



家庭から宇宙まで、エコチエンジ



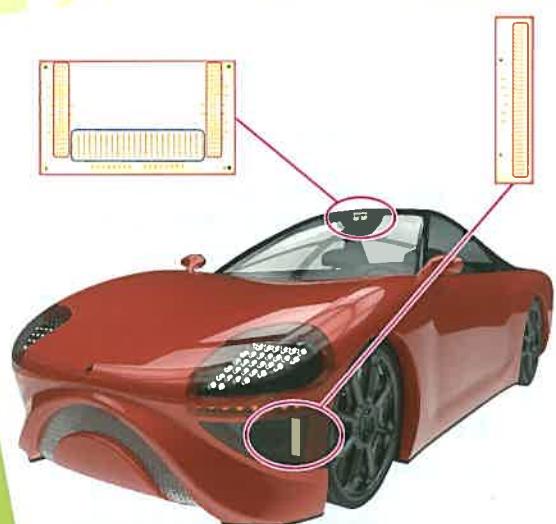
三菱電機技報

2

2020

Vol.94 No.2

先進技術による安心・安全・快適な社会への貢献



目 次

特集「先進技術による安心・安全・快適な社会への貢献」	Contribution to Secure, Safe and Comfortable Society by Advanced Technologies
先進技術による	
安心・安全・快適な社会への貢献 卷頭言 1 中畠弘品	Contribution to Secure, Safe and Comfortable Society by Advanced Technologies Hiromasa Nakaguro
宇宙利用・無線技術による	
安心・安全・快適な社会への貢献 卷頭論文 2 関根功治・小山 浩	Space Use and Wireless Technologies to Contribute Secure, Safe and Comfortable Society Koji Sekine, Hiroshi Koyama
防災向け衛星観測ソリューション 8 清水 聰	Earth Observation Solutions for Disaster Prevention Satoshi Shimizu
地球観測衛星ALOSシリーズの防災への貢献 13 大野新樹・中村聖平・藤井康隆	Contribution of Advanced Land Observing Satellites to Disaster Reduction Araki Ohno, Shohei Nakamura, Yasutaka Fujii
温室効果ガス観測技術衛星GOSATシリーズ の地球温暖化防止への貢献 18 上野信一	Contribution of Greenhouse Gases Observation Satellites to Prevention of Global Warming Shinichi Ueno
準天頂衛星システムセンチメータ級測位 補強サービスの利便性向上に向けて 23 上原晃斎・宮 雅一・藤田征吾・廣川 類	For Advancement of Quasi-Zenith Satellite System Centimeter Level Augmentation Service Akinari Uehara, Masakazu Miya, Seigo Fujita, Rui Hirokawa
自動運転用高性能ミリ波レーダモジュール 29 桐田 満・鈴木拓也・丸山貴史	High-performance Millimeter Wave Radar Module for Automated Driving Mitsuru Kirita, Takuya Suzuki, Takashi Maruyama
短波監視施設(DEURAS-H) 32 高尾哲也	Detect Unlicensed Radio Stations-HF Direction Finder Tetsuya Taka

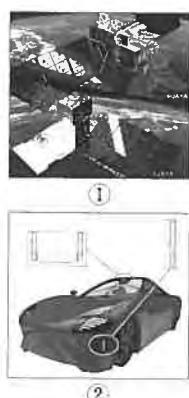
一般論文

飛行中の無人航空機への無線送電技術 36 本間幸洋・西原 淳・片瀬徹也	Wireless Power Transmission Technology for Unmanned Aerial Vehicles in Flight Yukihiro Homma, Jun Nishihara, Tetsuya Katase
宇宙用大容量リチウムイオンバッテリー 41 岡 寿久・丸谷健太郎・濱田慎太郎・大迫庸介	Large Capacity Lithium Ion Battery for Space Use Toshihisa Oka, Kentaro Marutani, Shintaro Hamada, Yosuke Osako

豆知識 46

特許と新案

「測位装置および測位方法」
「測位衛星選択装置、測位装置、測位システム、 測位情報発信装置および測位端末」 47
「無線送電装置および無線送電システム」 48



表紙：先進技術による安心・安全・快適な社会への貢献

三菱電機では、長年培った幅広い技術によって、安心・安全・快適な社会の実現に貢献する様々な製品、サービスの提供に取り組んでいます。

- ①先進光学衛星(ALOS-3)及び先進レーダ衛星(ALOS-4)は、可視光及び電波によって地球表面を広域・高精度に観測可能であり、これらの観測衛星で得られた情報は、ハザードマップの作成や災害発生時の情報提供等、防災・減災への取組みに貢献する。
- ②自動運転用高性能ミリ波レーダモジュールは、自動運転システム用センサへの適用を目指して開発中である。基本モジュールとオプションモジュールで構成されており、複数目標への対応、水平／垂直方向の高分解能化及び垂直方向の測角機能を実現した。

ALOS : Advanced Land Observing Satellite

卷頭言

先進技術による安心・安全・快適な社会への貢献

Contribution to Secure, Safe and Comfortable Society by Advanced Technologies



中畠弘晶 *Hiromasa Nakaguro*

電子システム事業本部 本部長付
Senior Adviser, Electronic Systems Group

日本での自然災害また少子化等の課題に対して、持続可能な社会を実現するための施策が年々重要視されてきています。国連のSDGs(Sustainable Development Goals)の目標でもある安心・安全・快適で持続可能な社会の実現に向けて三菱電機は宇宙システム、測位システム、統合センサシステム等での先進技術を活用した製品とサービスを提供しています。

近年の異常気象による被害の増加を受けて、地球環境監視やインフラ保全の重要性が広く認識されています。宇宙からの地球観測はその広域性、継続性から最も適した施策の一つとなります。2016年に閣議決定された「宇宙基本計画」では、地球規模の課題を解決し、安心・安全・快適な社会を実現するために宇宙利用を促進することが謳(うた)われています。この基本計画の下で、高精度で広域な観測画像を捉える先進光学衛星と先進レーダ衛星の開発が進められるとともに、地球温暖化の一因と考えられる温室効果ガスの濃度をモニタリングするGOSAT(Greenhouse gases Observing SATellite)シリーズの後継機の開発も始まりました^(注1)。地球環境・資源の把握や防災・危機管理に資するデータを地球規模で長期間にわたって取得可能なシステムが整備されます。近年はこれらの大型基幹衛星に加えて、小型衛星のコンステレーションによる高頻度な観測データ提供も始まっており、観測衛星の特長である広域・長期間に加えて高頻度に地球環境を監視することが可能になってきました。

2017年に制定された「宇宙産業ビジョン2030」では、観測衛星数の増加と観測性能の高度化によるデータ量の飛躍的な増大に対して、衛星データ利用促進に向けた環境整備とともに、衛星データのオープン&フリー化推進の指針が示されています。データプラットフォームの整備に加え、AI(Artificial Intelligence)等の情報処理技術や5G等の通信技術の積極的な導入によって、効率的なデータ解析が可能になり、ユーザーに分かりやすい情報を提供することで付加価値を高められ、衛星データ利用が進展することが期待されます。また、衛星データ利用ビジネスに携わるス

テークホルダーが増えることによって、新たな人材と技術が育成され、衛星データ利用が更に発展するという好循環につながります。衛星データを利用したソリューションビジネスは、甚大な被害を及ぼす大地震や台風・集中豪雨による風水害等の大規模災害への対応、地球規模の気候変動等の課題の解決策の一つになり得るものと考えています。

準天頂衛星システムは日本独自の衛星測位システムとして、衛星4機体制が構築され、2018年11月からサービスが開始されました。センチメータ級の位置補正情報がリアルタイムに日本全土に提供されています。高精度位置情報に高精度な地図を組み合わせることによって、自動車の自動運転、交通管制、IT農業、情報化施工等の様々な分野で新しいサービスの創出が急速に進み始めました。自動車には高精度な位置情報受信機に加え、周囲の状況を把握するためのセンサが搭載されています。ミリ波を利用したレーダシステムの高性能化も自律型の自動運転の実用化には必須の技術です。これらの製品とサービスを提供することが、少子高齢化がより顕著になった日本の社会的課題の解決につながることを期待しています。

携帯情報端末が日常生活に欠かせなくなった情報通信社会では、無線通信インフラを安定して利用できる環境を確保することも重要な課題となります。幅広い周波数範囲の電波が利用される中で、違法電波等による電波干渉を防ぎ、安全にかつ安心して無線通信を行えるようにする電波監視設備の役割が高まっています。

この特集では持続可能な社会の実現のために、社会的ニーズがますます高まると考えられている地球環境監視での衛星利用、自動運転実現に向けての位置情報システムの高度化、電波通信利用の安全性確保のための技術についての概要とともに、利活用に向けた可能性について述べます。三菱電機は宇宙、測位、統合センサの分野で培った高度な技術とAI等の革新的技術との融合によって安心・安全・快適な社会の実現に貢献できる製品とサービスを提供していきます。

(注1) 環境省「気候変動時代における令和2年度環境省予算案のポイント」による。

宇宙利用・無線技術による安心・安全・快適な社会への貢献

Space Use and Wireless Technologies to Contribute Secure, Safe and Comfortable Society



関根功治*



小山 浩†

要旨

第5期科学技術基本計画(2016年)の閣議決定によって、サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)の高度な融合によって“超スマート社会”と“地球規模の課題の解決”を目指す“Society5.0”的指針が明確化された⁽¹⁾。

背景には計算機・通信・半導体・遺伝子工学・アルゴリズム・ロボティクス・材料等の要素技術の革新を反映し、IoT(Internet of Things), AI(Artificial Intelligence), 機械学習, 5G(5th Generation), 自動運転, 宇宙空間利用に代表される実利用が世界的に加速している状況がある。

Society5.0では①国及び国民の安全・安心の確保と豊かで質の高い生活の実現, ②地球規模の課題への対応と世界の発展への貢献, ③持続的な成長と地域社会の自律的な発展の三つの大きな指針が掲げられている。

これに対し、三菱電機が持っている観測衛星・防災ソリューション技術・高精度測位信号生成技術・気象衛星開発などの宇宙利用・インフラ構築技術や、通信干渉を監視する施設、自動運転のための高性能車載ミリ波レーダモジュールなどの無線利用技術によって、“安心・安全の確保と質の高い社会”的実現に貢献することができる。また温室効果ガス観測技術衛星や衛星搭載マイクロ波放射計による継続的な地球全体の温室効果ガス観測や水循環の物理量観測によって“地球規模の課題解決”に貢献している。“持続的成長”に関しては、今後本格化する5Gや移動体通信に対応するための通信衛星への取組みや、2020年代の国際協力プログラムである月周回ステーションGatewayや月面基地、さらに火星実利用への技術貢献が期待できる。



宇宙利用・無線技術によって安心・安全・快適な社会の実現に貢献

当社は、観測衛星・防災ソリューション、温室効果ガス・水循環・気象観測、電波監視、センチメートル級測位による“安心・安全な社会と地球規模の課題解決”への貢献、宇宙ステーションに続く国際協力プログラムである月・火星実利用への参画による“持続的成長”への貢献を目指す。

1. まえがき

Society5.0の指針を受け、内閣府と宇宙政策委員会は2017年5月に“宇宙産業ビジョン2030”を発表した⁽²⁾。その中で、宇宙産業は2010年代以降継続している第4次産業革命を進展させる原動力であり、成長産業を創出するフロンティアと位置付けている。宇宙産業は従来、科学技術や安心・安全のための社会インフラの基盤であるが、別の側面として近年は産業的な観点から、ビッグデータ・IoT・AI・5Gによるイノベーションやネットワークとの結合の重要性が認識されている。観測衛星も通信衛星もセキュリティを担保しつつ、そのスペースノードをコンシューマーノードへネットワーク化することでサービスの相補性や情報を取得するターンアラウンドの向上を図ることができると考える。“宇宙産業ビジョン2030”では、民間の役割拡大を通じ、宇宙利用産業も含めた宇宙産業全体の市場規模(現在1.2兆円)の2030年代早期倍増を目指している。

当社は“ライフ”“インダストリー”“インフラ”“モビリティ”的4つの領域での社会課題解決に向けた価値を創出し、Society5.0と持続可能な開発への貢献を目指している。

本稿では“宇宙利用”と“無線技術”に注目し、“宇宙利用”による防災・地球環境監視・高精度測位・自動運転技術等を通じた“ライフ”“インフラ”“モビリティ”的高度化、“無

線技術”を活用した車載ミリ波レーダモジュールやセンチメータ級小型受信端末、将来高速衛星通信による“インダストリー”の持続成長への取組みなどを例に、当社が開発・整備・運用する最新技術について述べる。

2. 安心・安全の確保と質の高い社会の実現

2.1 地球観測・気象観測による安心・安全の確保

“宇宙利用”で喫緊の実利用が求められている分野が防災分野である。近年は自然災害の発生頻度と規模が深刻さを増しているが、光学センサ(可視及び赤外波長)及び合成開口レーダ(Lバンド等の無線帯域)を搭載する複数の衛星を連携させ、平時は画像の効率的な蓄積と災害予防や減災を目的とした河川・海岸などのインフラ監視を行い、発災時はこれらアーカイブと緊急観測で得られる情報から迅速なプロダクト提供をワンストップサービスで行う(詳細をこの特集号の論文“防災向け衛星観測ソリューション”に示す)。国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)が運用中のALOS-2(陸域観測技術衛星2号)、開発中のALOS-3/ALOS-4⁽³⁾やセンチネルアジア、国際災害チャータ等の海外観測衛星データも利用し、自然災害の多い日本の安心・安全な社会の実現を目指している。当社が参画しているレーダ観測衛星・光学観測衛星・温室効果ガス観測衛星の代表諸元と系譜を図1に示す。周回観測衛星

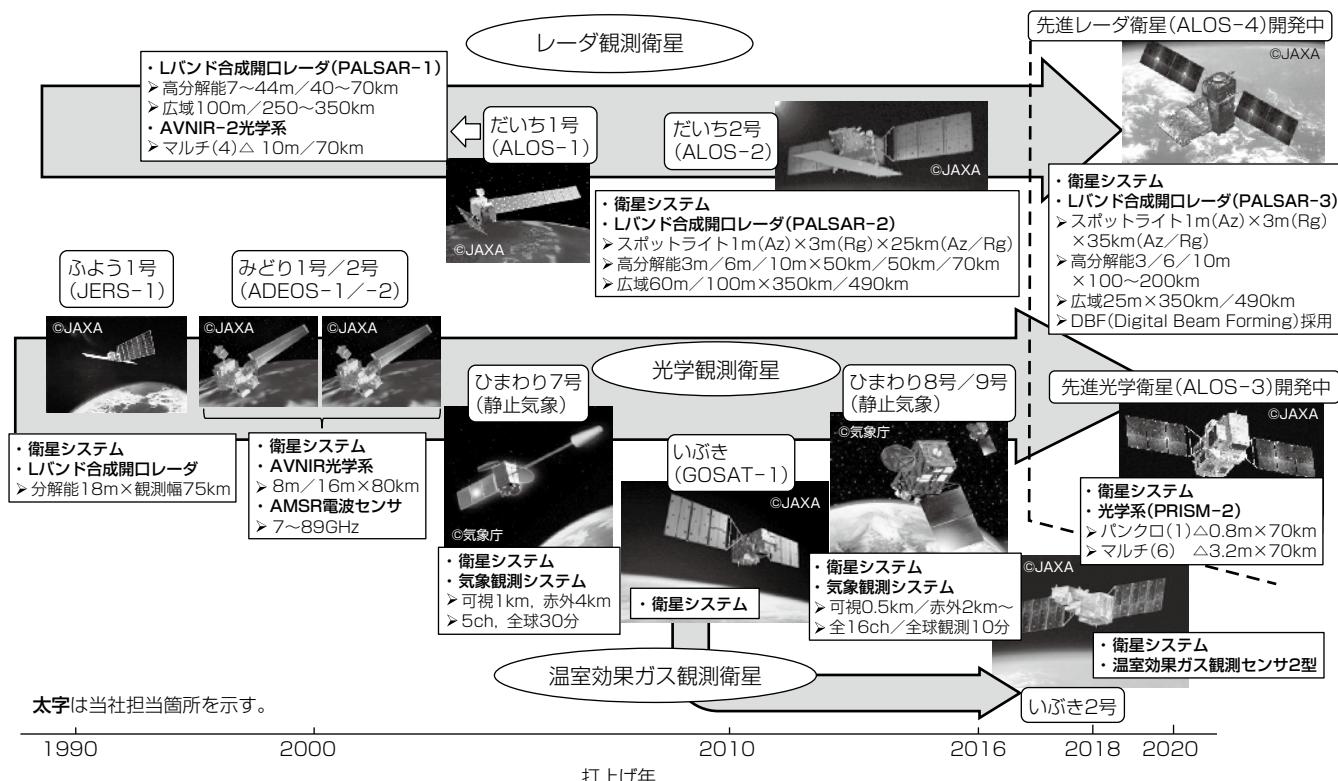


図1. レーダ観測衛星・光学観測衛星・温室効果ガス観測衛星シリーズの性能諸元と系譜

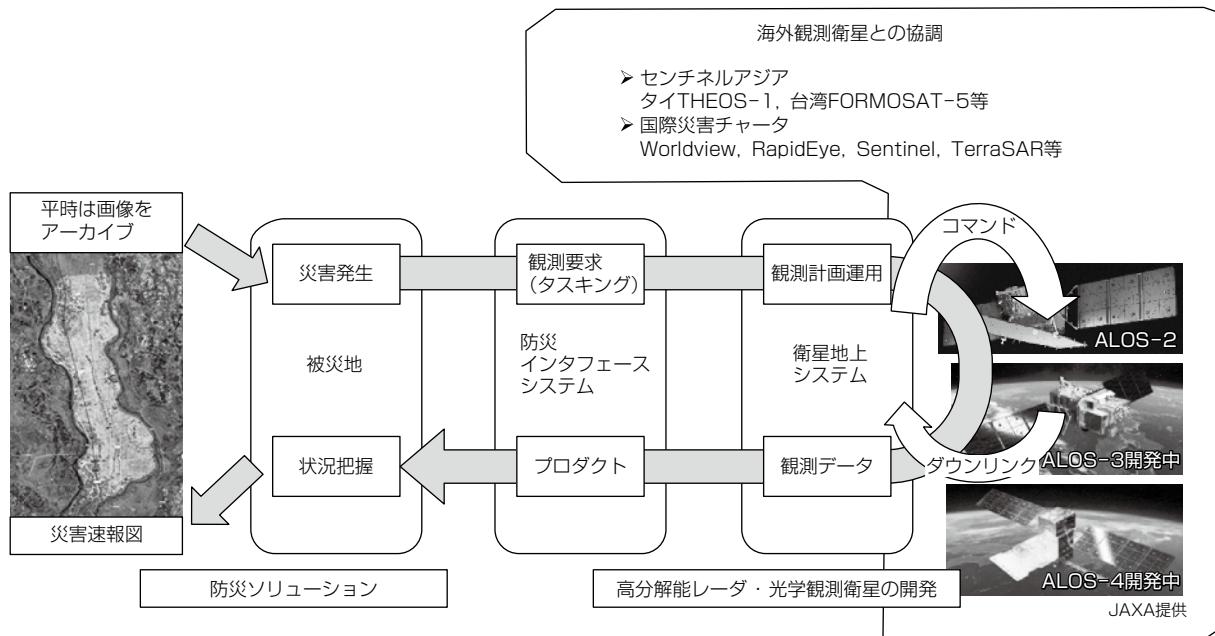


図2. 観測衛星・防災ソリューションのフロー

とともに最新の気象衛星開発と安定運用も安心・安全な社会のための重要なインフラであり、ひまわり8号／9号は高頻度・高精度観測によって局所的な気象予報を可能にしている。被災地に対して災害速報図等の防災対応用プロダクトを迅速に提供する観測衛星・防災ソリューションのフローを図2に示す。

“宇宙利用”に関しては、ALOSシリーズやDigital Globe社(Maxar社)のWorld Viewなどの高分解能中型観測衛星と並行して、海外では最大200機程度の小型衛星によって観測幅は小さいが高頻度でターンラウンドの早いコンステレーションシステムも稼働している。①Planet社(米、Terra Bella社、Google社協業)の分解能1～3m／約140機(2019年4月)、②BlackSky Global社(米、欧州Thales Space社協業)の分解能約1m／2021年までに16機(計画最大60機)などが有名である。従来のリモートセンシングが地形・収穫・人工物を画像として利用するのに対し、機械学習を活用して石油備蓄や来店状況等の経済市況のサービス(Orbital Insight社の機械学習)や、さらに米国では安全保障の観点からも重要視されている。これらのスタートアップ企業はファウンダー・IT大手・従来衛星オペレータ・衛星製造企業・政府と提携し、膨大な画像情報からAI・機械学習を用いて“情報”を自動抽出し、経済指標やインテリジェンスを提供する業態へと進化しつつある。

この重要性は“増大する画像データ”という観点からも推測できる。図3にALOS-1～ALOS-4の画像データの伝送レート合計(DT：直接伝送+衛星間通信)を示す。ALOS-2では約1,080Mbpsであったが、ALOS-3及びALOS-4では約3,600Mbpsのデータレートを必要として

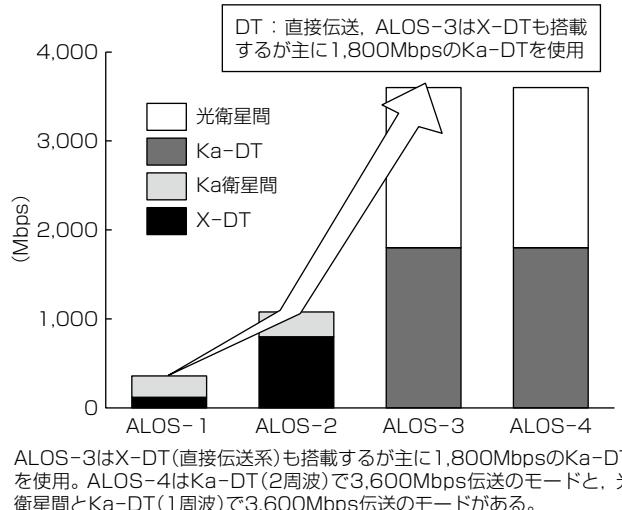


図3. ALOSシリーズのデータ伝送レート(代表値)

いる。先に述べた米国の趨勢(すうせい)からも分かるように、今後観測衛星の高分解能化・観測幅拡大・観測頻度増大(コンステレーションによる機数増)・バンド数拡大がさらに進む中で、“迅速で確かな経済指標や安心・安全のための情報”をユーザーに迅速に提供するには、地上での機械学習・AIに代表される技術革新とともに、情報抽出までオンボードで行ってダウンリンク量を“必要情報”に最適化するためのデジタル処理と衛星側ソフトウェアの高度化も目標となる。

2.2 センチメータ級測位システムによる安全・快適性の向上

2018年11月からサービス開始された準天頂衛星システムによるセンチメータ級測位補強サービス(Centimeter Level

Augmentation Service : CLAS)は、自動走行・IT農業・安全運転支援・インフラ監視等への利用が進められている。この分野でも“宇宙利用”と“無線技術”によって、市場拡大が期待される自動化サービス・無人化サービスを、車載ミリ波製品やセンチメータ級測位受信機と組み合わせ、より安全で快適な社会の実現に貢献可能である。

CLASはオープン仕様の衛星配信型の高精度・高信頼度な測位補強システムであり、センチメータ級精度とコンステレーションアベーラビリティ0.999以上(サービス開始後半年実績、仕様は0.99)という高い信頼性を2kbpsという少ない衛星配信データで実現する世界初のシステムである。測距誤差の主要因は、①衛星に起因するGlobal誤差(衛星軌道誤差、衛星クロック誤差、衛星信号バイアス誤差)、②地域に起因するRegional誤差(電離層遅延、対流圏遅延)、③ユーザー受信機に起因する誤差(マルチパス、受信機バイアス誤差)の3種類に分類される。これらの測距誤差と各補強方式による補正の比較を図4に示す⁽⁴⁾。CLASは高精度・広域性・迅速性・低データレートという利便性を同時に実現するため、ユニークな方式を採用し、①と②の誤差を補正している。図4の中でRTK(Real Time Kinematic)方式は、基準局観測を用いたコード及び搬送波位相測距誤差による精密解を数秒の初期化時間で推定可能という長所を持つが、課題として基準局からの距離が10km程度という狭域性や基準局の観測データを直接用いるOSR方式(Observation Space Representation: 観測空間表現)に由来する基準局との通信データ量の多さが挙げられる。

PPP(Precise-Point Positioning)方式は広域に配置した複数の監視局受信機の観測データによってSSR(State Space Representation: 状態空間表現)方式を用いて①の衛星に起因するGlobal誤差をユーザー受信機に低データレートで送信するため、RTK方式の課題を低減できる。一方通常は、②のRegional誤差をユーザー受信機側で推定するため、精密解を得るまでの初期化(最初の測位収束時間)に20分以上かかる。CLASはPPP-RTK方式によって両方式の長所を生かしつつ、国土地理院が配備している全国合計1,300局の電子基準点網を利用し、Global誤差だけでなく②のRegional誤差をSSRによって推定することでPPP方式の初期時間が長いという課題も克服している。配信データを更に最小化するために、各誤差のダイナミクスの周波数成分に応じて更新頻度や分解能を更に最適化(例:衛星クロックは5秒、そのほかは30秒周期)し、2 kbpsという従来の高精度補強システムの約1/1,000の伝送量の実現と30秒以下の初期化時間を実現している。

表 1 にCLASの主な仕様を示す。

表1. CLASの主な仕様

項目	仕様
補強対象のGNSS信号	GPS : L1C/A, L1C, L2P, L2C, L5 QZSS : L1C/A, L1C, L2C, L5 Galileo : E1b, E5a GLONASS(CDMA) : L1OS, L2OS
サービスエリア	日本国及び領海(80万km ²)
位置精度 (オープンスカイ, 95%)	静止体 : 水平6cm／垂直12cm 移動体 : 水平12cm／垂直24cm
初期化時間(95%)	60秒以下(補強情報取得時間含む)
サービス可用性* (*サービス継続性や日本からの高仰角性を仕様化したもの)	0.99以上(コンステレーション) 0.97以上(衛星) 0.92以上(高仰角(60°))

GPS : Global Positioning System

GPS : Global Positioning System
QZSS : Quasi-Zenith Satellite System

QESS : Quasi - Zenith Satellite System
CDMA : Code Division Multiple Access

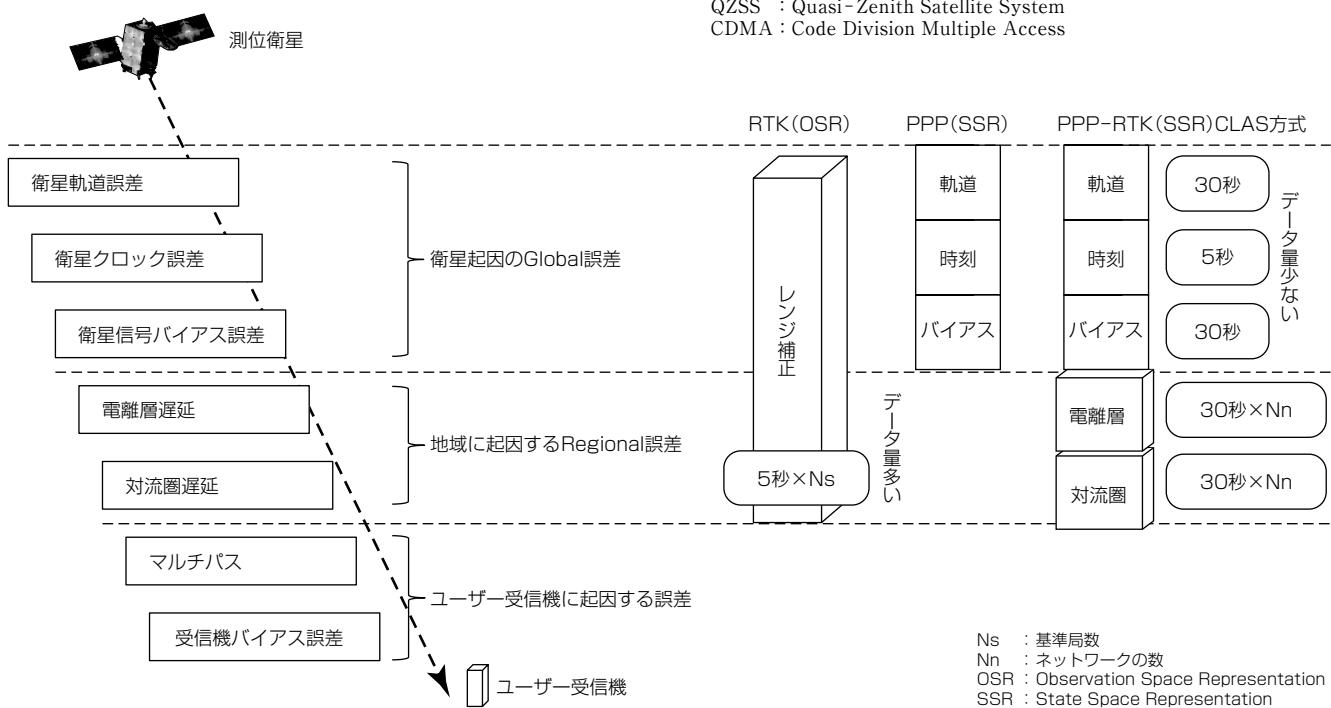


図4. 測距誤差種類と各補強方式の特徴(4)



自動走行は、GNSS(Global Navigation Satellite System)の測位衛星群や地上測位システム、CLASシステムなどの宇宙側インフラだけでなく、ユーザー側インフラである三次元地図生成・維持やセンチメータ級測位受信機、車載ミリ波装置、移動体、センサ、IT、アプリケーションを含めたシステムである。図5に当社が開発したCLAS小型受信端末や三次元地図によって社会の高度化・自動化や安心・安全の向上に貢献するためのアプリケーションを示す。当社は衛星から端末・利用形態を含む総合的なソリューション提供を目指している。

3. 地球規模の課題解決

Society5.0で定義されている地球規模の課題解決に関しては周回観測衛星による地表・海面・大気観測によって、地球規模の環境変化監視への大きな貢献が可能である。2.1節で示したALOSシリーズによる高精度観測も防災だけではなく土地被覆・氷床・森林・地形変化等の地球環境の変化を光学センサやレーダで定期的にモニタすることで貢献しているが、当社がJAXAと継続的な開発・運用を行っている

表2. AMSRシリーズの性能向上比較

周波数 (GHz)	バンド幅 (MHz)	偏波	空間分解能(km)		
			AMSR	AMSR-E	AMSR-2
6.925 (AMSR2は7.3追加)	350	V/H	50	43.0	35
	100		50	29.0	24
	200		25	16.0	14
	400		25	18.0	15
	1,000		15	8.2	7
	3,000		5	3.5	3
	200		10	—	—
50.3	400	V	10	—	—
52.8			1,600km	1,450km	1,450km
観測幅			1,600km	1,450km	1,450km

AMSR(高性能マイクロ波放射計)シリーズは、“無線技術”によって地表及び大気から自然放射される微弱電波を多周波のマイクロ波(7~89GHz)で受信し、水蒸気量、降水量、海面温度・風速、輝度温度等の水循環に関する地球物理量の観測で大きな貢献をしている⁽⁵⁾。表2にAMSR、米国Aquaに搭載したAMSR-E、水循環変動観測衛星しづく(GCOM-W1)で運用中のAMSR-2の主な性能向上比較を示す。近年では気象衛星データとともにAMSR-2の輝度温度による数値気象予報精度の向上や台風の内部構造

センサ名	衛星名	2000~	2010~	2020~
AMSR	みどり2号(ADEOS2)	2002~2003		
AMSR-E	Aqua(米国衛星)		2002~2015	
AMSR-2	しづく(GCOM-W1)		2012~	運用中
FTS-1	いぶき1号(GOSAT-1)	衛星システムを担当	2009~	運用中
FTS-2	いぶき2号(GOSAT-2)	センサFTS-2と衛星を担当	2018~	運用中

FTS : Fourier Transform Spectrometer

図6. AMSRシリーズ, GOSATシリーズの運用

の観測、高層水蒸気量による進路予測精度向上への貢献、また水産庁海洋技術室ではAMSR-2の海面水温データによって、ほかの海洋環境データと統合して中長期の漁海況予報に役立てている⁽⁶⁾。

当社が開発を担当したAMSRシリーズと温室効果ガス観測技術衛星(いぶき1号は衛星、いぶき2号は衛星及び温室効果ガス観測センサ2型を担当)の運用状況を図6に示す。長期にわたる継続的運用によって地球規模の温室効果ガスや水循環などの環境変化監視に貢献している。

4. “持続的成長”の実現

“持続的成長”のためには地球環境維持を優先しつつ、先端技術による経済成長を両立させる必要がある。5G等で通信量が飛躍的に増大する時代は目前であるが、“宇宙利用技術”“無線技術”によって占有帯域・電力・質量等の衛星リソースを従来衛星と同一規模に抑制しつつ、全体通信量を100倍以上に飛躍的に増大できるHTS(High Throughput Satellite)、さらにそのデジタル化が始まっている。図7に示すとおり、供給サイドの全通信量は2023年に20Tbpsを超える予測も示されている。当社は従来型通信衛星(アナログ中規模HTS、化学推進系)に関して実績を持つが、さらに“①デジタルペイロードによって周波数変換・接続・帯域・覆域・軌道位置をソフトウェアで再構成可能にするSoftware Defined Satellite”“②全電化推進系による打上げ質量削減(静止衛星で化学推進衛星のおおむね1/2)”を組み合わせた新しい通信衛星を早期に実現する必要がある⁽⁷⁾。技術試験衛星9号機プログラムでJAXA・総務省と連携してこれらの開発を進め、さらに欧米各社の最新動向も取り入れつつ新規技術の獲得及び事業推進を実施していく。

また宇宙利用の“持続的成長”の別の分野として、民間運用に移行する宇宙ステーションに代わる2020年代の国際

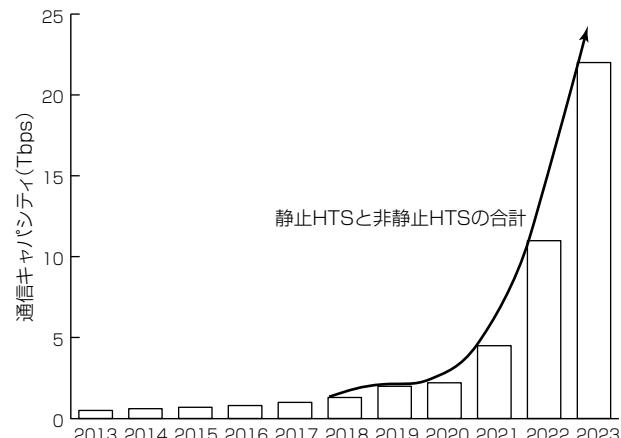


図7. 急拡大するHTSスループット
(Euroconsult Group, 23rd Summit for Satellite Financing
@Euroconsult 2019)

協力プログラムである月周回ステーションGatewayや月面基地、さらに火星実利用がある。多くのプログラムで培った無人輸送技術・ランデブ技術、さらに遠隔高速通信、ロボティクス等を活用してこれらのプログラムに貢献する。

5. む す び

Society5.0で示された“国及び国民の安全・安心の確保と豊かで質の高い生活の実現”“地球規模の課題への対応と世界の発展への貢献”“持続的な成長と地域社会の自律的な発展”に対して、宇宙利用・無線技術を中心に当社が貢献する事業と最新技術について述べた。自動化・無人化・高精度化をキーワードに、要素技術とともに今後ますます重要なシステム全体のソリューション構築に取り組んでいく。

参 考 文 献

- 内閣府閣議決定：第5期科学技術基本計画本文
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>
- 宇宙政策委員会：宇宙産業ビジョン2030 (2017)
https://www8.cao.go.jp/space/public_comment/vision2030.pdf
- 岡田 祐, ほか：広範囲かつ高分解能な地球観測を実現する先進レーダ衛星ALOS-4, 三菱電機技報, 92, No.2, 125~128 (2018)
- 廣川 類, ほか：準天頂衛星システムセンチメータ級測位補強サービス, 三菱電機技報, 91, No.2, 101~104 (2017)
- 野口龍宏, ほか：高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)観測データの利用と評価—世界に冠たるAMSRシリーズの実績—, 三菱電機技報, 88, No.2, 135~138 (2014)
- 三野雅弘：漁業利用ニーズと水産について, GCOM-Wの成果と後継ミッション利用展望ワークショップ (2017)
https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/materials/ws_shizuku_may2017//2_1_sanya.pdf
- 関根功治, ほか：静止衛星標準バス“DS2000”的開発と今後の指針, 三菱電機技報, 90, No.2, 115~118 (2016)

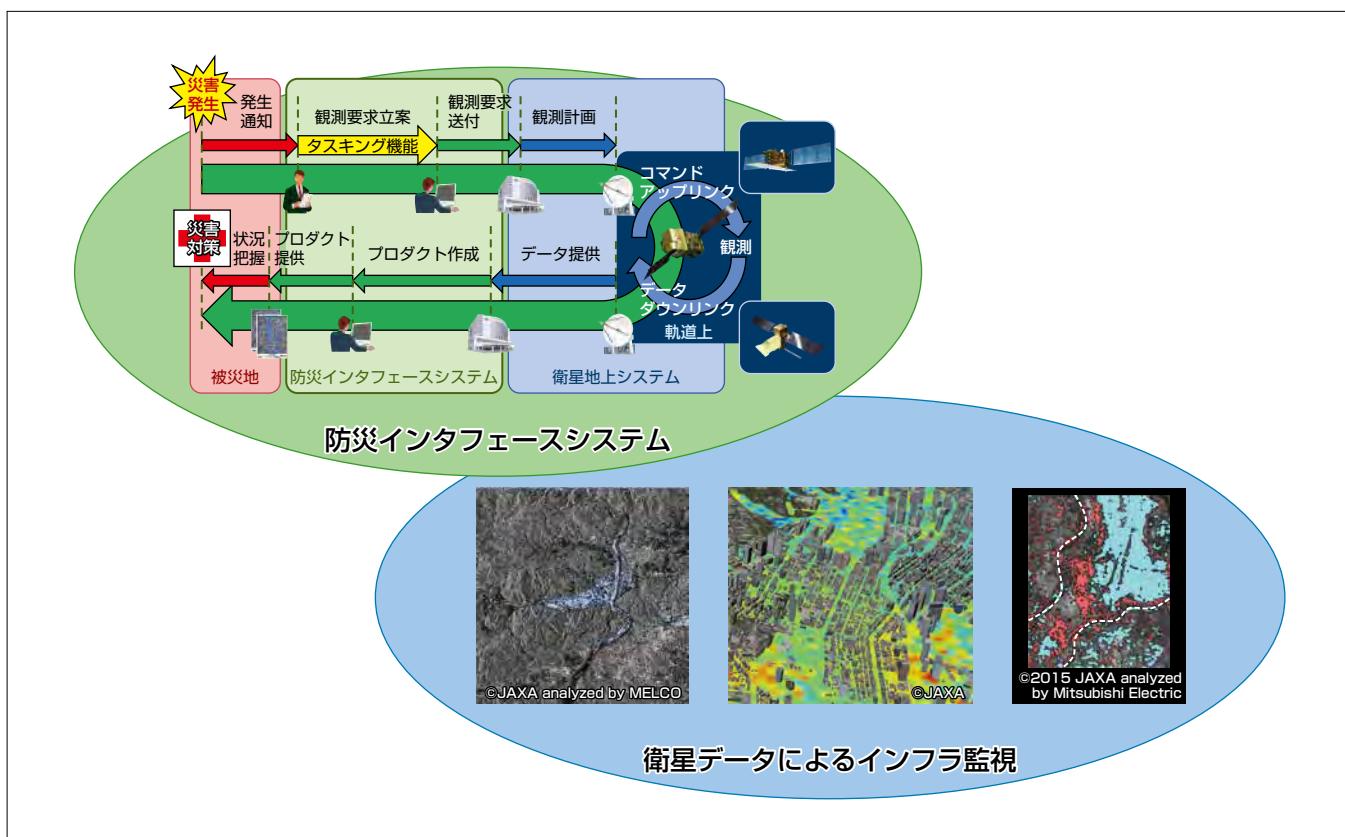
防災向け衛星観測ソリューション

Earth Observation Solutions for Disaster Prevention

要 旨

三菱電機では、防災分野での衛星観測ソリューションについて、①衛星データの実利用の促進、効率化を図る防災向け衛星観測インタフェースシステムの構築、②平時での災害予防・減災を目的とした河川堤防・海岸堤防などのインフラ監視を主体とする衛星データ解析サービスの提供に取り組んでいる。①では、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)の防災インタフェースシステムを2017年度から開発中である。防災インタフェースシステムは、防災・災害対応を行う国内外の機関からの緊急観測やプロダクト提供等の要求受付、光学衛星及びレーダー衛星のデータから生成した各種プロダクトの提供を、ワンストップサービスで実現する。②では、サービス提供の実現に向け、インフラ監視に対する衛星データ利用の可

能性・有用性の実証を行う段階にあり、国立研究開発法人防災科学技術研究所(防災科研)で推進されている戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「国家レジリエンス(防災・減災)の強化」で、合成開口レーダ(SAR)衛星の時系列観測データを用いたインフラ監視の実証実験を実施しようとしている。防災インタフェースシステムの2020年度の開発完遂を目指すとともに、並行して機能高度化の検討開発を進め、防災向け衛星観測インタフェースシステムとして拡充を図る。衛星データによるインフラ監視の実証実験で衛星データの有用性を示す確実な成果を挙げるとともに、サービス実現に向けた当社独自サービスの具体化・差別化の検討を進める。



防災インタフェースシステムと衛星データによるインフラ監視

防災インタフェースシステムは、防災・災害対応を行う国内外の機関からの緊急観測やプロダクト提供等の要求受付から、光学衛星及びレーダー衛星のデータから生成した各種プロダクトの提供までを、ワンストップサービスで実現する。衛星データの防災向け利用として、災害予防・減災を目的とした河川堤防などのインフラ監視を主体とする衛星データ解析サービスが検討されている。

1. まえがき

観測衛星から得られる情報の多様化・高頻度化・高精度化が進み、それを活用した多様な分野でのソリューション創出が期待されているが、その中の一つに、地震・火山・土砂・風水害等に対する発災時の状況把握・解析、平時の災害予防・減災のための監視といった、防災を目的としたソリューションがある。

当社では、防災分野での衛星観測ソリューションとして、現状、次の二つに取り組んでいる。一つは、JAXAの防災インターフェースシステムをベースとした、衛星データの実利用の促進、効率化を図る防災向け衛星観測インターフェースシステムの構築、もう一つは、平時の災害予防・減災を目的とした河川堤防・海岸堤防・港湾施設などのインフラ監視を主体とする衛星データ解析サービスの提供である。

本稿では、現在開発中のJAXAの防災インターフェースシステムとインフラ監視サービス実現の初期段階として実施するインフラ監視の実証実験について述べる。

2. 防災インターフェースシステム

2.1 概要

防災インターフェースシステムは、防災・災害対応を行う国内外の機関からの緊急観測やプロダクト提供等の要求受付、光学衛星及びレーダ衛星のデータから生成した各種プロダクトの提供を、ワンストップサービスで実現することを目指している。観測要求受付からデータ提供までを円滑に実現するため、陸域観測技術衛星2号(ALOS-2)、先進光学衛星(ALOS-3)、先進レーダ衛星(ALOS-4)等の複数の衛星と、防災関係機関等のユーザーとのインターフェースを一元的に担う共通システムとして整備されている。

図1に防災インターフェースシステムを示す。また、表1に

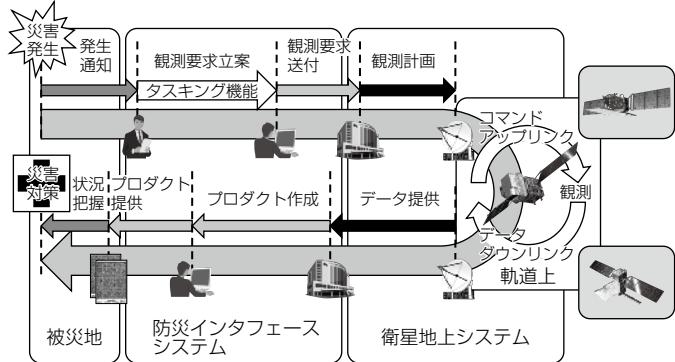


図1. 防災インターフェースシステム

表1. 防災インターフェースシステムに接続する外部システム

接続外部システム	関連衛星
ALOS-2利用・情報システム	ALOS-2
ALOS-3衛星運用システム	ALOS-3
ALOS-3利用推進システム	
ALOS-4利用・情報システム	
ALOS-4利用推進システム	ALOS-4
ALOS-4衛星管制・ミッション運用システム	
火山活動・林野火災速報システム	–
地震被害推定システム	–
防災機関災害情報システム	–
センチネルアジア	Resourcesat-2 Cartosat-2 VNREDSat-1A THEOS-1 FORMOSAT-5 DubaiSat-2
国際災害チャータ	RapidEye WorldView-1/2/3/4 GeoEye Sentinel-2A/2B TerraSAR-X/TanDEM-X RADARSAT-2 Sentinel-1A/1B
バイ協定機関	–

防災インターフェースシステムに接続する外部システムを示す。

2.2 機能

防災インターフェースシステムは、表2に示す機能で構成している。

表2. 防災インターフェースシステムの機能

機能名	機能概要
タスキング	・防災ユーザーからの防災対応用プロダクト提供要求を基に、衛星の緊急観測やアーカイブデータの提供に関する要求を立案する。
データ保存管理	・光学/レーダ観測衛星から提供された標準プロダクト及び防災インターフェースシステムで作成した防災対応用プロダクトの保存管理を行う。 ・各種補助情報の保存及び更新を行う。 ・光学/レーダ観測衛星のカタログ情報の保存管理を行う。
外部インターフェース	・関連する衛星の地上システム、防災ユーザー、補助情報提供元との情報のやり取りを行う。 ・防災ユーザーから受け付けた防災対応用プロダクト提供要求を、タスキング機能に送付する。 ・光学/レーダ観測衛星から提供された標準プロダクトや災害対応処理機能で作成した防災対応用プロダクトを、防災ユーザーに提供する。
災害対応処理	・光学/レーダ観測衛星から提供された標準プロダクトと補助情報を用いて、防災対応用プロダクトを作成する。
ステータス管理	・各機能での処理の進捗や防災ユーザーへのデータ提供状況等の管理を行う。
ユーザー管理	・防災ユーザーのアカウント管理やユーザー認証を行う。 ・防災ユーザーに応じたデータ利用や処理機能提供の権限の管理を行う。 ・災害種別や防災対応の枠組みに応じた、防災ユーザーのグループ化やプロダクト伝送の優先度の設定等を行う。
その他	・ヘルプ機能によって、防災ユーザーによる防災インターフェースシステムの操作をサポートする。 ・訓練機能によって、関係者による防災・災害対応時の訓練を行う。

2.2.1 タスキング機能

タスキング機能は、Webブラウザを用いたインターネット経由で受け付けた防災ユーザーからの防災対応用プロダクト生産要求に基づいて、衛星への緊急観測の要求及びアーカイブデータの提供要求を作成する。表3に、緊急観測要求に対応可能な衛星の一覧を示す。

要求立案では、観測対象データベース(重要施設・インフラ情報等を含み、大規模災害時の観測対象や観測の優先順位をデータベース化したもの)及び観測条件データベース(災害種別ごとの複数衛星の観測センサや観測条件、抽出可能情報をデータベース化したもの)に基づき、災害種別ごとに有効な観測が可能なシーンを緊急観測の候補としてWeb GIS(Geographic Information System)上に表示し、立案の支援を行う。図2にタスキング機能による要求立案時の画面イメージを示す。

タスキング機能で立案された衛星への緊急観測要求は、外部インターフェース機能によって、各衛星の地上システムに送信される。

2.2.2 災害対応処理機能

災害対応処理機能は、外部インターフェース機能によって各衛星の地上システムから受領した衛星の標準プロダクト、防災インターフェースシステムで保存管理されている各衛星の標準プロダクト、地図情報及び補助データ(河川氾濫エリア、降水情報等)を用いて、防災ユーザーに提供する防災対応用プロダクトを作成する。表4に、災害対応処理機能で作成する防災対応用プロダクトの種類と概要を示す。

次に、主要な防災対応用プロダクトについて補足する。

(1) 災害速報図

災害速報図は、光学観測衛星及びレーダ観測衛星の標準プロダクトから、浸水域や土砂崩落域を含む被害区域を抽出した図で、基本的に自動で作成される。図3に災害速報図のイメージを示す。

出した図で、基本的に自動で作成される。図3に災害速報図のイメージを示す。

表3. 緊急観測要求に対応可能な衛星

種類	衛星名
光学観測衛星	ALOS-3 センチネルアジアに加盟している宇宙機関の光学観測衛星 Resourcesat-2 Cartosat-2 VNREDSat-1A THEOS-1 FORMOSAT-5 DubaiSat-2
	国際災害チャータに参加している宇宙機関の光学観測衛星 RapidEye WorldView-1/2/3/4 GeoEye Sentinel-2A/2B
	商用光学衛星 SPOT-6/7 Pleiades-1A/1B
	ALOS-2
	ALOS-4
レーダ観測衛星	国際災害チャータに参加している宇宙機関のレーダ観測衛星 TerraSAR-X/TanDEM-X RADARSAT-2 Sentinel-1A/1B
	COSMO-SkyMed



図2. タスキング機能の画面イメージ

表4. 防災対応用プロダクト

プロダクト名	概要
緊急観測プロダクト(光学)	・光学観測衛星が緊急観測したデータから作成した標準プロダクト及びこれらから作成したパンシャープン画像。
緊急観測プロダクト(レーダ)	・レーダ観測衛星が緊急観測したデータから作成した標準プロダクト。
発災前プロダクト(光学)	・光学観測衛星が過去に観測したデータから作成した標準プロダクト及びこれらから作成したパンシャープン画像。
発災前プロダクト(レーダ)	・レーダ観測衛星が過去に観測したデータから作成した標準プロダクト。
だいち防災マップ	・ALOS-3又はALOSの観測したデータに地図情報等を重畠したプロダクト。 ・光学画像はパンシャープン画像を使用。 ・プロダクト作成の対象範囲は日本国内とする。 ・ALOS-3のベースマップ整備後は、ALOS-3の最新のベースマップを使用。
災害速報図	・光学観測衛星又はレーダ観測衛星の緊急観測で取得したデータを基に、自動処理で被災域の識別等を行った画像情報及び浸水域・土砂災害域などの被害域を自動抽出したポリゴン情報。 ・防災ユーザーからの要求内容に応じて、注目箇所の自動及びマニュアルでの切り出し処理を実施。
被害区域図	・災害速報図に解析者がマニュアル判読等を行い、各被害域の抽出精度を高めたプロダクト。
光学/レーダ複合プロダクト	・光学観測データとレーダ観測データのそれぞれの特徴と長所を合わせ、被害域と被災地物の両方を識別させたプロダクト。
その他	・被災した地物の識別等、高付加価値なデータを重ね合わせた情報。 ・火山活動・林野火災速報システムが作成する地表面温度や火山活動状況のプロダクトを含む。 ・JAXA/EORC、西日本衛星防災利用研究センター、解析を自ら実施する防災ユーザーが作成したプロダクト等を含む。

EORC: JAXA 地球観測研究センター

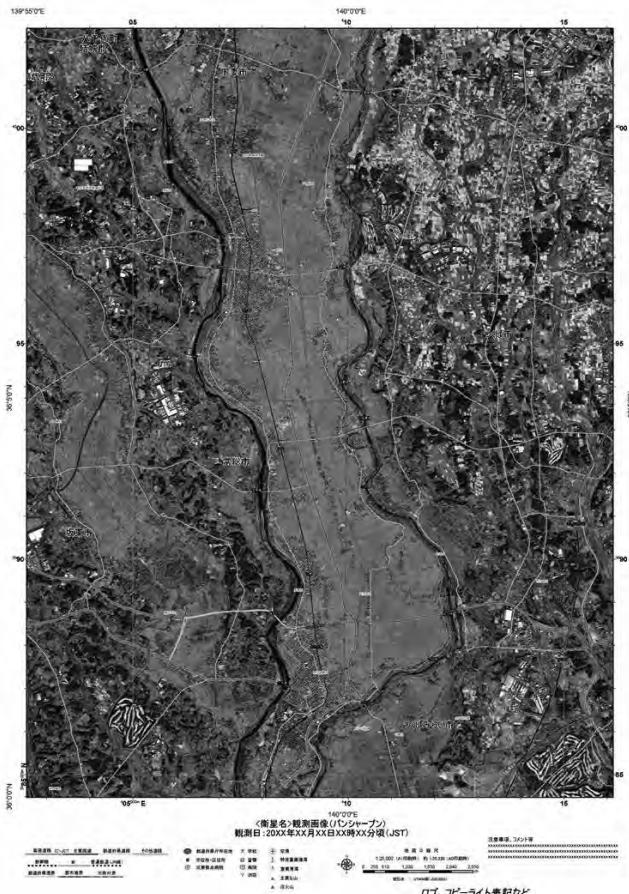


図3. 災害速報図のイメージ

(2) 被害区域図

被害区域図は、災害速報図に対し、運用者が災害対応処理機能で提供される各種編集機能(切り出し、拡大・縮小、各種補助データや地図情報の重畠、被害域／浸水域のポリゴンの作成)を用いて、被害域の抽出精度の高度化、防災ユーザー向けの補足説明追加等の加工をしたものである。

図4に被害区域図の作成画面イメージを示す。

(3) 光学／レーダ複合プロダクト

光学／レーダ複合プロダクトは、光学観測衛星及びレーダ観測衛星の標準プロダクトや浸水域抽出情報、建物ポリゴン、DEM(Digital Elevation Model)情報等を重ね合わせ、各々の衛星データの特徴を生かして、防災ユーザーに災害推定情報を提供するものである。図5に光学／レーダ複合プロダクトの作成画面イメージを示す。

2.3 今後の計画

防災インターフェースシステムは、現在開発中であり、2020年度から運用が開始される予定である。一方、並行して、SIPの「国家レジリエンス(防災・減災)の強化」で、タスキング機能を中心に高度化が検討されている。検討、試作等を経て、2021年度から防災インターフェースシステムの改良が計画されている。

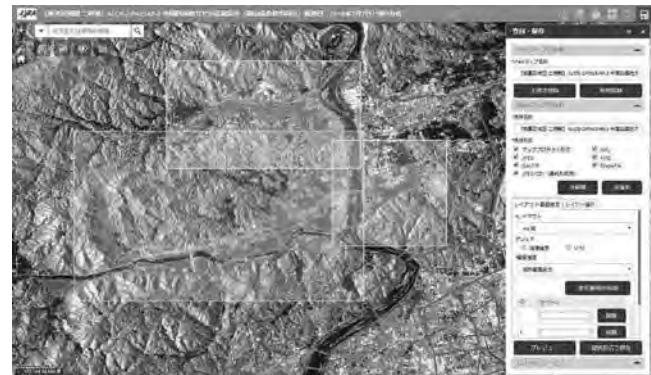


図4. 被害区域図の作成画面イメージ



図5. 光学／レーダ複合プロダクトの作成画面イメージ

3. 防災向けインフラ監視の実証実験

衛星データ解析サービスを中心とした防災向けソリューションについては、SIPでの社会実装検討等を活用した、平時での利用を含んだインフラ監視サービスの提供や、防災向けの衛星データ解析アプリケーションの提供等による事業化が検討されている。現在は、事業化に向けた最初のステップとして、インフラ監視に対する衛星データ利用の可能性・有用性について実証実験を実施する段階にある。次に、防災科研から請け負っている実証実験について述べる。

実証実験の目的は、SIP課題「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」（管理法人：防災科研）に位置付けられ、防災科研が推進しているテーマⅡ「衛星データ等即時共有システムと被災状況解析・予測技術の開発」で、SAR衛星による定期的な時系列観測データを用いたインフラ監視についての利活用の可能性の実証、インフラ監視を含めた被災状況解析技術を実装・運用する持続的な仕組みの構築を目指した社会実装化の検討支援である。

現在、実証実験の実施計画を立案する段階にあり、次にその内容を述べる。

3.1 監視対象と衛星データ

実証実験でのインフラ監視の対象は、海岸堤防、河川

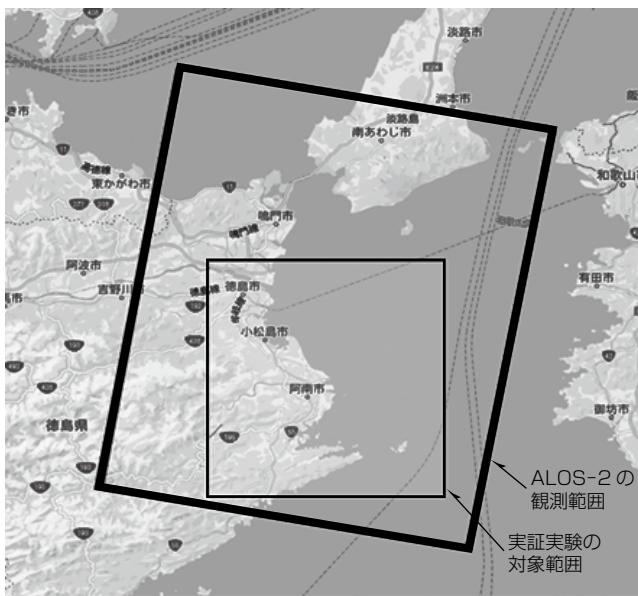


図6. ALOS-2データの観測範囲

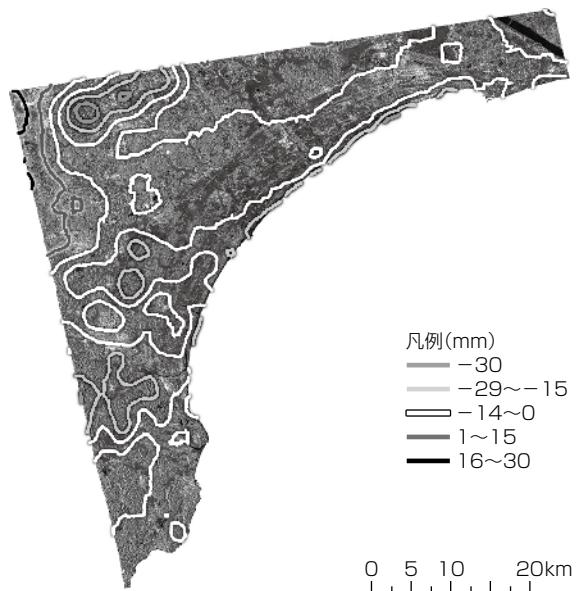


図7. 変動量の表示イメージ

表5. 時系列干渉解析手法

手法	手法概要	利点	欠点	適すると想定される対象
PSInSAR解析	信号が安定した点(PS点)の時系列的な変位量を抽出	変位量が高精度に得られる	変位量は点(PS点)でしか得られない	海岸堤防 港湾施設(堤防等)
SBAS解析	複数の干渉解析結果から逆問題を解き、時系列的な変位量を抽出	面的な変位量が得られる	PSInSAR解析と比較し、抽出精度が劣る	河川堤防 港湾施設(埋立地等)

PSInSAR : Persistent Scatterer Interferometry SAR, SBAS : Small Baseline Subset method

堤防、港湾施設である。使用する衛星データは、ALOS-2のSAR観測データを用いる。また、ALOS-2に比べて空間分解能は劣るもの、観測頻度が高い欧州宇宙機関(ESA)のSentinel-1のデータを収集し、精度比較等の検討に活用する。図6に、使用するALOS-2データの観測範囲を示す。

3.2 実証実験

実証実験では、監視対象となる堤防・施設の測量データとの精度比較を行う。複数の大きさのデータ平滑化を試行して精度劣化要因を分析し、監視対象のインフラ規模に対して適切なデータ平滑化手法について実証する。また、時系列干渉解析手法については表5に示す二つの手法を用いて、それぞれの利点に着目し、監視対象インフラへの適用効果について実証を行う。実証実験では、監視対象の海岸堤防や河川堤防等について、沈下・隆起等の変動を時系列で解析評価する。図7に変動量の表示イメージを示す。

3.3 利活用可能性の検討

実証実験の結果から、利活用可能なユースケースの検討、

制約条件の具現化を行う。検討に当たっては、監視対象インフラの管理にかかる利用想定ユーザーへのヒアリングを行い、ユーザーの視点も考慮して、衛星データによるインフラ監視の利活用の可能性等について検討する。

4. むすび

防災分野での衛星観測ソリューションの二つの取組みとして、現在開発中の防災インタフェースシステムと衛星データによるインフラ監視の実証実験について述べた。

防災インタフェースシステムについては、2020年度の開発完遂を目指すとともに、並行して機能の高度化についての検討開発を進め、防災向け衛星観測インタフェースシステムとしての拡充を図る。衛星データによるインフラ監視については、実証実験で衛星データの有用性を示す確実な成果を挙げるとともに、インフラ監視サービス提供に向けた当社独自サービスの具体化・差別化の検討を進める。

参考文献

- (1) 小山 浩, ほか: 宇宙システム利活用の新時代, 三菱電機技報, 92, No.2, 100~104 (2018)

地球観測衛星ALOSシリーズの防災への貢献

Contribution of Advanced Land Observing Satellites to Disaster Reduction

大野新樹*
Araki Ohno
中村聖平*
Shohei Nakamura
藤井康隆*
Yasutaka Fujii

要旨

人工衛星による地球観測は、陸域、海洋、大気、気候・気象監視、災害監視、地図作成等の分野で行われており、これら宇宙からの情報は、安心・安全・快適な社会の創生に大きく寄与している。近年の著しい気候変動によって、地震、噴火や津波、及び河川の氾濫による浸水害等が頻発しており、国民の生活基盤となる家屋、財産はもとより、尊い生命までも脅かす災害が発生している。各省庁及び行政機関では、これらの災害に対してハザードマップの作成や適時情報開示等による防災・減災の活動に取り組んでおり、人工衛星からの情報は必要不可欠であり、より詳細で、かつ高頻度な情報提供が求められている。

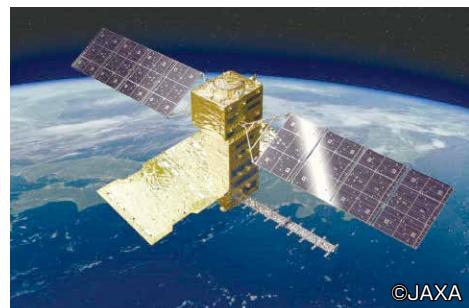
三菱電機では、現在2機の地球観測衛星の開発を進め

ている。一方は先進光学衛星(ALOS(Advanced Land Observing Satellite)-3)であり、大型化・高性能化した光学センサを搭載し、広観測幅かつ高分解能を可能にし、クリアな可視画像の取得を実現する。もう一方は、先進レーダ衛星(ALOS-4)であり、全天候観測可能なフェーズドアレー方式Lバンド合成開口レーダ(PALSAR-3)を搭載し、広観測幅での陸域・海上の観測を実現する。

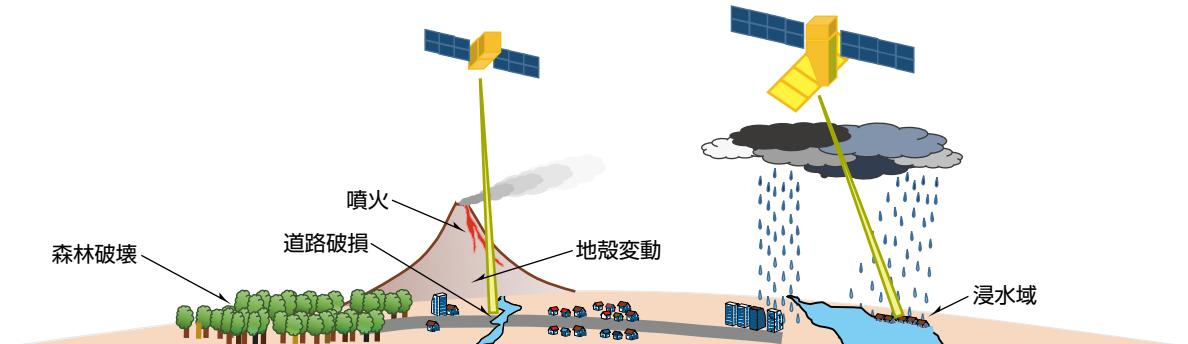
これら2機の衛星から得られる観測情報は、地殻変動のモニタリング、ハザードマップの作成、避難計画の策定等による防災・減災への活用はもとより、災害発生時の発生地点の特定、災害状況確認、及び救援部隊への情報提供等に活用されて二次災害の発生抑制にも貢献する。



先進光学衛星(ALOS-3)⁽¹⁾



先進レーダ衛星(ALOS-4)⁽²⁾



ALOSシリーズによる地球観測のイメージ

ALOSシリーズによる地球観測は、光学衛星とレーダ衛星との併用による災害発生時の昼夜・天候を問わない観測が期待されている。また、災害発生時だけでなく、平時のベースマップ作成や危険地域のモニタリング活動を通じて、防災・減災に貢献していく。

1. まえがき

人工衛星による地球観測は、陸域、海洋、大気、気候・気象監視、災害監視、地図作成等の分野で行われておらず、観測で得られた情報は、安心・安全・快適な社会の創生に大きく寄与している。例えば、地球観測衛星としてよく知られている気象衛星“ひまわり”は、雲、海水分布、及び地面・海面温度の観測を行い、台風やゲリラ豪雨の予測等の日常生活だけでなく、治水、農作物の生育、漁獲高予測等へも広く利用されており、人工衛星による観測は必要不可欠なものになっている。近年の著しい気候変動によって地震、噴火、津波や河川の氾濫による浸水害等の発生が以前に比べ増大しており、大規模・広範囲な災害が発生していることから、人工衛星からの情報の重要性は高まりつつあると同時に、より詳細で、かつ高頻度な情報提供を必要としている。

当社が開発を進めている2機の地球観測衛星(ALOSシリーズ)は、光学センサ、及び電波センサによる国内・海外問わず全地球規模での可視及び電波による広観測幅、高分解能、及び高頻度を実現する。表1にALOS-3とALOS-4の主要諸元を示す。これらの観測衛星から得られた情報は、平時では全地球規模でのベースマップの作成、危険地域のハザードマップの作成、活火山のモニタリング、

表1. ALOS-3とALOS-4の主要諸元

	ALOS-3	ALOS-4
ミッション機器	広域・高分解能光学センサ ・パンクロマチックバンド 地上分解能: 0.8m 観測幅: 70km ・マルチバンド(カラー) 地上分解能: 3.2m 観測幅: 70km	Lバンド合成開口レーダ ・スポットライトモード 分解能: 1.0m 観測幅: 35km ・高分解能モード 分解能: 3.0m 観測幅: 200km ・広域観測モード 分解能: 25.0m 観測幅: 700km
サイズ	5.0×16.0×3.5(m)	10.0×20.0×6.4(m)
質量	約3t	約3t
設計寿命	7年	7年
運用軌道	太陽同期準回帰軌道 高度: 669km 回帰日数: 35日 降交点通過地方太陽時: 10:30	太陽同期準回帰軌道 高度: 628km 回帰日数: 14日 降交点通過地方太陽時: 12:00

地殻・地盤の変動観測、及び土木インフラの変化確認等の防災情報として活用される。また、災害発生時には、道路・鉄道・橋・建物等の被災状況、河川の氾濫域の確認はもちろん、平時のデータと比較することによる地滑り・噴火による地形変化、地震による地殻変動観測等を行い、災害発生状況の早期確認、更なる災害の発生リスクの把握や地域の安全確保等の情報提供に活用される。

本稿では、先進光学衛星(ALOS-3)及び先進レーダ衛星(ALOS-4)の概要と搭載されるセンサの特長に加え、防災への適用例について述べる。

2. 先進光学衛星(ALOS-3)

2.1 光学センサ(広域・高分解能センサ)

ALOS-3に搭載される広域・高分解能光学センサは、防災・減災利用に資する広観測幅と高空間分解能を併せ持つことを最大の特長とする可視近赤外域の光学センサである。表2に広域・高分解能センサの観測性能を示す。

広観測幅と高空間分解能の両立性を表す指標として、観測幅を空間分解能で割った値である瞬時観測点数を考える。図1に近年開発された他の地球観測衛星に搭載された光学

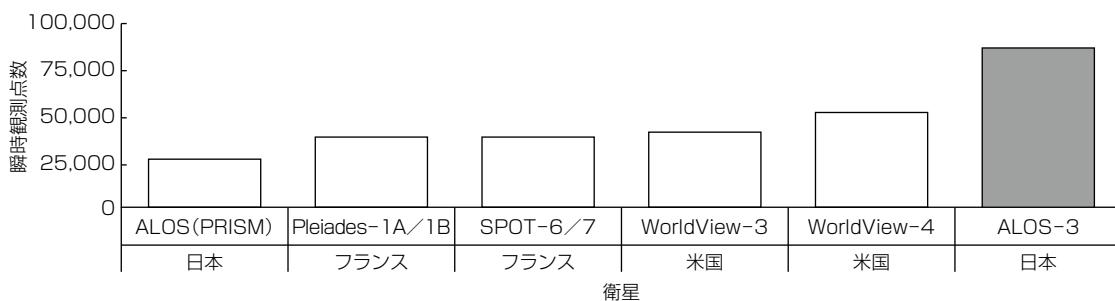
表2. 広域・高分解能センサの観測性能

項目	諸元
撮像方式	TDI撮像方式
分光方式	焦点面分光方式
観測バンド構成	パンクロマチック(Pa) : 1バンド マルチスペクトル(Mu) : 6バンド
観測波長域	Pa : 0.52~0.76μm Mu バンド1 : 0.40~0.45μm バンド2 : 0.45~0.50μm バンド3 : 0.52~0.60μm バンド4 : 0.61~0.69μm バンド5 : 0.69~0.74μm バンド6 : 0.76~0.89μm
観測幅 ^(注1)	70km
空間分解能 ^(注1)	Pa : 0.8m/Mu : 3.2m
MTF ^(注2)	Pa : 0.1以上/Mu : 0.2以上
S/N ^(注2)	200以上
量子化ビット数	11bit

(注1) 軌道高度669kmからの直下撮影時(ノミナル値)

(注2) 性能を規定する観測条件で

MTF: Modulation Transfer Function



センサと広域・高分解能センサのPaバンドの瞬時観測点数の比較を示す。広域・高分解能センサの瞬時観測点数は、海外の一線級の地球観測衛星と比較しても多いことが分かる。広域・高分解能センサは世界最高レベルで広観測幅と高空間分解能を両立させる光学センサである。

広域・高分解能センサでは、大口径な集光光学系によって信号光量を稼ぐとともに、TDI(Time Delay Integration)撮像と呼ばれる新しい撮像方式を適用することによって、高い取得画像品質(S/N)の下で、高空間分解能を実現している。TDI撮像とは、衛星進行に伴う光学センサの視点移動に同期して、検出器内で信号電荷を転送・加算し、設定したTDI段数分だけ信号電荷を増加させて出力する技術である。広域・高分解能センサでは、Paバンドで最大128段、Muバンドで最大32段の信号加算を行うことが可能であり、高空間分解能でありながら、S/N比(Signal to Noise ratio)の高い高品質な画像を提供することができる。

TDI撮像では、光学センサの視点移動と検出器内での信号電荷の転送を精密に同期させる必要がある。ALOS-3では、衛星の姿勢制御にTDI適合型3軸駆動制御方式(TPC: TDI Pointing Control)を適用し、衛星と広域・高分解能センサが協調した撮像制御を行うことでこれを実現する。さらに、TPCを用いることで、衛星の進行方向と異なる方向にセンサの視点を移動させて撮像を行うことも可能である(方向変更観測)。図2に南海トラフ地震発生時を想定した観測シミュレーション結果を示す。また、図3に陸域観測技術衛星“だいち”(ALOS)による取得画像と広



(a) ALOSの取得画像

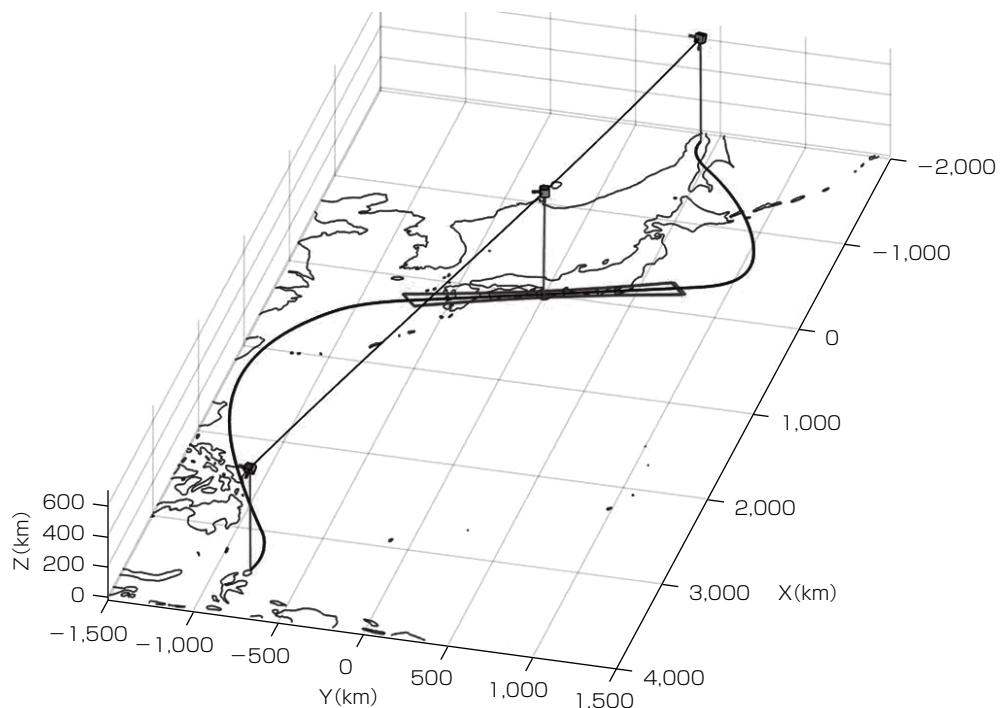
(b) ALOS-3のシミュレーション画像
図3. ALOSとALOS-3の画像比較⁽¹⁾

図2. 観測シミュレーション結果(方向変更観測)

域・高分解能センサのシミュレーション画像の比較を示す(共にパンシャープン(高解像度白黒画像と低解像度カラー画像を合成処理した)画像)。

南海トラフ地震が発生した際には関東地方から東海・近畿・太平洋沿岸地域を一度に観測して早急な情報収集を行うことが望まれている。広観測幅と高空間分解能を併せ持つ光学センサを用いて、TPCによる自由度の高い観測を行うことで、広範囲にわたる災害状況を正確に把握できる質の高い画像情報を効率的に取得することが可能になる。

2.2 集光光学系⁽³⁾

光学センサが広観測幅と高空間分解能を両立させるためには、視野が広く、かつ大口径・長焦点距離の集光光学系が必要になる。広域・高分解能センサでは、曲面鏡4枚を組み合わせた軸外しタイプの反射光学系によって、この集光光学系を実現している。TMA(Three-Mirror Anastigmat)をベースとした上で、曲面鏡を1枚多く用いた設計を採ることによって、コンパクトな全長ながら、広い視野全域にわたって高い結像性能を得ることができて、いる。軸外しタイプであることから、多くの反射光学系に見られる中心遮蔽は存在せず、明るくシャープな画像が得られる。図4に広域・高分解能センサの集光光学系のプロトフライトモデルを示す(各鏡の鏡面に保護カバーが取り付けられている)。

2.3 検出器と焦点面構成部

光学センサが広観測幅と高空間分解能を両立させるためには、高精細な検出器の画素を観測幅方向に多数配列した焦点面構成部が必要になる。広域・高分解能センサでは、検出器に高精細なTDI型長尺検出器を採用し、この検出器を観測幅方向に多数スタガ配列することによって、この焦点面構成部を実現している。検出器の画素ピッチはPa

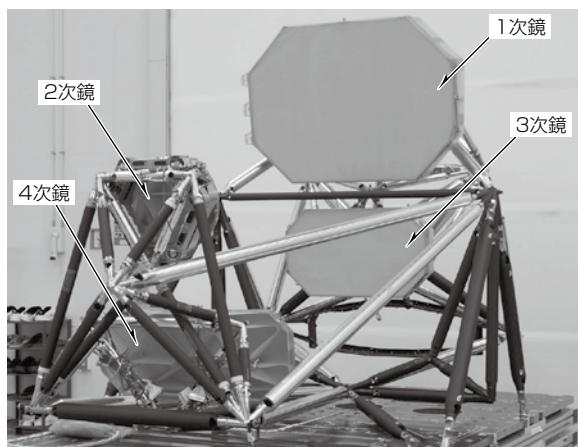


図4. 集光光学系のプロトフライトモデル

バンド: 8 μm/Muバンド: 32 μmであり、観測幅方向に配列される総画素長は750mm以上に及ぶ。

3. 先進レーダ衛星(ALOS-4)

3.1 SARセンサ(PALSAR-3)システム

ALOS-4に搭載されるSAR(Synthetic Aperture Radar)センサ(PALSAR-3)は、“だいち2号”に搭載された前号機であるPALSAR-2⁽⁴⁾からの機能を継承しつつ、性能の飛躍的な改善を実現している。表3にPALSAR-3の観測性能を示す⁽⁵⁾。

PALSAR-2と同様にSARアンテナは、アクティブラーフェーズドアレーランテナを採用して二次元の電子ビーム走査が可能である。これによって、高分解能化に特化したスポットライトモード、スキャンSAR方式を用いた広域観測モードなど、多様なニーズに対応した観測を可能にする。また、PALSAR-3では、新規にデジタルビームフォーミング技術を導入することによって、分解能及び画質を維持したまま200kmの観測幅(PALSAR-2に比べて最大4倍)を実現する。200km観測幅を観測した場合の画像例を図5に示す。1回の観測幅を拡大することで、観測頻度の向上などミッションに必要な性能を実現する。

3.2 SAR画像を用いた防災への貢献事例

PALSAR-2は、一度に広域な領域を高精度に観測することが可能であり、干渉SARと呼ばれる技術の有効性が

表3. PALSAR-3の観測性能

項目	内容	備考
周波数	L帯	1,257.5MHz(中心)
帯域幅	84MHz(最大)	
入射角	8~70度	
観測モード	スポットライトモード 高分解能(ストリップマップ)モード 広域観測モード	
分解能	3 × 1 m 3 × 3 (m) 6 × 6 (m) 10 × 10 (m) 25 × 25 (m)	レンジ×アジマス
観測幅	35 × 35 (km) 100~200km 700km	ALOS-2: 25 × 25 (km) ALOS-2: 50~70km ALOS-2: 350km, 490km
画質	NESZ S/A	-20dB以下 15dB以上 観測モードによる
観測方向	右方向及び左方向	
偏波	単偏波/2偏波/4偏波	
SARアンテナ	アクティブラーフェーズドアレーランテナ 3.6(エレベーション) × 10(アジマス)(m)	

NESZ: Noise Equivalent Sigma Zero

S/A: Signal to Ambiguity ratio

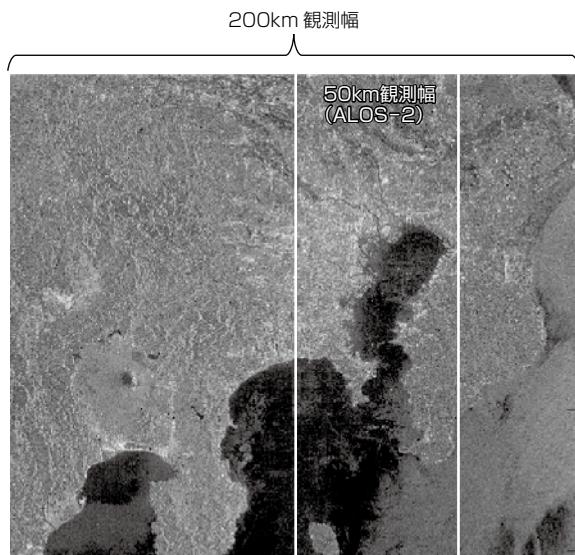


図5. 200km観測幅のSAR画像例(PALSARのデータを基に作成)

実証されている。干渉SARとは、2回の異なる時刻に取得したSAR画像の比較を行い、数cmオーダー級の変化の検出を可能にする技術であり、災害リスクや災害発生後の被災状況の把握等に強く期待されている。

図6に、SAR画像を用いた災害領域の観測結果の一例を示す。この画像は2019年10月に発生した台風19号による千曲川(長野県)の堤防決壊の様子とそれに伴う浸水被害をALOS-2搭載PALSAR-2の高分解能モード(3m分解能)で観測した結果である。図6では、防波堤の決壊箇所を詳細に捉えている。また、住宅街での浸水エリアでは、千曲川から流入した水が地表面を覆ったことで、レーダの観測信号を受信した信号の強さが変化しており、周囲の領域と比較して画像の強度が低下している様子が確認できる。

これらのようにレーダ画像を用いることで、災害発生箇所の特定などを迅速に行うことが可能である。ALOS-4搭載のPALSAR-3では、一度に観測可能な領域がALOS-2から約4倍に拡大しており、広域災害や複数の地点で同時に災害が発生した場合でも、観測頻度を下げることなく観測することが可能であり、ALOS-4打上げ後の災害監視に多くの期待が寄せられている。

図6. ALOS-2による千曲川観測結果(JAXA/EORC解析結果)⁽⁶⁾

4. む す び

開発中の2機の地球観測衛星(ALOSシリーズ)の概要、及び特長について述べた。これらの衛星は、高度約600kmから常時全地球規模の観測による地上の変化をモニタリングすることによって、我々の日常生活を脅かす、地震・噴火・及び水害等の被災状況の早期取得、並びに防災・減災に必要不可欠な情報を取得することで、安心・安全・快適な社会の創生に貢献する。

参 考 文 献

- (1) JAXA: 先進光学衛星(ALOS-3)
http://www.jaxa.jp/projects/sat/alon3/index_j.html
- (2) JAXA: 先進レーダ衛星(ALOS-4)
http://www.jaxa.jp/projects/sat/alon4/index_j.html
- (3) 阿波祐二, ほか: 先進光学衛星の目的と技術, 三菱電機技報, 91, No.2, 108~111 (2017)
- (4) 針生健一, ほか: 陸域観測技術衛星2号(ALOS-2) 一最先端LバンドSARによる高精度な地球観測を目指して, 三菱電機技報, 85, No.9, 521~524 (2011)
- (5) Motohka, T., et al.: STATUS OF THE ADVANCED LAND OBSERVING SATELLITE-2 (ALOS-2) AND ITS FOLLOW-ON L-BAND SAR MISSION, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2427~2429 (2017)
- (6) JAXA/EORC: 記録的な被害をもたらした台風19号の脅威
<https://www.eorc.jaxa.jp/earthview/2019/tp191028.html>

温室効果ガス観測技術衛星GOSATシリーズの地球温暖化防止への貢献

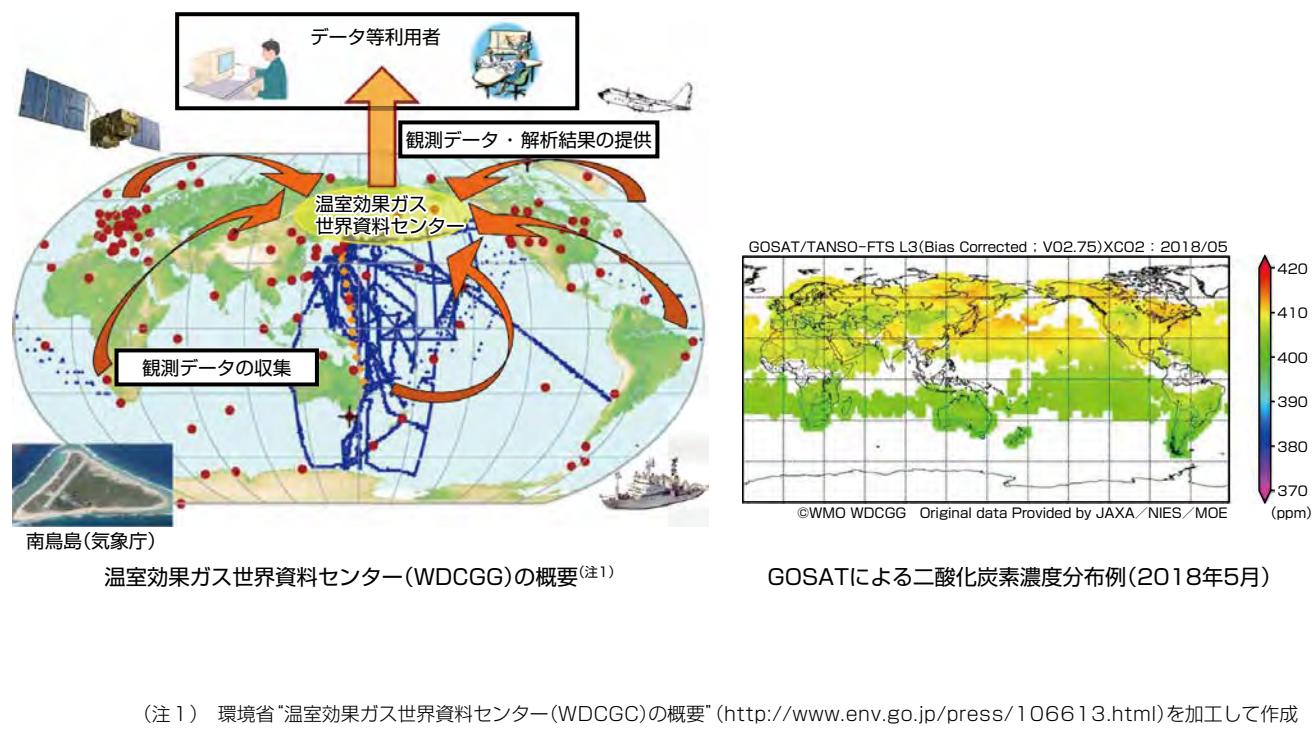
Contribution of Greenhouse Gases Observation Satellites to Prevention of Global Warming

上野信一*
Shinichi Ueno

要旨

三菱電機は、地球観測衛星による社会への貢献を宇宙開発の重要な柱と位置付け、海洋観測衛星(MOS-1)搭載マイクロ波放射計(MSR)の開発を端緒として、数々の地球観測衛星システム、及び搭載センサ開発に参画してきた。これらの一環として、環境省(MOE)、国立研究開発法人 国立環境研究所(NIES)、国立研究開発法人 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として、主要な温室効果ガスである二酸化炭素とメタンの濃度を宇宙から観測することを主目的にした世界初の温室効

果ガス観測技術衛星“いぶき”(Greenhouse gases Observing SATellite : GOSAT)及び温室効果ガス観測技術衛星2号“いぶき2号(GOSAT-2)”の開発・製造を担当した。GOSATとGOSAT-2から得られた観測データを解析することによって、二酸化炭素とメタンの全球にわたっての分布や、これらの温室効果ガスが地球上のどの地域で排出され、吸収されているかといった収支について、地理的分布とその季節変動、年々変動を知ることができる。



(注1) 環境省“温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)の概要”(<http://www.env.go.jp/press/106613.html>)を加工して作成

温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)の概要

温室効果ガス世界資料センター(World Data Centre for Greenhouse Gases : WDCGG)の概要とGOSATによる二酸化炭素濃度分布例(2018年5月)を示す。WDCGGは、全世界から報告される二酸化炭素やメタン等の各種温室効果ガス観測データを収集・提供している世界で唯一の国際的な機関である。従来の地上、船舶、航空機による高精度な“点”的データに加え、GOSATとGOSAT-2による“面”的データを組み合わせて使うことによって、地球全体の二酸化炭素濃度分布の長期的な監視や地域ごとの排出・吸収の収支把握などへの利活用拡大が期待されている。

1. まえがき

我々の住む地球はそれぞれの地域の気候を背景に形作られている。また、日本は四季に恵まれ風光明媚(めいび)な土地になっている。その気候が今、地球規模で、我々が経験したことのないものに変わりつつある。

現在の地球はデータが確認できる過去1,400年で最も暖かくなっている。この地球規模での気温や海水温の上昇、氷河や氷床が縮小する現象、すなわち地球温暖化は、平均気温の上昇にとどまらず、夏の異常高温(熱波)や大雨・干ばつの増加などの様々な気候の変化を引き起こしている。その影響は、早い春の訪れや海温上昇などによる生物活動の変化や、水資源や農作物への影響など、自然生態系や人間社会に既に現れ始めている。将来、地球全体の気温は更に上昇すると予想され、水、生態系、食糧、沿岸域、健康などにより深刻な影響が生じると考えられている。

これらの地球温暖化に伴う気候の変化がもたらす自然・社会・経済的影響に対して、世界各国との協力体制を構築し、解決策を見いだしていかなければならぬ。このため、国際社会は温室効果ガスの排出量を削減する方向に動き始め、気候変動枠組条約の下で、1997年の京都議定書で先進国の削減目標が合意され、2005年2月に発効になっている。世界各国が温室効果ガス排出量の削減対策を進めるには、将来の気候変動とその影響の正確な予測に基づく合理的な削減目標を設定すると同時に、国別の排出量を正しく測定し、各種施策の排出量削減効果を評価することが重要である。

当社はこれまで、地球観測衛星による社会への貢献を

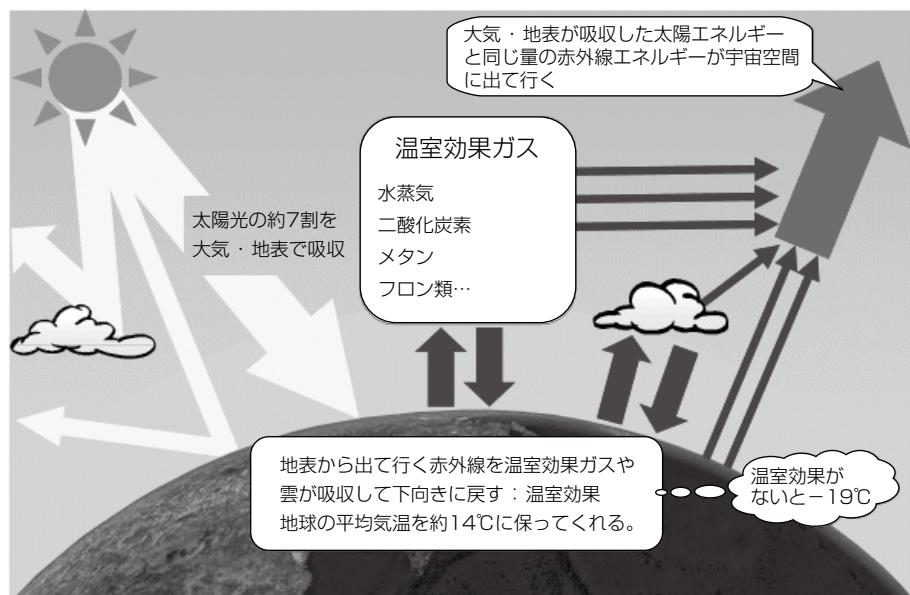
宇宙開発の重要な柱と位置付け、海洋観測衛星(MOS-1)搭載マイクロ波放射計(MSR)の開発を端緒として、数々の地球観測衛星システム、及び搭載センサ開発に参画してきた。これらの一環として、環境省、NIES、JAXAの3機関による共同プロジェクトとして、主要な温室効果ガスである二酸化炭素とメタンの濃度を宇宙から観測することを主目的にした世界初の温室効果ガス観測技術衛星“いぶき”(GOSAT)及び温室効果ガス観測技術衛星2号“いぶき2号(GOSAT-2)”の開発・製造を担当した。

本稿では、これら衛星を用いた地球温暖化防止への貢献について述べる。

2. 地球温暖化とGOSATシリーズ

2.1 地球温暖化の原因

地球温暖化の主な原因は、人間活動による温室効果ガスの増加である可能性が極めて高いと考えられている。大気中に含まれる二酸化炭素などの温室効果ガスには、海や陸などの地球の表面から地球の外に向かう熱を大気に蓄積し、再び地球の表面に戻す性質(温室効果)がある。18世紀半ばの産業革命以降、人間活動による化石燃料の使用や森林の減少などによって、大気中の温室効果ガスの濃度は急激に増加した。この急激に増加した温室効果ガスによって大気の温室効果が強まったことが、近年の地球温暖化の原因と考えられている。温室効果がない場合の地球表面の温度は氷点下19℃と見積もられているが、温室効果のために現在の世界の平均気温はおよそ14℃となっている(図1)。



出典：気象庁ホームページ(https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p03.html)

図1. 温室効果の模式図

このため、温室効果ガスが0では人類は地球での活動は困難である。一方、現在のように大気中の温室効果ガスが増えると温室効果が強まり、地球の表面の気温が高くなつて人類の活動に悪影響を及ぼすことになる。

2.2 GOSATシリーズの概要

世界気象機関(WMO)を含む世界の幾つかの気象機関や大学などの研究機関では、これまで地表面の各地の観測地点や、それらのデータを用いて算出した地上での二酸化炭素の全球平均濃度を発表してきた。しかし、二酸化炭素は標高や気圧によって濃度差があるために、地上観測点だけの濃度データでは地球大気の全体濃度を表せない。今後の温室効果ガスの増加による地球温暖化のリスクを算出・予測するためには、地球全体の温室効果ガスの平均濃度の算出が重要であり、上空の大気まで含めた“全大気”的平均像を把握することが不可欠である。このため、地表面から大気上端までの大気中の二酸化炭素の総量(カラム量)、“全大気”的平均値(カラム平均値)を観測可能な衛星を用いた観測が切望されていた。

このため、環境省、NIES、JAXAの3機関による共同プロジェクトとして、主要な温室効果ガスである二酸化炭素とメタンの濃度を宇宙から観測することを主目的にした世界初の温室効果ガス観測技術衛星“いぶき”(GOSAT)⁽¹⁾が開発され、2009年1月23日に打上げが成功し、設計寿命の5年を大きく超えた現在も順調に観測を続けている。

さらに、“いぶき”的後継機として、温室効果ガス観測技

術衛星2号“いぶき2号(GOSAT-2)”が開発され、2018年10月29日に打上げが成功した⁽²⁾⁽³⁾。2019年8月から観測データの公開が始まっている(図2)。

これらGOSATとGOSAT-2から得られた観測データを解析することによって、二酸化炭素とメタンの全球にわたっての分布や、これらの温室効果ガスが地球上のどの地域で排出され、吸収されているかといった収支について、地理的分布とその季節変動や年々変動を知ることができる。

2.3 GOSATシリーズの目的

GOSATの第一の目的は、温室効果ガスの亜大陸スケール(数千km四方)での吸収・排出量の推定精度を高め、地域ごとの吸収・排出状況の把握や森林炭素収支の評価などの環境行政に貢献することである。さらに、GOSATデータの利用研究を通して、温室効果ガスの全球分布とその時間変動や、全球の炭素循環メカニズムとその気候変動影響などに関する新たな科学的知見の集積が図られ、気候変動予測と影響の評価に役立てられている。GOSATのデータを基にして算出した、亜大陸スケールでの二酸化炭素の吸収・排出量の推定結果を図3に示す。

第二の目的は、これまでの地球観測技術を継承・発展させ、温室効果ガスの測定技術を開発するとともに、将来の地球観測衛星に必要な技術開発を行うことである。

第二の目的の結果として、GOSATの成果を基に次の機能がGOSAT-2の機器開発に反映されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

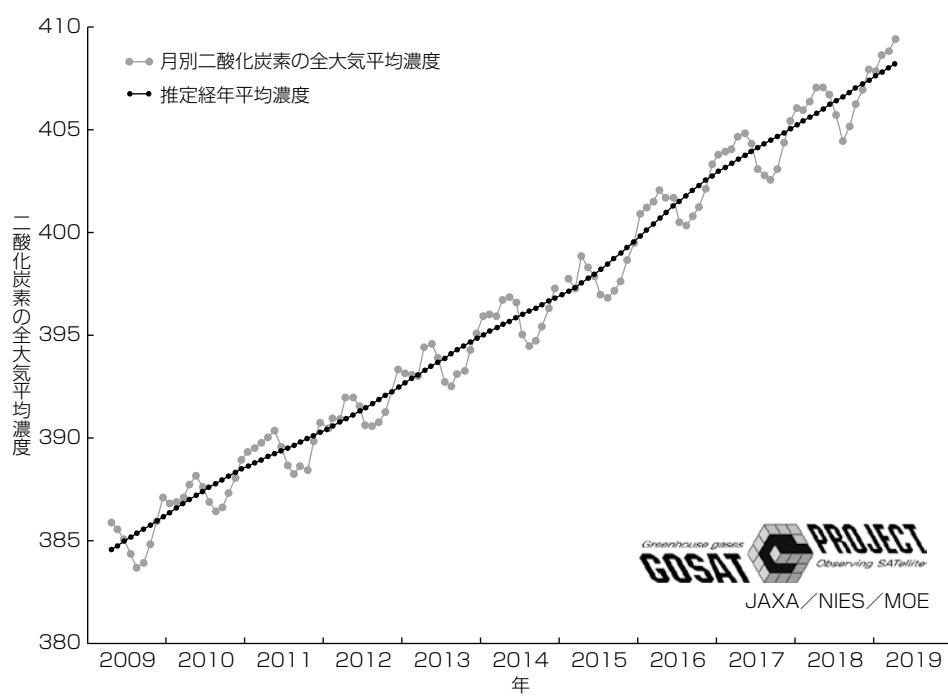
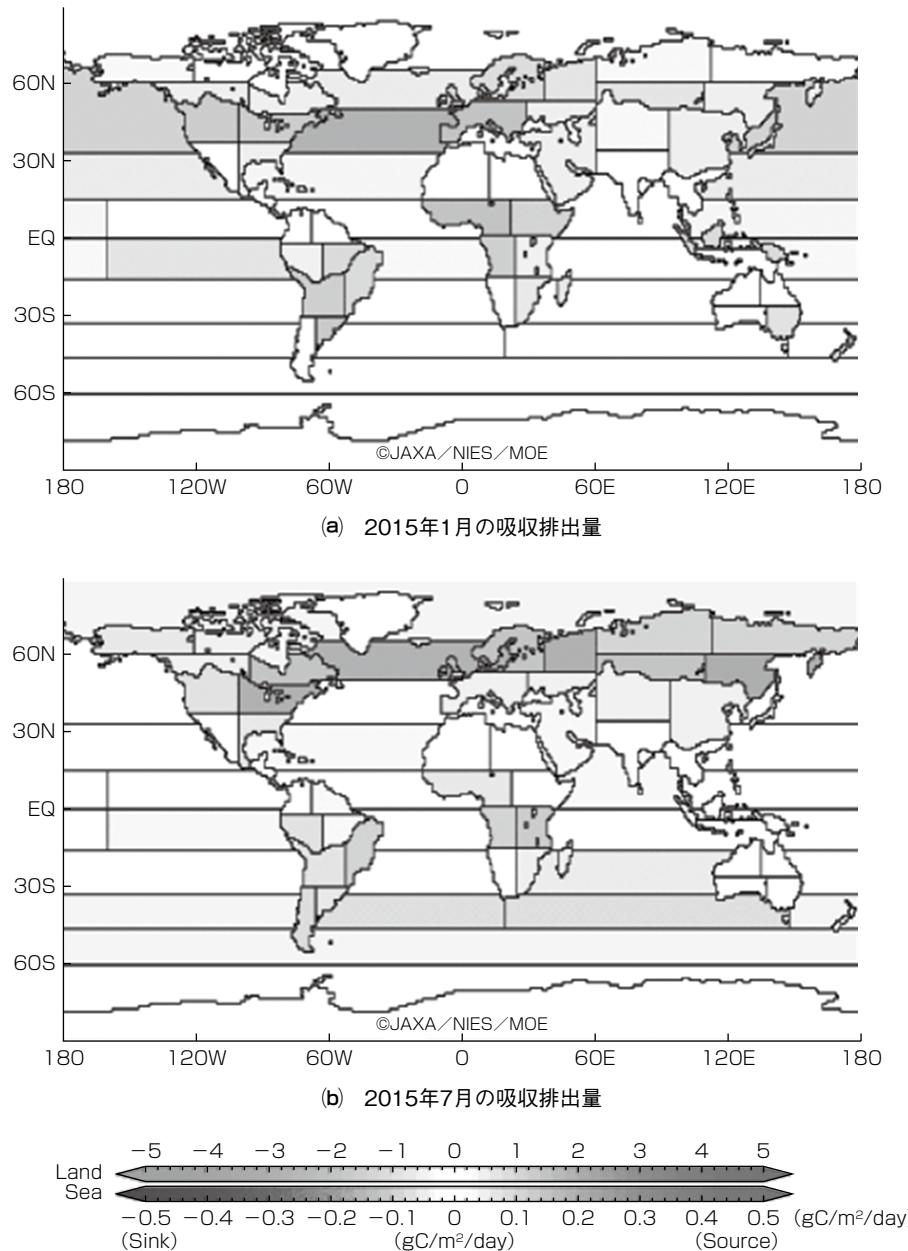


図2. 全大気での二酸化炭素濃度の月平均値と経年平均値のグラフ⁽⁵⁾

図3. 二酸化炭素の地域別正味吸収排出量⁽⁵⁾

- (1) 観測データの品質向上のために観測機器の開口径を拡大し、観測する光量の増加によるS/N(Signal to Noise ratio)の向上を図った。これによって、観測精度がGOSAT搭載機器から約1桁向上している。
 - (2) 一酸化炭素観測機能を追加するために、観測機器の観測波長領域を拡大した。一酸化炭素は、人為起源の場合二酸化炭素と一緒に発生するが、寿命が短い。このため、一酸化炭素は人為発生源近傍に存在すると考えられ、二酸化炭素の発生源の推定が可能になる。
 - (3) 有効観測データを増加させるための、観測地域の雲量を算出することで雲の少ない地域を観測する雲回避機能(インテリジェントポインティング)を搭載した。
- 過去から未来へのデータの一貫性と信ぴょう性の担保が

重要なことは大気観測でのGOSATシリーズも同様であり、2019年3月にGOSAT搭載温室効果ガス観測センサTANSO-FTS(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation-Fourier Transform Spectrometer)とGOSAT-2搭載温室効果ガス観測センサ2型TANSO-FTS-2のマッチアップポイント観測(ほぼ同年月日時刻に地球上の同一地点を観測)でのスペクトル比較を実施し、米国軌道上炭素観測衛星2号(Orbiting Carbon Observatory 2: OCO-2)データも含めて輝度変換係数の評価を実施し、TANSO-FTSとTANSO-FTS-2の相互校正を実施してデータの一貫性を確保している。

これらは、地球温暖化の原因物質の挙動に関する科学的な理解を深めるのに役立てられるとともに、将来の気候変

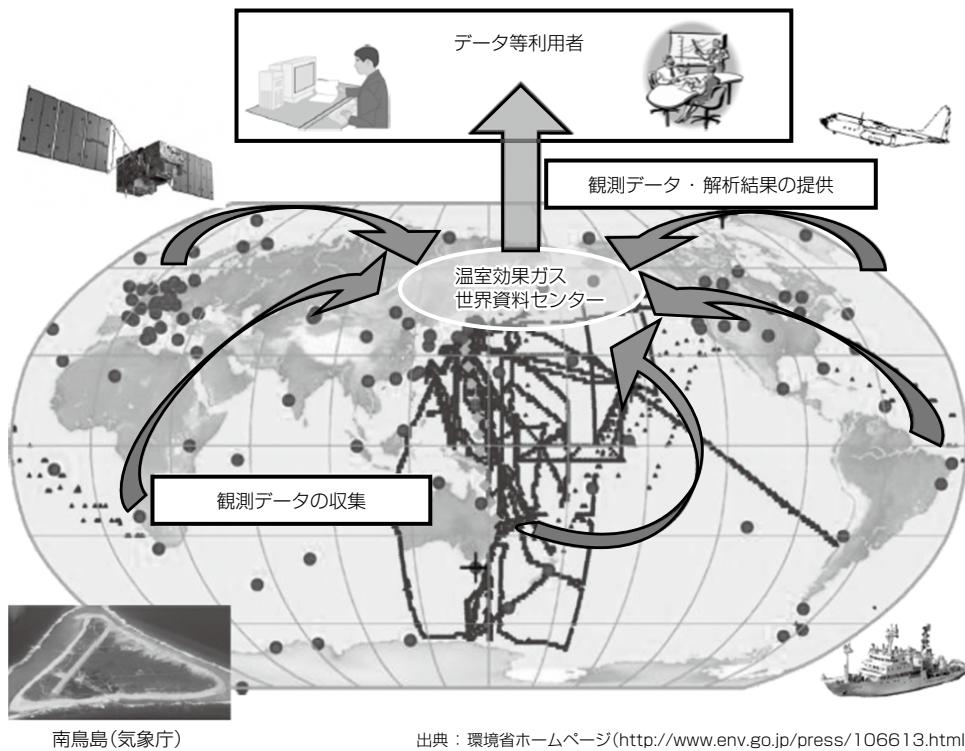


図4. 温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)の概要

化予測の高度化や炭素排出削減施策などの温暖化対策にかかる基礎情報として活用することが可能である。

2.4 GOSATシリーズの観測データ利活用

気象庁は、世界気象機関(WMO)の要請に基づいて、WDCGGを運営している。WDCGGは、全世界から報告される二酸化炭素やメタン等の各種温室効果ガスの観測データを収集・提供している世界で唯一の国際機関である(図4)。

WDCGGはこれらのデータを利用して様々な解析を行っており、その結果は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の報告書や、WMO温室効果ガス年報として気候変動に関する国際連合枠組条約(UNFCCC)の締約国会議(COP)で毎年配付されるなど、温室効果ガスの現状を伝える活動に有効に利用されている。さらに、WDCGGが提供している観測データや解析結果は、世界の地球温暖化の研究者にも広く利用されている。この観測データの一部として、GOSAT(2009年打上げ)による観測データが、2019年3月19日から新たに提供されている。

3. む す び

GOSATとGOSAT-2の概要と、これらの衛星による温室効果ガスの観測及び観測データの利活用による地球温暖化防止への貢献について述べた。2009年1月のGOSAT打上げ以降、2014年7月米国OCO-2、2016年12月中国TANSAT、2018年10月GOSAT-2、2019年5月米国OCO-3の打上げと軌道上観測が開始されており、宇宙からの温室効果ガス観測に注目が集まっている。

当社は、より良い社会の実現、また国連の持続可能な開発目標(SDGs)の実現に貢献する地球観測衛星の開発を引き続き進めていく。

参 考 文 献

- (1) Hamazaki, T., et al.: Sensorsystem 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)
- (4) 上野信一, ほか: 温室効果ガス観測技術衛星2号(GOSAT-2), 三菱電機技報, 93, No.2, 109~112 (2019)
- (5) 環境省発行: GOSATの概要をまとめたリーフレット (2019年6月発行)
http://www.gosat.nies.go.jp/jp/gosat_leaflet_jp.pdf

特集論文

準天頂衛星システムセンチメータ級測位補強サービスの利便性向上に向けて

For Advancement of Quasi-Zenith Satellite System Centimeter Level Augmentation Service

上原晃斎*
Akinari Uehara
宮 雅一*
Masakazu Miya
藤田征吾*
Seigo Fujita

廣川 類*
Rui Hirokawa

要旨

準天頂衛星システム(Quasi-Zenith Satellite System: QZSS)は2018年11月1日に実用サービスが開始された。そのサービスの一つとして、従来のGPS(Global Positioning System)カーナビゲーション等で数メートルであった精度についてセンチメータ級の極めて高い測位精度を実現する補強サービスであるセンチメータ級測位補強サービス(Centimeter Level Augmentation Service: CLAS)が提供される。CLASでは、衛星測距データに含まれる各種誤差を補正するデータを準天頂衛星経由で配信することで、高い測位精度(静止体水平: 6 cm以下(95%))を実現する。

都市部等の利用では測位衛星からの電波が遮蔽されるこ

とがあり、ユーザーの可用性を向上させる取組み状況として、CLASの補強対象衛星数を増加させる改善施策を報告する。CLASは2032年度までの提供が決定しており、インフラの更なる価値向上等によって、自動運転、鉄道利用、社会インフラ維持管理、無人化・ロボットサービスといった様々な分野への社会実装が期待されている。今後も継続した安定的なサービスの提供に向け、サービス品質の維持に取り組んでいくとともに、ユーザー利便性向上に向けた施策を進めることによって、高精度測位社会の実現に貢献する。

準天頂衛星システムセンチメータ級測位補強サービスの主要イベント

	FY2013	FY2014	FY2015	FY2016	FY2017	FY2018	FY2019	FY2020	FY2021	FY2022	FY2023	FY2024 以降	
運用状況						▼ 2018/11/1: 準天頂衛星システムサービス開始 2017/9/15: 2号機配信開始 ▲ 試験 2017/9/27: 1号機配信開始 ▲ サービス 2017/12/18: 3号機配信開始 ▲ 2018/1/12: 4号機配信開始 ▲	実用 サービス		実用 サービス (補強衛星数増)				
システム 構築・整備	基本/ 詳細設計			システム 整備・試験					維持管理		7機体制に向けた整備		



準天頂衛星システム「みちびき」サービス開始記念式典の様子

出典: みちびきウェブサイト
(https://qzss.go.jp/events/ceremony_181105.html)

準天頂衛星センチメータ級測位補強サービス

電子基準点(日本全国約1,300点)で取得した観測データから各衛星の距離誤差成分(軌道・時計・信号バイアス・電離層遅延・対流圏遅延)を推定し、圧縮及びインテグリティ情報を付与して衛星経由で配信する。2018年11月1日に準天頂衛星システムのサービスの一つとして開始されたが、ユーザー利便性を更に向上させるため、インフラで配信する補強対象衛星数を増加する改善を予定している。

1. まえがき

自己位置の標定技術として様々な技術が存在するが、中でも2018年11月1日にサービスインとなった準天頂衛星システム(QZSS)でのセンチメータ級測位補強サービス(CLAS)の提供開始は新たに注目される技術の一つである。CLASは、準天頂衛星から送信されるL6信号を使用して、日本の測地系と整合可能なセンチメータ級の位置精度が得られる測位補強情報を日本全国及びその近海に送信するサービスである。特定の地上通信インフラを必要としない日本国内をサービスエリアとした無償の放送型の測位補強サービスの開始は、IT農業や全国の高速自動車専用道路での自動走行・次世代安全運転支援システムなど、本格的な高精度位置情報利用時代への利活用が期待されている。

本稿では、CLASの概要とサービスの提供状況、サービス性能の評価状況、及びCLASの普及促進に向けての利便性向上の取組み状況を述べる。

2. CLASの概要

2.1 CLASの特長

CLASは、GNSS(Global Navigation Satellite System)としては初となるセンチメータ級の測位を可能にする補正情報を送信するサービスである。衛星からの補正情報の送信は、携帯電話やWi-Fi^(注1)等の地上インフラでの送信とは異なり、衛星の可視性が保持できる環境で一律にサービ

ス提供が可能である。ユーザー規模が爆発的に拡大した場合であっても、放送型のサービスであることから、ユーザー数は無制限に対応可能であることがメリットとしてある(図1)。GalileoやBeiDouなど他のGNSSでも、今後、センチメータ級の測位を可能とする補正情報の送信が予定されており、世界的にも高精度測位の爆発的普及に向けた環境が整いつつある。

(注1) Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの登録商標である。

2.2 CLASの原理

CLASが配信する補正情報の内容とセンチメータ級の位置情報を取得するまでのフローを図2に示す。QZSSのサービスの一つであるCLASは、日本全国約1,300か所に

CLAS：衛星による配信

- ・契約、通信費が不要
- ・放送型であり、爆発的ユーザー増にも対応可能
- ・送信元が準天頂衛星であり、可視性が保持できる高仰角位置から補正情報を送信

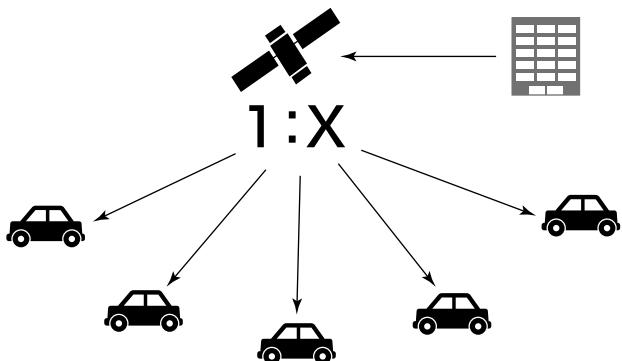


図1. CLASの特長

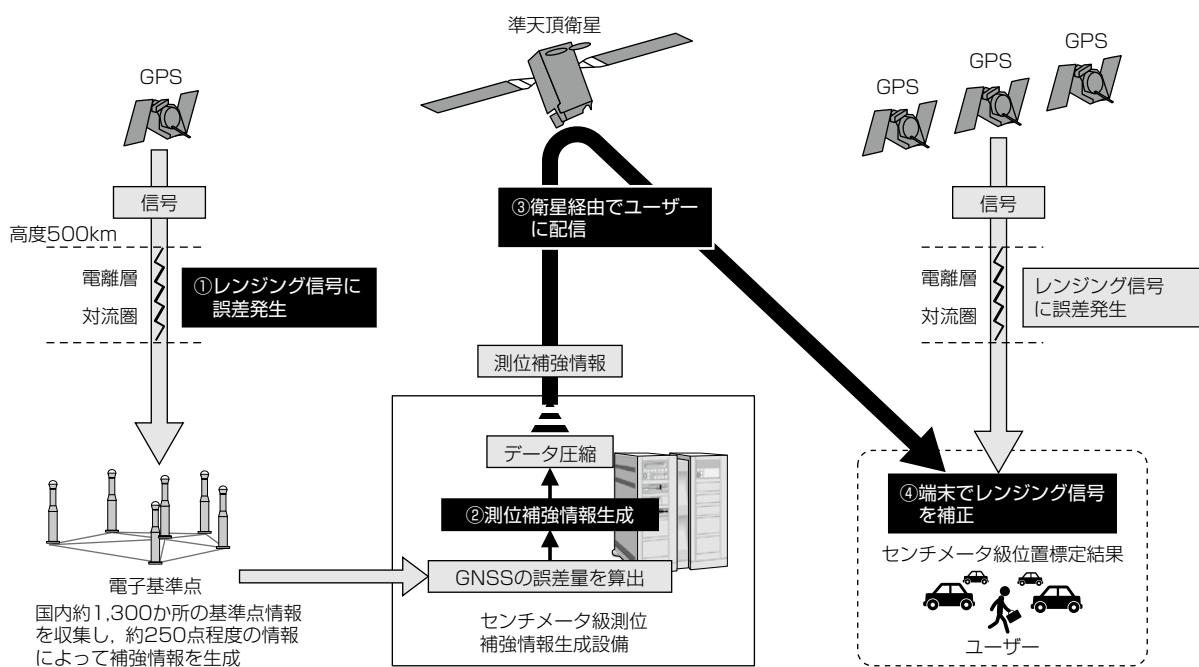


図2. CLASによるセンチメータ級位置情報の取得フロー

配置された電子基準点のGNSS観測データから、常時250点程度の観測データを利用して、衛星測位での誤差要因である衛星時計誤差、軌道誤差、衛星信号バイアス、電離層遅延誤差、対流圏遅延誤差等を推定し、補正情報を生成する。さらに、インテグリティモニタによる異常監視と補正情報の品質を表す指標となるインテグリティ情報を付加し、補強情報(補正情報及びインテグリティ情報)として回線容量である2 kbps(データ領域は1,695bps)に圧縮し、準天頂衛星のL6信号で送信する。補強情報のメッセージ規格は、測位補強サービスの国際的な標準規格RTCM STANDARD 10403.2⁽¹⁾から定義されるSSR(State Space Representation)方式に準拠したCompact SSRメッセージ⁽²⁾を採用している。ユーザーインターフェース仕様書(IS-QZSS-L6)⁽³⁾については、準天頂衛星システムサービス(株)(Quasi-Zenith Satellite System Service Inc. : QSS)が運用するウェブサイト⁽⁴⁾で公開されており、各企業・団体は自由にCLAS対応の受信機やアプリケーションなどの開発を行うことができる。

3. サービス提供状況

3.1 CLASのサービス提供状況

CLASは、2018年11月1日に実用サービスを開始した。サービスの提供状況(サービスの中断、性能劣化につながる提供イベントの計画、不具合などによる中断、性能劣化の実績など)については、米国のGPSがユーザーに対して配信しているNANU(Notice Advisory to Navstar Users)に倣い、NAQU(Notice Advisory to QZSS Users)情報⁽⁵⁾として公開しており、ユーザーはウェブサイト上で提供状況を確認できる。また、ツイッターによるNAQU情報の配信通知も実施しており、NAQU情報のウェブ公開と同時に、モバイル端末等でリアルタイムに通知を受けることもできる。また送信するメッセージではサービス中断か否かを示す“アラートフラグ”的データ領域を設けており、受信機ではリアルタイムでサービス中断か否かを判断する処理を具備できる。

CLASでは4冗長構成で地上システムを組んでおり、高い信頼性・可用性のサービスを提供している。準天頂衛星4機によるコンステレーションアベイラビリティ(衛星4機のうち少なくとも3機が、正常なL6信号を同時に提供する確率)は、仕様値0.99に対し、サービス開始後半年間の実績値は、0.999以上を達成している。

3.2 サービス性能のモニタリング

精度などのCLASのサービス性能は、PS-QZSS⁽⁶⁾で公

表1. CLASの主な仕様

項目	仕様
補強対象のGNSS信号	GPS : L1C/A, L1C, L2P, L2C, L5 QZSS : L1C/A, L1C, L2C, L5 Galileo : E1B, E5a GLONASS(CDMA ^(注2)) : L1OS, L2OS
サービスエリア	日本国及び領海(約80万km ²)
位置精度 (オープンスカイ, 95%)	静止体: 水平6cm/垂直12cm 移動体: 水平12cm/垂直24cm
初期化時間(95%)	60秒以下(補強情報取得時間含む)

(注2) CDMA : Code Division Multiple Access

開している(表1)。CLASでは、センチメータ級精度の測位(静止水平精度6cm(95%)以下、静止垂直精度12cm(95%)以下、移動体水平精度12cm(95%)以下、移動体垂直精度24cm(95%)以下)を可能とする補強情報を準天頂衛星から日本全国に送信している。衛星測位分野一般に精度の仕様は、GPSで見られるような衛星間とユーザー間の距離ドメインでのユーザーレンジ精度(User Range Accuracy)で示す方式と、ユーザードメインでの測位精度で示す方式があるが、CLASではユーザーへの分かりやすさを考慮し、後者の測位精度を採用し、精度仕様として定めている。そのため、CLASのプロバイダ側では、サービス性能をモニタリングすることを目的に、ユーザー模擬として、後処理測位演算ソフトウェアCLASLIB(Centimeter Level Augmentation Service Test Library)⁽⁷⁾を整備して一般公開するとともに、みなしうーザーとして日本全国から選定された電子基準点72点を対象にして、定常的に精度をモニタリングできる仕組みを設け、日々の精度評価結果を踏まえながら、サービス性能の維持向上に努めている。

CLASLIBは、L6メッセージのデコード処理や、CLASを利用するユーザーの測位方式であるPPP-RTK(Precise Point Positioning-Real Time Kinematic)対応の測位計算プログラムなどを含む後処理専用ツールのパッケージである。オープンソースであるRTKLIB(Real-Time Kinematic Library)⁽⁸⁾のversion2.4.2p13を拡張して構成している。L6メッセージのデコード処理以外の測位計算部分については、拡張カルマンフィルタ・MLAMBDA(Modified Least-square AMBiguity Decorrelation Adjustment)法によるアンビギュイティ決定処理などのコンペニショナルなRTK法の測位演算で使用される処理を採用している(図3)。また、オリジナルのRTKLIBの実装に対しては、アンビギュイティの検定処理機能の強化やパラメータチューニングを実施することによって、測位性能の改善を図っている。さらに、CLASLIBは静止体向け、移動体向けに別々のモードで実装している。静止体を想定した精度の確認は、静止体モードによって、移動体を想定した精度の確認は移動体モードによって実施する。静止体モードでは位置推定にかかる状態量が座標位置(三次元)だけであり、座標位置が前エポックの解に拘束するよう

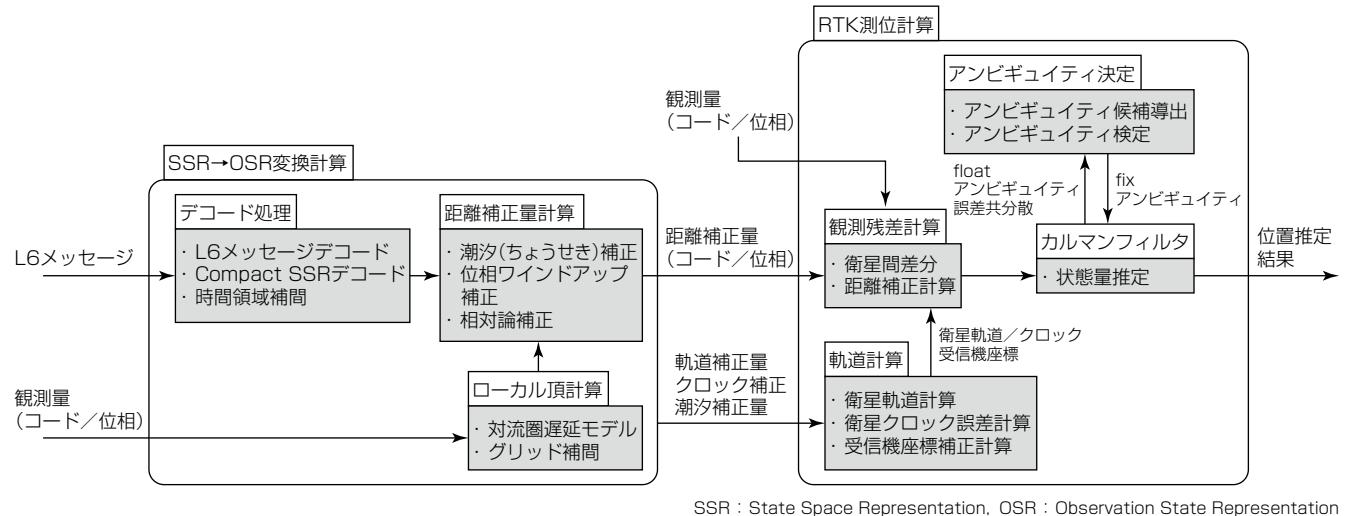


図3. CLASLIBの処理フロー

位置推定結果を算出する一方、移動体モードでは位置に加えて、速度及び加速度を状態量として推定して位置推定結果を算出する違いがある。

なお、CLASLIBは、CLAS対応端末の開発・販売を検討している企業・団体向けに、参照実装として提供することも目的としている。製品の実装検討時に参照データ生成ツールとして利用することも可能である。

4. サービス性能の評価状況

4.1 CLAS精度評価結果

サービス開始後のCLASの精度評価結果(水平方向、垂直方向)を静止体向け精度については図4(a)に、移動体向け精度については図4(b)に示す。月ごとに電子基準点72点の全エポックの測位結果を対象とした統計値(95%値)を示している。サービス開始以降、表1で示した精度仕様を満足している状況である。なお、サービスの評価結果は、定期的にウェブサイトで公開される計画である。

4.2 実端末での検証例

CLAS対応の端末を使用した検証例について述べる。2019年3月19日に、日本南方域の実フィールドでのサービス性能確認を目的に、日本最西端となる与那国島で、車両を使用した評価を実施した。評価に使用した端末は、QSSウェブサイトで一般貸出しを実施しているタイプと同じ端末である(図5)。自動車に端末を搭載し、移動体用のモードで動作させ、図6に示す走行経路に沿って、リアルタイム処理で測位結果を取得した。

図7に走行経路上の毎秒の測位精度を示す。リファレンス(みなし真値)として近傍の電子基準点を用いたRTKに

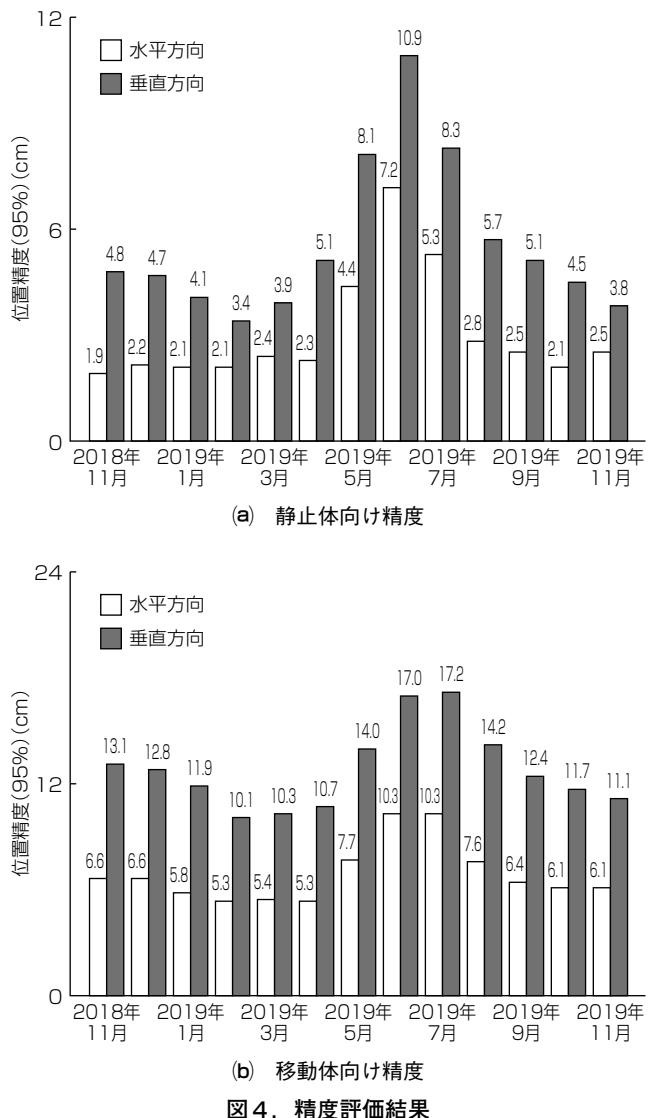


図4. 精度評価結果

より結果を求めて、リファレンスからの差異を示している。経路全体で精度良く測位ができるおり、水平精度は8.8cm、垂直精度は15.9cm(共に95%値)であった。なお、精度の



図5. PPP-RTK方式対応の端末



図6. 与那国島での走行経路

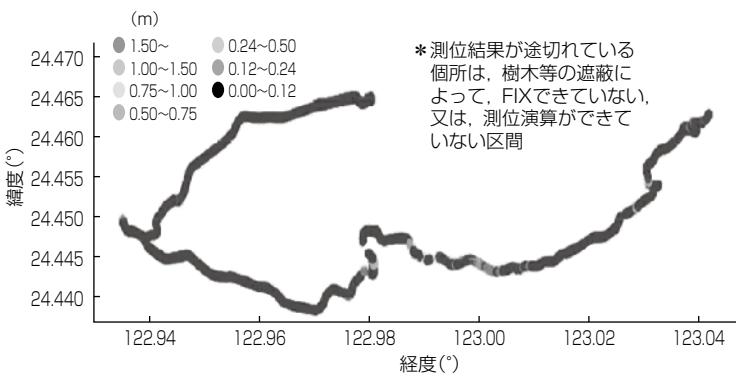


図7. 精度評価結果

統計値では、樹木等の遮蔽によってFIXできていない、又は、測位演算ができない区間を除いている。

5. CLASの利便性向上に向けて

5.1 補強対象衛星数増加の目的

CLASの補強信号は、日本のほぼ天頂にある準天頂衛星(QZS)から配信されるため、高層建造物があるような周囲環境でも電波が遮蔽されることなく、ユーザーに伝送される。一方、測位に使用する衛星(GPSやGalileo等)はQZSに対して低い仰角を飛行するため、非オープンスカイ環境(仰角15度以上に遮蔽物があり、衛星からの電波が遮蔽される環境(都市部

や森林等))では、ユーザーの可視性に制約を受けることがある。このため、都市部等の環境では、CLASの現行フォーマットで配信する補強対象(測位)衛星数の最大11機では、測位に必要な衛星数を確保することができずに、測位結果に大きな影響を与えることがある。

CLASは現在、マルチGNSS(Global Navigation Satellite Systems)対応として、GPS, Galileo, QZSをサポートしており、その平均可視衛星数は約17機である(図8に、2019年6月7日の東京での例を示す)。非オープンスカイ環境の利用シーンを想定し、新フォーマットを適用してCLASの補強対象衛星数を現状の最大11機から(平均可視衛星数の)17機まで増加させることで、CLASの可用性を飛躍的に向上させることが可能となる。

5.2 補強対象衛星数増加による効果

補強信号は衛星経由で配信されるため、回線容量に制約がある。そこで、補強情報のフォーマットを見直し、大気圏の擾乱(じょうらん)に応じて電離層補正量の情報量(ビット数)を動的に最適化(圧縮化)する方式を適用することで、情報圧縮率を最大30%向上させ、補強対象衛星を最大11機から最大17機に増加することを可能にした。補強対象衛星数の改善例を図9に示す。衛星配置によって可視衛星数が制約されるが、従来(現行フォーマット)では補強対象衛星として7~11機を配信していたが、新フォーマットでは12~17機に改善していることが分かる。また、補強対象衛星が時系列的に一様に増加することで、電離層擾乱の時間帯でも測位精度が大きく改善している(図10)。

先に述べた新フォーマットに関する性能評価については引き続き継続するとともに、CLASサー

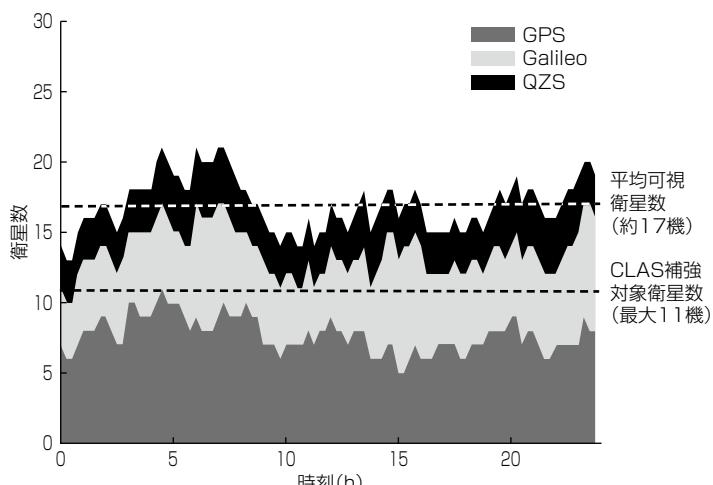


図8. 可視衛星数の時間推移(仰角マスク15度)

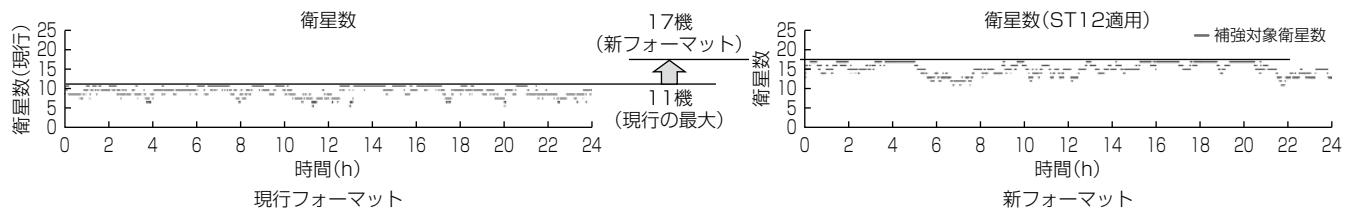


図9. 補強対象衛星数の改善例

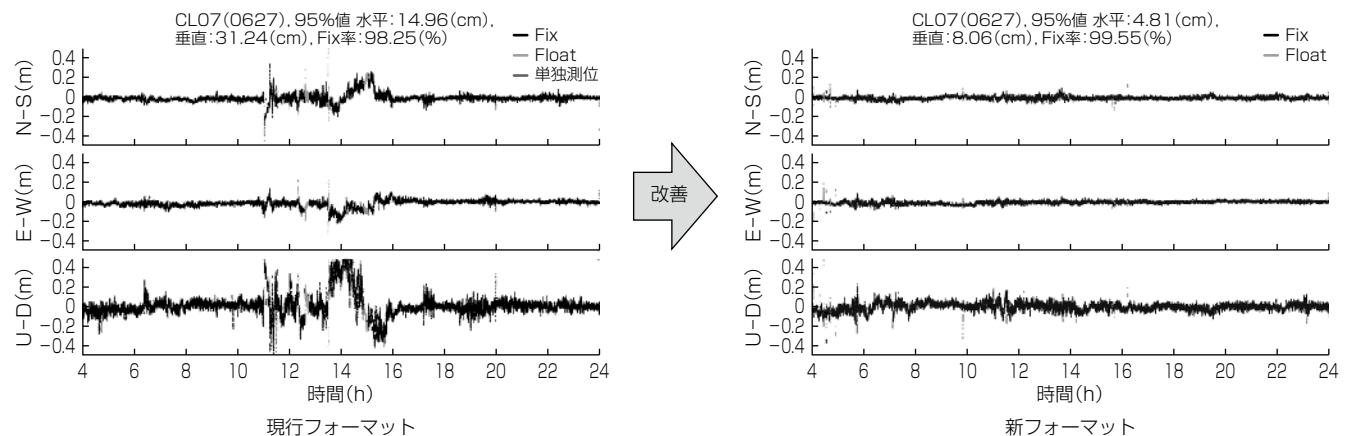


図10. 測位精度の改善例

ビスへの適用に先立ち、試験的な地上配信を2020年3月開始目標で準備を進めている。また、新フォーマットの詳細情報としてはユーザーインターフェース仕様書の改訂版 (IS-QZSS-L6-002)をQSSウェブサイトに公開中である。

6. む す び

準天頂衛星システムのCLASのサービス提供状況、及びサービス性能の評価状況を報告した。また、現状のCLASは補強対象衛星数を増加させることによって、ユーザーの可用性を向上させる取組み状況について併せて報告した。このサービスは2032年度までの運用が決定しており、インフラの更なる価値向上等によって、自動運転、鉄道利用、社会インフラ維持管理、無人化・ロボットサービスといった様々な分野への社会実装が期待されている。今後も継続した安定的なサービスの提供に向け、サービス品質の維持に取り組んでいくとともに、ユーザー利便性向上に向けた施策を進めることによって、高精度測位社会の実現に貢献する。

参 考 文 献

- (1) RTCM SPECIAL COMMITTEE 104 : RTCM Standard 10403.2 Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services (2013)
- (2) RTCM Paper 115-2018-SC104-1071 : Specification of Compact SSR Messages for Satellite Based Augmentation Service, Version 0.5, 18-OCT (2018)
- (3) Cabinet Office : Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification, Centimeter Level Augmentation Service, IS-QZSS-L6-001 (2018)
- (4) 内閣府 | 技術情報 | みちびき (準天頂衛星システム : QZSS) 公式サイト : パフォーマンススタンダード(PS-QZSS) 及びユーザインターフェース仕様書 (IS-QZSS) <https://qzss.go.jp/technical/download/ps-is-qzss.html>
- (5) 内閣府 | 技術情報 | 準天頂衛星システム (QZSS) 公式サイト : NAQU 情報 <https://sys.qzss.go.jp/dod/naqu.html>
- (6) Cabinet Office : Quasi-Zenith Satellite System Performance Standard, PS-QZSS-001 (2018)
- (7) 内閣府 | 準天頂衛星システム (QZSS) 公式サイト : センチメータ級測位補強サービスインデックスCLASテストライブラリ (2017) <https://sys.qzss.go.jp/dod/downloads/clas.html>
- (8) RTKLIB : An Open Source Program Package for GNSS Positioning <http://www.rtklib.com/>

自動運転用高性能ミリ波レーダモジュール

High - performance Millimeter Wave Radar Module for Automated Driving

1. まえがき

自動車の安全運転支援システムは、世界的にその重要性が認められ、国内でも2019年度の搭載率は85%までに上昇している。さらに来る高齢化社会でも安心・安全かつ快適な車生活を実現するために、自動運転システムの開発も加速している。この自動運転を実現するために、昼夜・天候に左右されない特長を持つミリ波レーダについても、検知性能(検知距離、角度分解能)の向上が求められている。

三菱電機では、2003年から継続しているミリ波レーダモジュールの量産実績を生かしつつ、防衛・宇宙で培った最新のレーダ技術を採用し、さらには乗用車への意匠性・搭載性を考慮した分散配置構造とした自動運転用高性能ミリ波レーダモジュールを開発中である。

本稿では、ミリ波レーダモジュールの構成と特長、主要技術、そして機能検証試作品でのフィールド試験結果について述べる。

2. ミリ波レーダモジュール

2.1 構成

開発中のミリ波レーダモジュールは、アンテナ、送受信回路、及び送受信回路の制御と信号の処理を扱うMCU(Micro Control Unit)で構成する基本モジュールと、アンテナと送信回路だけで構成するオプションモジュールで構成しており、車両への搭載性を考慮し、それぞれのモジュールを別々の場所に分散配置可能な構成になっている(図1)。レーダ方式は目標の速度成分と距離成分を容易に分離でき、かつ複数目標に対応できる最新の変調方式を採用した。水平方向の高分解能化のため、等価的に受信チャネル数を増加できる方式を採用した。また、送信回路には防衛・宇宙で培った最新のレーダ技術によって垂直方向の覆域と高分解能化を両立させ、かつ垂直方向の測角機能を実現した。

図2にミリ波レーダモジュールのブロック図を示す。モジュールの小型・低価格化のため、LO-IC, TX-IC, RX-ICの3品種のチップで構成するRF(Radio Frequency) CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor) ICと、ベースバンド増幅器、ADC(Analog Digital Converter)を含むベースバンドCMOS IC(BB-IC)を開発中

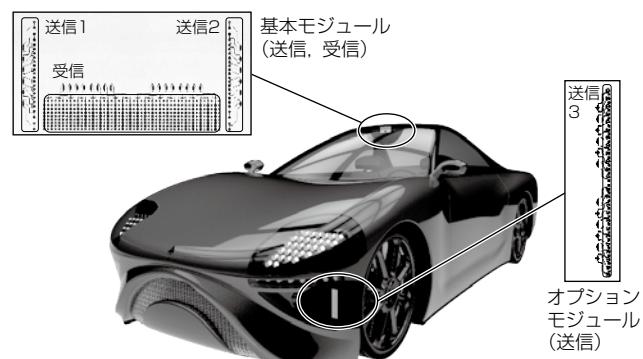


図1. モジュール搭載のイメージ

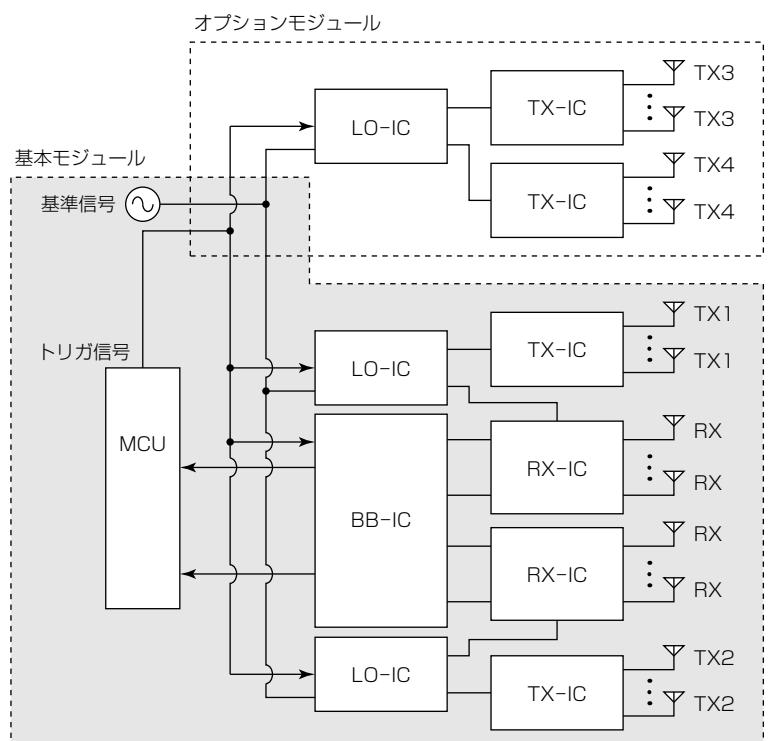


図2 ミリ波レーダモジュールのブロック図

である。RF CMOS ICには発振、増幅、周波数変換等の送受信回路の主要構成要素に加え、最新のレーダ技術に必要な回路も集積している。

2.2 アンテナ

アンテナには薄型化、低コスト化が可能な平面アンテナを採用した(図3)。基本モジュールでは、受信チャネルを水平方向に配置し、目標物の水平角の測角を行う。これに加え、送信チャネルを垂直方向に配置して最新のレーダ技術によって垂直角の測角を行う。また、送信チャネルを左右に配置して仮想的に水平方向の開口を拡大し、水平方向の分解能を向上させる。オプションモジュールには縦方向の開口を拡大したアンテナを採用する。これによって垂直方向の分解能を向上させる。

図4に基本モジュールのアンテナの放射パターンを示す。見込みどおりの方向にビーム形成ができることを確認した。

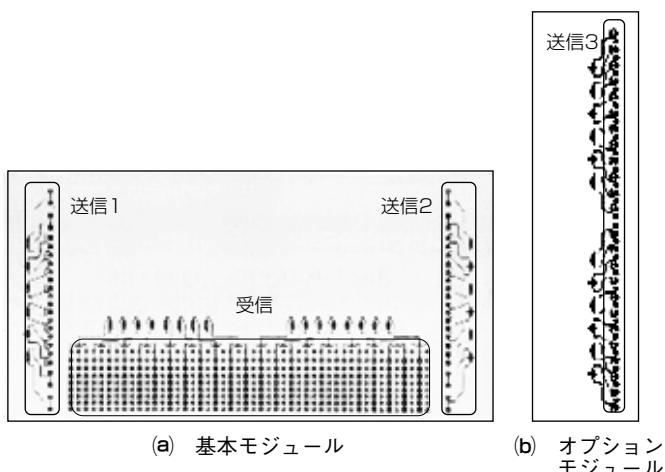


図3. アンテナ

2.3 ミリ波RF CMOS IC

3品種からなるRF CMOS ICのうち、TX-ICのチップ写真を図5に示す。TX-ICは図2のLO-ICで生成した周波数変調信号を入力・分配した後、各チャネルの位相を制御後、送信信号を出力する。これによって所望の垂直方向に送信ビームを向けることが可能になる。このビームを制御する移相器は、動作周波数帯で、6bit相当の分解能を実現している。また、水平面測角時に等価的に受信チャネル数を増加させるため、図3の送信1、送信2のそれぞれに対応する二つのTX-ICが周波数変調周期ごとにON/OFFを切り替えて送信する機能を持っている。

2.4 フィールド試験結果

試作ミリ波レーダモジュールを試験車両のフロントガラス付近に取り付け、目標物としてコーナーリフレクタ(反

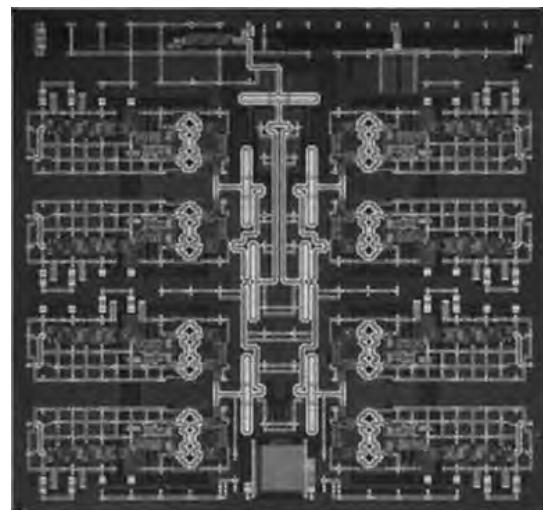


図5. RF CMOS IC (TX-IC) のチップ写真

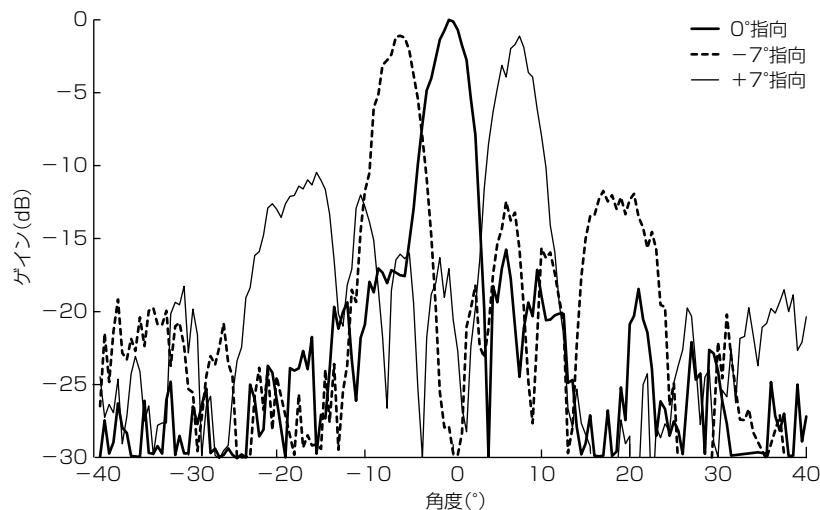


図4. アンテナの放射パターン(基本モジュール、垂直面)

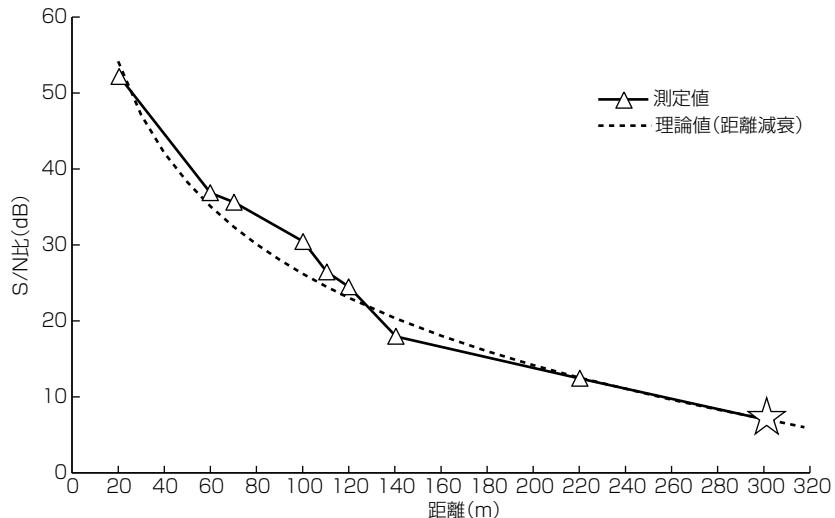


図6. 検知距離性能の評価結果

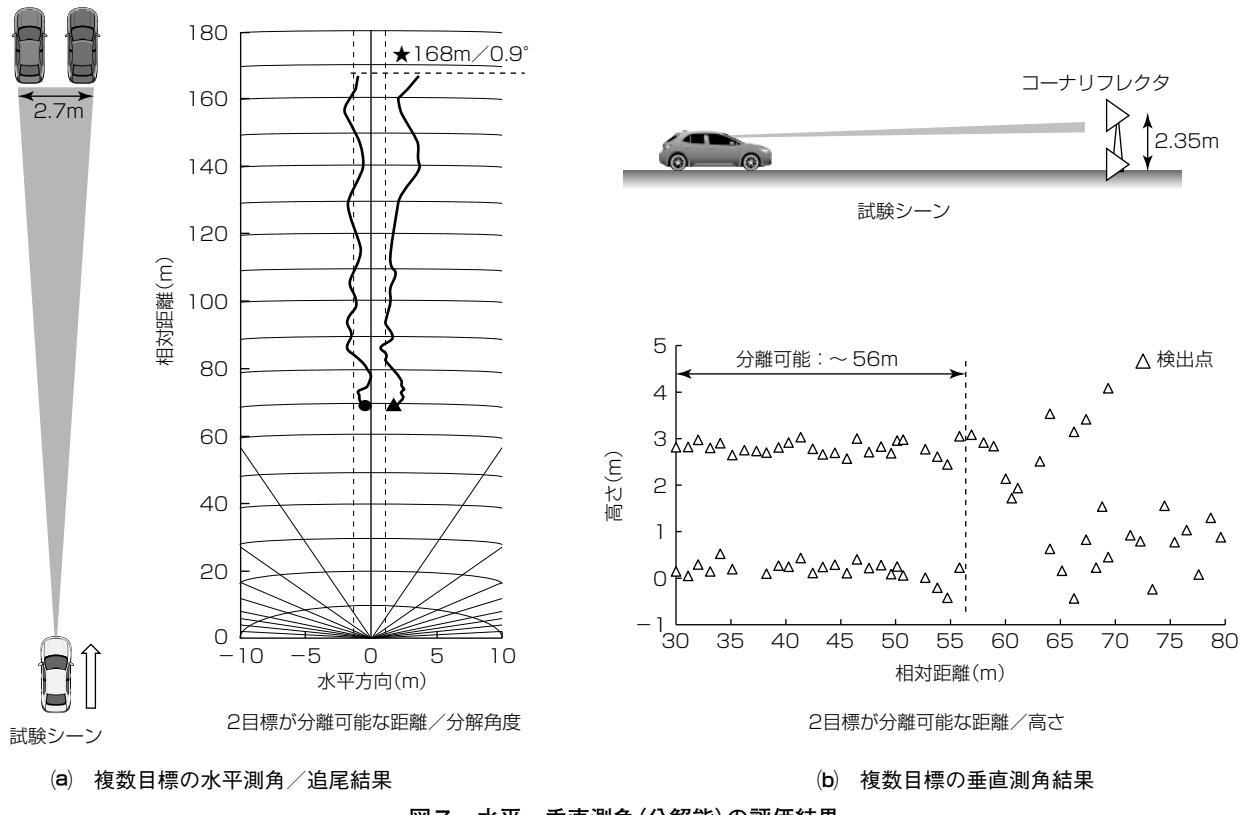


図7. 水平・垂直測角(分解能)の評価結果

射断面積が乗用車相当の約15dBsm)と乗用車を用いて検知性能を確認した。図6はコーナーリフレクタを300m離れた位置から見たもので、7 dB以上のS/N比(Signal to Noise ratio)が得られている。また、図7は2台接近して駐車している乗用車、又は2個の異なる高さに設置したコーナーリフレクタを目標物として、レーダを搭載した試験車両を接近させた例で、水平・垂直共に、複数目標に対して、高い分解能及び従来製品にはなかった垂直方向の測角が可能であることを確認した。

3. むすび

自動運転用高性能ミリ波レーダモジュールの構成、アンテナ特性、RF CMOS ICの回路構成や特性について述べ、フィールド試験結果について述べた。今後はモジュール製作とフィールド試験を重ね、ブレッシュアップを図る計画である。

短波監視施設(DEURAS-H)

Detect Unlicensed Radio Stations – HF Direction Finder

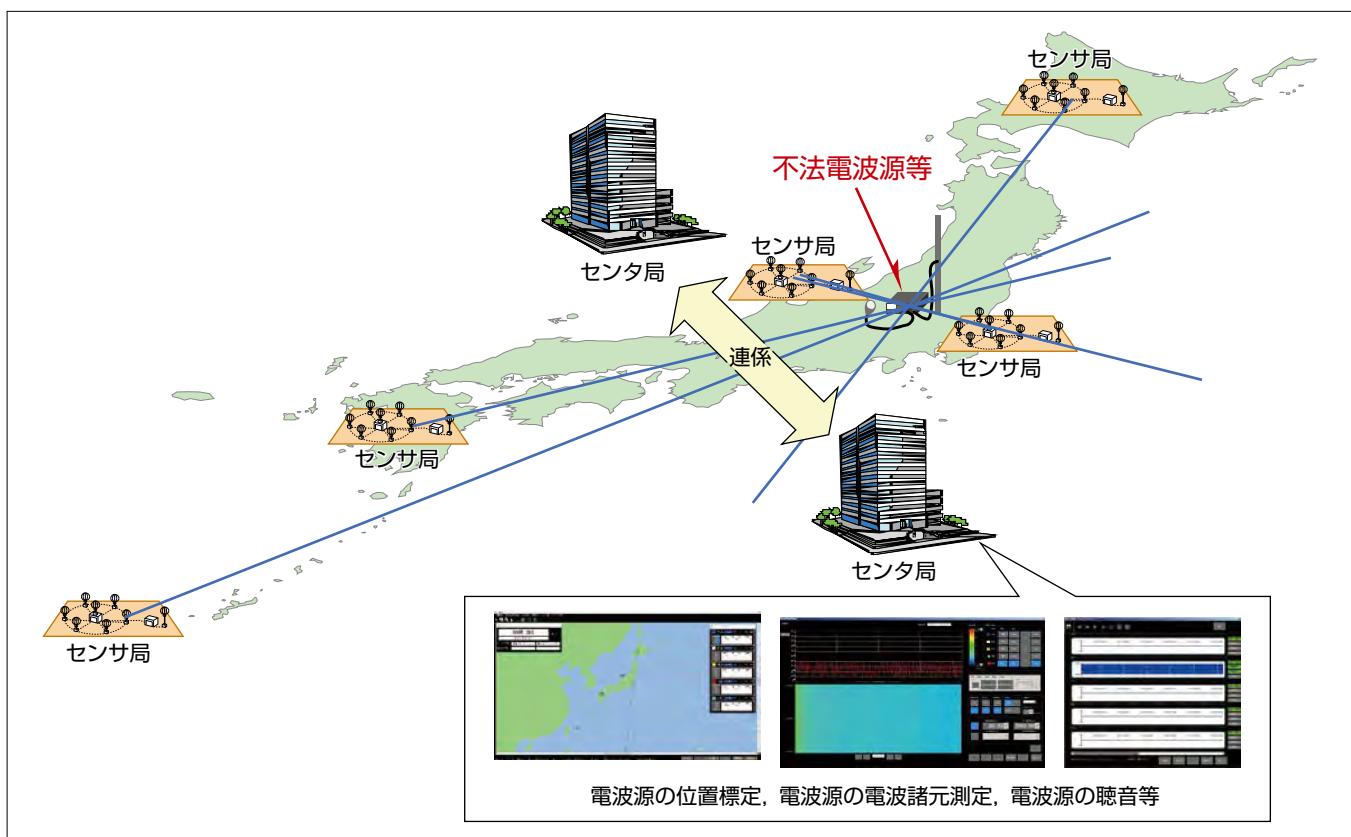
要旨

IoT(Internet of Things)化等、社会の情報化はますます進展する一方であり、情報化社会で電波を用いた無線通信の役割は非常に大きく、我々の生活に欠かせない存在となっている。無線通信の役割が高まるほど、安定した無線通信の享受が必要不可欠となる一方で、無線通信は空間を介する特徴を持つため、異なる無線通信間で相互に干渉する場合や意図的に無線通信に対する妨害が行われると、無線通信のサービスを安定して享受できないという問題が発生する。

このような問題を排除し、国内での安定した電波利用環境を実現するため、総務省では電波利用環境保護行政の一環で電波監視業務を執り行っている⁽¹⁾。電波監視業務を適切かつ効率的に行うために、総務省では電波監視業務に

活用する施設としてDEURAS(DETECT Unlicensed RAdio Stations)を保有しており、三菱電機ではAM(Amplitude Modulation)ラジオ等で用いられる低い周波数帯から、衛星通信で使用される高い周波数まで、幅広い周波数に対応する電波監視施設及び設備を納入している。

本項では、短波帯の電波監視を行うための施設である短波監視施設(DEURAS-H)について、概要やその特長について述べる。DEURAS-Hでは不法電波を発する電波源の位置の判別等が可能であり、このような電波発射を行う利用者へ電波発射の停止を促す勧告を行う等の電波監視業務を可能にしている。当社では電波監視施設及び設備を通じ、安心・安全な社会の実現に貢献している。



DEURAS-Hの概要

DEURAS-Hは、短波帯の電波の発射状況等を監視するための施設である。センサ局で不法電波源等から発せられる電波を収集・測定後、センタ局へWAN(Wide Area Network)回線経由で伝送する。センタ局では複数のセンサ局で収集した不法電波源等に対する到来方位の交点から不法電波源等の位置を特定する。センタ局はディザスター対応で物理的に離隔した場所に2局配備して安定した稼働を提供し、社会の安心・安全に貢献する。

1. まえがき

情報通信社会で、無線通信は我々の生活に欠かせない存在である一方で、情報化社会での無線通信の電波利用増大に伴い、不法電波等による電波干渉の問題が発生している⁽²⁾。無線通信を安心・安全に利用するためには、適正に無線通信が行われているか監視が必要であり、総務省では、これに対応するため、電波監視を行うDEURASを運用している。当社では総務省向けに電波監視に関連した施設及び設備を納入しており、これらについて述べる。

2. 当社が担当する電波監視施設及び設備

当社では、中波(Medium Frequency: MF)帯からマイクロ波(Super High Frequency: SHF)帯に至るまでの幅広い周波数帯の電波監視を実現する施設及び設備を納入している⁽³⁾。

2.1 短波監視施設(DEURAS-H)

DEURAS-Hは、300kHzから30MHzまでの船舶通信や国際通信等で使用される周波数帯の電波に対する干渉源や不法電波源を発見し、その位置特定を行う施設である。当社では、電波受信や各種信号の測定を行うセンサ局と、センサ局への制御や位置標定等を行うセンタ局双方について納入している。

2.2 遠隔方位測定設備(DEURAS-D)

DEURAS-Dは、25MHzから3.6GHzまでの消防無線、防災行政無線や携帯電話等で使用される周波数帯の電波に対する干渉源や不法電波源を発見し、その位置特定を行う設備である。当社では、電波受信を行うセンサ局について納入している。

2.3 宇宙電波監視施設(DEURAS-S)

DEURAS-Sは、静止軌道衛星を監視する静止衛星監視設備及び非静止軌道衛星を監視する非静止衛星監視設備で構成されている。静止衛星監視設備は、静止軌道衛星が発する1.5GHz帯から21GHz帯の電波の諸元や衛星の軌道位置が正しく運用されているかの確認や、静止軌道衛星を介した衛星通信への混信が発生した場合の電波源の位置特定を行う施設である。非静止衛星監視設備は、非静止軌道衛星が発する60MHzから10GHzまでの電波の諸元や衛星軌道位置が正しく運用されているかの確認等を行う。当社では、静止衛星監視設備及び非静止衛星監視設備共に納入している。

3. 短波監視施設(DEURAS-H)

3.1 構成

図1にDEURAS-Hの構成を示す。DEURAS-Hは国内5か所にセンサ局、2か所にセンタ局が設置されている。センサ局制御は、センタ局から行うほかに総務省総合通信局に設置されている端末(以下“端末”という。)からも可能であり、センタ局からの制御とは独立にセンサ局制御が可能である。

各センサ局では、センタ局から設定された諸元に基づき、電波の測定や、受信した電波の到来方位を算出し、受信信号のIQ(In-phase and Quadrature)データや到来方位の計算結果をWAN回線経由でセンタ局へ伝送する。

センタ局では、センサ局に対する制御権の管理及び割当てや、センサ局へ測定諸元等を設定する役割を果たす。また、センサ局から送達されて受信した電波の各種情報を分析する役割も果たす。

3.2 機能

DEURAS-Hでは、主に、到来電波の諸元を測定する電波諸元測定機能、到来電波の方位測定機能、位置標定機能及び到来電波の中身を確認する聴音機能を持つ。これら主要機能に加え、24時間絶え間ない電波の監視を可能にする予約測定機能や、一度分析した結果の分析条件を変更して後から再生分析を可能にする機能を持つ。

3.2.1 電波諸元測定機能

電波諸元測定機能はセンサ局が持つ機能であり、電波の諸元分析等を行う。図2に電波諸元測定機能の画面を示す。周波数スペクトルや時系列の電波受信状況を表すウォーターフォールでの電波の現出状況の確認が行える。センタ局では5局のセンサ局で受信した周波数スペクトルを重畠表示させて分析することも可能である。センサ局では、複数の

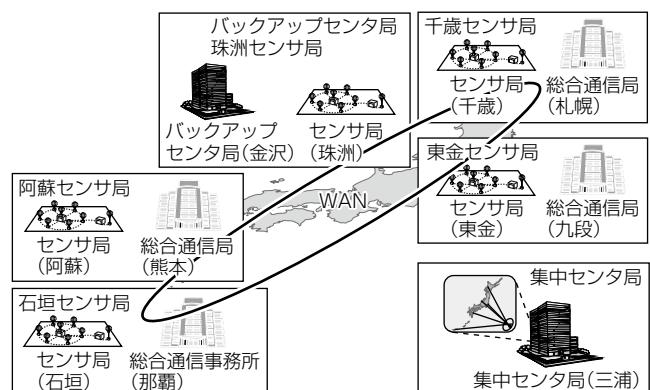


図1. DEURAS-Hの構成

制御を同時に受けて個別に測定することが可能である。この際、制御元の数が少なければ電波諸元測定機能の画面の更新周期を早くする等、ユーザー操作に流動的に対応する工夫を行っている。

3.2.2 方位測定機能

方位測定機能はセンサ局が持つ機能であり、位相差を用いた方位測定の一つであるMUSIC(MULTiple SIgnal Classification)アルゴリズムを用いた方位測定を行う。図3に位相差を用いた方位測定の原理を示す。DEURAS-Hでは7素子の空中線で構成されるが、ここでは簡単化のために2素子の場合で述べる。図3(a)に示すとおり、素子間距離Dだけ異なる位置に空中線素子が位置する場合、到来方位 θ からの電波に対しては $D \times \sin \theta$ の経路差が生じる。このため、図3(b)に示すとおり、素子位置の違いから受信波形でも位相差 δ が生じることになる。ここで、到来波の波長を λ とすると、位相差 δ は距離換算で $\lambda \times (\delta / 360)$ となる。この距離は図3(a)で述べた経路差と等価であることから、 $D \times \sin \theta = \lambda \times (\delta / 360)$ となり、入射角は $\theta = \arcsin(\lambda \times (\delta / 360) / D)$ から求まる。MUSICアルゴリズムは、この位相差を用いた方位測定の原理を応用したものであり、複数の素子で構成されるアレー空中線で受信した信号成分から相関行列を生成し、信号成分と雑音成分から固有値分解し、信号成分と雑音成分の独立性を利用した信号成分の方位探査によって到来方位を測定している。

3.2.3 位置標定機能

位置標定機能はセンタ局が持つ機能であり、位置が既知



図2. 電波諸元測定機能の画面

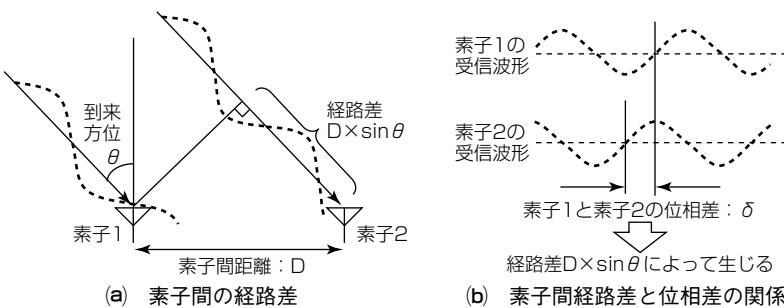


図3. 到来電波に対する方位測定の原理

なセンサ局とそのセンサ局で算出した電波源の到来方位線を用いて電波源の位置を計算する。図4に電波源に対する位置標定の原理を示す。センサ局の位置が既知であれば、複数のセンサ局で同一時刻に同じ諸元での受信信号に対して算出した到来方位線を交差させることで電波源の位置が計算される。位置標定の原理上、電波源の位置標定の精度は各センサ局からの到来方位線の直交度が高いほど、向上する。これは、実環境上では位置標定対象以外の電波の受信や、空間ノイズの影響等が生じるためである。一定の測定誤差が生じた状況での到来方位を測定すると、各センサ局で算出した到来方位にも一定の誤差が生じることになり、到来方位線の直交度が低い場合、微小な誤差でも到来方位線の交差位置が大きくずれることになるためである。このため、DEURAS-Hでは位置標定の精度向上を図るため、国内にセンサ局を北から南まで広域に配置している。

図5に電波源の位置標定機能の画面を示す。位置標定機能の画面では、測定対象の周波数や測定センサ局での受信レベル、到来方位等を一目で分かるように表示するとともに、各センサ局での到来方位や位置標定結果を地図上に表示する。各端末からは時分割で制御を行うことで、5局のセンサ局に対してほぼリアルタイムに制御及び取得データの更新が可能である。

3.2.4 聽音機能

聴音機能はセンサ局及びセンタ局が持つ機能であり、セ

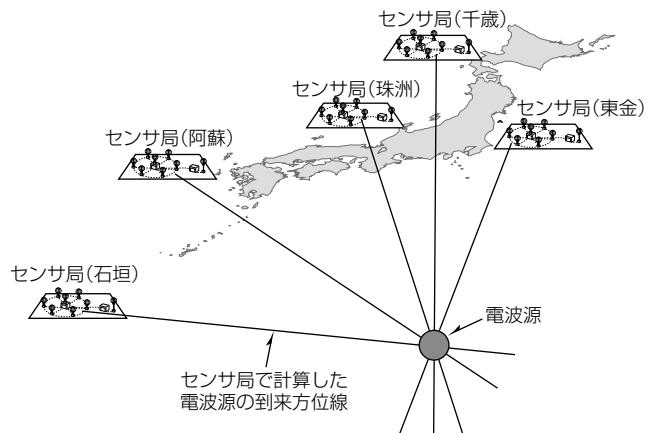


図4. 電波源に対する位置標定の原理



図5. 位置標定機能の画面

ンサ局で受信した信号をセンタ局で復調する。複数のセンサ局で受信した電波の同一性を判断するに当たり、周波数や帯域幅等の電波諸元での確認も可能であるが、放送波等が収集対象となる場合、運用者の聴音による確認が有効となる。このため、センサ局では同時に複数の制御を可能にしており、センタ局からは任意の2局のセンサ局を選択し、同時に聴音することが可能である。

図6に聴音機能の画面を示す。5局のセンサ局のそれぞれの音声情報をビジュアル的にも視認することができる、予約測定等で取得したデータの確認の際に有効となる。

3.3 分析能力向上

2015年度以降に更新を行った新規施設では、センサ局で取得した情報をIQデータ形式でセンタ局へ直接伝送する方式としている。従来は、センサ局で取得した電波はセンサ局で復調してWAV(Waveform Audio Format)形式でセンタ局へ伝送していた。このため、後から異なる諸元で分析したい場合等に対応ができないという課題があった。更新後は、センサ局で取得した電波はIQデータ形式でセンタ局へ直接伝送しており、例えば、AM波の復調の中心周波数を少しずらす、復調方式を変更する等を可能にして分析能力向上を行っている。また、方位測定についても諸元変更して再度分析することが可能である。

3.4 災害時のセンタ局バックアップ

電波監視は、安心・安全で豊かな社会を提供する上で、非常に重要な業務であり、DEURAS-Hではセンタ局が被災した際でも継続的な運用を提供できるようにバックアップ機能を持つ。

図7にバックアップ機能を示す。この図では札幌に設置した端末から石垣に設置したセンサ局を制御する場合を例示している。図7(a)に示すとおり、平常時では端末からは集中センタ局を介し、センサ局の制御やセンサ局で収集し



図6. 聽音機能の画面

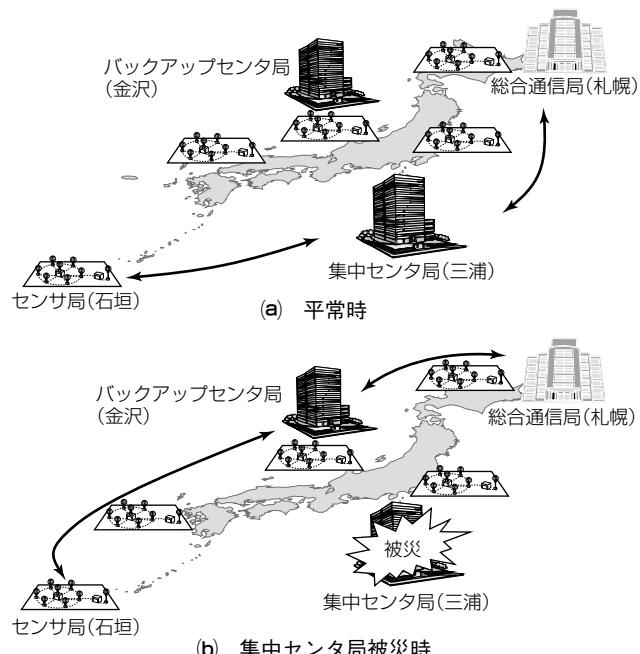


図7. バックアップ機能

たデータの確認を行う。一方で、集中センタ局が地震等に被災した場合は、図7(b)に示すとおり、集中センタ局から離隔した遠隔地に設置するバックアップセンタ局にセンタ局機能が自動的に切り替わる。このため、端末からセンサ局の制御等を行う場合は、バックアップセンタ局を介することになる。バックアップセンタ局では、平常時からDEURAS-H施設の死活を確認しており、集中センタ局の応答が一定時間になると運用者に意識させることなく自動的にセンタ局機能が変更される。

4. む す び

電波監視を行う短波監視施設(DEURAS-H)について述べた。電波監視は、安心・安全な社会を実現する上で欠かせない業務であり、DEURAS-Hを始めとする各種電波監視施設及び設備はこの業務を支える重要なものである。通信技術の発達や周波数拡大等、世の中の技術進展に伴い、これに応じた監視施設も必要になるが、今後も当社では電波監視に関連する施設を世の中に提供して社会に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 総務省：総務省の電波監視
<https://www.tele.soumu.go.jp/adm/monitoring/summary/general/index.htm>
- (2) 総務省：不法無線局等の出現数・措置数
https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/monitoring/summary/ad_pro/index.htm
- (3) 総務省：電波監視施設の整備
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/monitoring/moni/index.htm>

飛行中の無人航空機への無線送電技術

Wireless Power Transmission Technology for Unmanned Aerial Vehicles in Flight

本間幸洋*
Yukihiro Homma
西原 淳†
Jun Nishihara
片瀬徹也†
Tetsuya Katase

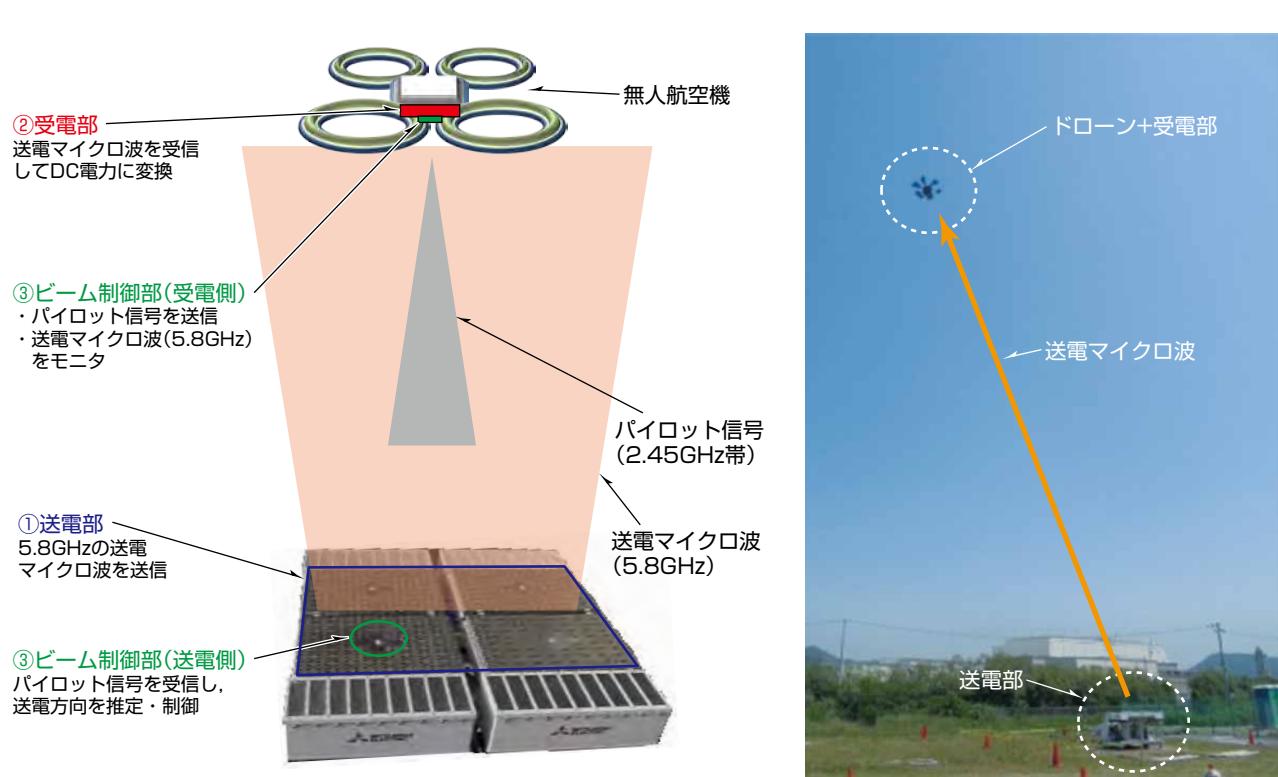
要 旨

近年、ドローンを含む無人航空機の活用の場は目覚ましい速さで拡大している。特に、高性能なGPS(Global Positioning System)による位置検出機能や、無線通信技術と組み合わせた自動航行技術の実用化が始まったことによって、産業界では、ドローンを輸送・物流や各種インフラ設備の巡視・点検など、種々の用途での活用が活発に議論されている。一方、ドローンは飛行可能な時間が短く(一般的には數十分程度)、活用の場を広げるためには、必要な電力をどう確保するかが大きな課題となっている。三菱電機は、このようなドローンを含む無人航空機に対して電力を供給する新しい手段として、マイクロ波を用いた無線送電技術を提案し、実用化に向けた研究開発を推進している。

2019年5月には、宇宙太陽光発電の研究開発の一環と

して、経済産業省と一般財団法人 宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)等と共同で、ドローンを用いた無線送電実験を行い、上空にホバリングするドローンに対して、完全な自動制御による無線送電技術の実証に成功している。

また、より実用的な飛行中のドローンへの長距離無線給電の実用化に向け、2019年11月から内閣府が推進する戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期に参画し、送電装置と受電装置の大電力化やドローン搭載機器の軽量化などの要素技術の開発や、実証試験機の開発に取り組んでいる。



無人航空機へのマイクロ波無線送電の概念図(左図)と屋外でのドローンを用いたマイクロ波無線送電実験風景(右図)

2019年5月に、屋外でドローンを用いたマイクロ波無線送電実験を実施した(右図)。屋外実験では、地上に4台の送電装置で構成する送電部を設置し、ドローンに受電部や送電マイクロ波をモニタするアンテナ等を搭載し、自動制御で送電マイクロ波ビームを形成して所望の方向に電力を無線伝送することに成功した。高度19mで105W、高度30mで42Wの電力をドローン側で受電できた。

1. まえがき

近年、ドローンを含む無人航空機の活用の場は目覚ましい速さで拡大している。特に、高性能なGPSによる位置検出機能や、無線通信技術と組み合わせた自動航行技術の実用化が始まったことによって、産業界では、ドローンを輸送・物流や各種インフラ設備の巡視・点検など、種々の用途での活用が活発に議論されている。一方、ドローンは飛行可能な時間が短く(一般的には数十分程度)、活用の場を広げるためには、必要な電力をどう確保するかが大きな課題となっている。当社は、このような無人航空機や各種移動体、IoT(Internet of Things)機器など、様々な機器に対して電力を供給する新しい手段として、マイクロ波を用いた無線送電技術を用いることを提案し、実用化に向けた研究開発を行っている。

本稿では、これらの研究開発での飛行中の無人航空機への無線送電技術の研究開発の状況と、課題、今後の開発計画について述べる。

2. マイクロ波を用いた無線電力伝送の原理

図1にマイクロ波を用いた無線送電の原理概念図を示す。図1(a)は原理概念図、図1(b)は回路イメージ図である。送

電装置は、RF(Radio Frequency)発振器で生成された微弱なマイクロ波を直流電力を用いて增幅し、送電アンテナを用いて空間に照射する。受電装置は、照射されたマイクロ波を受電アンテナで受信し、整流回路で整流して直流電力として取り出し、この電力を機器に供給する。このように、マイクロ波を電力の輸送媒体として使うことによって、遠方に無線で電力を送電できる。

3. 宇宙太陽光発電の研究開発での飛翔(ひしょう)体を用いた無線送電実験⁽¹⁾

3.1 宇宙太陽光発電の研究開発での取組み

当社は、2000年ごろから、宇宙太陽光発電の研究開発に参画し、マイクロ波を用いた無線電力伝送技術の研究開発を推進している⁽²⁾。宇宙太陽光発電は宇宙空間で太陽電池を用いて発電した電力を、マイクロ波に変換して地上に送電するシステムである。大型発電所に相当する百万kW級の発電を想定しており、再生可能エネルギーを利用した天候や昼夜に左右されない、クリーンで安定した発電システムの実現を目指している⁽³⁾。

近年では、2009~2014年度に経済産業省とJ-spacesystemsや、JAXAが行った“マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発”に参画し、屋外に設置した半導体増幅回路を用いた送電装置から、水平方向に約55m離れた

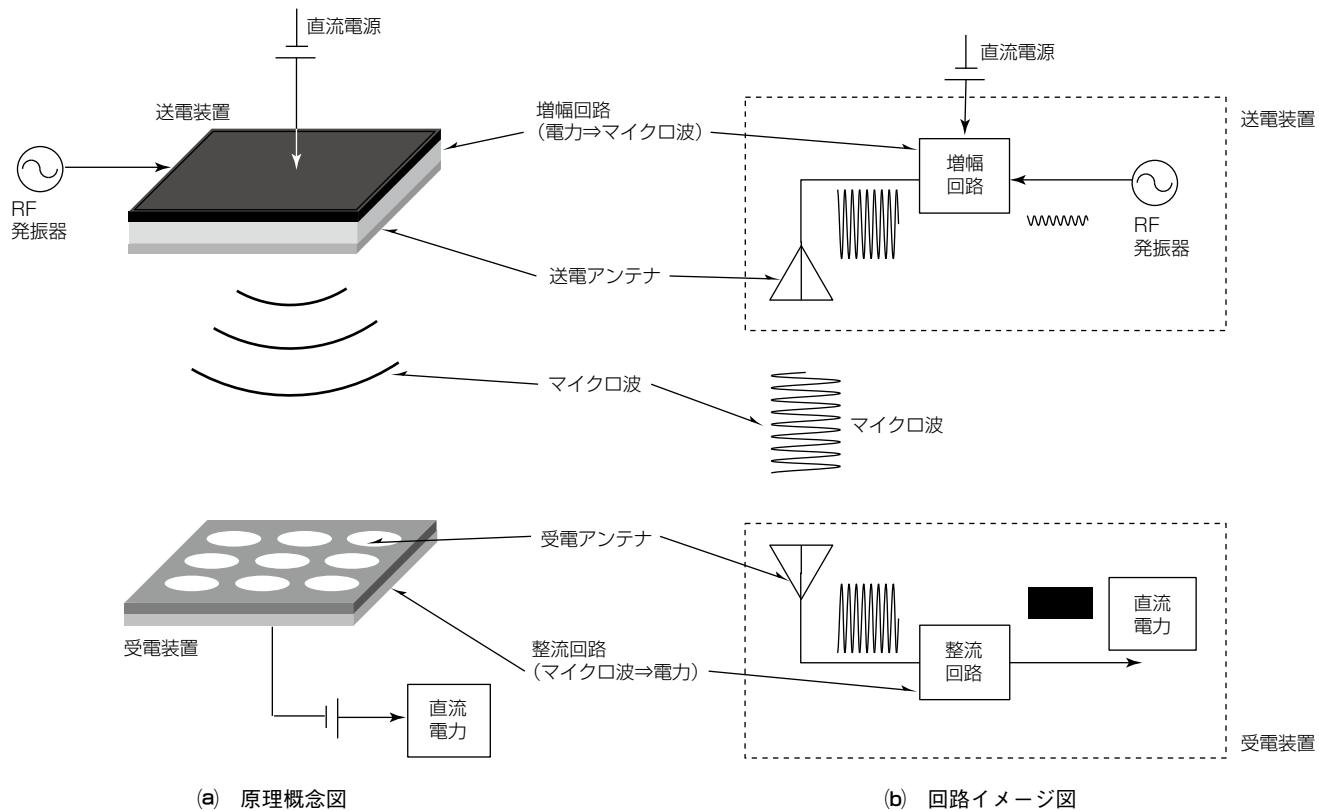


図1. マイクロ波による無線送電

受電装置に約340Wを送電する実証実験に成功している⁽³⁾。この実証実験では、将来の大規模な宇宙太陽光発電システムの送電装置を想定し、複数の送電装置を用いて精密に送電マイクロ波ビームを制御・合成して受電装置に効率よく送電する技術の実証実験を行い、この技術の有用性を実証している⁽⁴⁾。

一方、宇宙太陽光発電の実現に向けては、送電装置等の更なる高効率化や、完全な自動制御による送電マイクロ波ビームの制御などの課題が残っている。これらの課題を解決するため、経済産業省とJ-spacesystems、JAXAは、2016～2019年度には、更なる高効率化の研究開発や屋外でのドローンを用いた垂直方向への無線送電の実証実験⁽¹⁾を行っており、当社も試験装置開発や実証実験担当者として参画している。3章ではこの研究成果について述べる。

3.2 マイクロ波送電装置の高効率化の開発

マイクロ波送電装置を高効率化するために、送電装置に用いる半導体デバイス(GaN High Power Amplifier: GaN HPA)の高効率化開発を行い、その素子製造技術を用いて、DC電力をRF(マイクロ波)に変換する最終段半導体増幅器の高効率化・量産化の開発を行った。また、開発した高効率最終段増幅器を、2014年度に開発した送電装置の一部(19サブアレー)に搭載・換装し、垂直方向の無線送電実験の実証機として使用した。

半導体デバイスは、当社で近年導入された微細加工技術を用い、HPAに用いるGaN(窒化ガリウム)トランジスタのゲート長を0.15mmまで短縮することで、ドレイン効率の向上と高利得化を実現した。それによって電力負荷効率(Power Added Efficiency: PAE)は77.7%、出力は8.4Wとなる高効率半導体デバイスの開発に成功した⁽⁵⁾。

次に、この送電用の高効率半導体デバイスの設計・製造

技術を活用して、性能・品質の安定した量産用半導体デバイスを製造し、このデバイスを用いて高効率最終段増幅器を開発した。図2に製造した量産用高効率半導体デバイスのPAEを示す。30台のデバイスを製造し、PAEは平均69.5%を達成している。最終段増幅器ではこのデバイスの性能を最大限に引き出すために、インピーダンスを5.8GHzに最適化したバイアス回路を設計・開発した。その結果、送電装置として、44.8%のDC-RF変換効率を達成した(2014年の実績は35.1%)。

3.3 無人航空機を用いた無線送電での送電マイクロ波ビームの制御技術の検討

宇宙太陽光発電のような大規模・大電力のマイクロ波を用いた無線送電を目指す場合、できるだけ効率よく電力を送電するためには、複数の送電装置から照射された電力を空間で合成し、送電マイクロ波ビームを形成する技術の確立が必要になる。この研究では、このようなマイクロ波ビームの形成及び送電方向の制御を、自動制御で実現する方法について検討・開発を行い、無人航空機を利用して実証試験を実施した。

図3に無人航空機への無線送電の概念図を示す。送電部は複数の送電装置で構成されており、受電部を搭載した無人航空機が移動した場合、移動した受電部の位置・方向に送電マイクロ波ビームを形成する必要がある。このためには、各送電装置から見た、

- (1) 送電方向: $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n$
 - (2) 基準となる送電装置との位相差(経路長差): $L_1 - L_n$
- の二つを自動で検出・補正することによって、複数の送電方向(受電部の方向)に送電マイクロ波ビームを形成し、送電することが可能になる。今回、これらの補正值の検出には振幅モノパルス法とREV(Rotating Element electric

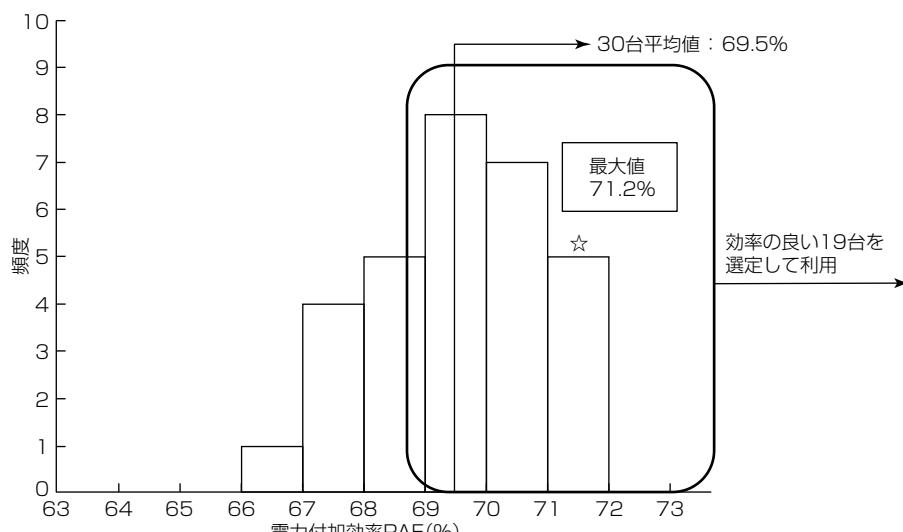


図2. 量産用高効率半導体デバイスのPAE

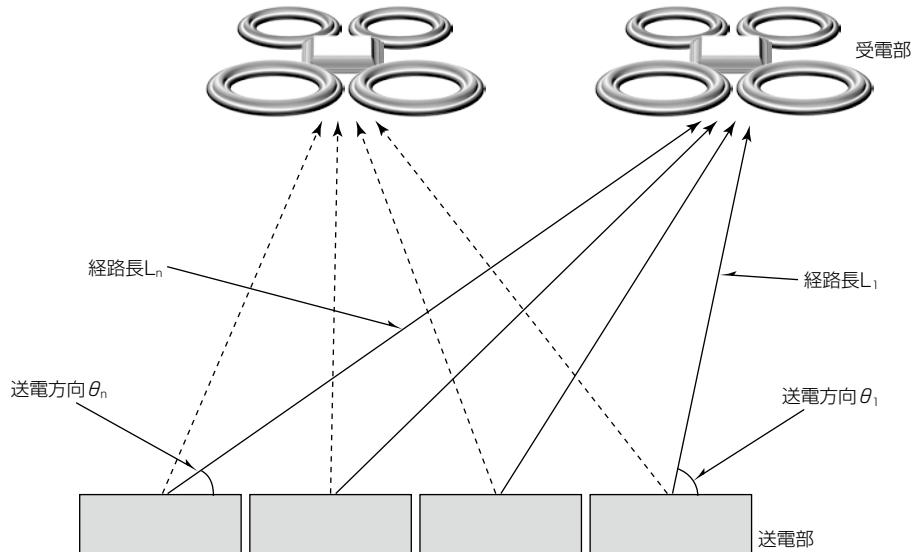


図3. 無人航空機への無線送電の概念図

field Vector)法の技術⁽⁴⁾を用いたドローンへの送電を想定したビーム方向制御部の開発を行った。

3.4 屋外での実証試験結果

送電マイクロ波の自動形成・制御、及び垂直方向の無線送電の実証試験は、要旨の図に示した試験コンフィギュレーションで、屋外で実施した。地上に4台の送電装置で構成される送電部を設置し、ドローンに受電部や送電マイクロ波をモニタするアンテナ等のビーム制御部(受電側)を搭載し、送電部にビーム方向を検知するアンテナ等のビーム制御部(送電側)を設置した。

送電部は、電子的に送電マイクロ波の送信方向を変えることが可能なアクティブフェーズドアレー方式の送電装置で構成されており、GaNデバイスを用いた高効率最終段増幅器で電力をマイクロ波(5.8GHz)に変換し、アンテナから放射する。ここで用いた送電装置の一部(19サブアレー)は3.2節で述べた高効率最終段増幅器を搭載し、高効率化の技術検証を行った。受電部はドローンに搭載され、上空でマイクロ波を受信して直流電力に変換する。

送電マイクロ波ビームの形成・制御は、3.3節で述べた技術を用いている。受電部側から送信したパイロット信号(2.45GHz)を送電部側で受信し、振幅モノパルス法を用いて送信方向 θ_n を推定する。また、受電側で送電マイクロ波をモニタし、REV法を用いて位相差(経路長差) $L_1 - L_n$ を検知している。これらの補正值を、アクティブフェーズドアレーの各アンテナ素子の位相制御機能を用いて補正する。

これらの方法で、ある場所にホバリングするドローンに対して送電し、高度19mで105W、高度30mで42Wの電

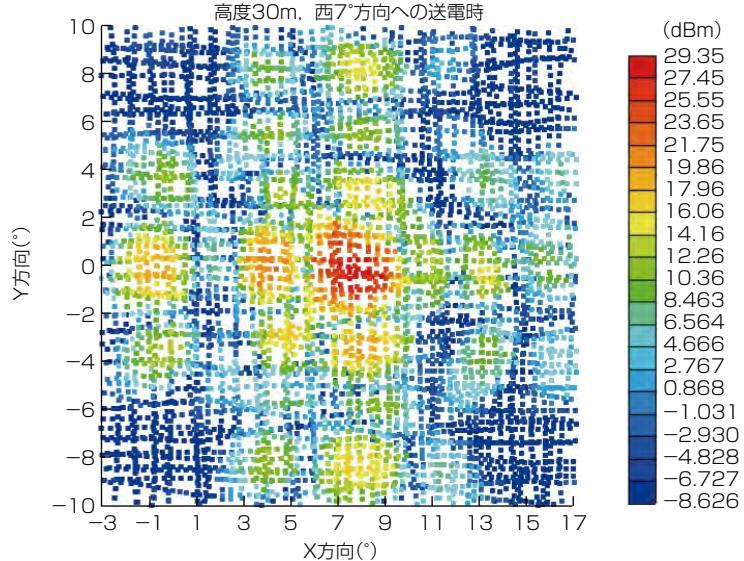


図4. 送電マイクロ波ビームの二次元パターンの測定結果例

力を受電することに成功している。また、送電マイクロ波ビームを形成した後に、マイクロ波ビームの電力強度を測定するモニタアンテナを搭載したドローンを飛行させてスキャンすることによって、送電マイクロ波の二次元のビームパターンの測定を行った。図4に測定した送電マイクロ波ビームの二次元パターンの一例を示す。ビーム形成制御時のドローンの飛行位置の揺動などによってビーム形成の誤差が生じ、非対称性等が見受けられるが、送電で重要なメインビーム(中心の赤色の電力の強い部分)のビーム幅は計算値と一致する2°程度に形成されており、おおむね良好なビーム形成が行われていることが分かる。これらの試験・検証結果によって、完全な自動制御によるマイクロ波ビームの形成・制御技術、及び垂直方向の無線送電技術が実証された⁽¹⁾。

4. 無人航空機への無線送電の実用化に向けた課題と今後の研究開発の取組み

3章で示した実証試験の結果から、マイクロ波を用いた無線送電技術を無人航空機に適用することの技術的な可能性は十分に示されているが、実際に実用化するに当たっては、まだ受電できる電力が小さいことや航空機に搭載する機器の軽量化、究極的な運用方法としての移動する無人航空機への追尾送電制御技術が確立されていない、などの課題がある。表1に、飛行中の無人航空機へのマイクロ波無線送電技術の適用での課題を示す。

大電力を受電するために、送電部は、単位面積当たりの出力を向上させ、大電力の送電を可能にする必要がある。また、より長距離・大電力の送電を行う場合は、送電装置を複数配置し、大開口径の送電アンテナから送電し、空間で大電力・狭ビームの送電マイクロ波ビームを形成する必要があるが、これを可能にするために拡張性のある送電装置の開発が必要となる。

受電部は、大電力が入力した際に高効率に直流電力に整流が可能な、高耐電力・高効率受電回路の開発が必要になる。また、無人航空機の飛行時間やペイロードを確保するために、できるだけ軽量な受電装置の開発が必要になる。さらに、飛行・移動中の無人航空機に対して給電するためには、高速に受電部の方向や位相差を探知して制御する追尾送電制御技術の開発が必要になる。

これらの技術開発に加え、産業利用を促進するためには、ビジネスモデルの構築と業界機運の醸成、及び利用可能な周波数の調整と規格・標準化活動を推進する必要がある。

これらの課題に対して、当社は、2019年度から内閣府

表1. 無人航空機へのマイクロ波送電技術の適用での課題

項目	課題と研究開発方針案等
送電部	大電力化：送電アンテナの単位面積当たりの出力向上、大開口径化・スケーラビリティ
受電部	大電力化：高耐電力・高効率受電回路(整流回路)の開発 軽量化：超軽量受電部の開発
ビーム制御部	追尾送電制御技術：移動する受電部の方向・位相差の探知と高速制御技術の開発
その他	ビジネスモデルの構築、業界機運の醸成 利用可能な周波数の調整、規格・標準化活動

が推進する戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期⁽⁶⁾に参画し、無人航空機活用のユーザーや大学研究機関、無人航空機メーカーと共同で研究開発を始めている。

このプロジェクトでは2022年度まで要素技術開発と実証試験機の開発を進め、2023年度には実用化を想定したドローンへの無線給電の実証試験を行うことを予定している。

5. む す び

マイクロ波を用いた無線送電技術は、遠方に無線で電力を送電できる特長があり、移動する機器に対して追尾して送電できるポテンシャルもある。飛行中の無人航空機(ドローンなど)へ無線給電を実用化するためには大電力化などの課題があるが、この技術が実用化されれば、着陸して充電やバッテリー交換を行う必要がないため、ドローンの運用効率を飛躍的に拡大することが可能になる。また、この技術は、例えば移動するロボットや走行中の電気自動車など、他の用途への応用の可能性も秘めている。当社は引き続き、無線送電技術の実用化に向けた研究開発を推進し、宇宙から産業機器までの幅広い分野での送電技術の革新を目指していく。

3章の研究成果は、J-spacesystemsが経済産業省から受託した「太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発」、及びJAXAの「ドローンによるマイクロ波パターン測定の精度確認試験」の研究の一環として行われた。

参 考 文 献

- (1) Mihara, S., et al. : Current Status of the SSPS Development and the Result of Ground to Air Microwave Power Transmission Experiment, IAC Proc., IAC-2019-C3.2.1 (2019)
- (2) Homma, Y., et al. : New Phased Array and Rectenna Array Systems for Microwave Power Transmission Research, IEEE IMWS-IWPT Proc., 59~62 (2011)
- (3) Mihara, S., et al. : Microwave Transmission Experiment on the Ground for the Future SSPS, ISTS Proc., 2015-q-04 (2015)
- (4) 本間幸洋, ほか: 宇宙太陽光発電マイクロ波電力伝送技術, 三菱電機技報, 90, No.2, 127~130 (2016)
- (5) 山中宏治, ほか: マイクロ波送電実用化に向けた5.8GHz帯高効率GaN増幅器, 電子情報通信学会技術研究報告, 117, No.244, MW2017-99, 117~122 (2017)
- (6) 国立研究開発法人 科学技術振興機構ホームページ：戦略的イノベーション創造プログラム
<https://www.jst.go.jp/sip/p08/index.html>

宇宙用大容量 リチウムイオンバッテリー

Large Capacity Lithium Ion Battery for Space Use

岡 寿久*

Toshihisa Oka

大迫庸介*

Yosuke Osako

丸谷健太郎*

Kentaro Marutani

濱田慎太郎*

Shintaro Hamada

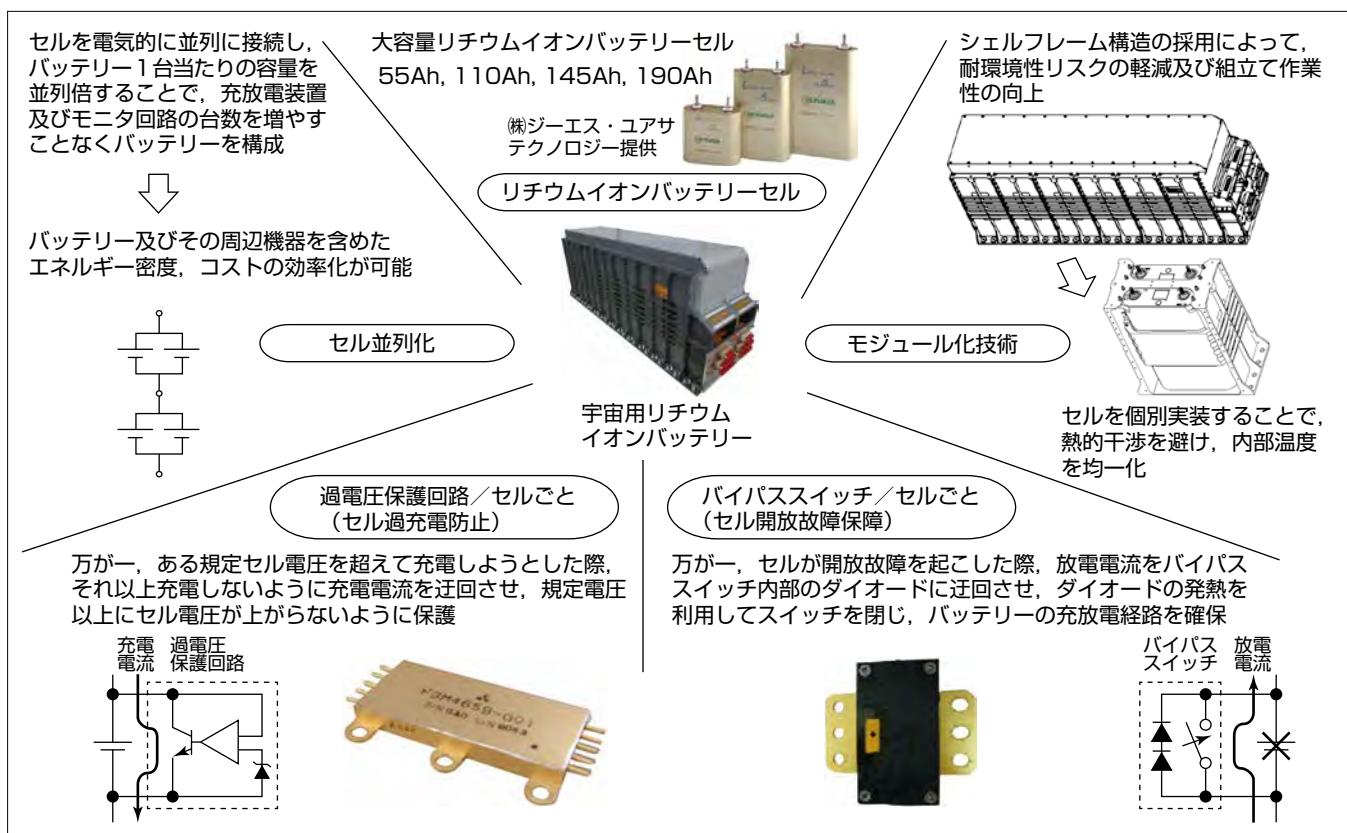
要旨

宇宙用電源機器のキーデバイスであるバッテリーの小型・軽量化及び高機能化は人工衛星(以下“衛星”という)。全体の小型・軽量化を可能にする。携帯電話用や車載用バッテリーとして広く普及しているリチウムイオンバッテリー(Lithium Ion Battery: LIB)は、エネルギー密度が高く、放電電圧が高い充放電効率の良いバッテリーであり、衛星用バッテリーシステムにも多くのリチウムイオンバッテリーが使用されている。

三菱電機は継続的に宇宙用リチウムイオンバッテリーの開発・生産を行い、国内だけでなく世界中の衛星システムメーカーにリチウムイオンバッテリーを供給し、既に300台以上の軌道上運用実績を持っている。商用衛星市場で当社リチウムイオンバッテリーの世界シェアは約30%に達し

ており、新たに開発した次世代リチウムイオンバッテリーを中心に更なるシェア拡大を進めている。

近年は、衛星電力要求が増加傾向にあり、バッテリー大容量化のニーズに応える必要がある。バッテリーを宇宙用途に適用するため、ロケットによる厳しい打上げ環境への機械耐性を持ったバッテリーの開発及び様々な電力・容量帯に対応できるようにセル並列化による拡張性の検討・開発を行った。リチウムイオンバッテリーセルのラインアップ及びその並列化、保護回路による拡張性と耐機械環境を持ち、宇宙用途での長期間の運用(静止軌道衛星: 15年以上、低軌道衛星: 5年以上)を満足する宇宙用リチウムイオンバッテリー構成を実現した。



宇宙用リチウムイオンバッテリーの基本構成

宇宙用リチウムイオンバッテリーを構成する基本的な技術を示す。宇宙環境で使用される宇宙用リチウムイオンバッテリーは、単セルの大容量化だけでなくセル並列化による大容量化、ロケット及び宇宙環境に適合するバッテリーモジュールの耐環境性及び万が一の搭載部品の故障にも対応するための保護／保障機能を持っている。

1. まえがき

1990年代に市場に流通して以来リチウムイオンバッテリーセルは、携帯電話用や車載用バッテリーとして急速に普及している。衛星搭載用バッテリーでも、従来のNi-H₂(ニッケル水素)バッテリーセルから性能、信頼性、品質面で優位なリチウムイオンバッテリーセルを搭載したバッテリーが使用されている。

当社は、2001年以降継続的にMaxar Technologies社(旧SPACE SYSTEMS/LORAL)に納入し、2005年の同社向けiStar衛星搭載用リチウムイオンバッテリー納入を機にフライテ実績が認められた。またTHALES ALENIA SPACE社、INDIAN SPACE RESEARCH ORGANISATION等の衛星システムメーカーにも多くのリチウムイオンバッテリーを供給し、現在までに300台以上の軌道上実績を持っている。海外商用衛星市場で当社リチウムイオンバッテリーのシェアは約30%であり、新たに開発した次世代リチウムイオンバッテリーを中心に更なる拡販を行っている。

本稿では、これらの製品に適用した技術と最近の開発成果について述べる。

2. 宇宙用リチウムイオンバッテリー

2.1 特長

衛星に必要な電力は、太陽光が衛星を照らす日照期間では太陽電池から供給しているが、衛星が地球や惑星等の陰に入った日陰期間ではバッテリーから供給している。宇宙用リチウムイオンバッテリーは、ロケットでの打上げ時に想定される過酷な振動及びロケットから衛星を切り離す際に起こる衝撃、真空・放射線環境、排熱等を十分考慮する必要がある。

リチウムイオンバッテリーは、2009年の電気自動車(Electric Vehicle: EV)発売や、スマートグリッドなど、国策を背景として急成長を見せており。これら地上用とは異なる宇宙用に特に必要な機能としては、

- (1) 充放電サイクルに強い(低軌道では数万サイクル)
 - (2) 長寿命(静止軌道衛星: 15年以上、低軌道衛星: 5年以上)
 - (3) 軽量でエネルギー密度が高い
 - (4) 衛星搭載性(熱的・機械的な特性)に優れること
- 等がある。

当社の宇宙用リチウムイオンバッテリーは、1998年から(株)ジーエス・ユアサテクノロジー(旧日本電池)と共同

開発を進め、海外衛星向けとして初めて2005年8月にMaxar Technologies社向けiStar衛星に搭載され、現在も正常に運用されている。この実績を皮切りにリチウムイオンバッテリーの搭載が拡大してきている。これまで一つの故障もなく正常に作動を続けており、高い信頼性を裏付けている。

リチウムイオンバッテリーセルには正極にLiCoO₂(コバルト酸リチウム)を用いて高い充放電電圧を得るとともに、負極にはカーボン材料を用いて容量の確保を図っている。バッテリーとしてはセルごとに、セル故障対策のための過電圧保護回路、直列に接続されたバッテリーセルの開放故障でもバッテリー機能を維持できるバイパススイッチを独自に開発し、長寿命化を支える高信頼性技術を搭載した。

宇宙用リチウムイオンバッテリーセルは、エネルギー密度の高い大容量セルを使用し、従来の宇宙用であったNi-H₂バッテリーセルに比べてエネルギー密度は2倍以上である。バッテリーレベルでも筐体(きょうたい)や保護回路などの軽量化を図り、120Wh/kg以上の高いエネルギー質量効率を実現し、競争力強化を図っている。セルの形状としては長楕円(だえん)円筒形であり、容積効率が高い一方で、バッテリー筐体フレームとの接触面積を大きく取れるため、セル内部の温度均一性に優れている。

バッテリーはセルを並列及び直列に複数接続して構成し、充放電はバッテリー一括で行う。このため、セル電圧がばらつくと各セル間に電圧差が生じ、特定のセルが過充電になる可能性がある。これを防ぐのが過電圧保護回路である。充電中に、セルの電圧が上限電圧以上に上昇する場合に、このセルを迂回(うかい)させ、電圧が規定値以上にならないように制御する(特許第3872057号)。

バイパススイッチは直列に接続されたセルの一つが開放故障を起こした場合でも、充放電電流の経路を確保してバッテリーの機能を喪失しないようにするためのスイッチである。これによって、1セル故障に対し、バッテリー冗長を構成する必要がなくなるため、軽量化で重要な技術の一つである。セル直列段ごとにスイッチを並列に接続し、セルが故障を起こした場合に自動で作動し、バッテリー機能を維持できるようにしている(特許第4358134号)。

バッテリー構成として、セルケースと筐体の間に2種類の絶縁機能を施しており、その他バッテリー内の電位部でも電気的に二重の絶縁機能を持つ構成としている。

図1に代表的な宇宙用リチウムイオンバッテリーの外観を示す。

2.2 構造

当社リチウムイオンバッテリーは、振動及び衝撃環境に適した独自のシェルフレーム構造を採用している。図2に

従来のNi-Cd(ニッケルカドミウム)バッテリー等で採用されていたスタック構造とシェルフレーム構造の比較を示す。シェルフレーム構造を採用することによって、セル

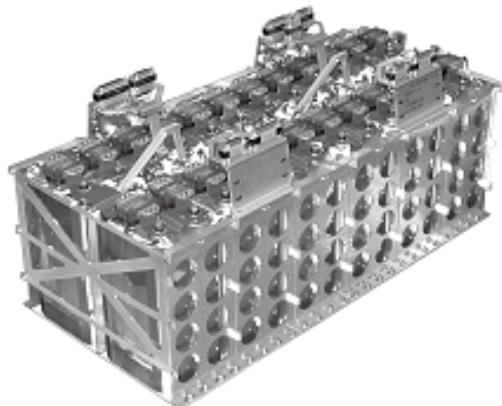


図1. 代表的な宇宙用リチウムイオンバッテリー

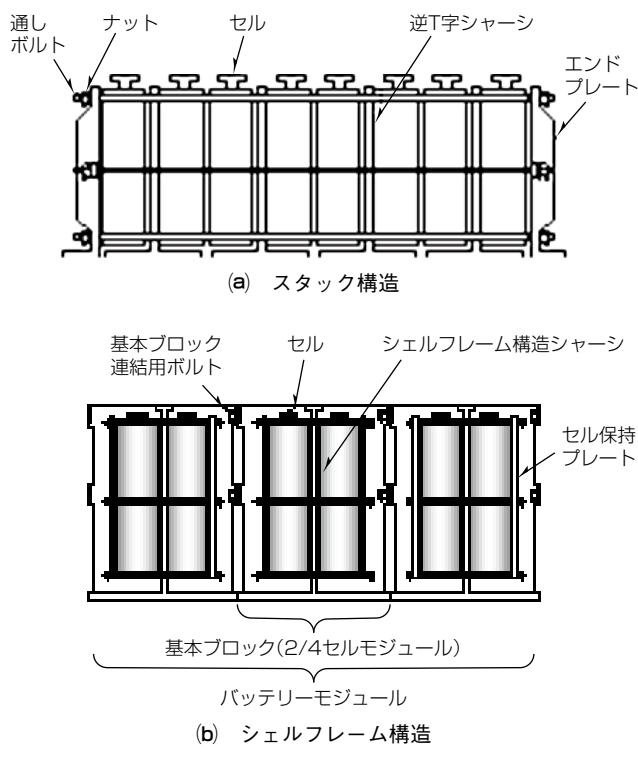


図2. バッテリー構造の比較

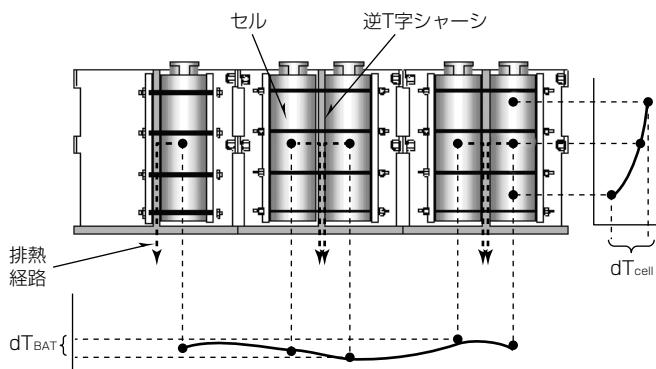


図3. バッテリーの熱設計概念図

実装時にセル外形寸法公差の影響を受けにくくなつて組立て作業性の向上が図れ、さらにセルを荷重パスから除外し、局所的な応力集中を緩和することによって耐環境性のリスクを軽減できる(特許第3888283号)。

バッテリーの熱設計概念図を図3に示す。セルを個別実装することによって他のシャーシに実装されたセルとの急峻(きゅうしゅん)な熱的干渉を避けると同時に、バッテリー内部温度の均一化を実現している。

3. 宇宙用大容量リチウムイオンバッテリーの開発

3.1 リチウムイオンバッテリーセルのラインアップ

当社が採用するリチウムイオンバッテリーセルのラインアップは、容量、寸法及び質量の異なるほぼ同形状の55Ah/110Ah/145Ah/190Ahセルである。各衛星及び宇宙機に必要な電力・容量に適したバッテリー構成を、これらセルのラインアップ及び使用するセル数(直列数/並列数)によって最適化してバッテリーの軽量化を実現している。シェルフレーム構造を採用しているため、バッテリーへのセル数の増加に対してシャーシ筐体連結数を容易に拡張可能なバッテリー構成になっている。2セル実装可能な2セルシャーシ筐体と1セル実装可能な1セルシャーシ筐体による5セルから12セルまでのバッテリー構成拡張性を図4に示す。

3.2 機械耐性を向上させた構成及びその検証

衛星及び宇宙機に搭載するバッテリーで、ロケットでの打上げ時に想定される過酷な振動及びロケットから衛星を切り離す際に起こる衝撃への機械耐性を持つ必要がある。また、衛星及び宇宙機へのバッテリー搭載場所によって振動・衝撃の印加レベルが大きい場合があるため、これらの厳しい機械環境でもセルの故障及びその他バッテリー構成品の破損等によって機能を喪失させない必要がある。このため、バッテリーに採用している長辺円錐形セルへの機械的影響をセルの機能・性能に影響が出ないように効率的に実装しつつ、電気的・熱的特性を持つ必要がある。

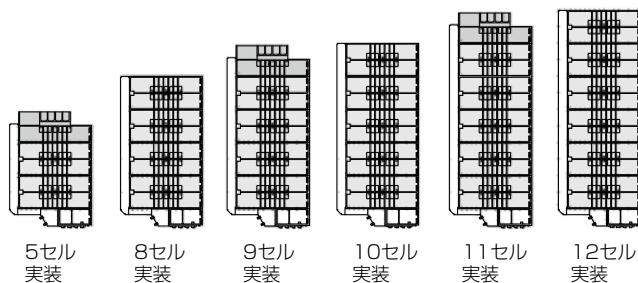


図4. バッテリー構成拡張性の概念図

これらの課題を解決するため、厳しい耐機械環境耐性を持つセル実装方法の開発・評価を行った。開発したセルの実装構成を図5に示す(特許第6537730号)。

セル内部の極板等のエレメントを機械環境で効率的に保持することを目的に、セル中央部を局所的に機械構成品で押さえて保持することによって、既存バッテリー構造の外部とのインターフェースは変更せず、かつ質量増加を抑えた構成になっている。

過酷な振動・衝撃、真空環境等の一般的なバッテリーにはない環境を試験評価するため、図6に示す衛星の環境条件下でのリチウムイオンバッテリーの電気特性、機械性能等を実機で試験(認定試験)・検証し、耐環境設計仕様を満足することを確認した。その後、軌道上での寿命特性を把握するために寿命試験を実施して良好な寿命耐性を持っていることを確認した。

認定試験に供した大容量リチウムイオンバッテリー検証モデルのラインアップのうち、190Ahセルを用いたバッテリーモデルを図7に示す。

当該大容量リチウムイオンバッテリー検証試験結果から、バッテリーの機械及び熱的機能が従来の宇宙用バッテリーと同等の衛星環境(ロケット打上げ、宇宙環境)に十分適合

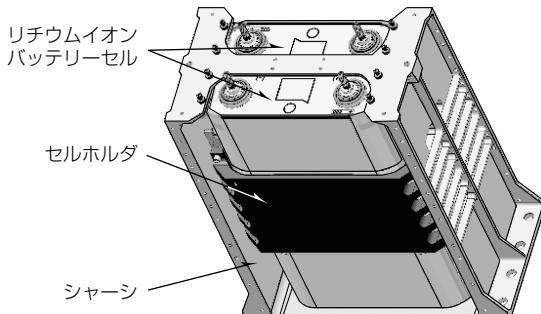


図5. セル実装構成

していることを確認し、特に機械環境試験(振動試験・衝撃試験)結果から振動耐性(正弦波振動(20G等))及び衝撃耐性(20,000G以上)を十分に持っていることが検証された。また、電気的にはエネルギー密度の高い大容量セルを採用したことによってバッテリーとして120Wh/kg以上の高いエネルギー質量効率を実現し、充放電サイクル寿命試験結果から静止衛星軌道の運用パターンで15年以上の寿命を満足できる特性であることが検証された。190Ahセルを用いた大容量リチウムイオンバッテリーによる充放電サイクル寿命特性(放電深度100%サイクル@25°C)を図8に示す。実衛星運用のバッテリー環境温度より温度を高く、更に放電深度も深い加速寿命試験を実施し、充放電1,000サイクル以上でも容量保持率が90%以上と、寿命特性で非常に良い結果が得られた。耐機械環境耐性を重視して開発したセル実装方法でもセル性能に影響を与えないことを確認し、長寿命要求の衛星運用に適したバッテリーであることが実証された。

3.3 セル並列化による大容量化及びその検証

大電力・大容量が必要な衛星にバッテリーを適用するに

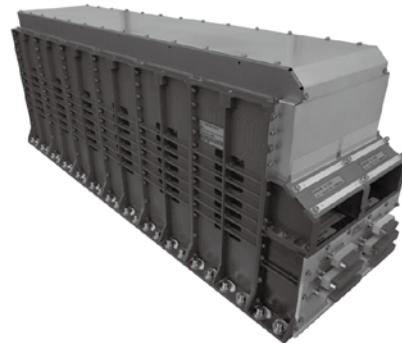


図7. 190Ahセルを用いたリチウムイオンバッテリーの検証モデル

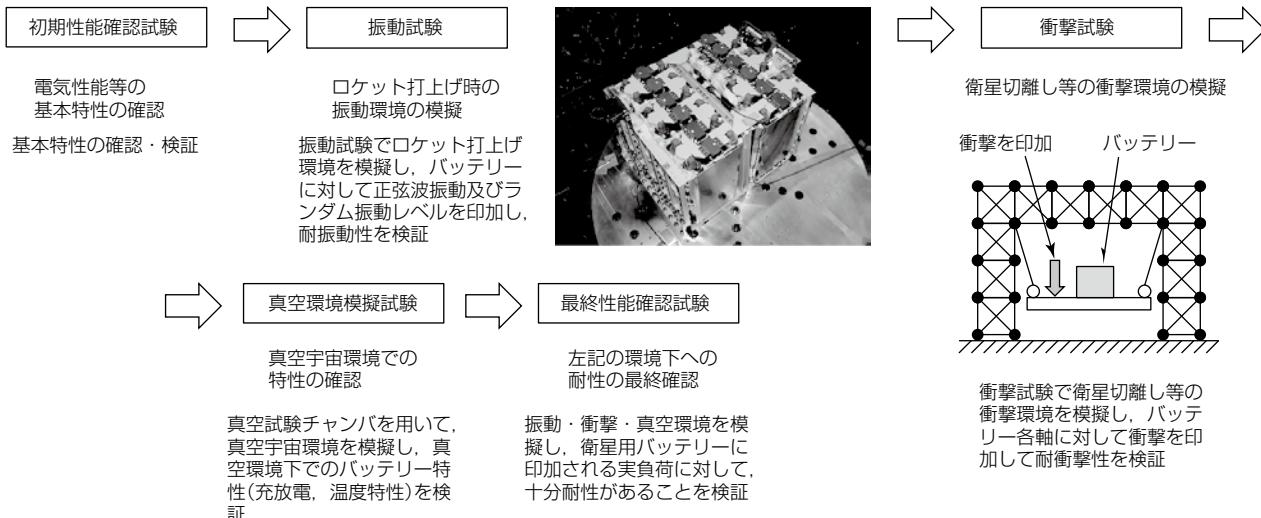


図6. 宇宙環境を模擬した検証試験

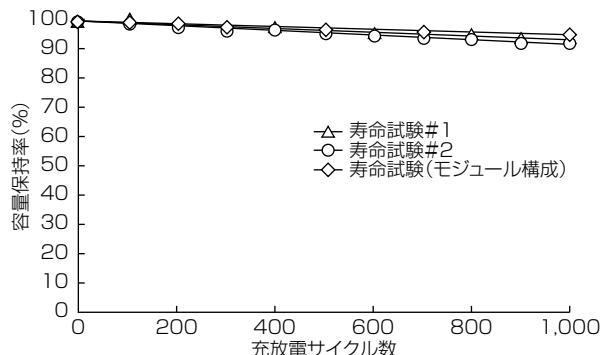


図8. セル単体及び開発実装方式セルの寿命特性

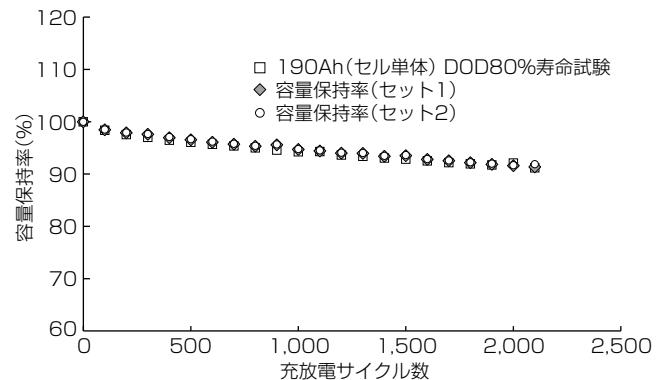


図9. セル単体及びセル並列の寿命特性

は、バッテリー台数を増やすか、又はセルを電気的に並列に接続する必要がある。バッテリー台数を増やすとそれぞれのバッテリーへの充放電装置及びモニタ回路等が必要になりエネルギー密度が下がってコストも上がる。セルを電気的に並列に接続してバッテリー1台当たりの容量を並列倍することによって、充放電装置及びモニタ回路の台数を増やすことなく大容量化が実現できる。ただし、セル並列化には特に並列接続されているセル特性(容量、内部抵抗等)の個体差による充放電電流のアンバランスが起こって寿命特性への影響が懸念されるため、次のような検証試験を実施した。

衛星搭載用バッテリーとして採用しているセルのセル並列化による寿命特性への影響を充放電サイクル試験(放電深度80%サイクル@15°C)によって検証した結果を図9に示す。結果は図8と同等であり、衛星搭載用バッテリーとして採用しているセルで、セル並列での充放電サイクルによる容量劣化は単セルと同等であること、当該セルでのセル間の特性個体差が寿命性能に影響を与えないことを確認した。また、長寿命要求の衛星運用に適したバッテリーに適用可能であることを確認した。

また、並列セルの充放電サイクル後の容量確認試験(C/2(145A)放電)での電圧特性及び各セル電流特性を図10に示す。充電率(State Of Charge: SOC)10%以下で若干の放電電流のアンバランスが見られた。各セルの容量差によって発生していると考えられるが、許容レベルであると判断している。ただし、長期間の衛星運用時で、並列セルの電流アンバランスを抑制して安定した劣化寿命特性を維持するため、電流アンバランスが発生する低SOC使用を極力避ける必要がある。実際は静止軌道衛星で放電深度(Depth of Discharge: DOD)最大80%以下、低軌道衛星でDOD最大20%程度での運用を通常行っているため、ア

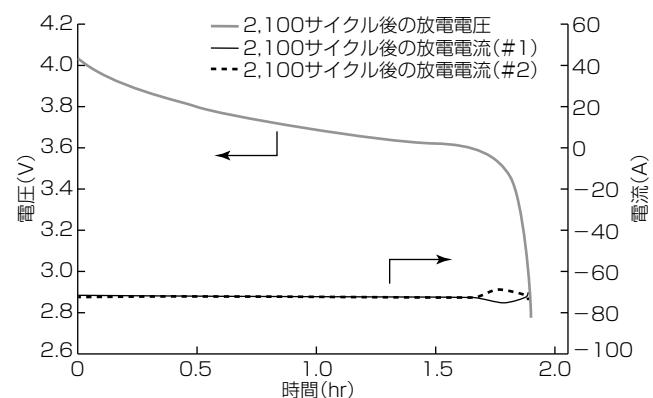


図10. 充放電サイクル後の並列セルの各電流

ンバランスの影響は受けにくく、セル並列化による大容量化は有効である。

4. む す び

近年衛星搭載用バッテリーに要求されている大容量化・高エネルギー密度化の需要に対応するため、当社での宇宙用リチウムイオンバッテリーで確立した技術と最近の開発成果について述べた。

これらの成果によって、当社で採用しているリチウムイオンバッテリーセルのラインアップである55Ah/110Ah/145Ah/190Ahセル及びその並列化による幅広い容量ラインアップをそろえ、過電圧保護回路及びバイパススイッチによる高い信頼性を実現し、高いレベルの耐機械環境性を持った宇宙用リチウムイオンバッテリーを完成させた。当社商用衛星“DS2000/DS1000”及び海外衛星メーカーに拡販していくことによって国内外シェアNo.1を目指していく。



高精度測位技術でより快適な社会へ 準天頂衛星システム

衛星測位システムとは？

私たちが日常使っているカーナビゲーション・システム（以下“カーナビ”という。）やスマートフォンでは、人工衛星から送られてくる電波信号を使って、位置を計算しています。この人工衛星からの電波信号で位置情報を取得するシステムが“衛星測位システム”です。衛星測位システムの衛星では米国のGPS(Global Positioning System)が最も

衛星測位の原理

カーナビやスマートフォンでは、衛星から私たちのいる位置までの距離を測定することによって位置情報を調べています。測位衛星からの電波信号には衛星の位置及び時刻情報が入っているので、カーナビやスマートフォンが電波信号を受信した時刻を使って、衛星から私たちのいる位置までの距離が分かります（衛星からの距離 = 電波信号の速度 × 電波信号の伝搬時間）。

電波信号の速度は光の速度（約 3×10^8 m/s）、電波信号の伝搬時間は“衛星の時刻情報”と“カーナビやスマートフォンが信号を受信した時刻”の差分から求められます。ただ、1機の衛星との距離だけでは私たちのいる位置を特定できないので、3機の衛星との距離を計算します。衛星との距離を半径とする円を考えると、三つの円が交わる一つの点が出てきます。さらに、カーナビやスマートフォン

準天頂衛星システム“みちびき”

準天頂衛星システム“みちびき”はその名のとおり、準天頂軌道をとる人工衛星を使ったシステムです。準天頂軌道とは、日本の上空に長時間とどまるように、図2のように非対称の8の字を描く軌道のことです。また衛星測位には4機以上の衛星が必要ですが、多くの衛星が見えると、より安定した位置情報を得ることができます。“みちびき”は

センチメータ級測位補強サービス(CLAS)

現在のカーナビやスマートフォンの位置情報には、衛星軌道の誤差や、電離層による電波信号の遅延等によって、数メートルの誤差があります。“みちびき”では全国に整備している電子基準点を用いた補正情報（センチメータ級測位補強情報）を“補強信号”として衛星から送信しています。この信号を専用受信機で受信することで、位置情報の誤差をこれまでのメートル級からセンチメートル級にまで改善

有名ですが、ヨーロッパのGalileoやロシアのGLONASS等もあります。2018年11月からサービスが開始された準天頂衛星システム“みちびき”は日本独自の衛星測位システムです。



の時刻の誤差を補正するために、もう1機の人工衛星の情報を加えます。図1に示すように、これら四つの円が交わる点が私たちのいる位置になります。

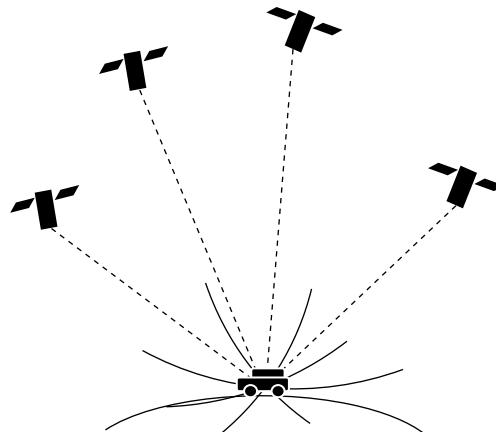


図1. 衛星測位による位置の特定

GPSと一体で利用できるため、安定した位置情報を得るための衛星数を確保することができます。

することができ、車の自動運転や農業用機器（トラクター等）の自動制御、鉄道の運行支援等への適用が期待されています。

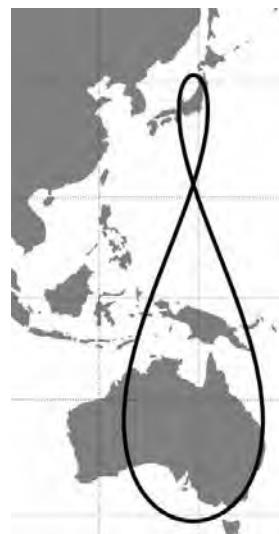


図2. 準天頂軌道