

**MITSUBISHI**  
*Changes for the Better*

家庭から宇宙まで、エコチェンジ



# 三菱電機技報

2

2014

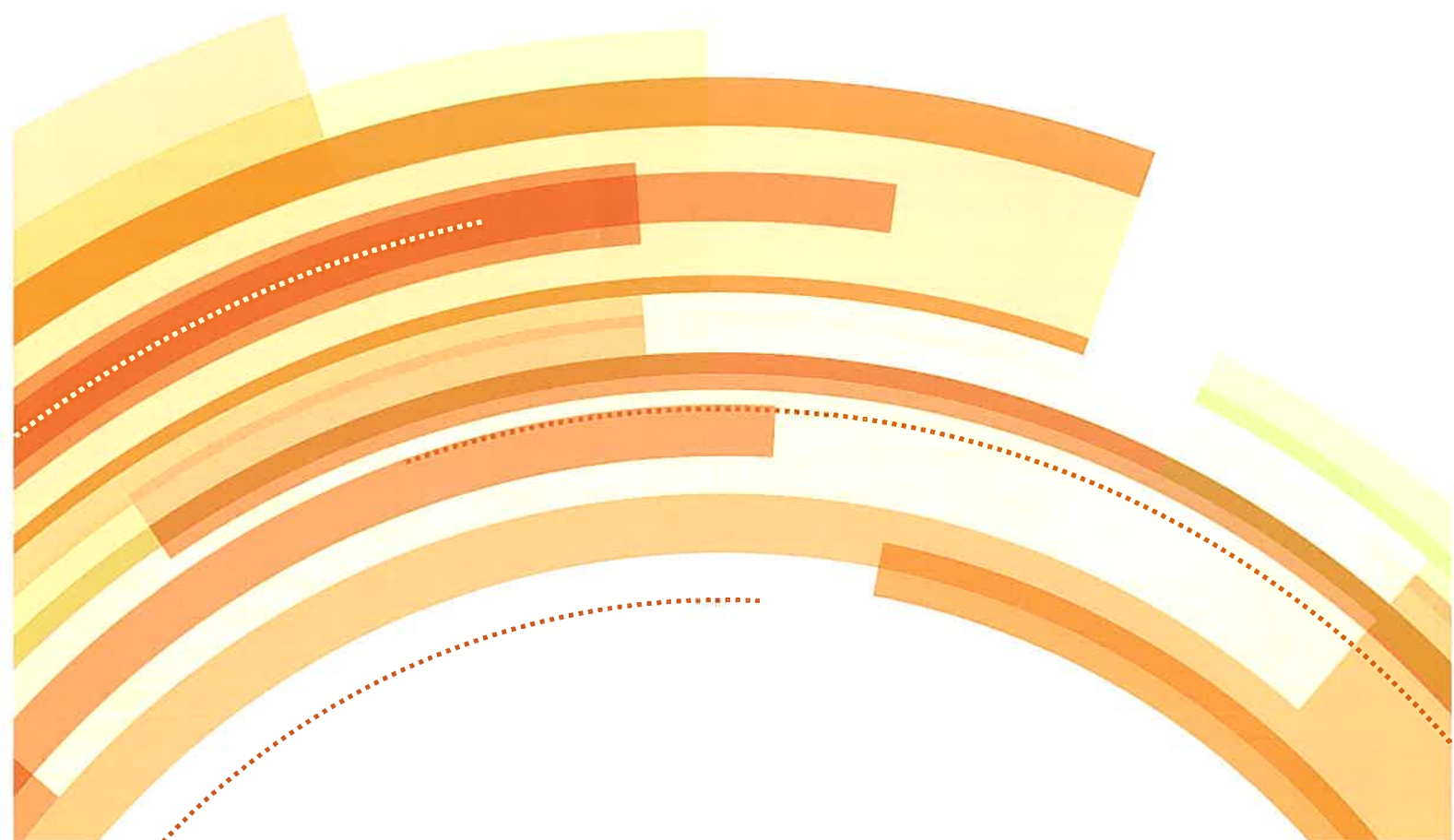
Vol.88 No.2

特集Ⅰ「広がりゆく宇宙利用」

特集Ⅱ「安全・安心な社会」を支える先進技術のグローバル展開に向けて」



© 国立天文台



## 目 次

### 特集 I 「広がりゆく宇宙利用」

衛星による今後の宇宙利用の拡大に向けて ..... 1  
山本静夫

宇宙利用の動向と今後の衛星技術 ..... 2  
中村太一・塚原克己・関根功治・小山 浩

準天頂衛星による測位システムの構築 ..... 7  
斎藤雅行・瀧口純一・矢尾 彰・岡本丈史

勝浦S-X帯20m大型アンテナ設備 ..... 13  
西原秀信・吉田武司・酒井雄二

すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ"HSC" ..... 17  
江崎 豊・遠藤 真

高精度気象観測システムの実現に向けた  
ひまわり 8, 9 号の衛星システム設計 ..... 21  
高原 修・磯部昌徳・米地寛夫・小野寺義範

陸域観測技術衛星 2 号 (ALOS-2) 衛星バス  
—最先端レーザ観測を支える高性能衛星バスの先進性— ..... 25  
橋爪 隆・笠間 縁・針生健一・鈴木新一・鳩岡恭志

次世代高速衛星通信用デジタルチャネライザ ..... 29  
江島二葉・秋田 稔・藤村明恵・小森裕一・中村和仁

合成開口レーダ (SAR) の最新技術の動向 ..... 33  
中村聖平・辻 雅生・中野陽介

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— ..... 37  
野口龍宏・石川貴章

三菱電機の衛星ミッションサクセス  
"BMS100.00%" 活動の歩みと成果 ..... 41  
佐々木俊昌・山森康博・森 康

### 特集 II 「安全・安心な社会」を支える先進技術のグローバル展開に向けて

「安全・安心な社会」を支える先進技術のグローバル展開に向けて ..... 45  
本元勝一

モバイルマッピングシステム (MMS) の最新動向 ..... 46  
吉田 守・吉田光伸

モバイルマッピングシステム (MMS) によるレーザ計測性能評価 ..... 50  
島 嘉宏・富樫健司・千葉洋平

ドップラーライダー ..... 54  
田中久理・圓城雅之・藪垣吉幸

長焦点深度イメージセンサ "DeFIS" ..... 58  
國枝達也・山縣浩作・美濃部 正・河野裕之

### Expanding in Space Utilization

Expanding the Utilization of Space —Now and Future—  
Shizuo Yamamoto

Trends in Space Based Utilization Business and Technology  
Taichi Nakamura, Katsumi Tsukahara, Kouji Sekine, Hiroshi Koyama

Establishment of Regional Navigation Satellite System Utilizing Quasi-Zenith Satellite System  
Masayuki Saito, Junichi Takiguchi, Akira Yao, Takeshi Okamoto

20-meter Large Antenna Equipment for S/X-band Operation at Katsura Station  
Hidenobu Nishihara, Takeshi Yoshida, Yuji Sakai

Hyper Wide-field Prime Focus Camera "HSC" for Subaru Telescope  
Yutaka Ezaki, Makoto Endo

Satellite System Design of Himawari-8, -9 for High Accurate Meteorological Observation  
Osamu Takahara, Masanori Isobe, Hiroo Yonechi, Yoshinori Onodera

Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2) Spacecraft Bus-system  
—Advanced Technology of High-performance Bus-system Supporting State of Art Radar Observation—  
Takashi Hashizume, Yukari Kasama, Kenichi Hariu, Shinichi Suzuki, Yasushi Hatooka

Digital Channelizer for High Throughput Satellite Communication  
Futaba Ejima, Minoru Akita, Akinori Fujimura, Yuichi Komori, Kazuhito Nakamura

Technical Trends of Synthetic Aperture Radars  
Shohei Nakamura, Masao Tsuji, Yousuke Nakano

Application and Evaluation for Observation Data on Advanced Microwave Scanning Radiometer2  
—Achievement of World-famous Microwave Radiometer (A Series of AMSR)—  
Tatsuhiko Noguchi, Takaaki Ishikawa

History and Achievements of Mission Success Promotion Activities "BMS100.00%" for MELCO's Satellites  
Toshimasa Sasaki, Yasuhiro Yamamori, Yasushi Mori

Global Business Development of the Advanced Technologies for "Safe Society"

Global Business Development of the Advanced Technologies for "Safe Society"  
Shoichi Kimoto

The Latest Trend of Mobile Mapping System  
Mamoru Yoshida, Mitsunobu Yoshida

Performance Evaluation of Laser Measurements by Mobile Mapping System  
Yoshihiro Shima, Kenji Togashi, Yohei Chiba

Doppler Lidar  
Hisamichi Tanaka, Masayuki Enjo, Yoshiyuki Yabugaki

Deep Field Image Sensor  
Tatsuya Kunieda, Kosaku Yamagata, Tadashi Minobe, Hiroyuki Kawano

### 特許と新案

「マルチパス検出装置、測位装置、姿勢方位標定装置、  
マルチパス検出方法」「俯瞰画像生成装置、俯瞰画像生成  
方法および俯瞰画像生成プログラム」 ..... 63

「画像読取装置」 ..... 64

### 表紙：広がりゆく宇宙利用

通信・測位・観測など様々な分野の衛星システムと、衛星追跡用の地上管制局、大型望遠鏡などの地上設備によって、安全・安心な社会の実現に貢献していく。

① 2013年に受注した温室効果ガス観測技術衛星 2 号 "GOSAT-2"

② 広視野化した新主焦点カメラ (HSC) を搭載した "すばる望遠鏡"

### 表紙：高精度GPS移動計測装置

GPSアンテナ、レーザースキャナ、カメラなどの機器を車両に搭載し、走行しながら建物、道路の形状・周辺の高精度な三次元位置情報を取得できるシステムである。交通規制不要で効率的に作業ができることから、全国自治体での公共測量をはじめ、インフラ維持・管理など幅広い分野で活用している。③ 最新機種 MMS-K320。



# 衛星による今後の宇宙利用の拡大に向けて

Expanding the Utilization of Space —Now and Future—

山本 静夫  
Shizuo Yamamoto



2013年1月、宇宙利用の拡大と自律性の確保を宇宙政策の基本的な方針とした新たな宇宙基本計画が策定されました。

様々な宇宙開発利用の中でも、人工衛星を中心とした宇宙の利用は、カーナビに代表される測位衛星、天気予報に欠かせない気象衛星“ひまわり”、毎日の茶の間に流れる衛星放送等々、既に国民生活に浸透し、必要不可欠なものとなっています。

我が国の衛星開発においては、技術実証を経て実用に供することができるよう、通信・放送、測位、地球観測等の分野の衛星が開発され打ち上げられてきました。欧米、ロシアに比べて、まだ衛星の打ち上げ機会が相対的に少ない我が国にとって、先進的な技術に挑戦し、その技術を宇宙実証することは、今後とも取り組むべき課題ですが、一方、技術開発だけではなく、その技術が社会の求める課題解決にどのように役立てられているかを、今まで以上に問われる時代に入ったものと考えています。

地球観測分野では、1987年に我が国初の地球観測衛星MOS-1“もも1号”が、1992年にJERS-1“ふよう1号”がそれぞれ打ち上げられ、この分野の端緒を開くこととなりました。技術開発から利用への橋渡しが段階的ながら進みつつある事例をいくつか挙げてみたいと思います。

2006年に打ち上げられたALOS“だいち”は、MOS-1、JERS-1衛星に比べて、観測性能が大きく改善され、地図作成、災害状況把握等に活用されるようになっていきます。東日本大震災においても、津波による湛水地域の識別や洋上漂流物のモニタリング等、国や地方自治体等防災関係機関において、衛星観測データが様々な利用に供されたところとす。 “だいち”の合成開口レーダの性能を更に向上させた後続機ALOS-2“だいち2号”がまもなく打ち上がり、利用の拡大が期待されています。

環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の共同プロジェクトとして進めているGOSAT“いぶき”は、2009年に打ち上げられ、地球環境問題に直結する温室効果ガスをグローバルに観測しています。“いぶき”の成果をもとに、観測性能を向上させるとともに、大気汚染物質の把握にも活用することを目指した後続衛星の計画が進んでいます。

2012年に打ち上げられたGCOM-W1“しずく”については、衛星に搭載されたマイクロ波放射計によって観測される大気中の水蒸気や海面水温等の情報が、気象庁において数値予報システムに利用され、“ひまわり”とともに天気予報業務に役立てられています。

漁業情報サービスセンターでは、衛星搭載の赤外センサやGCOM-W1“しずく”によって得られる海面水温等を用いた漁場の探索技術を確立し、海況情報を広く漁業者へ提供しています。その結果、漁船の燃油節約にも役立っています。

人工衛星を中心とした宇宙利用において、宇宙基本計画では、測位衛星、リモートセンシング衛星、通信・放送衛星を、宇宙利用拡大や自律性確保を実現する社会インフラと位置づけて取り組むべきことが示されています。

また、宇宙基本計画の重点課題の一つと位置づけられている安全保障、防災への対応も重要となっています。

測位分野では、我が国やアジア太平洋地域を中心に新たな利用拡大を目指して、国は2010年代後半を目途に、4機体制の実用準天頂衛星システムを構築する計画です。

地球観測分野では、前述の衛星に加え、これまでにない高性能の観測機器による降雨観測、雲エアロゾル観測、海面水温・海色の観測等によって、近年頻発する想定を超える大規模自然災害や地球規模の環境問題等の課題解決に役立てるべく、国際協力・分担も活用し、衛星計画が進められています。

通信衛星分野では、東日本大震災時の通信に支障をきたしていた被災地において、ETS-Ⅷ“きく8号”やWINDS“きずな”が緊急時の通信手段として活用されたことから、災害等に影響を受けにくい衛星の利点を生かした利用も一層拡大すると考えます。

宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、2013年10月で、創立10周年を迎え、新たな宇宙基本計画等を踏まえた新生JAXAの歩みを再スタートさせたところです。

実社会が直面する様々な課題解決に人工衛星をどう役立てるか、より具体的な形で生活の質の向上に結び付けたいところです。

## 宇宙利用の動向と今後の衛星技術

中村太一\* 小山 浩†  
 塚原克己\*\*  
 関根功治\*\*\*

*Trends in Space Based Utilization Business and Technology*

*Taichi Nakamura, Katsumi Tsukahara, Kouji Sekine, Hiroshi Koyama*

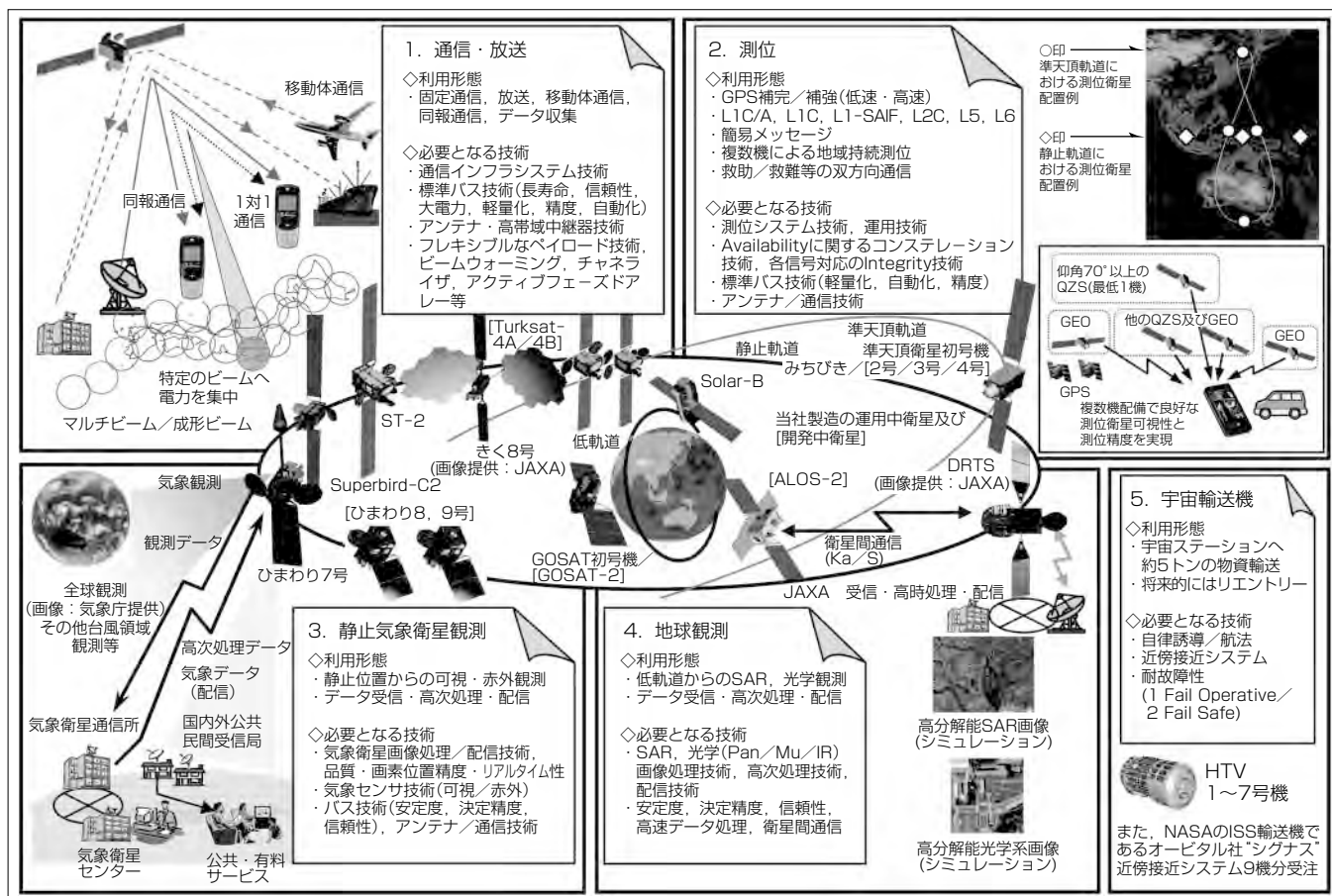
## 要 旨

2008年5月の宇宙基本法制定以降“経済的かつ戦略的な宇宙利用”という新たな方向性が示され、2013年1月の宇宙基本法改定では、“宇宙利用の産業振興”が重点課題にあげられている。市場という観点で世界に目を転じると、従来型の技術開発衛星や堅調な商用衛星需要とともに、先進国で計画又は整備中の通信・測位・観測の衛星コンステレーションや経済発展する多くの新興国の衛星需要が大きく伸びている。企業としても、より実利用に重きをおいた宇宙インフラを国際競争力のある品質とコストで市場へ提供することが求められている。

三菱電機は1960年代の宇宙開発黎明(れいめい)期から現在まで450を超える国内外の宇宙プログラムに参画し、通

信放送・測位・観測・宇宙輸送・天文等の様々なミッションを提供してきた。当社は2008年の売上げ規模世界第8位(衛星メーカーランキング、国内では衛星・ロケットを含め宇宙産業全体で第1位)から2020年までにトップ5を目指している。国内外の宇宙利用動向を的確にとらえ、衛星単体の開発・提供だけでなく衛星を利用した総合システム開発を推進し、世界の衛星リーディングカンパニーの一員としての地位を築いていきたいと考えている。

本稿では、事業化・産業化を視野にいたした“利用される宇宙インフラ構築”の観点から、国内外の宇宙利用動向と、宇宙事業推進の核となる通信・測位・観測の宇宙三大利用事業に対する当社の取組みと技術開発の状況を述べる。



## 宇宙利用の動向と当社の宇宙システム利用への取組み

当社はこれまで450以上の宇宙プログラムで人工衛星や搭載機器を提供してきた。利用対象は通信・放送、測位、観測(陸域・海洋、環境、気象)、宇宙輸送機等多岐にわたり、国内官需のみでなく国内外の民需へも静止衛星システム、地上システム、搭載機器を供給してきた。今後10年の世界需要は特に各国の宇宙インフラ関連で高い伸びが予想され、衛星を核とした総合システムの構築を中核事業の一つとして取り組んでいく。



# 1. ま え が き

宇宙基本計画の改定が2013年1月に実施され、宇宙利用の産業振興が重点課題の一つとして提示された。この方針に基づき、宇宙利用の拡大を出口とした準天頂衛星による測位インフラの整備が開始されるとともに、測位に続く利用インフラとして、観測インフラ(防災衛星ネットワーク)の検討が開始されている。また、産業振興の一環として、宇宙産業市場における世界的な将来ニーズを見据え、通信衛星にかかわる要素技術の実証も計画されている。

本稿では、2章で宇宙産業のマーケット構造及び動向を述べ、3章で通信・測位・観測の各分野における当社の取組み、4章では市場拡大に向けた当社の生産能力と品質向上への取組みについて述べる。

## 2. 宇宙産業のマーケット構造

宇宙産業市場における主要構成要素は、図1に示すように①通信・放送、②測位、③観測(リモートセンシング)である。通信・放送マーケットは宇宙産業市場の77%を占めている。ターゲットとなる商用通信衛星市場は、今後10年間で約20B\$の需要が見込まれるが、Boeing, EADS/Astriumほかの欧米主要企業10社が市場を席巻している。測位マーケットは宇宙産業市場の15%を占めているが、測位安全保障の観点から、測位衛星自体は基本的に各国が独自に整備しており、マーケットは測位利用の市場がはるかに大きい。観測マーケットは一般的な予想と異なり、ほかのマーケットに比べて市場は8%と限定的である。安全保障をミッションとする観測衛星は主要各国ともに自ら整備するため、一般入札となる商用観測衛星市場は年間約165億円の規模にとどまっている。これは商用通信衛星市場の1/10程度である。また、各国の観測要求に的確に応えるためには、長期にわたる共同検討が必要となるケースが多く、随機的に衛星製造メーカーが決まる例が多い。当社としても、各マーケットの特性を考慮しつつ、産業競争力強化に向けた取組みを行う。

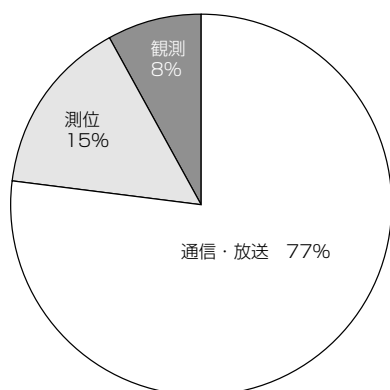


図1. 宇宙産業のマーケット構造<sup>(1)</sup>

# 3. 各分野の宇宙利用動向と当社の宇宙技術

## 3.1 通信分野における利用

通信・放送衛星技術は成熟した世界ではなく、欧米主要メーカーを中心に継続的な技術開発が推進されている。日米衛星調達合意以降、国内では継続的な技術試験衛星の開発機会が減少し、欧米との技術格差が拡大している。特に近年はKuバンドが周波数制約上飽和状態にある中で、新規の大容量通信需要を満たすKaバンドマルチビームによるHTS(High Throughput Satellites)が脚光を浴びている。例えば米国Viasat社、Hughes Network Systems社(Echostar社がその後買収)はそれぞれ6~7トン級の100Gbpsを超えるKaバンド衛星を打ち上げており、更にその倍のスループットの2号機の調達を開始している。このスループットが衛星1機で実現できれば、衛星・ロケット・地上局整備コスト、調達リスク(保険)、ユーザーの端末導入コストを考慮しても、光回線など地上インフラの新規導入コストに十分対抗することが可能であり、欧米のみならず新興国でも新しいビジネスを創出している(図2)。

一方、今回の新宇宙基本計画では、“我が国の宇宙産業の国際競争力の強化を図るため、将来のニーズを見据えて各要素技術について実証を行う。”旨が規定されている。世界商用通信衛星市場への参加権維持のためには、この施策に基づき、技術試験衛星シリーズによる継続的な開発と軌道上実証・運用実績を蓄積することが重要である。具体的には、大容量通信に適合した大型衛星バス、及び今後のトレンドであるKu/Ka帯でのマルチビーム技術・フレキシブルペイロード技術(利用者の増減に合わせ打ち上げ後にサービスエリアを自在に変更する通信技術)の開発・実証が必須と考えている(図3)。

また、図4に当社が開発した200Mbps級のチャネライザによるフレキシブル通信の例を示す。

## 3.2 測位分野における利用

準天頂衛星4機体制の整備(将来的には、持続測位が可

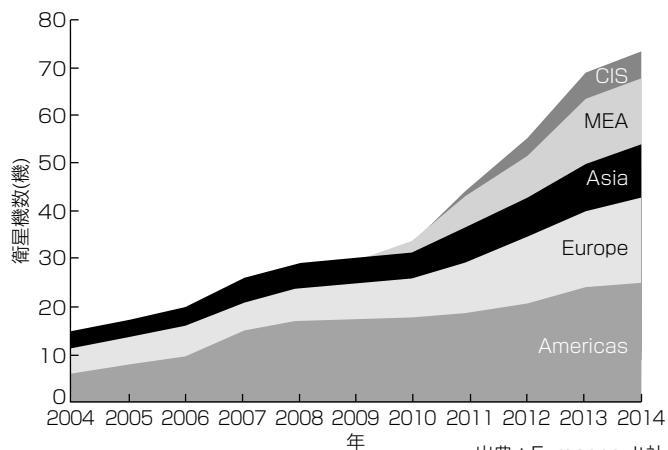


図2. Ka帯通信需要の動向(運用機数/コンステレーションを除く)

能となる7機体制を目指す)が2011年9月に閣議決定された。これによって準天頂衛星システムの整備も2013年3月から内閣府によって開始され、当社は衛星システム3機の整備、及び地上の衛星管制系、センチメートル級測位補強等の設備整備を担っている。準天頂衛星はGPSと相互運用性を持つ信号を送信するとともに(測位補完)、GPSによって得られる測位位置を補正し、高精度測位を可能とする信号を送信する(測位補強)。測位補強はGPS/Glonass/Galileo等の他の測位衛星にない準天頂衛星固有の機能であり、当社はセンチメートル級測位補強の利活用の拡大・推進を目指している。準天頂衛星初号機“みちびき”<sup>(2)</sup>で、センチメートル級測位補強の実証実験が実施され、日本国内で平均約2cmの測位精度が得られることが確認されている。

測位衛星インフラの継続、7機体制の構築に向けてはこのシステムの利用拡大が必須である。センチメートル級測位補強サービスによる、想定ユーザー規模と要求測位精度を図5に示す。高精度測位の実現は測量を初めとし、2020年頃には人・自動車の衝突回避、鉄道上下車両の分離と走行位置による安全運行管理等の大きなマーケットへの適用が期待される。また、2013年8月には高精度衛星測位サービス利用促進協議会(QBIC)も設立され、200社以上が準天頂衛星の利用活動に参画している。各測位ユーザーと連携を図りつつ、将来の海外への利用展開も視野に、必要な端末、

各種アプリケーション開発も含め、準天頂衛星システムの利用拡大・推進を図る方針である。

### 3.3 観測分野における利用

#### 3.3.1 陸域・海洋観測

世界的に観測衛星の利用が急速に拡大・浸透しつつあり、災害時の観測や森林監視、農業等への応用が進んでいる。

このような背景の下、陸域観測技術衛星2号(ALOS-2)<sup>(3)</sup>は、災害時などにおける公共の安全の確保、国土保全・管理に資する情報の提供、食糧や資源・エネルギー供給の円滑化、環境問題の解決への貢献等を目的として、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)が打ち上げを予定しているLバンド合成開口レーダ(SAR)を搭載する観測衛星である。当社は主契約者として衛星、SAR及び地上管制・処理システムから成る全系取りまとめを担当している。この衛星は、高度628kmの太陽同期準回帰軌道を14日回帰で飛行し、アクティブフェーズドアレイ(APAA)方式のSARアンテナを用いて、分解能 $3 \times 1\text{m}$ 分解能のスポットライト観測から観測幅490kmの広域観測までを行う。また、左右対称なセンサ配置と左右姿勢変更機能を加味することによって、観測可能な観測領域幅2,320kmを実現し、この衛星1機によって日本国土を1~2日の頻度で観測することを可能としている。ALOS-2衛星外観と合成開口レーダの性能比較を図6に示す。

また、低コスト・短工期かつ高性能な小型衛星の実現を目指す経済産業省のASNAROプログラムでは、2号機の

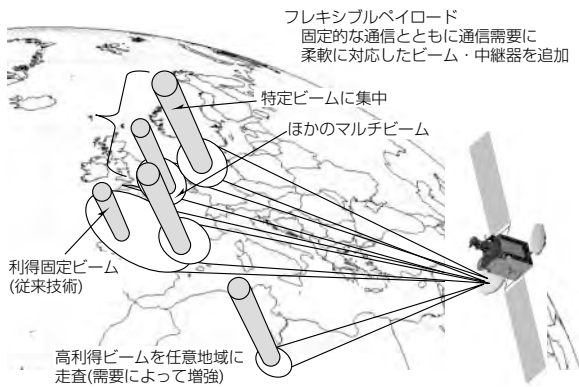


図3. フレキシブルペイロード技術

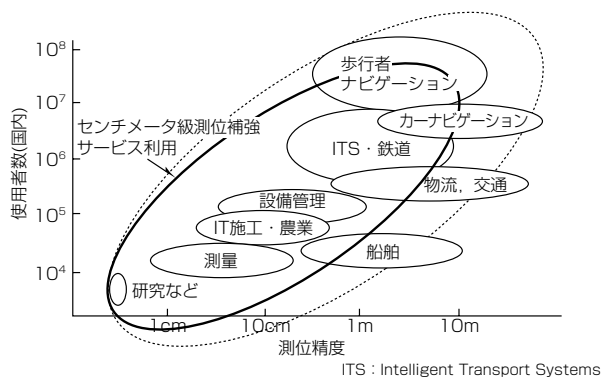


図5. 高精度測位ユーザーの規模

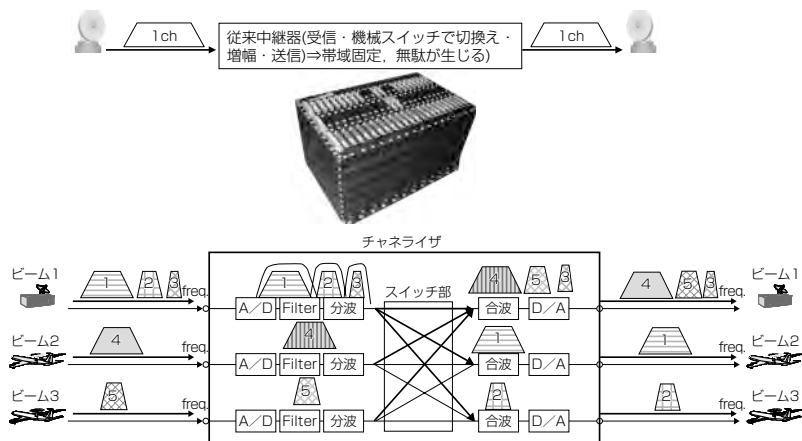


図4. チャネライザによるフレキシブルな通信系



(画像提供: JAXA)

	PALSAR(だいち)	PALSAR2(だいち2号)
観測頻度 (緊急観測時)	5日程度	1~2日
観測可能範囲	約870km(右側のみ)	約2,320km(左右観測可能)
分解能	10×10(m) (高分解能モード)	1×3(m) (スポットライト・モード) 3×3(m) (高分解能モード)ほか

図6. ALOS-2の外観と合成開口レーダの性能比較

XバンドSARミッションを当社が担当している。このSARはホーンアンテナ方式のコンパクトなものであるが、海外商用観測衛星並みの高精度な観測性能を実現する予定である。

今後、これらSAR衛星の開発・軌道上実証成果を取り込み、宇宙基本計画にうたわれている、光学衛星を含む観測衛星コンステレーションによる防災等での衛星利用の本格化に向け、実用衛星としての更なる品質向上を図っていく予定である。

### 3.3.2 環境観測

環境観測は全世界で取り組むべき重要な課題の1つである。衛星からのグローバルな観測データは、陸地・海洋・大気に見られる全世界レベルの地球環境を日々把握し、それらのデータを幅広い分野で解析・活用することに、大きく貢献している。

#### (1) 水循環の観測

日本の環境観測衛星は、欧米からアジアに至るまで裾野の広いニーズに对应しており、マイクロ波放射計は、地球の水循環(水蒸気、海面水温、土壌水分、雪氷など)を観測し、地球環境の変化を捉えるほか、気象・降水予測など様々な分野で利用されている。当社は1987年及び1990年に打ち上げられた海洋観測衛星(MOS-1)に搭載されたマイクロ波放射計(MSR)、2002年に打ち上げられたADEOS-II搭載の高性能マイクロ波放射計(AMSR)、2002年に打ち上げられた米国NASA(National Aeronautics and Space Administration)の衛星Aqua搭載の改良型高性能マイクロ波放射計(AMSR-E)、2012年に打ち上げられたGCOM-W1<sup>(4)</sup>搭載の高性能マイクロ波放射計(AMSR2)を担当しており、継続的に性能向上を実現してきた。AMSRのデータは、米国、欧州、日本を始めとする全世界の機関・組織が実利用し、利用データ量は年間約300万ファイルに上り、日本のセンサによる貢献が国際社会の中で定着した事例となっている(図7)。

#### (2) 温室効果ガスの観測

地球温暖化防止のため、主要な温室効果ガスである二酸化炭素・メタンを測定する温室効果ガス観測技術衛星“いぶき”(GOSAT)<sup>(5)</sup>が、2009年1月に打ち上げられ、その観測データが地球温暖化・気候変動の解明に役立っている。全世界で約56,000点の観測ポイントからの貴重な観測データは、米国、欧州、日本を始めとする海外機関・研究者で日々評価されている。温室効果ガスの継続モニタリングは、人類のみならず全ての生態系が持続的な活動を続ける地球環境を維持する上で重要なテーマである。当社は引き続きGOSAT-2システムの開発を担当し、衛星単体だけでなく、衛星の運用と観測データを処理する地上システムの開発、さらに定常運用における観測データの校正検証にも継続的に取り組んでいく(図8)。

#### (3) 気象観測

気象衛星ひまわりの観測データは、国内のみならずアジア太平洋諸国の30以上の国や地域に配信され、これら地域

の気象業務に欠かせない存在になっている。当社は、運輸多目的衛星新2号(ひまわり7号)と地上画像処理システムの開発を担当し、2006年の打ち上げ後、現在も順調に運用を行っている。2009年には、気象庁からひまわり8、9号を受注し、現在8号機のPFT(衛星システム試験)を実施中である。表1に示すとおり、ひまわり7号と比較して可視+赤外チャネル数、観測頻度、観測能力とも飛躍的に向上させた気象観測センサを搭載し、衛星の姿勢決定精度だけでなく、広帯域放射計視線決定系も適用している。同じ

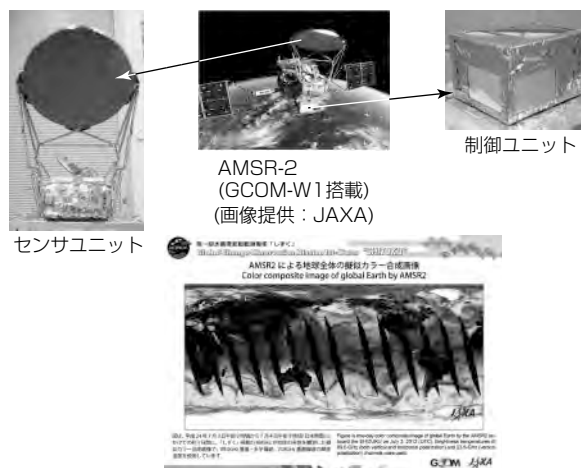


図7. AMSR-2と全地球カラー合成画像

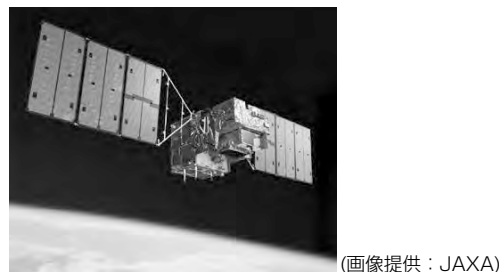


図8. GOSATの外観

表1. ひまわり7号からひまわり8、9号への性能向上比較

	ひまわり7号	ひまわり8、9号
	2006年2月	2014年及び2016年
衛星バス	DS2000	DS2000
姿勢決定系(AOCS) (姿勢決定精度:度)	ESA/FSS/IRU R/P:0.05, Y:0.15	STT/IRU R/P/Y:0.02
広帯域決定系(地上)	なし	ARS/ACC放射計視線決定系
打ち上げ質量(ドライ)/寿命	4,600kg(1,700kg)/10年	3,500kg(1,300kg)/15年
気象観測センサ(実績)	ITT社Imager(GOES-IP)	ITT-Exelis社 可視赤外放射計AHI (GOES-R:2015打ち上げ予定)
可視+赤外チャネル数 (分解能)	可視1ch(1km) +赤外4ch(4km)	可視3ch/近赤外3ch (0.5km/1km/2km) 赤外10ch(2km)
観測頻度/対象	全球30分, 半球15分, その他の時間で局所 観測可能	10分間で(全球+日本領域+ 台風領域+GCP/積乱雲) 計50回以上を観測可能
ダウンリンク(データレート)	Sバンド(2.6Mbps)	Kaバンド(66Mbps)
衛星の コンフィギュレーション		 (画像提供: 気象庁)

放射計はGOES-Rにも搭載される予定であるがひまわり8号が世界に先駆けて2014年に打ち上げられる予定である。

### 3.3.3 天文観測

当社は、世界最大級・最高性能の光学赤外線望遠鏡(すばる)、国際プロジェクトALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)計画ACA(Atacama Compact Array)(チリ)のサブミリ波電波望遠鏡の開発を担当した。

すばる望遠鏡は口径8.2mの世界最大級の光学赤外線望遠鏡であり、1999年の観測開始以来多くの成果をあげている。2013年には、ダークエネルギー計測を目的とするHSC(Hyper Suprime-Cam)計画で、望遠鏡の主焦点部に広視野化したカメラを搭載し、7月にはアンドロメダ銀河の画像が公開されるなど今後の成果が期待されている。

ALMA計画は、国立天文台を代表とする東アジア、米国立電波天文台を代表とする北米連合、ヨーロッパ南天天文台を代表とするヨーロッパの国際共同プロジェクトであり、日本は“ACA”と呼ばれる高精度の干渉計システムを構成する直径12メートルのアンテナ4台と直径7メートルアンテナ12台、サブミリ波を中心とする3種類の受信機、関連器などを担当している。2013年1月から本格的な観測を開始し、今後の成果が期待されている。

### 3.4 宇宙輸送

当社は国際宇宙ステーション(ISS)へ食糧・衣類・実験装置などの物資を輸送する“こうのとり”(H-II Transfer Vehicle: HTV)<sup>(6)</sup>の頭脳にあたる電気モジュールの開発・製造を担当している。HTVのISSとのランデブ技術は、技術試験衛星Ⅶ型(おりひめ・ひこぼし)で培った技術を基にしており、計画されている7機のうち4機のミッション運用を全て無事完了し、日本の技術力に高い評価を得ている。HTVは他の衛星を含めて、当社最大かつ貴重な量産機であり、この経験を商用衛星などの量産化に活用していく。

## 4. 生産能力と品質の向上

我が国の宇宙開発が従来の研究開発主体から、衛星利用を重視する方向に変わりつつある中で、衛星メーカーとしては、所定の品質の衛星を所定の工期で衛星利用者に提供することがますます重要な任務となっている。

当社は1990年代半ばから、商用通信衛星市場への参入活動を開始し、衛星生産一貫工場の設置を始めとする設計、製造、試験、運用の全フェーズにわたる設備投資、標準衛星バスの構築及び技術競争力強化のための開発投資、100.00%の成功率達成を目標とした品質力強化活動、QCD(Quality, Cost, Delivery)の総合的改善と連動した調達力の強化、セキュリティシステム、これらを支える長期的人材育成等の活動を総合的に進めてきた。

この結果、海外からの商用衛星受注を果たすとともに、通信・気象衛星や宇宙ステーション補給機(HTV)を始め

とする各種実用プログラムへの参画を実現し、実用衛星の生産経験を蓄積しつつある。今後、これらの経験・知見を国内の衛星利用プログラムで“実用衛星品質”として反映さ



図9. 新人工衛星生産棟の外観

せていくとともに、世界のメジャーとの距離を少しでも縮めるため、これまでの取組みを更に深化・発展させていく計画である。図9は、2013年3月に竣工した当社の新人工衛星生産棟の外観である。また、この特集号の“三菱電機の衛星ミッションサクセス“BMS100.00%”活動の歩みと成果”(p.41)では、当社品質強化活動の取組みについて述べる。

## 5. むすび

宇宙機器産業の立場からは、世界の宇宙マーケットで産業競争力を持つことが必須である。このことは“売れる製品”を持つこと、すなわち、技術、価格、納期、品質の全ての面で世界レベルの製品を作る能力を持つことと等価である。価格、納期、品質で世界に伍(ご)するためにはベースロードとなる規模の確保が必須と考えている。また、技術で世界に伍するためには、継続的な次世代技術の開発実証が不可欠である。ベースロード確保に向け、当社は各種宇宙インフラシステム事業に積極的に取り組む所存である。併せて、宇宙産業市場のユーザー動向を見極めつつ、継続的な技術開発に取り組んでいきたい。

## 参考文献

- (1) 日本航空宇宙工業会：平成20年度宇宙産業データブック(2009)
- (2) JAXAプロジェクト：準天頂衛星初号機「みちびき」  
[http://www.jaxa.jp/projects/sat/qzss/index\\_e.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/qzss/index_e.html)
- (3) JAXAプロジェクト：陸域観測技術衛星2号機「だいち2号」(ALOS-2)  
[http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/index_j.html)
- (4) JAXAプロジェクト：第一期水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W1)  
[http://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom\\_w/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/gcom_w/index_j.html)
- (5) JAXAプロジェクト：温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOAST)  
[http://www.jaxa.jp/projects/sat/gosat/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/gosat/index_j.html)
- (6) JAXAプロジェクト：宇宙ステーション補給機「こうのとり」(HTV)  
[http://www.jaxa.jp/projects/rockets/htv/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/rockets/htv/index_j.html)



# 準天頂衛星による測位システムの構築

齋藤雅行\* 岡本文史\*  
瀧口純一\*\*  
矢尾 彰\*

*Establishment of Regional Navigation Satellite System Utilizing Quasi-Zenith Satellite System*

*Masayuki Saito, Junichi Takiguchi, Akira Yao, Takeshi Okamoto*

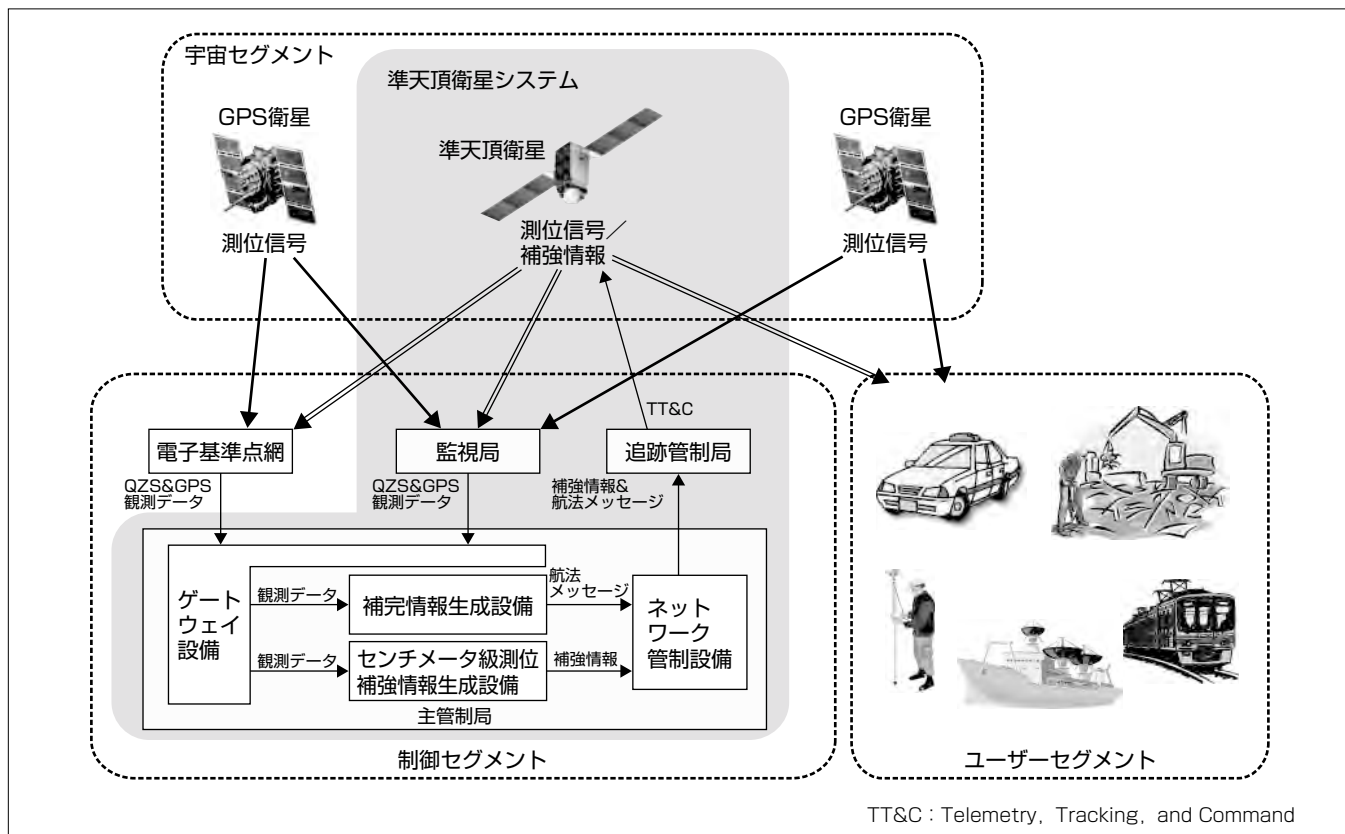
## 要 旨

現在、GPS(Global Positioning System)測位はカーナビゲーションなどで広く使われているが、都市部では、高層ビルなどによって測位信号が遮られて、測位率が著しく劣化する。また、電離層や対流圏での電波特性の変化によって電波伝搬(でんぱ)の遅延が生じる。これによって、GPS衛星と受信機までの距離の測定誤差が生じ、測位精度が劣化するため、自動車、鉄道などの各種移動体の位置管理システムを現状のGPS衛星だけで構築するには問題がある。

準天頂衛星は、常時高い仰角にある測位衛星として、GPS衛星と同様の測位信号を放送することによって、GPS衛星と組み合わせて、幾何学的配置(PDOP)が改善される。同時に、準天頂衛星から高精度の補強情報を放送すれば、いつでもどこでも高精度測位サービスが受けられるようになる。

本稿では、4機で構築される準天頂衛星による測位システムについて述べ、都市部として代表的な東京丸の内、移動体を用いた実証実験を行い、補完機能及び補強機能を確認した。その結果、補完と補強の相乗効果によって、GPS衛星だけの測位結果に対して、準天頂衛星を1機追加することによって、測位率が約1.7倍に改善した。さらに、準天頂衛星による改善結果に対してINS(Inertial Navigation System)複合させることによって、GPS衛星だけの測位結果の3.5倍の測位率を確認した。また、レーンナビゲーションの判断基準となる車線幅の1/2(1.75m)以下の測位精度を確認した。

今後、準天頂衛星システムを利用することによって、位置情報利用に関する多種多様なサービスが期待される。



## 準天頂衛星による測位システム

主管制局では、監視局と電子基準点網からの準天頂衛星やGPS衛星の観測データを基に、補完情報生成設備によって航法メッセージを、センチメートル級測位補強情報生成設備によってセンチメートル級測位補強情報を作成する。航法メッセージとセンチメートル級測位補強情報は、準天頂衛星を介してユーザーへ放送され、高精度測位が実現できる。これを準天頂衛星の補完・補強と呼び、これによって多種多様な測位サービスが実現できる。

\*鎌倉製作所 \*\*同製作所(工博)

# 1. ま え が き

衛星測位システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)は、複数の測位衛星が位置などの情報を含む航法メッセージを重畳した測位信号を地上に向けて電波送信(放送)し、その測位信号を受信した受信機が自己の位置を求めるもので、位置と時刻が正確に管理された測位衛星群(宇宙セグメント)とそれらを管制する幾つかの地上局(制御セグメント)及び利用者側の受信機を含むアプリケーションシステム(ユーザーセグメント)から構成される。

衛星測位システムとして、米国のGPSが一般にも良く知られているが、そのほかに、ロシアのGLONASS(Global Navigation Satellite System)が現在実運用中で、日本の準天頂衛星システム、欧州のGalileo、中国のBeiDou、インドのIRNSS(Indian Regional Navigational Satellite System)が開発中である。衛星測位システムは、現在、身近にはカーナビゲーションに広く使われているほかに、船舶や航空機の航法支援、測量や地盤監視等に用いられ始めている。

本稿では、4機によって構築される衛星測位システムとしての準天頂衛星システムについて述べる。そして、このシステムの最も特長的な効果として、都市部における移動体を用いた実証実験結果について述べる。

## 2. 衛星測位システムの課題と解決策

衛星測位システムにおける位置測定の実理は、測位衛星から放送される測位信号を測定点においた受信機で受信して、測位衛星と測定点との正確な距離を求め、三角測量の実理で測定点の位置を求めるものである。測位信号の搬送波を用いて高精度な測位を実現するには、測定点の座標値( $x$ ,  $y$ ,  $z$ )と受信機時計誤差及びアンビグイティと呼ばれる観測する測位信号に含まれる波長の整数倍の波数を未知数として求めるため、通常5機以上の測位衛星が必要となる。GPSは、6つの軌道面に各々4機配置の合計24機の測位衛星と予備の測位衛星が地球を周回しているが、時間帯によって日本上空での可視衛星数が減少し、測位精度に影響する測位衛星の幾何学的配置(Position Dilution of Precision: PDOP)が劣化する場合があり、高精度でかつ安定な測位がすべての時間帯でできないのが現状である。

さらに、高層ビル、高架、樹木や歩道橋等、測位衛星との見通しを遮蔽する建造物が多々ある都市部では測位率が著しく劣化する。また、測位衛星から受信機まで電波が到達する経路には、電離層や対流圏での電波特性の変化によって電波伝搬の遅延が生じる。これによって、測位衛星と受信機までの距離の測定誤差が生じ、測位精度が劣化する。そのため、自動車や鉄道などの各種移動体の位置管理システムを現状のGPS衛星だけで構築するには問題がある。

その解決策として、準天頂衛星システム(QZSS: Quasi-Zenith Satellite System)は、常に天頂付近にあるもう1機のGPS衛星としての役割とともに、測位精度を向上させるための補強情報を日本全国及びその近海の利用者に放送する役割を併せ持つ。前者を、補完機能、後者を補強機能と呼ぶ。特に、日本の都市部では、高層ビルに遮られて捕捉可能なGPS衛星が制限される。常時高い仰角にある測位衛星があれば遮られることがないため、いつでもどこでも高精度測位サービスが受けられるようになる。準天頂衛星システムは、この補完機能とともに高精度の補強機能を合わせ持つことが特長である。

## 3. 準天頂衛星システム

### 3.1 準天頂衛星システムの概要

衛星測位システムとしての準天頂衛星システムの構成を図1に示す。準天頂衛星システムは、制御セグメントに対応する地上システムと宇宙セグメントに対応する衛星システムで構成される。衛星システムは、これから新規に開発・整備する2機の準天頂軌道衛星と1機の静止軌道衛星に、2010年9月に打ち上げられた準天頂衛星1号機(みちびき)(以下“みちびき”という。)を加えたものである。

準天頂軌道衛星は、昇降点赤経が“みちびき”と $\pm 135$ 度の位置関係を持ち、離心率0.075、近地点引数270度、軌道傾斜角47度以下、軌道長半径42,164km(平均)の楕円(だえん)軌道をとる。この軌道によって、日本から見ると、約1日で軌跡が元に戻る非対称8の字軌跡となり、複数機構成で日本上空で常に高仰角が確保できる。図2は、準天頂衛星の地表面上の軌跡である。図3は、“みちびき”と今後打ち上げ予定の2機の準天頂軌道衛星と1機の静止軌道衛星の合計4機を組み合わせた場合の東京から見た準天頂衛星の仰角を示す。東京では、24時間常時どれか1機の仰角は70度以上を確保できる。静止軌道衛星は、東経90度から180度のいずれかの位置に配置することになっているが、東経135度付近になった場合には、常に仰角48度付近に見ることができる。

地上システムの監視局は、準天頂衛星とGPS衛星の測位信号を常時モニタし、準天頂衛星とGPS衛星からの観測データを主管制局に伝送する。主管制局では、補完情報生成設備によって、各衛星の軌道決定や時刻管理を行い、航法メッセージを作成する。

一方、電子基準点は、日本に約1,200点あるが、そのうち日本本土と近海をカバーするセンチメートル級測位補強情報を生成するには約300点程度が必要となる。センチメートル級測位補強情報生成設備では、監視局と電子基準点網で取得した準天頂衛星とGPS衛星の測位信号の観測データを入力し、補正情報の生成とその補正情報の2 kbpsへの圧縮、及び、インテグリティモニタによる異常監視と補正情

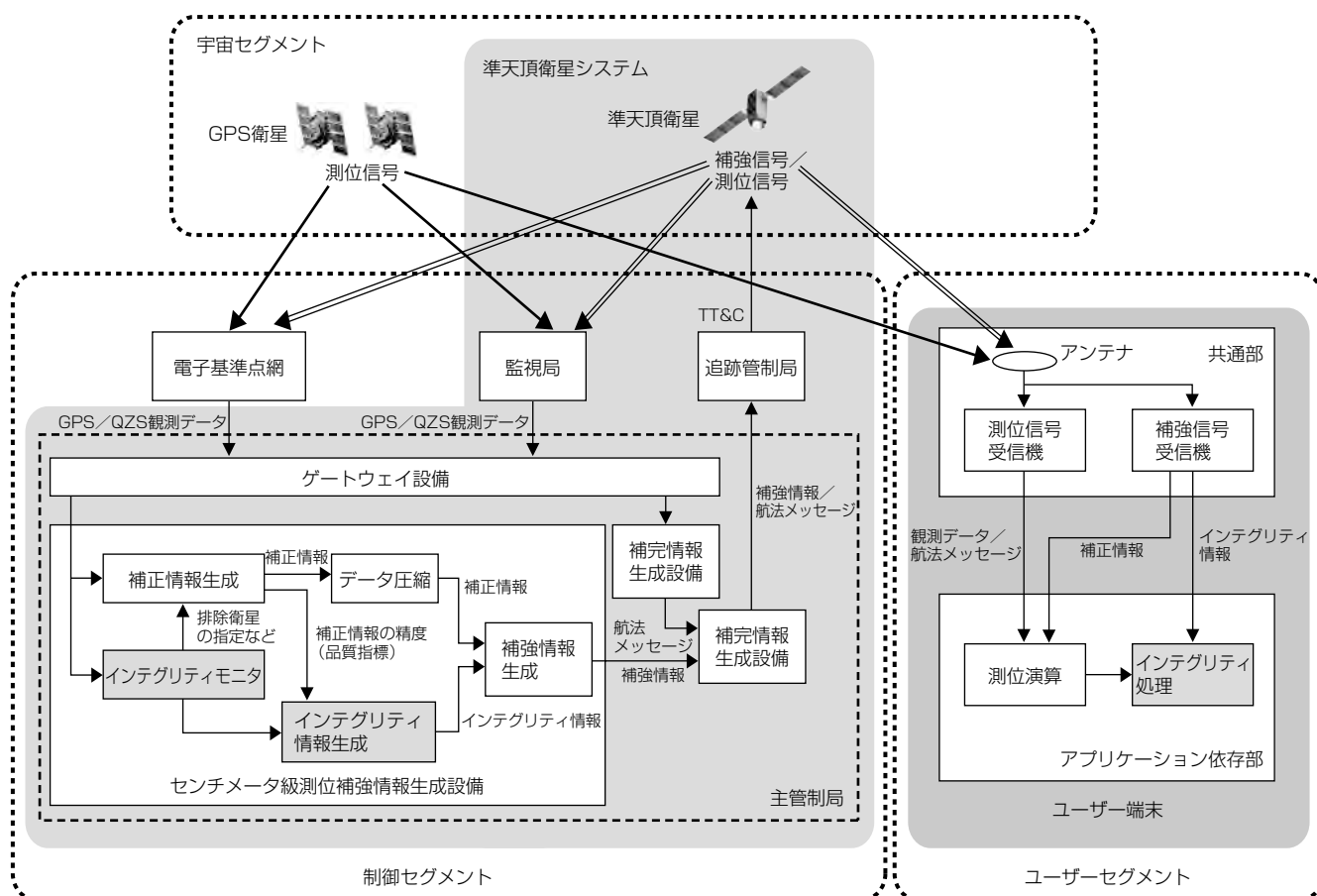


図1. 準天頂衛星による測位システムの構成

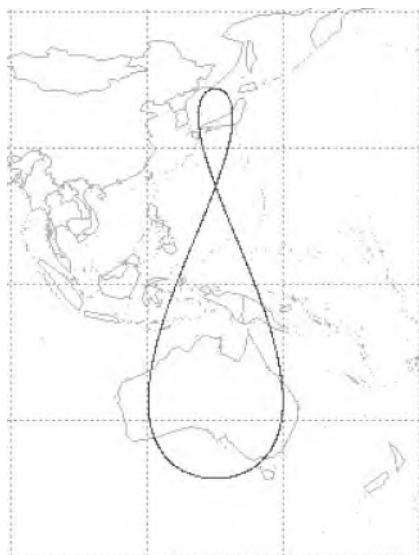


図2. 準天頂衛星の地表面上の軌跡(IS-QZSSから<sup>(1)</sup>)

報の品質を表す指標となるインテグリティ情報の生成、及び放送用の補強情報(補正情報、インテグリティ情報及びその他の情報)の生成を行う。

航法メッセージとセンチメートル級測位補強情報は、主管制局から追跡管制局を経由して準天頂衛星へ向けてアップリンクされる。準天頂衛星では、センチメートル級測位補強情報は、L6b信号によって日本全国へ放送される。航法

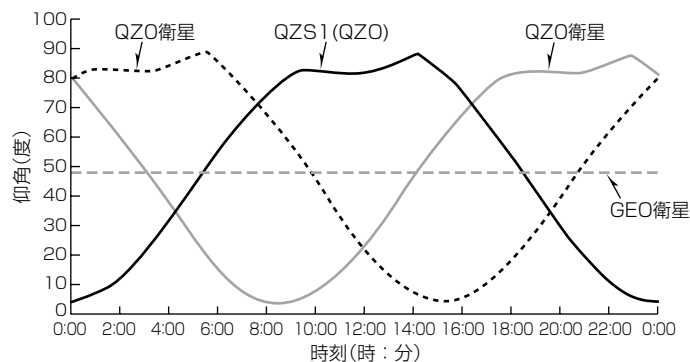


図3. 東京から見た準天頂衛星の仰角

メッセージは、各種補完信号に重畳されて準天頂衛星から放送される。ユーザー端末は、準天頂衛星からの補強情報と準天頂衛星とGPS衛星等からの測位信号を用いて測位演算を実施し、位置情報を出力する。同時に、ユーザーは補強情報のうちのインテグリティ情報を用いて、得られた位置情報の信頼度をリアルタイムに確認することができる。

準天頂衛星システムは、2018年4月から運用を開始することになっている。

### 3.2 補完・補強信号

準天頂衛星のGPS補完サービスは、米国が運用するGPS衛星と組み合わせ、準天頂軌道を利用して衛星のPDOPを改善することによって、都市部や山間部における測位可能

表1. 準天頂衛星の補完・補強信号仕様

搬送波	信号名称	チャネル	PRNコードと拡散方式		信号の内容
L1 1575.42MHz	L1-C/A信号	－	L1-C/A信号と同一の符号系列, BPSK (1)		GPS衛星のL1-C/Aと同様の測位信号, 50bps／50sps
	L1C信号	L1CD	L1C信号と同一の符号系列, BOC/MBOC		GPS衛星のL1Cと同様の測位信号, 50bps／100sps
		L1CP			データレス
	L1S信号	L1Sa	L1-C/A信号と同一の符号系列, BPSK (1)		サブメータ級測位補強情報, 250bps／500sps
L1Sb		未定		測位技術実証プラットフォーム提供用 (GEO衛星)	
L2 1227.60MHz	L2C信号	－	L2C信号と同一の 符号系列, BPSK (1)	L2C (CM) コード	GPS衛星のL2Cと同様の測位信号, 25bps／50sps
				L2C (CL) コード	データレス
L5 1176.45MHz	L5信号	Iチャネル	L5信号と同一の符号系列, BPSK (10)		GPS衛星のL5と同様の測位信号, 50bps／100sps
		Qチャネル	L5信号と同一の符号系列, BPSK (10)		データレス
	L5Sa及び L5Sb信号	Iチャネル	未定		測位技術実証プラットフォーム提供用 (QZO衛星)
		Qチャネル	未定		測位技術実証プラットフォーム提供用 (GEO衛星)
L6 1278.75GHz	L6b信号	Qチャネル	Kasami系列, BPSK (5)		センチメータ級測位補強情報, 2,000bps／250sps

PRN : Pseudo Random Noise, BPSK : Binary Phase Shift Keying,  
BOC : Binary Offset Carrier, MBOC : Multiplexed BOC,  
SBAS : Satellite-Based Augmentation System,  
GEO : GEostationary Orbit, QZO : Quasi-Zenith Orbit

エリア及び時間を拡大させることを目的とする。

準天頂衛星から放送するGPS補完に関する測位信号は、近代化GPSとの共存性、相互運用性を確保するため、近代化GPS信号をベースとする。したがって、測位信号には、L1C/A信号、L1C信号、L2C信号、L5信号を用い、その信号仕様に関しては、近代化GPSからの仕様変更を最小限に抑えることとしている。

測位補強に関する信号としては、サブメータ級測位補強情報がL1Sa信号に、センチメータ級測位補強情報がL6b信号(“みちびき”では独自の実験用信号であるLEX信号に対応)に割り当てられる。L6b信号は、2 kbps(補強情報の実質伝送容量は1,695bps)の伝送容量を持つ。1メッセージ/秒で、メッセージはメッセージタイプIDやアラート情報などを含むヘッダと補強情報を含むデータ部及び誤り訂正符号として256ビットのリードソロモン符号で構成される。

表1に準天頂衛星の補完・補強信号の仕様を示す。

### 3.3 補強機能

#### 3.3.1 センチメータ級測位補強情報

“みちびき”では、センチメータ級測位補強システムにSSR(State Space Representation)方式<sup>(2)</sup>を採用し、LEX信号(準天頂衛星システムではL6bに対応)を用いて移動体対応のセンチメータ級測位補強情報を全国に放送し、利用実証を進めている<sup>(3)</sup>。センチメータ級測位補強情報生成設備で、電子基準点網のGPS観測データに基づいて状態空間モデル(SSM: State Space Modeling)と呼ばれる広域の動的誤差モデルを使用し、このモデルから算出した衛星時計誤差、衛星軌道誤差、電離層遅延、対流圏遅延、シグナルバイアス等の各誤差量をSSRとして生成する。さらに、このSSRをLEX信号に対応させるために各誤差の物理的特性を利用して2 kbpsに圧縮し、センチメータ級測位補強情報(コーデッドSSRメッセージ)としてLEX信号を介して、日本全国に放送するものである。ユーザーは、このセンチ



図4. センチメータ級補強情報の網構成例

メータ級測位補強情報をデコードして、測位計算に使用する。

#### 3.3.2 網構成

センチメータ級測位補強情報は、衛星に対応する衛星時計誤差と衛星軌道誤差及びシグナルバイアスに対する補正情報、位置に依存する電離層遅延と対流圏遅延に対する補正情報に大別できる。位置に対応する補正情報は、全サービスエリアに対して約60km間隔でグリッドとして配置する。サービスエリアを日本本土と近海と想定し、日本本土をくまなくカバーするため、12網に分割した網構成例を図4に示す。

### 4. “みちびき”による効果の検証

#### 4.1 評価システム(ユーザーセグメント)

準天頂衛星からの測位信号が受信できる受信機(LEX信号受信機)を搭載した高精度GPS移動計測装置(Mobile Mapping System: MMS)を用いて、高層ビルを含む繁華



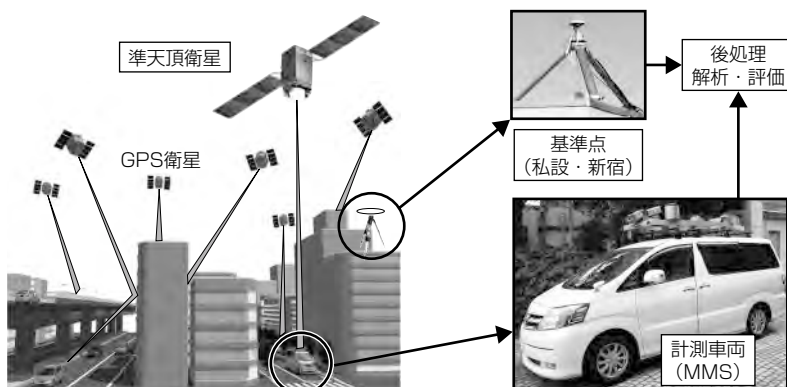


図 5. 評価システム

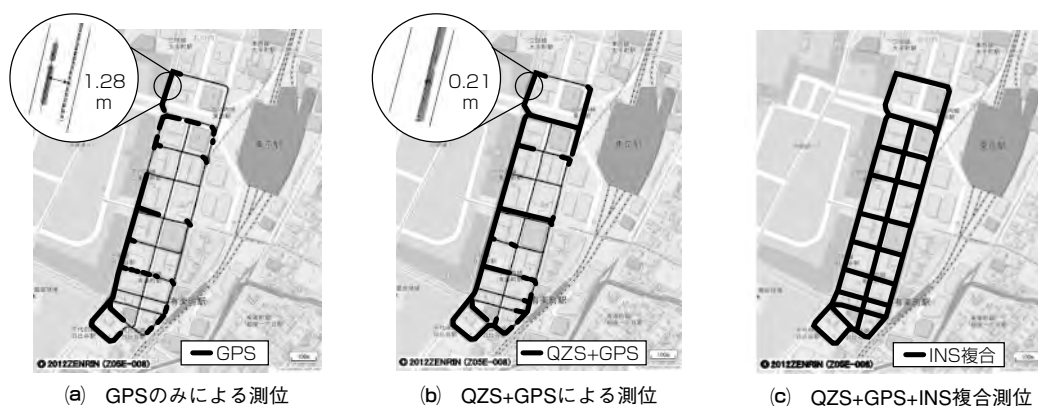


図 6. 測位結果

街である東京丸の内で測位精度・測位率を測定する実験を実施した。MMSを用いた評価システムの構成を図 5 に示す。MMSは、屋根に準天頂衛星とGPS衛星の信号を受信する測位信号受信アンテナや測位信号と複合して測位精度を改善し、かつ、測位信号を受信できないときも継続して測位計算を実施するINS及び画像情報を取得するためのビデオカメラやレーザスキャナを搭載し、車内に取得データを処理し記録する制御装置を搭載している。実験では、丸の内をMMSで走行し、“みちびき”とGPS衛星の測位信号及びセンチメートル級測位補強情報を受信し記録する。同時にINSのデータも記録する。受信した準天頂衛星とGPS衛星の測位信号及びセンチメートル級測位補強情報及びINSのデータを使用して、後処理によって、①GPS衛星だけによる測位計算、②準天頂衛星+GPS衛星による測位計算、③準天頂衛星+GPS衛星による測位計算結果とINSとの複合計算、を実施した。真値は、測定地域の丸の内から約 5 km離れた新宿に私設の基準点を設置して、移動体測量として公的に認められている方式であるFKP (Flaechen Korrektur Parameter) 方式とINSとの複合測位計算を後処理で実施した結果とした。なお、測定日は2012年 6 月21日、測位は 5 Hzで実施している。

#### 4.2 準天頂衛星による測位率改善

丸の内を走行し測位計算した結果を図 6 と表 2 に示す。

表 2. QZSによる効果

No	処理内容	測位率		精度rms (cm)		
		FIX率	改善度	水平	高さ	3D
1	GPSのみによる測位	28.60%	—	133	104	169
2	QZS+GPSによる測位	47.30%	1.7倍	35	27	45
3	QZS+GPS+INS複合測位	100%	3.5倍	—	—	—

図 6 は、測位計算結果を地図上にプロットしたもので、それぞれ測位信号としてGPS衛星だけによる測位結果、準天頂衛星とGPS衛星を用いた測位結果、さらに、準天頂衛星とGPS衛星の測位信号にINSを複合させて測位計算した結果を示す。図中の黒線は、真値を示す。表 2 にそれぞれの測位率 (FIX率) を示す。GPS衛星だけの測位結果に対して、準天頂衛星を 1 機追加することによって、28.6%から 47.3%へ、約 1.7 倍に改善した。さらに、INS複合させることによって、100% (GPS衛星だけの測位結果の 3.5 倍) の測位率を達成できた。図 7 に各測位地点における準天頂衛星とGPS衛星のスカイプロットを示す。準天頂衛星とGPS衛星の測位の場合、合わせて 5 機以上の場合で測位可能となるのに対して、GPS衛星の場合は、GPS衛星だけで 5 機以上ないと測位解が得られず、測位率が減少していることが分かる。

#### 4.3 補完と補強の相乗効果

表 2 にGPS衛星だけの場合と準天頂衛星+GPS衛星の場合の測位精度を示す。明らかに準天頂衛星を加えることに

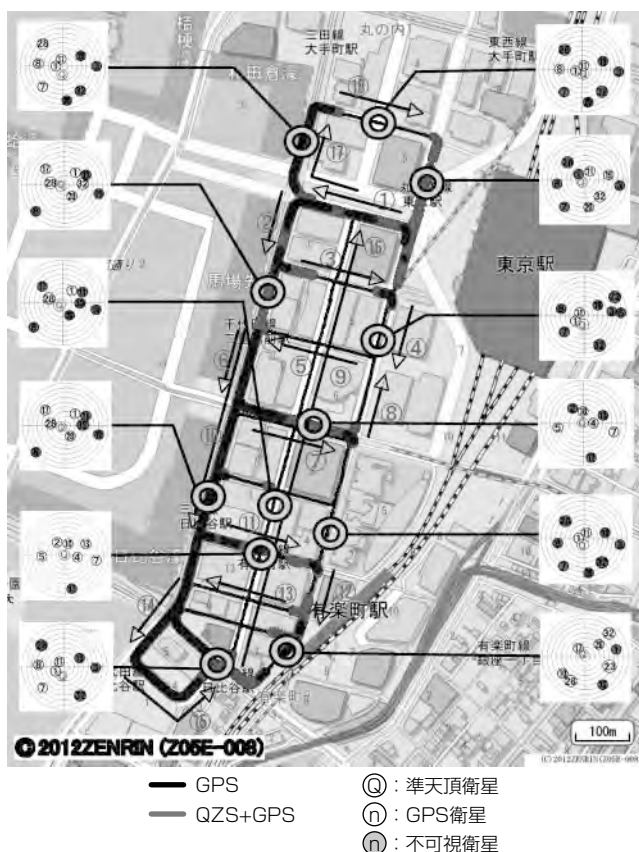


図7. 走行位置による測位に使用した衛星配置

よって測位精度が向上している。また、図8にINS複合時の測位精度(QZS補完あり／なし)を、真値として用いているFKP方式とINSとの複合測位計算結果と比較した時間推移を示す。GPS衛星に加え、準天頂衛星の補完・補強信号の双方を測位演算の対象とすることで、測位精度の向上が確認できる。これは、FIX率が向上したこと、複合時の航法フィルタにおける観測更新頻度が増大したことによるものである。また、GPS衛星だけを用いたときに現れていたマルチパスの影響による最大2.5m程度の誤った測位結果も、その誤差が低減できたことを確認できる。これは、準天頂衛星の高仰角特性によるマルチパスが少ない信号によって、測位演算で、マルチパスを含むGPS信号による影響を効果的に低減できたことによるものであり、準天頂衛星の補完と補強の相乗効果である。

この補完と補強の相乗効果によって、車線幅の1/2である1.75m以下が出せる領域の拡大を確認した。これらの結

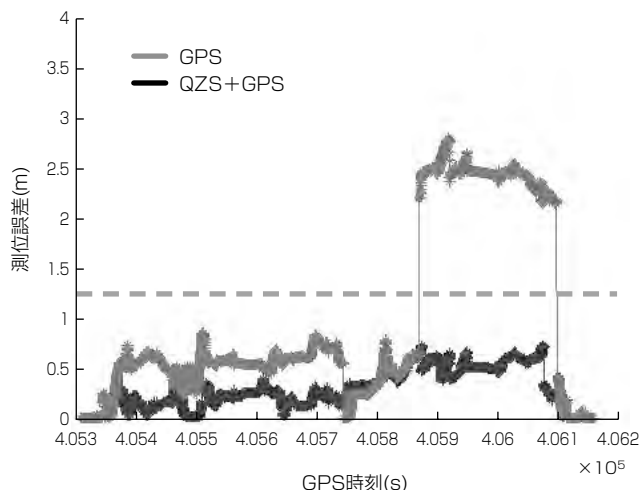


図8. マルチパス低減による精度向上

果は、自動運転などで、車載カメラやレーザなどの他の搭載センサへの負荷が軽減できることを意味し、この側面からも、準天頂衛星の利用は、自動運転システムなどの中で有効に働くものと期待される。

## 5. む す び

準天頂衛星の補完機能と補強機能を評価した。補完機能は、GPS衛星だけの場合に比べ、準天頂衛星を組み合わせることによって、測位率が大幅に改善できた。また、補強機能は、従来の測量で用いられている方式と同等の性能を確認できた。さらに、補完・補強の相乗効果によって、車両の自動運転の可能性を示した。

今後、測量、情報化施工、IT農業や高精度レーンナビゲーション等の多種多様なサービスが期待される。

## 参 考 文 献

- (1) 宇宙航空研究開発機構：準天頂衛星システムユーザインタフェース仕様書(IS-QZSS) 1.5版 (2013)
- (2) Wuebbena, G., et al.: PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks, the 18th International Technical Meeting, ION GNSS\_05 (2005)
- (3) Saito, M., et al.: Centimeter-class Augmentation System Utilizing Quasi-Zenith Satellite System Performance Verification, ION GNSS Conference (2011)

# 勝浦S/X帯20m大型アンテナ設備

西原秀信\*  
吉田武司\*  
酒井雄二\*

20-meter Large Antenna Equipment for S/X-band Operation at Katsuura Station

Hidenobu Nishihara, Takeshi Yoshida, Yuji Sakai

## 要 旨

勝浦S/X帯20m大型アンテナ設備は、千葉県勝浦市の(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)勝浦宇宙通信所に建設した、衛星追跡管制用の直径20mの大型アンテナ設備である。ALOS-2(陸域観測技術衛星：だいち2号)の主局として、S帯送受信及びX帯受信の衛星運用に対応しており、将来はKa帯受信機能を追加できる拡張性も持っている。アンテナ放射給電部には、高効率なリングフォーカスカセグレン方式と周波数選択反射鏡を含む集束ビーム給電方式を採用し、送信装置として自社開発した低消費電力(従来比：約30%減)な1kW電力増幅装置を含む送受信装置を、アンテナ上部の機器室内に収納したコンパクトな構造が特長である。一方、アンテナ駆動性能は、30kW ACサーボモ

ータを用いたアンチバックラッシュ駆動方式によって、直径20m級の大型アンテナとしては、三菱電機最高レベル(従来比：約40%増)の高速駆動性能を可能にした。当社の大型アンテナ製作のノウハウを集約し、短工期と高信頼性を両立させた設備として2013年9月に納入し、JAXAのアンテナとしては、64m(臼田宇宙空間観測所)、34m(内之浦宇宙空間観測所)に次ぐ口径のアンテナとなっている。将来、他の地球観測衛星や近地球科学衛星の追跡管制運用・ミッション運用での活躍も期待されている。

本稿では、大型アンテナ設備の開発計画を短期間で進める上での課題とその解決策、及びアンテナ設備や1kW電力増幅装置の構成・主要性能について述べる。



画像提供：JAXA

## 勝浦S/X帯20m大型アンテナ設備

勝浦宇宙通信所に完成した直径20mの大型アンテナ設備。

\*通信機製作所

## 1. ま え が き

勝浦S/X帯20m大型アンテナ設備は、地球観測衛星及び近地球科学衛星などの追跡管制やミッションデータの受信を行うことを目的に、JAXA勝浦宇宙通信所に整備された設備(図1)である。開発当初から設計・製作・工場試験・据付工事・現地試験までを短期間で実現するため、開発計画を効率的に進める必要があった。

本稿では、大型アンテナ設備の開発計画を短期間で進める上での課題とその解決策、及びアンテナ設備やS帯1kW電力増幅装置の構成・主要性能について述べる。

## 2. アンテナ設備の特長と課題

### 2.1 アンテナ設備の特長

この設備は、S帯送受信及びX帯受信の衛星運用に対応しており、S帯捕捉アンテナによる捕捉機能も持っている。また、将来Ka帯受信機能を追加できる拡張性を考慮し、送受信装置をアンテナ上部機器室に、制御装置をアンテナ下部機器室に収納したコンパクトな構造が特長で、高速駆動性能の実現と省電力な送信装置の製品化を実現している。

### 2.2 開発計画の課題

この設備の開発計画は、当初ALOS-2打ち上げに向けた整備によって、従来に比べ6か月以上短期間で実施することが求められていた。大型アンテナ製作に必要十分な期間が確保できない中、効率的に作業を進めるために、類似機種的设计・製作方法を一部適用することを早期に決定し、高信頼性を保ち、かつ工程短縮の実現を目指した設計をスタートさせた。一方、アンテナ設備とインタフェースする他設備に対しても、主要な設備間インタフェースを基本設計の早い段階で決定し、技術リスクを軽減する調整を行うことで設計フェーズでの検討作業を加速した。

大型アンテナ特有の課題として、特に製作フェーズでの特殊加工技術課題や大型構造物の保管などに困難が伴い、据付工事フェーズでも、現地への輸送車両や据付工事エリ

アの制約があり通常輸送での計画ができない困難も生じた。試作品での検証や保管期間の短縮化、JIT(Just In Time)輸送出荷を徹底するなど、開発工程の遅延リスクを減らす対策を講じることで、設計開始から据付工事完了までを約18か月間で実施し、次工程である現地試験フェーズへの移行を実現した。

## 3. アンテナ設備とS帯1kW電力増幅装置

### 3.1 アンテナ設備の構成と主要性能

アンテナ設備は、アンテナ装置(機構部/放射給電部)、アンテナ制御装置、プログラム追尾装置、捕捉アンテナ及び付帯設備で構成している。アンテナ装置は、公称直径20mのカセグレン形アンテナで、S帯の送受信機能及びX帯の受信機能を持ち、2軸(AZ(方位角)/EL(仰角))制御で衛星追尾を行う。また、アンテナ装置で受信したRF(Radio Frequency)信号(S帯/X帯)を送受信測距設備<sup>(注1)</sup>へ出力する。アンテナ制御装置は、送受信測距設備から出力された追尾誤差信号を基に各軸の誤差演算を行い、アンテナ装置の制御を行う。プログラム追尾装置は、送受信測距設備から送信されたアンテナ予報値をアンテナ制御装置へ送信する機能を持ち、衛星の初期捕捉のためのサーチ機能を持つ。捕捉アンテナは、S帯電波受信による自動追尾機能を持ち、衛星異常時及びアンテナ予報値精度が保証されないなどの場合に、送受信測距設備からの制御によって使用される。また、捕捉アンテナで受信したRF信号(S帯)を送受信測距設備へ出力する。付帯設備は、作業用に通話できる機能及び信号を中継する機能を持つ。主要性能を表1に示す。

(注1) JAXAによって別途整備された設備

表1. アンテナ設備の主要性能

項目	主要性能
アンテナ形式	集束ビームカセグレンアンテナ
マウント方式	AZ/ELマウント
駆動範囲	AZ軸: ±270°以上 EL軸: 0~90°以上
最大角速度	AZ軸: 7°/s以上 EL軸: 2.5°/s以上
最大角加速度	AZ軸: 2.5°/s <sup>2</sup> 以上 EL軸: 2.5°/s <sup>2</sup> 以上
耐風性	運用: 最大20m/s 駆動可能: 最大35m/s 非破壊: 最大60m/s
耐震性	水平方向: 0.2G 垂直方向: 0.2G
送信出力周波数	S帯: 2,025~2,120MHz
受信入力周波数	S帯: 2,200~2,300MHz X帯: 8,025~8,500MHz
アンテナ利得	S帯送信: 48.5dBi以上 S帯受信: 49.3dBi以上 X帯受信: 61.5dBi以上
雑音温度	2,200MHzで87K以下 8,025MHzで65K以下 (晴天時, 仰角5°, 気温25℃)



図1. アンテナ設備(画像提供: JAXA)



### 3.1.1 S/X帯給電方式

S/X帯給電部を上部機器室の限られたスペースに実装するため、S帯を反射し、X帯を透過する周波数選択反射鏡(Frequency Selective Reflector: FSR)を採用し、給電部を分散するとともに、S帯用に集束反射鏡を採用することによって、給電部の小規模化を実現した。図2にレイアウトを示す。FSRを用いることによってS/X帯を分波する機能が不要になり、給電損失が最小限にとどめられる。また、一次放射器のビーム幅を帯域ごとに最適化できるため、開口能率の周波数特性も個別に最適化でき、双方の周波数帯で高能率性を両立させることが可能となった。

### 3.1.2 駆動速度と可視パス比率

衛星追尾でEL角度が高くなるほど、AZ駆動速度が必要になるが、このアンテナはAZ駆動速度を当社大型アンテナでは最速(従来比: 40%増)となる $7^{\circ}/s$ を実現した。これによってALOS-2軌道で追尾可能なEL角度は $84.3^{\circ}$ となり、AZ/ELマウント形式のアンテナで可視パス比率(可視パス/全パス)98.6%を達成している(図3)。

### 3.1.3 アンテナ機器室の設置

アンテナセンターリング内部に上部機器室、AZ台車上に下部機器室と2つの機器室を設けた(図4)。

送信設備及び受信設備のRF装置を上部機器室に実装することによって、給電線による損失を最小限に抑えている。

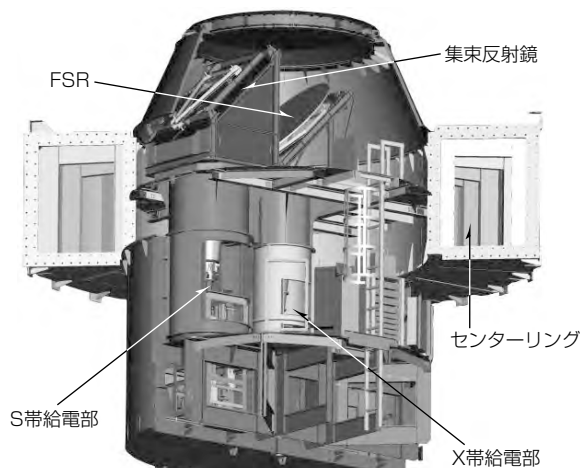


図2. 上部機器室内部のレイアウト

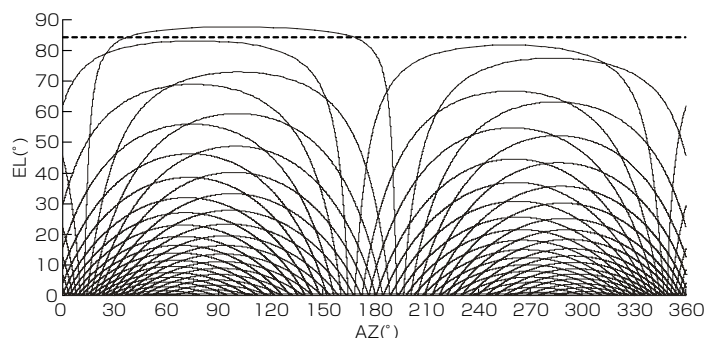


図3. アンテナ可視(ALOS-2軌道)

また、下部機器室を設けることによって、アンテナ基礎部下や周辺にアンテナ設備の機器を収容するための建屋などの建設が不要となる。

### 3.2 S帯1kW電力増幅装置

衛星追跡管制システム用のS帯1kW電力増幅装置を開発した。近年、地球温暖化や電気料金の高騰などから、低消費電力化の要求が強まっている。衛星追跡管制システムの中で、送信用電力増幅装置の消費電力の割合は大きく、特に消費電力低減の要求が強い。この装置は、最大出力(1kW)時の消費電力だけではなく、定常運用(100~300W)時の消費電力を抑えた設計としている。特に、低出力時に消費電力を抑えるエコモードを搭載した。

#### 3.2.1 S帯1kW電力増幅装置の構成

図5にS帯1kW電力増幅装置のブロック図、図6に外観を示す。前段にはプリアンプを持ち、後段は、200W出力HPA(High Power Amplifier)パネルを8台合成して、1kW出力を実現している。出力部には、高調波及び受信帯を抑圧するフィルタ、アンテナ/ダミー切替え用のスイッチ及び出力電力レベルのモニタリングが可能なパワーメータを持っている。プリアンプには可変減衰器を内蔵し、コリメーション設備対向から衛星対向に必要な電力範囲(10mW~1kW)に対応している。

#### 3.2.2 主要性能

表2にS帯1kW電力増幅装置の主要性能(設計値)を示す。

#### 3.2.3 消費電力の低減方法

##### (1) 増幅素子の動作級

出力電力は衛星の性能、状態によって変更可能で、緊急時は1kWの高出力、定常運用時は100~300W出力で使用する。使用した最終段のGaN FET(Field Effect Transistor)の動作級はAB級とし、低出力時の消費電力を抑えている。

##### (2) 飽和電力の最適化

HPAは飽和電力近くで動作させる程、効率が高くなる

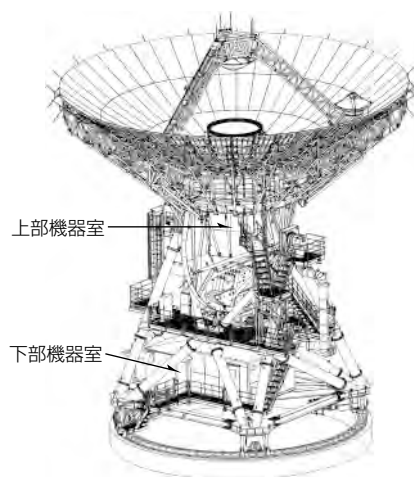


図4. アンテナ機器室

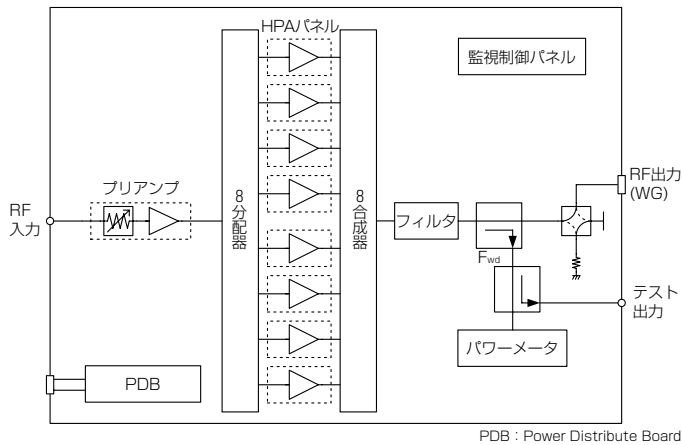


図 5. S帯 1 kW電力増幅装置のブロック図

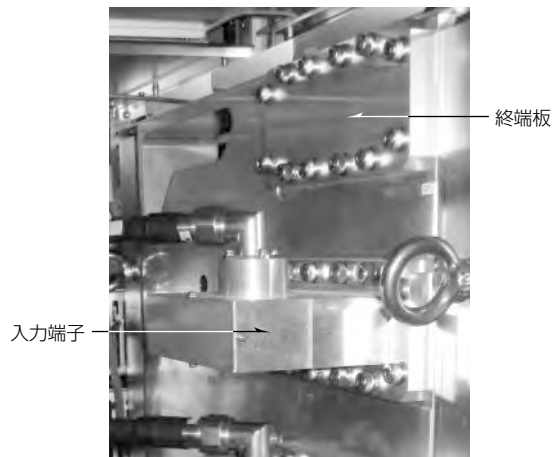


図 7. 導波管合成器の入力端子部分



図 6. S帯 1 kW電力増幅装置の外観(画像提供：JAXA)

表 2. S帯1kW電力増幅装置の主要性能

項目	性能
周波数範囲	2,025～2,120MHz
最大出力電力	1 kW以上
利得	60dB以上
可変利得範囲	0～-63.75dB, 0.25dBstep
消費電力	7.5kVA以下(従来比30%減)

傾向がある。低出力時は飽和電力に余裕がでるため、バイアス制御によって飽和電力を最適化した動作モード(エコモード)を備えることで、低消費電力化を図った。

### (3) HPAパネルの合成数の最適化

一般的に使用される合成器は、2のn乗の合成数となることが多い。今回開発した合成器は、合成数を任意の数に変更可能な導波管合成器<sup>(1)(2)</sup>を開発して採用した。

図7に導波管合成器の入力端子部分の写真を示す。最大8合成が可能な導波管合成器の1つの端子を終端板に変更することによって、7合成器として動作している。

表3に、出力電力に対する消費電力の測定結果を示す。当社従来品と比較して、1kW出力時は52.6%減、300W出力(エコモード)時は64.5%減を達成した。6台でも1kW出力は可能であるが、故障時の利得低減量を抑えるため、7合成を採用した。

表 3. 消費電力の測定結果

	消費電力	従来比	備考
1kW出力時			
8合成時	5.08kVA	40.5%減	
7合成時	4.05kVA	52.6%減	採用
6合成時	3.60kVA	57.9%減	
300W出力時(エコモード)			
8合成時	4.07kVA	59.7%減	
7合成時	3.59kVA	64.5%減	採用
6合成時	2.04kVA	79.8%減	

## 4. む す び

勝浦S/X帯20m大型アンテナ設備の特長や開発計画の課題と対策、及びアンテナ設備とS帯1kW電力増幅装置について述べた。この設備は、現地据付工事後に、現地設備内試験及び他設備とのインテグレーション試験を実施し、2013年9月にJAXAへ納入した。今後は、ALOS-2などの地球観測衛星や近地球科学衛星の追跡管制運用・ミッション運用で利用され、様々な運用に供するものと考えている。当社としては、約10年ぶりの大型アンテナ設備の建設であり、自社開発を進めた1kW電力増幅装置の製品化も含め、有識者の意見・ノウハウも取り入れながら無事完成に至った。この設備の開発に際し、JAXAの多大な支援を始め、多くの関係者からの支援・協力に対し深謝する。

## 参 考 文 献

- (1) 廣田明道, ほか: 入力数変更可能なS帯導波管電力合成回路の試作評価, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, C-2-89 (2013)
- (2) 廣田明道, ほか: 入力数変更可能なS帯導波管電力合成回路の設計, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, C-2-72 (2013)

# すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ“HSC”

江崎 豊\*  
遠藤 真\*

Hyper Wide-field Prime Focus Camera "HSC" for Subaru Telescope

Yutaka Ezaki, Makoto Endo

## 要 旨

すばる望遠鏡は、三菱電機が製造取りまとめを行った世界最大級の光学赤外線望遠鏡で、建設以来、世界最高レベルの性能を発揮し、多くの成果を上げている。

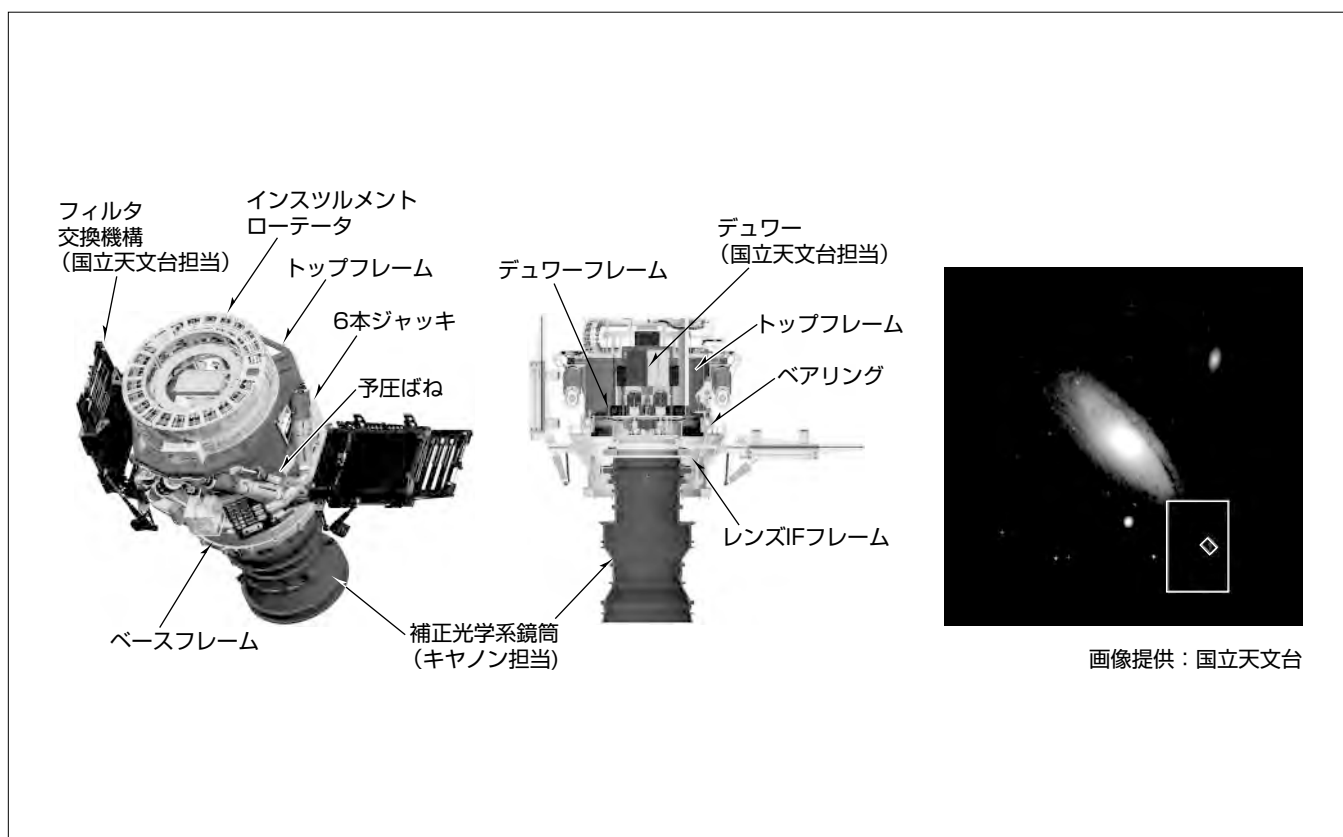
HSC(Hyper Suprime-Cam)計画は、すばる望遠鏡の主焦点部に広視野化したカメラを搭載することによって、サーベイ観測によるダークエネルギー計測を早期に実現することを目的とするプロジェクトである。2007年から基本設計を開始し、2013年7月16日、新主焦点ユニットを国立天文台に納入した。また、7月31日には、HSCが捉えたアンドロメダ銀河の画像が国立天文台によって公開された。

HSCは大きく分けて、カメラ部、補正光学系、主焦点ユニットの3つの要素で構成されており、当社は主焦点ユニットを担当した。新主焦点ユニットは、望遠鏡の筒頂部

に取り付けられる。補正光学系やカメラユニットなどで構成される約2.2トンの構造物を6本のジャッキで支え、この6本のジャッキが協調しながら、さらに、望遠鏡とも連動して伸縮することで、望遠鏡の傾きの変化によるたわみを補正し、主鏡に対する距離、横ずれ、傾きの5軸の位置合わせを数 $\mu\text{m}$ の精度で行っている。また、望遠鏡の回転にあわせてカメラユニットを回転させるインストルメントローテータを備え、追尾に伴う視野回転を約2.2秒角の精度で補正している。これらの装置が望遠鏡と協調してカメラユニットや補正光学系を駆動することで、シャープな星像の実現に寄与している。

本稿では、新主焦点ユニットの技術と、実現への課題と対策について述べる。

特集  
I



画像提供：国立天文台

## 新主焦点ユニットとHSCが捉えた画像

左に示すのが新主焦点ユニットの外観と断面である。右に示すのが、HSCが捉えたアンドロメダ銀河の画像である（枠内は従来の主焦点カメラの視野）。

## 1. ま え が き

すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラHSCはこれまでの主焦点カメラの7倍の視野を確保し、ダークエネルギーの計測を目的とする世界最高性能<sup>(注1)</sup>のサーベイカメラである。当社は、この重さ数トンのカメラ全体を数 $\mu\text{m}$ の位置精度で制御しながら望遠鏡上で安定した観測姿勢を保持するための機構を開発し、シャープな星像の実現に寄与している。本稿ではその技術概要について述べる。

(注1) 2013年7月31日現在、当社調べ

## 2. HSC計画概要

### 2.1 すばる望遠鏡の強み

すばる望遠鏡(図1)は、単一鏡の望遠鏡では世界最大級の光学赤外線望遠鏡であり、当社が製造取りまとめを行った。口径8mクラスの望遠鏡では、世界で唯一<sup>(注2)</sup>主焦点を持ち、広視野・高解像度の観測ができることが特長である。

従来のすばる主焦点カメラ(Suprime-Cam)は、34分角 $\times$ 27分角(およそ満月1個分)の視野を持ち、当時は世界最高の探査能力で、最遠方銀河の検出、重力レンズ現象を用いたダークマター分布の測定、銀河団の大規模構造の観測等、大きな成果を上げてきた。

(注2) 2013年7月31日現在、当社調べ

### 2.2 HSC計画

一方で、1990年代の後半に宇宙の加速膨張が観測され、その原因となるダークエネルギーが大きな研究課題となった。

Suprime-Camを使ってダークエネルギー研究を進める観測計画が検討されたが、従来のSuprime-Camの能力では、研究に十分なデータを集めるまでに50年以上もかかることが分かり、より高効率(広視野)の観測装置が必要となった。

HSC計画は、すばる望遠鏡の主焦点部を改造し、広視

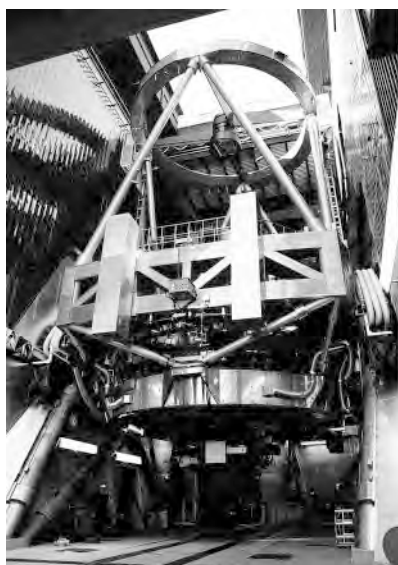


図1. すばる望遠鏡(画像提供：国立天文台)

野化したカメラを搭載することによって、サーベイ観測によるダークエネルギー計測を早期に実現することを目的とするプロジェクトである。

## 3. 新主焦点ユニット

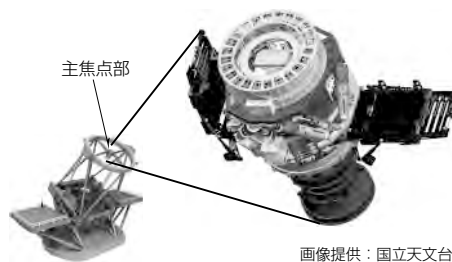
### 3.1 装置の構成

HSCは、すばる望遠鏡の筒頂部に取り付ける、いわば巨大なデジタルカメラである(図2)。大きく分けて、カメラユニット、補正光学系、主焦点ユニットの3つの要素で構成されており、当社は主焦点ユニット及び望遠鏡本体の改造を担当した。

図3に主焦点ユニットの外観、断面を示す。

主焦点ユニットは、ベースフレームで望遠鏡に固定される。トップフレームの下部にベアリングがあり、その外輪からレンズIFフレームを介して、補正光学系鏡筒を取り付けている。

補正光学系鏡筒は、レンズの材料と熱膨張率を合わせるため、また鏡筒を軽量化するために、コージライト(セラミックの一種)が採用されており、そこに熱応力を及ぼさないため、レンズIFフレームには低熱膨張のインバー合



画像提供：国立天文台



図2. 望遠鏡に搭載された主焦点ユニット

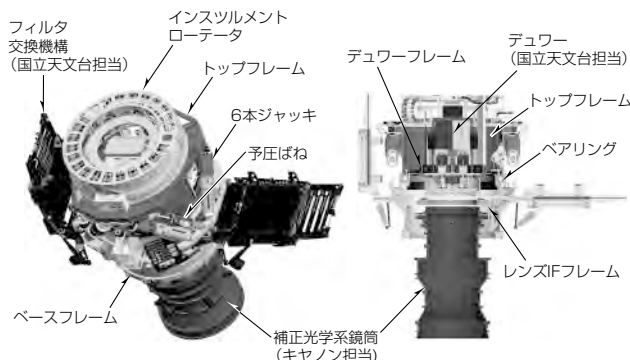


図3. 主焦点ユニット



金を採用した。

カメラユニットはベアリングの内輪：回転側から、デューフレームで補正光学系鏡筒の真上に支持されている。この部分は、軸回りに回転可能であり、回転させる装置をインスツルメントローテータと呼んでいる。トップフレームから先の部分は、合計で約2.2トンの重さになるが、これを6本のジャッキで支えている。

次に述べる6本ジャッキやインスツルメントローテータが、望遠鏡と協調してカメラユニット、補正光学系を駆動することによって、静止した画像を撮ることが可能になっている。

### 3.2 6本ジャッキ

望遠鏡で星を追尾すると、望遠鏡の重力方向に対する傾きが徐々に変化する。この変化によって望遠鏡のたわみ方が変わり、主焦点ユニットと主鏡の相対位置関係がずれていき、像がぼけてしまう。

このずれを補正するのが、6本ジャッキの役割である(図4)。

6本のジャッキが協調しながら、さらに、望遠鏡とも連動して、伸び縮みすることによって、主鏡に対し、(主焦点ユニットの)距離、横ずれ、傾きの5軸のずれを補正している。このジャッキは自社開発したもので、駆動系、検出系配置の最適化によって、数 $\mu$ m台の駆動精度を実現している。

### 3.3 インスツルメントローテータ

インスツルメントローテータはカメラユニットの回転方向の補正機構である。

すばる望遠鏡の架台は、経緯台方式であるため、星を追

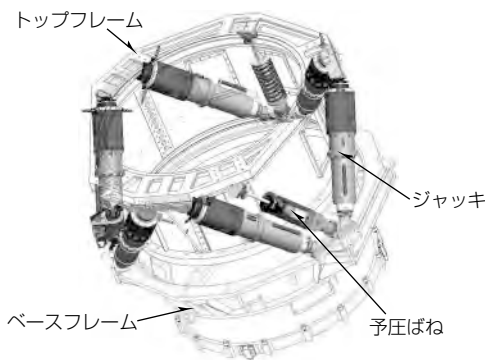


図4. 6本ジャッキ機構



図5. ケーブル巻取機構

尾する間に星像が画面の中央を中心にして回転する視野回転という問題がある。静止した画像を撮るためには、望遠鏡の回転にあわせてカメラユニットの方を回転させる。

HSCの場合、広視野化によって焦点面が大径化しており、回転駆動の誤差が視野端の像劣化に及ぼす影響が大きくなるため、高い駆動精度が求められたが、2台のモータを対向させて、ガタをなくすアンチバックラッシュ方式や光学式検出器の採用を含む、駆動系・検出系の最適設計によって、回転駆動の精度は約2.2秒角を実現している。

### 3.4 ケーブル巻取機構

インスツルメントローテータの固定側と回転側の間には、サーキュラーチェーン式のケーブル巻取機構(図5)を設け、カメラユニットへの、電源線、信号線、光ファイバ、冷却水、エア配管等は、全てこのケーブル巻取機構を通してしている。

この方式のケーブル巻取機構自体は、他分野の装置にも使用例があるが、望遠鏡に搭載する場合、取付け姿勢が天頂向きからほぼ水平まで変化するという独特の要求があり、ケーブルの重さを支え、スムーズにケーブルをガイドするように、磁石の吸着力を利用している(特許出願中)。また、万が一の巻取機構の動作異常時に、機械的に過負荷状態を検出して、インスツルメントローテータの駆動を止める過負荷検知機構を備えている。

## 4. 実現への課題と対策

### 4.1 主焦点ユニット

#### 4.1.1 省スペース化・軽量化

表1に示すとおり、HSCでは補正光学系が従来よりも大型化している。一方、主焦点ユニットへの制限質量(3,000kg)は従来と変わらない。この重量物を組み込みながら、望遠鏡に搭載可能な装置とするため、主焦点ユニットの大幅な省スペース化・軽量化が求められた。

実現に向けては、各部位に目標質量を割り付け、軽量化のアイデア(例：ジャッキ外筒をチタン化)を出し、その場合の性能、限界質量を一つ一つ構造解析で評価し、軽量化を図った。

#### 4.1.2 補正光学系鏡筒の熱応力の緩和

当初レンズIFフレームはアルミで製作する予定であったが、補正光学系鏡筒に、コージライト(セラミックの一種で低熱膨張)が採用され、組み込み時から温度が10℃変化するだけでも、熱応力で即時破壊することが分かり、構造・材料の検討が必要となった。

表1. 補正光学系鏡筒の寸法、質量

	S-Cam(従来品)	HSC(従来比)
視野角直径	0.5°	1.5° (3倍)
鏡筒直径	600mm	970mm (1.6倍)
長さ	730mm	1,675mm (2.3倍)
質量	175kg	893kg (5.1倍)

対策として、レンズIFフレームを低熱膨張の材料で製作し、熱膨張係数をコージライトに近づけて熱応力を低減した。

材料の候補として、CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)とインバーを検討し、部分試作まで実施したが、フレームが複雑な形状で積層欠陥が発生するなどのリスクを考慮して、インバーを採用した。

#### 4.1.3 補正光学系とカメラユニットの相対変位

望遠鏡と同様、主焦点ユニット自身も傾きの変化によってたわみ方が変化する。その結果、補正光学系とカメラユニットの相対位置関係がずれ、結像性能悪化の原因となる。

主焦点ユニットは、この相対変位に対する補正手段を持たないため、ユニットの剛性設計が重要である。

剛性設計では、相対変位の結像性能への影響を考慮して、変位の配分値を設定し、軽量化や熱応力緩和の要求と両立するように構造解析を繰り返して構造を決定した。

実機での検証は、望遠鏡搭載状態を模擬するよう、主焦点ユニットを傾けて相対変位を測定、解析結果と比較し、配分値を満たしていることを確認した。

### 4.2 望遠鏡本体の改造

#### 4.2.1 望遠鏡の追尾性能の維持

4.1.1項のとおり、主焦点ユニットとしては軽量化に努めたが、望遠鏡としては搭載質量が増えるため望遠鏡の追尾性能の劣化が懸念された。

追尾性能への影響を把握するため、望遠鏡の構造モデルに新主焦点ユニットに相当する質量を付加したモデルで応答解析を行い、従来の望遠鏡モデルと比較した。

その結果、EL(エレベーション)軸周りの釣合いが取れていれば、鏡筒全体の質量が増加しても、追尾性能にはほとんど影響がないことが分かった。この結果に基づき、望遠鏡の鏡筒にEL軸周りの釣合いが取れるようカウンタウェイトを取り付け、駆動試験を実施し、ステップ入力、ランプ入力に対する応答によって、架台駆動制御装置側で制御パラメータを調整することなく従来と同等の追尾性能を確認した。

#### 4.2.2 制御装置、機器間配線の共有

6本ジャッキやインスツルメントローテータは、制御棟にある制御装置から制御されるが、これらの制御装置と主焦点ユニットを接続するケーブルは全て、望遠鏡のAZ(アジマス)/ELのケーブル巻取を通る。事前調査の結果、これらのケーブル巻取には空きスペースがほとんどなく、また巻取を増設して新たにケーブルを敷設することも困難であることが分かった。

工事による運用停止期間を短縮するには、制御装置とケーブルを既存のトップユニットと共用できるかが鍵であった。

対策としては、各制御装置の負荷率を確認、新規製作が必要か、既存品の改修で実現可能かを見極め、新規製作すべきものについては、HSC計画への参画前に計画していた制御装置の更新計画を見直し、既存のトップユニットと

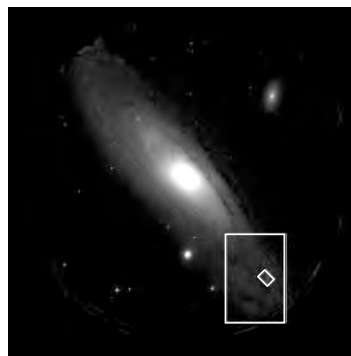


図6. HSCが捉えたアンドロメダ銀河の画像  
(画像提供：国立天文台)

新主焦点ユニットで共用できる制御装置を新主焦点ユニットの導入と同時に完成させた。

#### 4.2.3 運用停止期間の分散

設計当初、望遠鏡改造から、新主焦点ユニットの据付調整、性能確認までの作業期間を試算したところ、工事による観測運用停止期間は約3か月の見込みであった。長期間連続して望遠鏡の運用を停止することは許容されないため、望遠鏡の改造工事を2010年に主鏡蒸着作業と並行して行い、主焦点ユニットの据付調整は2011年から開始するようにスケジュールを見直し、運用停止期間を分散した。

## 5. む す び

新主焦点ユニットの開発は、2007年から基本設計を開始し、工場での組立・試験や現地での試験調整を経て、2013年7月16日、国立天文台に納入した。

また、7月31日には、HSCが捉えたアンドロメダ銀河の画像(図6)が公開された。図中の枠は従来の主焦点カメラの視野を示す。従来よりもはるかに広い視野で鮮明な画像が得られていることが分かる。

今後は、2014年から5年間にわたる観測が計画されている。空の広い領域、かつ遠い宇宙にある暗い銀河までくまなく観測する、言わば“宇宙の国勢調査”によって、ダークエネルギーの正体に迫る観測が期待されている。

## 参 考 文 献

- (1) すばる望遠鏡トピックス、新型の超広視野カメラが開眼、ファーストライト画像を初公開  
[http://subarutelescope.org/Topics/2013/07/30/j\\_index.html](http://subarutelescope.org/Topics/2013/07/30/j_index.html)
- (2) HSCプロジェクト(国立天文台ホームページ)  
[http://subarutelescope.org/Projects/HSC/j\\_HSCProject.html](http://subarutelescope.org/Projects/HSC/j_HSCProject.html)
- (3) 林 正彦：すばる望遠鏡の観測成果、日本物理学会誌、**63**, No.2, 86~92 (2008)
- (4) 宮崎 聡：すばるで観測する宇宙の暗黒成分、日本物理学会誌、**63**, No.2, 112~119 (2008)

# 高精度気象観測システムの実現に向けた ひまわり 8, 9 号の衛星システム設計

高原 修\* 小野寺義範\*  
磯部昌徳\*  
米地寛夫\*

*Satellite System Design of Himawari-8, -9 for High Accurate Meteorological Observation*

*Osamu Takahara, Masanori Isobe, Hiroo Yonechi, Yoshinori Onodera*

## 要 旨

気象衛星ひまわりは、1978年の1号機の運用開始以来、現在運用中の7号機まで我が国の気象観測には欠かせない存在となっている。また、アジア太平洋諸国の30以上の国や地域に観測情報を配信し、これら地域の気象観測、災害監視に対しても、大きな役割を果たしている。

三菱電機は、現在運用中のひまわり6, 7号の後継機として、2014年、2016年にそれぞれ打ち上げが計画されているひまわり8, 9号の衛星システム及び放射計データ処理ソフトウェアを受注し、開発を進めている。ひまわり8, 9号には、先進的な次世代の放射計を世界に先駆けて搭載する計画となっている。

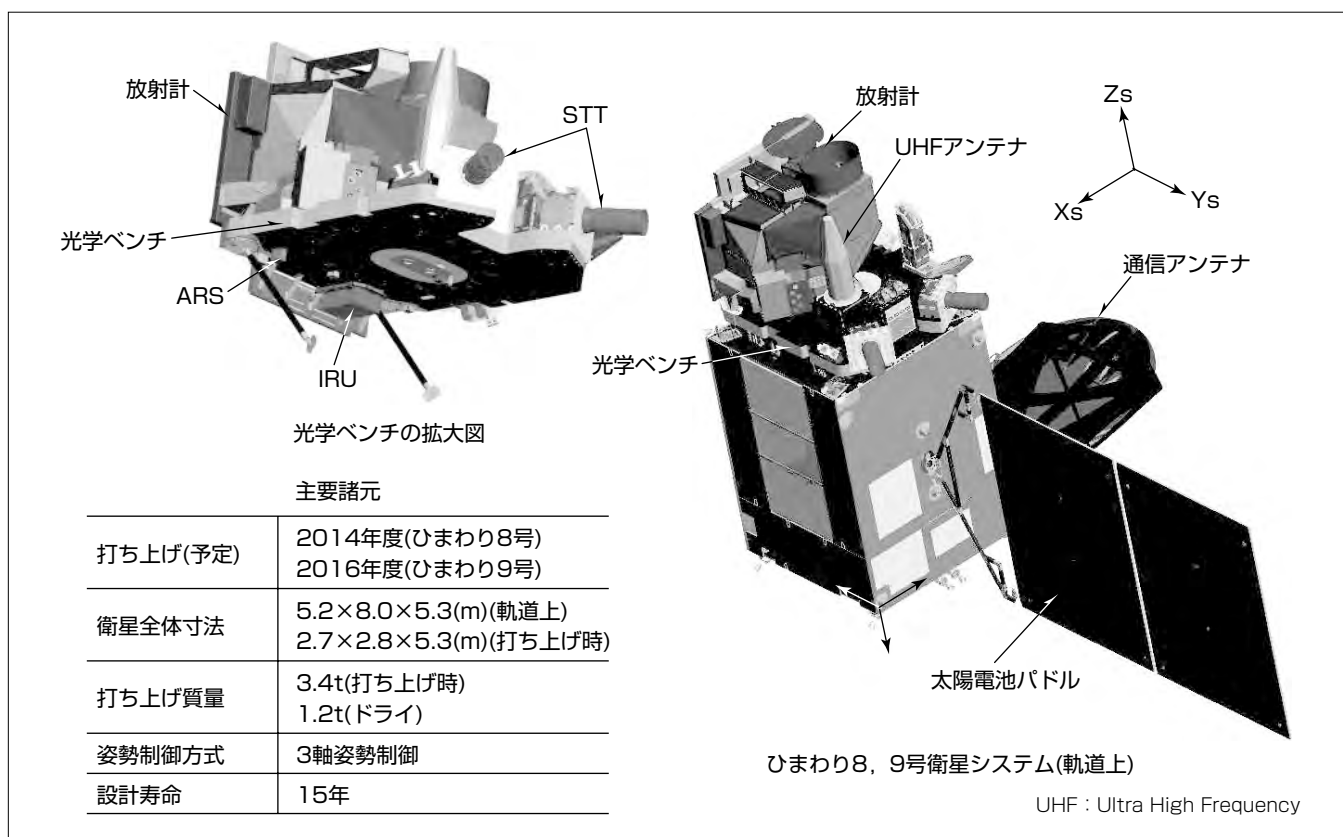
この放射計は、ひまわり7号に搭載のイメージャーと比べて画像の解像度は、約2倍の高精細となり、また、地球

全体の観測にかかる時間を、約1/3に短縮する上、日本域などの小領域を高頻度に観測可能となる。

一方、放射計での観測精度実現には、放射計を搭載する衛星バスシステムも、従来に比べて高い要求仕様が設けられている。その仕様を満たすため、衛星バスシステムでは、低熱歪(ひずみ)光学ベンチ、高精度姿勢制御系システム、低擾乱(じょうらん)アクチュエータの採用による擾乱低減を図るとともに、地上処理における画像補正のために、高精度・広帯域に光学ベンチの姿勢を計測・決定する機能も持っている。

本稿では、ひまわり8, 9号の概要について述べるとともに、高精度気象観測を実現するために、衛星バスシステムに採用する複数の技術について述べる。

特集  
I



## ひまわり8, 9号衛星システム及び光学ベンチの拡大図

ひまわり8, 9号は、気象ミッション単独衛星であり、搭載する放射計の熱入力条件が厳しいため、北面側への機器搭載をしない構成となっている。衛星バスシステムのアースパネル面に低熱歪の光学ベンチを設け、この光学ベンチ上に放射計を搭載する。この光学ベンチ上には光学ベンチの姿勢を高精度広帯域に決定するために、恒星センサ(STT)、慣性基準装置(IRU)、角速度センサ(ARS)等を搭載する構成となっている。

## 1. ま え が き

ひまわり 8, 9 号は、現在運用中のひまわり 6, 7 号の後継機として、当社が衛星システム及び放射計データ処理ソフトウェアを受注し、開発を進めている衛星である。この衛星には、従来の 2 倍の分解能を持ち、地球全体観測の時間を 1/3 に短縮化するなどの特長を持つ先進的な次世代の放射計が搭載される。この高性能な放射計による観測を実現するため、衛星システムでも低熱歪光学ベンチの採用、高精度姿勢制御システムの採用、低擾乱アクチュエータの採用による高周波擾乱対策を図っている。また、放射計が搭載される光学ベンチの姿勢を高精度に決定するためのセンサを複数搭載し、これらの角速度データによる決定値を用いて、地上で高精度な画像補正を行うためのデータ処理が可能なシステムを構成している。

本稿では、ひまわり 8, 9 号の概要について述べるとともに、高精度気象観測システムの実現のため、衛星バスシステムで採用される技術について述べる。

## 2. ひまわり 8, 9 号の概要

ひまわり 8, 9 号は、可視赤外放射計による観測ミッションと気象データの中継機能ミッションを目的とした衛星で、それぞれ 2014 年、2016 年に打ち上げを予定している。これらの衛星は、前号機（ひまわり 7 号）と同様に、三軸姿勢制御型の静止衛星であり、衛星バスは前号機同様、（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）の技術試験衛星Ⅷ型（ETS-Ⅷ）をベースとする当社衛星標準バスシステム“DS2000”を適用している。ただし、衛星設計寿命は、前号機の 10 年に対して、15 年とより長寿命を目指した設計となっている。現在、詳細設計を完了し、打ち上げに向けてひまわり 8 号の製造及び試験を実施中である。

この衛星に搭載される可視赤外放射計は、米国の気象衛

表 1. ひまわり 8, 9 号とひまわり 7 号の観測運用比較

観測モード	頻度	
	ひまわり 8, 9 号	ひまわり 7 号
全球観測	1 回/10 分	1 回/30 分
日本付近観測	4 回/10 分	なし
台風観測	4 回/10 分	なし
ランドマーク観測	20 回/10 分	なし
積乱雲観測	20 回/10 分	なし

表 2. ひまわり 8, 9 号とひまわり 7 号の観測チャンネル数比較

機種	チャンネル数
ひまわり 8, 9 号	16ch
ひまわり 7 号	5 ch

表 3. ひまわり 8, 9 号とひまわり 7 号の空間分解能比較

	空間分解能	備考
ひまわり 8, 9 号	0.5km	可視(波長帯0.625~0.660μm)
ひまわり 7 号	1 km	可視(波長帯0.55 ~0.90μm)

星 GOES-R 向けに開発された ABI (Advanced Baseline Imager) と同等性能のもので、世界に先駆けての採用であり、表 1 に示すように、従来のイメージャー（ひまわり 7 号機に搭載）と比較し、観測運用性の飛躍的向上が図られている。例えば、地球全球観測については、1 回/10 分と、前号機に比べ、1/3 に短縮される。また、観測可能な波長帯が細分化され、表 2 に示すように、そのチャンネル数が、3 倍に増加するとともに、表 3 に示すように、観測波長帯に依存するものの空間分解能も 2 倍に向上し、高精度かつ高速な気象観測が可能となる。

また、搭載系及び地上処理系では、光学ベンチの姿勢計測を行うために異なる周波数帯域の複数のセンサデータを組み合わせて高精度・広帯域に姿勢計測及び決定を行い、地上で放射計画像の幾何補正に利用するデータを配信する機能を持っている。

さらに、通信系では、Ka 帯を利用した通信を採用し、地上局に送信された観測データは、画像処理を施され、インターネットなどを通じて、世界各国に配信される一方、前号機と同様、離島や航空機、船舶から UHF 帯を利用して送信される観測データを、地上局へ中継する機能を持っている。

## 3. ひまわり 8, 9 号の放射計視線誤差要求

ひまわり 8, 9 号に搭載される放射計による高精度観測実現に向けて、表 4 に示す放射計の視線誤差要求が規定されている。この要求仕様は、衛星バスシステムによる影響も含むものとなっており、この誤差要求を満たすため、衛星バスシステムでも種々の技術を採用している。4 章では、この要求仕様を満たすために、ひまわり 8, 9 号に採用する衛星バスシステム技術について述べる。

## 4. 高精度観測実現のための衛星バスシステム技術

### 4.1 衛星コンフィギュレーション設計

ひまわり 8, 9 号は、放射計の搭載に係る要求を満足し、

表 4. ひまわり 8, 9 号の放射計視線誤差要求

誤差項目			仕様値 (下段：規定時間)	主要因
大分類	中分類	小分類		
放射計 指向角 推定誤差	放射計 姿勢角 推定誤差	バイアス	—	
		ドリフト (長期変動)	14μrad (p-p) (600s)	IRU／光学ベンチ 間アライメント IRU／STT 間相対 熱変形等
		ジッタ (中・短期変動)	4μrad (1σ) (30/150/600s)	IRU, ARS ノイズ 等
	放射計 相対指向角 推定誤差	放射計内部 アライメント	±70μrad (0-p) (1day)	内部アライメント (熱変形も含む)
		放射計走査角 検出誤差	4μrad (RMS) (30/150/600s)	ミラーエンコード 誤差
		放射計高周波 視線変動		内部擾乱 (RWA, IRU, 冷凍機)

RMS : Root Mean Square



衛星システムの性能を達成する最適なコンフィギュレーションを実現する設計としている。次に、代表的な2つの特長について述べる。

#### 4.1.1 放射計の放熱面視野の確保

放射計は、赤外検知器の温度要求が厳しいことから、その冷却能力を阻害しない衛星コンフィギュレーションが求められる。ひまわり8, 9号では、太陽電池パドルを南面片翼とするなど、放射計が搭載される北面側には輻射(ふくしゃ)熱源となる外部搭載機器を配置しない設計としている。これによって、放射計放熱面は $\pm 90^\circ$ の視野を確保でき、放射計の放熱能力を最大限発揮させる理想的な熱制御環境を実現している(図1)。

#### 4.1.2 光学ベンチの低熱歪設計

ひまわり8, 9号では、高精度の観測ミッション要求を実現するために、光学ベンチに、恒星センサ(STT)、慣性基準装置(IRU)及び角速度センサ(ARS)を搭載している。これらのセンサを用いた高精度姿勢決定を実現するために、次の方策を適用している。

- (1) 光学ベンチへの全センサ一体化搭載による姿勢センサ間相対アライメント誤差の最小化
- (2) 光学ベンチをCFRP(炭素繊維強化プラスチック)製のシリンドラ構体に直接締結し、構体部の熱歪の影響を抑制
- (3) アルミ合金より2桁低い線膨張率を持つCFRPを表皮とするハニカムパネルの採用による光学ベンチの低熱歪化

これらの方策によって、表4で示す放射計姿勢誤差推定値(ドリフト成分)に対する熱変形の影響を抑制することが可能である。

### 4.2 高精度姿勢制御システム

放射計の画像位置合わせ処理における幾何精度実現のため、ひまわり8, 9号では、従来の搭載系で姿勢制御に必要となる低中周波領域の姿勢決定を行うことに加えて、地上処理系で高周波領域を含めた放射計の姿勢変動を決定し、画像補正に使用する高精度姿勢決定を行う。次では高精度姿勢制御システムの搭載系と地上処理系におけるそれぞれの特長を示す。

#### 4.2.1 衛星搭載系機器

ひまわり8, 9号では、高精度の観測ミッション要求を

実現するために、従来の地球センサ(ESA)に代えて、常時高精度で衛星姿勢を検出することができるSTTを搭載する。IRUは、そのおおよそ12Hzの帯域を十分に活用するため、従来の16Hzから128Hzへサンプリングレート向上を実現している。さらに、広帯域(2Hz~1kHzを検出可能)のARSによって光学ベンチの姿勢を512Hzサンプリングで計測し、放射計データとともに地上に伝送する構成となっている。

放射計のミッションデータ及び姿勢情報の地上配信は、ミッションデータコーディング装置(MDC)が行う。放射計とMDC及びMDCと衛星制御器(SCP)との間は、高速データバスとして近年採用が広まっているSpW(SpaceWire)インタフェースによって接続されている。MDCは、SCPからの時刻情報及び衛星内正秒タイミング信号を受信し放射計へ転送する。時刻データ及び衛星内正秒タイミングを放射計へ優先配信することによって放射計画像データと高周波姿勢データの時刻の等時性を保証している。これによって、地上の位置合わせ処理で、姿勢・レートを使用して画像を補正可能としている。

#### 4.2.2 地上処理における高精度・広帯域姿勢決定

地上処理系における高精度・広帯域姿勢決定系は、光学ベンチの姿勢を高精度・広帯域に決定する光学ベンチ姿勢決定系となっている。

光学ベンチ姿勢決定系は、光学ベンチに搭載したIRU, STT, ARSを用いて、高精度・広帯域に光学ベンチの姿勢を決定する。この姿勢決定フィルタは、オフライン姿勢決定処理(IRU・STTベース)を基本としている。STTを搭載し、姿勢基準値の精度を向上させるとともに、光学ベンチに搭載したARSとIRUを用いた相補フィルタによって、DC成分から広帯域まで観測帯域を持つ広帯域レートセンサを構成する。この広帯域の角速度推定値と、IRU・STTベースで決定した低中周波の姿勢決定値を用いて、光学ベンチの姿勢と角速度を高精度・広帯域に決定する。図2に高精度姿勢決定フィルタの構成を示す。

#### 4.3 放射計高周波指向変動対策(高周波擾乱対策)

3章の放射計視線誤差要求にも記載のように、高周波擾乱による放射計視線誤差要求が規定されており、この要求を満たすことも必要条件となる。ひまわり8, 9号には、

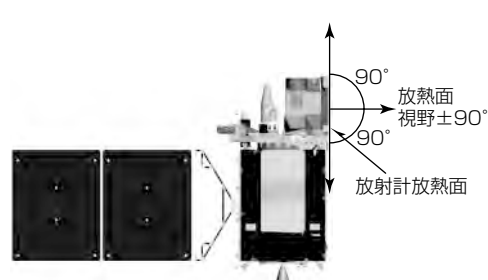


図1. 放射計放熱面視野

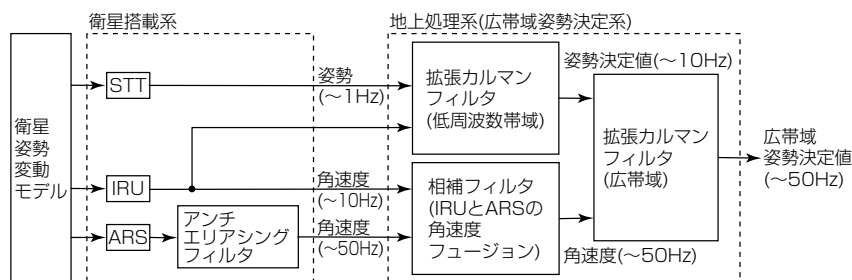


図2. 高精度・広帯域姿勢決定フィルタの構成

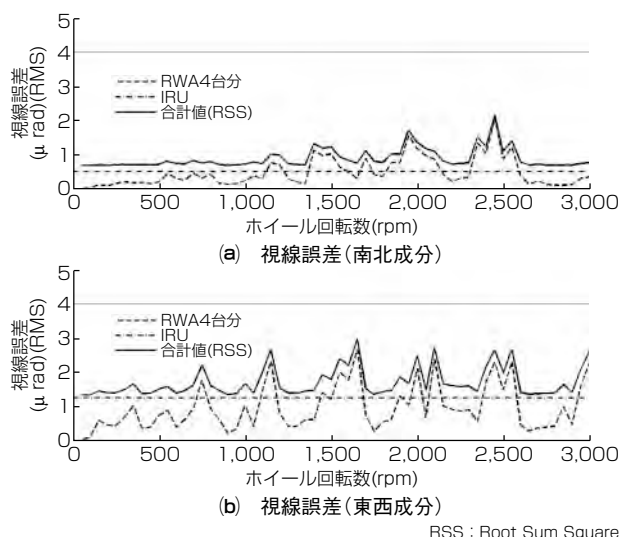


図3. 高周波擾乱解析結果(RWA 4 台+IRU)

通常の衛星と同様、リアクションホイール(RWA)4台、IRU1台が搭載され、さらに、放射計内部は、冷凍機も搭載されている。これらが、高周波擾乱を発生する擾乱源となるため、これらの擾乱が放射計の観測に対して影響を与えないよう方策を採る必要がある。また、これら方策が十分に機能していることを打ち上げ前に評価することも必要である。

#### 4.3.1 擾乱低減対策と擾乱解析

ひまわり8, 9号では、設計当初から放射計の視線誤差要求が厳しいこと、また、これまでの高精度観測衛星の開発経験からコンポーネントレベルでの擾乱低減対策が必要と考えており、その対策として、主要な擾乱源であるRWAは、当社の静止観測衛星では初となる低擾乱タイプのRWAを採用している。また、IRUについてもできる限り擾乱レベルの低いものを採用している。

一方、先に述べた擾乱源の擾乱低減対策だけでは、放射計の視線誤差要求を満足するとは言い切れない。そこで重要となるのが、擾乱による視線誤差への影響評価である。ひまわり8, 9号では、設計段階で、擾乱による影響を把握するため、衛星バスシステムに放射計モデルを組み込んだ有限要素モデルを用いて算出した擾乱源から光学ベンチインタフェース面(放射計搭載面)までの伝達関数、光学ベンチインタフェース面から放射計の指向軸までの伝達関数及び擾乱源の擾乱特性を用いた擾乱解析を実施した。図3は、RWAの回転数変化による視線誤差変動に、IRUによる定常成分の視線誤差成分を加えた結果である。この結果から冷凍機による視線誤差分を加えても要求仕様4μrad(RMS)を満足することを確認している。

#### 4.3.2 擾乱試験計画

設計段階で、擾乱解析による視線誤差予測は重要な役割を持つが、解析モデルと実機では必ずしも特性が一致しな

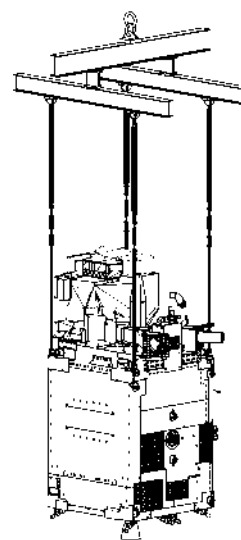


図4. 衛星システム擾乱試験

い。そのため、当社は、これまで開発した多くの高精度観測衛星で、地上で実機を用いた擾乱試験を実施し、性能評価を行っている。この擾乱による観測機器への影響評価は、“ひまわり7号”や太陽観測衛星“ひので”<sup>(1)(2)</sup>などで評価技術を蓄積しており、ひまわり8, 9号でもこれら技術を適用した評価試験を計画している。

擾乱試験では、可能な限り軌道上の両端自由境界条件を模擬する試験コンフィギュレーションを確立するとともに、微小振動の計測に影響を与える建屋などから伝播(でんぱ)する外来振動を低減するため、図4に示すように衛星バス全体をばねでつるコンフィギュレーションとする計画である。また、試験では、実際に軌道上での擾乱による影響を把握する目的からRWA, IRUなどの実際の搭載機器を駆動した場合に生じる放射計の視線誤差評価を行う計画である。

## 5. む す び

2014年、2016年打ち上げのひまわり8, 9号の概要について述べるとともに、この衛星で目標としている高精度観測を実現するための衛星システム設計技術について述べた。今後、これら技術を搭載した衛星は、製造及び試験を行い、地上試験で、観測性能要求を満足することを確認した後、打ち上げ予定である。世界初の放射計による高精度気象観測システムを実現するために、総力を挙げて取り組んでいく。

## 参 考 文 献

- (1) 高原 修, ほか: Solar-B微小擾乱伝達特性評価試験, 宇宙科学技術連合講演会講演集, 47, 1596~1599 (2003)
- (2) 高原 修, ほか: 光学計測による太陽観測衛星SOLAR-Bの指向誤差評価, 宇宙科学技術連合講演会講演集, 50, IE03 (2006)

# 陸域観測技術衛星 2 号 (ALOS-2) 衛星バス — 最先端レーダ観測を支える高性能衛星バスの先進性 —

橋爪 隆\* 鈴木新一\*\*\*  
笠間 緑\*\* 嶋岡恭志\*\*\*  
針生健一\*

Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2) Spacecraft Bus-system — Advanced Technology of High-performance Bus-system Supporting State of Art Rader Observation —  
Takashi Hashizume, Yukari Kasama, Kenichi Hariu, Shinichi Suzuki, Yasushi Hatooka

## 要 旨

陸域観測技術衛星 2 号“だいち 2 号” (ALOS-2) は、現在、(独) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の下、打ち上げに向けた準備作業が実施されている。

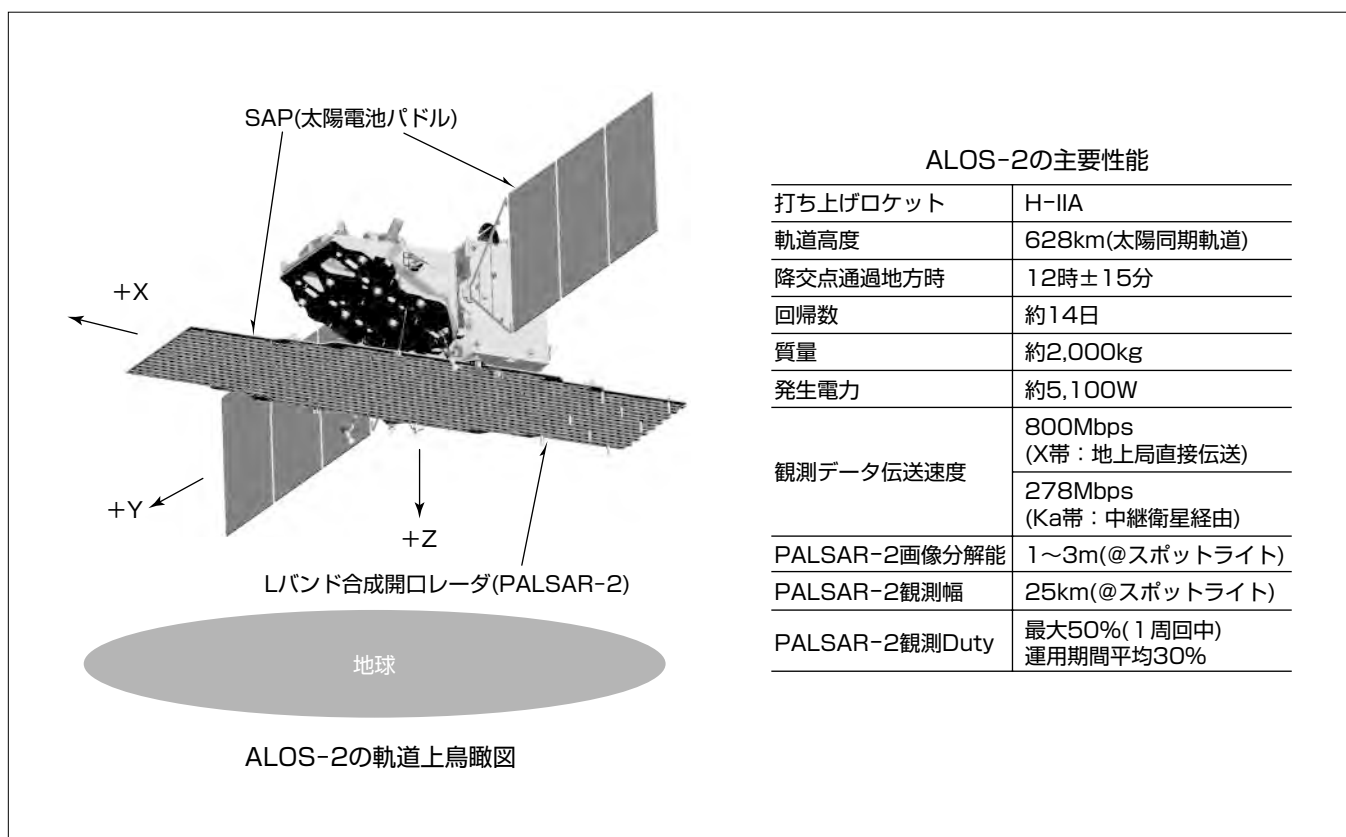
ALOS-2 は、L バンドの合成開口レーダ (PALSAR-2) をメインミッションとする電波観測衛星であり、“だいち”の後継機として、“だいち”のミッションを継続するものである。“いぶき”などで実績のある三菱電機周回衛星技術を踏襲することによって、確実な開発を行うことを基本方針にしている。それと同時に、衛星バスの高性能化、小型化

を目的として開発された機器も複数搭載している。具体的には、次の機器又は機能である。

- (1) 電力制御器 (PCU: JAXA 戦略コンポーネント)
- (2) 高速マルチモード変調器  
(XMOD: JAXA 戦略コンポーネント)
- (3) 観測テーブル方式 (PALSAR-2 の運用方式)

本稿では、これら 3 つの項目について、その新規性、発展性及び標準化への貢献について述べる。

特集  
I



## ALOS-2 の軌道上鳥瞰 (ちょうかん) 図と主要性能

ALOS-2 は、PALSAR-2 を主ミッション機器とし、JAXA 戦略コンポーネントなど新規開発バス機器を複数搭載した将来観測衛星の原型となる衛星である。

## 1. ま え が き

本稿では、ALOS-2に搭載されている高機能機器PCU、XMOD、及びPALSAR-2の観測テーブル方式に関して、その特長を述べる。

主に、PCUは小型化、XMODはデータ伝送高速化と回線品質の向上、そして観測テーブル方式は運用性の向上にそれぞれ貢献することを特長とする。以後、個別にそれらについて述べる。

## 2. 電力制御器(PCU)

周回衛星の電源系は従来、電力制御器(PCU)と余剰電力制御器(SSU)、及びバッテリー(BAT)によって構成され、日照中は太陽電池パドルから、日陰中はバッテリーから、それぞれ搭載機器にエネルギーを供給するシステムとなっている。

今回、電源系の小型化を実現するにあたり、小型化のキープポイントとしては次の4項目が挙げられる。

- (1) 従来の充電電流を一定電流に保つ制御方式をやめて、太陽電池アレー回路の定電流特性を利用してアレー回路から直接バッテリーに充電するチャージアレー方式を採用し、充電制御回路の簡素化、小型化を達成する。
- (2) SSUの機能をPCUに内蔵し、構成機器数を減らす。
- (3) 故障検知機能をデータ処理系の担当とし、機器の小型化を行う。
- (4) フィルムコンデンサ、電力用表面実装部品の使用など実装面での小型化対策を行う。

これらの対策を取り入れたPCUは最大出力120A(約6kW)

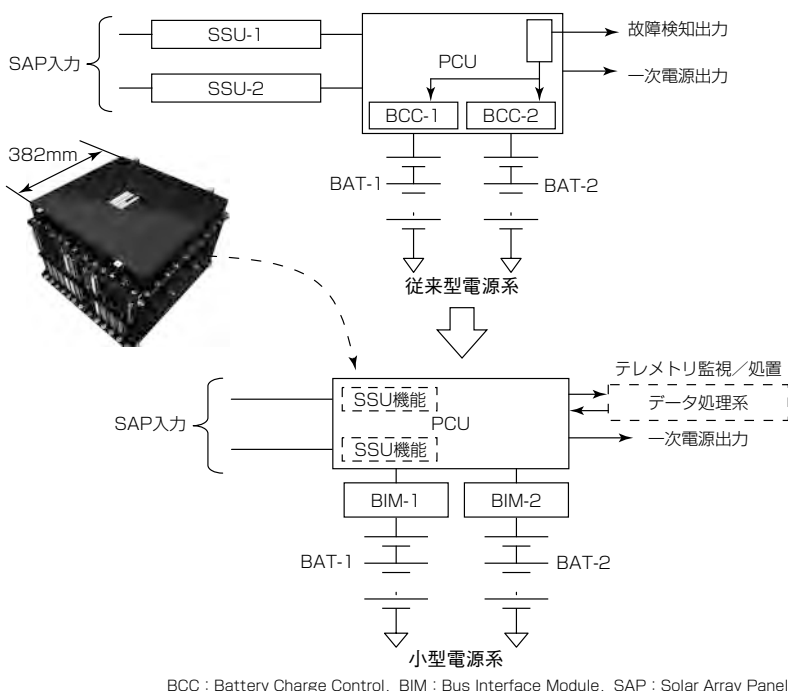


図1. 従来型電源系と小型電源系の比較

の供給能力を持ち、質量に関しては、従来型の40kgから19.4kgまで削減することに成功している。図1に従来型電源系との比較を示す。

海外他社などによって既の実施されているBAT1系統の構成に対して、(1)のチャージアレー方式はBAT2系統の接続が可能であることを特長としている。

充電電圧制御は、BATの上限しきい値電圧に到達した時点で、太陽電池アレー回路を、順次充電系統から切り離す方式を採用し、従来のCC(Constant Current)/CV(Constant Voltage)充電方式と同等な充電電流プロファイルを実現し、かつ回路規模の大幅な簡素化を図っている。

(2)に関しては、(4)の電力用表面実装部品の開発によるところが大きい。

(3)に関しては、データ処理系の変自律化機能によって、従来PCUがバス側に出力しているテレメトリを監視することで、故障検知機能を代替した。データ処理系が担当することによって、PCU側の回路設計規模を削減すると同時に、故障検知のしきい値(例えばバッテリー電圧値)などをコマンドで変更できるようになった。

(4)の実装面での小型化対策は、(2)のSSUの内蔵化も含めて小型化実現に大きく貢献したが、PCUが具備するパスキャパシタの大きさは、従来の1/10程度を前提として小型化を実現している。これは、電圧、電流変動に対する感度が従来型のPCUよりも10倍高くなることを意味する。そのため、パルスレーダであるPALSAR-2のRF(Radio Frequency)放射時の負荷電流が約20A程度変動するALOS-2では、大きな課題であった。

ALOS-2では、この課題をPALSAR-2側のRF放射電力の立ち上がり時間を抑制することによって解決した。この対策は、特にPALSAR-2側の観測性能を制限するものではない。

ALOS-2の負荷変動に対応できれば、光学観測衛星のように、負荷電流変化量が比較的小さな衛星には十分に対応できる。図2に負荷電流変化量に対応した電流変化率の許容レベルを示す。

また、最大出力120Aを超える負荷電流を必要とする衛星、又は、発生電力の変化が大きい

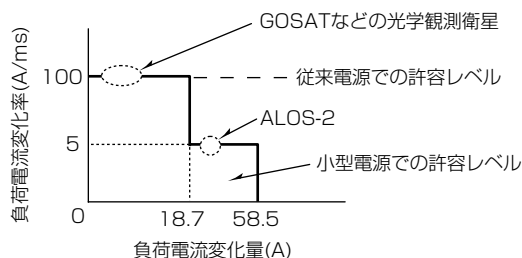


図2. 負荷電流変化量に対応した電流変化率の許容レベル



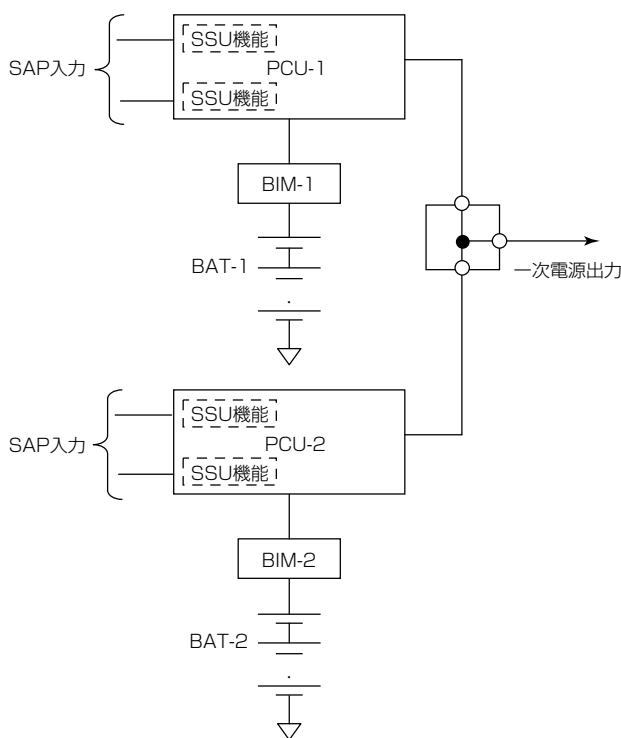


図 3. 小型電源の 2 並列運転構成 (ALOS-2 拡張型)

く、PCU 1 台で余剰電力処理ができない衛星には、図 3 に示すように、2 台並列運転の構成とすることによって対応できる。

### 3. 高速マルチモード変調器 XMOD

高速マルチモード変調器は、周回衛星で従来使用されている QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) に加え、アナログ変調装置では実現が困難である 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 変調機能を持つマルチモード変調器である。図 4 に XMOD の機能ブロック図と外観を示す。

この変調器の最大の特長は、理想的なナイキスト波形を生成することによって、理想状態に近い回線品質の実現が可能になっているという点である。表 1 に従来型との復調損失の比較を、図 5 に BER (Bit Error Rate) 特性をそれぞれ示す。

表 1 の DEAF (Digital Equalization Automatic Filter) とは、通信路のフィルタ特性を推定し、逆フィルタを通して信号を矯正する機能である。この DEAF 機能を併用すれば、QPSK (200Mbps, 400Mbps) の復調損失はほぼ 0 dB となる。16QAM (800Mbps) に関しては、DEAF が OFF の状態では、BER は悪いが、DEAF が ON の状態では、1.3~1.6dB 程度と良好な値となる。16QAM の BER が悪い理由は、通信路における周波数特性の非対称性に関して 16QAM が敏感であることなどによる。

なお、16QAM (800Mbps) に関しては、偏波多重化を行うことによって、2 倍の伝送速度 (1.6Gbps) の達成が可能となる。図 6 に 1.6Gbps 伝送系の構成を示す。

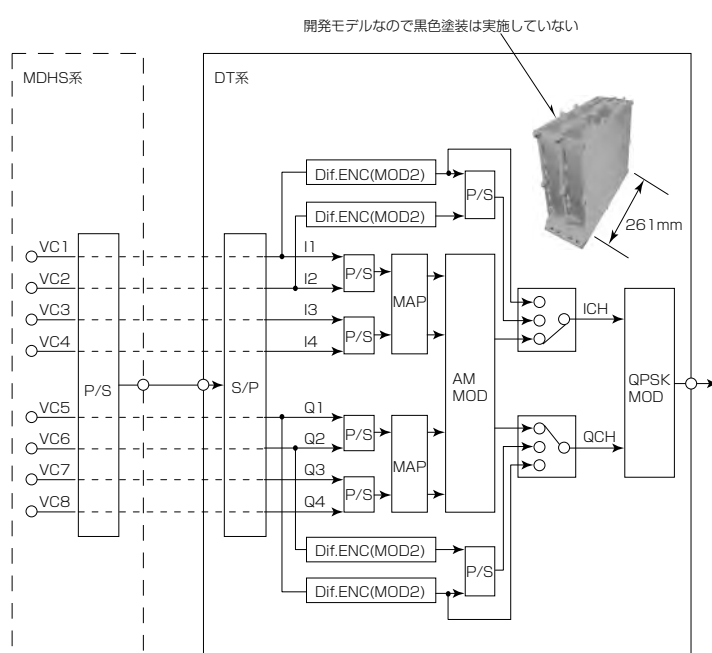


図 4. XMOD の機能ブロック図と外観

表 1. Xバンド変調装置復調損失<sup>(注1)</sup>の比較

アナログ変調装置 (GOSAT: 実測値)	高速マルチモード変調器 (XMOD) (ALOS-2: 実測値)
1.5~2.0dB (138.76Mbps)	<ul style="list-style-type: none"> <li>QPSK (200Mbps, 400Mbps) 0.0~0.2dB (復調側 DEAF ON)</li> <li>0.5~1.0dB (復調側 DEAF OFF)</li> <li>16QAM (800Mbps) 1.3~1.6dB (8 CH 平均)</li> </ul>

(注 1) BER=5E-04 を実現する  $E_b/N_0$  の理想状態との差

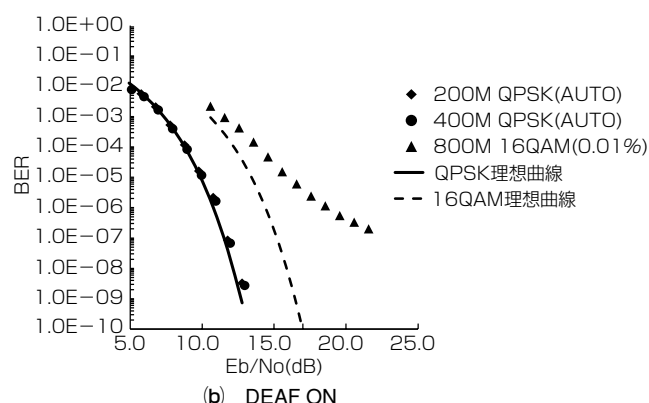
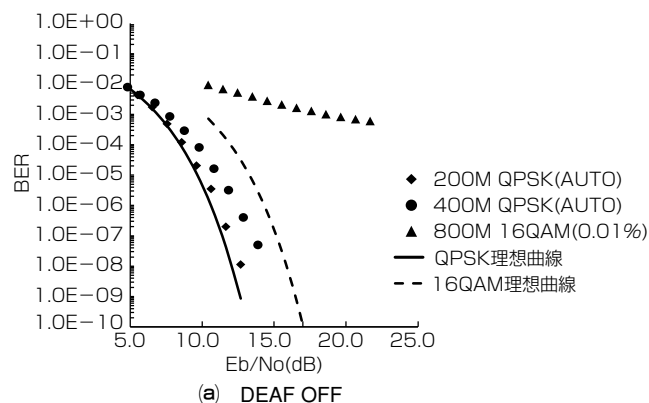


図 5. XMOD の BER 特性

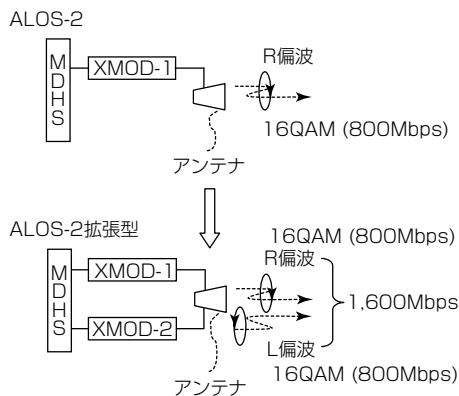


図6. 16QAMの偏波多重化による1.6Gbps伝送系の構成 (ALOS-2拡張型)

#### 4. 観測テーブル方式

観測テーブル方式とは、バス系の蓄積コマンドに頼ることなく、ミッション機器に観測計画情報を登録し、軌道イベントをトリガーとして、ミッション機器各部の制御を行う方式をいう。

この方式は、バス系の設計に影響を与えないので、衛星全体の開発リスクが低減すると同時に、機器各部の同期性を確保した確実な観測動作が実現でき、かつ観測計画情報を集約して登録できるのでコマンド送信時間が極めて短くなる。一方試験性の観点からもミッション機器側単独で運用を模擬した試験が実施できるなどのメリットが大きい。表2にALOS-2における非観測テーブル方式と観測テーブル方式のコマンド送信時間の比較を示す。観測テーブル方式の採用によって送信時間は約1/4に短縮されている。

ただし、地球観測衛星にこの方式を適用するためには、2つの課題が発生する。1つは、観測動作は時刻ではなく、軌道をトリガーにしなければならない点、もう1つは、観測動作と姿勢制御とのタイミングなど、周辺機器との同期性を考慮しなければならないという点である。

軌道をトリガーにする点に関して、ALOS-2では観測計画は、すべて軌道上の位置（緯度引数）をパラメータとして登録し、GPS(Global Positioning System)時刻をトリガーとして観測動作を実行する。そのため、GPS時刻と緯度引数の関係は常時ミッション機器側で管理され、軌道パラメータの変化に対応して、逐次観測動作を実行するGPS時刻を更新する必要がある。

PALSAR-2では、これらの要求事項を満足させるために、定期的に時刻タグを付加した観測計画を更新する設計となっているが、軌道計算に不慣れなユーザーにとっては

表2. 観測テーブル方式と観測テーブル方式のコマンド送信時間の比較(コマンド速度=4Kbps)

No.	項目	単位	非観測 テーブル方式	観測 テーブル方式
1	観測設定コマンド数	—	4	4
2	MDP記録モード変更コマンド数	—	8	—
3	姿勢変更コマンド数	—	24	—
4	2日分のアップロード時間	分	5.2	1.2

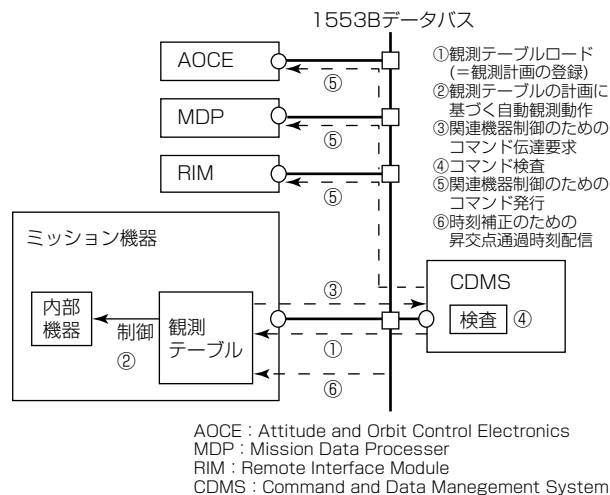


図7. 観測テーブルを使用した観測動作におけるデータの流れ

難所の1つである。ALOS-2の後継衛星では、姿勢軌道制御系の支援によって、ユーザーが取り組みやすいパラメータを加工して配信することを計画している。

第2の課題である周辺機器とのインタフェースに関しては、PALSAR-2と周辺機器との連携動作を行うために、1553Bデータバスをネットワークとして利用して、ミッション機器から周辺機器への動作要求（コマンド）を発行する方式“リクエストコマンド機能”を採用した。図7にリクエストコマンド機能を含む観測動作の流れを示す。

この方式は、従来のバス系という“上流”から“下流”であるミッション機器にコマンドを流す方式ではなく、“下流”の要求を“上流”が吸い上げて、内容を検査した上で再度“下流”に流すという概念であり、ALOS-2がはじめての試みとなる。これによって、ミッション機器主体での観測運用が可能となり、かつ周辺機器との同期性もバス系の設計変更なしに実現できる。

#### 5. む す び

ALOS-2で開発した新規要素について述べた。取り上げた3項目は、ALOS-2だけでなく、将来、高度化する要求への拡張性を十分に備えたものである。

# 次世代高速衛星通信用 デジタルチャネライザ

江島二葉\* 小森裕一\*  
秋田 稔\* 中村和仁\*  
藤村明憲\*\*

*Digital Channelizer for High Throughput Satellite Communication*

*Futaba Ejima, Minoru Akita, Akinori Fujimura, Yuichi Komori, Kazuhito Nakamura*

## 要 旨

近年、ブロードバンド衛星通信サービスを低コストで提供する次世代高速衛星通信システムが提案されている。衛星はマルチビームを持ち、デジタルチャネライザ(以下“チャネライザ”という。)を用いて周波数とビーム割当てを柔軟に変更することによって、自由なルーティングと高い周波数利用効率を実現する。

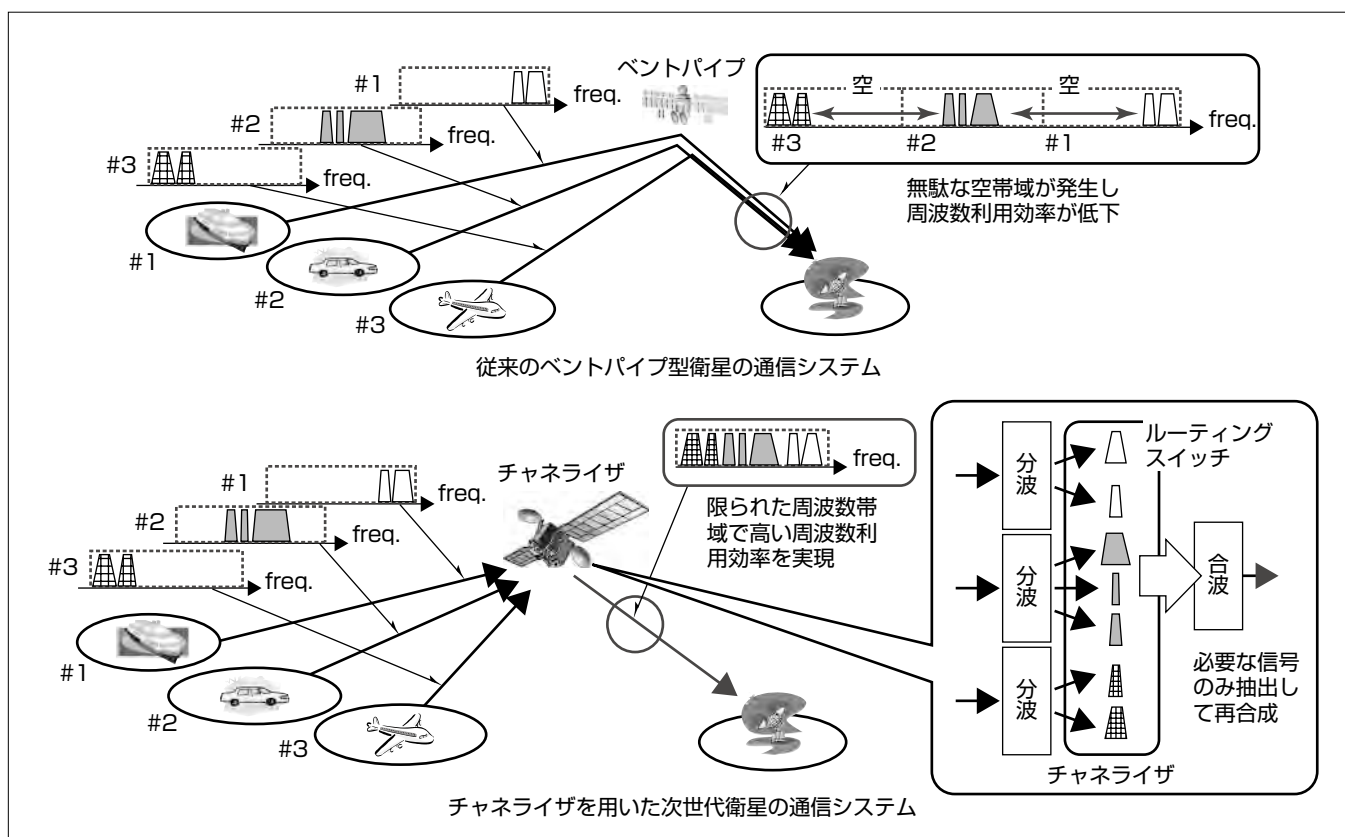
このシステムは運輸、公務、教育・研究、サービス、医療等で使用される平常時の衛星通信サービスを効率化するだけでなく、災害発生時など通信需要の変化に対応することが可能である。例えば災害発生地域に通信需要が集中した場合、チャネライザによってその地域への柔軟な帯域割当てや回線収容数の調整を行うことができる。

このようにチャネライザは将来のフレキシブルな通信衛星に欠かせないキーコンポーネントであり、欧米の主要衛星メーカーでは既に製品化されている。

三菱電機ではチャネライザのエンジニアリングモデル(EM)を製作して耐環境性試験を実施し、2013年10月に開発を完了した。EMの開発では、宇宙用FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた大容量信号処理、宇宙用基板・コネクタを用いたGbps級基板間高速シリアル伝送、高排熱技術等、様々な技術を用いている。

本稿ではチャネライザを構成する分波部、合波部、スイッチ部の機能及び性能について述べる。またEMの開発成果について述べる。

特集  
I



## 従来のベントパイプ型衛星とチャネライザを用いた次世代衛星の通信システム

従来のベントパイプ型衛星では周波数及びビーム割当ては固定であり、空きチャンネルが発生する。空きチャンネルが発生しないよう1ビームに割り当てる帯域幅を制限すると、災害時に一部のビームに広い帯域を割り当てられない。これに対しチャネライザを用いた衛星では、不要な空きチャンネルを削減し必要な信号帯域だけ抽出して中継するため、通信需要の変化に対応可能であり、周波数利用効率を高めることができる。

# 1. ま え が き

次世代高速衛星通信システムで、マルチビームを持つ衛星に搭載されるチャネライザを開発した。チャネライザはデジタル信号処理によって周波数とビーム割当てを柔軟に変更することで、自由なルーティングと高い周波数利用効率を実現する、将来のフレキシブルな通信衛星に欠かせないキーコンポーネントである。

チャネライザの分波部・合波部にはハーフバンドフィルタ(HBF)方式を採用し、回路規模削減と低消費電力化を実現している。スイッチ部は、未使用チャンネルの電力削減と信頼性を向上させるチャンネル分離型スイッチとその制御方法を新たに開発した。

製作したEMは1ポートあたりの帯域幅40MHz、サブチャンネル帯域幅2.5MHz、ポート数8個(冗長2個)の性能を持っている。

本稿では、デジタルチャネライザを構成する分波部、合波部、スイッチ部の機能及び性能について述べる。またEMの開発結果について述べる。

## 2. デジタルチャネライザ

### 2.1 チャネライザの概要

#### (1) チャネライザの機能、性能

チャネライザは通信衛星に搭載するデジタル経路切替装置であり、図1に示すように分波部、スイッチ部、合波部で構成している。各ポートから入力されるアップリンク信号はA/D変換後、分波でサブチャンネルに分解する。その後スイッチ部で経路切替えを行うことによって、サブチャンネルの信号が任意のビーム、任意の周波数にマッピングする。合波部ではスイッチ部で再配列した信号を合波処理し、D/A変換後に出力する。チャネライザ全体の制御は、テレメトリ・コマンド制御インタフェースとして1553Bインタフェースによって行っている。

またサブチャンネルごとの電力モニタ、利得制御、不要波のノッチングを行う機能を持つ。

図2に2013年3月に製作したチャネライザのEMの外観、表1にチャネライザの主要性能を示す。

周波数有効利用の観点からサブチャンネル間でオーバーラップするガードバンド帯域幅は0.25MHzとした。さらに、小型移動端末からの微弱な信号が、周波数軸上で隣接する大型の地上局からの大電力信号による干渉の影響を受けないよう、隣接サブチャンネル選択度は50dBを超える設計とした。

#### (2) 開発技術

##### ①宇宙用FPGAでの実現

分波部・合波部は今回の装置に適した方式としてHBFを採用して回路規模削減及び低消費電力化を行い、デジタル信号処理用デバイスとして宇宙用FPGAのRTAX4000を複数個用いて実現している。

##### ②基板間高速伝送

基板間の信号インタフェースは高速のシリアルライザ/デシリアルライザを採用し、宇宙用認定基板とコネ



図2. チャネライザEMの外観

表1. チャネライザの主要性能

項目	性能
サイズ	45×30×25(cm)
消費電力	300W
質量	40kg
入力ポート	8ポート×40MHz(動作: 6ポート)
出力ポート	8ポート×40MHz(動作: 6ポート)
サブチャンネル帯域幅	2.5MHz
ガードバンド	0.25MHz
隣接チャンネル抑圧	50dB以上
冗長構成	入出力ポート数: 8(冗長2) スイッチ・制御ユニット数: 2(冗長1)

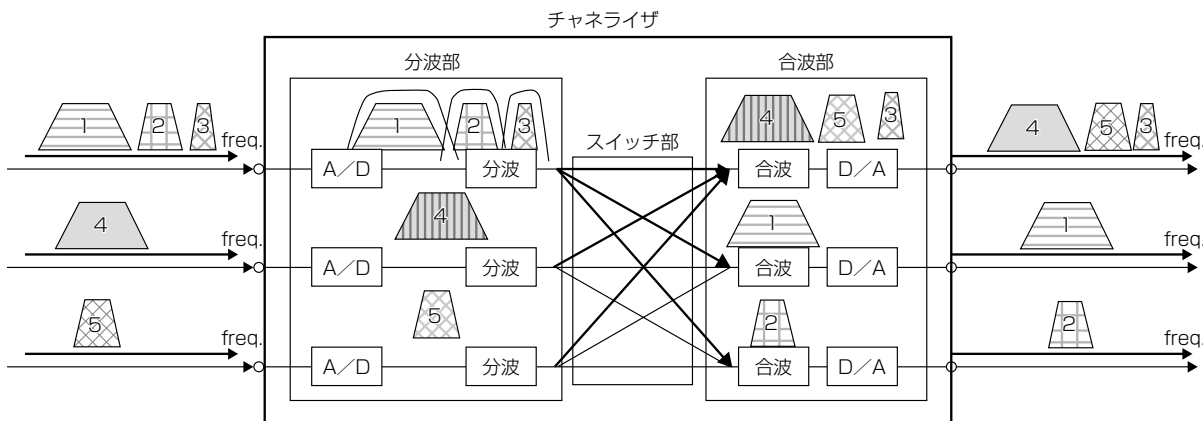


図1. チャネライザ機能のブロック図



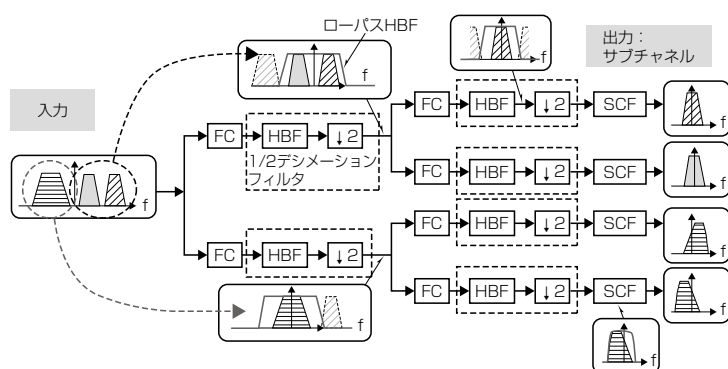


図3. 分波部の機能ブロック図

クタを用いたバックプレーンではインピーダンスマッチングに配慮した配線を行って2 Gbpsのシリアル伝送を行っている。

### ③高排熱技術

チャネライザは200W以上の高い消費電力のコンポーネントであり、部品の許容温度を超えないよう各種高排熱技術を使用した設計を行った。熱解析の高精度化、高熱伝導シート、高排熱用フレーム、高排熱基板を採用している。

## 2.2 分波部・合波部

分波部・合波部では周波数変換回路(FC)とHBFでの構成を採用している<sup>(1)(2)(3)</sup>。図3に分波部の機能ブロック図を示す。提案方式は、各ブランチで入力信号を周波数領域で2分割し、最終段のサブチャンネルフィルタ(SCF)で、隣接チャンネル干渉成分を除去するツリー構成によって、入力信号を複数のサブチャンネルに分波する。また合波回路も同様にFCとHBFを用いたツリー構成で実現し、複数のサブチャンネル信号を1つに合波する。

なお実際は、各ブランチにおける動作速度とブランチ数が反比例となる関係などを利用した時分割処理によって、演算部の回路規模を時分割処理しない場合と比較して約0.1倍に抑えた設計としている<sup>(4)</sup>。

さらに、このツリー構成で、HBFのフィルタ特性をロールオフ率20%で設計したことで、チャネライザ回路全体のクロック速度を、入力帯域幅(40MHz)の僅か1.25倍である50MHzで駆動する設計とし、低消費電力化を図っている。

図4に分波数と乗算器数及びメモリサイズとの関係を示す。分波数が256以下のシステムでは乗算器数が他社方式(PDFT：ポリフェーズDFT(Discrete Fourier Transform)方式)<sup>(5)(6)</sup>よりも少なく回路規模が小さいという利点がある。

この結果を受けて、チャネライザのEMでは提案するHBFを用いたツリー方式を採用している。

図5にサブチャンネルフィルタの周波数特性を示す。

実機の実測値は、設計値とほぼ一致し、設計通り隣接サブチャンネル帯域を50dB以上抑圧する特性を持っていることを確認した。

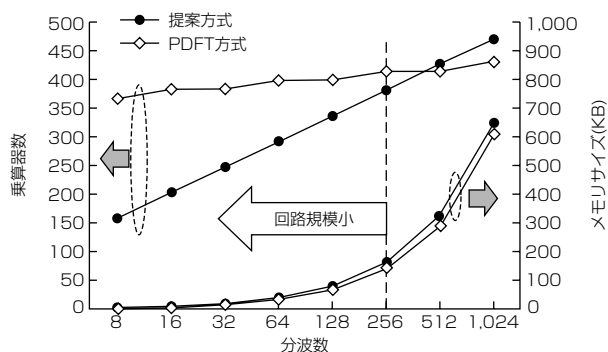


図4. 分波数と乗算器数及びメモリサイズとの関係

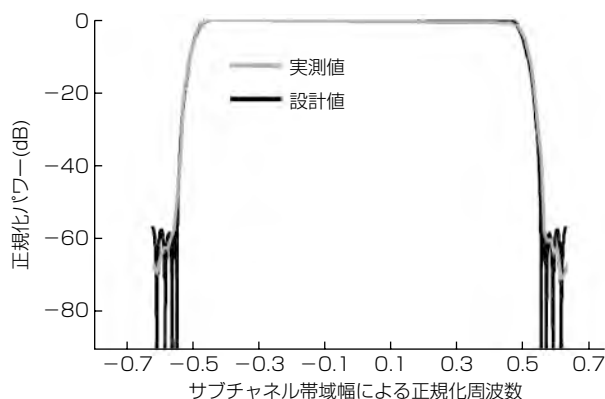


図5. サブチャンネルフィルタの周波数特性

## 2.3 スイッチ部

スイッチ部は、分波部によってチャンネル分離したデジタル信号を、合波部の所定のチャンネルにスイッチする機能を持つ。今回、衛星搭載用のスイッチ機能に最適化させたチャンネル分離型スイッチとその制御方法を開発した。

この技術は、スイッチ機能の衛星搭載の際、チャンネル数の増加とともに増える発熱及び電力消費の低減と、チャンネルを集線するスイッチ部の故障発生時に、全サービスの停止につながるリスク回避から要求される高信頼性の両者を実現する。

図6にチャンネル分離型スイッチの構成を示す。ポート内のスイッチ処理をチャンネルごとに分離できる構成とし、各ポート間のチャンネルのスイッチ処理を細分化して、ブロック単位で電源制御を行う構成としている。さらに、ポート内で信号の並べ替えを行う処理(CP)をチャンネル分離型スイッチの前後に設けている。

前段の並べ替え(Pre-CP)で、各入力ポートの使用チャンネルを、スイッチ内の特定の電力制御単位ブロックに集約するように並べ替えを行い、この並べ替えに応じて、出力ポートと出力チャンネルが本来の出力位置と変わらないようにスイッチングテーブルの更新と、出力ポート内のチャンネルの並べ替え(Post-CP)を行う。また、Pre-CPとスイッチングテーブルの設定によって、マルチキャストとブロードキャストにも対応可能である。

これらの構成によって、各ポート内で使用するチャンネル

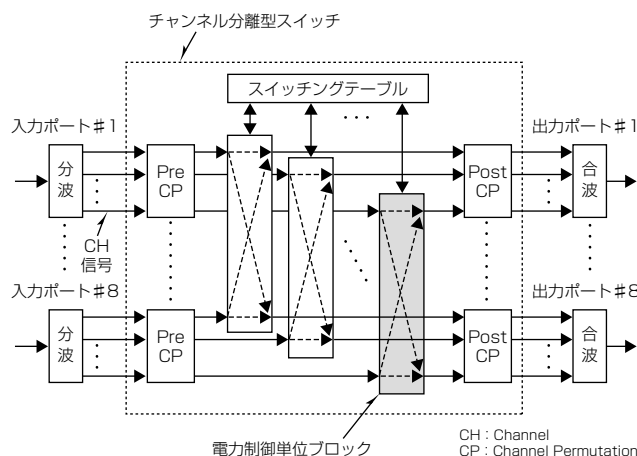


図6. チャンネル分離型スイッチの構成

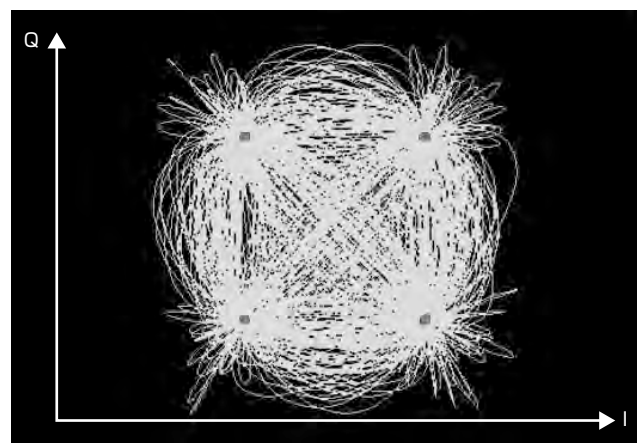


図7. チャネライザ出力信号のコンステレーション

配置に制約を課すことなく、未使用となるチャネルの処理を集約し、その処理ブロックに対する電力を停止することで消費電力の低減を効率的に実施できる。

信頼性の面では、ポート内のチャンネル分離スイッチの一部が故障した場合、故障したチャネルの処理部を、電力供給を行わないブロックにアサインすることで継続運用を可能にした。さらに、衛星が軽負荷モードに移行する場合は、最低限必要なチャネルの処理を特定ブロックに集約し、他のブロックの電力を遮断することで、最低限の通信回線確保と電力削減を行う運用が可能である。

また、スイッチ処理を集約したブロックを一定の期間使用後、別ブロックに処理を集約するように変更する制御を行うことで、各ブロックの半導体に長期的に印加される電氣的、熱的ストレスを、サービスの停止をせずに時間的に分散させることができる。これによって、デバイスを長寿命化し、信頼性を更に向上させることができる。

### 3. チャネライザEMの開発結果

チャネライザのEMを製作し、標準的なDS2000衛星に要求される環境条件での振動試験、衝撃試験、熱真空試験及びEMC (Electro-Magnetic Compatibility) 試験を実施し、問題ない結果を得た。

代表的な通信特性としてQPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 変調波を伝送した時のチャネライザ出力信号のコンステレーションを図7に示す。

この信号は占有帯域幅が8 MHzであるため、このチャネライザEMで一旦4つのサブチャネルに分波後、スイッチを経由して再合波しているが、図7に示す通りQPSKの信号が復元できていることを確認した。同様に、複数の異なる帯域幅の信号に対してもQPSK信号の復元を確認し、中継後の各信号のEVM (Error Vector Magnitude: 理想信号点からの誤差) は1～4%で良好な値を得た。

## 4. む す び

今後の次世代高速衛星通信に欠かせないキーコンポーネントである衛星搭載用デジタルチャネライザのEM開発を完了した。衛星にチャネライザを搭載することによって、周波数とビームの割当てを柔軟に変更でき、平常時の衛星通信サービスを効率化するだけでなく、災害時の通信需要変化に対応可能になる。また社会の様々なニーズに対応する衛星通信のフレキシビリティの向上が期待できる。

## 参 考 文 献

- (1) 藤村明憲, ほか: フレキシブル衛星中継器用分波/合波方式の検討, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-3-3 (2011)
- (2) 藤村明憲, ほか: 衛星搭載用再生/非再生中継器に適した分波/合波方式の検討, 電子情報通信学会ソサエティ大会講演論文集, B-3-10 (2011)
- (3) 藤村明憲, ほか: 衛星搭載用デジタル分波/合波方式に関する一検討, 電子情報通信学会ソサエティ大会講演論文集, B-3-4 (2012)
- (4) Fujimura, A., et al.: A Novel DEMUX/MUX Method for Flexible Digital Channelizers using Half Band Filters, 31th AIAA ICSSC (2013)
- (5) 山下史洋, ほか: 衛星搭載用帯域可変FFTフィルタバンクの提案と基本動作特性, 電子情報通信学会論文誌, B, J85B, No.12, 2290～2299 (2002)
- (6) Di Cecca, F., et al.: Payload Aspects of Mobile Satellite Systems with On-Ground Beamforming and Interference Cancellation, ICWITS, 2012 IEEE International Conference (2012)

# 合成開口レーダ(SAR)の最新技術の動向

中村聖平\*  
辻 雅生\*  
中野陽介\*

## Technical Trends of Synthetic Aperture Radars

Shohei Nakamura, Masao Tsuji, Yousuke Nakano

### 要 旨

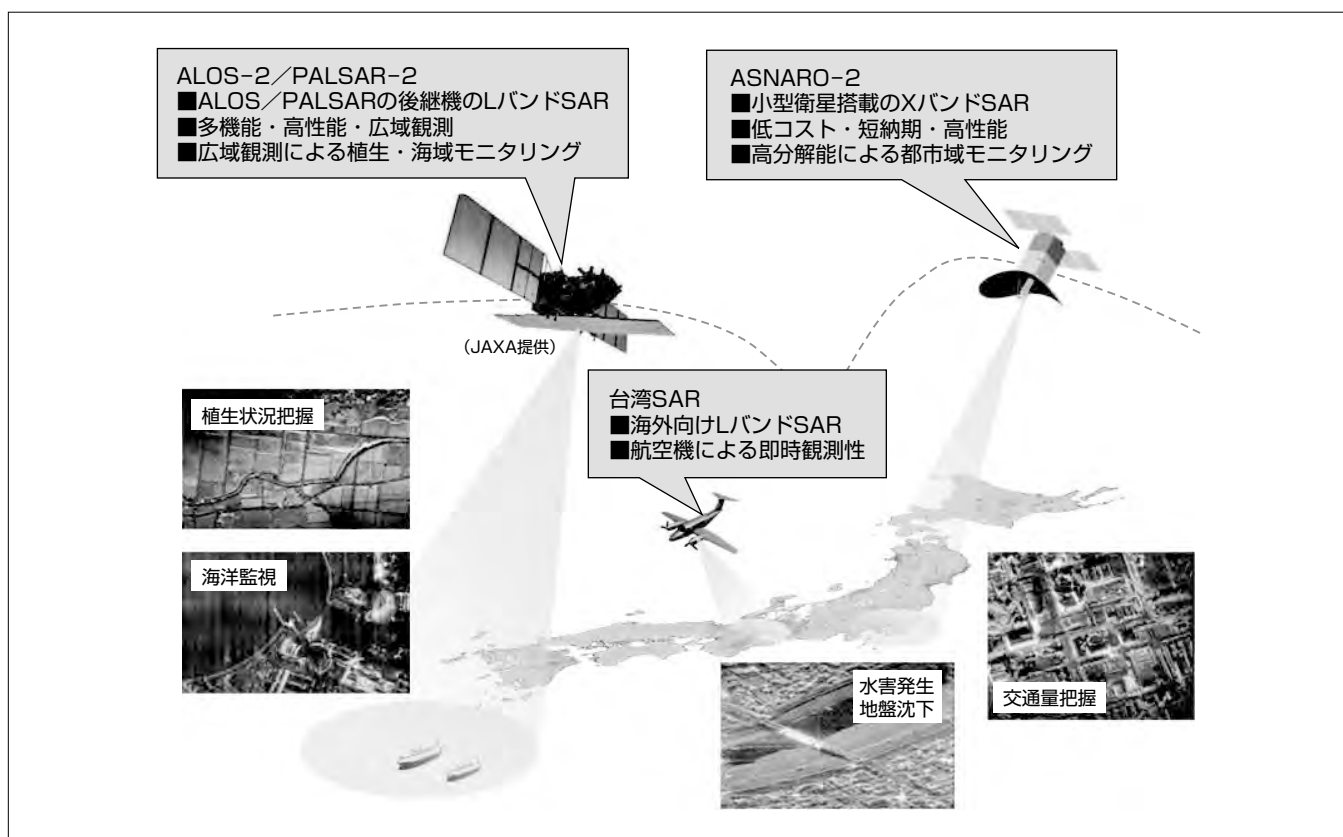
合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar : SAR)は、航空機や衛星などの移動するプラットフォームに搭載して観測を行い、対象領域の高分解能二次元画像を得る画像レーダである。SARは天候、昼夜によらず観測が可能であるため、近年の災害監視、地形図作成、土地利用調査、海洋監視等への活用が期待されている。

三菱電機では、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)の下、陸域観測技術衛星2号“だいち2号”(ALOS-2)を2013年度内の打ち上げを目標に開発中であり、打ち上げ後の活躍が期待される。また、経済産業省(METI)の下、日本電気㈱と共同で先進的宇宙システム(ASNARO-2)を開発中であり、当社はSARミッションシステムの開発を担当している。

ALOS-2に搭載されるLバンドのSAR(以下“PALSAR-2”という。)と、ASNARO-2に搭載されるXバンドSARミッションシステムは、ともに、高空間分解能化・広域観測幅化・高画質／高機能化を実現するための技術開発がなされている。

本稿では、ALOS-2及びASNARO-2に搭載されるSARの主要性能とその特長について述べる。また、当社の社内開発技術として、航空機搭載SARによる技術実証試験の成果を交えながら、今後のSAR技術動向について述べる。最後に、当社の民生事業への展開事例として、台湾への輸出事例について述べる。

特集  
I



### 当社で開発中の合成開口レーダの運用イメージ

当社で開発している合成開口レーダ(SAR)の運用イメージである。ALOS-2やASNARO-2に搭載されるSARセンサは、同一地点を定期的に観測することが可能であり、昼夜・天候に依存せずに広範囲にわたる植生や海洋、都市状況のモニタリングが可能となる。また、航空機搭載SARでは、その即時観測性から、災害発生時の被災状況の把握に役立つことが期待される。

## 1. ま え が き

合成開口レーダ(SAR)は、航空機や衛星などの移動するプラットフォームに搭載して観測を行い、対象領域の高分解能二次元画像を得る画像レーダである。SARは天候、昼夜によらず観測が可能であるため、近年の災害監視、土地利用調査、海洋監視などへの活用が期待されている。

当社では、JAXAの下、陸域観測技術衛星2号(ALOS-2)を2013年度内の打ち上げを目標に開発中である。また、経済産業省(METI)の下、NECと共同で先進的宇宙システム(ASNARO-2)を開発中であり、当社はSARミッションシステムを開発している。

本稿では、ALOS-2及びASNARO-2に搭載されるSARの主要性能とその特長について述べる。また、当社の社内開発技術として、航空機搭載SARによる技術実証試験の成果を交えながら、今後のSAR技術動向について述べる。最後に、当社の民生部門への展開事例として、台湾への輸出事例について述べる。

## 2. 開発中の衛星搭載SARと仕様

### 2.1 ALOS-2搭載のSAR

陸域観測技術衛星2号“だいち2号”(ALOS-2)に搭載されるLバンドSARであるPALSAR-2は、前号機“だいち”(ALOS)に搭載されたPALSARの機能を継承しつつ、飛躍的な性能改善を図ったSARセンサシステムである。表1にPALSAR-2の主要観測性能を示す<sup>(1)(2)</sup>。

前号機では、1つの開口から送信された信号を1つの開口で受信する従来の方式であったが、PALSAR-2では、観測中のPRF(Pulse Repetition Frequency)を低下させるために、1つの開口から送信された信号を、位相中心の異なる2つの受信開口で受信するデュアルビーム観測を行う。これによって、前号機から大幅に観測性能を向上し、3m

表1. PALSAR-2の主要観測性能

項目	性能
周波数帯域	L帯(1.2575GHz±42MHz)
オフナディア角	8~70°
観測モード	スポットライト 高分解能 3m/6m/10m 広域観測
分解能	3m(レンジ)×1m(アジマス) 3m/6m/10m 100m/60m
観測幅	25km四方 50km/50km/70km 350km/490km
画質	NESZ≤-24dB, S/A≥20dB
観測方向	右及び左方向
偏波	単独/2偏波/多偏波
SARアンテナ	アクティブフェーズドアレーアンテナ 約3m(エレベーション)×10m(アジマス)

NESZ : Noise Equivalent Sigma Zero  
S/A : Signal to Ambiguity ratio

の高分解能と50km以上の広い観測幅を同時に実現する。

図1にデュアルビーム観測の概念図を示す。

先に述べたデュアルビーム以外に、アクティブフェーズドアレーアンテナ(APAA)による二次元ビーム走査によって、アジマス分解能1mの高分解能化を実現するスポットライトモードと、スキャンSAR方式を行う広域観測モードを実現する。広域観測モードでは、350kmに加え、超広域の490kmの観測幅も可能である。また、観測制御が改善され、高頻度でのスキャンSARインターフェロメトリが可能となり、100kmオーダーの規模で発生する地殻変動把握に威力を発揮することが期待される。さらに、高分解能(10m)モードによって、PALSARからのデータ利用の継続性を確保している。

現在、PALSAR-2はフライトモデルの開発が完了している。図2にSAR電気回路部及びSARアンテナを示す。

### 2.2 ASNARO-2搭載のSAR

ASNARO-2は、“低コスト”“短納期”“高性能”を開発コンセプトとする小型地球観測衛星である。ASNARO-2は、衛星バスとSARミッションシステムの2つに分類され、各システムは、バスシステムの開発をNECが担当し、SARミッションシステムの開発を当社が担当する。図3にASNARO-2の外観を示す<sup>(3)(4)</sup>。表2に、XバンドSARミッションシステムの主要観測性能を示す。

ASNARO-2搭載のSARは、小型衛星向けのSARながら海外の中・大型の商用SARに比肩する機能を持っており、ストリップマップモードに加えて、スポットライトモード・スキャンSARモードという標準的な観測モードを網羅している。

また、各観測モードの地上分解能/観測幅は、スポットライトモードで1m/10km四方、ストリップマップモードで2m/12km幅、そしてスキャンSARモードで16m/50km幅

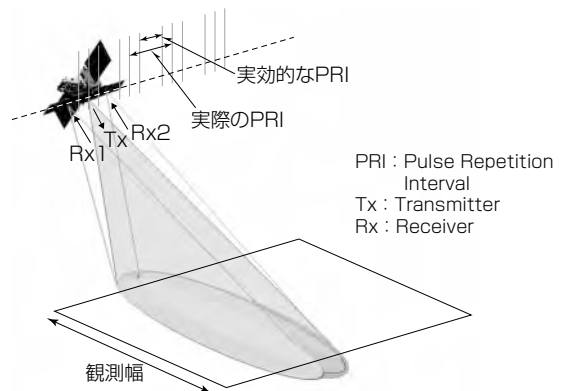


図1. デュアルビーム観測の概念図

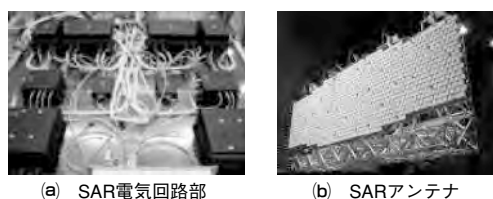


図2. ALOS-2/PALSAR-2のプロトフライトモデル



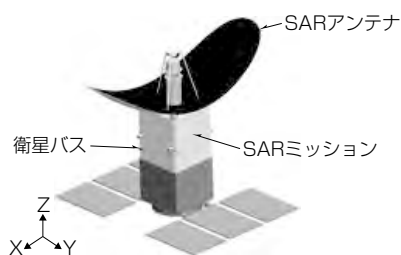


図 3. ASAR-2システム構成図

表 2. ASAR-2の主要観測性能

項目	性能		
周波数帯域	X帯		
オフナディア角	15～45°		
観測モード	スポットライト	ストリップマップ	スキャンSAR
分解能 <sup>(注1)</sup>	< 1 m	< 2 m	< 16m
観測幅 <sup>(注1)</sup>	> 10km	> 12km	> 50km
画質 (NESZ) <sup>(注1)</sup>	< -14.0dB < -15.5dB <sup>(注2)</sup>	< -17.0dB	< -25.0dB
画質 (S/A) <sup>(注1)</sup>	> 20dB		
偏波	HH/VV		
データ圧縮	1/2, 1/4, 非圧縮(量子化ビット 8)		
SARアンテナ	開口面アンテナ(センタフィードカセグレン) 1.5m(エレベーション) × 4 m(アジマス)		

(注1) オフナディア角35°時

(注2) 2 ルック観測時



図 4. ASAR-2搭載のSARアンテナ

であり、性能面でも中・大型SAR衛星並みの性能を持つ。

小型衛星のため送信電力に制限を受けることから、画質面(信号対雑音比)では中・大型衛星に比べて不利となるが、高利得アンテナ及び送受信機の低損失化・高効率化によって、全ての観測モードで-15.5dBを達成する。

SARミッションシステムに搭載するSARアンテナは、センタフィードカセグレン方式による高利得の大型開口面アンテナである。このアンテナは、10km超の観測幅に効率よく電波を照射するために、1.5m×4 mの扁平(へんぺい)形状としていることを特徴とする。また、“低コスト”と“性能(必要な鏡面精度・ビーム成形の容易さ)”を両立させるため、CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)製のソリッドな開口面を採用している。打ち上げの際は、ロケットフェアリング内に収納するため、図4に示すように、長手方向に3分割して折りたたむ。

さらに、アンテナの一次給電部をマルチフィードとして、異なる4つの方向で電波の送受信が可能なマルチビームアンテナとすることで、50kmの広域観測を可能とした。

### 3. SAR先進技術の動向と開発

#### 3.1 SAR技術の今後の動向

図5に示すように、衛星搭載SARシステムの動向については大きく4つの方向性がある。

(1) 高性能化(広域・高分解能)

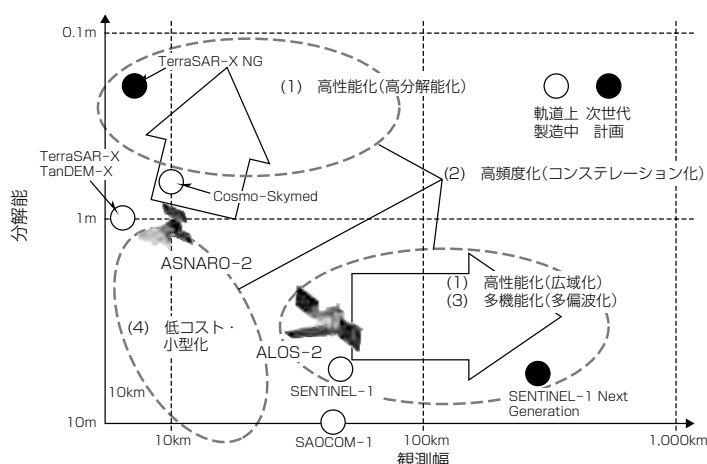


図 5. 今後のSAR技術動向

高分解能化とともに、衛星SARの最大の特長である広域化が追求されると考える。商用SAR衛星では、現状1m程度の分解能が最高だが、25cmまで高分解能化することが計画されている。一方で、DBF(Digital Beam Forming)を用いたSweepSAR技術や、マルチビームSAR技術(High Resolution Wide Swath: HRWS)によって、従来の20～100km程度の観測幅を100～600kmに拡大することが提案されている。

(2) 高頻度化(コンステレーション化)

観測システムとしてインフラ化が進み、観測頻度を向上させるために、一機あたりの低コスト化と合わせて、2～4機の複数衛星でのコンステレーション化が進む。

(3) 多機能化(多偏波化)

バイオマス計測や海洋観測での偏波利用の有効性が示されており、ミッションによっては必須機能となりつつある。

(4) 低コスト・小型化

民生技術を最大限活用した低コスト化、小型化の要望もあり、適度な性能を安価に実現するシステムの検討が進む。さらに、近年では100kg級の衛星でのSAR衛星実現に向けた研究も行われており、ピギーバック方式の打ち上げなどによって、実現すればライフサイクルコストを大幅に削減することが可能となる。

#### 3.2 これまでの社内開発工事による成果

当社では、3.1節で述べた動向を踏まえ、SAR先進技術実証のための航空機搭載KuバンドSARシステム(以下“KuSAR”という。)による航空機フライト試験を行っている。ここでは、KuSARとフライト試験における技術実証結果を示す。

##### 3.2.1 航空機搭載KuバンドSARシステム

KuSARの主要諸元を表3に示す。図6に示す航空機の客室にレーダの送受信機を格納し、送信用と受信用のアンテナを航空機の下部にある多目的ポッドに格納する。受信チャンネルは最大3チャンネルで、試験目的によってチャンネル数を選択可能である。送信機は、最大で1.5GHzの周波数帯域幅(レンジ分解能10cm:図6(b))を生成可能である。



表 3. KuSARの主要諸元

項目	仕様
送信周波数	Kuバンド(中心:16.45GHz)
送信帯域幅	1.5GHz(最大)
分解能	10cm(最高)
送信ピーク出力	300W
アンテナビーム幅	9×10°
受信チャンネル	最大3チャンネル(選択式)

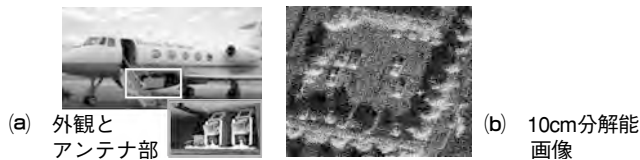


図 6. KuSARシステム外観と取得画像

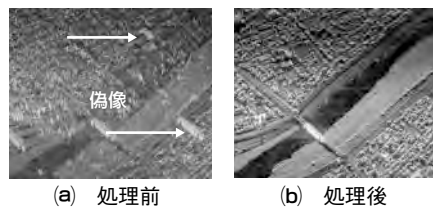


図 7. マルチビームSAR処理前後のSAR画像

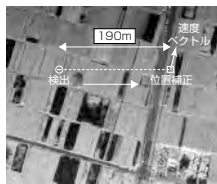


図 8. 移動目標検出結果

表 4. 速度推定結果

二輪車	推定値 (km/h)	誤差 (km/h)
クロストラック速度	-25	-2.5
アロングトラック速度	-6.8	-0.69

### 3. 2. 2 フライト試験による技術実証結果

マルチビームSAR技術実証試験の結果を図7に示す。図は、受信チャンネル数を3チャンネルとしたマルチビームSARデータの取得結果で、同図(a)がマルチビームSAR処理前、(b)がマルチビームSAR処理後の画像である。

図7(a)の、マルチビームSAR処理前の画像中には、多くの偽像が発生しているが、図7(b)のマルチビームSAR処理後のSAR画像では、偽像が抑圧されていることが確認できる。

次に、移動目標検出試験の結果を図8に示す。同図は、マルチチャンネルデータによる移動目標検出及び速度ベクトル推定結果である。試験では、既知の移動目標として、二輪車を走行させている。速度推定処理によって推定した二輪車の速度とGPS(Global Positioning System)で計測した速度との誤差を表4に示す。表4から、移動目標の速度を推定可能であることが伺える。

### 4. 民生事業への展開事例(台湾SAR)

台湾林務局農林航空測量所が森林資源把握及び災害監視へのSAR利用を計画しており、台湾国立中央大学を主契約者、当社がサブコンとして、航空機搭載SARシステム(台湾SAR)を納入した。台湾SARの主な性能を表5に示す。

表 5. 台湾SARの主要諸元

項目	性能
周波数帯域	L帯(帯域幅170MHz)
観測モード	ストリップマップ
分可能	1m以下
観測幅	10km
画質	NESZ<-30dB
偏波	フルポラリメトリ
その他	オンボードリアルタイム再生

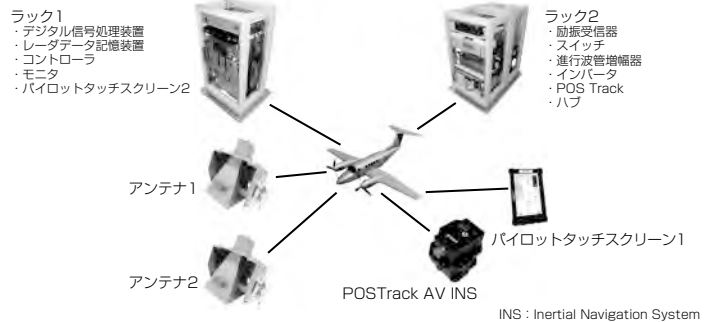


図 9. 台湾SARのシステム概念図

台湾SARは、当社での社内開発成果をいかしており、オンボード上でのリアルタイム再生処理が実現可能である(図9)。

## 5. む す び

現在当社で開発している衛星搭載SARとして、ALOS-2搭載のPALSAR-2及びASNARO-2搭載のSARミッションシステムの性能及び特長について述べた。また、今後のSAR技術の動向と社内開発工事のフライト試験による成果を述べた。さらに、民生事業への展開事例として、台湾への輸出事例について述べた。

## 参 考 文 献

- (1) Kankaku, Y., et al.: ALOS-2 MISSION AND DEVELOPMENT STATUS, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2013. IGARSS'13. Proceedings. 2013 IEEE International, in press.
- (2) Okada, Y., et al.: SYSTEM DESIGN OF WIDE SWATH, HIGH RESOLUTION, FULL POLARIMETRIC L-BAND SAR ONBOARD ALOS-2, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2013. IGARSS'13. Proceedings. 2013 IEEE International, in press.
- (3) Muta, A., et al. (NEC): Outline and Program status of ASNARO-2(Advanced Satellite with New System Architecture for Observation) Satellite System, proceedings of 9th IAA symposium on Small satellites for earth observation, IAA-B9-0105P (2013)
- (4) Yokota, Y., et al.: Newly developed X-band SAR system onboard Japanese small satellite "ASNARO-2", 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), 81~83 (2013)

# 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—

野口龍宏\*  
石川貴章\*

Application and Evaluation for Observation Data on Advanced Microwave Scanning Radiometer2 —Achievement of World-famous Microwave Radiometer (A Series of AMSR) —  
Tatsuhiro Noguchi, Takaaki Ishikawa

## 要 旨

三菱電機は1980年代初頭から、マイクロ波放射計の開発に携わってきた。マイクロ波放射計は、地表及び大気から自然放射される微弱電波を多周波数で受信し、水蒸気量、降水量、海面温度等の水に関する地球物理量の観測を目的とする電波センサである。

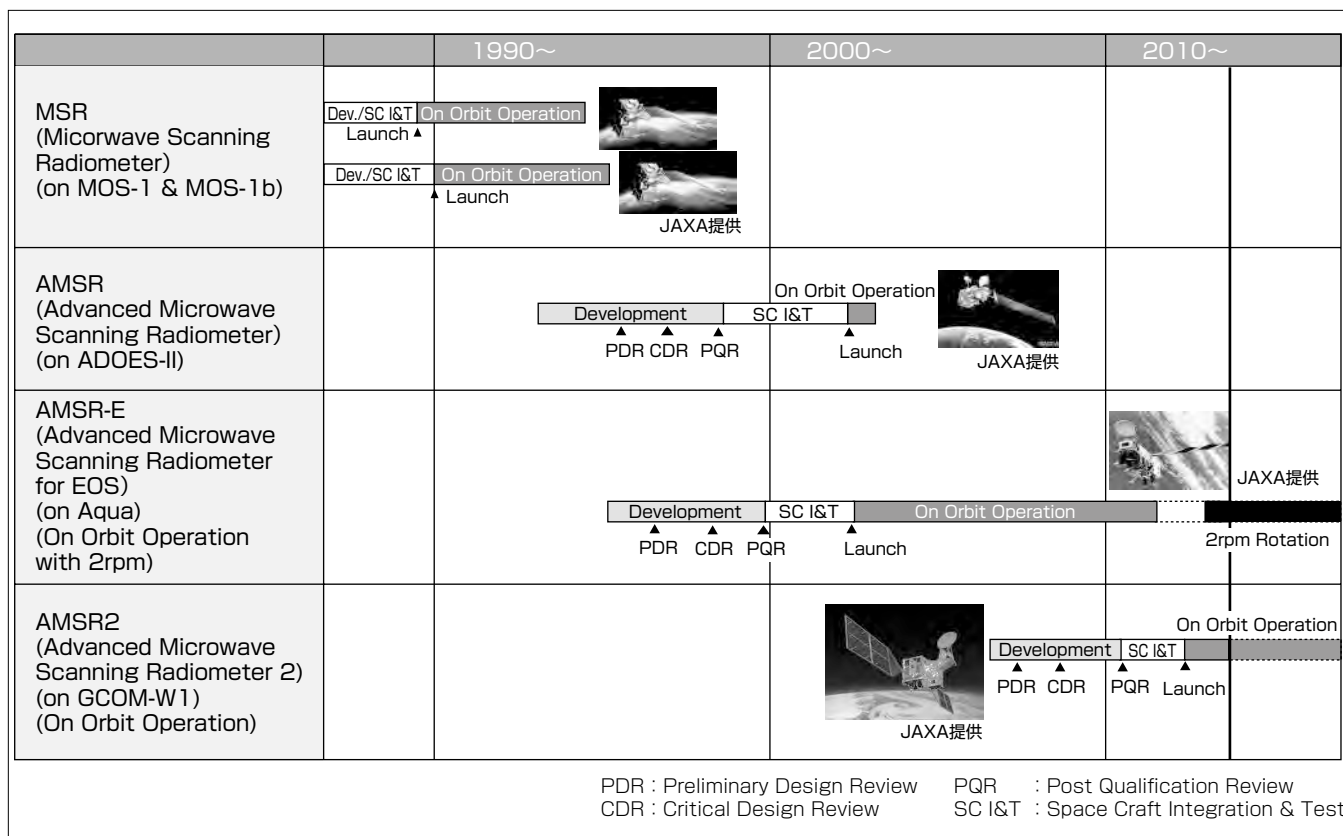
1987年と1990年に打ち上げられたMOS-1(もも1号)及びMOS-1b(もも1b号)搭載のマイクロ波放射計(MSR)は、開口径約0.5mのアンテナで、23GHz帯と31GHz帯(各々片偏波)の2チャンネルだけを持つ小型センサであったが、2002年に打ち上げられたADEOS-II(みどり2号)搭載の高性能マイクロ波放射計(AMSR)は、約2mのアンテナで、7GHz帯から89GHz帯(各々直交2偏波)の16チャンネルを持ち、世界的に見ても大型で多周波数のセンサへと発展した。

2002年に打ち上げられたNASA(National Aeronautics and Space Administration)の衛星Aqua搭載の改良型高性能

能マイクロ波放射計(AMSR-E)は、約1.6mの展開アンテナで、7GHz帯から89GHz帯の14チャンネルを持つセンサであり、2011年10月に観測停止するまでの約9年半、軌道上から貴重な観測データを配信し続けてきた。

その後継機である高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)は、約2mの展開アンテナで、7GHz帯から89GHz帯の16チャンネルを持つセンサであり、2012年5月18日にGCOM-W1(しずく)に搭載されて打ち上げられた。その後、約8か月間の初期運用校正を完了し、2013年1月25日から輝度温度プロダクトの提供を開始した。また、打ち上げから1年後の2013年5月17日から降水量、海面水温などの物理プロダクトの提供が開始された。

前号機のAMSR-Eに引き続き、貴重な観測の継続性を望む米国、欧州、日本を始めとする世界各国のユーザーへ、AMSR2の観測データが提供され、評価されている。



## マイクロ波放射計シリーズのヘリテージ

2002年に打ち上げられた2式の高性能マイクロ波放射計(AMSR, AMSR-E)の後継機として、高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)が開発され、2012年5月18日に第1期水循環変動観測衛星(GCOM-W1:しずく)に搭載され、打ち上げられた。なお、その後継機である次期マイクロ波放射計の開発が計画されている。

\*鎌倉製作所

# 1. ま え が き

当社におけるマイクロ波放射計の開発は、1987年に打ち上げられた海洋観測衛星(MOS-1)搭載用マイクロ波放射計(MSR)に始まり、第2世代の環境観測技術衛星(ADEOS-II)搭載の高性能マイクロ波放射計(AMSR)、及びNASAの衛星Aqua搭載の改良型高性能マイクロ波放射計(AMSR-E)へとそのミッションを拡張して開発を継続した。現在は2012年5月に打ち上げられた第1期水循環変動観測衛星(GCOM-W1)搭載の高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)が軌道上で運用されており(図1)、その観測データは世界各国へ提供され、利用されている。

本稿では、当社が開発してきたマイクロ波放射計シリーズの開発意義、役割などを述べるとともに、現在までの観測データ利用状況、及び今後の動向などについて述べる。

# 2. AMSR2のデータの有効利用、実績、評価

マイクロ波放射計は、水循環に関連する全球的な水蒸気量、降水量、海面水温等を観測する受動型の電波センサであり、地球規模の水循環のモニタリングとモデリングに全世界で有効利用されている。表1にAMSR2の観測周波数と観測対象を示す。

AMSR2は2012年5月18日にGCOM-W1に搭載されて打ち上げられ<sup>(1)</sup>、同年7月4日に観測データ初画像の取得<sup>(2)</sup>、同年8月10日には定常運用への移行<sup>(3)</sup>と順調に初期運用が実施されてきた。約8か月間の初期運用校正を完了後、2013年1月25日から輝度温度プロダクトの提供が開始された<sup>(4)</sup>。その後も同年5月17日から降水量、海面水温などの物理プロダクトの提供が開始されたことによって、同年6月13日からEORC (Earth Observation Research Center)で



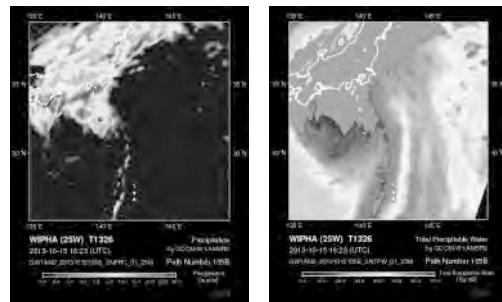
図1. 第1期水循環変動観測衛星(GCOM-W1)(JAXA提供)

表1. AMSR2の観測周波数と観測対象

周波数 観測対象	7GHz帯	10GHz帯	18GHz帯	23GHz帯	36GHz帯	89GHz帯
積算水蒸気量			○	◎	○	
積算雲水量			○	○	◎	
降水量		○	◎	○	○	◎
海上風速	○	○		○	◎	
海面水温	◎	○		○	○	
海水密度度	○		◎	○	◎	◎
積雪水量		○	◎	○	◎	○
土壌水分	◎	◎	○	○	○	○

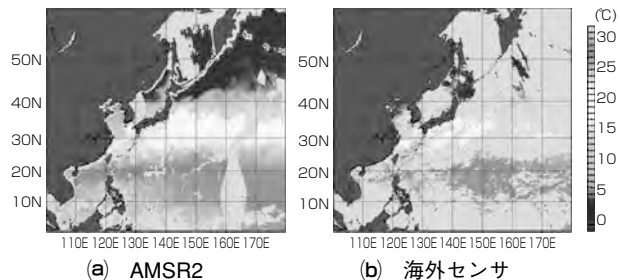
◎: 最重要周波数

AMSR2による台風速報<sup>(5)</sup>などのアプリケーション(図2)も開始された。またユーザーである気象庁でも、同年5月27日から海面温度の解析システムへこのAMSR2の海面水温プロダクトの利用を開始し(図3)、同年9月12日からは天気予報の数値予報システムにAMSR2プロダクトの利用を開始(図4)するなど<sup>(6)</sup>、予測/予報精度の向上に貢献してきている。先に述べた通り、日本周辺で発生し、大型化する台風の規模、進路予測精向上もその一例である。次に、AMSR-EとAMSR2による北極圏の海水分布の状況(2007年9月24日及び2012年8月24日)を図5に示す。観測した海水データを解析した結果、2012年の北極海の海水は、観測史上最も小さい面積を記録したことが確認されており<sup>(7)</sup>、地球環境モニタとしての機能も果たしている。



(a) 降水量 (b) 水蒸気画像

図2. AMSR2データによる台風26号情報(JAXA提供)



(a) AMSR2 (b) 海外センサ

図3. 海面水温の分布の比較(JAXA/気象庁提供)

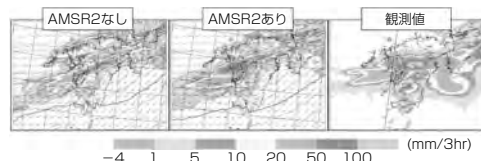
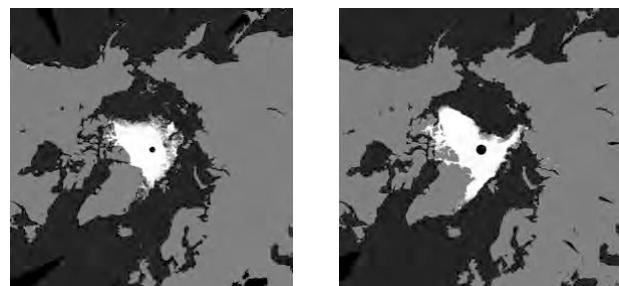


図4. 降水量予測分布(AMSR2データの有無による差異)(JAXA/気象庁提供)



(a) AMSR-Eの観測(2007年9月24日) (b) AMSR2の観測(2012年8月24日)

図5. 北極圏の海水分布(JAXA提供)

一般社団法人 漁業情報サービスセンター(JAFIC)では、AMSR-Eから海面水温の情報を利用した漁場推定と漁船の燃料消費量の削減の成果が得られたことから、AMSR2の観測データも同様に漁業管理のインフラとして継続して組み込まれている。このインフラの開発については、JAFICが内閣府の平成25年度宇宙開発利用大賞の中で内閣総理大臣賞を受賞しており<sup>(8)</sup>、将来に向けた海産資源管理、燃料削減、漁業の近代化に向けて、海外各国に向けて活用範囲を拡大させられる事項と考える。

また、AMSR2を搭載するGCOM-W1は、地球環境保全のための優れた成果に対して贈られる“2013年日経地球環境技術賞”をJAXAが受賞し<sup>(9)</sup>、技術の独自性や社会生活への貢献が評価されている。

### 3. AMSR-Eの再起動と相互校正

AMSRシリーズは、40rpm(1.5秒に1回転)で回転しながら1,600km以上の広範囲における地表面／海表面からのデータを取得するセンサである。AMSR-Eは2002年5月の打ち上げ以降、2011年10月に回転／観測停止<sup>(10)</sup>するまでの約9年半、軌道上から貴重な観測データを配信し続けてきた。そのデータは、米国、中国、日本を始めとする世界各国のユーザーに利用されてきた。観測データの配信は、2012年5月に打ち上げられたAMSR2に引き継がれたが、AMSR2観測データの相互校正を主目的とし、かつAMSR-Eを運用しているNASAからの強い要望によって、再起動の計画が進められた。AMSR-Eを搭載するAquaはほかにも多くのセンサを搭載し観測を継続しているため、AMSR-Eの回転擾乱(じょうらん)が衛星の姿勢に影響を与えないよう細心の計画を練り、2012年2月に回転停止状態での観測を無事再開し、2012年9月に4rpm低速回転(定常回転は40rpm)の試行を実施したが、所望の4rpmまではランアップしなかった。この結果を踏まえ、最終的に2rpm低速回転で観測を再開する案を立案した。2012年12月にコマンド運用を行い、無事に2rpmでの低速回転観測を開始した。その後、2013年12月現在までの1年以上、大きな変動なく観測を継続している。このことはNASAからも大きく評価され、2013年9月にAMSR-Eの再立ち上げに対してNASA Head Quarterから表彰を受けた(図6)。表彰状は個人名宛で、当社2名、JAXA及び三菱スパー



図6. AMSR-E再立ち上げに対する表彰盾

ス・ソフトウェア(株)のメンバーが表彰された。いまやAMSRは、米国で気象観測センサとしてLANDSATなどと同列でインフラに組み込まれており、AMSRシリーズに対する期待は大きい。

### 4. 海外における観測データの利用状況

2002年5月に打ち上げられた米国NASA衛星Aqua搭載用AMSR-Eは3年のミッション期間(設計寿命5年)をはるかに超えて約9年半の運用を継続し、表2(2013年7月のデータによる利用データ量によるランキング)に示す通り、世界各国のユーザーに利用されてきた。AMSR2がAMSR-Eの後継機としての任務を果たすため、GCOM-W1は米国NASA主導のものと地球観測衛星群(米国衛星Aqua, Aura, CloudSat及び米仏共同衛星CALIPSOから構成される)A-Train<sup>(11)</sup>に加わった。A-Trainを構成する各衛星は、数分ほどの間隔で同じ地点を観測することによって、同一観測対象物に対して、マイクロ波、赤外、光学の異種センサによる観測を行うことが可能となり、米国異種センサ(MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer), AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)等)の観測データを複合的に利用するための研究などが進められている。

また、AMSR2とTMI<sup>(12)</sup>、SSMIS<sup>(13)</sup>等の同種センサ間の相互校正を行うことで、同一観測箇所での頻度を増加させて観測精度を向上させる取組みも進められている。

AMSR2の観測データは米国NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)へも配信され、ハリケーンの規模、進路推定に利用されている<sup>(14)</sup>ことに関しても成果が得られており、今後は気象災害による避難範囲と経済損害規模推定の利用にも期待がかかる。また、米国JTWC(Joint Typhoon Warning Center)<sup>(15)</sup>でも台風やハリケーンなどの監視と予報を行うために観測データを利用している。NOAA/NSIDC(National Snow and Ice Data Center)のデータ配信先の集計(表2)によって、近年中国では土壌水分に関するAMSR-Eのデータ利用機関数(ユー

表2. AMSR-Eのデータ利用状況(Top10)

ランキング	国	データ量 (GB)	ファイル 数	ユーザー 数
1	米国	36,872	1,760,329	555
2	中国	25,506	1,074,053	786
3	カナダ	10,232	1,741,630	58
4	ドイツ	5,448	255,951	47
5	日本	2,231	79,871	48
6	アルゼンチン	1,105	26,668	14
7	フランス	1,066	23,208	24
8	ノルウェー	821	19,294	14
9	韓国	721	18,680	22
10	デンマーク	715	16,793	7

備考 2013年度の利用状況(NSSTC(National Space Science and Technology Center)集計)：利用国数 50か国以上、利用機関数合計 2,519

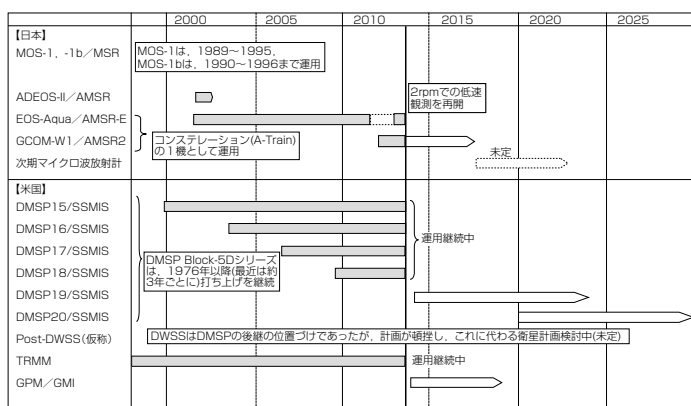


図7. 日米のマイクロ波放射計の将来計画

ザ一数)で米国を抜いてトップに躍り出るなど、観測を引き継ぐAMSR2の国際的な利用価値が増していることも明らかになった。

## 5. 今後の動向

日米における今後のマイクロ波放射計の将来計画を図7に示す。米国でマイクロ波イメージャサウンダ(MIS)の開発が頓挫、空軍(USAF)のDWSSシリーズ衛星などがキャンセルされるなどの状況があり、AMSRシリーズは、マイクロ波放射計として世界の標準機になっていると言っても過言ではない。

当社としては、AMSRシリーズの実績、強みをいかして、ヘリテージを十分に活用するとともに、高周波受信機系の開発、機器の小型・軽量化、及び高密度インテグレーション等の新規技術開発を進める。さらに、次期マイクロ波放射計の受注を目指すだけでなく、インフラとして拡販に結びつけるため、観測データの利用に向けた検討を進めている。

## 6. む す び

我が国における衛星搭載用マイクロ波放射計は、国産化技術の育成段階から、国際協力の枠組みの中で社会貢献する実利用の段階まで進化してきた。

今後もマイクロ波放射計のシリーズ化を図り、ユーザーのニーズに応えるよう高機能化及び性能向上を図っていく必要がある。様々なニーズに応えることによって、宇宙からの観測データが社会の安心・安全と、生活の質の向上に資することで、社会に貢献することを目指している。

## 参 考 文 献

(1) JAXAプレスリリース：H-IIAロケット21号機による第一期水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W1)および韓国多目的実用衛星3号機(KOMPSAT-3)の打上げ結果について  
[http://www.jaxa.jp/press/2012/05/20120518\\_h2af21\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2012/05/20120518_h2af21_j.html)

(2) JAXAプレスリリース：第一期水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W1)搭載センサAMSR2の観測データ取得について  
[http://www.jaxa.jp/press/2012/07/20120704\\_shizuku\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2012/07/20120704_shizuku_j.html)

(3) JAXAプレスリリース：第一期水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W1)の定常段階移行について  
[http://www.jaxa.jp/press/2012/08/20120810\\_shizuku\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2012/08/20120810_shizuku_j.html)

(4) JAXAプレスリリース：第一期水循環変動観測衛星「しずく」の輝度温度プロダクトの提供開始について  
[http://www.jaxa.jp/press/2013/01/20130125\\_shizuku\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2013/01/20130125_shizuku_j.html)

(5) JAXA/EORC台風速報：Tropical Cyclones  
[http://sharaku.eorc.jaxa.jp/TYPHOON\\_RT/index\\_j.html](http://sharaku.eorc.jaxa.jp/TYPHOON_RT/index_j.html)

(6) JAXAプレスリリース：第一期水循環変動観測衛星「しずく」の気象庁での利用について  
[http://www.jaxa.jp/press/2013/09/20130912\\_shizuku\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2013/09/20130912_shizuku_j.html)

(7) JAXAプレスリリース：北極海海水の観測データ解析結果について～北極海海水の面積 観測史上最小に～  
[http://www.jaxa.jp/press/2012/08/20120825\\_arctic\\_sea\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2012/08/20120825_arctic_sea_j.html)

(8) 内閣府宇宙戦略室プレスリリース：平成25年度宇宙開発利用大賞受賞者の決定について  
<http://www8.cao.go.jp/space/prize/kettei.pdf>

(9) 日経地球環境技術賞：2013年(第23回)日経地球環境技術賞受賞者  
<http://www.nikkei-events.jp/chikyu-kankyo/>

(10) JAXAプレスリリース：改良型高性能マイクロ波放射計AMSR-E(アムサー・イー)の観測停止について  
[http://www.jaxa.jp/press/2011/10/20111004\\_amsr-e\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2011/10/20111004_amsr-e_j.html)

(11) NASA Missions：Introducing the A-Train  
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/a-train/a-train.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/a-train/a-train.html)

(12) NASA Facts：TRMM Microwave Imagers  
[http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview\\_dir/tmi.html](http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/tmi.html)

(13) NSIDC Instrument Description：Special Sensor Microwave Imager/Sounder(SSMIS)  
[http://nsidc.org/data/docs/daac/ssmis\\_instrument](http://nsidc.org/data/docs/daac/ssmis_instrument)

(14) NOAA：Hurricane HENRIETTE  
<http://www.nhc.noaa.gov/archive/2013/ep08/ep082013.discus.019.shtml>

(15) NASA Missions：Nasa Marks the Joint Typhoon Warning Center's 50th Anniversary  
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/hurricanes/features/typhoon\\_prt.htm](http://www.nasa.gov/mission_pages/hurricanes/features/typhoon_prt.htm)



# 三菱電機の衛星ミッションサクセス “BMS100.00%” 活動の歩みと成果

佐々木俊昌\*  
山森康博\*  
森 康\*\*

History and Achievements of Mission Success Promotion Activities "BMS100.00%" for MELCO's Satellites

Toshimasa Sasaki, Yasuhiro Yamamori, Yasushi Mori

## 要 旨

三菱電機は、当社衛星の製品品質検証力向上の中心的な役割を担う組織としてBMS(Brand of Mission Success)推進センターを設立し、第三者の有識者による各種審査及び不具合予防活動を展開してきた<sup>(1)(2)</sup>。その結果、2002年9月から2013年8月にわたり衛星27機の打ち上げ及び軌道配置に成功するという大きな業績への貢献を果たした。

この打ち上げ成功の裏には、当社の宇宙開発・製作の核である鎌倉製作所の全従業員が一丸となって取り組んだ、製品の高い品質と信頼性を確保するための実践的な活動がある。

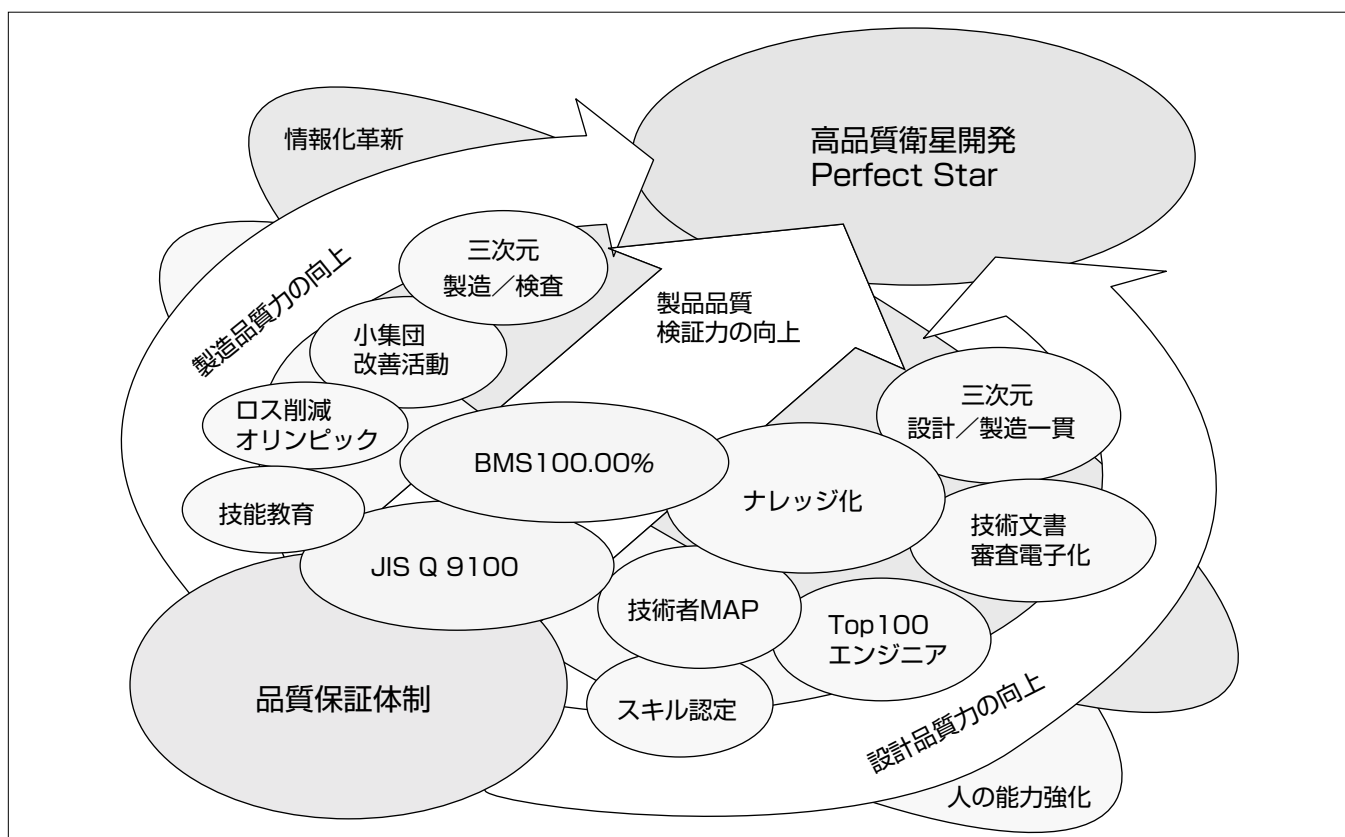
当社は、高品質という企業イメージを確立するために、

設計品質力、製造品質力、製品品質検証力のそれぞれに対して競争力向上施策を展開してきた。また、従来の高い品質と信頼性を確保する活動の中に衛星自体と作業現場の“安全”を確保するシステム安全管理活動も加え強化してきた。さらに、2008年10月には、信頼性技術センターを設立し、デブリ<sup>(注1)</sup>、放射線、帯放電といった宇宙独特の環境に対処して衛星システム設計段階から品質・信頼性を作り込む体制を強化した。

本稿では、これらの活動の歩みと成果及び今後の活動の展望について述べる。

(注1) 地球の周回軌道上にある不要になった人工物体のこと。

特集  
I



## 衛星の品質信頼性向上施策

従来の品質保証体制の上に“BMS100.00%”活動によって第三者検証機能を強化し、製品品質検証力を向上させるとともに品質を作り込む設計品質力及び製造品質力の向上施策を展開して、高品質衛星開発を達成するための品質信頼性向上施策を示す。

## 1. ま え が き

当社は、製品品質検証力向上の中心的な役割を担う組織としてBMS推進センターを設立し、第三者の有識者による各種審査及び不具合予防活動を展開してきた<sup>(1)(2)</sup>。その結果、2002年9月から2013年8月にわたり衛星27機の打ち上げ及び軌道配置に成功するという大きな業績への貢献を果たした。

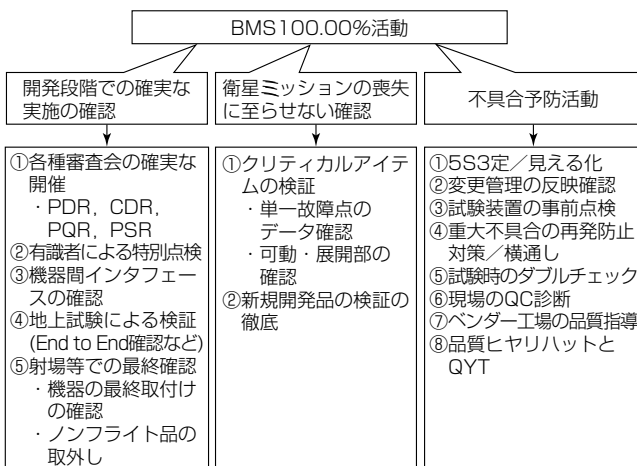
この間、通信衛星や気象観測衛星などの分野を中心に、ひまわり7号☆、Super Bird-C2☆、みちびき☆、ST-2☆、Turksat-4A/4B○、ひまわり8号/9号○、準天頂衛星3機○、その他プロジェクトでの受注を重ね、当社が独自に開発した静止衛星の標準プラットフォームであるDS2000バスをベースとした国内外の衛星の製作を進め、ロケット調達、射場での管理、軌道上初期運用などを含むより広範な業務の経験と実績を蓄積してきた(☆印は軌道配置済み、○印は設計、製造、試験中)。

## 2. BMS100.00%活動

### 2.1 高品質衛星開発の取組み

顧客の要求仕様を100%満足させる取組みは当然のことであるが、当社の鎌倉製作所では顧客満足の絶対的な信頼獲得のためには100%に加えて2ランク上の品質レベル100.00%を目指すこととし、要旨の図に示すように製品品質検証力向上の柱として衛星のミッションサクセス活動“BMS100.00%”を継続している。

この活動では、第三者が、いわゆる“独立した確認と検証”といった活動に従事し、各種審査及び不具合予防活動を展開する。BMS推進センターは宇宙関連部門が行うすべての活動を監視し、品質に関する問題が生じると勧告、追跡調査に取りかかる。この活動は週一回鎌倉製作所の所長室に報告される。主なBMS100.00%活動を図1に示す<sup>(1)(2)</sup>。



PDR: Preliminary Design Review, CDR: Critical Design Review, PQR: Post Qualification test Review, PSR: Pre Shipment Review, QC: Quality Control, QYT: 品質予知訓練

図1. 主なBMS100.00%活動

### 2.2 商用衛星での活動事例

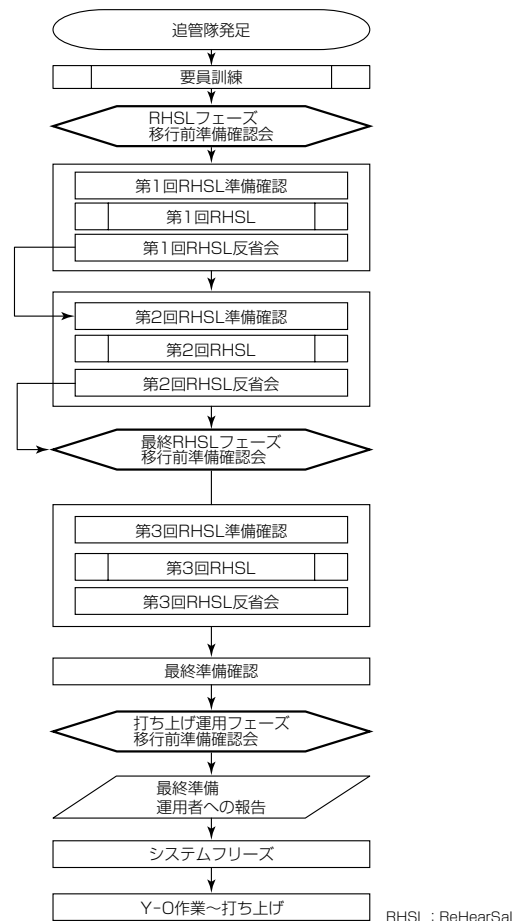
DS2000バスをベースとした商用衛星での高品質維持に向けた活動事例を述べる。

#### 2.2.1 現品会議

有識者、電気設計技術者、機械設計技術者による基板、機器、サブシステム、システムの各階層における現品の出来栄を確認する特別審査を物品の難易度や過去の経験から抽出して実施・継続している。特に、ケーブルや熱制御材などの実装状態、機構部のクリアランスや動作状況については、設計者の意図や有識者の指摘を各関連の設計者、現場作業員との間で協議し合うことで、不安点を取り除いた確実な状態に製品を仕上げ、また、有識者の経験やノウハウなどの暗黙知を形式知に変えて認識共有する機会として役立てていくように心がけている。

#### 2.2.2 衛星運用準備会

有識者を交えた第三者検証としては、先に述べた衛星ハードウェアに対する現品会議とは別に運用準備の状況確認を行うフェーズ移行前確認会による審査強化を実施している。運用の準備は運用準備会(OROCB: Orbit Raising and Operation Control Board)の場で進められているが、それらの準備状況を有識者が確認する複数のフェーズ移行前確認会を図2に示すように開催し、運用者の意図が正しく反映されていることを確認している。



RHSL: ReHearSaL

図2. 運用準備会に対するフェーズ移行前確認会による審査強化

## 2.3 更なるミッションサクセス活動の強化

衛星システムで高い信頼性を確保していても、衛星や機材の射場への輸送や射場での作業でトラブルや事故が発生したとしたら、衛星ミッションを成功に導けないどころか、プロジェクト自体が存続しえない。また、標準化が進んでいる世界の商用衛星市場でさえも、設計や製造の致命的の不具合によっていまだに失敗する衛星が一定数ある。これらの不具合の中には、設計段階から注目し対処すべき品質・信頼性上の課題が存在している。

当社では、図1に示した従来実施・継続されているミッションサクセス活動に加えて、次の2つの取組みを展開している。

### 2.3.1 システム安全管理からの衛星開発への取組み

衛星開発における衛星自体及び関連作業の安全性の確保は、システム安全管理活動として衛星プロジェクトの初期段階から実施される。“システム安全”という用語は、“システムの安全”という意味ではなく、ISO14620-1 Space Systems-Safety Requirements Part 1で規定される“システムティックな安全管理の手法を指す固有名詞”として用いられている。

DS2000バスをベースとした商用衛星でもシステム安全の考え方を踏襲した本質安全設計優先の安全性の作り込みが行われている(図3)。

製品動作の確実さを追求する信頼性と不慮・不測の動作を防止する安全性は、必ずしも両立しない概念であることは広く知られている。

安全性を優先するために動作の信頼性が低下する、又は、その逆に信頼性確保のために安全性が制約を受けることは、決して洗練された製品設計、システム開発とは言えない。このような課題への対応として、衛星バスの構成品や関連する作業・機材に内在する危険性に早い段階から目を向け、安全確保のキーファクタが新規のプロジェクトでも保たれていることをプロジェクトの初期段階から確認していくことが重要となる。また、製品・作業の変化点、変更点が及ぼす影響について第三者を交えた審査を客観的に行うことも必要となる。

当社では、このようなシステム安全管理活動を取りまと

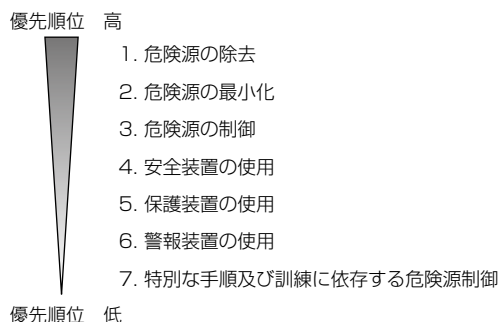


図3. 安全設計の優先順位

め、標準化推進を担う専門の第三者的組織として2003年6月からシステム安全管理グループを組織し、10年間にわたって継続的な活動を推進してきた。この間、各プロジェクト、設計者、品管、品証への教育プログラムの提供やリスクアセスメント、FTA(Fault Tree Analysis)等の手法を用いた共通的な危険源(ハザード)の見える化、制御法の標準化、結果の蓄積等を行い、関係者との認識共有と管理レベル向上を図ってきた。2013年4月からは宇宙事業の品証部門にシステム安全管理の業務を統合し、システム安全管理活動を継承しつつ、より製品開発・製造の各業務に本目細かく密着した形で、安全性と信頼性の両立を図ることを目的に安全信頼性管理課を設立し、強化を図っている。

### 2.3.2 品質・信頼性からの衛星開発への取組み

当社では2008年10月に信頼性技術センターを設立<sup>(2)</sup>、デブリ、放射線、帯放電と言った宇宙独特の環境に起因する現象に対する衛星システム設計上の課題を検討し、更なる品質・信頼性の作り込みを行う体制強化を実施した。ここではその後の活動事例を述べる。

#### (1) スペースデブリ対策

人工衛星を取り巻くスペースデブリ環境は近年悪化している。そのため無人の人工衛星でもスペースデブリの防御対策が必要となっている。当社ではISO TC20/SC14/WG7デブリ分科会、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)の宇宙機設計標準ワーキンググループなどの活動に積極的に参加し、各国、各宇宙機関の動向を含めた情報収集や衛星メーカーとしての意見表明及び原案作成に携わっている。また、これらの活動を通じて得た国内外の標準・規格の動向を踏まえ、衛星システム設計へのフィードバックを図っている。

人工衛星の設計で検討すべきデブリ対策には、①デブリ発生防止(軌道上デブリ環境の悪化防止)、②デブリ防御(機器故障を誘発する衝突被害の防止)、③地上安全(大気圏突入時の残存物による人的被害の防止)がある。特に②では、参照するデブリ環境モデルの差異による衝突頻度の違いが衛星設計に大きく影響するため、利用する解析プログラムやデータに注意が必要である。

現在、衛星のデブリ環境予測に用いられるシミュレーションモデルにはMASTER2005、MASTER2009(ESA：欧州宇宙機関)、ORDEM2000(NASA：アメリカ航空宇宙局)などが利用されており、これらのシミュレーションモデルの差異や特徴を正しく理解することが必要となる。静止軌道衛星のデブリ環境例を図4に示す。

また、中国の衛星破壊実験(2007年)や米露衛星間衝突事故(2009年)といった軌道上破碎事象による軌道環境急変といった事態への対応が必要となる場合も予想される。このような課題への対応には、外部の関係機関や有識者との意見交換、ネットワーク作りが今後ますます重要になると考える。

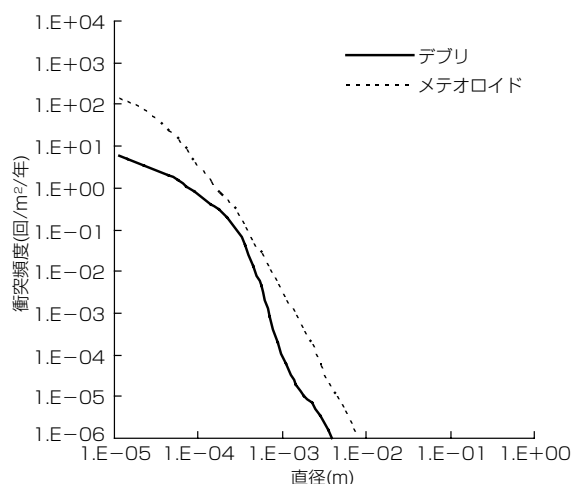


図 4. 静止軌道衛星のデブリ環境

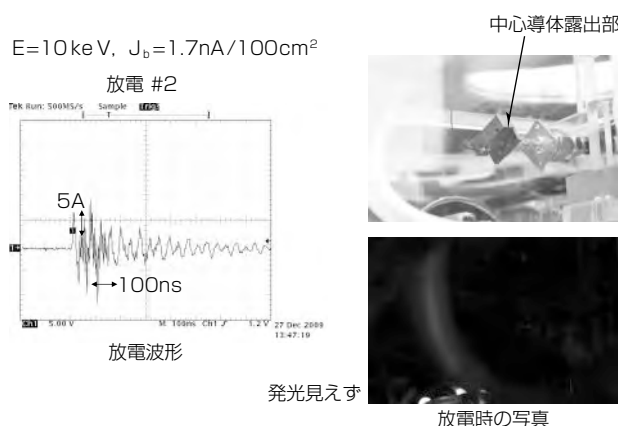


図 5. 帯放電試験

## (2) 帯放電評価

衛星システムに使用される材料・部品への宇宙環境の荷電粒子による帯電状態把握のため、電子線照射による帯電の度合いや放電の有無を確認し、帯電解析を行うための帯電特性データ蓄積を外部研究機関と共同で継続的に進めている。例えば、最新の同軸ケーブル、ガラスクロステープ、白色ペイント、メタルマウント等をサンプルとして試験を実施した。これらの部品・材料は、いずれも宇宙空間に直接露出する、又は遮蔽がほとんどなく帯電電位が高いことが見込まれる物品である。試験の結果から実装状態を考慮したリーク特性や放電しきい値が確認でき、ミッション期間中の帯電電位予測や放電回数予測を行う根拠を得ることができる。このように蓄積したデータを用いて帯電解析を行うことによって早期に設計の見直し・処置・対策を行うことが可能となる(図 5)。

## 3. ミッションサクセス活動の展望

2002年 9 月から開始した当社衛星のミッションサクセス活動も、その活動期間が10年を超え新しい段階を迎えている。ミッションサクセス活動を実施したプロジェクトから得た経験や課題を次の改善機会へとつなげるPDCA (Plan, Do, Check, Act) サイクルは、事務局であるBMS推進センターや各有識者を中心に積極的に行われてきた。これらの取組みを通じて社内でのコミュニケーションが活性化し、実際の業務手順や標準に修正を加えた事例も多くある。しかし、今後の宇宙事業における更なる飛躍のためには、過去のミッションサクセス活動によって得た多くの情報をより効果的に、また、より積極的に活用できるように工夫し、次の世代の実務担当者に生きた知恵として伝えていくことが大切である。

そのために対応すべき課題には、次のような事柄がある。

### (1) 知見の活用促進

業務の一層の効率化や予防型品質管理活動強化の観点か

ら、ミッションサクセス活動で得た知見をより本目細かく上流工程で活用できるよう実務担当者のためのガイドを再整理し活用を促進する。

### (2) 教育・訓練へのフィードバック

関係者が受ける教育内容の選別や根拠資料として、ミッションサクセス活動で得た知見を参考とすることで、新たなコンテンツ準備や既存資料の改訂に役立てる。

### (3) 標準化活動・変更管理へのフィードバック

ミッションサクセス活動で得た知見から社内の標準化活動や変更管理に対する新たな施策展開を促す。

## 4. む す び

本稿をまとめるに当たり、今回改めて当社の衛星ミッションサクセス活動の歩みを振り返る機会を得た。そして、各業務に取り組む関係者一人ひとりが取り組んだ飽くなき安全・品質・信頼性の作り込み活動と各課題への果敢な挑戦が衛星の打ち上げ及び軌道配置の連続成功を支えていることを再認識した。今後のミッションサクセス活動でも関係者一人ひとりが果敢に挑戦する姿勢を貫き、その経験を次代へ伝え育むことが成功継続への必須要件と考える。当社の宇宙事業のミッションサクセス活動は更に一段高いレベルを目指し、衛星ミッション成功の品質ブランドを追求する。

## 参 考 文 献

- (1) 稲川美之：衛星開発における品質信頼性向上活動，三菱電機技報，**79**，No.8，559～562 (2005)
- (2) 稲川美之：衛星の品質力向上施策，三菱電機技報，**83**，No.3，231～234 (2009)
- (3) 森 康，ほか：定性的リスクマトリクスを用いた予防型安全管理のフレームワークに関する考察(リスクアセスメント改善のためのリスクコミュニケーション)，日本機械学会論文集(C編)，**76**，No.772，3760～3767 (2010)
- (4) 金井典子：人工衛星のスペースデブリ対策，日本信頼性学会誌，**34**，No.31，178～185 (2012)



# 「安全・安心な社会」を支える先進技術のグローバル展開に向けて

Global Business Development of the Advanced Technologies for "Safe Society"

木元勝一  
Shoichi Kimoto



我が国は東日本大震災のような津波を伴う大地震をはじめ、台風などによる暴風や豪雨、豪雪、洪水、噴火など様々な自然災害を経験している。世界で起きたマグニチュード6.0以上の大地震の約2割は、国土面積が世界の総陸地の僅か0.3%にも満たない日本の周辺で発生しているという(内閣府：防災情報)。加えて現代社会では、交通事故、飛行機・鉄道事故、環境汚染など人為的な要因で引き起こされる災害も発生し、安全・安心を脅かす要素の拡大とともに「安全・安心な社会」の構築が喫緊の課題となっている。

三菱電機は防衛・宇宙事業で培ったセンサー、レーダ、デバイス等の最先端技術を活用し、「安全・安心な社会」の構築に貢献すべく、様々な製品を開発し世に送り出している。はじめにご紹介する“モバイル・マッピング・システム(Mobile Mapping System, 以下MMS)”は、GPS衛星からの位置情報を受信するアンテナ、慣性計測装置、カメラ及びレーザースキャナーを車両に搭載し、走行しながら地理空間の画像データや三次元レーザ点群データを計測することが可能である。多くは公共測量分野で利用されているが、防災分野でも河川堤防の変形や沈下、トンネル内壁の細かなクラック、道路面のひび割れの調査などで活用されている。将来のITS(Intelligent Transport Systems)分野においては、準天頂衛星をはじめとする複数の衛星を活用することによって、景観情報や道路情報などを正確に取得することで、自動運転支援システムなどへの発展が期待されるほか、当社が開発した車載用ミリ波レーダとの相乗効果による交差点での安全監視など、交通安全への寄与を目指している。

次に紹介する“ドップラーライダー(Doppler Lidar)”はレーザ光を発射し、大気中のエアロゾル(塵、微粒子)からの反射光を受信することで、その移動速度を風速として計測する装置である。上空の風速分布の計測を遠隔で行うことが可能で、風況観測などで利用されている。航空機の安全確保のため、着陸に影響を与えるウィンドシアの観測はその一例であり、空港で導入が進められている。また航空機の安全の脅威となる乱気流の観測について、実用化に向

けた航空機搭載型ライダーの研究開発が進められており、当社もこれに参画している。環境対策用途では、都市大気(ヒートアイランド現象や自動車排気による環境影響物質、大気汚染)の風向監視・予測での利用が期待されるほか、再生可能エネルギー分野でも、今後普及が予測される風力発電において、風車制御による運用の効率化や長寿命化を目指しライダーの導入が検討されている。

最後に、次世代のスキャンニングデバイス“長焦点イメージセンサ(Deep Focus Image Sensor)”をご紹介します。これまで当社は、流通貨幣の安全・安心を支える真贋判定用途で、紙幣の読取デバイスとして密着イメージセンサ(Contact Image Sensor)を供給してきた。一方、長焦点イメージセンサは、こうした読取デバイスの一つとして新たに開発した製品であり、複写機の読取用途で従来使用されてきた縮小光学系デバイスに匹敵する焦点深度を確保することで、当該分野への参入を目指している。今後は半導体ウェハ、ガラス基板等の傷・欠けなど検査用途での適用を目指し、ものづくりの安全・安心に向けた製品開発を進めていく。

日本政府は「安全・安心な社会」の構築に向けた法令の整備を進めるとともに、有識者による防災対策検討会の推進や科学技術の研究などに積極的に取り組んでいる。また海外では、開発途上国を中心に自然災害の抑止や被害軽減などの防災・減災技術、復旧対策技術の進歩が望まれていることから、日本の国際協力としてそのインフラ需要に寄与すべく提案活動(防災に関する技術・製品の海外輸出)を進めている。こうした政府の動きに呼応し、当社も最先端の技術やノウハウを提供する場として、グローバルな防災分野での事業拡大を目指している。IT宇宙ソリューション事業部では衛星通信、レーダ、電子デバイス等の事業を推進しており、これらの最先端技術、オンリーワン製品などの強みを生かし、世界各国の安全・安心・防災の分野に製品を投入していくことで、国内外の「安全・安心な社会」の構築に向けて貢献していく所存である。引き続き各方面からのご支援、ご協力を賜りたい。



# 巻頭論文

## モビルマッピングシステム(MMS)の最新動向



吉田 守\*



吉田光伸\*\*

The Latest Trend of Mobile Mapping System

Mamoru Yoshida, Mitsunobu Yoshida

### 要 旨

道路・橋梁(きょうりょう)・港湾・トンネルや上下水道といった社会インフラは経済活動でその重要性をますます増しているものの、1950~1960年代の高度成長期における建設後、半世紀がたち維持管理と補修が大きな課題となっている<sup>(1)</sup>。しかしながら対象となる設備の数も多く、効率的な維持管理を可能とする技術が注目されている。MMS(Mobile Mapping System)はこの注目技術の一つとして、社会インフラの効率的な維持管理を実現するために期待されている。

MMSとは、車両にGPS(Global Positioning System)他各種センサを搭載し、走行しながら周辺の三次元地図データを精密かつ効率的に計測するシステムである。

三菱電機では道路台帳やトンネル覆工の走行計測、河川

計測、地下計測、都市景観や広範囲の三次元化等用途に応じ、各種カスタマイズしたMMSを開発・投入している。

現在、さらに計測対象を鉄道、路面検査へ広げる検討を行っている。また宇宙を見た時、複数の衛星測位システム(マルチGNSS(Global Navigation Satellite Systems))の時代がもうすぐそこまできている。すなわちGPS、GLONASS、GALILEO、GAGAN等が測位衛星として活用できるようになる。日本も既に準天頂衛星1号機みちびきを打ち上げ、測位信号の発信を開始、続いて衛星3基が追加で打ち上げられて、4基体制でシステムが運用されることが決定している。これら衛星を有効利用する技術を早期に検討し、防災・維持管理・安全管理等のより大きな社会貢献を果たしたいと考えている。



MMS-X640



MMS-X320R



MIMM



MMS-K

IMU : Inertial Measurement Unit

### 当社MMSのバリエーション

"MMS-X640"は6カメラ4レーザを搭載し、全方位計測が可能、"MMS-X320R"は長距離レーザを搭載し、200m以上の遠方計測が可能、"MIMM"は高精度レーザを搭載し、微細な形状を計測可能、"MMS-K"は改良型標準機であり、写真は全方位カメラ搭載時のものである。

# 1. ま え が き

高度成長期に建設された道路・橋梁・港湾・トンネルや上下水道といった社会インフラの維持管理が必要とされている。昨今は効率的な維持管理を可能とするための検査技術が注目されており、早期発見・早期改修の“予防保全”への取組みなどとともに、低コストで効率よく検査できる技術の開発と導入が急務とされている。

MMSはIT技術を活用して維持管理のための検査を効率よく・精度よくかつ低価格で実現しようと開発されている。各種インフラ維持管理の実例と取組みについて述べる。

# 2. MMSの概要

## 2.1 基本構成と基本機能

一般的にMMSの定義は、次の2点である。

- (1) 車にGPSなどの測位装置とカメラやレーザスキャナ等の計測装置を搭載していること。
- (2) 道路を走りながら周辺の三次元形状の取得が可能であること。

基本的な機能は、GPSアンテナ及び受信機を1～3台と慣性計測装置(IMU)及びタイヤの回転数を検出するオドメータの組合せによって車両の自己位置と姿勢を計算する。加えて、同時に搭載されているカメラやレーザスキャナによる計測データに三次元座標を付与するものである<sup>(2)(3)</sup>。

## 2.2 GPS/IMU/オドメータ複合計算

MMSではGPSで測位計算を行って位置を特定し、3つのGPSによってGPSジャイロを構成し、姿勢計算を行う。さらにIMUに加えてオドメータ(タイヤ回転計)を加えた複数のセンサの複合測位計算を行っている<sup>(2)</sup>。

GPS・IMU・オドメータ複合計算の目的は次の2つである。①GPS単独の位置計算に含まれるノイズの影響と、IMUでの位置計算に含まれる積算誤差成分の影響、及びオドメータによる距離計算に含まれるスケールファクタの誤差を相互に補完して正確に測位する。②GPSが受信できない箇所での測位。

GPSによる測位は誤差の時間的蓄積はないものの、1回の計測には誤差が含まれる。IMUデータは逆に短時間の誤差は少ないが、時間経過とともに誤差が蓄積する。さらにオドメータはタイヤの回転数から移動距離を求めるが、気温、空気圧、乗車人員等によってタイヤ1回転あたりの移動距離が変動する。当社のMMSはこれら3種の測位システムを密結合方式で融合し、一括して位置・姿勢計算を行っている。これによってGPSによる測位を有効に利用することが可能となり、基準点による座標確定を必要とせず、直接的に座標を得ることが可能になっている。

## 2.3 使いやすさの追求

当社のMMSは専門知識がなくても操作できるという基

本コンセプトの基で設計している。車両の操作も後処理を行うソフトウェアも誰でも使用できるように考慮している。特に後処理ソフトウェアは複数車両による複数の計測であってもユーザーは煩雑な手順を行うことなくカメラ画像を使用したカラーレーザ点群まで、自動的に算出するようになっている。

しかし、車両を利用した移動体計測が一般化し、需要が増えていく中で、より一層使いやすいMMSが求められている。

最新機種のMMS-K(要旨の図右下)はこのような要望に応えて既存機種を改良し、性能と、使い勝手を向上させている。特長として次の6点が挙げられる。

- (1) 助手席での操作を可能として、運転者とのコミュニケーションをとりやすくした。
- (2) オドメータを車両のホイール内に納め、非接触方式とすることで、オーバーフェンダが不要となった。また縁石などにオドメータをぶつけて故障させることがなくなった。
- (3) 新型標準レーザを搭載することによって、到達距離、取得点数ともに約2倍となった。また反射輝度が取得できるようになり日光に左右されないレーザ計測が可能となった。
- (4) 軽自動車にも搭載可能であり、より狭い道路の計測も可能となった。
- (5) 記録媒体を半導体化することで、対振動衝撃による記録の欠落を防止した。
- (6) 車両内の記録装置を集約して車両後部に配置することで乗車定員を増やした。

# 3. MMSの利用事例

インフラ維持管理分野について、MMSの4つの利用事例を搭載センサのタイプ別に述べる。

## 3.1 道路台帳など公共測量(標準機利用事例)

MMSは名前が示すとおり地図を作成するシステムとして開発され、道路台帳付図や上下水道台帳付図作成に多く利用されている。効率的な測量ができることはもとより、交差点の見通し改善、看板や樹木のはみ出しのチェックなど、取得した三次元データからまた別の維持管理業務も可能となる。

道路や上下水道の管理者は国や自治体であるため、公共測量として実施しなければならない。当社MMSを利用したこれらの測量は50以上の自治体から国土交通省公共測量作業規程の準則第17条を申請し、国土地理院によって承認された実績を持つ。図1はMMS-Kによって取得した点群の例である。点群は1点ごとに座標を持っており、位置の特定、距離、形状の測定に利用できる。MMSでは点群を利用して位置、距離などを計測し、カメラ画像を利用して対象物を確認することができる。

### 3.2 景観調査など(長距離レーザ利用事例)

計測距離が200m以上計測できる長距離レーザを搭載したMMSを開発した(要旨の図右上)。図2はその計測の例であり、高さ150m以上の高層ビル群の屋上付近まで鮮明に計測されている。これを導入することによって台帳付図周辺のビル群まで把握できる。景観調査や3D都市モデルの作成に利用されている。また崖面の傾斜を計測し安全性の確認や、河川の対岸の現状把握などに利用することで崖面や河川の維持管理に利用できる。

### 3.3 トンネルなどのインフラ管理高精度レーザ利用事例)

高精度レーザは1秒間に100万点以上のレーザ点を取得でき、それぞれの点がレーザとして1mm以下の距離精度を持っており、詳細な形状を計測したいときに有効である。図3はこのレーザで一般道路を計測した事例である。レーザが高密度であるため、見た目は写真のように見えるが、これも点の集まりである。またズボンのしわ、枝の形状などが詳細に取得できていることが分かる。

MIMM(要旨の図左下)はトンネル用専用車両として業界メーカーと共同で開発したMMSで、高精度レーザとLED照明装置及び16台のカメラを搭載している。トンネル覆工を50km/hで走行しながら計測を行う。これまで、トンネル点検は長期間にわたる交通規制や通行止めを伴っていた。MIMMでは一般車に混じってトンネル内を走行するだけで計測できるため交通規制を全く必要としないこ

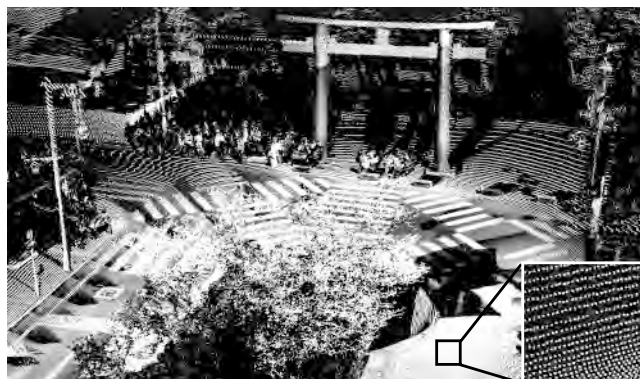
とは大きなメリットである。

MIMMでは撮影したカラー画像からトンネル内の微細なひび割れを始めとして、漏水、変色などの変状を判別できる。また、図4のような三次元レーザ計測結果から、覆工の局部的な微細形状を計測できる。

これらの変状と変形を合わせて把握することによってトンネルの健全性を評価できると考えており、実用化検討を進めている<sup>(4)(5)</sup>。

### 3.5 河川計測など(全方位カメラ利用事例)

MMSではカメラは主に道路付近の現況を目視確認するのに利用するが、道路付近だけでなく全周囲の現況を確認する要望も出てきており、これに対応するために全方位を同時に撮像できるカメラを搭載できるようになっている(要旨の図右下)。このカメラは5つのカメラが一体となっており、一度の撮像で継ぎ目のない全方位映像を取得可能である。図5はその撮像例である。画面左側が前方、右側



右下は部分拡大図、点の集合であることが分かる。

図1. MMS-Kによる点群



図2. 長距離レーザ計測結果(みなとみらい)



図3. 高精度レーザでの取得例

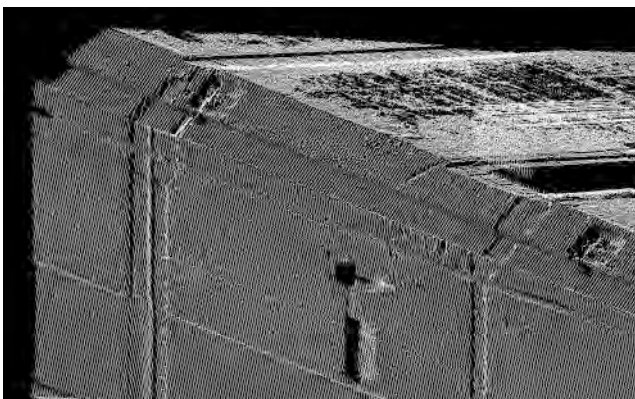


図4. トンネル計測例, 拡大図(高精度レーザ)



図5. 全方位カメラ撮像

が後方、真ん中が右側を示している。下側はMMSのユニットが写っている。上側は道路にそっている高架道が撮像されているのが確認できる。この映像とMMSの標準カメラ映像を組み合わせることで全方位の現況を正確に把握できる。このカメラは河川の現況計測などに多く利用されている。

#### 4. 発展への展望

##### 4.1 鉄 道

鉄道、線路周辺、鉄道トンネルでも道路同様、維持管理が必要である。現在、MMSをトロッコなどに搭載し鉄道の計測を試行している。線路周辺の3D形状を計測することで、車両限界・建築限界の解析、トンネルの健全性確認にも利用可能と考えている。また、将来の鉄道ITS(Intelligent Transport Systems)の基礎データとしても活用できると考えている。

ただし鉄道レール上は、道路のように自由にコースを変更してGPSを補足するような走行はできないため、計測装置や計測データの後処理に工夫が必要である。さらに連続したトンネルとして地下鉄への応用も考えられるが、全線にわたってGPSが受信できない状況となるため、更なるシステムの検討が必要である。

##### 4.2 路面性状

路面性状とは舗装道路の路面の健全性を示す指標である。高精度レーザの用途として路面性状調査への適用を検討している。MMSを用いて舗装調査・試験法便覧に沿った方式を用いて、決められた精度で簡便に計測できれば道路維持管理の計測にも利用できると考えている。その上で計測結果を道路台帳の上に位置を合わせて表現できれば、管理者も利用しやすい道路管理図面ができると考えている。

路面性状調査では欠かせない、“ひび割れ”については1mm以上のものを検出・撮影しなければならないが現状の標準カメラでは分解能が十分ではないので、舗装面専用のカメラを搭載することが必要である。

#### 5. む す び

MMSを利用した種々のインフラ管理の現状と将来の見通しについて述べてきた。今後のインフラ管理は三次元が主流になっていくと考えている。計測走行とそれからの点群生成までの効率化だけでなく、3D地図又は社会基盤データ作成までの全体を効率化するために計測データの自動処理の開発なども盛んに行われている。

例えば現在の地形座標を初期値としてデータベースなどに登録しておき、通常は維持管理のための経年変化量として、災害発生時には被害査定や復興計画へ即座に供することができると考えている。

MMSによって、三次元の計測が高精度・高効率に行われ、経年変化の初期値データとして蓄積され将来に受け渡すことができるようになってきた。社会インフラの維持管理を行う技術者や管理者にはこれらデータが、維持管理や震災・災害等の緊急時における対策に強力な手助けとなるはずである。

MMSとその利用用途の開発を通じて社会貢献を果たしていく。

#### 参 考 文 献

- (1) 国土交通省：国土交通省技術基本計画～安心と活力のための明日への挑戦～（2012）  
<http://www.mlit.go.jp/common/00023235.pdf>
- (2) Ishikawa, K., et al.: A Mobile Mapping System for road data capture based on 3D road model, IEEE International Conference on Control Applications (2006)
- (3) 西川啓一，ほか：高精度GPS移動計測装置 三菱モビルマッピングシステム(MMS)，画像ラボ，22，No. 1，74～81（2011）
- (4) 京都大学道路トンネル健全性評価プロジェクト：道路トンネル健全性評価技術の研究，第6回新都市社会技術セミナー（2009）
- (5) 西川啓一，ほか：MMSの最新動向，建設の施工企画，No. 740，58～64（2011）

# モービルマッピングシステム(MMS)による レーザ計測性能評価

島 嘉宏\*  
富樫健司\*  
千葉洋平\*

Performance Evaluation of Laser Measurements by Mobile Mapping System

Yoshihiro Shima, Kenji Togashi, Yohei Chiba

## 要 旨

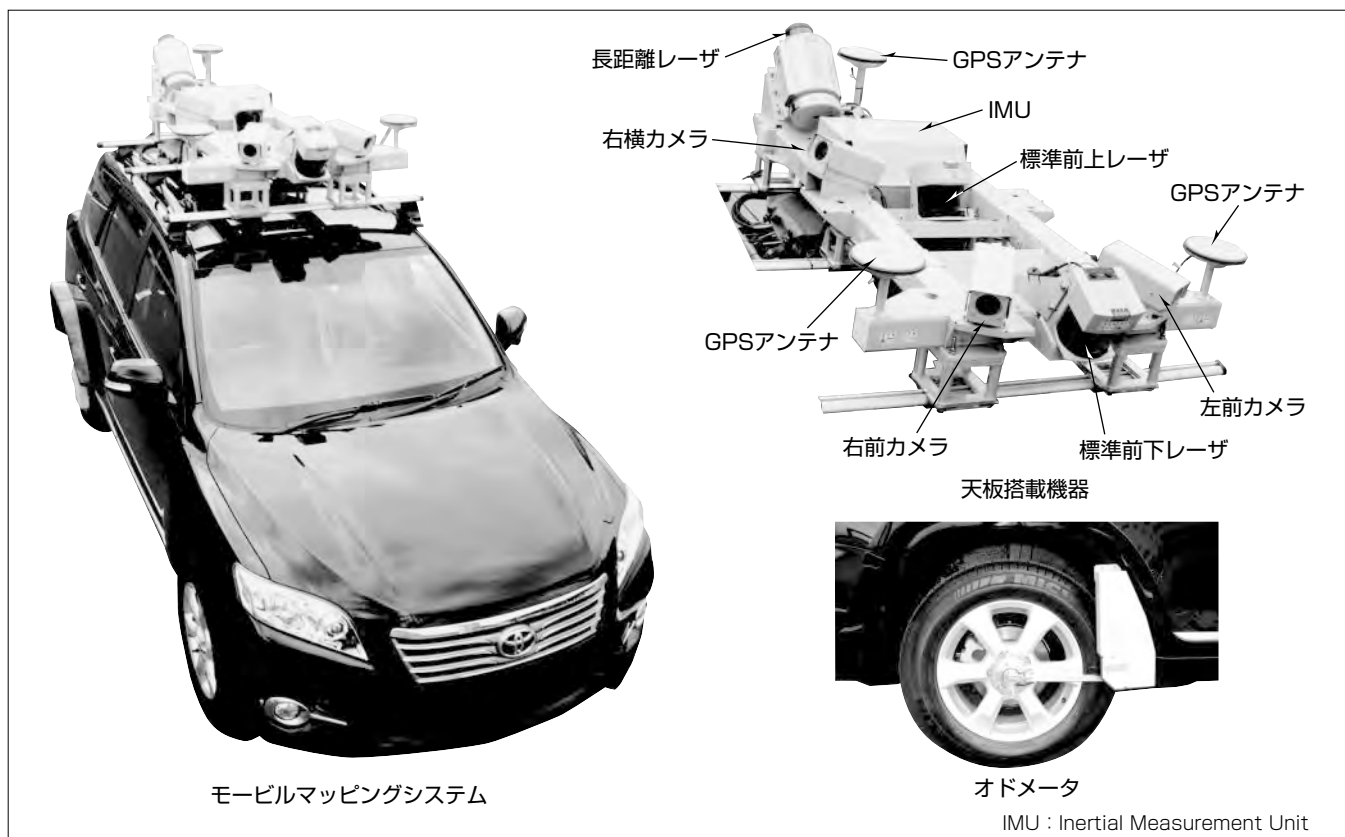
MMS(Mobile Mapping System)は、車両にGPS(Global Positioning System)他の各種センサを搭載して、走行しながら周囲の三次元計測を行うシステムである。道路周辺の地物計測が容易に行えることから、道路周辺の地図作成などの用途で活用され、測量規定案にも記載されている。

MMSの普及に伴い、様々な環境でのデータ収集が行われることで、その活用用途も広がりを見せ、従来の道路周辺部に限らず、より広範囲に、より詳細に計測したいという需要が生まれてきた。特に、国内の道路や鉄道などの交通インフラは構築から半世紀を迎え、維持管理と補修のための現状計測が急務となったことに対し、移動しながら周

囲の三次元形状を詳細に計測できるMMSの適用が望まれている。

三菱電機では、このような新たな計測ニーズに対応するため、従来の標準レーザスキャナに加えて、長距離レーザスキャナを搭載したMMSを、新しくラインアップに加えた。また、トンネルの壁面や路面性状を高精細に計測するための高精度レーザスキャナを搭載した計測車両を開発し、現在はMMSのオプションとして高精度レーザスキャナを選択可能とした。

本稿では、これらの高性能なレーザスキャナを搭載したMMSで得られる三次元データの精度を評価検証した結果について述べる。



## 三菱モービルマッピングシステム“MMS-X320R”

GPS、IMU、レーザスキャナ、カメラなどの機器を車両に搭載し、走行しながら周囲の三次元位置情報を高精度で効率的に取得できる三菱モービルマッピングシステム(MMS)は、公共測量を始め、インフラ維持・管理などの広い分野で活用されている。MMS-X320Rでは、さらに長距離レーザスキャナを搭載することでより高く、遠くまで計測が可能となった。



# 1. ま え が き

MMSは、車両で走行するだけで、周囲の三次元計測を行えるため、道路封鎖や交通規制で交通を妨げることなしに、安全に効率良く、道路周辺のデータ収集ができるというメリットがあり、全国的に道路周辺の地物計測などでの活用が始まりつつある。

さらに、MMSによる三次元計測データの活用用途については、都市景観調査や、河川堤防計測など、様々な分野での検討が始まっている<sup>(1)</sup>。

# 2. MMSの概要

## 2.1 MMSとは

MMSは、次の機能を持つユニットで構成される。

- (1) 自車両の位置・姿勢を計測する。
- (2) 車両の周囲の地物を計測する。

この(1)を実現するためのセンサとして、GPSアンテナ及び受信機、慣性航法装置、タイヤの回転数を計測するオドメータが搭載され、これらのセンサを組み合わせることで、自車両の位置・姿勢を計測している。また、(2)を実現するためのセンサとして、カメラ及び、レーザスキャナが搭載されている。

## 2.2 MMSに搭載するレーザスキャナ種別とその用途

MMSに搭載するレーザスキャナの種別と主な用途を表1に示す。

## 2.3 長距離レーザスキャナ搭載MMS

長距離レーザスキャナを搭載した当社MMSのライン

表1. レーザスキャナの種類と主な用途

レーザスキャナの種類	主な用途
標準	<ul style="list-style-type: none"> <li>道路台帳など公共測量</li> <li>道路現況調査</li> </ul>
長距離	<ul style="list-style-type: none"> <li>都市景観計測</li> <li>砂防計測</li> <li>法面計測</li> </ul>
高精度	<ul style="list-style-type: none"> <li>トンネル計測</li> <li>路面性状計測</li> <li>電線・電柱計測</li> </ul>

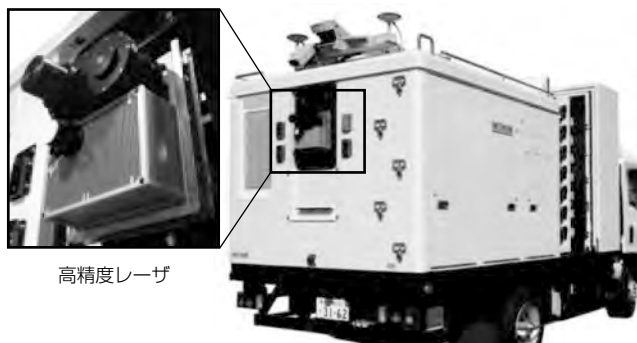


図1. MIMM 2号機

アップの一つである、“MMS-X320R”について述べる。MMS-X320Rは、標準レーザのほかに、長距離レーザスキャナを車両後方に搭載したモデルで、道路から離れた場所までレーザスキャンできるように構成している。

## 2.4 高精度レーザスキャナ搭載MMS

高精度レーザスキャナを搭載したMMSとして、“MIMM”について述べる。MIMMは、トンネル計測専用車両として計測検査㈱と当社が共同開発した車両で、MMSの機能とトンネル壁面の高精度画像を撮影するMIS (Mobile Imaging System, 計測検査㈱開発)の機能を併せ持つ車両である<sup>(2)</sup>。トンネル壁面を計測するための高精度レーザを車両後部に1台搭載しており、トンネル壁面の凹凸を精度良く計測することが可能である。図1に、MIMMの外観を示す。

# 3. レーザ計測性能評価

## 3.1 レーザスキャナの単体性能

表2に長距離、高精度、標準レーザスキャナの主な単体性能(カタログ値)を示す。

表2に示すとおり、長距離レーザでは、最長200m離れた場所が計測可能である。また、道路横断方向のレーザ点数は長距離レーザでは、1スキャン当たり3,000点となる。長距離レーザでは、1パルスで複数の距離からの反射波を計測できるので、計測対象物が植物の枝葉に隠れていても、レーザスポットの一部が透過していれば、その先の形状も計測できるという特長がある。

一方、高精度レーザは、計測精度が1mm以下であり、距離方向の高い分解能が必要な計測に向いている。レーザ点数は1スキャン当たり、約10,000点(100Hz時)となり、長距離レーザスキャナよりも更に高密度である。

また、反射信号輝度情報は標準レーザスキャナを含めすべてのレーザスキャナで取得可能である。

## 3.2 標準レーザスキャナと長距離レーザスキャナの比較

図2は、走行した車線近傍の路肩段差を標準と長距離のレーザスキャナで計測し、道路横断方向の断面でプロットしたものである。各々の点群が重ならないように、意図的

表2. レーザスキャナの単体性能

項目	レーザスキャナのタイプ			
	長距離	高精度(1)	高精度(2)	標準
視野角(度)	360	310	360	190
最長計測距離(m)(代表値)	200	79	119	65
最大パルスレート(点/秒)	30万	50万	100万	2.8万
最大スキャンレート(Hz)	100	100	200	100
距離精度(再現性)(mm)(代表値)	5	0.8	0.56	9
1パルス当たりの最大検出ターゲット数(個)	5	1	1	5
反射信号輝度情報	あり	あり	あり	あり
備考	X320R搭載	MIMM 1号機搭載	MIMM 2号機搭載	—

にずらして表示している。標準レーザスキャナによる点群は離散的であるのに対し、長距離レーザスキャナでは点群が高密度に取得されていることが分かる。段差の計測値としては、同等な値が得られている。

図3は、車線近傍の路肩段差を標準と長距離のレーザスキャナで計測し、道路縦断方向(車両進行方向)に沿った断面でプロットしたものである。図2と同様に各々の点群が重ならないようにずらして表示している。道路縦断方向のレーザ点群密度は、スキャン速度で決まり、標準レーザスキャナ、長距離レーザスキャナとも100Hzであり、両者に差はない。段差の計測値についても、同等の値が得られている。

### 3.3 長距離レーザスキャナの評価

#### 3.3.1 長距離レーザスキャナの長距離計測精度評価

MMSに搭載した長距離レーザスキャナのレーザ点群精度を評価するため、図4に示す道路から見通せる建物をターゲットとして測量を行い、MMSでの計測結果との差分比較を実施した。表3に長距離レーザ点群精度評価の条件を示す。ターゲットを計測する地点はすべてGPS衛星可視のエリアで行い、GCP(Grand Control Point)による調整計算はしないものとした。

図5は、ターゲットの計測結果から求めた標準偏差と平均較差をプロットし、それぞれ線形近似直線を引いたものである。図5から、ターゲット間距離が80m以下の範囲では、長距離レーザスキャナによる計測精度は、標準偏差、平均較差ともに0.1m以下が得られることが推定される。

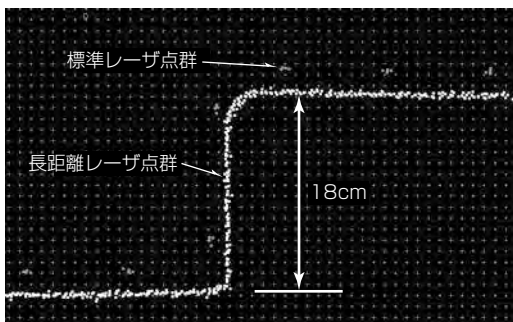


図2. 横断方向計測値の比較

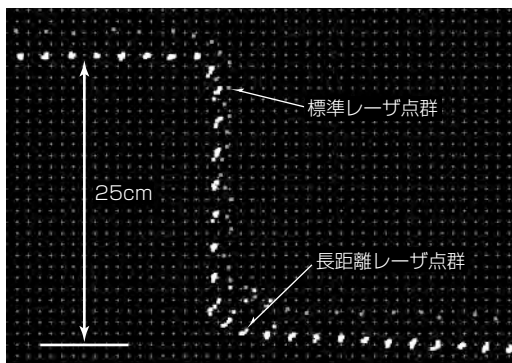


図3. 縦断方向計測値の比較

#### 3.3.2 長距離レーザスキャナを用いた計測例

図6は、長距離レーザスキャナ搭載MMSで道路周辺を計測した例である。道路から離れた高い建物までレーザスキャンできていることが分かる。

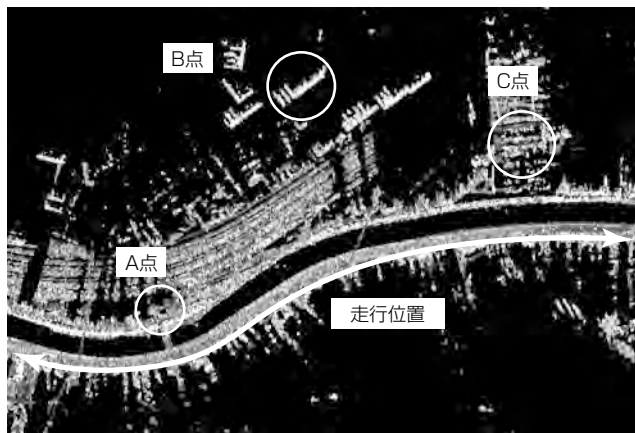


図4. 走行経路と各ターゲットとの位置関係

表3. 長距離レーザ点群精度評価条件

項目	検証条件
走行速度	30~50km/h
走行回数	26回(13往復)
路面状況	一部工事のため凸凹あり
衛星条件	衛星可視
スキャン速度	100Hz
ターゲット点までの水平距離	A点: 60m, B点: 209m, C点: 111m

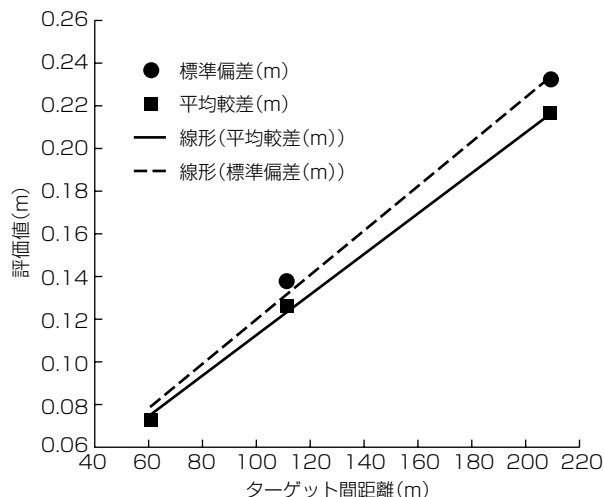
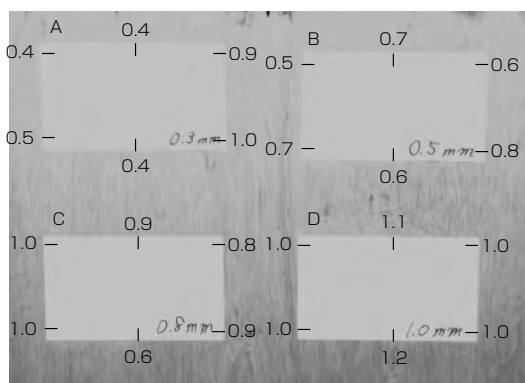


図5. 長距離レーザ点群の精度評価結果



図6. 長距離レーザ搭載MMSの計測



図中の数値はノギス計測値

図 7. 薄板ターゲット板

表 4. 計測精度評価結果

ターゲット	MMS計測平均値	ノギス計測平均値	差分値
A	0.647mm	0.430mm	+0.217mm
B	0.708mm	0.580mm	+0.128mm
C	0.762mm	0.850mm	-0.088mm
D	0.927mm	1.035mm	-0.108mm

### 3.4 高精度レーザの評価

#### 3.4.1 高精度レーザによる段差計測

高精度レーザが使用されるトンネルや道路性状計測での段差計測分解能を評価するため、図 7 に示すターゲット版を計測し、計測値とノギスで計測した計測値を比較した。

MIMM1号機と同型の高精度レーザを使用した計測結果を表 4 に示す。今回の実験では、高精度レーザ搭載のMMSでは、0.2mm程度の厚さが判別可能との結果を得た。別の実験によると、MIMMの高精度レーザによる段差の計測誤差は、0.2~0.5mmという結果が出ている<sup>(2)</sup>。これらから、MIMM搭載時でも高精度レーザの単体性能と同等の段差計測性能が得られていると言える。

#### 3.4.2 高精度レーザスキャナと長距離レーザスキャナの平坦性比較

図 8 は、高精度と長距離のレーザスキャナで約 3 m離れたターゲット板を計測し、1 スキャンのデータをプロットしたものである。ターゲットをスキャンしたレーザ点群各 100 点で平坦性を計算した結果を表 5 に示す。今回の実験では同表に示すように、高精度レーザは長距離レーザの 4 倍程度、計測ばらつきが少ないという結果を得た。

#### 3.4.3 高精度レーザによるトンネル計測例

図 9 は、高精度レーザでトンネルを計測した三次元点群の例である。このようなトンネルの形状調査にMMSを利用するための実用化検証が進められている<sup>(3)</sup>。

## 4. む す び

MMSに対する新しいニーズに対応する技術として、長距離レーザ、及び高精度レーザを搭載した機種と、そのレーザ計測精度の評価結果を述べた。



(a) 高精度レーザ



(b) 長距離レーザ

図 8. レーザ点群の 1 スキャンデータ比較

表 5. レーザ点群の平坦性比較

	高精度レーザスキャナ	長距離レーザスキャナ
平坦性 $\sigma$	0.35mm	1.40mm



図 9. トンネル計測

MMSに高精度レーザを搭載することで、これまで車両から30m程度の範囲に限られていた計測範囲が格段に広がった。一度に広範囲の地形を三次元計測できるようになるため、法面の計測や都市の景観の三次元モデル化など、新しい分野での三次元データの活用が進むことが期待される。

また、高精度レーザを搭載したMMSを、トンネルや道路などの社会インフラの現況調査に利活用することで、点検作業の効率化、点検頻度の向上による、インフラ設備の安全性向上が進むことを期待したい。

地上移動体計測は今後より一層応用範囲が広がっていくと予想される。レーザだけでなくニーズに適合した製品を開発し、社会の安全安心に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) 木元勝一，ほか：モービルマッピングシステムと各種応用例：三菱電機技報，84，No.8，458~461（2010）
- (2) 西川啓一，ほか：MMSの最新動向，建設の施工企画 No. 740，58~64（2011）
- (3) 京都大学道路トンネル健全性評価プロジェクト：道路トンネル健全性評価技術の研究，第 6 回新都市社会技術セミナー（2009）

# ドップラーライダ

田中久理\*  
圓城雅之\*  
藪垣吉幸\*

Doppler Lidar

Hisamichi Tanaka, Masayuki Enjo, Yoshiyuki Yabugaki

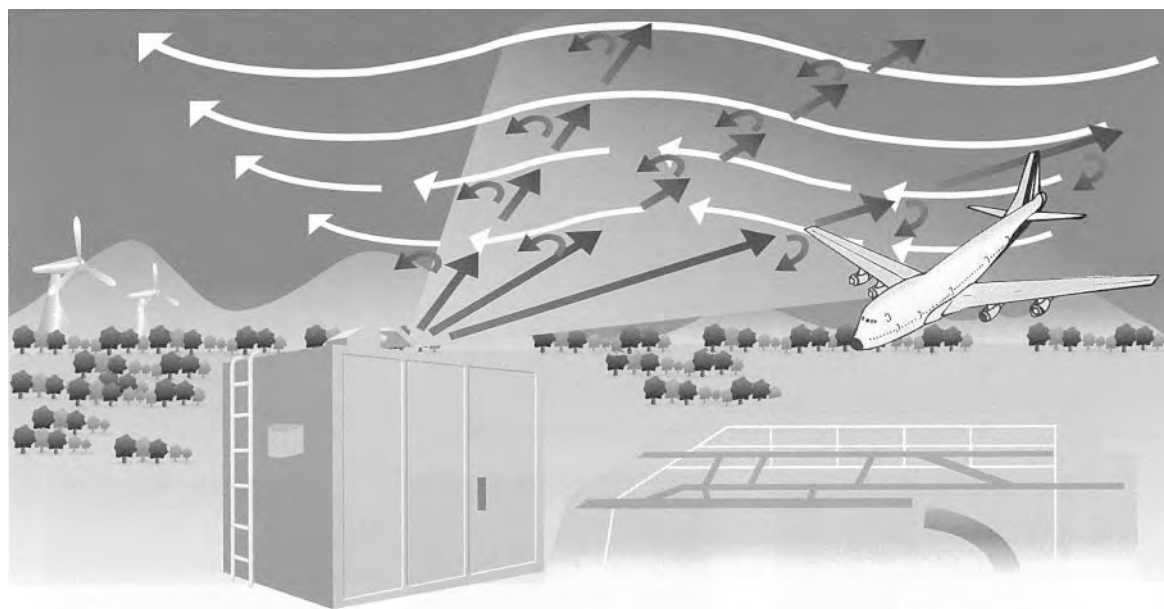
## 要 旨

ドップラーライダ (Light Detection And Ranging : LIDAR) は、レーザ光を大気中に放射し、大気中のエアロゾル(ちりなどの微粒子)からの散乱波を受信し、そのドップラー周波数の変位を検出することで遠隔の風速を計測する装置である。ドップラーライダは大気中のエアロゾルからの散乱波を受信するため、晴天時の風速計測が可能という特長を持っている。

三菱電機は2000年に光ファイバ部品で構成したドップラーライダの開発に成功し、その後、広い範囲での風速計測を目的とした長距離型ドップラーライダの開発を進めるとともに、全光ファイバ型ドップラーライダの商品化を行っ

てきた。長距離型ドップラーライダは設置環境の影響を受けないよう機器をシェルター内に格納しており、大気に放射するレーザ光を2枚の反射鏡で構成するスキャナ装置を介することによって全天半球の任意の仰角、方位への走査を可能としている。小型ドップラーライダは三脚上に設置する光アンテナ装置と、本体装置の2つの装置で構成しており、装置の可搬性を高めたドップラーライダである。

本稿では当社がこれまでに開発した長距離型及び小型ドップラーライダについて述べるとともに、現在開発を進めている風力発電用途に特化したドップラーライダについて述べる。



## ドップラーライダの適用分野

レーザ光を用いることによって晴天時での風速計測を可能とするドップラーライダは、大気の流れを計測する気象・環境計測、空港周辺の風速分布や航空機から生じる後方乱気流を計測して航空機の運航安全を図る航空管制、風力発電サイト候補地の調査等、様々な用途が期待される。

## 1. ま え が き

ドップラーライダーは、レーザ光を大気中に放射し、大気中のエアロゾル(ちりなどの微粒子)からの散乱波を受信し、そのドップラー効果による周波数の変位を検出することでエアロゾルの速度を計測する装置である。エアロゾルは微小(直径数マイクロメートル)であり大気の動きと同一と想定し、風速とみなすことができる。ドップラーライダーの風速測定原理を図1に示す。

当社では1990年代からドップラーライダーの開発を進めており、2000年にはレーザ光の発振、増幅、受信部分をすべて光ファイバ部品で構成したドップラーライダーの開発に成功した。その後、長距離計測可能な高出力ライダーの開発を進めるとともに、全光ファイバ型ドップラーライダーの商品化を行ってきた。

本稿では当社がこれまでに開発したドップラーライダーについて述べるとともに、現在開発を進めている風力発電用途に特化したドップラーライダーについて述べる。

ドップラーライダーの特長として、これまで気象観測などに用いられてきた風向風速計と異なり、レーザ光を大気中に放射して一定時間後に散乱波を受信することによって、遠隔の風速を計測することが可能であることが挙げられる。

ドップラーライダー以外に遠隔の風速を計測する手段として、電波を用いるドップラーレーダ、ウィンドプロファイラなどがある。ドップラーレーダは、マイクロ波を大気に放射し、雨滴による散乱波から速度を算出するため、雨天時に用いられる。またウィンドプロファイラは上方に電波を放射し、大気の揺らぎや雨滴による散乱波を受信するため、装置の天頂方向の風向風速を計測する。ドップラーラ

イダは大気中のエアロゾルからの散乱波を受信するため晴天時の風速計測が可能であり、また、レーザ光を水平又は低仰角で走査することによって、面的な風速成分の計測が可能である特長を持っている。

## 2. 長距離型ドップラーライダー<sup>(1)(2)</sup>

ドップラーライダーの光部品をすべて光ファイバ部品を用いることで、小型で取扱いが容易になるという利点がある。その一方、出力するレーザ光のピークパワーが、送信光路の光ファイバ部品内で発生する非線形光学効果によって数十Wに制限されるため、観測距離が抑えられるデメリットがあった。そのため、ドップラーライダーの風速計測範囲の拡大を目的として、高い出力が得られるレーザ光増幅器の開発を行い、実用化した。このドップラーライダーの外観を図2に示す。ドップラーライダーの機器は設置環境の影響を



図2. 長距離型ドップラーライダーの外観

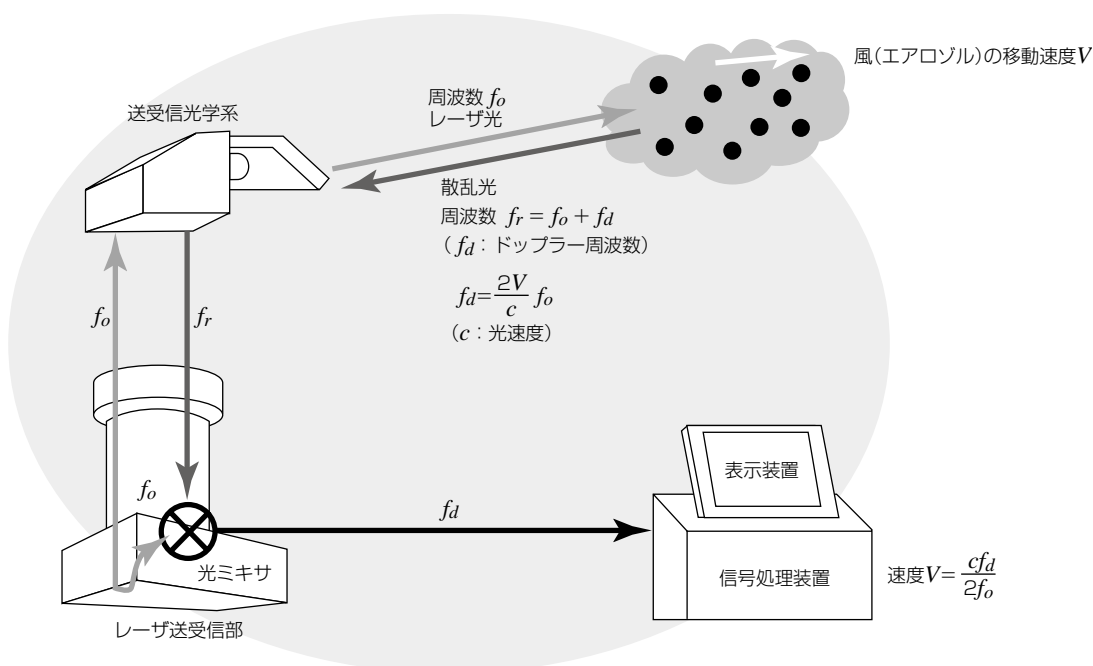


図1. ドップラーライダーの風速測定原理



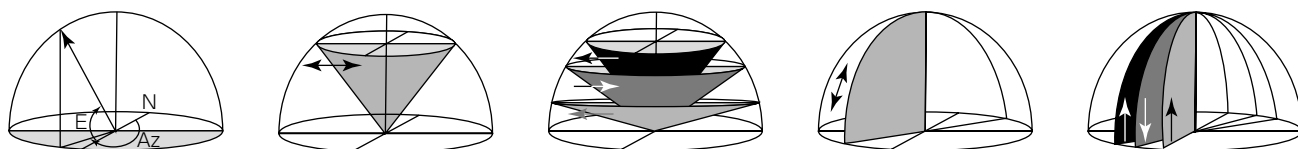


図3. 長距離型ドップラーライダの走査パターン

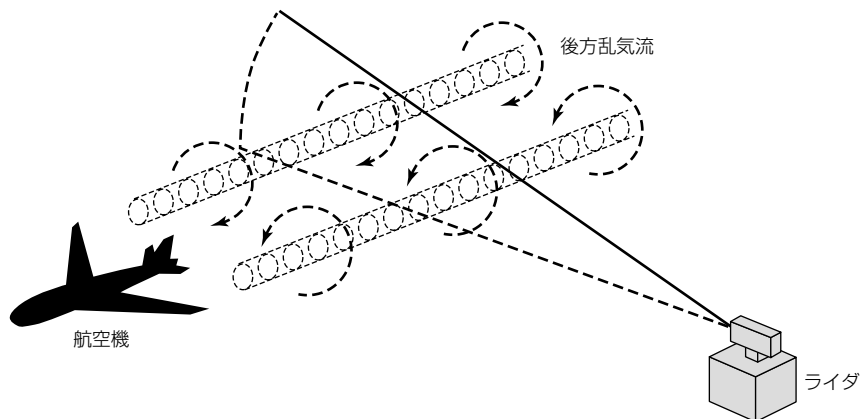


図4. 後方乱気流検出のレイアウト

受けないようすべてシェルター内に格納している。天井に設置したスキャナ装置によって大気中にレーザ光を放射する。スキャナ装置は2枚の反射鏡で構成し、反射鏡角度を変化させることで、レーザ光を全天半球の任意の仰角と方位に走査又は指向させることが可能となっている。このドップラーライダの走査パターンを図3に示す。

このドップラーライダの計測距離は約20kmであり、適用分野として気象観測や空港周辺の面的な風速分布計測が期待される。

また、晴天時に風速計測が可能な特長を生かした応用として、飛行中の航空機の主翼両端から発生する後方乱気流と呼ばれる渦の検出が挙げられる。先行する航空機が発生する後方乱気流は後続機に影響を及ぼすため、空港の離発着では一定の間隔をあけるよう定められている。当社ではドップラーライダを用いた航空機の航跡を垂直面観測(図4)したデータから、後方乱気流の特徴と一致する風速パターンを空間領域の相関演算によって検出するアルゴリズムを開発した。今後、後方乱気流検出の実用化を進めることによって、航空機の運航安全の確保に寄与することが期待される。

### 3. 小型ドップラーライダ<sup>(3)</sup>

小型ドップラーライダの特長は、レーザ光の送受信を行う部品をすべて光ファイバ部品で構成したことによる小型・高信頼化である。このライダはレーザ光の発振、増幅、受信を行う本体装置と、レーザ光の大気への放射と散乱波の受信を行う光アンテナ装置で構成している。小型ドップラーライダの外観を図5に示す。

光アンテナ装置は三脚上に設置し、本体装置と接続する



図5. 小型ドップラーライダ

ケーブル及び光ファイバを脱着可能とすることによって、可搬性を高めている。また、小型ドップラーライダ専用のFPGA(Field Programmable Gate Array)タイプの信号処理ボードを開発し、リアルタイムで信号処理を行い表示可能とすることでユーザビリティを高めている。

このドップラーライダは光アンテナ装置に格納したプリズムを回転させることによって、円錐(えんすい)走査、水平走査、垂直走査が可能となっている。このドップラーライダの走査パターンを図6に示す。

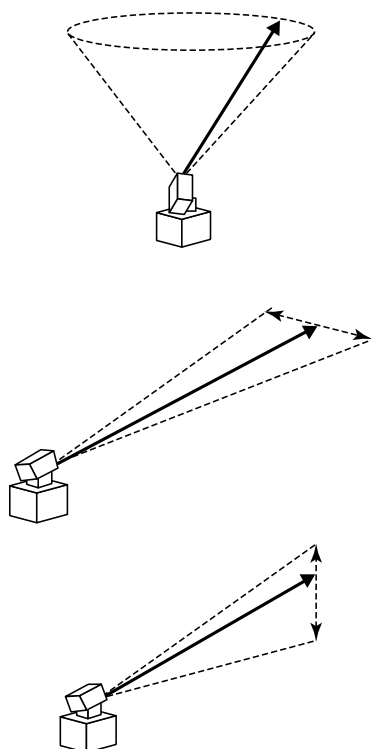


図 6. 小型ドップラーライダの走査パターン

#### 4. 風力発電向けドップラーライダ

2012年7月から、再生可能エネルギーによる発電量の拡大を目的とした固定価格買取制度が開始された。風力発電もその一つとして導入規模の拡大が望まれており、また世界的にも再生可能エネルギーの有力な手法として活発化しつつあるため、当社でも風力発電分野への寄与を目指して風力発電分野に特化したドップラーライダの開発を行っている。

風力発電分野での風向風速の計測は、発電量の予測や発電量との比較を行うために実施される。そのためには、風車の回転軸(ハブ)付近の高さでの値を得る必要があり、ハブ付近の高さのタワーを設置し、風向風速計を配置しなければ目的とする計測ができない。さらに、近年は風車直径が大型化することで風車のハブ位置も高度化しており、それに準じてタワー高さの高度化も必要となるため、タワー設置及び維持管理の負担が高まることが予想される。ドッ

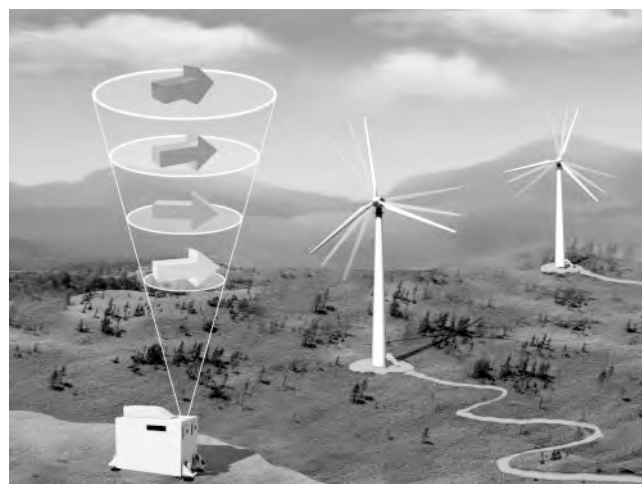


図 7. 風力発電向けドップラーライダの計測イメージ

プラーライダを用いることでハブ付近の高さの風向風速計測を容易とし、タワー設置及び維持管理の軽減に寄与することを想定し、現在開発を進めている。計測イメージを図7に示す。

#### 5. む す び

当社のドップラーライダの開発について述べた。長距離型及び小型ドップラーライダの商品化を行い、気象、環境計測や航空機の運航、管制等の用途で適用が期待されている。今後は風力発電分野での応用を含め更なる適用分野の拡大を目指し開発を進めていく。

#### 参 考 文 献

- (1) 柳澤隆行, ほか: 1.5  $\mu\text{m}$  コヒーレントライダ用パラメトリック増幅器の開発, 第23回レーザーセンシングシンポジウム, AO-6 (2004)
- (2) 酒巻 洋, ほか: レーザレーダにおける乱気流検出アルゴリズム, 第23回レーザーセンシングシンポジウム, KP-5 (2004)
- (3) Kameyama, S., et al.: Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing, Applied Optics, **46**, No. 11, 1953~1962 (2007)

# 長焦点深度イメージセンサ“DeFIS”

國枝達也\* 河野裕之\*\*  
山縣浩作\*  
美濃部 正\*

Deep Field Image Sensor

Tatsuya Kunieda, Kosaku Yamagata, Tadashi Minobe, Hiroyuki Kawano

## 要 旨

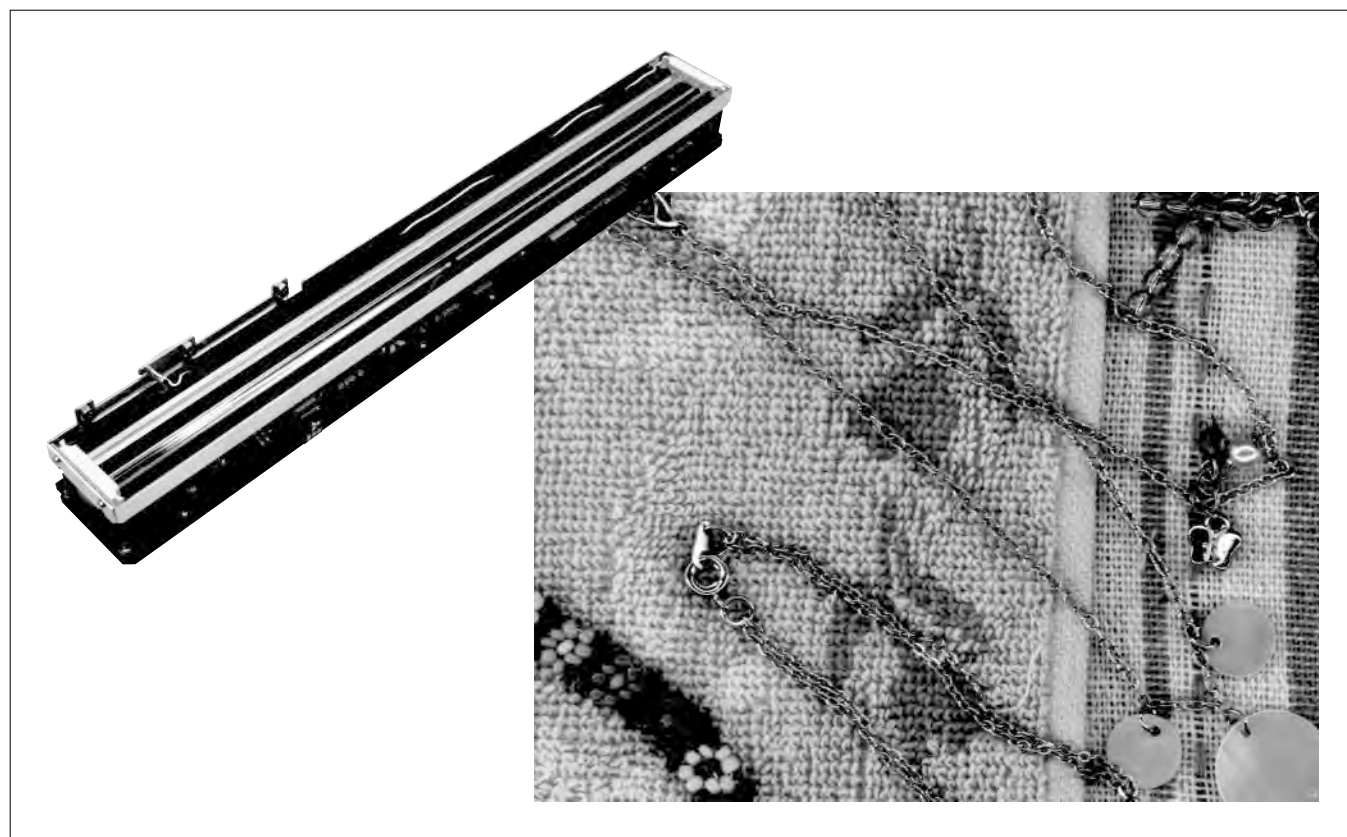
三菱電機では、複写機のADF (Auto Document Feeder) などに使用される裏面読取りデバイスとして、密着イメージセンサ (CIS) を開発・製造している。CISは小型で高画質な画像が得られるという特長を持ち、多くの複写機に搭載されている。しかしながら、CISの撮像系は焦点深度が浅いため、高画質な画像を得るには原稿にほぼ密着してスキャンする必要があり、複写機の前稿台側 (表面読取り) のスキャンには適用できなかった。

長焦点深度イメージセンサ“DeFIS”は、焦点深度が浅いという従来のCISの弱点を解消することで、複写機表面読

取り用途への展開をねらった新しい読取りデバイスである。撮像系に独自に開発した反射式のテレセントリック光学系<sup>(注1)</sup>を複数個組み合わせて用いることで、従来の複写機の表面読取りデバイス (縮小光学系読取りデバイス) に匹敵する焦点深度を確保し、CISに迫る小型・軽量化を実現している。

本稿では、DeFISの構成と各部の特長、及び特長を裏付ける要素技術について述べる。

(注1) 主光線が原稿面に垂直入射する光学系で、原稿の距離が変化しても倍率が変わらない。



## 長焦点深度イメージセンサ“DeFIS”の外観と凹凸のある原稿の取得画像例

長焦点深度イメージセンサ (DeFIS) によって、凹凸のある原稿も鮮明に読み取ることが可能となる。従来の複写機の表面読取りデバイス (縮小光学系読取りデバイス) に匹敵する焦点深度を確保し、CISに迫る小型・軽量化が可能となった。

## 1. ま え が き

長焦点深度イメージセンサは、従来の密着イメージセンサの弱点を解消することで、これまで適用が困難であった複写機表面読取り用途への展開をねらった新しい読取りデバイスである。

本稿では、DeFISの構成と各部の特長、及び特長を裏付ける要素技術について述べる。

## 2. デバイス

### 2.1 構 成

DeFISの基本的な構成(図1)はCISと同様、①原稿を照明する照明系、②原稿の画像情報を光学的に結像させる撮像系、③結像された画像情報を電気信号に変換するセンサIC、④センサICのアナログ出力をデジタル変換するAFE(Analog Front End)、⑤デジタル変換した画像情報に信号処理を加えて客先システムへ出力する信号処理系から成る。これらのうちCISと大きく異なるのは②と⑤である。

### 2.2 主要諸元

DeFISの主な仕様を表1に示す。

### 2.3 特 長

装置(複写機)の使用面から見た場合のDeFISの特長を次に示す。

#### (1) 焦点深度が深い

新開発の撮像系によって4mmの焦点深度を実現し、更に原稿距離が離れても画像は急激には劣化せず、自然なぼやけ感を確保している(表2)。なお、焦点深度は撮像系の明るさとのトレードオフの関係にあり、実用上必要な焦点深度を2mmとすれば、より明るい撮像系を構成することができ、照明系の消費電力を引き下げることが可能となる。

#### (2) 原稿距離を長く取ることができる

図2はDeFISの断面構造である。新開発の撮像系によって、デバイスと原稿の距離を大きく取ることが可能となっている。

#### (3) 画像歪(ひず)みが少ない






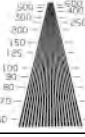



撮像系にテレセントリック光学系を使用しており、原稿距離が変化しても読み取る画像の大きさが変化しない(表3)。

表1. DeFISの主な仕様

項目	仕様	備考
撮像素子	CMOSラインセンサ	
画素密度	600dpi	
有効読取幅	310.2mm	
総画素数	8,192画素	
有効画素	7,328画素	画像結合処理後
ライン周期	90μs/line	
焦点深度範囲	ガラス面上0~2mm	
照明深度範囲	ガラス面上0~2mm	
物体間距離	6.9mm	原稿ガラス厚3.9mm時
データ出力方式	10ビット長デジタル出力	
データ通信	SPI準拠	
電源仕様	主電源: +5V×1.5A 光源用: +24V×0.7A	
外形	330×40×33(mm)	本体サイズ
質量	350g	

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor  
SPI: Serial Peripheral Interface

表2. 解像度の比較

原稿距離	0mm	1mm	3mm	5mm	7mm
DeFIS					
CIS					判別困難

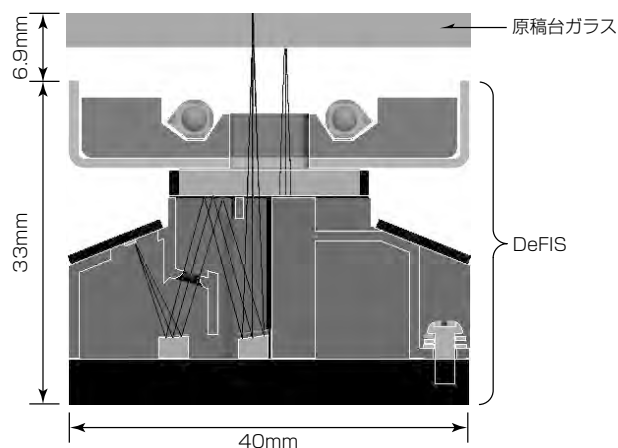


図2. DeFISの断面構造

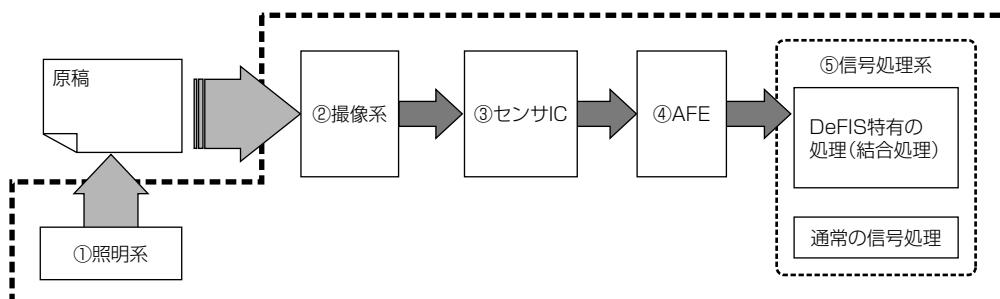


図1. DeFISの基本構成

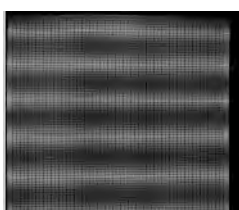

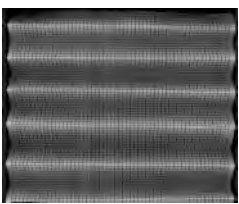

(4) 画素欠落がない

従来のCISでは複数のセンサICチップを1ラインに並べる構成としており、センサチップ間の継ぎ目部分に隙間が必要なことからセンサチップごとに1画素の欠落が発生していた(図3)。DeFISでは隣接するセンサICを千鳥状に配列し相互にオーバーラップして読み取る構成とすることで画素欠落のない画像を得ることが可能となっている。

(5) 小型・軽量

従来の複写機表面読み取りと同等の性能を確保しながら、CISに迫るサイズダウンを実現しており、系全体の小型化が可能となっている(図4)。

表3. 画像歪みの比較

	折り目のある原稿	雑誌の折り目
DeFIS		
縮小光学系		

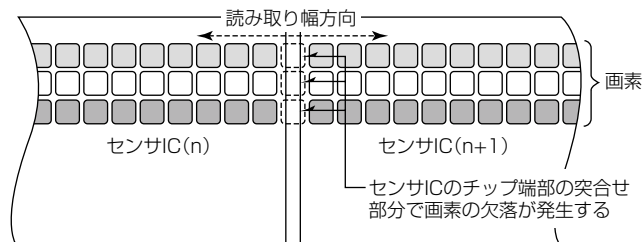


図3. 画素欠落が発生する理由

3. 要素技術

3.1 撮像系<sup>(1)(2)</sup>

(1) 複眼セル構造

従来の複写機で用いられている縮小光学系方式の撮像系は、一つの大きい光学系(単眼)で構成されているため、長い物体距離が必要で、系が大きくなる問題があった。

DeFISでは読み取り領域を分割し、それぞれの読み取り領域に複数の小さな単位撮像系(光学セル)を対応させ、これらを組み合わせた構成(複眼)とすることによって、撮像系の物体距離を大幅に短縮し、装置の小型化を実現している(図5)。

(2) テレセントリック光学系

屈折率分布型のレンズアレーを使用した従来のCISでは、原稿距離によって転写倍率が変わるため、レンズアレーを構成するレンズの焦点深度以外に、隣接するレンズの画像との重なりがずれることによるボケの問題があった。DeFISの撮像系では主光線が原稿面に垂直となるようなテレセントリック光学系を採用することによって、隣接する光学セル間の画像の重なりがずれが発生しないため、焦点深度は光学セル固有の焦点深度にだけ依存することとなり、深い焦点深度の確保を可能としている。

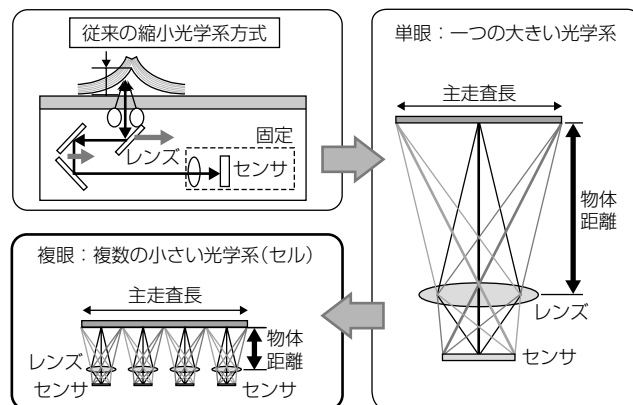


図5. 複眼セル構造

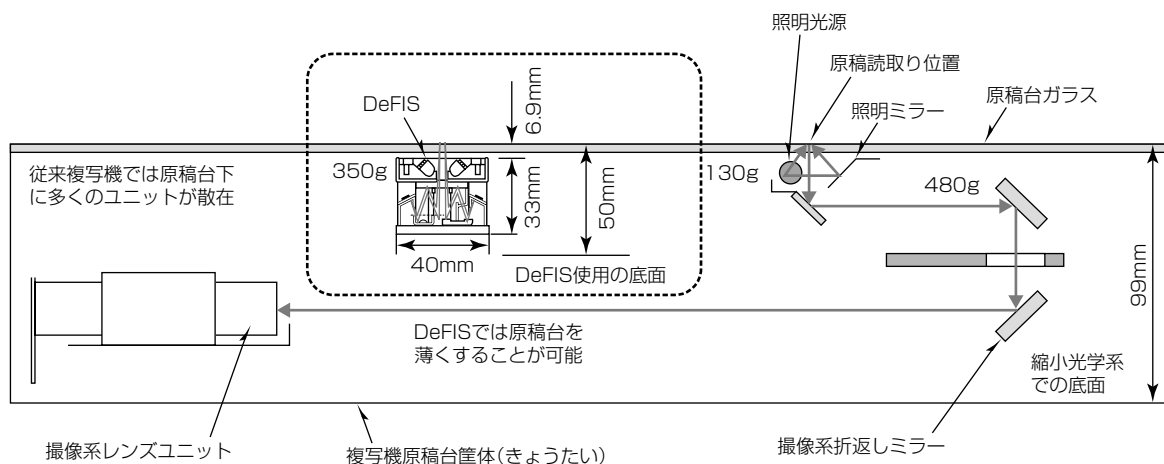


図4. 原稿台下の配置比較



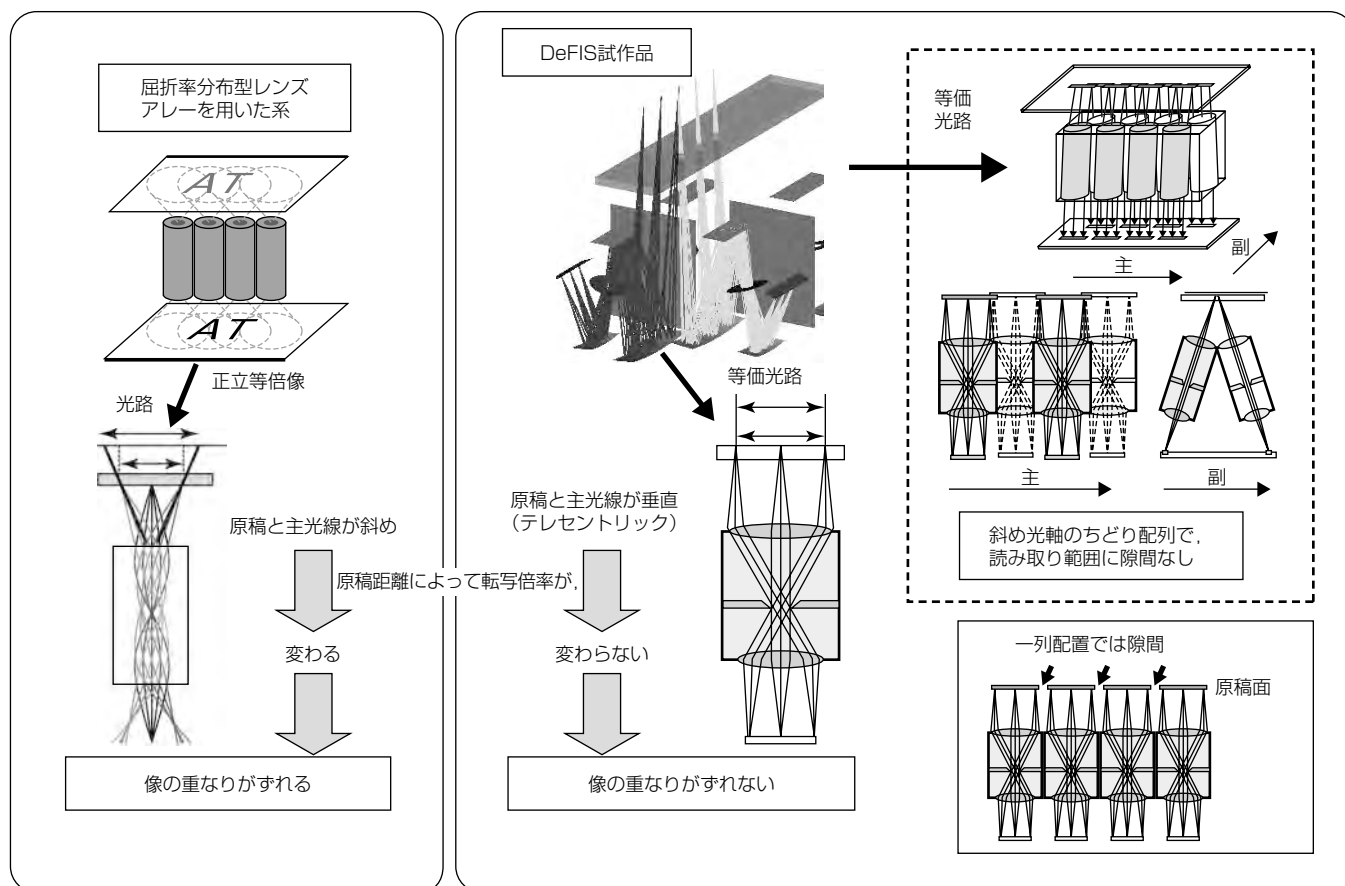


図6. テレセントリック光学系による焦点深度確保

また、このような光学セルを一行に配置するだけでは、隣接する光学セル間で隙間が発生するが、光学セルを千鳥状に配列することによって、隣接する光学セルの画像をオーバーラップさせて読み込むことを可能としている(図6)。

### (3) 反射光学系

先に述べたテレセントリック光学系を反射光学系で構成し、光路を折り畳むことで、よりコンパクトな撮像系を実現している(図7)。

## 3.2 信号処理系

### (1) ハードウェア構成

図8に信号処理系のハードウェアブロック図を示す。前段に従来のCISでも用いられる一般的な信号処理ブロックがあり、後段にDeFIS固有の画像結合処理ブロックがある。画像結合処理の後段に画像復元処理ブロックを設け、更に解像度を改善することも可能となっている。

### (2) 結合処理

DeFISでは複数の光学セルによって画像を読み取るため、個々の光学セルから出力された画像を結合する処理が必要となる。光学セルを千鳥状に配列していることに起因する隣接セル間の副走査方向読み取り位置の差に加え、組立て精度のばらつきによるズレも考慮し、結合位置を動的に検出して結合を最適化するアルゴリズムを用いている。隣接する光学セル間でオーバーラップする領域の相関演算によって

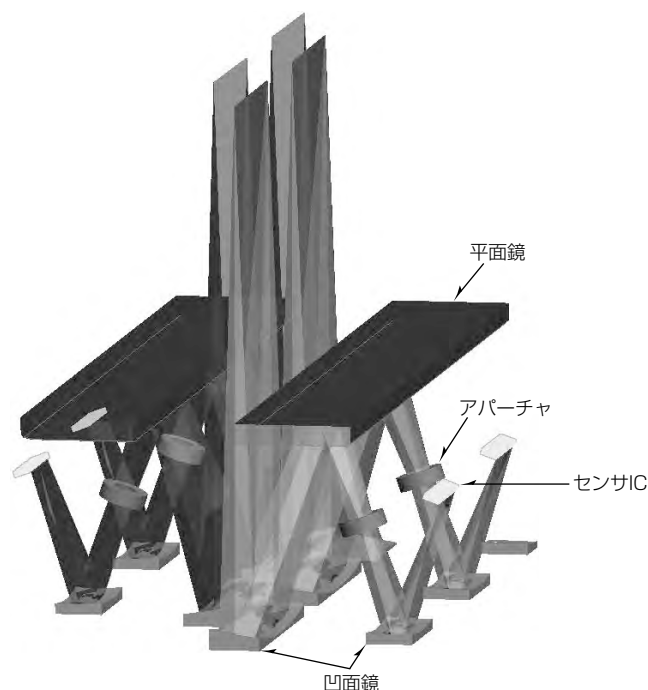


図7. 反射光学系による小型化の実現

結合位置を算出し、サブピクセルレベルの補間を行って結合を実現している。光学セル間の画像がオーバーラップしていることによって画像情報の欠落は発生しない(図9)。

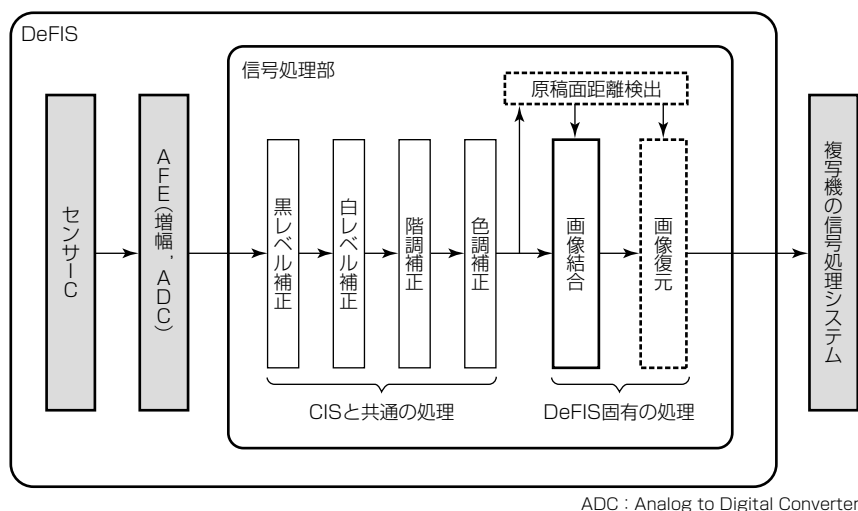


図8. 信号処理系のハードウェアブロック図

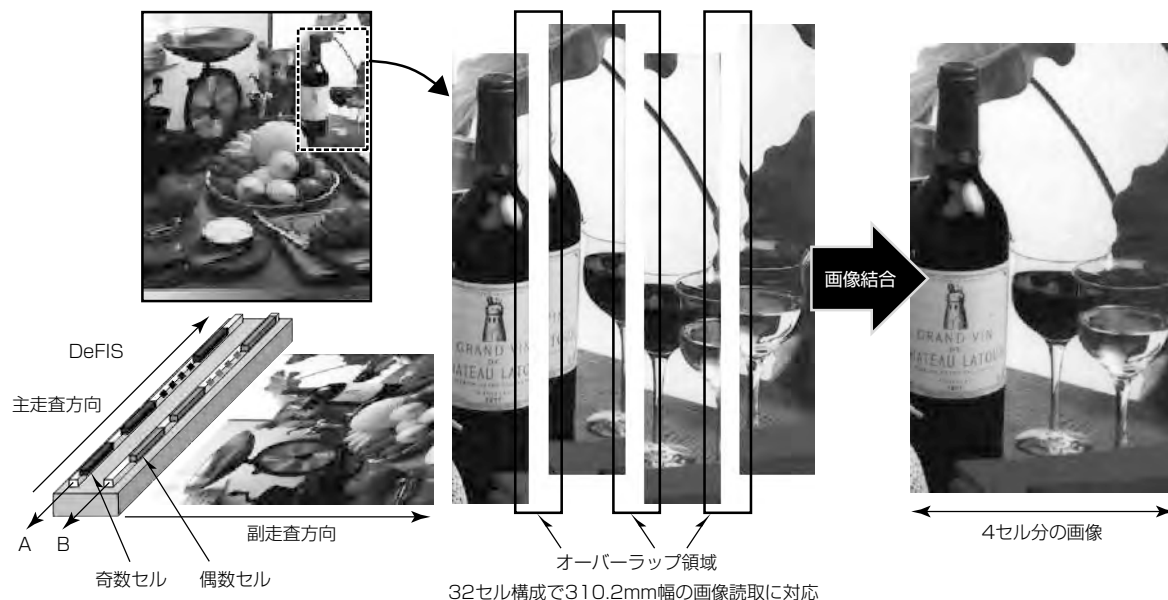


図9. 画像結合

#### 4. む す び

当社が独自に開発した長焦点深度イメージセンサDeFISの特長、及び要素技術について述べた。このデバイスは従来の複写機表面読取り系に匹敵する性能を持ちながら、CISに迫る小型化を実現したもので、搭載する複写機の小型化、機構の簡略化が可能となる。今後、この製品によって、複写機の市場が活発化することを願うとともに、新たな技術シーズとして他分野の読取り装置への展開も検討していく。

#### 参 考 文 献

- (1) Kawano, H., et al.: Compact image scanner with large depth of field by compound eye system, Optics Express **20**, No. 12, 13532~13538 (2012)
- (2) Kawano, H., et al.: Compact and Large Depth of Field Image Scanner for Auto Document Feeder with Compound Eye System, Optical Review **20**, No. 12, 254~258 (2013)