

MITSUBISHI
Changes for the Better

家庭から宇宙まで、エコチェンジ



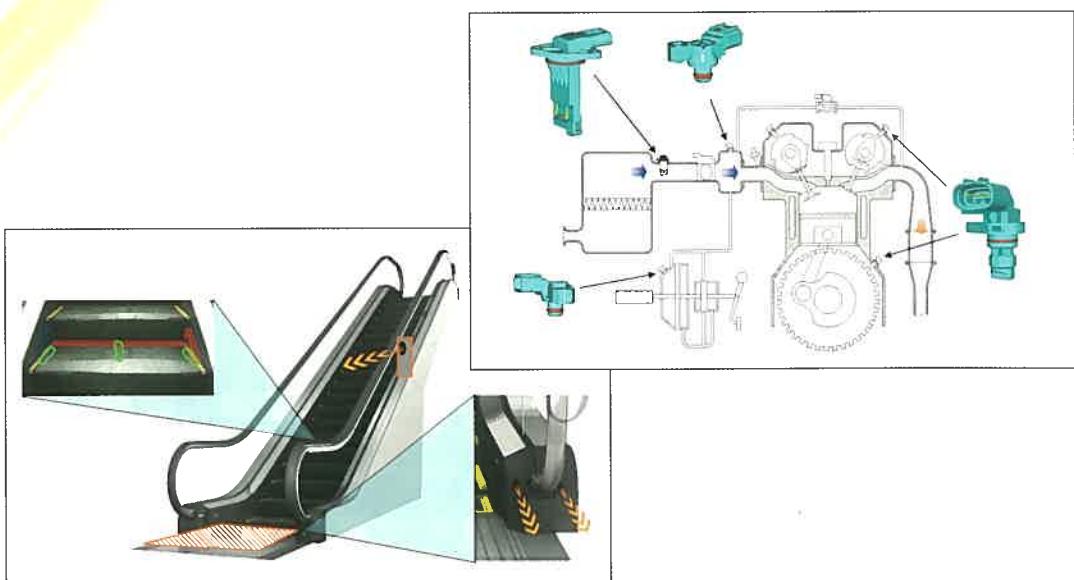
三菱電機技報

6

2013

Vol.87 No.6

センシング技術が導く安全・安心・快適な社会



目 次

特集「センシング技術が導く安全・安心・快適な社会」	
「センシング技術が導く安全・安心・快適な社会」特集号に寄せて …	1
藤田博之	
安全・安心・快適な社会を支えるセンシング技術	2
井上満夫・大路 浩・吉田幸久	
エアバッグシステム用Z軸加速度センサ	7
平田善明・伊藤恭彦・紺野伸顕・平岡裕二・末次英治	
自動車エンジン制御用センサ	11
谷本考司・大庭彰洋・高畠香満	
車社会の安全を支える超音波センシング技術	15
木村友則・井幡光詞	
省エネルギーと快適性を両立させる	
ルームエアコン霧ヶ峰“人感ムーブアイ”	19
渡辺信太郎・松本 崇	
エスカレーター乗降口滞留検知システム	23
近藤純司・猪又憲治・伊藤 寛・吉田浩二	
多チャネル合成開口レーダ	27
若山俊夫・源吉 啓・上田正芳	
風計測ドップラーライダ	31
亀山俊平・崎村武司・安藤俊行・柳澤隆行・平野嘉仁	
環境放射線センシング技術	35
西沢博志・猪又憲治・田室 勝・藤田和彦	
プラズモニクスによる波長選択型非冷却赤外センサ	39
小川新平・木股雅章	
家電プラスチックリサイクルでの材料センシング技術	43
上原 康・中 慶朗・平野則子・梅村園子・衣川 勝	
光ファイバセンサを用いた	
複合材料構造の健全性診断技術	47
竹谷 元・高橋市弥・水口 周・武田展雄・榎本清志	
生産現場見える化ソリューション	51
奥村誠司・中島龍二	

Safety and Comfortable Society produced by Sensing Technology

Forward to Special Issue on Sensing Technologies for Safe, Secure and Comfortable Society
Hiroyuki Fujita

Sensing Technologies for Supporting Safe, Secure and Comfortable Society

Mitsuo Inoue, Hiroshi Oji, Yukihisa Yoshida

Z-axis Accelerometer for Airbag System

Yoshiaki Hirata, Takahiko Itoh, Nobuaki Konno, Yuji Hiraoka, Eiji Soetsugu

Sensors for Engine Control System

Koji Tanimoto, Akihiro Oba, Yoshimitsu Takahata

Ultrasonic Sensing Technologies Supporting Safety Motorization

Tomonori Kimura, Koji Ibata

Air Conditioner "Kirigamine Move Eye" —Saving More Energy with Keeping Comfortable
Shintaro Watanabe, Takashi Matsumoto

Congestion Detection System on Escalator Exits

Junji Kondo, Kenji Inomata, Yutaka Itoh, Koji Yoshida

Multichannel Synthetic Aperture Radar

Toshio Wakayama, Kei Suwa, Masayoshi Tsuchida

Wind Sensing Doppler LIDAR

Shumpei Kameyama, Takeshi Sakimura, Toshiyuki Ando, Takayuki Yanagisawa, Yoshihito Hirano

Environmental Radiation Sensing Technologies

Hiroshi Nishizawa, Kenji Inomata, Masaru Tamuro, Kazuhiko Fujita

Wavelength Selective Uncooled Infrared Sensor by Plasmonic Absorber

Shimpei Ogawa, Masafumi Kimata

Material Sensing Technologies in Post-Consumer Electronics Recycling Process

Yasushi Uehara, Jiro Naka, Noriko Hirano, Sonoko Umemura, Masaru Kinugawa

Structural Health Monitoring of Composite Structure by Using Optical Fiber Sensor

Hajime Takeya, Ichiya Takahashi, Shu Minakuchi, Nobuo Takeda, Kiyoshi Enomoto

Visualization Solutions in Production Factory

Seiji Okumura, Ryuji Nakashima

特許と新案

「熱式流量センサ」	
「超音波探傷装置および超音波探傷方法」	55
「加速度センサ」	56

表紙：センシング技術が支える安全・安心・快適な社会

センサ及びセンシング技術は様々な分野で活用され、我々の身の回りの生活を安全・安心・快適なものに導き、環境保全に貢献するなど、社会に多大な恩恵を与えていている。三菱電機では、家電機器、車載機器、FAやビル管理、医療から宇宙防衛などの広い分野にわたって、センシング技術を活用した製品群の開発を進めている。

表紙では、センサ技術の製品化の一例として、自動車の高効率・低燃費化に向けて重要度が増す、カム角センサ、マイクロエアフローセンサ、小型圧力センサ等のエンジン制御用センサと、エスカレーターに備えられる、インレット部センサ、アウターデッキセンサ、ステップ気配りセンサ、乗降口倒れ検知システム等の安全センサを示した。



巻/頭/言

“センシング技術が導く安全・安心・快適な社会”特集号に寄せて

Forward to Special Issue on Sensing Technologies for Safe,
Secure and Comfortable Society

藤田博之
Hiroyuki Fujita



ムーアの法則に従った電子デバイスの高速化と集積化に支えられて、情報通信技術は飛躍的な発展を遂げ、我々のライフスタイルにも大きな変革をもたらした。携帯情報機器の無線通信ネットワークは、いつでもどこでもインターネットへのアクセスを可能にして、不斷に情報を提供してくれる高度なシステムとなっている。しかしそう考えると、これらの情報は人がインプットしたものであり、それを機械が処理した結果を伝送して、人に提示する仕組みである。つまり人間の脳や会話の能力を電子的に拡張したものに相当する。ところが現在では、環境、防災、エネルギー、高齢化社会、交通安全等の課題を解決することが急務となっており、安全・安心・快適な生活を満喫できる社会を実現するには、人を煩わせずに実世界情報をそのまま大量に処理する新たな仕組みが必要となりつつある。

ここで決定的に不足しているのは、目や鼻に当たる感覚器官に対応する機能である。センサは画像や音だけでなく、加速度のような運動感覚、臭覚や味覚(化学組成)、触覚、痛覚、温度感覚などを拡張して、人の手に頼らず機械が外界の情報を直接的に得ることを可能にする。センサデバイスは測定対象に応じて測定原理や構造が多岐にわたるが、最近の技術革新として特筆すべきものに、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を導入した半導体集積化センサの進展と、バイオテクノロジーやナノテクノロジーなど異分野との融合技術の利用が挙げられる。

そもそも上述したムーアの法則に基づく電子デバイスの微小化も、超巨額な製造設備投資の必要性や、チップ消費電力の増加による発熱によって限界に近づいており、別のアプローチが提唱されている。すなわち、単なる電子回路だけでなく、無線回路、光素子、MEMSセンサやアクチュエータなど、様々な異なる機能を持つ要素をチップ上に集積化し、高い機能性をチップに付加する方向である。これは“モア・ザン・ムーア”的アプローチと呼ばれ、欧州を中心に注目が集まっている。異なる機能を持つ要素をチップ上に集積化することで、利用者や環境との物理化学的な相互作用を可能にする方向性である。比喩的な表現を

すると、集積度の向上という“定型進化”から脱却し、様々な機能の付加という“多様性の増大”に向かう方向である。巨大化の一途をたどった恐竜が絶滅した後、様々なほ乳類が繁栄してきた歴史を思わせる展開で、今後の発展が楽しみである。

さて、新機能センサの実現や性能の画期的向上には、異分野融合技術が必須である。例えば、メタマテリアルと呼ばれる人工材料では、周期的に配置したナノ構造と光波、電波、音波との相互作用を用いて、自然界の物質が持ち得なかった材料特性を発現させるものである。メタマテリアルを応用したセンサは、全く新規なセンシング機能の実現や、デバイス構造の簡素化・小型化など大きな可能性を秘めている。また、表面プラズモン共鳴など金属薄膜やナノ粒子と光との相互作用に基づく近接場光現象も注目を集めている。ナノ構造にバイオ・化学修飾を施し、局所的に発生する極めて強い電磁場を利用する化学センサや、特異的な光学特性を利用する分光センサなどが提案されている。

さて、安全・安心の確保と快適性の向上というニーズに即した外界情報を的確に把握するためには、単なるセンサ信号の高感度な取得にとどまらず、その時空間的なトレンドの分析や、異種のセンサからの計測結果の統合、さらにはこれまで取得し蓄積したビッグデータの解析に基づくモデル化などが必要となる。これらを含めて、センシング技術と呼ぶことができる。

この特集号では、皆が安心して安全かつ快適に暮らせる社会のために役立つ様々なセンサとセンシング技術が紹介されている。特に、自動車交通を中心とするモビリティの安全確保や、環境の監視と保全に重要な情報をセンシングして、迅速な対応を可能とするものが中心となっている。人間でも、その場の状況を的確に感じ取り、いち早く適切な行動をする人は、周りの人たちを幸せにする“気の利く人”だと賞賛される。今後は、身の回りで通常目にする普通の機器を、多様かつ大量の入出力機能を埋め込んだ“気の利く機械”にすることによって、幸せで豊かな社会の構築に貢献することが望まれる。

巻頭論文

安全・安心・快適な社会を
支えるセンシング技術

井上満夫*



大路 浩**



吉田幸久***

Sensing Technologies for Supporting Safe, Secure and Comfortable Society

Mitsuo Inoue, Hiroshi Oji, Yukihisa Yoshida

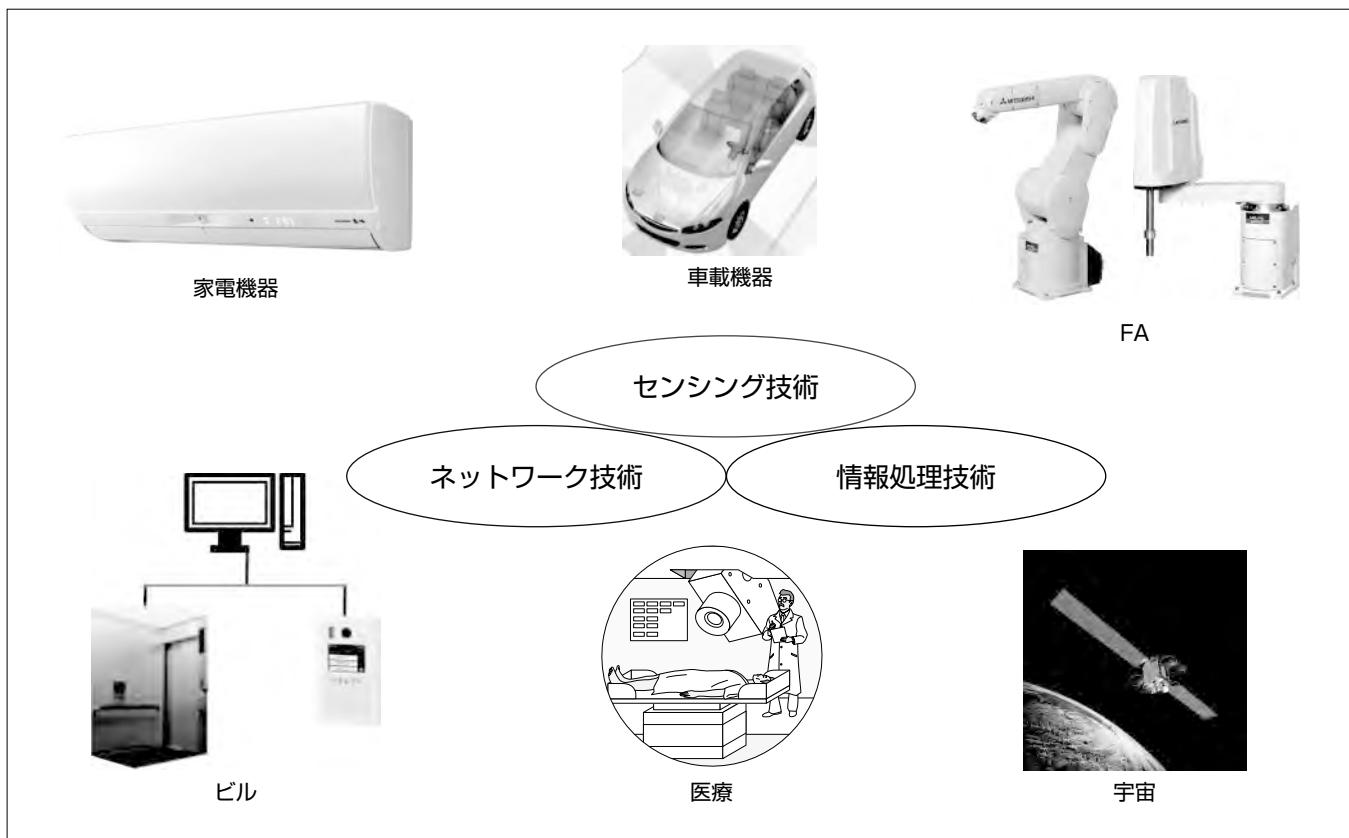
要 旨

人は古くから、世の中の現象をセンシング(計測)して情報を取得し、それを生活に役立ててきた。例えば、古代エジプトでは天体の動きから洪水の時期を予測したり、作物の植付けの時期を決めたりしていた。しかしながら、目測によるセンシングでは、経験と勘に基づくところが大きく、定量性には限りがあった。その後、多種多様なセンサ(道具)を生み出すことで、より精度良く計測することが可能となり、我々の豊かな社会を支える一助となっている。また、学術の進歩はセンシング技術の進歩と表裏一体の関係があると言われている。特に物理学の世界では、理論によって予測された現象をセンシングによって実証することを繰り返すことで、進歩・発展してきた。

このように、センサ及びセンシング技術は様々な分野で活用され、我々に多大な恩恵を与えていたにも関わらず、縁の下の役割を担っている場合が多く、その技術があまり知られていない。

三菱電機では、家電機器、車載機器、FAやビル、医療から宇宙などの広い分野にわたって、センシング技術を活用した製品群の開発を進めている。

この特集号では、具体的な事例を通してセンシング技術がどのような形で我々の身の回りの生活を安全・安心・快適なものに導いているか、また環境保全に貢献しているかを述べていく。



センシング技術を用いた製品群

センサで計測されたデータは、情報処理回路によって意味のある情報に加工され、判定又は機器の制御情報として用いられる。最近ではネットワーク技術の進展によって、様々なセンサが有機的に統合され、いわゆるスマート社会の形成に活用されている。今後も、当社はこれら技術の開発を推進し、安全・安心社会の実現、環境に配慮した循環型社会の構築を先導していく。

1. まえがき

センサが計測の対象とするものは、温度・湿度などの環境状況、位置・傾き、速度・加速度、衝撃・圧力等の物理量、光、電気・磁気、化学に関する情報等、極めて広い範囲に及ぶ。自動車に搭載されるセンサを例に挙げると、センサの役割は速度やエンジンの回転数、冷却水温度などの機器の状態を計測する基本的なものから、エンジンの燃焼状態、ブレーキングの安定性、車体の姿勢等の制御に用いるための情報取得手段へと進展し、自動車の更なる電動化に伴い、ますます車載センサの重要性は増してきている。一方、GPS(Global Positioning System)を使って位置を計測することによって、カーナビゲーションシステムは地図や道路標識で自分の位置を知るという煩わしさから運転者を解放し、快適かつ安全に目的地まで誘導してくれる。さらに、高度化するセンシング技術は運転者の状態の監視から、最近では自動車に搭載したセンサによって、段差や機械的強度などの路面状態を非接触で検知し、道路や橋梁(きょうりょう)などの状況を把握して、これらインフラのメンテナンスに役立てようとする試みも提唱されている。

本稿では、自動車用のセンサを中心に、センシング技術の開発動向と当社の取組みについて述べる。

2. センシング技術の開発動向

従来、センサは機械的、電気的、磁気的な部品を組み合わせた構成となっており、センサを利用する側からの小型化や高精度化に対する要求に十分応えることができていなかった。しかしながら、1980年代に入り、図1に示すように加速度センサなどの一部のセンサには半導体技術をベースとしたMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術が適用されるようになり⁽¹⁾、半導体ウェーハ上へのセンサの一括大量生産が可能になった。これによって、小型化や高精度化に加えて、低コスト化も一気に進み、後述する自動車やスマートフォンなど、身近な機器に数多くのセンサが搭載されるに至っている。

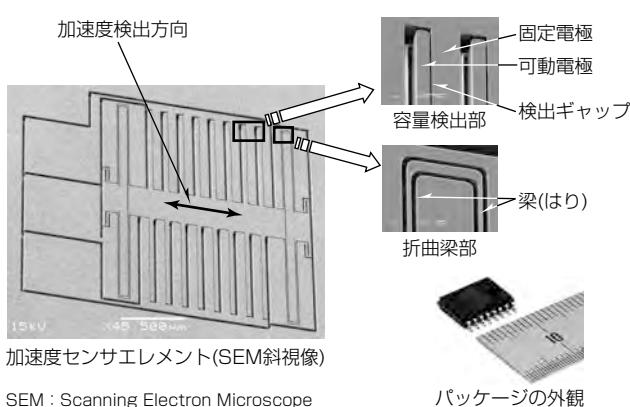


図1. MEMS加速度センサ

また、半導体デバイス・プロセス技術の適用に伴い、従来センシングできなかったものを新たな現象を用いてセンシングすることが可能になりつつある。例えば、赤外線センサは赤外線を熱として検知して、その温度変化をセンシングするものであるが、燃焼するガスからは、ガス種によって特定波長の赤外線が放出されており、赤外線の波長を知ることで燃焼ガスの同定が可能となる。これまで、センサに分光器を設置しなければ、吸収された赤外線の波長を知ることはできないため、大掛かりなシステムが必要であった。しかしながら、プラズモンという現象を利用することによって、赤外線吸収面に微細な構造を作りこむことで、センサそのものに赤外線分光の機能を持たせることができる⁽²⁾。

一方、最近はセンサに対しても低消費電力化が強く求められている。すなわち、環境発電と呼ばれる小さな自立発電型分散電源によって、外部から給電することなくセンシングするとともに、複数のセンサを無線でつなぎ、多元的な情報を瞬時に把握する大規模センサネットワークが注目されている。この背景には、センシングによって収集したビッグデータをリアルタイムで処理することができる組み込みソフトウェアの性能向上がある。このようにセンシングは、情報の収集と同時に、得られた情報を的確に分析し、判断・処理することによって初めてその効果が発揮される。今後、この分野での組み込みソフトウェアの役割は、ますます増大していくことが予測される。

ここまで述べてきたように、センサの開発動向としては、従来のセンサを小型化、低コスト化、低消費電力化することによって、その利用の範囲を拡大していくとともに、新たな物理現象を活用することによって、従来、センシングすることができなかった現象をセンシングする方向に向かっている。もちろん、これらの発展を支える技術として、収集した情報を使うためのCPUの高速化と組み込みソフトウェアの進歩も必要である。

3章では、具体的な事例として、当社の自動車用センサの開発と将来展望について述べる。

3. 自動車用センサ

3.1 発展の背景

自動車は、機械、材料、エレクトロニクスなど様々な分野の先端技術を融合した複合体であり、その進化は“安全・安心・快適”を追求しつつ、今もその歩みを止めることはない。自動車を下支えする先端技術の一つであるカーエレクトロニクスは、半導体技術の発展に呼応して1980年代から急速に進展してきた。また、それらの背景には外的要因とも言える排出ガス規制やエアバッグの搭載義務化といった環境問題・安全への社会的意識の高まりがあった。カーエレクトロニクスはECU(Engine Control Unit)とセ

ンサに大別できる。人に例えると前者は膨大な信号処理・判断をつかさどる脳であり、後者は多様な信号を正しく検知する五感である。現在の自動車には100個近くに及ぶセンサが搭載されている。その用途は、エンジン、ステアリング、トランスミッション、ブレーキ、サスペンション等を制御する駆動系に関するもの、エアバッグシステム、横滑り防止システム、ナビゲーションなどの安全性・利便性に関するものなど多岐にわたっている。図2に自動車に搭載されている代表的なセンサを示す。

自動車技術の高度化に伴うセンサへの要件について考えてみる。近年、自動車用エンジンに対する高動力性能・低公害・低燃費への要求は、地球環境保護など持続的社會の実現に向けた意識の向上を背景に、一段と加速している。これらの相反する要求を成立させるには、多様な物理量を検知する各種センサの更なる性能向上が必須である。また、人の快適性・安全性を希求する観点からは、車内での居住性向上に伴うエンジルームの縮小、及び安全機能の充実に向けた装着品の増加によって、センサを搭載できる空間はますます小さくなっている。すなわち、自動車用センサには性能向上に加え、小型化・軽量化が求められている。

3.2 MEMS技術を利用したセンサ

3.2.1 センサの種類と製造方法

自動車用センサの小型化には、半導体技術と親和性の高いMEMS技術の発展が大きく寄与している。MEMSを用いた自動車用センサは、エンジン制御用の空気量センサ、圧力センサ、エアバッグシステム用の加速度センサ、横滑り防止システムのジャイロセンサなどがある。自動車用途以外でも、携帯機器やスマートフォン、ゲーム機器、デジタルカメラなどに、MEMSを用いた加速度センサ、ジャイロセンサ、マイクロフォンが搭載されている。また、ブ

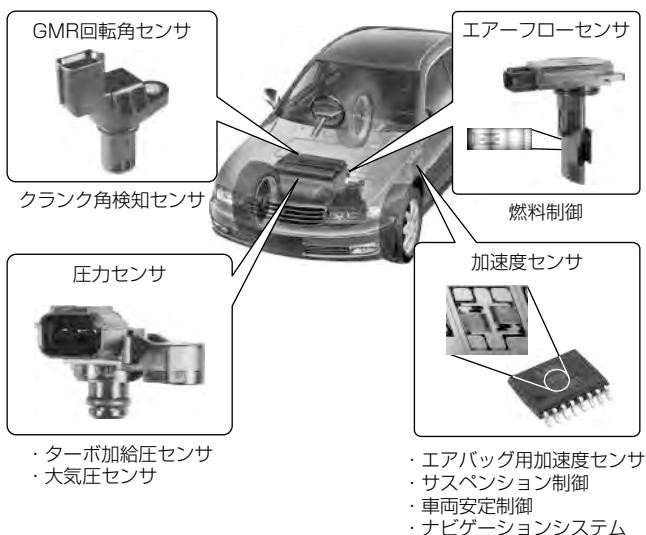


図2. 自動車へのセンサ適用事例

ロジェクタにはMEMSを用いたミラーデバイスが使われている。

MEMSセンサの製造方法は半導体技術を基盤にしている。つまり、直径が150mmないしは200mmのシリコンウェーハに電子デバイスで培われた半導体プロセスを適用し、1枚のウェーハから数千個の素子を一括して製造する。更に数10枚のウェーハを投入するバッチ処理が可能であり、ロット単位で数万個の素子が得られる。プロセス工程は半導体と同様に一定基準で管理されるため、多数の素子は均質な性能を持ち、品質を統計的見地から管理することができる。

3.2.2 製造プロセス

MEMSセンサ素子は中空構造や可動構造を持っており、その点が従来の半導体デバイスと決定的に異なる。この相違点を述べるために、MEMSセンサ素子の製造プロセスの各工程を図3に示す。

工程(a)では所望のサイズのシリコンウェーハを用意する。これを基板として工程(b)と工程(c)では、成膜、写真製版、エッチングなどの処理を、設計した工程フローに基づいて行う。工程(c)の後半では、犠牲層除去と呼ばれる処理を行いMEMSに特徴的な可動構造体を形成する。工程(d)では、可動構造体を外部環境から保護するため、ガラス基板をウェーハレベルで接合する。最後に工程(e)でダイシングし

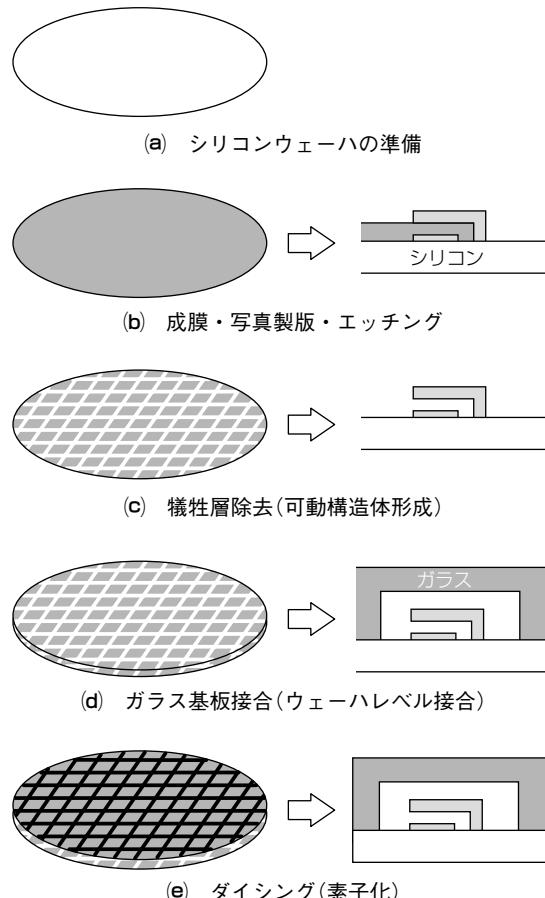


図3. MEMSセンサ素子の代表的な製造プロセス工程

素子化する。これらがMEMSセンサ素子製造の大まかな流れであるが、先に述べたように、このフローの中には従来の半導体プロセスにはないMEMS固有の特徴的なプロセスが使われている。その代表的なプロセスは、シリコンの深掘エッチング、犠牲層エッチング及びウェーハレベルでの陽極接合等であり、これらの詳細を次に述べる。

(1) 深掘エッチング

シリコンの深掘エッチング技術は、ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching)とも呼ばれ、1990年代後半から市場に普及し始めたプロセスである。この技術によって、MEMSセンサ構造の設計自由度が飛躍的に向上し、多様なセンサ素子に適用されるようになった。ICP-RIEでは、側壁保護と底面エッチングのレシピを秒単位で交互に繰り返し行うことで、シリコンを垂直に加工できる。エッチングの開口幅に対する深さの比(アスペクト比)は最大100程度までが可能であり、エッチングレートも20μm/分と早く製造のスループット向上に寄与している。図4に、厚み400μmのシリコンウェーハにICP-RIEを施した加工例を示す。この技術は、この特集号の論文で述べる加速度センサや圧力センサで適用しており、前者ではポリシリコン可動電極の形成に、また後者では受圧ダイヤフラムの形成に不可欠である(p7~10, p11~14)。

(2) 犠牲層エッチング

図3(b)と同図(c)に示した犠牲層エッチング技術で可動構造体又は中空構造体を作るには、まずその下地に犠牲層を形成し、その上に可動構造体となるポリシリコンなどを成膜する(“犠牲層”という言葉の由縁は“後に残らないが構造体形成上で必要な層”である)。犠牲層はフッ酸水溶液などでエッチングして除去する。この状態で空気中に曝(さら)すと、可動構造体同士は数μmの隙間しかないと液体が乾燥する際の表面張力によって固着(ステイクション)してしまう。これを回避するためにエッチング直後に超臨界乾燥法を活用する。

(3) 陽極接合

ウェーハ上にでき上がったMEMS構造体を外部環境から保護するためには、これにキャッピングを施し、気密封

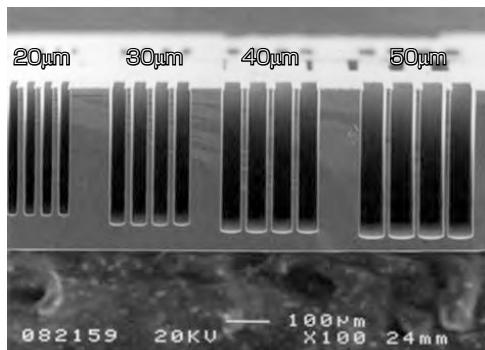


図4. ICP-RIEによるシリコン深掘エッチングの加工例

止を行う必要がある。その代表的な手法として、シリコンとガラスの陽極接合がある。450°C程度まで加熱し、両基板の間に1kV程度の電圧を印加することによって、界面がSiO₂化され強固な接合が得られる。これがウェーハレベルで可能であるため、図3(e)のダイシング工程における水圧からもMEMS構造体を保護することができる。陽極接合の用途はMEMS構造体の保護だけではない。例えば、圧力センサではダイヤフラム上に形成したピエゾ抵抗体で圧力を検知するが、ダイヤフラムが圧力を受けて変形するためにはダイヤフラムの裏面に真空基準室が必要である。この真空基準室を設けるために、ダイヤフラムが形成されたシリコンウェーハとガラスウェーハを真空中で陽極接合する。これもMEMS固有に開発されたプロセス技術である。

3.3 当社が取り組む自動車用センサの例

当社の自動車用センサへのMEMS応用は、1980年初頭のピエゾ抵抗型圧力センサの製品化から始まり、長い歴史を持つ。1990年代末から、櫛歯(くしば)構造による容量検出型の加速度センサを上市し、現在はエアバッグ用途のZ軸加速度センサを市場投入している。燃料制御用のエアーフローセンサも白金抵抗体をMEMS化している。このセンサでは、ダイヤフラム上に形成した白金パターンが流量を検出するため、先に述べたようなMEMS構造体を保護する封止はせず過酷な環境下でも性能・信頼性を維持できるよう工夫を施している。これらのセンサについては、この特集号で個別に述べている。当社は、MEMSだけでなく磁性薄膜を用いた磁気センサの開発も推進している。図2に示したように、電気抵抗値が磁場によって変化する特性を用いたGMR(Giant Magneto-Resistance)回転角センサをエンジンのクランク角検知に適用し、製品化した⁽³⁾。このセンサでは、信号処理回路のICと一体化したいわゆるモノリシック化を実現しており、高感度とともに耐高温環境、小型であることを特長としている。自動車用センサの開発は、その過酷な環境下における信頼性確保と低コスト化の両立が要求される点や製品化実績を問われる点で、他の民生用センサに比べて研究開発の障壁が高いと言える。当社では、これまで培ってきたMEMS技術、機能薄膜形成技術、回路集積化技術などを基盤に、今後も自動車用センサの開発・製品化を推進していく。

3.4 自動車用センサの今後の展望

3.3節までは主にMEMS技術を用いたセンサについて述べたが、新しい自動車用センサやそれを使ったシステムはこれらに限らない。人は元来ミスを犯す生き物との前提に立ち、自動車運転における安全・安心システムの更なる高度化が進められている。最近よく知られるようになったプリクラッシュセーフティシステムがその一例である。居眠り・不注意運転による衝突事故の防止、AT車の誤発進防止を目的としている。このシステムに使われるセンサには、

ミリ波レーダ方式とカメラ方式がある。前者では、例えば周波数76.5GHzのミリ波を前方に照射し、自分の車に接近した他の走行車、障害物、人を早期に検知して、自動的にブレーキをかける衝突回避システムである。欧州では、AEB(Autonomous Emergency Braking)システムと呼ばれる、現在のエアバッグシステムのように将来の標準装備化が検討されている。ミリ波レーダを使った送受信機は元来、航空・宇宙用途で開発された電波技術であり、これが自動車分野に転用された例である。

人の倫理観に対してもリスクを見出し対処しようとするシステムが検討されている。飲酒運転による相次ぐ痛ましい事故の報道は、我々の記憶に新しい。飲酒運転撲滅に向け、法的措置がより厳罰化された。これは抑止力として効果を発揮しているが、更なる取組み強化が自動車業界でも促進されている。運送事業者の点呼時に、ドライバーのアルコール検知が2011年から義務化されたことは、その一例である。これに用いられるアルコールセンサは従来ある携帯型のものであるが、ドライバーが特別な動作をすることなく呼気からアルコールガスを高精度に検知する運転席搭載型のセンサも研究開発されている。

先に述べた地球環境保護など持続的社会への意識の高まりは、自動車業界でも新たな技術を後押ししている。ハイブリッド車(Hybrid Electric Vehicle: HEV)を始め、電気自動車(Electric Vehicle: EV)、プラグインハイブリッド車(Plug-in Hybrid Vehicle: PHEV)が注目されるようになり、インバータ駆動モータやバッテリー充放電の状態をモニタする電流センサが活発に開発されている。これらに続く究極のエコカーとして、水素と酸素を化学反応させて動力源を作り出す燃料電池車(Fuel Cell Vehicle: FCV)がある。水素は取扱いに注意を要するガスであり、燃料電池の水素ガス検知センサはFCVの普及には不可欠なセンサと言える。

今後も、自動車用センサは、多角的な見地からクルマの安全・安心・快適さを下支えするハードウェアとして、システムと密接に係りあいながら、常に先端技術を取り込んで進化していくものと考えられる。

4. む す び

我々の身の周りの製品を見渡すと、そこには必ずと言っていいほど安全・安心・快適の概念・設計指針が反映されている。文明の利器は単に利便性を追求するだけでなく、安全性が担保されていなければならない。それがモノの品質を形作り、消費者の信頼獲得につながる。歴史をたどればクルマは便利な交通手段を目的に発明されたわけだが、やがてそれが普及すると公害や交通事故といった社会問題を提起することになった。環境負荷低減に向けた取組みとして低燃費、排ガスのクリーン化が進められ、ドライバーや歩行者にとって安全な乗り物であるためにエアバッグシステムや衝突回避システムが誕生した。これらの実現には、多様な技術を基盤としたセンシング技術が使われていることを述べた。

安全・安心・快適なセンシングの基盤技術は、半導体技術、信号処理技術、組み込みソフトウェア、電波・無線技術、画像処理技術等の様々な分野にわたっている。そして、これらの基盤技術は、自動車だけではなく、一般の家電製品、社会インフラ、セキュリティ、リサイクル等の様々な分野で活躍している。この特集号では、当社の取り組む“安全・安心・快適”なセンシング技術について具体的な事例を通して述べる。

参 考 文 献

- (1) 平田善明, ほか: MEMS高精度加速度センサ, 三菱電機技報, **78**, No.6, 389~392 (2004)
- (2) Ogawa, S., et al.: Wavelength selective uncooled infrared sensor by plasmonics, Applied Physics Letters 100, 021111 (2012)
- (3) 深見達也, ほか: 車載用集積化GMR回転センサ, 電気学会論文誌E, **120**, No.5, 219~224 (2000)

エアバッグシステム用Z軸加速度センサ

Z-axis Accelerometer for Airbag System

Yoshiaki Hirata, Takahiko Itoh, Nobuaki Konno, Yuji Hiraoka, Eiji Suetsugu

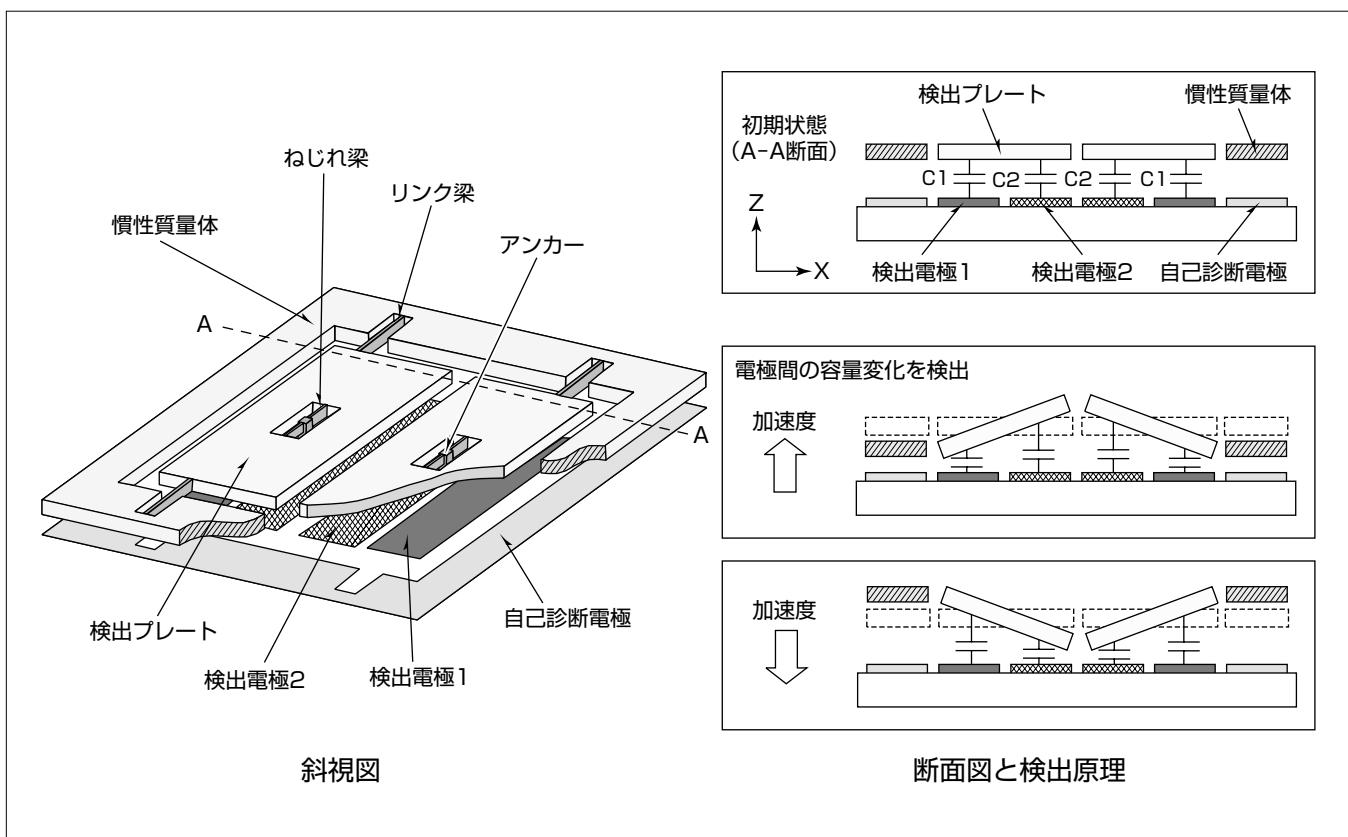
平田善明* 平岡裕二**
伊藤恭彦* 末次英治***
紺野伸顕*

要 旨

50G (G: 重力加速度) 以上の高い加速度を検知する半導体容量式加速度センサは、温度による特性変動が小さく、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) による小型・低価格化が可能なため車載エアバッグシステムに多数使用されている。一般的なエアバッグシステムでは、衝突検知用の加速度センサは運転席付近及びエンジンルーム付近に設置されるが、対応する衝突形態の多様化に伴い、車体の緩衝効果が小さいピラーなどへの搭載が増加している。車体の緩衝効果が小さい場合、衝突した際の入力加速度は、ボディ共振などによって検出加速度範囲をはるかに超える高周波振動となり、加速度センサの固定電極と可動電極が接触するクリップと呼ばれる現象が発生する可能性がある。

クリップが発生すると、加速度を積分してエアバッグ展開を決定する速度成分に誤差が発生し、誤動作を引き起こす要因となる。

今回開発した加速度センサは、面外方向の加速度を検出し、慣性質量体の面外変位を検出プレートの回転変位へメカニカルに変換する独自の検出機構を持ち、感度と共振周波数を独立に設計することが可能である。最適な共振周波数設定と、検出プレートと検出電極間のダンピング効果の利用によって、エアバッグ用途として理想的な感度周波数特性を実現し、クリップ現象を回避した正確な速度検出が可能となった。



Z軸加速度センサ構造と検出原理

加速度を検知する可動構造体は慣性質量体と可動電極からなる。可動構造体は2箇所のアンカーで基板と接続している。2枚の検出プレートはねじれ梁(はり)で支持されアンカーと接続する。リンク梁は慣性質量体と検出プレートを接続する。加速度による慣性質量体の面外変位を検出プレートの回転変位へメカニカルに変換し、検出プレートと基板上の電極間の差動容量変化で加速度を検出する。可動構造体と電極はポリシリコン薄膜で形成する。

1. まえがき

車載用エアバッグシステムは、側突対応、オフセット衝突対応など、衝突形態が多様化し、車体の緩衝効果が小さい箇所への加速度センサ搭載が増加している。車体の緩衝効果がない場合、衝突した際の入力加速度は、検出範囲をはるかに超える高加速度・高周波振動となり、固定電極と可動電極が接触するクリップを誘発する。その結果、加速度を積分した速度誤差が大きくなり、エアバッグの展開判断ミスにつながる危険性がある⁽¹⁾。一方エアバッグ用加速度センサの市場でのコスト競争は激化しており、コストアップを伴うプロセスの適用は難しい。そこで、標準的な2層ポリシリコンプロセスで作製でき、独自の変位変換機構と大きいダンピング効果を持つZ軸加速度センサを開発してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

本稿では新規開発したZ軸加速度センサの検出原理、製造プロセス、特徴について述べる。

2. Z軸加速度センサの検出原理と製造プロセス

2.1 Z軸加速度センサの検出原理

図1はZ軸加速度センサの平面図であり、図2は検出原理を示す断面図である。センサの可動構造体は8μm厚のポリシリコンである。可動構造体は2か所のアンカーで基板と接続している。2枚の検出プレートはねじれ梁で支持されアンカーと接続し、リンク梁は慣性質量体と検出プレートを接続する。図2は図1のA-A断面図で、(a)は初期状態、(b)はZ軸に加速度が加わって変位した状態である。図2(a)に示す通り、検出プレートに対して検出電極1、2が検出ギャップ g だけ離して配置している。検出初期容量は $C = \varepsilon S/g$ となる。ここで ε は誘電率、 S は検出電極面積である。慣性質量体の下部には自己診断電極を配置し、静電引力によって慣性質量体及び検出プレートを強制変位させる自己診断機能を持つ。

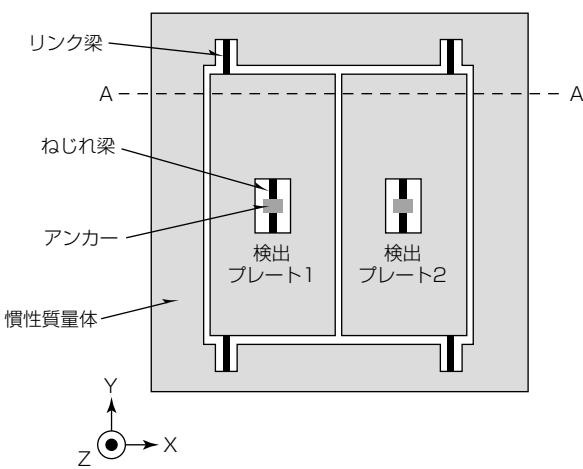


図1. Z軸加速度センサの平面図

図2(b)を用いてZ軸加速度センサの検出原理を述べる。基板の上方向に加速度 A_c が加わると、慣性力によって慣性質量体は下方向に変位する。検出プレートはリンク梁に引っ張られ、ねじれ梁を支点に回転変位する。検出容量 $C1, C2$ は片方の容量が増加すれば、他方が減少する差動容量を形成する。検出プレート先端の変位を u とすると、検出容量は式(1)、式(2)で表される。

センサ出力 V_{out} は C-V 変換回路を用いることで⁽⁴⁾、式(3)で表される。

ここで、 V_s は供給電圧である。式(3)に式(1)、式(2)を代入し、 u が g と比較して小さいと仮定すると、式(4)となる。

検出プレートの先端変位 u は加速度に比例するので、加速度に比例したセンサ出力が得られる。

図3に入力加速度とセンサ出力の相関を示す。 u が大きくなると式(4)は成立せずセンサ出力の非線形性が大きくなるが、開発したZ軸加速度センサでは検出プレートの可動範囲を最適設計し、検出加速度範囲内の非線形性は1%以下である。2枚の検出プレートをY軸対称構造とすることで、X軸方向加速度及びY軸回り角加速度等、他の慣性力による出力誤差の低減を図っている。

2.2 Z軸加速度センサの製造プロセス

図4にZ軸加速度センサの製造プロセスを示す。Z軸加速度センサはポリシリコンを可動構造とする表面マイクロマシンと呼ばれるプロセスで製造する。

(1) SiO_2 付きSi基板上にポリシリコンで固定電極を形成する。固定電極の容量検出部以外を Si_3N_4 膜で覆う。 Si_3N_4

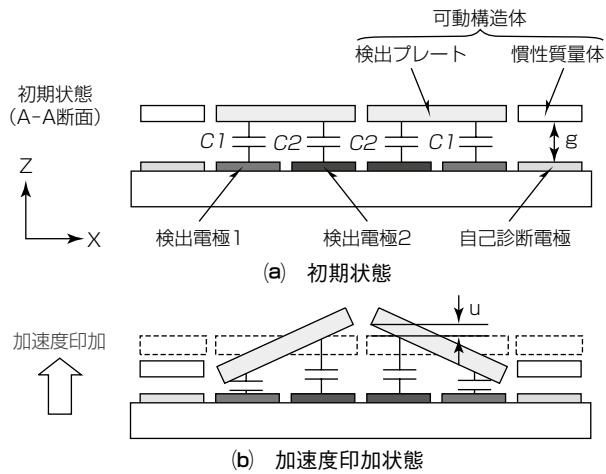


図2. Z軸加速度センサの断面図

は構造体リリース時に基板上の SiO_2 エッチングを防ぐ保護膜である。

- (2) リン酸ガラス(PSG)を堆積し、パターニングする。PSG膜厚が検出ギャップとなる。
- (3) 8 μm 厚のポリシリコンを堆積し、深掘りドライエッチング(DRIE)で可動構造体を形成する。ポリシリコンはドーパント量制御とアニール処理によって面外方向へ反らないように応力制御を行う。ワイヤボンディング用のアルミ電極を形成する。

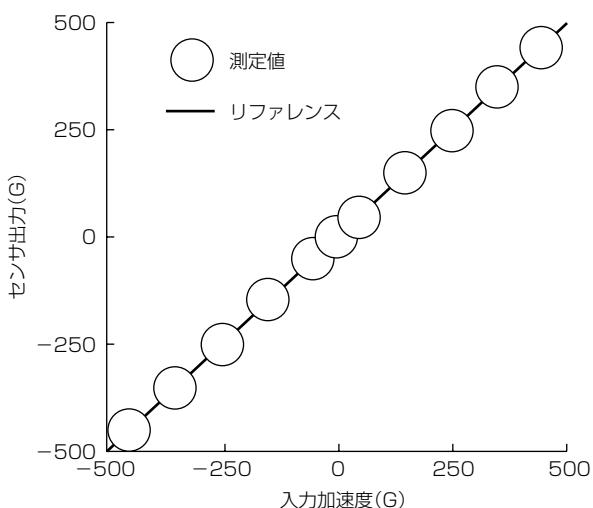


図3. Z軸加速度センサの入力加速度とセンサ出力

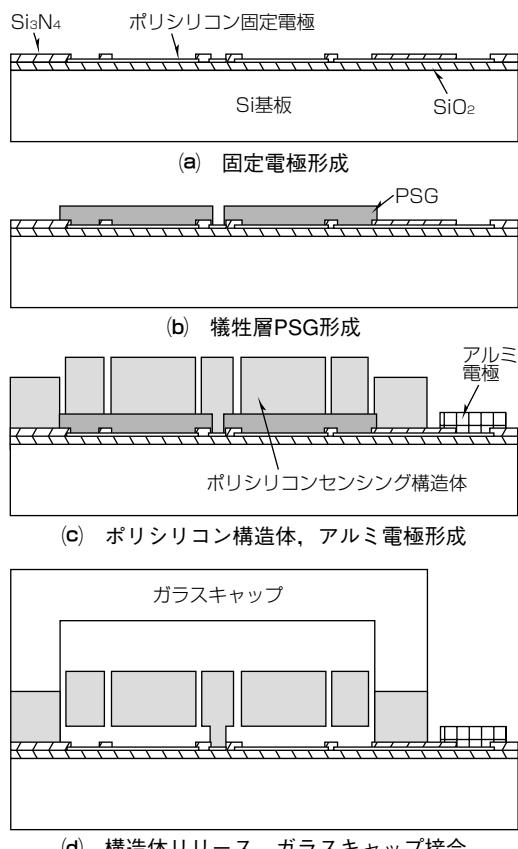


図4. Z軸加速度センサの製造プロセス

- (4) PSGをフッ酸でエッチングして構造体をリリースする。固着防止のため、水洗後の乾燥には超臨界乾燥法を用いる。最後にガラスキャップを陽極接合法で接合し、ウェーハレベルで封止する。

従来の多くのZ軸加速度センサは、可動構造体のZ軸変位を検出するため、可動構造体の上下に配置した電極で差動容量を形成している。しかしこの構造では、プロセスが複雑で、かつ上下の検出ギャップの違いによって特性ばらつきが発生しやすい。このZ軸加速度センサは、慣性質量体のZ軸変位を検出プレートの回転変位へメカニカルに変換する独自のセンシング機構によって、可動構造体下面に配置した同一検出ギャップの電極で差動容量を形成でき、可動構造体上部の検出電極は不要である。また一層だけの膜厚で差動容量を形成しているため、検出ギャップばらつきに起因する素子間の特性ばらつきが少ない。

3. Z軸加速度センサの特徴

3.1 高ダンピング構造

図2に示す検出プレートと検出電極は、狭い検出ギャップでエアが挟まれた構造である。検出プレートの動きが低周波の場合、検出ギャップ間に挟まれたエアは検出プレート変位に追随して移動する。しかし検出プレートが高周波で変位すると、ギャップ間のエアは検出プレートに追随できず、検出プレート変位に対して抗力となって、いわゆるスクイズフィルムダンピングの効果を奏する。

図5の①は開発したZ軸加速度センサの感度周波数特性を示す。白抜きプロットは実測値で実線は解析値である。①の感度周波数特性は、強いダンピングによって8 kHzの共振周波数でピークが発生しない過減衰特性となる。

図5の①で、開発品の感度周波数特性は衝突検知に必要な周波数帯域であるDC～400 Hzでほぼ平坦(へいたん)であるが、1 kHz付近からスクイズフィルムダンピング効果によって急速に減衰する。この感度周波数特性は、検知帯域を超える高周波・高加速度成分が入力されても可動電極は変位せず、クリップを生じないエアバッグ用として理想的な特性と言える。

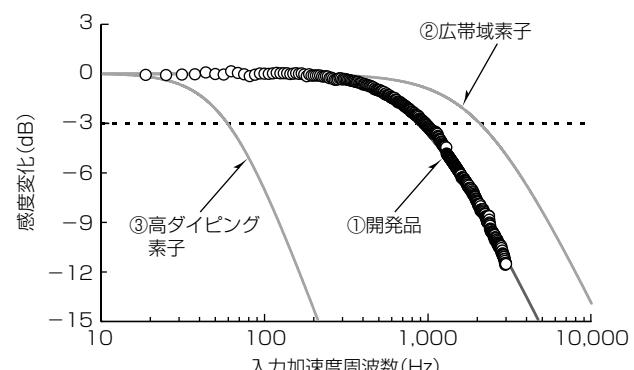


図5. Z軸加速度センサの感度周波数特性

3.2 共振周波数可変構造

櫛歯(くしば)型などの通常の容量式加速度センサは、1つの慣性質量体を1自由度のばねで支持しているため、感度と共振周波数を個別に設計できない。したがって、感度が決まれば共振周波数は一意的に決まる。しかし、このZ軸加速度センサは、感度と共振周波数を決定するパラメータが慣性質量、ねじれ梁ばね定数、リンク梁ばね定数、ねじれ梁とリンク梁の距離と多数あるため、感度と共振周波数を個別に設計できる利点を持つ⁽¹⁾⁽²⁾。

図5の②と③は①の開発品と同一感度で、ねじれ梁長、リンク梁長、ねじれ梁とリンク梁のオフセット距離を変えたZ軸加速度センサの感度周波数特性の解析結果である。②は共振周波数を上げて帯域を広げた素子モデルであり、③は共振周波数を下げてダンピングを高めた素子モデルである。共振周波数に対応して検出周波数帯域が異なり、検出帯域の目安となる感度が-3 dBとなる周波数は①が800Hzに対し、②が1.8kHz、③が60Hzとなる。

これらから、このZ軸加速度センサは、従来の1自由度系加速度センサでは不可能であった、同一構造、同一感度で共振周波数を変更することによって、検出帯域を調整できる。したがって、用途に応じた最適な周波数特性が設計可能である。

3.3 衝突模擬試験による速度誤差検証

衝突時の速度誤差を見積るために、加速度センサと圧電素子ピックアップを同一金属ブロックに貼り付け、ブロックを加速して壁に衝突させる衝突模擬試験を実施した。ブロックを加速する力、壁の材質を変えて、衝突速度と衝突加速度を調整する。衝突前のピックアップ加速度出力を積分した速度をリファレンスとし、衝突後の加速度センサ出力を積分した速度をプロットする。図6に試験結果を示す。図(a)は三菱電機で開発したZ軸加速度センサの結果であり、図(b)は他社のエアバッグ用加速度センサの結果である。

図6中のプロット○印の大きさは衝突直後のピックアップ最大加速度を表し、大きいほど加速度が高い。最大加速度は10,000Gを超える。図(a)に示すZ軸加速度センサの積分速度は、実線で示すリファレンスとほぼ一致する。また速度誤差は最大加速度に依存せず、衝突加速度が大きくなつても速度誤差が大きくなることはない。これに対し、図(b)に示す他社製の加速度センサは、センサ出力の積分速度がリファレンス速度より小さい傾向にある。また最大加速度が大きくなると、リファレンスからのズレが大きくなる。これは、衝突によって固定電極と可動電極が接触するクリップが発生して出力が飽和し、加速度を積分して速度に換算すると実際の速度より減少するためである。今回開発したZ軸加速度センサは、クリップの問題を解消でき、エアバッグ衝突判定の精度向上に貢献できる。

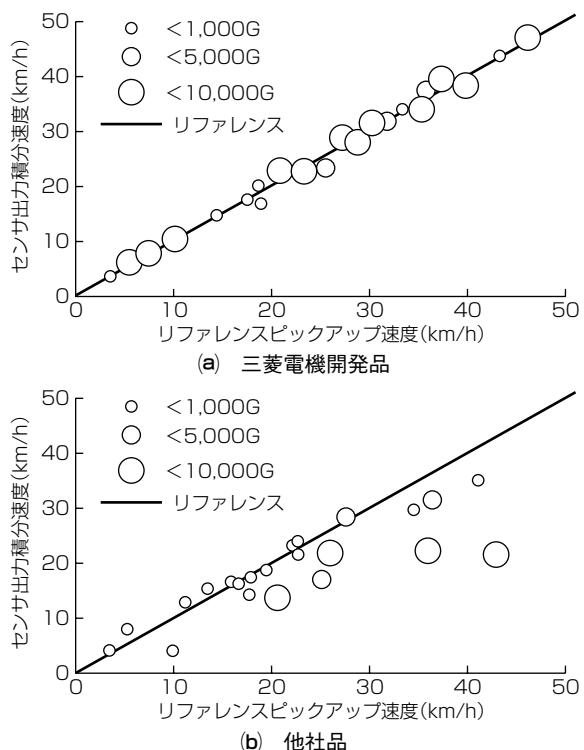


図6. 加速度センサ衝突模擬試験による速度誤差比較

4. むすび

標準的な表面マイクロマシンプロセスで作製でき、独自の変位変換機構を持つエアバッグ用Z軸加速度センサを開発した。検出プレートと検出電極間のスクイズフィルムダンピング効果を利用し、検出加速度レンジを超える高周波・高加速度が入力されてもクリップが発生せず、正確な速度検出が可能であることを示した。また、センサ感度と共振周波数を独立に設計できるため、用途に応じた最適な感度周波数特性を設定できることを示した。

参考文献

- (1) 平田善明, ほか: ダンピング効果を利用したメカニカル変位変換型Z軸加速度センサによる衝突速度検出の改善, 電気学会論文誌E, 132, No.9, 296~302 (2012)
- (2) 平田善明, ほか: 変位変換機構を有するZ軸加速度センサ, 平成21年電気学会全国大会講演論文集, 3-196 (2009)
- (3) Hirata, Y., et al.: A new z-axis capacitive accelerometer with high impact durability, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 1158~1161 (2009)
- (4) Tsugai, M., et al.: A Charge Balanced C-V Converter for a Differential Capacitance Sensor, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, 123, No. 9, 357~362 (2003)

谷本考司*
大庭彰洋*
高畠香満**

自動車エンジン制御用センサ

Sensors for Engine Control System

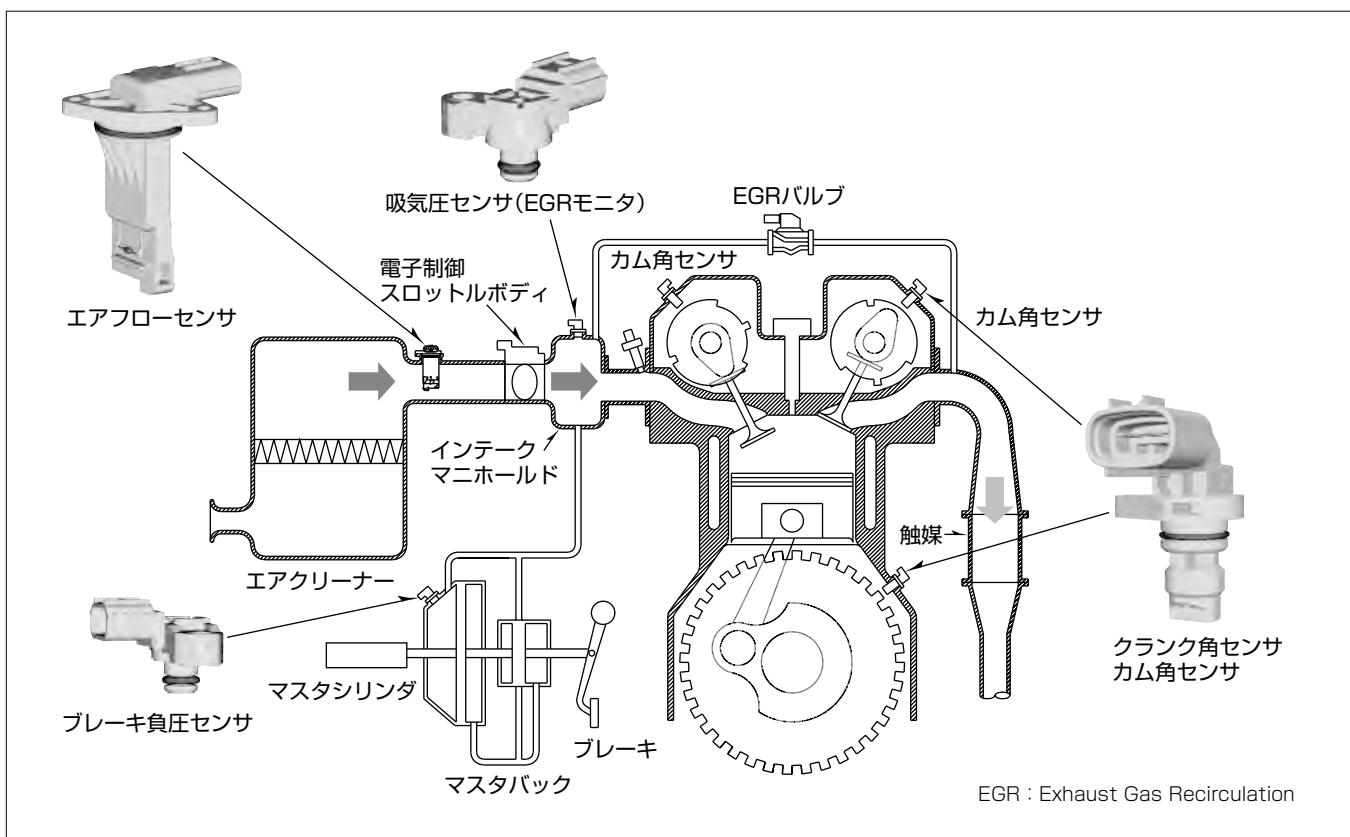
Koji Tanimoto, Akihiro Oba, Yoshimitsu Takahata

要 旨

CO₂、排気ガスなどの環境規制が強化される中、自動車の高効率・低燃費パワートレインの開発が加速している。CO₂削減のための燃費向上エンジン制御システムには、エンジンや車両の状態をより正確に検出するセンサと燃費向上に有効となるエンジン制御システムが重要な課題である。

燃費向上アイテムとして普及拡大しているアイドルストップシステムでは、エンジン停止時の逆回転も検出するクランク角センサの要求が強い。三菱電機は従来の検出素子よりも高感度なGMR(Giant Magneto Resistance:巨大磁気抵抗)素子を応用した逆回転検出タイプを製品化した。GMR素子の高い感度の優位性を活用して高精度・高信頼性を実現した。

燃費向上のためのエンジンのダウンサイ징化、ポンピング損失低減に伴いスロットルが全開する運動領域が拡大し、高脈動の吸入空気量検出が重要になる。排気規制対応ではエンジン始動後早期に空燃比を制御する必要がある⁽¹⁾。これらの吸入空気量検出への要求に対応するため三菱電機は、MEMS(Micro Electro Mechanical System)技術を応用したマイクロエアフローセンサ、及び小型圧力センサを開発し、製品化した。マイクロエアフローセンサは始動時の高速応答、低消費電力という特長に加えて、脈動流及び吸気温度変化に対する検出誤差を従来比1/2に低減した。小型圧力センサは検出素子の小型化と回路の集積化によって、三菱電機従来比質量40%減を実現した。



ガソリンエンジン制御システムのセンサ

ガソリンエンジン制御システムではエアフローセンサや圧力センサでエンジンへの吸入空気量を検出し、クランク角センサやカム角センサからのエンジン状態情報を基に最適な燃料噴射量、燃料噴射タイミング、点火タイミングを決定する。どちらのセンサも小型、高信頼性、高精度化が求められる。

1. まえがき

自動車エンジンの空燃比制御、点火時期制御をよりきめ細かく行うため、エンジン回転やピストン位置、カム角度等の回転角度、吸入空気量の高精度な検出が求められる。

三菱電機は高感度なGMR素子を応用した回転センサを世界に先駆けて^(注1) 製品化以降、ゼロ回転検出、逆回転検出タイプを順次製品化している⁽²⁾。また、MEMS加工技術を応用したマイクロエアフローセンサ、及び圧力センサも小型軽量化、高精度化、低コスト化が求められている⁽³⁾。これらの課題を克服するために開発を行った。

本稿では、PWM(Pulse Width Modulation: パルス幅変調)出力方式逆回転検出GMR回転センサ、第2世代マイクロエアフローセンサ、小型圧力センサそれぞれの構造、検出方式、及び特長について述べる。

(注1) 1999年10月現在、当社調べ

2. GMR回転センサ

車載用回転センサは、エンジンやトランスマッisionの動作を歯車の回転として検出する。当社は、GMR素子の適用によって、車載用回転センサの高精度・高信頼性を実現した。

また、アイドルストップシステムに好適なPWM出力方式逆回転検出GMR回転センサを開発し、2012年に製品化した。

2.1 構造と検出方式

図1はGMR回転センサの内部構成である。センサの先端部にGMR素子と磁石があり磁気回路を構成する。IC(Integrated Circuit)は過電圧・サージ保護用及びEMC(Electro-Magnetic Compatibility)用チップ部品とともにパッケージ化しており、これらを樹脂で一体成形している。

図2はGMR素子の特性曲線(MR(Magneto Resistance)カーブ)である。センサ内蔵の磁石によってGMR素子にはバイアス磁界が与えられている。歯車の回転によって歯が近づくと素子に印加される磁界が大きくなり、素子の電気抵抗が小さくなる。

GMR素子はGMR膜をパターニングしたものである。GMR膜は数nmの厚さの磁性層と非磁性層を積層した多層膜で、磁性層／非磁性層界面での電子の散乱確率が磁性層

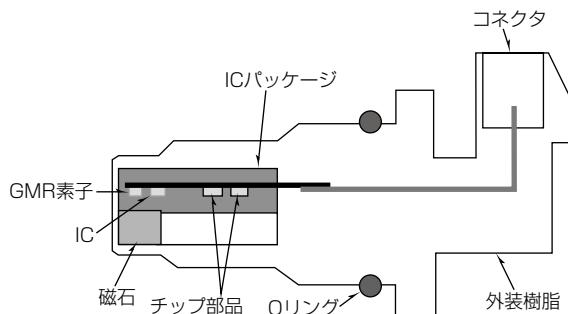


図1. GMR回転センサの内部構成

の磁化状態によって変化するため、印加磁界によって電気抵抗が変化する。多層化によって界面を形成することで、大きな電気抵抗変化を得ることができる。

図3に回転方向検出の原理を示す。歯車の回転方向を検出するためには位相差のある2つの信号が必要である。GMR素子のブリッジ回路を2つ設け、そのうちの1つをクロック信号(センサ出力にも用いる)とし、もう1つをデータ信号(回転方向に応じて電位が変化する参照用信号)として使用する。すなわち、クロック信号のタイミングでデータ信号を検出して参照し、論理回路で回転方向を判定する。

出力信号は回転方向に応じて、パルス幅を変えることで回転方向を出力する。これによってシステムは、エンジンが停止しようとする際に発生する正回転・逆回転をカウントすることができ停止位置を正確に検出することが可能となる。したがって、始動時の早期点火を実現することができる。特にアイドルストップシステム搭載車は、従来車に

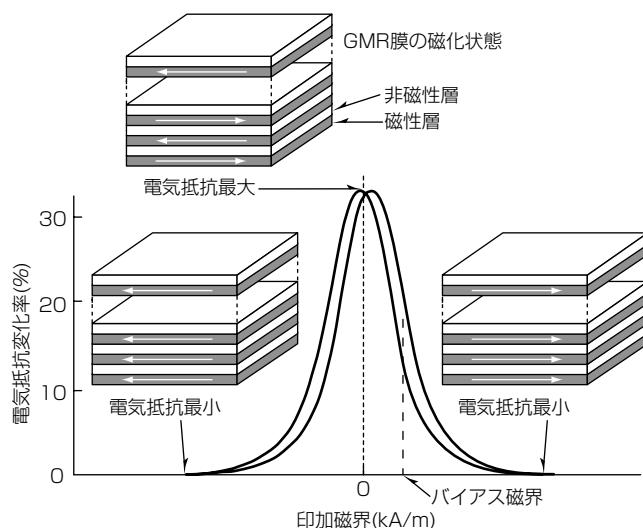


図2. GMR素子の特性曲線

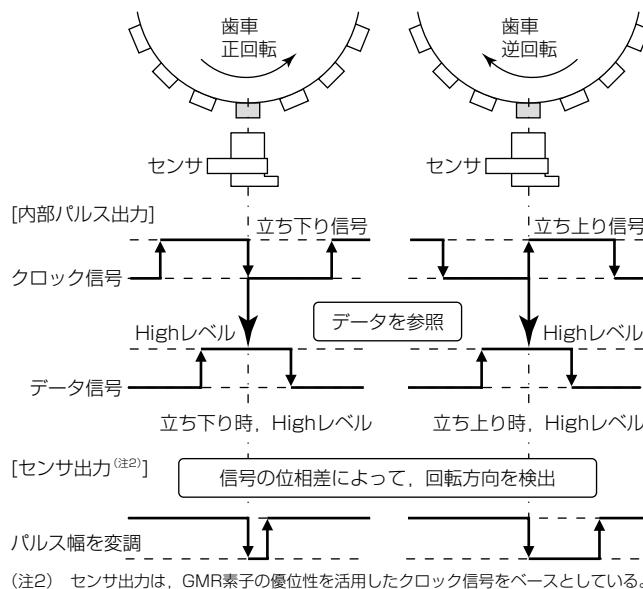


図3. 逆回転検出の原理

比べ始動頻度は飛躍的に高まるため、このセンサが用いられることが多い。

2.2 特長

高精度なセンサの実現には、信号対雑音比(S/N比)の高い信号を得ることが重要である。GMR素子は半導体ホール素子に対して感度が、強磁性体MR素子に対して電気抵抗変化率がそれぞれ一桁以上大きく、実用上の磁界範囲で大きな信号振幅が得られる。三菱電機逆回転検出GMR回転センサの出力信号も、GMR素子の優位性(大きな信号振幅による高精度)を活用した仕様となっており、高精度と機能(逆回転検出)の双方を持つ回転センサである。

3. マイクロエアフローセンサ

エンジンへの吸入空気量を検出するマイクロエアフローセンサ(AFS)は検出素子にMEMS技術を応用した感熱式AFSである。三菱電機は、高精度化・高速応答・小型軽量化の要求に対応するために、吸気脈動流及び吸気温度変化に対する検出誤差を低減し、小型軽量化を図った第2世代マイクロAFSを開発し、2010年に製品化した。

3.1 構造と検出方式

マイクロAFSの外観を図4に示す。検出回路とバイパス流路、検出素子を一体にパッケージングし、吸気温度検出用のサーミスタをバイパス流路の近傍に配設している。バイパス流路は、吸気脈動流を低減するため迂回(うかい)した流路構造とし、出口上流側に突起を設けてバイパス流路内の流れの安定化を図っている。

検出素子は、図5に示すようなシリコン基板の裏面をエッチングして厚さ数 μm のダイヤフラム構造を形成し、ダイヤフラム上に温度検出抵抗と発熱抵抗を配置したものである。検出部を薄膜状のダイヤフラム構造とすることで、発熱体とシリコン基板間を熱絶縁でき、また発熱体の熱容量を小さくできるため、低消費電力と高速応答を実現している。一方で、吸気に含まれるダストから検出部の薄膜を保護するために、検出素子をバイパス流路の壁面に実装して検出素子の上流側に屈曲部を設けることでダストの運動エネルギーを低減し、ダスト衝突時のダメージを低減する構造を実現した。



図4. マイクロAFS

図6に示す検出回路では、発熱温度検出抵抗(R_{su} , R_{sd})の温度が吸気温度検出抵抗(R_a)よりも高くなるように発熱抵抗への加熱電流を制御し、プリッジ電圧(V_m)を流量信号として使用している。発熱抵抗(R_h)の上下流側に配置した発熱温度検出抵抗の中点を差動增幅回路の入力として帰還回路を構成することで、図7に示すように空気の流れ方向と流量に応じて発熱温度を変化させている。これによって逆流の感度を下げて吸気脈動流検出誤差を低減すると同時に、流量に応じた高精度な温度補償を実現している。

3.2 特長

マイクロエアフローセンサの特長は次のとおりである。

- (1) 屈曲部を持つバイパス流路の壁面に検出素子を実装することによって、検出素子へのダストの影響を低減した。
- (2) 逆流補償検出回路とバイパス流路の最適化によって吸気脈動流や温度変化による検出誤差を低減した(三菱電機従来比1/2以下)。
- (3) センサ出力形態として、アナログ電圧又はデジタル出力を選択可能とした。

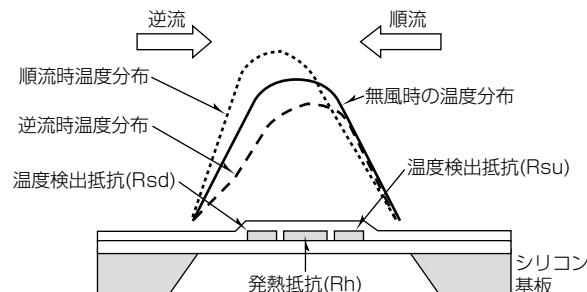


図5. 検出素子断面図と温度分布

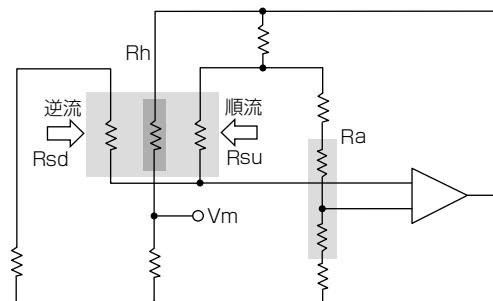


図6. 検出回路

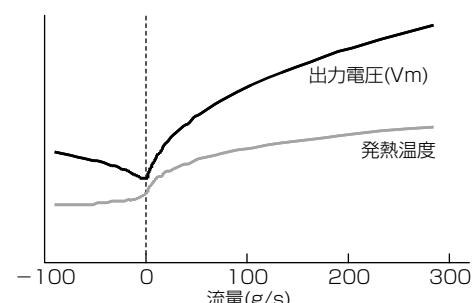


図7. 発熱温度及び出力電圧の流量特性

4. 圧力センサ

自動車用途としてエンジンの吸入空気量検出のほかに、大気圧検出やEGRシステムモニタ、さらにアイドルストップシステムにおけるブレーキマスタバッグ圧モニタとして、圧力センサの使用が増加している。また、システム化が進む中、多くのコンポーネントが搭載されることから、レイアウト性に優位な小型センサが求められる。ここでは、現在生産している最新仕様の小型化圧力センサについてその構造と特長を述べる。

4.1 構造と検出方式

圧力センサの外観を図8に示す。圧力導入ポート、車体取付け部位及びコネクタを形成した外装の内部には、リードフレームをモールドしたパッケージ上に、圧力検出素子と検出素子出力の増幅や温度補正をするASIC(Application Specific Integrated Circuit)をマウントしたセンサモジュールを備える。

圧力検出方式は、図9に示すとおり半導体ピエゾ抵抗式である。ダイヤフラム上に形成した4つのゲージ抵抗によって、圧力に応じたダイヤフラムのひずみをゲージ抵抗の抵抗変化に変換し、ブリッジ回路によって、抵抗変化に比例した出力電圧を得る。

検出素子の表面には、ゲージ抵抗をイオン注入法などによって形成し、裏面をエッティングすることでダイヤフラム及びキャビティを形成する。キャビティ部は、真空状態でガラス台座と陽極接合することで真空基準圧力室として形成される。

検出素子を小型化するためにはダイヤフラムサイズの縮小が不可欠になる。ダイヤフラム厚の低減に対しては活性層厚が均一なSOI(Silicon On Insulator)基板を用い、またエッティング斜面部縮小のため垂直エッティング可能なドライエッティング(Inductive Coupled Plasma-Reactive Ion Etching: ICP-RIE)技術を採用した。従来のSi基板からSOI基板の採用によって、SiとSiO₂とのエッティングレート差を利用しSiO₂層でエッチストップを図ることで、ダイヤフラム厚は、活性層厚で決定されるため高精度な薄膜ダイヤフラム形成が可能となり、従来比の1/3の薄膜化を実現した。また、従来の異方性ウェットエッティングからドライエッティングを採用することによってSi結晶(111面)に由来するテープ角 $q = 54.7^\circ$ から、90°の深堀エッティングが可能となるため、高精度なダイヤフラム辺形成とともにチップ辺の短縮が可能となり、ダイヤフラム辺は従来比の1/3、検出素子サイズは従来面積比1/9の小型化を実現した(図10)。

4.2 特長

検出素子とともにASICを高耐圧CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)で小型化を図り、センサモジュールサイズの縮小及び製品全体の小型化を達成した。三菱電機従来品に対し質量比40%減を実現した。

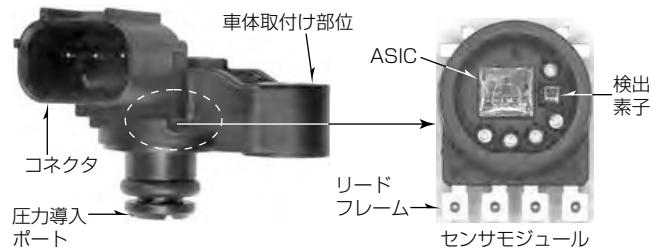


図8. 圧力センサ

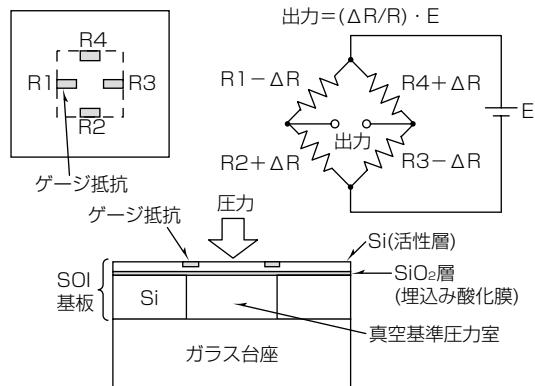


図9. 検出素子構造と等価回路

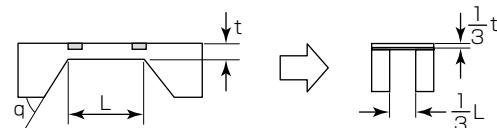


図10. 検出素子サイズ(従来品との比較)

5. むすび

回転センサは、GMR回転センサで精度面のアドバンテージを保持したまま、市場から求められる機能面で充実を図った。一方、コスト低減の要請は一層強くなることが想定される。今後も市場ニーズを的確にとらえた開発を推進していく。

マイクロエアロセンサは逆流補償によって検出誤差を低減したが、さらに大きな吸気脈動に対する検出精度や低流量検出が求められており、これらの要求に対応するため逆流検出回路やデジタル信号処理による高精度化の開発を進めている。

圧力センサは小型化・軽量化によって、レイアウトスペースの制限が多い二輪車用途にもセンサの搭載を可能とし、燃費向上のシステムに貢献している。

参考文献

- (1) 大須賀 稔, ほか:パワートレイン制御と検出技術, 自動車技術, 66, No.2, 4~9 (2012)
- (2) 川野裕司, ほか:GMR回転センサの応用展開, 三菱電機技報, 81, No.9, 594~597 (2007)
- (3) 中村洋志, ほか:エンジン制御用センサの小型化, 三菱電機技報, 78, No.9, 585~588 (2004)

車社会の安全を支える超音波センシング技術

木村友則*
井幡光詞**

Ultrasonic Sensing Technologies Supporting Safety Motorization

Tomonori Kimura, Koji Ibata

要 旨

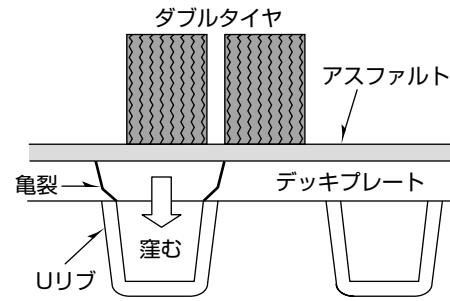
現代の車社会にとって、安全に運転するためのインフラ整備が欠かせない。特に高度成長期に建設された各種構造物の老朽化が進んでおり、社会問題となっている。老朽化した構造物を放置しておくと人命に係わる重大事故を引き起こす可能性があり、安全な社会の実現にはこれら構造物の維持管理が不可欠である。すなわち、検査を行って問題があれば補修を行う必要がある。検査方法としては、超音波を用いた非破壊検査(超音波探傷)が有効である。老朽化したインフラの例として、道路橋の鋼床版がある。鋼床版に発生した亀裂が貫通すると路面の窪(くぼ)みの原因となり、運転に支障をきたすので問題となっている。本稿では、

今回開発した鋼床版亀裂の超音波探傷技術について述べる。従来技術では探触子(超音波のセンサ)を設置する面で感度補正を行うことができなかったが、新たに開発した探傷技術では感度補正を可能にしたので、経年変化に対応した探傷が可能となった。

また、車を安全に運転するには、インフラの整備だけではなく、車両周辺の安全を確保することも重要である。このため、自動駐車支援、死角監視や衝突回避等のシステムが拡大しており、車両周辺のセンシング技術向上が求められている。本稿では、車両周辺のセンシングに用いられる空中超音波センサの開発状況についても併せて述べる。



路面に発生した窪み



鋼床版の断面図



実橋での探傷の様子



空中超音波センサの設置例

鋼床版の超音波探傷技術と空中超音波センサ

左上の写真は、実際の路面に発生した窪みである。この窪みを発生させる原因是鋼床版デッキプレートを貫通した亀裂であり、この様子を右上の図に示している。左下の写真は、新たに開発した臨界屈折角探傷法で実橋の鋼床版を探傷している様子である。また右下の写真は、車両周辺のセンシングに用いられる空中超音波センサを車に設置した例を示している。

1. まえがき

近年、高度成長期に建設された各種構造物の老朽化が進んでおり、社会問題となっている。老朽化した構造物を放置しておくと人命に係わる重大事故を引き起こす可能性があるので、安全な社会の実現にはこれら構造物の維持管理が不可欠である。交通量の多い道路橋では、鋼床版のデッキプレートを貫通する亀裂が報告されている⁽¹⁾。この亀裂は目視検査ができない部位に発生し、また打音検査も有効でないため、デッキプレート下側からの超音波探傷が行われる。この際、塗装や表面状態によってエコーの受信感度が大きく変化する。本稿では、これらがエコーに及ぼす影響を除去する探傷方法について示し、実橋で行った探傷試験結果と亀裂の実測値との比較について述べる。

また、車両周辺の安全確保にも超音波センシング技術が用いられている。本稿では、検知距離の拡大を目的とし、感度を向上させた空中超音波センサについても併せて述べる。

2. 臨界屈折角探傷法

2.1 鋼床版デッキプレートの貫通亀裂

図1は、路面に発生した窪みである。窪みの深さはそれ程ではないが、この窪みに車のタイヤが嵌(は)まると運転に支障をきたし、事故の誘因となる。窪みが発生する原因是、道路の構造にある。図2は、鋼床版の断面図である。鋼床版はデッキプレートとUリブで構成されており、これらは溶接されている。Uリブ上を車が通行すると溶接部に大きな荷重がかかり、デッキプレート内に亀裂が発生する。年月を重ねるとこの亀裂が進展し、最終的にはデッキプレートを貫通する。この場合、路面のアスファルトを支えられずに、窪みが生じる。

路面に窪みが生じる前に補修工事を行うことが重要であり、そのためにはデッキプレートを貫通する前に亀裂を検出する必要がある。この亀裂は目視では確認できない場所に発生し、また打音検査でも確認できない。そこで、この亀裂を検出可能な超音波探傷技術を開発した。

探触子(超音波のセンサ)を設置する場所は、図2に示す

ようにデッキプレートの裏面に限られる。またアスファルトが載っている面は平滑とは限らないので、この面で超音波ビームを反射させて探傷することは難しい。そこで、デッキプレートの面にはほぼ平行な超音波ビーム(横波)を伝搬させて亀裂に直接照射する臨界屈折角探傷法を開発した。図2の拡大図の部分は、探傷の様子を示している。

2.2 擬似表面SV波を用いた感度補正方法

構造物の検査は、数年間隔で定期的に行われる。数年間に塗装面が劣化すると、探触子からデッキプレートへの超音波の伝搬挙動が、前回の検査時と異なってしまう。また、前回と同じ探触子や探傷装置を用いることが難しい場合もある。このように、従来は前回までと同じ条件で探傷を行うことが困難であった。今回開発した臨界屈折角探傷法は感度補正を行うことで、この課題の解決を試みた。

臨界屈折角探傷法は、図2に示したように超音波ビームを試験体に対してほぼ平行に伝搬させる探傷法である。この探傷法に用いる探触子を2個対向させて設置すると、擬似表面SV(Shear Vertical)波が受信されることが報告されている⁽²⁾。図3には、擬似表面SV波が受信される様子を示している。

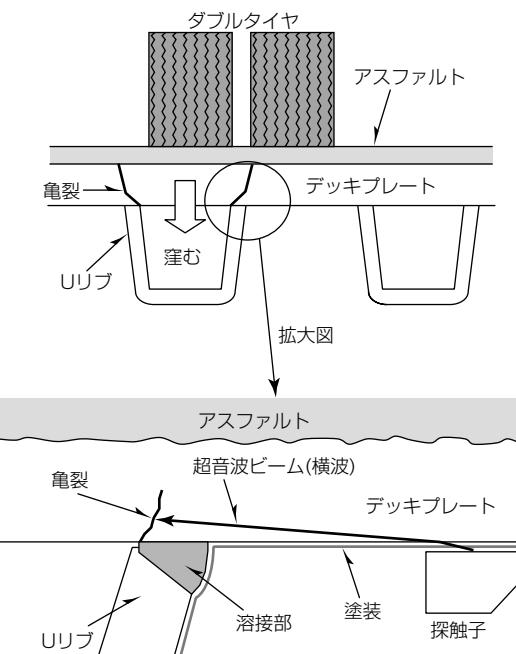
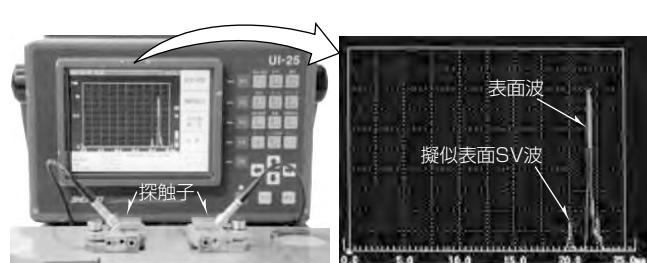


図2. 鋼床版の断面図と探傷の様子



図1. 路面に発生した窪み



(a) 臨界屈折角探触子を対向させた状態
(b) Aスコープ画像

図3. 擬似表面SV波の受信の様子

臨界屈折角探傷法では、擬似表面SV波の受信感度を用いて感度補正を行う。図4に補正方法の概念図を示す。まず表面が滑らかな感度校正用試験片で擬似表面SV波を受信し、この感度を記録しておく。次に、探触子間隔を固定して実橋の鋼床版デッキプレートで同様に擬似表面SV波を受信し、この感度を記録する。両者の感度差は塗装の表面状態だけとなるので、この感度差を補正值として用いれば、塗装の表面状態に応じた感度補正が可能となる。なお、校正用試験片と実橋鋼床版のデッキプレートでは音速が異なる場合があるので、実際には屈折角を微調整して補正值を求める⁽³⁾。

2.3 亀裂深さとエコー高さとの関係

亀裂深さとエコー高さとの関係を求めるため、人工的に亀裂を入れた試験片で実験を行った。図5に実験結果を示す。横軸が実際の亀裂深さで、縦軸は相対エコー高さである。図中の黒丸印が実験データである。深さが0~9.5mmの亀裂を対象として実験を行った。図に示すように亀裂深さ4mm以下ではエコー高さは単調な増加傾向にあるが、

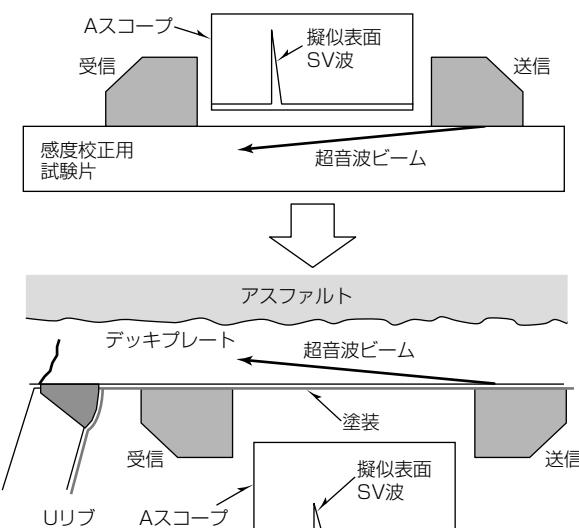


図4. 擬似表面SV波による感度補正方法

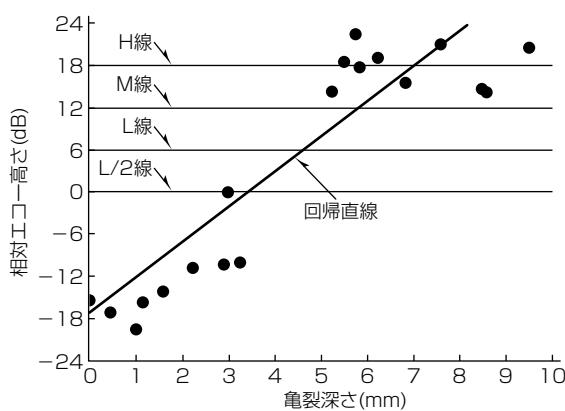


図5. 人工亀裂の深さとエコー高さとの関係

4mmを超えると飽和状態となる。これは亀裂の深い位置に超音波ビームが照射されないためと考えられる。

2.4 実橋に発生した亀裂の探傷

実橋に発生した亀裂に対し、臨界屈折角探傷法を適用して亀裂を評価した。図6に、実橋鋼床版での適用状況を示す。鋼床版の下に足場を設け、作業員2名による探傷を行った。なおこの現場における感度補正值は、8dBであった。

図5に示した回帰直線を用い、実橋での探傷におけるエコー高さから亀裂の深さを推定した。また検査部位を切り出して実際の亀裂深さを測定し、エコー高さから推定した亀裂深さと比較した。結果を図7に示す。図中、黒丸印がエコーから推定した亀裂深さで、実線が実測値である。また図の横軸は基準点(横リブ)からの位置を示している。図に示すように、両端部では亀裂が浅いので、両者はほぼ一致している。亀裂が深い場合、図5に示したようにエコー高さが飽和するため、両者に差異が生じる。しかし両端部を評価することによって、中間部では大きな亀裂があると類推できる。このように、実橋で臨界屈折角探傷法の妥当性が検証された。

なお臨界屈折角探傷法は、(独)土木研究所、菱電湘南エレクトロニクス(株)及び当社による共同研究で開発したものである。



図6. 実橋鋼床版での適用状況

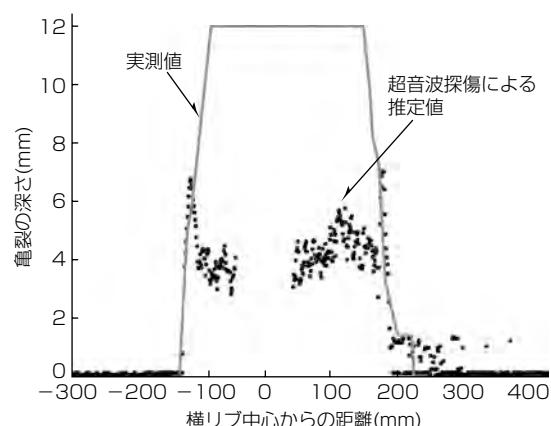


図7. 亀裂深さの実測値とエコーから推定した値の比較

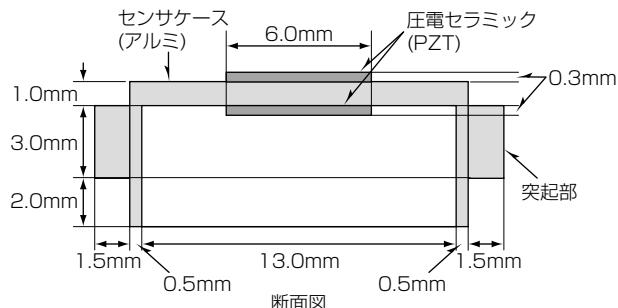


図8. バイモルフ構造を利用した空中超音波センサ

3. 空中超音波センサ

空中超音波センサは、比較的簡易な装置構成で物体の検知システム、人の位置や動きの計測システム等が実現でき、広く応用されている。物体の検知装置としては、車両周辺の障害物検知に利用されている。現在利用されている装置では、車両近傍の障害物検知を目的としているため、検知距離は1~2m程度であるが、装置の高性能化に伴い、検知距離の拡大が望まれている。一般に、空中超音波センサは低感度であるため検知距離が2m程度となってしまう。検知距離を拡大するためには、送受信感度を改善すればよく、その方法の一つとして、音響整合層を利用する方法がある⁽⁴⁾。これは、センサと空気との間に適切な音響特性を持つ層を挿入することによって、音響的な不整合を低減し、感度を向上させるものであるが、耐環境性に課題がある。一方、感度を向上させる別の方法として、センサの構造を工夫することによって、センサ放射面の振動変位を増大させる方法が考えられる。従来の空中超音波センサは、センサケース底面の片側に圧電セラミックを接着したユニモルフ構造を利用したものが多い。そこで、センサケース底面の両側に圧電セラミックを接着したバイモルフ構造を利用することによって、センサ放射面の振動変位増大を検討した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

バイモルフ構造を利用した空中超音波センサの構成を図8に示す。有底筒状ケースの底面の両側に圧電セラミックを接着し、バイモルフ構造を形成している。圧電セラミックは直径6mm、厚さ0.3mmの円盤状のPZT(チタン酸ジルコン酸鉛)で、ケースは内径13mm、外径14mm、深さ5mmのアルミ製の円筒、底面の厚さは1mmである。また、超音波の不要放射の原因となるケース側面での振動を抑圧するために、側面に突起部を設けている。

図8に示したセンサの放射面での振動変位分布をレーザドップラ振動変位計で測定した。比較のためケースの底面の片側だけに圧電セラミックを接着した従来構造センサについても、同様に振動変位分布を測定した。図9に測定結果を示す。図中、横軸は放射面の中心を原点とした放射面上の位置を示し、縦軸は放射面に垂直な方向の振動変位を示している。また、有限要素法によって求めた計算結果を

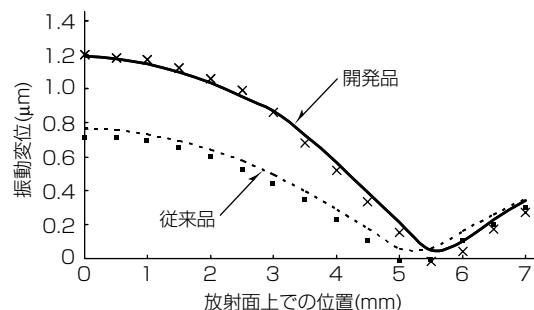


図9. 放射面での振動変位分布

点線で示している。図に示すように、放射面上の振動変位は、従来構造より増大していることが分かる。

これらの結果から、バイモルフ構造を利用することによって、放射面の振動変位を増大させることができ、センサ感度の向上が期待できる。

4. む す び

鋼床版デッキプレートの亀裂探傷技術として、臨界屈折角探傷法について述べた。この技術が、老朽化した道路橋の健全性診断に活用されることを期待する。また、検知距離拡大を目的とし、感度向上を図った空中超音波センサの開発についても述べた。

実橋鋼床版の探傷にあたり、阪神高速道路株から現場提供と実測データを提供をしていただいた。ここに深謝の意を表する。

参考文献

- (1) 村越 潤, ほか: 鋼床版の疲労損傷と補修・補強技術に関する検討, (社)土木学会, 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, 第10回, -鋼床版の疲労損傷とその対策-, 19~37 (2007)
- (2) 木村友則, ほか: 試験体表面に沿って伝搬するSV波による端面エコーに関する検討, (社)日本非破壊検査協会超音波分科会, 第14回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 39~44 (2007)
- (3) 村越 潤, ほか: 臨界屈折角近傍に調整した超音波斜角探触子による鋼床版デッキ進展き裂の探傷法の検討, 土木学会論文集A1, **68**, No.2, 453~464 (2012)
- (4) 井幡光詞, ほか: 発泡材を用いた音響整合層による空中超音波センサの検知距離拡大の検討, 電子情報通信学会技術研究報告US, **111**, No.158, 75~78 (2011)
- (5) 井幡光詞, ほか: バイモルフ構造を利用した空中超音波センサ, 第41回EMシンポジウム講演論文集, 73~76 (2012)
- (6) Ibata, K., et al.: An Air-Coupled Ultrasonic Sensor Applying a Bimorph Structure, IEEE IUS2012, P5F-3 (2012)

省エネルギーと快適性を両立させる ルームエアコン霧ヶ峰“人感ムーブアイ”

渡邊信太郎*
松本 崇**

Air Conditioner "Kirigamine Move Eye" —Saving More Energy with Keeping Comfortable

Shintaro Watanabe, Takashi Matsumoto

要 旨

家庭内で使用される電力消費のうち大きな割合を占めるエアコンの消費電力削減は、電力の安定確保のための重要な課題である。

三菱電機は、10年以上前から、室内に居る人の“体感温度”をコントロールすることによって、ムダのない快適な空調を実現できるという信念に基づいて、ルームエアコン“霧ヶ峰”的センシング技術の開発を行ってきた。

霧ヶ峰では、室内に居る人の“体感温度”を計測するため、業界初^(注1)として、サーモパイルセンサという物体の放射する熱を遠隔で計測する赤外線センサを温度センサとして2000年に採用し、その後、2005年には左右首振り機構にセンサを載せた“ムーブアイ”，そして2007年に多素子サーモ

パイルセンサを用いた“人感ムーブアイ”へと進化させた。

この人感ムーブアイによって取得した温度分布データを解析することによって、床・壁の位置と表面温度、ドア・窓の位置や開閉状況、窓からの日射、天井付近の熱溜(だ)まり、室内にいる人の位置、活動量等を検知できる。霧ヶ峰では、これらの情報に基づき空調制御を行うことによって、自動的に使用環境に合わせて省エネルギー性と快適性を両立させる空調を実現する。

本稿では、人感ムーブアイを搭載して以降の、2007年から現在にいたる各年のモデルを取り上げ、その機能とともに当社ルームエアコンの進化について述べる。

(注1) 1999年12月現在、当社調べ



http://www.mitsubishielectric.co.jp/home/kirigamine/13/function_zw/sensor/index.html

人感ムーブアイによる室内センシングイメージ

エアコン中央部に搭載したムーブアイは縦に8個並べたサーモパイルセンサで、物体の放射する熱を遠隔で計測できる赤外線センサである。このセンサを左右方向に回転駆動しながら部屋全体の温度分布データを取得する。取得した温度分布データを解析することで、室内に居る人の“体感温度”を計測することが可能になる。

1. まえがき

現在、国内家庭用ルームエアコンの年間需要は800万台前後であり、家庭内で使用される電力消費量のうちエアコンの占める割合は、夏季で約半分、冬季で約30%と家庭内の電力消費量が最も多い電化製品となっている。地球温暖化の防止だけでなく、日本では電力安定確保のためにも、エアコンの消費電力削減は重要課題である。

従来のエアコンは、エアコン本体に内蔵された温度センサが、部屋の天井付近の温度を検知し、その温度に基づき自動運転を行っていた。しかし、人が居るのは床付近であり、温かい空気は天井付近に、冷たい空気は床付近に溜まりやすいため、冷房時は冷やし過ぎ、暖房時は温まりにくいという問題が起こっていた。

当社は、10年以上前から、室内に居る人の“体感温度”をコントロールすることによって、ムダのない快適な空調を実現できるという信念に基づいて、ルームエアコン霧ヶ峰のセンシング技術の開発を行ってきた。

霧ヶ峰では、室内に居る人の“体感温度”を計測するため、業界初として、サーモパイルセンサという物体の放射する熱を遠隔で計測する赤外線センサを温度センサとして2000年に採用した。その後、2005年には左右首振り機構にセンサを載せた“ムーブアイ”，そして2007年に多素子サーモパイルセンサを用いた“人感ムーブアイ”へと進化させた。

“人感ムーブアイ”は、8個のサーモパイルセンサを縦に並べたライン状のセンサを、左右方向に片道38秒で首振りし、室内の温度分布データを取得するセンサである。この温度分布データを解析することによって、床・壁の位置と表面温度、ドア・窓の位置や開閉状況、窓からの日射、天井付近の熱溜まり、室内にいる人の位置、活動量等を検知できる。

霧ヶ峰では、これらの情報を用いて人が実際に感じる体感温度を計測し、それに基づいて制御を行うことによって、自動的に使用環境に合わせて省エネルギー性と快適性を両立させる空調を実現する。

本稿では、人感ムーブアイ搭載以降の製品に焦点を当てて、その進化について述べる。

2. 人感ムーブアイ(2007年モデル)

“人の居る場所の温度”の調節が重要であり、それ以外の運転はムダという考えに基づき、ルームエアコンに人の位置を検知する多素子サーモパイルセンサを、世界初^(注2)搭載したモデルである。

(注2) 2006年11月6日現在、当社調べ

2.1 人の位置の検知

人感ムーブアイによって、38秒に一度、室内の温度分布データを取得し、その時系列データから、背景に比べて温度上昇している部分を、図1に示すように、その上昇幅のしきい値処理で人の領域として検知する。この方式で、室温28℃以下のとき人感ムーブアイから距離6mまでの人を検知できる。

人の位置がわかれば、人の位置以外の空調はムダであり、図2に示すように、人を狙った空調制御を行うことで、快適かつ省エネルギーな空調を実現できる。

3. 新・人感ムーブアイ(2008年モデル)

人の位置の精度を改善し、その位置履歴に基づいて人の活動量と生活エリアを推定し、よりきめ細かい空調制御を実現した。また、検知した生活エリアだけを効率良く空調することによってムダをなくし、省エネルギー性能を改善したモデルである。図3に示すように、このモデルでは、前年モデルに比べ人の位置の検知性能を改善し、活動量検知機能、生活エリア検知機能を新たに搭載した。次に、これらの機能の詳細を述べる。

3.1 人の奥行き方向の位置検知の改善

エアコンの高さから俯瞰(ふかん)したとき、エアコンから人体までの距離は人体と床面との接点である足部の位置によって推定できる。しかし、人体からの放射温度は着衣

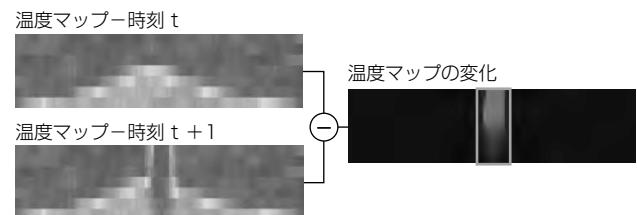


図1. 温度分布データから的人体検知

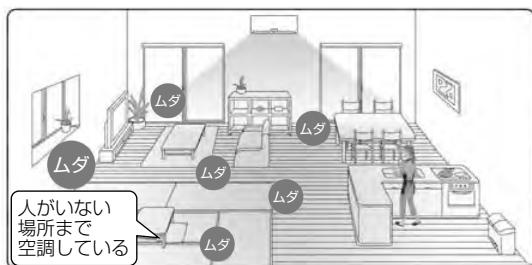


図2. 人の位置に基づく空調制御



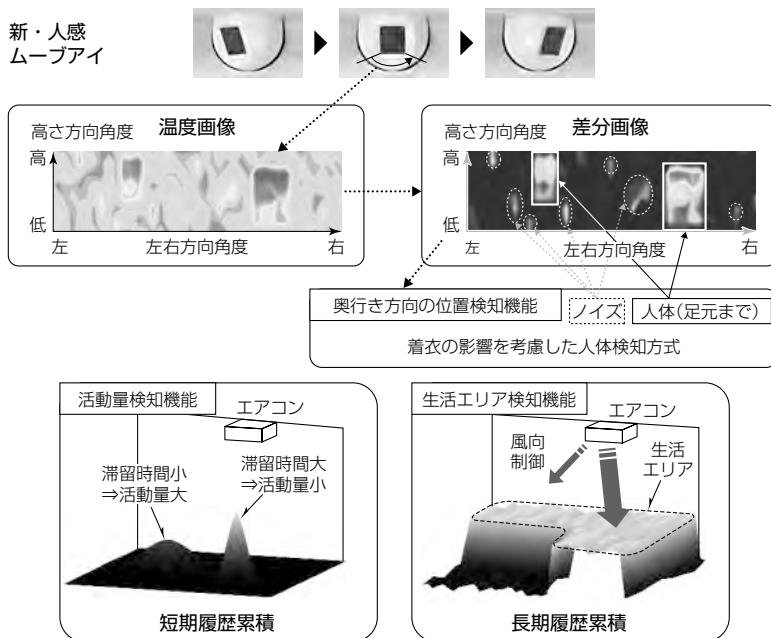


図3. 2008年モデルの機能

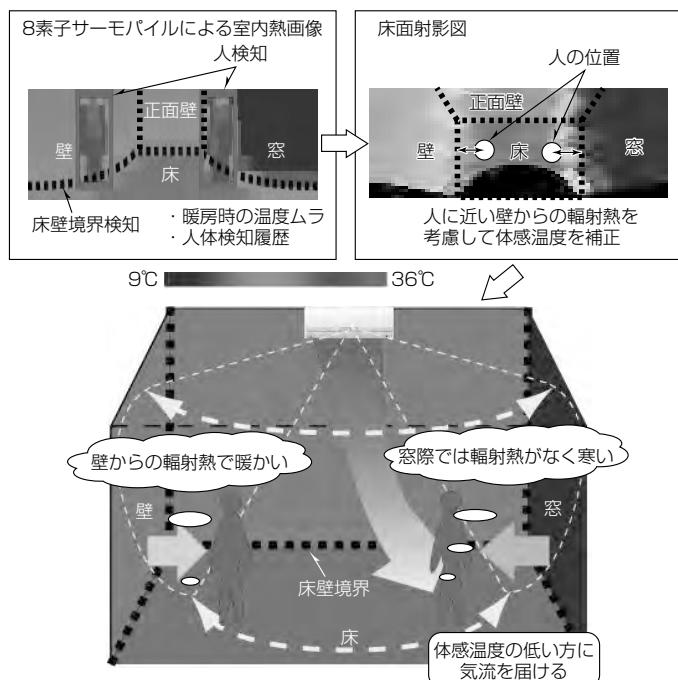


図4. 2009年モデルの機能

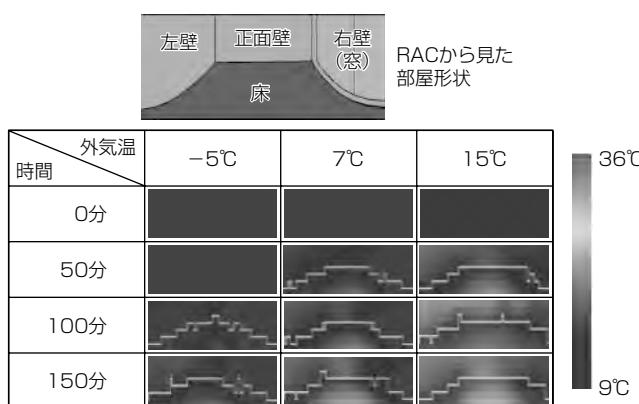


図5. 暖房時の温度むらを用いた床壁境界検知

などの影響で、頭は高温に、足は低温に観測される傾向があり、単純なしきい値処理では足を見落とす可能性が高い。そこで、高温な人体頭部との隣接関係によって人体足部とセンサノイズを区別するという考えに基づいて、足を見逃さずセンサノイズに強い人体検知方式を開発した。これによって、エアコンから人体までの距離を正確に求めることができなり、人体位置の履歴を解析することができる。

3.2 人の活動量の検知

短期間の人体検知位置の履歴を用いることによって、人の滞留時間の大小から活動量を推定する機能を開発した。これによって、家事などで活動が多いときは低温に、じっとしているときは高温に室温を調整し省エネルギー性能を向上できる。

3.3 生活エリアの検知

生活エリアとは人が行動する範囲のことで、検知した生活エリアだけを効率良く空調することによってムダをなくし、省エネルギー性能を向上できる。生活エリアは、人体検知位置の履歴を長期間累積することによって検知する。

4. ムーブアイFit(2009年モデル)

部屋の形状を検知し、床、壁、窓等からの輻射(ふくしゃ)熱も考慮し、一人ひとりの体感温度を精緻に検知することで、更なる省エネルギー性能改善を実現したモデルである。

前年モデルの生活エリアは、人の動きまわるエリアであって、部屋の壁や窓の位置を正しく求めることはできない。それに対しこのモデルでは、暖房時の温度むらを用いた床壁境界検知機能を新たに搭載し、これによって、求めた床壁境界に基づき図4のように壁や窓からの輻射熱を考慮して、一人ひとりの体感温度計測の高精度化を実現した。

4.1 暖房時の温度むらを用いた床壁境界検知

暖房運転時、風向を下向きにして床を集中的に暖める制御を行うため、通常先に床が暖まりその後壁が暖まるという時間差が生じる。そこで暖房運転開始から一定時間内の部屋の温度分布から床と壁の温度の境目を検知することによって床壁境界を検知する機能を開発した(図5)。床壁境界は、温度分布から部屋の奥行き方向の温度変化を測定して最も変化が大きい位置(2次微分値が最大の位置)を検知する。

5. ムーブアイNavi(2010年モデル)

部屋の状況を分析し、カーテンやドアを閉める、外気温の変化に応じた運転切り換え、除湿と冷房の切り換え等、省エネルギーにつながる行動をリモコンがアドバイスする

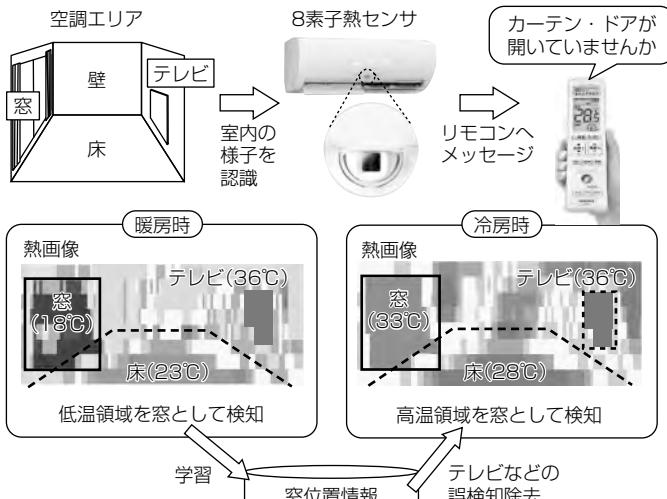
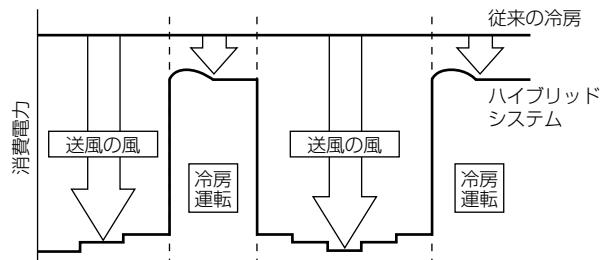
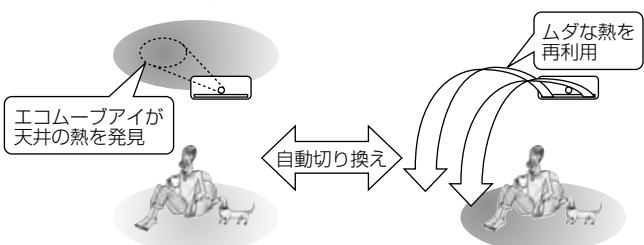


図6. 2010年モデルの機能



(a) 夏のハイブリッド運転



(b) 冬のハイブリッド運転

図8. 2012年モデルの機能

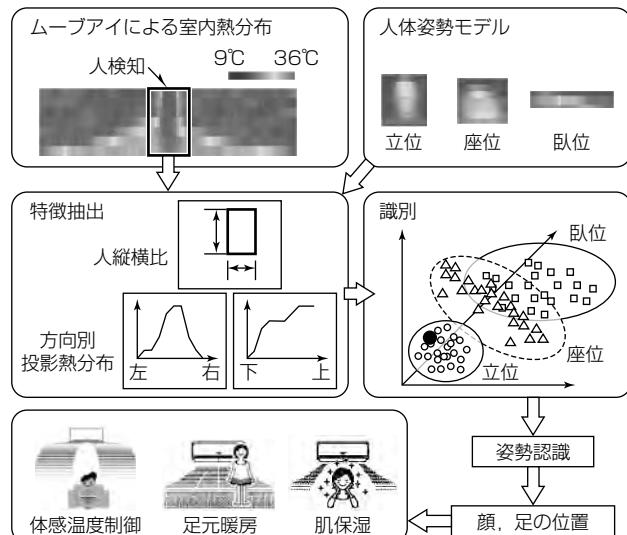


図7. 2011年モデルの機能

“おしらせナビ”を搭載したモデルである。

暖房時であれば壁領域内の冷たい領域、冷房時であれば壁領域内の温かい領域が、空調のムダとなるカーテンから露出した窓や開けっ放しのドアの領域と推定できる。このことを利用して次に示す方法で開けっ放しのカーテン・ドアを検知し、見つけた場合はリモコンを通してユーザーに省エネルギーにつながる行動をナビゲートする。

5.1 カーテン・ドア検知

床壁境界に基づき、壁領域内で床との温度差が大きい部分を窓領域と検知する。しかし、冷房時のテレビ・冷蔵庫などの熱源は床に比べて高い温度となり誤検知のおそれがある。そこで、図6に示すように、暖房時の窓領域検知結果を学習しておき、冷房時には学習した位置だけに注目して窓検知することによって誤検知を抑制した。

6. 3Dムーブアイ(2011年モデル)

部屋の天井までの温度分布を考慮した空調制御、人の姿勢を考慮した体感温度計測による空調制御を実現したモデルである。

人の体感温度とかかわりの深い運動強度を概算するための人体の姿勢検知機能と、風向制御の位置基準となる顔と足の位置検知機能を新たに搭載した。

6.1 姿勢検知

図7に姿勢検知機能を示す。人領域の熱分布パターンから得られる特徴量を用いて、識別空間でクラス分類することによって、立位、座位、臥位(がい)の姿勢を認識する。そして、その熱分布の偏りから顔、足の位置を検知する。

7. エコムーブアイ(2012年モデル)

無理なく節電するための“ハイブリッドシステム”を搭載したモデルである。

夏は人の体感温度を見張り、快適性を損なわないように、送風運転と冷房運転を自動で切り換えることで、図8(a)のように消費電力を節約する。冬は、天井付近の温度を見張り、熱が溜まっていることを検知したら、セキュレーターモードに自動的に切り換わり、天井の熱を利用して足元まで温める(図8(b))。

8. むすび

ルームエアコンの2007年モデルから搭載している“人感ムーブアイ”的変遷について述べた。今後も、さらに快適かつ省エネルギーな空調を目指して、ムーブアイ機能の高度化を進めていく。

エスカレーター乗降口滞留検知システム

Congestion Detection System on Escalator Exits

Junji Kondo, Kenji Inomata, Yutaka Itoh, Koji Yoshida

近藤純司* 吉田浩二†
猪又憲治**
伊藤 寛***

要 旨

エスカレーター・エレベーターなどの昇降機の利用に際し、利用者の保護を目的とした安全への要求・意識が高まっている。

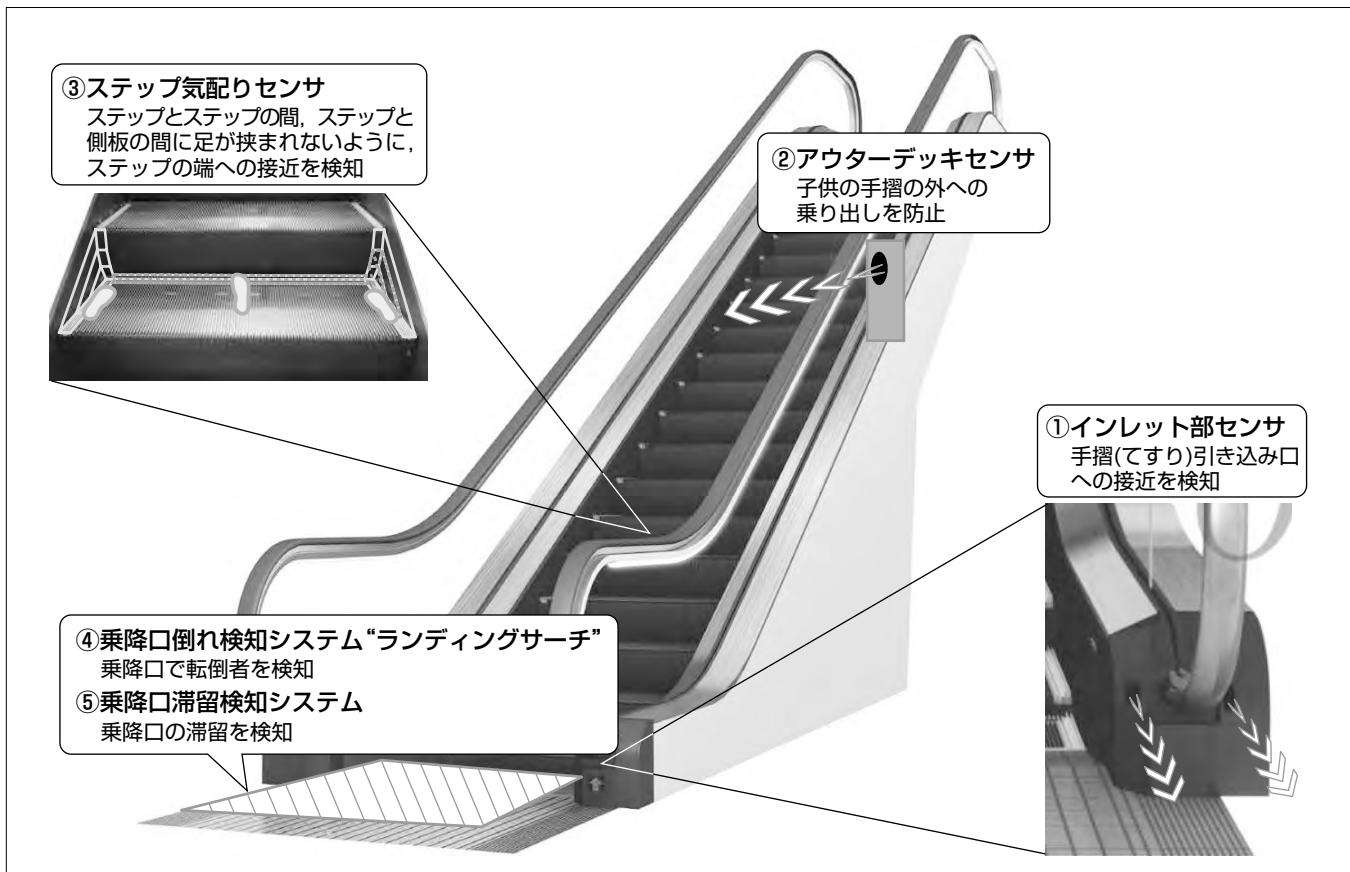
三菱電機(株)及び三菱電機ビルテクノサービス(株)では、このような状況から、従来エスカレーターに次のような安全センサを備えている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

- ①インレット部センサ
- ②アウターデッキセンサ
- ③ステップ気配りセンサ
- ④乗降口倒れ検知システム“ランディングサーチ”

エスカレーターでは特に、乗降口での事故が最も多く発生している。このため、乗降口倒れ検知システムに加えて

今回開発したのが、乗降口滞留検知システムである。

この滞留検知システムの開発では、倒れ検知システムと同じハードウェアを用いることで、コスト低減を図った。倒れ検知システムでは転倒者を検出するため、乗降口の地上高10cmでの検出を行う。一方、滞留検知システムでは人の流れを計測する必要があるが、地上高10cmでは、通常、歩行者の足首が検出される。このため、足の停止時間から人の移動速度を、足の数から人数と混み具合を割り出し、これら2つの値から滞留状態を判断するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムについて実環境下にセンサを設置しての実証実験によって有効性を確認し、滞留検知システムを2013年3月から市場へ投入した。



エスカレーターに備えられる安全センサ

三菱電機(株)及び三菱電機ビルテクノサービス(株)では、エスカレーター上の安全を確保するために、従来、①インレット部センサ②アウターデッキセンサ③ステップ気配りセンサ④乗降口倒れ検知システム“ランディングサーチ”を製品ラインアップに用意している。今回さらに⑤乗降口滞留検知システムを開発した。

1. まえがき

エスカレーターやエレベーターなどの昇降機の利用に際し、利用者の保護を目的とした安全への要求・意識が高まっている。行政機関の調査報告⁽⁵⁾によると、2010年度上期の大坂府建築物に付属するエレベーターでの事故件数9件に対し、エスカレーターは85件と9倍以上の頻度で事故が発生し、その内、中央部での事故31%に対し、55%が乗降口で発生している。このような状況から、三菱電機株と三菱電機ビルテクノサービス(株)は乗降口における利用者の転倒を検知する“ランディングサーチ⁽³⁾”を製品化している。

これに加え、さらに、転倒など様々な事故の要因となる滞留状態を検知し、利用者や管理者に注意を促すことで事故を未然に防ぐことを目的として、滞留検知システムを開発した。

本稿ではこの滞留検知システムについて述べる。

2. エスカレーター乗降口における安全システム

2.1 倒れ検知システム

エスカレーターで最も事故発生頻度が高い乗降口付近における安全システムとして、先に開発した倒れ検知システム“ランディングサーチ⁽³⁾”について述べる。図1が倒れ検知システムの概観図である。エスカレーター乗降口近辺を監視エリアとし、ここで倒れて動けない人物(転倒者)を検出すると警報を発報するシステムである。図ではポストタイプのセンサユニットの下部に、レーザによって対象までの距離を監視エリア内二次元上で計測するセンサを内蔵し、同センサで転倒者を検出する。表1に示す仕様の同センサは転倒者を検出するため、地上高10cmの平面を監視エリアとして設定している。

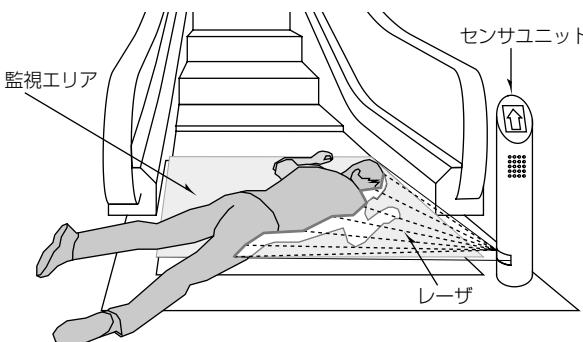


図1. 倒れ検知システム

表1. 倒れ検知システムのセンサ仕様

番号	項目	仕様
1	レーザ波長	785nm (FDA class 1)
2	最大計測距離	4 m
3	計測角度	±70°
4	検出サイズ	35cm~
5	電源	5 V 500mA以下

FDA : Food and Drug Administration

倒れ検知システムには、図2(a)(b)のように、ポスト型や据置き型、また、(c)の矢印部分のように、エスカレーターステップの引込み口(くし)付近を照らす照明の代わりに埋め込むタイプがある。

2.2 滞留検知システム

転倒事故の検出を目的とした倒れ検知システムに対して、さらに、事故を起こしやすい状況を検知することで、この状況を避け、未然に事故を防ぐことを目的とした滞留検知システムを開発した。

また、倒れ検知システムとハードウェアを共通化することで、顧客が両方の安全システムを同時に採用しやすい製品とすることを目標に開発を行った。3章で、滞留検知アルゴリズムについて述べる。

3. 滞留検知アルゴリズム

3.1 滞留とは

滞留検知システムでは、事故を引き起こす可能性のある危険な滞留状態を検知する。危険な滞留の状態について、次の2つを指標とした。

- (1) 占有率：50%以上(人の平均面積0.16m²)
- (2) 歩行速度：4 m/min以下(=0.66m/s以下)

滞留といっても、乗降口に他者がいない状況で、1人立ち止まっている場合は、ただちに危険な状態とはいえない。このため、監視エリアに何人の人が存在しているかを表す占有率という概念を導入した。これは人の平均面積を0.16m²とし、人数と監視エリアの面積の比によって求める。さらに、多数の人間がいる状態で、人の流れが停滞することが危険な滞留状態であるため、人の歩行速度を計測する。これら占有率と歩行速度を(1)(2)の指標に照会することで、滞留状態の判断を行う。



(a) ポスト型



(b) 据え置き型



(c) 埋め込みタイプ

図2. センサ設置タイプ

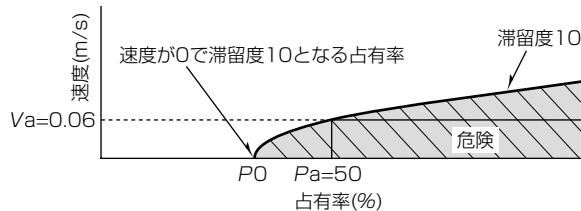


図 5. 滞留度の算出

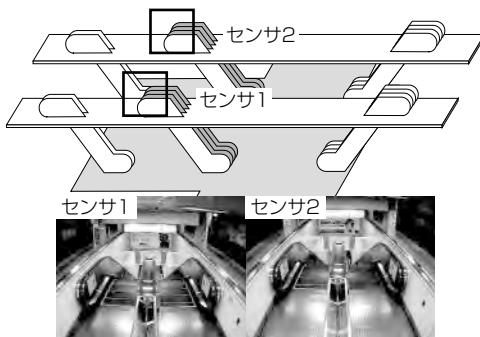


図 6. 実証実験環境

用者が多い)状態でも人が流れていれば、人が停滞している状態に比べ危険性が低い。一方占有率が低い(利用者が少ない)状態でも、停滞が発生すると危険な状態に陥りやすい(後続者の追突など)。よって、滞留度を求める際には速度を重視した式としている。

切片 P_0 は設置環境ごとの調整用パラメータとする。こうして求められる滞留度について $C=10$ となる曲線を、速度・占有率平面に示したものが図 5 となる。このシステムでは滞留度 10 以上の領域(図中斜線部)を滞留状態として検知する。

4. 実証実験による評価

滞留検知アルゴリズムの有効性を評価するため、某鉄道会社と共同で、駅ホームに通じるエスカレーターを用いた実証実験を行った。この時の環境を図 6 に示した。システムを上りエスカレーターの降り口に設置した。レーザセンサは図 2(c)の設置タイプとし、図 7 に示すように、くしから外側を監視エリアとして設定した。この環境下で延べ約 2か月/台分について滞留検知実験を行った。同時に監視エリア付近の映像を撮影し、映像を手動で解析することで速度と占有率を求めた。図 8 は、映像の解析結果と、センサによって得られた値との比較を示しており、左上が比較時の映像、左下がセンサの検知状態、右上が速度と占有率個々の値、右下がセンサと映像解析によって得られた滞留度の比較を表している。高い精度で一致、滞留状態の検知について誤報がなかったことを確認した。このことから、実環境でもこのアルゴリズムが有効であると確認できた。

5. むすび

既に製品化されている倒れ検知システムのハードウェアを応用した滞留検知システムを開発した。同システムにつ

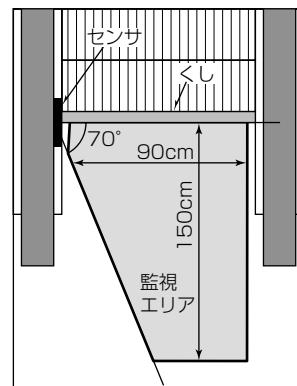


図 7. 滞留監視エリア

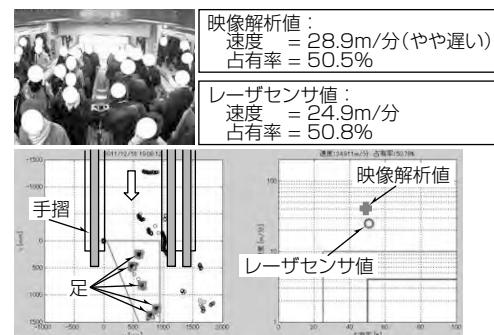


図 8. 滞留度計測結果

いては、実証実験を行うことで有効性を確かめた。起きた事故を検知するだけでなく、事故が起りそうな状況を検知することで、未然に事故を防ぐ技術を同一のハードウェアで実現し、総合的にエスカレーターの安全性を高めることができた。

三菱電機(株)は、今後も事故を多角的に分析・研究し、エスカレーターの安全性確保に向けた開発を続ける。

参考文献

- (1) 特集 昇降機・ビルシステム, 三菱電機技報, 85, No.2 (2011)
- (2) 三菱電機企業情報、エスカレーター安全センシング 乗降口倒れ検知システム
http://www.mitsubishi-electric.co.jp/corporate/randd/list/heavy_electric/b162/index.html
- (3) 三菱電機ビルテクノサービス、エスカレーター乗降口倒れ検知システム ランディングサーチ
<http://www.meltec.co.jp/products/es/renewal/landing.html>
- (4) 三菱電機製品情報 エスカレーター製品一覧
<http://www.mitsubishi-electric.co.jp/elevator/escalator/product/index.html>
- (5) 大阪府 建築指導室 建築安全課、平成22年度上半期 特定設備事故届出状況報告書
<http://www.pref.osaka.jp/attach/1825/00002800/H22kamihankitodokedehoukoku.pdf>

多チャネル合成開口レーダ

Multichannel Synthetic Aperture Radar

Toshio Wakayama, Kei Suwa, Masayoshi Tsuchida

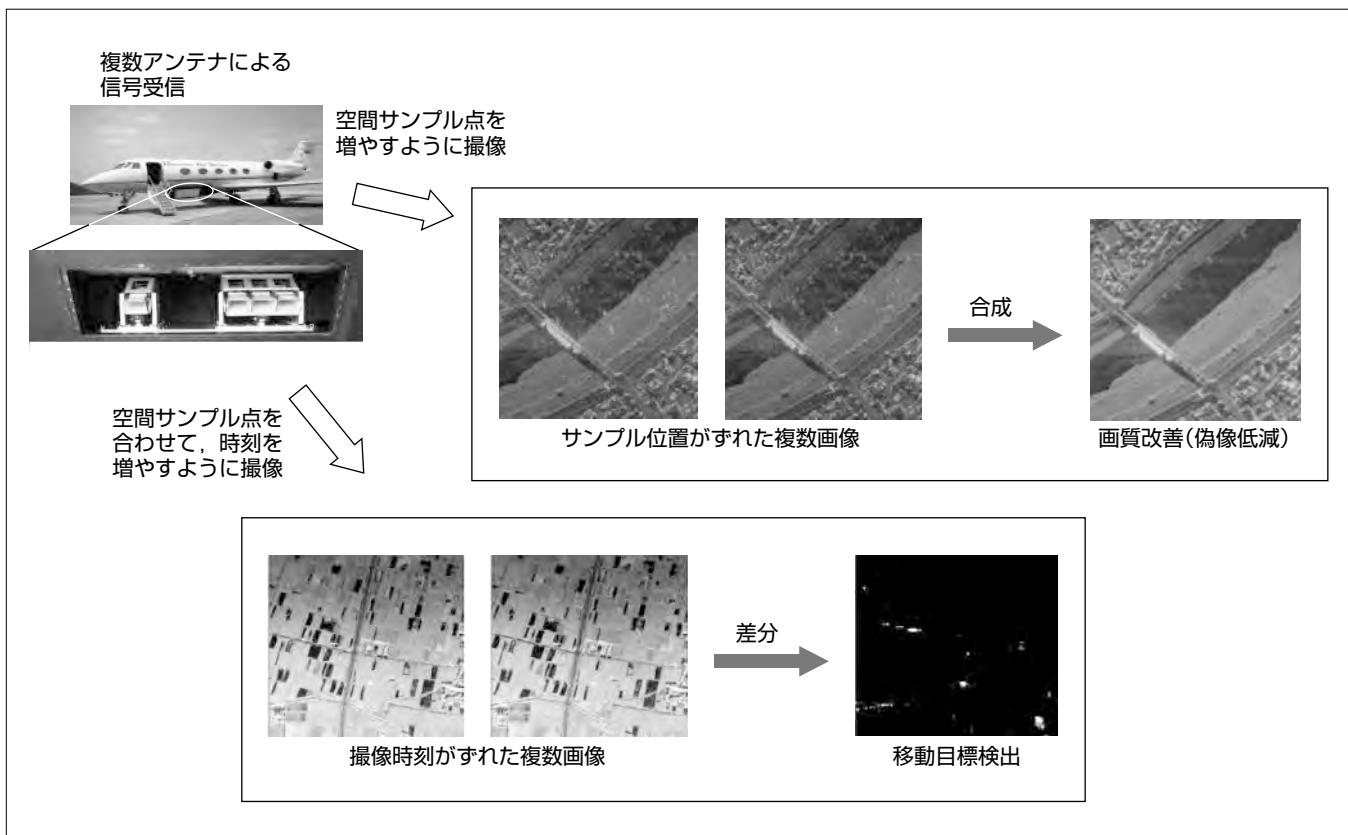
要 旨

合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR) は人工衛星や航空機から地表面を電波で撮像する装置である。光学カメラと異なり、雲や雨があっても地表面を観測すること、レーダ自体が電波を放射して地表面を照らすため、夜間でも撮像可能であることなどの利点があり、災害監視を始めとする様々な目的での利用が期待されている。

SARは単一の送信アンテナ、単一の受信アンテナを用いても画像を撮像することができるが、近年では複数のアンテナを用いた高性能、高機能なSARの開発も進められている。

本稿では、軌道に沿う方向に複数の受信アンテナを配置し、各アンテナに受信機を接続した多チャネルSARを用

いた観測手法について述べる。2つのアンテナによって、軌道上の観測位置の密度(空間サンプリング周波数)を上げるように観測すると、ゴースト状の偽像を低減する効果が得られる。マルチビームSARと呼ばれるこの手法は、広域化と高解像化を両立させる際の偽像低減手法として有効である。一方、複数のアンテナによって、同じ観測位置をわずかに異なる時刻で観測するような撮像を行い、得られた複数の画像の差分を取ることによって、移動目標検出を行うことが可能となる。航空機搭載SARを用いた実験によって、マルチビームSAR及び移動目標検出の機能を検証した結果を示す。



複数の受信アンテナを用いた多チャネル合成開口レーダ

複数のアンテナを軌道に並行な方向に配置し、それぞれのアンテナで受信した信号からレーダ画像が得られる。アンテナ間で受信位置がずれるように観測すれば、空間サンプリング周波数の向上によって画質改善が可能となる。アンテナ間で受信位置が一致するように観測すれば、異なる時刻のレーダ画像が得られるため、画像間の差分によって移動目標を抽出することが可能となる。

1. まえがき

合成開口レーダ(SAR)は、上空から地表面の状況を撮像するレーダである。人工衛星又は航空機などの移動体に搭載したレーダによって、移動しながら空間的に広い範囲で受信データを収集する。そのデータを合成することによって仮想的に大開口アンテナを構成し(合成開口)，高分解能な地表面画像を得る。近年では衛星搭載で解像度1m, 航空機搭載で解像度10cm級の地表面画像を得ることが可能となっている⁽¹⁾⁽²⁾。

光学カメラと比較すると、電波は雲を透過する性質を持つため、雲や雨があっても地表面を観測することができる。レーダ自体が電波を放射して地表面を照らすため、夜間でも撮像可能なことが合成開口レーダの利点である。昼夜・天候を問わず観測できる特性を活用して、災害監視などへの利用が期待されている。

合成開口レーダを高性能化、高機能化する方法として、複数のアンテナを用いた多チャネル合成開口レーダが近年注目されている。

本稿では、広域かつ高解像度な撮像、又は移動目標の検出を目的とした多チャネルSAR技術について述べる。

2. 多チャネルSAR

2.1 単チャネルSARの原理

多チャネルSARを述べる前に、従来の単チャネルSARについて述べる。SARでは移動体の側方から電波を放射し、観測領域となる地表面を斜め上方から電波照射する。照射した電波の一部は地表面で反射してSARへ戻るため、その反射波を受信することによって、地表面画像を得る。観測領域内の画像を高解像に得る方法として、アンテナビームを十分細くすることも考えられる。しかし、アンテナビームを細くするには、巨大なアンテナが必要となり、移動体への搭載が困難である。そこでSARでは信号処理によって画像化に必要な分解能を得る。

距離(レンジ)の軸とそれに直交する方位角(アジマス)の軸で照射領域内の画素を分離し、地表面画像を得る。アンテナビーム幅で決まる分解能では近接する2点を分離できないが、移動しながら空間的に広い範囲で信号を収集し、計算機上で信号を合成する。あたかも大きなレンズで電波を集束させたようになり、アジマスが高解像化される。

レンジ軸については、電波を送信してから受信するまでの送受の時間差によって画素を分離する。パルス状に送信される電波の幅が狭いほど、近接する2目標を分離しやすい。実際には送信電力を高めるため、周波数変調を施した長いパルスを送信し、受信後に計算機上でパルス幅を細くするパルス圧縮の手法が利用される。

2.2 多チャネルSARの種類

複数チャネルを用いてSAR観測を行う手法は、図1に示すように、アンテナ配置によって次の2つに分類することができる。

- (1) 高さ方向にアンテナを配置
- (2) 横方向、すなわちプラットフォーム軌道と同じ方向にアンテナを配置

(1)については、地表高を計測する技術として、従来知られている⁽³⁾。異なる高さにアンテナを配置することによって、アンテナ間で地表高に応じた信号位相差が生じるため、その情報をを利用して地形計測が可能となる。

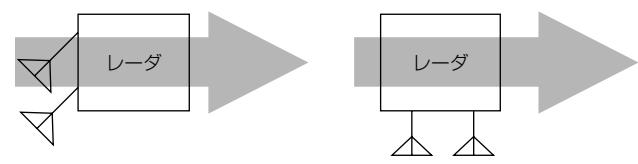
(2)については、次の2つに更に分類される。

- ①軌道上の異なる位置で受信信号を得る。
- ②軌道上の同じ位置で異なる時刻の受信信号を得る。

①は空間サンプリング周波数を上げることによって、高域かつ高解像な撮像が可能となるマルチビームSAR方式⁽⁴⁾に利用され、②は移動目標を検出するMTI(Moving Target Indication)に利用される。

2.3 マルチビームSAR：広域・高解像の両立

図2は2つのアンテナを用いてマルチビームSAR観測を行う場合の、各アンテナの時刻と位置の関係を模式的に示したものである。SARはパルスドップラーレーダの一種であることから、パルス状の電波の送信と、反射波の受信を時間的に交互に繰り返す。そのため、受信信号は離散的に行われる。図2は、アンテナ1によるデータ取得を○で示す時刻・位置で行い、アンテナ2では□の時刻・位置で行うことを表している。○又は□を結ぶ直線の傾きは、プラットフォームの速度となる。ある時刻にパルス状の電波が送信され、地表面で反射した電波が、時刻1でアンテナ1とアンテナ2で同時に受信される。このとき、衛星上のアンテナ設置間隔に対応する位置の差(位置B-位置A)で信号が受信される。1回の送信で、位置Aと位置Bの異なる位置で受信信号が得られることになる。2つのアンテナの間隔を適切に定めると、図2の右端に示すように、軌道上で○と□の受信位置が等間隔に並ぶ。その間隔は、1つのアンテナを用いて2倍のパルス繰り返し周波数で観測したのと同等となる。逆に言えば、2つの受信アンテナを用いれば、同じ空間サンプリング周期を低いパルス繰り返し



- ・俯角方向の測角
→地表の高さ計測

- ①空間サンプリング位置の増加
→広域観測と高解像度観測の両立
- ②同じ位置から時間差をつけて
観測→移動目標検出

(a) 高さ方向にアンテナ配置

(b) 横方向にアンテナ配置

図1. アンテナ配置による多チャネルSARの分類

周波数で観測したのと同等になる。画像解像度を上げるために、ドップラー周波数帯域を向上させるために、高い空間サンプリング周波数が必要となる。一方、パルス繰り返し周波数が高くなると、観測距離の幅を狭くする必要がある。このようなトレードオフの関係を緩和することが可能となるため、高解像度かつ広い観測幅での撮像が可能となる。

なおこの撮像方式は、近く打ち上げ予定の陸域観測技術衛星2号機(ALOS-2)搭載のSARでも実施される予定である⁽⁵⁾。

2.4 移動目標検出

図3はMTIにおける各アンテナの時刻と位置の関係を表す模式図である。アンテナ1とアンテナ2とで、時刻は異なるが同じ位置で受信する信号の組合せが得られる。例えば、図3では、時刻1にアンテナ1で観測する軌道上位置と、時刻2にアンテナ2で受信する軌道上位置が、ともに位置Bである。そのため、アンテナ1で受信した信号から合成した画像と、アンテナ2で受信した信号から合成した画像とでは、時刻のみが異なる画像となる。観測対象が静止している場合には、両画像は同一となる。一方、観測対象が動いている場合には、その時間差の間に対象が移動した分だけ、画素が変化する。そこで、両画像の差分画像

を算出すれば、静止する背景が消え、移動目標のみを抽出することが可能となる。

実際には、航空機の飛行速度が想定からずれることなどによって、アンテナ間で受信位置がずれることがある。その場合、一方のアンテナの受信信号に補間処理を適用することによって、信号処理で位置ずれの補正を行う。ただし、これはドップラー周波数が帯域制限されていることを前提とする処理となる。実際には、アンテナサイドローブによって観測対象範囲外の広角から反射信号がある場合、補間処理の精度が劣化する。これを解決する手法の1つとして、3つ目のアンテナを用いて、観測対象範囲外の広角から混入した信号成分を抑圧する偽像抑圧型の移動目標検出手法を新たに開発している⁽⁶⁾。この手法は、原理的には2.3節で述べたマルチビーム処理をMTI処理に組み込んだものとみなすことができる。

3. 航空機搭載実験による検証

3.1 実験の概要

先に述べたマルチビームSAR及びMTIの機能を航空機搭載SARによって検証する実験を行った。表1に実験の諸元を、図4に使用した航空機とアンテナの外観を、図5

表1. 航空機SAR実験の諸元

送信中心周波数	16.45GHz
送信帯域幅	250MHz
パルス繰り返し周波数	~4,000Hz
偏波	垂直送信、垂直受信
オフナディア角	60°
観測方式	ストリップマップ
航空機	Gulfstream II



図4. 実験に使用した航空機とアンテナ

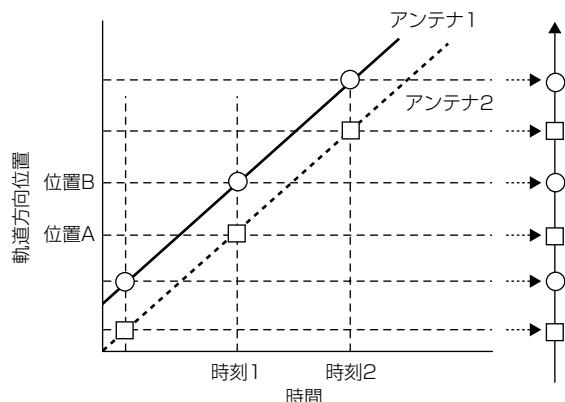


図2. 複数アンテナ間の観測位置の関係(マルチビームSARの場合)

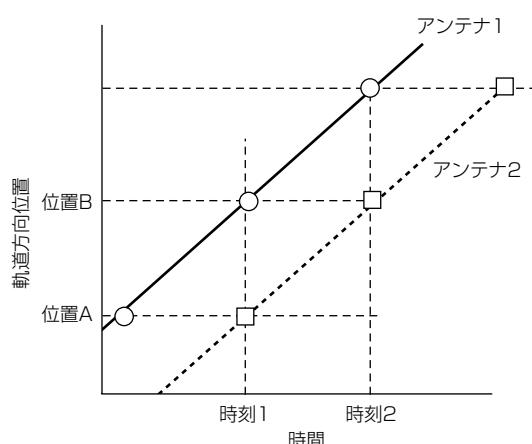


図3. 複数アンテナ間の観測位置の関係(移動目標検出の場合)

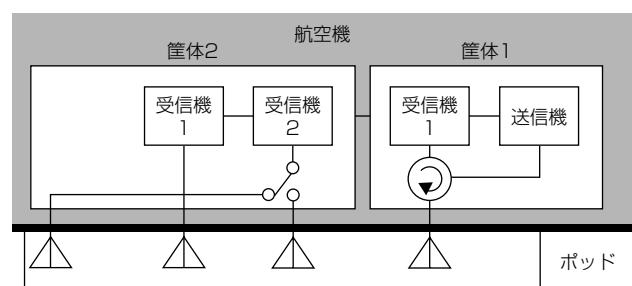


図5. 実験に用いたレーダ装置の概略構成

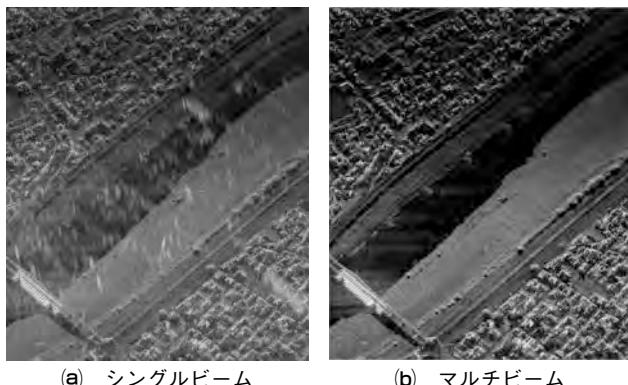
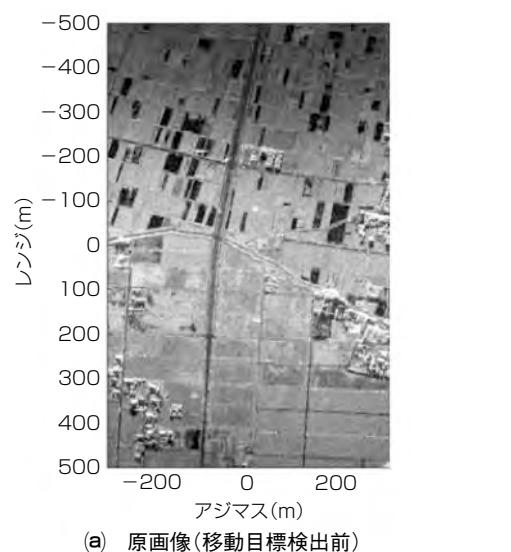
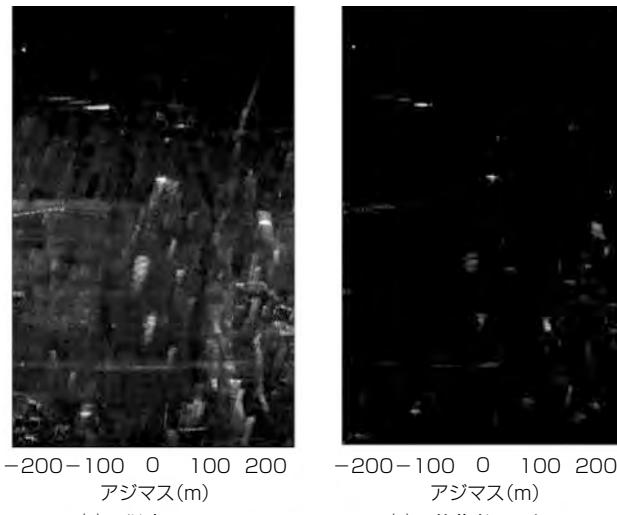


図6. マルチビームSAR観測例(偽像低減効果の確認)



(a) 原画像(移動目標検出前)



(b) 従来のMTI



(c) 偽像抑圧型MTI

図7. 移動目標検出観測例

に搭載したレーダ装置の概略構成をそれぞれ示す。搭載した4つのアンテナのうち、実際には2つ又は3つのアンテナを用いた撮像を行った。

3.2 実験結果例

3.2.1 マルチビームSAR

図6にマルチビーム観測の例を示す。同図(a)はパルス繰り返し周波数2 kHzの場合に、単一の受信アンテナで撮像した結果である。画像全体にゴースト状の偽像が生じている。特に反射率の低い河川上で偽像が目立っている。パルス繰り返し周波数2 kHzでは空間サンプリング周波数が不足しているためである。一方、同図(b)は同じ2 kHzのパルス繰り返し周波数で、2つの受信アンテナを用いた場合の撮像結果である。パルス繰り返し周波数4 kHzと同等の空間サンプリング周波数が得られるため、ゴースト状の偽像がなくなり、画質が改善されていることが分かる。

3.2.2 移動目標検出

図7に移動目標検出の実験結果例を示す。同図(a)は移動目標検出処理前のSAR画像である。静止している背景と移動する物体の両方が画像内に含まれている。同図(b)は偽像抑圧処理を付加しない従来の移動目標検出を行った結果である。面的に広がった画像が多く含まれているが、これらの多くはアンテナサイドローブで受信された反射波によって生じたゴースト状の偽像である。そこで、先に述べた偽像抑圧型移動目標検出を行った結果、同図(c)のように、偽像が低減され、車両などの移動物のみが抽出されるようになった。

4. むすび

複数の受信アンテナと受信機を用いた多チャネルSARについて述べ、航空機搭載SARを用いた実験による検証例を示した。今回検証した手法は、将来の衛星搭載SARでの活用も期待できる。

参考文献

- 若山俊夫, ほか: 高分解能合成開口レーダの信号処理技術, 三菱電機技報, **84**, No.11, 613~616 (2010)
- 若山俊夫: 合成開口レーダの技術動向, 電子情報通信学会誌, **95**, No.2, 142~144 (2012)
- 岡田 祐, ほか: 干渉型合成開口レーダによる三次元地図作成, 三菱電機技報, **81**, No.8, 521~524 (2007)
- 山岡智也, ほか: 航空機搭載マルチビーム合成開口レーダによるアジャマスアンビギュイティ低減, 電子情報通信学会2011年総合大会, B-2-40 (2011)
- Kankaku Y., et al.: The overview of the L-band SAR onboard ALOS-2, Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, 735~738 (2009)
- 諏訪 啓, ほか: アジャマスアンビギュイティを抑圧する複数開口SAR-MTI方式とその性能評価, 電子情報通信学会技術研究報告, **112**, No.41, SANE2012-12, 7~12 (2012)

風計測ドップラーライダ

Wind Sensing Doppler LIDAR

Shumpei Kameyama, Takeshi Sakimura, Toshiyuki Ando, Takayuki Yanagisawa, Yoshihito Hirano

龜山俊平* 柳澤隆行**
崎村武司** 平野嘉仁***
安藤俊行*

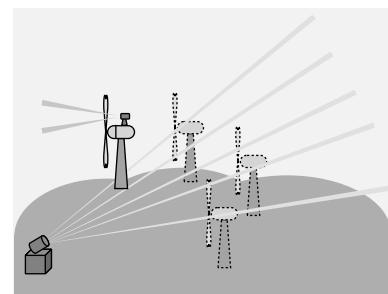
要 旨

風計測ドップラーライダ(Light Detection And Ranging: LIDAR)は、電波を用いるドップラーレーダと比較して空間分解能及び速度分解能が高く、かつ晴天時での計測が可能である。したがって、風力発電、気象計測、航空安全といった用途への応用が期待されており、これらへの応用に向け、技術開発に取り組んでいる。三菱電機の開発は、人の目に対し安全な波長1.5μm帯のレーザ光を用いており、小型光ファイバタイプと大型タイプ(長距離計測用)の両方がある。本稿では、各々のライダについて述べるとともに、最近の計測長距離化開発について併せて述べる。

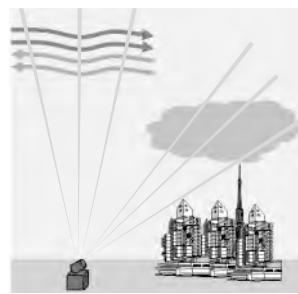
小型光ファイバタイプは、全ての光部品にファイバ部品を用いており、小型かつ高信頼であることが特長である。

最大2kmの計測距離を持っており、都市気象計測、空港気象計測、風力発電等、幅広い用途における適用実績がある。大型タイプの計測距離は最大約10kmであり、広域気象計測に用いられている。また、最近のEr, Yb:glass平面導波路型増幅器の開発によって、風計測ドップラーライダ全体の歴史としても世界最長^(注1)となる、計測距離30km以上を実現した。今後、このライダを航空機に搭載して晴天乱気流検出センサとしての評価試験が実施される予定である。また、地上設置用の大型タイプにこの導波路型増幅器を適用し、大型タイプについても長距離計測化する予定である。

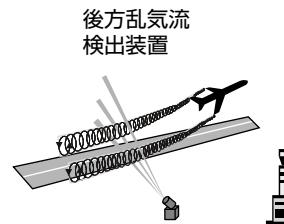
(注1) 2013年4月26日現在、当社調べ



風力発電



都市気象計測



後方乱気流
検出装置

全天候空港
気象レーダ

空港
航空安全

風計測ドップラーライダの応用



小型光ファイバドップラーライダ



大型ドップラーライダ

風計測ドップラーライダの応用

風計測ドップラーライダは、風力発電、気象計測、航空安全といった様々な分野への応用が期待されている。これらへの応用に向け、当社では、小型光ファイバドップラーライダ及び大型ドップラーライダを開発しており、前者は風力発電及び気象計測に、後者は広域気象計測及び航空安全用途に適用されている。

1. まえがき

風計測ドップラーライダは、レーザ光を大気中に放射し、エアロゾルからの散乱光が受けたドップラー周波数シフトから風速を計測する装置である(図1)。この装置では、電波を用いるドップラーレーダと比較して短波長・高周波信号を送受するため、空間分解能及び速度分解能が高い。さらに、レーダでは受信困難なエアロゾルからの散乱信号を受信できるため、晴天時での計測が可能である。これらの利点を活用することで、気象計測、風力発電、航空安全といった用途への応用が期待されており、当社でもこれらへの応用に向け、技術開発に取り組んでいる。当社の開発は、人の目に対して安全な波長1.5μm帯のレーザ光を用いていることを特長としており、小型光ファイバタイプと大型タイプ(長距離計測用)の両方がある。

本稿では、各々のライダについて述べるとともに、最近の計測長距離化開発について併せて述べる。

2. 小型光ファイバドップラーライダ⁽¹⁾⁽²⁾

小型光ファイバドップラーライダの構成を図2に、装置の外観を図3に示す。この装置は、本体とヘッド部とを、一本の光ファイバで接続し、高い配置自由度を持ち、最大約2kmの計測可能距離を持っている。また、全ての光部品に光通信で用いられているファイバ部品を用いており、小型かつ高信頼な装置を実現している。波長1.5μmの光源から連続光を出力し、この出力を分岐し片側を送信光に、他方を局発光に用いる。送信光をパルス変調器によってパルス化し、ファイバ増幅器によってピークパワー約10Wまで増幅した後、サーチューレータ、光学系、及びビームスキャナを介し大気中に送信する。散乱光を受信した後、光受信器で局発光と合波しヘテロダイイン検波を行う。この検波信号を信号処理部でスペクトル解析処理を行ってビーム送受信方向におけるドップラー周波数シフトの分布を検出することで、この方向の風速分布計測を行う。ヘッド部に格納されたビームスキャナの機能によって、風向・風速計

測、さらには風速の面分布の計測も可能である。距離分解能は30m、75m、150mの3種類を持っている。また、FPGA(Field Programmable Gate Array)タイプの専用信号処理ボードによって、20レンジの風計測をリアルタイム

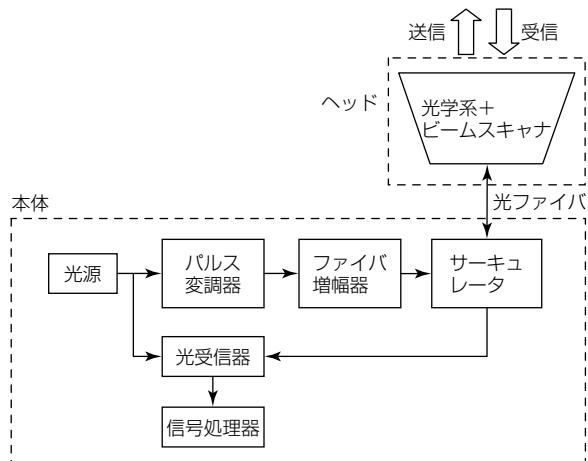


図2. 小型光ファイバドップラーライダの基本構成



図3. 小型光ファイバドップラーライダ

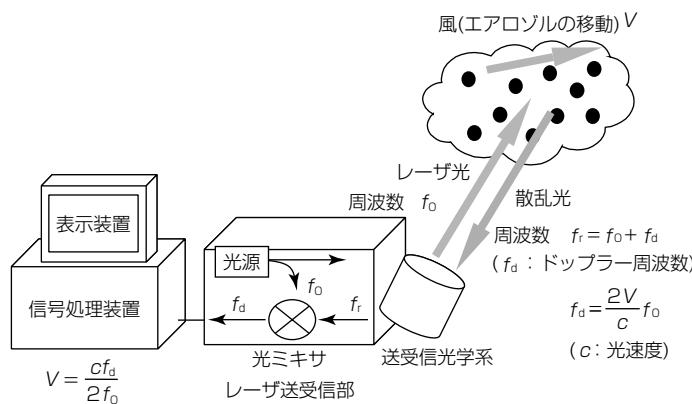


図1. 風計測ライダの基本原理

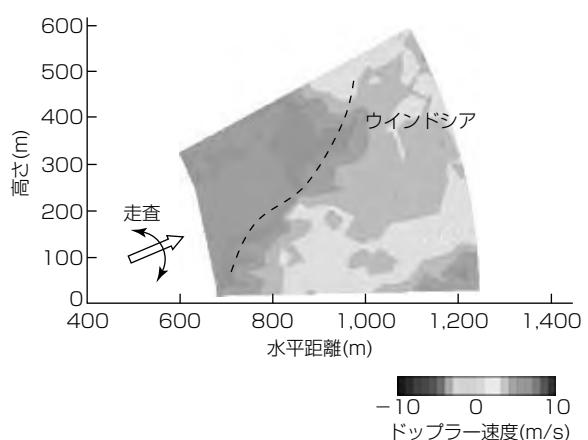


図4. 計測結果例(縦方向スキャンによる風速断面分布の計測結果)

に実現することが可能である。さらにビームスキャンについても、水平・垂直スキャン、及び円周スキャンといった様々な動作モードを実現することが可能である。

このライダは小型・可搬型であることから、都市気象計測、空港気象計測、風力発電等、幅広い用途における適用実績がある。このライダを気象計測に適用した一例を図4に示す。距離分解能を75mとし、縦断面でビームスキャンしながら距離1.2kmまでの視線風速分布を計測したものである。ウインドシア(風速があるラインを境に急変する現象)を明確に捕らえていることを確認できる。

3. 大型ドップラーライダ⁽³⁾

2章に述べた小型光ファイバタイプに加え、広範囲の気象計測用として、長距離計測用大型ドップラーライダの開発



図5. 大型ドップラーライダ

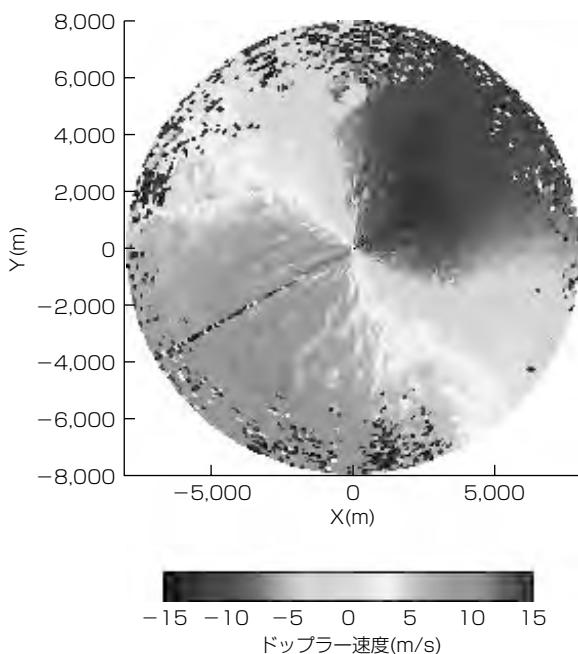


図6. 計測結果例(円周スキャンによる風速の水平面内分布)

を行っている。計測長距離化のため、高繰り返し(4 kHz)、高ピーク光出力(> 1 kW)が可能なパラメトリック光増幅器を開発し、これを小型光ファイバタイプの構成に加えて、ファイバ増幅器の後段に増設する形とした。大型ドップラーライダの外観を図5に示す。光送受信部・信号処理部等一式はシェルター内に格納しており、天井部に位置するスキャナを介して大気中にレーザ光を送受する。ビームスキャンによって、空間中の風速分布を計測する。

このライダは、最大計測距離約10kmを持っており、特に広域の気象計測用途(都市、空港)として用いられている。このライダによる計測結果の一例を図6に示す。図は、スキャナによって水平面内をスキャンして得られた風速分布の画像であり、円の中心がライダ設置位置に相当している。図中の色は、カラーバーに示された風速に対応している。8 km半径内の風速分布を鮮明に捕らえていることが分かる。

4. 計測長距離化技術⁽⁴⁾⁽⁵⁾

航空機の巡航時では、晴天乱気流への遭遇が脅威となる。当社では、この乱気流検出を目的とした航空機搭載ライダの開発を、(独)宇宙航空研究開発機構と共同で進めている。このライダでは、小型化が要求されるだけでなく、距離10kmの長距離計測を、上空10kmの高高度で実現することが求められる。上空ではレーザ光の散乱源となるエアロゾルが少ないため、更なるレーザ高出力化による計測長距離化技術が必要である。この高出力化を目的とした、Er, Yb:glass平面導波路型増幅器を開発し、ピークパワーを約4 kWに高出力化した。装置の基本構成は、2章に示した小型光ファイバタイプの本体部後段に、先に述べた導波路型増幅器と光学系を一体化したヘッド部を増設する形となっている。航空機搭載試験に先立ち、地上で評価試験を行った結果を図7に示す。図では、送受信方向を仰角数度に固定してほぼ水平に送受を行い、受信SN(Signal to Noise)比と風速検出値をプロットしている。高出力化の効

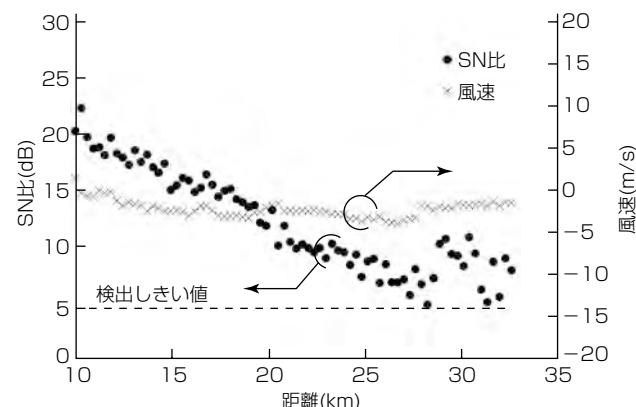


図7. 長距離計測用ライダでの計測結果例
(分解能300m、計測レート4s)

果によって地上での計測距離は大幅に伸びており、検出しきい値以上の受信SN比を距離30km以上まで連続的に得られていること、また、風速検出値でも、この距離範囲でランダム誤検出がなく、正確に風速計測できていることが分かる。今後、このライダを航空機に搭載し、上空での長距離風計測が実証される予定である。

5. む す び

当社における風計測ドップラーライダの開発について述べた。小型光ファイバタイプは最大約2kmの計測距離を持っており、都市気象計測、空港気象計測、風力発電等、幅広い用途における適用実績がある。大型タイプの計測距離は最大約10kmであり、広域気象計測に用いられている。また、最近のEr, Yb:glass平面導波路型増幅器の開発によって、計測距離30km以上を実現した。この計測距離は、風計測ドップラーライダ全体の歴史でも最長の実証距離であり、次ステップとして実施される航空機搭載での上空風計測試験でも、長距離計測を実現できる見通しである。また、地上設置用に関しても、大型タイプに先に述べた導波路型増幅器を適用し、大型タイプの長距離計測化も実現する予定である。これらの風計測ライダが、気象計測、航空安全、風力発電などの各種分野で有効活用されていくことを期待する。

参 考 文 献

- (1) Kameyama, S., et al.: Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing, *Applied Optics*, **46**, 1953~1962 (2007)
- (2) Ando, T., et al.: All-fiber coherent Doppler LIDAR for wind sensing, *Proc. of Material Research Society Symposium*, 1076-K04-05 (2008)
- (3) Hirano, Y: High-performance $1.5\mu\text{m}$ coherent Doppler lidar for wind field measurement, *Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics* (2004)
- (4) Sakimura, T., et al.: $1.5\mu\text{m}$ high-gain and high-power laser amplifier using Er, Yb:glass planar waveguide, *Proc. of CLEO Science and Innovations, CTu2D* (2012)
- (5) Kameyama, S., et al.: Wind sensing demonstration of more than 30km measurable range with a $1.5\mu\text{m}$ coherent Doppler LIDAR which has the laser amplifier using Er, Yb:glass planar waveguide, *Proc. of SPIE*, 85260E-1 (2012)

環境放射線センシング技術

Environmental Radiation Sensing Technologies

Hiroshi Nishizawa, Kenji Inomata, Masaru Tamuro, Kazuhiko Fujita

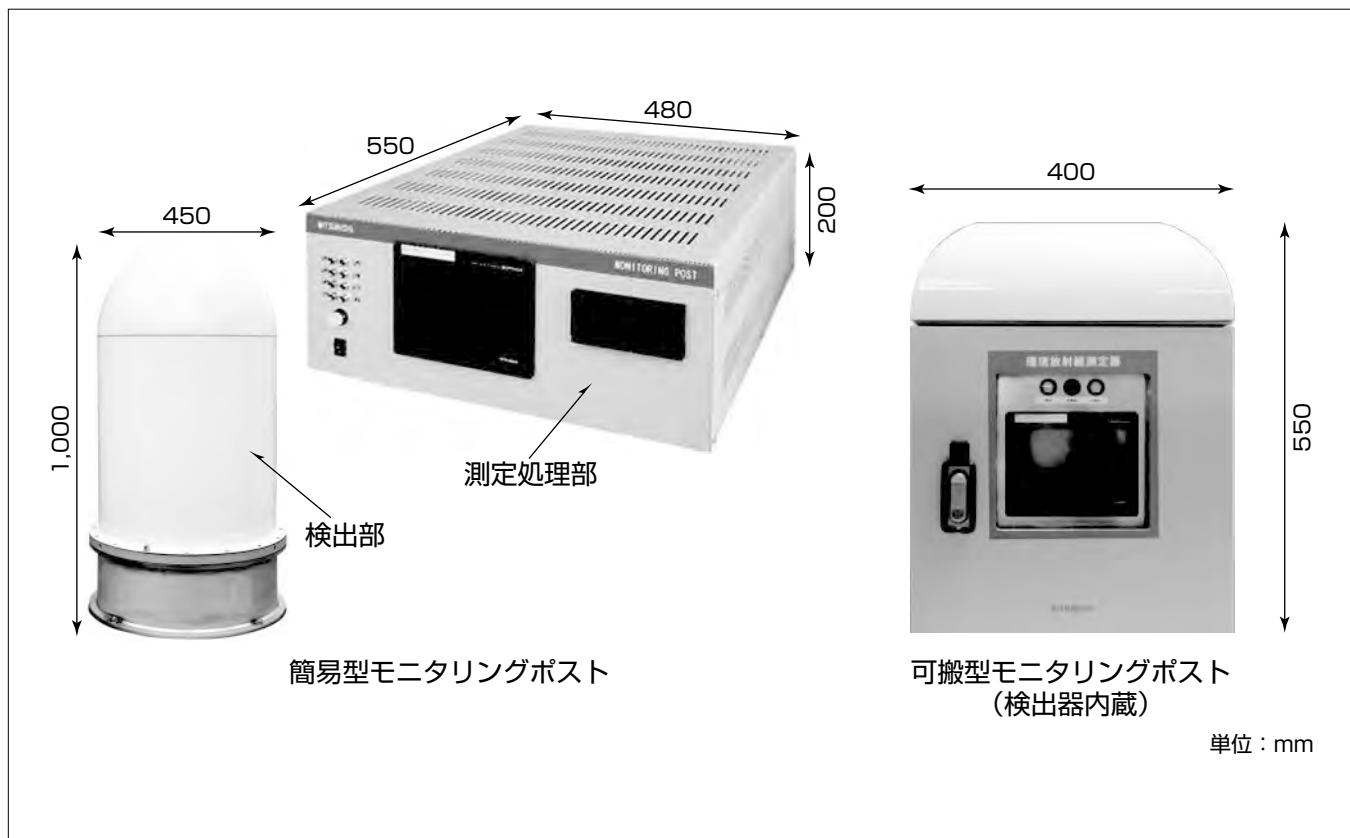
西沢博志* 藤田和彦**
猪又憲治*
田室 勝**

要 旨

東日本大震災に伴う福島原発事故後、国民全体に放射線に対する関心が高まっている。放射線に対する安全・安心を得るために、環境中の放射線量を正確に測定することが求められている。三菱電機は長年、原子力・放射線関連施設向けの放射線監視システムを手がけてきており、正確かつ迅速で信頼性の高い測定を行うための技術を開発してきた。震災後、小型化・軽量化、短納期(短い開発期間)、リーズナブルな価格といった様々なニーズ浮かび上がっている。これらに対応するため、従来行ってきたシミュレーション技術を駆使した設計手法を更に改善し、高精度化する試みを行っているほか、解析設計技術を適用して新たな環境放射線測定システムを開発している。

当社の環境放射線測定システムには、従来の据置き型モニタリングポストのほかに、新たに開発した簡易型や可搬型のモニタリングポストがある。これらは環境放射線をバックグラウンドレベルから正確に測定し、環境変動に対しても安定な出力を得るための技術を盛り込んでいる。また、迅速な情報提供のためにネットワークシステムへの接続も可能となっており、放射線の測定値と共に位置情報を伝送することで、各地点の環境放射線レベルの状況を即座に把握することができる。

本稿では、これらを実現する放射線センシング及びシステム技術について述べ、それを応用した環境放射線測定システムの例について述べる。



簡易型及び可搬型環境放射線モニタリングポスト

環境放射線の線量率を連続的に監視する装置である。簡易型モニタリングポストは専用建屋が不要なシステムで、可搬型モニタリングポストは仮設用のシステムであり、いずれも従来のモニタリングポストに比べて低コストで設置できる。ネットワークシステムへの接続が可能で、GPS (Global Positioning System)による位置情報と併せて線量率情報を上位システムに伝送することもできるため、各地点の放射線量の状況を即座に把握することができる。

1. まえがき

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う原発事故後、国民の放射線に対する関心が高まっている。放射線測定は、従来は被曝(ひばく)線量管理によって放射線作業従事者の安全を確保することが主な目的であったが、今回の事故後は一般公衆の安全を確保するだけでなく、被曝を可能な限り低く抑え国民一人ひとりの安心を得ることも重要な要素となってきた。

当社は1970年代から、国内に24基ある加圧水型原子力発電所の放射線監視システムを始め、燃料取扱い施設や放射線取扱い施設向けの放射線モニタ・システムを担ってきた。原子力発電所の運転において、空間線量率や発電所内外の空気中・水中の放射能レベルを測定することは、公衆・作業従事者の保護やプラント異常の早期発見の観点から非常に重要である。そのため、当社は正確かつ迅速で信頼性の高い測定を行うための技術を開発してきた。最近では、これらの技術を環境放射線モニタリングポストなどへも展開しており、既に自治体などに設置されている。

福島原発事故後、放射線測定に対する様々なニーズが浮かび上がってきた。生活環境における線量レベルを測定する環境放射線モニタリングだけでなく、除染作業で発生した廃棄物やその保管区域の監視、食品や飲料水の放射能測定のほか、農業再生に向けた土壤の放射能測定等に対するニーズが、事故以前に比べて格段に高まっている。当社はこれらのニーズに応えるため、正確かつ迅速に放射線を測定し、その測定結果を遠隔地まで迅速に伝達する装置をリーズナブルな価格で提供できるように、製品開発を継続している。

本稿では、当社の放射線計測技術を述べ、その技術を応用した環境放射線測定システムの例を述べる。

2. 当社の放射線計測技術

2.1 放射線センシング技術

2.1.1 放射線の種類

放射線にはいろいろな種類がある。身边にあるものでは主に α 線・ β 線・ γ (X)線がある。例えば環境中には自然放射線があり、大地に含まれるウランやラジウム・ラドン等の放射性核種からは α 線・ β 線・ γ 線が放出されているほか、宇宙に飛来する高エネルギー粒子が大気中の原子核と衝突して様々な種類の放射線が地上に降り注いでいる。一方、人工放射線では医療診断に用いられるX線が代表的であるが、工業用途でも非破壊検査や厚さ計に γ 線や β 線が使われる例がある。原子力発電所は主にウランを燃料としているが、ウランからは α 線や γ 線が放出され、さらに、ウランの核分裂によって中性子が放出される。また、核分裂してできた核種(核分裂生成物)からも β 線や γ 線などの放射線が放出される。

2.1.2 放射線検出器

放射線を測定するための検出器には、電離箱、GM(Geiger-Müller)管、半導体検出器、シンチレータ等、様々な種類がある。これらはいずれも、放射線特有の電離作用と励起作用を利用して、放射線のエネルギーを電気信号に変換することで測定するものである。電離箱は、空気などのガスを充填した検出器に放射線が入射すると内部のガスがイオン化する電離現象を利用したものであり、電圧がかけられた電極間のガスが放射線によってイオン化すると、微弱な電流が流れることを利用する。GM管は電離箱と構成が似ているが、電極に高電圧(数kV)がかかっていることが電離箱と異なる点であり、放射線が入射するごとにスパークのような現象が起こることを利用したものである。半導体検出器は、半導体に放射線を照射すると電気信号が流れる電離現象を利用している。シンチレータは結晶状の蛍光物質であり、放射線が入射すると励起作用によって微弱な光を発光する現象を利用したものである。

2.1.3 放射線検出器の選定と設計

実際の放射線の測定では、測定対象の種類や強度に応じて最適な放射線検出器が選定される。例えば、原子力発電所では、プラントの健全性確認と放射性廃棄物の放出監視を行うために、水やガスといった流体中の放射能レベルを測定しているほか、作業者や公衆の放射線防護を目的として、空間線量率や空気中の放射能濃度、物品表面の放射性物質の密度を測定・監視している。これらを測定する放射線検出器も様々なタイプがあるが、原子力発電所の放射線監視システムは様々な測定対象に応じて適材適所で検出器タイプを選定している⁽¹⁾⁽²⁾。例えば、空間の γ 線の線量率を測定するエリアモニタは、 γ 線測定に適した半導体検出器やGM管といったタイプの検出器が適用されている。また、気体状の放射性物質のレベルを測定するガスマニタは、主な対象核種が核分裂生成物である⁸⁵Krや¹³³Xe等の希ガスである。これらは β 線を放出するため、 β 線に対して高感度なプラスチック製のシンチレータを用いている。液体状の流体を測定する水モニタは、測定対象が¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs、⁶⁰Co等で、計測対象は γ 線である。 γ 線を高感度に検出するにはヨウ化ナトリウム(NaI)の結晶でできたシンチレータを用いる。また、空気中に浮遊する粒子状の放射性物質を測定するダストモニタは、気体をサンプリングして移動ろ紙上に捕集して放射線を測定する方法としている。これも計測対象は γ 線であり、高感度を要求されるためNaIシンチレータを用いている。また、一般公衆を対象とした環境放射線モニタリングの測定対象は γ 線であるが、自然放射線程度の低い線量レベル(バックグラウンドレベル)から事故時を想定した比較的高い線量レベルまで、精度良く測定することが求められる。低い線量レベルを測定するためには高感度である必要があるので、検出器は γ 線

を高感度に検出できるNaIシンチレータが用いられる。

これらの検出器は、測定対象線種と必要とされる感度や応答時間を考慮して、検出器タイプとその大きさ・配置・計測回路系が最適になるように設計される。最適な設計を行なうため、当社ではシミュレーション技術を駆使している。

2.2節にその詳細を述べる。

2.2 放射線検出器感度解析技術

2.2.1 放射線・光連成解析手法

放射線検出器や測定システムは、2.1節で述べたとおり正確かつ高い信頼性を持った測定結果が得られるように設計、製造することは当然であるが、小型化・軽量化、短納期(短い開発期間)、リーズナブルな価格等といった、様々なニーズに応えていくことも重要である。当社では開発期間を短縮するため、従来、設計にシミュレーション技術を適用しているが、さらに高度な要求に対応するためシミュレーション精度の向上に取り組んでいる。その一つに、放射線解析と光学解析を融合した“放射線・光連成解析手法”を確立し、この手法を用いて高精度な設計を行なっている。

例えばシンチレーション式放射線検出器の原理は、放射線の入射によってシンチレータで発光した光を、光電子増倍管などの光検出器で検出するというものである。従来の放射線検出器の解析では、放射線(γ 線・ β 線やそれに伴う相互作用で発生したX線・電子等の二次粒子を含む)の挙動だけを考慮し、放射線から変換された光の挙動は考慮していなかった。そのため、精度がさほど要求されない場合は特に問題にはならなかったが、高感度・高精度な検出器を設計する場合は問題が生じる。検出器を高感度化する一般的な方法は、検出器の体積を大きくすることである。しかし、検出器を大きくすれば、シンチレータで発光した光が光検出器に到達するまで長い経路を通過することになる。その間、光が減衰するので、放射線が持っていたエネルギーの情報を正しく光検出器に伝達できなくなり、検出器の出力を正確に模擬できなくなる。そこで当社は、放射線の軌跡と、放射線から変換された光の軌跡の両方を追跡する手法(連成解析)を確立した。

2.2.2 連成解析手法の適用例

図1は高感度 β 線計測を行う大口径プラスチックシンチレータに連成解析を適用した例である⁽³⁾。放射線・光連成解析手法では、放射線解析コードEGS5⁽⁴⁾による β 線挙動解析によって検出器への付与エネルギー及び反応位置を算出し、反応位置ごとのシンチレーション光の集光効率を光線追跡によって算出する。この計算を入射 β 線ごとに、検出器内部での挙動に沿って行なうため、検出器の形状による集光効率への影響を高精度で評価することが可能となる。

また、図2にNaI(Tl)(タリウム活性化ヨウ化ナトリウム)シンチレータの連成解析の例⁽⁵⁾を示す。図に示すように、 γ 線がシンチレータに入射して発光すると、発生した

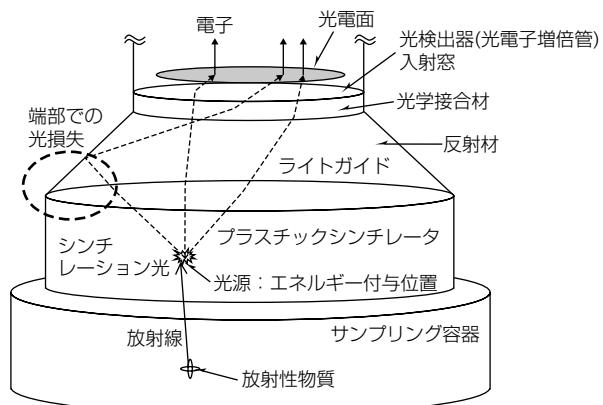


図1. 大口径プラスチックシンチレータの解析モデル

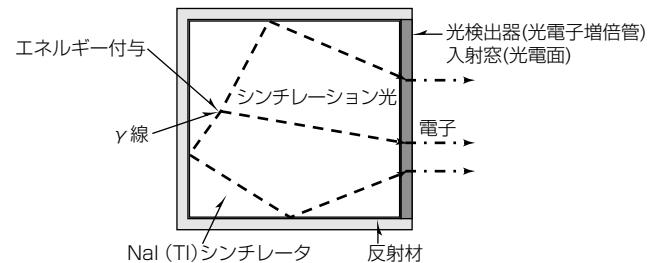


図2. NaI(Tl)シンチレータの解析モデル

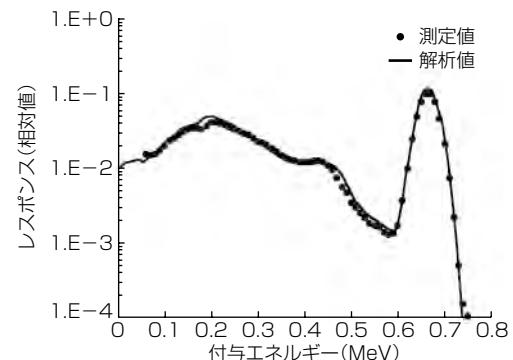


図3. NaI(Tl)シンチレータの出力波高分布の解析

シンチレーション光はシンチレータ内で伝播(でんぱ)・反射を繰り返し、最終的には光検出器(光電子増倍管)に入射する。発光位置によって光検出器まで到達する経路が大きく異なるので、光の減衰割合も様々になる。図3は連成解析技術を用いて、大型NaI検出器から出力される波高分布を模擬した例であり(横軸のエネルギーはパルスの高さに比例する)、 ^{137}Cs 線源を用いた測定結果と、それに相当する解析結果を比較したものであるが、両者は互に良く一致しており、高精度な解析ができていることを示している。

3. 環境放射線測定システム

これまでに蓄積してきた放射線計測や設計・解析技術、及びデータ収集システム技術を応用し、新しい環境放射線測定システムを開発した。一例として、図4に簡易型モニタリングポスト、図5に可搬型モニタリングポストを示す。



図4. 簡易型モニタリングポスト



図5. 可搬型モニタリングポスト

簡易型モニタリングポストは専用建屋が不要なシステム、可搬型モニタリングポストは仮設用のシステムであり、いずれも従来の環境モニタリングポストに比べて低コストで設置できる。従来の技術をベースに、次に述べる計測精度・耐環境性能向上・保守点検容易化といった課題を解決し、製品ラインアップの拡充を図っている。

3.1 計測精度向上

計測精度については、放射線パルスの数え落とし抑制とエネルギー特性確保という2つの課題がある。まず、放射線パルスの数え落としを抑制するために、検出器パルスデータのリアルタイム監視を行っている。検出器からの放射線パルス信号は信号処理回路で信号振幅の解析を行い、振幅の大小に応じて信号レベルに区分けする。区分けしたデータはメモリに格納し線量率演算を行う。従来技術では、演算処理部で一定時間内に検出器パルスをメモリに格納し線量率演算処理していたが、処理能力を超える多数の検出器パルスが入力された場合には数え落としが生じ、精度と応答性が悪くなってしまう課題があった。対策として、信号処理回路のメモリを複数分割し、演算処理中に同時にデータを格納することでリアルタイムに検出器パルスを処理可能とした。その結果、数え落としによる誤差がほとんどないシステムとなっている。一方、エネルギー特性については、従来は低エネルギー領域で誤差が大きくなるという課題があった。この原因は、単位エネルギー当たりのパルス波高に非直線性があるためである。この非直線性を解析設計で考慮し、低エネルギー領域に補正を加えることでエネルギー特性を改善した。

3.2 耐環境性能向上

耐環境性能の向上については、温度や経年劣化に対しても安定した出力を得るために、検出器ゲインの安定化対策を施している。環境モニタリングポストは屋外で使用されるため、昼夜及び季節によって設置環境の温度が大きく変化する。また、検出器は経年劣化による波高値の変動によって、感度特性が変化し線量率の値に影響を及ぼす。これらの対策として補償機能を備えている。温度変化に対する補償では、あらかじめ検出器の温度特性を関数化しておき、検出部温度をモニタリングして補償量を算出して温度補正を行うことで、温度変化による変動を抑制している。

また、検出器劣化補償機能では、天然放射性核種からの一定の放射線エネルギーを検出し、定期的に基準値と比較してゲインを自動調整することによって、劣化による波高値の変動を抑制している。

3.3 保守点検の容易化

放射線検出器は定期的な保守や点検が不可欠である。保守操作を容易にするために演算処理部本体に接続可能なタッチパネルディスプレイを適用し、表示メニューやデータフォーマットを標準化している。例えば、初期設定画面では、放射線演算部の初期設定内容を抽出して一元管理を行っている。線源校正画面では、現場でテスターやオシロスコープなど、専用機器を用いずに保守・点検ができるようしている。データ管理画面では、他設備へのデータ出力を行うデータ管理を一元化し標準化している。これらの標準化や共通プラットフォーム化は、多岐にわたるユーザーのニーズを迅速に反映し、タイムリーな製品供給も可能にするという効果もある。製品によってはGPSを搭載して位置情報を検知したり、FOMA^(注1)通信ユニットを搭載することで携帯電話網を利用して線量率情報を上位システムに伝送するものもあるが、これらのハードウェア・ソフトウェアを共通化することで短期開発を実現している。

(注1) FOMAは、株NTTドコモの登録商標である。

4. む す び

環境放射線を正確かつ高い信頼性を持って測定する技術と、その応用製品について述べた。震災直後の緊急を要する状況からは幾分落ち着きを取り戻しているものの、環境放射線の測定は、安全・安心を得るために今後も重要であることは間違いない。当社は今後も放射線計測に対する様々なニーズに対応するため、新たな技術及び製品開発を行っていく。

参 考 文 献

- (1) 茂木健一, ほか: 新型放射線管理システム, 三菱電機技報, 75, No.5, 356~359 (2001)
- (2) 西沢博志: PWRプラントの放射線計装の最新技術, 応物学会放射線分科会, 第12回「放射線夏の学校」テキスト, 51~63 (2000)
- (3) 林 真照, ほか: 放射線・光連成解析を用いた大口径シンチレータの小型化, 日本原子力学会「2012年春の年会」予稿集, O21 (2012)
- (4) Hirayama, H., et al.: The EGS5 Code System, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8 (2005)
- (5) 林 真照, ほか: アンフォールディングによるNaI(Tl)シンチレータを用いた放射能分析手法の研究, 研究会「放射線検出器とその応用」(第27回)要旨論文集, 63~64 (2013)

プラズモニクスによる波長選択性非冷却赤外センサ

小川新平*
木股雅章**

Wavelength Selective Uncooled Infrared Sensor by Plasmonic Absorber

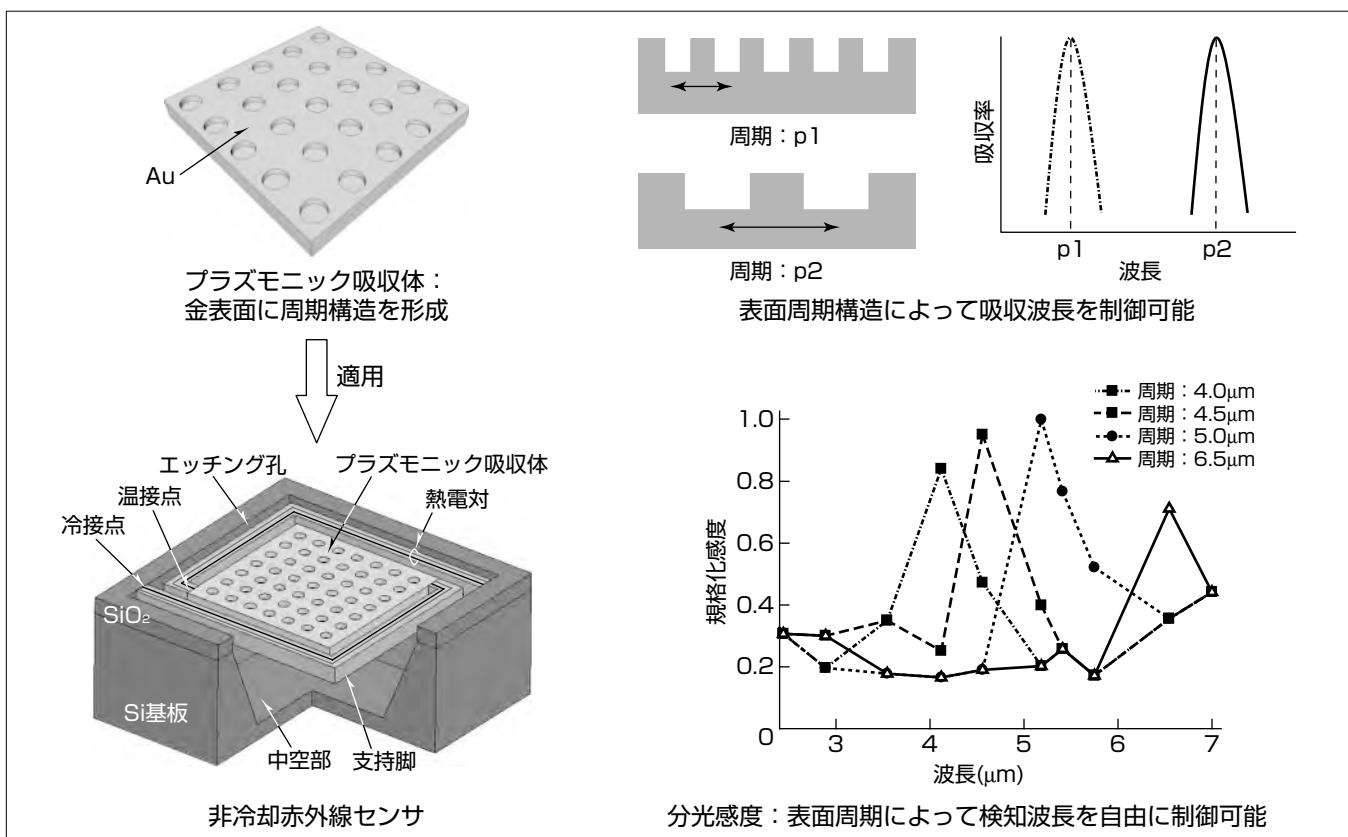
Shimpei Ogawa, Masafumi Kimata

要旨

近年、安全・安心への関心の高まりから、非冷却赤外線センサに大きな注目が集まっている。非冷却赤外線センサは、物体からの熱放射による熱エネルギーを吸収し、電気信号に変換することで物体を検知する。よって熱源として物体の有無や位置を検知することは可能であるが、形状情報以外から熱源の正体を識別することは不可能であった。しかし、熱放射エネルギーを波長分解することができれば、放射スペクトルから検知物体の正体を識別することが可能になる。

三菱電機は、近年発展著しい新たな光制御技術であるプラズモニクスを応用することで、所望の波長で赤外線を吸収する新たな吸収体(プラズモニクス吸収体)を応用した非冷却赤外線センサを提案した。表面が金からなる二次元周

期構造を持つプラズモニクス吸収体について電磁界解析を行い、主に周期によって吸収波長が制御可能であることを示した。次に、様々な表面周期構造を持つプラズモニクス吸収体を適用した非冷却赤外線センサを作製し、分光感度を評価した。プラズモニクス吸収体の周期と等しい波長で感度が増強されており、解析結果とよい一致を示した。以上の経緯から、プラズモニクス吸収体によって、表面構造の制御のみで、非冷却赤外線センサの検知波長を自由に設定することができる実証した。異なる検知波長を持つ画素の集積化が容易であるため、将来的に、赤外線でも可視域におけるカラーイメージセンサに相当する多波長検知画像センサの実現が期待される。



プラズモニクス吸収体を用いた波長選択性非冷却赤外線センサ

従来の非冷却赤外線センサでは、波長情報に基づく被検知物体の正体識別が不可能であった。プラズモニクスを応用することで、金表面の周期構造によって吸収波長を自由に制御することができる。プラズモニクス吸収体を受光部に持つ非冷却赤外線センサを作製し、分光感度を評価した結果、検知波長を周期構造によって制御できることを実証した。異なる検知波長を集積化することで、赤外画像におけるカラー化が期待される。

1. まえがき

近年、安全・安心への関心の高まりから、非冷却赤外線センサに大きな注目が集まっており、様々な分野で応用されている⁽¹⁾。非冷却赤外線センサは、入射した赤外線を吸収することで熱エネルギーに変換し、さらに電気信号に変換することで光を検出する。MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術⁽²⁾の進展を契機とし、性能面で著しい進歩を遂げている⁽³⁾⁽⁴⁾。赤外線センサは、物体の熱放射エネルギーを検知するが、被検知物体の正体を識別することは不可能である。ただし、熱放射エネルギーの波長分解が可能になれば、放射スペクトルから熱源の正体を識別することが可能である。

当社では、波長情報を取得することで被検知物体を識別する新機能を備えた非冷却赤外線センサの開発を進めている⁽⁵⁾。異なる波長を検知する画素を集積化することによって、赤外波長域でも、可視域におけるカラー画像に相当する波長情報を持った画素が取得できる。波長情報によって熱源の正体識別が可能になるため、非冷却赤外線センサの可能性を大きく拡大することが期待される。

2. プラズモニクスによる波長選択吸収

2.1 赤外線吸収構造

波長選択を実現する試みとしては、①センサに帯域通過フィルタを付加する方法、及び②吸収体材料を制御する方法が一般的である。しかし、①では所望の波長を通過させるフィルタの設計及び製造を波長ごとに行わなければならぬ。多画素の場合は、さらに画素ごとにフィルタの種類を用意しなければならないため集積化が困難である。②については、所望の波長を吸収する材料を自由に制御することが難しく、特に異なる材料を画素ごとに集積することが困難である。

2.2 プラズモニクス吸収体

外部光学系や材料に依存しない新たな吸収体を実現するため、プラズモニクスを応用した。プラズモニクスは、金属表面の微細構造によって光を制御する新たな光技術であり、フォトニクス結晶の進展と相まって、2000年代から進歩の著しい分野である。初期段階では、可視光～近赤外域における金属内部の自由電子波としての表面プラズモンの研究を中心としていた⁽⁶⁾。近年、金属周期構造⁽⁷⁾⁽⁸⁾の導入や、メタマテリアルとの融合によって、赤外波長域～THz(テラヘルツ)波長域においてもプラズモニクスの概念は拡張されている⁽⁹⁾。

図1にこの研究で用いたプラズモニクス吸収体の概念図を示す。プラズモニクス吸収体は、表面が金からなり、孔が正方格子状に二次元周期的に配置された構造体である。周期構造の導入によって、周期に固有の擬似表面プラズモ

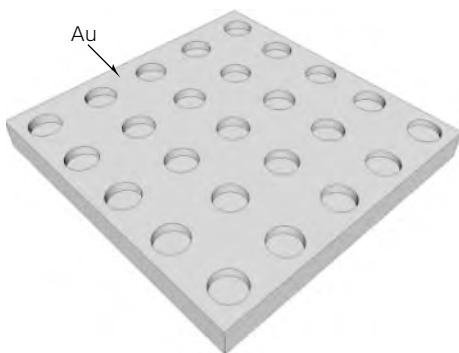


図1. プラズモニクス吸収体の概念図

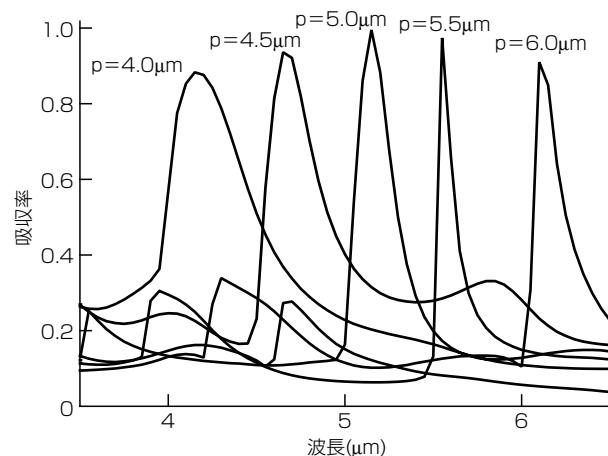


図2. 周期を変化させた場合の吸収率

ンモード⁽⁵⁾⁽⁹⁾が形成されるため、吸収波長が周期によって制御可能であることが理論的に予測される。

図1で、孔径3μm、孔深さ1.2μmに固定し、周期(p)を4.0～6.0μmの範囲で変化させた場合の吸収率を厳密結合波解析によって求めた。結果を図2に示す。

表面構造を反映して、周期とほぼ等しい波長でのみ吸収が増強されていることが分かる。また、表面プラズモンの分散関係⁽⁷⁾⁽⁸⁾を考慮すると、プラズモニクス吸収体では、吸収波長に対する孔径、孔深さの影響が小さい。よって、プラズモニクス吸収体では、表面構造特に周期によって吸収波長を制御することができる。

3. 非冷却赤外線センサへの適用

電磁界解析によって示された波長選択吸収をセンサで実証するため、赤外線受光部にプラズモニクス吸収体を用いたサーモバイル型非冷却赤外線センサを作製した。図3、図4にプラズモニクス吸収体を持つ非冷却赤外線センサの模式図及び作製過程を示す。以下、作製過程を述べる。

- (1) CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)
工程によって、Siウェーハ上に赤外線受光部、支持脚、熱電対を形成する。RIE(Reactive Ion Etching)によって中空化エッティング用の孔を形成する。
- (2) RIEによって、赤外線受光部のみに二次元周期的な孔

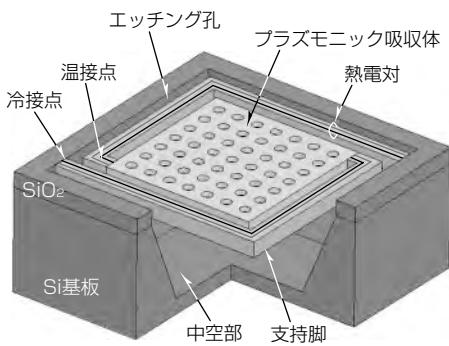


図3. プラズモニック吸収体を持つ非冷却赤外線センサ

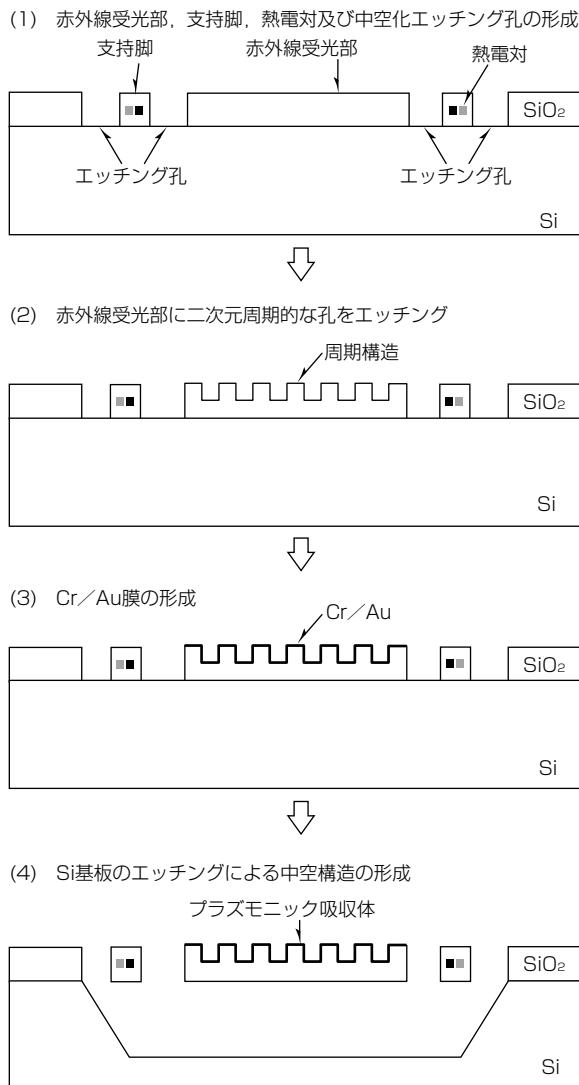
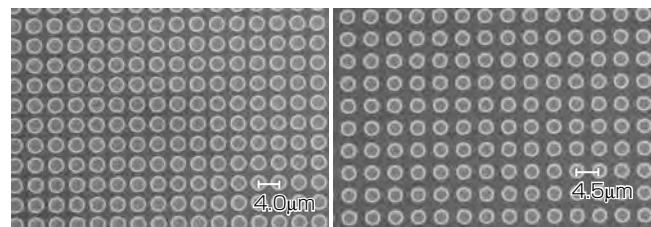


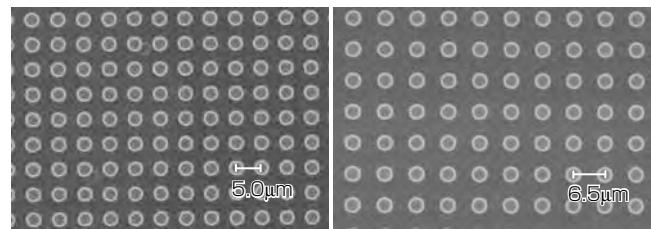
図4. 作成過程

をエッティングする。孔深さは1.2μmとしている。

(3) Cr, 及びAuをそれぞれ50nm, 250nm成膜し, 写真製版によって受光部のみにCr/Au膜を残す。金の厚さは250nmであり, 赤外波長域における表皮厚さより十分厚いため, 下部のSiO₂が入射光へ与える影響は無視できる。つまり入射光に対してはAuのみが作用するため, 図1に示すプラズモニック吸収体と等価な構造が形成できる。なお, 孔側壁についてもCr/Auが均一に成膜されてい



(a) 周期 : 4.0μm



(b) 周期 : 4.5μm

(c) 周期 : 5.0μm

(d) 周期 : 6.5μm

図5. プラズモニック吸収体の表面周期構造のSEM写真

ることを確認している。

(4) ウェーハをチップ化し, TMAH(Tetra Methyl Ammonium Hydroxide)によってSi基板をエッティングする。エッティング孔によってプラズモニック吸収体下部のSiのみが選択的に除去されるため, 中空構造が形成される。以上によって, プラズモニック吸収体を中空に保持した非冷却赤外線センサが完成する。

図5にプラズモニック吸収体における表面周期構造のSEM(Scanning Electron Microscope)写真を示す。プラズモニック吸収体は, 周期的な凹凸を持つ薄膜構造であるが, 中空構造でも良好な形状を保っていることが分かる。孔径は3 μm, 孔深さは1.2μmを共通として, 周期が4.0μmから6.5μmの4種類のセンサを作製した。以下, それぞれセンサA～Dとする。

4. 分光感度評価

センサA～Dについて分光感度を測定した。分光感度測定系を図6に示す。

光源は黒体炉(1,000K)を用いた。帯域通過フィルタを用いて所望の測定波長のみを取り出し, ピンホールによって受光部へ入射する光以外の迷光を除去することで, プラズモニック吸収体の効果のみを評価している。センサは真空槽に格納し, 外部から接続した読み出し回路によって出力電圧を測定する。センサ感度の算出は, 黒体炉のアパチャ径, フィルタ透過率, フィルタ半値幅, 真空槽Ge窓の透過率, 光源とセンサとの距離, センサ受光部の面積, 黒体炉温度などのパラメータから算出した。

センサA～Dについて求めた分光感度を図7に示す。プラズモニック吸収体の効果を示すため, 分光感度は最大感度で規格化を行っている。

図7から, 全てのセンサA～Dの特定波長でのみ感度が増強されていることが分かる。さらに, 感度が増強される

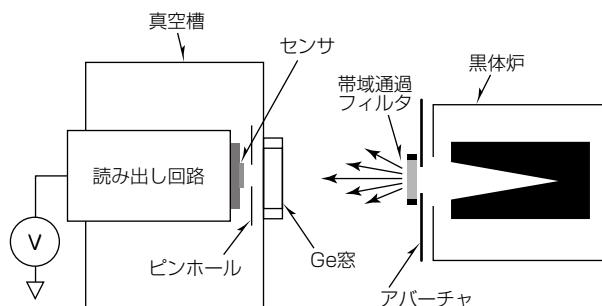


図6. 分光感度測定系

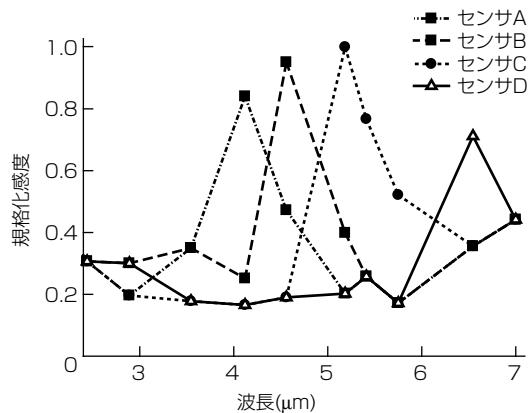


図7. 分光感度測定結果

波長は、センサA～Dのプラズモニック吸収体における周期にはほぼ等しいことが示されている。得られた分光感度特性は電磁界解析によって示したプラズモニック吸収体の吸収特性(図2)とよく一致し、検知波長がプラズモニック吸収体の周期のみによって自由に制御することが可能であることが実証された。孔深さなどの垂直方向の構造制御が不要であり、表面構造のみの制御で検知波長を制御できる。よって、異なる検知波長を持つ画素を集積化する場合は、画素ごとに周期のみを変化させればよい。周期のみを変える場合は、写真製版の工程のみで実現できるため多波長検知を実現するための集積化が容易である。

5. む す び

金属表面周期構造のプラズモニック吸収体による検知波長選択型非冷却赤外線センサを提案した。また、電磁界解析によって、プラズモニック吸収体が表面周期によって吸収波長が制御できることを示した。さらに、設計したプラズモニック吸収体を適用した非冷却赤外線センサを作製し、分光感度を評価することで、解析とよく一致した検知波長の選択性が実現されていることを示した。

提案したプラズモニック吸収体を用いた波長選択型非冷却赤外線センサの優れた点は以下のようにまとめられる。

- (1) 表面周期構造のみによって検知波長が制御可能
- (2) 集積化が容易
- (3) 多波長検知が可能
- (4) 波長分解能が高い
- (5) 構造揺らぎの影響が小さい

本稿では中赤外域を対象としたが、理論的にはさらに長波長赤外域、THz域でも同等の効果がある。赤外波長域のみならず広い波長域における多波長検知が可能と考えられる。プラズモニクスの応用から、非冷却赤外線センサの高機能化による応用範囲の拡大が期待できる。

参 考 文 献

- (1) Vollmer, M., et al.: *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, Wiley-VHC, Weinheim (2010)
- (2) Gianchandani, Y., et al.: *Comprehensive Microsystems*, 3, Elsevier, Amsterdam, 113～163 (2008)
- (3) Takamuro, D., et al.: Development of new SOI diode structure for beyond 17μm pixel pitch SOI diode uncooled IRFPAs, Proc. SPIE, 8012, 80121E (2011)
- (4) Fujisawa, D., et al.: Two-million-pixel SOI diode uncooled IRFPA with 15μm pixel pitch, Proc. SPIE, 8353, 83531G (2012)
- (5) Ogawa, S., et al.: Wavelength selective uncooled infrared sensor by plasmonics, *Appl. Phys. Lett.*, 100, 021111 (2012)
- (6) Raether, H.: *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*, Springer, Berlin (1988)
- (7) Ebbesen, T. W., et al.: Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays, *Nature (London)*, 391, 667～669 (1998)
- (8) Genet, C., et al.: Light in tiny holes, *Nature (London)*, 445, 39～46 (2007)
- (9) Pendry, J. B., et al.: Mimicking surface plasmons with structured surfaces, *Science*, 305, 847～848 (2004)

家電プラスチックリサイクルでの 材料センシング技術

上原 康* 梅村園子*
中 慶朗* 衣川 勝*
平野則子*

Material Sensing Technologies in Post-Consumer Electronics Recycling Process

Yasushi Uehara, Jiro Naka, Noriko Hirano, Sonoko Umemura, Masaru Kinugawa

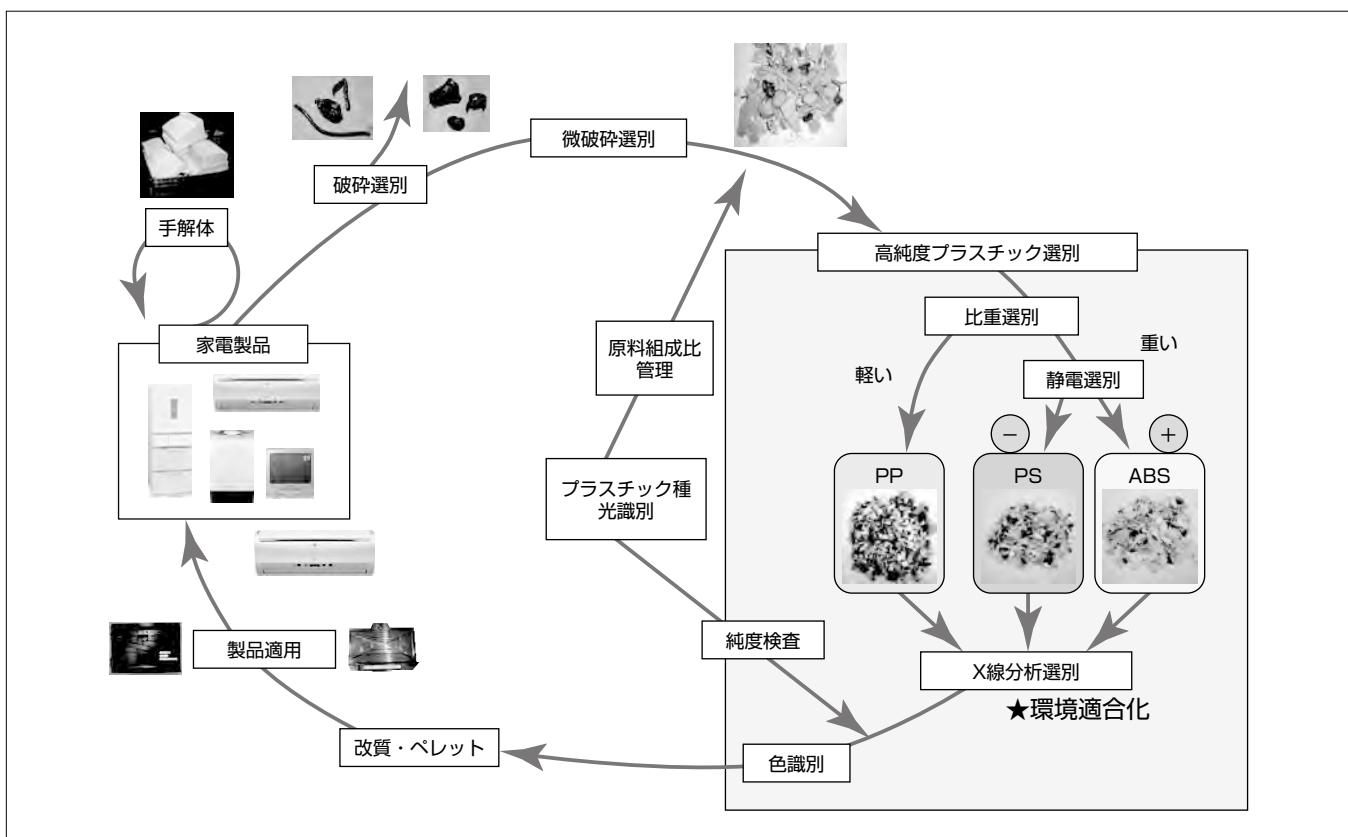
要 旨

家電リサイクル工程で発生する混合破碎プラスチックの高品質分別回収工程で、X線を応用した高濃度臭素含有樹脂の高速選別除去による環境適合(RoHS適合)を実現している。臭素そのものをセンシングするのではなく、臭素難燃剤を多く含むプラスチックフレークが、含まないフレークに比べてX線を吸収しやすいことに着目してフレーク透視画の濃淡から臭素含有有無を判定する手法を確立した。照射X線と透過X線検出条件の最適化及び臭素含有フレークの除去用エア噴射の高精度制御によって、720kg/hrの処理量で回収品の臭素濃度300ppm未満、回収率90%以上を達成した。

また、分別回収されるプラスチックフレークの純度は、抜取りで手作業によって検査が行われているが、これを自

動化する装置を開発した。フレークの色や添加物の影響を受けにくい中赤外光をセンシングプローブとして自動搬送されるフレークに照射し、反射光に含まれる樹脂種固有の情報を瞬時に識別して樹脂種ごとに分類する。PP(ポリプロピレン)、PS(ポリスチレン)、ABS(アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン)樹脂を、約1秒でそれぞれ99%以上の精度での識別が可能で、純度検査自動化の目途(めど)を得た。

今後、プラスチックリサイクルに限らず、様々な工程を流動するものの材質や組成をリアルタイムで計測するニーズに対応するため、分析技術をベースに据えた技術開発を推進する。



自己循環プラスチックリサイクル

使用済み家電製品の機械破碎選別で得られた混合微破碎プラスチックは、比重選別及び静電選別によって、単一種の樹脂(PP, PS, ABS)に選別分離する。これに、中赤外分光を応用した樹脂識別技術を応用することで、大量選別条件の最適化や純度検査の自動化が可能になり、効率と品質の向上が期待できる。また、X線を応用した環境規制物質の選別除去によって、家電品への再利用が可能なRoHS (the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment) 適合化が達成できる。

1. まえがき

三菱電機では、循環型社会の構築を目指して使用済み家電品の自己循環リサイクルを実現するための各種技術開発を進めてきた。その中で、手解体が困難な部材を破碎して得られる混合プラスチックフレークを、高度に選別回収して再生素材化する技術を確立し、(株)グリーンサイクルシステムズ(GCS)で、年間約1万トンのフレーク処理を行い、当社の一部の製品に再生プラスチックとして適用している。リサイクルプラスチックの製品適用で、原料に含まれる不純物は材料の物性を低下させることから、回収プラスチックには高い純度が要求される。また、過去の家電品の中には有害性が疑われる特定臭素化合物がプラスチックの難燃剤として使用されていたものがあることから、回収プラスチックから臭素を含むものを除去する必要があり、臭素含有有無を、回収プロセスの中で瞬時に判定する必要がある。このような、回収プラスチックの品質確保で、分析技術をベースにした材料センシングを適用している。

2. 工業プロセスでの材料センシング

複数種の材料が流動する工業プロセスで、流動材料自身をセンシングする実例は多くない。ある種の真空プロセスで、排気に含まれる残留ガス成分のセンシングによるプロセスの開始可否判断や、石油精製の中で、一部の流動中間体を分流させることによる組成センシングの例はあるが、これらは製品全数検査ではなく、いわゆるサンプリング調査である。サンプリング調査では、個別材料分析と同じ原理による高精度センシングが適用される。

一方で、大量製品の全数を対象とした検査に対しては、個別材料分析の考え方に基づいた手法は適さず、二次元信号取得と信号強度の二値化による合否判定が行われる。例えば、食品や薬などへの異物含有の検査では、X線透視による検査が広く用いられている。

3. プラスチックリサイクルでの材料センシング

3.1 環境適合化のための臭素含有樹脂の検知除去

3.1.1 X線透視による臭素含有有無の判定⁽¹⁾

再生プラスチックを家電製品に適用するためには、RoHS指令に適合することが不可欠で、回収プラスチックに残留の可能性のある特定臭素系難燃剤を除去する必要がある。本来は、規制対象となる特定の物質を含むものだけ除去すればよいが、特定のものだけ選別することは非常に高度な分析技術を必要とすることから、大量選別には向きである。そこで、臭素を含む樹脂を全て除去するという方針に基づき、臭素自身を検知するのではなく、臭素難燃剤を多く含むプラスチックフレークが他のフレークに比べてX線を吸収しやすいことに着目し、フレーク透視画の濃

淡から臭素含有有無を判断する方法によって、回収プラスチック中の残留臭素濃度300ppm未満を達成している。

臭素含有有無は、先に述べたとおり、X線透視画像の濃淡で判定を行っている。家電製品に用いられるプラスチックの大部分は、PP, PS, ABSの3種類であるが、これらはいずれもC(炭素)とH(水素)が主要構成元素で、X線に対してほとんど“透明”である。一方で臭素は、炭素や水素に比べると重く、X線の吸収が大きくなる。X線の透過率は、各元素に対して既知のX線吸収率から、計算で求めることができる。例えば、これら3種類のプラスチックの中で最も重いABS($C_{15}H_{17}N$)の1mm厚板と5mm厚板、及び臭素系難燃剤の1つであるジプロモビフェニル($C_{12}H_8Br_2$)の1mm厚板のX線透過率計算値を図1に示す。工業材料のX線透視に用いられるX線源は、一般的に、50kV以上の電圧で用いられることが多いが、低X線エネルギー領域で透過率の違いが大きいこと、またABSの厚みの違いよりもジプロモビフェニル中の臭素による吸収が非常に大きいことが分かる。ただ、実際のプラスチックに含まれる臭素系難燃剤の量は多くても数wt%であり、フレーク厚み及び臭素含有量とX線透過率との関係を正確に求めないと、非含有なのに厚いために除去されるといった事象によって、回収できる臭素非含有樹脂が少なくなるおそれがある。

3.1.2 臭素含有樹脂選別除去装置⁽²⁾

現在、量産ラインで稼働中のX線利用臭素含有樹脂選別除去装置及び装置で得られているデータの例を図2に示す。検査対象のフレークは、フィーダから100m/minで移動するコンベヤに供給される。フレーク供給に対してコンベヤの移動が極めて速いことから、コンベヤ上でフレークは互いに重なることなく分散され、コンベヤ端部から空中に放出される。放出位置の直上と直下にX線源とX線ラインセンサをそれぞれ配置し、空中に放出されたフレークのX線透過強度を測定する。基準値を下回る透過強度のフレークは、センサの下流に設けたエアガンによって手前に設けた回収箱に撃ち落とし、残りのフレークは自然落下によって

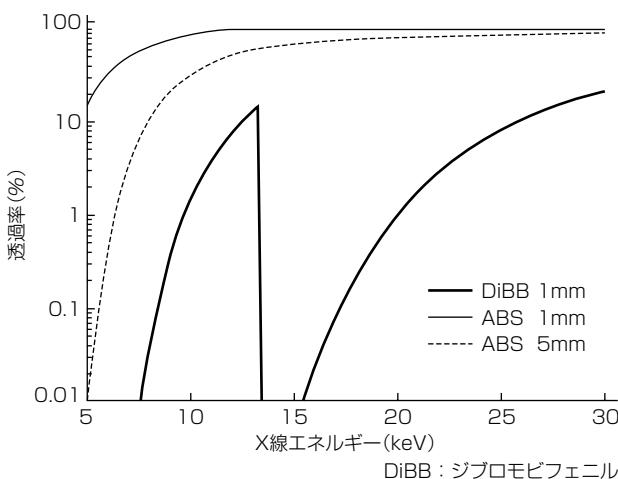


図1. ABS樹脂及び臭素系難燃剤のX線透過率

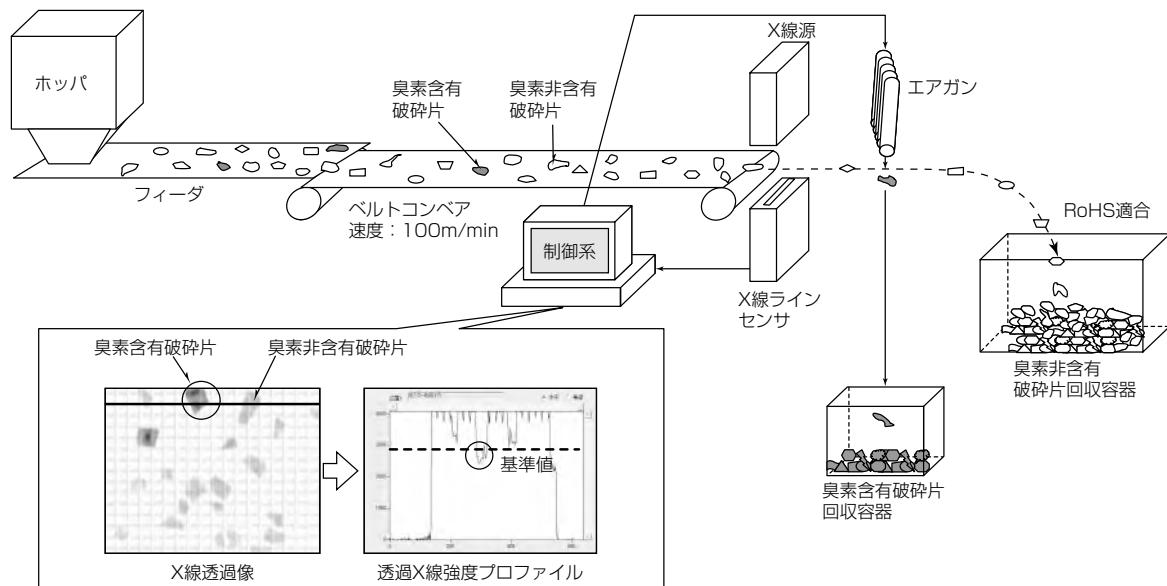


図2. X線透過像応用の臭素含有樹脂選別除去装置

下流側の回収箱に入る。コンベヤから放出されるフレークの初速度は約2m/sであり、空中での検査と分別をミリ秒単位で実施している。これによって、コンベヤの材質の制約を受けず、フレーク厚みと臭素含有量だけがX線透過率を決める要素となり、高精度の臭素含有樹脂の検知・除去が可能となった。その結果、720kg/hrの処理量で、回収フレーク中の臭素濃度が環境規制基準値である300ppmを十分に下回るものを90%以上の回収率で回収できている。

3.2 純度検査を自動化するための樹脂種識別技術

混合破碎プラスチックには、PP、PS及びABS樹脂以外にも多様な種類のプラスチックが含まれていることから、大量処理で異物の混入が“0”になることは不可能で、そのためロット単位で抜き取り純度検査を実施している。これを自動で行える装置の開発に取り組んだ。

3.2.1 識別プローブの選択

樹脂の種類を非接触・非破壊で識別するプローブとしては、近赤外光、中赤外光及びレーザラマン分光が知られている。この内、近赤外光の反射を用いた樹脂識別技術は、既に白色樹脂に対し有効性が示されているが、有色樹脂は近赤外光を反射しないことから識別できない。家電からの混合破碎プラスチックには、有色樹脂が少なからず含まれるため、樹脂の色に左右されない識別が求められることから、近赤外光の適用は不可である。レーザラマン分光は、1秒未満の短時間で樹脂種に特有の信号を検出することができるが、レーザ光の散乱強度やレーザ照射によって試料から発生する蛍光の影響で、白色樹脂と有色樹脂を同一の条件で識別することは極めて困難であることが、実験検討で判明した⁽³⁾。これに対し中赤外分光は、信号強度、すなわち評価所要時間の点でレーザラマン分光に劣るが、相対的に外乱を受けにくい条件で、全ての樹脂種の識別を行うことができる。そこで、連続して多数のフレークを非

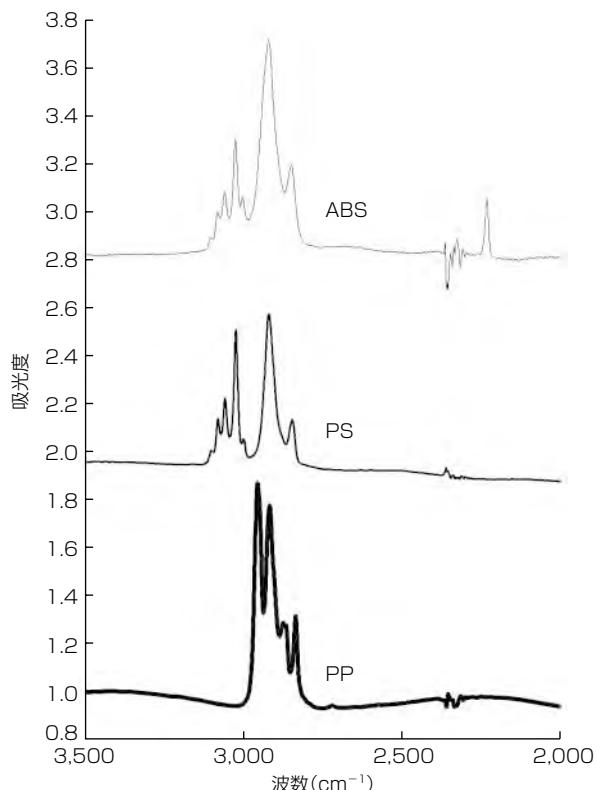


図3. PP, PS, ABSの赤外吸収スペクトル

接触で評価するのに最適な手法として、中赤外光の反射スペクトルを用いた樹脂識別を採用することにした。

3.2.2 識別アルゴリズム

図3に、PP、PS及びABSの赤外(吸収)スペクトルを示す。グラフの横軸は波長の逆数である“波数(単位: cm⁻¹)”で、縦軸が吸光度である。先に述べたとおり、これらの材料はいずれもC(炭素)とH(水素)が主要構成元素で、例えばスペクトルの3,000cm⁻¹近くの領域には、3材料ともにC-H結合に起因した吸収が現れる。ただ、その形状はPPとPS及びABSの間に違いがあり、この領域のスペクトル

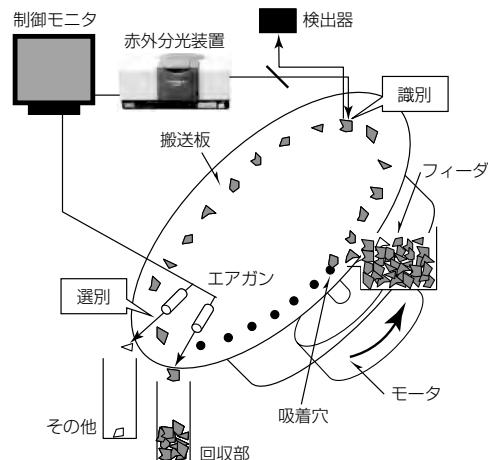


図4. 中赤外分光応用樹脂種識別装置

解析から、PPとPS及びABSの区別ができる。一方、PSとABSの間で、この領域のスペクトル形状は完全に相似であり両者の区別はできないが、ABSのスペクトルには $2,350\text{cm}^{-1}$ にPSのそれには見られない吸収があることが分かる。したがって、 $3,000\text{cm}^{-1}$ 近傍のスペクトル形状と $2,350\text{cm}^{-1}$ の吸収の有無から、未知のフレークがPP、PS又はABSかどうかを識別するというアルゴリズムを構築した。ABSと類似のAS(アクリロニトリル・スチレン)以外の不純物プラスチックは、このアルゴリズムで、主要3プラスチックと区別除去できることを確認した。

3.2.3 識別の高速・高精度化

赤外吸収(反射)スペクトルは、フーリエ変換型分光計(FTIR)で測定するのが最も高感度・短時間とされる。同分光計では、光源からの連続赤外光が干渉計を経ることで光路長差を持つ2つのビームに分けられて試料に照射され、その吸収又は反射を測定する。測定中に干渉計の可動鏡が移動し、1回の往復で所定の波長領域をカバーする干渉光の集まりが測定され、その信号をフーリエ変換することによって波長と吸収(反射)強度の関係を示すスペクトルが得られる。短時間で測定を行うためには、可動鏡の移動をできるだけ早くかつできるだけ短距離にした方が有利であるが、移動速度には限界があり、また移動する絶対距離が短くなると波長分解能が下がる。通常の材料分析では、感度とともに高い波長分解能を要求するが、主要3プラスチックの高速識別に特化するため、 $3,000\text{cm}^{-1}$ 近傍のスペクトル形状解析の精度が低下しない分解能を見極めて可動鏡の移動範囲を制限し、1フレークあたり1秒未満での高速・高精度識別を実現した。

3.2.4 樹脂種識別装置

図4に、株島津製作所と共同開発した樹脂種識別装置を示す。穴を設けた円盤状の搬送板を傾斜させることによって、自重を利用してプラスチックフレークを1個ずつ穴に吸着させ、識別位置に自動搬送する。中赤外分光測定は、FTIR装置本体からのダブルビームが識別位置に集光・照射され、試料表面で反射した光を検出することによって行われ、先に述

べたアルゴリズムに基づいて識別位置を通過したフレークの樹脂種が識別される。識別されたプラスチックフレークは、円盤下方位置でエアガンで自動選別することで、分別回収される。この流れによって、PP、PS、ABSの主要3プラスチックを、99%以上の精度で識別・分別することが可能になった。GCSで回収された製品の数ロットの純度検査に試用し、現行の化学分析で得られたPP、PS及びABS樹脂の検査結果と良い一致を示し、自動純度検査としての有用性を実証した。

4. むすび

X線選別は、既にGCSラインで日々の臭素含有樹脂除去に適用中で、GCS製品の環境適合を実現している。中赤外光分光を適用した樹脂識別技術は、これまでに純度検査に適用可能であることを示したが、大量選別前の混合樹脂フレークの組成比把握にも応用先を広げる開発を進めている。大量選別工程の中の静電選別では、混合フレークの組成比の違いによって帶電の状態が異なり、その結果として選別のされ方が変わることが分かっている。静電選別投入前に投入フレークの大まかな組成比が分かれれば、帶電や選別の設定条件変更が可能になり、回収率の更なる向上が期待される。

これらの開発は、平成21年度経産省委託事業“プラスチック高度素材別分析技術開発”，及び平成23年度産業技術実用化開発事業費補助金“プラスチックの高度素材識別技術及びリサイクル素材化技術”による成果であり、光識別技術開発は株島津製作所と共同で実施した。

参考文献

- 真下麻理子, ほか:リサイクルプラスチックのRoHS適合化技術, 三菱電機技報, **83**, No.8, 473~476 (2009)
- 山田 朗, ほか:次世代家電リサイクル技術, 三菱電機技報, **85**, No.12, 692~695 (2011)
- 三菱電機(株):平成21年度経済産業省産業技術研究開発事業委託費(プラスチック高度素材別分析技術開発)事業報告書 (2011)

光ファイバセンサを用いた複合材料構造の健全性診断技術

竹谷 元* 武田展雄†
高橋市弥** 榎本清志††
水口 周***

Structural Health Monitoring of Composite Structure by Using Optical Fiber Sensor

Hajime Takeya, Ichiya Takahashi, Shu Minakuchi, Nobuo Takeda, Kiyoshi Enomoto

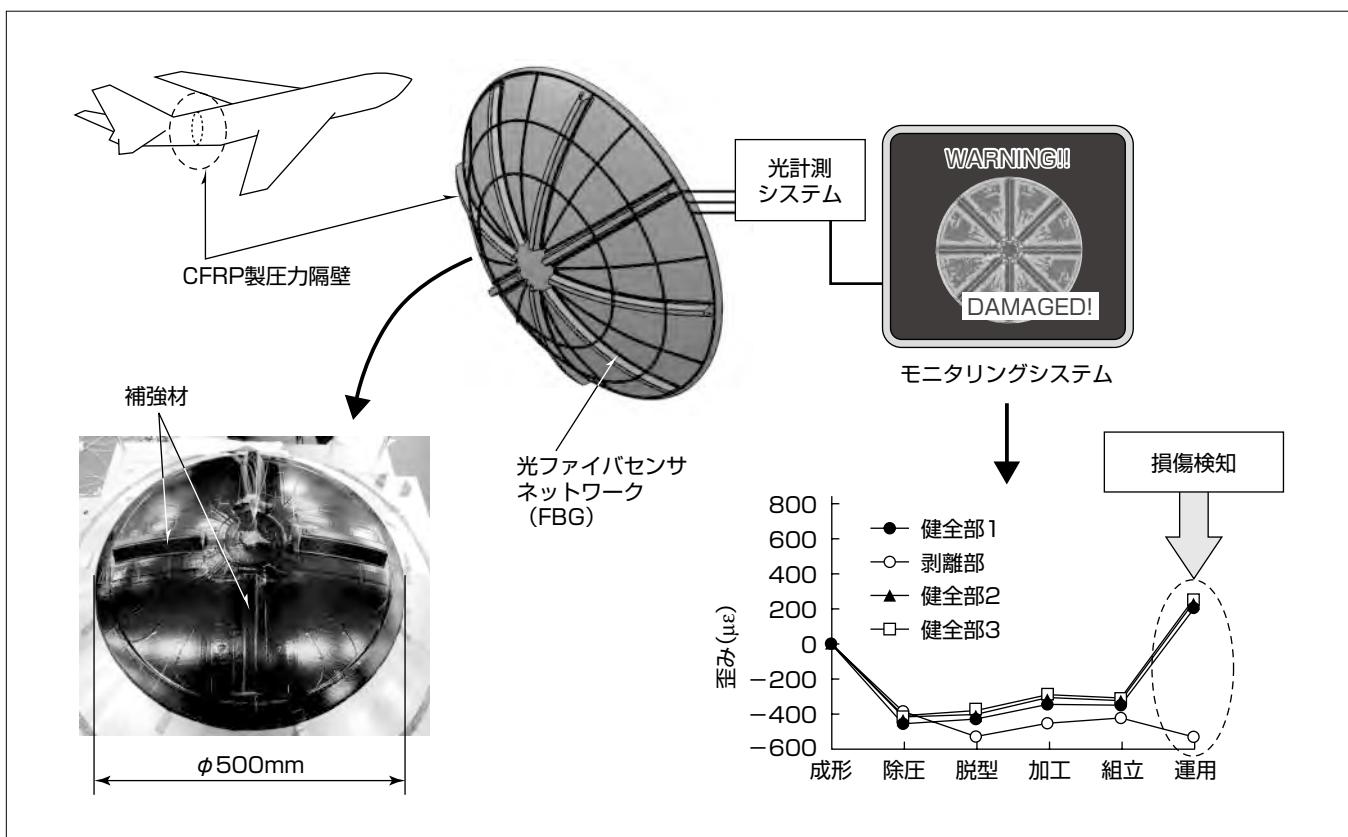
要 旨

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP) は、軽量・高強度の素材として注目されており、特に、航空機などの移動体に適用が進んできている。また、産業機器や民生機器についても、今後、徐々に高機能製品から適用が進んでいくものと考えられる。一方で、CFRPは炭素繊維をマトリックスの樹脂材料で硬化させた材料であることから、従来の金属材料と異なり、内部でクラックや剥離などの損傷が生じやすく、またその損傷も外観検査では見つけにくい、といった課題がある。

このため、これらの課題を解決し、CFRP構造の更なる軽量化、高信頼化、メンテナンス性を向上させる技術の実現を狙って、光ファイバセンサを用いた複合材料のライフサイクルモニタリング技術・健全性診断技術の開発に取り

組んだ。光ファイバセンサは直径125μmのガラス繊維であり、炭素繊維との同様の繊維状構造のため、CFRPの中に埋め込むのに適するとともに、CFRP部材のライフサイクルにわたる長期的な計測も可能である。

ここでは航空機の圧力隔壁を対象構造として選定し、約1/6スケールのCFRP製スケールモデルを作製して、損傷の検知実験に取り組んだ。その結果、全56点のFBG (Fiber Bragg Grating) 型光ファイバセンサを実装したCFRP製圧力隔壁スケールモデルで、部材のライフサイクルを通じた歪(ひずみ)計測技術を確立するとともに、接着部の剥離の検知に成功し、健全性診断の基礎技術を確立した。今後、これらの技術の実用化に向けた研究開発に取り組んでいく。



光ファイバセンサによる損傷検知システムのイメージ

圧力隔壁(プレッシャーバルクヘッド)のスケールモデル(図左下)に埋め込んだ光ファイバセンサによって接着部の剥離による歪みの変化の検知に成功した(図右下)。これによって、健全性診断の基礎技術を確立した。

1. まえがき

代表的な複合材料である炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は、軽量・高強度の素材として注目されており、特に、航空機などの移動体に適用が進んできている。また、産業機器や民生機器についても、現在は素材のコストが高いことから制約はあるものの、今後徐々に高機能製品を対象に適用が進んでいくものと考えられる。一方で、CFRPは炭素繊維をマトリックスの樹脂材料で硬化させた材料であることから、従来の金属材料と異なり、内部でクラックや剥離などの損傷が生じやすく、またその損傷も外観検査では見つけにくい、といった課題がある。

これらの課題を解決するため、光ファイバセンサを用いた複合材料の検査・診断技術の開発に取り組んできた。光ファイバセンサは直径125μmのガラス纖維であり、炭素纖維との同様の纖維状の構造のため、CFRPの中に埋め込むのに適する。図1は、光ファイバによる構造の健全性を診断するシステムのイメージを示したものである。図に示すように、構造に発生する損傷を光ファイバセンサによって監視できれば、高い信頼性が確保できるとともに、点検時の省力化を図ることができる。

本稿では、航空機のCFRP製の圧力隔壁を対象としてこれらの技術開発に取り組んだ結果を述べる。圧力隔壁は、航空機の客室内の圧力を保つための重要な構造部材であり、点検が困難な位置に設置されることから、光ファイバセンサの適用によって、高信頼化・点検の省力化が期待できる。

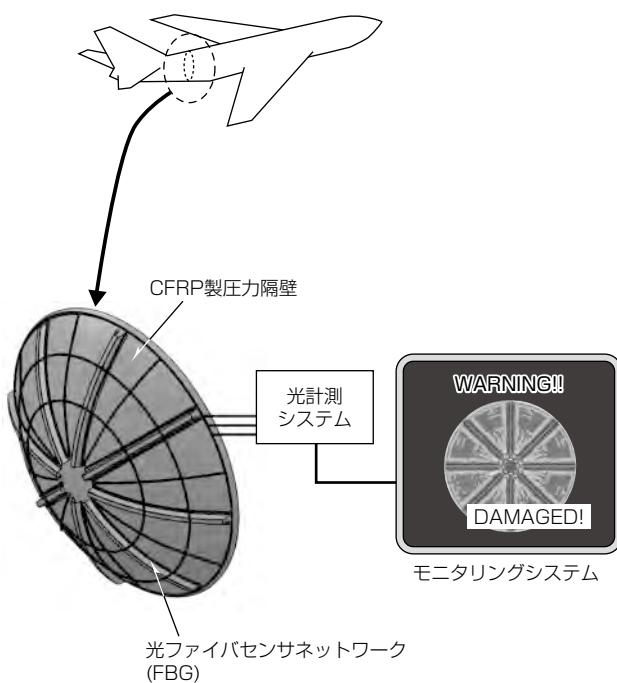


図1. 光ファイバによる構造の健全性を診断するシステムのイメージ

2. 光ファイバセンサの特長

ここでは、FBGと呼ばれるタイプの光ファイバセンサを用いる。FBGは、図2に示すように、光ファイバのコア中に屈折率の周期構造を作成したので、波長帯域の狭い中心波長(λ_B)の反射光が得られるのが特長である。ここで、中心波長(λ_B)は、次式で表される。

この式から分かるように、中心波長は、まず、周期構造のピッチ(Λ)によって変化することから、中心波長を観測しておけば、その変化から回折格子のピッチの変化、つまり構造の歪みを計測することができる。一方、屈折率(n)が温度依存性を持つことから、あらかじめ温度と中心波長の関係を求めておくことによって、逆に中心波長の変化から構造の温度を知ることができる。温度と歪みが同時に変化する場合も考えられるが、構造から独立した温度センサを近傍に配置することによって、温度と歪みの計測が可能である⁽¹⁾。

このFBGを用いたセンサは、光ファイバであることから非常に小型軽量であり、熱遮断性に優れ、電磁ノイズ影響を受けにくいなどの特長を持つ。

これらのメリットに加えて、FBGセンサは、多点での計測に適するものである。図3は構造に貼り付けたFBGセンサを模式的に示したものであるが、図に示したように1本の光ファイバに、わずかに中心波長を変えたFBGセンサを実装することが可能である。計測される反射波長スペクトルから、どのFBGセンサの中心波長がどのくらい変化したのかを計測すれば、各点での温度又は歪みを知ることができる。用いる光源の種類などによって変化するが、1本の光ファイバ中に40点程度のセンサを配置することができるため、熱電対や歪みゲージなどの温度・歪みセンサと比べて配線数を大幅に削減することができ、質量や設置にかかる時間を削減可能である。

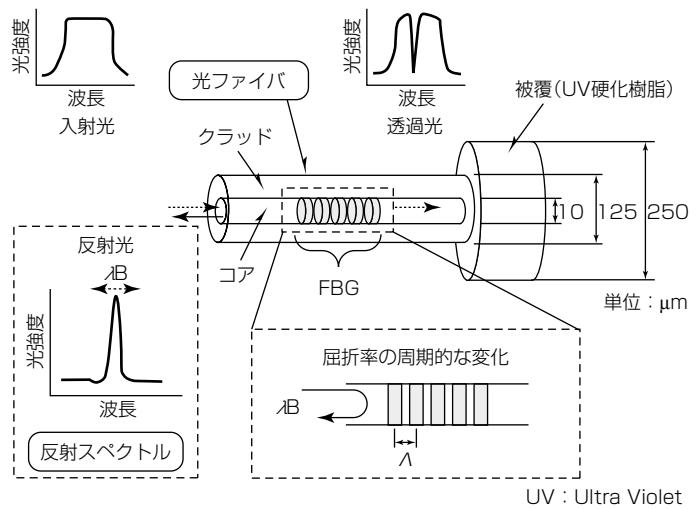


図2. FBGセンサの構造

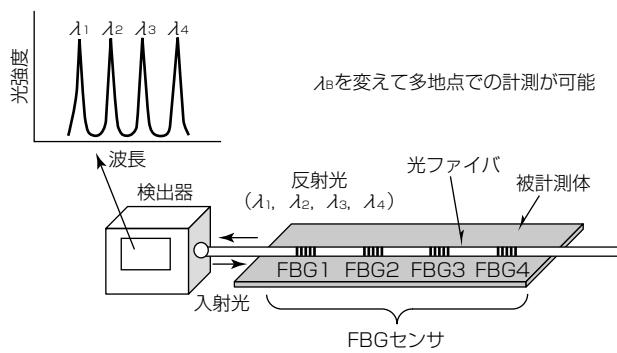


図3. FBGセンサによる多点計測のイメージ

3. 複合材料構造への適用

3.1 ライフサイクルモニタリング

光ファイバセンサは、歪みゲージと異なり、長期にわたる歪みの継続計測が可能である。これは、FBGセンサが中心波長から歪みを導出するためで、中心波長は歪みと温度でしか変化しないため、温度の補正をかけるだけで、成形から加工・組立て、運用、メンテナンス・補修まで含めて、ライフサイクルを通じた計測が可能である。具体的には、次のモニタリングが可能である。

(1) 成形工程

CFRPの加熱・加圧成形の熱歪みをモニタリングすることで、成形プロセスの安定性・再現性を確認できる。

(2) 加工・組立て

穴あけや外周部の整形など加工時の不良や、組立て時の変形の確認ができる。

(3) 運用

運用時の損傷発生を検知できる。

(4) メンテナンス・補修

メンテナンス時の損傷確認、補修部の健全性を確認できる。

これらの各段階での歪み計測は、要素実験によって確認済みである⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。3.2節では、(3)の運用時の損傷検知実験について述べる。

3.2 圧力隔壁スケールモデルでの健全性診断技術の実証

圧力隔壁は、旅客機の客室内の圧力を支えているもので、大型の旅客機では直径3mサイズの規模になる。ここでは健全性診断技術の実証のため、約1/6スケールのCFRP製圧力隔壁モデルを製作し、損傷検知の実験に取り組んだ。

3.2.1 試作品の形状

4本の補強部材を接着したφ500mmの球面形状で、周辺に設置した孔を介してボルトで固定される。板厚は均一部が炭素繊維4層の約0.4mmで、周辺のボルト固定部と中央の増厚部は12層の1.2mmとした。FBGセンサはCFRPの層間及び補強材接着内部の全56点を実装した。また、圧力隔壁に発生する損傷は、補強材の端部が剥がれるというケースを想定した。ここでは、あらかじめ補強材接着部に難接着性の樹脂フィルムを挿入して接着していない領域を作

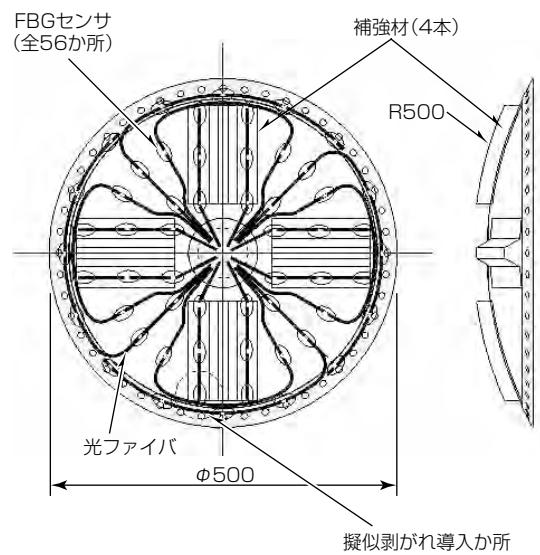


図4. CFRP製圧力隔壁の形状及びFBGセンサ配置

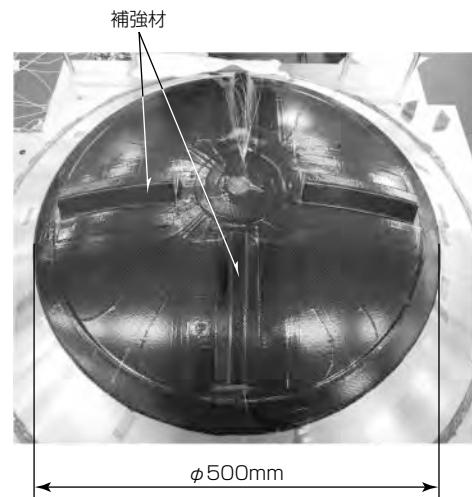


図5. CFRP製圧力隔壁試作品

りこむことによって模擬した。図4は試作品の形状及びFBGセンサの配置を示したものである。図5は成形後の試作品の外観である。

3.2.2 試験装置の構成

圧力隔壁は、運用時には客室側の圧力と高高度の気圧との差圧が加わる。このため、図6に示すように真空チャンバに取り付け、凸面側を排気することによって大気圧が加わる構成とした。光ファイバはハーメチックポートから、チャンバ外へ取り出し、光計測器へ接続した。光計測器は広帯域の光源とフォトダイオードアレーを用いた波長モニタ及び光スイッチで構成している。図7に示したように電源及びデータ読み取り用のパソコンを接続すれば実験が可能なようにケースに収納する構成とした。大きさは270×180×240(mm)とコンパクトなサイズを実現している。

3.2.3 損傷検知実験

CFRP製圧力隔壁のスケールモデルに実装した光ファイバセンサで計測される歪みの変化を図8に示す。横軸はラ

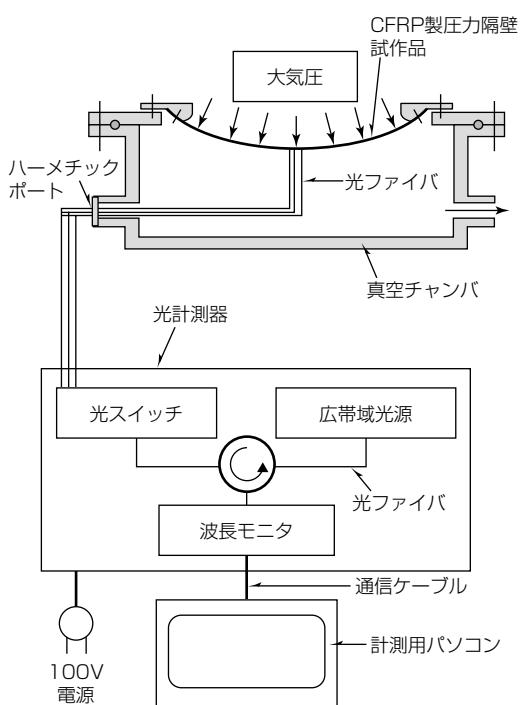


図6. 試験装置の構成



図7. 光計測器試作品

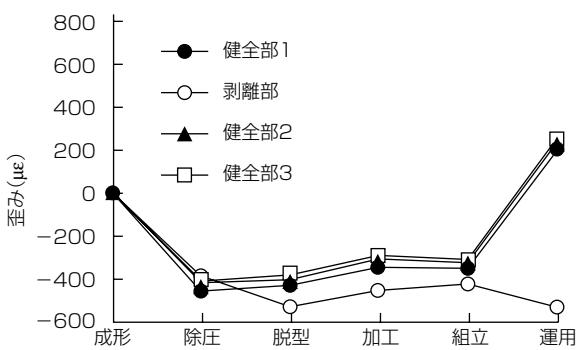


図8. ライフサイクル歪みモニタリングの試験結果

イフサイクルの各段階を示している。補強材を接着していない領域の歪み変化は、脱型時から他の欠陥のない領域のセンサと差異が生じ始め、運用の大きな荷重がかかる場合は、他のセンサが大きく歪んでいるのに対してほぼ変化を

示さず、はっきりと違いが認められた。これは、接着部の剥離によって補強材に力が加わらなくなり、歪みが生じなくなったためである。この結果から、埋め込んだセンサの歪み値を観測することによって、損傷の発生を検知可能であることを実験的に示すことができた。

4. む す び

CFRPの更なる軽量化や高信頼化、メンテナンス性の向上等を狙い、光ファイバセンサ(FBG)を使った健全性診断技術の開発に取り組んだ。具体的な構造として、航空機の圧力隔壁を選定し、そのCFRP製1/6スケールモデルで、全56点のFBGセンサを実装し、CFRP部材のライフサイクルを通じた歪み計測技術を確立するとともに、接着剥離を模擬した損傷部の検知に成功した。これによって健全性診断技術の開発に成功した。今後、これら技術の実用化に向けた研究開発に取り組んでいく。

この研究は、経済産業省「航空機・宇宙産業イノベーションプログラム」のうち、中核的要素技術研究として位置付けられた「次世代構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの1テーマである「複合材構造健全性診断技術開発」の一環として、一般財団法人 素形材センターとの契約に基づき実施したものである。

参考文献

- (1) Takeya, H., et al.: Monitoring of a Structural Panel for Space Satellite Using FBG Sensor, Proceedings of the first European Workshop on Structural Health Monitoring, 919~925 (2002)
- (2) Sekine, K., et al.: Life cycle strain mapping of composite airframe structures by using FBG sensors, Proc. SPIE 7981, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2011, 79812K-1~13 (2011)
- (3) Takahashi I., et al.: Structural health monitoring of CFRP airframe structures using fiber-optic-based strain mapping, Proc. SPIE 8345, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, 834531-1~11 (2012)
- (4) Takahashi I., et al.: Life cycle strain monitoring of composite airframe structures by FBG sensors, Proc. SPIE 8695, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2013, 869512-1~12 (2013)
- (5) 高橋市弥, ほか:光ファイバセンサを用いたライフサイクルストレインマッピングによる複合材構造の健全性診断技術の開発, 第37回複合材料シンポジウム, 93~94 (2012)

生産現場見える化ソリューション

奥村誠司*
中島龍二**

Visualization Solutions in Production Factory

Seiji Okumura, Ryuji Nakashima

要 旨

製造業者にとって、トラブルなどによる生産ラインの異常停止は大きな損失となるため、生産現場ではトラブルの早期発見・原因究明とラインの早期復旧が求められている。

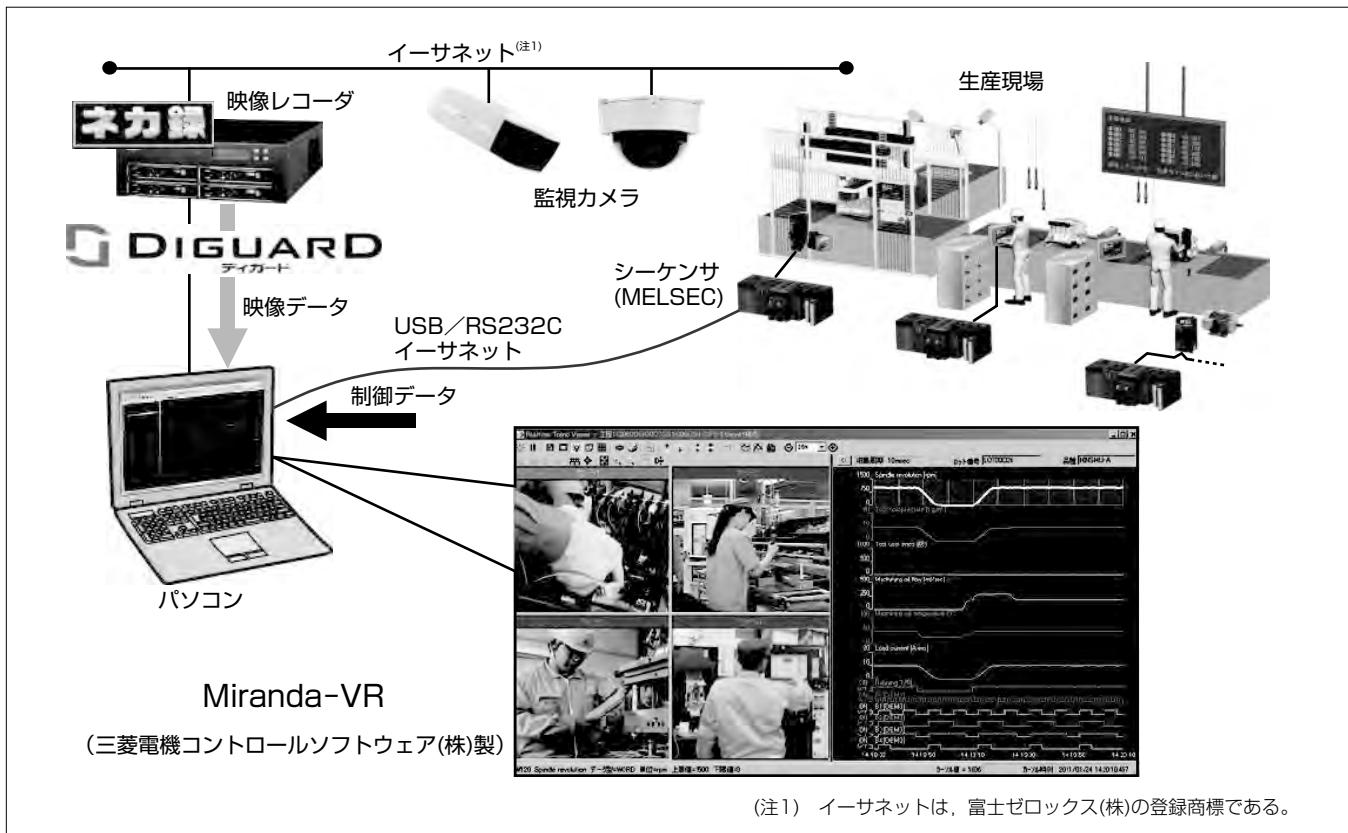
このような背景から、生産現場でもカメラによる映像監視ニーズが高まっている。トラブル分析にカメラ映像も活用することで原因究明の効率化が図れ、生産性改善が期待できるからである。

そこで、三菱電機及び三菱電機コントロールソフトウェア(株)では、シーケンサなどのPLC(Programmable Logic Controller)から制御データを収集する従来システム“Miranda(ミランダ)”を基に、カメラ映像の連動表示が可

能な生産ライン監視システム“Miranda-VR”を開発し、2012年7月から販売を開始した。

Miranda-VRには、三菱電機のセキュリティ構築プラットフォーム“DIGUARD NET”を搭載し、Miranda-VRと映像監視機器のシステム連携(時刻同期や機能連携)を実現した。これによって、トラブル発生時の現場映像を瞬時に作業員へ提供することができ、トラブル解決の時間短縮が可能となる。

今後も、H.264カメラ対応など、多様化する顧客の用途・ニーズに対応するためのシステム拡張開発を行っていく。



カメラ映像の連動表示が可能な生産ライン監視システム“Miranda-VR”

Miranda-VRは2012年7月に三菱電機コントロールソフトウェア(株)で販売を開始した。監視カメラ、映像レコーダ(三菱電機インフォメーションテクノロジー(株)の“ネカ録”)、パソコンで構成し、パソコン上でシーケンサの制御データと連携したカメラ映像表示を実現した。制御データと映像の同期再生、カメラ最大16台のライブ/記録映像同時表示が可能である。コマ送りや画像拡大/縮小等、生産現場のトラブル分析に役立つ多彩な映像表示機能も搭載している。

1. まえがき

製造業者にとって、トラブルなどによる生産ラインの異常停止は大きな損失となる。そのため、生産現場ではトラブルの早期発見・原因究明とラインの早期復旧が求められている。

このような背景から、生産現場でもカメラによる映像監視ニーズが高まっている。シーケンサなどのPLCの制御データ(以下“シーケンサデータ”という。)だけではなく、カメラの映像も活用することでトラブル原因究明の効率化が図れ、生産性改善が期待できるからである。

そこで、三菱電機及び三菱電機コントロールソフトウェア(株)は、従来のシーケンサデータ収集システム“Miranda(ミランダ)”を基に、カメラ映像の連動表示が可能な生産ライン監視システム“Miranda-VR”を開発し、2012年7月から販売を開始した。

本稿では、Miranda-VRの特長について述べる。

2. システム概要

2.1 システム構成

Miranda-VRには、PLC 1台を想定した小規模向けのLT版と、複数のPLCの管理が可能な大規模向けのHR版がある。ともに、監視カメラや映像レコーダなどの映像監視機器とMiranda-VRソフトウェアがインストールされたパソコンで構成する。なお、PLCはこのシステムの製品範囲に含まれない。

2.2 システム諸元

Miranda-VRは、従来のMirandaと同じく、シーケンサデータをパソコンに収集・保存・表示する機能がある。さらに、Miranda-VRでは、シーケンサデータと連動して監視カメラの映像を収集・保存・表示する機能を持つ。Miranda-VRの諸元を表1に示す。

表1. Miranda-VRの諸元

項目	仕様
制御データ	対応PLC 三菱電機MELSECシーケンサ(Q, QnA, A, FXシリーズ)
収集・保存・表示	LT版: 最短10ms間隔、最大512点 HR版: 最短5 ms間隔、最大16,384点 (数値以外にも多彩なグラフ表示が可能)
監視カメラ	三菱電機MELOOK DG IIシリーズを始め、下段の映像レコーダがサポートする全機種に対応 (現版はMotiion JPEGだけであるが、2013年10月からH.264カメラにも対応)
映像レコーダ	三菱電機インフォメーションテクノロジー(株)製 ネカ録(500GB~24TB)
カメラ接続台数	LT版: 最大16台 HR版: 最大64台
表示性能	・ライブ映像と記録映像 ・最大 16画面、同時表示可能
画像品質	フレームレート: 1~30fps/台 解像度: 1280×960(SXVGA), 640×480(VGA)

JPEG: Joint Photographic Experts Group
SXVGA: Super eXtended VGA
VGA: Video Graphics Array

2.3 機能概要

2.3.1 シーケンサデータ収集・表示機能

Miranda-VRは、収集したシーケンサデータをトレンドグラフや棒グラフなどで、グラフィカルに表示できる。また、アラーム設定・表示も可能である。これらの機能によって、作業員のデータ解析やライン監視の作業負荷を軽減することができる。図1に、トレンドグラフ表示例を示す。

2.3.2 カメラ映像連携機能

Miranda-VRでカメラ映像連携を実現するために、三菱電機のセキュリティ構築プラットフォーム“DIGUARD NET”⁽¹⁾⁽²⁾をMiranda-VRに搭載した。DIGUARD NETは、三菱電機の映像監視システムを始め、様々なセキュリティシステムをシームレスに接続・連携する共通プラットフォームである。これによって、Miranda-VRと三菱電機映像監視機器とのシステム連携(時刻同期や機能連携など)が可能となり、Miranda-VR上で多彩な映像監視機能を実現することができた。その1つが、シーケンサデータとカメラ映像の連携表示機能である。この機能の詳細は3章で述べる。

3. システムの特長

3.1 シーケンサデータとカメラ映像の連携表示機能

生産現場の作業員は、シーケンサデータを監視することで、生産ライン上のトラブル発生をほぼ認識することができる。しかし、トラブルの発生経緯や要因をシーケンサデータだけから認識することは熟練者でも困難である。そのため、生産ラインに監視カメラや映像レコーダなどの映像監視システムを設置し、映像も活用してトラブル原因究明にあたる製造業者が増えてきた。

しかし、シーケンサデータの監視と、カメラ映像の監視は、それぞれ異なるシステムであるため、カメラ映像を効率良く活用することができなかった。例えば、シーケンサデータの監視システムで作業員がトラブル発生を認識しても、発生時のカメラ映像を映像監視システムから検索・表示するのに時間がかかっていた。

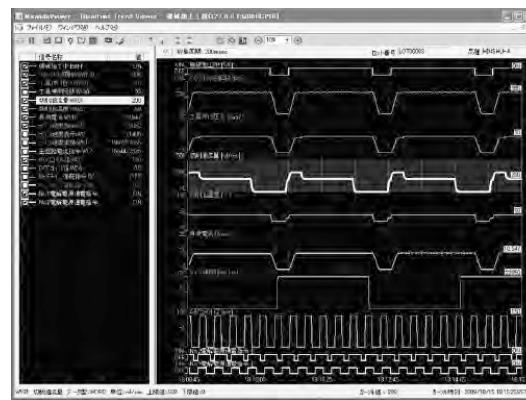


図1. Miranda-VRのトレンドグラフ表示

そこで、Miranda-VRでは、シーケンサデータのグラフ画面とカメラ映像画面を並べて表示し、グラフ画面の時刻カーソルを移動させるだけで、該当时刻のカメラ映像を映像レコーダから抽出して表示するカメラ映像連携表示機能を開発・搭載した(図2)。この機能はMiranda-VRのアラーム表示とも連携してカメラ映像を表示することもできる。また、DIGUARD NETによってMiranda-VRと映像レコーダを定期的に時刻同期させているため、シーケンサデータのトレンド(遷移)とカメラ映像(動画)をミリ秒精度で同期再生することも可能である。

この機能によって、トラブル発生時に現場の該当映像を瞬時に作業員へ提供することができるため、トラブル解決時間及び生産ライン復旧時間の短縮が可能となる。

3.2 多彩な映像再生制御・画像調整機能

Miranda-VRのカメラ映像連携では、生産ライン上のトラブル原因究明・解析の用途に必要な、様々な映像再生制御機能や画像調整機能を搭載している。

例えば、映像再生制御は、通常再生、一時停止、早送り／早戻し(速度は設定変更可能)、コマ送り／コマ戻し等、多くのトリックプレイ機能を搭載した。

また、画像調整では、旋回カメラのPTZ(パン／チルト／ズーム)操作(図3)、画像の拡大／縮小(図4)、カメラ映像画面のレイアウト変更(図5)、画像保存等、多彩な

調整機能を搭載した。

3.3 映像保存機能

Miranda-VRでは、カメラ映像を映像レコーダに蓄積する。映像レコーダは、三菱電機インフォメーションテクノロジー株の“ネカ録(500GBから24TBまで)”を採用しており、用途に応じて容量を選択することができる。例えば、カメラ4台、VGAサイズ、5コマ/秒のカメラ映像の場合、500GBで約7日間の蓄積が可能である。しかし、この例の場合、トラブル発生時などの重要な映像シーンも7日以上経過すると映像レコーダから削除されてしまう。

そこで、Miranda-VRでは、重要な映像シーンを映像レコーダから抽出して、シーケンサデータとひと付けながらパソコンにバックアップ保存する映像保存機能も開発・搭載した(図6)。保存する映像はユーザーが設定できる。アラーム設定と連動したり、常時保存することも可能である。

また、この機能で保存した映像もシーケンサデータと同期させて表示するオフライン再生が可能である。これによって、Miranda-VRを映像レコーダから切り離して、パソコンだけを現場に持ち込み、現場でトラブル発生時の映像を確認したり、現在の状況と比較分析したりすることができる。



図2. カメラ映像連携表示機能



図3. 旋回カメラのPTZ操作

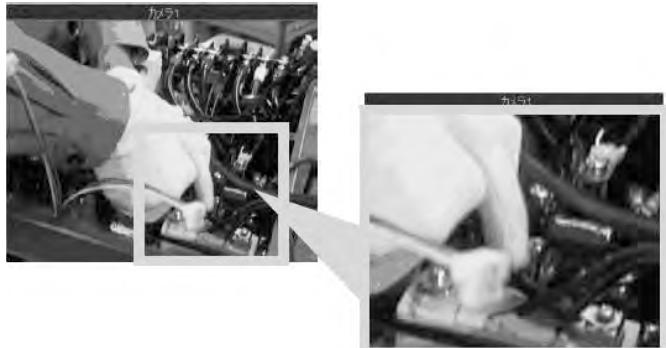


図4. 画像の拡大／縮小



図5. レイアウト変更

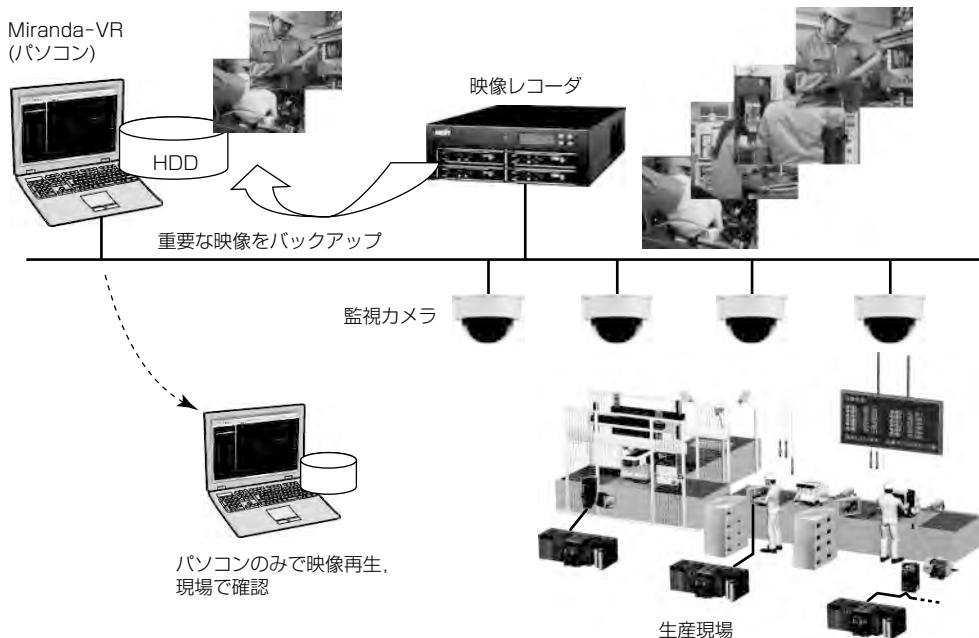


図6. 映像保存機能

4. む す び

今回、三菱電機及び三菱電機コントロールソフトウェア株は、三菱電機のセキュリティ構築プラットフォーム“DIGUARD NET”を用いて、カメラ映像の連動表示が可能な生産ライン監視システム“Miranda-VR”を開発した。これによって、シーケンサデータだけではなく、カメラ映像も活用して、生産現場におけるトラブル原因の早期究明を可能にした。また、Miranda-VRは、シーケンサデータと同期可能な映像表示や、多彩なトリックプレイ・画像調整や、映像のバックアップ保存機能等、効率良くトラブル分析を行うための様々なカメラ映像表示・制御機能も搭載している。

このような生産ラインの監視システムは、製造物や製造場所(国内／海外)、生産ライン規模や作業員数等によって、その用途やニーズが異なる。実際に現場の声を聞いてみると、カメラは少数でいいが高い画質が必要であったり、カメラ数十台又は長期保存を求めたりするなど多様である。

今後は、このように多様化する顧客の用途・ニーズに対応するために、システム拡張開発を順次行っていく予定であり、直近ではH.264カメラにも対応する。H.264カメラ対応によって、カメラ映像の蓄積時間、カメラ台数の拡大及び画像品質の向上が可能となり、より幅広く顧客要望に対応できる。

また将来的には、映像監視機器に不慣れな生産現場作業員でも簡単にカメラ設定ができる設定支援機能や、画像処理によって生産ラインの異常検知を支援する技術の開発に取り組んでいく。

参 考 文 献

- (1) 竹田昌弘, ほか: 三菱電機トータルセキュリティソリューション“DIGUARD”, 三菱電機技報, 82, No.4, 245~248 (2008)
- (2) 三浦健次郎, ほか: セキュリティ構築プラットフォーム“DIGUARD NET”, 三菱電機技報, 82, No.4, 249~254 (2008)