

三菱電機技報

2

2019

Vol.93 No.2

安心・安全・快適な社会を切り拓く先端技術—デバイスから宇宙まで—



目次

特集「安心・安全・快適な社会を切り拓く先端技術—デバイスから宇宙まで—」 Society 5.0, SDGs実現に向けた先端技術の貢献… 巻頭言 1 小山 浩	
安心・安全・快適な社会を切り拓く先端技術… 巻頭論文 2 近岡 繁	
温室効果ガス観測技術衛星 2号(GOSAT-2)…………… 7 上野信一・前島孝晴	
風力発電向けナセル搭載ドップラーライダー試作機…………… 11 高林幹夫・梶山 裕・崎村武司・小竹論季・柳澤隆行	
三菱モバイルマッピングシステム“MMS-G” 試作機の海外での検証…………… 15 金子幸司・加賀谷篤大・富樫健司	
ダイナミックマップデータの自動図化…………… 19 高橋由華子	
技術試験衛星 9号機搭載用通信ミッション…………… 23 永易孝幸・石原秀樹・宮崎幸一・須永輝巳	
日本テレビ系列向けSNGシステム…………… 27 中田浩志・西脇大貴	
電磁シールドシステム“ペルセウス・シールド”…………… 31 窪田正博・金本貴志	
電波探知妨害装置…………… 35 丸山康平	
高解像度ライン磁気イメージセンサ “MICMO JS1Cシリーズ”…………… 39 尾込智和・武舎武史・浅村まさ子・山内一輝	
パッチアンテナによるタービン発電機と 高圧モータの部分放電計測…………… 43 岡田真一・久保崎 満	
新型宇宙ステーション補給機“HTV-X” サービスモジュール…………… 47 堀田成紀	
小型月着陸実証機(SLIM)…………… 52 下地治彦・芝崎裕介・清水康弘・首藤和雄	

Advanced Technologies Creating Safe, Secure and Comfortable Society Contribution of Leading Edge Technologies for Society 5.0 and SDGs Hiroshi Koyama	
Advanced Technologies Creating Safe, Secure and Comfortable Society Shigeru Chikaoka	
Greenhouse gases Observing SATellite-2(GOSAT-2) Shinichi Ueno, Takaharu Maejima	
Nacelle Mounted Doppler LIDAR Prototype for Wind Energy Mikio Takabayashi, Yutaka Kajiyama, Takeshi Sakimura, Nobuki Kotake, Takayuki Yanagisawa	
Verification of Mitsubishi Mobile Mapping System "MMS-G" Prototype in Overseas Koji Kaneko, Atsuhiko Kagaya, Kenji Togashi	
Automated Mapping System of Dynamic Map Data Yukako Takahashi	
Communication Mission for Engineering Test Satellite 9 Takayuki Nagayasu, Hideki Ishihara, Kouichi Miyazaki, Terumi Sunaga	
Satellite News Gathering System for Nippon News Network Hiroshi Nakata, Hiroki Nishiwaki	
Electromagnetic Shield System "Perseus Shield" Masahiro Kubota, Takashi Kanamoto	
Drone Deterrence System Kohei Maruyama	
High-resolution Linear Magnetic Sensor "MICMO JS1C Series" Tomokazu Ogomi, Takeshi Musha, Masako Asamura, Kazuki Yamauchi	
Partial Discharge Measurement with Patch Antenna for Turbine Generator and High-voltage Motor Shinichi Okada, Mitsuru Kubosaki	
Improvement of Japanese Cargo Transfer Vehicle "HTV-X" and Service Module Shigeki Hotta	
Smart Lander for Investigating Moon(SLIM) Haruhiko Shimoji, Yusuke Shibasaki, Yasuhiro Shimizu, Kazuo Shuto	

豆知識…………… 56

特許と新案

「無線通信装置及び無線通信制御方法」 「シールド室監視システム」…………… 57 「磁気読み取りセンサ」…………… 58	
--	--



表紙：安心・安全・快適な社会を切り拓く先端技術—デバイスから宇宙まで—

三菱電機では、安心・安全・快適な社会づくりに貢献する様々なソリューションの提供や、それを支える幅広い技術・製品の開発に取り組んでいる。

- ① 温室効果ガス観測技術衛星 2号“いぶき 2号”は、二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスの濃度を精度良くかつグローバルに観測し、そのデータを用いて地球温暖化防止に向けた国際的な取組みに貢献する。
- ② ナセル搭載ライダーは、風車上に搭載して前方の風速を計測する。その値に基づいて風車の向きやブレードのピッチ角を制御することによって、発電の高効率化や風車の長寿命化を実現する。
- ③ モバイルマッピングシステム(MMS)は、走行しながら周辺の三次元空間情報を収集でき、自動運転の実用化に向けてダイナミックマップを構築するためのキー技術となる。MMSの新製品“MMS-G”は、従来機と同等の性能を確保しつつ、三つのGNSS(Global Navigation Satellite System)アンテナを一つに集約して小型化し、可搬性・着脱性・操作性の向上を実現している。

巻/頭/言

Society 5.0, SDGs実現に向けた先端技術の貢献

Contribution of Leading Edge Technologies for Society 5.0 and SDGs

小山 浩
Hiroshi Koyama



Society 5.0の概念が第5期科学技術基本計画で提唱されてから、3年余りになります。Society 5.0は狩猟社会、農耕社会、工業社会、情報社会に続く、超スマート社会を目指すものであり、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合することによって、多様な情報を活用し、今までにない新たな価値を生み出すことを目指しています。

一方、SDGs(Sustainable Development Goals)は2015年9月の国連サミットで採択された“持続可能な開発のための2030アジェンダ”に規定された2030年までの国際目標であり、エネルギー、産業・技術革新、気候、海域、陸域等に関わる持続可能な世界を実現するための17のゴールと169のターゲットが制定されています。日本ではSDGsアクションプラン2018で、日本のSDGsモデルを特色付ける大きな柱として、“SDGsと連動するSociety 5.0の推進”等が掲げられ、Society 5.0の実現を通じたSDGsの達成に向けて取組みが進められています。

Society 5.0の実現に向けては、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム^(注1))等を通じて、高度道路交通システムや防災・減災システムなどの主要分野のプラットフォーム構築が進められてきました。2018年に閣議決定された統合イノベーション戦略では、各分野の垣根を越えてデータを連携させるためのデータ連携基盤(宇宙、地球環境、エネルギー、自動運転、防災等)と、それらの支えとなる基盤技術(AI(Artificial Intelligence)、IoT(Internet of Things)、ビッグデータ解析等)を整備することが掲げられました。

三菱電機は安心・安全かつ快適な社会の実現を目指し、環境・交通・通信・セキュリティの各分野で、先端技術を活用したシステム・機器の開発・運用を行ってきました。これらの開発・運用成果はSociety 5.0でのデータ連携基盤構築に不可欠な各種データ、要素技術を提供するものです。

環境分野では地球環境、エネルギー、防災分野での貢献を目指しています。観測衛星システムによって陸、海、大

気等の様子を長期的、かつ継続的に宇宙から観測できます。これらのデータは地球環境の把握、地球資源の把握、防災・危機管理に資するデータになります。また、レーザ光を利用するライダーによって大気中のエアロゾルの分布や温度、さらには風向や風速の観測が可能になり、風力発電装置との組合せによる発電効率向上が期待されています。

交通分野では高度道路交通(自動走行)分野への貢献を目指しています。当社が開発したモバイルマッピングシステムは道路面・道路周辺の三次元空間の高密度なレーザ点群データと画像データを走行しつつ取得する装置であり、三次元地図作成の情報源として活用されます。ここで整備された三次元地図は自動走行のほか、インフラ維持管理、防災・減災分野で活用されます。三次元地図利用に際しては、定常的な地図データ更新が不可欠です。更新作業の効率化・省力化に向け、AIを活用した三次元地図自動化ソフトウェアの開発を進めています。

データ連携基盤を支える共通技術として、通信とセキュリティに関わる先端技術開発は欠かすことができません。今後の旺盛な通信需要を宇宙から補完する次世代通信衛星・通信機器、及び現場からの情報発信を可能にするSNG(Satellite News Gathering)システムは、防災・減災、高度道路交通システム等への利活用が期待されています。データ連携基盤、通信システムでのデータセキュリティ確保は今後の重要課題です。外部からの情報システムへの侵入・妨害を防止するためのシールドシステム、電波探知妨害装置等がセキュリティ確保の要となります。

今回の特集で紹介する先端的なシステム技術と機器技術を核に、安心・安全・快適な社会の実現を目指すとともに、Society 5.0の実現を通じたSDGs達成に向け、取り組んでいきます。

(注1) 内閣府総合科学技術・イノベーション会議が司令塔機能を発揮し、府省の枠や旧来の分野を超えたマネジメントによって、科学技術イノベーション実現のために創設した国家プロジェクト。

巻頭論文

安心・安全・快適な社会を切り拓く 先端技術



近岡 繁*

Advanced Technologies Creating Safe, Secure and Comfortable Society

Shigeru Chikaoka

要 旨

近年増加する自然災害への対応、自動運転実用化に向けた開発、通信の高速大容量化、サイバーセキュリティの脅威への対応など、安心・安全・快適な社会の実現に向け、多くの解決すべき課題がある。5期科学技術基本計画で提唱されているSociety 5.0はサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させて、様々な知識や情報を共有することによって、これらの社会的課題の克服を目指すものである。今回の特集で取り上げる三菱電機の先端技術は、環境、交通、通信、セキュリティの各分野で、これらの社会的課題の解決に必要な情報・データを把握・提供し、また必要な処置を講じるものである。

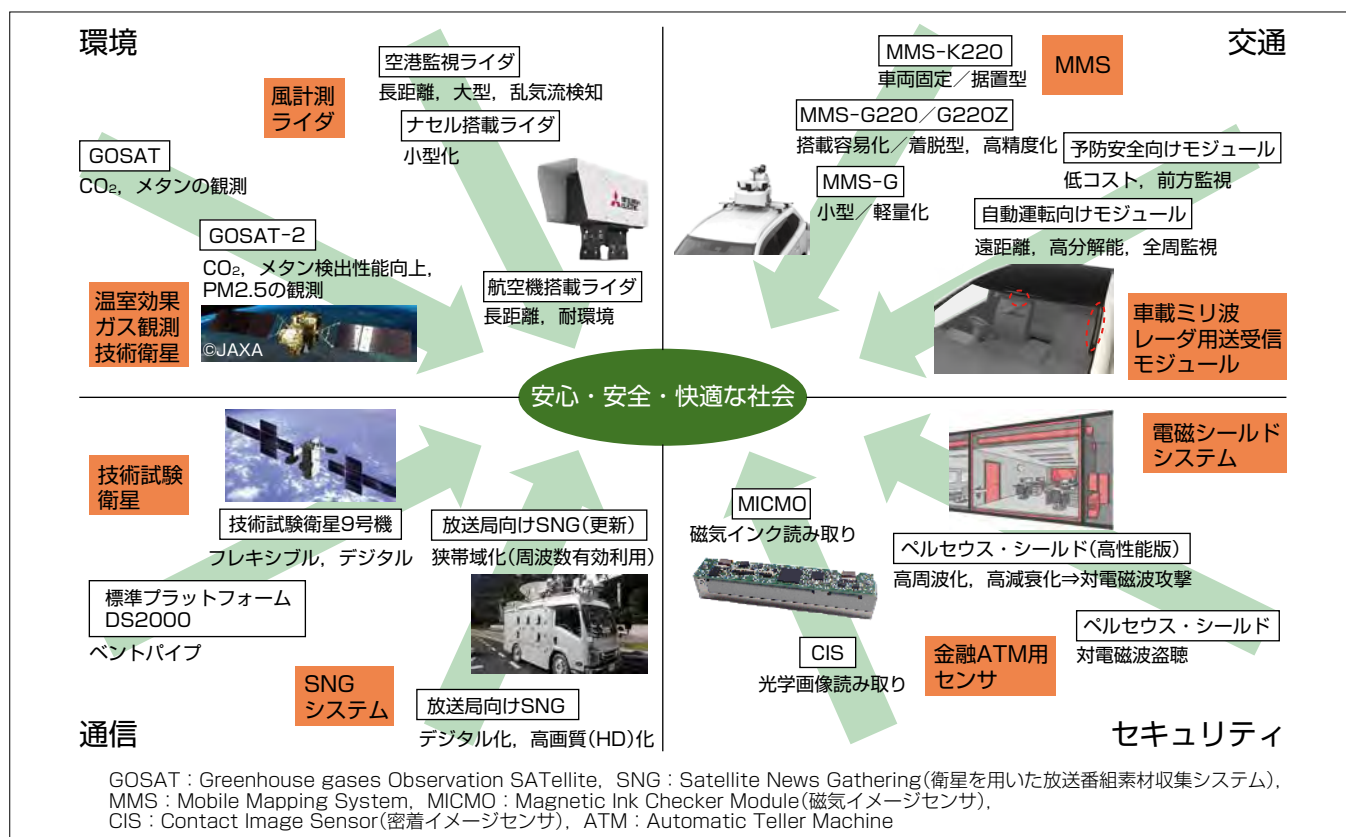
環境分野では、温室効果ガス観測技術衛星によって温室効果ガスを宇宙から観測し、気候変動予測と炭素排出量削減に資する情報を提供する。

交通分野では、車載のモービルマッピングシステム(MMS)によって道路面等の三次元空間データを取得し、共通基盤データを整備して自動運転の実現に貢献する。

通信分野では、技術試験衛星9号機を開発中であり、デジタル技術によってビームや周波数をフレキシブルに割り当て、ブロードバンド衛星通信を実現する。

セキュリティ分野では、電磁シールド室“ペルセウス・シールド”によって電磁波攻撃と電磁波盗聴の二つの電磁波脅威から貴重な情報資産を防護する。

これらの先端技術によって、当社は安心・安全・快適な社会の実現、Society 5.0の実現に取り組んでいく。



当社の安心・安全・快適な社会を切り拓く先端技術

当社は環境、交通、通信、セキュリティの各分野で社会的課題の解決に必要な情報・データ及びソリューションを提供している。社会や顧客からの要求に対応しながら技術を進化させ、安心・安全・快適な社会を実現していく。

1. ま え が き

経済発展が進み、人々の生活は便利で豊かになったが、解決すべき社会的課題は複雑化している。ゲリラ豪雨や台風等の自然災害の増加、自動運転実用化に向けた開発の進展、航空機・船舶等の移動体向け通信の大容量化と低コスト化、サイバーやテロのセキュリティの脅威の深刻化など、安心・安全・快適な社会の実現に向けて課題が山積している。

2015年に策定された5期科学技術基本計画でSociety 5.0が提唱されている。Society 5.0はサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させて、様々な知識や情報を共有することによって新たな価値を生み出し、これらの社会的課題の克服を目指すものである。

今回の特集で取り上げるシステム・機器は、環境、交通、通信、セキュリティの各分野で、広域性、常時性、即時性、正確性等の社会や顧客からの要求を満たしながら、社会的課題の解決に必要な情報・データを把握・提供し、また必要な処置を講じるものである。

本稿では、安心・安全・快適な社会の実現を切り拓く当社の代表的な先端技術について述べる。

2. 当社の先端技術の位置付け

安心・安全・快適な社会につながる行動プロセスを見ると、状況を的確かつタイムリーに把握する“センシング”，その結果を受けた的確な“処置”，確実かつタイムリーな“情報伝達”の三つの機能に分けることができる。それぞれの機能で、当社の先端技術による高度化が進められている。環境、交通、通信、セキュリティの分野での、センシング、処置、情報伝達の三つの機能と当社技術との関係を表1に示す。

それぞれのシステム・機器の特徴として、広い地域に網羅的に対応する“広域性”，災害時等でも機能を失わない“常時性”，素早く様々な観測対象に対応できる“即時性”，高い精度を実現する“正確性”が挙げられる⁽¹⁾。これらの特徴は社会や顧客からの要求事項である。環境、交通、通信、セキュリティの各分野での、特徴と当社技術との関係を表2に示す。

環境では、温室効果ガス観測技術衛星GOSATは温室効果ガスを宇宙から観測するセンシングのシステムであり、気候変動予測と炭素排出量削減に資する情報を提供する。温室効果ガスの観測は広域性と常時性が要求される。ナセル搭載ライダーは風力発電装置に搭載し、周辺の風の状況を計測するセンシングのシステムであり、風力発電システムの効率的な運用に資する情報を提供する。風力発電のリアルタイム制御に用いられるため、即時性と正確性が要求される。

交通では、MMSは道路面等の三次元空間データを取得する車載システムであり(センシング)，データの正確性が要求される。ダイナミックマップデータ自動図化ソフトウェアを使用してMMSで取得したデータを図化すること

表1. 分野、機能、当社技術の関係

機能\分野	環境	交通	通信	セキュリティ
センシング	GOSAT-2 ライダー	MMS		MICMO 電波探知妨害装置
処置		ダイナミックマップ		ペルセウス・シールド
情報伝達			技術試験衛星9号機 SNG	

表2. 分野、特徴、当社技術の関係

特徴\分野	環境	交通	通信	セキュリティ
広域性	GOSAT-2		技術試験衛星9号機 SNG	
常時性				ペルセウス・シールド 電波探知妨害装置
即時性				
正確性	ライダー	MMS ダイナミックマップ		MICMO

によって、自動運転のデータ連携基盤の情報源にする。

通信では、ブロードバンド環境の世界的な普及拡大を背景にして、技術試験衛星9号機を開発中であり、商業衛星通信の大容量化とライフサイクル・コストの低減を目指す。SNGシステムは災害時等のニュース配信で活躍中である。共に、通信の広域性、常時性、即時性が要求される。

セキュリティでは、電磁シールド室であるペルセウス・シールドは電磁波攻撃と電磁波盗聴の二つの電磁波脅威に対する防護になる。電波探知妨害装置は新しい脅威であるドローンの電波を感知し(センシング)，妨害し(処置)，効果的な警備を行う。共に、常時性、即時性が要求される。高解像度磁気イメージセンサ“MICMO”はATM等の金融端末で紙幣の偽札鑑別に使用されるセンシングのデバイスであり、正確性が要求される。以上の三つの機器は電磁波、ドローン、金融の領域でのセキュリティ確保の要になる。

3. 当社の先端技術

3.1 環境分野

3.1.1 温室効果ガス観測技術衛星“いぶき2号”

環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の3機関は、温暖化の研究に貢献するために、2009年に温室効果ガス観測技術衛星“いぶき”(GOSAT)を打ち上げ、当社が衛星システム開発を担当した。世界中の二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスの濃度を宇宙から高精度に観測し、温室効果ガスの地球全体の分布、排出地域の識別を含めた、季節と年度の長期にわたる変動情報を提供することによって、温暖化防止に向けた国際的な取組みに貢献している。

“いぶき”のミッションを引き継ぎ、2018年10月29日に“いぶき2号”(GOSAT-2)を打ち上げ、より高性能な観測を開始しようとしている(図1)。二酸化炭素とメタンの観測精度を向上させるとともに、工業地域や人口密集地域などの特定地点を重点的に観測する機能を強化している。さらに、一酸化炭素やPM2.5についても観測対象とすることで、温暖化防止、温室効果ガス削減等の地球環境の保全に引き続き貢献していく。

3.1.2 ライダ

風計測ライダは、大気中のエアロゾルに対してレーザ光を送受信し、受信光のドップラー周波数シフトから風速を計測するセンサである。

当社は国内外の空港へライダを納入し、運用が進んでいる。風力発電装置に搭載するライダを市場投入するために、開発・評価中である。さらに、航空機搭載ライダの開発にも取り組んでいる。

空港では乱気流が航空機の離着陸の安全に多大な影響を及ぼす。空港の乱気流の検知には電波を使ったレーダも使われるが、レーダは雨や霧からの反射波を検知するものであり、雨や霧がない晴天時の乱気流についてはレーダによる検知は困難であり、光を使ったライダが有効である。国内外の空港で当社のライダの運用が進んでいる。長距離の風計測が可能な地上設置のライダが使われており、航空機の安全な離着陸に貢献している。

環境問題やエネルギー資源問題への配慮から、クリーンで無尽蔵な風力エネルギーを利用した風力発電の利用が進んでいる。風力発電は風向きや風速の変動に対応することによって、安定かつ効率的に発電するとともに、装置自体の長寿命化を図ることができる。

風力発電で、風の状況をタイムリーかつ正確に把握するために、風計測ライダの開発・評価が進んでいる。風車のタワー上の発電部を収納するナセルと呼ばれる箇所にライダを搭載することから、ナセル搭載ライダと呼ばれる。時々刻々と変動する風車への到来風を事前に計測し、風車の向きやブレード(羽根)のピッチ角を制御することによって、発電効率の向上や風車各部の過重負荷の低減による長寿命化の効果が期待される(図2)。

当社は風力発電の発電効率向上と長寿命化のために必要とされる性能と小型・軽量を両立させるナセル搭載ラ

イダを開発した。第三者による性能評価を進めるとともに、風力発電装置のナセルに搭載して風車制御と接続し、フィールド実証を進めていく。

当社は航空機搭載ライダの開発も進めている。乱気流は航空機の離着陸だけでなく、巡航での安全にも多大な影響を与えている。ライダによって晴天時の乱気流を事前に検知できれば、パイロットへ情報を提供できるとともに、将来的には制御技術で機体の動揺を低減することによって、旅客航空機の安全運行が可能になる。

3.2 交通

3.2.1 MMS

自動運転の実用化に向けて、各種開発・実証実験が進められている。自動運転に必要なのが、道路面、標識、建物等の静的な位置情報と渋滞情報や通行規制等の動的な位置情報を組み合わせたダイナミックマップと呼ばれる高精度三次元地図である。ダイナミックマップデータのうち、静的な位置情報については、道路を走行するMMSによってデータを取得し、取得したデータから自動図化ソフトウェアによって生成する。

MMSは、レーザ計測器、デジタルカメラ及びGPS(Global Positioning System)アンテナ・受信機によって、道路面と道路周辺の三次元空間情報(位置、形、色)を収集する車両搭載型の計測装置であり、広範囲の三次元空間情報を高精度かつ高効率・低コストで収集することによって、公共測量や地図作成などの各種業務の効率化に貢献している(図3)。

これまでは国内での販売が中心であったが、海外市場での展開も見据え、小型化と着脱性・操作性の向上を図ったMMSを開発している。従来機では三つのGPSアンテナを用いていたが、これの一つにして従来機と同等の性能を確保しながら、装置全体の小型・軽量化を図っている。

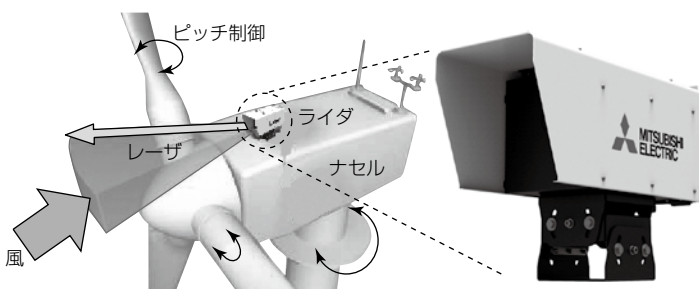


図2. ナセル搭載ライダ

©JAXA

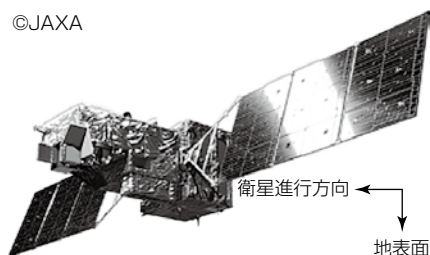


図1. 温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT-2)



図3. MMS

3.2.2 ダイナミックマップデータの自動図化

MMSによって取得した三次元レーザ点群データとカメラ画像データから、道路面上の区画線、路肩縁、及び道路の標識、標示等の地物を検出し(静的な位置情報)、これを図化することでダイナミックマップを生成する。従来は手作業で作成していたが、これを自動図化ソフトウェアによって効率化することで、地図作成のコスト削減と時間短縮を図る。

MMSと自動図化ソフトウェアを連携・一体化することによって高精度三次元地図を整備し、これを自動運転の共通基盤データにすることで、自動運転の実現に貢献していく。

3.3 通 信

3.3.1 技術試験衛星9号機

近年、地上・航空機・船舶を対象とした高速大容量の衛星通信の需要が高まっている。技術試験衛星9号機は、国内の宇宙産業の国際競争力強化及び防災通信等の社会インフラの実用化を目的としたものであり、当社は総務省、JAXA、NICTとともに開発・製造中である。2021年度に打ち上げが予定されている(図4)。

衛星ペイロードには総務省委託契約の下で開発中のデジタルチャネライザ及びDBF(Digital Beam Forming)プロセッサが搭載され、フレキシブルな周波数やビームの割当てが可能になる。デジタルチャネライザとDBFプロセッサは同一機器を使用し、その処理を地上コマンドによって切り替える。衛星通信が持つ広域性、常時性、即時性を生かしつつ、デジタルチャネライザとDBFプロセッサの導入によって、高速大容量の衛星通信を実現する。

3.3.2 SNG

SNGは、放送局がニュースや番組で用いるために取材先で撮影した映像を、通信衛星を介して収集・配信する車載システムである。通信衛星の方角の空が開けてさえいれば、どこからでも通信できるという衛星通信の持つ広域性、常時性、即時性から、災害、事件、スポーツ、イベント等で放送局によって利用されている(図5)。

当社は最新の国際標準規格であるDVB-S2Xに対応した衛星通信用モデムを開発し、多値変調の高度化と狭帯域



図4. 技術試験衛星9号機

フィルタの採用によって、伝送可能な映像信号を4波から6波に増やし、周波数利用効率の向上(衛星回線利用料の軽減)を実現した。また、従来の電子管に比べて長寿命の半導体増幅器(GaN(窒化ガリウム)-FET(Field Effect Transistor))を用いた大電力増幅器SSPA(Solid State Power Amplifier)を開発し、保守性の向上及び運用停止期間の短縮を実現した。さらにSSPAの筐体(きょうたい)を防塵(ぼうじん)・防水構造として屋外のアンテナ直近に設置することによって、車内スペースの有効活用と高周波信号の電力損失の低減を実現できた。

3.4 セキュリティ

当社は、情報はもとより、電磁波、ドローン、紙幣偽装の脅威に対するセキュリティ対策の開発を行っている。

3.4.1 電波探知妨害装置

小型無人機(ドローン)が容易に入手可能になり、急激に普及している。近年は災害時の空撮や高所構造物の安全検査等に活躍しているが、悪意を持って操縦された場合に社会に重大な影響を及ぼす。例えば、ドローンの高い機動性を生かし、重要防護施設を破壊するテロ行為が懸念される。2015年に首相官邸屋上に放射性物質を搭載したドローンが落下する事件が発生しており、ドローンに対するセキュリティ対策の必要性が高まっている。

ドローンが放射する電波を捉えてドローンを遠距離で探知するとともに、これを妨害する電波探知妨害装置を開発した(図6)。最大3kmの探知及び妨害を実現している。常時性と即時性の特徴を持ち、探知・妨害による防護エリアを形成することで、効果的なドローン警備を実現する。



図5. SNG

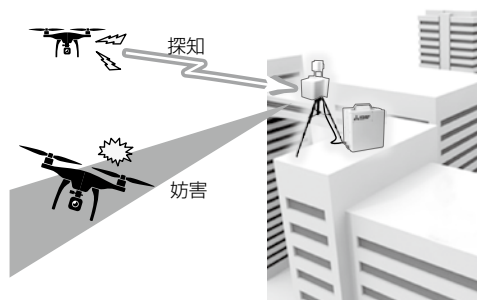


図6. 電波探知妨害装置

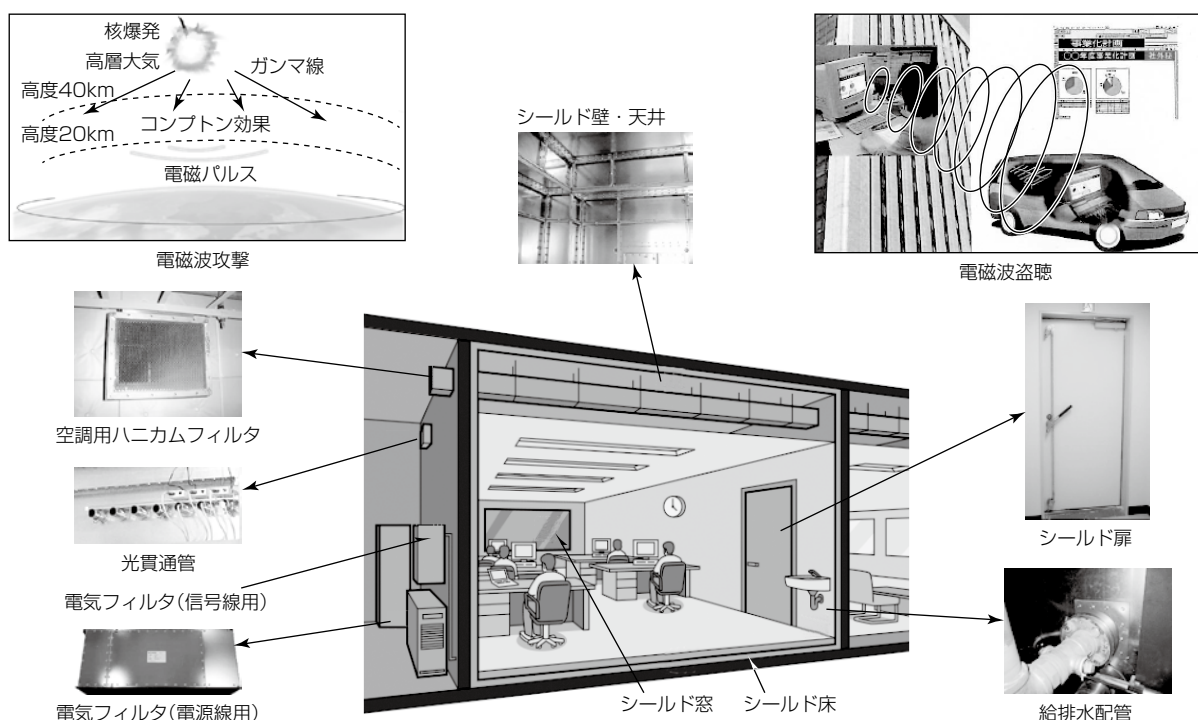


図7. ペルセウス・シールド

3.4.2 ペルセウス・シールド

現代オフィスは、二つの目に見えない電磁波脅威である“電磁波盗聴”と“電磁波攻撃”にさらされている。当社が提供する電磁シールドシステム“ペルセウス・シールド”はこの二つの電磁波脅威への対策である(図7)。

電磁波盗聴とは、電子機器、特に情報通信機器から生ずる不要電子ノイズ(漏洩(ろうえい)電磁波)に含まれる有益な情報を受信・再現することによる盗聴行為である。初期のペルセウス・シールドは電磁波盗聴への対策として開発された。

ペルセウス・シールドは居室単位や建屋単位を対象とした比較的規模の大きいシールド室である。薄板鋼板から成るシールド層を建築躯体(くたい)の内側に隙間なく施工するとともに、シールド扉、シールド窓、電気フィルタ、貫通管、ハニカムフィルタを採用し、さらに24時間連続でシールド性能を監視することによって、所望のシールド性能を確保している。

近年、電磁波攻撃への対策への必要性が高まってきた。電磁波攻撃とは、電子機器に固有のイミュニティ限度値をはるかに超える電磁波を照射することによって、機器の破壊、異常をもたらす攻撃である。電磁波攻撃に対する防護のために、ペルセウス・シールドは高周波化及び高減衰化(高シールド性能)を実現している。

3.4.3 高解像度磁気イメージセンサ“MICMO”

近年、偽札が精巧化しており、ATM等の金融端末装置ではより精度の高いセキュリティ対策が求められている。金融端末装置には光学センサ(可視光、赤外線、紫外線)、磁気センサ、厚みセンサ等が搭載されており、各センサの読み取り精度を上げることで偽札鑑別能力の向上を図っている。

当社は光学センサとしてCIS、磁気センサとして高解像度磁気イメージセンサ“MICMO”の開発・製造を行っている。

MICMOは金融端末装置に搭載され紙幣や小切手等に含まれる磁気インク等の磁気情報を読み取るデバイスであり、正確性、すなわち高い解像度が要求される。従来の磁気センサの画素ピッチ10mmに対して、MICMOは0.5mmピッチと20倍の解像度を実現しており、紙幣等のより詳細な磁気情報をイメージとして出力できる。偽札鑑別能力の向上、紙幣のセキュリティ向上に貢献する。

4. む す び

今回の特集で取り上げたシステム・機器は、環境、交通、通信、セキュリティの各分野で、広域性、常時性、即時性、正確性等の社会や顧客からの要求を満たしながら、社会的課題の解決に必要な情報・データを把握・提供し、また必要な処置を講じるものである。これらのシステム・機器は、状況を的確かつタイムリーに把握する“センシング”、その結果を受けた的確な“処置”、確実かつタイムリーな“情報伝達”の機能を持つ。

さらに、これらのシステム・機器をIoT(Internet of Things)で有機的につなげて、様々な知識・情報を共有化し、AI(人工知能)によって必要なときに、必要な情報を、必要な形で提供することで、安心・安全・快適な社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 宮崎守泰：安全・安心・防災に貢献する先進技術，三菱電機技報，91，No.2，96～100（2017）

温室効果ガス観測技術衛星 2 号 (GOSAT-2)

上野信一*
前島孝晴*

Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2)

Shinichi Ueno, Takaharu Maejima

要 旨

2018年10月に打ち上げられた温室効果ガス観測技術衛星 2 号“いぶき 2 号”(Greenhouse gases observing SATellite-2: GOSAT-2)は、2009年 1 月に打ち上げられた世界初の温室効果ガス観測技術衛星“いぶき”(GOSAT)の後継として環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構の 3 機関指導の下、三菱電機が衛星システム開発を担当した。COP21で採択された“パリ協定”で、“透明性の高い”枠組みの下で、世界各国が温室効果ガス排出量の報告が義務づけられた。日本政府は衛星データを用いて排出量や削減量を比較・評価することが“透明性の高い”方法で報告するカギとなると位置付けており、GOSAT-2はこの枠組みへの貢献を目的としている。

GOSAT-2はミッション機器として、“いぶき”のミッションを引き継ぎ、温室効果ガスの観測精度向上(前号機の約 8 倍)、雲回避機能による有効観測データの増加を目指した温室効果ガス観測センサ 2 型(TANSO-FTS-2)と、TANSO-FTS-2の観測に誤差を及ぼす雲の有無や健康への影響が懸念される“PM2.5”などの大気浮遊物質の分布を観測可能な雲・エアロソルイメージャ 2 型(TANSO-CAI-2)の 2 種類のセンサが搭載されている。TANSO-FTS-2センサは二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスをフーリエ分光法で観測する。TANSO-CAI-2は、通常のプッシュブルーム方式であり、前方視／後方視の機能を持っている。



種子島宇宙センターでのプレス公開時のGOSAT-2

2018年9月2日に種子島宇宙センターでプレス公開された、H-IIAロケット搭載直前のGOSAT-2の機体(サイズ:高さ5.8×幅2.0×奥行き2.1(m))である。ミッション機器及び一部衛星システムはコンタミネーションによる性能劣化を防ぐため打ち上げ時に外すカバーが取り付けられている。

1. ま え が き

温室効果ガス観測技術衛星2号“いぶき2号”(GOSAT-2)は、環境省(MOE)、国立環境研究所(NIES)、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の3機関による共同プロジェクトで、2009年1月に欧米に先駆けて打ち上げられた世界初の温室効果ガス観測技術衛星である“いぶき”(GOSAT)⁽¹⁾⁽²⁾の後継衛星として開発された。

“いぶき2号”にはミッション機器として、温室効果ガス観測センサ2型(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation/Fourier Transform Spectrometer 2:TANSO-FTS-2)と、雲・エアロソルイメージャ2型(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation/Cloud and Aerosol Imager 2:TANSO-CAI-2)を搭載している。TANSO-FTS-2は、短波長赤外及び熱赤外波長域を用い、地球表面での太陽散乱光及び大気の熱輻射(ふくしゃ)を光源とし、地心方向の大気分光観測を行うセンサである。TANSO-CAI-2はTANSO-FTS-2で二酸化炭素を測定する際に誤差要因となる雲の有無を判定し、TANSO-FTS-2の導出精度を向上させるための補助センサであるとともに、健康への被害が懸念される大気に浮遊するエアロソル(大気粒子状物質)の光学的厚さ及びオングストローム指数を基に、“PM2.5”のような微小粒子状物質及び黒色炭素量を導出するために、前方視／後方視の機能を持つバンド数10のマルチスペクトルセンサである。

“いぶき2号”は2018年10月29日13時8分に種子島宇宙センターから、H-IIAロケット40号機で打ち上げられた。運用期間は、打ち上げ後5年間であり、高度約613km、軌道傾斜角約97.84度、6日間回帰の太陽同期準回帰軌道(降交点通過地方時13時±15分)である。現在“いぶき2号”はクリティカルフェーズ運用、初期チェックアウトの初期性能確認を完了し、初期校正フェーズに移行している。

2. 衛星システム

2.1 システムの外観

衛星システムの外観を図1、軌道上での飛翔(ひしょう)状態の想像図を図2に示す。また、衛星システムの構成を図3に示す。

2.2 システム構成

この衛星のシステム構成を検討する上で考慮している主要なポイントを次に述べる。

(1) ロケットインタフェース

フェアリング内の許容包絡域／衛星分離部結合／アクセスドア／電波透過窓／クロッキング／振動・衝撃環境等、衛星が確実にロケットに搭載されて問題なく打ち上げができる設計にした。

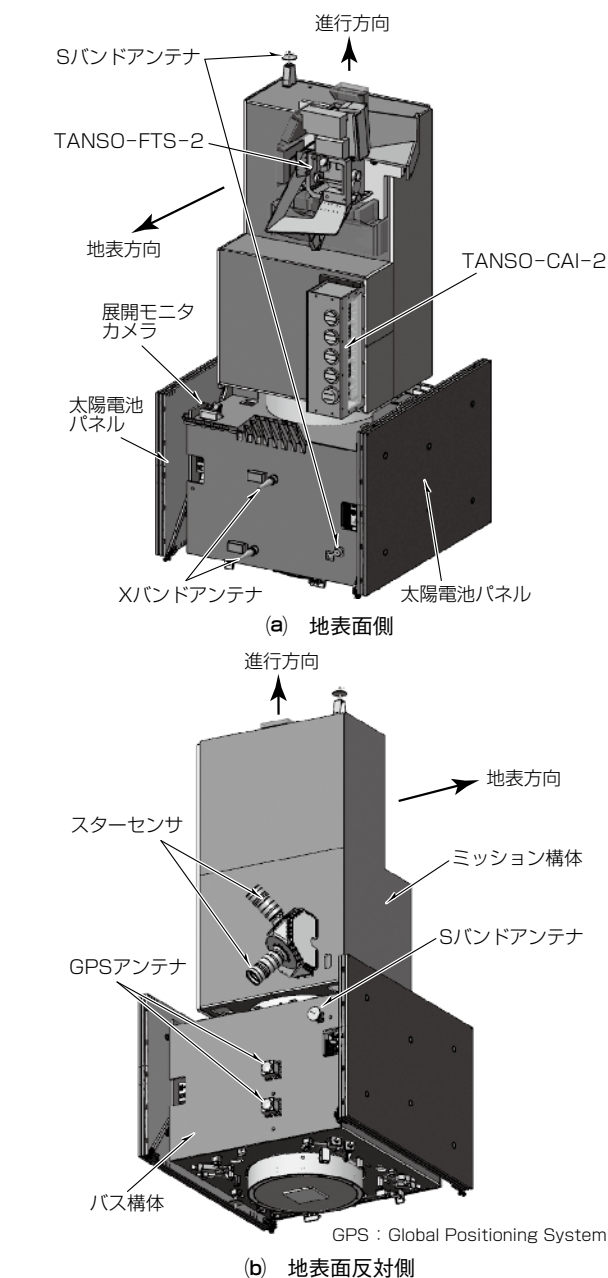


図1. 衛星システム

©JAXA

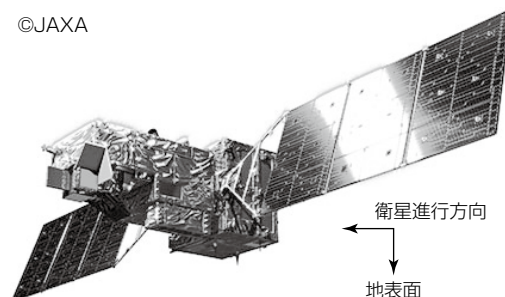


図2. 軌道上での飛翔状態の想像図

(2) ミッションセンサインタフェース

ミッション機器の機能・性能を最大限発揮できるように衛星システムの成立性を確保しつつセンサ側の要求を最大限満足する設計にした。

(3) 通信系(RF)インタフェース

回線設計を踏まえた各アンテナの配置／線長要求／等長の要否／試験時のインタフェースポイント等，RF(Radio Frequency)の成立性を確保した設計にした。

(4) 姿勢制御インタフェース

姿勢制御系センサ類のボアサイト方向／極性／アライメント精度，スラスタの配置や(要すれば)バランスウェイトの搭載等，制御要求を満たす設計にした。

(5) 熱インタフェース

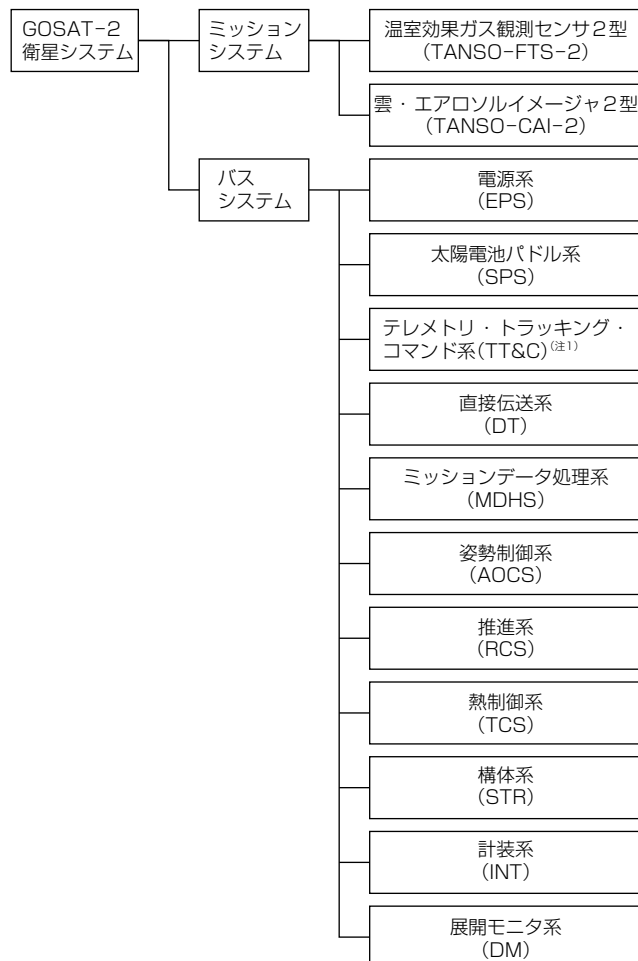
各搭載機器，構成要素の許容温度範囲を満足するように，機器自身の発熱／環境からの熱入力／排熱方法・領域／ヒーター配置等を考慮して温度マージンを確保し，適切な熱制御を行える設計にした。

(6) 構造インタフェース

インテグレーション時の強度／打ち上げ時の振動・衝撃環境／軌道上での熱変形等を考慮し，衛星構体としての成立性やアライメント保持精度を確保した設計にした。

(7) 電気インタフェース

太陽電池パネルの配置，基準グラウンドの配置や搭載機器のボンディング要求，ハーネスのルーティング要求／分割ポイント，試験時のインタフェース等を満足する設計にした。



(注1) RF系をTTC-RF系，データ処理系をTTC-DH系と呼称する。

図3. 衛星システムの構成

(8) インテグレーション性／保天性

製品を損傷させることなく確実に，かつ効率的に衛星組立てや試験を遂行できる設計にした。万一，不測の事態が発生したとしても，処置作業が効率的に短期間で実施可能なように，インテグレーション順や逆行手順の制約を最大限減らした設計にした。

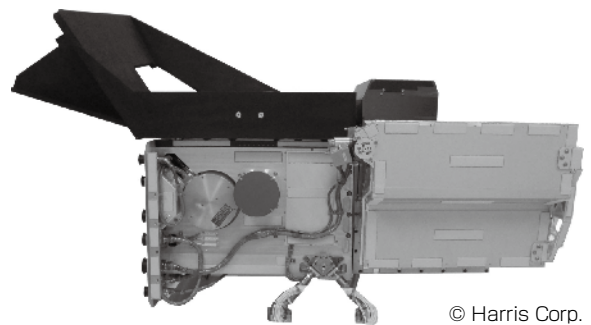
3. ミッション機器⁽³⁾

ミッション機器であるTANSO-FTS-2の外観と仕様を図4と表1に示す。

3.1 TANSO-FTS-2

TANSO-FTS-2は，“いぶき”搭載機器TANSO-FTSから次の性能向上を実現している。

- (1) 開口径拡大による観測データの品質向上によって，観測精度を“いぶき”搭載機器から約8倍向上
- (2) 観測波長領域拡大による一酸化炭素観測機能追加による人為起源の二酸化炭素データの推計
(一酸化炭素は二酸化炭素と同時に発生するが，寿命が短いため，発生源の推定が可能)
- (3) 大都市・大規模排出源の観測強化
- (4) 雲回避機能(インテリジェント・ポインティング)搭載による有効観測データの増加



© Harris Corp.

図4. TANSO-FTS-2

表1. TANSO-FTS-2の仕様

	バンド 1	バンド 2	バンド 3	バンド 4	バンド 5
分光方式	フーリエ分光方式				
波数範囲 (cm ⁻¹)	12,950 ~13,250	5,900 ~6,400	4,200 ~5,200	1,188 ~1,800	700 ~1,188
サンプリング間隔 (cm ⁻¹)	0.2				
有効サンプリング 点数	153,090		76,545		38,400
偏光観測	あり			なし	
SN比	>400	>300			
ILS半値全幅 (cm ⁻¹)	≦0.40		≦0.27		
消費電力	≦220W (平均)／350(最大)				
質量 (kg)	≦225				

3.2 TANSO-CAI-2

TANSO-CAI-2の外観を図5に示す。
TANSO-CAI-2は、“いぶき”搭載機器であるTANSO-CAIから次の性能向上を実現している(表2)。

- (1) 直下視観測から前方／後方視観測への観測方向の変更及び観測方向の増加
- (2) 観測波長領域を4バンドから、紫外(UltraViolet：UV)バンドを含む10バンドに増加させることによって、複数バンドの出力の比較から、黒色炭素や“PM2.5”等の微小粒子状物質の観測可能



図5. TANSO-CAI-2

表2. TANSO-CAIとTANSO-CAI-2の性能比較^{(1) (2)}

項目	TANSO-CAI	TANSO-CAI-2	備考
観測方向	直下視	前方視(20度) 後方視(-20度)	方向観測の追加
観測バンド数	4	10	
観測波長帯(nm)	380~1,600	340~1,600	UV観測の追加
VNIR観測幅(km)	1,000	1,000	いぶきの軌道高度 換算
VNIR分解能(m)	500	500	
SWIR観測幅(km)	750	1,000	
SWIR分解能(m)	1,500	500	

VNIR：可視近赤外(バンド1-4／6-9に対応)
SWIR：短波長赤外(バンド5／10に対応)

- (3) 短波長赤外領域バンドの分解能の向上、観測幅の拡大、性能向上

4. む す び

“いぶき2号”の開発では、当社がプライムメーカーとして担当した“いぶき”と陸域観測技術衛星2号“だいち2号”(Advanced Land Observing Satellite-2：ALOS-2)の開発成果を流用し、効率的な設計及び試験検証を実施することによって、2014年4月の開発開始から約4.5年の短期開発を実現した。

2018年10月29日13時8分に種子島宇宙センターからH-IIAロケット40号機で打ち上げられた“いぶき2号”はクリティカルフェーズ運用、初期チェックアウトの初期性能確認を完了し、初期校正フェーズに移行している。引き続き、環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構の指導の下でミッション機器の初期校正を実施し、温室効果ガスのデータの世界配信に今後も貢献していく。

参 考 文 献

- (1) Hamazaki, T., et al.: Sensor system for Greenhouse Gas Observing Satellite (GOSAT), Proc. of SPIE, **5543**, 275~282 (2004)
- (2) 中島正勝, ほか：いぶきの運用と搭載センサの軌道上性能, 電子情報通信学会技術研究報告, **110**, No.92, 121~122 (2010)
- (3) 上野信一, ほか：温室効果ガス観測技術衛星2号のミッション機器, 三菱電機技報, **90**, No.2, 111~114 (2016)

風力発電向けナセル搭載 ドップラーライダー試作機

高林幹夫* 小竹論季***
梶山 裕** 柳澤隆行**
崎村武司*

Nacelle Mounted Doppler LIDAR Prototype for Wind Energy

Mikio Takabayashi, Yutaka Kajiya, Takeshi Sakimura, Nobuki Kotake, Takayuki Yanagisawa

要 旨

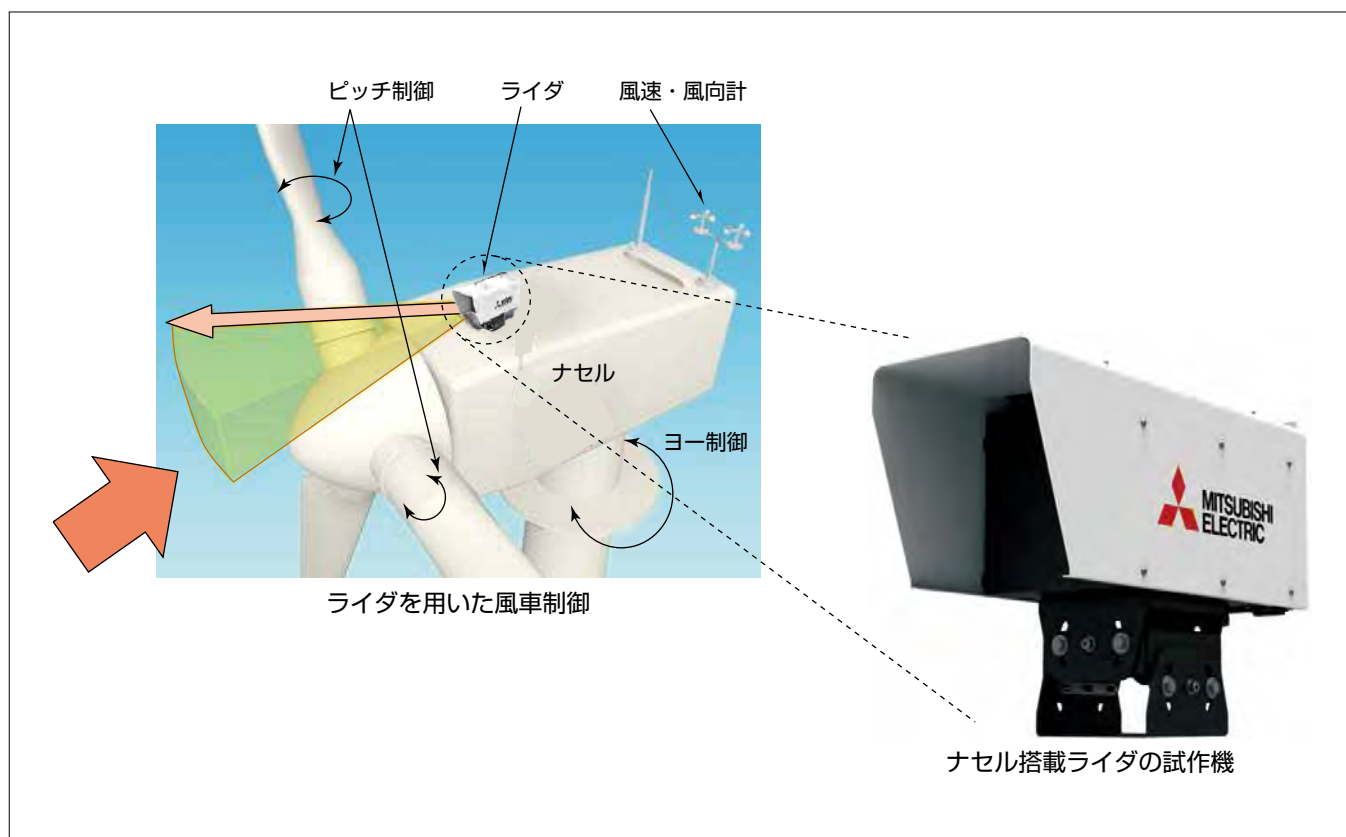
風計測ドップラーライダー(Light Detection And Ranging : LIDAR)は、大気中のエアロゾルに対してレーザ光を送受信し、受信光のドップラー周波数シフトから風速を計測するリモート風センサである。昨今、風力発電分野での風計測ドップラーライダーの活用が進んでいる。特に近年では、風車のタワー上に設置される発電部を収納したナセルと呼ばれる部分にドップラーライダー(以下“ライダー”という。)を搭載するナセル搭載ライダーの実用化に向けた評価が進んでいる。ナセル上に搭載されたライダーで風車への到来風を事前に測定することで、ヨー制御による発電効率の向上や、ピッチ制御による風車各部の過重負荷の低減、風車

長寿命化に寄与することが期待されている。

また、ナセル搭載ライダーは既存風車への設置も想定されており、可搬性も想定した構造が好ましい。

今回、風車制御に必要な性能と、コンパクトで軽量を両立させるナセル搭載ライダーを開発した。コンパクト化の鍵は、主要光部品を1枚の基板上で実装する統合光送受信ボードと、複数のビームを一つの光学系で構成する単一・多方向送受光学系である。

今後、開発した試作機で第三者評価を行い、性能評価を進めていく。また、実際に風車に搭載し、風車制御と接続させることでフィールド実証も進めていく。



ライダーを用いた風車制御とナセル搭載ライダーの試作機

風力発電用風車のナセルと呼ばれる部分にライダーを搭載し、ライダーによって到来風を測定して流入風を予測し、風車制御を行う。ヨー制御は、ナセル搭載ライダーによって予測された流入風向に対して正対するよう制御することで発電効率を向上させる。ピッチ制御は、予測された流入風に対してピッチをフィードフォワード制御することで風車のタワー、ブレード、ロータへの荷重負荷を低減する。

1. ま え が き

風計測ライダは、大気中のエアロゾルに対しレーザ光を送受信し、受信光のドップラー周波数シフトから風速(風に乗って移動するエアロゾルの速度)を計測するリモート風センサである。このセンサの風力発電での利用が進んでおり、ウィンドファーム建設前後の風況調査、風車出荷前及び設置後の評価等、利活用の幅が拡大している。近年では、風車のタワー上に設置される発電部を収納したナセルと呼ばれる部分にライダを搭載するナセル搭載ライダの実用化に向けた評価が始まっている。

ナセル搭載ライダを用いて風車前方の風を計測し、その値に基づき風車を制御することで発電を高効率化する技術は、2000年代中頃から理論実証や実験が開始された⁽¹⁾。これらの経験によって、ナセル搭載ライダが風車のヨー制御による発電高効率化、ピッチ制御による風車荷重負荷低減とそれに伴う風車の長寿命化に寄与することが理論、実験から実証されている。

ヨー制御は、ナセル上に既設置されている風向計を用い流入風に対し正対するよう制御することで発電効率を向上させる。しかし、ナセル上での風向計では、ブレード回転によって風車後方に風の乱れが発生し、正確な流入風向の計測は困難である。これに対しナセル搭載ライダを用いて乱れを受けない風車前方領域で流入風向を正確に計測し、この計測値に基づきヨー制御を行うことで、発電量向上が可能になる⁽²⁾。

一方、ピッチ制御は、ナセル搭載ライダを用いて到来風によって流入風を予測し、ピッチをフィードフォワード制御する。この制御によって、風車(タワー、ブレード、ロータ)への荷重負荷を低減することが可能になり、風車の長寿命化に貢献する⁽³⁾。さらに、風車出力の安定化に寄与でき、これが実現できれば、実運用時の出力上限値を風車定

格出力近くまで引き上げ、年間発電量向上への寄与も期待できる⁽⁴⁾。

このようなナセル搭載ライダによる制御は、効果は検証されていたものの、開発当初は風車の発電出力も数百kWと小さい一方で、ライダ装置が大きくて価格も高いことから、学術的検証にとどまっていた⁽²⁾。しかし、2010年代に入り、発電出力が3MWから洋上では6~7MWクラスの風車が登場し、費用対効果の視点からもナセル搭載ライダの有益性が認められ始めており、期待が高まっている。

一方、当社は、2003年にはナセル搭載ライダの実証実験を開始し、2014年には風況計測用の小型ライダを商用化してきた(図1)⁽⁵⁾。また、2015年には9ビームのナセル搭載ライダを学術機関向けに開発・納入してきた実績を持つ⁽⁶⁾。今回、これらの実績、技術を活用し、商用化を見据えたより軽量、コンパクトなナセル搭載ライダの試作機を開発した。

2. 装 置 概 要

図2にナセル搭載ライダ試作機の外観を示す。このライダは、W290×H300×D670(mm)の筐体(きょうたい)内部に、光送受信部と演算部を内蔵した一体型構成であり、質量は18kg(アライメント治具を除く)である。このようなコンパクトな構成は、後述する統合光送受信ボードと単一・多方向送受光学系によって実現した。

また、このライダではパルス方式を採用している。通常ライダは、CW(Continuous Waves)とパルスの2方式があり、前者が前方の単一距離だけの風計測であるのに対し、後者は複数距離の風計測(風速分布計測)が可能である。

2.1 主 要 性 能

ナセル搭載ライダ試作機の主要性能を表1に示す。このライダは40mから400mでの4方向の視線方向風速を計測する。また、それらの視線方向風速を合成することによって、各レンジでの風向を観測することが可能である。



図1. 風況観測用ライダ



図2. ナセル搭載ライダ試作機

表 1. ナセル搭載ライダ試作機の主要性能

項目	性能
観測距離	40~400m(実際の観測距離はエアロゾル濃度等によって変化する。)
高度分解能	20m
走査パターン	スイッチ切替方式
ビーム送受方向数	4
レンジ数	7レンジ
出力/表示データ	・各レンジでの視線方向風速 ・10分間平均風向風速データ
風速観測範囲	-10~60m/s
風向風速更新周期	最速1sec以内
レーザ波長	1.55 μ m帯の単一波長(JIS C 6802 クラス1Mに相当)
耐環境性	IP66, 重塩害仕様
本体寸法・質量	・W290×H300×D670(mm) (突起物は除く) ・18kg(アライメント治工具は除く)
電源条件	DC+24V \pm 10%
有効データ取得率向上	環境適応制御アルゴリズムを実装

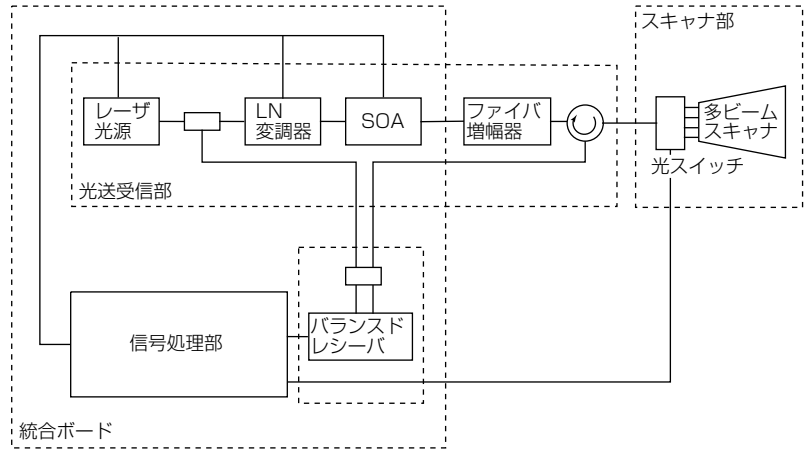


図 3. ナセル搭載ライダ試作機のシステム構成

4方向の観測は、固定ビームを電氣的に切り替えてそれぞれのビーム方向からの視線方向速度を計測する。従来の機械的スキャンに比べて瞬時に計測が可能であり、駆動系をなくしたことでメンテナンスフリー化と長寿命化を実現している。また、アイセーフ波長(近赤外、不可視)のクラス1Mのレーザを用いており、目の安全も考慮した装置となっている。さらに、このライダでは、環境適応制御アルゴリズムを実装している。一般にライダの測定可能距離は、SNR(Signal to Noise Ratio)に依存し、その値は大気中のエアロゾル濃度等の大気環境に影響される⁽⁷⁾。そこで、計測された距離-SNRに対して、所望の測定距離の風速値を得るために最適な積算回数を自律的に調整する“環境適応制御”が可能なアルゴリズムを開発した⁽⁸⁾。このアルゴリズムは風況観測用ライダに実装しているが、同様の機能をこのライダにも適用し、高可用性を実現している。

3. 装置の特長

図3に今回開発したライダのシステム構成を示す。このライダは、主に光送受信部、信号処理部、スキャナ部で構成している。今回、光送受信部の一部と信号処理部を1枚の基板に集約した統合光送受信ボードと、複数ビームを一つの光学系で構成する単一・多方向送受光学系を開発した。これらの成果を用いることで、2章で述べたとおり軽量・小型化を実現している。

3.1 統合光送受信ボード

図4に試作した統合光送受信ボードの外観を示す。この装置は、主に光送受信部と信号処理部で構成している。150×250(mm)の基板にサーキュレータとファイバ増幅器を除く光送受信部と、光部品制御と観測データ処理を行う信号処理部を実装している。

ここで光送受信部はレーザ光源とLN(ニオブ酸リチウム)変調器、半導体光増幅器(SOA)で構成している。一般



図 4. 試作した統合光送受信ボード

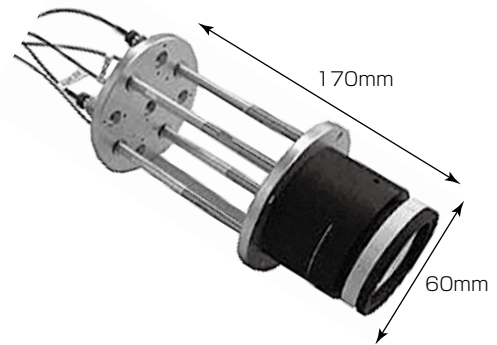


図 5. 単一・多方向送受光学系試作機

にパルス方式ライダでは、音響光学変調器(AOM)が用いられているが、フットプリントが大きくて小型化と実装で不利である。そこでSOAとLN変調器の構成によってパルス化を実現する構成を採用している。SOAだけのパルス変調では、変調時の消光比の問題によって受信信号に妨害信号が混入するが、LN変調器によるセロダイン変調を付加することでこの問題を解決している⁽⁹⁾。

3.2 単一・多方向送受光学系

図5に試作した単一・多方向送受光学系の外観を示す。従来の送受光学系は1台の光学系について、1方向のレー

ザ送受を行うものであった。これに対し、この試作機(単一・多方向送受光学系)には、取り付けるファイバコネクタの位置によってレーザ射出方向の切替えを可能にする機能を付加した。つまり、従来の性能(波面収差, 損失, ビーム径, 有効開口径)を持ちつつ, 送受光学系に係る必要体積を, 4ビームの場合1/4にできる⁽¹⁰⁾。今回のライダシステムのビーム送受方向数は4であるが, コネクタ数によって走査数を可変にできるため, 機能拡張が容易であることも単一・多方向送受光学系のメリットと言える。

4. 試作評価

図6に試作したナセル搭載ライダによる観測風景を示す。今回2台を製作し, それぞれの風速測定結果を比較して両者が一致することを確認した(図7)。また観測距離400mを実現できていることも確認した。



図6. ナセル搭載ライダ試作機による観測風景

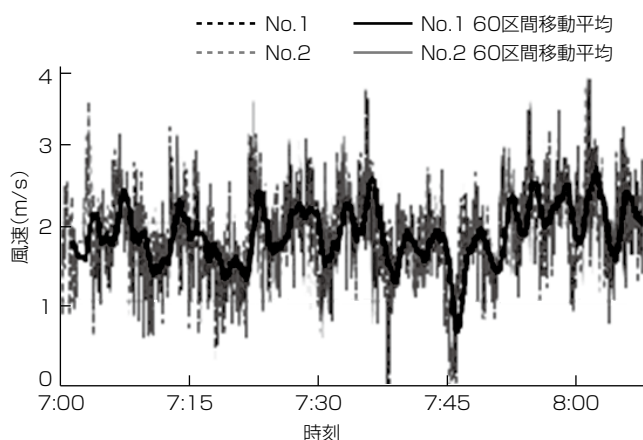


図7. 2台のナセル搭載ライダによる風速測定比較

5. む す び

風力発電向けナセル搭載ライダの試作機について述べた。今後, 第三者評価を行うとともに, 実際に風車上に搭載し, 風車制御との接続を行うことで発電効率向上, 風車荷重負荷低減などの効果検証を行っていく。

参 考 文 献

- (1) Schlipf, D., et al.: Field Testing of Feedforward Collective Pitch Control on the CART2 Using Nacelle-Based Lidar Scanner, Journal of Physics, Conference Series, **555**, 012090 (2014)
- (2) Fleming, P.A., et al.: Field-test results using a nacelle-mounted lidar for improving wind turbine power capture by reducing yaw misalignment, Journal of Physics, Conference Series, **524**, 012002 (2014)
- (3) Scholbrock, A.K., et al.: Field-Testing LIDAR Based Feed-Forward Control on the NREL Controls Advanced Research Turbine, Proc. of 51st AIAA Aerospace Science Meeting, including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition (2013)
- (4) Barber, S.K., et al.: The effect of wakes on the fatigue damage of wind turbine components over their entire lifetime using short-term load measurements, Journal of Physics, Conference Series, **753**, 072022 (2016)
- (5) 三菱電機ドップラーライダシステム
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/lidar/>
- (6) Kamada, Y., et al.: Status of research and development for lidar-assisted wind turbine control in Japan, 19th CLRC (2018)
- (7) Kameyama, S., et al.: Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for win sensing, Appl. Opt, **46**, No.11, 1953~1962 (2007)
- (8) 梶山 裕, ほか: 風況観測用ライダ“DIABREZZA”, 三菱電機技報, **89**, No.3, 182~186 (2015)
- (9) Haraguchi, E., et al.: Pulsed serrodyning technique as applied to coherent laser transmitter for wind sensing, 18th CLRC (2016)
- (10) Kotake, N., et al.: Coherent Doppler LIDAR system switching the LOS direction by wavelength of laser, 19th CLRC (2018)

三菱モービルマッピングシステム “MMS-G”試作機の海外での検証

金子幸司*
加賀谷篤大*
富樫健司*

Verification of Mitsubishi Mobile Mapping System "MMS-G" Prototype in Overseas

Koji Kaneko, Atsuhiko Kagaya, Kenji Togashi

要 旨

モービルマッピングシステム(Mobile Mapping System: MMS)は、車両にGNSS(Global Navigation Satellite System)受信機、慣性航法装置(Inertial Measurement Unit: IMU)、車両の移動量を測定するオドメータなどの測位装置と、レーザスキャナ、カメラ等の計測装置を搭載したシステムである。

走行しながら道路周辺の三次元空間情報(位置、形、色)を収集することができるため、従来の測量手法と比較して、広範囲を効率的に計測できるという特長があり、公共測量や地図作成などの分野では既に広く利用されている。三菱電機のMMSは、既に100台以上を販売してきており、測量を始めとして各種業務の効率化に貢献している。

これまでは国内での販売が中心であったが、海外市場での展開も見据え、操作性に優れている既存機種の特長を継承しつつ、より小型で着脱性・操作性の向上を図った三菱モービルマッピングシステム“MMS-G”を開発している。MMS-Gでは、従来機は三つのGNSSアンテナを用いていたものを1アンテナにして装置全体の小型化を図りつつ、従来機と同等の性能を確保できるよう設計している。

製品化に先行して製作した試作機によって、海外(オランダ)で実証試験を実施し、従来機と同等の性能が得られることを確認できた。MMS-Gは、2018年度内に販売開始予定である。



三菱モービルマッピングシステム“MMS-G”試作機と得られた点群データ

車上部にメインユニットとレーザユニットを搭載する。メインユニットには、カメラ2台、IMU 1台、各センサを制御するセンサBOXが含まれる。レーザユニットには、高精度レーザスキャナ1台、GNSSアンテナ1台が含まれる。右後輪にタイヤの回転を計測するオドメータを設置する。これらのセンサで得た情報を処理することによって、各点が座標値を持った点群データが得られる。

1. ま え が き

当社のモービルマッピングシステム(MMS)は、2007年の販売開始から10年を経て、測量分野を始めとして、地図作成、道路性状調査、トンネル変状点検、道路周辺インフラ点検など、様々な幅広い分野で活用されている。この間、MMSの機能も高性能化や利便性向上のための改良を進めてきている。

MMSは、従来の測量手法と比較すると、広範囲を効率的に計測できるというメリットがあり、公共測量や地図作成などの分野で広く利用されてきている。

今回開発しているMMS-Gは、海外展開を目的とした機種であり、従来機と同様の良好な計測精度を確保しつつ、ユーザーの利便性をより向上させるために改良を図っている。

本稿では、MMS-Gでの改良点について述べるとともに、MMS-Gの製品化に当たって先行して製作した試作機によって、海外(オランダ：ロッテルダム市街)で実証試験を実施した結果について述べる。

2. MMS-G試作機の製作

2.1 MMS

MMSとは、車両にGNSS受信機、IMU、車両の移動量を測定するオドメータなどの測位装置と、レーザスキャナ、カメラ等の計測装置を搭載したシステムであり、走行しながら道路周辺の三次元空間情報(位置、形、色)を収集することができる。収集したデータを後処理することによって、点群と呼ばれる1点ごとに座標値を持つ点の集合体を得ることができ、それぞれの点の絶対座標精度は10cm以下を実現している。図1にMMSによるデータ処理の流れを示す。

2.2 MMS-G試作機製作の目的

当社のMMSは、衛星測位の専門知識がなくても操作できるという基本コンセプトの下で設計されており、車載ソフトウェアも、後処理ソフトウェアも衛星測位の知識がなくても操作できるものにしており、ユーザーからも高評価

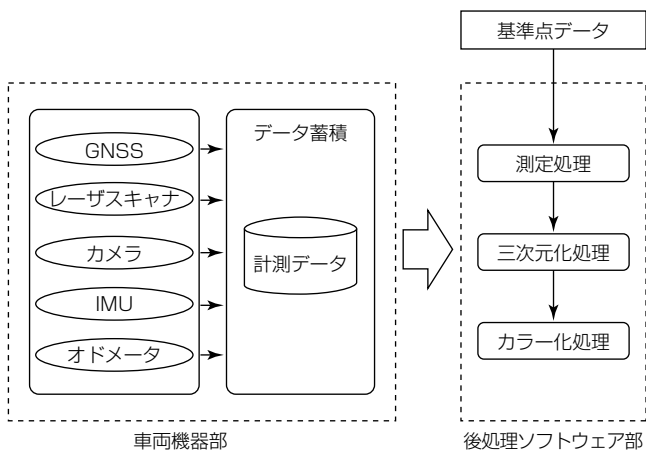


図1. MMSによるデータ処理の流れ

を得ているが、MMS-Gでは、このような従来機種での特長を継承しつつ、より小型で利便性の良いものを目指している。

具体的には、次の4項目の実現を目的としており、先行して試作機を製作し、これらの実証を海外で実施した。

- (1) 可搬性の向上
- (2) 着脱作業の省力化・簡易化
- (3) 操作性の向上
- (4) 従来機と同等の精度を確保

3. MMS-G試作機の構成と主な改良点

3.1 MMS-G試作機の構成

図2に製作したMMS-G試作機の外観を示す。MMS-G試作機は、車上部に設置する二つのユニット(センサユニット、レーザユニット)とホイールに設置するオドメータ、及び車内に設置するノートパソコンとで構成している。

表1にMMS-G220Z(試作機のベースとした従来機)とMMS-G(試作機、製品版)との仕様比較を示す。

3.1.1 車 上 部

これまで従来機で搭載していた標準レーザをなくして高精度レーザスキャナだけにしたこと、及びアンテナを一つだけにしたことによって、小型軽量化を図っている。機材は二つのユニットで構成し、メインユニットの上にレーザユニットを重ねて取り付ける構造にした。

3.1.2 車 内 部

従来機では記録ユニットとして車内にラックを設置していたが、試作機ではラックは設けず、ノートパソコンを任意の場所で操作可能にした。

これによって、機材が座席を占有することがなく、定員までの乗車が可能になり、ユーザーの利便性を高めている。

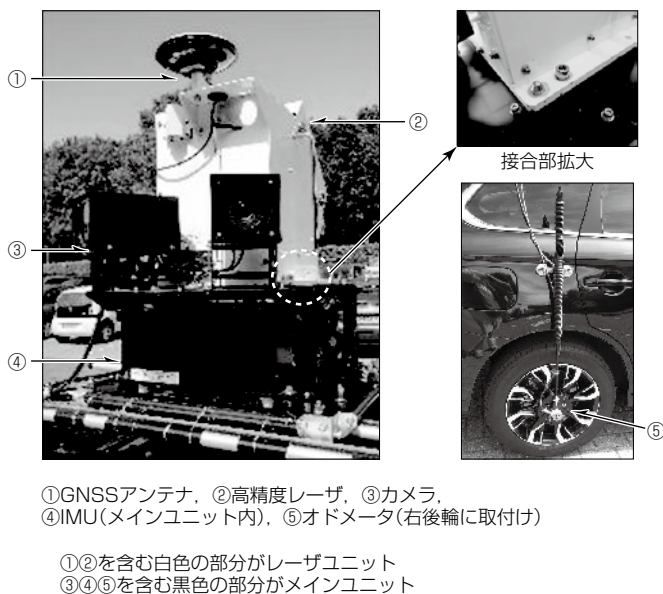


図2. MMS-G試作機

3.2 主な改良点

次に、この開発で実施した従来機種からの主な改良点を述べる。

3.2.1 1アンテナ化

従来機種では三つのGNSSアンテナを用いて、各アンテナの受信状態の違いを用いた姿勢計測を行っていたが、高精度なIMUの搭載と後処理方式の改良によって一つのアンテナのデータだけで従来と同等の姿勢計測の性能を実現した。これによって、これまで二つのアンテナ設置のために必要であった車上の設置スペースが不要になり、MMSを搭載する車種の選択性をこれまで以上に高めることが可能になっている。また、GNSS対応としてMMS-Gの製品版では、これまでの米国のGPS(Global Positioning System)とロシアのGLONASS(GLObal NAVigation Satellite System)の対応に加えてEUのGALILEOにも対応するため、測位の安定性の向上が見込める。

3.2.2 メインユニットとレーザユニットの接続

車上の装置は、メインユニットとレーザユニットを分離することによって、それぞれのユニットの質量は約30kgにしている。各ユニットの質量を抑えることによって、着脱の際の作業者の身体的な負担を軽減するとともに、作業時の安全性を高めている。なお製品版では、上部に載せるレーザユニットの質量を約20kgにし、装着をより容易にする。

二つのユニットは、位置を固定するピンによって設置の際のずれが生じない構造にしている。この構造によって、着脱によるずれを防ぎ、調整作業の軽減を実現している。

3.2.3 カメラと高精度レーザの操作の一元化

従来機種では、高精度レーザについてはカメラの撮像とは別に起動する必要があったが、カメラの撮像と高精度

レーザの起動を1回の操作でできるようにすることで、操作性を高め、運用時のユーザーの負担を軽減するとともに誤操作を防いでいる。

4. 試作機による実証

4.1 機材の着脱

海外で実際に試作機の機材の着脱を行い、従来機に比べて着脱に要する人手と時間が大幅に改善できることを確認した。

従来機“MMS-G220Z”の車両への取付けは、2人で作業をした場合に4時間程度の時間を要していたが、MMS-G試作機では、30分以内での装着が可能になった。また、機材の小型軽量化によって、これまでよりも狭いスペースで着脱可能になり、機動性の向上が期待できる。

4.2 実証コース

オランダのロッテルダム市街で、橋梁(きょうりょう)、トンネル、高速道路を含む、約16kmの評価コースを設定した。図3にコースの概略を示す。

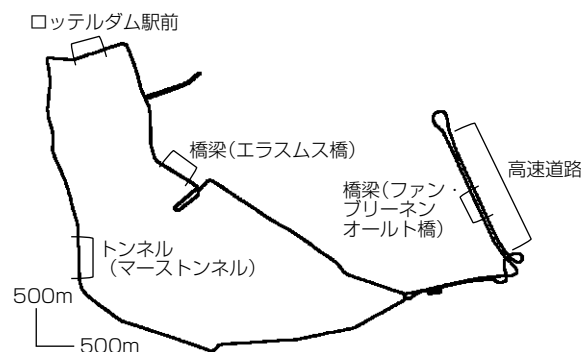


図3. ロッテルダム市街の評価コース

表1. MMS-G220ZとMMS-Gの仕様比較

仕様項目		MMS-G220Z	MMS-G(試作機)	MMS-G(製品版)
GNSSアンテナ	台数	3台	1台	
	対応システム	GPS, GLONASS		GPS, GLONASS, GALILEO
カメラ	搭載台数	2台		3台(オプションで1台追加可)
	画素数	500万画素		500万画素(オプションで1200万画素に変更可)
レーザ スキャナ (標準)	搭載台数	2台	-	
	取得点数	27,100点(1台当たり)		-
	スキャン速度	最大100Hz		-
	最大到達距離	65m		-
レーザ スキャナ (高精度)	搭載台数	1台		
	取得点数	100万点/秒		
	スキャン速度	最大200Hz		
	最大到達距離	119m		
車上部外形寸法(長×幅×高)		約1.9×0.9×0.6(m)	約0.7×0.7×0.8(m)	約0.8×0.6×0.7(m)
質量	車上部	約90kg	約60kg (内訳) レーザユニット：約30kg メインユニット：約30kg	約53kg (内訳) レーザユニット：20kg メインユニット：33kg (オプション追加時は最大15kg増)
	車内部	記録ユニット：約30kg	ノートパソコンほか：約6kg	ノートパソコンほか：約5kg
車上／車内間配線		6本		3本
消費電力(ピーク時)		AC100V：650W以下 DC12V：90W以下	AC100～240V：600W以下 DC12V：90W以下	AC100～240V：550W以下

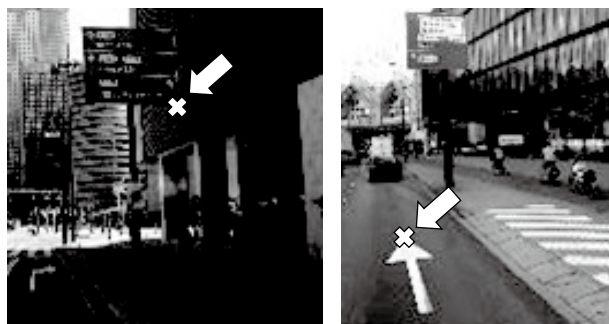


図4. 評定点の例

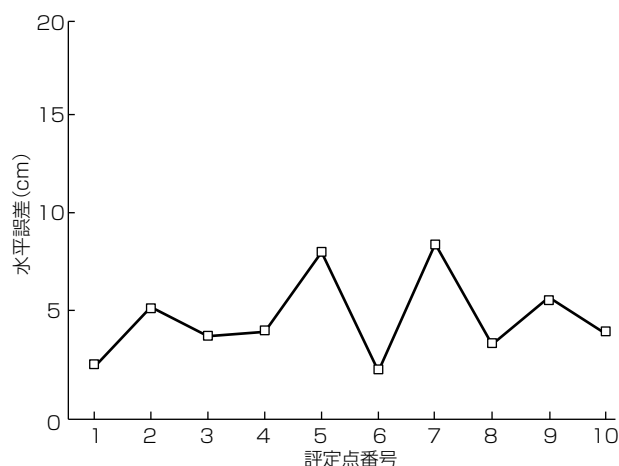


図5. 精度評価結果

また、精度検証のため、コース上に座標値を明確にした評定点を10点設けた。図4に評定点の例を示す。

4.3 実証結果

設定したコースを計測走行して得た結果を、評定点の座標値と比較して精度を確認した。評定点との比較結果を図5に示す。従来機と同様に誤差が10cm以下であり、1/500縮尺の地図生成に必要な精度を満たしていることが確認できた。

取得した点群の例を図6、図7、図8に示す。図6は高速道路を往復走行したときの点群の例であり、往復の計測で誤差が生じていないことを、中央部の鉄柱がずれていないことから確認できる。図7はトンネル走行時の点群の例であり、図8は市街地走行時での特徴的な建物の点群の例である。

5. む す び

海外向け三菱モービルマッピングシステムMMS-Gでの改良点と、製品化に先行して製作した試作機によって実際に海外で検証した結果について述べた。成果として次の点を実現していることを確認した。

- (1) 小型軽量化によって、可搬性が向上
- (2) 着脱作業の省力化・簡易化を実現



図6. 高速道路往復走行時の点群の例



図7. トンネル走行時の点群の例



図8. 市街地走行時の点群の例

- (3) カメラと高精度レーザの起動の一元化によって、操作性が向上
- (4) 海外で、従来機と同等以上の精度が得られていることを確認

海外で検証した事項と、デモンストレーションによって得られたコメントを踏まえ、製品版の完成を図っている。製品版は、2018年度内に販売開始予定である。

参 考 文 献

- (1) 石原隆一、ほか：海外向け三菱モービルマッピングシステム“MMS-G220”，三菱電機技報，91，No.2，121～124（2017）
- (2) 富樫健司：三菱モービルマッピングシステム“MMS-G220Z”，三菱電機技報，92，No.2，121～124（2018）

ダイナミックマップデータの自動図化

高橋由華子*

Automated Mapping System of Dynamic Map Data

Yukako Takahashi

要 旨

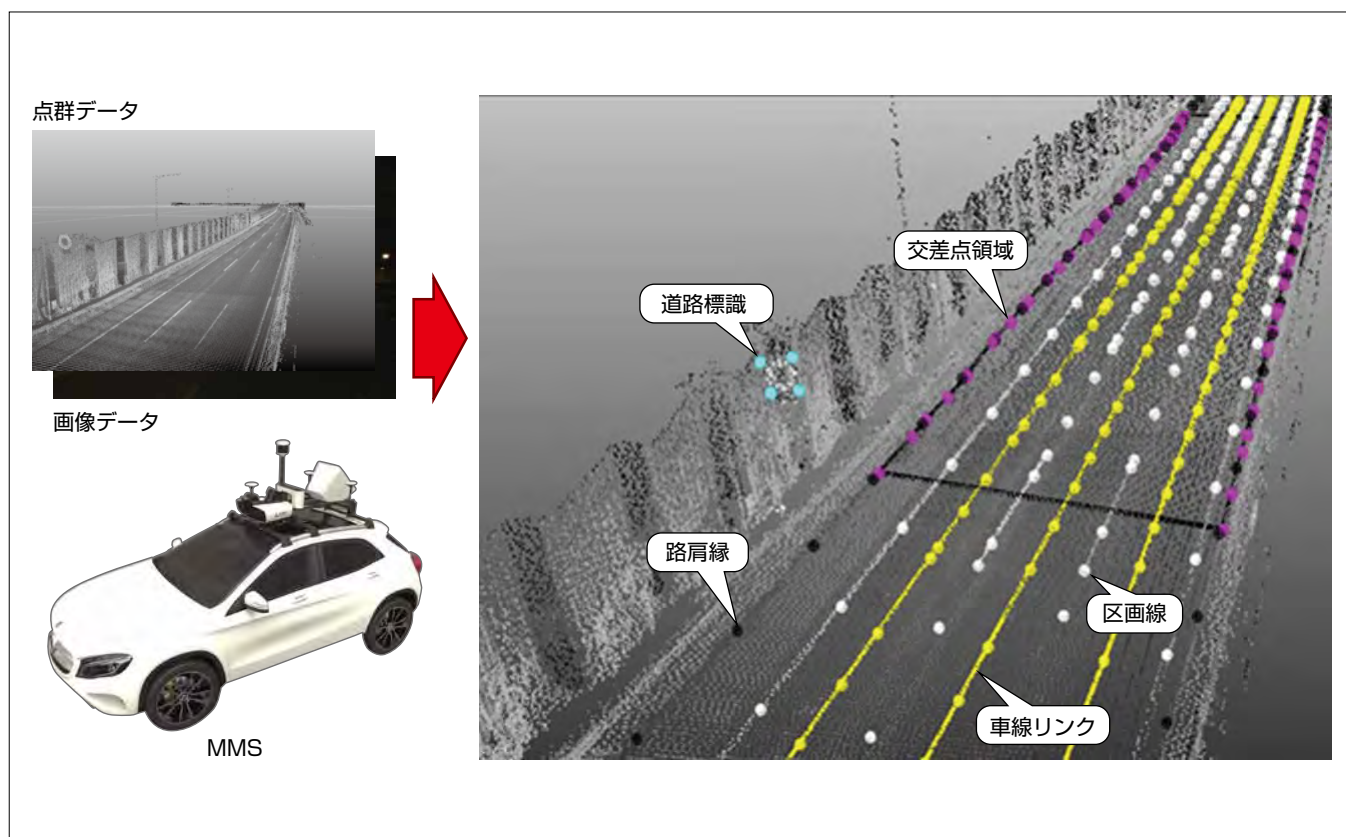
自動運転の実用化に向けて、各種開発・実証実験が進められている。車両に搭載する、自動運転のキー技術の一つである高精度三次元地図(ダイナミックマップ)を自動生成する自動図化技術を開発した。

ダイナミックマップデータはMMS(Mobile Mapping System)によって取得した三次元レーザ点群データとカメラ画像データから道路上の区画線、路肩縁、道路標識、道路標示等の地物を検出・図化することで生成する。

従来はMMSによって計測した点群データと画像データを用いて、手作業で図化していた。この図化作業を自動化し、効率化することで地図作成コストを低減することが期待される。

今回開発した自動図化ソフトウェアは、高速道路・自動車専用道路上にある地物を点群データの形状・位置情報から算出し、画像データから道路標識と道路標示の種別を画像認識で判定する⁽¹⁾ことで地物検出の自動化を実現した。また、ユーザーが生成した地図データの図化距離に応じた従量課金を行う新たなビジネスモデルも構築した。

今後は国内の高速道路・自動車専用道路だけではなく、一般道路への展開と海外対応を進め、事業化を推進していく。また、自動図化ソフトウェアをMMSと連携・一体化するなど他社差別化技術によって、市場での優位性を確保し、測位端末、MMS及び高精度地図等の高精度測位事業全体での拡大を目指す。



自動図化

MMSによって計測された点群データ・画像データを自動図化ソフトウェアに入力することで区画線、路肩縁、道路標識、道路標示などの地物が算出される。点群データから地物の座標を算出し、画像データから道路標識・道路標示の種別を判定する。自動図化ソフトウェアは、ダイナミックマップデータを生成するに当たり、これらの図化作業の自動化・効率化を実現した。

1. ま え が き

2020年に限定地域でのLevel4、2025年に高速道路での完全自動運転を実現するために国内外で研究開発が進められている。Level4の自動運転では緊急時を除き、加速・操縦・制動全ての動作を自動車が実施し、Level5ではドライバーの操作が不要な完全な自動運転となる⁽²⁾。快適で安全な自動運転技術の実用化のためには、車両に搭載される高精度なセンサと、準天頂衛星による高精度な自車位置情報など様々なセンサの利用が必要となる⁽¹⁾。

車両に搭載されるセンサの一つに高精度三次元地図(ダイナミックマップ)がある。従来手作業で実施していた三次元地図の作成を自動化することで他社差別化を図り、市場での優位性確保を狙うためにダイナミックマップに対応した自動図化ソフトウェアを開発した。

自動図化ソフトウェアは高速道路・自動車専用道路上の地物算出に用いられるもので、本稿では、この開発の内容及び今後の展開について述べる。

2. 自動図化システム

2.1 システム概要

図1に自動図化システムを示す。ダイナミックマップデータは、自動走行を実現するための静的・動的情報を組み込んだ高精度な三次元地図データである。動的情報は周辺車両や歩行者など変化する情報を指す。静的情報は道路の形状等の静的な情報を指し、自動図化ソフトウェアはこの静的な高精度三次元地図を生成するものである。MMSによって計測された三次元レーザ点群データと画像データを自動図化ソフトウェアに入力すると、道路地物の図化データが出力される。図化データはダイナミックマップデータの静的情報の元となる静的な高精度三次元地図となる。

2.2 自動図化ソフトウェア

自動図化ソフトウェアによって検出される地物には、区画線・路肩縁・道路標識・道路標示等の実在地物と、車線リンク・交差点領域等の実在しない仮想地物がある。これらの地物には、点群データだけで算出可能な地物と画像データを用いて算出する地物の2種類がある。

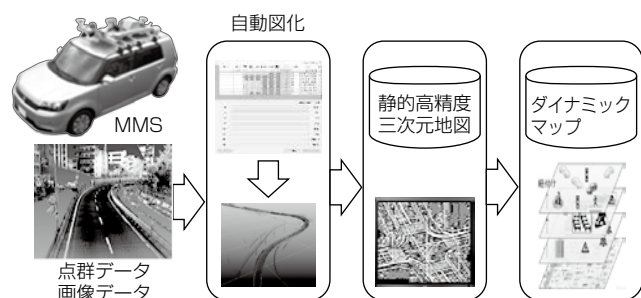
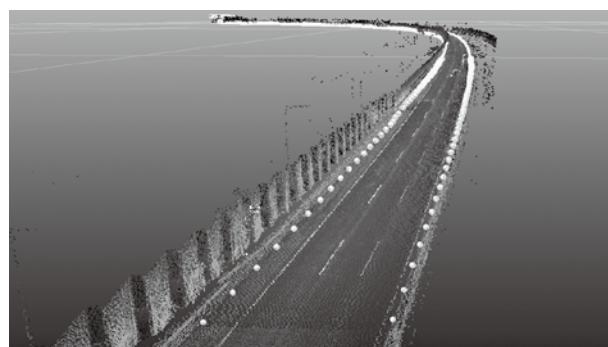


図1. 自動図化システム

2.2.1 実 在 地 物

実在地物の例として路肩縁・区画線等があり、点群データに含まれる座標情報・輝度情報によって算出される。路肩縁は、路面からの高さ方向の変化を検出して生成する。縁石や側壁によって区切られた道路、すなわち車両が走行可能な範囲を示す最重要地物である。区画線は、MMSに搭載されるレーザスキャナが反射輝度情報を検出可能であることを利用し、道路面の白線部分、すなわち反射輝度が周囲の路面より高い値となる部分を区画線として検出する。東名高速道路(海老名JCTから前後5 km)での路肩縁・区画線の図化結果例を図2に示す。

この自動図化結果で、誤検出・未検出といったエラーケースも実道路環境での計測データに対しては存在する。これらの誤検出・未検出の要因としては、図3に示すとおり、路肩から道路内にせり出している植生及び並走車によって路肩の点群データが取得されていないケースが支配



(a) 路肩縁



(b) 区画線

図2. 東名高速道路(海老名JCT)での図化結果例



図3. 計測データによる誤検出・未検出例

的であり、点群データが正しく取得できている部分では問題なく検出できることを確認した。しかし、現実にはこれらの問題は避けることはできないため、これらの外乱に対する検出アルゴリズムの高度化に継続して取り組んでいく。

MMSでの道路計測では、高速道路上の分岐や車線数が多い場合は複数回の計測を行い、道路上を漏れなく計測することが必要になる。そこで自動図化でもMMSの1計測データでの図化だけではなく、複数計測データをマージし、道路上を漏れなく図化するマージ処理を実装した。図4に、分岐点での路肩縁のマージ処理結果を示す。

2.2.2 仮想地物

仮想地物の例として車線リンク・交差点領域について述べる。車線リンクは、区画線の中心、すなわち車両の走行位置を示す地物である。区画線・路肩縁によって区切られた位置の中央とするため、区画線と路肩縁の図化データ情報を元に生成する。交差点領域は、車両が車線変更を行うエリアと定義付けられており、車線数の増減する区間を検出し、路肩縁・車線リンクの図化データを基に生成する。図5に東名高速道路での車線リンク・交差点領域の図化結果例を示す。

2.3 Viewerとの連携

自動図化では点群データから図化データを生成するが、実際に地図を作成するにはこの図化データの閲覧・修正が必要となる。そのため、閲覧・修正を容易にするため既存の作図用Viewerと連携させ、Viewerのオプション機能として自動図化ソフトウェアを起動させることを可能にした。

図6にViewer表示例を示す。図6(a)は図化結果の表示画面例を表している。図化結果ファイルを選択し、点群データと図化データを重畳表示させることによって、正確な修正が可能になる。図6(b)はパラメータ設定画面例を示しており、検出範囲等がユーザーによって設定できる。これによって、様々なパラメータに対応した図化を実行し、容易に表示・編集ができるシステムを実現した。

2.4 従量課金システム

自動図化ソフトウェアのユーザーはソフトウェアを使用する前にソフトウェアのライセンス認証を実施することで、

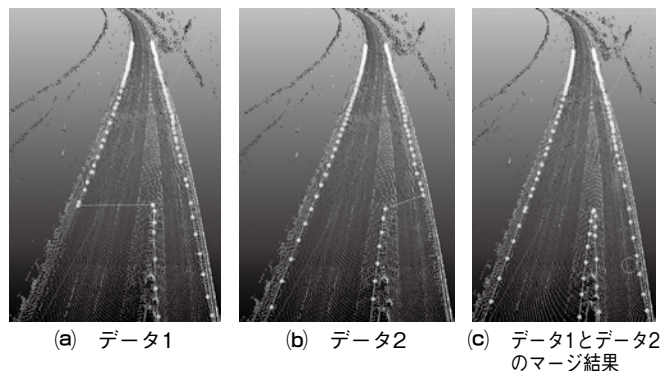
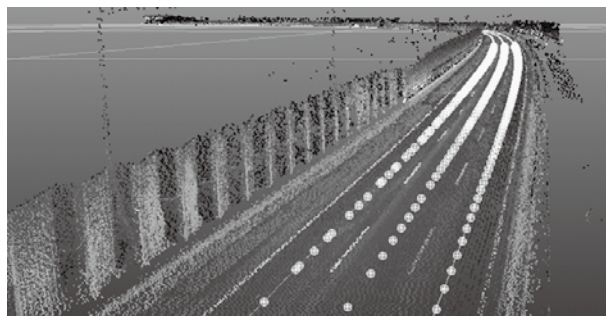


図4. 路肩縁のマージ処理結果

機器情報をソフトウェア提供元に送信する。ソフトウェア提供元は送信された機器情報をネットワーク上で管理する



(a) 車線リンク



(b) 交差点領域

図5. 東名高速道路での図化結果



(a) 図化結果の表示画面



(b) パラメータ設定画面

図6. Viewer表示例

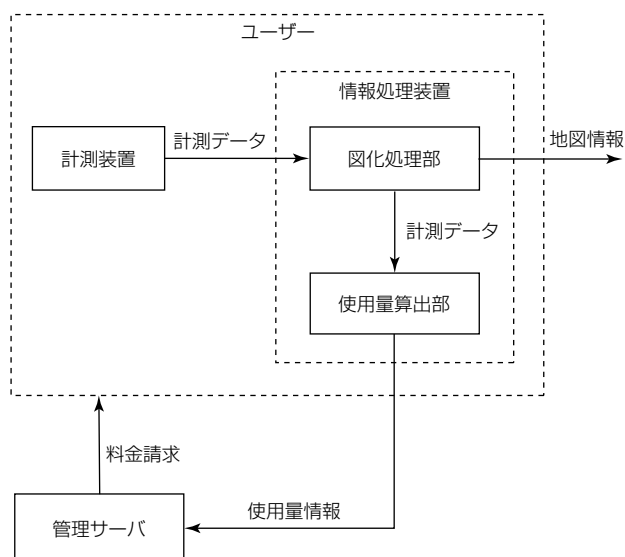


図7. 従量課金システム

ことで、不正コピー・不正利用を防止する。ネットワーク上ではライセンス認証機器の情報とユーザーのソフトウェア利用状況を管理でき、ソフトウェア利用状況を基に、ユーザーが図画を実施した距離に応じた従量課金を可能にした。従量課金システムを図7に示す。

3. 今後の展開

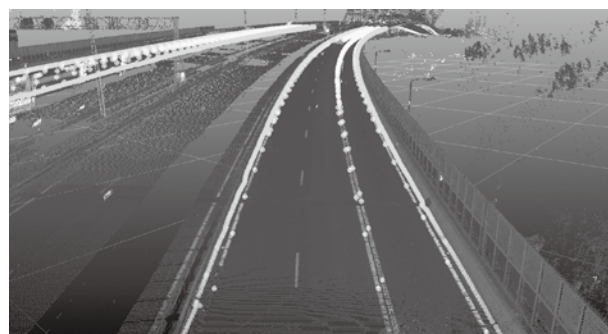
3.1 海外道路への適用

海外道路での適用検証として2017年に米国、2018年にオランダでMMS計測を行ったデータを用いて自動図化ソフトウェアの検証を実施した。図8にオランダでの実在地物の図化結果を示す。

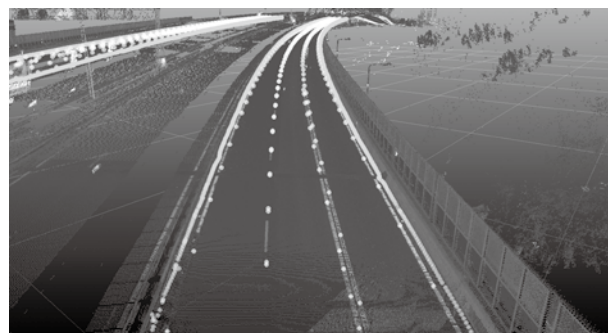
海外道路での適用に関しても、日本と同じデフォルトパラメータで問題がある場合は、各パラメータ調整でおおむね対応可能であることを確認した。一方で特殊な形状の地物（道路標識・道路標示）等に関してはアルゴリズムを検討した上で改善を進めていく。今後は北米・ヨーロッパだけでなくアジア諸国への展開を推進する。

3.2 一般道路への適用

高速道路・自動車専用道路のダイナミックマップデータの整備に続いて、一般道路についても整備が始まる見込みである。自動図化ソフトウェアについても一般道路での地物形状に対するアルゴリズム改良と、一般道路用地物への対応を進め、一般道路への適用を進めていく。



(a) デフォルトパラメータでの図化結果



(b) 調整済みパラメータでの図化結果

図8. オランダでのデータの図化結果

4. む す び

自動図化ソフトウェアの開発によって、ダイナミックマップの生成を自動化し、効率化を実現した。2020年の自動運転実現に向けて、一般道路対応、海外への展開など活用シーンを拡大していくことが期待される。また、継続的な性能改善を進めていくとともに、外乱等の影響を受けにくいアルゴリズム開発に取り組んでいく。さらに計測センサ(MMS)やインフラ設備(準天頂衛星)との連携を強化しつつ、より高度化した自動図化ソフトウェアを開発することで自動運転に関わる新たな技術を広く展開していく。

参 考 文 献

- (1) 自動運転向け高精度三次元データ自動生成技術，三菱電機技報，92，No1，23 (2018)
- (2) 三菱電機(株)：三菱電機の自動運転の取り組み，株主通信2016 (2016)
http://www.mitsubishielectric.co.jp/ir/data/business_report/pdf/h28_01/2.pdf

技術試験衛星9号機搭載用 通信ミッション

永易孝幸* 須永輝巳***
石原秀樹**
宮崎幸一**

Communication Mission for Engineering Test Satellite 9

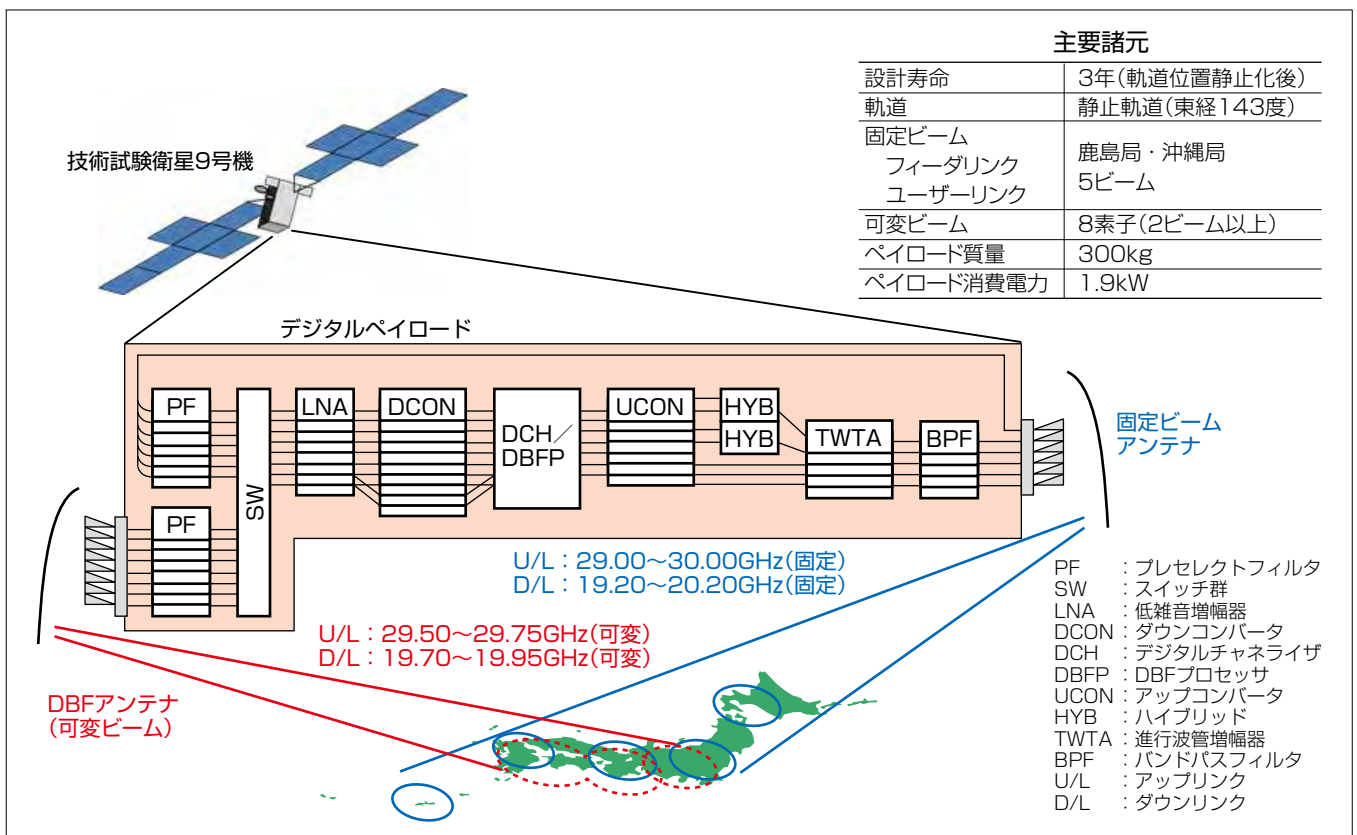
Takayuki Nagayasu, Hideki Ishihara, Kouichi Miyazaki, Terumi Sunaga

要 旨

世界の衛星市場では、HTS(High Throughput Satellite)による大容量化に加えて、デジタルチャネライザ及びDBF(Digital Beam Forming)技術の導入によって、周波数とビーム割当てのフレキシビリティ化が進められている。海外メーカーではチャネライザやDBFプロセッサの開発を精力的に進めている。

技術試験衛星9号機は、国内の宇宙産業の国際競争力強化及び防災通信等の社会インフラの実用化を目的として、当社で開発するデジタルチャネライザとDBFプロセッサ⁽¹⁾⁽²⁾から構成されるデジタルペイロードの軌道上実証を計画している。このペイロードは、デジタルチャネライザ処理を行う固定ビーム通信ミッションとDBF処理を行う可変

ビーム通信ミッションから構成され、各ミッションは異なる受信アンテナを備えるが、大半の機器を共通使用する。デジタルチャネライザは、入出力8ポート、総処理帯域幅2GHzを、分波合波ユニット、SW・DBFユニット、制御ユニット、電源ユニットの4ユニットによって実現する。DBFプロセッサは、SW・DBFユニットで分波した2.5MHz帯域幅の各サブキャリアに対して励振係数を掛けて合成することによって、サブキャリアごとにビーム形成できるので、例えば125MHz×2ビームの運用を可能にする。デジタルチャネライザとDBFプロセッサは、同一機器を使用し、その処理を地上コマンドによって切り替えることによって実現する。



技術試験衛星9号機搭載のデジタルペイロードと主要諸元

技術試験衛星9号機に搭載するデジタルペイロードは、鹿島局と沖縄局を含む日本列島上の5ビームを覆域としたアップリンク通信及びダウンリンク通信を行う固定ビーム通信ミッションと、関東から九州までの地域を覆域として、柔軟にビームを形成するアップリンク通信を行う可変ビーム通信ミッションから構成される。可変ビーム通信ミッションのダウンリンクは固定ビーム通信ミッションのダウンリンクを使用する。

1. ま え が き

世界の衛星市場では、HTSによる大容量化に加えて、デジタルチャネライザ及びDBF技術の導入によって、周波数とビーム割当てのフレキシビリティ化が進められており、海外メーカーではデジタルチャネライザやDBFプロセッサの開発を精力的に進めている。このような衛星市場の状況を背景として、技術試験衛星9号機は、国内の宇宙産業の国際競争力強化及び防災通信等の社会インフラの実用化を目的としており、当社で開発するデジタルチャネライザとDBFプロセッサ⁽¹⁾⁽²⁾から構成されるデジタルペイロードを搭載し、軌道上実証を計画している。

本稿では、2章で技術試験衛星9号機に搭載するデジタルペイロードの全体構成、主要構成機器、主要諸元について述べる。3章では、デジタルチャネライザとDBFプロセッサの主要諸元と各構成ユニットについて述べる。4章では、デジタルチャネライザの部分試作装置を使用した動作検証で、異なるポートから入力した信号の配置変更と合成ができることを確認し、設計に問題がないことを明らかにする⁽³⁾。

2. デジタルペイロードの構成

技術試験衛星9号機に搭載するデジタルペイロードは、固定ビーム通信ミッション及び可変ビーム通信ミッションから構成される。固定ビーム通信ミッションは、鹿島局と沖縄局を含む日本列島上の5ビームを覆域としたアップリンク通信及びダウンリンク通信を行う。一方、可変ビーム通信ミッションは、関東から九州までの地域を覆域として、柔軟にビームを形成するアップリンク通信を行い、ダウンリンク通信は固定ビーム通信ミッションのダウンリンクを使用する。

図1に技術試験衛星9号機に搭載するデジタルペイロードの構成を、表1及び表2にデジタルペイロードの主要機器リストと主要諸元を示す。各アンテナは、反射鏡、アン

テナ駆動機構、保持解放機構、一次放射器から構成される。両アンテナから入力した信号は、プレセレクトフィルタで帯域外の干渉をフィルタリングして、後段のスイッチで入力する信号を排他的に切り替える。両ミッションで、スイッチから後段の機器は共通使用して、固定ビームアンテナから送信を行う。ただし、デジタル処理機器は、固定ビーム通信ミッションの場合、デジタルチャネライザとして処理を行い、可変ビーム通信ミッションの場合、DBFプロセッサとして処理を行う。

表1. デジタルペイロードの主要機器リスト

機器	数量
プレセレクトフィルタ(PF)	15
低雑音増幅器(LNA)	8
ダウンコンバータ	10
デジタルチャネライザとDBFプロセッサ	1式
アップコンバータ	7
ハイブリッド(HYB)	2
進行波管増幅器(TWTA)	5
バンドパスフィルタ(BPF)	5
同軸スイッチ	19
導波管スイッチ	25
固定ビームアンテナ	1式
DBFアンテナ	1式

表2. デジタルペイロードの主要諸元

項目	設計値
設計寿命	3年(軌道位置静止化後)
軌道	静止軌道(東経143度)
周波数	U/L(固定/可変) 29.00~30.00GHz/29.50~29.75GHz D/L(固定/可変) 19.20~20.20GHz/19.70~19.95GHz
固定ビーム	フィーダリンク 鹿島局・沖縄局 ユーザリンク 5ビーム
可変ビーム	U/L 8素子(125MHz×2ビーム) D/L 5素子(125MHz×2ビーム)
TWTA出力	130W
G/T(固定/可変)	6.7dB/K以上/ -0.2dB/K以上
EIRP(固定/可変)	56.2dBW以上/56.2dBW以上
ペイロード質量	300kg
ペイロード消費電力	1.9kW(飽和動作)

G/T：アンテナ利得／等価雑音温度，EIRP：等価等方輻射電力

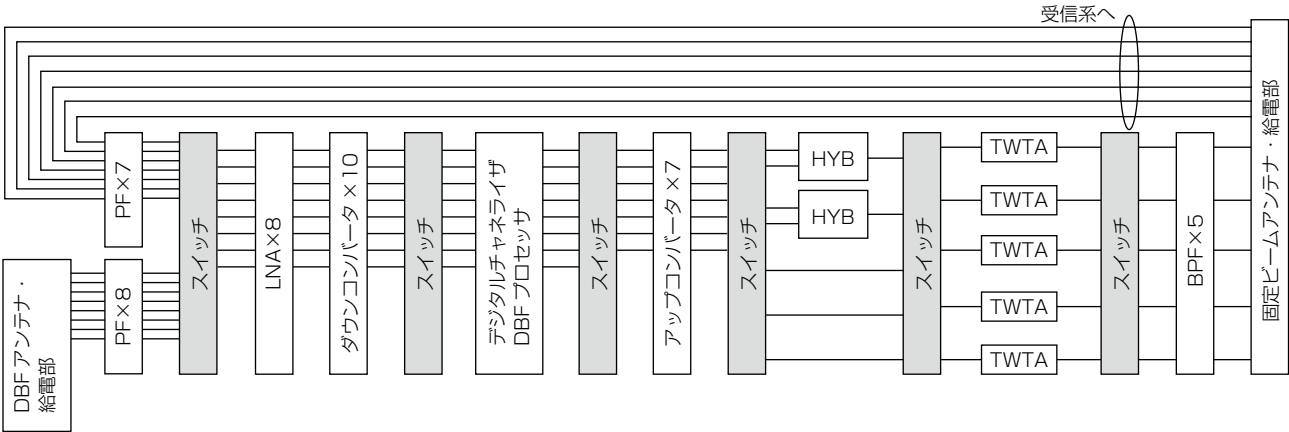


図1. デジタルペイロードの構成

3. デジタルチャネライザとDBFプロセッサ

図2及び表3にデジタルチャネライザとDBFプロセッサの外観イメージ及び主要諸元を示す。デジタルチャネライザとDBFプロセッサは、分波合波ユニット、SW・DBFユニット、制御ユニット及び電源ユニットから構成され、動作モードは、地上からのコマンドによって、SW・DBFユニットの処理を変えることによって切り替える。また、今回開発したデジタルチャネライザは8ポートとしているが、将来的には64ポートに拡張可能な構成とした。

3.1 分波合波ユニット

分波合波ユニットは、図3に示す分波・合波処理を行うASIC(Application Specific Integrated Circuit)、ADC

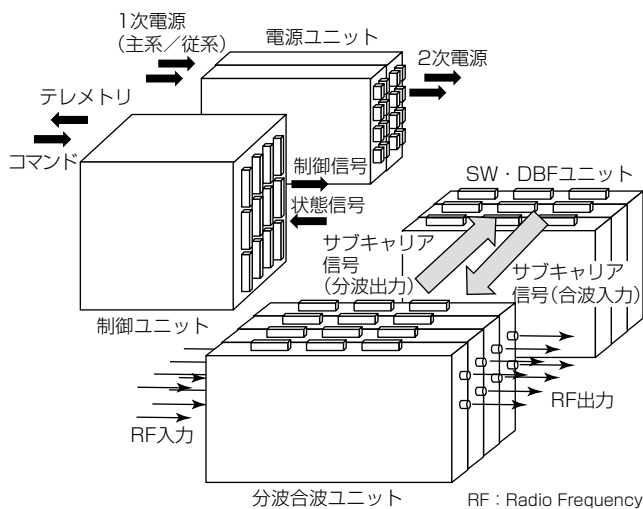


図2. デジタルチャネライザ/DBFプロセッサの外観イメージ

表3. デジタルチャネライザの主要諸元

項目	設計値
ポート数(入力/出力)	8ポート/8ポート
入出力帯域幅	最大500MHz/2ポート
総処理帯域幅	最大2GHz
サブキャリア数	200サブキャリア/2ポート
サブキャリア帯域幅	2.5MHz
質量	52kg
消費電力	206W

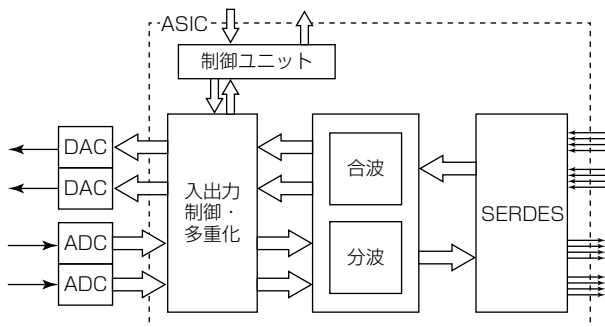


図3. 分波合波ユニットの構成

(Analog/Digital Converter) 及びDAC(Digital/Analog Converter)によってデジタル信号処理を行う。各ポートで、250MHz帯域幅の入力信号は、A/D変換後、2.5MHz帯域幅の100サブチャネルに分波し、全800サブチャネルの信号をSERDES(SERializer/DESerializer)でSW・DBFユニットにインタフェースする。一方、SW・DBFユニットから出力される全サブチャネル信号を100サブチャネルごとに250MHzの信号に合波し、D/A変換して各ポートから出力する。

3.2 SW・DBFユニット

デジタルチャネライザは、図4に示すようにSW・DBFユニットを800×800のスイッチマトリックスとして処理を行う。一方、DBFプロセッサは、図5に示すようにサブキャリアごとに受信励振係数を乗算して合成し、100×100のスイッチマトリックスによって並び替えた後、各送信素子に対応した送信励振係数を掛けた8ポート×100サブキャリアの信号を分波合波ユニットにSERDESでインタフェースする。両処理は、同じFPGA(Field Programmable Gate Array)で実現して、地上コマンドで処理を切り替える。

3.3 制御ユニット

制御ユニットは、他のユニットの制御を行い、バス機器とのインタフェースとして、標準インタフェースであるMILSTD-1553Bデータバスを採用している。それによって、搭載機器がデータバスに直接接続となり、可変長パケットでのテレメトリ・コマンドのインタフェースに対応している。

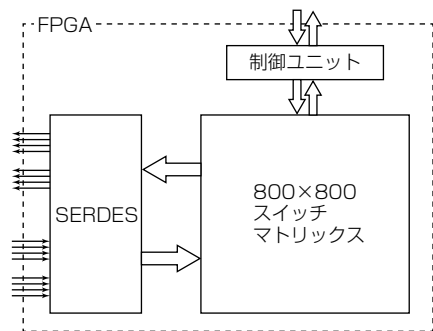


図4. SW・DBFユニットの構成 (デジタルチャネライザ動作時)

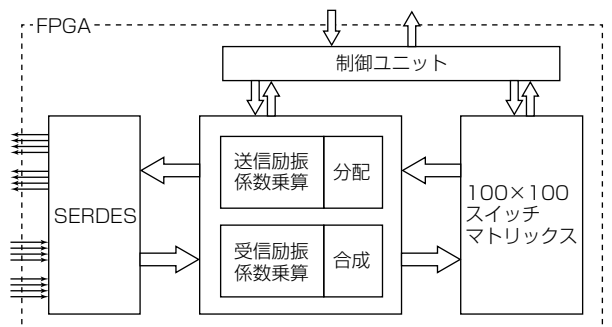


図5. SW・DBFユニットの構成 (DBFプロセッサ動作時)

3.4 電源ユニット

電源ユニットは、分波合波ユニットとSW・DBFユニットに電源供給する。

4. デジタルチャネライザの試作・検証

ASICの製造開始前に、ASIC回路を模擬したFPGAを使用して実速度による動作検証を実施した⁽³⁾。図6及び図7は、動作検証のために製造したデジタルチャネライザの部分試作装置と検証シナリオである。部分試作装置は、ASIC回路を複数のFPGAに分割して実装し、実際の動作速度と同じ、サンプリング1.5Gsps／3Gsps、内部並列処理速度187.5MHz／375MHzで動作する。

検証では、S1・S2の変調波を別々のポートから入力して、合成した周波数スペクトラムが期待どおりに出力されることを確認する。変調波S1として中心周波数(fc)1.795GHz、80Msps(占有帯域幅(BW)100MHz)のQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)信号、変調波S2として中心周波数1.955GHz、100Msps(占有帯域幅125MHz)のQPSK信号を部分試作装置の異なるポートから入力して、スイッチマ



図6. デジタルチャネライザ部分試作装置

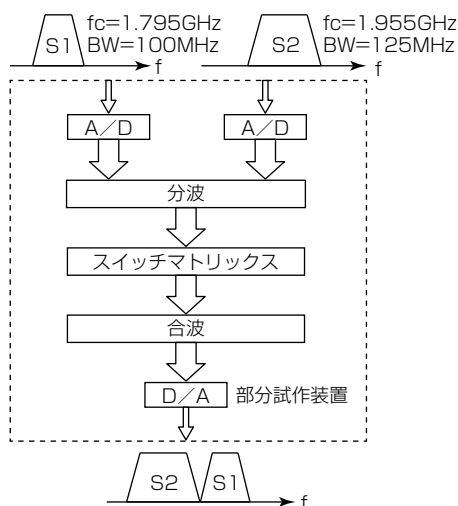


図7. 部分試作装置による検証シナリオ

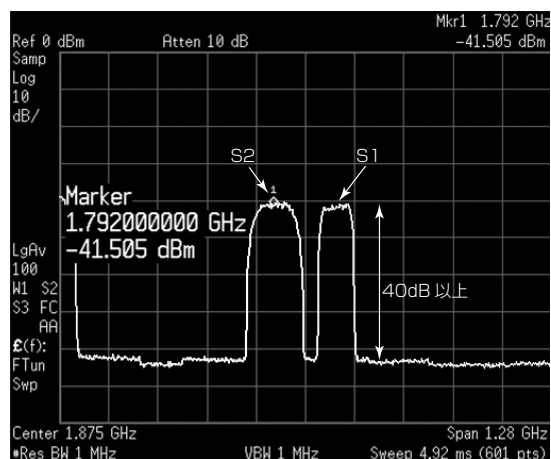


図8. 動作検証結果(D/A出力の周波数スペクトラム)

トリックスで周波数の並びを入れ替えてから合波して同じポートから出力する。図8は、D/A変換後のS1・S2の合成スペクトラムを、スペクトラムアナライザで確認したものである。S1とS2の配置が入れ替わり、デジタルチャネライザで生じるノイズレベルが、変調波レベルに対して40dB以上低いことが確認できる。

5. む す び

技術試験衛星9号機に搭載するデジタルパイロードの全体構成と仕様、分波合波ユニット、SW・DBFユニット、制御ユニット、電源ユニットの4ユニットから構成するデジタルチャネライザとDBFプロセッサの仕様について明らかにした。また、デジタルチャネライザの部分試作装置による検証試験結果を示し、現在開発中のデジタルチャネライザの設計に問題がないことを明らかにした。

この研究の成果の一部は、総務省委託研究“ニーズに合わせて通信容量や利用地域を柔軟に変更可能なハイスループット衛星通信システム技術の研究開発”及び“Ka帯広帯域デジタルビームフォーミング機能による周波数利用高効率化技術の研究開発”に基づいて実施したものである。

参 考 文 献

- (1) 草野正明, ほか: Ka帯広帯域デジタルビームフォーミング機能による周波数利用高効率化技術の研究開発—回線設計—, 2018年電子情報通信学会総合大会, B-3-12 (2018)
- (2) 尾野仁深, ほか: Ka帯広帯域デジタルビームフォーミング機能による周波数利用高効率化技術の研究開発—DBFプロセッサの基本設計—, 2018年電子情報通信学会ソサエティ大会, B-3-14 (2018)
- (3) 角田聡泰, ほか: 技術試験衛星9号機搭載デジタルチャネライザの部分試作評価, 2018年電子情報通信学会ソサエティ大会, B-3-10 (2018)

日本テレビ系列向けSNGシステム

中田浩志*
西脇大貴*

Satellite News Gathering System for Nippon News Network

Hiroshi Nakata, Hiroki Nishiwaki

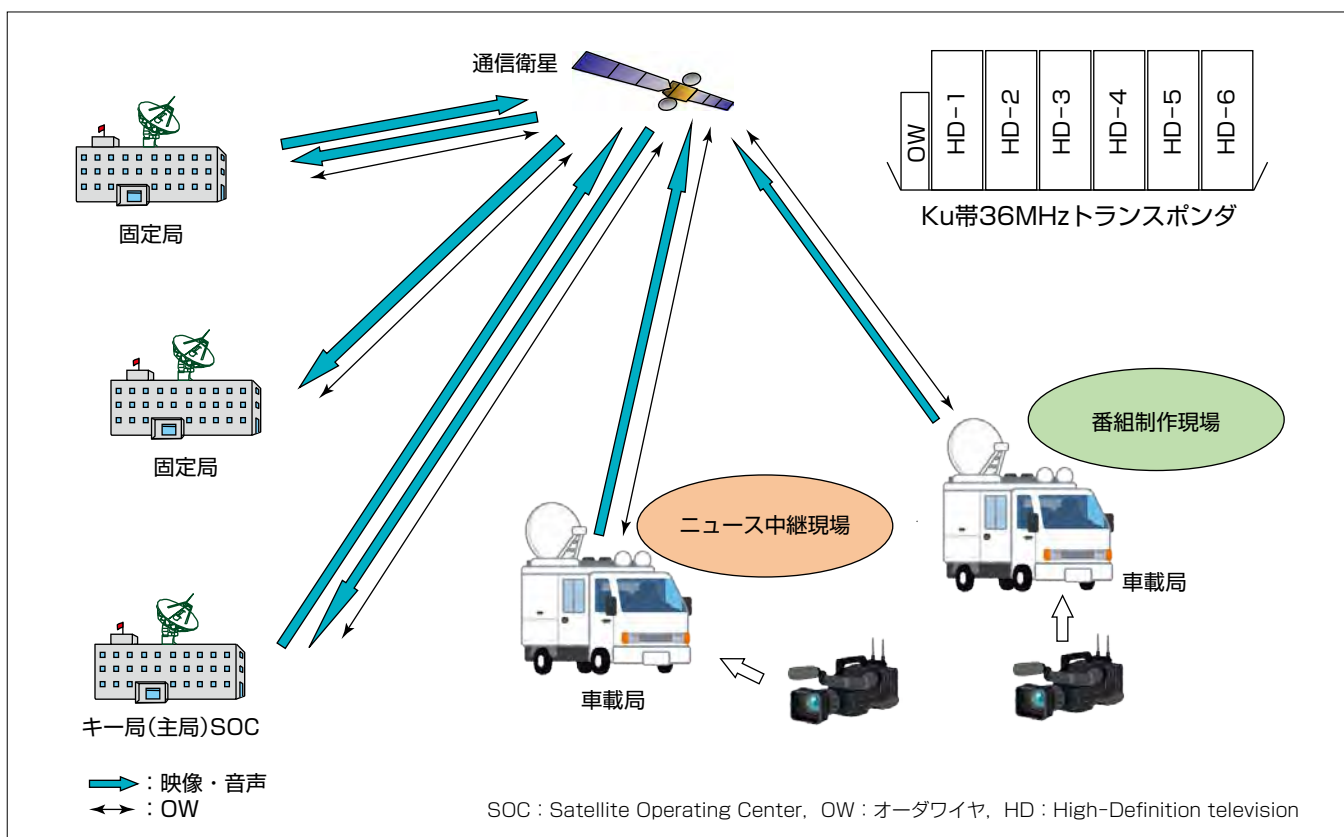
要 旨

SNG(Satellite News Gathering)システムは、放送局がニュースや番組で用いるために取材先で撮影した映像を、通信衛星を介して収集・配信するシステムであり、通信衛星の方角の空が開けてさえいればどこからでも通信できるという衛星通信の持つ広域性、即時性から、全国の放送局で広く利用されている。

現在、三菱電機では、日本テレビ系列向けSNGシステムの更新を行っている。更新に当たり、SNGシステムの課題を抽出し、その課題を解決するための製品群を開発したので、その成果について述べる。

最新の国際標準規格であるDVB-S2Xに対応した衛星通信用モデム“MS8300TX/RX”を開発し、多値変調高度

化・狭帯域フィルタを実現することで、周波数利用効率を向上させ、1トランスポンダでの映像6波伝送を可能にした。定期交換の不要なGaN-FET(Galium Nitride Field Effect Transistor：窒化ガリウム電界効果トランジスタ)を採用した大電力増幅器“SX-6101”を開発し、保守性の向上及び運用停止期間の短縮を実現した。また筐体(きょうたい)を防塵(ぼうじん)・防水構造にすることで屋外設置に対応し、SNG車載局の車内スペースの有効活用を可能にした。また、監視制御装置“SYSTEM CONTROL”は機器の一体化・操作のタッチパネル化・リモート端末の追加を行い、運用者の操作性を向上させた。



SNGシステムの構成

SNGシステムは在京のキー局(主局)を中心としたネットワークを形成しており、固定局と車載局によって構成される。番組制作現場やニュース中継現場で撮影された映像は、データに変換された後で車載局から送信され、通信衛星を介して固定局(各放送局本社)で受信される。こうして収集された映像は放送局内で番組やニュースに活用される。

1. ま え が き

現在放送局では、取材先で撮影した映像の伝送手段の一つとして、SNGシステムが用いられている。

SNGシステムは、ニュースや番組で用いられる映像を、通信衛星を介して収集・配信するシステムで、放送局からの見通しが効かない地域であっても、通信衛星の方角の空が開けてさえいればどこからでも通信できるという衛星通信の持つ広域性、即時性から広く利用されている。

SNGシステムは1990年にアナログ方式で始まり、その後デジタル化、高画質(HD)化と進化してきた。今回の日本テレビ系列(日本テレビニュースネットワーク:NNN(Nippon News Network)系列)向けSNGシステムの更新では、周波数の狭帯域化など効率化が求められていた。

本稿では、2章でSNGシステムの概要を述べ、3章ではSNGシステムの課題を抽出し、4章でその課題を解決するために開発した製品について述べる。

2. SNGシステムの概要

SNGシステムは在京のキー局(主局)を中心としたネットワークを形成しており、固定局(主に放送局本社)と車載局(衛星通信機能を持った車両)によって構成される。取材先で撮影された映像は、圧縮符号化された後で車載局から送信され、通信衛星を介して固定局で受信される。こうして取材先から収集された映像は放送局内で番組やニュースに活用される。図1にSNG車載局の外観を示す。

3. SNGシステムの要求事項

今回のNNN系列向けSNGシステム更新での要求事項は次のとおりである。

(1) 周波数利用効率の向上

従来のシステムでは1トランスポンダ当たり伝送可能なHDTV(High Definition TeleVision)映像信号は最大4波であるが、更に多くの素材を伝送可能にすることが求められているため、周波数利用効率の向上が大きな課題であった。



図1. SNG車載局

(2) 車載局車内スペースの有効活用

SNG車載局には映像編集用、映像伝送用など多くの機器が必要だが、車内スペースには限りがあるため、搭載できる機器は限定される。機器の小型化等を行うことで、車内スペースを有効に活用して搭載可能な機器を増やしたり、又は車両を小型化して機動力を上げるなど、運用をより円滑にすることが求められる。

(3) 運用停止期間の短縮

SNGシステムは主に報道用途で使用されるため、突発的に運用が入ることが多い。そのため、機器の修理や保守等による運用停止期間は可能な限り短縮することが求められる。

(4) 操作性の向上

SNGシステムは複数の機器を連動させて制御しなければならず、迅速性と確実性が求められる。そのため、操作性の高い制御装置の要求が高い。

4. 要求事項解決のための製品開発

3章で述べた課題を解決するため、次の製品群を開発し、NNN系列向けSNGシステムに適用した。

4.1 DVB-S2X対応衛星通信用モデムMS8300TX/RX

今回NNN系列向けSNGシステムに適用したDVB-S2X⁽¹⁾対応衛星通信用モデムMS8300TX/RX⁽²⁾では、次の点を考慮して開発した。

4.1.1 多値変調の高度化と狭帯域フィルタリング

周波数利用効率を改善するため、MS8300TX/RXでは、最新の国際標準規格であるDVB-S2Xに対応し、従来の変調方式(〜32APSK(Amplitude Phase Shift Keying))に加えて新たに64APSKの多値変調方式を追加し、また波形整形フィルタのフィルタ係数には、従来のロールオフ率(〜20%)に加えて新たに15%、10%、5%を追加した。これによって、同一伝送速度の場合に変調波帯域が約27%改善される。図2にロールオフ率の違い(20%、5%)による変調スペクトラム波形の差異を、図3に32APSKと64APSKのコンスタレーション^(注1)を示す。NNN系列向

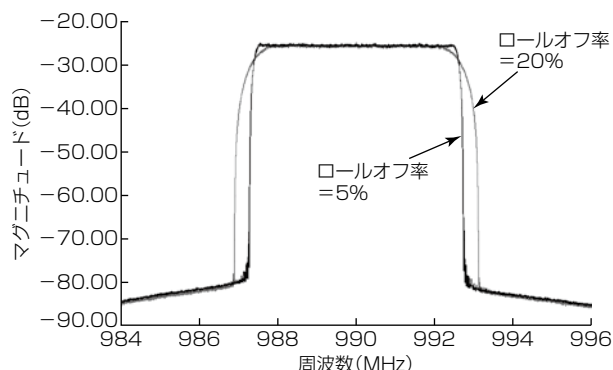


図2. 狭帯域フィルタの適用による周波数利用効率の向上(ロールオフ率20→5%)

けSNGシステムでは、このモデムに最新方式の映像圧縮符号化方式を組み合わせることで、1トランスポンダで伝送可能なHDTV映像信号を最大4波から6波に増やすことができた。

(注1) デジタル変調によるデータ信号点を二次元の複素平面上に表現した信号点配置図

4.1.2 小型化・軽量化

従来装置と比較して半分の幅(19インチラックのハーフサイズ)で実現した。これによって、既存機器の実装スペースに予備系1台を追加可能であり、安定した通信回線の確保を可能にするなど新たな利用用途が広がった。また、質量も従来比約1/2に軽量化した。図4にMS8300RXの外観を、表1に主要諸元を示す。

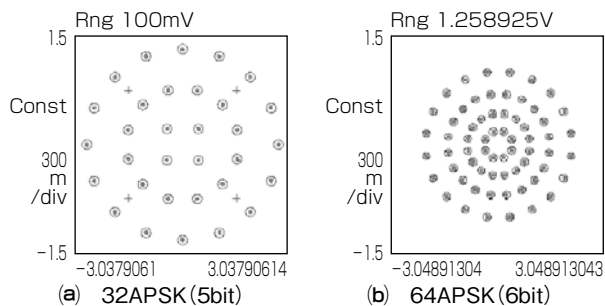


図3. 多値変調高度化による周波数利用効率の向上



図4. MS8300RX

表1. MS8300TX/RXの主要諸元

項目	諸元
インタフェース周波数	950~1,500MHz
周波数設定	1 Hzステップ
変調速度	384ksps~36Mpsps, 1 sps ステップ
変調方式	QPSK, 8PSK, 16QAM, 16APSK, 32APSK, 64APSK
誤り訂正方式	畳み込み+RS接続符号/ビタビ復号+RS復号 BCH符号+LDPC符号/BCH復号+LDPC復号
符号化率	1/2, 3/5, 2/3, 32/45, 11/15, 3/4, 7/9, 4/5, 5/6, 7/8, 8/9, 9/10
ロールオフ率	5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 35%
周波数安定度	± 1 ppm以内
データ入出力ポート	DVB-ASI
監視制御	LCD, LED(装置前面) 10Base-T/100Base-TX/1000Base-T(装置背面)
外形寸法	210(W)×480(D)×44(H)(mm)
質量	約4 kg

SPS: Symbols Per Second

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

RS: Reed Solomon code

BCH: Bose Chaudhuri Hocquenghem code

LDPC: Low Density Parity Check code

DVB-ASI: Digital Video Broadcasting Asynchronous Serial Interface

LCD: Liquid Crystal Display

4.2 大電力増幅器 屋外型Ku帯 SSPA“SX-6101”

4.2.1 保守性の向上による運用停止期間の短縮

従来、大電力増幅器には高出力が容易に得られるマグネトロンや進行波管などの電子管が用いられていたが、寿命が限られ定期的な交換が必要であることや、電子管が海外調達部品であったため故障時に修理期間が長期化するなど保守性に問題があった。そこで今回は、増幅器として長寿命の半導体増幅器(当社製GaN FET)を用いたSSPA(Solid State Power Amplifier)“SX-6101”⁽³⁾を開発した。GaN FET単体の出力では伝送に必要な電力を得られないため、素子の出力を合成することで所望の出力を実現した。また、当社製GaN FETを採用し、主要部位をモジュール化することで、修理期間の短縮も図ることができる。

4.2.2 屋外設置に対応

SSPAの屋外(車載局の屋上)への実装を可能にするために、SSPA筐体を防塵・防水構造にした。当社では大雨や砂ほこりを想定して、噴流水に対する保護と、機器の正常動作や安全性を阻害するほどの粉塵(ふんじん)が内部に侵入しないことを目標にしており、このSSPAでもIP55の規格を満足する耐環境性を実現した。これによって、従来車内に実装せざるを得なかった大電力増幅器を車外に実装可能になり、SNG車載局の車内スペースの有効活用ができた。あわせて、車上搭載のアンテナの直近にSSPAを配置することで、アンテナ給電部の損失を最小化することもできた。図5にSX-6101の外観を、表2に主要諸元を示す。



図5. SX-6101

表2. SX-6101の主要諸元

項目		諸元
周波数範囲		14.0～14.5GHz
定格出力電力		100W以上
利得		60dB以上
三次混変調積		－25dBc以下
第二高調波		－60dBc(定格出力時)
電源電圧		AC85～264V, 50/60Hz
消費電力		1,600VA以下(定格出力時)
環境条件	温度	動作：－20～55℃(性能保障) 保存：－20～70℃
	湿度	RH95%以下(雨天使用可)
	防塵・防水	IP55(IIS保護等級5級)

RH: Relative Humidity

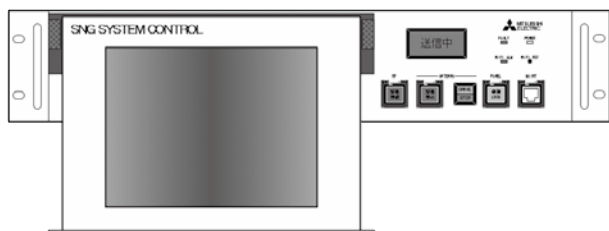


図6. SYSTEM CONTROL

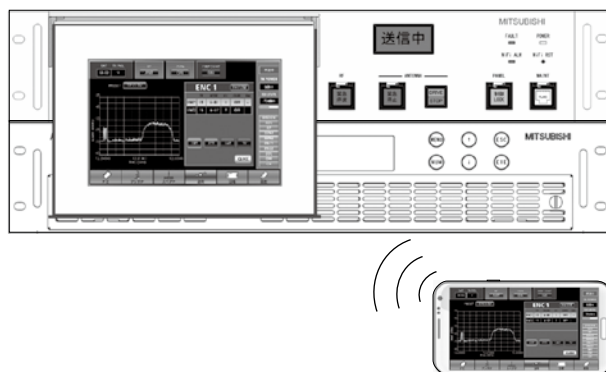


図8. リモート端末の運用イメージ

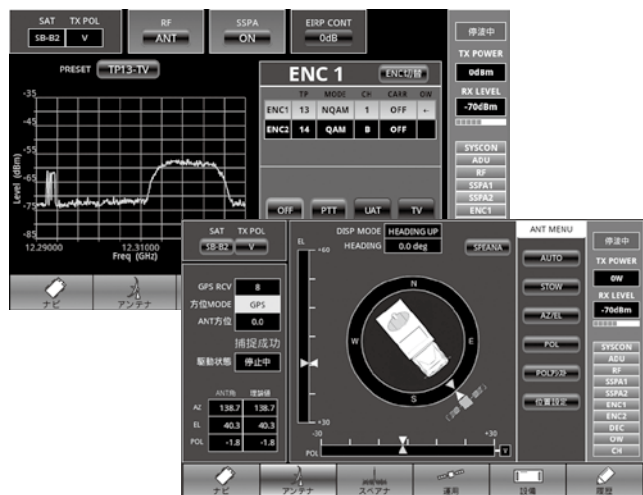


図7. 画面例

4.3 SNG車載局監視制御装置“SYSTEM CONTROL”

4.3.1 監視制御機能の集約

従来は個別の機器で実現していた受信信号のスペクトラムアナライザ表示、アンテナ監視制御機能、衛星方向表示機能をSNG車載局監視制御装置SYSTEM CONTROLに集約し、1台で衛星通信機器の集中監視制御を可能にした。図6にSYSTEM CONTROLの外観を、図7に画面例を示す。

4.3.2 機器操作の液晶タッチパネル化

従来はハードウェアスイッチによる操作であったが、今回は液晶タッチパネルを採用した。液晶画面をタッチすることで直感的な操作が可能になった。また、操作シチュエーションに応じて表示内容を変化させることで、より多くの情報が表示可能になるとともに、不要な操作パネルを隠すことで誤操作を防止できる。

4.3.3 リモート端末

SYSTEM CONTROL本体と別に、タブレット型のリモート端末を備えた。リモート端末の画面は本体と同じ構成とし、端末の違いを意識せずに同じ操作を可能にした。また、リモート端末を本体と無線LAN接続することによって、車外など本体から離れた場所から操作を行えるため、例えば、車外で伝送路上の障害物を目視で確認しながらアンテナ展開操作を行うこと等が可能になり、従来2人

で行っていた作業を1人でできるようになり、運用の省力化を可能にした。図8にリモート端末の運用イメージを示す。

5. む す び

放送局向けの素材伝送用衛星通信システムで、システム更新での課題を解決する製品群を開発した。DVB-S2Xの多値変調高度化・狭帯域フィルタに対応した衛星通信用モデムによる周波数利用効率の向上と装置の小型化、大電力増幅器の屋外設置対応による車載局車内スペースの効率化及び主要部品を定期交換不要な構成にすることによる保守性の向上・運用停止期間の短縮、監視制御装置の機器の一体化、タッチパネル化及びリモート端末による操作性の向上を実現した。

NNN系列向けSNGシステムの更新は2017年から実施中で、順次運用を開始しており、2019年に全局の更新が完了する。

現在、SNGシステムでは映像ストリーム以外の情報の伝送も求められてきており、今後は、通信のIP(Internet Protocol)化など新たなニーズに対応することで、より円滑な映像伝送の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) Draft EN 302 307-2 : Digital Video Broadcasting (DVB) : Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications, Part 2 : DVB-S2 Extensions(DVB-S2X) (2014)
- (2) 井戸康浩, ほか : 次世代衛星通信向け変復調装置, 三菱電機技報, 90, No.2, 135~138 (2016)
- (3) 小坂田 寛, ほか : SNG向け屋内/屋外型Ku帯100W半導体電力増幅器“SX-6020/6101”, 三菱電機技報, 92, No.2, 141~144 (2018)

電磁シールドシステム“ペルセウス・シールド”

窪田正博*

金本貴志*

Electromagnetic Shield System "Perseus Shield"

Masahiro Kubota, Takashi Kanamoto

要 旨

現代オフィスを取り巻く目に見えない二つの電磁波脅威として“電磁波攻撃”と“電磁波盗聴”がある。電磁波攻撃は、電子機器に固有のイミュニティ限度値をはるかに超える電磁波を照射し、機器の破壊、異常をもたらす攻撃である。また、電磁波盗聴は、電子機器、特に情報通信機器から生ずる電磁ノイズ(漏洩(ろうえい)電磁波)に含まれる有益な情報を受信して再現することによる盗聴行為である。

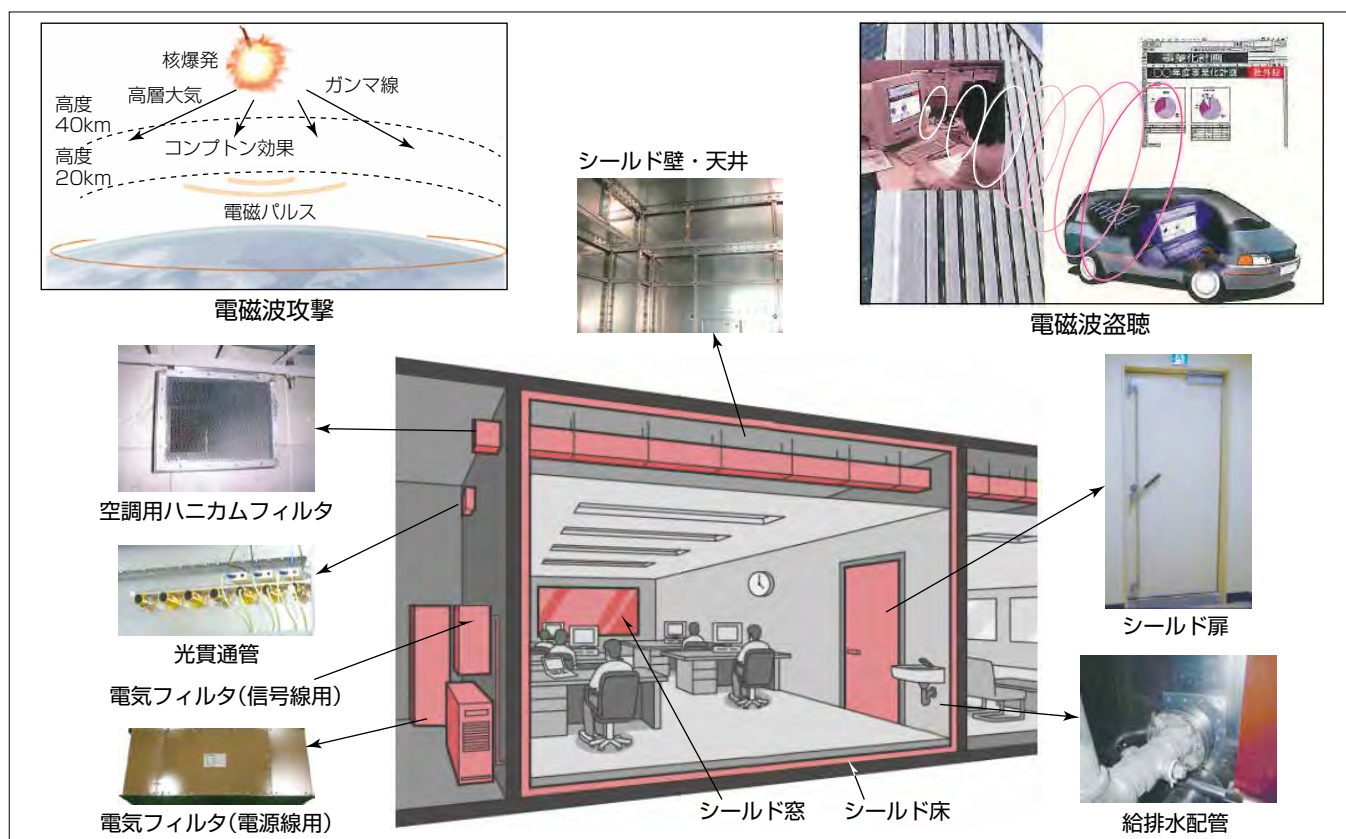
このような電磁波脅威に備える防護手段として電磁シールドシステムがあり、三菱電機の“ペルセウス・シールド^(注1)”は居室単位や建屋単位を対象とした比較的規模の大きいシールド室である。

ペルセウス・シールドの基本構成は、薄板銅板から成る

シールド層を建築躯体(くたい)の内側に隙間なく施工して電磁遮蔽空間を構築し、シールド扉、シールド窓、電気フィルタ、光貫通管、空調用ハニカムフィルタなど、シールド特有の建具から成っており、性能維持のための定期保守が欠かせない設備である。

ペルセウス・シールドでは目に見えない電磁波を電磁界解析手法によって巧みに可視化して、電磁波を所望のレベルまで減衰させる設計・施工に活用するとともに、更なる付加構成要素として、常時連続稼働して性能監視を行うシールド性能監視システムやシールド室へ入室する際のわずらわしさを解消するラビリンス通路などがある。

(注1) ペルセウス・シールドは、ギリシャ神話に登場する勇士ペルセウスの盾に由来する名称である。



ペルセウス・シールドの基本構成

ペルセウス・シールドの基本構成は、薄板銅板から成るシールド層を建築躯体の内側に隙間なく施工して電磁遮蔽空間を構築し、その表層に内装仕上げをしているため、一見したところ、通常のオフィスと変わらない。そして、シールド扉、シールド窓、電気フィルタ、光貫通管、空調用ハニカムフィルタなど、シールド特有の建具が備え付けられている。

1. ま え が き

21世紀とともに幕開いたユビキタスネットワーク社会は、その後急速に進展し、いまやIoT(Internet of Things)時代の到来でインターネットにつながるモノの数は爆発的に増加している。こうした背景には情報通信機器や回線の高速大容量化、小型化、省電力化など多岐にわたる革新的な技術進歩がある。一方で基本素子での微細化、微小電圧電流化は、ハードウェアとしての脆弱(ぜいじゃく)化を招き、また、“有線”より手軽で便利な“無線”通信は、電磁波的には、より脆弱な通信媒体であることは否めない。

現代オフィスを取り巻く目に見えない二つの電磁波脅威として“電磁波攻撃”と“電磁波盗聴”がある。それらの電磁波脅威に備える防護手段として、当社は電磁シールドシステム“ペルセウス・シールド”を提供している。

本稿では、電磁波攻撃と電磁波盗聴のメカニズムを述べた後、電磁シールドシステムの構成、さらに電磁界解析に基づいたシステムの付加構成要素について述べる。

2. 電磁波攻撃

エレクトロニクスを駆使した各種電子機器では、電磁環境適合性(ElectroMagnetic Compatibility: EMC)の観点から、装置内や外部環境による放射/伝導ノイズに対して誤動作・故障しないように設計・製造されている。この耐性をイミュニティ耐性と言い、そのレベルは、適用規格、クラスによって異なるものの、おおむね、電界強度が3~20V/m程度である。実際の機器の実力(イミュニティ限度値)は、オーダ的には電界強度数百V/m以上で誤動作が発生し、数十kV/m以上で破壊すると言われ、電磁波攻撃とは、電子機器のイミュニティ限度値を超える電磁波を放射して意図的に電磁障害を発生させることを目的とした攻撃である。

2.1 電磁波攻撃のメカニズム

2.1.1 大電力電磁パルスの発生手段

電磁波攻撃を可能にする大電力電磁パルスの発生手段は、EMP(ElectroMagnetic Pulse)とHPM(High Power Microwave)二つに大別される。

EMPは、広義には自然雷を含む瞬時の電磁パルスであるが、攻撃目的のパルス発生手段としては核爆発と電子機器による高電力放出がある。

2.1.2 大電力電磁パルスの発生メカニズム

大電力電磁パルスの発生手段のうち、核爆発によるものを高高度電磁パルス(High-altitude Electro-Magnetic Pulse: HEMP)と称し、核攻撃の選択肢の一つとして、話題となった脅威である。その発生原理は、大気圏外(高度40km超)の核爆発によって生じるガンマ線が大気圏の空気分子と衝突することによって、コンプトン効果と言われる電子拡散を生じ、このときの電子の流れが強力な電磁

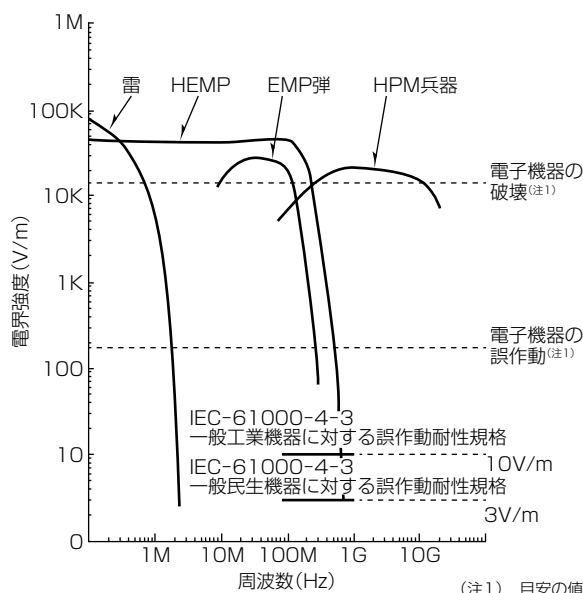


図1. 大電力電磁パルスのスペクトラム分布⁽²⁾

場を形成して、地表の広範囲に電磁パルスを放射するというものである⁽¹⁾。

電子機器による高電力放出型は、例えば、マルクスジェネレータと言われる多段式高電圧インパルス発生器による高電圧パルスを、マイクロ波発生管に印加して瞬時高電界パルスを発生させるもので、一般に発生繰り返し頻度は低い。

一方、HPMは、マグネトロンやクライストロンといったマイクロ波発生管によって高周波で繰り返される数~数十GHz帯の高レベル電磁パルスを発生させるものである。

大電力電磁パルスのスペクトラム分布を図1に示す。同図には、国際規格IEC-61000-4-3で制定されるイミュニティ規格(誤動作耐性規格値)も示したが、大電力電磁パルスはこれをはるかに超える値となっている。

2.1.3 大電力電磁パルスによる破壊・誤動作

HEMPによる電磁パルスは、その初期に数十n秒、約50kV/mピークの単発パルスが到来すると言われる。電磁波の周波数帯域は300MHzまで及ぶことから、波長的には数十センチ程度以上の電線や金属板、回路基板等と電磁結合しやすい性質がある。空間結合した電磁エネルギーは電圧源又は電流源として、電子機器内に侵入し、脆弱な回路部位を破壊したり、状態遷移を生じさせて誤動作を引き起こす。また、数~数十GHz帯域のHPMでは、数ミリメートルサイズでも結合しやすく、より小型の電子機器に対しても脅威となる。

3. 電磁波盗聴

情報通信機器から生じる電磁ノイズ(漏洩電磁波)には有意な情報が含まれ、これを受信して再現を試みることは、軍事諜報(ちょうほう)活動の一端として古く1950年代から行われてきた。その後、1985年にWin van Eckの論文によって、ディスプレイ画像の放射電磁ノイズで画像再現

できることが示され、このような情報漏洩は米国国家安全保障局(NSA)のコードネームであるTEMPESTとして周知となった⁽³⁾。

3.1 漏洩電磁波による情報再現メカニズム

モニタ表示画像を例にとれば、電磁波漏洩から情報再現までのおおまかな流れは次のとおりである。

- (1) 電磁ノイズ放射(モニタ本体や周辺ケーブルなど)
- (2) 傍受アンテナで受信
- (3) 受信信号処理(不要波成分除去, 受信信号の増幅)
- (4) 画像処理(水平/垂直同期, 画像ノイズ除去)表示

実際に画像を再現して解読できるかどうかは、モニタ等から放射される電磁ノイズのレベル、傍受アンテナまでの距離、その間に介在する建物(建材)等による減衰、傍受アンテナの利得、受信装置の感度、画像処理の処理方法などによるところとなるが、条件がそろえば、モニタの画像を数百メートル離隔した位置で傍受できる可能性がある。

4. 電磁波攻撃・電磁波盗聴の対策

電磁波攻撃・電磁波盗聴の対策について、ここでは、機器類やシステム全体を収容する部屋単位、建屋単位を対象としたペルセウス・シールドについて述べる。

4.1 ペルセウス・シールド

ペルセウス・シールドの“シールド性能”は周波数範囲と減衰性能とで規定され、さらには放射減衰性能と伝導減衰性能とに分けて規定される。所要性能については、対象とする脅威からどれだけ離隔できるかを加味しつつ当該エリアに対してどこまでのシールド性能を求めるかによって決定され、シールド性能評価方法については放射・伝導共に防衛省規格NDS-C0012Bに準拠している。

ペルセウス・シールドの基本構成は要旨の図に示すとおりで一見すると通常のオフィスと変わらない。図2は電磁シールドボックスと称する小部屋単位のシステムで、既設建屋内に後付け設置する場合などに便利である。鋼板の事前加工によって組立てが容易で、かつ自立型であることから、工事規模が小さく、短期間に導入することが可能なオールインワンのボックスタイプである。

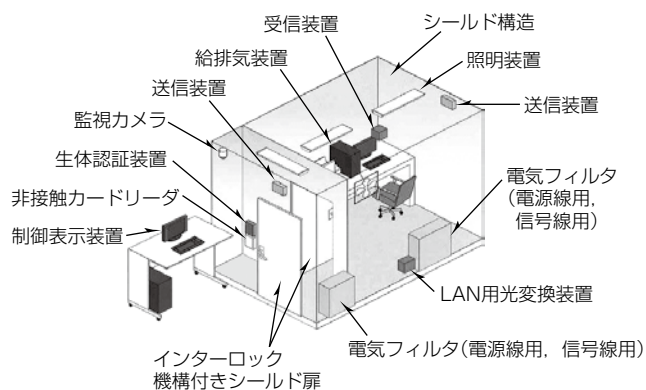


図2. 電磁シールドボックス例

4.2 ペルセウス・シールドの基本構成要素

ペルセウス・シールドの基本構成要素について述べる。

4.2.1 シールド壁・天井

良導性の鋼板(例:縦2m×横1m×厚さ1mm程度)を、シールド性能に応じた施工方法によって、四方隙間なくつなぎ合わせる。周波数範囲(GHz帯)や減衰性能が上がるほど、より緻密な施工を要する。

4.2.2 シールド床

良導性の鋼板(例:ロール鋼板)を敷き詰め、この上に床仕上げが施される。床はシールド材にとっては過酷な環境になるため、壁・天井とは異なる仕上げとすることが多い。

4.2.3 シールド扉

シールド扉はガスケット劣化等によってシールド性能に影響を及ぼす最も重要な要素である。常時シールドのシステムでは、シールド室前に前室を設け、2枚の扉をインターロック機構によって連動させることで同時開放が行われないように制御する。扉の外周に布設するシールドガスケットにはワイヤメッシュタイプのものやシールドフィンガタイプものなどがあり、グレモンハンドル等による押し付け力によって強く密着させる。

4.2.4 シールド窓

シールド窓にはガラス内に導電性塗膜を蒸着したもの、電磁シールドフィルムや導電性メッシュを挟み込んだものなどがあるが、透視性を考えた場合、約40dB程度が上限と考えてよい。

4.2.5 電気フィルタ

電気フィルタには電源線用と信号線用とがあり、それぞれ、商用電源周波数、数十kHz程度までの周波数を通過させるが、それ以上の高周波領域を減衰させるローパスフィルタである。特に信号線用では、デジタル信号は通過させることができず、専ら光ケーブルによることになる。また、HEMP対応の場合は、耐パルス仕様とする必要がある。

設計に当たっては、電気的な回路定数だけでなく、部品間の空間結合や筐体(きょうたい)からの漏洩対策が不可欠であり、電磁界解析によるシミュレーションで、共振点の空間結合に着目し、回路定数と物理配置の最適解を見いだして設計に役立てている。図3に電磁界解析シミュレーション例を示す。

電気フィルタの外観形状は、1線当たりの電流容量と芯数の構成によって様々である。

4.2.6 光貫通管

シールド壁面に光ケーブルを通線させるための金属配管であり、導波管での原理を転用し、金属管の内径と金属管長とによって、カットオフ周波数と減衰性能を制御・設計している。例えば、1GHzの場合、管の内径はφ100mm程度となる。当然、光ケーブルはメタル外装タイプのものは通線してはならない。

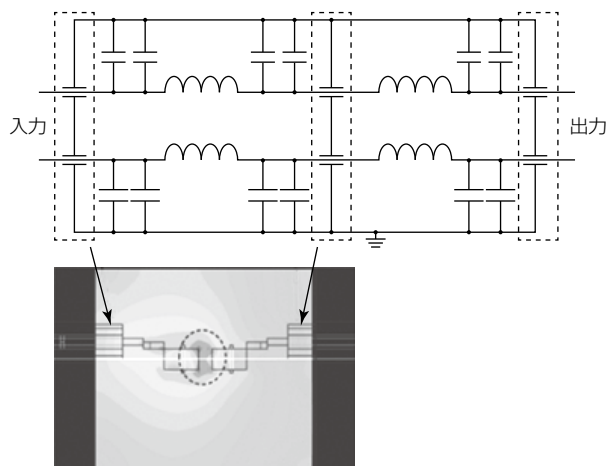


図3. 電磁界シミュレーションによる空間結合検討例

4.2.7 給排水配管

光貫通管と同様の原理によって、内径、長さに対応したシールド減衰性能が得られる。

4.2.8 空調用ハニカムフィルタ

空調エアの通風のための電磁シールドエアフィルタである。金属枠体にはめこんだ蜂の巣状の金属性ハニカムによって所要のシールド性能が得られる。

4.3 ペルセウス・シールドの付加構成要素

ペルセウス・シールドは4.2節で述べた基本構成要素に加え、セキュリティシステムとして求められる装備、また快適性、保守性などの観点から、幾つかの付加構成要素を組み合わせることでシステム構築している。次にペルセウス・シールドの付加構成要素について述べる。

4.3.1 シールド扉

付加構成要素として、遮音性を兼ね備えた遮音シールド扉があり、扉ガスケットにシールド用途、遮音用途のガスケットを設けることで実現する。

快適性については、押さえ圧を軽減したガスケットを開発・採用することによって、一般扉と同様のレバーハンドルによる開閉が可能な、軽く、操作性の良いシールド扉を実現している。自動扉を採用している例もあるが、設置、メンテナンス、維持費用とも高額になりがちである。

4.3.2 ラビリンス通路

シールド室への入退室にシールド扉を必要としない通路である。電磁解析による設計手法を駆使し、屈曲した通路と電波吸収材を組み合わせることによって、開口した形状でありながら、シールド性能を得ることができる(図4)。

4.3.3 シールド性能監視システム

シールド扉をはじめとした各構成要素は使用頻度、経年劣化、地震などの外的要因によって徐々に性能低下を来し、シールド性能の維持に当たっては定期的メンテナンスが必須である。また、悪意の破壊工作リスクに備えることも求められることから、シールド性能は常時連続的、かつ経年的に監視しておくことが求められる。図5に示すよう

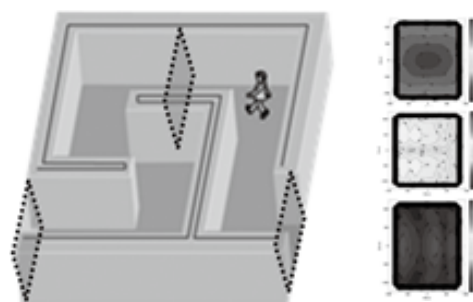


図4. ラビリンス通路と解析例

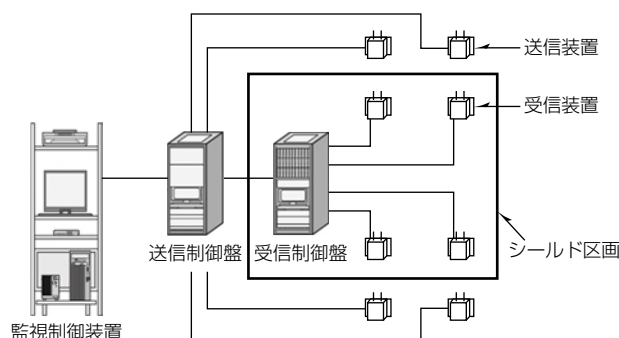


図5. シールド性能監視システム

にシールド性能監視システムはシールド区画内外に設置した送・受信装置によって常時シールド性能を監視するもので、シールド性能の低下を瞬時に検出して警報するとともに、監視ログをグラフ表示することで経年性的変化についても観測できる。

5. む す び

電磁波攻撃と電磁波盗聴のメカニズムを述べ、その対策として当社の電磁シールドシステム“ペルセウス・シールド”の基本構成要素と付加構成要素について述べた。シールド室はもともと、EMI(ElectroMagnetic Interference)測定用途や電波測定用途などの電波暗室向け特殊用途に供されていたが、現代の電磁波脅威の増加に伴い、サーバ室、オフィスルームなど、より身近な一般居室への適用が広く展開されつつある。これに伴い、特殊なシールド構成要素をいかに、使い勝手が良く、長寿命で手のかからないものにしていくか、“ペルセウス・シールド”では日々、その付加要素の拡充と拡大に努めている。

参 考 文 献

- (1) IEC1000-2-9: Electromagnetic compatibility (EMC) Part2: Environment-Section9: Description of HEMP environment-Radiated disturbance
- (2) 電気学会 電磁環境・情報セキュリティ技術調査専門委員会編: 電磁波と情報セキュリティ対策技術 (2012)
- (3) 鈴木康直, ほか: PCから放射される電磁波による情報漏洩への対策技術, NTT技術ジャーナル, 20, No.8, 11~15 (2008)

電波探知妨害装置

丸山康平*

Drone Deterrence System

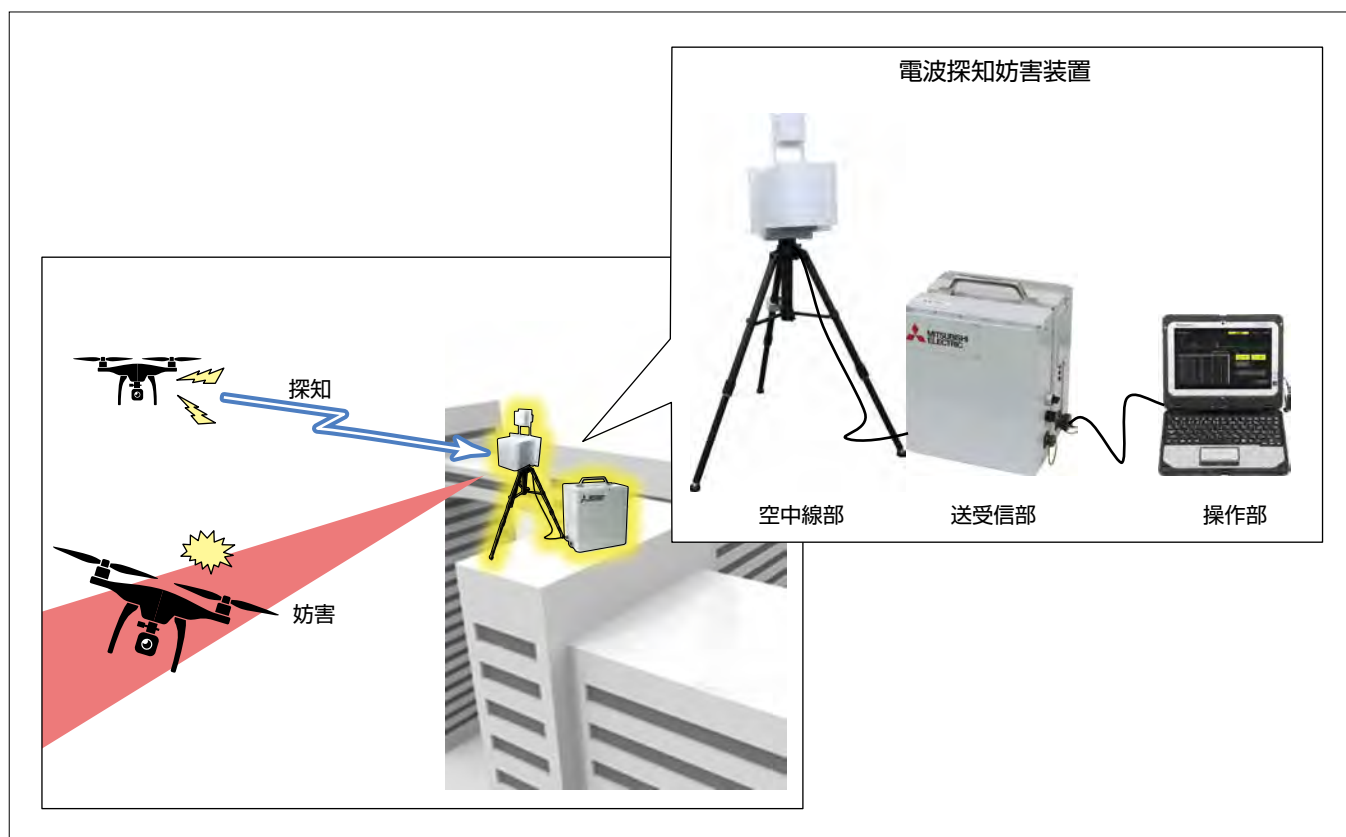
Kohei Maruyama

要 旨

技術進展に伴って小型無人機(ドローン)が極めて容易に入手可能になり、一般民生用途として急激に普及している。近年では趣味の用途だけでなく産業用途では災害時の空撮や高所構造物の安全検査等に活躍するドローンであるが、悪意を持って操縦する場合は社会に重大な影響を及ぼす。例えばドローンの高い機動性を生かし、化学薬品や爆発物を積んだまま要人にピンポイントで突入する行為や、重要防護施設を破壊するテロ行為が懸念されている⁽¹⁾。実際に海外では2014年にサッカーの国際試合中に政治的主張を示す旗を取り付けたドローンがスタジアムを飛行することでパニックが発生した事件⁽²⁾が報道されており、国内では2015年には首相官邸屋上に放射性物質を搭載したド

ローンが落下する事件⁽³⁾が発生している。こうした悪意あるドローンに対処する手段として、投網を射出してドローンを捕獲する手段や放水車の水圧で撃ち落とす手段があるが、これらの物理的手段では高速で飛行するドローンの対処は困難であり、有効な対処手段が模索されている。

三菱電機はドローンの利用する電波に着眼し、ドローンが放射する電波を捉えることでドローンを遠距離で探知するとともに、これを妨害することで即座に対処する電波探知妨害装置を開発した。電波によるドローンの遠距離対処が可能であり、条件によるが最大3kmの探知及び妨害を実現している。探知・妨害による防護エリアを形成することで、効果的なドローン警備を実現することが可能である。



電波探知妨害装置のコンセプト

指向性を持つ送受信共用の空中線部、受信信号の信号処理及び送信信号を生成する送受信部及びドローンの探知情報を表示し、妨害電波の発射操作を行う操作部で構成している。ドローンが機体状態や撮影画像情報を操作者に伝達するために発する電波を受信し、信号処理によってドローンを判別する。妨害はドローンが利用可能な複数の周波数帯を同時に妨害し、操縦による任意の飛行を阻害することが可能になる。

1. ま え が き

小型無人機(ドローン)の急激な普及に伴い、様々な分野でドローンが活用される一方で、悪意を持った操縦者によるドローンの対処については、関係機関での検討と模索が続いている段階にある。これに対して当社は、電波による遠距離かつ広域の探知・妨害を可能にする電波探知妨害装置を開発している。

2. 電波探知妨害装置

2.1 ドローン対処の仕組み

図1にドローン対処の仕組みを示す。近年のドローン・プロポ(ドローンの操作機)間の通信は、プロポからドローンの飛行に関する制御信号をドローンに送るアップリンク信号と、ドローンからプロポに撮影画像情報や機体状態、アップリンク信号に対する応答信号等を送るダウンリンク信号によって構成するものが一般的である。また近年のドローンはGPS(Global Positioning System)受信器を搭載し、指定した座標に自律的に飛行する機能を備えているものも多い。一方でドローンの紛失等を防ぐため、アップリンク信号の通信が確立している状態(即座に手動操縦に切り替えられる状態)でだけGPSによる自律飛行が実現できるようにインターロックが設定されており、妨害電波がアップリンク信号を遮断すると自律飛行を停止するものが大半である。電波探知妨害装置はダウンリンク信号を受信することでドローンの存在を探知し、妨害電波によってアップリンク信号がドローンに到達しないように遮断することで飛行制御を阻害する。

2.2 ドローンが利用できる周波数

表1にドローンが日本国内で利用できる周波数⁽⁴⁾を示す。特に近年のドローンはより通信容量を必要とするため920MHz帯以上を利用するものが多く、中でも920MHz帯及び2.4GHz帯は技術基準適合証明があれば無線局免許や無線従事者資格を必要としないため一般民生用ドローンのほとんどがこの周波数帯を利用している。また2016年には産業用ドローンをターゲットに、無線局免許、無線従事者資格及び運用調整を必要とするものの、より高出力な1Wでの通信が可能な2.4GHz帯(一部)及び5.7GHz帯が開放されている。これによって産業用途で空撮や安全検査を実施するドローンの通信をより遠距離で実施できるようになり、また他無線機材の混信による電波障害の抑制が期待できる。

表1. ドローンが日本国内で利用可能な周波数⁽⁴⁾

分類	無線局 免許	周波数帯	送信出力	利用形態	備考	無線従事者 資格
免許及び 登録を 要しない 無線局	不要	73MHz帯等	(注3)	・操縦用	ラジコン用 微弱無線局	不要
	不要(注4)	920MHz帯	20mW	・操縦用	920MHz帯テレ メータ用、 テレコントロール用 特定小電力無線局	
		2.4GHz帯	10mW/MHz	・操縦用 ・画像伝送用 ・データ伝送用	2.4GHz帯小電力 データ通信システム	
携帯局	要	1.2GHz帯	最大 1 W	・画像伝送用	アナログ方式限定(注6)	第三級陸上 特殊無線 技士以上の 資格
携帯局 陸上 移動局	要(注5)	169MHz帯	10mW	・操縦用 ・画像伝送用 ・データ伝送用	無人移動体画像 伝送システム (平成28年 8 月に 制度整備)	
		2.4GHz帯	最大 1 W	・操縦用 ・画像伝送用 ・データ伝送用		
		5.7GHz帯	最大 1 W	・操縦用 ・画像伝送用 ・データ伝送用		

(注3) 500mの距離で、電界強度が200 μ V/m以下のもの。

(注4) 技術基準適合証明等(技術基準適合証明及び工事設計認証)を受けた適合表示無線設備であることが必要。

(注5) 運用に際しては、運用調整が必要。

(注6) 2.4GHz帯及び5.7GHz帯に無人移動体画像伝送システムが制度化されたことに伴い、1.2GHz帯からこれらの周波数帯への移行を推奨している。

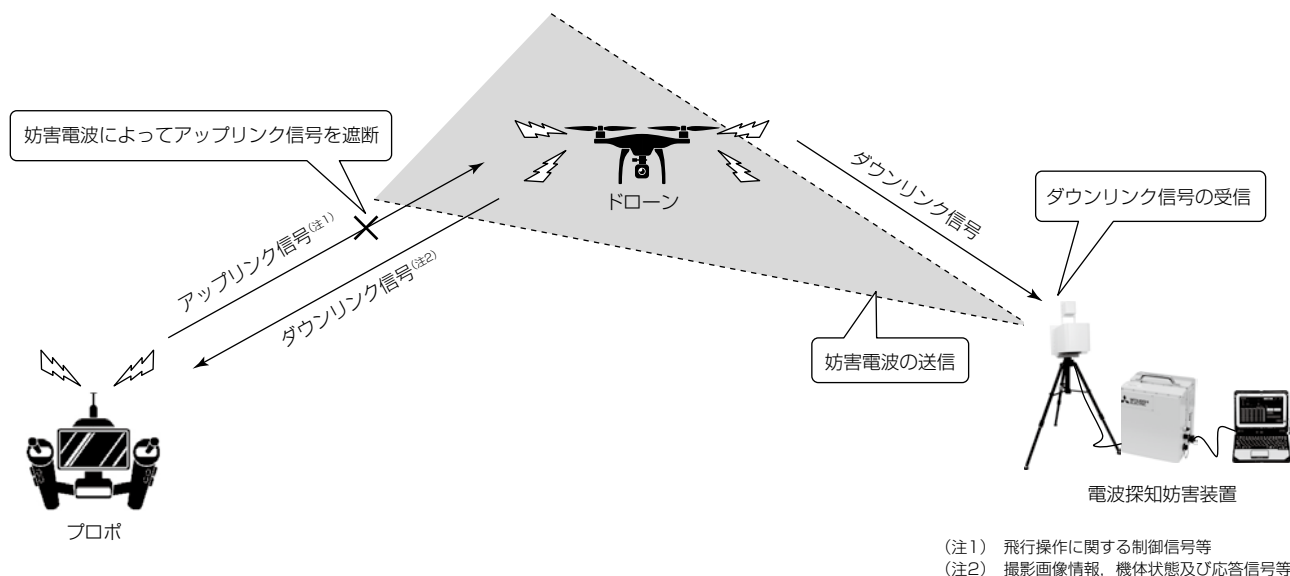


図1. ドローン対処の仕組み

(注1) 飛行操作に関する制御信号等
(注2) 撮影画像情報、機体状態及び応答信号等

2.3 電波探知の仕組み

ドローンの電波探知は、ドローンがプロポに向けて送信しているダウンリンク信号を受信することで実現している。ドローンが多用する2.4GHz帯等の周波数帯は無線LAN等の他無線機の信号が入り交じる環境となっている。したがって電波探知妨害装置は様々な受信信号を信号処理し、帯域幅、信号長及び現出頻度等を特徴量としてドローンの蓋然性の高い信号を識別している。

2.4 電波妨害の仕組み

図2に電波妨害の仕組みを示す。アップリンク信号がドローンに到達する電力に対して、妨害電波がドローンに到達する電力が高い場合、ドローンは妨害電波に埋もれたアップリンク信号を検出することができず、通信を妨げることができる。電力妨害と呼称される基本的な手法でありながら、様々な通信方式に有効であるため多用される妨害手法である。ドローンがアップリンク信号を検出できるかは各信号が雑音に比してどれだけの電力を持っているかを示す指標であるSNR(Signal to Noise Ratio)が、通信を維持する上での所要品質を満たしているかが要点となる。拡散符号等によってSNR改善を図る通信も多く、電波探知妨害装置の妨害電力は信号処理利得等を考慮した上で設計している。電波妨害では、特にSNRのノイズをジャ

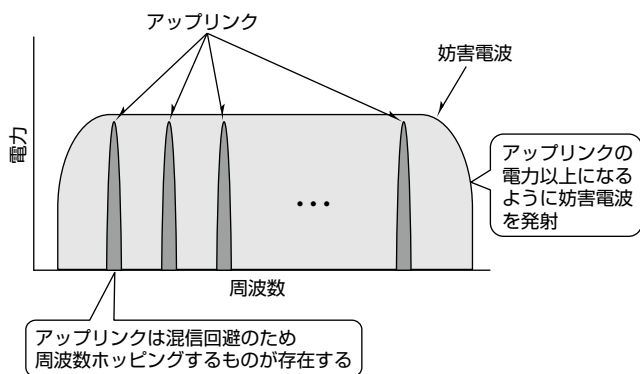


図2. 電波妨害の仕組み

表2. 電波探知妨害装置の諸元

項目	諸元	備考
対応周波数	920MHz帯, 2.4GHz帯, 5.7GHz帯	探知
	920MHz帯, 2.4GHz帯, 5.7GHz帯	妨害
送信電力	4 W (920MHz帯, 2.4GHz帯) 8 W (5.7GHz帯)	送受信部の出力端による
寸法質量	送受信部 W300×H380×D310(mm) 約17kg	突起部分、付属品を除く
	空中線部 W380×H540×D470(mm) 約7kg	三脚部分、突起部分及び付属品を除く
動作温度	-15~40℃	-
防水性能	IPX4相当	送受信部及び空中線部だけ
探知・妨害距離	最大3km	使用環境及び対象ドローンによる(注7)

(注7) 送信出力10mW, 周波数2.4GHzのドローンに対して、見通しのある条件による。
ドローンとドローン进行操作するプロポの距離は1km以上の条件による。

ミングに置き換えて逆数としたJSR(Jamming to Signal Ratio)で議論することが多い。

2.5 電波法との関係

電波探知妨害装置を日本国内で運用するには、運用者が無線局としての開局申請を実施する必要がある。したがって装置性能への制約として、電波妨害を実施する機材でありながら無線設備規則⁽⁵⁾に合致した空中線電力、周波数偏差及び帯域内外のスプリアス規程等を満足する必要がある。当社の装置はこれらの規程を満足するように設計しており、妨害装置でありながら妨害周波数外への影響を局限した電波の放射を可能にしている。

2.6 電波探知妨害装置の諸元

表2に電波探知妨害装置の諸元を示す。電波探知、電波妨害の周波数帯は日本国内でドローンが多用する920MHz帯/2.4GHz帯及び将来の利用拡大を見越した5.7GHz帯に対応している。送信電力は920MHz帯及び2.4GHz帯で4W, 5.7GHz帯で8Wであり、探知・妨害距離は条件によるが最大3kmである。また屋外配置のためIPX4(防まつ型)相当の防水性能を持っており、全方位からの水の飛まつに耐える構造となっている。

3. 実空界の妨害実証

妨害効果を実際の環境で確認するため、海外のテストサイトで実空界のドローン妨害検証を実施している。

3.1 複数同時ドローン妨害の検証

電波探知妨害装置が妨害電波を発射しているエリアに複数のドローンが突入した場合の妨害効果について検証した。図3に複数同時ドローン妨害の検証での配置図を示す。また図4に試験で使用したドローンを示す。使用したドローンは世界的なシェアを持つDJI社のPhantom3 Advanced及びPhantom4 Advancedであり、アップリンク信号は2.4GHz帯を利用する。電波探知妨害装置から妨害電波を発射し、その妨害覆域内に2機のドローンを最大速度で突入させて挙動を確認した。

検証結果として、2機のドローンはそれぞれほぼ同時に妨害覆域に突入した後、アップリンク信号が遮断されプロ

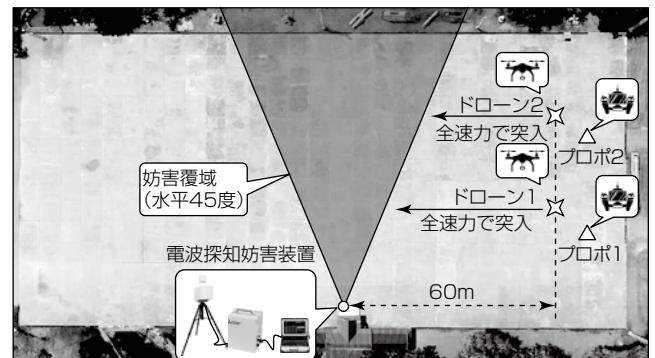


図3. 妨害距離検証の配置図



図4. 試験に使用したドローン

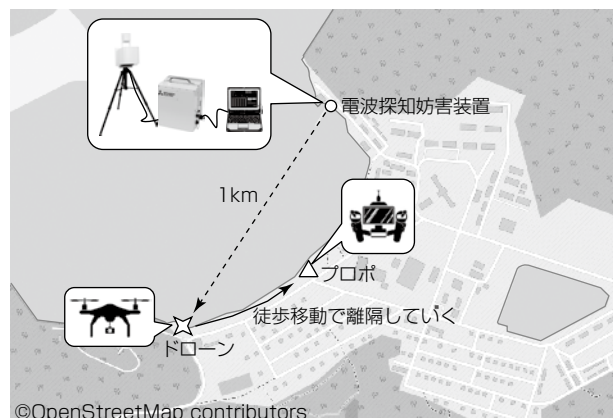


図5. 妨害可能距離検証の配置図

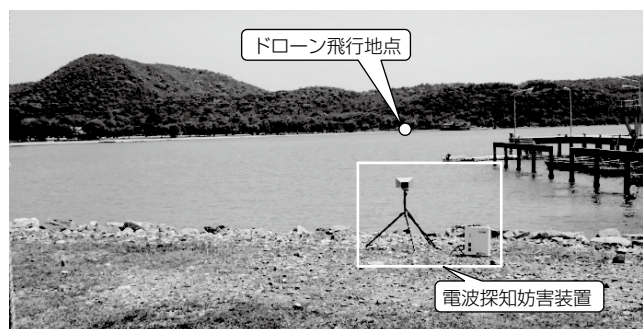


図6. 電波探知妨害装置周辺の様相

ボからの操作が不可になった。通信回線が切断されたドローンは前進指示がなくなったためその場でホバリングし、フェイルセーフモードによってその場で自動降下した。電波探知妨害装置は妨害電波による防護エリアを形成することで、複数のドローンが突入してきた際にも同時に対処が可能であることを確認した。

3.2 妨害可能距離の検証

次に、ドローンに対する妨害可能距離を検証した。図5に妨害可能距離検証の配置図を示す。また図6に電波探知妨害装置周辺の様相を示す。図6に示すとおり電波探知妨害装置の位置からドローン飛行地点は見通しがある状態である。電波探知妨害装置から1 km離隔した地点でドローンを高度50mでホバリング飛行させて妨害電波を発射した。その状態でプロボの操作員が徐々に移動し、プロボと

ドローンの離隔距離を変化させることによって妨害効果を検証した。なお移動するプロボとドローンの間は常に見通しがある状態にした。

結果として、電波探知妨害装置から1 km先のドローンへの妨害に対して、プロボとドローンが直線距離で0.3km離隔した時点で操作不能になり、ドローンはフェイルセーフモードによって自動降下した。したがって電波探知妨害装置はドローン-プロボ間通信距離の約3.3倍の離隔距離から妨害が可能である実証を得た。このとき使用したドローンの性能ではドローン-プロボ間の最大通信距離は1 km以上(Phantom4 Advancedのカタログスペック⁽⁶⁾では4 km)であり、ドローン-プロボ間通信距離の3倍以上が実証できたことで、電波探知妨害装置が3 km以上で妨害可能であることを確認できた。

4. む す び

電波によって悪意を持って飛行するドローンに対処する電波探知妨害装置を開発し、実空界での検証によってその効果を確認した。高速で移動する複数のドローンに対しても電波探知妨害装置によって妨害電波による防護エリアを形成することで対処可能であることが確認できた。また、目視が困難な遠距離を飛行するドローンに対しても3 kmの距離で妨害が可能であることを確認できた。今後は更なる性能向上及びカメラ等の他機材との連携等、市場ニーズに合致した開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 澤田雅之：テロ敢行手段としてのドローンの脅威と対処方策，警察政策，20，211～238 (2018)
- (2) BBC News：Serbia condemns drone flag stunt at Albania match (2014)
<https://www.bbc.com/news/world-europe-29627615>
- (3) 日本経済新聞：首相官邸にドローン落下，テロ対策の弱点が顕在化 (2015)
https://www.nikkei.com/article/DGXLASDG22H82_S5A420C1EA2000/
- (4) 総務省：ドローン等に用いられる無線設備について
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/>
- (5) 総務省：無線設備規則(昭和二十五年十一月三十日電波監理委員会規則第十八号)
http://www.tele.soumu.go.jp/horei/reiki_honbun/72081000001.html
- (6) DJI：Phantom4 Advanced/Advanced+ ユーザーマニュアル V1.0 (2017)
https://dl.djicdn.com/downloads/Phantom_4_Advanced/20170722/Phantom_4_Adv_and_Adv_Plus_User_Manual_JP.pdf

高解像度ライン磁気イメージセンサ “MICMO JS1Cシリーズ”

尾込智和* 山内一輝**
武舎武史**
浅村まさ子**

High-resolution Linear Magnetic Sensor "MICMO JS1C Series"

Tomokazu Ogomi, Takeshi Musha, Masako Asamura, Kazuki Yamauchi

要 旨

高解像度ライン磁気イメージセンサ“MICMO (Magnetic Ink Checker Module)”は金融端末装置に搭載され、紙幣や小切手等に含まれる磁気インク等の磁気情報を読み取るデバイスである。従来の磁気情報の有無を検知する磁気センサの画素ピッチが10mmピッチであるのに対して、MICMOは0.5mmピッチと20倍の解像度を実現しており、紙幣等のより詳細な磁気情報をイメージとして出力できることを特長としているため、偽札鑑別能力向上への貢献が期待できる。

三菱電機では、センサに感度の高いMR (Magneto-

Resistance：磁気抵抗効果)素子を採用し、独自開発した低雑音増幅器を含むアンプICを内蔵することで高いS/N (Signal-to-Noise)比を実現、さらに画素間のばらつき補正等を行う信号処理回路を搭載し、ばらつきの小さい安定した出力を実現したMICMO初号機“JS1Bシリーズ”を2016年度に開発した。

今回、初号機に対して、狭幅化(搬送幅25→16mmの実現)、低コスト化(従来比40%の低減)、外乱によるノイズの低減(磁気シールド追加、MRリセット機能の追加)等を実現した改良版の“MICMO JS1Cシリーズ”を開発した。



JS1C90



JS1C170



1,000円紙幣の出力画像(一部抜粋)



5ユーロ紙幣の出力画像(一部抜粋)

高解像度ライン磁気イメージセンサ“MICMO JS1Cシリーズ”の外観と紙幣の磁気情報読み取り結果

高解像度ライン磁気イメージセンサMICMO JS1Cシリーズによって、紙幣に埋め込まれた高精細で微弱な磁気情報をイメージとして出力することが可能になる。これによって、金融端末の偽札鑑別能力の向上が期待できる。なお、セキュリティ情報が含まれているため、出力画像は部分的な掲載としている。

1. ま え が き

近年、偽札が精巧化しており、ATM(Automatic Teller Machine)等の金融端末装置ではより精度の高いセキュリティ対策が求められている。金融端末装置には光学センサ(可視光、赤外線、紫外線)、磁気センサ、厚みセンサ等が搭載されており、各センサの読み取り精度を上げることで偽札鑑別能力の向上を図っている。当社では、光学センサとして密着イメージセンサ(Contact Image Sensor : CIS)、磁気センサとして高解像度ライン磁気イメージセンサMICMO、厚み検知センサとして静電容量方式テープ検知センサ(開発中)の開発・製造を行っている。

2016年度に、紙幣等に含まれる磁気インク等の磁気情報をイメージとして出力できる高解像度ライン磁気イメージセンサMICMO初号機JS1Bシリーズを開発・拡販したが、従来の磁気情報の有無を検知する10mmピッチ磁気センサとの置き換え要求が高く、従来磁気センサと同等のサイズ・単価を求められ、高解像度化のためにサイズ及びコストが拡大したMICMO初号機では、客先採用にまで至らなかった。また、従来磁気センサに比べ感度が高いため、ATM等の金融端末装置に搭載されたときに外乱によるノイズの影響を受けやすいという課題が判明した。

今回、これらの市場要求を踏まえて狭幅化、低コスト化、耐外乱性向上を達成したJS1Cシリーズを開発した。

本稿では、今回のJS1Cシリーズ製品化に当たり、JS1Bシリーズからの改良点と特長について述べる。

2. MICMOの基本構成

図1にMICMOの基本構成を示す⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。MICMOは、①紙幣等の検出媒体とMR(磁気抵抗効果)素子に磁束を印加するバイアス磁石、②検出媒体に含まれる磁気インク等の磁気情報を電気信号に変換するMR素子、③MR素子からの出力信号を低ノイズで増幅する低雑音増幅器と多画素読み出し回路(マルチプレクサ)を一体化したアンプIC、④アンプIC出力を増幅してデジタル信号に変換するAFE(Analog Front End)、⑤デジタル変換した磁気出力

信号に信号処理を行って客先システムへ出力する信号処理部から成る。従来の磁気情報の有無だけを検知する他社製10mmピッチ磁気センサは①と②だけで構成されたアナログ出力磁気センサデバイスであったのに対し、MICMOでは③～⑤も搭載して微弱なアナログ信号をノイズに強いデジタル信号に変換・出力することで、システム側の取扱い性を向上させている。

図2にMICMOの検出原理を示す。MICMOは外部磁束密度の変化を抵抗値の変化へ変換するMR素子を使用しており、ハーフブリッジ回路を構成することで温度特性等の品質安定化を図っている。バイアス磁石でMR素子の感度が一番高くなるようにバイアス磁束を印加するとともに、紙幣等の検出媒体にも磁束を印加している。MRチップ(MR素子A、B)には一定の電圧が印加されており、検出媒体が搬送されMR素子Aに近づく、検出媒体中に含まれる磁気インク等の磁性体によってMR素子Aに印加さ

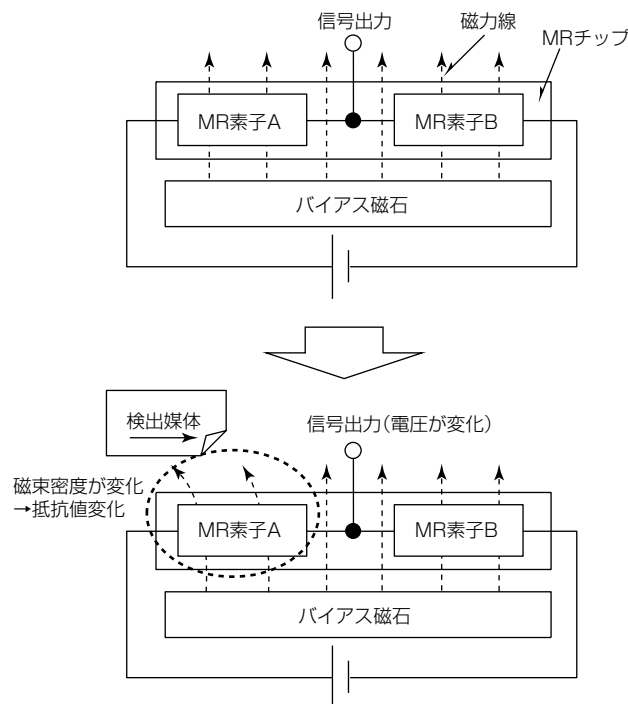


図2. MR素子検出方法

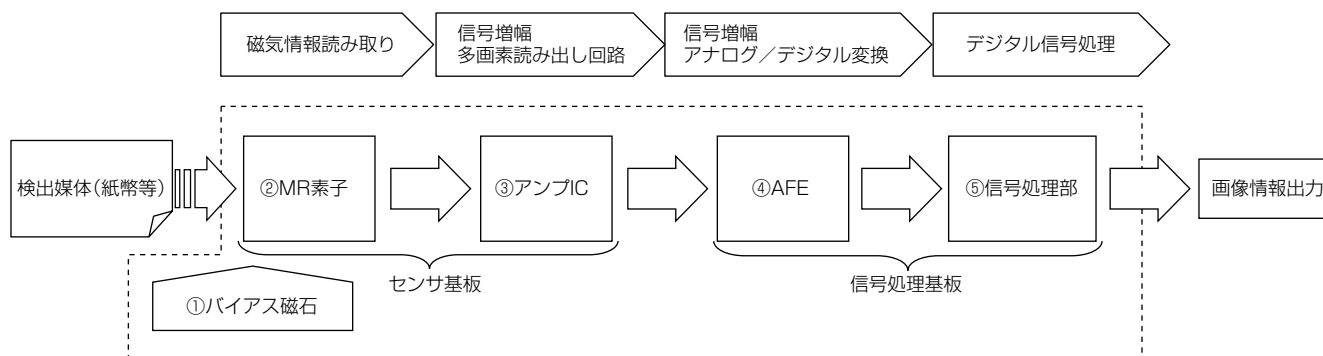


図1. MICMOの基本構成

れている磁束密度が変化してMR素子Aの抵抗値が変化する。それによって、信号出力端子の電圧の変化として検出媒体の磁気情報を検知でき、さらに、検出媒体が搬送されるとMR素子Bにも影響が及ぶようになり、同じ原理で検出媒体の磁気情報を検知できる。

3. JS1Cシリーズの開発

3.1 狭幅化

MICMO初号機であるJS1Bシリーズでは、図3に示すように搬送方向幅が25mmあった。これは、高解像度化に伴い、400chとなったMR素子出力を0.5mmピッチでアンプIC入力に接続する必要がある、その方策としてリジット基板の同一面上にMR素子とアンプICを並べて実装したためである。この構成によって検出媒体読み取り位置も搬送方向中心から5mmずれた位置となっていた。

JS1Cシリーズでは、図4に示すようにフレキシブル基板を採用し、アンプICをMICMOの側面側に配置したことで、搬送方向幅の短縮が可能になった。これによって外乱による磁気ノイズを遮断する磁気シールドを搭載した状態で、従来磁気センサと同等の搬送幅16mmを実現しただけでなく、従来磁気センサと同じく検出媒体読み取り位置を搬送方向中心に配置できた。

3.2 低コスト化

JS1Bシリーズでは、S/N比を確保するために、高価なネオジム焼結磁石を採用していたが、JS1Cシリーズでは磁石の大幅な原価低減を行うためにネオジムボンド磁石採用を前提にした磁気回路開発を行った。ネオジムボンド磁石に変更することによって搬送面の主磁束がJS1Bシリーズ：150mTに対して、JS1Cシリーズでは80mTまで下がったが、新たな磁気回路の構成でMRセンサの感度を向上させ、JS1Bシリーズと同等のS/N比を達成した。図5(a)にJS1Bシリーズでの1,000円札の読み取り結果(抜粋)を、図5(b)にJS1Cシリーズでの1,000円札の読み取り結果(抜粋)を示す。

3.3 外部磁性体の影響対策

金融端末装置では、紙幣等の検出媒体を搬送するために磁性ベアリングが磁気センサの前後に配置されており、

MICMOは高感度のMR素子を採用しているため、JS1Bシリーズを客先搬送系に搭載したときに、磁性ベアリングのノイズが大きく信号に影響を与えるという問題が判明した。この問題を回避するため、MICMOの外周に磁気シールドを配置して外部磁性体の影響を低減する対策を実施した(図4)。図6に外部磁性体の影響評価条件(MICMOと磁性ベアリングの配置)を、図7にJS1Bシリーズでの評価結果、図8にJS1Cシリーズでの評価結果を示す。この対策によって外部磁性体の影響をJS1Bシリーズに対して1/3まで低減できた。

また、JS1Cシリーズでは主磁束を80mTまで低減させたことから、MICMOが発生する磁場による客先装置への影響も大幅に低減された。

3.4 MRリセット機能の追加

MICMOで採用しているMR素子は磁性体であるためヒステリシスを持つ。ヒステリシスの影響で、クリップ等の磁力の大きな磁性体が搬送されてしまうと、クリップ搬送後に出力MAX値又はMIN値に貼り付いてしまうという課題があった。これは、クリップ等の強磁性体によってMR素子がマイナーループに入ってしまうことが原因であり、正常動作に復帰させるには正しい方向に磁界を印加し直す必要がある。この対策として、MR素子上に大電流を流して強磁界を発生させることで磁界の状態をリセットする回路を追加した。この対策によって、クリップ等の強磁性体が搬送された後に、MR素子リセットを実施するため、次の検出媒体搬送時には正常な出力が得られるようになった。

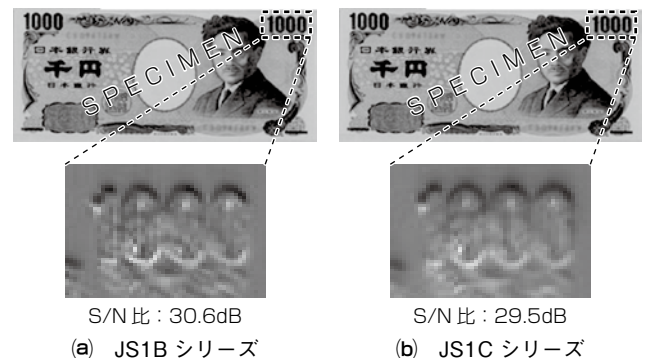


図5. 1,000円札の読み取り結果の比較

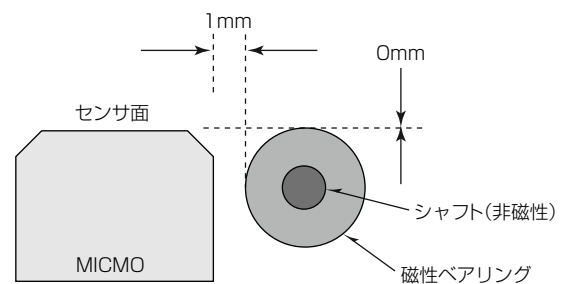
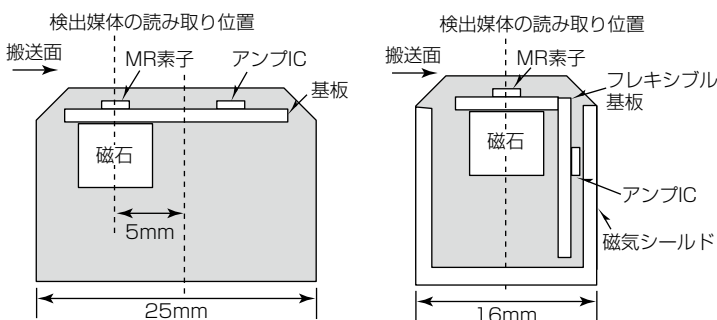


図6. 外部磁性体の影響評価条件

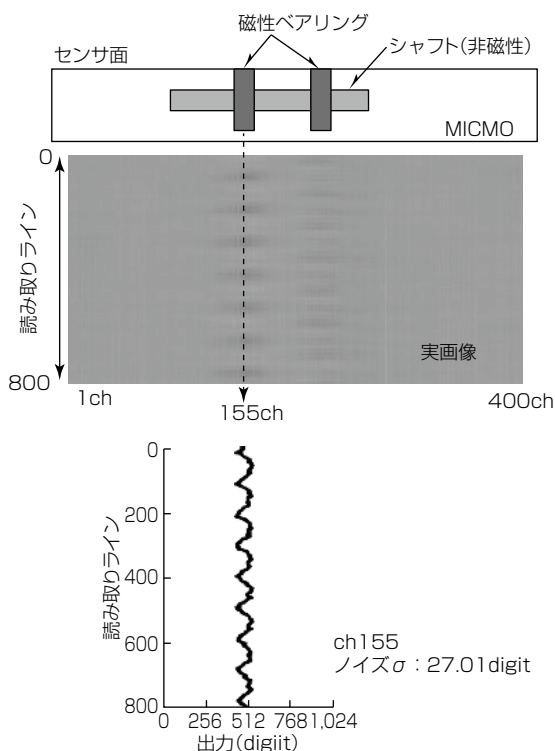


図7. JS1Bシリーズでの影響評価結果

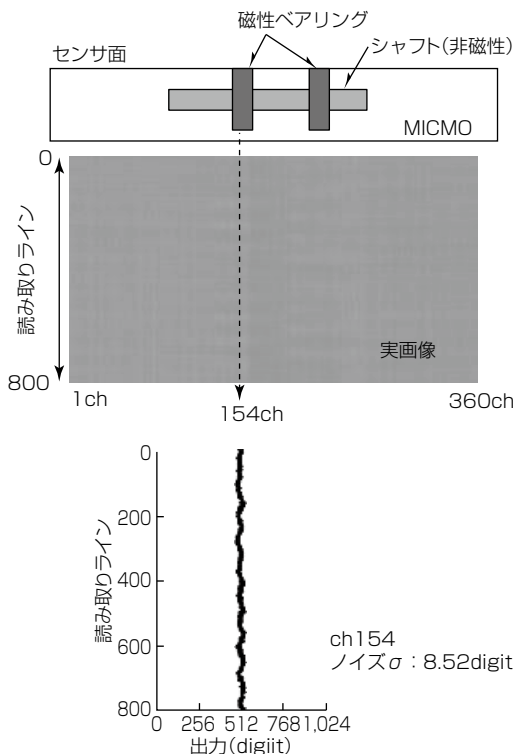


図8. JS1Cシリーズでの影響評価結果

4. 今後の展開

今回開発したMICMO JS1Cシリーズの主な仕様を表1に示す。紙幣のショートエッジ読み取りを想定した“JS1C90”,

表1. JS1Cシリーズの主な仕様

項目	JS1C90	JS1C170
読み取り幅	100mm	180mm
有効読み取り幅	90mm	170mm
有効画素数	180	340
画素ピッチ	0.5mm (50dpi相当)	
ライン周期	62.5~1,000μs/ライン	
データ出力方式	10ビット長デジタル LVDS出力	
制御インタフェース	SPI準拠	
搬送面主磁束	80mT	
電源仕様	5V×0.65A	5V×0.85A
外形寸法(L×W×H)	114×16×25(mm)	194×16×26.5(mm)
質量	110g	200g

LVDS: Low Voltage Differential Signaling
SPI: Serial Peripheral Interface

ロングエッジ読み取りを想定した“JS1C170”の2種類のラインアップを持ち、JS1C170は2019年3月、JS1C90は2019年夏頃から量産開始予定である。

金融端末装置用磁気センサには、①検出媒体のソフト磁性体/ハード磁性体識別、②ハード磁性体の保磁力識別、③高解像度化(100dpi)、④光学センサ、厚み検知センサと磁気センサの一体化等の更なる高性能化の要求があり、今後、これらの新たな要求に対応する磁気センサの開発も進める予定である。

5. む す び

当社の高解像度ライン磁気イメージセンサ“MICMO”の概要と特長、JS1BシリーズからJS1Cシリーズへの改良点について述べた。高解像度、高S/N比、安定出力を実現したJS1Bシリーズに、狭幅化、低コスト化、外部磁性体の影響対策追加、MRリセット機能追加の改良を加えたJS1Cシリーズをリリースすることによって、従来困難であった高精細で微弱の磁気情報のイメージ化が、従来の磁気情報の有無を検知する10mmピッチ磁気センサとの置き換えで対応可能になり、金融端末装置の偽札鑑別向上に貢献できると考えている。今後、更なる拡販と他分野への展開に向けた市場調査も進めて適用拡大を図り、社会に広く貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 尾込智和, ほか: 高分解能ライン磁気イメージセンサ“MICMO”, 三菱電機技報, 90, No.2, 143~146 (2016)
- (2) 高分解能ライン磁気センサ“MICMO”: 三菱電機技報, 89, No.1, 16 (2015)
- (3) 井上 甚, ほか: 磁気インク強度読取り用の磁気センサの開発, 平成25年電気学会全国大会, 3-163 (2013)

パッチアンテナによるタービン発電機と高圧モータの部分放電計測

岡田真一*
久保崎 満**

Partial Discharge Measurement with Patch Antenna for Turbine Generator and High-voltage Motor
Shinichi Okada, Mitsuru Kubosaki

要 旨

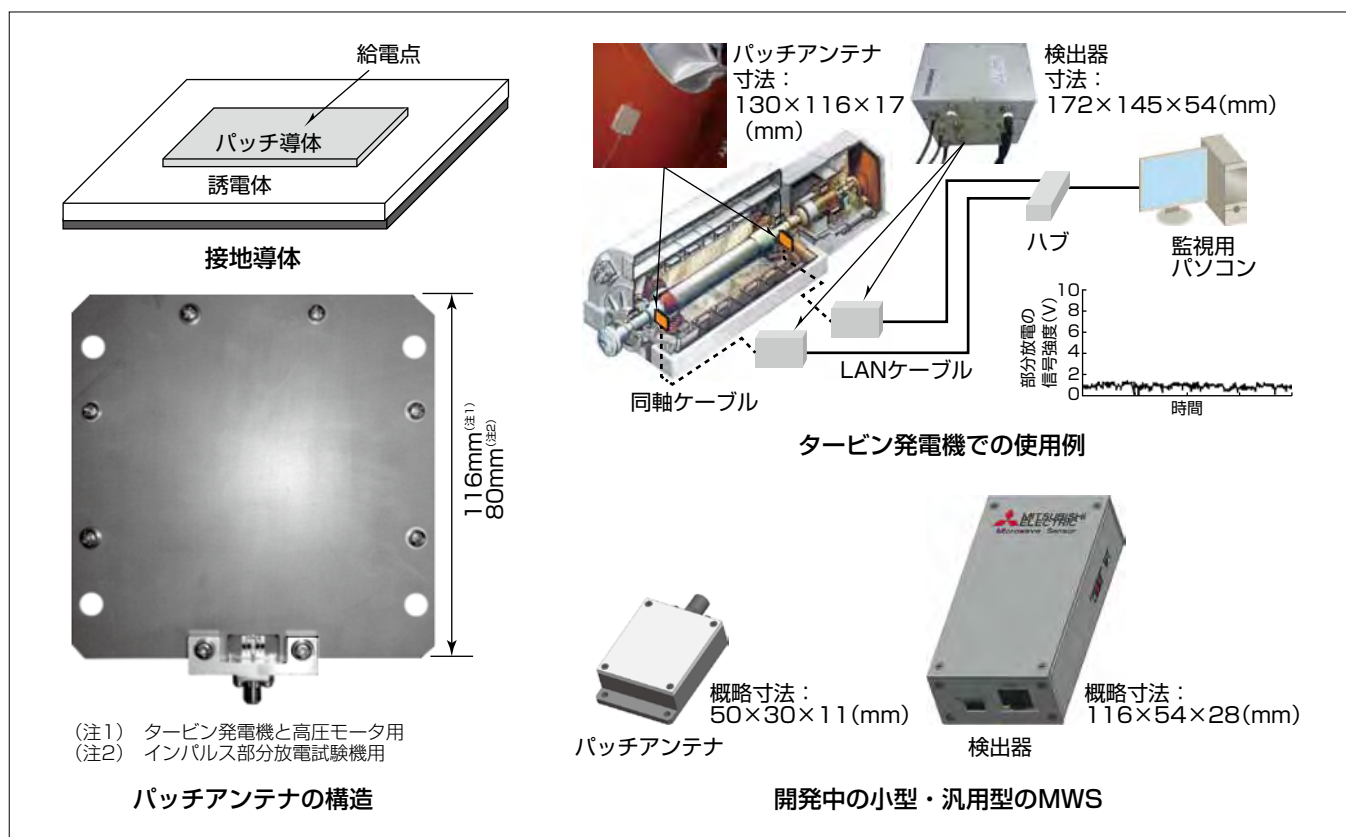
電力の安定供給と工場の安定操業のために、タービン発電機と高圧モータの予期せぬ停止は回避すべきであり、昨今では運転状態を連続的に監視する装置の需要が高まってきている。このような状況のなか、絶縁異常の兆候を早期に検出するために、部分放電によって放射される電磁波が広帯域であることに注目し、GHz帯の電磁波を検出して部分放電を連続的に計測するマイクロ波センサ(MicroWave Sensor：MWS)を開発した。MWSは小型・薄型のパッチアンテナと信号処理を行う検出器で構成している。

タービン発電機に取り付ける場合、回転子を引き抜くこ

となく短時間で容易に取り付けることができ、高電圧部の固定子巻線から離れた場所に設置するため、固定子巻線の主絶縁に悪影響を与えることはない。高圧モータの場合、パッチアンテナは、回転子と固定子ギャップの点検窓又は冷却通風孔の外部に設置できる。

このMWSの応用としてインパルス部分放電試験機に適用している。パッチアンテナはGHz帯の高周波であるため、インパルス電圧印加時の突入電流によるノイズを検出せず、部分放電信号だけを検出できる。

現在、更なる監視対象機器の拡大を目指した小型・汎用型のMWSを開発中である。



パッチアンテナの構造とMWSの使用例

パッチアンテナは接地導体、誘電体、パッチ導体の3層構造であり、平面形状が特徴である。パッチアンテナは、タービン発電機の場合、筐体(きょうたい)内側のタービン側と励磁器側にそれぞれ設置することを基本とし、インパルス部分放電試験機の場合、被試験品に向けて配置する。パッチアンテナで受信した信号に対して検出器でフィルタリング、増幅、検波等を行い、パソコンに記録又は試験機に表示する。

1. ま え が き

タービン発電機や高圧モータの運転状態を連続的に監視して絶縁異常の予兆を早期に検出する装置の需要が高まっていることから、高電圧の固定子巻線で発生する部分放電を連続的に計測するMWSを開発した。また、このセンサをモータのインパルス部分放電試験機にも適用した。

本稿では、このセンサと計測データについて、また開発中の小型・汎用型MWSについても述べる。

2. パッチアンテナを用いた部分放電計測

2.1 システムの基本構成

MWSはパッチアンテナと信号処理を行う検出器で構成される。図1に検出器のブロック図を示す。検出器は、パッチアンテナの信号に対してフィルタリング、増幅、検波、ゼロクロス検出と比較等の信号処理を行ってパソコンにデータを送る。インパルス部分放電試験用の検出器は、電源回路、データ処理部の機能を外して小型化している。

2.2 タービン発電機

固定子コイルの絶縁異常を模擬してMWSで部分放電特性を取得した⁽¹⁾。絶縁異常の一例として、固定子コアの折損等の異常でコア積層板が主絶縁に刺さり、主絶縁が損傷する事象が考えられる。主絶縁に溝を切り、溝にSUS (Special Use Stainless) 鋼板を配置して異常を模擬した。溝の深さを62%、89%としたときの部分放電位相特性を図2に示す。横軸がサンプルに印加した高電圧の位相、縦軸が部分放電の信号強度を表している。この図から、電圧位相に応じて部分放電が発生していることが分かる。劣化が大きく(溝が深く)なると、部分放電の強度が増加しており、部分放電の強度変化から劣化状態を推定できることが分かる。

位相特性の各点を強度順に並べたものが図3である。このセンサでは、部分放電強度の指標として60pps値(50Hzの地域では50pps)を用いており、例えば5秒間の計測の場合には300個目が指標となる。この値は自動計算され部分放電強度の長期トレンド監視に用いている。

図4は定格19kVの水素冷却タービン発電機で固定子巻線の巻替え前後のトレンド監視である。長期間の使用で固定子巻線の劣化が認められたため、巻替えを実施した。巻替え後は部分放電強度が小さくなっていることが確認できた⁽²⁾。このセンサを発電機に搭載して常時監視を行い、絶縁異常の早期検出に活用している。

また標準化活動を行い、IEC/TS 60034-27-2 Ed.1.0: 2012(回転電気機械-第27-2部: 回転電気機械の固定子巻線絶縁でのオンライン部分放電の測定)、IEEE Std 1434-2014(IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery)にMWSによる方式が記載された。

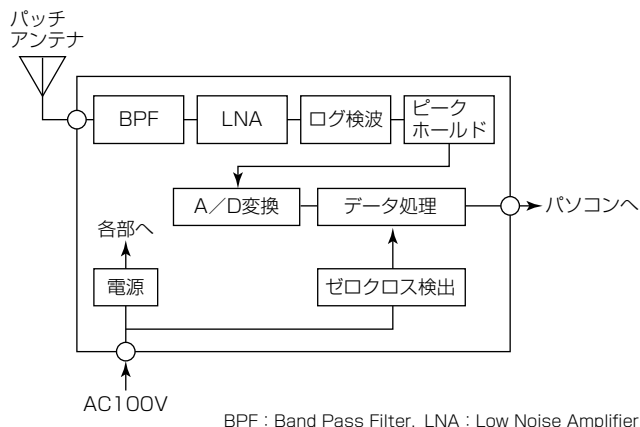
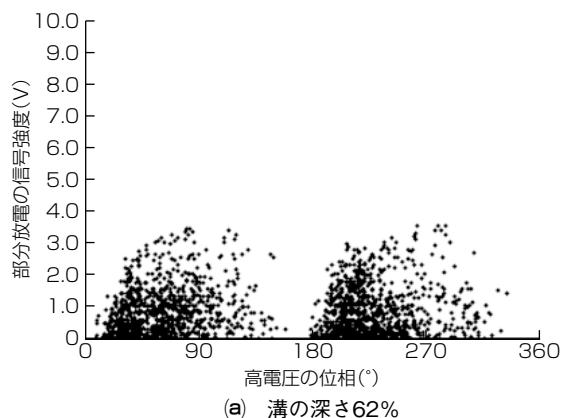
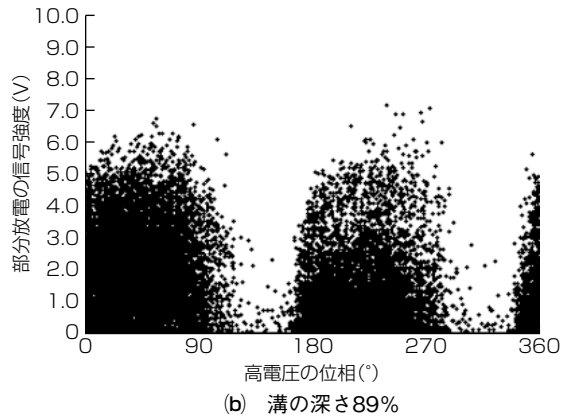


図1. 検出器のブロック図



(a) 溝の深さ62%



(b) 溝の深さ89%

図2. 部分放電位相特性

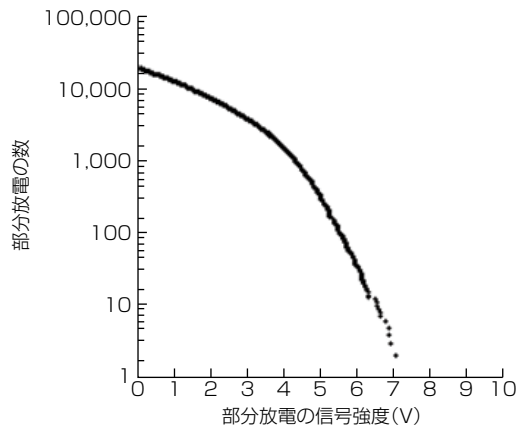


図3. 部分放電の強度分布

2017年には、電気保安に貢献したことが評価され、一般社団法人日本電気協会の澁澤賞を受賞した。

2.3 高圧モータ

工場の動力源を担う高圧モータも絶縁の状態を把握して
予期せぬ停止を回避するために、部分放電を連続監視して
いる。定格6.6kVの高圧モータの部分放電計測結果の一例
を述べる⁽³⁾。図5(a)は1相で劣化が進み、1相で部分放電
が発生したときの部分放電位相特性で、位相が180°付近
と360°付近で部分放電が集中的に発生している。図5(b)
は3相で劣化が進み、部分放電が発生したときの部分放電
位相特性で、部分放電が集中的に発生している位相が6か
所ある。このように部分放電位相特性から劣化の様相を推
定することができる。タービン発電機と同様、高圧モータ
もトレンド監視及び個別の部分放電位相特性の監視を行う。

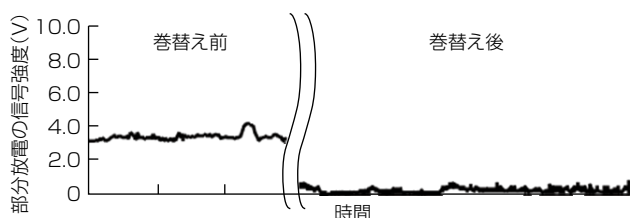
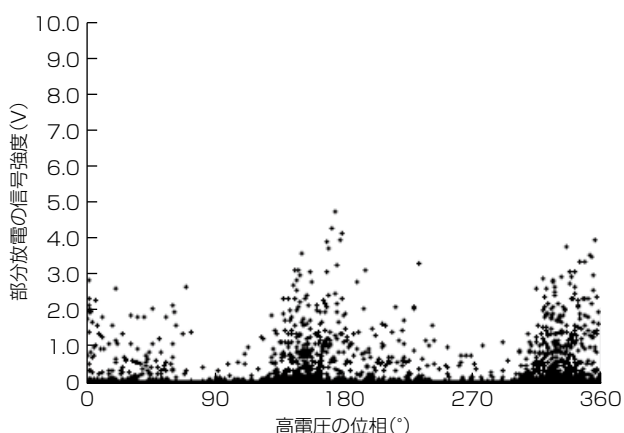
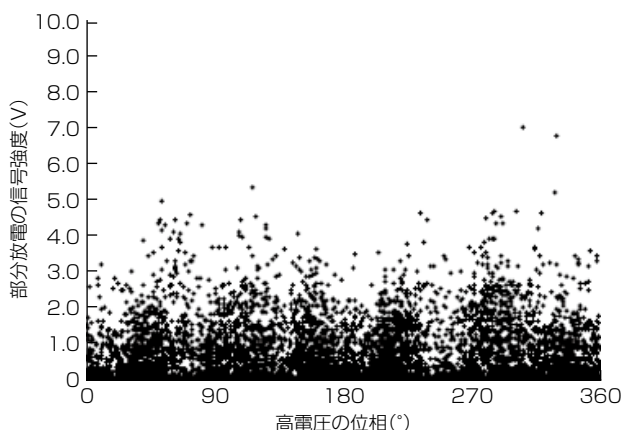


図4. 固定子巻線の巻替え前後のトレンド監視



(a) 1相で部分放電が発生



(b) 3相で部分放電が発生

図5. 高圧モータの部分放電位相特性

2.4 インパルス部分放電試験機

小型化したパッチアンテナと、機能を限定して小型化した検出器をインパルス部分放電試験機(株電子制御国際製DWX-05PD)に適用した⁽⁴⁾(**図6**)。インパルス部分放電試験機は主に低圧モータの絶縁評価に使用するもので、インパルス電圧印加時の突入電流によるノイズが問題であったが、MWSはGHz帯の狭帯域を計測するため、ノイズを検出せずに部分放電信号だけを検出できる。部分放電の計測結果の一例を**図7**に示す。インパルス電圧の立ち上がり部分でノイズを検出せず、インパルス電圧のピーク付近などで発生した部分放電を検出できていることが分かる。

MWSは、電気学会の繰り返しインパルスでの部分放電計測調査専門委員会で行われた繰り返しでの部分放電開始電圧(RPDIV)を計測する共同実験で共通センサとして採用された。インパルス電圧を10回印加ごとに昇圧し、そのうち5回以上のインパルス電圧で部分放電が発生した電圧をRPDIVとした。図8はRPDIV計測時のインパルス電圧とMWSで計測した部分放電信号を示している⁽⁵⁾。この図は時間軸を圧縮しているため、インパルス電圧及び部分放電信号は線状に表示されている。RPDIVは同一試料・同一インパルスに対する平均値と標準偏差の分布は使用したセンサや研究機関にかかわらずほぼ狭い範囲に分布していた⁽⁶⁾ことから、MWSは各研究機関の部分放電センサと同等の検出感度を持ち、モータの部分放電検出装置として



図6. インパルス部分放電試験機(左)と
小型化したパッチアンテナと検出器(右)

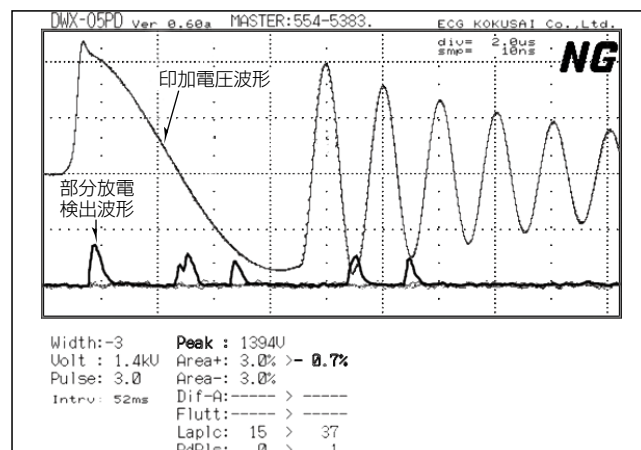


図7. 部分放電発生時のインパルス部分放電試験機の画面

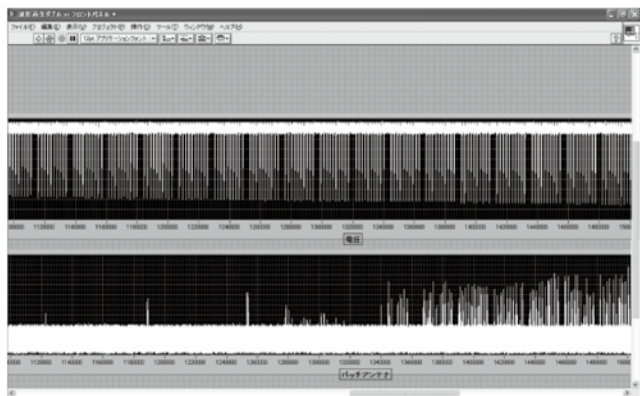


図8. RPDIV計測時のインパルス電圧(上)とMWSの信号(下) (5)

十分な性能を持つことを示した。

また部分放電の検出性能だけでなく、耐ノイズ性も持っており、モータ製造ライン等のノイズ環境が比較的劣悪な場所でもこの装置を適用できている。

標準化活動も進めてIEC/TS 61934 Ed.2.0：2011(絶縁材料及びシステム-短い立ち上がり時間及び繰返し電圧インパルス下での部分放電(PD)の電気計測)に部分放電計測の1手法として記載され、付録に先に述べた共同実験の結果が記載されている。

3. 小型・汎用型MWSの開発

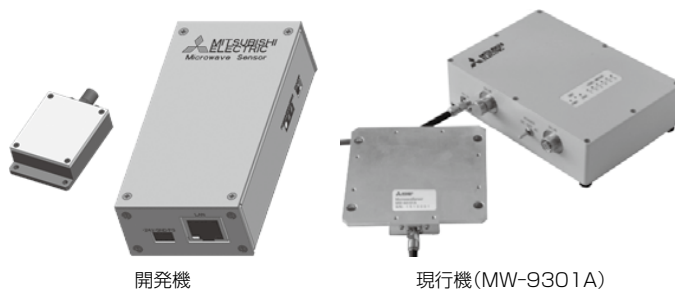
近年のIoT(Internet of Things)の拡大、状態監視や予防保全に対する関心の高まりによって、タービン発電機と高圧モータへのMWS適用が拡大している。またインバータ駆動装置での、インバータサージによる部分放電に対する関心が高まっている。

そのような背景のなか、MWSの適用拡大を目指した小型・汎用型MWSの開発を行っている。図9に現在開発中のMWSのパッチアンテナ、検出器の外観イメージとタービン発電機で使用しているMWS(現行機：MW-9301A)の外観を示す。

開発中のMWSは基本性能を従来機から変更することなく小型化しており、パッチアンテナのサイズは50×30×11(mm)と現行機(130×116×17(mm))と比較すると容積比で90%以上の小型化を実現する見込みである。パッチアンテナの小型化によって装置内部へ設置不可であった機器(中型、小型の発電機、モータ、分電盤等の絶縁劣化が問題となる装置)の部分放電監視への適用拡大を考えている。

検出器は116×54×28(mm)と現行機(172×145×54(mm))と比較すると容積比で85%以上の小型化を実現する見込みであり、スマートフォンが置けるスペースがあれば設置可能になる。

現行MWSは出力計測用に専用のソフトウェアが必要であり、また監視用パソコンとMWSの間は専用のLAN環境が必要になる。そこで開発中のMWSでは汎用的に使用



	開発機の概略寸法	現行機の寸法	容積比
パッチアンテナ	50×30×11(mm)	130×116×17(mm)	90%以上低減
検出器	116×54×28(mm)	172×145×54(mm)	85%以上低減

図9. 開発中のMWSと現行機の比較

できるように出力をCC-Link IE Field Basic対応とした。そのようにすることで専用ソフトウェア、専用回線は不要になり、また、監視対象機器に対して振動センサ等様々なセンサで同時監視するなどユーザーの使い方に対する自由度が広がるものと期待している。

4. む す び

部分放電の計測用マイクロ波センサと、タービン発電機や高圧モータの状態監視、さらにはモータ用のインパルス部分放電試験機への適用事例について述べた。近年のIoTやAI(Artificial Intelligence)の発展によって、様々な電気機器への状態監視の需要が広がっていることから、小型・汎用型MWSの開発によって、このセンサの適用機種を拡大していく。

参 考 文 献

- (1) 岡田真一，ほか：マイクロストリップアンテナによる発電機のオンライン絶縁診断技術，電気評論，102，No.6，66～70 (2017)
- (2) 佐古 浩，ほか：マイクロストリップアンテナによるタービン発電機のオンライン部分放電計測，三菱電機技報，87，No.11，636～639 (2013)
- (3) 澤田憲良，ほか：高圧電動機への運転中部分放電監視技術の適用，電気学会全国大会，第2分冊，6～7 (2010)
- (4) 久保崎 満，ほか：PD検出用マイクロ波センサの開発と実機適用，電気学会全国大会，第2分冊，15～16 (2008)
- (5) 木村 健，ほか：繰返しインパルスに対する部分放電開始電圧(RPDIV)の第1次共同実験(RRT)，第40回電気電子絶縁材料システムシンポジウム，D-1，95～98 (2009)
- (6) 繰返しインパルスにおける部分放電計測とインバータサージ絶縁，第1218号電気学会技術報告 (2011)

新型宇宙ステーション補給機 “HTV-X” サービスモジュール

堀田成紀*

Improvement of Japanese Cargo Transfer Vehicle "HTV-X" and Service Module

Shigeki Hotta

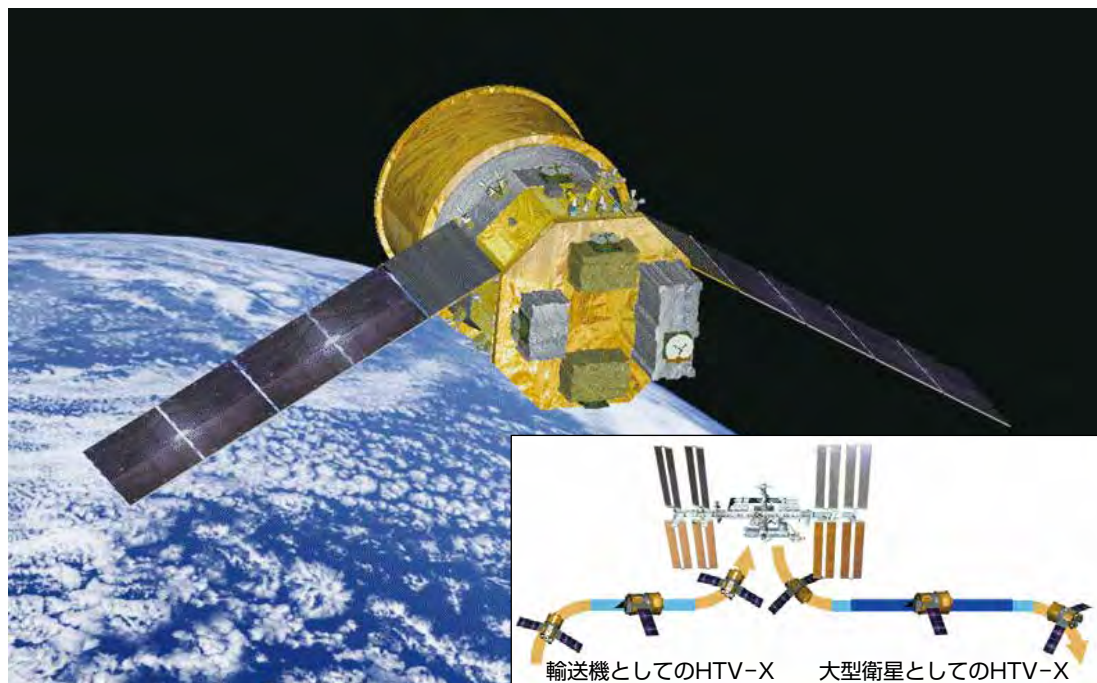
要 旨

新型宇宙ステーション補給機“HTV-X”は、国際宇宙ステーション(International Space Station : ISS)への物資補給を行うとともに、将来の宇宙活動に対する波及性の高い技術を獲得するための技術実証プラットフォームとして活用することを目的として開発が進められている。7機の飛行実績を持つ宇宙ステーション補給機(H-II Transfer Vehicle : HTV)の開発・運用実績を踏まえて、輸送効率を更に向上させることで国際協力ミッションであるISS運用に寄与する。また、物資補給後の軌道上飛行期間を活用し、技術実証プラットフォームとして利用し、将来宇宙活動の発展に寄与することをもう一つの開発目的としている。

三菱電機では、“ISSへの物資輸送機”と“技術実証プラットフォームとしての大型衛星”の二つの開発目的を実現す

るために、宇宙輸送機・大型衛星の開発実績・技術を最大限に活用してHTV-Xの開発に取り組んでいる。現行HTVからの技術的改良を実現すべく、当社の静止・周回衛星技術を積極的に融合させ、確実かつ効率的な開発を進めている。

HTV-X開発を踏まえた将来への取組みとして、ポストISSの国際動向を踏まえてHTV-Xの技術実証プラットフォームを活用したドッキング実証等の将来技術獲得にも積極的に取り組む方針である。さらには、将来的な月拠点有人活動を支える物資輸送機としての発展も視野に入れてHTV-Xサービスモジュールの開発で得られた技術を活用していく。



新型宇宙ステーション補給機“HTV-X”の軌道上飛行イメージとその開発目的

HTV-Xは、国際宇宙ステーションへの物資補給を行うとともに、将来の宇宙活動に対する波及性の高い技術を獲得するための技術実証プラットフォームとして活用することを目的として開発を進めている。輸送機として物資補給ミッションを完了した後、最長1.5年間の軌道上飛行期間を利用して軌道上技術実証を行う。輸送機と軌道上実証プラットフォームとしての大型衛星の両方の機能・性能を具備した宇宙ステーション補給機である。

1. ま え が き

当社は、宇宙輸送機としてISSへの物資補給を担うHTVの電気モジュールの開発・製造・運用に20年来携わっている。その実績を踏まえて、HTV-Xサービスモジュールの開発メーカーとして宇宙航空研究開発機構から選定され、2016年度から開発に着手している。HTV-Xは、ISSへの物資補給を行うだけでなく、その貴重な飛行機会を利用して将来宇宙活動に寄与する軌道上実証ミッションを行う軌道上プラットフォームとして活用することも開発目的となっている。

本稿では、物資補給と軌道上プラットフォームの両方の要求を実現する新型宇宙機であるHTV-Xサービスモジュール開発に関する当社の取組みを述べる。

2. HTV-X開発の目的と当社の取組み

2.1 HTV-X開発の目的

HTV-Xは、ISSへの物資補給を行うとともに、将来の宇宙活動に対する波及性の高い技術を獲得するための技術実証プラットフォームとして活用することを目的として開発を進めている。ISSへの物資補給は、現在、日本が開発したHTV及び米国・ロシアの補給機によって実施されている。HTV-Xでは、HTVの開発・運用実績を踏まえて、輸送効率を更に向上させることで国際協力ミッションであるISS運用に寄与するとともに、国際パートナーに対するプレゼンスをより一層高めることを開発目的の一つとしている。また、物資補給後の軌道上飛行期間を活用し、技術実証プラットフォームとして各種軌道上実証ミッションユーザーに対する軌道上実証サービスを提供し、将来宇宙活動の発展に寄与することをもう一つの開発目的としている。

2.2 当社の取組み

当社では、“ISSへの物資輸送機”と“技術実証プラットフォームとしての大型衛星”の二つの主な開発目的(図1)を実現するために宇宙輸送機・大型衛星の開発実績・技術を最大限に活用してHTV-Xの開発に取り組んでいる。HTV-Xはサービスモジュールと与圧モジュールの二つのモジュールから構成される機体であり、当社実績・技術が活用できるサービスモジュールの開発に2016年12月から着手している。HTV-Xサービスモジュールの開発に関しては、次の4点を主要な取組み方針として開発を進めている(図2)。

(1) 有人安全要求への対応

HTV電気モジュールの開発及び7機の製造・実運用の経験を最大限に活用し、NASA(National Aeronautics and Space Administration)有人安全要求に適合したシステムの開発を進める。特に、NASA安全審査やNASAとの統合実運用・合同運用訓練での経験・知見・共有情報を最大限に活用して開発を行う。

(2) 輸送能力向上と費用削減

衛星開発・運用実績及び最新の技術開発成果を取り込み、

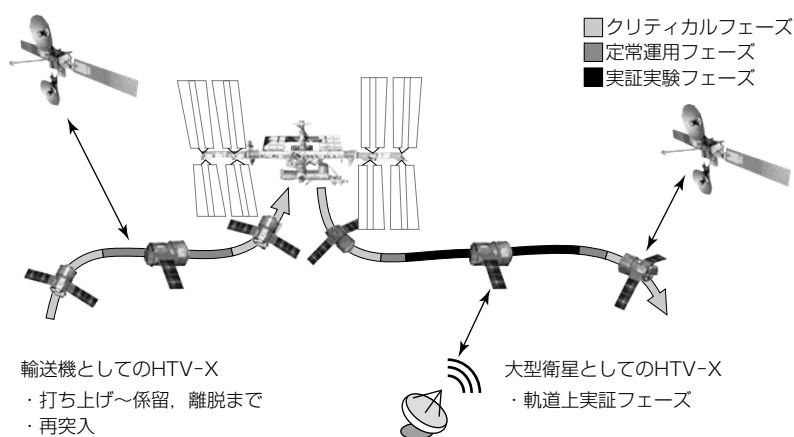
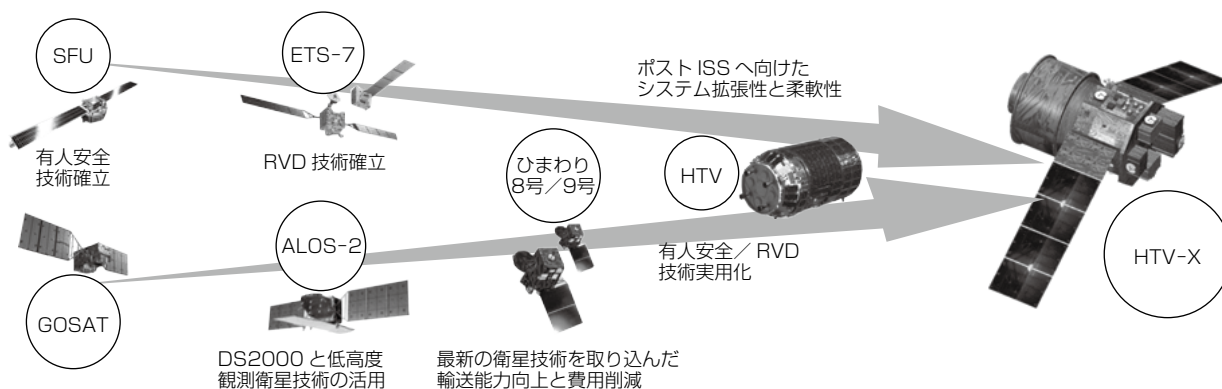


図1. HTV-Xの二つの主な開発目的



SFU : Space Flyer Unit, RVD : RendezVous Docking, ETS : Engineering Test Satellite, GOSAT : Greenhouse gases Observing SATellite, ALOS-2 : Advanced Land Observing Satellite-2

図2. HTV-X開発での当社の取組み方針

輸送能力を向上させつつ、リスク低減と開発費低減を両立させる。当社標準衛星バスでの既存技術を最大限活用してサービスモジュール開発を確実に遂行する。

(3) 拡張性と柔軟性

国際宇宙探査、ポストISSでの新しい宇宙領域での有人活動、各種軌道上実証ミッションユーザーの要望等を踏まえた技術実証へのシステム拡張性と柔軟性を確保する。ISSへの輸送ミッションと技術実証ミッションを両立させる電力・熱・通信等の衛星システムを実現する。

(4) 開発方式と工期遵守

HTV及び衛星開発の実績に基づき、新規技術要素だけエンジニアリングモデル(EM)を用いて要素検証を行う“部分EM⇒PFM(Proto Flight Model)方式”で短期開発を実現する。

3. サービスモジュールとHTVからの改良

3.1 サービスモジュール

HTV-Xは、サービスモジュールと与圧モジュールの二つのモジュールから構成されている(図3)。サービスモジュールは機体バス部に相当し、電力系、太陽電池パドル系、通信系、推進系を持ち、搭載計算機を核とした統合化制御系で機体制御を行う。また、物資輸送として曝露(ばくろ)カーゴを搭載する機能を持っている。与圧モジュールは、ISSへの結合部分を持っており、与圧環境を維持してISSへの輸送物資搭載が可能である。

3.2 HTVの実績を踏まえた改良点

3.2.1 HTV-Xサービスモジュールで実現する改良点

HTV-X開発での当社の取組み方針を踏まえて、現行HTVでのISSへの物資補給ミッション7機連続成功の実績を最大限継承するとともに、当社が持つ衛星技術を積極的に取り込み、効率的かつ付加価値の高い宇宙機の開発を

進め、現行HTVからの技術的改良を実現する。次に主要な改良点について述べる。

3.2.2 HTV実績と衛星システム技術の融合

“ISSへの物資輸送機”と“技術実証プラットフォームとしての大型衛星”の両立のため、現行HTVの開発実績を活用するとともに当社の静止・周回衛星の技術を融合することで確実かつ効率的な開発を進める。ISSへの輸送ミッションに必要な有人安全、ISSインタフェース等については、HTV実績を踏まえた設計を踏襲することで開発リスクを低減する。また、技術実証プラットフォーム衛星としては、当社衛星標準バスで軌道上実績を持つ既存機器(太陽電池パドル・データ処理機器・通信機器等)を活用し、信頼性を確保しつつ効率的な開発を進める。特に、有人安全固有の要求が課せられる機器については、当社標準バス機器を積極的に使用することをベースに、現行HTVで認められた有人安全設計の考え方を取り込むことで、当社既存機器の延長線での機器開発を進めている。

3.2.3 統合化制御系によるアビオニクス機能効率化

HTV-Xサービスモジュールでは、航法誘導制御・データ処理・システム管理を統合的に処理するため統合化制御系を構築している(図4)。統合化制御系では、最適な計算機の機能配分によって機器統合化を実現するとともに、データバス化によって機器間インタフェースを簡素化している。

現行HTVでは、計算機機能が9個のCPU部に分散していたが、CPU部計算機機能の最適化・機器統合によって6個のCPU部に統合した。また、搭載計算機は、同一仕様の計算機3台(図4でFCと表示)で構成され、それぞれに2個のCPU部を実装している。搭載計算機と各種搭載機器間のデータ処理(コマンド・テレメトリ機能)については、標準インタフェース機器(図4でRIMと表示)3台で実現し、当社標準機器を積極的に活用している。データインタフェースは、SpaceWireと1553Bのデータバス導入によって、基幹データインタフェースを統一化して機器間インタフェース数を削減し、簡素化している。

3.2.4 HTV飛行実績を踏まえた電力系の刷新

ISSへの物資輸送を完了して離脱した後、1.5年間の軌道上実証プラットフォームとして飛行を継続するため、現行HTVでの一次電池ベースの電力系を刷新し、太陽電池パドル化の電源構成とする。これによって、飛行中の太陽電池発生電力と負荷消費電力のバランスを維持することで継続的な軌道上実証が可能になる。また、ミッション期間を通して、負荷状態に基づく必要電力と供給可能電力のバランスを最適化し、適正規模の電力系を実現している。特に、電力収支が厳しいISS近傍運用中とISSからの供給電力制約が課せられるISS係留運用中で、現行HTVでの飛行実績を評価の上、過剰規模にならないように電力システム設計を最適化している。また、ミッション期間中の太陽光入

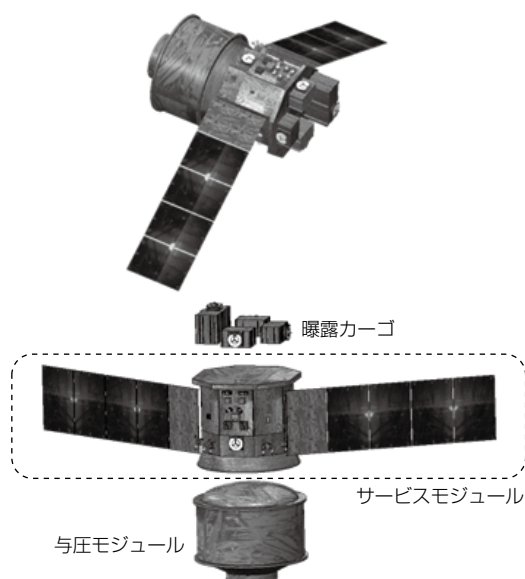


図3. HTV-Xとサービスモジュール

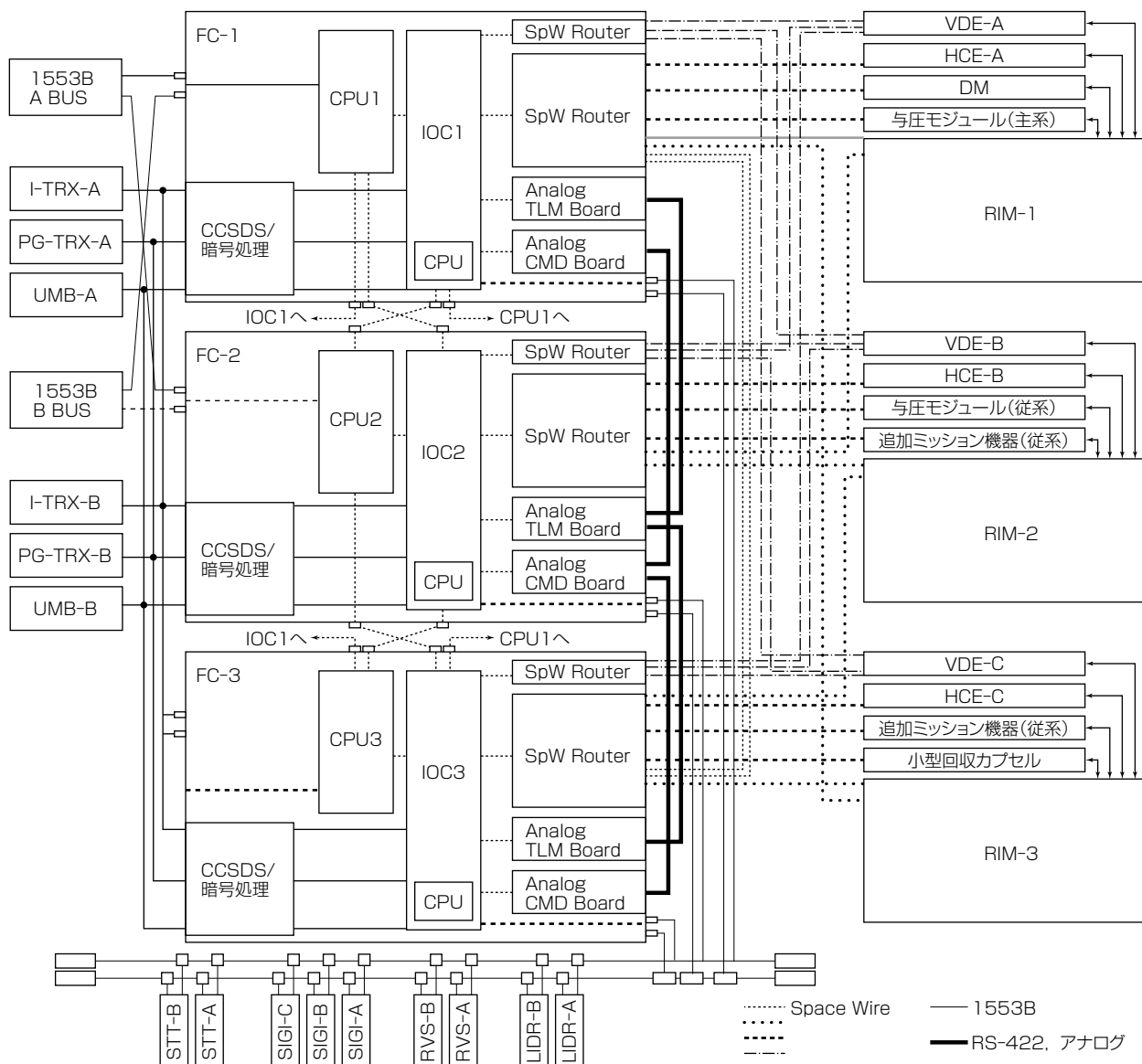


図4. サービスモジュール統合化制御系

射角変動や係留時軌道周回中のISSからの陰の影響を考慮し、太陽電池パドルからの電力供給を最大とするため、電力最大点追尾機能を持つ電力系システムを構築している。

3.2.5 サブモジュール化による製造効率化

サービスモジュールの構体は大きく四つのサブモジュールから構成される。電気系搭載部と推進系搭載部はそれぞれ個別に組立てを行い、サブモジュールとして組立て完了後にサービスモジュールとして組み上げる。これによって、製造を並行実施できるためスケジュール短縮に寄与できる。また、曝露カーゴ搭載部については、打ち上げ号機ごとにISSに輸送される曝露カーゴは異なり、各々の曝露カーゴに適合した搭載インタフェースを具備する必要がある。このため、曝露カーゴユーザーの都合に柔軟に対応していく必要から、その他サブモジュールの製造スケジュールより

も後になる。曝露カーゴ搭載部については、工場ではサービスモジュールには組み込まず、射場に直接搬入して射場での組立てを行う。これは、曝露カーゴユーザーへのサービス向上を意図したものである(図5)。

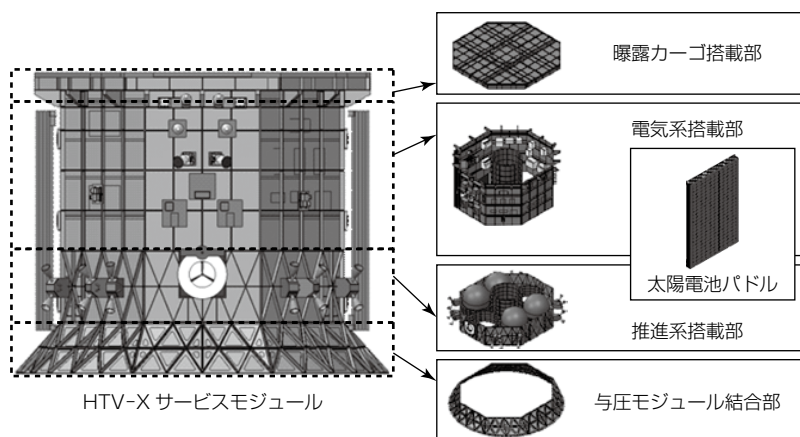
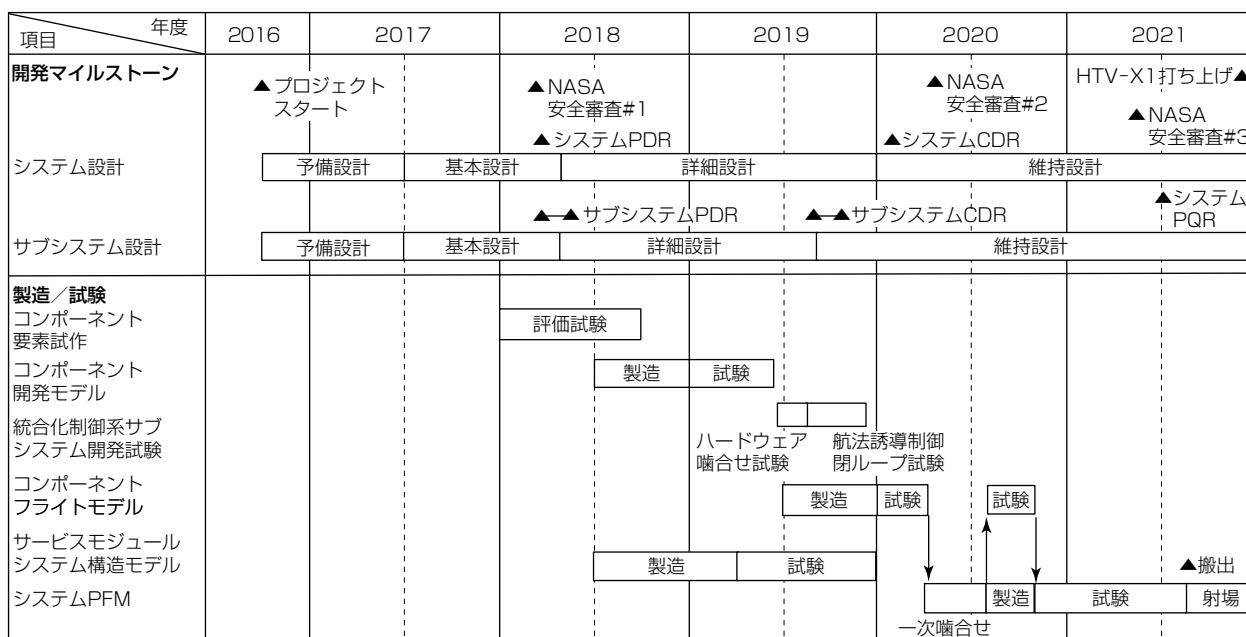


図5. サービスモジュールのサブモジュール構成



PDR : Preliminary Design Review, CDR : Critical Design Review, PQR : Post Qualification Review

図6. HTV-Xサービスモジュールの開発スケジュール

4. 開発スケジュールと効率的な開発への取組み

2021年度の初号機打ち上げスケジュールを遵守し、手戻りなく確実に開発を進めるため、開発要素を精査・識別の上、効率的な開発を進めていく必要がある。このため、HTV及び衛星開発実績に基づき、新規技術要素だけEMを用いて要素検証を行う部分EM⇒PFM方式の採用を開発方針としている。多くの搭載機器については、既存の実績ある機器をベースにHTV-X固有の要求に適合するように改修して対応が可能であり、要素試験、部分EMによる開発計画にしている。有人安全性の観点からISSへの衝突ハザード制御の根幹機器となる搭載計算機及び搭載ソフトウェアの開発については、十分な検証が要請されるため、試作モデル(BBM)及びEMによる開発試験に加えて、航法誘導制御系サブシステムとしての開発試験を行い、早期に有人安全性を担保できる開発計画にしている。また、サービスモジュールシステム試験としては、機器間のインタフェース検証を早期に実施し、不備等があった場合でも大きな手戻りが発生しないように、機体組立作業の前に一次適合(かみあわ)せ試験を行う。機器本搭載後は、システムPFT(Proto Flight Test)として、機能性能試験、熱真空試験・音響試験等の環境試験を実施する計画である。サービスモジュールとしてのシステムPFT完了後、射場で与圧モジュールとの全機結合を行い、機能性能点検、カーゴ搭載作業等を行い、打ち上げとなる(図6)。

5. 将来に向けた取組み

HTV-Xは将来の宇宙活動に対する波及性の高い技術を獲得するための技術実証プラットフォームとして活用する

ことをミッションの一つとして開発されている。将来の宇宙活動として、ポストISSへの取組みに関して国際的な議論が活発化しており、この枠組みで当社としてもサービスモジュール開発に基づく将来技術獲得に積極的に取り組む計画である。特に、早期の技術獲得が求められるドッキング技術については、サービスモジュール開発の延長として技術開発が可能であると考えられる。ドッキング実証機器として、ドッキング機構やドッキング用センサ等の新規開発品を要するが、ドッキング制御用計算機・搭載ソフトウェア、軌道・姿勢制御用推進系については、サービスモジュール機器を活用することが可能である。

さらに、将来的な月拠点有人活動を支える物資輸送機としての活用も将来ミッションとして想定されるものである。サービスモジュールは、モジュール単独で宇宙輸送機に必要な電力・通信・推進・制御等のバス機能を持っており、月拠点有人活動にも貢献できる要素を兼ね備えている。

6. む す び

ISSへの物資補給と技術実証プラットフォームの両方の要求を実現する新型宇宙ステーション補給機であるHTV-Xサービスモジュール開発への当社の取組みを述べた。2016年度から開発に着手し、2018年度にはシステム・サブシステム・コンポーネントの基本設計を完了し、開発モデルの製作・試験を進めている。2021年度の初号機打ち上げを目指して、HTV-Xサービスモジュールの開発を確実に進めていくとともに、将来の新たな宇宙活動に寄与できる付加価値の高い宇宙機として、JAXA、関係メーカーとも連携して開発を進めていく。

小型月着陸実証機 (SLIM)

下地治彦* 首藤和雄**

芝崎裕介**

清水康弘**

Smart Lander for Investigating Moon (SLIM)

Haruhiko Shimoji, Yusuke Shibasaki, Yasuhiro Shimizu, Kazuo Shuto

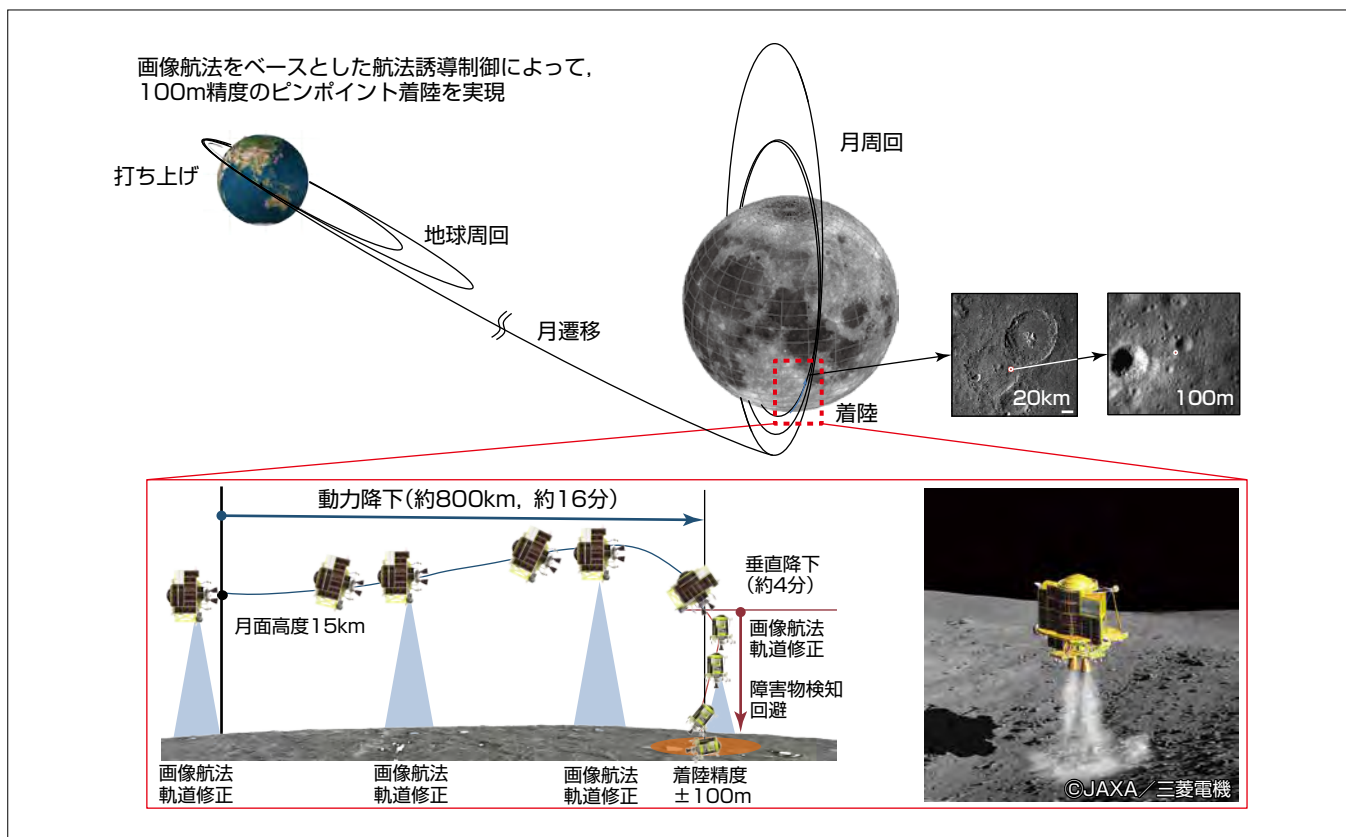
要 旨

SLIM(Smart Lander for Investigating Moon)は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)で開発中の小型月着陸実証機で、三菱電機がシステム開発を担当している。

これまでの月着陸例では、着陸地点精度は数kmであったのに対し、SLIMでは将来の科学探査の要求に対応できるように、設定された目標の着陸地点から約100m以内のピンポイント着陸を目指している点が最大の特長である。さらに、着陸地点の大きな石や穴などの障害物を検知し、これらを避けて安全な地点に着陸する。SLIMでは、この要求を実現するために、航法カメラで撮影したクレータ画像から月面に対する相対位置を高精度に推定し、推定結果に基づいて自律的に複数回の軌道修正を行って目標地点に接近する。着陸直前には画像から障害物を検知してこれ

を避ける位置修正を行い、高精度で安全な着陸を実現する。また、将来の探査機に適用できる小型軽量化技術の開発を行っている。制御機能の統合を進め、制御機能は統合化制御装置と電力制御分配器の2個の機器に受け持たせ、搭載機器の集約を図った。構造設計では、タンクを主構造材として打ち上げと着陸の荷重を受け持たせ、タンクの周辺のパネルに主要機器を配置する構成方式などによって、最終的にドライ質量を約200kg程度に抑えた。

現在、基本設計をほぼ完了しており、今後は、熱構造モデルやコンポーネントのエンジニアリングモデルを製作して、試験による成立性の検証を進め、2021年度の打ち上げを目指している。



SLIMの運用シーケンスと着陸シーケンス

SLIMの打ち上げから、地球周回、月遷移、月周回、着陸までの運用シーケンス及び着陸シーケンスを示している。月着陸フェーズでは、動力降下、垂直降下の二つのフェーズで、ピンポイント着陸を実現する。

1. ま え が き

SLIMは、JAXAで開発中の小型月着陸実証機で、当社がシステム開発を担当している。SLIMでは、これまでの諸外国の着陸機に比べて着陸位置精度を100m級に抑えるピンポイント着陸、ドライ質量を約200kg程度に抑える小型軽量化を特長としている⁽¹⁾。

これまでに、基本設計をほぼ完了した⁽²⁾。SLIMは、日本初の月着陸を目指すもので、チャレンジングな技術開発要素を含んでおり、適宜、プロジェクトの成功確率を高めるための見直しを行いつつ、設計を固めている。

本稿では、最新の設計状況をベースに、SLIMのシステム設計上の特長について述べる。

2. システム概要

2.1 飛行計画

SLIMは、打ち上げから約2か月で着陸する計画である。
着陸イメージを図1に、その運用計画を図2に示す。

ロケットから分離された後、太陽捕捉を行い、しばらくはスピン姿勢で、各機器のチェックアウト運用を行うとともに、月遷移軌道に合わせた軌道の位相を合わせるために地球を周回する。適切なタイミングでメインエンジンを噴射して月遷移軌道に投入し、約4日で月に到達し、再度メインエンジンを噴射して月に対する高度が約4,000km程度の月周回軌道に入る。月周回は極軌道に設定し、着陸地点上空にくるタイミングを目指して徐々に高度を下げていく。最終的に近月点が高度15kmの軌道に投入し、近月点から着陸制御を開始する。着陸制御は、動力降下と垂直降下と呼ぶ2種類のフェーズから構成し、着陸地点精

度100m程度の高精度な着陸を実現する。動力降下と垂直降下はSLIMでのキーとなる運用フェーズであり、詳細は、**4章**で述べる。

2.2 システム構成

SLIMのシステム構成を図3に、主要諸元を表1に示す。

SLIMのシステムは統合化制御系を中心として、電源系、通信系、構造系、推進系、熱制御系、計装系、及び月面活動系(ミッション)で構成している。

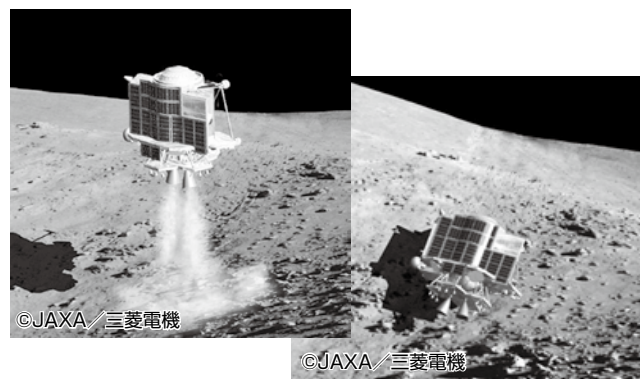


図 1. 着陸イメージ図

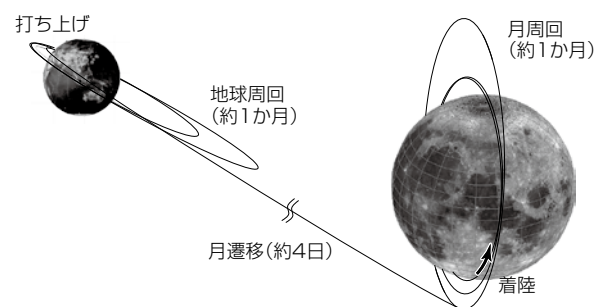


図2. 運用計画

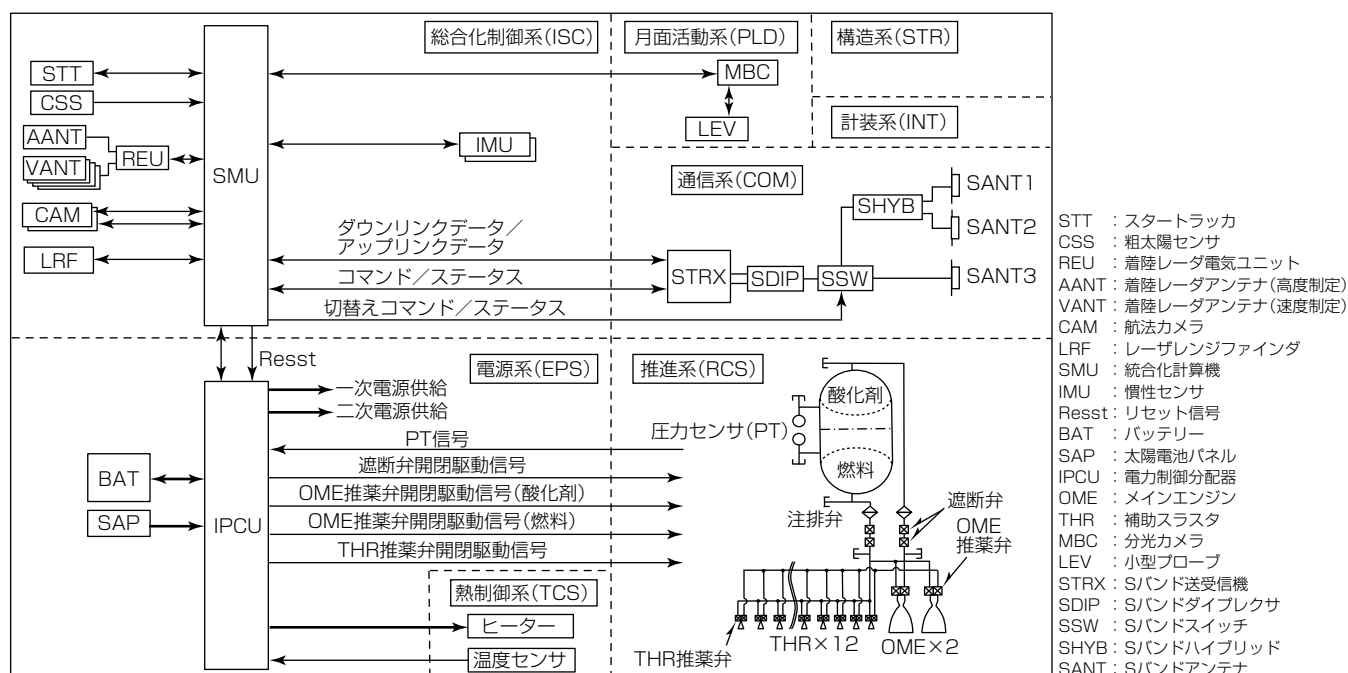


図3. システム構成

表 1. 主要諸元

項目	諸元
打ち上げ	2021年度、H-IIA ロケット
着陸地点	神酒の海
着陸地点精度	±100m
サイズ	約2,700×1,700×2,400(高さ)mm
質量	ドライ 約200kg ウェット 約730kg
推進系	ブローダウン方式 燃料：ヒドラジン メインエンジン：500N級二液式スラスタ2本 補助スラスタ：20N級二液式スラスタ12本
航法センサ	航法カメラ(CAM)、着陸レーダ(RAV) レーザレンジファインダ、STT、IMU、CSS
通信系	Sバンド通信系 最大レート 32kbps
電源系	非安定化バス方式(バッテリーバス方式) SAP発生電力：最大 約240W BAT容量：10Ahセル(公称)×8直列

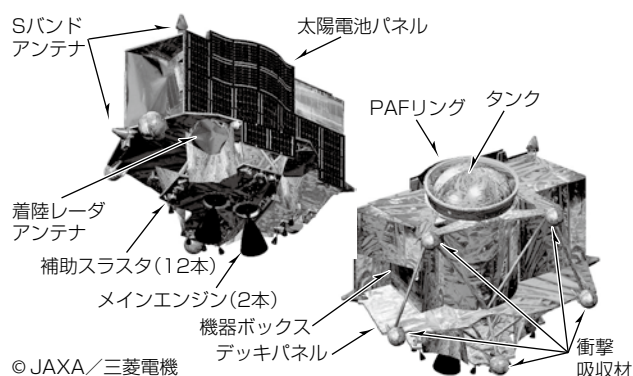


図 4. SLIM

SLIMの概観イメージを図4に示す。

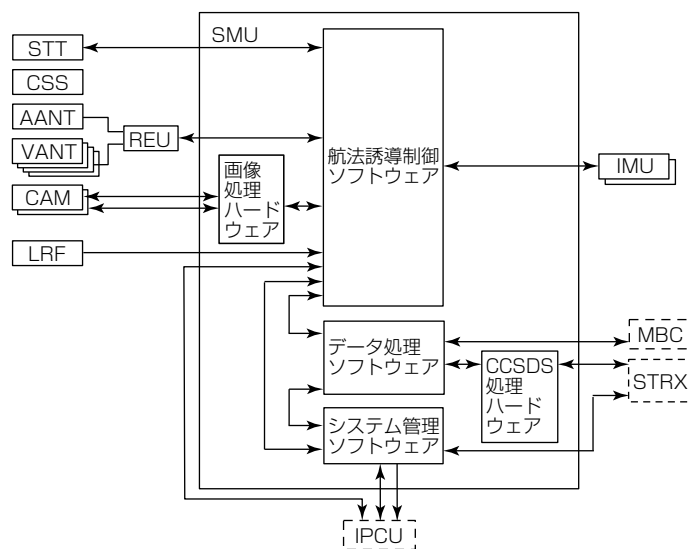
全体の構造としては、図4に示すように燃料と酸化剤を一体で搭載するタンクを中心として、両横に機器ボックスを配置し、電気系コンポーネントはこのボックスの中に搭載する。上部にロケットと結合するPAF(Payload Attach Fitting)リングを備え、中央部にデッキパネルを配置し、姿勢軌道制御用のセンサ類を搭載する。さらにストラットで結合したハニカムパネルにメインエンジンと補助スラスタを取り付けている。着陸時の衝撃は、5か所の衝撃吸収材で吸収する。一番下部の衝撃吸収材が月面に接触し、その後、残りの4個の衝撃吸収材が接地する方向に回転し、静定姿勢(図1の右図)となる。

太陽電池パネルは片面に配置している(図4の左図)。軌道変更以外の飛行中は、太陽電池パネルを太陽面に向けたままでスピンする姿勢を基本とし、発生電力の最大化と推進最小化を図っている。

3. サブシステム設計

3.1 統合化制御系

統合化制御系は、全体の制御を一手に引き受ける統合化計算機(SMU)と、航法誘導制御のためのスタートラッカ(STT)、粗太陽センサ(CSS)、慣性センサ(IMU)、航



CCSDS : Consultative Committee for Space Data System

図 5. 統合化制御系のシステムブロック図

法カメラ(CAM)、着陸レーダ(RAV)、レーザレンジファインダ(LRF)から構成される。図5に統合化制御系のシステムブロック図を示す。ロケット分離から月周回まではSTT、CSS、IMUを用いて制御し、着陸フェーズでは、CAM、RAV、LRFを用いて月に対する相対位置、速度を検出して、着陸航法誘導を実現する。また、CAMで取得した画像は、SMUに搭載したFPGA(Field Programmable Gate Array)で処理し、クレータデータベースとのマッチングによる位置測定、凹凸の大きい場所を排除する着陸候補地点の抽出(障害物回避)を行う。

統合化制御系は、航法誘導制御、データ処理、システム管理の機能も兼ねている。データ処理では、テレメトリ/コマンド処理に加えてデータレコーダ機能を備え、システム管理では、ヒーター制御、電源系の充放電制御などの機能をソフトウェアで処理し、電源系を制御する機能も含む。このような機能の統合化によって、システム全体の小型軽量化を図っている。

3.2 電源系

電力制御分配器(IPCU)、バッテリー(BAT)、太陽電池(SAP)で構成している。IPCUは、ピークパワートラッキング方式で電力制御を行うとともに、BATの充放電制御、SMUからの指令に基づいて推進系のパルス駆動、ヒーターのオン/オフ制御、さらに温度センサのインタフェース機能なども統合化しており、軽量化を実現している。IPCUを中心とした電源系の構成を図6に示す。

SAPは、薄膜太陽電池シートを面ファスナでパネルに固定する方式とし、単位質量当たりの発電効率を高めている。BATはラミネート型のバッテリーセルを、CFRP(炭素繊維強化プラスチック)を主としたブラケットで挟み込む構造とし、従来型のバッテリーに比べて、質量当たりのエネルギー密度を高めている。

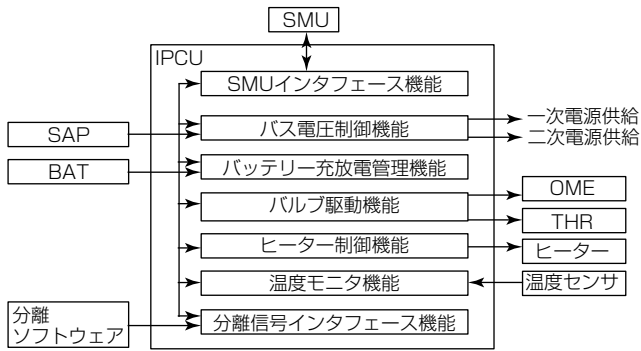


図6. IPCUを中心とした電源系の構成

3.3 構造系

SLIMではドライ質量約200kg程度に対して、約530kgの推進を搭載する計画であり、推進が探査機質量の約3/4を占めている。通常の当社の構造設計では、打ち上げに対する強度を確保するCFRP製の円筒を中央に配置し、タンクはその内部に配置する設計としているが、SLIMでは円筒状のタンク自体を構造部材として強度を受け持たせている。それによって、探査機の小型化とドライ質量の低減を図っている。

3.4 推進系

主構造部材を兼ねるタンクと、500N級メインエンジン（OME）、姿勢制御用の20N級補助スラスタ（THR）から構成される。OMEとTHRは共に、燃料にヒドラジン（ N_2H_4 ）、酸化剤に酸化窒素混合物（MON3）を用いる2液式のスラスタであり、ブローダウン式で用いる。

着陸フェーズでは、目標軌道に沿った推力を発生させたり、位置・速度推定を確実にを行うためのホバリングを実現したりするために、OMEで1～2秒周期で30～80%のデューティのパルス噴射を行う。また、新規開発のタンクであること、OMEとTHRの同時噴射で配管内流れの干渉が発生する可能性があることなどから、EM（Engineering Model）フェーズでシステム燃焼試験を実施して、想定する性能が出ることの検証を行う計画である。

4. 着陸航法誘導制御

2章で述べたように、SLIMは高度15kmの地点から、動力降下、垂直降下という2種類のフェーズの制御で、目標地点に対して100m程度の精度の着陸を目指している。着陸シーケンスを図7と図8に示す。

動力降下フェーズは、最適軌道に沿うように姿勢を制御しつつメインエンジンを噴射することで、着陸目標地点の真上で高度7km程度の地点に到達させる制御である。動力降下に入る前、及び途中で2回、航法カメラを用いて月面を撮像して、搭載しているクレータの画像とのパターンマッチングによって位置を推定する。位置推定をするたびに軌道計画を再設定し、位置誤差の修正をかける。

着陸地点上空約7km地点からは垂直降下フェーズとなり、自由落下と減速を繰り返しつつ、また、目標地点から

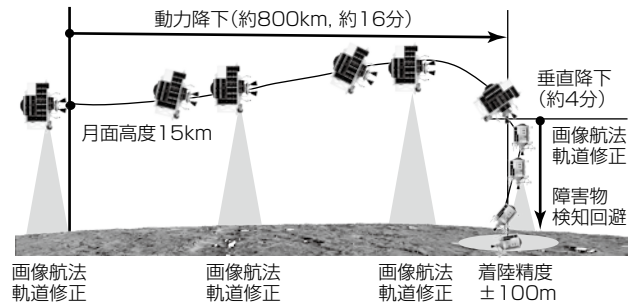


図7. 着陸シーケンスの動力降下フェーズ

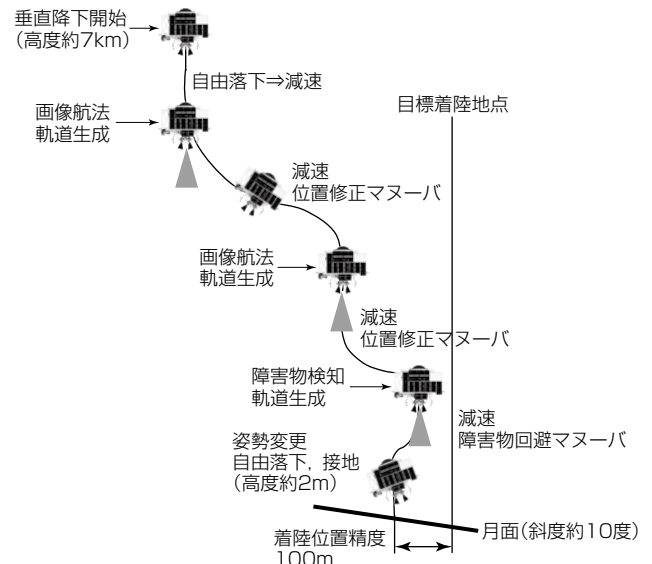


図8. 着陸シーケンスの垂直降下フェーズ

の位置誤差を修正しつつ高度を下げていく。垂直降下中は、航法カメラによる位置推定、着陸レーダによる高度測定と水平方向速度測定を組み合わせ、さらに高度約30m以下では、レーザレンジファインダを用いた高精度な高度測定を組み合わせ高度・水平位置の補正を行う。

最終的に高度約2mから自由落下で着陸する。着陸時には、月面に対する相対姿勢、並進速度、回転速度を適切な範囲に制御することで、確実に安全な着陸を実現する。

5. むすび

SLIMのシステム設計の特長について述べた。これまでに基本設計をほぼ完了し、解析によって実現性の検証を行った。今後、熱構造モデルやコンポーネントのエンジニアリングモデルを製作し、試験による検証を進める。SLIMでは新規技術要素が多いが、解析と検証試験を充実させて、確実なシステム開発を進めていく。

参考文献

- (1) 澤井秀次郎，ほか：小型月着陸実証機SLIMのシステム設計，航空宇宙技術，17，35～43（2018）
- (2) 浪越洋人，ほか：SLIM探査機システム設計，第62回宇宙科学連合講演会講演集，1D04（2018）



風力発電，航空分野をはじめ，社会インフラからレジャーにまで幅広く適用

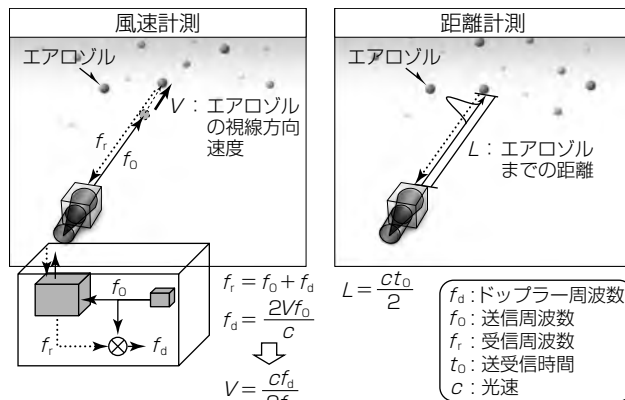
ドップラーライダー

ドップラーライダーとは？

雨や雲を観測する気象レーダのレーダとは，RADIo Detection And Rangingのことで，Radio，つまり電波を使った測位技術のことを言います。

一方，ライダーとは，LIgHT Detection And Rangingの略で，Light，つまり光を使ったレーダとなります。このことから，光波レーダ，あるいは使われている光がレーザーであることからレーザーレーダとも呼ばれます。ライダーの中でも，計測対象の移動速度を計測できるものをドップラーライダーと言います。

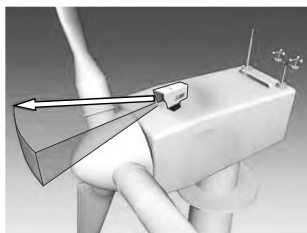
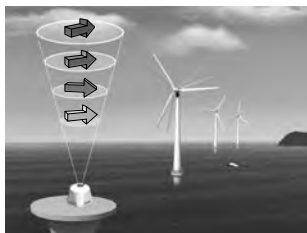
ドップラーライダーは大気中のエアロゾル(目に見えない(1/10から数μm)塵や微粒子)を対象にそれらの移動速度を風速として計測します。これによって，雨滴などを測定対象とするレーダと異なり，晴天時にも計測できることが大きな特長です。



ドップラーライダーの計測原理

風力発電分野への適用

再生可能エネルギーの有力な手段として世界で市場が拡大している風力発電分野では，ドップラーライダーの適用が広がっています。例えば，風力発電設備建設前後での風況調査に用いられており，特に洋上風力発電では，建設費が高額な従来のマストに代わる手段として期待されています。また，風車の発電部分であるナセルと呼ばれる部分にライダーを搭載し，リアルタイム計測を行うことで発電効率向上，風車の過重負荷低減にも寄与しています。



ドップラーライダーのコア技術

ドップラーライダーの観測距離は，送信するレーザー光の出力量に大きく影響します。三菱電機は，高出力と，高信頼・小型軽量を両立する平面導波路型レーザー増幅器の開発に成功し，この増幅器を空港向けライダーに適用することで，距離10km以上の高信頼観測を可能にしています。



航空分野への適用

空港で，風向・風速が急に变化するウインドシア^(注1)を素早く正確に検知することは，離着陸時の航空機の安全を確保する上で欠かせません。この検知システムでドップラーライダーが活躍しています。空港に設置されたドップラーライダーで空港面内を360度面内スキャンし，風向・風速を計測してウインドシア情報を検知したら，リアルタイムで管制，パイロットに状況が伝わります。

ドップラーライダーは国内では既に羽田，成田，関西空港に設置されており，世界各国でも導入が進められています。また，近年では航空機にドップラーライダーを搭載し，フライト中の乱気流を検知するシステムの実証も進められています。(http://www.aero.jaxa.jp/research/star/safeavio/)

(注1) 飛行機が単位時間に受ける風ベクトルの変化量(ms⁻²)

