



家庭から宇宙まで、エコチェンジ



三菱電機技報

2

2016

Vol.90 No.2

宇宙利用を支える先端技術



目 次

特集「宇宙利用を支える先端技術」

“ひまわり 8, 9 号”による 日本の静止気象衛星観測の技術革新 操野年之	巻頭言 1
宇宙利用の新たな動向 長谷川広樹・村田 眞	巻頭論文 2
宇宙ステーション補給機(HTV)の連続成功と 今後の技術発展 桐谷浩太郎・千葉隆文・佐藤正則・堀田成紀・蒲原信治	7
ひまわり 8 号打ち上げ成功と定常運用開始 西山 宏・西村修司	11
温室効果ガス観測技術衛星 2 号(GOSAT-2)の ミッション機器 上野信一・中野貴敬	15
静止衛星標準バス“DS2000”の開発と今後の指針 関根功治・舟田雅彦・山田浩之	19
衛星ミッションサクセス“BMS100.00%”活動による 衛星の品質向上と連続打ち上げ成功 森 康・中原雅一・安田真之・金井典子・新田道英	23
衛星及び衛星利用での標準化戦略 中村太一・廣川 類・草野康晴・吉岡省二	27
宇宙太陽光発電マイクロ波電力伝送技術 本間幸洋・佐々木拓郎・高橋智宏・阿部好邦・川津久輝	31
超大型光学赤外線天体望遠鏡TMTのキーテクノロジー 江崎 豊・加藤 篤・服部友哉・仲尾次利崇・猿田祐輔	35
一般論文	
次世代衛星通信向け変復調装置 井戸康浩・杉本達也・吉岡 優・富塚浩志	39
雲観測用Kaバンドレーダ 松田知也・柿元生也	43
高分解能ライン磁気イメージセンサ“MICMO” 尾込智和・井上 甚・下畑賢司	47
モバイルマッピングシステム(MMS)の進化 小澤 正・吉田光伸	51

Leading-edge Technologies to Support Space Utilization

Technological Innovation in Japanese Geostationary Meteorological Satellite Observation with Himawari-8/9 Toshiyuki Kurino	
Space Related Technologies and their Application : Past, Now and Future Hiroki Hasegawa, Makoto Murata	
Continuous Successes of H-II Transfer Vehicle(HTV) and Future Technology Evolution Kotaro Kiritani, Takafumi Chiba, Masanori Sato, Shigeki Hotta, Nobuharu Kambara	
Successful Launch and Operational Service of Himawari-8 Hiroshi Nishiyama, Shuji Nishimura	
Mission Instruments for Greenhouse Gases Observation Satellite-2(GOSAT-2) Shinichi Ueno, Takayuki Nakano	
Development and Guideline to Improve Standard Geostationary Satellite Bus “DS2000” Koji Sekine, Masahiko Funada, Hiroyuki Yamada	
Satellite Quality Improvements and Consecutive Successes with Support of Mission Success Promotion Activities “BMS100.00%” Yasushi Mori, Masaichi Nakahara, Masayuki Yasuda, Noriko Kanai, Michihide Nitta	
Strategy for Standardization of Satellites and Satellite Application Taichi Nakamura, Rui Hirokawa, Yasuharu Kusano, Shoji Yoshioka	
Microwave Power Transmission Technologies for Space Solar Power System Yukihiro Homma, Takuro Sasaki, Tomohiro Takahashi, Yoshikuni Abe, Hisateru Kawatsu	
Key Technologies for Ultra Large Optical Infrared Astronomical Telescope TMT Yutaka Ezaki, Atsushi Kato, Tomoya Hattori, Toshitaka Nakaoji, Yusuke Saruta	
Modulator and Demodulator for Next Generation Satellite Communication Systems Yasuhiro Ido, Tatsuya Sugimoto, Masaru Yoshioka, Koji Tomitsuka	
Cloud Radar Tomoya Matsuda, Ikuya Kakimoto	
High-resolution Linear Magnetic Image Sensor “MICMO” Tomokazu Ogomi, Jin Inoue, Kenji Shimohata	
Evolution of Mobile Mapping System Tadashi Ozawa, Mitsunobu Yoshida	

特許と新案

「宇宙機用多層断熱シートと宇宙機の断熱方法」	
「車載装置、歩行者用測位端末」	55
「アンテナ装置」	56

表紙：宇宙利用を支える先端技術

三菱電機は、宇宙を利活用するための技術、製品を開発し、観測・通信・測位の分野で社会の発展に貢献していく。

①は、静止気象衛星“ひまわり 8, 9 号”。8 号の運用が開始され、同型の 9 号機も近々打ち上げられる。観測データの高度化による気象予報、防災などへの貢献が期待される。

また、準天頂衛星(②)は、2018 年度から 4 機体制での運用となり、衛星測位のサービス環境が劇的に進化する。センチメートル級の精度も可能となり、自動運転等、様々な分野への応用が期待される。

③の“リアルタイム MMS”は、車両に搭載したレーザスキャナやカメラで、走行しながら建物・道路の形状・標識・路面文字等の道路周辺の三次元位置情報をリアルタイムに取得する。衛星測位による位置情報を活用し点群として情報化する。測量分野に加え、災害対策、社会インフラ管理、ITS(Intelligent Transport Systems)等の新分野での活用が期待される。



①



②



③

巻/頭/言

“ひまわり 8, 9 号”による日本の静止気象衛星観測の技術革新

Technological Innovation in Japanese Geostationary
 Meteorological Satellite Observation with Himawari-8/9

操野年之
 Toshiyuki Kurino



気象庁は、最新鋭の静止気象衛星“ひまわり 8 号”を2015年7月7日に正式に運用開始した。以後本稿執筆時点まで順調に運用を日夜継続することができており、ここまでの関係者の尽力に誌面を借りて御礼申し上げる。

静止気象衛星“ひまわり”は、初号機が1977年に打ち上げられており、その観測データから得られる数々の情報が防災情報として活用されるという非常に重要な役割を担うとともに、観測画像そのものがテレビの天気予報や最近ではインターネットなどを通じて広く提供されるなど、国民の耳目に触れる機会が多いこともあり、我が国では最も有名で親しまれている人工衛星の1つとなっている。

現在運用中の“ひまわり 8 号”は、その後継機で同一仕様の“ひまわり 9 号”とともに2009年度に2機一括調達を行い、国際競争入札の結果、三菱電機に製造をお願いすることとなったものである。“ひまわり 9 号”は三菱電機鎌倉製作所で現在最終試験中で、“ひまわり 8 号”と同じくH-2Aロケットで2016年に種子島から打ち上げられる予定となっている。“ひまわり 8 号”と“ひまわり 9 号”はそれぞれ7年間の運用を予定しており、2029年までの間、前号機の“ひまわり 7 号(運輸多目的衛星新 2 号)”から通算すると20年近くにわたり、三菱電機製の静止気象衛星が気象庁の業務遂行を通じて国民の生活を支えていくことになる。

“ひまわり 8 号”には、地球の雲の状態を撮影するため高性能の可視赤外放射計(Advanced Himawari Imager: AHI)が搭載されている。この放射計は米国や欧州などの他の新世代の静止気象衛星に先駆けて世界最先端の観測能力を持っており、可視域3バンド、近赤外域3バンド、赤外域10バンドの計16バンドのセンサを持ち(“ひまわり 7 号”は可視1バンド、赤外4バンドの計5バンド)、従来は約30分を要していたフルディスク観測を10分ごとに行いながら、特定の領域を高頻度に観測することも可能になり(例:日本域を2.5分ごと)、さらに水平分解能も従来に比べて南北・東西方向にそれぞれ半分(画素にすると4倍)に向上するなど、その観測データは、量・質ともに飛躍的に向上しており、今後のデータ利活用の面で国内外の関係者から注目されている。

気象庁では、格段に向上した“ひまわり 8 号”の観測機能を最大限活用した防災情報の開発及びその利用技術開発を推進することが非常に重要と考えており、この新しい観測データを気象の実況監視、数値予報、気候・環境監視等で

利用するための技術開発を継続するなど、様々な取り組みを行っている。例えば、観測機能の大幅な強化によって、台風や集中豪雨をもたらし雲の移動・発達をこれまで以上に詳細に把握でき、また火山灰やエアロゾルの分布も高精度に把握できるようになった。また、“ひまわり 8 号”で得られた観測データは、雲画像として利用されるだけでなく、上空の風向・風速など多くの物理量がこれまで以上にきめ細かく計算され、天気予報の基となる数値予報の初期値として入力できるようになった。これらによって、予報精度をさらに向上させるとともに、防災情報のタイムリーな発表につなげていくことができると期待している。

また、静止気象衛星“ひまわり”が持っている、我が国の周辺各国に対する国際貢献の側面について述べておく。国連の専門機関の1つである世界気象機関(WMO)は、その中心的な科学技術プログラムである世界気象監視(WWW)計画の重要な柱の1つとして、複数の静止気象衛星と極軌道気象衛星からなる世界気象衛星観測網を提唱しており、我が国の“ひまわり”は1977年の初号機打ち上げ以来、この観測網構築の初期メンバーとしてその一翼を担ってきた。“ひまわり 8 号”もこれを継承して、東アジア・西太平洋域等の30余りの国や地域の気象機関に無料ですべてのデータを提供しており、各国における天気予報はもとより、台風・集中豪雨、気候変動などの監視・予測、船舶や航空機の運航の安全確保に貢献するなど、この地域の防災・減災にも役立てられている。2015年11月には“ひまわり 8 号”を利用するアジア・オセアニア地域の気象機関の関係者が一堂に会する第6回アジア・オセアニア気象衛星利用者会議を東京で開催した。この会議でも世界最先端の観測機能を持つ“ひまわり 8 号”を運用する気象庁に対する国内外からの期待と注目が非常に大きいことが改めて感じられ、それらの期待に応え続けることが、より一層の国民生活の安心安全の確保と国際貢献につながるものと思いを新たにしたいところである。

2015年に改定された新しい宇宙基本計画でも、静止気象衛星“ひまわり”を今後も切れ目なく整備・運用していくことが盛り込まれている。気象庁は、今後14年間の長期間にわたる事業として“ひまわり 8, 9 号”の観測データを安定的に提供する責務があり、その間の安定的な運用とデータ利用技術の高度化に向けて、関係機関とも連携してたゆまぬ努力を継続していく所存である。

宇宙利用の新たな動向



長谷川広樹*



村田 眞**

Space Related Technologies and their Application : Past, Now and Future

Hiroki Hasegawa, Makoto Murata

要 旨

これまで三菱電機技報では、この号と同様に数回にわたって“宇宙利用”をテーマとする特集号を発行してきた。正にそれに呼応して、急速かつ確実に宇宙が社会に身近なものとなってきた。

国際宇宙協力の象徴である国際宇宙ステーション(ISS)へ必要な物資を輸送するため、米国、ロシア、ヨーロッパに加えて、日本も独自の補給機を持っている。2014年以降、米国とロシアの補給機が相次いで打ち上げに失敗したが、日本は2015年8月に“こうのとりの HTV 5号”を予定通りISSにドッキングさせて無事に物資を運び入れ、世界の宇宙関係者を安堵(あんど)させた。

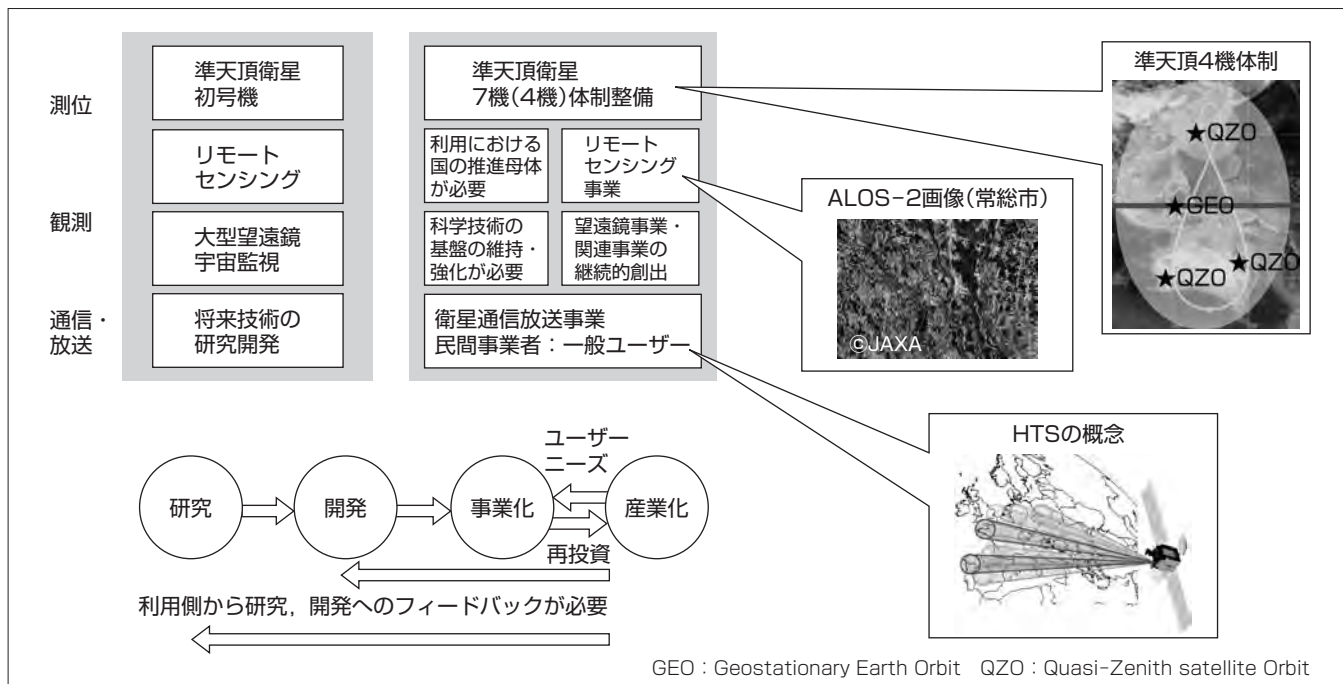
また、東京オリンピック・パラリンピックの開催を契機として、自動走行(自動運転)を含む新たな交通システムを実現する機運が高まっている。自動運転を含む新しい交通システムを実現するためには、高精度の位置情報が必要である。2018年度には準天頂衛星の7機体制の前段階としての4機体制が整い、準天頂衛星を使用したcm級の高精度

測位を常時利用することが可能となる。高精度測位情報と三次元地図情報を活用した自動走行・安全運転支援を実現することで、抜本的な対策につながり、事故や渋滞が大幅に減ることが期待されている。

2015年9月の栃木県での大雨災害では、“ひまわり8号”が撮像した画像が正確な気象予報のために活用され、ニュース番組でも繰り返し報道された。被害の全容は、情報収集衛星及び“だいち2号(ALOS-2)”が撮像した画像で明らかにされた。なお、情報収集衛星が撮像した画像が公開されたのは、これが初めてである。

通信は、最も古くからある衛星の利用分野であるが、後に述べるHTS(High Throughput Satellite)の出現で、新たな利用分野が開拓されつつある。

下の図に示すとおり、当社の宇宙事業の測位、観測及び通信・放送の3つの分野で、研究→開発→事業化→産業化のサイクルを回してフィードバックを行い、更なる成長を実現していく。



当社の宇宙事業の展開方針と利用の拡大

測位、観測及び通信・放送の各分野で、宇宙基本計画に示される方針に沿って研究、開発、事業化から産業化へのサイクルを積極的に展開していくことが必要である。科学技術基盤の整備及び利用における推進母体の整備については、関連機関との緊密な協力関係が必須である。また、利用側からのフィードバックも確実に研究及び開発に反映していく必要がある。

1. ま え が き

本稿では、まず当社の宇宙開発の歴史を振り返り、次に、宇宙を利用してかつ必要不可欠な存在になっている社会インフラについて最新の事業状況を述べる。さらに、将来に向けての技術開発と、それを基盤とした事業展開の方向性について述べる。

2. 当社の宇宙事業の歴史

当社は、衛星セグメントと地上セグメントの両分野で事業を展開している。前者は当社の鎌倉製作所が、後者は通信機製作所が担当している。

2.1 衛星セグメントの開発の歴史

衛星セグメントの開発の歴史を図1に示す。当社の衛星の国際的な位置付けを明確にするために、広く市場が開放されている商用通信衛星と、各国が参加している宇宙ステーションの2つの分野を中心に次に述べる。

(1) 1960～1970年代

当社の宇宙事業は、1965年のINTELSAT-Ⅲ (INternational TELecomunications SATellite organization-Ⅲ) 搭載の電力制御器の受注に始まった。そして1969年に設立された宇宙開発事業団 (NASDA, 2003年に現在の国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) に改組) から受注した電離層観測衛星：うめ (ISS) から衛星開発を開始した。

当時の国際情勢から、静止軌道上に日本の衛星を確保するため、いわゆる“GCB (気象衛星 (GMS), 通信衛星 (CS), 放送衛星 (BS))”の開発が1973年に決定された。当社は

1974年に通信衛星：さくら1号 (CS-1) を受注し、米国から習得した技術を基に開発を行った。

(2) 1980年代

それまでのスピン制御に対して、衛星の大型化に必須となる三軸姿勢制御の技術開発のためにドイツから技術導入を行い、1983年に技術試験衛星V型：きく5号 (ETS-V) の衛星システムを受注した。

また1988年には、日本が米国の宇宙ステーション計画へ参加することが決定し、当社も宇宙ステーション及び補給機 (HTV) の開発に参画することとなった

(3) 1990年代

先に述べたとおり、日本の初期の衛星開発は欧米からの技術導入を基盤としていた。1990年に、当時の貿易摩擦を背景として“非研究開発衛星の調達手続等について”の日米合意がなされ、GCBは全て国際競争入札で調達されることになった。そのため、当社を含む国内の衛星メーカーは商用通信衛星市場から実質的に排除された。

(4) 2000年代

JAXAを初めとする関係機関からの指導の下、2002年に打ち上げたデータ中継技術衛星：こだま (DRTS) 及び2006年に打ち上げた技術試験衛星Ⅷ型：きく8号 (ETS-Ⅷ) の開発を通して、標準衛星バスの確立を図った。その後、欧米の衛星メーカーを国際競争入札で破り、運輸多目的衛星：ひまわり7号 (MTSAT-2, 2006年に打ち上げ)、商用通信衛星として初めてスーパーバードC2号 (SB-C2, 2008年に打ち上げ) を受注し、標準衛星バスDS2000を確立した。

2008年には宇宙基本法が制定され、内閣府に新たに設立された宇宙開発戦略本部によって衛星の実利用インフラ化



図1. 当社の宇宙開発の歴史(衛星セグメント)

が強力に促進され、宇宙は“開発”から本格的な“利用”の時代に入った。

2009年にはJAXAの指導の下、このとり初号機(HTV技術実証機)の運用が成功し、日本の技術力が欧米に比肩し得るものであることが示された。

(5) 2010年代

2010年に、JAXAの準天頂衛星初号機(みちびき)を打ち上げた。また、2011年にはシンガポール・台湾の商用通信衛星ST-2を打ち上げた。

さらに、2009年に気象庁のひまわり8号(2014年打ち上げ)及び9号(2016年打ち上げ予定)、2011年にトルコからTURKSAT-4A/4B(2014年/2015年に打ち上げ)、2014年にカタールからEs'hail 2を受注し、DS2000衛星は16機(製造中の衛星含む)を数えるに至った。

2012年には内閣府に宇宙戦略室が発足し、準天頂衛星インフラの整備を強力に推進している。

2.2 地上セグメントの開発の歴史

地上セグメントの開発の歴史を図2に示す。地上セグメントは、1960年代のアンテナ黎明(れいめい)期から衛星管制・衛星通信と大型電波・光学望遠鏡の2つの流れの中で発展し、当社が開発に携わった3つの製品がIEEEマイルストーン(2015年時点で日本では17件が受賞)に認定されている。

(1) 1960年代

1963年に米国のRelay-1衛星を用いて行われた初の日米間テレビ伝送実験で、KDD茨城宇宙通信実験所(当時)で使用されたアンテナは当社が開発したものである。

また、1964年に気象庁の指導で富士山頂に設置した気象

レーダは、1999年に長野・静岡レーダにその役割を引き継ぐまでの35年間にわたって気象業務に貢献した。

(2) 1970年代

NASDAへロケット精測レーダ及び衛星追跡管制地上設備を納入し、その技術基盤を築いた。

(3) 1980年代

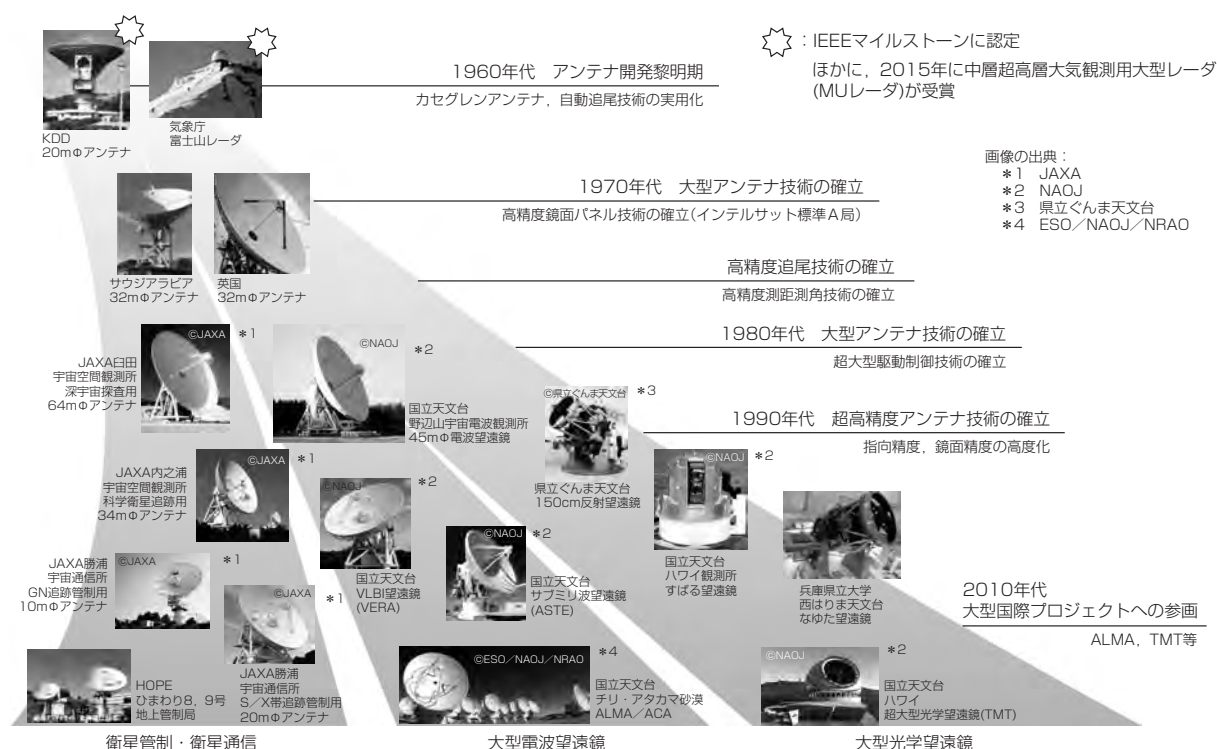
1980年に直径45mのミリ波電波望遠鏡を、1981年に直径10mのミリ波干渉計電波望遠鏡をそれぞれ東京大学附属東京天文台(当時)の野辺山宇宙電波観測所に納入し、大型アンテナ及び電波望遠鏡の技術基盤を確立した。1984年には直径64mの深宇宙探査用大型アンテナを宇宙科学研究所(当時)の臼田宇宙空間観測所に納入し、当社の大型アンテナ技術は不動のものとなった。

また、INTELSAT及びEUTELSAT(EUropean Telecommunications SATellite organization)向けのTDMA(Time Division Multiple Access)通信設備及び民放向けのSNG(Satellite News Gathering)システムを納入し、衛星通信事業の拡大を図った。

(4) 1990年代

1999年にハワイ島マウナケア山頂の標高4,200mに設置された国立天文台(NAOJ)の大型光学赤外望遠鏡“すばる”を納入した。一枚鏡の望遠鏡としては当時世界最大の有効開口径8.2mの望遠鏡であり、今もなお天文学の発展に貢献している。

また1990年代にはH-IIロケット射場システムの設置が進み、当社はNASDAの設備である精測レーダ及びテレメータアンテナの開発を担当した。



(5) 2000年代

2002年に、NASDAの衛星追跡管制業務を筑波から遠隔操作で行う新しい地上ネットワーク(GN)として、国内(3サイト)及び海外(4サイト)に地上局設備(無人局)を納入し、現在のJAXA衛星の追跡管制業務を支えている。

(6) 2010年代

2010年から宇宙初のPFI(Private Finance Initiative)事業となる“ひまわり”の運用事業に参画して、その地上設備の開発を担当した。衛星とともに日本の気象観測の一翼を担っている。

2011年にALMA(Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array)プロジェクト向けの直径12m及び直径7mの16台のアンテナから成るACA(Atacama Compact Array)アンテナ群“いざよい(十六夜)”を国立天文台に納入し、天文学の解明や宇宙生命科学への貢献が期待されている。

3. 当社の宇宙事業の展開

2015年1月、政府は2013年に策定された“宇宙基本計画”の見直しを行った。これは、“宇宙安全保障の確保”“民生分野における宇宙利用の推進”及び“宇宙産業及び科学技術の基盤の維持・強化”の3つを重点課題として、今後10年間の長期計画を具体的な工程表と事業規模で示すものである。当社は、宇宙基本計画に沿って事業展開を図っていく。

3.1 DS2000とそれを軸にした商用衛星分野

(1) 当社の事業方針

当社は1980年代後半から“システムインテグレータへの道”という目標を掲げ、商用通信衛星をフルターンキーで受注するための施策に着手し、早くから段階的に衛星工場の整備を行ってきた。また、衛星搭載機器を積極的に輸出し、当社の認知度の向上と実績を積み重ねることに注力して商用衛星市場への参入に成功した。2.1節で述べた日米合意は、正に“システムインテグレータへの道”を不退転の覚悟で切り拓く契機になったと言える。

国内衛星に加えて、JAXAを初めとする関係機関からの支援を得て海外の市場開拓にも継続して積極的に取組んで宇宙事業の拡大を図る当社の事業方針は、“宇宙基本計画”が掲げる重点課題を解決する。

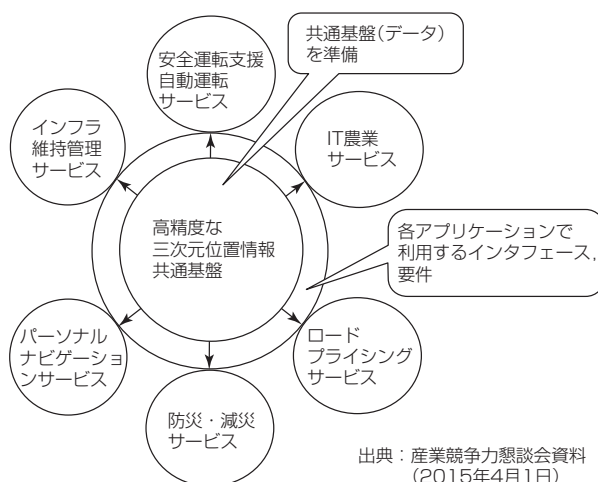
(2) 標準衛星バスDS2000の高い品質と信頼性

商用通信衛星では、事業者の事業リスクの担保として衛星打ち上げ及び軌道上での不具合に対して保険を付与され、この保険料率が衛星の信頼性を示す国際的な指標となっている。

DS2000衛星は現在9機が軌道上で運用されているが、保険金が支払われる事故は皆無であり、世界最高レベルの品質と信頼性を持つとの評価を得ている⁽¹⁾。

3.2 準天頂衛星とその利用

準天頂衛星の7機体制の前段階である4機体制の整備が進み、2018年度からは測位サービスの提供が開始される。



出典：産業競争力懇談会資料
(2015年4月1日)

図3. 三次元位置情報を用いた新たなサービスの創出

当社はこれまでに得た経験を活用し、政府が整備する準天頂衛星及びその地上設備だけでなく、衛星運用及び測位サービスの利用にも積極的に参画していく。特に図3に示すとおり、三次元位置情報を用いた新たなサービスの創出に取り組む必要がある。

3.3 気象衛星・観測衛星

気象衛星の分野では、ひまわり7号(運輸多目的衛星：MTSAT-2)が2006年に、ひまわり8号が2014年に打ち上げられた。さらに、ひまわり9号が2016年に打ち上げられる予定であり、日本を中心とする気象観測は、20年以上にわたって気象庁、JAXA及び関連機関の指導で当社が開発した“ひまわり”によって行われていることになる。

観測衛星の分野では、JAXAの指導で開発したGOSAT(温室効果ガス観測技術衛星：いぶき)、AMSR-2(Advanced Microwave Scattering Radiometer)を搭載したGCOM-W1(水循環変動観測衛星：しずく)、及びPALSAR-2(Phased Array L band SAR)・CIRC(Compact IR Camera)を搭載したALOS-2(陸域観測技術衛星：だいち2号)が運用され、貴重な観測データを日夜提供している。今後、GOSAT-2(いぶき2号)、先進光学衛星などの開発を完遂するとともに、新たな観測センサ及び観測衛星の開発機会の創出に努めていく。

4. 将来に向けての技術開発と事業展開

4.1 衛星通信の動向

1945年にアーサー・C・クラークが静止衛星の概念を提唱した際には、C帯に近い周波数を用いることが想定されていた。2.2節で述べたRelay-1衛星もC帯を使用していたが、衛星通信で使用される周波数は、より高い周波数であるKu帯に移行していった。2000年代前半の光ケーブルの驚異的な技術進歩と普及によって危機に陥った衛星通信業界を救ったのは、正にKu帯の利点を活用したテレビ放送(Direct To Home：DTH)である。また、L帯からS帯にかけての周波数は移動体通信に使用されるなど、衛星通信で

の移動衛星業務(Mobile Satellite Service : MSS), 固定衛星業務(Fixed Satellite Service : FSS), 放送衛星業務(Broadcasting Satellite Service : BSS)の3つのサービスが確立された。

4.2 将来に向けての技術開発

各周波数帯における衛星通信サービスを図4に示す。近年、ハイスループット衛星(High Throughput Satellite : HTS)が注目されており、既に海外ではおよそ50機が打ち上げられている。HTSとは、Ka帯の使用による狭ビーム化と周波数の再利用によって、同じ帯域幅で少なくとも2倍以上(数十倍に及ぶ場合もある)にスループットを向上させた高速大容量の衛星を指す。

海外では100Gbpsを超えるスループットを持つHTSによるサービスも開始され、通信サービスの単価の大幅な削減を実現している。テレビ放送の需要が残る地域などを中心としてDTH衛星は存続すると思われるが、今後の通信衛星市場はHTSへ移行していくことは明らかである。

また、従来の化学推進系を電気推進系に置き換えたいいわゆる“オール電化衛星”は大幅に衛星バスの質を削減することが可能であり、通信ペイロードのリソースとしてより質を必要とするHTSとの組合せにその特長を発揮する。2015年3月に打ち上げられた米国Boeing社のABS-3AとEutelsat 115WBが2015年9月から10月にかけて所定の軌道位置に到達して通信サービスを開始し、オール電化衛星の軌道上実績が示された。欧米の他の衛星メーカーでも、オール電化衛星の開発はかなりのレベルまで進められており、当社も至急キャッチアップする必要がある。

また、HTSの性能を十分に発揮するためには、軌道上でビームパターンやビーム間接続などの通信コンフィギュレーションを柔軟に変更できるフレキシブルペイロード機能が必須である。当社では、デジタルチャネルライザなどの開発は既に完了しており、DBF(Digital Beam Forming)と組み合わせてフレキシブルペイロード機能の早急な実現を図る計画である。

4.3 将来に向けての事業展開

米国運輸省連邦航空局(米国FAA)が毎年発行する“Commercial Space Transportation Forecasts”によれば、

商用通信衛星の国際市場では今後継続して毎年20機以上の需要が見込まれる。

当社は、海外の衛星メーカーと競い合うことによって、“宇宙基本法”及び“宇宙基本計画”が提起する課題に対応する実力を身に付けることができると考えている。商用通信衛星に加えて、新しい分野で海外衛星市場を開拓し、日本の宇宙産業のプレゼンスを示していくことは当社に課せられた責務である。

4.4 新たなプレーヤーによる宇宙利用の変革

近年、海外では、IT(Information Technology)業界などから衛星業界へ参入する事例が増えている。従来の枠に収まらないこれらの新たなプレーヤーの動きにも注意を払うとともに、航空機や無人飛行機などを用いた同種のアプリケーションとの差別化を図る必要がある。

5. む す び

約50年に及ぶ日本の宇宙開発の歴史を通して、当社はこれまでに国内外含めて、主契約者として60機以上、副契約者として450機に及ぶ衛星の開発に参画してきた。

DS2000衛星はこれまでに9機打ち上げられ、全て健全に動作しており、軌道上運用実績は昨年末で累計で50年を超えた。さらに、当社が開発した全ての衛星の軌道上運用実績は、昨年末で累計で200年を超えている。しかし、これは、米国SSL社の全衛星の軌道上運用実績1,900年以上⁽²⁾、米国Lockheed Martin社のA2100衛星(40機以上)の軌道上運用実績450年以上⁽³⁾と比較すると、スタートラインに立ったに過ぎないと言える。高品質・高信頼性の衛星の実績を積み重ねることと衛星利用を支える地上設備の充実化を進めることを併せて、ソリューションの提供を図っていく。

大型望遠鏡の分野では、日本(国立天文台)、米国及びカナダなどが共同で推進する国際プロジェクトである次世代超大型天体望遠鏡TMT(Thirty Meter Telescope)の開発を開始した。TMTは、492枚の複合鏡から成る口径30mの光学・赤外線望遠鏡であり、“すばる”をしのぐ性能を実現することが期待されている。世界に誇る“Only One”の高い技術力で今後も歴史に残るプロジェクトに貢献していくとともに、既存の事業領域にとどまらず更なる飛躍・発展を続けていく。

参 考 文 献

- <http://www.sankei.com/premium/print/150424/prm1504240001-c.html>
- <http://www.sslmda.com/html/products/products.html>
- <http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/space/photo/a2100/Modernized%20A2100%20Flysheet.jpg>

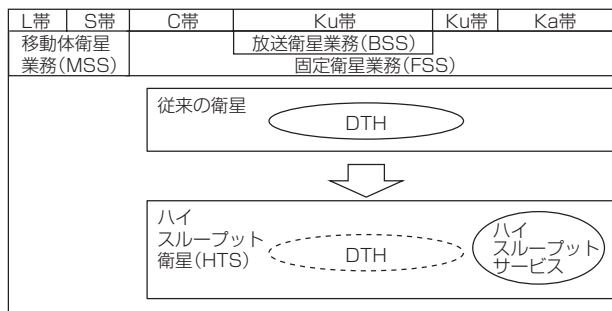


図4. 各周波数帯における衛星通信サービス

宇宙ステーション補給機(HTV)の連続成功と今後の技術発展

桐谷浩太郎* 堀田成紀**
千葉隆文** 蒲原信治**
佐藤正則**

Continuous Successes of H-II Transfer Vehicle(HTV) and Future Technology Evolution

Kotaro Kiritani, Takafumi Chiba, Masanori Sato, Shigeki Hotta, Nobuharu Kambara

要 旨

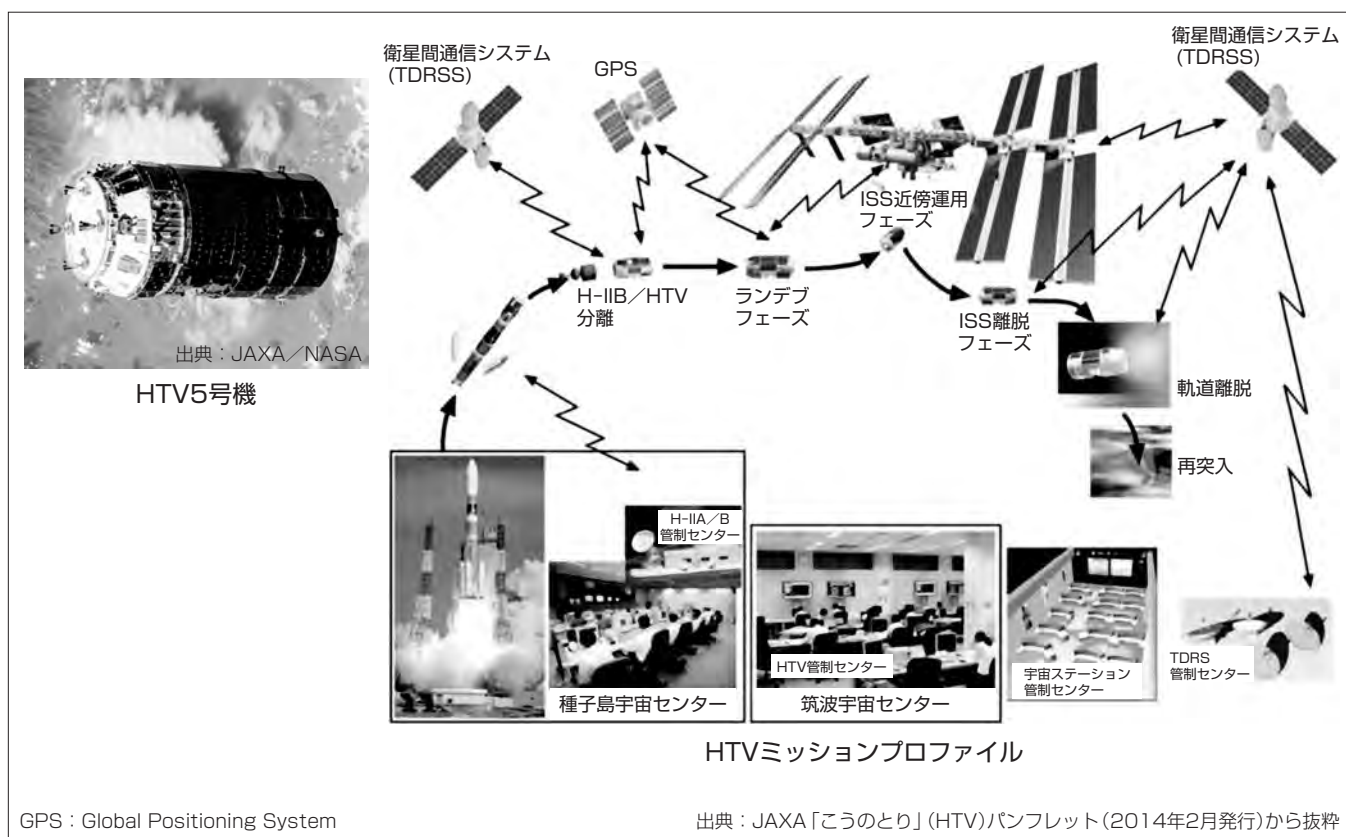
宇宙ステーション補給機(H-II Transfer Vehicle : HTV) “こうのとりの”は、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) (当時、宇宙開発事業団(NASDA))が開発し、2009年9月の技術実証機の打ち上げからほぼ年1機の割合で打ち上げられ、2015年8月に打ち上げられたHTV5号機まで5機連続で成功を収めている。三菱電機は、HTVの頭脳である電気モジュール(機体表面の太陽電池パネルを含む)を担当しており、ランデブミッションを支える航法誘導制御系の開発メーカーとして、JAXAの下でランデブ運用の全般的な運用支援及び運用管制系のとりまとめを行っている。

電気モジュールには、航法誘導制御系、通信データ処理系、電源系、熱制御系等が含まれ、これらの品質を維持・

安定させることが連続成功を支える基盤となっている。

航法誘導制御技術ではランデブフライトソフトウェア(RVFS)がその中核となっているが、号機ごとにランデブ運用をスムーズに遂行するために、このRVFSをいかに維持管理していくかが重要である。

運用支援業務では数多くの訓練・リハーサルを実施しており、実際の軌道上運用や訓練からのフィードバックを反映して、より現実的かつ緊急対応性の高いものへ常に進化し続けている。運用管制系については、運用管制メンバーが気付いた“使いにくさを低減し、より使いやすくミスが少なくなる”提案を反映することで、ヒューマンエラーの少ない安定したシステムへと逐次発展させている。



国際宇宙ステーションの下方を飛行する“こうのとりの”5号機(HTV5)

宇宙ステーション補給機“こうのとりの”5号機(HTV5)は、国際宇宙ステーション(International Space Station : ISS)に向けて最終接近を実施した後、8月24日19時29分(日本時間)にISSロボットアームで把持された。その後、8月25日2時28分(日本時間)にISSロボットアーム運用によってISSとの結合を完了した。

1. ま え が き

宇宙ステーション補給機“こうのとり”は、ISSへの物資輸送を目的として、JAXAの指導の下、1997年から基本設計が開始され、2009年9月に技術実証機が打ち上げられた。

HTV 2号機から、機体製造は三菱重工業(株)(MHI)に移管され、それ以来ほぼ年1機の割合で打ち上げられ、2015年8月に打ち上げられたHTV5号機まで連続成功を収めている(表1)。日本の宇宙機、衛星の歴史で、HTVほど同じミッションを繰り返し、長期にわたって連続成功を収めてきたプログラムは他にない。

当社は、HTVの頭脳である電気モジュール(機体表面の太陽電池パネル含む)の製造を担当しており、またランデブミッションを支える航法誘導制御系の開発メーカーとしてJAXAの下でランデブ運用の全般的な運用支援及び運用管制系のとりまとめを行っている。

本稿では、HTVが連続成功を収めてきた要因について、

表1. HTVのミッション

号機	ミッション期間	備考
HTV1 (技術実証機)	2009年9月11日～ 11月2日	①技術実証 HTV1(技術実証機)ミッションでは、初打ち上げのH-IIBロケットとともに、初号機にして日本初のISSへの補給物資の輸送を達成した。
HTV2	2011年1月22日～ 3月30日	①運用結果の反映 HTV1(技術実証機)ミッション結果を受け、次の改良を行った。 ・誘導制御ソフトウェアの改修 ・航法センサソフトウェアの改修 ・温度センサを耐熱温度の高いものに変更 ②機体の改良、通信装置の国産化と軌道上実証 ・バッテリーの性能向上及び搭載数の削減 ・近傍通信システム(Proximity Link System: PLS)のトランスポンダ(送受信機)2系統のうち1系統を国産品に変更 ③東日本大震災の発生 ISS係留期間中に東日本大震災が発生したが、NASA等の支援もあり計画通りミッションを完遂した。
HTV3	2012年7月21日～ 9月14日	①主要機器の国産化 メインエンジン/RCS(Reaction Control System)スラスタを始め、様々な主要機器が国産化された。
HTV4	2013年8月4日～ 9月7日	①再突入をISSから観測 再突入軌道をISSから夜間観測可能な軌道に調整し、再突入で生じた光球を観測(将来の改修型宇宙機に参考となるデータの取得)した。 ②表面電位センサ(ATOTIE-mini)の搭載 ISS係留前後のHTVの表面電位とその変化を計測(HTVの表面電位が宇宙飛行士の船外活動等へ与える影響を調べるためのデータ取得)した。
HTV5	2015年8月19日～ 9月30日	①宇宙環境観測装置(KASPER)の搭載 HTV4に搭載したATOTIE-miniの発展型のセンサで、デブリモニタ用のセンサも持っている。
HTV6 (予定)	未定	①導電性テザー実証実験(KITE)の搭載 軌道上デブリ回収技術の1つである導電性テザーの原理実証実験。電気モジュールは実験環境の支援と、ISS接近用のレーザーを用いてテザー先端の重りの位置計測を行う。

電気モジュール製造、航法誘導制御技術、訓練を含んだ運用支援、及び運用管制系技術の観点から分析した結果を述べ、それらを今後につないでいく技術の発展について述べる。

2. HTVミッション連続成功の要因

2.1 電気モジュール製造

HTVは量産機であるが、表1に示すような改善や設計変更があり、変更点に対しては設計から運用まで確実に対応が必要である。また、各号機のライフサイクルで発生した不具合は徹底して原因究明を行い、次号機以降に確実に反映している。量産機ならではの長い生産期間を通して、絶え間なく品質改善活動に取り組んできた。これらの活動が製品及び作業の高い品質の維持、ひいては連続成功の基盤となっている。

2.1.1 射場作業への申し送り事項

HTVでは、毎号機、当社鎌倉製作所での試験作業で得られた知見や発生した不具合情報等を“射場作業への申し送り事項”として整理して顧客であるMHIへ報告する活動を継続することで、射場作業での同様事象の再発防止及びスケジュールの厳守を実現している。

<射場作業への申し送り事項の例>

- ①特性値管理が必要な地球センサやGPSR(GPS Receiver)のデータ
- ②通信装置搭載コンフィギュレーションとその取扱い上の注意点
- ③搭載機器ソフトウェアバージョンと適用が必要となる再プログラム

2.1.2 次号機への申し送り事項

各号機の製造・試験での気付き事項や改善点、射場作業とりまとめのMHIが整理した知見を“次号機への申し送り事項”として管理し、次号機の試験開始前までにそれらを設計文書/試験手順書に反映させる。それによって、製品品質の改善、ヒューマンエラーの予防を行い、また諸作業の品質向上と効率化を継続的に実施している。

<次号機への申し送り事項の例>

- ①試験手順書の間違いやすい表現を改訂して明確化
- ②複雑な試験装置の接続手順には写真・図等を添付
- ③設計変更に伴う手順修正・要反映事項の反映確認

2.1.3 軌道上事象の反映

前号機の軌道上で発生した事象で、電気モジュールで対処が必要なものを次号機で対処し、同様の事象を軌道上で発生させない、また発生した場合でも即座に対処できる準備をあらかじめ行っておくことで、ミッション成功の確率を向上させている。

<軌道上事象の反映事項の例>

- ①航法誘導制御系搭載ソフトウェアの改良・最適化のためのバージョンアップ及び検証

②バス系機器搭載ソフトウェアの軌道上動作改善のための再プログラム製作及び検証

③発生事象原因の明確化，対処手順・運用への申し送り

2.2 航法誘導制御技術

航法誘導制御技術では，軌道上で発生した事象や気付き事項を分析し，次号機のRVFSに反映することで同じ事象を発生させないようにするとともに，類似事象への対策を行っている。

図1にRVFSを改修する場合のフローを示す。

このように，RVFSを改修する場合には，改修点が正常に動作することだけでなく，その改修が他の動作に悪影響を与えていないことを確認するために，航法誘導制御計算機上でのソフトウェア検証，及び各号機の実際の質量や運用手順を反映した打ち上げ前解析を行うことで，全体の動作が正常で，RVFSとしての品質を持っていることを検証している。

2.2.1 軌道上事象への対処

軌道上事象への対処の一例として，技術実証機で発生した姿勢制御システム（Reaction Control System：RCS）のスラスタ過熱事象への対処について述べる。

HTVは，ISSへの最終接近時にISS下方から接近するRバー接近という軌道を採用しているが，技術実証機ではRバー投入後の最初の停止点であるISS下方300mのHP点（Hold Point）でRCSスラスタが温度センサの許容温度以上に高温化する事象が発生した。そこで，主従2系統あるRCSスラスタを交互に切り換えて許容温度以上の高温化を防ぎ，ミッションを継続させた。ミッション完遂後の原因調査の結果，スラスタ噴射のデューティ（間欠的な噴射での噴射期間の割合）が高まるとスラスタが加熱することが判明した。

2号機以降への反映として，航法誘導制御系サブシステムでHP点を50m上方へ移動し，ISS下方250mとする軌道設計変更を行った。これは，ISSからの距離が近いほど，停止するために必要なスラスタ噴射を相対的に減らすことができるからである。また，推進系サブシステムで温度センサを換装し，スラスタ自体の限界までの温度範囲の計測を可能とした。

HTVのRバー接近の軌道制御はRVFSで自動で実施されるため，軌道設計変更を反映するためにRVFSの軌道制御ロジックを改修して対応した。この軌道設計変更は，ISSに接近するHTVの異常検知のしきい値にも影響するため，これについても設計変更を実施した。これらの変更を反映したRVFSの改修後の機能・性能検証では，HTV開発時に実施した401ケースのソフトウェア検証のうち，軌道変更及び異常検知しきい値変更の影響を受ける56ケースの再検証を実施した。検証結果の例として，図2にHP点を50m近づける軌道設計変更実施後のRバー接近のシミュレーション結果を示す。

改修結果を見ると，曲線で示されるRバー接近の飛行経路で，接近開始後の最初の停止点がISS下方300mから250mに正しく変更され，かつ最終的にISS直下まで接近できていることが分かる。

このように，検証されたRVFSを適用して飛行したHTV2号機では，軌道保持のためのRCSの噴射デューティを減少させることで，スラスタ高温化を防止することができた。

2.3 ランデブ運用及び運用管制系

2.3.1 ランデブ運用準備

HTVでは，有人の宇宙ステーションへのランデブ運用という日本が未経験の技術を確認するため，機体開発及び運用管制系の開発と同時並行で運用検討を行い，運用成立性の検証，開発への運用検討結果のフィードバックを行いながら，運用手順を固めていった。試験フェーズでは運用手順を試験に取り込み，試験で検証されたとおりの手順書を運用に提供することを徹底した。

運用手順書の整備に当たっては，網羅性の確保に努め，次の観点から手順書をリスト化・整理し，約2,080件の手順を整備した。

- (1) 機体の全動作を網羅：約1,000件
- (2) 運用イベント失敗時の処置手順を網羅：424件
- (3) アメリカ航空宇宙局(NASA)安全要求への運用解を網羅：56件
- (4) 故障モード影響解析(FMEA)の網羅：534件

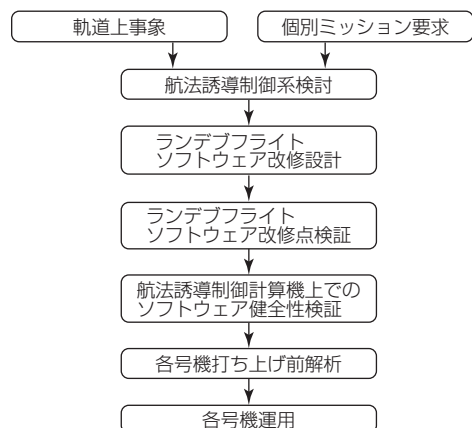


図1. RVFS改修から運用までのフロー

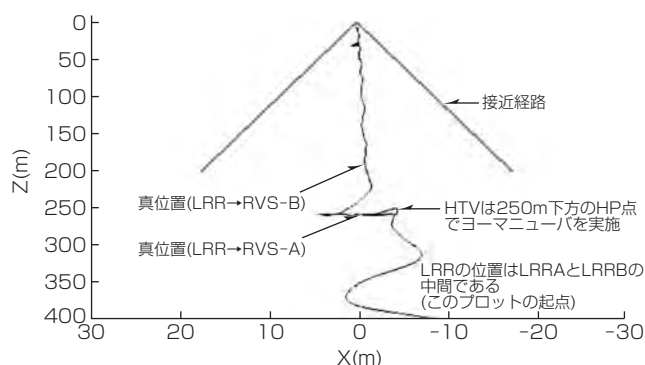


図2. ISS下方250mHPに変更後のシミュレーション結果（スラスタ高温化対策でのRVFS改修後の検証結果）

(5) 想定異常のフォールトツリー解析(FTA)の網羅：70件

HTV各号機の運用終了後は、軌道上不具合や訓練を通じて得た不具合対応策を不具合対応データベースとして整備し、維持改訂を継続している。このデータベースによって、実績のある不具合対応策を素早く確実に、なおかつ運用管制チームで情報共有しながら手順進行できるようになり、緊急時対応能力が運用経験ごとに高まっていった。

2.3.2 運用訓練

HTVの訓練環境は実運用に限りなく近い。訓練装置は、航法誘導制御系の試験にも提供されるシミュレータをベースに各種サブシステムのモデルを組み込み、RVFSは実機と同じものを使用している。

HTV運用の大きな特徴の1つとして、ISSとの協調運用が挙げられる。訓練で実運用環境を模擬するために、日本ではISSの情報が、米国ではHTVの情報が必要となる。そこで、日米合同でHTV運用の訓練を実現するため、“分散シミュレーション(Distributed Simulation：DIS)”技術が採用された。これは、複数の場所にあるシミュレータ（コンピュータ）同士をネットワークで接続し、あたかも1つのシミュレータが動作しているかのように見せる仕組みである。今回HTVプロジェクトでこの技術を初めて宇宙分野で実用化した。

DISの導入によって、日米それぞれのシミュレータを見た目上は1つのシミュレータとして動作させることが可能となり、HTVとISSの複雑なシステム同士のインタフェースをリアルに模擬した訓練が可能となった。

このような高度な訓練環境の下に、毎号機15～20回の運用訓練を実施している。ちなみに、初号機では約100回に及ぶ訓練を実施した。

訓練では、不具合対応データベースの練度を上げるため、毎回違うタイミングで違う不具合をランダムに投入する。また、答えのある不具合対応にとらわれず、“ありえない”と言われるような異常事象をあえて発生させ、運用管制チームにリアルタイムで対処を考えさせるような訓練を織り交ぜる。そうすることで、実運用で起こるかもしれない“想定外の事象”への対応能力を磨き上げている。

実運用より先に訓練で経験することでスムーズに対処できた最も顕著な例が、HTV3のISS離脱時である。ロボットアームで外乱が印加されたことによって、HTVの衝突回避機能が働き、予定していた軌道とは大きく異なった軌道に入ってしまった。しかし、結果的に当初の計画通りの日時に地球へ再突入できたのは、事前にこの事象を想定した訓練を積み重ね、課題を抽出して全て解決しておいた賜物(たまもの)と考えている。

2.3.3 HTVミッション管制室(MCR)運用管制システム

HTVのランデブ及び係留運用を管制する運用管制システム(HTV Operation Control System：HTVOCS)は当社が開発したシステムである。

HTVOCSは、実運用や訓練・リハーサルでHTVの運用管制チーム(FCT)が気付いた“使いにくさ”や“より使いやすくミスが少なくなる”提案を次のポイントで評価し、ヒューマンエラーの少ない安定したシステムへと逐次発展させている。

- (1) 次号機の機能・性能の変更に対する地上支援機能(シミュレータモデル更新を含む)の付加必要性(最優先)
- (2) 前号機運用での、使いにくさやミスを誘発しそうな箇所の地上支援機能の改修(優先)
- (3) 前号機運用での、作業効率の向上が期待される地上支援機能の改修

3. 今後の技術の発展

HTVを更に高度化した次世代HTV(HTV-X)の開発を、現在JAXAで検討している。HTV-Xは、

- (1) 製造コストの半減
- (2) 将来への波及性のある技術
- (3) 汎用性の高いプラットフォームとしての技術実証等への活用

を目標として掲げている。目標(3)の汎用性の高いプラットフォームとしての活用は、これまでのHTVにはないコンセプトであるが、当社はこれまで複数の技術実証衛星の開発・運用を手掛けており、実験ペイロードインタフェースのノウハウを活用できると考えている。

HTV-Xでも、HTVと同様に連続成功を継続させるために2章で述べたような地道な努力が必要である。また、HTV-Xでは、これらをより効率よく実現していく仕組みを作ることで、同等の品質を低コストで実現することも重要となる。

4. む す び

HTVの連続成功と言っても、その1つ1つを見れば、号機ごとに機体製造・試験、軌道上運用の各フェーズで大小様々な課題が見つかる。しかし、課題が見つかるたびに、その対応策を、ハードウェア／ソフトウェアの両面で継続的に適用することで連続成功が成し遂げられてきた。

今後は、これらのノウハウをHTVに続く将来型宇宙機にも適用することで、日本の宇宙機開発に貢献していきたい。

本稿の作成に当たって、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)の御指導を仰ぎ、三菱スペースソフトウェア(株)に支援いただいた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 桐谷浩太郎，ほか：宇宙ステーション補給機(HTV)の開発と利用—ランデブ技術の応用と有人宇宙機への発展構想—，三菱電機技報，**85**，No. 9，530～535(2011)

ひまわり 8 号打ち上げ成功と定常運用開始

西山 宏*
西村修司**

Successful Launch and Operational Service of Himawari-8

Hiroshi Nishiyama, Shuji Nishimura

要 旨

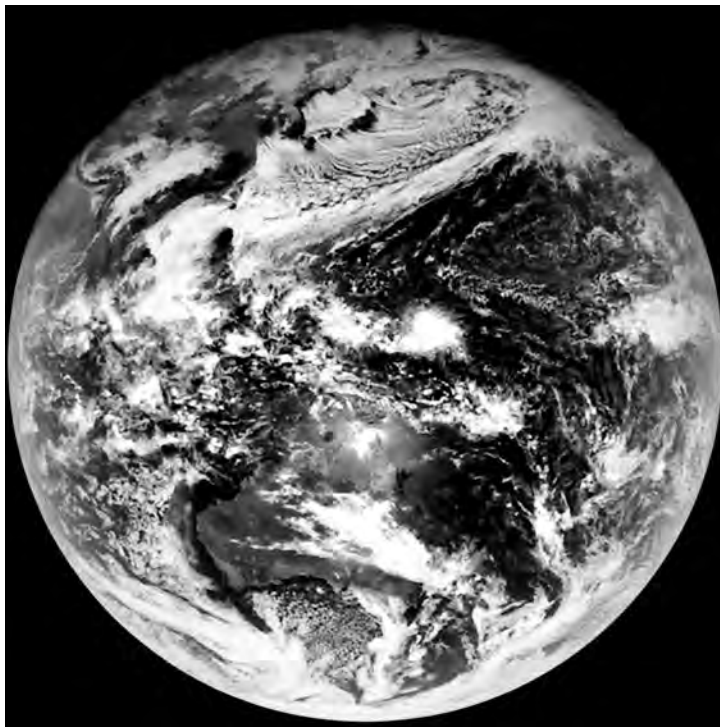
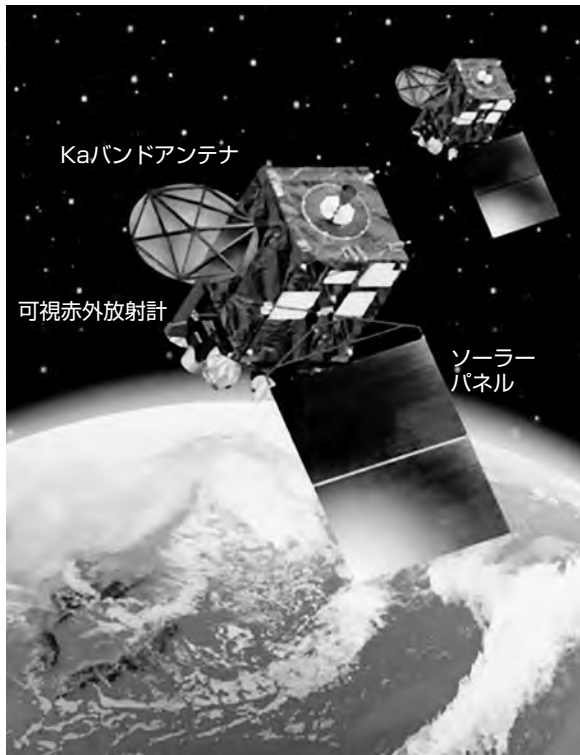
気象衛星“ひまわり 8 号”は、2014年10月に種子島宇宙センターから打ち上げられ、約半年間の点検及び画像調整を経て2015年 7 月から気象庁によって画像提供サービスが開始された。これまで使用されてきた“ひまわり 7 号”（運輸多目的衛星新 2 号：MTSAT-2）に比べて、性能が飛躍的に向上している。

ひまわり 8 号は、2009年に気象庁によって国際公開入札が実施され、欧米を含めた数社が応札する中、三菱電機が受注し、衛星本体、及び地上の画像データ処理ソフトウェアの開発を進めてきた。また、同型機となる“ひまわり 9 号”の製造も現在当社の鎌倉製作所で進んでおり、2016年度の

打ち上げを予定している。

一方、地上局は、日本で初めてのPFI方式(Private Finance Initiative)での衛星運用事業であり、気象衛星ひまわり運用事業(株)(Himawari Operation Enterprise Corporation：HOPE)の指導の下、当社の通信機製作所が、埼玉県鳩山町、東京都板橋区及び北海道江別市にアンテナ設備及び衛星管制設備を納入し、衛星の打ち上げ以降順調に稼働している。

ひまわり 8、9 号は、台風の進路予想の精度向上、積乱雲等局所気象変動の予測、火山噴火、黄砂の監視など、防災に大きく貢献すると期待される。



2014年12月18日 気象庁による初画像提供

ひまわり8、9号の軌道上想定図と観測の画像例

当社標準衛星バスDS2000に可視赤外放射計を搭載した三軸姿勢制御方式のひまわり8、9号と可視帯域のバンドが光の3原色となったフルディスク観測の画像例。

1. ま え が き

ひまわり 8 号は、ひまわり 7 号の実績と経験を踏まえて、新型の可視赤外放射計（以下“放射計”という。）の運用に最適な設計を行ったものである。ひまわり 7 号に搭載したイメージャ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が約 1/3 に短縮され、日本域などの小領域を高頻度に観測することが可能である。

一方、放射計の観測精度実現のためには、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性能を要求された。そのため、低熱歪（ひずみ）の光学ベンチの採用、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、地上での画像補正処理のために、高精度・広帯域に光学ベンチの姿勢を計測・決定する機能を持つ。衛星バスには、当社が開発してひまわり 7 号や各種通信衛星に採用してきた実績ある標準衛星バス“DS2000”を採用している。撮像画像は、Kaバンドのマイクロ波で伝送する。データ伝送レートは衛星の各種技術情報（テレメトリ）を含めて 60Mbps 程度である。直径約 2.2m のアンテナを具備し、日本国内の 2 か所の地上局（埼玉県鳩山町と北海道江別市）に効率的に電波放射できるように設計としている。

本稿では、ひまわり 8、9 号の衛星及び地上局の性能について述べ、ひまわり 8 号の幾つかの画像を示す。

2. 放 射 計

地球を撮像する放射計は、米国航空宇宙局（NASA）などが中心となって開発した。気象衛星観測の新世代を担う最先端の性能を持ち、ひまわり 8、9 号では、これをいち早く導入するとともに日本独自の仕様を追加した。まだ米国で打ち上げた実績がなく、日本が世界で初めて運用したものである。次に放射計の性能進化について述べる。

2.1 観測バンド（波長帯）数の増加

放射計の観測帯域（バンド）をひまわり 7 号のイメージャと比較して表 1 に示す。

可視帯域のバンドが光の 3 原色となったことによって、地上で重ねあわせ処理をしてカラー画像が得られる。これによって、黄砂、火山噴煙、土地利用など様々な情報が得られている。

2.2 分解能の倍増

放射計の受光素子密度が高くなり、デジタル処理技術の進歩と相まって、表 2 に示すように分解能が向上した。これによって、積乱雲や台風の進路、発達の監視がより詳細にできるようになり、火山噴火などの現象も把握しやすくなった。図 1 に台風の領域観測画像を示す。

2.3 観測時間短縮

走査幅を広くするとともに放射計が小刻みに動けるよう、

ひまわり 8 号から 2 枚の走査ミラーを導入して、南北・東西にそれぞれ個別に動くことで複雑な観測が可能になった。これによって、局所的な領域観測、例えば日本領域を、地球全体の観測を行いながら 2.5 分間隔で連続撮像できるようになった。この画像をつなぎ合わせることで、滑らかで精細な動画を作成することも可能となり、局所的に発達する積乱雲をいち早く検知できるようになった。表 3 に示すように、観測にかかる時間を短縮したことによって、雲や台風の動きをより早期に緻密に追跡することが可能となり、気象災害の防止・軽減に寄与するものと期待されている。

表 1. ひまわり 7 号から 8 号への放射計の進化

	ひまわり 7 号 イメージャ	ひまわり 8、9 号 放射計
可視観測	1 バンド（白黒）	青、緑、赤の 3 バンド （地上で合成処理してカラー画像になる）
近赤外観測	なし	3 バンド
赤外観測	4 バンド	10 バンド
合計	5 バンド	16 バンド

表 2. ひまわり 7 号から 8 号への水平分解能向上

	ひまわり 7 号 イメージャ	ひまわり 8、9 号 放射計
可視	1 km	0.5 ～ 1 km
近赤外・赤外	4 km	1 ～ 2 km

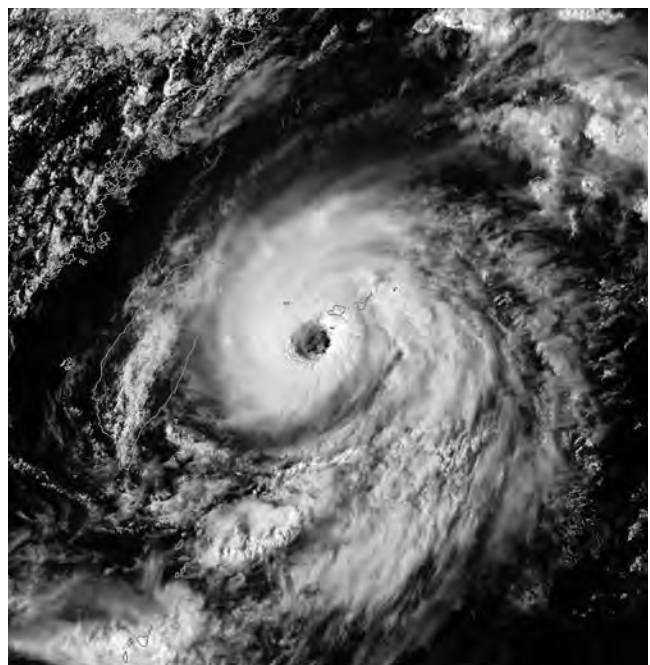


図 1. 台風の画像例（2015 年 3 月 31 日試験撮像）（気象庁提供）

表 3. ひまわり 7 号から 8 号への観測時間短縮

	ひまわり 7 号 イメージャ	ひまわり 8、9 号 放射計
走査ミラー数	1 枚	2 枚
地球全体観測	30 分	10 分
局所領域観測	—	2.5 分

3. 放射計の性能を最大限引き出す技術

放射計は、2章で述べたとおり、これまでにない高い機能が盛り込まれている。この機能を最大限に発揮するため、衛星・地上全体システム設計の最適化を行った結果、高精細な画像を得ることができた。具体的には、衛星の地球を向くパネル面に低熱歪のもう一枚のパネルを乗せ、このパネル上に放射計を搭載した。これに加えて、このパネル上に放射計の視線を高精度・広帯域に決定するために、スタートラッカー(STT)、慣性基準装置(IRU)等を搭載する構成にした。主要な点を次に述べる。

(1) 放射計の熱歪を最小化

衛星構体は、軌道上の周期的な温度変動で歪を生じる。特に表面は $-170\sim+100^{\circ}\text{C}$ の温度変化にさらされる部分がある。このため、放射計を衛星から極力熱的に分離して、衛星の熱歪が放射計の光学系を歪(ゆが)める悪影響を最小化した。

(2) 機械的な擾乱の最小化

衛星に搭載するリアクションホイールなどから出る微小振動が衛星構体を伝わり、放射計を揺らす擾乱という現象がある。これを最小限とする搭載方法を採用した。

(3) 高精度の姿勢制御方式

STTで姿勢を高精度に同定するとともにIRUで姿勢の変化(加速度の変化)を検知して衛星搭載コンピュータのソフトウェアで姿勢を制御するという、DS2000で蓄積してきた技術を用いて、定常観測時には $1/100^{\circ}$ の精度での姿勢制御を実現した。

(4) 高精度の画像位置ずれ補正技術

ひまわり8号では、放射計の視線方向を東西方向に高速走査することで、地球全体を10分ごと、日本付近を2.5分ごとに観測するが、この走査で発生する微小振動を衛星に搭載した各種センサで計測し、視線方向の振動を高周波微小成分も含めて高精度に推定する技術を地上ソフトウェアで実現した。地上局では、受信した視線方向推定用データ(姿勢角、角速度、加速度)を演算処理することで視線方向の振動成分を高精度に推定し、観測画像の位置ずれを補正する。この高精度姿勢決定機能と、気象庁が開発した画像位置合わせ機能を融合して、可視0.5km、赤外1kmの高分解能が得られている。

(5) 地上処理

ひまわり8、9号の画像データを地上局で一次処理するための放射計データ処理システム(RDACS)を衛星とともに開発した。このシステムは、地上で受信したデータを復調した後のデータ処理を担い、次の機能を持つ。

- ①放射計データファイル作成
- ②位置精度・校正処理
- ③領域観測選定処理
- ④画像診断・監視

このRDACSで出力されたデータは、HOPE地上局を経由して気象庁の気象衛星センターに送られて画像化・二次加工処理され、その画像がユーザーに配信される。RDACSは災害防止に必要な情報を途切れさせないという観点で、サービスの継続性・連続性を重視した設計となっており、さらに、地上局の構成機器として高い機動性のある観測運用を可能とするため、衛星運用との連動性も重視した設計となっている。

4. 地上局

ひまわり8、9号の地上局では、我が国で初めて宇宙分野で衛星運用にPFI方式が採用された。2010年にHOPEが“ひまわり8、9号の運用等事業”を受注し、当社はアンテナ設備や衛星管制設備などを担当した。当社にとって初めての宇宙PFI事業であり、安定的な衛星運用と確実なサービス提供を実現させるため、HOPE構成企業である三菱UFJリース(株)、新日鉄住金ソリューションズ(株)、宇宙技術開発(株)の協力の下に、信頼性の高いシステム設計及び装置開発を行い、HOPE地上施設・設備が2014年9月に完成した。HOPEは、ひまわり8、9号から受信した気象観測データを24時間/365日中断することなく気象庁へ送り届けることが主な業務である。

4.1 地上施設・設備の概要

ひまわり8、9号の地上施設・設備の概要を図2に示す。主局と副局の2局で構成され、主局のアンテナサイトは埼玉県鳩山町に、主局データセンタは東京都板橋区に設け、副局のアンテナサイトとデータセンタは北海道江別市に設置した。観測データの大容量化に伴い受信周波数にはKaバンドを採用しており、従来のひまわり7号と比べて降雨減衰の影響を受けやすいため、サイトダイバーシティ構成としている。

ひまわり8号からの観測データを常に主局と副局で同時に受信しており、例えば、大規模災害などで関東が大きな被害を受けて主局が機能しなくなった場合にも、副局(北海道)で観測データを受信・処理して運用が継続できる。なお、主局と副局は全て同じ装置で構成しており、機能・性能は変わらず、どちらの局でも同じ運用が可能である。

観測データは、HOPEが整備した地上専用回線を通じて東京都清瀬市にある気象衛星センター及び大阪管区気象台へ伝送する。図3にアンテナサイト、図4にデータセンター内にある運用室を示す。

4.2 地上施設・設備の特長

地上設備の主な特長は、(1)高い稼働率の確保、(2)高頻度観測の実現、(3)運用の効率化であり、次にその内容を述べる。

(1) 高い稼働率の確保

局、設備、装置の各階層で冗長化するとともに、受信データについては同時並行処理を行うことで障害発生による観測データの欠損を抑え、99.99%以上の高い稼働率を確

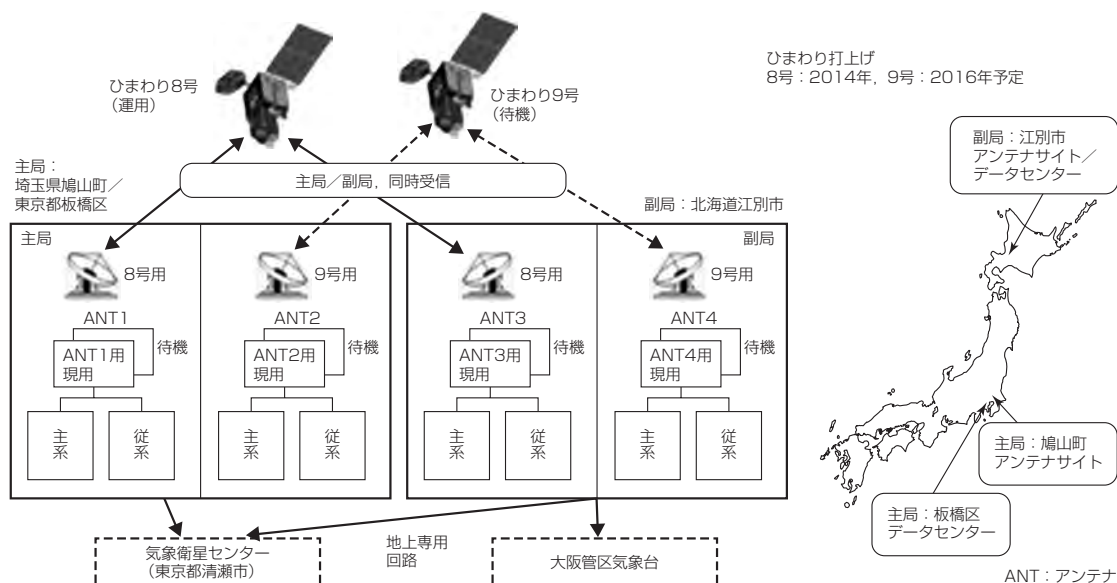


図2. 地上施設・設備の概要



図3. アンテナサイト(北海道江別市)



図4. データセンター運用室

保している。また、主局及び副局は大規模な災害や降雨での電波障害を同時に受けないよう、地理的に離れた関東と北海道に設置し、各拠点をつなぐ地上専用回線についても二重化している。

(2) 高頻度観測の実現

衛星管制システムには、当社製の標準衛星管制ソフトウェア“Birdstar”を採用しており、日本域や台風付近などの領域を2.5分ごとの高い頻度で観測できるよう、2.5分間隔で確実にコマンド送信が可能なデータ処理システムを実現した。

(3) 運用の効率化

統合監視による運用負荷の軽減や運用計画の自動化を実現し、長期にわたって効率的な衛星運用が実施できる衛星管制システムを構築した。また、運用者の作業性向上や操作ミスを防止するため、設計初期段階から運用者の意見を取り入れて操作画面の設計を行った。

4.3 地上施設・設備の維持管理・保守

長期にわたって安定かつ確実なサービス提供を継続するため、施設・設備の日常点検や定期検査は必須であり、HOPE運用者及び維持管理者と連携して計画的に維持管理・保守業務を遂行している。また、PFI事業では維持管理・保守を含めたライフサイクルコストを十分に考慮して設計することが重要であり、高信頼性設計に加えて将来の

装置交換の容易性などを検討した。障害発生時には即座に冗長系に切代わって運用を継続するシステムとなっているが、障害復旧時間の短縮や確実なサービス提供のため、運用者の実機訓練や故障箇所特定フローの整備などを実施してきた。

5. む す び

ひまわり8号は、2015年7月から正式に画像配信を開始したところである。気象庁で、取得したデータの数値予報などへの活用も始まったところである。気象予報会社や大学、研究機関でも画像の活用、解析方法等の開発が始まったばかりである。今後に期待するとともに、その活用現場の生の声を聞いて次のひまわり衛星の開発に反映していくことが重要である。ひまわり9号の製造は進行中で、2016年に打ち上げ、2017年から待機運用の開始を予定している。2017年からは最新鋭の気象衛星による二機体制での運用となる。また、地上局は衛星運用と維持管理・保守を一体とした日本初のPFI事業としてスタートしたばかりであり、2030年3月までの長期間、24時間/365日確実に安定して観測データを気象庁へ送り届けられるように引き続き気象庁やHOPE関係者と連携し事業推進に努めていく。

おわりに、本稿の執筆に当たり御指導いただいた気象庁気象衛星課の皆様へ謝意を表す。

温室効果ガス観測技術衛星 2 号 (GOSAT-2) のミッション機器

上野信一*
中野貴敬*

Mission Instruments for Greenhouse Gases Observation Satellite-2 (GOSAT-2)

Shinichi Ueno, Takayuki Nakano

要 旨

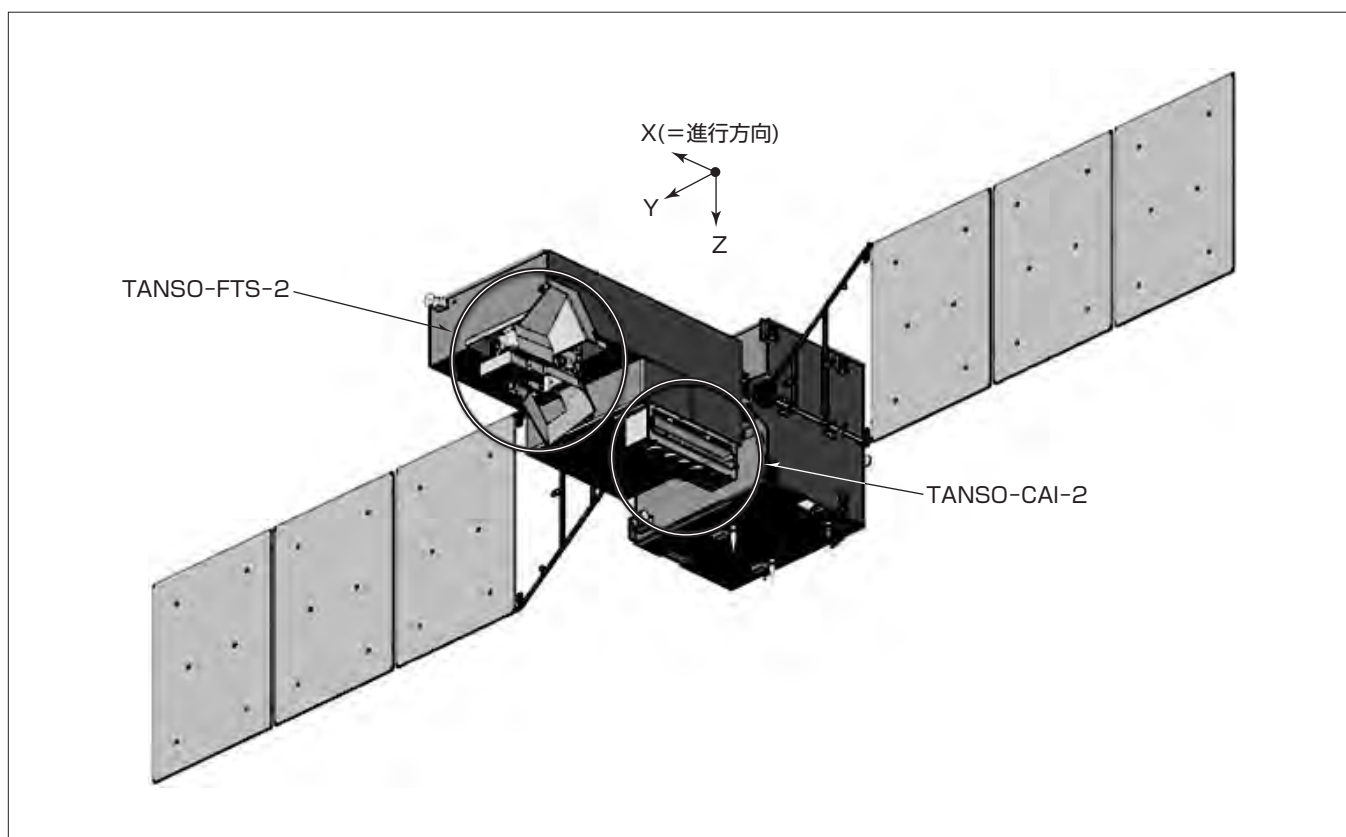
温室効果ガス観測技術衛星 2 号 (Greenhouse gases Observing SATellite-2: GOSAT-2) は、日本が欧米に先駆けて 2009 年 1 月に打ち上げた世界初の温室効果ガス観測専用衛星“いぶき (GOSAT)”⁽¹⁾⁽²⁾の後継衛星として開発が進められている。

GOSAT-2 は、ミッション機器として温室効果ガス観測センサ 2 型 (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation/Fourier Transform Spectrometer 2: TANSO-FTS-2) と雲・エアロゾルセンサ 2 型 (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation/Cloud and Aerosol Imager 2: TANSO-CAI-2) の 2 種類のセンサが搭載される。

TANSO-FTS-2 センサは、二酸化炭素やメタンなどの

温室効果ガスをフーリエ分光法で観測する。TANSO-FTS-2 では、前号機に対して①センサ開口の拡大による観測データの品質向上、②観測波長領域の拡張による一酸化炭素の観測データ追加、③雲領域の回避観測による有効観測データ数の増加の性能向上を行う。

TANSO-CAI-2 は、TANSO-FTS-2 で二酸化炭素を測定する際に誤差要因となる雲の有無の判定やエアロゾル (大気粒子状物質) の測定に用いる画像センサである。TANSO-CAI-2 は、前号機に対して①直下視観測から前方／後方視観測への観測方向の変更及び増加、②観測波長領域追加によるブラックカーボンや PM2.5 等の微小粒子状物質の観測、③短波長赤外領域バンドの観測幅の拡大の性能向上を行う。



温室効果ガス観測技術衛星 2 号 (GOSAT-2) の形状とミッション機器搭載状況

X 方向が衛星の進行方向である。-Y 方向が太陽光が当たらない面となるため、2 つのミッション機器 (TANSO-FTS-2 及び TANSO-CAI-2) の放熱面は -Y 方向に設置されている。+Z 方向が地球面方向であり、センサは +Z 方向を観測方向としている。

1. ま え が き

本稿では、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の指導の下、当社が開発を進めている温室効果ガス観測技術衛星 2 号 (GOSAT-2) に搭載されるミッション機器 TANSO-FTS-2 センサ (以下“FTS-2”という。) と TANSO-CAI-2 (以下“CAI-2”という。) について述べる。

2. FTS-2 センサ

2.1 FTS-2 センサの構成

FTS-2 センサの主な仕様を表 1 に、観測対象を表 2 に、構成を図 1 に示す。FTS-2 は、大きくセンサユニットと電気回路ユニットの 2 つに分けられる。

センサユニットは、製造性を高くするためにモジュール化された構造である。そのモジュール構成を図 2 に示す。センサユニットは大きくスキャナアセンブリ構造 (SSA) と光学結合アセンブリ構造 (IOA) の 2 つに分かれる。SSA は、観測地点を決定するスキャナと光源、観測時に雲領域を回避するための視野画像を撮影するモニタカメラと迷光を抑

表 1. FTS-2 の主な仕様

		バンド1	バンド2	バンド3	バンド4	バンド5
分光方式		フーリエ分光方式				
波数範囲 (cm ⁻¹)		12,950～ 13,250	5,900～ 6,400	4,200～ 5,200	1,188～ 1,800	700～ 1,188
帯域外波数範囲 (cm ⁻¹)		<12,750 >13,450	<5,100 >6,800	<4,100 >5,500	<1,000 >3,800	<600 >1,300
サンプリング間隔 (cm ⁻¹)		0.2				
有効サンプリング点数		153,090	76,545		38,400	
偏光観測		あり			なし	
S/N比	ケース 1	>400	>300		>300	
	ケース 2	>650	>500		>NA	
	ケース 3	>200	>150		>NA	
ILS半値全幅 (cm ⁻¹)		≦0.4	≦0.27			
消費電力 (平均／最大)		≦200W／≦350W				
質量		≦225kg				
残存確率 (5 年後)		≧0.85				

NA: Not Applicable

表 2. FTS-2 の観測対象

バンド	波数	主な観測対象
1	12,950～13,250	O ₂
2	5,900～6,400	CO ₂ , CH ₄
3	4,200～5,200	CO, CO ₂ , H ₂ O
4	1,188～1,800	CH ₄ , H ₂ O
5	700～1,183	CO ₂ , 温度

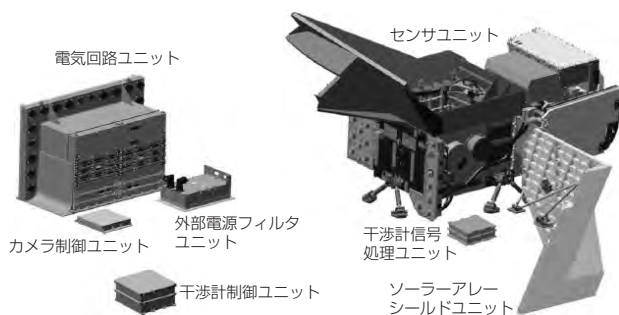


図 1. FTS-2 センサの構成

制するためのシールド構造でできている。IOA は、干渉計、光学系、検出器などの光学素子と検出器を冷却するパッシブクーラ、アナログ信号処理回路部などで構成されている。

FTS-2 全体はアメリカ海洋大気庁の気象衛星 Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership) に搭載された CrIS (Cross-track Infrared Sounder) をベースに設計を行っている。干渉計は、いぶきの設計をベースにしているが、特に次の 3 つの点で向上を図っている。

- (1) 干渉計の開口径: $\phi 68\text{mm} \rightarrow \phi 77\text{mm}$ 拡大による S/N 比 (Signal-to-Noise ratio) の向上
- (2) レーザアライメント: ピックアップミラーのモノリシック化や集光レンズ追加によるロバスト性向上
- (3) フリンジカウント: ハーフフリンジカウントによる精度向上

オンボードでの信号処理フローを図 3 に示す。時間に同期した、等時間サンプリングによってインターフェログラムへ変換する。また、等時間サンプリングのインターフェログラムの取得は、出力データ周波数に対して 5～12 倍のオーバーサンプリングを行う。サンプリングは 14bit の ADC (Analog-to-Digital Converter) で行い、データビット数をバンド 1～3 は 16bit, バンド 4, 5 は 18bit に向上させて出力する。これは、エイリアシングの抑制や量子化誤差の低減に非常に有効である。

2.2 FTS-2 センサの性能見積り

TANSO-FTS-2 の S/N 比の見積り結果を図 4 に示す。性能評価での入射輝度は 3 ケース設定 (表 3) されており (ただし、バンド 4, 5 はケース 1 だけ), それぞれの条件で S/N 比を算出しているが、ここではケース 1 の算出結果を示す。実線が要求仕様値である。バンド 1～3 は S/P (Senkrecht/Parallel) 波のいずれかの観測光に対して S/N 比要求を満足していれば良く, S/N 比が高い S 波観測の見積り結果を示している。バンド 1～5 の全ての条件で S/N 比が要求仕様を満足している。

表 4 に、装置関数の見積り結果を示す。要求仕様を満足していることが確認できる。

2.3 雲検出の例

FTS-2 では、雲を回避して観測を行うことで有効観測

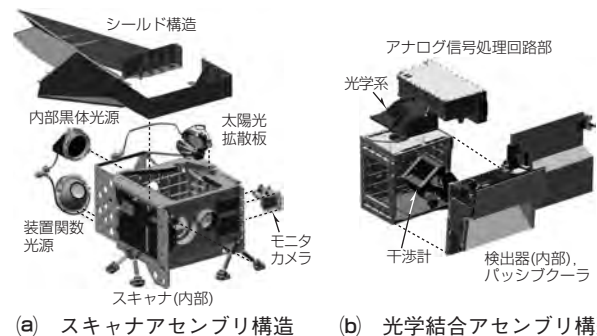


図 2. FTS-2 センサユニットのモジュール構成

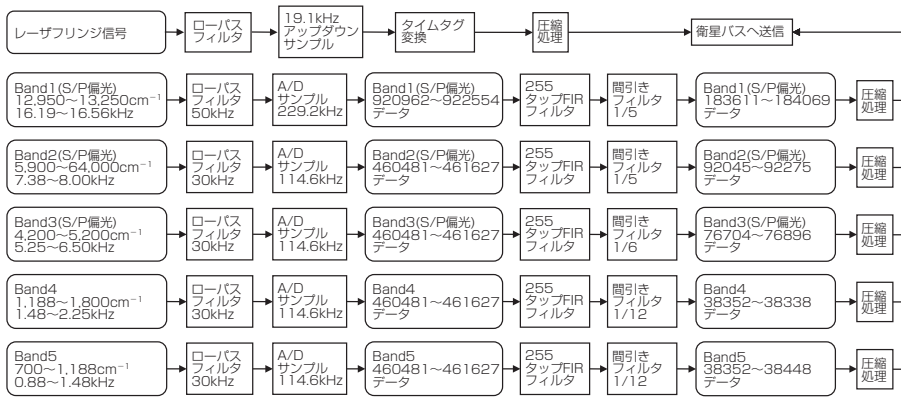


図3. FTS-2のオンボード信号処理フロー

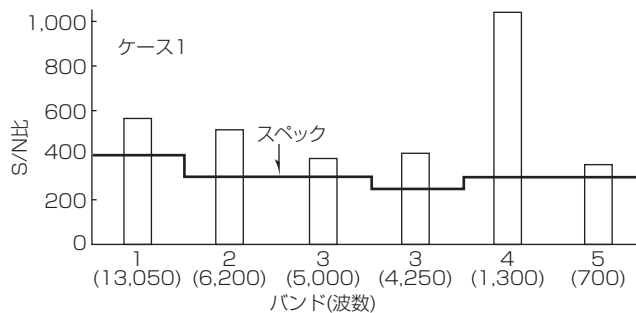


図4. S/N比の見積り(ケース1)

データの増加を図っている(この機能をインテリジェントポイントティングと呼ぶ)。視野確認カメラで得られた画像から雲のない領域を検出するアルゴリズムの検討を行った。

バンド	要求仕様	設計結果
1	0.40cm ⁻¹	0.365cm ⁻¹
2	0.27cm ⁻¹	0.265cm ⁻¹
3		0.257cm ⁻¹
4		0.244cm ⁻¹
5		0.243cm ⁻¹

図5に、雲がある視野画像サンプルに対して雲検出アルゴリズムを適用した例を示す。図5(a)は雲検出の信号処理アルゴリズムを示す。このアルゴリズムでは、視野画像のカラーの輝度値に対してフィルタしきい値処理を行い、雲の有無に応じた雲マスク画像を作成する。そして、雲マスク画像に対してセンサ視野を重畳して最も雲がない領域を観測点として抽出する。

図5(b)に、衛星画像に対してこれらのアルゴリズムを適用した例を示す。四角枠内が視野確認モニタカメラの撮影領域を示し、濃淡3段階で雲の有無を示している。①中間色四角が視野中心で雲のない領域、②一番濃い四角が視野中心以外に雲がない領域、③一番色の薄い四角は視野全体が雲に覆われている領域を示し、図中に各色の代表例を示す。①の領域は従来の観測データであり、②の領域がインテリジェントポイントティングで観測データが増加する領域となる。この例では、①の領域は20%、②の領域は26%、③の領域は54%であり、したがって、インテリジェントポイントティングで観測データは20%から46%へ2.3倍向上するという結果が得られた。

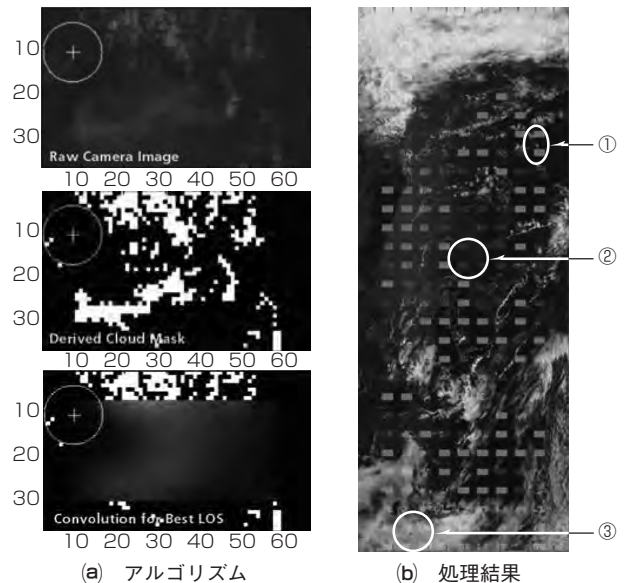


図5. 雲検出処理の例

3. CAI-2センサ

3.1 CAI-2センサの主要諸元

CAI-2センサの主要諸元を表5に示す。

GOSAT/CAIでは直下視だけであったが、GOSAT-2ではサングリントの影響を避けるために前方視/後方視としている。さらに、観測方向の増加と合わせて観測バンド数を増加させている。このタイプの観測センサとしては世界初^(注1)の340nmUV帯観測バンドを持っている。

(注1) 2015年10月30日現在、当社調べ

3.2 CAI-2センサの構成

CAI-2は、光学系ユニット(OPT)と電気回路ユニット(ELU)の2つのユニットから構成される。ブロック図を図6に示す。

CAI-2は、前方視5バンド/後方視5バンドの合計10バンドから構成される。光学系構成として、1本のレンズ系(鏡筒)に観測波長帯が同じ又は近い前方視/後方視バンドを各1バンドずつ配置した。この合計5本の鏡筒構成によって、鏡筒の本数を最小化して光学系ユニットの小型化を図りつつ、要求の観測バンドと観測方向を満足させている。各鏡筒と各バンドの観測方向を図7に示す。

表 5. CAI-2の主要諸元

		光学系部 1		光学系部 2	光学系部 3	光学系部 4	光学系部 5
共通	分光方式	分光フィルタ方式					
	IFOV (チルト角±20°において)	700±15μ rad (0.46±0.01kmに相当)			1400±30μ rad (0.92±0.02kmに相当)		
	観測幅	日照時観測期間 6 日間で全球/同一地点を 2 方向から観測					
	データ取得周期 (撮像周期)	73.2ms以下			146.5ms以下		
	S/N比	規定分光放射輝度にて200以上					
	ダイナミックレンジ	最大輝度レベルで飽和しない					
	MTF (矩形波応答)	0.2以上					
	量子化ビット数	12ビット					
	ゲイン (積分時間) 切り替え段数	32					
	バンド間レジストレーション	0.5画素以内 (ナレッジ)					
前方視	取得校正データ	ダミー (暗時) 画素出力, 検出器温度, 電気校正					
	バンド	1	2	3	4	5	
	バンド視線方向 (チルト角) (°)	20					
	中心波長 (μm)	0.343±0.005	0.443±0.005	0.674±0.005	0.869±0.005	1.63±0.0075	
	波長幅 (μm)	<0.02				<0.09	
	帯域外特性	<0.323 >0.363	<0.423 >0.463	<0.654 >0.694	<0.849 >0.889	<1.540 >1.720	
	規定分光放射輝度 (W/m ² /sr/μm)	45	79	46	30	7	
	最大分光放射輝度 (W/m ² /sr/μm)	209	530	400	250	58	
	バンド	6	7	8	9	10	
	バンド視線方向 (チルト角) (°)	-20					
後方視	中心波長 (μm)	0.380±0.005	0.550±0.005	0.674±0.005	0.869±0.005	1.63±0.0075	
	波長幅 (μm)	<0.02				<0.09	
	帯域外特性	<0.360 >0.400	<0.530 >0.570	<0.654 >0.694	<0.849 >0.889	<1.540 >1.720	
	規定分光放射輝度 (W/m ² /sr/μm)	48	65	46	30	7	
	最大分光放射輝度 (W/m ² /sr/μm)	300	500	400	250	58	

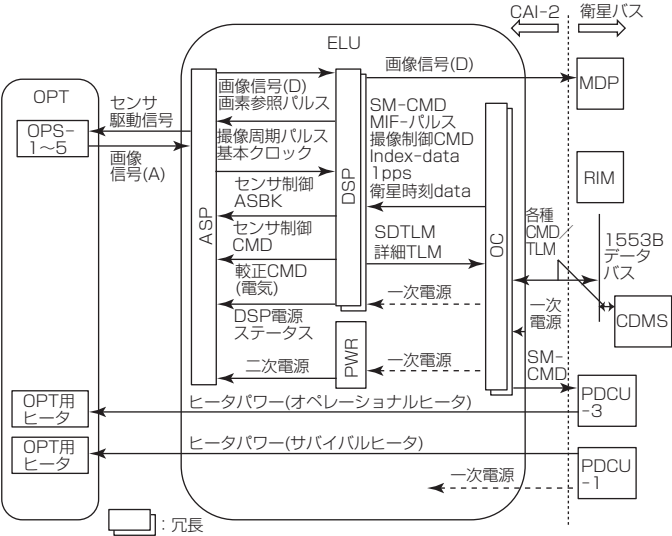


図 6. CAI-2ブロック図

3.3 CAI-2センサの性能見積り

CAI-2の主要性能である, S/N比の見積り結果を表 6 に示す。仕様値はS/N比が200以上であり, 要求仕様を満足している。

4. む す び

TANSO-FTS-2とTANSO-CAI-2の詳細設計が完了しており, PFM(ProtoFlight Model)製造フェーズに移行している。前号機(いぶき)及びCrIs開発で培われたヘリテージ技術を活用して, 確実な性能達成と短期間での開発を実現する。

表 6. CAI-2性能(S/N比)見積り

バンド	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S/N比	272	303	383	260	347	260	329	383	260	347

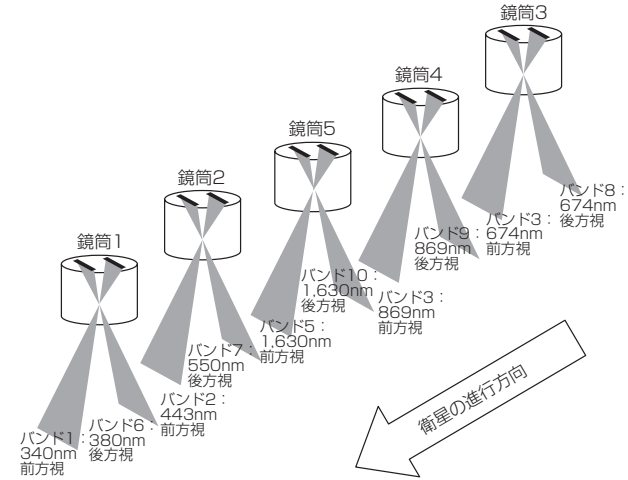


図 7. 観測バンド/観測方向と鏡筒構成

参 考 文 献

(1) Hamazaki, T., et al.: Sensor system for Green-house Gas Observing Satellite(GOSAT), Proc. Of SPIE, **5543**, 275~282 (2004)

(2) 中島正勝, ほか: いぶきの運用と搭載センサの軌道上性能, 電子情報通信学会技術研究報告, **110**, No.92, 121~122 (2010)

静止衛星標準バス“DS2000”の開発と今後の指針

関根功治*
舟田雅彦*
山田浩之**

Development and Guideline to Improve Standard Geostationary Satellite Bus "DS2000"

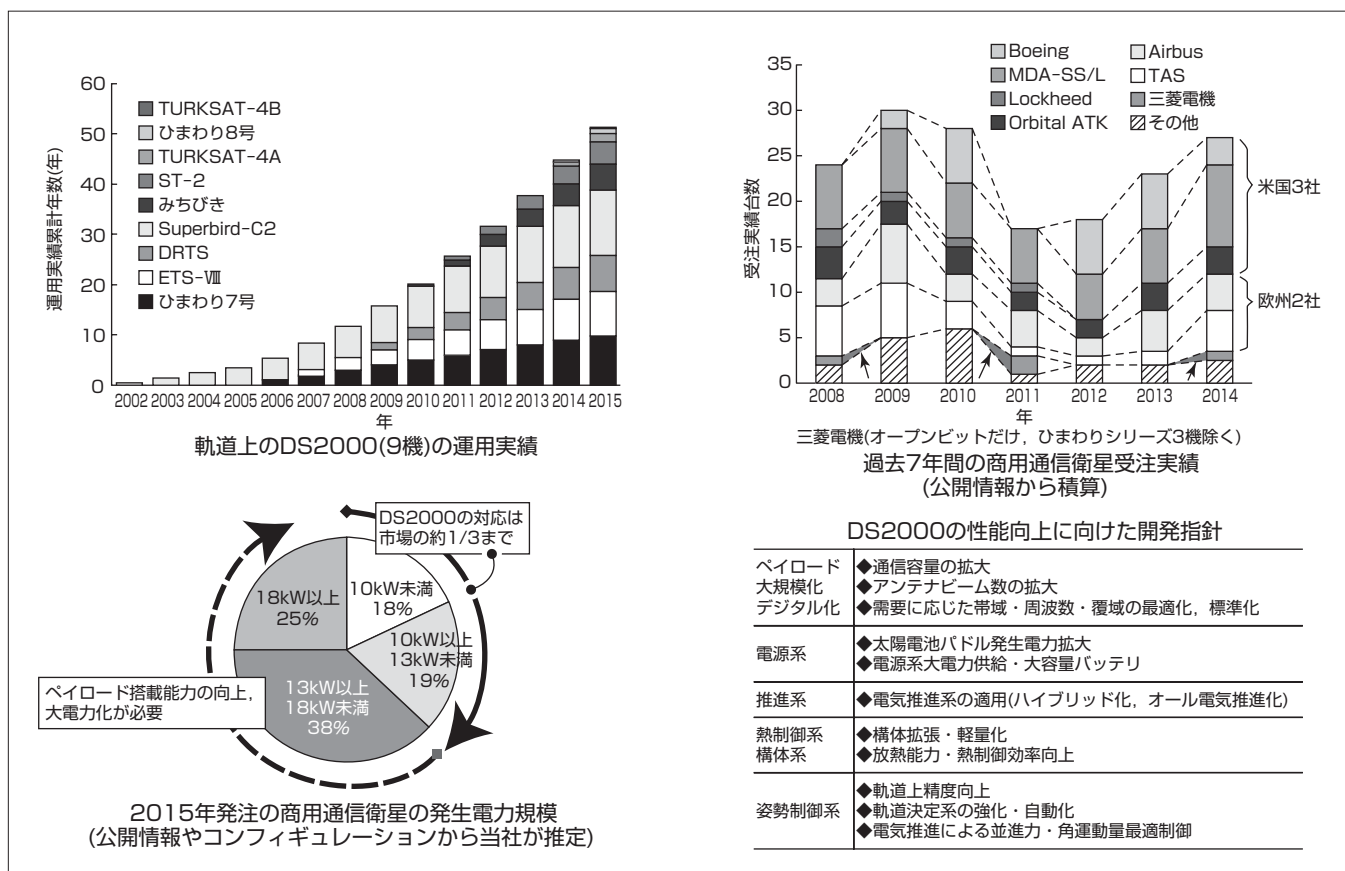
Koji Sekine, Masahiko Funada, Hiroyuki Yamada

要 旨

三菱電機は、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) のデータ中継技術衛星 (DRTS) 及び技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII) の開発実績をベースに、ミッション継続性やペイロード搭載性の向上、生産方式の標準化や工期短縮などの開発施策を行い、静止衛星標準バス“DS2000”に発展させた⁽¹⁾⁽²⁾。下の図に示すとおり、軌道上の9機の運用実績累積年数は50年以上であり、いずれも順調な運用を継続している。DS2000は、欧米各社の衛星バスと比較しても軌道上信頼性の観点で高い評価をされているが、一方、年間20～25機の新規発注が継続している世界通信衛星市場で受注機数5機 (運用中4機、製造中1機) であり、欧米大手衛

星企業との実績の差異、性能・価格・工期の実力差が大きい。特に性能面では、Kaバンドマルチビームを用いた HTS (High Throughput Satellites) によって帯域・中継器台数・アンテナ台数の要求が増大し、さらに、デバイスの進歩や周波数帯域の高度利用の観点からデジタル通信ペイロードが台頭する中で、発生電力面でも現在のDS2000での対応は市場の約1/3までの需要に限定されている。

これらに対して、ペイロード・衛星システムの性能向上に向けた開発を推進することで近年の通信衛星市場要求に対応し、欧米に比肩し得る衛星企業へ飛躍して行きたい。



DS2000の実績と今後の開発指針

DS2000は、通信・放送、気象観測、測位等の各種サービスに適応する標準プラットフォームに進化しており、軌道上の9機の運用実績累計年数は50年を越え、信頼性の観点で高い評価を得ている。一方、世界市場シェアはまだ僅かであり、近年の大規模ペイロードに対応可能な搭載容量の拡大、低コスト化・短工期の観点で製品力を強化して、事業拡大とともに衛星技術の革新を進めていく。



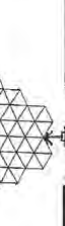



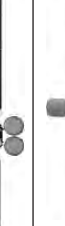





1. ま え が き

本稿では、DRTS/ETS-Ⅷから最近のDS2000までの各号機における継続的な開発内容を述べ、例として軌道上で運用されている商用通信衛星TURKSAT-4A, TURKSAT-4B, 及び2014年に受注したカタールの通信衛星Es'hail 2について述べる。また、競争力確保のために必要なペイロード要求・大電力化・電気推進化による打ち上げコスト削減・高精度化に関する性能向上に向けた開発指針について述べる。

2. DS2000の各号機での開発内容

DS2000は、JAXAのETS-Ⅷプログラムで認定を行った後、表1に示すとおり16機以上のプログラム又は継続の開発で性能向上・コスト削減の改良を重ねてきた。具体的には、構体/電源の軽量化、高効率太陽電池搭載、恒星センサの標準化、東西4枚の2m級展開アンテナ搭載等であり、通信放送だけではなく気象衛星⁽³⁾、静止高度測位衛星等にも対応できる自由度の高い衛星システムとペイロードをメニューとして提供してきた。次にDS2000の最新の通信衛

表1. 各プログラムでの性能向上のまとめ

衛星 コンフィ ギュレー ション													
衛星名称	こだま (DARTS)	ひまわり7号 (MTSAT-2)	きく8号 (ETS-VIII)	Superbird-C2	みちびき	ST-2	TURKSAT-4A TURKSAT-4B	ひまわり8号 ひまわり9号	準天頂2号機・ 3号機・4号機	Es'hail 2	今後の方向性		
ミッション 概要	通信	観測・通信	通信	通信	測位	通信・放送	通信・放送	観測	測位	通信・放送	通信・測位・ 観測等多くの 静止ミッション に対応。 特に、大規模 通信を安価な ロケットで 提供(軽量と 低コスト化)		
	衛星間通信	気象	MSS・SBAS	FSS	補完補強	FSS・BSS	FSS・BSS	気象	補完補強	FSS・BSS			
ミッション1	Ka/Sバンド による観測 データ・TTC 中継	気象観測・ 中継	Sバンド移動体通信	Kuバンド 通信	Lバンド測位 補完・補強	Kuバンド 通信・放送	Ku/Ka/Cバンド等 通信・放送	気象観測 (ダウンリンクKa) 気象DCP	L1, L2, L5, L6等、 測位補完・補強信号	Ku/Kaバンド等 通信・放送			
ミッション2		航空機移動体・ 測位補強	Lバンド/Sバンドによる 測位補強・補完機能		Ku時刻同期	Cバンド 通信・放送	KaバンドHTS (小規模マルチビーム)			KaバンドHTS (小規模)			
打ち上げロケット	H-IIA-2024	H-IIA-2024	H-IIA-204	Arian-V	H-IIA-202	Arian-V	Proton-Breeze-M	H-IIA-202	H-IIA-202/204	Falcon-9			
ドライ／ 打ち上げ質量	1.3トン／ 2.8トン	1.7トン／ 4.65トン	2.87トン／5.8トン	2トン／ 4.8トン	1.8トン／ 4.0トン	2.0トン／ 4.9トン	1.7トン／4.8トン (4A) 1.8トン／4.9トン (4B)	1.3トン／3.5トン	1.6～1.7トン／ 4.1～4.3トン	2.2トン／5.3トン			
発生電力EOL	2kW	3.7kW	8kW	8kW	6kW	12kW	8.6kW	22kW	6kW	13kW	～24kW級		
TTC	USB/Ka	USB/S/KU	USB	Ku	USB/C	C	Ku	Ku	C/Ku	Ku/Ka	C/X/Ku/Ka		
設計寿命	7年	10年	10年	15年	12年	15年	15年	15年	15年	15年	15年		
電源方式	50V非安定化	100V安定化バス、ETS-8電源					性能向上△1 100V安定化バスに対して次世代軽量化電源投入					～24kW級	
	性能向上の説明△1 小型軽量化電源を投入、PCU・PDCUを従来の60%に軽量化												
SAPセル	高効率Siセル	GaAsセル	高効率Siセル				性能向上△2 GaAsセル搭載標準化による大電力化					薄膜セル、 二次元展開	
	性能向上の説明△2 DJ⇒ATJ⇒ZTJ等のセル最新技術を取り入れ、海外大手と同等の性能・軽量化を実現												
バッテリー	ニッケル水素バッテリー					性能向上△3 リチウムイオンバッテリーの搭載標準化による軽量化・運用性向上						大電力・電気 推進対応	
	性能向上の説明△3 海外輸出を進め、DS2000もLi-BATで標準化。110AH, 190AH大容量化を推進												
データバス システム	CU-RIUデータ バス	1553B(SC⇒バス機器間) SC/RIM方式					性能向上△4 第一バス1553B(SCP⇒バス機器)及び第二バス SpW(SCP⇒ミッション計算機(測位・気象))					外部データバス、 I/O強化	
	性能向上の説明△4 バス機器はプロトコル含めて1553Bで標準化。ペイロード高度化に伴い、一部海外商用でも高速通信ニーズのあるペイロード計算機搭載が顕在化して、SCPのSpW(第二バス)で実現。一方通信系は1,000台規模以上に増加、最大2,000個のCMD/TLM配信はSCP⇒RIM⇒機器でスケラブルに対応。												
計算機 システム	・コールド スタンバイ	・コールドスタンバイ	・ヒータ・バッテリーソフトウェア制御・R4900統合化計算機(SC)					性能向上△5 ホットスタンバイ強化・ハンドオーバー強化 HR5000S・ヒータ・バッテリーソフトウェア制御					更なる ミッション 継続性強化
	性能向上の説明△5 従系モニタ、主従同時立上げと演算監視機能、時刻・軌道データの常時ハンドオーバー等ミッション継続性をひまわりから格段に強化。												
姿勢制御系	バイアス モーメント	・4-skew ゼロ/バイアス任意設定 ・10年寿命アクチュエータ			性能向上△6 ・4-skew ゼロ/バイアス任意設定 ・15年寿命アクチュエータ								電気推進の 自動化、 軌道決定機能 強化
	性能向上の説明△6 2015年対応の衛星バスに強化、ひまわりで低い擾乱(じょうらん)RWAを標準メニュー化。												
	ESA/IRU/FSS姿勢決定系				STT/IRU高 精度姿勢決定	ESA/IRU/ FSS姿勢決定系	性能向上△7 STT/IRU高精度姿勢決定系						電気推進・ Kaバンドに 対応した 高精度化、 安定度向上
	性能向上の説明△7 みちびき以降、静止軌道でのSTT標準化を推進。高精度化と運用継続性を実現。月干渉、太陽干渉回避や精度劣化はない。ひまわりはARS(レートセンサ)/ACC(加速度計)で広帯域指向決定系を地上で実現、画像をリアルタイムで補正して配信。												
化学推進系	統合型推進系	二液式推進系											オール電化、 Ispの向上、 打上コスト削減
電気推進系	アークジェット	20mNイオンエンジン系											
構体方式	ハーフシリンド	フルセントラルシリンド+Dualチャネルヒートパイプ実装ペイロードパネル											軽量化・ 構造簡略化に よるコスト削減
	小型構体	DS2000標準	DS2000標準	DS2000標準	DS2000標準	性能向上△8 アンテナ増強	DS2000標準	小型DS2000	DS2000標準	DS2000標準	DS2000標準		
		南北連絡HP/展開ラジエタ			性能向上の説明△8 東西4枚の展開アンテナ開発、軽量メンブレンアンテナ							東西HPP	

星であるTURKSAT-4A, TURKSAT-4B, Es'hail 2について述べる。

3. TURKSAT-4A, 4Bの概要

TURKSAT-4A(図1)とTURKSAT-4B(図2)は、当社がトルコの国営衛星通信会社“Turksat Satellite Communication, Cable TV and Operation AS”から受注した通信衛星であり、DS2000の衛星としては7機目、8機目である。既に静止軌道上で稼働しているTURKSAT-4Aはカザフスタンのバイコヌール宇宙基地から2014年2月に、TURKSAT-4Bも同基地から2015年10月にProtonロケットによって打ち上げられ、両衛星とも軌道上試験を経て無事客先へ軌道上納入した。

両衛星の主な諸元を表2に示す。現在、TURKSAT-4AとTURKSAT-4Bは、静止軌道上からトルコを中心とした各エリアに表3⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾に示す通信・放送サービスを提供している。

4. Es'hail 2の受注と開発

Es'hail 2(図3)は、当社が2014年にカタールの国営衛

星通信事業者であるEs'hailSat(エスヘイルサット)社から受注した通信衛星であり、DS2000としては16機目である。日本の衛星メーカーとしてアラブ諸国から初めて受注した通信衛星であり、2016年末にSpace-X社のFalcon-9ロケットで打ち上げられ、静止軌道上東経26度に配置される予定である。

この衛星の打ち上げ質量は約5,300kg、太陽電池パドルの寿命末期での発生電力は約13kWであり、Kuバンド、Kaバンドを中心に14台のアンテナを地球指向面及び東西面に搭載し、中東及び北アフリカ地域へ通信・放送サービスを提供する。表1に示すように、この衛星は当社が納入してきたDS2000の中で最大級の能力を持つものとなる。

表2. TURKSAT-4A/4Bの諸元

	TURKSAT-4A	TURKSAT-4B
衛星バス	DS2000	
パドル発生電力(EOL)(kW)	8.6	8.6
ドライ質量(トン)	1.7	1.8
打ち上げ質量(トン)	4.8	4.9
打ち上げ日	2014年2月15日	2015年10月17日
静止軌道位置	東経42度	東経50度
軌道上寿命	15年以上	

表3. TURKSAT-4A/4B通信系

衛星	帯域	サービスエリア	サービス内容	中継器数
TURKSAT-4A	Ku帯	トルコ 中東 アジア 北アフリカ 欧州	衛星放送	36
	Ku帯/ Ka帯	アフリカ トルコ 欧州	衛星通信	
TURKSAT-4B	Ku帯	トルコ 中東 アジア 北アフリカ 欧州	衛星通信	43
	Ka帯	トルコ 中東 欧州 アジア	マルチスポット ビーム通信	
	C帯	アフリカ トルコ	衛星通信	



図1. TURKSAT-4A



図2. TURKSAT-4B(奥はTURKSAT-4A)



図3. Es'hail 2

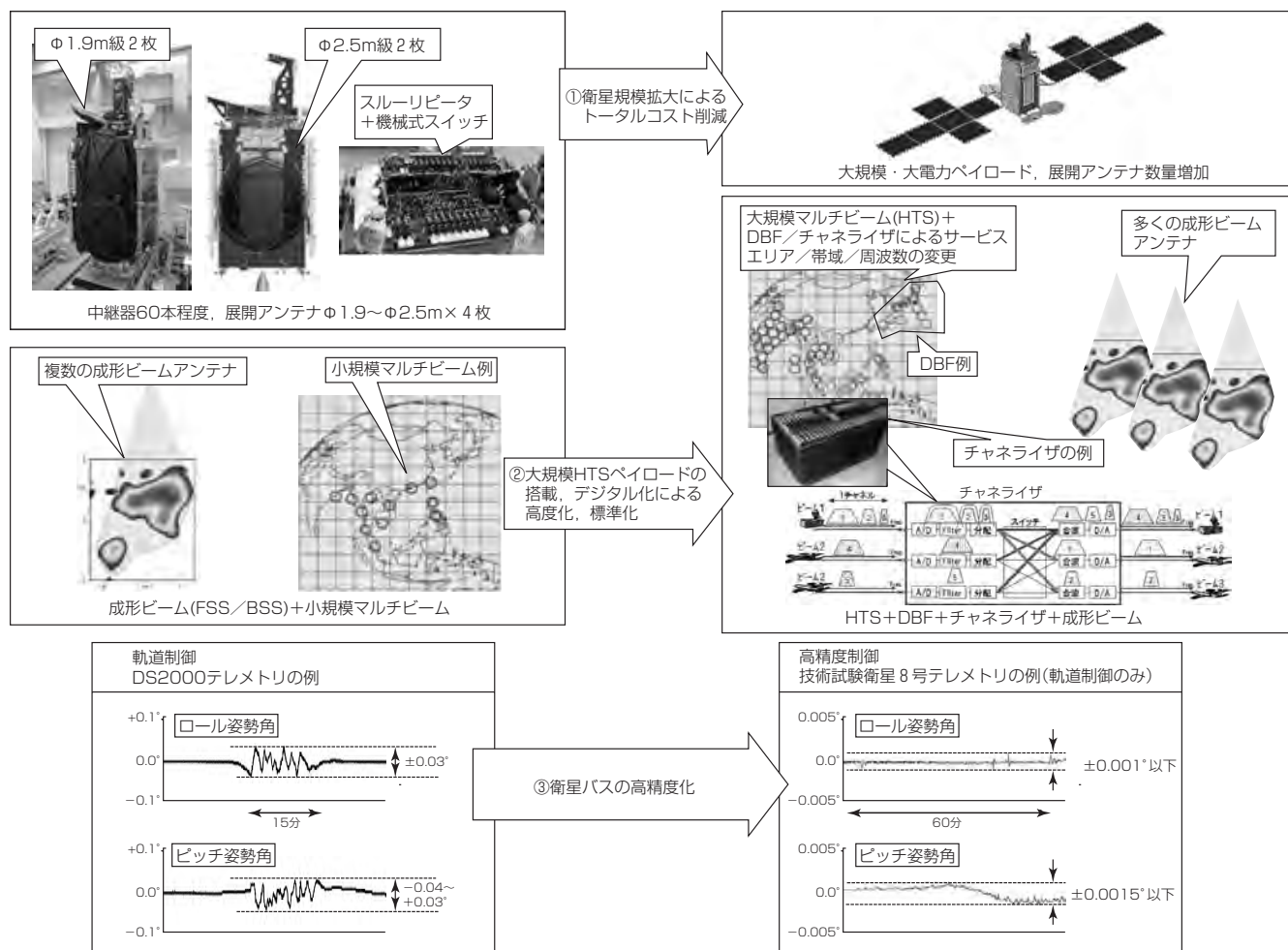


図4. DS2000の性能向上に向けた開発指針

5. 性能向上に向けた開発指針

通信衛星の世界市場では、米国衛星企業のコスト削減戦略や搭載能力向上戦略(MDA-SS/L社, ATK-Orbital社), 打ち上げコスト・ランニングコストを含めたトータルコスト削減(Boeing社)が新しい価格性能競争をリードしている。それに触発された形で、欧州はESA(European Space Agency), 通信オペレータ、企業が協力しつつ, ARTES(Advanced Research in Telecommunications Systems)プログラムや商用衛星プログラムの中でAirbus社・TAS社・OHB社等が新規バス投入競争の終盤を迎えている。背景には、KaバンドのHTSを単独又は既存のKu/Cバンドサービスに相乗りする形で通信サービス単価削減と新規Kaバンド需要の取り込みを計画する、衛星オペレータの地上波との競争圧力も推察される。このような状況の中で、当社も図4に示すように①衛星規模拡大によるトータルコスト削減、②大規模HTSペイロードの搭載、デジタル化による高度化、標準化、③衛星バスの高精度化の指針に沿って、性能・コスト・工期の国際的競争力の向上を図っていく。

6. む す び

DS2000の各号機の性能向上開発内容について述べ、最

近の通信衛星3機について述べた。また、国際的な競争が更に厳しくなる静止通信衛星市場に対応するために、欧米企業の更なる進化やKaバンドHTSの台頭を例にDS2000の性能向上に向けた開発指針を示した。

参 考 文 献

- (1) 中村太一, ほか: 宇宙利用の動向と今後の衛星技術, 三菱電機技報, **88**, No.2, 100～104 (2014)
- (2) 関根功治, ほか: 宇宙利用の技術動向と事業展開—世界の衛星リーディングカンパニーを目指して—, 三菱電機技報, **88**, No.9, 496～502 (2011)
- (3) 高原 修, ほか: 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, 三菱電機技報, **88**, No.2, 119～122 (2014)
- (4) <https://www.turksat.com.tr/sites/default/files/uydu/turksat-satellite-catalog-en.pdf>
- (5) https://www.turksat.com.tr/sites/default/files/uydu/turksat_4a_uydu_ingilizce.pdf
- (6) https://www.turksat.com.tr/sites/default/files/uydu/turksat_4b_uydu_ingilizce.pdf

衛星ミッションサクセス“BMS100.00%”活動による衛星の品質向上と連続打ち上げ成功

森 康* 金井典子**
 中原雅一** 新田道英**
 安田真之**

Satellite Quality Improvements and Consecutive Successes with Support of Mission Success Promotion Activities "BMS100.00%"

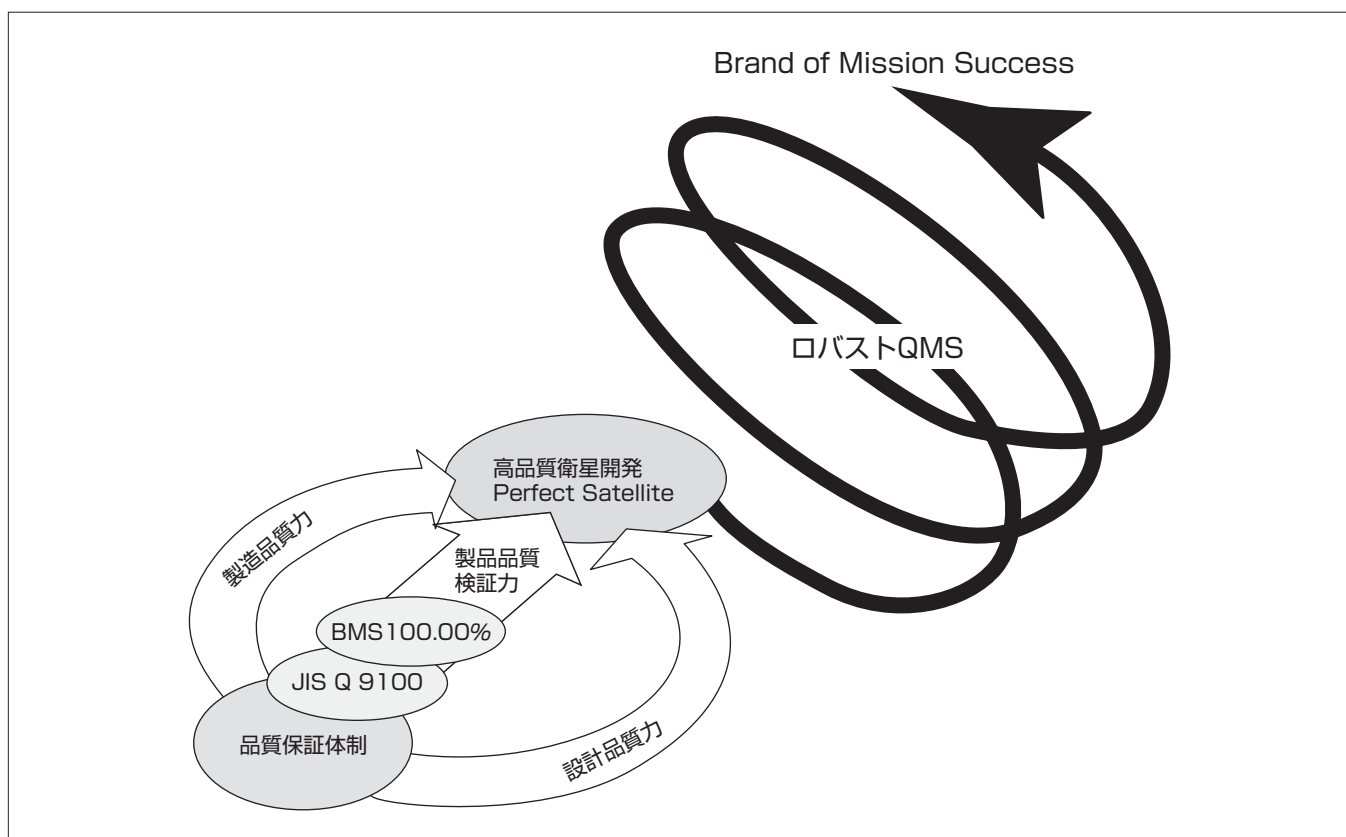
Yasushi Mori, Masaichi Nakahara, Masayuki Yasuda, Noriko Kanai, Michihide Nitta

要 旨

三菱電機は、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からなる衛星ミッションサクセス活動(“BMS100.00%”推進活動)を展開してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。その結果、2002年9月から2015年10月にわたり衛星34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。

当社の衛星事業を担当する鎌倉製作所では、高品質という企業イメージを確立して維持するために、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・継続してきた。また、組織体制を見直して、

業務改善、ピアレビュー充実やより早い段階での第三者の有識者によるレビュー機会の増加を図ることで、品質・信頼性の作り込み強化を推進している。さらに、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)を始めとする国内外の関係機関から得られる品質情報や受注プロジェクトでの不具合・課題を“Lessons Learned”等として他プロジェクトへ水平展開することで、より効果的な不具合予防活動の展開や課題の早期解決への組織的取組みの強化を図り、ロバストな品質管理システム(ロバストQMS(Quality Management System))を構築する活動を継続している。



衛星ミッションサクセス活動の継続的スパイラルアップによる“BMS100.00%”推進活動

“BMS100.00%”推進活動を継続するに際して、国内外の関係機関から得られる品質情報や受注プロジェクトでの不具合や課題を“Lessons Learned”等として他プロジェクトへ水平展開することによる、より効果的な不具合予防活動の展開やロバストな品質管理システム(ロバストQMS)構築のための継続的活動状況を示す。

1. ま え が き

当社は、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推進センターを設立し、第三者の有識者(以下“有識者”という。)による各種審査及び不具合予防活動からなる衛星ミッションサクセス活動(“BMS 100.00%”推進活動)を展開してきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。その結果、2002年9月から2015年10月にわたって衛星34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[○]、Es'hail 2[○]、その他プロジェクトでの受注を重ね、当社が独自開発した静止衛星の標準衛星バスであるDS2000をベースにした国内外の衛星製作を進めるとともに、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)。

本稿では、ミッションサクセス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。

2. ミッションサクセス活動

2.1 高品質衛星開発の取組み

当社の鎌倉製作所では、顧客満足を得るためのより高い品質向上目標として品質レベル100.00%を目指し、要旨の図に示すように製品品質検証力の柱として衛星のミッションサクセス活動(“BMS100.00%”推進活動)を継続している。

この活動では、有識者が、いわゆる“独立した確認と検証”といった活動に従事して、各種審査及び不具合予防活動を展開する。また、各プロジェクトで“開発段階での確実な実施の確認”“衛星ミッションの喪失に至らせない確認”“不具合予防活動”の観点から、BMS推進センターを中心に宇宙関連部門が行う全ての活動を監視し、品質に関する問題が生じると警告、追跡調査に取りかかる。この活動は、鎌倉製作所の所長室に週一回報告される。主なミッションサクセス活動を図1に示す⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

2.2 商用衛星での活動事例

DS2000バスをベースに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 ミッションサクセスレビュー

製品の難易度や過去の経験から抽出された衛星の性能やミッションの成功に大きな影響を与えかねない部分に対しては、有識者、電気設計技術者、機械設計技術者によるサブシステム、システムの各階層における現品の出来栄を確認する自主的チェックを実施・継続している。特に、単一の故障点に関連する場合や定量的な管理が難しいケー

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態については、設計者の意図や有識者の指摘を各関連の設計者、現場作業者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ている。また、これらを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たり、ミッションと衛星システム間での技術者の相互理解増進に役立てたりしている。

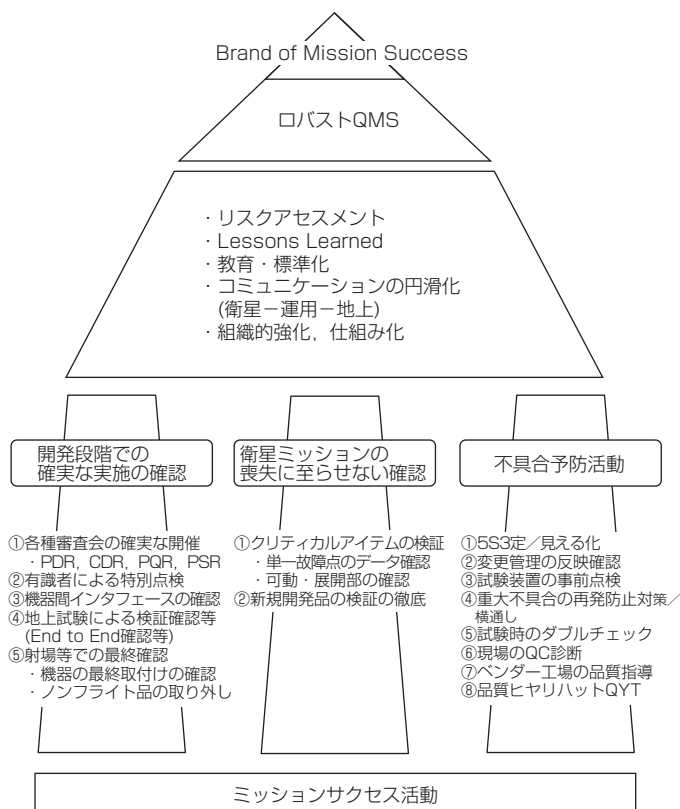
2.2.2 衛星運用準備確認会

有識者を交えた第三者検証としては、運用準備の状況確認を行うフェーズ移行前確認会を実施している。

過去のプロジェクトを含めて取り組んできたこの確認会は、その有効性から近年では関連部門の本来業務の1つとして取り込まれ、運用準備委員会(Orbit Raising and Operation Control Board: OROCB)の場で進められている。追跡管制チーム発足以降、複数回のフェーズ移行前確認会が開催され、有識者は衛星のインタフェース、地上設備のインタフェース、オフノミナルフロー、等を確認している。

2.3 更なるミッションサクセス活動の展開

衛星システムで高い信頼性を確保していても、射場への輸送や射場での作業でトラブルが発生したとした場合、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得ない。また、標準化が進んでいる世界の商用衛



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. 主なミッションサクセス活動

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。これらの不具合やトラブルの中には、設計段階から注目して対処すべき品質・信頼性上の課題やプロジェクト遂行上のリスク管理として対処すべき事柄が存在している。

当社では、先に述べた従来実施・継続されているミッションサクセス活動に加えて、新たな施策として次に述べる取組みを展開している。

2.3.1 リスク低減活動支援の取組み

2014年度は衛星打ち上げが多く予定されていたため、衛星プロジェクト部門、技術部門、品質管理部門で実施している試験検証状況、輸送準備状況、軌道上初期チェックアウト体制・要領書準備状況等に対して、有識者による点検や状況確認を実施する追加の点検活動(Perfect Satellite活動)を展開した。

プロジェクトのリスク管理は、プロジェクトごとのリスク管理ボード(Risk Management Board：RMB)でリスクアセスメントに基づき抽出して管理されているが、この活動に加えて、有識者の経験や過去の課題から抽出された観点リストを作成・展開し、プロジェクトごとの状況確認をフォローすることでより抜けのないリスク管理活動の展開を支援した。対応した各プロジェクトからは、項目ごとにポイントを絞ってリスク低減活動を確認、対策反映でき、この活動は有効であったとの評価を受けている。

2.3.2 不具合横通し会議の取組み

各衛星の製造中、試験中に発生した不具合の情報は、QIM(Quality Information Management)システムに登録されて管理されている。品質保証担当部門では、QIMシステムに登録される不具合情報を全件再確認する不具合横通し会議を毎週実施しており、そこに有識者も参画して横通しする活動を継続している。この活動を通じて抽出された不具合に対して、発生頻度や傾向に基づく包括的な対策の提案として、設計部門が検討している対策処置内容に追加検討を要請したり、品質管理部門や品質保証部門の担当者へアドバイスが出されたり、有識者会議へ上申して検討支援を求めることが推奨されたりする。

また、このような確認活動を通じて関係者間の情報共有の機会を増やしてコミュニケーションの活性化につなげるとともに、不具合が発生しているプロジェクト以外への水平展開の要否や設計標準等へのフィードバックの要否に関する気付きを得ることに役立っている。

2.3.3 設計品質会議の取組み

軌道上の衛星運用に関連して発生した事象の情報や製造・試験中の各衛星プロジェクトの進捗状況について、JAXAを始めとする国内外の関係機関から得られる品質情報や受注プロジェクトの進捗情報をベースに、所長室、技術部門、品質保証部門が課題を協議する設計品質会議の取

組みを開始した。図2に示すような、軌道上の事象の情報展開や各プロジェクトの課題検討の有識者会議は従来も開催していたが、そのような目的の会議を定期的に開催することで、コミュニケーションの活性化を図るとともに仕組みとしても整備して活動を強化することを目的としている。

この活動を通じて抽出された共有すべき過去のトラブル情報は、リスト化を図って展開するとともに、難易度の高い課題は有識者への検討依頼による早期解決に向けた支援強化や他プロジェクトへの水平展開活動を促すトリガーにもなっている。また、この活動の水平展開の一環として、課題として抽出されたテーマに沿った注意喚起の情報発信の場を月に1度設定し、宇宙関連部門のプロジェクト部門及び技術部門の全関係者を対象にした全体会議を開催することで情報発信、コミュニケーション活性化に取り組んでいる。

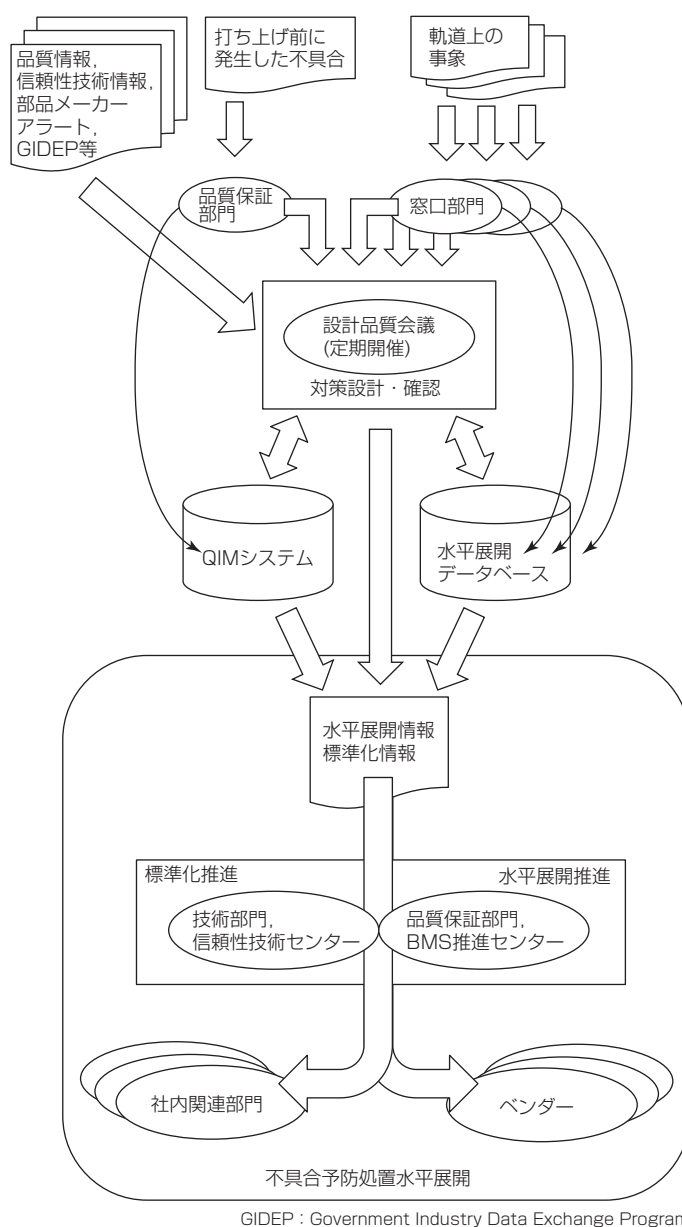


図2. 設計品質会議による業務フロー強化

2.3.4 設計フロントローディング会議の取組み

設計結果や試作モデル、エンジニアリングモデル等の製造・試験の結果は、PDR、CDR等の各設計審査会で審査を実施している。不具合情報から得られる過去のトラブル等への対策反映や開発要素へのリスク対策の確認も同様に審査会で実施されているが、リスク低減の観点からは、設計作業のより早い段階から関係者間で課題抽出を進めて協議・対応を図ることが望ましい。また、このような議論に社内研究所の専門家や有識者等が参画して検討を充実させることは非常に重要である。

このため、検討段階で設計部門が開催する内部の打合せに専門家や有識者が参加する設計フロントローディング会議の取組みがなされている。そのような場で、設計案のトレードオフや設計根拠の充実化を図る作業に、先に述べたミッションサクセス活動の成果をより活用できるように連携を深めていくことがポイントである。

2.3.5 商用衛星向け製品保証要求のISO提案

ミッションサクセス活動に対する気付きを得るための試みの1つとして、2011年からISO(International Organization for Standardization)の場で“商用衛星向け製品保証要求”の規格提案活動を開始している。

宇宙システムに対する既存のISO規格の製品保証要求は、有人システム、無人システム、打ち上げ機を包含した広範な適用範囲で品質保証、ディペンダビリティ、安全、部品、材料・プロセス等の各管理を個別のISO規格を参照する形で規定しており、テーラリングによる調整が必要となる。そこで、今後新たに衛星を持つ新興国等のオペレータが規格参照の際の利便性向上のため、これらの管理項目から商用衛星の設計、製造、試験に必要な“Best Practice”的製品保証項目を集約した“商用衛星向け製品保証要求”を提案し、現在、2016年1月中のCD登録(ISO規格制定手順6段階中の3段階目)の調整を参加各国と鋭意実施中である。

3. ミッションサクセス活動の展望

過去のミッションサクセス活動で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⁽³⁾。そのために我々が対応すべき課題としては、①知見の活用促進、②教育・訓練へのフィードバック、③標準化活動・変更管理へのフィードバックがある。

今回、①、③の課題に対応する活動事例について述べた。この各活動は、情報の水平展開やコミュニケーション活性

化の中で知見の活用を行い、標準化活動・変更管理へのフィードバックへとつながることを狙って推進している。

また、課題②の教育・訓練へのフィードバックは、今後取組みを加速させる必要のある課題と認識している。日々蓄積されるプロジェクトの課題に関わる情報は、我々の大切な資産である。この大切な資産を無駄なく有効活用するために、新たに実施している各活動から得られる情報と融合させて、関係者が受ける教育資料や根拠資料に反映することで、情報の受け手が直面している課題をより正確に把握できるようにすることを目指している。その際、関係者の世代構成が変化して、有識者・経験者と若手の技術者・作業員での認識・意識やコミュニケーション方法に差異があることに配慮して、木目細かい工夫を加えることが必要である。

4. む す び

当技報2014年2月号⁽³⁾で報告した2002年9月から2013年8月の開発以降2013年9月から2015年10月までの25か月間に7機の衛星、宇宙機の軌道配置に成功するという成果を挙げることができた。このような頻度での打ち上げに対応できるのも、関係者の日頃からの不斷の努力と地道な業務遂行、そして、BMS100.00%”推進活動の成果によるところが大きいと考える。今後、更なる高頻度での打ち上げに対応する必要もあり、ミッションサクセス活動の更なる進化は待ったなしの状況にある。

ミッションサクセス活動を取り巻く国内外の事業環境は激しい変化や競争にさらされており、平坦(へいたん)な道程ではない。様々な影響因子と背後要因を見極めながら調和を図るためには、従来の枠組みを超えて異業種や異なる専門分野から得られる有用な知見なども貪欲に吸収して、新たな改善や仕組みの創造を続ける攻めの姿勢が必要である。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、衛星ミッションサクセス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) 佐々木俊昌，ほか：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，三菱電機技報，**88**，No.2，139～142（2014）

衛星及び衛星利用での標準化戦略

中村太一* 吉岡省二***
廣川 類**
草野康晴*

Strategy for Standardization of Satellites and Satellite Application

Taichi Nakamura, Rui Hirokawa, Yasuharu Kusano, Shoji Yoshioka

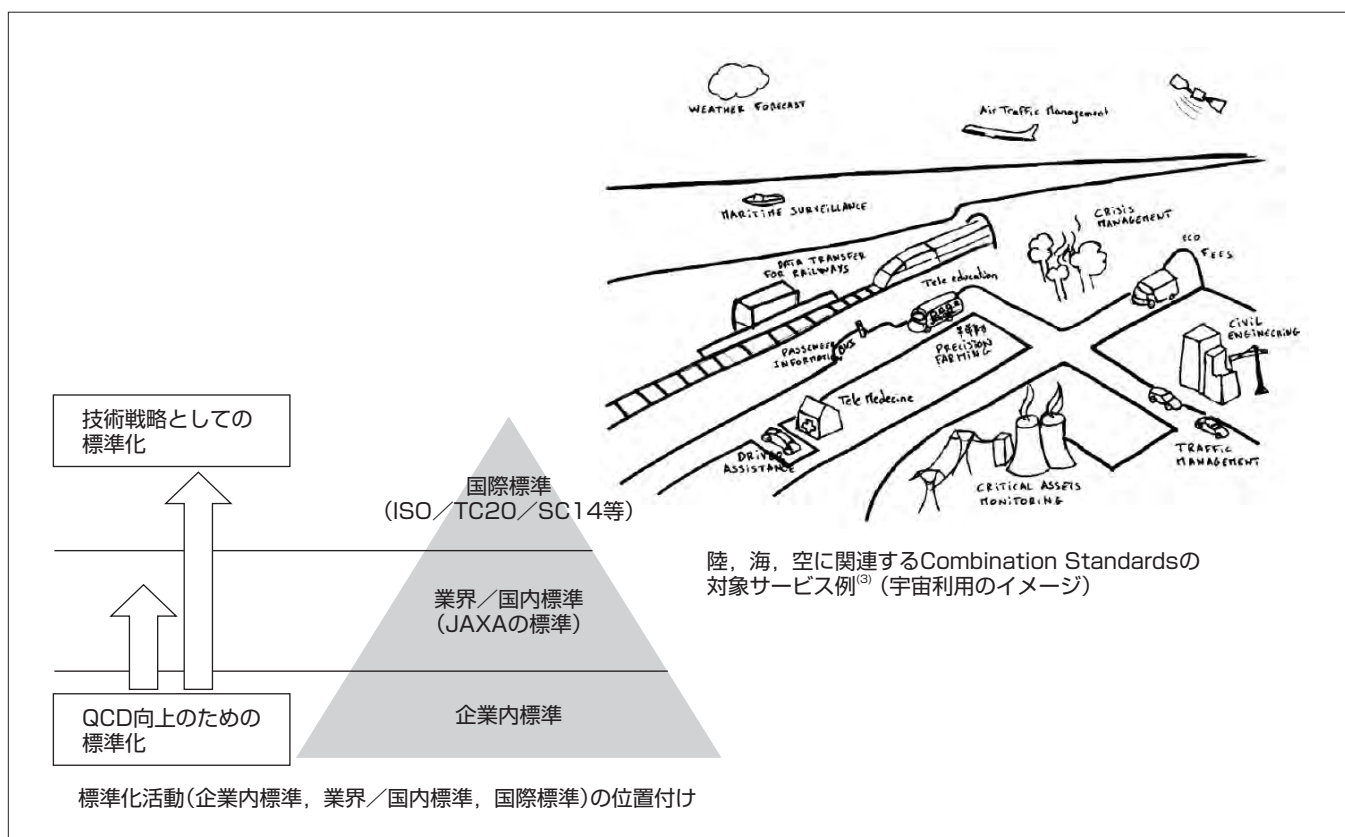
要 旨

一般に、標準化活動は、自社製品のQCD(Quality Cost Delivery)向上のための企業内活動から始まる。これを非公開のまま市場シェアを獲得するデファクト標準に対して、技術仕様の一部又はインタフェースを開示して国内外の業界団体や公的団体とともに仲間作りを進めるのがデジュール標準である。このような標準化は、製品利便性の向上による市場の拡大、及びこれに向けた協調的かつ主体的貢献による自社プレゼンス向上という意味で、企業の重要な技術戦略の1つである⁽¹⁾。

我が国の衛星分野では、企業内標準に加えて、デジュール標準として業界／国内標準に相当する国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)の標準、さらに国際標準化機構(ISO)の体系が存在する。ISOには、航空宇宙技術委

員会(TC20)の下に宇宙データ・情報転送システム分科会(SC13)と宇宙システム分科会(SC14)があり⁽²⁾、SC14では従来の宇宙技術の標準化に加えて衛星・ロケット市場拡大の観点から宇宙利用の標準化についても取り組んでいる⁽³⁾。

三菱電機では、これらの標準化に対して多面的に取り組んでいる。衛星技術の標準化活動では、当社標準商用衛星バス“DS2000”の競争力強化のための企業内標準化活動を進める一方で、デジュールであるJAXAの宇宙機設計標準ワーキンググループ活動への参画、及びISOの衛星技術の標準化提案を推進している。さらに、衛星利用の促進に向けた準天頂衛星利用及び観測衛星を利用した標準化提案活動も行っている。



標準化活動(企業内標準, 業界／国内標準, 国際標準)の位置付け

我が国衛星分野の標準体系は、企業内標準、業界／国内標準(JAXA標準)、国際標準(ISO)の階層から成る。宇宙を利用したサービスは陸、海、空の各分野に及び。宇宙利用の標準化を進めるには、宇宙技術と各分野固有事項の相互理解が不可欠である。

1. ま え が き

当社は、衛星技術の標準化活動として、標準商用衛星バスDS2000のQCD向上のための社内標準化活動、国産衛星の品質向上に向けたJAXAの標準化活動への参画、当社主力製品の1つであるリチウムイオン電池に関するISOへの標準化提案等の活動を行っている。ISOに対しては、商用衛星顧客の利便性向上のための製品保証要求提案も行っている。

また、宇宙利用促進に向けた標準化として、準天頂衛星によるcm級測位技術及びその応用技術についての標準化活動や、観測衛星利用の利便性向上のための校正要求の標準化提案等を行っている。

本稿では、これらの活動事例について述べる。

2. 衛星開発／生産における標準化

2.1 社内におけるDS2000標準化活動

標準商用衛星バスDS2000は、図1に示すように技術試験衛星“きく8号”(ETS-VIII)設計基準書を出発点に標準化を進めた結果、運輸多目的衛星新2号“ひまわり7号”(MTSAT-2)や、商用通信衛星Superbird-C2(スカパーJSAT社)、ST-2(シンガポールSingTel社/台湾中華電信社)等への採用に至り、その後、開発、軌道上実績を積み重ねてきた。また、JAXA指導の下、内部搭載機器の小型・軽量化を行った成果を設計基準書の改定に反映させ、ひまわり8号以降の機種でこれを全面適用した。さらに、これまでの開発や軌道上実績から得られた知見等を標準設計にフィードバックすることで、QCDの改善サイクルに反映してきた。

国際商用衛星市場での顧客要求、海外勢の技術革新は目覚ましく、ここで生き残るためには更なる国際競争力の強化が不可欠である。現在、当社は更なる低コスト化と通信ミッションの高機能化に向けた新たな標準商用衛星バスDS2000の構築のために、次の開発を実施している。

- (1) 質量削減による打ち上げコスト抑制のための電気推進系の搭載技術開発
- (2) 高機能通信ミッションを搭載可能な大電力バスの開発
- (3) 搭載機器の更なる低コスト化開発

これらの開発は、いずれもこれまでの延長線上にはない新たな技術革新が必要であり、ETS-VIII開発と同様に、我が国の総力を挙げての取組みが期待されている。

なお、技術開発と並行して作業プロセス(設計・調達・製造・試験・運用等)の標準化も重要であり、最新の製造技術等も取り込みつつ引き続き取り組んでいく。

2.2 JAXAの標準化活動への貢献

かねてから、JAXAでは衛星・ロケット等の設計品質向上に向けた宇宙機設計標準ワーキンググループ(WG)活動を実施しており、衛星・ロケットメーカー各社とともに当社も参画している。JAXAでは、WGで議論された最新の技術動向に基づいて各種標準類⁽⁴⁾を整備するとともに、企業側では開発中の衛星の設計基準書案等にこの考え方を反映して設計品質の向上に役立てている。

今後、当社は商用衛星等から得られた知見の反映、及びISOや海外市場の動向も見据えた国内標準の発展に向けて、引き続き貢献していく所存である。

2.3 商用衛星向け製品保証要求のISO提案

宇宙システムに対する既存のISO規格の製品保証要求は、有人と無人の両システムを包含した適用範囲で、品質保証、ディペンダビリティ、安全、部品、材料・プロセス等の各管理を個別のISO規格を参照する形で規定されており、かつ、テーラリングによる調整が必要である。

今後新たに衛星を持っている新興国等のオペレータに対する利便性を向上させるため、当社は2011年からISOの会合で、先の管理項目から商用衛星に必要な部分を集約した“商用衛星向け製品保証要求”の制定を提案している。現在、ISO規格制定手順のちょうど半ばに当たる委員会原稿登録の調整(WD20188)を各国との間で鋭意実施中である。

2.4 ISOへのリチウムイオン電池標準化提案

宇宙用リチウムイオン電池(Lithium Ion Battery: LIB)標準化の目的は、国際的商用ルールに則(のっと)り、宇宙機器開発の成果を盛り込んだLIBを普及拡大させることである。2010年の活動開始当初、各宇宙機関にはLIB利用に関する厳格なガイドラインが存在した⁽⁵⁾。また、自動車やスマートグリッド向け民生大型LIBの規格発行目前であったため、各宇宙機関との調整や他産業との連携活動を余儀なくされたが、結果として市場規模の小さい宇宙用LIBの認知度向上に寄与した。

きく8号(ETS-VIII)をベースに標準商用衛星バスDS2000設計基準書策定					ひまわり8号以降も標準商用衛星バスDS2000設計基準書をベースに改定・改良				
	きく8号(ETS-VIII)	ひまわり7号(MTSAT-2)	Superbird-C2	みちびき	ST-2	TURKSAT-4A/4B	ひまわり8、9号	Es'hail 2	準天頂2、3、4
設計寿命	10年	10年	15年	12年	15年	15年	15年	15年	15年
運用開始	2006年～	2006年～	2008年～	2010年～	2011年～	2014年～2015年予定	2014年～2016年予定	2016年予定	2017年予定
ミッション	S-移動体測位	気象観測移動体・測位	Ku通信放送	測位Ku時刻同期	Ku通信放送C通信放送	Ku通信放送Ka/C通信	気象観測気象DCP	Ku通信放送Ka通信	測位
ロケット	H-IIA-204	H-IIA-204	Ariane-V	H-IIA-202	Ariane-V	Proton	H-IIA-202	Falcon-9	H-IIA
質量(ドライ/打ち上げ)	2.87/5.8	1.7/4.6	2.0/4.8	1.8/4.0	2.0/4.9	1.7/4.8(4A) 1.8/4.9(4B)	1.3/3.5	2.2/5.3	1.6/4.1
発生電力(kW)	8	3.7	8	6	12	8.6	2.2	13	6
標準商用衛星バスDS2000	◇NASDA設計基準(NASDA-STD)時代 ⇒ETS-V設計基準書として継承 ◇ひまわり7号や各商用衛星で適用 (長寿命化、軽量化、実装性向上等)					◇宇宙機設計標準(JERG-2)時代 ⇒2009年からの静止開発プログラムでバス機器を刷新し、設計基準を改定 ◇TURKSATで一部適用、ひまわり8号で全面適用			

図1. DS2000と設計基準書との関係

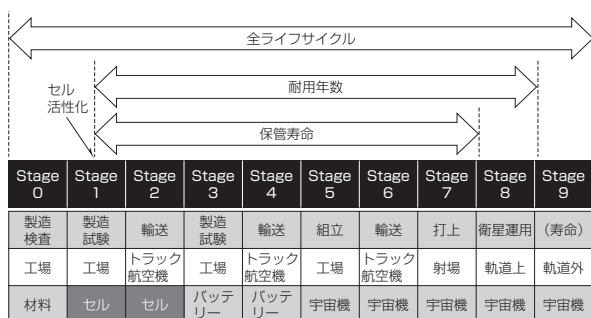


図2. 宇宙用LIBの全ライフサイクル

ISOに提案中の標準化規格(DIS17546)について述べる。LIBは単位質量当たりの蓄電可能エネルギーが他の電池より大きく、衛星軽量化に有利である。一方、誤使用での破裂・発火の危険があるため、専門的知識と経験が必要なデバイスである。宇宙用LIBの標準化規格案は、安全性だけではなく、設計に必要な項目を次の観点から分かりやすく述べたものである。

- (1) 製造から軌道上運用まで網羅したライフサイクル
- (2) 安全・性能・取扱い(運搬/輸送)の統合化を重視
- (3) 宇宙機器固有の設計・検証

この規格は、宇宙機システムの環境温度、振動、衝撃、充放電サイクルパターンなどの設計パラメータを示し、製造から軌道上運用までの全ライフサイクルで(図2)、安全・性能・取扱いの観点から設計・検証方法について言及している。

また、LIBは特性の異なる種類が多数存在するが、この標準は部材仕様の限定や特定LIBの認証規格を本意としない。条件を満たせば、他産業向けLIBの宇宙用への展開を許容する。

この規格の制定に向けては、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)及び経済産業省の支援(宇宙用リチウムイオン電池に関する国際標準化事業)の下、日本航空宇宙工業会に国内LIB標準化委員会が組織され、規格案の策定・検討を行ってきた。ISOでは当社が日本の立場でプロジェクトリーダーを務め、宇宙用LIBのメーカーがあるフランス、米国をサブリーダーとして活動を展開してきた。本稿執筆段階では最終の各国投票フェーズにあり、2016年初めに標準を発行予定である。

3. 衛星利用における標準化

3.1 cm級測位利用に向けた国際標準化活動

2018年から4機の衛星による実用サービスが開始される準天頂衛星システムでは、オープンサービスとして世界初^(注1)の衛星配信でのcm級測位補強サービスが提供される。このサービスは、従来のGPS(Global Positioning System)カーナビゲーション等で数mであった精度を6cm(水平)へと飛躍的に高めるものであり、自動運転、IT(Information Technology)農業、IT施工等の様々な用途への応用が期待されている(図3)。



図3. 準天頂衛星システムの利用・活用例

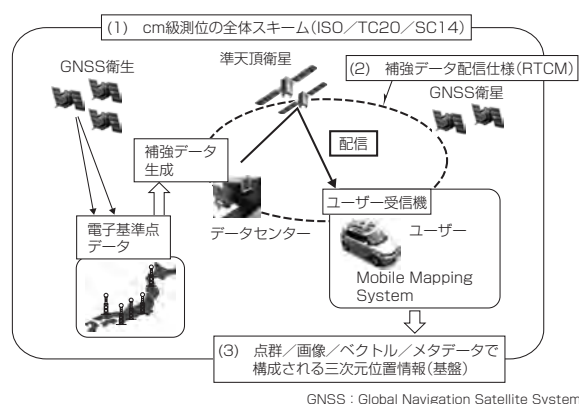


図4. 衛星測位システム関連標準化と適用範囲

このサービスでは、全国に配置された600点の電子基準点で受信した衛星測位信号を用いて、衛星軌道・クロック誤差、電離層遅延等の衛星信号に含まれる距離誤差成分をリアルタイムに推定して準天頂衛星から補正信号として放送し、ユーザー受信機で補正した上で測位計算を行うことで極めて高い測位精度を実現する。このサービスは、日本全国をサービス範囲とする高精度測位インフラの中核を成し、同種のサービスのアジア・オセアニア地域への展開も期待される。その中で、新規のサービスであることから高精度測位サービスの要件定義が必要となり、また、自動運転等への活用を図るために全国レベルの高精度三次元地図基盤等の利用インフラの整備が必要である。

新規サービスを普及させるために、海外メーカーを含めた測位端末製品化の促進、アプリケーション市場創出が必要であり、国際標準化活動を行っていく必要がある。当社では、cm級測位利用に向けた次の3種類の標準化活動を実施している(図4)。

- (1) cm級測位の全体スキーム(ISO/TC20/SC14)
cm級測位サービスに関する要件を定義しており、2015年5月にISO18197として成立した⁽⁶⁾。
- (2) 補強データ配信仕様(RTCM)

衛星又は地上回線で配信される補強データのフォーマットを定義するもので、主な受信機メーカー及び配信サービス提供者が組織する米国海上無線技術委員会(RTCM)で規格化⁽⁷⁾される。当社は、伝送帯域が制限される衛星回線で配信可能な圧縮フォーマットを提案し、規格化活動を実施している。

(3) 三次元位置情報

産業競争力懇談会(COCN)で、当社が幹事となり26社(2015年度)が参画して“三次元位置情報を用いたサービス・共通基盤整備”を検討しており、標準化に向けた活動もこの中で進めている。

2018年の準天頂衛星補強サービス開始に向けて、こうした標準化活動を促進し、様々な高精度測位関連市場の創出と高精度測位社会の実現に向けて活動していく。

(注1) 2013年4月25日現在、当社調べ

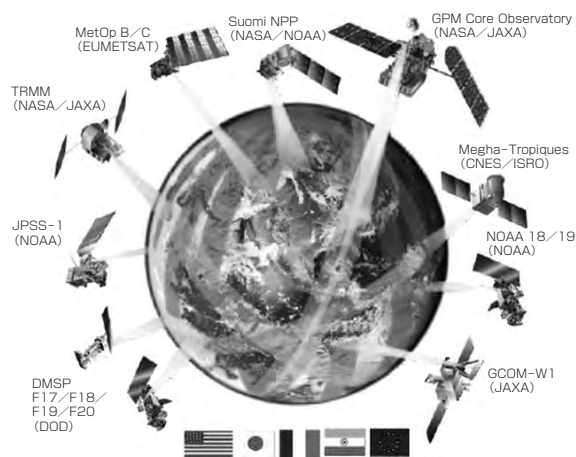
3.2 観測衛星の校正要求の標準化

我々の日常生活に密接な水に関する情報取得を主目的としている観測衛星(観測センサ)は、日米欧中を含めて多数軌道上で運用されている。しかし、同一の目標を観測した場合でも、各センサの観測データにばらつきが生じ、ユーザーは独自の知見に基づいてセンサごとに観測データを補正する必要性に迫られている。

このような状況の改善のため、センサの開発段階(設計～試験)における校正に必要な特性の把握、及び軌道上での校正要求の規定を提案している。

この規格の適用によって同一観測点での観測値のばらつきが抑制されるため、ユーザーは各センサの観測データを容易かつ効果的に取り扱うことが可能となる。さらに、従来のユーザーである米国海洋大気庁(NoAA)、一般財団法人リモートセンシング技術センター、農林水産省、一般社団法人漁業情報サービスセンター等に加えて、気象、農業、漁業、輸送・運輸等の各事業分野での利用拡大や、今後予想される地球規模の異常気象に起因する台風、豪雨等の激甚災害予測精度の向上による被害低減に向けた貢献についても期待できる。

昨年、JAXAが開発した高性能マイクロ波放射計(AMSR-E)とその後継センサである高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)で、観測データの継続的品質確保とそのための相互校正の重要性が改めて認識され、米国航空宇宙局(NASA)とJAXA協力の下、AMSR-EとAMSR2の相互校正を実施している。また、日米が主導する全球降雨観測計画(GPM)コンステレーション(図5)では、既に米国で相互校正の検討が進められ、我が国もAMSR2の相互校正協力を行っている。さらに、世界気象機関(WMO)／GSICS(Global Space-based Inter-Calibration System)でもマイクロ波放射計の相互校正についての検討が始まっており、GPMとも連携している。



出典：http://pmm.nasa.gov/image-gallery/gpm-constellation

図5. GPMコンステレーション

4. む す び

衛星技術の標準化活動事例として、標準商用衛星バスDS2000の競争力強化に向けた標準化活動、国産衛星の品質向上に向けたJAXAの宇宙機標準活動との連携、ISOでの商用衛星向け製品保証要求、及び宇宙用LIBの標準化提案について述べた。また、衛星利用面での標準化活動事例として、cm級測位に関する国際標準化活動と観測衛星の校正要求の標準化提案について述べた。

当社は、我が国の衛星開発を支えるリーディングカンパニーとして、国際競争力向上と衛星利用市場拡大に向けた取組みの一環として、引き続き標準化活動に対して戦略的かつ継続的に取り組んでいく所存である。

参 考 文 献

- (1) 田村泰一、ほか：技術経営におけるデジタール標準化戦略に関する研究、早稲田大学WBS研究センター、早稲田国際経営研究、40、125～141 (2009)
- (2) 堀井茂勝：宇宙国際標準(ISO_TC20/SCI)の活動状況と我が国の産業界の現状、航空と宇宙、No.4(736)、33～38 (2015)
- (3) 永島敬一郎：宇宙利用サービスに係わる標準化活動の動向、航空と宇宙、No.3(711)、8～14 (2013)
- (4) JMR/JERG-JAXA共通技術文書
http://sma.jaxa.jp/TechDoc/
- (5) Guidelines on Lithium-ion Battery Use in Space Applications, NASA/TM-2009-2215751：NESC-RP-08-75/06-069-1
- (6) 古川敏雄、ほか：衛星を利用した高精度測位サービスの国際標準の紹介、航空と宇宙、No.3(735)、33～38 (2015)
- (7) RTCM Special Committee No.104, RTCM Standard 10403.2 for differential GNSS services-Version 3, RTCM Standards, 2013

宇宙太陽光発電 マイクロ波電力伝送技術

本間幸洋* 阿部好邦**
佐々木拓郎** 川津久輝**
高橋智宏**

Microwave Power Transmission Technologies for Space Solar Power System

Yukihiro Homma, Takuro Sasaki, Tomohiro Takahashi, Yoshikuni Abe, Hisateru Kawatsu

要 旨

電力をマイクロ波に変換して送電するマイクロ波電力伝送技術は、コードレスで遠方に送電できる特長があり、センサシステムや飛翔(ひしょう)体への給電、離島や僻地(へきち)への送電、宇宙太陽光発電(Space Solar Power System: SSPS)等の様々なシステムでの実用化が期待されている。三菱電機はこれらのシステムの実現を目指し、マイクロ波電力伝送技術の開発に取り組んでいる。近年では、2009年度から2014年度に経済産業省、一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)が推進した“マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発”に参画した。当社は、実証試験モデルの送電部及びビーム方向制御部の開発と実証試験の実施を担当した。

送電部は、宇宙への輸送、組立てを容易にするために薄

型化に注力して、厚さ25mmを達成した。また、高効率に電力をマイクロ波(5.8GHz帯)変換するためにGaN(窒化ガリウム)デバイスの半導体増幅器を開発し、増幅器単体で平均60.3%の世界最高クラスの効率を実現した。ビーム方向制御部は、パイロット信号を用いて受電部の方向を検知してその方向に自動でマイクロ波を送電するソフトウェアレトロディレクティブ技術と、送電モジュール間に段差が生じた場合に位相誤差を検知・補正する複数モジュールの協調動作技術を開発し、標準偏差で0.15°という高いビーム方向制御精度を実現した。また、屋外試験で約1.8kWのマイクロ波を送電し、設計通り送電部から約55m離れた場所約340Wの直流電力を受電することに成功した。これらの成果から宇宙太陽光発電やマイクロ波電力伝送技術の実現性や有用性が実証され、実用化に向けて大きく前進した。



マイクロ波電力伝送の屋外試験風景

2015年2月から3月に、当社の屋外試験場で実施されたマイクロ波電力伝送の実証試験風景である。送電部から約55m離れた場所に受電部を設置して送電部から5.8GHz帯の約1.8kWのマイクロ波を送電し、約340Wの電力を受電した。

1. ま え が き

電力をマイクロ波に変換して送電するマイクロ波電力伝送技術は、コードレスで遠方に送電できる特長があり、センサシステムや飛翔体への給電、離島や僻地への送電、SSPS等の様々なシステムでの実用化が期待されている。当社はこれらのシステムの実現を目指し、2000年からマイクロ波電力伝送技術の開発に取り組んでいる⁽¹⁾。近年では、2009年度から2014年度に経済産業省、J-spacesystems、JAXAが推進した“マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発”に参画した。この研究開発ではSSPSの実現を目指して大規模な送電システムの構築を想定し、キー技術となる複数の送電モジュールを用いたマイクロ波電力伝送技術を実証するための、実証試験装置の開発を行い、2014年度にこれらを用いた実証試験を行った。この中で、当社は送電部及びビーム方向制御部の開発と、実証試験の実施を担当した。

本稿では、これらの装置の開発と実証試験の成果について述べる。

2. SSPSについて

SSPSは、宇宙空間で太陽電池を用いて発電した電力をマイクロ波に変換して地上に送電するシステムである。大型発電所に相当する百万kW級の発電を想定しており、再生可能エネルギーを利用した天候や昼夜に左右されないクリーンで安定した発電システムの実現を目指している。図1に概念図を示す。36,000km上空の静止軌道に発・送電パネルを多数並べてkm級の発・送電部を構築する。太陽光で発電した電力は送電部でマイクロ波に変換されて地上へ照射され、地上のkm級の受電部でマイクロ波を受信して電力に変換して利用する。このとき、電力を安全に漏れなく受け取るために、マイクロ波を送電部から受電部に正確に照射する技術が必要となる。

3. マイクロ波電力伝送試験モデルの開発

3.1 マイクロ波電力伝送試験モデル⁽²⁾

SSPSを想定して、マイクロ波照射方向を精度よく制御してkW級の電力送電技術を実証することを目的として、マイクロ波電力伝送試験モデル(以下“試験モデル”という。)を開発した。

図2に試験モデルの概念図を示す。電力をマイクロ波に変換して送信する送電部と、マイクロ波を受信して電力に変換する受電部、マイクロ波を制御するビーム方向制御部で構成されている。送電部は4枚の送電モジュールで構成され、大型の送電部を構築する際の変形や日射などによる変形を模擬するために、1枚ごとに変位・回転が可能な構造となっている。マイクロ波のビーム方向は、受電部からガイド信号であるパイロット信号を送信して、その到来方

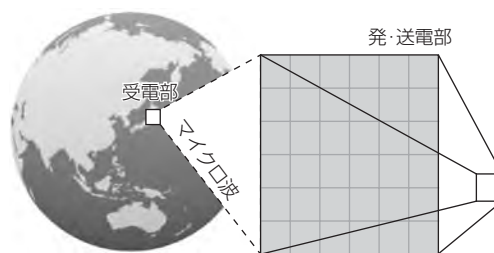


図1. SSPSの概念

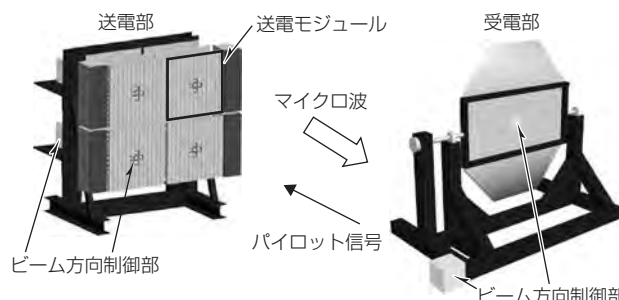


図2. マイクロ波電力伝送試験モデルの概念

向を送電モジュールごとに検知して自動でその方向へ照射・制御される。送電部と受電部には、パイロット信号を送信／受信するビーム方向制御部が組み込まれている。送電モジュールに変位が生じた場合は、それを電氣的に検知する手法として素子電界ベクトル回転法(REV法)⁽³⁾を用いて補正し、正確・高効率に送電する。

3.2 送電部の開発⁽²⁾

送電部は、効率良く電力をマイクロ波(5.8GHz帯)に変換し、ビーム方向制御指示値に従って正確にマイクロ波を照射する機能が必要である。また、多数の送電モジュールをロケットで打ち上げて宇宙で組み立てることを想定すると、薄型、軽量が望まれる。このような高い電気性能(効率等)と機械性能(薄型、軽量)の両立を目指して送電部(要旨の図)を開発した。

図3に送電モジュール(サブアレー部)の外観を、表1に主な性能試験結果を示す。電力をマイクロ波に変換するHPA(High Power Amplifier)にはGaNデバイスの半導体増幅器を用いて、304個(76個/送電モジュール×4)の平均で60.3%の高い効率を実現した。送電モジュールは量産性や大規模化を考慮した構成で、これまでの類似装置⁽¹⁾の1/10以下の厚さ25mmを達成した。また図4に、4枚の送電モジュールで送電した際のアジマス放射パターンを示す。設計値とよく一致しており、送電の指令値に従って正確にマイクロ波を送信していることが分かる。

3.3 ビーム方向制御部の開発

複数の送電モジュールで送電する場合、各送電モジュールの回転や段差に応じたビーム方向と位相差の補正が必要となる(図5)。試験モデルでは、ビーム方向の制御にソフトウェアレトロディレクティブ技術を、位相差の制御に複数送電モジュールの協調動作技術を開発した⁽⁴⁾。

3.3.1 ソフトウェアレトロディレクティブ技術

大電力を送電するSSPSでは、極めて高精度なマイクロ波のビーム方向の制御が要求される。これを実現するために、受電部から送信されるパイロット信号の到来方向を検知し、この方向に自動でマイクロ波を送信するソフトウェ

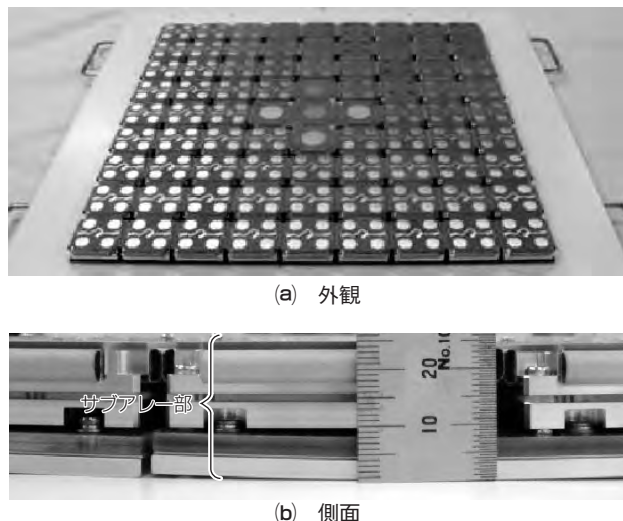


図3. 送電モジュール(サブアレー部)

表1. 送電モジュールの主要な性能試験結果

項目	実測値
送電モジュール寸法	599×600(mm)
サブアレー部	厚さ：25mm(突起物を除く) 質量：16.1kg以下
周波数	5.8GHz(連続波(CW))
出力電力	423W以上(送電部全体で1.795W)
効率	総合：35.1%以上 最終段HPA：平均60.3%

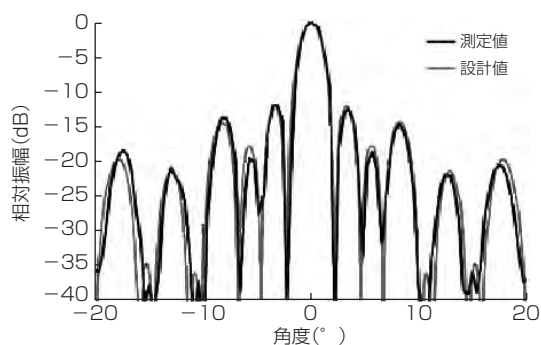


図4. アジマス面放射パターン

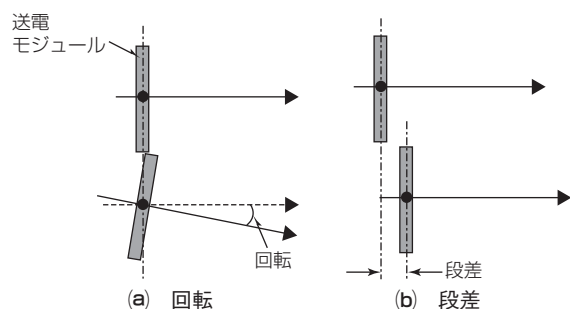


図5. 送電部の変形

アディレクティブシステムを開発した。このシステムでは、パイロット信号の到来方向の高精度な検知が重要であり、今回は、衛星通信システム等で実績のある複数のアンテナビームを一組として用いてアンテナ正面方向からのずれ角を検出する振幅モノパルス方式を採用した⁽⁵⁾。図6に、このシステムの実現のために開発したパイロット信号受信アンテナを示す。左右2つのアンテナ(A, B)と上下のアンテナ(C, D)で、それぞれパイロット信号の方位角と仰角を検出する。また、左右、上下の2素子ペアから得られた信号を、中央の素子(S)で受信した信号で規格化することで、パイロット信号の強度変動による誤検知を防止する。

図7にビーム方向制御部のブロック図を示す。パイロット信号受信アンテナで得た信号はダウンコンバータで中間周波数に変換され、追尾受信機はこの信号を用いて高速にパイロット信号到来方向を検知する。アンテナ制御装置(ACU)は、この信号を基に送電部のビーム方向の指令値を算出して送電部のビーム方向を制御する。このシステムを送電部に組み込み、パイロット信号到来方向検出精度を試験した結果、検出誤差の標準偏差で0.078°の高い精度を実現した。

3.3.2 複数モジュールの協調動作技術

送電モジュール間の段差に応じた送電マイクロ波の位相誤差を高精度に検知・補正する方法として、REV法を用いた複数送電モジュールの協調動作技術を開発した。REV法は、アンテナ1素子の励振位相を変化させた時の合成電力が正弦波を描くことを利用して、各アンテナ素子

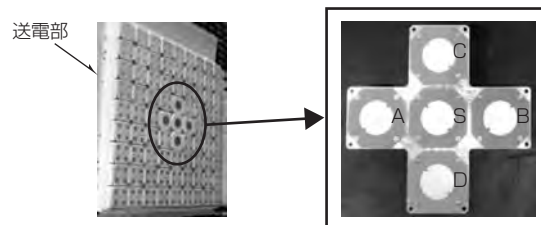


図6. パイロット信号受信アンテナ

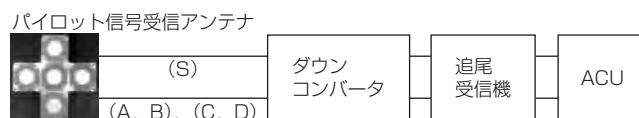


図7. ビーム方向制御部のブロック図

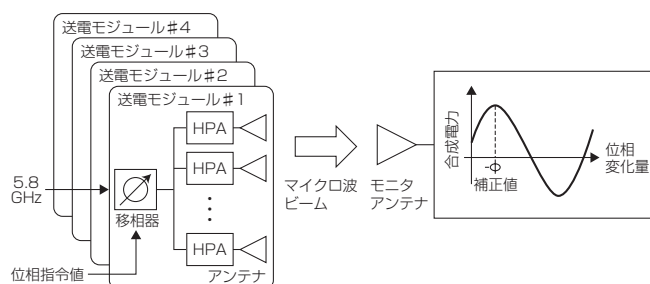


図8. 位相補正值の測定の概念

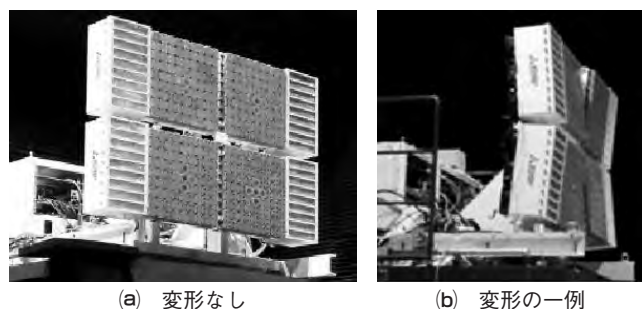


図9. 送電部の変形の様子

の素子電界(振幅, 位相)を求める方法である。図8に, 送電モジュール間の段差に応じた位相補正值の測定概念図を示す。送電モジュールごとに移相器で位相を順次変化させて受電部中央で受信する合成電力を測定し, その情報から各送電モジュール間の段差に相当する位相差を検出する。検出された位相差を補正值として各送電モジュールの移相器へ指令して補正することで, 送電マイクロ波ビームを形成できる。

4. 実証試験結果

開発した試験モデルを用いて, 屋内の電波暗室では主にビーム制御精度の評価試験を, 屋外ではkW級のマイクロ波無線電力伝送試験, 及び送電した電力を利用してアマチュア無線局を運用する実用化実証試験⁽⁶⁾を行った。

4.1 屋内試験

屋内試験は京都大学宇治キャンパスの電波暗室で実施した。ソフトウェアレトロディレクティブ技術及び複数モジュールの協調動作技術を用いて, マイクロ波を自動送信した場合のビーム方向制御精度の検証を行った。送電部と受電部の距離は約10mに設定し, 図9に示すような送電モジュールに変形がない時や変形がある時の合計8ケースで, ビーム方向制御精度を評価し, 標準偏差で 0.15° という高いビーム方向制御精度を達成した⁽²⁾⁽³⁾。

4.2 屋外試験

屋外試験は当社の屋外試験場で実施した(要旨の図)。送電部から約55mに受電部を設置し, 送電部に段差がない状態でマニュアルでビーム方向を設定して送電した。約1.8kWのマイクロ波を送電した場合, 平均340Wの直流電力(設計値: 最大340W程度)を受電し, 設計通りの電力を受電していることを確認した。また, 送電モジュール間に段差を設けてREV法を用いて位相補正する送電実験を行った。図10に, 段差の様子と位相誤差の補正なし/ありの場合の受電面での受信レベル分布を示す。送電部の下側2枚に波長の約1/2に相当する30mmの段差を設けて補正した場合, ビーム方向指示値の受電面に理想的なマイクロ波ビームが形成されている。また, 受電電力は補正がない場合は90W程度, 補正した場合は330W程度の直流電力が得られ, 段差がある場合でも協調動作を行うことで段差がない場合と同程度の電力が得られることを確認した⁽⁷⁾。

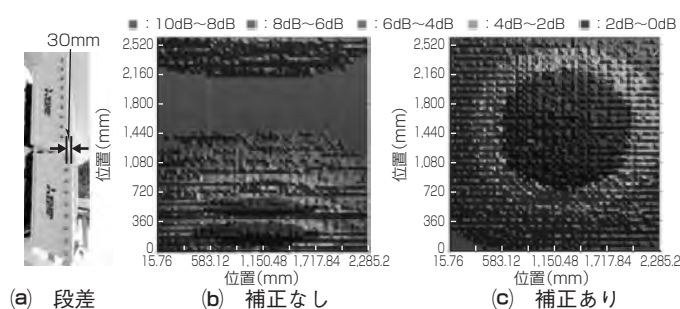


図10. 段差に応じた位相補正による電力分布

5. む す び

SSPSのマイクロ波電力伝送技術を実証するために, マイクロ波電力伝送試験モデルを開発して実証試験を行った。送電部は半導体増幅器を用いて, これまでにない薄型・高効率の両立を達成した。また, ソフトウェアレトロディレクティブ技術と複数モジュールの協調動作技術を開発し, 高精度なビーム方向制御精度と高効率な送電を実証した。これらは, 将来の長距離・大型化を想定したマイクロ波電力伝送技術の実現性・有効性を示す大きな技術進捗である。この成果を基に, SSPS計画の推進やマイクロ波電力伝送技術の産業応用が更に加速されることを期待する。

この研究開発は経済産業省からJ-spacesystemsが受託した“マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発”, 及びJAXAの“マイクロ波電力伝送地上実験システム用ビーム方向制御装置の開発”の一環として行われた。関係機関の皆様のご支援に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- (1) Homma, Y., et al.: New Phased Array and Rectenna Array Systems for Microwave Power Transmission Research, IEEE IMWS-IWPT Proc., 59~62 (2011)
- (2) Mihara, S., et al.: Microwave Transmission Experiment on the Ground for the Future SSPS, ISTS Proc., 2015-q-04 (2015)
- (3) 真野清司, ほか: フェイズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法-素子電界ベクトル回転法-, 電子情報通信学会論文誌(B), J65-B, No.5, 555~560 (1982)
- (4) 牧野克省, ほか: SSPSの実現に向けた高精度マイクロ波ビーム方向制御装置の開発とその技術実証試験, 電子情報通信学会技術研究報告, 115, No.91, 37~42 (2015)
- (5) 吉田 孝 監修: 改訂 レーダー技術, コロナ社 (1996)
- (6) JAXA イベントHP: マイクロ波無線電力伝送地上試験/実用化実証(デモンストレーション)
- (7) 牧野克省, ほか: 素子電界ベクトル回転法を用いたマイクロ波ビーム方向制御技術の地上実証試験, 第59回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2015)

超大型光学赤外線天体望遠鏡TMTの キーテクノロジー

江崎 豊* 仲尾次利崇*
 加藤 篤* 猿田祐輔*
 服部友哉*

Key Technologies for Ultra Large Optical Infrared Astronomical Telescope TMT

Yutaka Ezaki, Atsushi Kato, Tomoya Hattori, Toshitaka Nakaoji, Yusuke Saruta

要 旨

TMT (Thirty Meter Telescope) は、国際協力の下、2024年の稼働開始を目指して米国ハワイ州のマウナケア山頂に建設する計画が進められている、口径30mの光学赤外線・次世代超大型天体望遠鏡である。TMTは、世界最先端の天文学研究に用いられて活躍してきた口径8.2mのすばる望遠鏡をはるかにしのぐ13倍の集光力と4倍の解像度を実現し、“月の上の蛍の光が見える”と例えられている⁽¹⁾。TMTによって、宇宙に最初に生まれた星“ファースター”の発見や“地球外生命”の探索など、新しい天文学の研究分野を切り開くことが期待されている。

三菱電機では、幅、高さともに50mを超え、質量も2,000ト

ン以上となる巨大な望遠鏡の本体構造や、天体を追尾するために望遠鏡を駆動する架台駆動制御、分割鏡交換装置等の詳細設計を進めている。

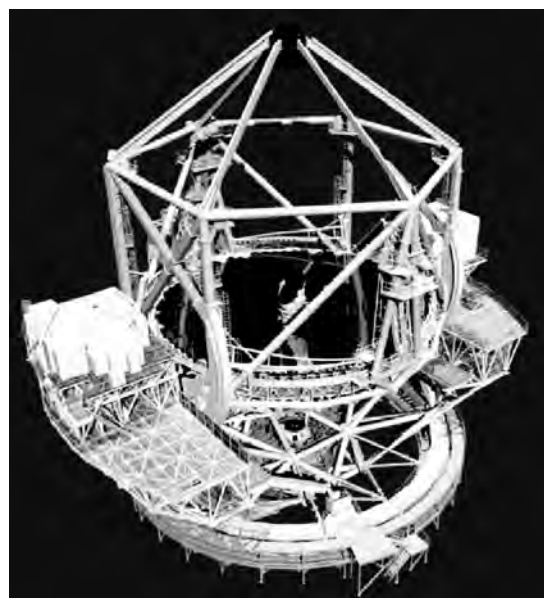
前例のないこれらの装置に対して、技術的難度が極めて高い要求性能や搭載機器とのインタフェース条件が規定されている。主要なものとしては、主鏡支持構造の姿勢変形の抑制、巨大地震に耐える免震構造、望遠鏡を精密に駆動して天体を捕らえ続ける高い追尾精度、1日10枚の分割鏡を交換する交換装置などの実現である。

当社は、これらの技術的要求を達成するため、詳細設計と技術開発を実施してきた。



TMT観測所の完成イメージ

提供：国立天文台



TMTの望遠鏡本体構造

次世代超大型天体望遠鏡TMT

左がTMT観測所全体の完成イメージ、右がTMT計画で当社が詳細設計を実施しているTMTの望遠鏡本体構造の概観である。縦、横、高さともに50mを超え、質量は2,000トンを超える史上最大級の望遠鏡の本体構造である。

*通信機製作所

1. ま え が き

TMTは、口径30mという史上最大級の大きさを誇る超大型光学赤外線天体望遠鏡であり、新しい天文学の研究分野を切り開くことが期待されている。当社は、その巨大な望遠鏡の本体構造や、天体を追尾するために望遠鏡を駆動する架台駆動制御、分割鏡交換装置等の詳細設計を進めている。

これらの装置に対して、技術的難度が極めて高い要求性能、搭載機器とのインタフェース条件が規定され、これらの技術的要求を達成するため、詳細設計と技術開発を実施してきた。

本稿では、技術的要求達成のため、詳細設計段階で適用を検討しているキーテクノロジーについて詳細を述べる。

2. TMTの望遠鏡本体構造

望遠鏡の架台は、方位軸／高度軸で駆動する経緯台式である(図1)。492枚の分割鏡から成る主鏡、副鏡、第3鏡で、ナスミ焦点に最大で視野直径20分角の観測光を結像させる。左右2つのナスミ台それぞれに複数の観測装置が望遠鏡の前後に展開され、大気ゆらぎ補償光学を備えた高解像度撮像、多天体同時分光などの観測が行われる予定である。

3. 望遠鏡構造の主要な要求性能と適用技術

望遠鏡構造の主要な要求性能は、主鏡支持構造部の姿勢変形量1.8mm RMS(Root Mean Square)以下への抑制、

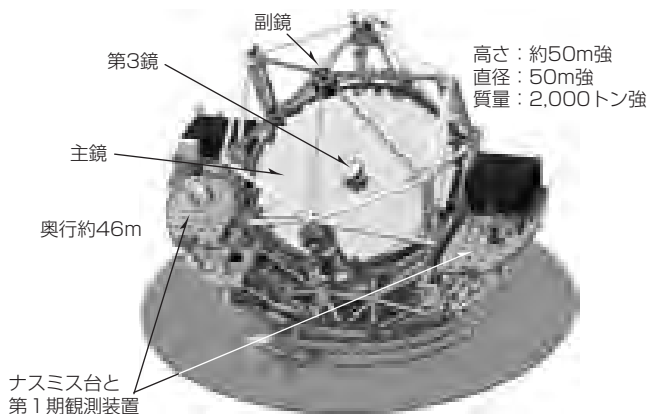
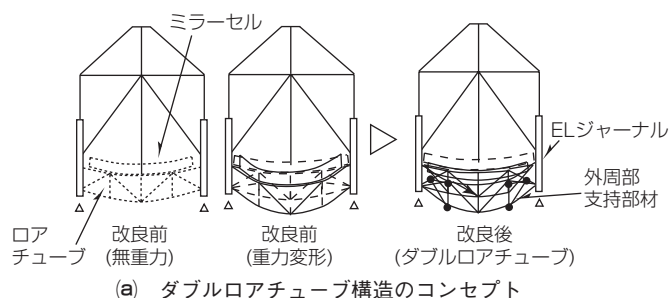


図1. TMTの本体構造



(a) ダブルロアチューブ構造のコンセプト

1000年に一度の地震に耐える免震構造、天体を0.015秒角RMS以下の精度で追尾し続ける高い追尾精度、1日10枚の分割鏡を交換する装置などの実現である。

3.1 主鏡支持構造部の姿勢変形抑制

口径30mのTMTでは、主鏡の自重変形(高度角変化による姿勢変化がたわみを発生させる)の抑制が大きな課題である。各分割鏡は主鏡支持構造部から支持され、主鏡面全体の自重変形は主鏡支持構造部の剛性に大きく依存している。

“すばる望遠鏡”では、高い剛性を確保するために、高度角回転の中核部や主鏡支持構造部を厚みのある箱構造にして自重変形を抑制した。これをTMTに適用した場合、望遠鏡の高さ寸法が大きくなり、部材数量も増大して目標口径・質量(すばる望遠鏡に比べて、口径が3.66倍、質量は4倍強)を大幅に超過する。また、望遠鏡の大型化は、収納するドームの大型化、基礎部の荷重負担の増加など、観測所全体のコスト、工期に大きく影響する。そこで、従来の設計思想を変更して鏡面精度を満足する望遠鏡構造の設計思想を確立する必要が生じた。

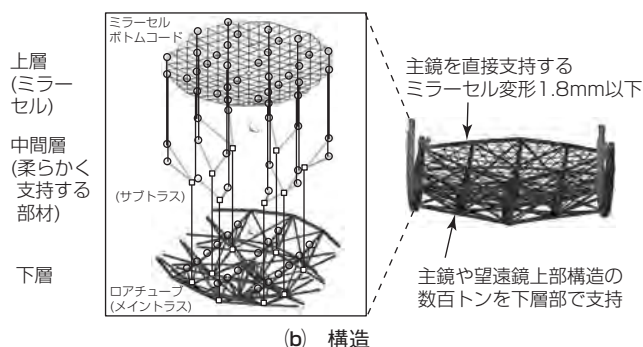
TMTは、主鏡支持構造部の両端の固定部であるEL(ELelevation)ジャーナルという高度軸の半円上のレールが30m以上離れているため、自重変形時に主鏡支持構造の中央部分が大きく落ち込み、両端はほとんど変形しないために主鏡面が湾曲して鏡面精度が低下する問題が生じる。これに対して、各分割鏡を能動アクチュエータで補正するなどの対策が採られているが、ストロークの制約などがあり完全ではない。

鏡面精度を実現するための主鏡支持構造として“ダブルロアチューブ構造”の新規構築を行った。ダブルロアチューブ構造のコンセプトは次のとおりである。

- (1) ミラーセルはELジャーナルとは接続せず、中央部だけをロアチューブで支持する。
- (2) ミラーセル外周部は変形が中央部と同程度になる適切な剛性の部材で柔らかく、自然に支持する。

図2(a)にダブルロアチューブ構造のコンセプト、図2(b)に構造を示す。

この主鏡支持構造によって、ロアチューブの中央部と端部の変形差がそのままミラーセルを歪(ゆが)ませることを回避している。ミラーセル中央部だけをロアチューブで支



(b) 構造

図2. 主鏡支持構造部

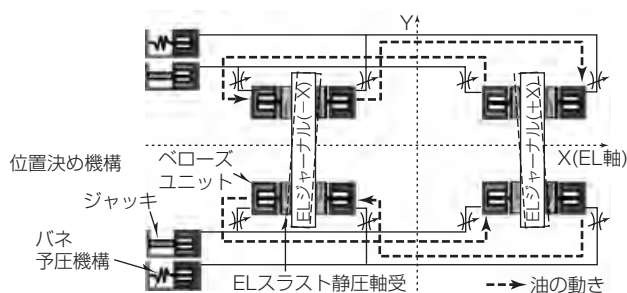


図3. ウィッフルツリー方式の概念

持させて外周部は適切な剛性の部材で支持させることで剛体変位が主となっている結果、鏡面変形を最小限に抑えることができた。

鏡面精度以外にも、仰角変化時の第3鏡とナスミス台上の観測装置群との光路長の変化を最小限に抑えるために、今回新たに鏡の支持方式として用いられるウィッフルツリー支持方式をEL回転構造のスラスト方向の支持に採用した。図3にウィッフルツリー支持方式の概念を示す。

4系統のウィッフルツリー支持によって、高度角回転構造の姿勢変化で生じる反力をAZ(AZimuth)構造・ナスミス構造に極力伝えないようにすることで、観測装置の変位を最小限に抑えている。予圧を与える油圧系統(駆動時、加減速時の反力から予圧を決定)と望遠鏡の中心位置を調整する油圧系統からなる。ELジャーナルの動きに応じて各系統内に封入された油が移動することで、AZ構造・ナスミス構造に入る反力を最小限に抑えている。

3.2 免震システム

TMTは“1000年に1度の確率で発生する地震荷重”に耐えるという要求に対して、望遠鏡で初めての水平方向免震構造を採用している。その特徴は①滑り要素による地震動の絶縁、②ダンパによる地震動の減衰、③与圧機構による運用時の駆動安定化と地震時の絶縁化の切り換え、④大規模地震解析時のスーパーコンピュータの利用である。

一般的に、望遠鏡の主軸は観測精度などへの追求から高剛性である必要があるが、免震構造を採用する場合、主軸を基礎と切り離す必要があり、この相反する性質を両立させることが課題であった。そこで、主軸部にロック機能を持たせることでこの課題を達成している。

望遠鏡の断面図を図4に示す。望遠鏡構造は回転中心の主軸部に設けられた滑り軸受(図中A)と回転レール上の静圧軸受(図中B)で質量が支えられ、一方で水平方向へ自由に移動できるようになっている。この主軸部に与圧したばねを応用したロック機構が設けられており、図5のように構造と基礎部をつないでいる。観測時、風や駆動ブレーキなどの外乱に対して望遠鏡構造はしっかり基礎部へ固定され、高い剛性を保つ。一方、地震時は一定の外力を超えればばねのリミットが外れて構造と基礎部の固定が開放され、水平方向への移動が自由になり免震される。同時に、ダン

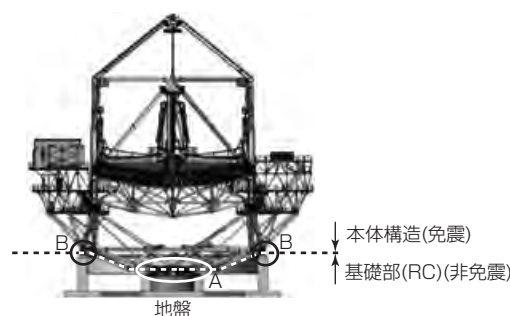


図4. 望遠鏡構造と基礎部の断面

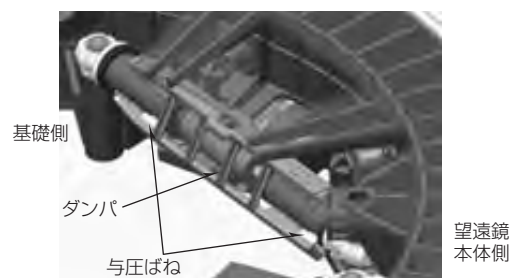


図5. 主軸部内の与圧ばねを使用したロック機構

パで揺れを減衰させる。このような機構で観測時の高い望遠鏡性能を満たすと同時に、地震時に光学機器及び観測機器に許容される加速度要求、及び各サブシステム装置の強度要求を満足させている。

また、地震解析でより現実的な評価を行うため、大規模構造モデルに実地震波を入力している。国立天文台にスーパーコンピュータ“アテルイ”を用いた解析を協力いただき、解析時間を半年以上縮め、解析効率と解析品質の向上を達成している。

3.3 追尾精度

3.3.1 大規模構造の高精度モデリングと解析時間の低減

この望遠鏡は、コスト等の理由で国内仮組時の架台駆動試験が不可能であるため、現地でのリスク低減と機械設計へのフィードバックの目的で、高精度な解析による性能評価が不可欠であった。具体的には、構造モデルを含む制御システムのモデルを構築し①周波数応答解析、②天体追尾や“Short Move駆動”の時刻歴応答のシミュレーション解析を組み合わせることで評価を実施した。このうち②では、実時間で数分程度の解析を多くの追尾パターンで実施する必要があるが、数十万ノード(=数十万×6自由度)のモデルで実施するのは時間がかかり現実的ではない。また、システムの基本的な応答の確認にも時間がかかり過ぎ、効率が悪い。このため、高精度(要求された精度の維持)と解析時間の低減(評価の効率化)の両立が解析の課題である。

この解決のため、構造のFEM(Finite Element Model)のモード解析結果から制御性能に影響する支配的かつ適切な数のモードを抽出して、自由度を縮小したモデルを生成してシミュレーションを行うことで、モデル精度を維持した上で効率化を図った。また、天空上の光軸の応答を評価

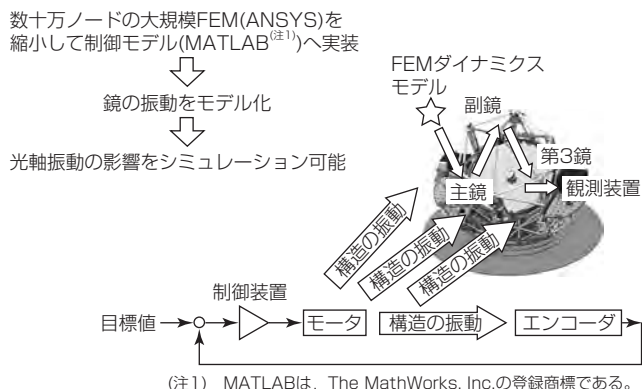


図6. 構造・光学・制御のモデル化

するために、関連する光学コンポーネント(主鏡～第3鏡、ナミスミ台上の観測装置)の代表ノードの振動から、光軸の振動を算出するモデルを生成してシミュレーションに適用した。このように、機械・光学・制御を統合したモデルを構築して解析することで、より現実の光軸ぶれに近い応答の評価を実現した。図6にモデル化の概念を示す。

3.3.2 構造の振動や軸間干渉を考慮した制御則の改良

望遠鏡構造は、その質量制限によって、大きさの割に軽量化された“大型柔軟構造物”であるが、短時間に天体間を切り換えてすぐさま天体観測に移るという“Short Move駆動”の要求があり、準静的に駆動させる日周運動の追尾だけに留(とど)まらず“Short Move駆動”による加振力が望遠鏡構造に入り、これが構造物を振動させる原因となる。この結果、①制振性(柔軟構造の光軸の揺れを最小限にする)と②高応答性(短時間で目的の天体の位置まで移動する)という相反する要求の両立が追尾制御の課題となる。

高精度な駆動を達成するため、低トルクリブルのDD(Direct Drive)モータや高精度テープ式エンコーダなどの高性能化を進めているが、それだけでは達成が難しい。そこで、次に挙げる制御則の改良を実施して制振性と高応答性の両立を図っている。

- (1) 構造フィルタによる不要帯域ゲインの低減
- (2) 軸内、軸間相互干渉力の影響の抑制
- (3) 振動を抑制する指令値の生成

(1)の構造フィルタは、望遠鏡の制御に不要な高周波域の共振による振動を抑制するために、ノッチフィルタなどを制御ループ内に挿入して振動の励起を抑える。また、軸内に発生する共振を(2)の相互干渉力の抑制制御で低減する。回転軸上に複数配置した検出器とモータを利用して、回転軸全体の運動を純粋な回転の“同相”成分と反対方向の“逆相”成分に分解し、双方に制御ループを適用することで制振を実現している。これらに加えて、構造共振を避けるように指令整形と指令フィルタリングを実施してサーボループに与えることで、更に振動を抑制している。図7に制御システムのブロック図を示す。

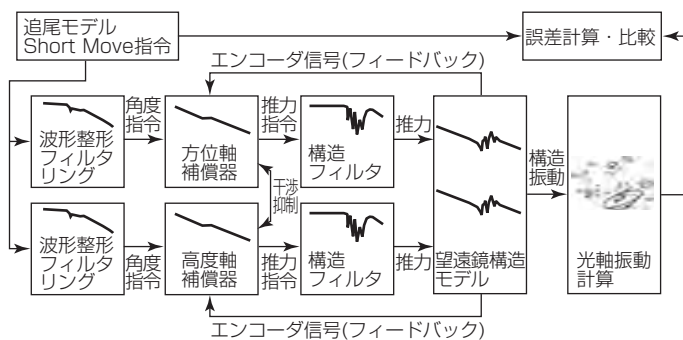


図7. 制振・高応答性を実現する制御システムのブロック図

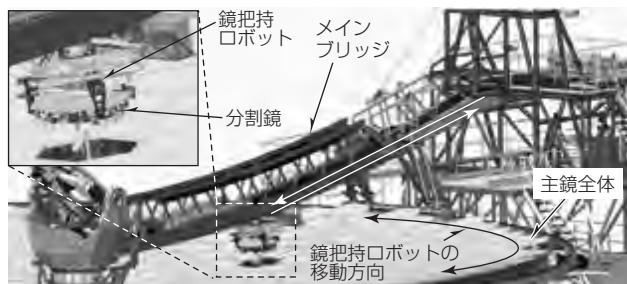


図8. 分割鏡自動交換装置の構成

3.4 分割鏡自動交換装置

分割鏡交換装置の構成を図8に示す。分割鏡を主鏡の所定の位置へ搬送するために、主鏡上部を円周方向に回転するブリッジを主鏡上部に展開し、ブリッジ下部を鏡把持ロボットが半径方向に動く。分割鏡の着脱は、6自由度で駆動するパラレルリンク機構の鏡把持ロボットが行う。

主鏡上の位置によって様々な配置(角度、傾き)をとる分割鏡に対して、その着脱時に鏡や望遠鏡側の支持部に過剰な力が掛からないようにする必要がある。そのため、6軸力センサで反力を検出して鏡に負荷をかけないように柔らかさを可変にするコンプライアンス制御(力覚制御)、カメラ画像によって鏡と交換装置の相対位置、傾き、距離を検出するビジョンセンサを実装し、分割鏡交換での高効率化、省人化を実現する。現在鏡把持ロボットの試作機を製作し、開発評価中である。なお、望遠鏡の分割鏡自動交換装置は世界初^(注2)の試みである。

(注2) 2015年12月現在、当社調べ

4. む す び

国際協力で進められるTMTプロジェクトへの参画に当たり、国立天文台の指導の下、計画を主導する米国や海外の様々な機関との調整が必要となる。このプロジェクトの実現に向けて、今後も各国と協力し技術開発と貢献を図っていく。

参考文献

- (1) 国立天文台ホームページ：国立天文台TMT推進室
<http://tmt.nao.ac.jp/>

次世代衛星通信向け変復調装置

井戸康浩* 富塚浩志**
杉本達也*
吉岡 優*

Modulator and Demodulator for Next Generation Satellite Communication Systems

Yasuhiro Ido, Tatsuya Sugimoto, Masaru Yoshioka, Koji Tomitsuka

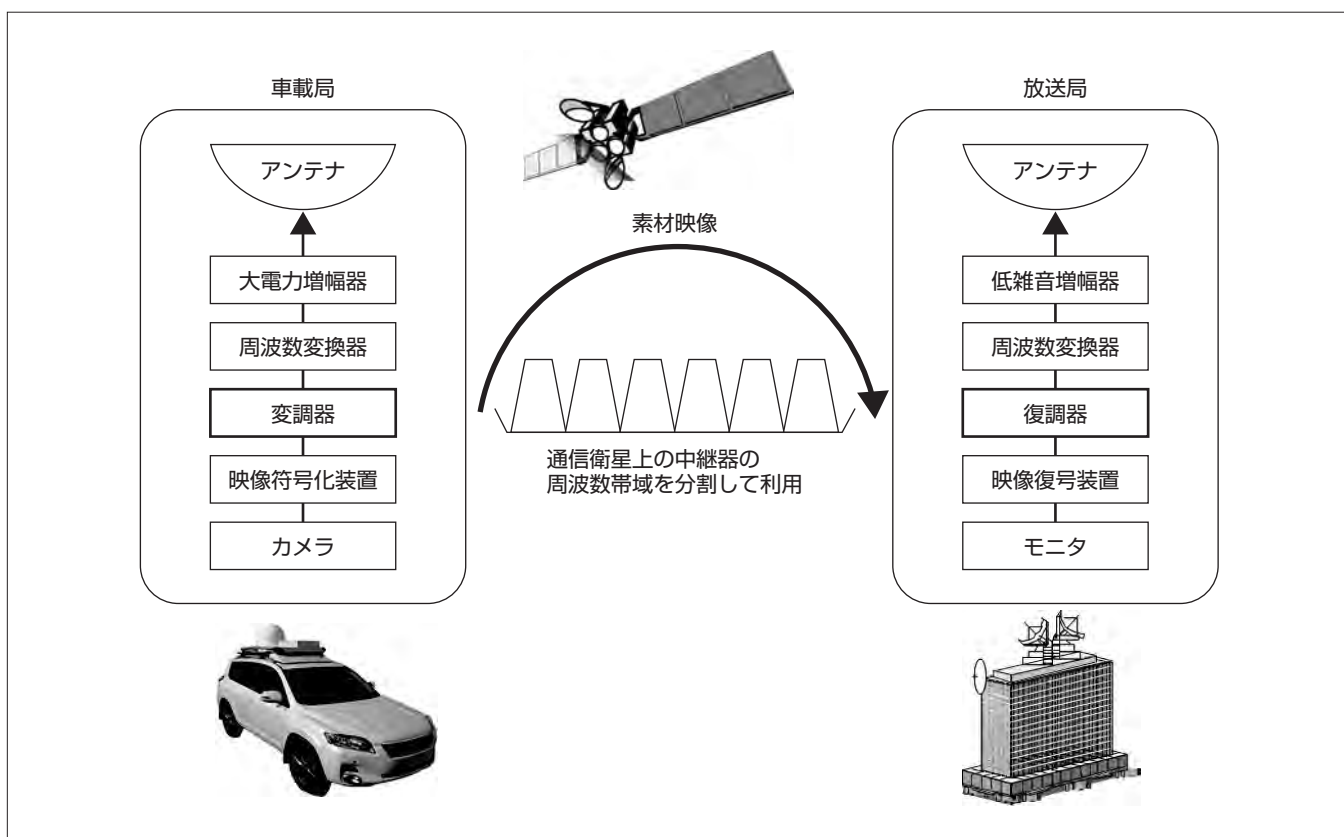
要 旨

近年、衛星通信システムは周波数利用効率向上と高速・大容量化の要求に伴い、変調信号の多値化や波形整形フィルタの急峻(きゅうしゅん)化、強力な誤り訂正方式の採用等、変復調装置の高機能化が進んでいる。特に、衛星通信システムの中でも放送用の映像素材を伝送するSNG(Satellite News Gathering)システムでは大容量伝送を行うため、周波数利用効率向上に関する技術開発・製品化が注目されている。

今回、三菱電機では、放送用映像素材伝送向けに新方式を採用し、周波数利用効率の向上に大きく寄与する変復調装置を製品化した。また、同時に装置の小型化・軽量化・高機能化を実現した。

この変復調装置は、周波数利用効率を従来比で約27%向上させるとともに、装置の小型化も実現した。この装置の主な特長を次に示す。

- (1) 変調方式は、従来のQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)～32APSK(Amplitude Phase Shift Keying)の方式に加えて、新たに64APSKの多値変調方式を搭載
- (2) 波形整形フィルタとして、従来のロールオフ率0.35, 0.25, 0.20に加えて、新たに0.15, 0.10, 0.05に対応
- (3) 寸法・質量ともに、従来機種との1/2に小型化・軽量化し、実装スペースや積載質量の削減が課題となっている中継車等での車内スペースの有効活用に貢献



映像素材伝送システムの構成

衛星通信での映像素材伝送システムの構成例を示す。車載局には、主に送信系のシステム機器を装備しており、変調器から出力された変調波は通信衛星を介して放送局等の固定局に伝送される。通信衛星では、限られた中継器の周波数帯域を分割して利用するため、変調波の周波数利用効率の向上が大きな課題となっている。

◇一般論文◇

1. ま え が き

衛星通信ネットワークの需要拡大、伝送映像の高精細化に伴い、伝送帯域の削減、周波数利用効率の向上が課題である。当社では、デジタルSNG向け変復調装置の開発を第1世代のDVB-S(Digital Video Broadcasting-Satellite)⁽¹⁾から取り組んでおり、現在はDVB-S/DSNG(Digital Satellite News Gathering)/S2⁽²⁾対応の変復調装置を市場へ供給している。今回、DVB-S2のPart IIとして規格化されたDVB-S2X(S2 eXtensions)⁽³⁾に対応した変復調装置を製品化した。DVB-S2Xでは、従来の変調方式(～32APSK)に加えて新たに64APSK方式が追加され、伝送帯域を決定するロールオフフィルタのフィルタ係数には、より狭帯域化を実現するために従来のロールオフ率(0.35, 0.25, 0.20)に加えて新たに0.15, 0.10, 0.05が追加された。

本稿では、この変復調装置について述べるとともに、その技術的な課題と解決策について述べる。

2. 映像素材伝送用変復調装置

2.1 変復調装置の主要諸元と特長

今回製品化した復調器を図1に、変調器と合わせた変復調装置の主要諸元を表1に示す。この装置は、次の特長を持つ。

(1) 周波数利用効率の向上

新たに64APSKの多値変調方式を搭載して、波形整形フィルタとして、0.15, 0.10, 0.05に対応した。これによって、同一伝送速度の場合に変調波帯域が約27%改善される。

(2) 小型化・軽量化

従来の半分の幅(19インチラックのハーフサイズ)で実現することで既存機器の実装スペースに予備系1台を追加可能であり、安定した通信回線の確保を可能とするなど新たな利用用途が広がる。また、質量も従来比約1/2に軽量化して車載積載量の課題にも対応した。

(3) 従来機種との互換性の確保

既存のDVB-S/DSNG/S2方式の機器との接続を考慮して、DVB-S2Xで追加されたモード以外のDVB-S/DSNG/S2モードも実装している。これによって、新旧の方式が混在した運用では、既存機器が送受信可能なモードを選択することで互換接続性を確保でき、運用現場での利便性が高まる。

なお、SNGシステムでは送信局と受信局が個別に運用される場合があり、その利便性を考慮して、当社では変調器と復調器をそれぞれ別々の装置として構成している。変復調装置の諸元は、今後の市場ニーズに応じて更なる高機能化に向けて追加していく予定である。

2.2 変復調装置の構成

変復調装置の構成を図2に示す。図の(a)は変調器、(b)は復調器の構成である。この装置の特長である小型化・軽量化を実現するために、IF(Intermediate Frequency)フロ



図1. SNG向け復調器

表1. 変復調装置の主要諸元

項目	諸元
IF周波数	950～1,500MHz
周波数設定	1 Hzステップ
変調速度	384ksps～36Msps, 1 spsステップ
変調方式	QPSK, 8PSK, 16QAM, 16APSK, 32APSK, 64APSK
誤り訂正方式	畳み込み+RS接続符号/ビタビ復号+RS復号/ BCH符号+LDPC符号/BCH復号+LDPC復号
符号化率	1/2, 3/5, 2/3, 32/45, 11/15, 3/4, 7/9, 4/5, 5/6, 7/8, 8/9, 9/10
ロールオフ率	0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.35
周波数安定度	± 1 ppm以内
データ入出力ポート	DVB-ASI
監視制御	LCD, LED (装置前面) 10Base-T/100Base-TX/1000Base-T (装置背面)
外形寸法	210(W)×480(D)×44(H) (mm)
質量	約 4 kg

SPS: Symbols Per Second, 16QAM: 16 Quadrature Amplitude Modulation, RS: Reed Solomon code, BCH: Bose Chaudhuri Hocquenghem code, LDPC: Low Density Parity Check code, DVB-ASI: Digital Video Broadcasting Asynchronous Serial Interface, LCD: Liquid Crystal Display

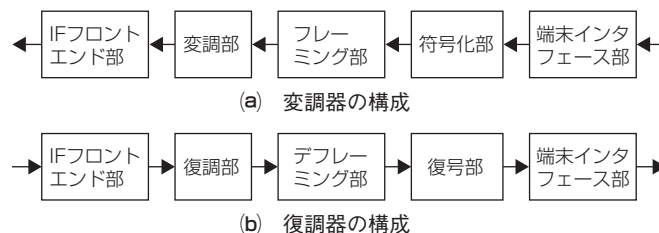


図2. 変復調装置の構成

ントエンド部以外の大部分をFPGAで実現した。IFフロントエンド部は、シリコンチューナーとダイレクトコンバージョン方式を採用して部品点数を削減したことで、部位ばらつきによる性能の安定性阻害要因を排除しつつアナログ部の小型化を実現した。さらに、構成部位ごとに低消費電力化を図って電源部を小型化し、基板実装の配置の工夫によって効率的な排熱構造を実現した。また、映像素材伝送の現場では緊急性が要求されることから、装置の起動時間の主要因である送信周波数の安定性確保までの時間を短縮するために、高精度・高安定でかつ起動時間の短い水晶発振器を採用した。

3. 主要要素技術

周波数利用効率の向上に寄与する多値変調方式と狭帯域フィルタ技術、及びそれらを適用した場合の復調処理の技術的課題及び解決技術について述べる。

3.1 低ロールオフ率対応マルチレート伝送技術

この変復調装置では、広範囲のシンボルレート可変伝送

に対応しながら、低ロールオフ率による狭帯域伝送を実現するために、高精度なサンプリングレート変換が必要である。サンプリング点を細かく補間して波形を再生する従来方式では、多くのフィルタ係数メモリ量が必要となる課題があったが、今回、この課題を克服する低メモリ量で高精度にサンプリングレートを変換する方式を開発した。

図3に変調部のサンプリングレート変換方式のブロック図を示す。今回採用したサンプリングレート変換方式では、リサンプルするタイミングを決定するNCO(Numerically Controlled Oscillators)回路と、所望のサンプル点を生成する補間回路と位相誤差補正回路の2段階構成でサンプリングレート変換を実現している⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。1段目の補間回路ではフィルタ係数メモリ量を削減するために比較的粗い精度で理想サンプル点に近い信号を生成し、2段目の位相誤差補正回路でその残留位相誤差を高精度に補正する。この方式によって、少ないメモリ量で高精度なサンプリングレート変換を実現した。

このサンプリングレート変換方式を用いた変調波のスペクトラム波形(ロールオフ率 0.20, 0.05)を図4に、コンスタレーション(32APSK, 64APSK)を図5に示す。図4ではロールオフフィルタを急峻にした場合に出現するリプル特性も良好であり、衛星の中継器上で隣接波に対する影響

が考えられる変調波の端の部分の減衰特性が十分得られている。また、図5では32APSK, 64APSK双方ともに理想的なマッピング位置を示す○点の中に実測のシンボル点が集中しており、理想に近い変調精度(理想シンボル点と観測シンボル点のベクトル誤差を理想シンボル点のベクトルで正規化した変調波の特性を示す性能指標)が得られている。

従来の32APSK, ロールオフ率0.20と今回追加した64APSK, ロールオフ率0.05を適用した場合の変調波帯域の比較を表2に示す。表から、同一伝送速度の場合に変調波帯域が約27%改善されることが分かる。

3.2 低ロールオフ率対応タイミング同期技術

3.1節で述べたロールオフ率0.05の復調処理での課題として、ロールオフ率が低くなるとキャリア周波数オフセット存在時にビット誤り率が大きく劣化する問題がある。これは、図6に示すように、ロールオフ率が低くなると復調入力アイパターンが大きくなり、タイミング誤差に起因して符号間干渉劣化が生じてBTR(Bit Timing Recovery)によるビット同期時にナイキスト点(振幅が一定になる点)の抽出が困難になるためである。このように、ロールオフ率が低い場合にBTRの推定精度が劣化する課題に対して、従来のBTRにリミッターとフルロールオフフィルタを前置

置きすることで、ロールオフ率が低い場合でも高いBTR精度を維持できる手法を開発した。

図7に今回開発したBTRの構成を示す。従来は受信信号の瞬時電力の包絡線信号に対してDFT(Discrete Fourier Transform)解析でシンボルナイキスト

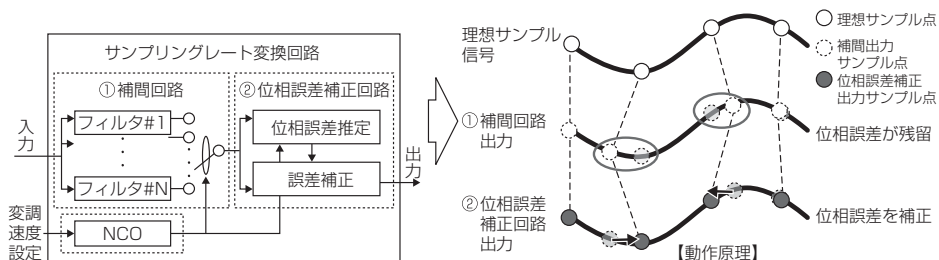


図3. サンプリングレート変換方式

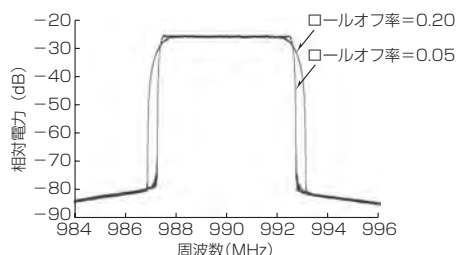


図4. ロールオフ率による変調スペクトラム波形の差異

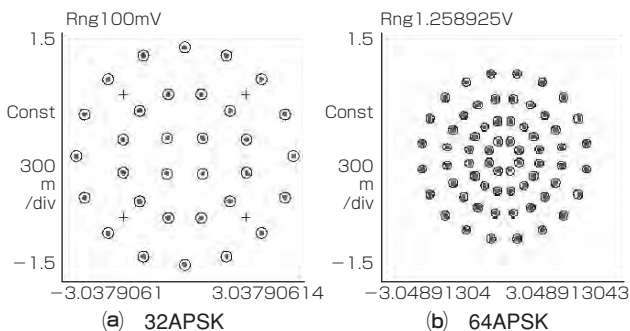


図5. コンスタレーション

表2. 変調方式とロールオフ率による変調波帯域の比較

変調方式	ロール オフ率	伝送速度 (Mbps)	シンボルレート (Msps)	100%占有周波 数帯幅 (MHz)	帯域比率 (%)
32APSK	0.20	150.0	30.0	36.0	100.0
64APSK	0.05	150.0	25.0	26.3	72.9

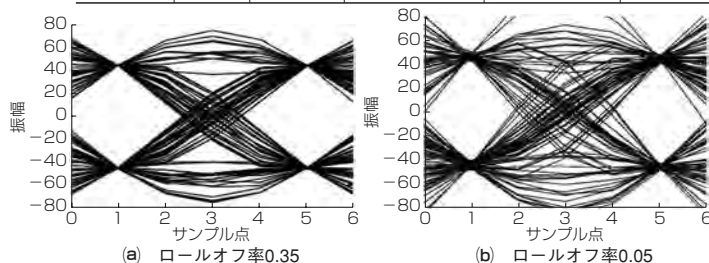


図6. アイパターン

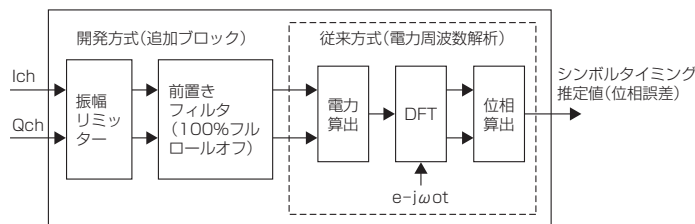


図7. BTRの構成

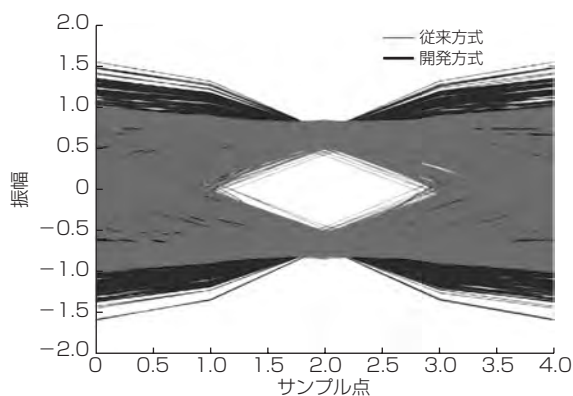


図8. 従来方式と開発方式のアイパターン

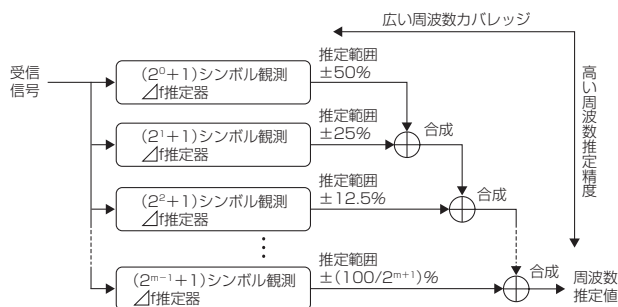


図9. 多重開ループ周波数推定方式

点の位相を算出する方式を採用していた。今回はその前段にリミッターとフルロールオフフィルタを追加することによって、リミッターで振幅をカットして雑音を低減することで低ロールオフ率変調信号の急峻な振幅変動を抑え、さらにシンボル周期の周波数成分を強調させるために高ロールオフ率(=1)のコサインロールオフフィルタを通した信号を用いてBTRを行う手法である。

図8にロールオフ率0.05での従来方式と開発した方式の電力周波数解析への入力アイパターンの比較を示す。開発方式はリミッター、フルロールオフフィルタ通過後の信号であり、ナイキスト点以外でのサンプル点の振幅変動が抑えられ、ロールオフ率の高い信号のアイパターンとほぼ同様になる。これによって、低いロールオフ率の信号でも周波数オフセット存在時にも高精度にタイミング推定することが可能となる。

3.3 高精度周波数同期技術

低CNR(Carrier to Noise Ratio)、多値変調伝送に対応するこの装置の復調器では、高精度な周波数同期が要求される。通常、周波数カバレージと推定精度はトレードオフの関係にあり、これらを同時に満足させることは困難であった。今回、この課題に対して、周波数カバレージの優れた粗推定と推定精度の優れた精推定のそれぞれの特長を損なわずに合成する多重開ループ周波数推定技術を開発した。多重開ループ周波数推定技術は、周波数オフセットによる位相変動を観測シンボル数の異なる周波数推定器を用いてそれぞれ推定・合成することで、広い周波数カバレージと高い周波数推定精度を同時に実現する⁽⁶⁾⁽⁷⁾。図9に多重開ループ周波数推定方式のブロック図を示す。 (2^0+1) シ

ンボルから $(2^{m-1}+1)$ シンボルまでの観測シンボル数の異なる周波数推定器(Δf :周波数オフセット)を備えている。粗推定AFC(Auto Frequency Control)はパイロットシンボル間での遅延検波による位相推定であり、精推定AFCはパイロットシンボルの平均値を用いたパイロットブロック間での遅延検波による位相推定である。これらを、同時に、かつ複数フレームで平均化することで、システムターゲットである周波数推定誤差を確保するための引込み時間の短縮とともに、広い周波数カバレージと高精度な周波数同期を実現した。

4. む す び

周波数利用効率の向上が求められる衛星通信システムで、多値変調と低ロールオフフィルタを備えた小型・軽量な変復調装置を製品化した。変調信号の多値化と狭帯域化は更に高度化することが見込まれる技術であり、引き続き、これまでに培った変復調・伝送技術を更に発展させ、安定した通信の確保に寄与する機器を提供することで放送業務や映像伝送サービスへ貢献していく。

参 考 文 献

- (1) EN 301 210 : Digital Video Broadcasting (DVB) : Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite (1999)
- (2) EN 302 307-1 : Digital Video Broadcasting (DVB) : Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broad-casting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications ; Part1 : (DVB-S2) (2014)
- (3) Draft EN 302 307-2 : Digital Video Broadcasting (DVB) : Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broad-casting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications ; Part2 : DVB-S2 Extensions (DVB-S2X) (2014)
- (4) 富塚浩志, ほか: リサンプリングフィルタを用いた可変シンボルレート伝送技術に関する一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, **110**, No.426, 43~48 (2011)
- (5) 井浦裕貴, ほか: サンプリングレート変換における補間誤差低減に関する一検討, 2011年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-3-22 (2011)
- (6) 富塚浩志, ほか: 衛星通信用マルチチャネル伝送技術, 三菱電機技報, **86**, No.11, 599~602 (2012)
- (7) Kubo, H., et al. : A multiple open-loop frequency estimation based on differential detection for MPSK, IEICE Transactions on Communications, **E82-B**, No.1, 136~144 (1999)

雲観測用Kaバンドレーダ

松田知也*
柿元生也*

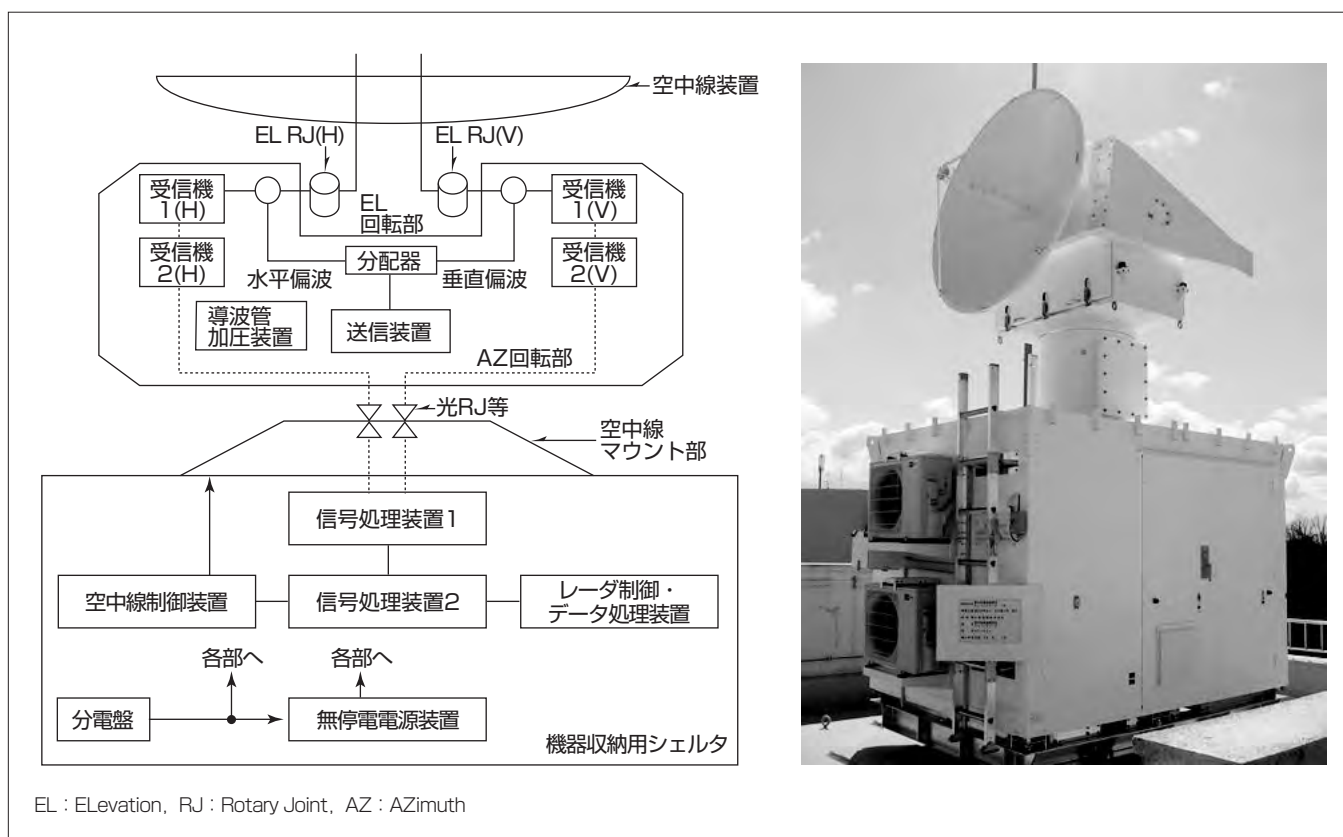
Cloud Radar

Tomoya Matsuda, Ikuya Kakimoto

要 旨

気象レーダは、パルス状の電波をアンテナから照射して、同じアンテナで降水粒子の後方散乱波を受信することで、その位置・降雨強度及び移動速度を測定する装置である。国内では、主にCバンド(5GHz帯)の周波数を用いることで、レーダ中心から半径200~300kmのエリアを測定している。また、最近では、都市域を中心としたゲリラ豪雨の早期観測用としてXバンド(9GHz帯)の周波数を用いたレーダが整備され、レーダ中心から半径80kmまでの距離を測定しており、人口が集中している地域により高精度な降雨情報をほぼリアルタイムで配信することが可能になってきた。

一方、Cバンド・Xバンドの周波数では降水粒子より小さいターゲットを捕らえることができないため、ゲリラ豪雨を事前に察知するために必要な発達中の積雲などの雲を捉えることができない。三菱電機では、この問題を解決するため、雲の発達段階から雲粒子や氷晶粒子を捉えることができるKaバンド(35GHz帯)の周波数を用いた雲観測用Kaバンドレーダの開発を行ってきた。ゲリラ豪雨発生前の積乱雲の様子を事前に測定可能なKaバンドレーダを活用することで、降雨前の予報精度の向上に貢献し、更なる防災・減災ニーズに役立つことが期待される。



雲レーダのシステム構成と外観

左の図は当社が開発した雲レーダのシステム構成を示し、右の図はその外観を示す。アンテナ背面に送信装置・受信装置を配置することで、アンテナと送信・受信装置間の損失を従来機より低減している(2013年度に名古屋大学に納入)。

1. ま え が き

当社は、パルス状の電波をアンテナから照射して降水粒子の後方散乱波を受信することで、その位置と移動速度を測定する気象レーダの開発・製造を行っている。

気象レーダは、国内では主にCバンド(5GHz帯)の周波数を用いることで、レーダ中心から半径200~300kmにわたるエリアの降雨強度、及び降雨のドップラー速度を測定することが可能であり、気象庁では20台のCバンド気象レーダを配置して日本全国をカバーしている。また、最近では、ゲリラ豪雨の早期観測用として国土交通省が“X-RAIN”というXバンド(9GHz帯)の周波数を用いたレーダを都市域を中心に配備することで、人口が集中している地域を中心に、より精密な降雨情報を配信することが可能になってきた。

2. Kaバンドレーダの必要性

2.1 気象レーダで使用する周波数とMPレーダ

先に述べたとおり、気象レーダは、国内では主としてCバンドとXバンドの周波数が用いられているが、どちらを用いるかは1台のレーダの観測範囲及びレーダシステムの規模との関係で決定される。また、電波は周波数が高くなると降雨の減衰の影響を受けやすくなり、電波が遠くまで到達しない。このため、降雨粒子をターゲットとする気象レーダは、高い周波数ほど長距離観測には適さない。Xバンドレーダも降雨減衰の影響を受けやすい周波数とされているが、一方でCバンドレーダに比べて波長が短い分、電波が降雨を伝播(でんぱ)する途中で受ける位相の変化に敏感であるという特徴がある。近年、水平偏波と垂直偏波を同時に発射して受信した両偏波の振幅比や位相差を用いることで、単に受信強度だけで雨量強度を測定するよりも格段に高い精度でこれを測定できる方式が実用化された。日

本では、この技術を用いたレーダをマルチパラメータレーダ(MPレーダ)と呼んでおり、Xバンドレーダではこの技術を適用することで観測精度を高めている。また、MPレーダは偏波の比の特徴を用いて雨と雪の判別も行うことができ、Cバンドレーダにも適用されつつある。

2.2 降雨ステージとKaバンドレーダの役割

一般的な降雨現象の流れは、図1に示すとおり大きく4つのステージに分類される。

(1) プレストームステージ

上昇気流が発達して水蒸気が対流圏上部に供給される。

(2) 雲ステージ

供給された水蒸気によって、雲が形成される。

(3) 降水ステージ

更に下層から水蒸気が供給されることで雲から降水粒子が生成され、降雨をもたらす。

(4) ポストストームステージ

雲が衰退して降雨が消滅する。

降水ステージでは、気象レーダの降雨観測によって1~10分間隔で降水情報を取得できるが、特にゲリラ豪雨のような局地的大雨では、強降雨が観測できた時点で既に手遅れである事象も起き得る。これを回避するためには、降水粒子を観測する前、つまり雲ステージでその兆候を捉えることが解決手段の1つとして有効である。

当社は、雲ステージの状態を捉える最も有効なレーダとしてKaバンド(35GHz帯)レーダの開発を行ってきた。Kaバンドレーダは、雲・霧といった直径数十 μm の粒子を捉えることが可能な反面、先に述べたとおり周波数が高いため降雨の減衰の影響を受けやすい。そのため、アンテナ開口及び送信電力を可能な限り大きくすることでレーダ中心から半径30kmの雲及び降水粒子を捉えるコンセプトで開発を行ってきた。

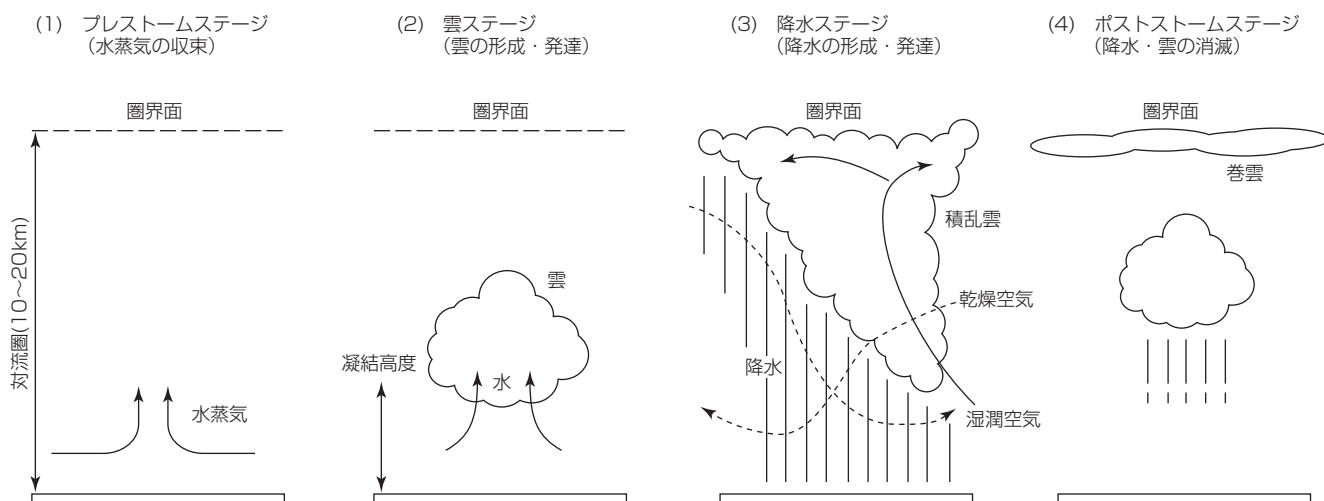


図1. 降雨の生成ステージ



図 2. 2000年度に開発したKaバンドレーダ

3. Kaバンドレーダの開発

3.1 1990年代での開発

当社は、1990年代末から2000年代初めにそれぞれ独立に京都大学との共同研究でKaバンドレーダ(ミリ波ドップラーレーダ)の開発(図2)、及び防災科学技術研究所向けのXバンド・Kaバンド・Wバンド(95GHz帯)多周波観測レーダの開発を行ってきた。当時では、アンテナ開口が2mのKaバンド(35GHz帯)としては大きなアンテナに加えて、100kWの高い送信出力を得るためにマグネトロン管を採用した。図3は、当社が開発したKaバンドレーダを用いて釧路で実施した海霧を観測した例である。

3.2 2010年代での開発

当社が開発したKaバンドレーダは積乱雲・霧の観測を主用途としていたが、注目度は決して高くなかった。しかし、近年、Xバンドで二重偏波レーダ(MPレーダ)の普及によって粒子判別方法の技術が確立され始め、この成果をKaバンドでも活用すれば雲ステージの正確な観測も可能になることから、再び注目を集めるようになってきた。その結果、名古屋大学が1式(2013年度納入)、防災科学技術研究所が5式(2014年度納入)のKaバンドレーダの調達を行うこととなり、当社がこれを受注・開発することとなった。

新たに開発したKaバンドレーダの主な諸元を表1に示す。今回開発したレーダは、初代と比較して大きく2点の改良を行っている。まず1点目は、送信管に性能が安定しているEIK(Extended Interaction Klystron)を採用したことである。EIKの出力は3kWであり、初代で用いていたマグネトロン(100kW)と比較すると1/30以下の出力となるが、Xバンドレーダで培ったパルス圧縮方式を採用することで、比較的低出力な送信電力にもかかわらずマグネトロンと同等出力の性能を発揮させることに成功した。次に2点目として、Kaバンドという高い周波数で問題となるレーダ装置内の伝送ロスを極力軽減するために、送信機及び受信機とアンテナ間の距離を可能な限り近づける工夫を

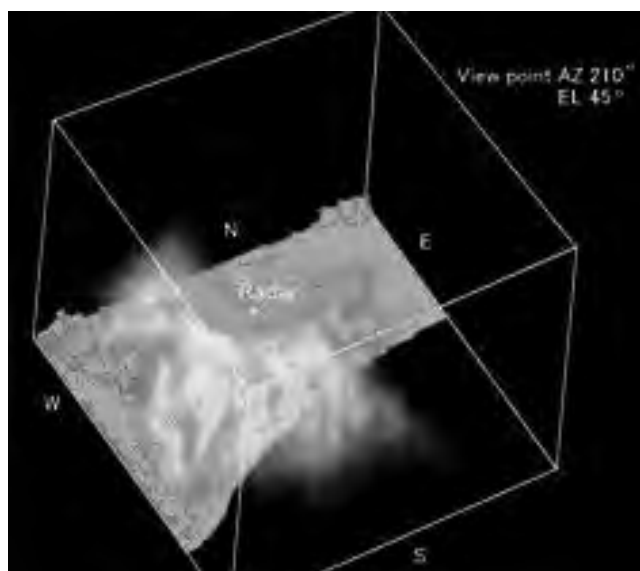


図 3. 2001年8月にKaバンドレーダで観測(釧路の海霧を三次元で表示)

表 1. 雲レーダの主な諸元

レーダ・タイプ	二重偏波ドップラーレーダ
観測範囲	半径30km
送信周波数	34.815~34.905GHzのうち1波
送信パルス幅	短パルス 0.5μs/1.0μs
	長パルス 30μs/55μs/80μs/100μs (短パルス相当にパルス圧縮)
送信管, 送信尖頭電力	EIK, 3 kW (EIK出力端)
感度	二重偏波モード: -17dBZを距離20kmでS/N>3dBで検出可能
空中線駆動範囲, 駆動速度	水平方向: 360°, 最大36deg/s, 仰角方向: 180°, 最大12deg/s
ビーム幅	0.4°以下
距離分解能	75/150m
出力データ	受信強度・レーダ反射因子(水平偏波・垂直偏波), 速度・速度幅, 偏波間位相差・偏波間相関係数
消費電力, 質量	12kVA以下, 4 t以下

S/N : Signal-to-Noise ratio

行ったことである。具体的には、アンテナの背後に送受信機を配置するという、気象レーダとしてはユニークな構造を採用した。これら2点によって、初代と比較して約10dBの能力向上を図っている。なお、今回開発したKaバンドレーダでは、送信機・受信機とこれらを動作させる電源部もアンテナ背面に配置して、水平方向にアンテナと一緒に駆動する装置構成となっている。

4. Kaバンドレーダでの観測例

図4、図5に名古屋大学で観測した例(受信強度)を示す。図4はPPI(Plan Position Indicator)方式、つまりアンテナ方向を仰角20度に保ちながら方位角方向に360度のスキャンを行って得られた観測例である。また図5はRHI(Range Height Indicator)方式で、アンテナ方向を方位角270度(西方向)から鉛直経路で90度(東方向)に垂直スキャンして得られた観測例である。これらの観測によって、地

◇一般論文◇

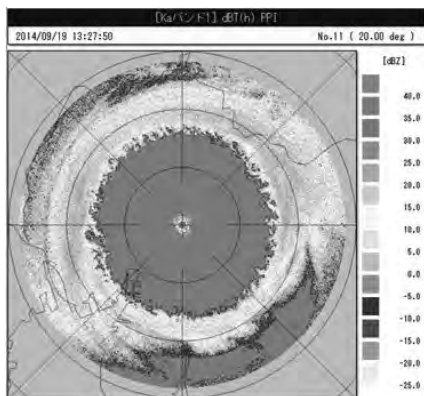


図 4. 名古屋大学での観測例
(受信強度・PPI表示画面)

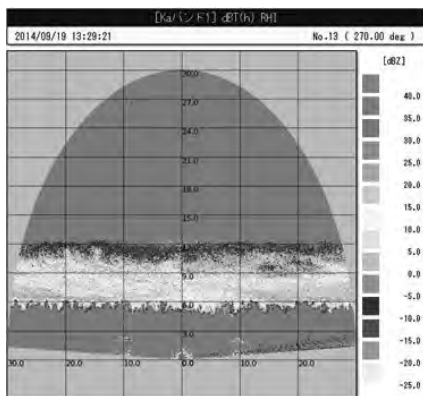


図 5. 名古屋大学での観測例
(受信強度・RHI表示画面)

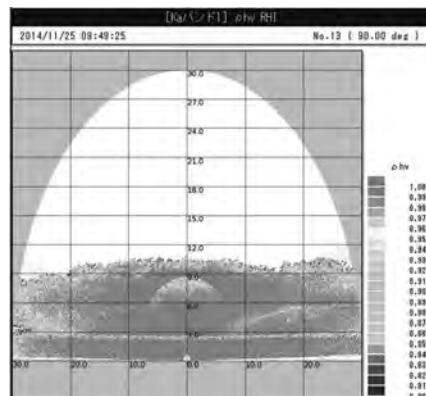


図 6. 名古屋大学での観測例
(偏波間相関係数・RHI表示画面)

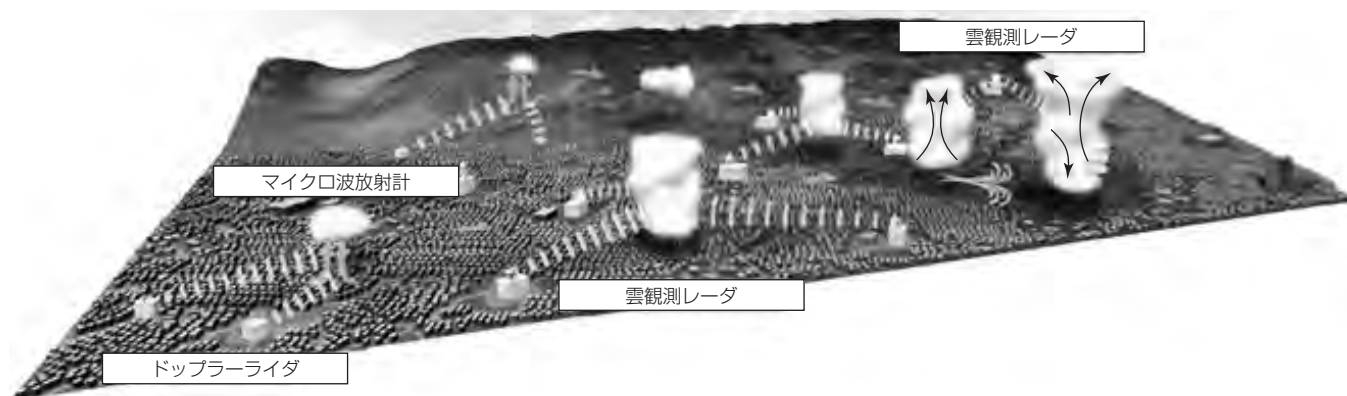


図 7. 局地的大雨が発生するメカニズムを捉えるための将来構想

上付近では降水がなく、高度6～12kmに存在する粒子(つまり雲粒子)を的確に捉えていることが分かる。

図 6 は、RHI方式で観測した二重偏波パラメータ(垂直偏波と水平偏波との相関係数)の例である。高度2.5km前後で相関係数が低い層が観測されていることが分かるが、これは水の粒と融(と)けた水滴が混在する融解層(0℃層)と呼ばれる部分である。この観測結果は、二重偏波技術を用いることで雲とは異なった粒子(氷・雪など)の判別が可能になることを示している。

5. む す び

気象レーダは、近年の降雨災害の増加をきっかけに二重偏波レーダによる定量観測化技術が発達したことで高機能化が進んでいる。この高機能化の動きに伴い、降雨観測用途である気象レーダの応用となる、雲観測用Kaバンドレーダも注目をあびるようになってきた。

さらに、同じく当社が開発しているドップラーライダー(パルス状の光を送信して、空気中のエアロゾル(塵(ちり))からの反射光を受信して観測を行う装置)は、晴天時の気

流を観測することが可能である。これによって、湿った上昇流の発生などを検知できる可能性が広がる。

図 7 は、ゲリラ豪雨のような局地的大雨が発生するメカニズムを捉えるための実験構想図である。積乱雲の発達前ではドップラーライダー、発達段階ではKaバンドレーダを用いて非降水時の状態を観測し、Xバンド及びCバンドレーダによる降雨観測に引き渡すことで、降雨ステージの生成から消滅までを捉える観測システムが構築できる。この観測システムを用いた研究成果として、局地的大雨の1時間前予測の実現など、防災・減災社会の実現の一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) Hamazu, K., et al.: A 35-GHz Scanning Doppler Radar for Fog Observations, J. Atmos. Oceanic Technol., **20**, 972～986 (2003)
- (2) 篠田太郎, ほか: 名古屋大学Kaバンド雲レーダの諸元と初期観測結果, 日本気象学会2015年度春季大会講演予稿集, D158 (2015)

高分解能ライン磁気イメージセンサ “MICMO”

尾込智和*
井上 甚**
下畑賢司***

High-resolution Linear Magnetic Image Sensor "MICMO"

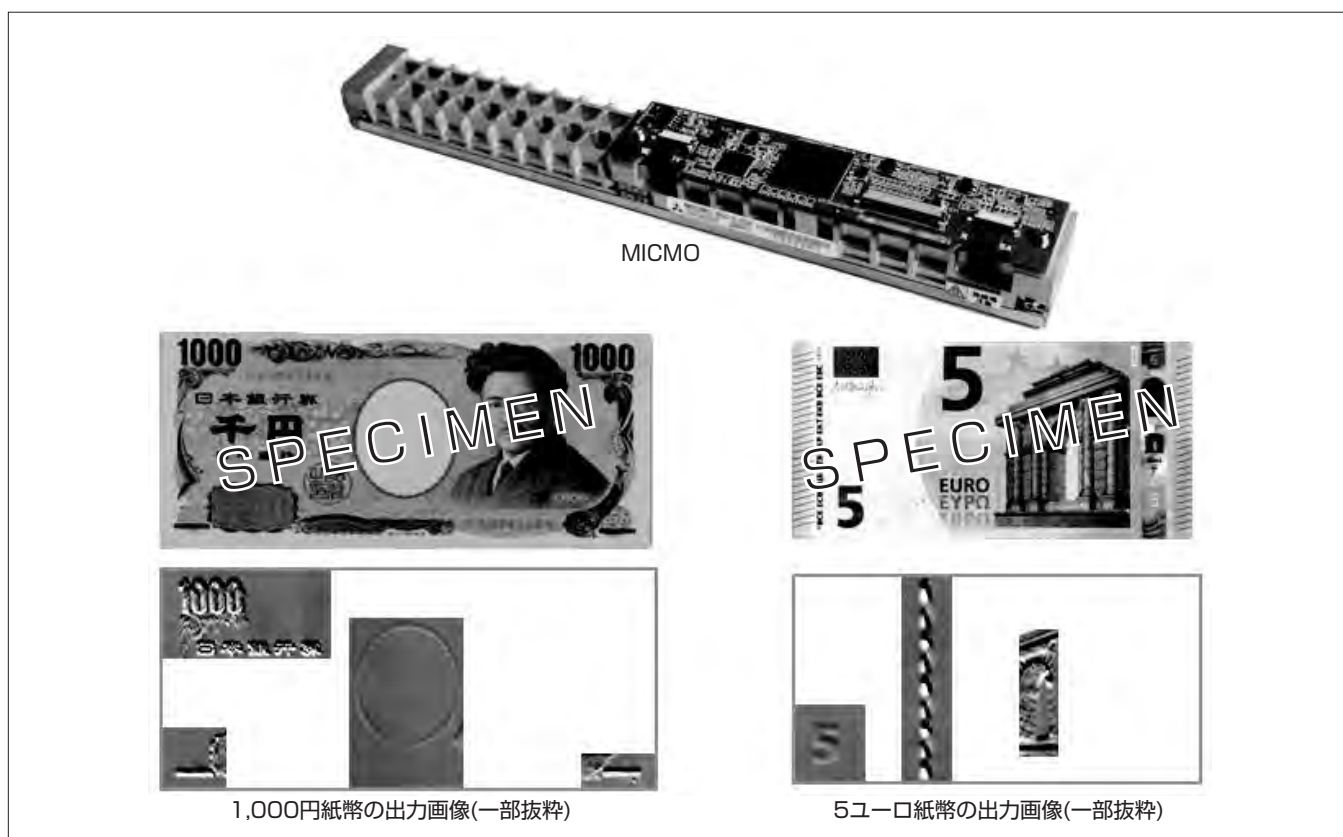
Tomokazu Ogomi, Jin Inoue, Kenji Shimohata

要 旨

高分解能ライン磁気イメージセンサ“MICMO (Magnetic Ink Checker MOdule)”は金融端末装置に搭載され、紙幣や小切手等に含まれる磁気インク等の磁気情報を読み取るデバイスである。従来の磁気センサの画素ピッチ10mmに対して、MICMOは0.5mmピッチと20倍の分解能を実現し、紙幣等に埋め込まれた高精細で微弱な磁気情報をイメージとして出力できることを特長としているため、偽札鑑別能力向上への貢献が期待できる。

このセンサには、感度の高い磁気抵抗効果 (Magnet-

Resistance : MR) 素子を採用し、三菱電機で開発した低雑音増幅器を含むアンプICを内蔵することで、検出媒体の微弱な磁気信号出力を高いS/N比 (Signal-to-Noise ratio) で読み取ることが可能となっている。さらに、マルチプレクサ、アナログ-デジタル変換回路、画素間のばらつき補正等を行う信号処理回路を搭載しており、1系統化して画像処理したものを10ビット長デジタルで出力するため、取り扱いやすいユーザーインターフェースと、ばらつきの小さい安定した出力を実現している。



高分解能ライン磁気イメージセンサ“MICMO”の外観と紙幣の磁気情報読み取り結果

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

◇一般論文◇

1. ま え が き

近年、偽札が精巧化しており、ATM(Automatic Teller Machine)等の金融端末装置ではより精度の高いセキュリティ対策が求められている。金融端末装置には光学センサ(可視光、赤外線、紫外線)、磁気センサ、厚みセンサ等が搭載されており、各センサの読み取り精度を上げることで偽札鑑別能力の向上を図っている。当社では、金融端末装置向け光学センサとしてデジタル出力で差別化した密着イメージセンサ(Contact Image Sensor : CIS)を開発・製造しているが、今回、紙幣等に含まれる磁気インク等の磁気情報をイメージとして出力できる高分解能ライン磁気イメージセンサ“MICMO”を開発した。

従来、金融端末装置の磁気センサは磁気情報の有無を確認する目的で搭載されていたため、ポイントセンサ又は低分解能(10mmピッチ)ラインセンサが多く採用されていた。しかし、近年、高精細で微弱な磁気情報が含まれている紙幣が増えてきており、精巧な偽札対策として磁気センサに対しても高分解能化、高S/N化の必要性が高まりつつある。MICMOは、このようなニーズに対応するために開発した磁気センサである。

本稿では、その概要と各部の特長、今後の展開について述べる。

2. MICMOの概要⁽¹⁾

MICMOの主要仕様を表1に示す。MICMOは、①紙幣

表1. MICMOの主要仕様

項目	仕様	
有効読み取り幅	90mm	190mm
画素ピッチ	0.5mm(50dpi相当)	
ライン周期	62.5~1,000 μ s/line (設定変更可能)	
データ出力方式	10ビット長デジタル出力	
制御インタフェース	SPI(Software Process Improvement)準拠	
電源仕様	5V \times 0.55A	5V \times 0.85A
外形	124 \times 25 \times 24(mm)	224 \times 25 \times 24(mm)
質量	150g	240g

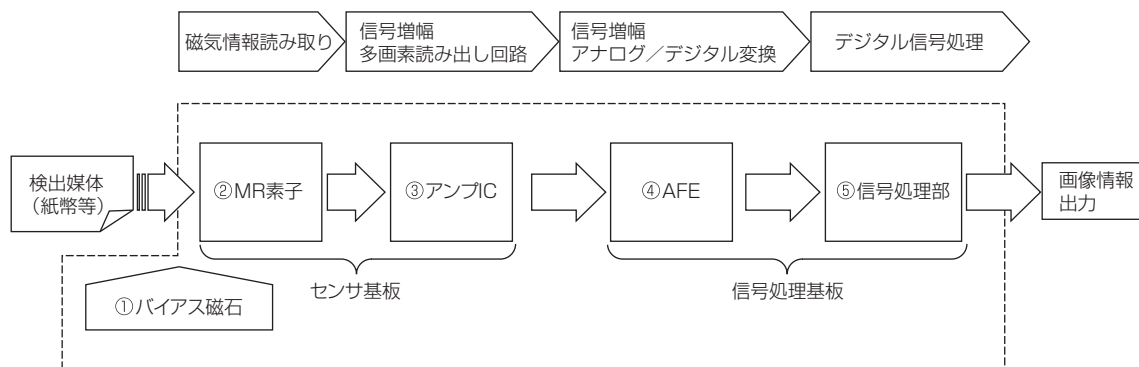


図1. MICMOの基本構成

等の検出媒体とMR(磁気抵抗効果)素子に磁束を印加するバイアス磁石、②検出媒体に含まれる磁気インク等の磁気情報を電気信号に変換するMR素子、③MR素子からの出力信号を低ノイズで増幅する低雑音増幅器と多画素読み出し回路(マルチプレクサ)を一体にしたアンプIC、④アンプIC出力を増幅してデジタル信号に変換するAFE(Analog Front End)、⑤デジタル変換した磁気出力信号に信号処理を行って客先システムへ出力する信号処理部からなる(図1)。従来の磁気センサは①と②だけで構成されたアナログ出力磁気センサデバイスであったのに対して、MICMOでは③~⑤を付加して微弱なアナログ信号をノイズに強いデジタル信号に変換して出力することで、システム側の取扱い性を向上させた。

3. MICMOの特長⁽²⁾

3.1 検出原理

MICMOの検出原理を図2、図3に示す。MICMOは外部磁束密度の変化を抵抗値の変化へ変換するMR素子を使用しており、ハーフブリッジ回路を構成することで温度特性等の品質の安定を図っている。図2にMR素子に印加される外部磁束密度とMR素子の抵抗変化率の関係を示す。バイアス磁石でバイアス磁束を印加することで、MR素子の感度が一番高くなるように構成している。なお、バイアス磁石は検出媒体に磁束を印加する機能も兼ねている。

図3に磁気情報を含む検出媒体がMR素子Aに近づく場合の検出原理を示す。MRチップ(MR素子A、B)には一定の電圧が印加されている。検出媒体がMR素子Aに近づく、検出媒体中に含まれる磁気インク等の磁性体によってMR素子Aにかかる磁束密度が変化してMR素子Aの抵抗値が変化する。そのため、信号出力端子の電圧の変化として検出媒体の磁気情報を検知することができ、さらに、検出媒体が進んでいくとMR素子Bにも影響が及ぶようになり同じ原理で検出媒体の磁気情報を検知することができる。

3.2 高感度／高分解能の実現

MICMOは感度の高いMR素子を採用して、図4に示す

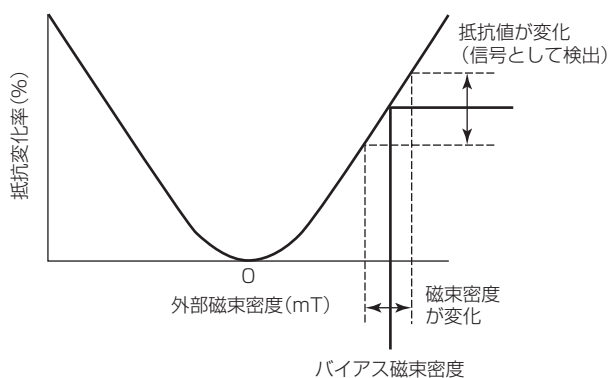


図2. MR素子の外部磁束密度と抵抗変化率の関係

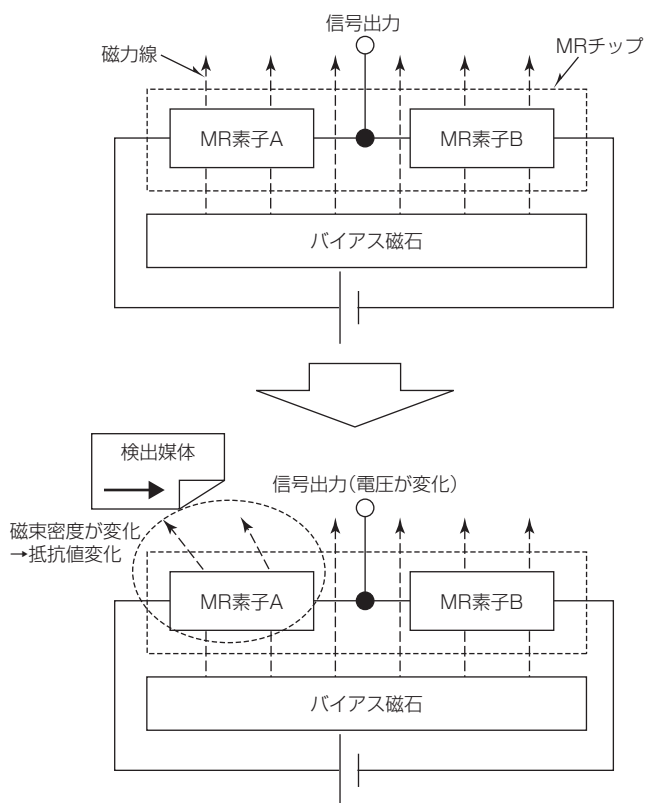


図3. MR素子検出方法

ようにMR素子を高密度に集積したMRチップを新規開発して、このMRチップを横一列に配置することで所定の読み取り幅の高分解能読み取りを実現している。このMR素子の画素ピッチは0.5mmであり、読み取り幅200mmでは400素子となる。図5の(b)に紙幣の大部分に磁気インクが使用されている1ドル紙幣の読み取り結果、(c)に従来磁気センサ出力相当画像を示す。比較すると情報量に大きな違いがあることが分かる。

3.3 高S/N比の実現

紙幣等に含まれる磁気情報出力は非常に弱く、MR素子から出力される信号レベルは極めて微小であり、鑑別に必要なS/N比を確保するためには低雑音増幅回路が必要となる。MICMOでは低雑音増幅器と多画素読み出し回路(マルチプレクサ)を集積した多チャンネルの専用アンプICを新

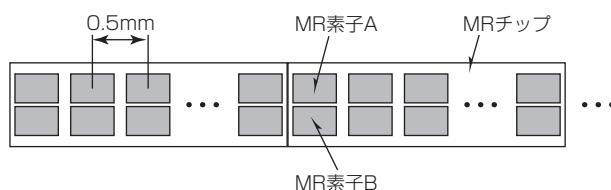


図4. MRチップ構成



(a) 1ドル紙幣



(b) MICMO出力画像(一部抜粋)

MR素子配列イメージ



MR素子配列イメージ

(c) 10mmピッチ磁気センサ出力相当画像(一部抜粋)

(MICMO読取結果を20chごとに平均化し出力)

図5. 1ドル紙幣読み取り結果



図6. 1,000ウォン左下磁気インク部出力画像

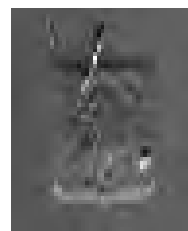


図7. 1,000ルーブル“OVMI(Optically Variable Magnetic Ink)”出力画像

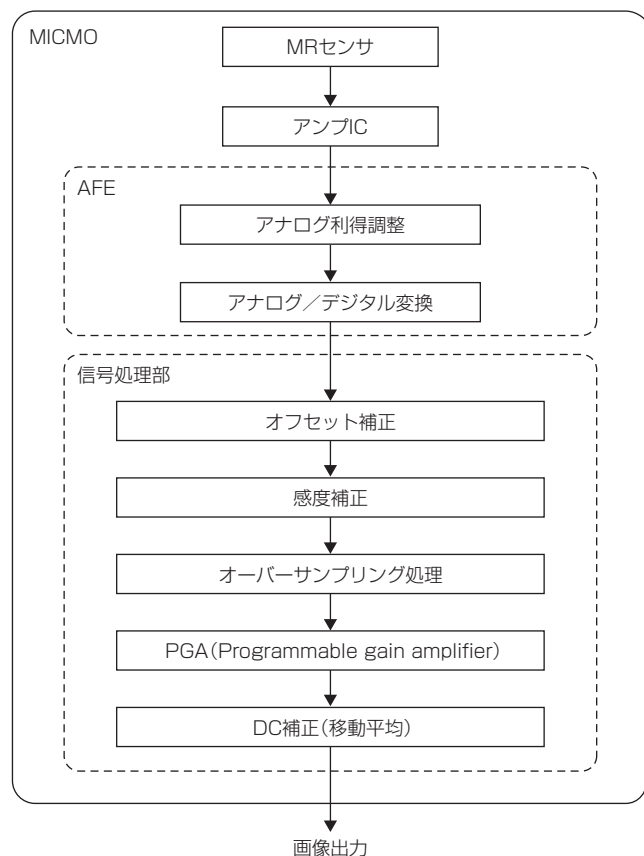


図 8. 信号処理部のブロック図

規開発し、これをMRチップと同一基板上に必要数実装して最短配線としたことでノイズの重畳を極力抑え、高いS/N比を確保している。

なお、低雑音増幅回路には、MR素子やアンプICの温度変動等による基準出力電位の変動に対して安定した出力を実現するため、クランプ回路を採用している。図 6、図 7 に代表的な紙幣の高精細、微弱パターンの取得画像例を示す。

3.4 信号処理機能

MICMOには、高分解能磁気イメージセンサ出力に最適化した各種信号処理機能を内蔵している。図 8 に信号処理部のブロック図を示す。また、MICMOの代表的な信号処理機能を次に挙げる。これらの信号処理機能はレジスタで設定可能である。

- (1) アナログ利得調整機能
識別する紙幣の磁気量に合わせて利得の最適設定が可能
- (2) アナログ／デジタル変換機能
1ライン400画素分の信号を時分割に高速／高精度でデジタル信号に変換
- (3) オフセット補正機能
画素ごとの基準出力のオフセットばらつきを補正
- (4) 感度補正機能
画素ごとのMR素子感度、アンプIC利得ばらつきを工場出荷時に調整したプリセット値で補正
- (5) オーバーサンプリング処理機能
副走査方向の高分解能化、高速搬送への対応、平均化処理によるS/N比改善を実現

4. 今後の展開

金融端末装置用磁気センサには、①検出媒体のソフト磁性体／ハード磁性体識別(当社にはハード磁性体だけを検出するハード磁気センサのラインアップあり)、②出力安定性(外部磁性体影響低減)、③光学センサとの一体化等の更なる高性能化の要求があり、現在これらの新たな要求にも対応する磁気センサの開発を進めている。

5. む す び

当社の高分解能ライン磁気イメージセンサ“MICMO”の概要と特長について述べた。高分解能、高S/N比、安定出力を備えたMICMOによって、従来困難であった高精細で微弱な磁気情報のイメージ化が可能となり、金融端末装置の偽札鑑別能力向上に貢献できると考えている。今後製品化を進めていくとともに他分野への展開に向けた市場調査も進め、適用拡大を図っていく。

参 考 文 献

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

モービルマッピングシステム(MMS)の進化

小澤 正*
吉田光伸*

Evolution of Mobile Mapping System

Tadashi Ozawa, Mitsunobu Yoshida

要 旨

三菱電機のモービルマッピングシステム(MMS)は、車両にGPS(Global Positioning System)、慣性計測装置(Inertial Measurement Unit: IMU)、レーザスキャナ、カメラ等の各種センサを搭載し、走行しながら周辺の三次元空間データを精密かつ効率的に計測するシステムである。これらは衛星システムから得られる正確な位置、姿勢によって実現している。

国内では、測量、地図作製などに必要となる三次元空間データの取得用として100台以上のMMSを出荷し、各種業務の効率化、高精度化が図られている。さらに、トンネル内計測、河川計測、地下計測、都市景観モニタなどに適用させた応用製品の投入も進めている。

こうしたMMSの活用分野の拡大と稼働率UPを背景に、取得データを計測後の“後処理”でないと確認ができないという課題や、万一の計測データの不備などで再計測が発生する等の計測の煩雑さも課題として浮上している。今回、

準天頂衛星を利用することで位置をリアルタイムに演算してMMSで計測全体のリアルタイム化を可能とし、これらの課題を解決している。

さらに、各種センサを搭載してより精細な画像を取得し、路面や壁面の検査での活用拡大を図りたいという要望や、従来の検査方法よりも簡易に計測を行って検査の効率化を図りたい等の要望もあり、これらの要望に応えるために各種開発を進めている。

また、自動運転の早期実現に向けた社会インフラ整備の加速も背景に、効率的に高精度な三次元道路データを取得できるMMSの活用拡大を行い、三次元地図データ基盤整備へのMMSによる高精度な三次元道路データの活用も開始されている。

このように、衛星を有効利用するMMSの技術を早期に実用化、深化させて防災・減災・インフラ維持管理・安全管理等のより大きな社会貢献を果たしていく。



三菱MMS標準機MMS-K320



リアルタイムMMSによる取得データ例



路面性状計測用MMS



簡易着脱型MMS

三菱電機MMSのバリエーション

左上は、3つのカメラと2つのレーザスキャナを搭載した三菱MMS標準機“MMS-K320”である。右上の図はリアルタイムMMSによって取得した走行中の三次点群を示している。左下は高精度カメラと高精度レーザスキャナを搭載した路面性状計測用MMSである。右下は車両の改修が不要で簡易に着脱可能なMMSである。

◇一般論文◇

1. ま え が き

MMSは、衛星測位技術、IT (Information Technology) 技術を利用して高精度に広範囲を効率良く計測できるシステムである。静止測量が1点での計測であるのに対して、車両に搭載して移動しながら計測でき、1秒間に数万～100万点の道路周辺の空間座標を得ることができる。これを、高度な位置、姿勢演算技術と融合させ、高精度で詳細かつ効率的に三次元空間データを取得することに成功している。

本稿では、MMSの技術を更に進化させ、より早く、詳細に、簡易に計測できるシステムの開発の取組みについて述べる。

2. 当社MMS

MMSでは、GPSアンテナ及び受信機を3台、IMU及び車両の速度を検出するオドメータのセンサから得られる情報で車両の位置と姿勢を計算する。さらに、レーザスキャナから得られる情報から三次元点群の座標を得る。これに、カメラ画像から色を取得して点群に色を付与することができる⁽¹⁾。三次元点群の取得・処理量は、標準機で55,000点/秒、高精度レーザスキャナ搭載機で100万点/秒の能力を持っている。MMSで走行して取得した道路周辺の三次元点群は1点ごとに座標を持っており、三次元情報としてコンピュータ上に再現し、任意の方向から俯瞰(ふかん)したり距離を計測することができる。図1はMMS標準機で取得した三次元点群の例である。図の右下の拡大図を見ると、点の集まりであることが分かる。

MMSは、用途・目的に応じて異なる搭載センサを選択することができる。主な用途と搭載センサは次のとおりである⁽²⁾。

- (1) 公共測量、地図作製(標準機)
- (2) 三次元景観等(長距離レーザスキャナ搭載機)
- (3) トンネル等インフラ管理(高精度レーザスキャナ搭載機)



図1. MMS標準機で取得した三次元点群の例

- (4) 河川計測等(全方位カメラ搭載機)

昨今は、道路を含めた周辺の三次元空間データの蓄積を計画的に実施し、自動運転支援のための三次元道路データの利用が検討され、多様な活用方法の検討が進んでいる。

3. MMSの進化

MMS進化の方向と要素技術について述べる。

3.1 リアルタイムMMS

現在、MMSでの三次元空間データの取得は全て計測後の後処理によるものであり、即時にデータを得ることができないことが課題の1つであった。リアルタイムで三次元空間データを取得できれば、迅速な状況判断を支援すること、計測結果を現場で確認すること等、データ取得の効率化は元より、災害発生時の被害程度をリアルタイムで三次元空間データとして取得・活用することで、救助活動や復旧活動の効率化と迅速化を図ることが可能と考える。

既に三次元空間データのリアルタイム取得とコンピュータ上での再現は実現しており、これによって、車で走行しながら道路とその周辺情報(状態)をリアルタイムで把握することができる。図2はその例であり、走りながら任意の方向から三次元点群を確認することもできる。

また、この技術を発展させることで前回データとの差分が抽出でき、変化物(不審物等)の早期発見、警戒監視にも可能性を持っており、具体的には次のような用途に活用できると考えている。

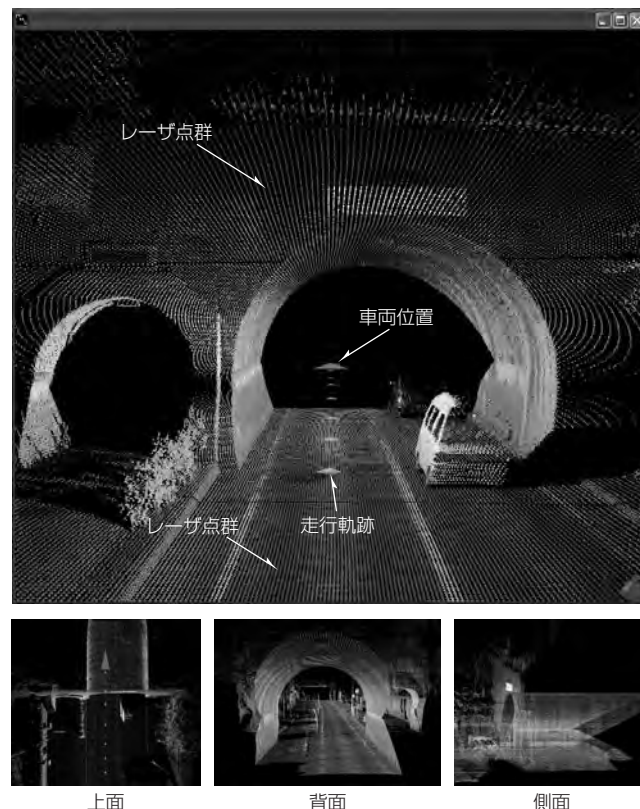


図2. リアルタイムMMSで取得した三次元点群例

(1) 測量

現場での状況判断，測量業務の効率化

(2) 災害対策

災害現場や被害状況の即時把握から救助活動，復旧活動の早期検討支援

(3) 警備・監視

パトロール結果の即時把握，変化箇所・変化物(不審物等)の迅速な発見

(4) 社会インフラ管理

現場での即時目視確認，変化箇所への迅速なマーキング

(5) ITS(Intelligent Transport Systems)

三次元地図基盤整備への対応，高精度地図と簡易測位結果のマッチングによる自動運転支援

例えば道路パトロールでは，道路落下物，陥没，電線の垂れ下がり，街路樹の伸びすぎ，白線のかすれ，違法駐車車両などの目的物を正確な位置とともにリアルタイムに検出することが可能となる。この情報を集中管理することで，迅速な対応が可能になる。

さらに，三次元空間データのリアルタイム化技術は，2018年度に開始される準天頂衛星のcm級測位補強サービスを利用したリアルタイム高精度測位端末(図3)として開発を進め，各種実験を行って製品化を目指している。

3.2 路面性状計測用MMS

道路は，長期間の使用でひび割れたり，走行によって凹凸(わだち掘れ)したりするため，定期的な補修が必要である。

“路面性状”とは，舗装道路の劣化度，健全性を示す指標で，MMSを用いて舗装調査規定に沿った精度で計測する装置が“路面性状計測用MMS”である。この装置によって，路面性状の計測を三次元空間データ計測と同時に実行でき，計測結果を地図上の位置に正確に合わせて表現した道路管理図面の作成ができる。さらに，高精度な位置を把握できるので，該当箇所の経年管理と差分検出等で劣化の速さを推測して再舗装が必要な時期の予測をするなど，効率的な補修計画立案の一助になるとも考えている。

路面性状の重要な要素⁽³⁾の1つである路面の“ひび割れ”を検出するためには，1mm以上のひび割れを検出・撮影しなければならない。この路面のひび割れを検出・撮影するため，舗装面専用の撮像システムを開発している(図4)。具体的には，解像度の高いラインカメラで車両の進行に同期させて路面を撮像することで，一定の解像度で路面撮像することを実現している。標準1.00mm/ピクセルの撮像が可能である。図5は走行しながら路面を撮像した例であるが，0.5mm程度のひび割れも判別できている。右側の解像度チャートでは0.1mmの線も判別できている。また，路面に向けた照明装置にはレーザを採用し，周辺のを幻惑することなく一般車両と同様に走行しながら計測することが可能である。

路面性状のもう1つの要素である“わだち掘れ”に関して，高精度レーザスキャナを搭載して3mm以下の道路の凹凸を判別可能である。このように“MMS”と“舗装面専用の撮像システム”を同時に搭載しているため，位置と三次元形状と路面性状を同時に計測でき，効率的に計測後のデータを管理できる。

この装置(車両)は，平成27年度一般財団法人土木研究センターの路面性状自動測定装置の性能確認試験に合格している。

3.3 簡易着脱型MMS

簡易に着脱可能なMMSの開発も行っている。既存のMMSは，車両に専用ユニットを搭載して車内にラックを設置する等，簡易な着脱を前提にはしていない。昨今，多様化される活用シーンに向け，三次元空間データの移動体計測を容易に実現するため，可搬可能で車両への搭載が容易なMMSの製品化を進めている。

軽量かつ高剛性を実現する簡易着脱型MMSの開発を完



図3. 準天頂衛星の高精度測位端末のプロトタイプ

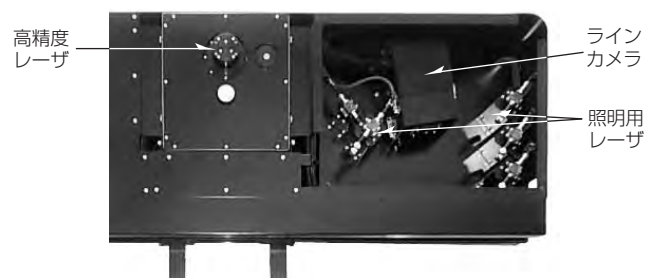


図4. 舗装面専用のシステム

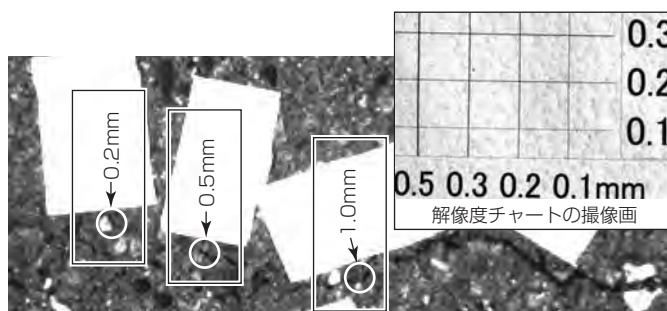


図5. 高精査モードで撮像した路面画像と解像度チャート

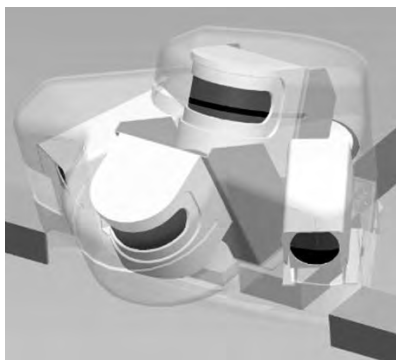


図 6. 集約したセンサと機器

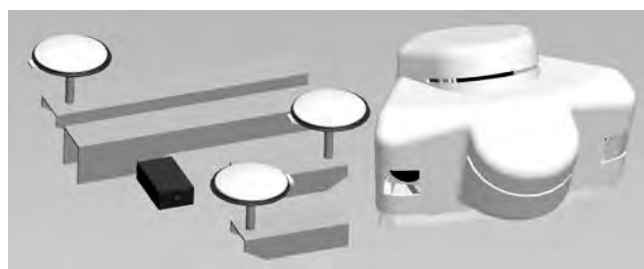


図 7. 運搬時の分解状態

了し、機器を集約して60×60×60(cm)内(突起物を除く)に収めている(図6)。また、軽量化と構造のスリム化も図り、総質量を当社標準MMSの35%以下とした。さらに省電力化を図るとともに、可搬性に関しても分解して運搬性の向上を図り、持ち運びが可能である(図7)。

3.4 鉄道向けMMS

鉄道、線路周辺、鉄道トンネルでも道路と同様に維持管理が必要であり、より効率的で高精度な計測装置が求められている。線路周辺の三次元形状を計測することで安全管理区域内への建築物や電線の侵入、建材の劣化、トンネルの健全性確認にも利用でき、取得されたデータは将来の鉄道路線、インフラ管理用の基礎データとしても活用できる。ただし、鉄道に利用する場合は、道路と異なり自由にコースを変更して衛星の捕捉をするような走行はできない。さらに、地下鉄での活用を考えると衛星の捕捉は望めず、既存のMMSの鉄道利用では制約事項が多い。

このため、特に地下鉄計測などで有効に活用するために、衛星不可視(活用できない)でも高精度三次元空間データを計測可能とする鉄道向けMMSの開発を行った。これによって、場所や時刻に依存しない計測が可能となっている。ただし、衛星不可視の計測モードでは相対位置での活用となる。

図8(a)は衛星可視状態で計測した結果、同図(b)は衛星を利用せず計測した結果である。形状としては同じものが計測されることが分かり、高精度での再現データの取得が可能である。

鉄道向けには“三菱インフラモニタリングシステム”とし



(a) 絶対位置計測

(b) 相対位置計測

図 8. 絶対位置計測と相対位置計測による三次元点群

てサービスを開始しており、変化を確認するデータの取得用に鉄道向けMMSを活用している。

4. む す び

MMSの進化と、要素技術について述べてきた。今後のインフラ、施設管理では、リアルタイム、三次元が主流になっていくと考えられる。MMSは走行しながら高精度三次元空間データを計測して計測作業の効率化に寄与しているが、さらに、道路、路面、トンネル、鉄道などの社会基盤の維持管理を安全にかつ高精度に行えるという利便性も高めてきている。これらをリアルタイムに、高精度に、高精細に、容易に、場所や時間に依存せず実施できるようにすることで、社会の安全安心の向上、また、災害発生時の被害査定や復興計画へ即座にデータを供することができるなど、更なる効率化を図ることができる。

進化したMMSの活用で、より多くのシーンでの高精度三次元空間データの取得・蓄積を実現し、経年変化分析の効率化、将来劣化予測分析の短縮化等が図られ、安全・安心な社会の更なる向上を加速できるものとも考えている。また、高精度三次元空間データ(地図)と簡単な自己位置測位結果をリアルタイムでマッチングしながら車両走行を実現する自動運転支援システムへの適用も期待でき、MMSを更に深化させて行きたい。

MMSの開発と利用用途の拡大を通じて社会貢献を果たしていく。

参 考 文 献

- (1) 瀧口純一：高精度GPS移動計測装置三菱モバイルマッピングシステム、情報処理学会、研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM)、2011-CVIM-176, No.20, 1~5 (2011)
- (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) 国土交通省 道路局：道路ストックの総点検 総点検実施要領(案)【舗装編】、及び総点検実施要領(案)【舗装編】(参考資料) (2013)