月延夫, 高嶋和夫, 山口圭一, 実森彰郎:光学式パイプ内面検査システム, 電気学会研究会資料, SC-88-14, 31~37 (1988)
- (6) 谷口善昭:光応用管内形状測定センサ学, 石油学会第20回装置研究討論会資料, 52~56 (1989)

半導体ウェーハ表面欠陥検査装置

田中 均* 市村英男*
大重豊実* 友田利正**
宮崎陽子*

1. まえがき

メモリに代表される半導体デバイスの微細化・高集積化の進展が目覚ましい。これらの製造工程におけるウェーハ表面上の異物やパターン欠陥(ここでは、この両方を単に“欠陥”という)が、デバイスの歩留りと強い相関のあることが知られており、デバイスの微細化に伴い問題となる欠陥サイズは、ますます小さくなっている。歩留り向上や製造ラインの管理のため、ウェーハ表面の欠陥検査が行われているが、現状の検査技術・検査装置は欠陥の検出感度、検査速度や製造現場への適用のしやすさなどの点で不十分であり、デバイスやその製造プロセスの開発及び製造の現場から、これらの点を改善した装置の出現が待望されている。つまり、実ウェーハについて異物とパターン欠陥の両方を感度良く検査する装置として次のものがあるが、いずれもユーザーの要求を十分満たしていない。

- (1) 隣接チップの顕微鏡画像を比較する方式⁽¹⁾：検査時間が1ウェーハ当たり10時間以上と膨大である上、比較処理するのは顕微鏡画像であるため、コントラストの低い欠陥については検出感度が低い。
- (2) 空間周波数フィルタリング(後述)をベースにホログラフィを用いた方式⁽²⁾：検査時間は40～60分と比較的短いが、検査ウェーハごとにホログラムの写真撮影・現像処理が必要であるため、操作員の負担及び写真乾板の経費が大となるほか、ウェーハ面内の検出感度を均一に保つのが困難である。また、装置が大型となり貴重なクリーンルーム内の占有面積が大となる。

そこで、我々は、空間周波数フィルタリング方式のもつ、正常な繰り返しパターンは光学的に除去し、欠陥のみを映像化するという長所を生かして、高速・高感度を保ちながら製造現場に適用しやすい検査装置の開発を計画した。目標としては、欠陥の検出下限をサブミクロン、検査時間を6インチウェーハ全面で約30分とし、同じ工程のウェーハなら(写真撮影・現像処理なしに)連続して自動検査できる装置をねらいとした。

現在、上述した理由から製造現場においてパターン付き実ウェーハについては、極く少量しか検査できていない。そのため、ラインの管理や歩留り低下原因の追求に関し、十分な活動が採られていると言えないのが現状である。この装置が実現すると、パターン付きウェーハの欠陥検査をルーチンで

実施できることになり、メモリなど半導体デバイスの生産性向上に多大の貢献をすると期待される。

2. 空間周波数フィルタリング方式による欠陥検出

この章では、この装置に用いた空間周波数フィルタリングの原理と特長について概説し、さらに半導体ウェーハの欠陥検査装置への適用に際しての検討事項について述べる。

2.1 原理

空間周波数フィルタリングは、光学系に特殊な開口やフィルタを付加して所望の像を得るもので、通常は、光学系のフーリエ変換面に様々な空間周波数フィルタ(以下“空間フィルタ”という)を挿入する。この装置では、空間フィルタによって半導体ウェーハ上の規則的な正常パターンを除去し、不規則なパターン欠陥や異物のみを映像化することを意図している。図1に示すような、平行単色レーザ光により、照射された半導体ウェーハ表面(図2(a))を映像化する光学系において、レンズの後焦点面にできる半導体ウェーハの正常なパターンからの回折パターンを写真乾板によってネガパターンとして作成し(図2(b))、これを空間フィルタとして挿入することにより、結像面で欠陥、異物のみを映像化できる(図2(c))。

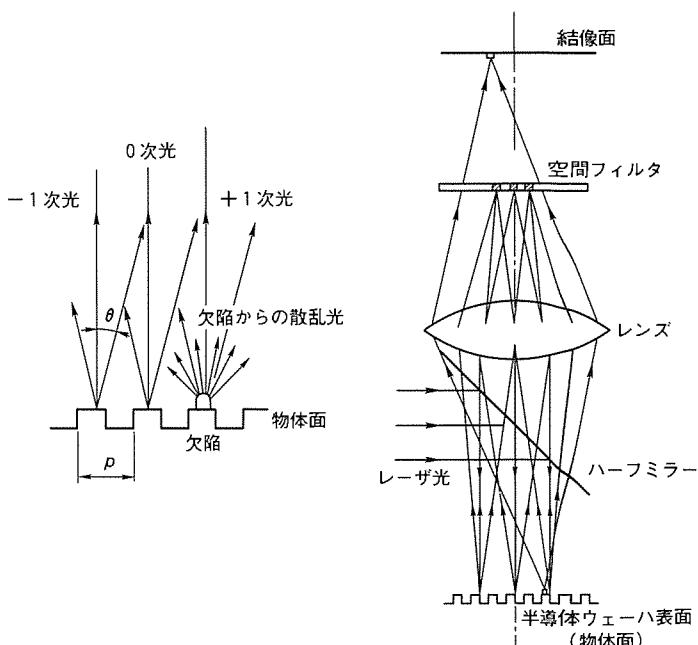


図1. 空間周波数フィルタリングの原理

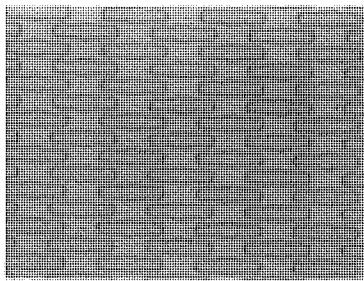


図2. (a) 半導体ウェーハ表面の
繰り返しパターン

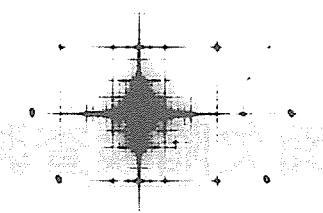


図2. (b) 空間フィルタ

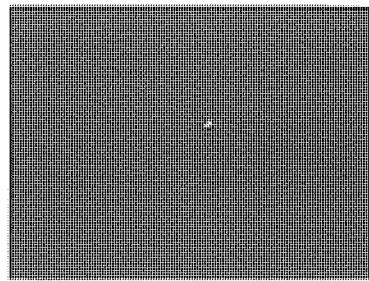


図2. (c) 空間フィルタを通して
映像化された欠陥画像

このように写る原理は、次のように理解できる。物体面でピッチ ρ を持つ繰り返しパターンに平行に入射した光は、次式のプラグの反射条件

ただし $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, λ : 波長

を満たす角 θ に平行な方向にのみ強く反射され、レンズで集光されて後焦点位置で点像群パターンとなる。このパターンは、物体の回折像であり、物体面のパターンの空間周波数の強度分布を表している。一方、欠陥からの反射光は、広い角度分布を持って散乱され、レンズ開口を通った光が結像面では集光されるが、後焦点面では大きな領域に広がる。したがって、後焦点面に、物体面での繰り返しパターンからの点像群パターンのみを遮断する空間フィルタを設ければ、正常な繰り返しパターンはすべて除去され、欠陥からの光の大部分は空間フィルタ上の点像群パターンの間げきを通過して結像面に至り、欠陥のみが映像化される。

2.2 特長

このように、空間周波数フィルタリングを用いれば、正常な繰り返しパターンを光学的に除去できるので、撮像後の欠陥検出処理を単純化、高速化でき、特に半導体のメモリセルのような繰り返しの多いパターンの検査に対し有効である。

また、物体面でのパターンの繰り返しピッチが狭くなると、これに逆比例して後焦点面での回折パターンの点像間隔が大きくなる。これに対応して、解像度など空間フィルタの作成に対する要求は緩和されることになり、微細パターン上の欠陥の検査に対しこの方式はより有利となる。

後焦点面に生ずる回折パターンは、物体面の繰り返しパターンの平行移動に対して不变であり、物体を移動させながら映像を流し撮りして検査を行うことができる。

また、撮像画像から欠陥を検出するためには、暗部の中の輝点を検出すればよいので輝度さえ足りればよく、画像の解像度を上げる必要はない。したがって、レンズの開口率(以下“NA”という。)は、通常の顕微鏡画像を処理する検査システムのものほど大きくする必要はない。また、一検査視野を大きくとることができる。

以上のように、空間周波数フィルタリング方式は、微細な繰り返しパターン上の微小なパターン欠陥や異物の検査を高

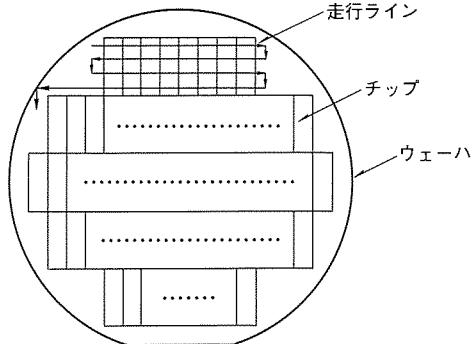


図3. ウェーハ上のチップ配列と検査視野の走行ライン

速・高感度で、しかも広域を一度に行うのに適している。

2.3 ウェーハ検査装置への適用

上記のように、空間周波数フィルタリング方式は優れた特長をもつ方式ではあるが、ウェーハ検査への実際の適用に当たっては検討事項も多い。まず、ウェーハは、直径が125mmから200mmあり、その上に約5×15mmのチップパターンが多数配列されている(図3)。このようなウェーハを対象にして、サブミクロンの欠陥を画像処理により検出するため、一検査視野を500ミクロン角程度に採る必要がある。そのため、図3中矢印で示すように、ウェーハを走行させての検査となり、空間周波数フィルタリング方式の採用に伴う課題としては、以下がある。

半導体ウェーハパターン上の繰り返しの少ない部分は、空間フィルタでは完全には除去されずに映像化される。このため、検査領域をメモリセル上に限定し、ウェーハパターンの設計データをもとに検査領域の切り出しを行うこととした。このため、検査視野の位置管理と検査視野ごとの検査領域の設定が必要となる。

回折パターンは、繰り返しパターンの平行移動に対しては不变であるが、回転に対しては変化するため、繰り返しパターンを除去するためには、空間フィルタと各検査視野位置での回折パターンを合わせる必要がある。この装置では、繰り返しパターンの回折パターンのネガを、そのまま空間フィルタとして使用するが、両者間には高い位置合わせ精度が要求される。ウェーハ表面内の回転方向に対しては、ウェーハローディング後の位置決めでウェーハの回転角を合わせて固定する。一方、ウェーハ表面のうねり等に起因する回折パ

ターンと空間フィルタのいずれは、検査位置ごとに補正する必要がある。

3. 装置の機能と構成

この章では、装置の機能と構成について述べ、主要構成部について更に詳しく説明する。

3.1 全体説明

この節ではまず、装置全体の持つ機能の概要を述べ、その後装置構成について述べる。

欠陥検査中、装置は次のように動作する。ウェーハステージに載せられた被検ウェーハを定速走行させ、指定位置でレーザ光をフラッシュ照射して順次準静止画を取り込み、ウェーハの設計データから展開された各視野での検査領域情報をもとに、画面の中からメモリセル部分を切り出し、その中の欠陥を検出しその面積と位置を計測して行く。これら一連の処理は、約33ミリ秒ごとに行われる。検査領域を正しく切り出すため、検査前のウェーハ位置決め処理のほか、検査中にはウェーハステージの走行精度などに起因する位置ずれを検出し補正を行う。

検査中、上述のように、ウェーハ表面のうねり等に伴って変化する回折パターンの位置を、空間フィルタに常時一致させる必要がある。この両者の位置ずれ許容量は、フィルタの作成条件に依存するが、この位置ずれ補正のために、検査中、正反射光方向を計測しこの方向がフィルタ中心方向と一致するように、ウェーハステージの傾斜角を制御する。また、同時に焦点センサからの指令により、焦点合わせ制御も行う。

操作員がウェーハカセットを装着すると、自動的に上記検査を実行し、検査結果として、ウェーハごと/チップごとの欠陥分布マップと欠陥の大きさ別のヒストグラムを出力する。さらに、各検査視野ごとの欠陥分布マップ及び欠陥の位置座標と面積も表示する。また、操作員が、検出した欠陥を指定すると、空間フィルタを通した検査画像そのもので、又は高倍率の顕微鏡画像で欠陥のレビュー観察ができる。

上記機能のほかに、この装置に不可欠な空間フィルタ撮影機能、ウェーハの設計データ入力機能や検査条件設定機能を持つ。

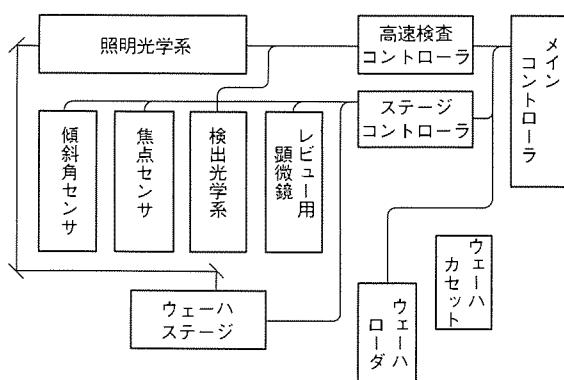


図4. 装置の構成

これらの機能を実現するために、図4に示す装置構成とした。ウェーハローダは、操作員が装着したウェーハカセットとウェーハステージの間のウェーハの受け渡しを無発じん(塵)で行う。ウェーハステージは、光軸へのウェーハパターーンの位置合わせ、検査動作時のウェーハの走行、傾斜角合わせ、焦点合わせを行い、このために6軸の自由度を持つ。照射光学系は、レーザを光源とし、フラッシュ用のシャッタ、コリメータ、正落射用のハーフミラーから成る。検出光学系は、対物レンズとその後焦点面での空間フィルタ、さらに拡大レンズとITVカメラから成る非常に単純な構成である。空間フィルタには、撮影時と現像後の装着時の位置ずれ誤差を少なくすることが要求される。傾斜角検出センサは、ウェーハ表面からの正反射光の一部をレンズで集光し、焦点面での集光スポットの位置ずれをITVカメラで検出する。焦点センサは光学式変位センサで、投光系と受光系を別に持ち、浅い角度に配置して分解能を上げている。操作員が検出した欠陥を観察できるように、検出光学系の横にレビュー用顕微鏡を設けている。制御系は、テーブルの座標管理及び検査時のテーブルの姿勢制御を行うステージコントローラ、検査時に33ミリ秒ごとに欠陥検出処理を行う高速検査コントローラ、及びマンマシン インタフェース部を含み各構成要素のシーケンス制御、高速検査コントローラからのデータロギングを行うメインコントローラから成る。図5は装置の外観写真である。

3.2 光 学 系

前節では、このシステム全体の機能と構成の概要を述べた。この節では、光学系について更に詳しい説明を行う。

図6に、検出光学系の概略を示した。照明用の光源は、アルゴンレーザ(波長488nm、出力約1W)である。欠陥検出用ITVカメラの画像取り込みタイミングに同期させて、光源の明滅をコントロールする手段としてAOM素子(超音波光変調素子)をスイッチ素子として用いている。この素子によってレーザビームの方向を切替制御し、数十から数百μsのフラッシュ照明を行う。ただし、この素子ではレーザ光線を完全に遮断することができないため、さらに機械式のシャ

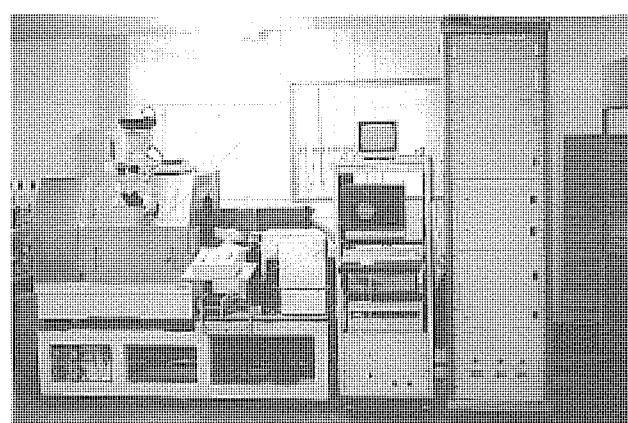


図5. 装置の外観

ッタを後段に組み込んでいる。光源から発した光は、これらシャッタと二つの折返ミラーを経た後、所望のビーム径の平行光線となるようにレーザビームエキスパンダを経て、二つのハーフミラーを経由しウェーハに垂直に入射する。

このとき第一のハーフミラーは、入射光の約92%以上を透過させるため入射光の大半が第2のハーフミラーに至る。次に、第2のハーフミラーによって入射光の約半分が、ウェーハ表面に到達する。

ウェーハからの反射回折光は、検査レンズによって集める。検査レンズは、焦点距離が95mm、NAは0.27である。空間フィルタを配置できるように、後焦点がレンズの外になるように設計されている。さらに、検出光学系全体で検査ウェーハの500μm角の領域が、検出用カメラ上に投影されるように倍率設計している。

一方、ウェーハからの反射回折光のうち、正反射光の一部が第2のミラーによって光路を逆行し第一のミラーに至るが、第1のミラーが約8%の反射率を持つため、光路を逆行してきた光の一部がこの第1のミラーによってウェーハ表面の傾斜角検出光学系に取り込まれる。

3.3 信号処理系

図7の信号処理フロー図を用いて欠陥の検出の方法について

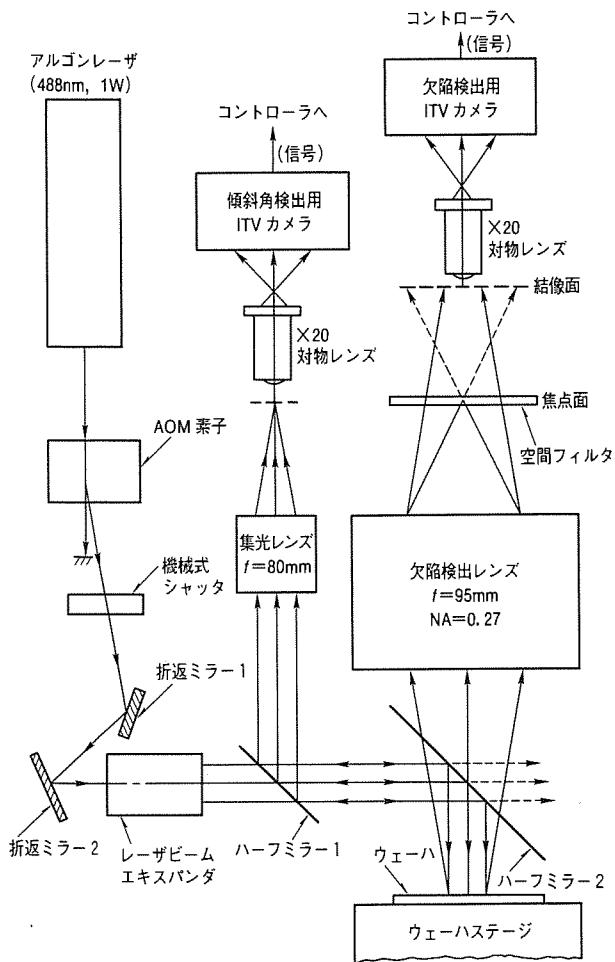


図6. 検出光学系の概略

て説明する。メモリセルの境界部など繰り返し数の少ない部分は、空間フィルタで完全には除去されずに映像化されるため、検査領域をメモリセル上に限定するための画面切り出しを行う必要のあることを2・3節で述べた。このために必要となるマスクパターンは、ウェーハの設計情報からメインコントローラで生成される。しかし、ウェーハステージのアライメント精度やステージの走行精度に起因した検査視野の位置ずれが生じ、マスクエリアから消え残りパターンがはみ出してしまう可能性がある。このため、常にメモリセル境界部の位置を検出しマスク位置の修正を行う。

こうして得た画像について、欠陥を一つ一つ区別して認識し、その位置・面積を測定し個数を数える。その画像処理手法として、ラベリング処理⁽³⁾⁽⁴⁾を適用している。以上のような検出処理には、3フレーム分の時間が必要となる。しかし、1検査視野を約33msで連続的に処理できるよう、この構成は、画像メモリとラベリングシステム部を2系列用意して、各信号処理の並列化を行っている。そのため、処理結果を交互に順次出力すれば、ITVの1フレーム時間ごとに一つの検査視野の処理が完了し、その結果が出力される。

3.4 ウェーハステージ

ウェーハステージは、X Y移動、焦点合わせ(Z軸)動作に加え、空間フィルタの遮光安定化を図るために、傾斜(θ_x , θ_y)、回転(θ_z)動作の計6軸が必要となる。この種のステージでは、傾斜角度、回転角度を変化させたとき目的とする視野がずれてしまうことが多く、これは流し読み検査を実現する上で大きな課題となる。

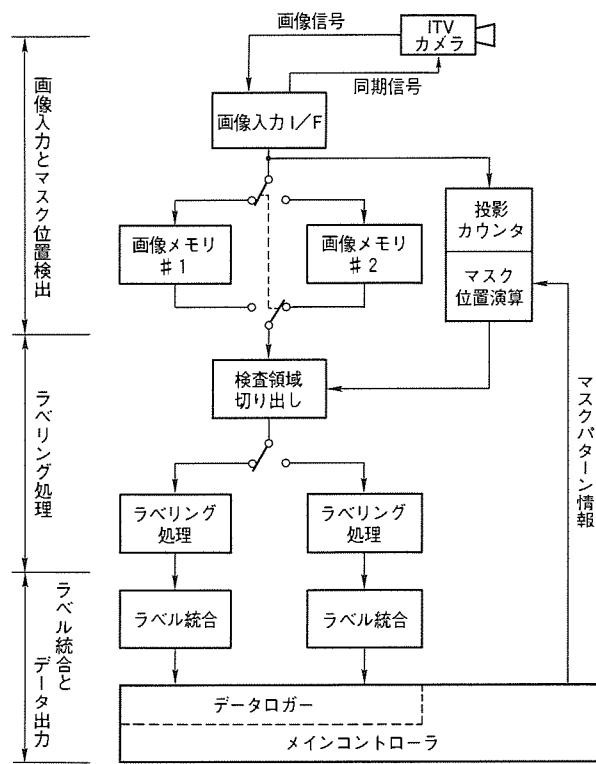


図7. 信号処理フロー

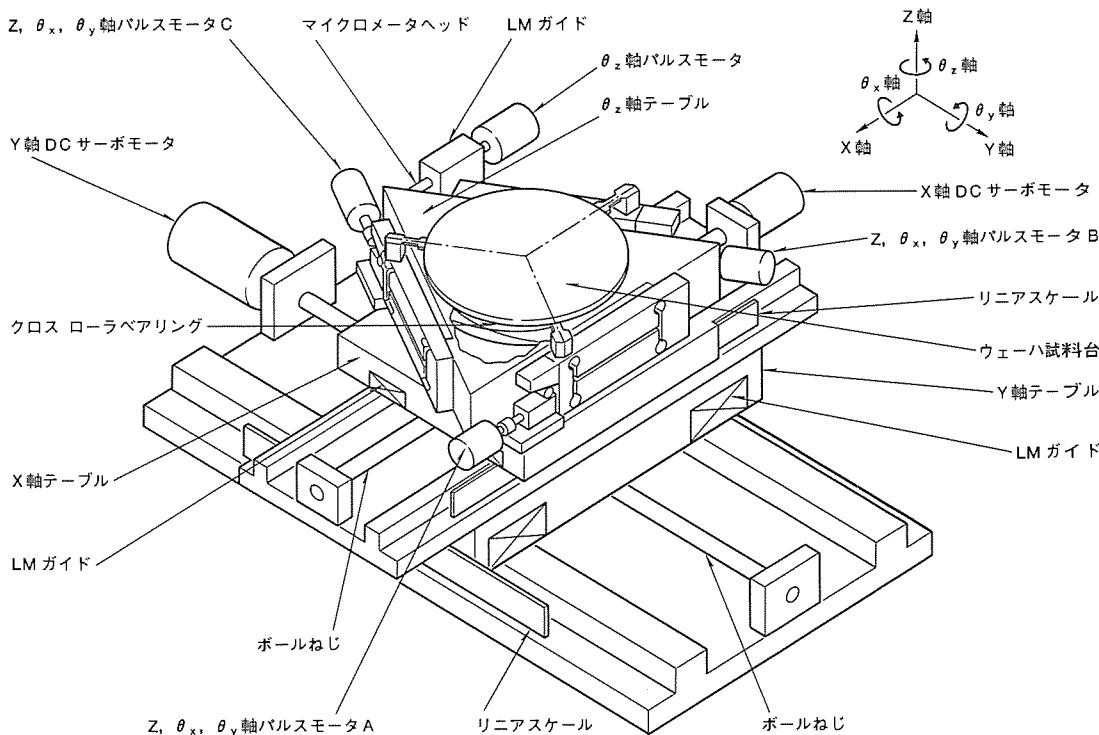


図 8. 6 軸テーブルの構成

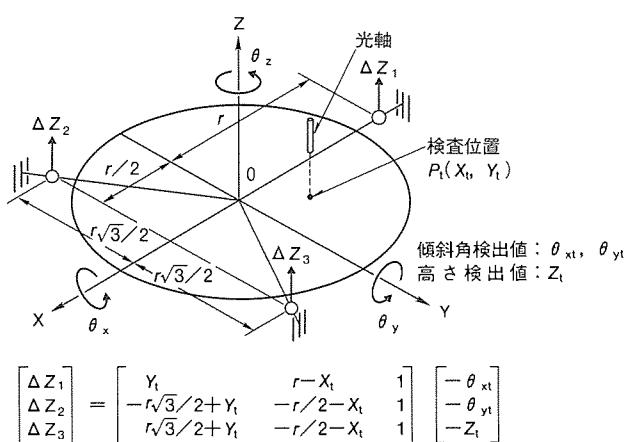


図 9. 傾斜ステージのモデルと演算式

このため、傾斜動作による X Y 軸への干渉変位を小さくすることのできる傾斜機構を開発した。ウェーハステージの全体構成を図 8 に示す。傾斜させるステージは、X Y テーブルの上に回転可能な構造で積載されている。動作を簡単に説明すると、ウェーハチャックの周辺部を 3箇所で支持し、その箇所を上下させることで高さと傾斜 2 軸の駆動ができるものである。このステージの特徴は、ウェーハチャックの支持を弾性ヒンジで行い、その中立軸をウェーハ表面と一致させ、原理的には干渉変位が発生しないようにしていることである。また、上下動作のガイドに弾性平行リンク機構を適用し、薄型で高剛性な構造となっている。

次に、図 9 の傾斜ステージのモデルと演算式を用いてステージの傾斜角制御について述べる。検査中、ウェーハステージは X Y 面内を動くことにより、ウェーハ上の検査位置

P_t を検出光学系の視野下へ移動させるため、機械的な傾斜角の回転中心 O と光軸とは位置がずれた状態になる。そのため、検出光学系での焦点ずれが生じないように、見かけ上の傾斜中心が光学系の視野下となるように、高さ補正を含めた動作指令値 (ΔZ_1 , ΔZ_2 , ΔZ_3) の演算を行い、傾斜角制御を行う。

なお、Z 軸 (3 軸) の駆動は、高精度なねじ送り機構をパルスモータで駆動するオープン制御である。また、X Y 軸は、DC サーボモータによる位置制御を採用し、光学格子から成るリニアエンコーダを用い絶対位置検出を行っている。

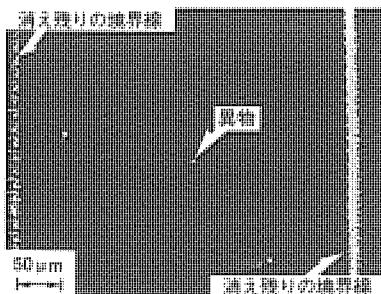
4. 欠陥検出試験

実際にこのシステムで行った欠陥検査試験の結果をもとに、特徴的な例を 2 件ほどあげて、この装置の欠陥検出性能の一端を紹介する。

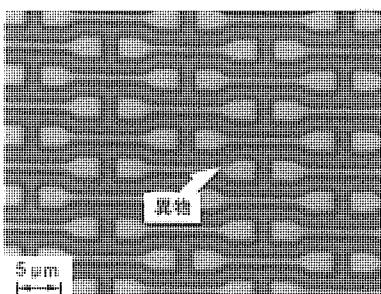
定量的に欠陥検査の能力を評価するため、標準粒子を散布したサンプルウェーハを用いるのが一般的である。ここでも、あらかじめ大きさの分かっている標準粒子 (ラテックス球粒子) を、試験用のパターン付きウェーハ上の特定の場所に散布して性能評価を行った。

図 10 に、この結果の一例を紹介している。同図(a)は、欠陥検出画像すなわち空間フィルタを通した後のレーザ画像である。図の中で光っている点をレビュー用の顕微鏡で拡大観察したのが、(b)である。このように、空間フィルタリングによって正常パターンが消え、異物が鮮明に映像化されているのが分かる。検出した異物の大きさは約 2 μm である。

次いで、図 11 にパターン欠陥の検出例を示す。同図(a)は

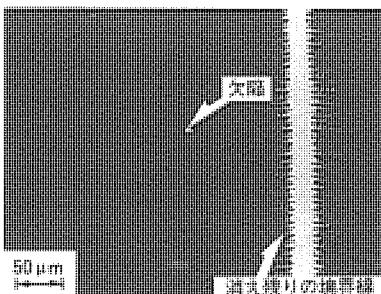


(a) 欠陥検出画像
(空間フィルタリング像)

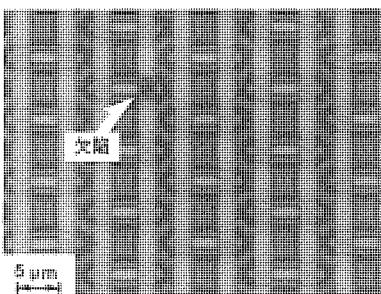


(b) 検出欠陥のレビューステーションでの拡大観察 (異物)

図10. 異物検出試験例



(a) 欠陥検出画像
(空間フィルタリング像)



(b) 検出欠陥のレビューステーションでの拡大観察 (パターン欠陥)

図11. パターン欠陥試験例

図10と同じく、空間フィルタリング後のレーザ画像であり、パターン欠陥が標準粒子と同じように光っているのが分かる。この部分を同じくレビュー用の顕微鏡で拡大観察した結果が(b)である。検出したパターン欠陥の大きさは約2 μmである。このシステムは、異物と同程度の感度でパターン欠陥を検出できることがこの例によって分かる。

なお、繰り返し再現試験を行った結果、大きさ約1 μmの標準粒子の検出では再現性95%以上を確認した。また、大きさ約0.8 μmの標準粒子を使った同様の試験でも90%以上の再現性が得られている。

なお、6インチサイズのウェーハ全面を欠陥検出するのに要する時間は、約30分である。

最後に、欠陥検査結果のCRT出力画面の1部を紹介する。図12はウェーハ全面についての欠陥分布図であり、また図13は1チップだけの検査結果を表示した画面の例である。

5. むすび

空間周波数フィルタリングの優れた特長を生かして、半導体メモリセル上のサブミクロンクラスのパターン欠陥・異物を、6インチウェーハに対し、約30分で検出する検査装置を開発した。

今後、欠陥を作り込んだプログラムドウェーハや実ウェーハによる本格的な性能評価を行った後、製造ラインの評価・管理に役立てて行く予定である。

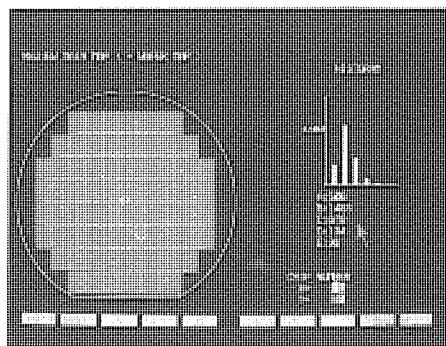


図12. ウェーハの検査結果出力画面例
(ウェーハ全面についての欠陥分布 (左) と大きさ別ヒストグラム (右))

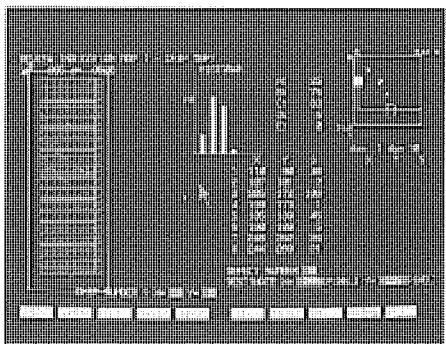


図13. チップの検査結果出力画面例
(チップ内の欠陥分布 (左) と大きさ別ヒストグラム (中央上) 及び1検査視野内の欠陥のアドレス表示 (中央下) とマップ表示 (右上))

また、この方式を更に改良して欠陥の検出感度が0.5 μm以下の装置の開発も予定している。

参考文献

- (1) Harris, K. L., Sandland, P., Singleton, R. M. : Automated Inspection of Wafer Patterns with Application in Stepping, Projection and Direct-Write Lithography, Solid State Technol. (1984-2)
- (2) Cavan, D. L., Lin, L. H., Howe, R. B., Graves, R. E., Fusek, R. L. : Patterned Wafer Inspection Using Laser Holography and Spatial Frequency Filtering, J. Vac. Sci. Technol. B6 (6), 1934-1939 (1988-11/12)
- (3) Rosenfeld, A., Kak, A. C. : 画像の情報処理, 長尾, 真監訳, 近代科学社
- (4) 藤原秀人, 磯貝文彦 : 高能率ラベリングプロセッサのための一手法, 情報処理学会コンピュータビジョン研究会研究報告, 88, No.73, 88-CV-56

非接触速度むら測定器とその応用

1. まえがき

VTR, DATなどのAV機器やFDD, HDD, ODDなどの計算機周辺機器、OA機器・各種精密機器・自動車部品などの回転機構を持つ機器では、駆動モータ単体及び回転機構の性能がこれら製品の品質・性能に直接影響を及ぼす。特に、回転系・搬送系の回転むら、速度むら（以下、ワウフランナーという。）は、これらの製品の性能を表す重要な指標となっている。

近年、これら各種製品の性能向上とあいまって、製品開発部門、製品評価部門を中心に、測定対象の制約を受けずに、高い精度でかつ測定の省力化の図れるワウフランナー測定器の要求が高まっている。従来、ワウフランナーは、回転機構に直結したロータリエンコーダなどの回転センサを使用し測定していたが、この測定方式には次のような問題点があった。

- (a) センサが測定対象物の負荷になり、測定対象の物理現象が乱される。
- (b) センサ取付箇所の制約から、測定対象に限りがある。
- (c) センサ取付けに熟練を要し、かつ、測定結果に個人差が出る。
- (d) 回転速度が低くなると分解能や応答性が下がる。

このような背景から、非接触式のワウフランナー測定器の要求が高まってきた。この市場要求に対応するために、当社では、鉄鋼、非鉄金属の圧延制御用速度センサとして、既に数多くの実績のあるレーザドップラー速度計で培った技術を基に、非接触速度むら測定器 LV-202 を製品化した。この速度むら測定器は、回転体、移動物体の速度、ワウフランナー測定はもとより、移動物体の長さ、往復動する振動速度・変位・零速度からの過渡応答などの測定にも対応できる汎用測定器である。

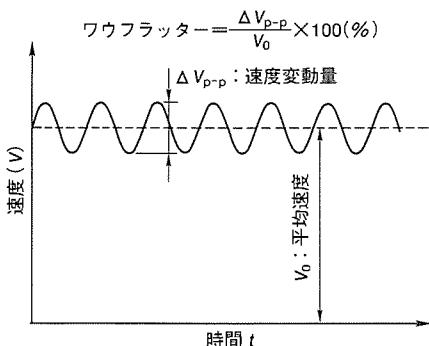


図1. ワウフランナーの定義

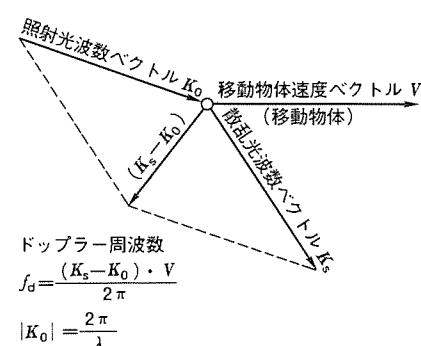


図2. ドップラー効果の原理

この論文では、非接触速度むら測定器の測定原理と構成・性能・特長・用途例などについてその概要を報告する。

2. 測定原理と構成

2.1 ワウフランナーとは⁽¹⁾

古くから、レコードプレーヤーなどの回転機構を持つ機器の性能指標として、ワウフランナーが使用されている。レコードプレーヤーなどの回転むらをなすワウフランナーは、録音・再生時の音質に直接影響を与えるため、その評価方法が重要な課題であった。

ワウフランナーは、図1に示すように平均的な回転速度 V_0 に対する回転速度の変動量 ΔV の百分率として次式によって定義されている。

$$\text{ワウフランナー} = \frac{\Delta V}{V_0} \times 100 (\%) \quad \dots \dots \dots (1)$$

当社で製品化した非接触速度むら測定器 LV-202 は、レーザ光のドップラー効果を利用したレーザドップラー速度計（以下 “LDV” (Laser Doppler Velocimeter) という。）と基本原理を同じくするものである。次に、LDV を基本原理⁽²⁾とする非接触速度むら測定器について述べる。

2.2 非接触速度むら測定器の原理と構成

図2は、ドップラー効果の原理を示す図である。レーザ光を移動物体に照射すると、その散乱光の波長（周波数）は、ドップラー効果によって照射光の元の波長（周波数）から移動物体の速度に応じて偏移する。この周波数偏移量、すなはちドップラー周波数 f_d は次式で与えられる。

$$f_d = (K_s - K_0) \cdot V / 2\pi \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 K_s 、 K_0 ：照射光、散乱光の波数ベクトル

V ：物体の移動速度ベクトル

したがって、この f_d を測定することによって、移動物体

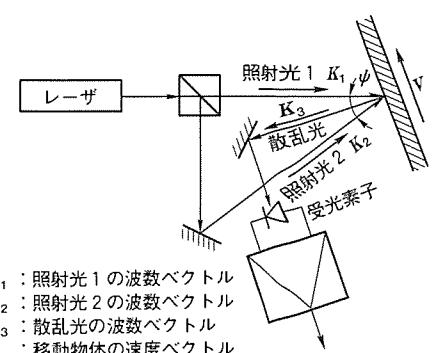


図3. LDV の基本光学構成

の速度 V を知ることができる。

LDV の基本光学構成を図 3 に示す。LDV は、分割された 2 本のレーザビームを移動物体の上に互いに反対方向から交差するように照射する。この 2 本の照射光に対応した散乱光には、正負同じ量の周波数偏移が生ずることになる。これらの散乱光を受信光学系で重ね合わせることによる干渉によって、次式に示すドッpler周波数 f_d が検出される。

ここで、 V ：物体の移動速度

λ : レーザ光の波長

ψ ：2本の照射光の交差角

LDV のドップラー周波数 f_d と物体速度 V との関係は、センサの光学配置で決定される交差角 ψ だけに依存するため、センサの設置条件の制約を受けにくく高い精度の計測が可能となる。

以上のように、LDV を測定原理とする非接触速度むら測定器では、ロータリエンコーダなどの回転センサを用いた従来の測定方式と同様、回転体又は移動物体の速度をドップラー周波数のパルス信号として検出するため、ドップラー周波数の周波数変調度からワウフランサーを測定することができる。この非接触速度むら測定器は、従来の測定方式と比較し、次の大きな特長を持っている。

- (a) 非接触測定のため、測定対象の負荷にならず回転体、移動物体の真のワウフラッターが測定できる。
 - (b) 速度に対応したドップラー周波数は、ロータリエンコーダなどの回転センサの出力パルス数と比較し非常に高いため、低速度での測定分解能と高い応答性能が確保できる。

当社の非接触速度むら測定器 LV-202 の構成と外観を、それぞれ図 4、図 5 に示す。この測定器は、プローブと信号処理部から構成され、動作は次のとおりである。

(1) プローブ

プローブは、レーザ光源として半導体レーザを内蔵し、受信系に光ファイバを使用することによって小型、軽量化されている。

また、被測定物の停止を含む往復動の速度計測を可能とするため、照射レーザビームの出力端に音響光学変調器を付加し、2本の照射レーザビームの波長(周波数)を各々異なった周波数 f_{M1} , f_{M2} だけ偏移させている。このことによって、被測定物からの散乱光を電気信号に変換したドップラー信号として、式(3)で示した速度に比例するドップラー周波数 f_d と2本の照射レーザビームの周波数偏移量の差の周波数 f_M (= $f_{M1} - f_{M2}$)との和の形で、次式に示す周波数 f_{d0} 信号が得られる。

$$f_{d0} = (f_{M1} - f_{M2}) + f_d \\ = f_M + \frac{2V}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \dots \dots \dots \quad (4)$$

すなわち、受信したドップラー周波数を、あらかじめ光学的に一定周波数だけオフセットさせることによって、零速度を含む往復動の速度計測が可能となっている。

(2) 信号处理部

プローブで受信したドップラー周波数を含む信号光は、光ファイバケーブルによって信号処理部まで導かれ、光検出器でドップラー信号として電気信号に変換される。

このドップラー信号は、微弱でレベル変動を受けていたため、ビデオ増幅器、周波数トラッカなどによって速度演算処理できる信号に波形整形される。速度演算は、 F/V 変換回路からなるアナログ処理とカウンタ回路からなるデジタル処理の二系統で処理されている。これらの信号は、マイクロプロセッサによって演算処理され、速度、ワウフリッターなど測定に必要な信号形態に変換後、表示・出力される。

3. 性能と特長

ここでは、当社非接触速度むら測定器 LV-202 の主要性能と特長について概説する。

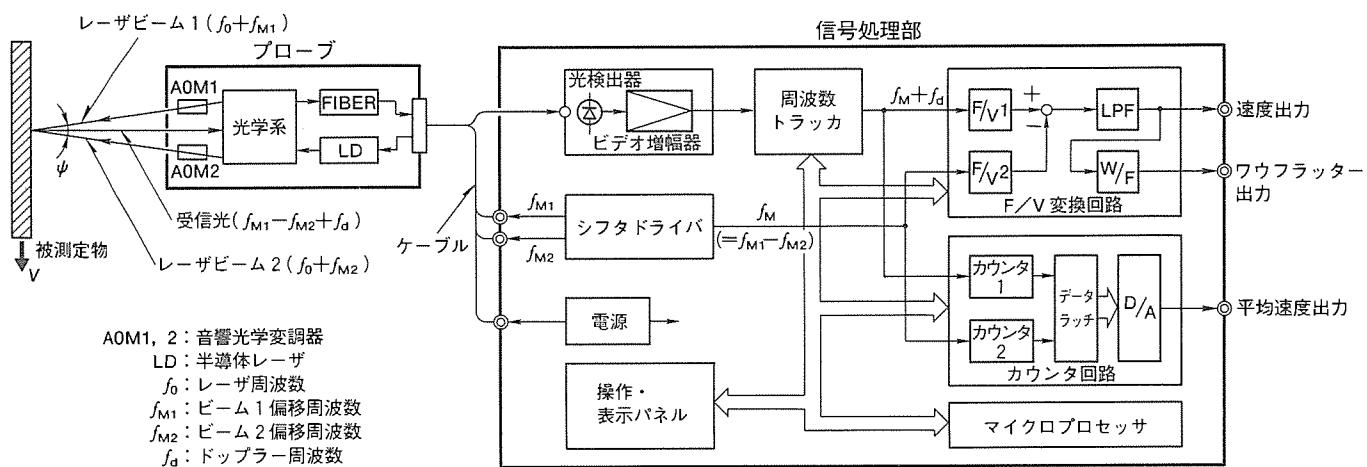


図4. 非接触速度むら測定器の構成

3.1 主要性能

当社非接触速度むら測定器の主要性能を表1に示す。この速度むら測定器は、表1に示した標準仕様のほか、次のようなオプション機能をもつ多機能な測定器である。

(1) 測長機能

ドップラー信号に含まれる周波数信号 f_{d0} と2本の照射レーザビームの周波数偏移量の差周波数 f_M から、ドップラー周波数 f_d を抽出し、積算カウントすることによって、移動物体の長さを測定するものである。測長結果は、信号処理部にデジタル表示するとともに、単位長さ当たりの測長

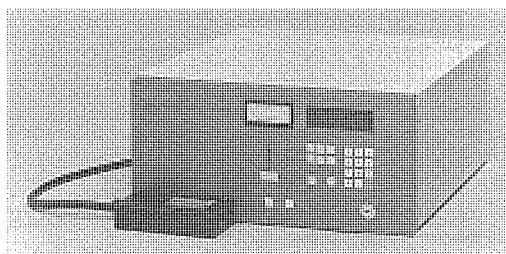


図5. 非接触速度むら測定器の外観

パルスとして外部に出力している。また、速度測定範囲内において、移動物体の停止を含む往復動の長さ測定も可能となっている。

(2) 変位測定機能

測長機能と同様に、速度方向に対応した正負の2種類のドップラー周波数 f_d をUP/DOWNカウントした後、D/A変換することによって、被測定物の変位量に比例したアナログ電圧として出力している。変位測定分解能は、ドップラー周波数の1パルスから決定され、レーザ波長 λ とビーム交差角 ψ から $\lambda/(2\sin(\psi/2))$ で与えられる。交差角 $\psi=20^\circ$ 、 $\lambda=0.78\mu\text{m}$ の場合、変位測定分解能は約 $2.5\mu\text{m}$ となる。

(3) 振動測定機能

この機能は、プローブの照射レーザ光の波長(周波数)を偏移させる音響光学変調器のオフセット周波数 f_M を変更することで、正逆速度方向が変化する振動測定を可能としたものである。

交差角 $\psi=20^\circ$ のプローブを使用した場合、最大振幅

表1. 主要性能

項目	仕様	備考
1. 方式	差動型レーザドップラーワイド	
2. プローブ		
(1) 使用レーザ	半導体レーザ: 波長 780nm 出力 20mW	音響光学変調器付き
(2) ビーム交差角	$\psi=20^\circ$	・ビーム交差角 $\psi=10^\circ, 6^\circ, 3^\circ$ も対応可能
(3) 測定距離	$100\pm2\text{mm}$	・ビーム交差角 $\psi=10^\circ, 6^\circ, 3^\circ$ に対応して測定距離は 200, 300, 600mm となる。
3. 測定範囲		
(1) 速度測定範囲	$-40\sim1,000\text{m}/\text{分}$	・ビーム交差角 ψ によって最大 2,000m/分まで測定可能
(2) 速度むら測定範囲	0.15~10%	・外部FFTで0.001%までの測定可能
4. 測定精度		
(1) 速度測定精度	$\pm0.2\%$ 又は $0.2\text{m}/\text{分}$ 以下	
(2) 速度むら測定精度	$\pm5\%$ FS 以下	
5. 出力信号		
(1) 平均速度出力 (D/A変換出力)	<ul style="list-style-type: none"> 出力電圧: $10\text{VFS}, 0\sim+10\text{V}$ フルスケールレンジ: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1,000, 2,000 $\text{m}/\text{分}$のレンジ選択 サンプリング周期: 50ms 平均化処理: 1~99回の移動平均 	平均速度に比例したアナログ電圧出力
(2) 速度出力 (F/V変換出力)	<ul style="list-style-type: none"> 出力電圧: $10\text{VFS}, -10\sim+10\text{V}$ フルスケールレンジ: 20, 50, 100, 200, 500, 1,000, 2,000 $\text{m}/\text{分}$のレンジ選択 	速度に比例したアナログ電圧出力
(3) 速度むら出力	<ul style="list-style-type: none"> 周波数応答: DC~5kHz 出力電圧: $1\text{V}_{0\sim\text{pFS}}, -1\sim+1\text{V}$ フルスケールレンジ: 0.1%, 0.3%, 1%, 3%, 10% のレンジ選択 周波数応答: 0.5Hz~5kHz 	高域特性は、5Hz~5kHz間を5Hzステップで設定可能 ワウフランジャーに比例したアナログ出力
6. 表示		
(1) 速度表示	<ul style="list-style-type: none"> デジタル4けた表示、浮動小数点 $\pm\text{□.□□□}\sim\pm\text{□□□□□}\text{mm}/\text{s}$ 	
(2) 速度むら表示	<ul style="list-style-type: none"> デジタル3けた又は4けた表示 レンジ内固定小数点、単位% モード選択スイッチによって実効値、ピーク値を選択表示 	
(3) 動作モード表示	動作モード、設定値等をLED及びデジタル表示	
7. 所要電源	AC100 $\pm10\text{V}, 50/60\text{Hz}, 200\text{VA}$ 以下	

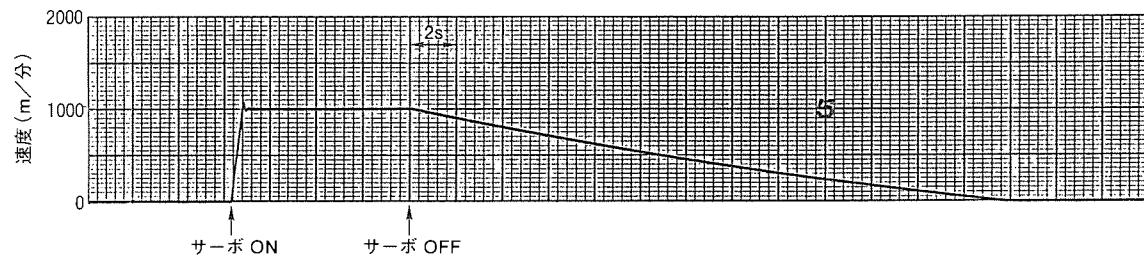
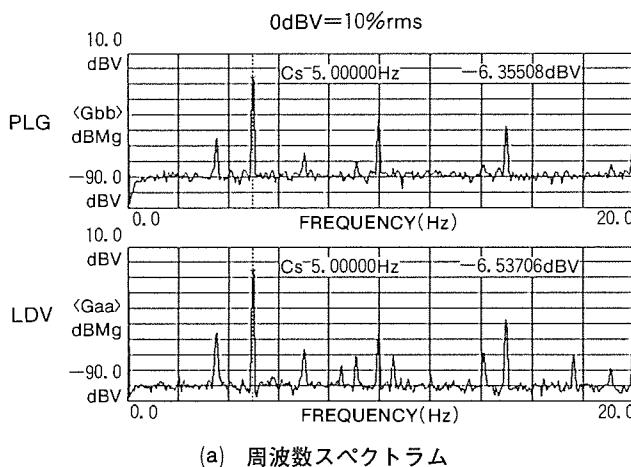
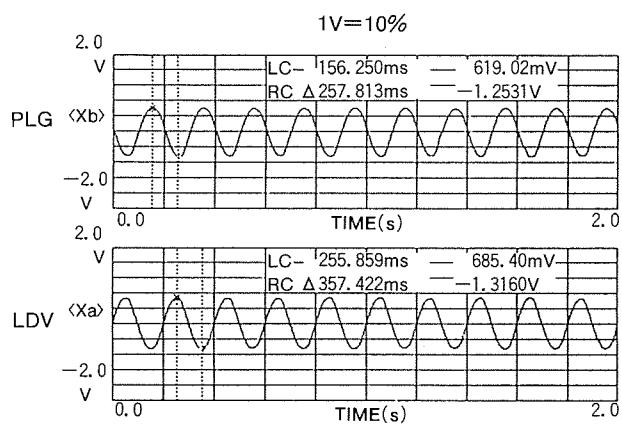


図6. サーボモータの過渡応答測定例



(a) 周波数スペクトラム



(b) 時間波形

図7. ワウフランッター測定例

10m/sの振動速度まで測定できる。周波数応答はDC～5kHzであるが、高周波振動では加速度応答の制約から測定可能振幅は小さくなる。

(4) 超低速度測定機能

1m/s以下速度を、高い精度と分解能で測定する機能である。音響光学変調器のオフセット周波数 f_M の変更とドップラー周波数を10倍する機能を持った低速度専用周波数トラッカの使用によって対応している。

(5) 出力インターフェース機能

パソコンコンピュータなどと接続して、速度むら測定器の測定条件の設定、測定データの管理・解析用のGPIBインターフェースと各種製造ラインの速度・長さ測定データのデジタル出力用としてデジタルパラレル出力(最大28ビット)のインターフェース機能が装備できる。

次に、この速度むら測定器の代表的な性能データの一例を示す。図6は、速度制御したサーボモータの零速度から1,000m/sまでの立ち上がり、立ち下がり特性データである。図7は、一定な速度で回転しているサーボモータに外部から5Hzの変調周波数で速度変調を加えたときのワウフランッターの測定例である。図では、サーボモータに直結しているロータリエンコーダと非接触速度むら測定器によって測定したワウフランッターの時間波形と周波数パワースペクトラム波形について各々比較している。図8は、この測定系においてサーボモータに与える速度変調度を変化させて測定したロータリエンコーダと非接触速度むら測定器のワウフランッターの相関を示す。

3.2 特長

このような性能、機能をもつ当社非接触速度むら測定器LV-202は、次にあげる特長を持っている。

(1) 非接触測定

- (a) 被測定物の特性に外乱を与えることなく、測定対象の真の速度、ワウフランッターの測定ができる。
- (b) 光を被測定物に照射するだけで測定可能なため、どんな測定対象でも、直接測定できる。

(2) 容易な取扱い

- (a) 半導体レーザを採用した小型・軽量プローブのため、設置条件の制約が受けにくい。
- (b) 停止した被測定物でも測定可能なため、プローブのセッティングが容易で測定時間の短縮が図られる。
- (c) 被測定物からの反射光レベル変動による測定最適条件を瞬時に自動設定するので、レベル調整不要など操作性が大幅改善している。

(3) 高い測定分解能

光のドップラー効果を利用して測定するため、従来のロータリエンコーダによる測定方式に比べ、低速時での測定分解能と応答性が大幅に向上している。

(4) 零速度からの測定

- (a) 音響光学変調器の採用によって、零速度を含む往復動する被測定物の速度が欠測なしに連続測定できる。このため測定分野が大幅に拡大している。
- (b) 特に、高い応答性能をもつ周波数トラッカとの組合せで零速度からの立ち上がり、立ち下がり特性などトランジエント速度測定に威力を発揮する。
- (c) ドップラー信号として、光学的に一定な周波数をオフ

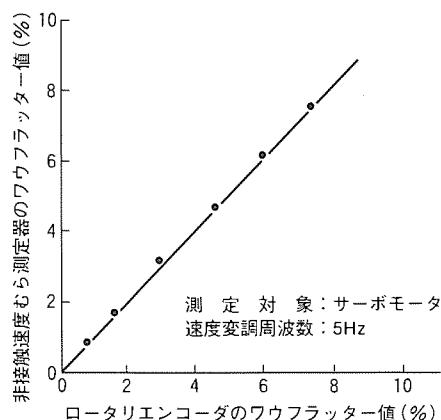


図8. ワウフラッターの相関

セットして処理しているため、レーザ光源などに起因する低周波領域のノイズ($1/f$ ゆらぎノイズ)の影響を低減している。特に、超低速度の測定安定性と高い性能を維持している。

(5) 豊富なオプション機能

移動物体の測長・変位測定・振動計測・超低速度測定・外部インターフェースなど用途によって豊富なオプション機能をサポートしている。

4. 用途例

高い性能、豊富な機能などを特長とする当社非接触速度むら測定器LV-202は、各種モータ・AV機器・OA機器などの開発試験、検査用としての速度、ワウフラッター計測はもとより、各種製造ラインにおける制御用センサとしての速度、長さ計測、リニアアクチュエータなどの挙動解析のための振動、変位測定、トランジェント特性測定など幅広い分野に利用されている。ここでは、代表的な次の分野における用途例について述べる。

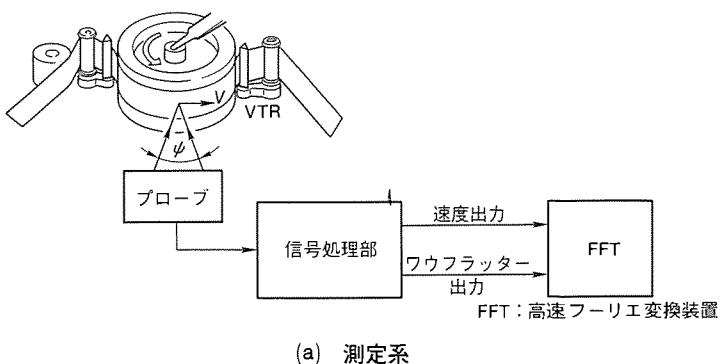
4.1 VTRなどのAV機器

VTRの画像ジッタは、VTRの構成品であるドラムモータ、テープ、インピーダンスローラなどの挙動が複合して発生している。

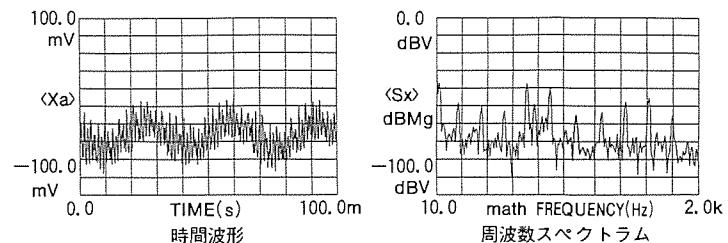
従来、画像ジッタの解析は、ドラムモータに内蔵するFG(Frequency Generator)からワウフラッターを測定したり、テープに収録した一定周波数の基準信号を再生し測定することによって評価していたが、画像ジッタとの相関、ジッタ発生メカニズムの完全な究明には至っていない。非接触測定方式では、モータ単体はもとより、走行テープ各部のワウフラッターが直接測定可能なため、画像ジッタの解明、VTRの高性能化の開発ツールとして利用されてきている。図9は、VTR走行テープのワウフラッターの測定データ例を示すものである。

4.2 各種モータ

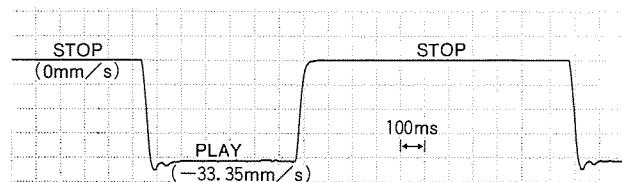
回転機構を持つ機器には、用途によって、小型精密モータ、ギヤードモータ、サーボモータなどが使用されている。これ



(a) 測定系



(b) テープ走行のワウフラッター特性



(c) テープ走行の立ち上がり・立ち下がり特性

図9. VTRテープ走行のワウフラッター測定例

らの機器の基本構成品である各種モータの性能評価としてのワウフラッター計測は、必要不可欠となっている。従来の回転センサによる測定方式では、センサの取付け、セッティングなど測定に要するタクトタイム、個人差による測定データの信頼性などの問題点があったが、非接触測定方式でこれらの課題を解決している。

4.3 OA機器

複写機・スキャナ・プリンタ・ファクシミリなどのOA機器では、回転機構と直進機構が互いに連動したメカニズムで動作している。複写機を例にとると、感光ドラムの周速度と転写用紙の送り速度とのスリップ、速度むらが、印画における濃淡、色ずれ、印字むらの発生要因となる。感光ドラムの周速度は、ドラム自体が高温で熱膨張するため、回転軸に取り付けられたロータリエンコーダでは測定できない。したがって、これら印字むらなどの解析には、ドラム周速度、転写用紙の移動速度を直接測定する非接触測定が必要となっている。

4.4 産業用機械

工作機械、ロボットなどのメカトロ製品の送り速度、変位測定は、加工精度、位置決め精度の観点から高い測定精度が要求され、非接触速度むら測定器が使用されはじめている。

図10は、リニアアクチュエータの往復動の送り速度、変位の測定例である。図11は、マシニングセンターの刃物欠

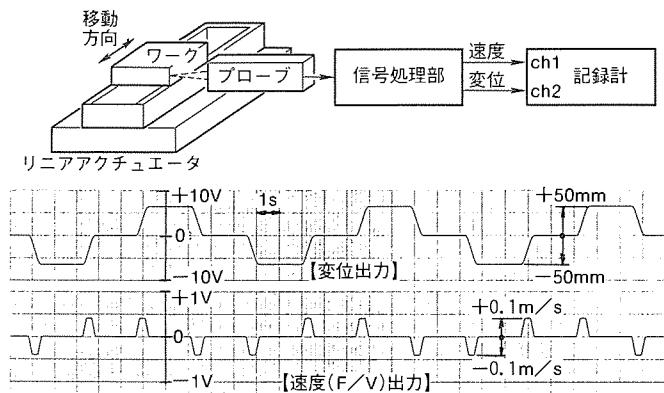


図10. リニアアクチュエータの送り速度・変位測定例

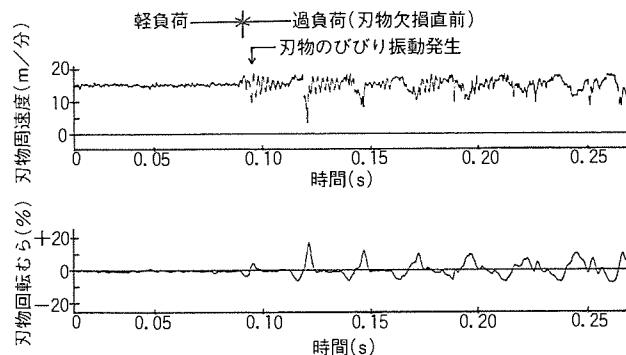


図11. マシニングセンターの刃物の回転むら測定例

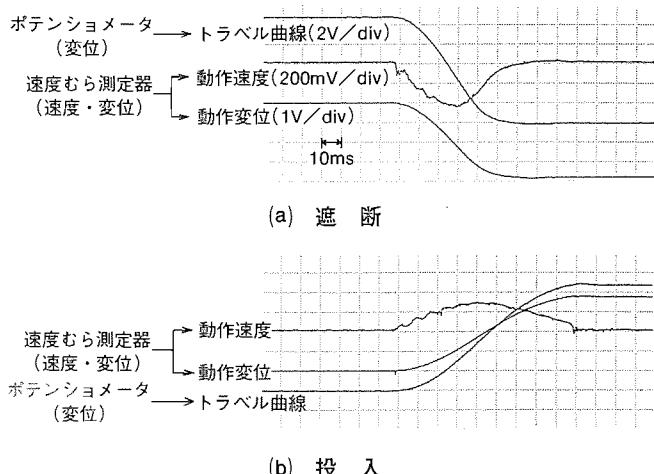
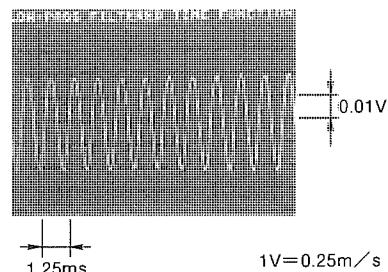


図12. 電力開閉器の投入・遮断特性測定例

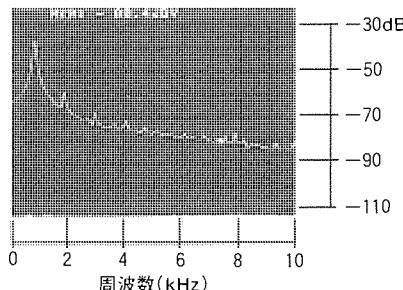
損前後の刃物の回転むらの測定例を示す。無人連続運転するマシニングセンターの刃物欠損は、刃物の保守費用の増大、マシンの稼働率の低下、ワークの損傷など重大な損害を招く。この用途例は、ワークの切削条件によって起こる刃物の過負荷状態を、負荷に比例して変化する刃物の回転むらで事前に検出し、切削送り速度を制御することによって刃物の欠損を防止している。

4.5 トランジエント特性測定

電力開閉器の投入、遮断時の開閉器の動作速度、変位量の測定は、電力開閉器の維持管理にとって重要な測定項目となる。また、杭打機のリバウンド変位量の測定は、杭打工事の



(a) 時間波形



(b) パワースペクトラム

図13. 振動測定例 (正弦波: 1kHz, 5.0mm/s_{0-p})

施工管理に必要である。このほか、射出成形機の鉄込み速度、ハードディスクのシーク、アクセスタイルの測定、タイピュアなどの印字ヘッドの挙動解析など零速度からのトランジエントな速度、変位測定の分野は多い。高い応答性、零速度からの連続測定、変位測定機能などの特長をもつ当社速度むら測定器は、これらの用途に威力を発揮する。

図12は、電力開閉器の投入、遮断特性の測定例である。

4.6 その他の用途

以上紹介した用途のほか、非接触速度むら測定器は、各種製造ラインの制御用としての速度、長さ測定、搬送系の設備診断、自動車関連機器の振動解析、トランスマッシャン駆動系の伝達特性解析など幅広い分野に利用されている。図13は、正弦波加振している物体の振動測定例である。

5. むすび

当社レーザドップラ方式の非接触速度むら測定器について、その性能・特長・用途例を中心に紹介した。この測定器は、一般工業計測器として速度・長さ・ワウフラッター・変位・振動測定など幅広い用途に利用されており、工業計測器としての地位を確立しつつある。今後、多様化した顧客の要求にこたえるべく、さらに、性能の向上、機能の充実を図っていく所存である。

参考文献

- (1) オーム社編:「ワウフラッター測定器」の最新動向、エレクトロニクス、34, No. 5, 73~81 (1989)
- (2) 田代秀夫、小池敦美:レーザドップラ速度計の応用、第3回光波センシング技術研究会講演論文集、91~98 (1989)

サーマル イメージャ

藤野正太郎* 日和佐 淳*
西村照弘* 柳本重治*
三好哲夫*

1. まえがき

赤外線は波長領域でいうと、可視光と電波の中間に位置する電磁波の一種である。赤外線は可視光に比べると、昼夜に関係なく観測が可能であり、また電波に比べると、波長が短かいので空間分解能に優れている。物体は、自身の温度や放射率に応じた強さの電磁波を放射しているが、常温付近の物体からの放射エネルギーは赤外線領域が圧倒的に多い。物体から放射される赤外線を検出することにより、夜間でも照明なしで撮像することができ、かつ物体の温度情報を得ることができる。このような赤外線の優れた特徴を生かした映像装置がサーマル イメージャである。

当社では、赤外線検出器と走査回路をシリコン基板上に二次元配列した赤外線固体撮像素子の高集積化に成功し、標準のテレビ画像と同品位の赤外線映像を得ることができる“三菱サーマル イメージャ”を完成した。ここでは、その最新モデル“IR-5120C”を紹介する(図1)。

“三菱サーマル イメージャ”は、高解像度・高感度の赤外線テレビジョン装置である。1988年4月に発売以来、その性能の高さに対し、世界中から大きな反響をいただいている。

サーマル イメージャは、カメラヘッドとカメラ コントロールユニットで構成され、カメラヘッドには、25万画素の赤外線固体撮像素子IRCSD (Infrared Charge Sweep Device) とそれを極低温まで冷却する密閉式クーラーを内蔵している。カメラ コントロールユニットは、赤外線映像をより美しくするための画質改善画像処理とクーラードライバ及び電源で構成されている。

2. 25万画素の赤外線固体撮像素子

赤外線を検出するためには、Si, HgCdTe, InSbなどの半導体がよく知られている。なかでも、1973年 Shepherd

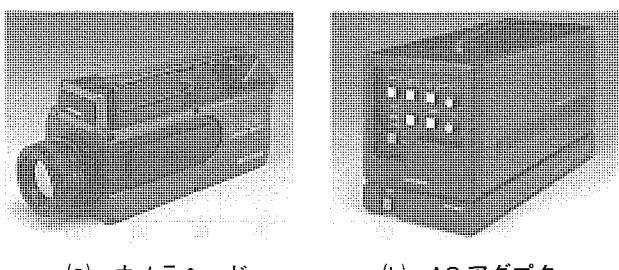


図1. 三菱サーマル イメージャ IR-5120C

とYangによって提案されたシリコン ショットキーバリヤ赤外線検出器⁽¹⁾は、シリコンVLSI 製造技術が使用できることと、シリサイドを用いたショットキーバリヤ検出器の個々の感度の均一性が高いため、多画素化に最も適している。

当社では、微少な画素でも高い開口率が得られるCSD (Charge Sweep Device) 方式を用いて、25万画素(512×512画素)の白金シリサイド(PtSi)ショットキーバリヤ赤外線固体撮像素子を開発することに成功した。図2にCSDの構造と動作を説明するため、簡単な4×6画素のCSD素子を示す。

通常の固体イメージセンサCCD (Charge Coupled Device)では、インライン転送方式を採用している。このインラインCCD(IL-CCD)では、1画素内に1検出器の信号電荷を蓄積転送できるだけの垂直CCDを必要とし、その垂直CCDの電荷転送容量によって最大電荷蓄積量が制限される。したがって、IL-CCDの最適設計は、検出器の電荷蓄積容量と垂直CCDの電荷転送容量を等しくすることである。一般には、電荷の飽和によるブルーミングを少なくするために、検出器の開口率は最適値よりも小さく設計される。一方、CSDによる信号読出し方式では、垂直電荷転送素子(CSD)全体を一つの大きな電荷井戸とし、1画素の検出器の電荷をCSD全体に広げて転送することができる。飽和レベルは、SB検出器の電荷蓄積能力で決まり、飽和レベル以上の光入射に対しても電荷転送ラインでは飽和することなく、ブルーミングの発生しないのがCSD方式の特長である。

図2において、各PtSiSB検出器で赤外線が検出され、赤外線の強さに応じた電荷が蓄積される。次に、水平に並んだ画素のトランスマッゲートが同一のタイミングで開き、PtSiSB検出器の電荷が対応するCSDチャネルに移動する。

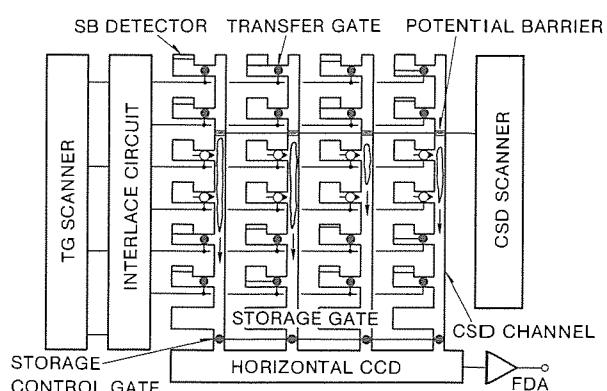


図2. 赤外線固体撮像素子

CSD チャネルに読み出された信号電荷は、CSD 走査回路を駆動することによって図の下方へ掃き出され、1 水平周期内に蓄積ゲート内へ蓄積される。次に続く水平帰線期間にストレージ コントロールゲートが開かれ、蓄積ゲート内に蓄積された電荷は水平電荷伝送素子に転送され、さらに前置増幅器を通して素子外部へ出力される。このように、各水平周期内に 2 ライン分の信号を順に呼び出し、1/60 秒間の 1 フィールド周期で全画素のデータを呼び出す。次のフィールド周期では、インタレースした 2 ライン分の信号を順次呼び出し、1/30 秒のフレーム周期で完全な 512×512 の解像度のある画像を構成する。

$26 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ の検出ピクセルを $2 \mu\text{m}$ デザインルームで設計した場合、インタライン CCD (IL-CCD) では開口効率 (Fill Factor) が 25% であるのが、当社独自の CSD 方式では開口効率が 39% と改善されて、IL-CCD に比較して 1.56 倍の感度を有することができる。

図 3 に、IL-CCD と CSD の比較を示す。完成した赤外線固体撮像素子 IR-CSD の各諸元は次のとおりである。画素数は 512×512 、素子寸法は $16 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 、撮像エリアは $13.3 \text{ mm} \times 10.2 \text{ mm}$ であり、標準 TV 仕様の 4:3 のアスペクトル比を有している。

3. 極低温クーラー

赤外線撮像での今一つの重要な課題は、撮像素子を極低温まで冷やすことである。被写体から放射される赤外線エネルギーは非常に小さく、この微少信号をノイズの中から取り出すためには、撮像素子の暗電流ノイズを下げなければならない。このために、素子を約 80K の極低温にまで冷却する必要がある。従来は、液体窒素を装置に注入し、直接素子を液体窒素温度で冷却する方法や、窒素などの高圧ガスを細孔を通して膨脹されることによって低温を得る JT (Joule-Thomson) クーラーを使用していた。いずれの方式も、液体窒素や高圧ガスを消費するので数時間おきに補充する必要があり、実験室的環境での運用に限られたり、連続運転ができない等の運用面におけるネックになっていた。このような背景にあって、いつでも、どこでも、何時間でも使える冷却方式への要求に対応するために、封入したガスを繰り返し使用する。いわゆるクローズド サイクルクーラーとして、小型軽量でかつ低騒音のスターリング サイクルクーラーを開発し、カメラヘッド内に組み込むことに成功した⁽⁴⁾。

図 4 にスターリング サイクルクーラーの構造を示す。

図 5 にクーラーの冷却特性を示す。クーラーの能力は、冷却温度 77K に対し 1W である。

図 6 に、スターリング サイクルクーラーの動作を示す。このクーラーは、熱機関として知られているスターリング サイクルエンジンの逆サイクルである。

図 6 で動作を説明する。

(1) ①→② (等温圧縮過程)

ピストンの上昇によって、内部の作動ガスは圧縮され、圧力が上昇する。このとき発生する圧縮熱は、シリンダ表面から大気中に放熱される。

(2) ②→③ (等積冷却過程)

ニューマティック空間と作動空間との圧力差によって、ディスプレーサが下降する。ディスプレーサ下部に存在していた作動ガスは、蓄冷器を通過して上方へ移るが、このとき蓄冷器によって冷却される。

ITEM	IL-CCD	CSD
PIXEL LAYOUT		
FILL FACTOR	25%	39%
RESPONSIVITY	1	1.56

PIXEL SIZE=26(H) $\mu\text{m} \times 20(V) \mu\text{m}$

図 3. 画素比較

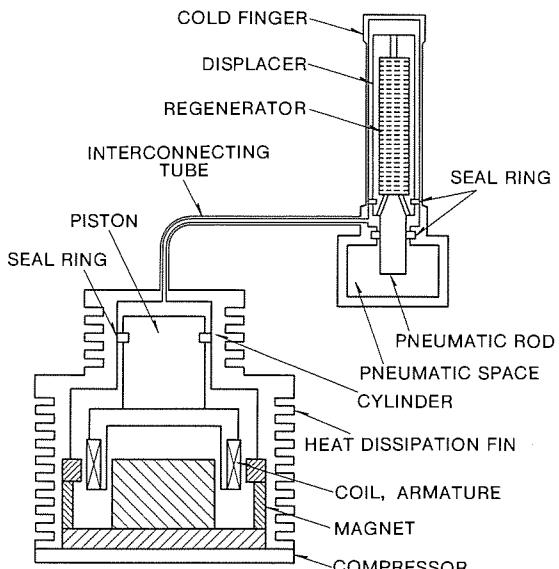


図 4. クーラーの構造

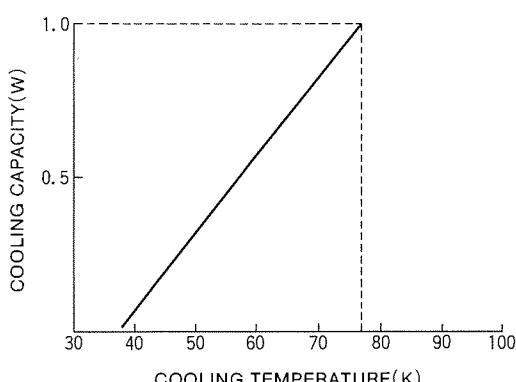


図 5. 冷却特性

(3) ③→④(等温膨脹過程)

ピストンが下降し、内部のガスが膨脹して冷凍作用が生じる。この間ガスの温度は、外部からの熱侵入によって一定に保たれる。

(4) ④→①(等積加熱過程)

作動ガスの圧力が低下すると、ニューマティック空間との圧力差によってディスプレーザが押し上げられる。すると冷凍発生部のガスは、再び蓄冷器を経て下方に移動する。このときガスは、蓄冷器に冷熱を与え、自らは常温となって移動する。

サーマルイメージヤとして組み込んだ状態でのクールダウンタイムは約10分である。消費電力は、約50Wである。また、ランニングテストでは、5,000時間以上の連続運転を確認している。

4. 装置の構成と動作

「三菱サーマルイメージヤ、IR-5120C」の構成を表1に、機能ブロックを図7に示す。

サーマルイメージヤは、赤外線レンズ、カメラヘッド、カメラコントロールユニット及びACアダプタから構成される。

赤外線レンズは、ゲルマニウム及びシリコンの複合光学系であり、波長3~5μmの赤外線を透過してIRCSD面に被写体の放射する赤外線を結像させる。

カメラヘッドの外観を図8に示す。カメラヘッドは、検出器モジュールDTM(Detection Module)、カメラボディ、冷却ファン等からなる。

DTMの外観を図9に示す。DTMは、IRCSDの周囲からの熱侵入を防ぐために、真空容器で取り囲んだデュウ、スターリングサイクルクーラー、素子の駆動回路及び素子出力を増幅するビデオ回路からなり、IRCSDに結像された赤外線画像は電気信号に変換され、ビデオ信号レベルにまで増幅される。

カメラコントロールユニット(図10)は、画像処理回路、クーラードライバ及び電源からなる。

画像処理回路は、次の4項目の機能を持つ。

- (1) デジタル画像処理するためのA/D, D/A変換
- (2) 欠陥画素補正
- (3) 固定パターンノイズ補正
- (4) シェーディング補正

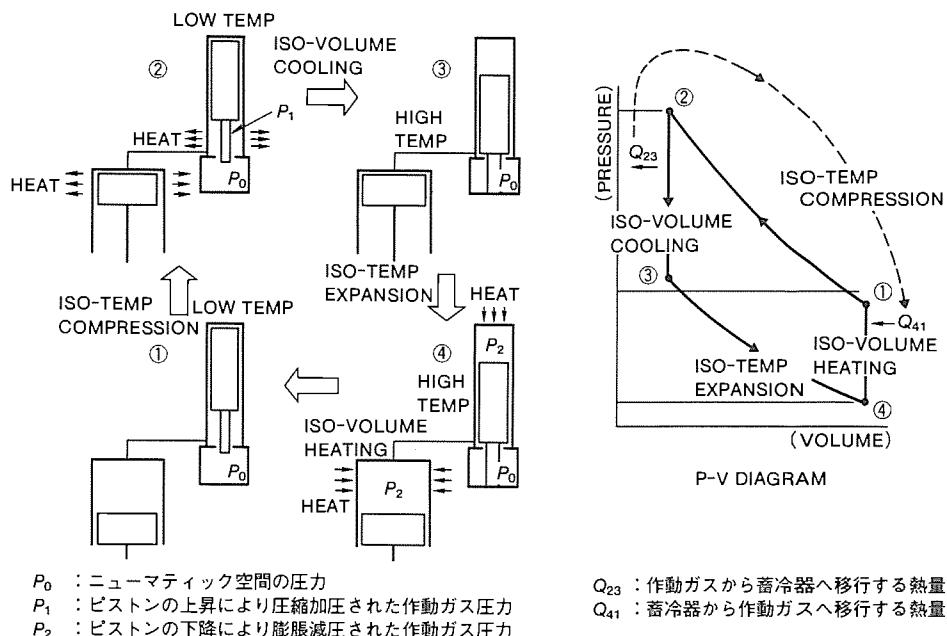


図6. スターリングサイクルクーラーの動作

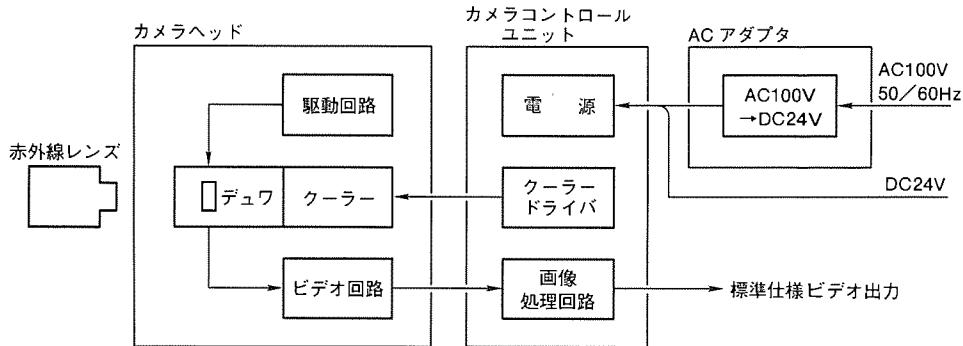


図7. IR-5120Cのブロック図

表1. IR-5120Cの構成品

構成品名	概略寸法 W×D×H (mm)	概略重量 (kg)
レンズ	Φ100×90	0.7
カメラヘッド	130×355×170	7.5
カメラコントロールユニット	200×450×200	13
ACアダプタ	200×450×45	5
ケーブル	5 m	

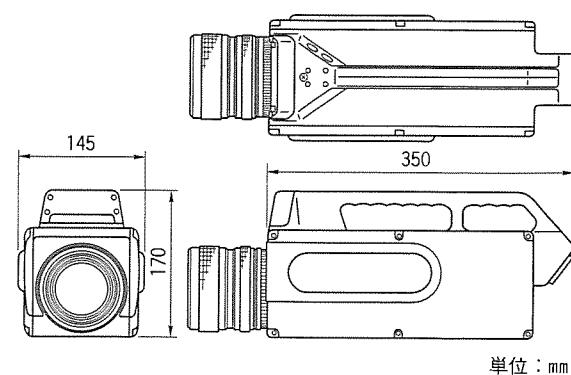


図8. カメラヘッド

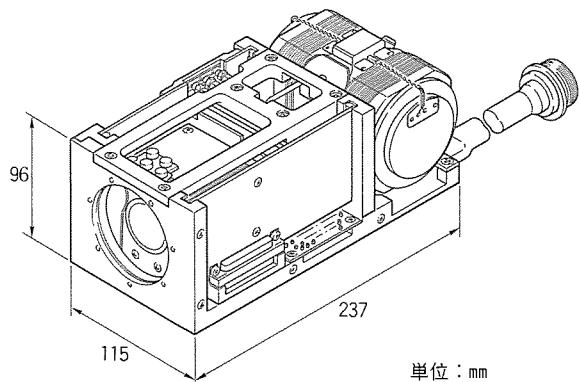


図9. D T M

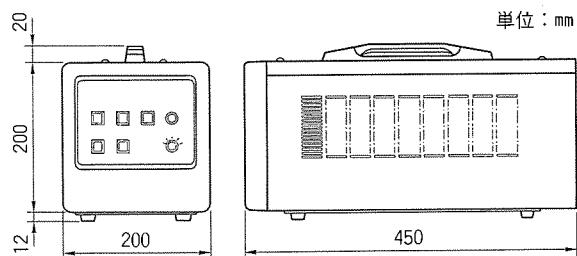


図10. カメラ コントロールユニット

表2. IR-5120Cの仕様

項目	仕様
赤外線検知器	シリコンショットキーバリヤ IRCSD
画素数	512×512
検知波長	3~5 μ m 帯
レンズ	赤外線レンズ f: 50mm F: 1.2
雑音等価温度差	0.15°C (NETD)
視野角	14°(水平) × 11°(垂直)
フィールドタイム	1/60 秒
冷却方式	スターリング サイクルクーラー
画像表示	白黒 256 階調
映像出力	RS170 (NTSC 白黒)
環境条件	温度 -10~50°C 湿度 95%
入力電源	DC22~28V, 250W
ACアダプタ	入力 100V 50/60Hz 出力 DC24V
ケーブル長	5m (カメラヘッド, カメラコントローラ間)

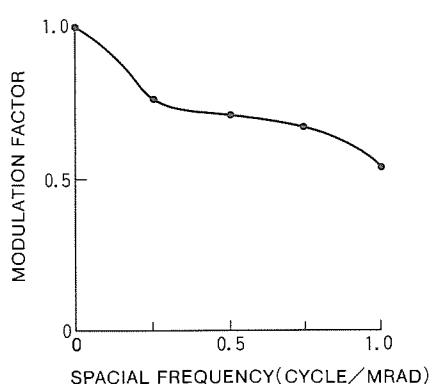


図11. M T F

クーラードライバは、CSD上の温度センサからのフィードバックにより、CSDの温度を80Kに保つためにクーラー電流をコントロールするパルス幅変調増幅器である。

カメラコントロールユニットの電源回路の入力はDC 24Vであり、屋外でのバッテリ使用や、ヘリコプタ搭載時

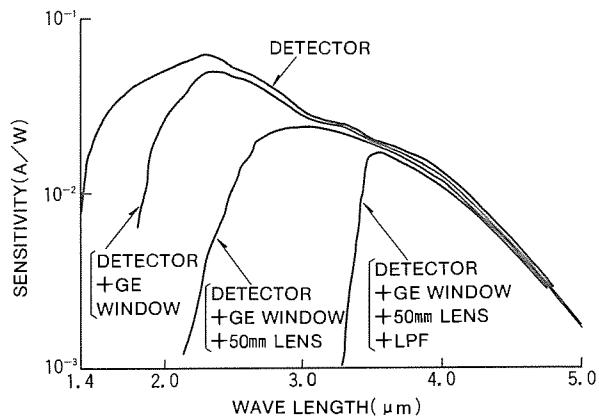


図12. 波長感度特性

表3. オプション機能

オプション項目	仕様	備考
擬似カラー出力	(1)ビデオ出力: NTSC, R, G, B, SYNC (G on SYNC) (2)表示色: 8, 16, 64色選択可	
GPIBインターフェース	(1)主要機能 パネルコントロール フレームメモリーインタフェース(入出力) 画像の静止 スムージング(2, 4, 8画面積分) オーバーレイ表示(3面) グレースケール表示(擬似カラー使用時は カラーバー表示となる。) (2)転送速度: 100kバイト/秒max (画像転送時)	
デジタルビデオ出力	(1)ビデオ出力 ビデオデータ 11/8ビット切替え 出力タイミング RS170準拠 (2)出力信号: 差動出力(RS422) (D-sub37ピン)	
リモートコントロールパネル	(1)パネル仕様: フロントパネルと 同一(電源を除く) (2)ケーブル長: 最大200m(ドラム付き) (標準2m)	
交換レンズ群	(1) f 25mm, F1.2 (2) f 100mm, F1.2 (3) f 200mm, F1.2(レンズサポート付き) (4) f 30~120mm, F1.2 (5) f 50~200mm, F1.4(レンズサポート付き) (6)モータドライブ: 遠隔制御用 (7)リモートコントローラ: 最大200m (ドラム付き)(標準2m)	f 50mm, F1.2 は標準構成品 すべてのレン ズに追加可能
カメラケーブル (10m)		
ビューファインダ	CRTサイズ: 1.5インチ	
ショルダーパッド		
三脚		

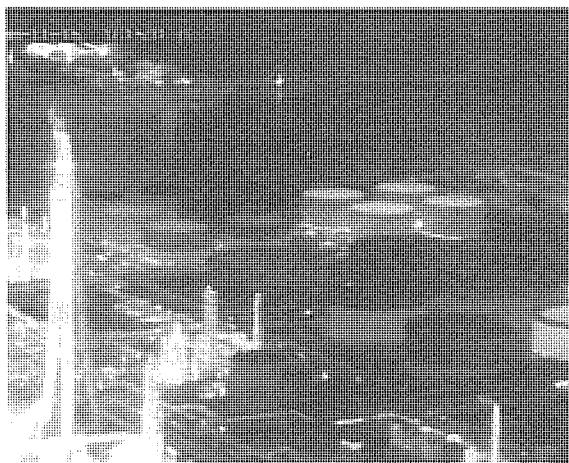


図13. 撮像例

のDC電源の使用を可能にしている。

ACアダプタは、商用電源の100V, 50/60HzをDC24Vに変換するためのものである。

5. 性能

表2に、IR-5120Cの仕様を示す。

雑音等価温度差は0.15°C以下であり、視野角は50mmレンズを使用して水平14°、垂直11°である。

図11にMTF (Modulation Transfer Function)を示す。50mmレンズを使用したときのナイキスト周波数1.0cycle/milliradianにおけるMTFは0.5以上である。

図12に波長感度特性を示す。IRCSD検出器は、1.4~5.0μmまでの感度を持ち50mmレンズを使用したIR-5120Cは1.8~5.0μmの波長帯に感度がある。

6. 豊富なオプション機能

表3に、オプション機能を示す。豊富な交換レンズ群、擬似カラー出力、ディジタルリアルタイム画像出力、コンピュータインターフェース、専門家に使ってもらえる大きなビューファインダ、200mまで延長可能なりモコンパネル等の拡張機能は、広い応用分野での活躍が期待できる。

7. 応用分野

前述したように、サーマルイメージヤIR-5120Cは、従来の赤外線映像装置にない種々の特長を持っている。このことから、従来の装置では不可能であった高密度熱分布映像を、リアルタイムにとらえることができるため、国内外の研究機関(エネルギー分布の研究、ロケット発射時の状況研究、鋼構造物の熱移動の研究、暗視装置の研究、建物診断の研究、半導体熱分布の研究、熱機関の研究、都市構造の研究等)、オンラインでの非破壊検査、設備診断装置として、各種製造ライン(鉄鋼・非鉄金属・自動車・コンピュータ)で利用され、大いに威力を發揮している。

サーマルイメージヤのもう一つの特長である・夜間・暗闇の中を鮮明に見通すことができるところから、夜間の船舶・車両の安全確保のための前方監視・工場・施設のセキュリティシステム、防災システム等に利用されている。当社のサーマルイメージヤが活躍している例を最近の新聞記事から紹介する。

- (1) 夜間1キロからバッチリ。高性能の赤外線検索監視システム。“するが”にもセット。(海上保安新聞、昭和63年7月21日)
- (2) 列車に目玉。赤外線カメラで1キロ先キャッチ。(読売新聞、平成2年4月29日)
- (3) フェリー新時代の旗手。初採用の最新技術がいっぱい。荒天下も安心、赤外線カメラ設置。(日本海事新聞、平成2年5月16日)
- (4) アワビ密海防止に新兵器。赤外線カメラ導入。(岩手日報、平成2年6月19日)

8. むすび

この装置の特長をまとめれば、次のとおりである。

- (1) 高画質、高感度
赤外線撮像装置としては、最も高精細な画像が得られ、しかもNETDが0.15°C以下と高感度である。
 - (2) リアルタイム画像
被写体の動きを自然な映像として補えることができる1/60秒のフィールドタイム。
 - (3) 連続運動が可能
スターリングサイクルクーラーを内蔵しているので、冷却用ガスボンベや液体窒素が不要。
 - (4) 2電源方式の採用
バッテリと商用電源の2電源に対応しているので、いつでも、どこでも撮像が可能。
- 既に国内外の研究機関、放送関係、発電所、船舶の夜間運行、遭難救助、非破壊検査等での活躍を開始している。
- 最後にこのカメラでの撮像例を図13に示す。

参考文献

- (1) Shepherd F.D., Yang, A.C. : Technical Digest of IED M, 310~313 (1973)
- (2) M. Kimata : Technical Digest of ISSCC, 100~101 (1985)
- (3) 木股雅章: テレビジョン学会報告, TEBS101-6, ED8 41 (1985)
- (4) 野間口 有: 超小形スターリングサイクル冷凍機について, 冷凍, 62, No. 719, 937~942 (1987)
- (5) 藤野正太郎: テレビジョン学会報告, 13, No. 26, 49~54 (1989)

インテリジェント電磁流量計とフィールド ネットワーク

長田俊二*
春尾弘志*
鈴木敏春*

1. まえがき

最近のプラント管理システムは、監視制御機能の高度化だけでなく、取り扱う情報についても制御情報から、さらに施設管理等に必要な情報へと拡大してきている。つまり、管理範囲がより広域で、かつフィールドから上位管理レベルまで密接に関連したトータルシステムへと移行し、最適な運転管理、施設管理を一元的、効率的に行える“統合システム”へと発展しつつある。

一方、フィールドにおける計装、及び電気制御の統合による合理化・情報化と、これに対応するネットワーク化の実現が、大きな開発課題となっており、センサやアクチュエータなどのフィールド機器についても、ネットワークに接続するためのシリーズ化が急がれている。

このような背景をもとに、将来のフィールド ネットワーク構想を実現する第一ステップとして、マイクロプロセッサを搭載したインテリジェント電磁流量計を製品化し、公共プラント用総合計装制御システムを対象としたフィールドバスを開発した。本稿では、フィールド ネットワーク構想の概要を紹介するとともに、インテリジェント電磁流量計の特長・仕様などについて報告する(図1)。

2. フィールド ネットワークとフィールドバス

2.1 概要と動向

(1) フィールドバス、フィールド ネットワークとは

フィールドバスの定義は、ISA-SP50 委員会のなかで、“フィールドに設置されたフィールド機器と、計器室に設置された上位コントロール機器との間を結ぶ、デジタル・シリアル方式の通信用リンク”と定められている。この定義に

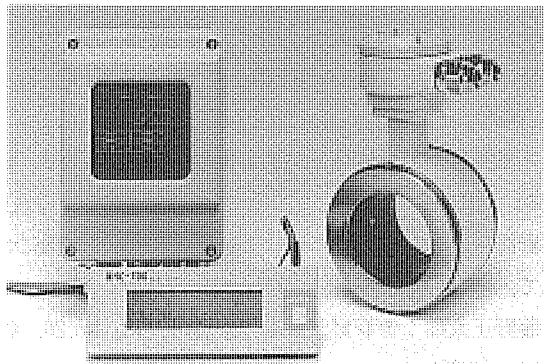


図1. インテリジェント電磁流量計 “SF780F”

基づき、センサ、アクチュエータ等のフィールド機器、及び現場で制御監視を扱うコントローラを含む通信網を、フィールド ネットワークと呼ぶことにする。

(2) フィールドバス動向

フィールドバスは、米国のISA-SP50を中心として世界的な規格化が進められており、現状では低速タイプのH1領域と、高速タイプのH2領域に区分し、大枠を定めつつある。一方、国内ワーキングでの規格化はまだ検討段階であり、共通化はその後となる。この規格化の動きに先立ち、各メーカーとも最近脚光をあびてきたインテリジェント センサと合わせて、フィールドバスの開発を進めている。当社も、共通規格化に先駆けて、独自のフィールド ネットワークシステム構想に基づくフィールド バスシステムの開発を行った。

2.2 三菱総合計装制御システムにおける

ネットワーク構想

昨今のエレクトロニクス技術の進展に伴い、公共プラント用計装制御システムも、電子化、インテリジェント化、ネットワーク化され、全体として、機能面・経済性・信頼性などにおいて下位機種まで整合性の取れた監視制御システムを要求されるようになってきている。

三菱総合計装制御システムでは、このような状況をふまえてトータルネットワークを構築してきており、システムの基本構想である、水平分散システム指向と階層別ネットワークシステムにより、システム構成のフレキシビリティと、システム規模にマッチした最適システム構築を可能にしている。階層別ネットワークは、情報バス、制御バス、フィールドバスの3階層に分かれしており、最上位のネットワークは汎用LANであり、EOAを中心とした汎用機器、画面管理システム等の管理システム間の通信を可能とする。また、制御システムネットワークは、リアルタイム性を重視したので、中央の監視システムとプロセスコントローラ間を結ぶバスであり、このクラスのバスは、大・中・小の規模別に、バスが準備されている。さらに、下位のフィールドレベルでは、フィールド計装機器間用のネットワークがあり、今回開発したフィールドバスがこれに当たる。このフィールドバスを含むフィールド ネットワークは、総合計装制御のトータルネットワーク化の一貫として、センサ関係だけではなく、プロセス関連信号もトータル的にネットワーク化することを目指している。三菱計装システムにおけるネットワーク構想を図2に示す。

2.3 フィールドバス化のメリット

今までは、上位システムに比較して下位のフィールドでは、バス化がなされていないために、限られた情報しか送られず、そのためにメンテナンス情報等は、人手を介して得る等の未熟な手段しかなかった。しかし、昨今、現場機器のインテリジェント化が進み、情報処理機能、通信機能を持つにいたり、従来のプロセス情報のほかに、上位との制御監視データのやり取りも可能となってきている。したがって、インテリジェントなフィールド機器と上位とをデジタル通信網で結合することのメリットとしては、以下の事項があげられる。

(1) フィールド機器群のRAS情報収集の容易化

機器群の自己診断、異常時の情報の上位システムでの診断監視に関して、より従来に比較して精度が向上する。

(2) フィールド機器群から得られる情報量と質の向上

高精度なプロセス値を得ることができ、従来は現場で確認する必要のあった設定データ等の監視が上位からできる。

(3) フィールド機器群のメンテナンスの簡素化

計器類のスパン変更等のコンフィギュレーション、及び機器運転時間等の設備保守管理に必要な情報を容易に収集でき、かつ上位システムから行うことができる。

(4) ケーブル工事の簡素化と増設・変更への対応が容易

従来、各フィールド機器群各自に信号線を布設していたものを、通信ケーブルを配線することで共通化でき、ケーブル費を削減できる。また、増設・変更が発生しても上位コントローラと機器間を結ぶ必要はなく、既に配線されている通信ケーブルを延長すればよい。

2.4 三菱計装用フィールドバスの特長

前述のフィールドネットワーク構想に基づいて、独自のフィールドバスの開発に着手し、電磁流量計及び以降インテリジェント化が予定されている計装センサ用のバスを、開発の第一ステップとした。なお、既設及び他社センサのフィールドバス化は、次ステップとしてバスI/Fの供給等を検討していきたい。

以下に、今回開発した三菱計装用フィールドバスの特長について述べる。なお、概略の基本仕様を表1に示す。

(1) 既存システムとの共存化に対応

フィールドバス専用センサには、4~20mAのアナログ信号系出力を標準装備し、既存システムとの共存化を図っている。また、既存アナログシステムに用いられる、当社インテリジェントセンサに対しては、オプションカードの追加のみで、将来のフィールドバス構想に展開できるよう考慮している。

(2) 標準フィールドバス規格化に対応

将来規格化されるであろう標準フィールドバスへは、部分的変更のみで発展できるよう配慮している。

(3) 高速で安価なシリアル伝送バスを提供

《MELSEC》系の新規開発のシリアルバスをベースとして

採用し、安価で、高速制御向きのバスを構築した。

(4) E・I・C統合が容易に実現可能

FA・シーケンサの分野で広く使われている《MELSEC》系の他のバスとも容易に接続できるとともに、センサ関連の電気信号にも接続でき、電気・計装の統合化がフィールド環境において実現した。計装及び電気の総合化フィールドバスのシステム構造を図3に示す。

(5) 冗長性を考慮

オプション機能として、光バイパスユニットを開発したことにより、もし局に故障があった場合、その局をバイパスすることが可能である。

(6) 局間の長距離化を考慮

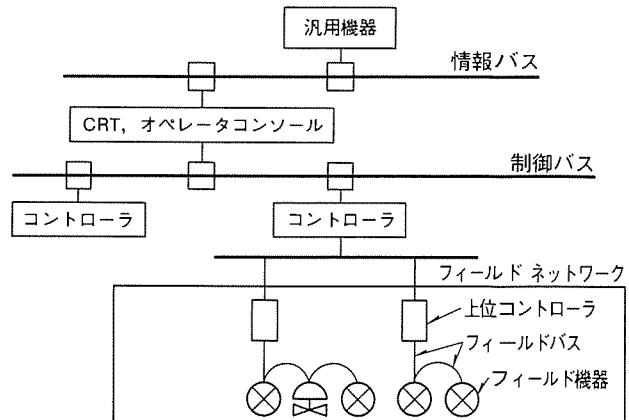
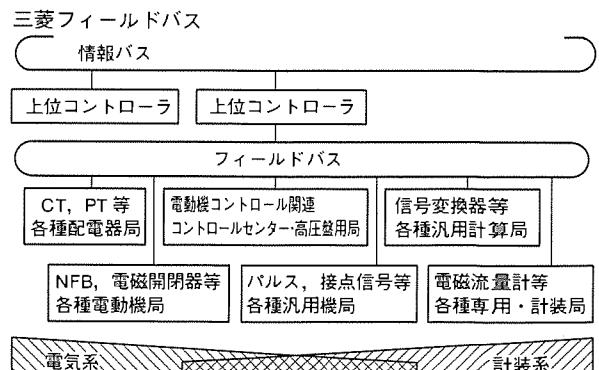


図2. 総合計装システムにおけるネットワーク構想

表1. 三菱計装用フィールドバスの仕様

項目	計装用フィールドバス	
	センサ局	MAX 14局
最大制御制御局数	I/O局	
リフレッシュ時間	3~18ms	
通信速度	1.5Mbps	
局間伝送距離	500m(光)/100m(0.5 ² ツイストペア)	
伝送路形態	ループ形式	
R A S 機能	<ul style="list-style-type: none"> 隣接反転チェック、パリティチェック併用 ステーションコントローラ電源異常時バイパス 	



注: 計装系、電気系両方の高機能化が可能

図3. 三菱フィールドバスのシステム構想

できる。

3.4 仕様・構成

3.4.1 仕様

三菱電磁流量計“SF780F”の仕様を表2に示す。以下、標準装備している機能の一部について説明する。

(1) 多重レンジ(正逆四重レンジ)

流量が大幅に変化する場合に、レンジを切り換えて、精度良く流量を測定する(自動で二重レンジ、外部切換で四重レンジまで可能)。

(2) 正逆流量測定

検出器の向きを変えずに、そのままの状態で逆方向に流れた量の測定が行える。

(3) 自動ゼロ・スパン校正

変換器内部に校正用のキャリブレータを内蔵しており、コミュニケーションからの操作で、校正を実行する。

(4) 積算(正・逆・差)

流量の積算値を内部メモリに記憶し、正方向、逆方向及びその差について各々の積算値を表示する。

(5) 上下限警報

流量測定値が、任意に設定可能な上下限警報点を越えた時に、接点出力を行う。

(6) 自己診断

コイル断線、短絡・入力回路異常・メモリ異常・マイクロプロセッサ異常・バッテリ異常などを検出し、外部への警報接点出力を行う。

3.4.2 構成

電磁流量計は、検出器、変換器及びその間を接続する専用ケーブルで構成される。変換器内部を中心とした構成ブロック図を図5に示す。

3.4.3 特性(性能評価データ)

この電磁流量計における実流試験データの一例を、図6に示す。当初の設計仕様である、 $\pm 1.0\% F.S$ (流速スパン0.3~1m/s), $\pm 0.5\% R.D$ (流速スパン1~10m/s)を十分満足している。

3.5 コミュニケータによるリモート操作

三菱電磁流量計は、専用のコミュニケーションを用いることにより、変換器はもとより、変換器からの4~20mA DC アナログ信号ライン上において、保守・校正・点検などの作業が行える。コミュニケーションの接続方法について、図7に示す。変換器からの4~20mA DC アナログ信号ラインに、コミュニケーションを並列に接続し、このアナログ信号ラインに、デジタル信号を重畠して情報を伝送する。

操作は、表示部分であるLCD(液晶)パネルの上に取り付けられた透明タッチパネルから、日本語表示(漢字含む。)による対話方式

で行う。図8に、コミュニケーションにおけるタッチパネル操作を示す。操作体系は、図9に示すように、仕様・確認・測定・設定・校正・診断といった機能ごとに分類され、階層メニュー方式となっているため、複雑な操作方法を覚えることなく、簡単に扱うことができる。また、フィールドバスの適用時には、これらコミュニケーションから行う同一の機能が、バスを介して上位システムから実行できる。

3.6 実流量検定設備

電磁流量計の性能の向上及び評価を行う上で実流量検定設備を使用する。設備の概要は、下記のとおりである。

(1) 設備規模

(a) 高架複合水槽塔：上部水槽容量 320 t

下部水槽容量 640 t

(b) 最大校正流量 : $10,000 \text{ m}^3/\text{h}$

(c) 被校正口径 : $5 \sim 1,200 \text{ mm} \phi$

(2) 校正方法

(a) 重量基準による(2, 10, 50 tのひょう量タンク及びはかり)。

(b) 50 tを超える場合は、下部水槽レベル、又は基準流量計を用いる。

表2. 三菱電磁流量計“SF780F”的仕様

項目	仕 様		
口 径	$5 \sim 1,200 \text{ mm} \phi$		
ライニング	テフロン PFA, ポリウレタン		
電極材質	SUS316L, チタン, 白金イリジウム ほか		
検出器構造	防浸没(JIS C 0920)		
精度 ($50 \sim 200 \text{ mm} \phi$)	スパン(m/s)	25% 指示以上	25% 指示未満
	1~10	0.5% R.D	0.125% F.S
	0.3~1		1.0% F.S
標準機能	多重レンジ、正逆流量測定、積算、パルス出力、ダンピング、自動ゼロ・スパン校正、自己診断など		
避雷機能	電源、出力信号ラインに避雷素子内蔵		
電 源	AC100V, DC24V 共用		

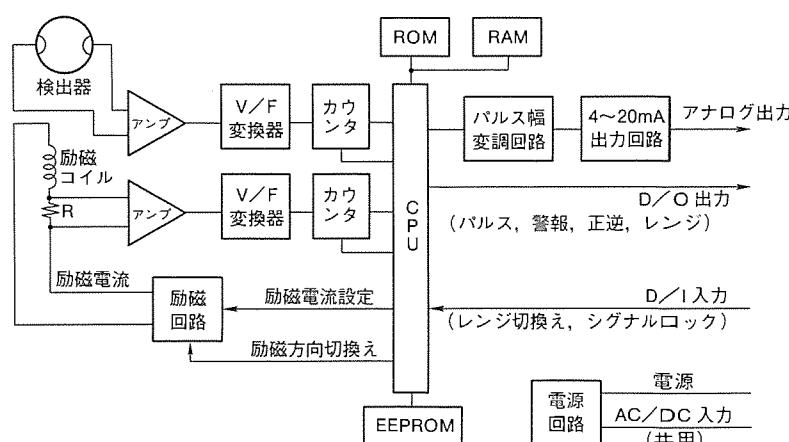


図5. 電磁流量計の構成ブロック図

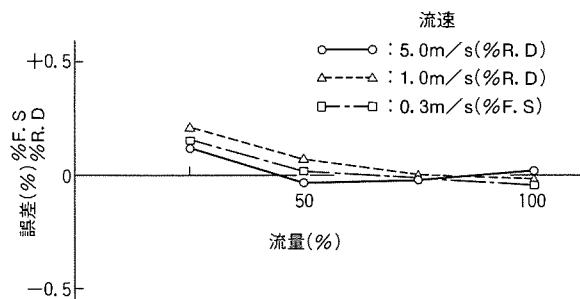


図6. 実流試験データ (口径 80 mm φ)

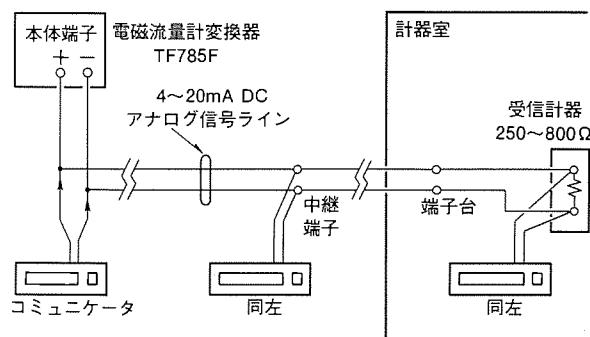


図7. コミュニケータの接続方法

4. 今後の展開

4.1 インテリジェント センサ

今回製品化した電磁流量計については、今後

- ・検出器と変換器を組み合わせた一体型の製品化。
- ・悪条件下においても、安定した計測が行えることを可能とするAI機能の付加

を進めていく。また、フィールド ネットワークの基礎をなすインテリジェント センサのラインナップについては、次のセンサとしてインテリジェント圧力・差圧伝送器の製品化を考えている。また、既設センサや他社センサのフィールドバス化のステップとしては、フィールドバス I/F の提供も考えていきたい。

4.2 フィールドバス

(1) 電気、計装系双方にまたがる高機能化

インテリジェントなフィールド機器の充実と併せて、中央にいながらにして電気系・計装系とも同レベルで監視・制御・メンテナンスが可能になる。また、現場では、コミュニケーションでどこにいても知りたい機器の情報が入手できるようになるであろう。

(2) 標準フィールドバスを含めた適材適所のフィールドバス化

将来標準化されるフィールドバスをメインに、三菱フィールドバスはもちろんアナログ伝送ライン等も混在する適材適所の伝送方式をもつシステムの構築がなされるであろう。

以上、フィールド機器のインテリジェント化に伴い、今後

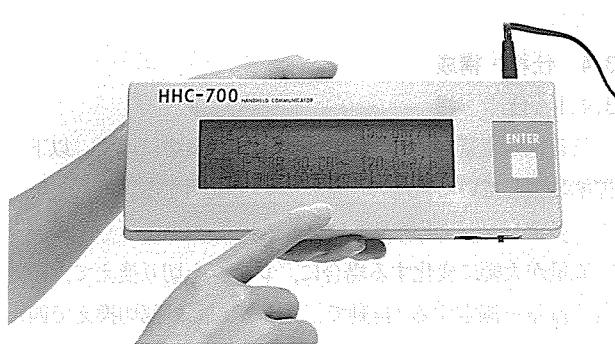


図8. コミュニケータにおけるタッチパネル操作

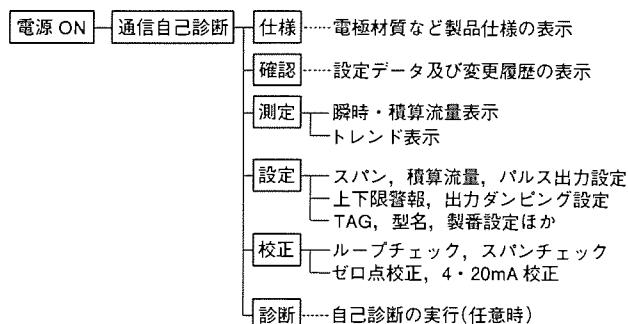


図9. コミュニケータの操作体系

のフィールドには、複数の伝送方式が必要になるであろうが、混在した方式でも使えるようにインターフェースを考慮することで、標準フィールドバスが、確定されるのを待つまでもなく、開発を推進して、設備運用にいち早く貢献していく必要があると考えている。

5. むすび

将来のプラントのフィールド ネットワーク化に対応できるインテリジェント電磁流量計及び三菱フィールドバスの概要について述べた。今後、センサ、アクチュエータなどを含めたフィールド機器において、一層インテリジェント化が進んでいくものと思われる。我々としては、公共プラントのみならず、様々なプラント設備のニーズにこたえるべく、さらにフィールド ネットワーク、センサの開発を続けていく所存である。

参考文献

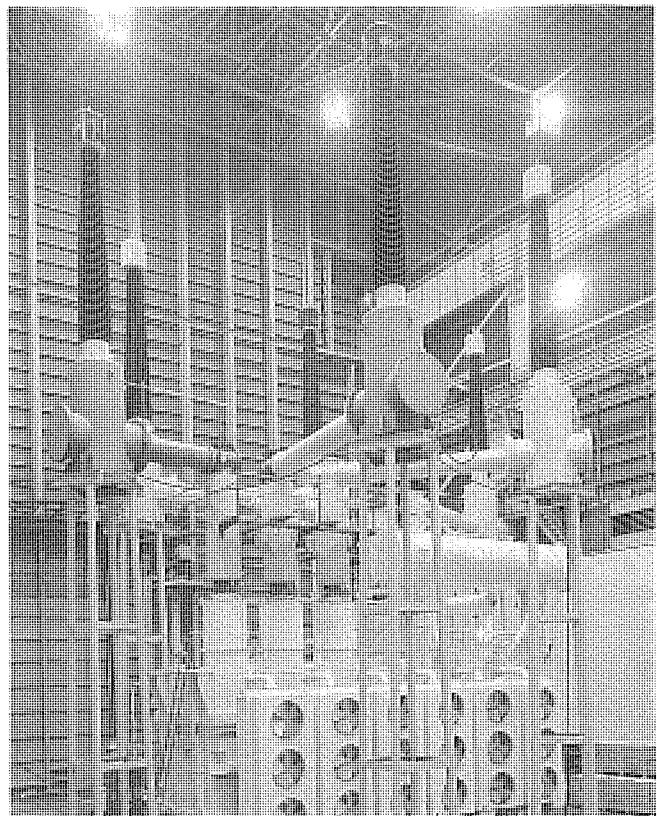
- (1) 川田裕郎、小宮勤一、山崎弘郎編：流量計測ハンドブック、日刊工業新聞社 (1979)
- (2) 石田義三、小宮山 裕、筆保隆弘、岩佐千秋：電磁流量計、第34回システム制御情報学会研究発表講演会 (1990)
- (3) 計測制御機器フィールド・バス動向調査報告書、(社)日本電気計測器工業会 計測制御機器技術委員会、フィールドバス動向調査研究 WG (1988)
- (4) 三菱計装テクニカルブック、三菱電機(株) (1988)

中国・大亜湾原子力発電所向け 三相900MVA・525/420kV単巻変圧器

このたび三菱電機では、中国・GNPJVC殿大亜湾原子力発電所向けに、525kVと420kV連系用として世界最大容量級の三相900MVA、525/420kV単巻変圧器を完成し、良好な試験結果を得ることができました。本変圧器は、当社における大容量・高電圧変圧器の標準である外鉄形ウォームフィット構造を採用し、最新の設計・工作技術により最高水準の低損失化とコンパクト化を実現しました。また、写真では、一次側(525kV)、二次側(420kV)共工場試験用気中プッシングを取り付けていますが、現地ではGISに接続されます。

特長

- 直列変圧器による間接式負荷時タップ切換え方式を採用し二次側電圧を調整していますが、タンク補強の最適配置など合理的なタンク設計を図り、単巻変圧器と直列変圧器の共通タンク構造・コンパクト化を実現しました。
- 一次線路側には、電界緩和形(コンツール)絶縁を採用し、更に衝撃電圧性能改善のため静電板を適正配置することにより、絶縁信頼性の向上・コンパクト化を実現しました。
- 巻数分比(Co-ratio)の小さな大容量単巻変圧器においては、漏洩磁束量の増大に伴い漂遊損失が増加する傾向にありますが、最新の磁界解析技術を駆使して転位位置の最適化・導体の細分化などを図り、大幅な低損失化を達成しました。
- 冷却器は、油側・空気側の冷却効率を改善した高効率ユニットクーラの採用により補機損失の低減を図りました。



仕様

項目	仕様					
形 式	外鉄形(直列変圧器内蔵)					
相 数	3相					
周 波 数	50Hz					
定 格 容 量	900MVA					
定 格 電 壓	1 次 側	525kV	結線			
	2 次 側	420kV				
絶 縁 階 級	1 次線路側 : BIL 1550kV					
	2 次線路側 : BIL 1425kV					
	中性点側 : BIL 170kV					
タップ範囲	420kV +8%、-12% (21点)					
切換方式	間接式負荷時タップ切換					
インピーダンス	11.2% (900MVAベース)					
冷却方式	送油風冷式					
製 造 年 月	平成2年8月					

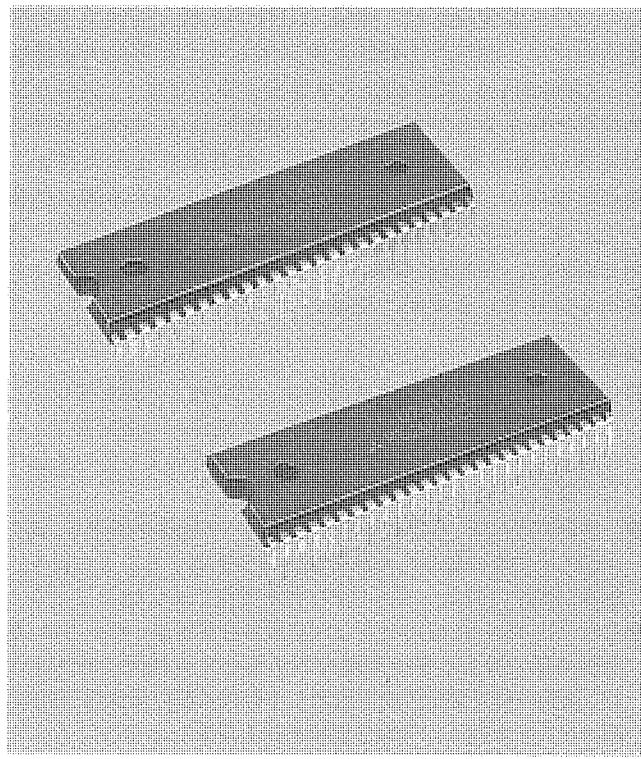
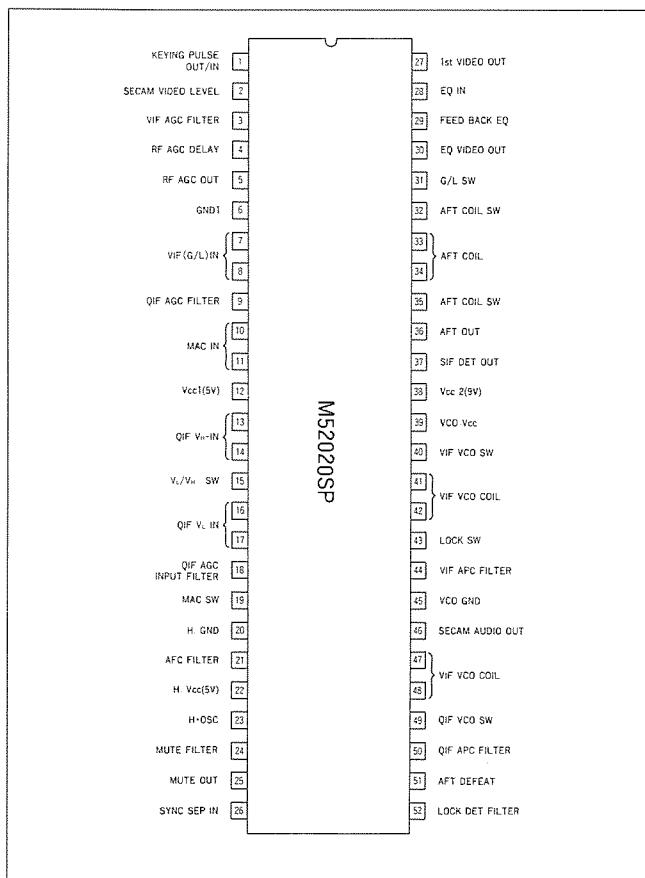
マルチスタンダード対応PLL スポットライ VIF/SIF IC "M52020SP"

このたび三菱電機では、映像、音声の両IF信号処理のために2個のPLLを備え、SECAM Lの映像、音声検波、PAL、B/Gの映像、インターチャンネルの切替回路を内蔵しています。更に、NICAM、D₂-MAC等にも対応可能なマルチスタンダードVIF/SIF IC "M52020SP"を開発、製品化しました。

特長

- VCO、AFTコイル周波数切替回路を内蔵していますので、少ない外付部品でSECAM LのVHF ロー・チャンネルの対応が可能です。
- SECAM L音声検波は、映像同様PLLによる完全同期検波方式のため、直線性の良い音声が得られます。
- インターチャンネル検波はPLLスプリット方式を採用。出力はAGC制御され、ダイナミックレンジも従来より広く設定していますのでNICAMにも対応可能です。
- MACスイッチの切替により、AGC時定数と入力端子が切替わり、D₂-MACにも使用可能です。
- VIF AGCにダイナミックAGCを採用。PAL、MAC時には高速AGCスピードが得られます。
- キーイングパルス発生回路を内蔵していますので、VTRのチューナーにも使用できます。

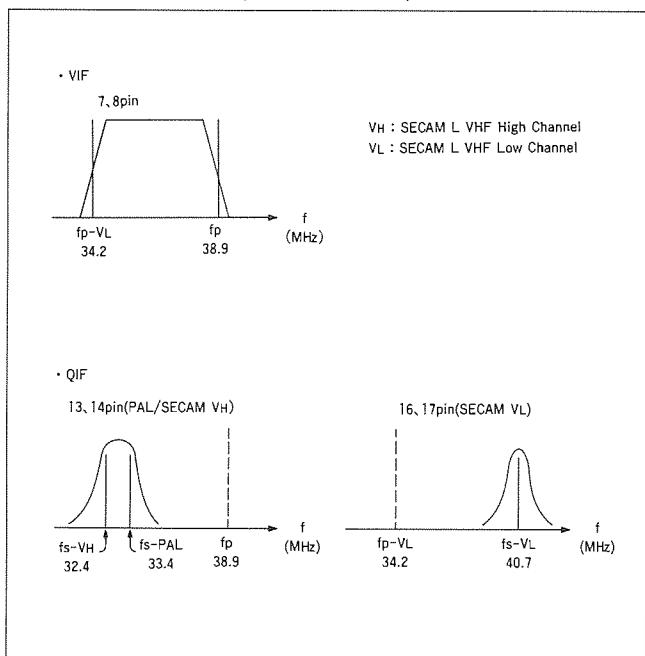
ピン結線図



各モードにおけるAGC形式とEQAMP出力の関係

	VIF AGC形式 時定数	EQ AMP 極性	QIF AGC 形式
PAL B/G	ピークAGC 短い	同相	ピークAGC
SECAM L	キーAGC 短い	逆相	平均値QGC
D ₂ -MAC	ピークAGC 長い	同相	—
	王変調 ピークAGC 長い	逆相	—

入力SAWフィルター例(マルチシステム)



TWIN-PLL方式

スポットライ

テレビ中間周波信号処理IC“M52014SP”

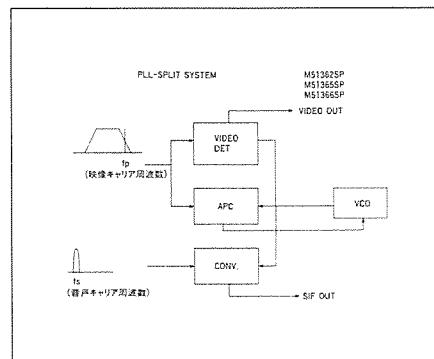
高画質・高音質対応のテレビ、VTRの中間周波信号処理部には、現在御好評をいただいているM51362/5/6SPシリーズによるPLL-SPLIT方式が標準的となっていますが、このたびさらに高画質・高音質を追及し、TWIN-PLL方式中間周波信号処理IC“M52014SP”を製品化しました。

特長

- 新ウェハプロセスを採用し、IF-AMP、PLL検波、AGCを映像用と音声用に2系統備えています。
- SAWフィルタの音声側に双峰の帯域特性をもたせたものでPLL検波が可能なため、ナイキストスロープで発生する音声ペズが削減(5~10dB)され、またAGCにより音声感度が向上します。
- 新回路技術を用いたTWIN-PLL方式であり、VCOコイルが1つだけで、従来と同じ周辺回路規模、調整点数で実現できます。
- Dynamic-AGC方式の映像、音声両チャネル共への採用により、各々AGCフィルタ1端子だけで、従来比約2倍のAGCスピードが得られます。

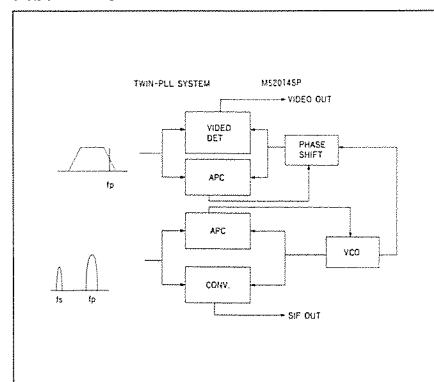
従来のPLL-SPLIT方式

SAWフィルタのナイキストスロープを通った映像キャリアにVCOがロックし、そのVCOで音声キャリアが周波数変換される。

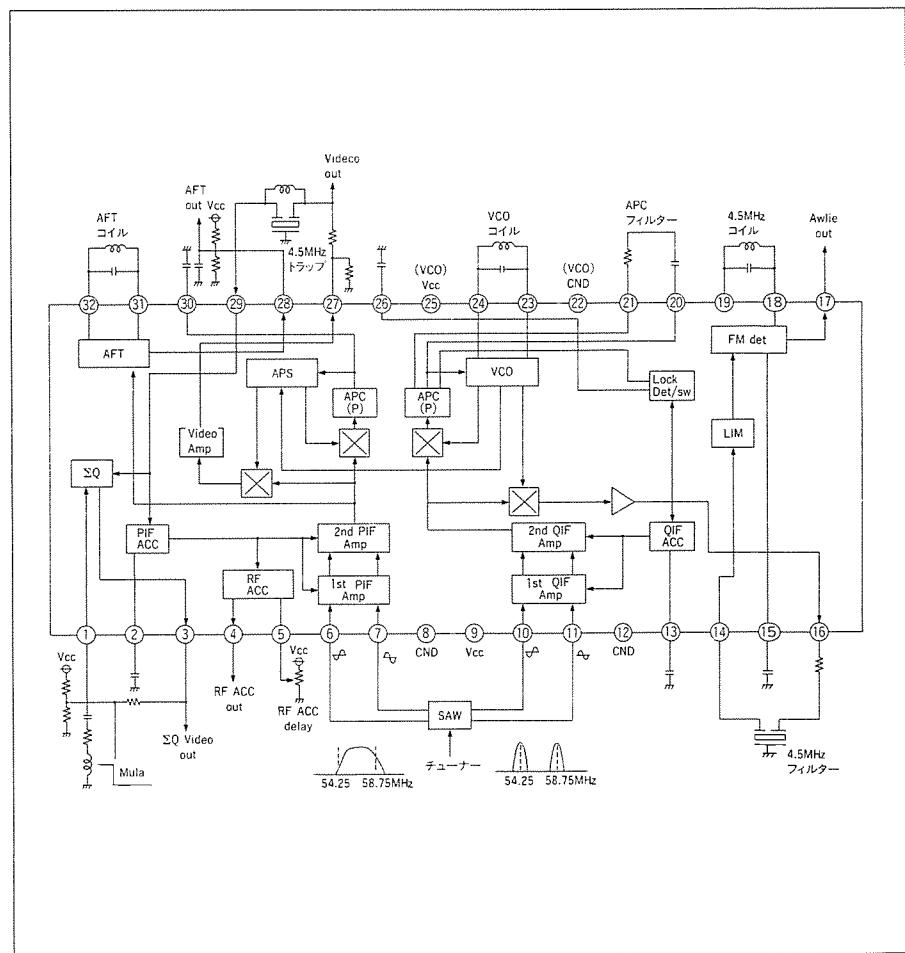


TWIN-PLL方式

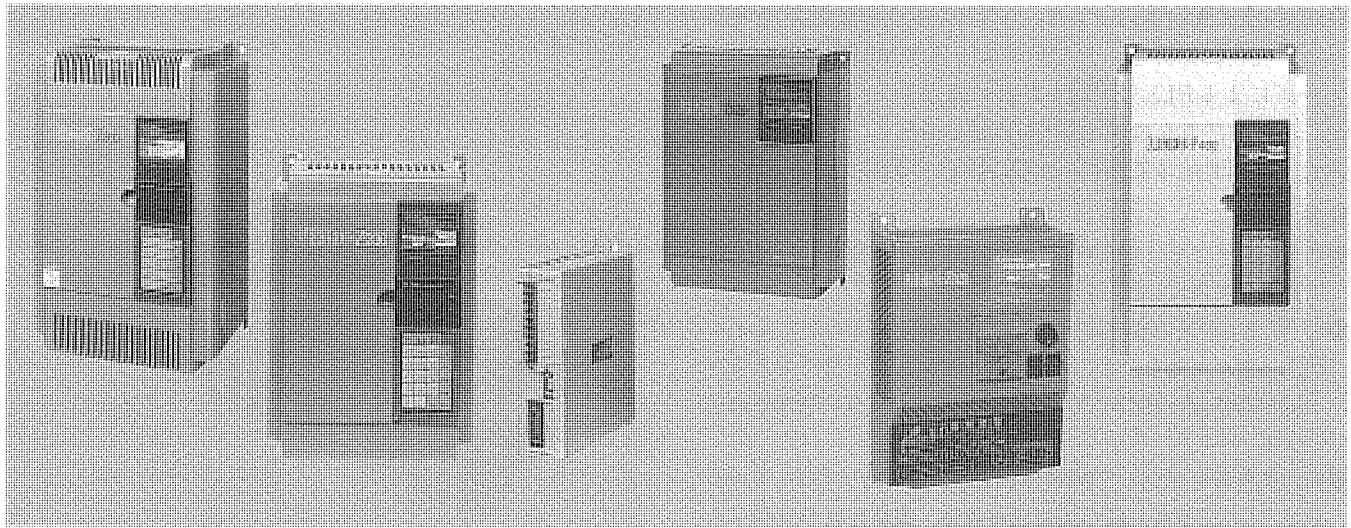
双峰特性のSAWフィルタを通った映像キャリアにVCOがロックし、そのVCOで音声キャリアが周波数変換される。



ブロック図および周辺回路図



三菱はん用インバータ スポットライ《FREQROLファミリー》



省力、自動化、省エネを目的として、一般産業機械からビル空調機器にいたるまでの幅広い用途でインバータが使用されるようになり、普及が高まるにしたがって用途に対応したニーズも多様化してきています。三菱はん用インバータは、これらのニーズに応えるためFAシステムにも結合できるハイスペックなものから、操作性と経済性を追求したエコノミーなものまで、各種シリーズを豊富に品揃えています。

特長

●高機能

- ①FAシステム上のシーケンサや計算機と直接結合できる『データリンク機能』や『計算機リンク機能』を使用しているため、システム構築が容易です。〈Z300、Z200シリーズ〉
- ②電流を制限してトリップに至らないように制御するトリップレス機能で、インバクト負荷などでも安心して運転できます。
- ③16ビットマイコン採用によるオールディジタル化で各種機能をパラメータ処理、多機能化と高精度化を達成しています。

仕様

シリーズ型式	製品概要	電源クラス	適用モータ容量 (kW)	出力周波数範囲 (Hz)	その他・特長など
FR-Z300	高機能、低騒音形	200V 400V	0.75~22 2.2~22	0.5~360	低騒音仕様、電流制限機能を標準装備Zシリーズの最上位機種
FR-Z200	高機能、多目的形	200V 400V	0.4~55 2.2~55	0.5~360	Z300シリーズにせまる多機能設計 (低騒音、電流制限機能は装備せず)
FR-Z120	高機能、普及形 小容量	200V	0.4~3.7	0.5~360	単機ドライブに最適な機能を備えた普及タイプ
FR-Z123	ブックタイプ 省スペース形	200V	0.4~3.7	0.5~360	スリムサイズ、取付面積が0.4kWでZ120の約1/4
FR-Z020	小形、小容量 エコノミータイプ	200V	0.4~1.5	0.5~120	B5判 (W180×H255mm) の小形・軽量、簡易操作の経済タイプ
FR-F400	省エネ用途	200V 400V	2.2~55 2.2~55	0.5~120	ファン、ポンプの省エネ運転に最適な機能を装備したオールディジタルインバータ

●低騒音

耳障りな金属音を一掃し、商用電源時にせまるモータの低騒音運転を実現しました。〈Z300シリーズ〉

●省スペース

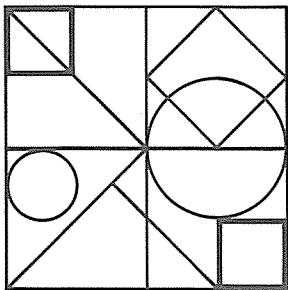
ブック形化による取付面積の大幅な低減〈Z123シリーズ〉や奥行き寸法の縮小〈Z020シリーズ〉により格段の収納効率を図ることができます。

●高信頼性

厳選した高信頼性部品の採用、低ロス設計そしてオールディジタル化による部品点数の低減とがいまって、信頼性が著しく向上しています。

●操作性

業界トップレベルの操作性を有する、当社独自のディジタル設定器『パラメータユニット』はZ020シリーズを除くすべてのシリーズ共通に使用できます。



特許と新案 有償開放

有償開放についてのお問合せ先 三菱電機株式会社 知的財産専門部 TEL (03) 218-2136

負荷時タップ切換器 (特許 第 1248254 号)

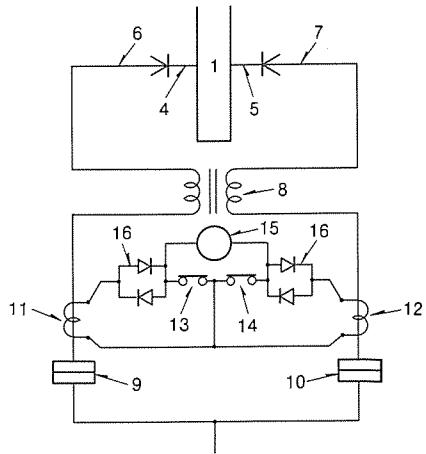
発明者 古川 一弥, 有福 裕

この発明は、タップ切換過程でリアクトルを循環電流抑制要素として使用する保護回路を備えた負荷時タップ切換器に関するものである。

図において、(1)は変圧器などのタップ巻線、(4), (5)はタップ巻線(1)のタップ位置 N 及び位置 N-1 よりそれぞれ引き出されたタップに接続されたタップ選択器の固定接点、(6), (7)はそれぞれ交互にタップを選択するタップ選択器の可動接点、(8)は限流リアクトル、(9), (10)は負荷開閉器、(11), (12)は変流器、(13)(14)は負荷開閉器(9)及び(10)がそれぞれ開極したのち一定時間後にそれぞれ開成し負荷開閉器(9), (10)がそれぞれ投入される前に閉成するように構成された短絡スイッチ、(15)は短絡スイッチ(13)又は(14)が開成したときに変流器(11)又は(12)の出力を検知する電流検知装置、(16)は逆並列に接続された整流素子である。

この発明は、整流素子(16)を図に示すように接続したため、変流器二次回路に流れる過度直流電流を制限する逆起電力としてスレッショルドレベルの電圧が作用し、その減衰を早め

ることができ、過度電流転流による誤動作を確実に防止することができる。また、スレッショルドレベルは通常 1 V 未満であるため、整流器(16)を挿入したことによる変流器負担の増加はほとんど無視でき、経済的効果は大きい。



液中溶解ガス抽出装置 (特許 第 1438543 号)

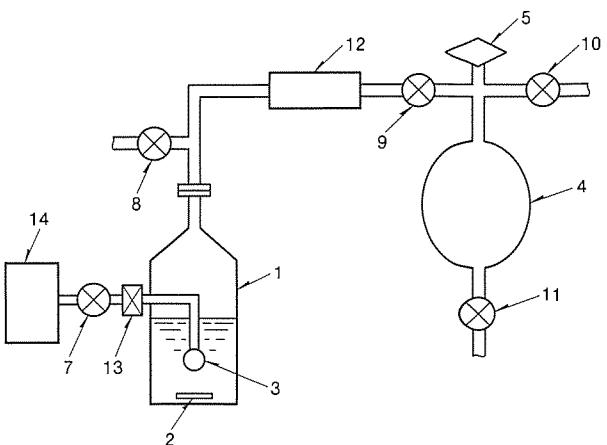
発明者 石井 敏次, 牧野 芳弘, 内藤 貞夫

この発明は、例えば運転中の変圧器等の油入機器の油中に溶解しているガスを分析するための油中分解ガス自動分析装置等に装備されるバブリング方式の液中溶解ガス抽出装置に関するものである。

図に示すものにおいて、先ずコック(7), (8)及び(11)を閉じ系内を大気と遮断するとともに、コック(9)を開いて容器(1)とガスだめ容器(4)を連通させ、真空ポンプで系内を排気した後コック(10)を閉じる。次に一定量の試料油を容器(1)へ導入した後コック(8)を閉じ、マグネットスターラにより回転子(2)を回転させると、油は攪拌され試料油中の溶解ガスの一部はコック(9)を通ってガスだめ容器(4)に移る。一定時間油を攪拌後圧力計(5)の指示が変化しなくなったとき、コック(7)を開き流量制御器(13)及びフィルター(3)を介してバブリングガスを送り込む。この時、バブリングガスの貯槽(14)の圧力を大気圧より相当大きくし流量制御器(13)により流量を極めて少量に調節してバブリングガスを連続的に適量送り込む。試料油中の溶解ガスはバブリングガスと共にガスだめ容器(4)に大気圧若しくは加圧の状態で採取した後コック

(9)を閉じ、圧力計(5)によりガスだめ容器(4)内の圧力を正確に測定する。

以上のように、この発明によれば、コック類の開閉回数を低減させたため、部品の寿命延長と操作の簡便化を実現でき、自動分析装置用の液中溶解ガス抽出に適した装置を提供できる。



バブリング式液中溶解ガス抽出装置 (実用新案登録 第1728151号)

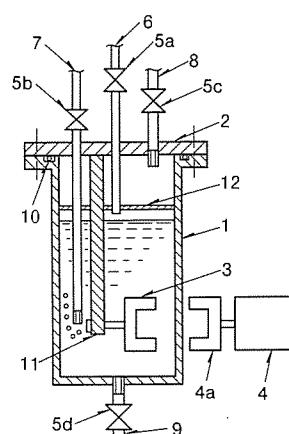
考案者 牧野 芳弘, 吉原 俊彦

この考案は、バブリング方式の液中溶解ガス抽出装置の改良に関するものである。

すなわち、図に示すものにおいて、液中溶解ガスの抽出を行う場合、給液流路(6)の弁(5a)及びガスの吐出流路(8)の弁(5c)を開き、一定量の溶液を密閉容器(1)に入れる。次に、モーター(4)に通電し回転子(3)を回転させ、溶液を攪拌させる。この溶液の攪拌は密閉容器(1)の底面に対し直角面に沿って回転する回転子(3)により行われるため、液面の波立ちが少なく、仮に波立ちが起こっても邪魔板(12)で抑制される。また、回転子が支持棒(11)に機械的に支持されているので、回転速度をかなり高めることができ、気液の接触効果を増大することができる。一方、溶液の攪拌と同時に、弁(5b)を開きバブリングガスを溶液中に送り込む。このとき、回転子(3)の背部(図の左側)のバブリングガスは回転子側に吸引され、しかる後密閉容器(1)の壁面に叩き付けられるようになるため、バブリングガスは細かく碎かれ、気液の接触効果は

大きくなる。そして、溶液中の溶解ガスはバブリングガスと共にガスの吐出流路(8)から容器の外へ移送される。

以上のように、この考案によれば、攪拌による気液の接触効果を高め、液中溶解ガスの抽出効率の高い抽出装置を得ることができる。



〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol. 64 No. 12 鉄鋼プラントを支える最新技術特集

特集論文

- 鉄鋼プラント技術の新しい展開に期待する
- 鉄鋼プラント用電機品の展望
- 熱間圧延プラント用電機品
- サイクロコンバータ駆動同期電動機の圧延主機への適用
- 交流可変速ドライブの鉄鋼プラントへの適用
- 大規模分散化計算機システム
- プロセスラインにおける EIC 統合化システム
- AI を利用した加熱炉燃焼制御システム
- 冷間圧延機の形状制御システム
- 鉄鋼用溶接機と誘導加熱装置の現状と動向

●鉄鋼プラント用特殊センサ

普通論文

- 幕張テクノガーデン
“IC カード利用入退室管理システム・鍵管理システム”
- 多地点テレビ会議システム
- 衛星間通信用搭載アンテナ追尾制御システム
- 800MHz 帯デジタル自動車電話用リニアアンプモジュール
- 超高速 256K ピット CMOS SRAM シリーズ
- 冷暖同時マルチエアコン
- 多極参照電極付き単セルによる
リン酸型燃料電池の分極挙動の解析

三菱電機技報編集委員

委員長 山田 郁夫
委員 名畑健之助
福岡正安
宇佐美照夫
風呂功
大原啓治
松村恒男
名取直幸
吉岡猛
鳥取浩
柳下和夫
幹事 長崎忠一
11月号特集担当 米谷光雄
稻荷隆彦

三菱電機技報 64巻11号

(無断転載を禁ず)
1990年11月22日 印刷
1990年11月25日 発行
編集兼発行人 長崎忠一
印刷所 千葉県市川市塩浜三丁目12番地 (〒272-01)
菱電印刷株式会社
発行所 東京都千代田区大手町二丁目6番地2号
日本ビル 650号室 (〒100)
三菱電機エンジニアリング株式会社内
「三菱電機技報社」 Tel. (03) 218-2806
発売元 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 (〒101)
株式会社 オーム社
Tel. (03) 233-0641(代)、振替口座東京6-20018
定価 1部 721円 (本体 700円) 送料別
年間予約は送料共 9,373円 (本体 9,100円)

モーションコントローラ スポットライト “MR-P20”



三菱モーションコントローラ“MR-P20”は、当社のはん用ACサーボと組合わせて使用する指令装置として新しく製品化したものです。近年、工場の自動化が進む中でACサーボを使用した各種機械設備の自動化の需要が年々増加しています。さらに、自動化の機能はより高度化し、複雑な制御や、個々の機械専用の制御機能が求められ、高速度、高精度が必要なものが増えていきます。一方、顧客には、より使い易特長

- <32ビット>CPU、メモリ素子をはじめ最新鋭のLSIと、超小形の面実装部品を数多く採用し、ユニットの大きさを従来品の1/2へと小形化をはかりました。
- <32ビット>CPUの高速処理により、モーション制御の性能を大幅に向上でき、複雑な制御もよりスムーズにスピーディに指令できます。
- モーションプログラムにはNC言語を使用し、割込機能や同期制御などの複雑な動きも簡単なプログラムで実現できます。
- マンマシンインタフェースは、専用の9インチCRT操作パネルのほか、MELSEC-Aシリーズのプログラミングパネルとして“MR-P20 PRU”を接続すれば、ティーチングプレイバック機能が可能になります。
- ディジタル制御のACサーボアンプ“MR-SB/MR-SD”とは、専用の高速バスケーブルで結合し、コントローラとサーボアンプが双方向にデータ交信が行え、サーボ性能、信頼性、保守性が一段と向上しました。また原点復帰動作を使わなくてすむ絶対位置検出システムにも対応しています。
- 機械のシーケンス制御を“MR-P20”にユーザラダーとして組むことができ、“MR-P20”ユニット1台でモーション制御と周辺のシーケンス制御が行えるため、スタンドアロン形での機械制御を、よりコンパクトな構成で実現できます。
- 主な用途としては、各種搬送機械、簡易ロボット、簡易工作機械および機械周辺のマテハン機器、木工機械、包装機械などのモーション制御に適用できます。

く、安価で信頼性の高いものが当然だとの認識があり、これらの要求に応えるために、従来に比べてよりコストパフォーマンスの高いコントローラが必要となっています。モーションコントローラ“MR-P20”は、各種機械の自動化に幅広く対応するため、業界初の<32ビット>CPUを搭載し、小形、高性能、使い易さを追求して製品化しました。

仕様

仕様項目		内 容
制 御 軸 数	2軸制御	
2 軸 同 時 制 御	直線補間、円弧補間	
2 軸 独 立 制 御	各軸独立に運転モード設定、プログラム運転が可能	
制御系	最小指令単位	0.01、0.001、0.0001mm
	最大令量	8桁 ±99999999
	最大出力パルス数	600kps(モータ回転数 3000rpm時)
送り機能	高速送り速度	0.001mm/パルス時 36mm/分(モータ回転数 3000rpm時)
	自動加減速	直線加減速(時速数0~30sec)
	送りオーバライド	高速送りオーバライド1、25、50、100%、 低速送りオーバライド0~140%
	無限表位置決め	同一方向のくり返し位置決め
運転モード	自動運転	メモリモード:メモリ内のプログラムによる 自動運転
	手動運転	JOG送り、ステップ送り、手動ハンドル送り、 手動原点復帰
プログラム	プログラム言語	NC言語(Gコード使用)
	プログラム容量	最大32種 合計8000文字
外部制御機能	外部サーチ、始動、一時停止、シンプルブロック、 リセット	
保護機能	非常停止、ストロークエンド、ソフトリミット、 インダロック	
機械補正	バックラッシュ補正 0~65000パルス	
機械インターフェース	機械入力	標準Di48点、最大96点(24V/13mA)
	機械出力	標準Do32点、最大64点(24V max6VmA)
サーボインターフェース	サーボインターフェース	当社ディジタルACサーボ MR-SB/MR-SD バス結合インターフェース
内蔵PLC	ユーザシーケンス	内蔵ラダー 2000ステップ
	シーケンス命令	95種(シーケンス命令19種、応用命令76種)
操作&データ入出力	マンマシンインターフェース	9インチCRT操作パネル AGGPP接続可
	ICカードインターフェース	本体ユニットICカード挿着、プログラム、パラメータ、ユーザラダーの入出力用
絶対位置検出		絶対位置検出器付サーボモータ、アンプ使用時可能

店舗用 スポットライト 空調機器集中監視制御システム



高架下等店舗の空調は、従来パッケージタイプの単独運転方式、または集中熱源分配方式による単純(段階)制御のため、全体の効率及び運転操作の利便性については重点が置かれていました。今回、高効率、省エネ、運転操作の利便性を追求したアドバンストな集中監視制御システムを、高架下店舗の空調設備に対し適用、納入致しましたので以下にその特長及び仕様概要を紹介します。

特長

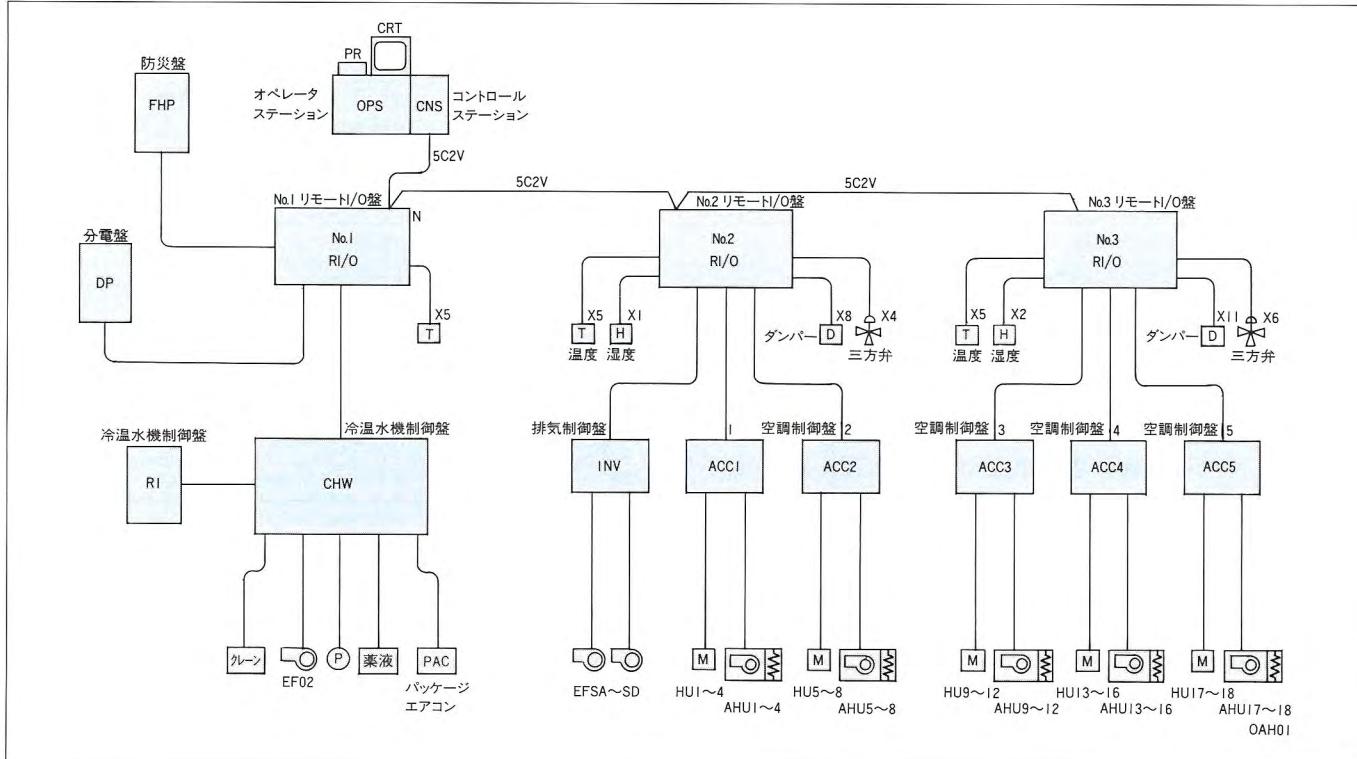
- 1) システム生成ビルダによりプログラムレス化を図り、ユーザニーズに適合した制御、観察システムを構築可能。
- 2) 操業履歴(運転、操作、警報)のデータベース化により、容易な操作及び保守管理を実現。
- 3) データロギング充実(FIFIN形式によるロギング対象データの登録と収集データの保存)
- 4) ユーザフレンドリイなマンマシンインタフェース(人猿作案内、ガイダンス、ウィンドウ表示)
- 5) FDDベースによる移植性とFIFベースによる短納期を実現。

システム構式図



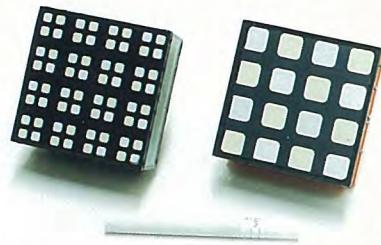
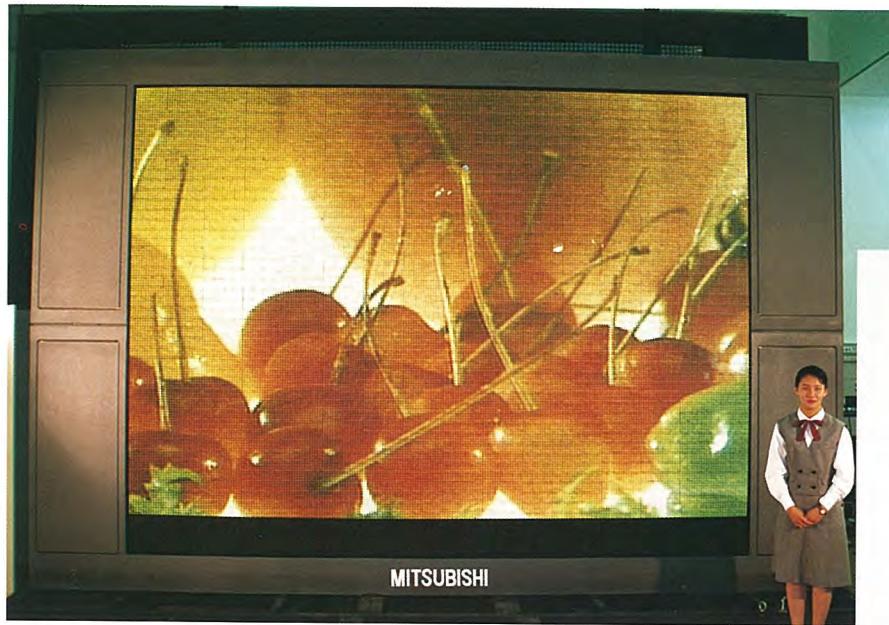
機能・仕様

適用範囲	10,000m ² /SET
管理点数	1,424点/SET
ユーザKEY	8,192種のFUNCTIONを自由に設計・組み合わせ可能
操作WINDOW	HELP-WINDOW
標準搭載S/W	a) スケジュール運転 b) グループ運転 c) パターン運転 d) PID制御 e) データロギング f) 操業履歴



屋内用高解像度大型映像表示装置

スポットライト《オーロラビジョン・マークII HR》



発光素子(左側:高解像度型右側:従来型)

大型映像表示装置は、臨場感・迫力感あふれる映像を多数の観衆に同時に与え提供することができるニューメディアとして脚光を浴びています。最近では、野球場・競馬場などの大型の競技場以外にもビル壁面や駅のコンコースなどに設置され、街を歩く人々に最新情報をリアルタイムで提供し親

特長

●高解像度

従来の屋内用当社製と比較して4倍の解像度を有しているため、より短い距離から映像を見ることができます。

●高画質

クリアビジョン技術による信号処理によって、より鮮明な映像が提供できます。

●高輝度

発光方式に電子線励起のCRT方式を採用し、高輝度表示が可能になりました。明るい場所においても美しい映像を楽しむことができます。

●画面の一様性

発光素子ごとにRGB輝度補正回路を附加しているので、色のばらつきがない一様な表示ができます。

●低消費電力

低消費電力なので省エネルギーで運営でき、設置場所の選択や設置工事が容易です。

●高速応答表示

動きある画像においてもスムーズに表示できるので、ちらつきのない表示が提供できます。

●色再現性

プラウン管と同様の発光方式を採用しているので、色再現性に優れ違和感のない映像が表示できます。

●軽量・薄型

スクリーンの奥行きが薄く重量が軽いので、簡単に取り付けができます。

しまれています。しかし、ハイビジョンの技術動向からもうかがえるように、映像の高解像度化の要求は一層高まっています。そこで、市場のニーズに応えるべく高解像度型発光素子を開発し、その素子を多数配列した屋内用高解像度表示装置《オーロラビジョン・マークII HR》を製品化致しました。

仕様 (標準スクリーン: 200インチ)

仕様項目	製品名
発光方式	オーロラビジョンマークII HR 複合CRT
画素配列 [mm]	
1m ² 当り画素数	17,776
視認	デジタル (文字グラフィック)
距離 [m]	5m以上
	ビデオ
	10m以上
応答性	TV相当
表示速度 [フィールド/秒]	60
表示階調	256相当
最大面輝度 [cd/m ²]	1,000
寿命 [hr]	8,000
標準	スクリーンサイズW×H [m]
	3.84×2.88
スクリーン	スクリーン面積 [m ²]
	11.06
クリ	画素数W×H (合計)
	512×384 (196,608)
ン	外形寸法W×H×D [m]
	5.12×3.38×0.45
重	平均電力 [kW]
	13
量	受電容量 [kVA]
	20
kg	重量 [kg]
	2,500