

# 三菱電機技報

3

2015

Vol.89 No.3

宇宙利用拡大と情報通信社会を支える先端技術



## 目次

### 特集「宇宙利用拡大と情報通信社会を支える先端技術」

総務省における宇宙開発利用の取組みと、  
技術開発成果の産業展開・社会実装について ..... 1  
山内智生

宇宙利用拡大と情報通信社会を支える先端技術 ..... 2  
小山 浩・中村太一・小澤 正

静止気象衛星ひまわり 8号・9号の地上システム ..... 7  
腕野一磨・田中 剛・西村修司

準天頂衛星システムによる都市部での  
衛星測位の可用性の拡大 ..... 12  
瀧口純一・中田圭二・津田喜秋・富樫健司

準天頂衛星cm級測位補強サービスの鉄道環境での評価試験 ..... 16  
加賀谷篤大・角谷卓磨・白樫智也・金井利喜・横山啓之

陸域観測技術衛星2号(ALOS-2)向け  
データ中継衛星通信系アンテナ用メカニズム ..... 20  
大和光輝・徳永裕典・中川 潤・猿渡英樹・鳩岡恭志

衛星搭載型合成開口レーダの利用技術 ..... 24  
遠藤 勉・入部純一・横田裕也・中村聖平・吉岡秀樹

静止軌道衛星用次世代リチウムイオンバッテリー ..... 28  
岡 寿久・大迫庸介・吉岡省二・半田誠一・清川 丈

風況観測用ライダ“DIABREZZA” ..... 32  
梶山 裕・藤井康宏・酒巻 洋・小竹論季

40GHz帯を用いた移動体無線通信システム ..... 37  
金正利和・鈴木清文・塚本 薫

位相回転系列を用いた拡散通信モデム ..... 41  
白井 忠・松木優治・岡崎彰浩

衛星用太陽電池パネルの健全性評価手法 ..... 45  
関根一史・竹谷 元・世古博巳・小林裕希・宇都宮 真

### 一般論文

設計品質リスクを未然にあり出す新手法  
“XCN(クロスチェック付きなぜなぜ分析)” ..... 49  
鶴田明三・春名一志

Leading Edge Technologies to Support Utilization of Space and ICT Society

MIC's Approach Regarding Space Communications Development and Utilization, and  
the Expectation of R&D Results for Industrial Development and Social Implementation  
Tomoo Yamauchi

Leading Edge Technologies to Support Utilization of Space and ICT Society  
Hiroshi Koyama, Taichi Nakamura, Tadashi Ozawa

Ground System for Himawari-8/-9 as Geostationary Meteorological Satellite  
Kazuma Udeno, Tsuyoshi Tanaka, Shuuji Nishimura

Availability Enhancement of Satellite Positioning Service in Urban Canyon Utilizing Quasi-Zenith  
Satellite System  
Junichi Takiguchi, Keiji Nakata, Yoshiaki Tsuda, Kenji Togashi

Evaluation of Centimeter Positioning Reinforcement in Railway Environment  
Atsuhiko Kagaya, Takuma Kadoya, Tomoya Shirakashi, Toshinobu Kanai, Hiroyuki Yokoyama

Data Relay Communication Antenna Mechanism for Advanced Land Observing Satellite-2  
Mitsuteru Yamato, Hironori Tokunaga, Jun Nakagawa, Hideki Saruwatari, Yasushi Hatooka

Advanced Techniques for Satellite Synthetic Aperture Radar Applications  
Tsutomu Endo, Koichi Iribe, Yuya Yokota, Shohei Nakamura, Hideki Yoshioka

New Generation Lithium-Ion Battery for Geosynchronous Earth Orbit Satellite  
Toshihisa Oka, Yosuke Osako, Shoji Yoshioka, Seiichi Handa, Takeshi Kiyokawa

Doppler LIDAR System "DIABREZZA" for Measuring Wind Condition  
Yutaka Kajiyama, Yasuhiro Fujii, Hiroshi Sakamaki, Nobuki Kotake

Mobile Wireless Communication System on 40GHz Frequency Band  
Toshikazu Kanemasa, Kiyofumi Suzuki, Kaoru Tsukamoto

Spread Spectrum Modem Using Phase Rotation Sequences  
Tadashi Shirai, Yuji Matsuki, Akihiro Okazaki

Health Monitoring Method for Satellite Solar Array Panel  
Kazushi Sekine, Hajime Takeya, Hiromi Seko, Yuki Kobayashi, Shin Utsunomiya

New Analytical Method "XCN" to Manage Risks of Quality during Early Design Phase  
Hirozoh Tsuruta, Kazushi Haruna

### 特許と新案

「隊列走行支援装置」

「測位ドライバおよび測位プログラム」 ..... 53

「ヘリコプター衛星通信方法、並びにその方法に使用  
するヘリコプター搭載通信装置及び地上局通信装置」 ..... 54

### 表紙：宇宙利用拡大と情報通信社会を支える先端技術

三菱電機は、我が国の宇宙分野におけるリーディングカンパニーとして衛星開発のみならずICT(Information and Communication Technology)技術の進展に呼応し、衛星利用技術、観測・通信・測位の分野で社会の発展に貢献している。

①は陸域観測技術衛星2号(ALOS-2)である。電波による観測を行う合成開口レーダ(PALSAR-2)を搭載している。昼夜天候を問わない観測が可能であり、かつ、高分解能化や広域化を実現しており、災害発生時の詳細観測から広域災害モニタリングまで、広く社会の安全・安心・防災に貢献する。

②はレーザを用いて遠隔の風向風速を計測する風況観測用ライダ“DIABREZZA”である。風力発電や航空分野等での安全・安心・防災の強化に貢献していく。



①



②

巻/頭/言

総務省における宇宙開発利用の取組みと、技術開発成果の産業展開・社会実装について

MIC's Approach Regarding Space Communications Development and Utilization, and the Expectation of R&D Results for Industrial Development and Social Implementation

山内智生  
Tomoo Yamauchi



2015年1月、新たな宇宙基本計画が策定された。この宇宙基本計画は、その前文に記載されているとおり、国家安全保障の基本方針として2013年12月に策定された“国家安全保障戦略”に示された新たな安全保障政策を十分に反映するとともに、産業界の投資の予見可能性を高め、産業基盤を強化するため、今後20年程度を見据えた10年間の長期整備計画となっている。また、我が国の基本的スタンスを、“我が国は、宇宙の持つ潜在力を我が国の安全保障能力の強化や国民生活の向上等に最大限活用するとともに、宇宙を活用して国際社会における我が国のリーダーシップを強化し、人類・社会全体の安全と安定、繁栄と発展の実現に貢献していく”とした上で、政府が取り組むべき一連の政策を具体的かつ体系的に示すこととしている。

今回の宇宙基本計画では、科学技術と安全保障・産業振興の有機的なサイクルの構築がうたわれているが、これは、出口を見据えた研究開発を推進するとともに、社会・産業展開を行う際に見いだされる気付きや教訓等を研究開発にフィードバックすることで宇宙分野の持続的な発展を目指すという姿勢であると考えられる。

総務省も、宇宙政策にかかわる政府の一員として、通信・放送、測位、地球観測等様々な分野に関係しているが、その観点から、総務省における宇宙開発利用の取組みの一端を紹介し、その取組みにおける技術開発の重要性とともに、その技術開発に加え、産業展開、社会への実装という観点での産業界への期待を申し上げたい。

通信・放送分野については、2006年打ち上げの「きく8号」(ETS-Ⅷ)、2008年打ち上げの「きずな」(WINDS)以来、新しい技術試験衛星についての計画が定まらない状態が続いていたが、今回の宇宙基本計画では、安全保障・国際競争力の観点から最先端の技術を獲得・保有するため、2015年度中にその在り方について結論を得た上で2021年頃の打ち上げを目指すこととされている。このため、総務省は、文部科学省、経済産業省とともに、この技術試験衛星について技術的な検討を始めたところである。また、高抗たん性や送受信データ量の増大に対応する光データ中継衛星の開発にも着手予定であるが、これらの衛星の開発に当たっては、地上系ネットワークの動向、特に第5世代移動通信

(5G)に対応する衛星通信の在り方を意識するとともに、我が国の衛星通信システムや技術の国際展開を推進するために求められるものを意識することが必要である。

測位分野については、2018年頃から準天頂衛星が4機体制となる見込みであることを踏まえ、我が国のみならず、準天頂衛星によるサービスを受けることが可能な東南アジア・オセアニア諸国に対して、衛星測位を含めたG空間サービスの有効性を示すことで、G空間サービスの浸透と国際展開を図っていきたいと考えている。

地球観測分野では、安全保障に加え、防災・減災のための災害・リスク情報の提供、地球環境問題への適切な対応に必要な客観的なデータの提供、また様々な産業の高度化・効率化・予測に利用可能なデータの提供など、幅広い目的でリモートセンシング衛星の活用が期待されている。政策や産業からの期待に具体的に応える衛星の開発など、優先順位を念頭に置きつつ、その発展に期待したい。

また、従来の“衛星産業”が意味していた範囲を拡大させ、衛星及びそれに付随するシステム・部品だけでなく、衛星によって取得された情報同士又はほかの情報と組み合わせ、新たな知識・知見を産み出す、いわゆる“ビッグデータ”による付加価値の創出も範囲に含めていくことが、今後の衛星産業の発展のためには重要である。

この付加価値という観点では、今後の国際展開を考える上で、個々のインフラ単体だけではなく“パッケージインフラ”、すなわちハードウェアだけでなく、ソフトウェア、アプリケーション、そして利用するサービスを総体的に提案し、先方に訴求力を持つものとする意識することが重要である。このためには、ICT (Information and Communication Technology) そのものに加えて、実際の利用目的となるソリューション、例えば、防災、教育、医療、農業等々を一緒に展開することが求められる。

総務省では、情報通信審議会に“新たな情報通信技術戦略の在り方”の諮問を2014年12月に行い、今後5年間程度のICT分野の研究開発像を予見する作業を開始したところである。

宇宙分野を含め、ICT分野の研究開発、そしてその成果の社会・産業への展開を進めることによって、社会・経済の発展、生活の質の向上を是非実現したいと考えている。

# 巻頭論文

## 宇宙利用拡大と情報通信社会を支える先端技術



小山 浩\*



中村太一\*\*



小澤 正\*\*\*

Leading Edge Technologies to Support Utilization of Space and ICT Society

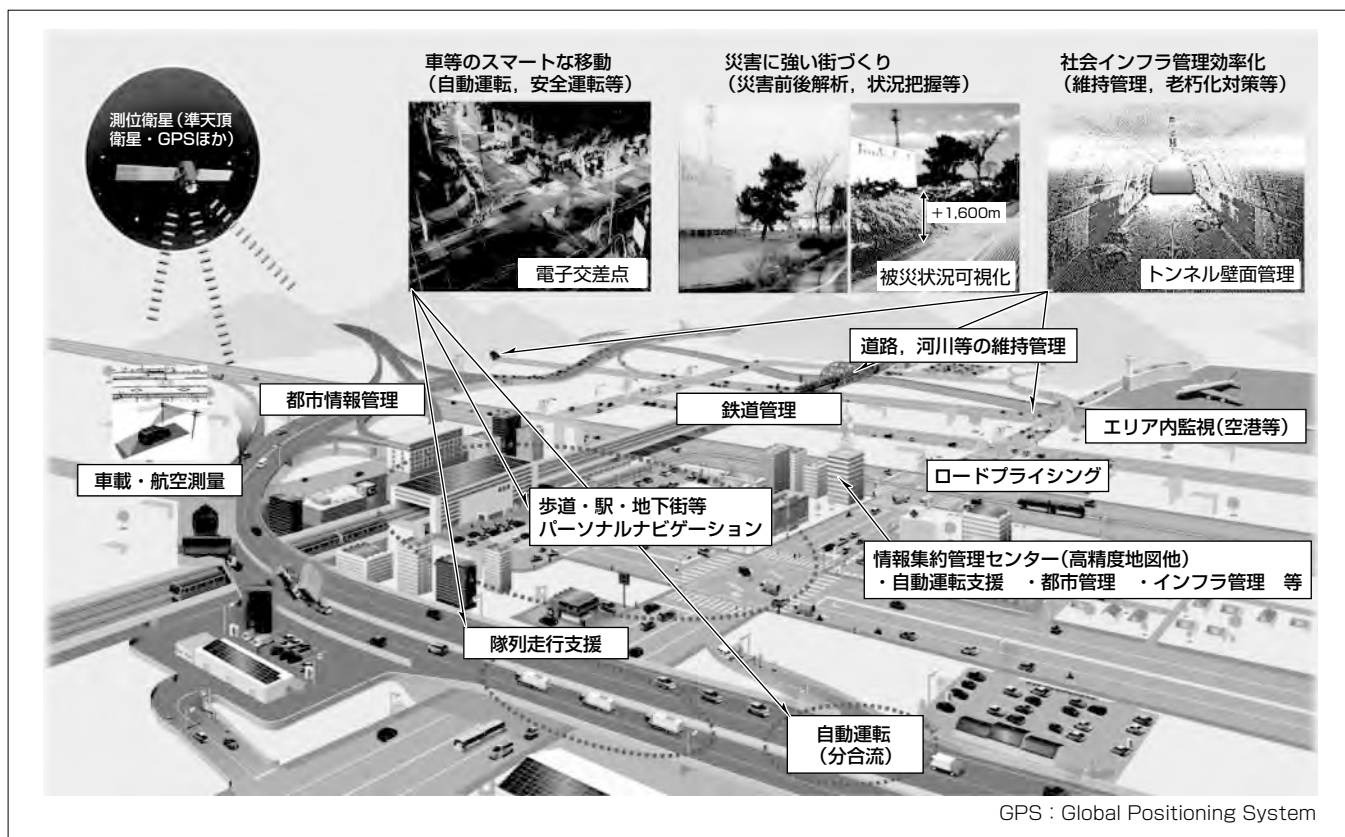
Hiroshi Koyama, Taichi Nakamura, Tadashi Ozawa

### 要 旨

2013年に制定された“宇宙基本計画”で、“利用を重視し、出口戦略を明確にした”宇宙政策の新たな方向性が提示された。この方向性をより具体的な計画として規定するため、“新宇宙基本計画”が2015年1月に策定された。“新宇宙基本計画”では、国内外における宇宙利用拡大を促進するため、長期的な展望に立った宇宙開発利用、及び産業基盤整備に関する中長期ビジョンが示されている。観測分野に対しては、公共・ビジネス利用に関するニーズ、利用の在り方を明らかにした上で、これに資する衛星群を継続的に整備する方針が示されている。通信放送分野に関しては、商用通信衛星市場が宇宙利用の最大のマーケットであるとの認識の下、国際競争力強化に資する先進的衛星・新規要素技術の実証、技術試験衛星のシリーズ化が挙げられてい

る。また、衛星測位分野に関しては、準天頂衛星の利活用が最大の課題であり、2018年頃を目指した4機体制の整備、さらに持続測位が可能となる7機体制の早期確立に加え、国内、及びアジア太平洋を中心とした諸外国における準天頂衛星利活用の推進が示されている。

本稿では観測、通信放送、衛星測位の各分野における宇宙利用動向、及びそれらに対応するための各種衛星に対する三菱電機の見組み状況を述べる<sup>(1)(2)</sup>。一方、2020年に開催される東京オリンピック・パラリンピックは、我が国における最新の宇宙利用技術の“ショーケース”として、その機会活用が期待されている。今後の急速な利用市場拡大が期待される衛星測位分野を中心に、宇宙利用技術の確立・拡大に向けた当社活動状況を併せて述べる。



### 衛星測位による三次元位置情報を用いたサービス

高精度測位社会では、三次元位置情報の活用が期待されている。準天頂衛星によって取得される高精度測位情報、観測衛星によって取得される広域観測画像等、多様な情報を三次元位置情報上に重ね合わせて処理することによって、安全・安心・防災に貢献する新たなサービス、新産業の創出が可能となる。

# 1. ま え が き

地上におけるICT (Information and Communication Technology) 技術の進展は、衛星がもたらす大量のデータの利用を大幅に促進しつつあり、また衛星側もこれに応える実用技術を蓄積してきている。

本稿では、観測・通信放送・測位といった主要衛星種別ごとにその利用動向を述べ、さらにこれらを実現するために必要となる衛星技術及び関連利用技術を述べ、当社の技術がどのように貢献しているかを述べる。

また、これらの各種衛星はもはや個別に利用されるというよりは、その複合データを地理空間情報として複合的に利用される時代に突入している。準天頂衛星による高精度測位情報はその核をなすものであり、その利用拡大に向けた当社の取組み事例について述べるとともに、地理空間情報の利活用を1つの基軸として我が国産業界の取組みについても述べる。

## 2. 観測衛星の利用動向と当社の技術

### 2.1 観測衛星の利用動向及びニーズ

宇宙を活用した地球規模の観測によって、国際社会と我が国が直面する大規模災害、資源、エネルギー、気候変動、環境、食糧等の各種地球規模課題の解決に貢献することができる。

陸域における地震・火山・台風による大規模災害に対する早期災害情報の把握、海洋における流水、船舶運航に対する安全確保やオイル流出などの海洋汚染に対する監視等、衛星からの広域観測に対するニーズが高まっている。これらのニーズに対応するため、観測衛星には光、赤外、電波を使った様々なセンサが選別・搭載され、速報性、視認性、広域性の高い観測要求に対応している。高度な観測に対応するため、観測衛星は、搭載センサ性能の向上だけでなく、俊敏かつ安定した衛星軌道制御や多くの観測データをいち早くユーザーへ届ける衛星-地上局間の通信手段、地上に届けられたデータを利用者のニーズに合わせて画像処理する技術に支えられている。大気・気候観測では、マイクロ波放射計(MSR)によって、地球規模の水循環(水蒸気、海面水温、土壤水分、雪氷など)を観測し、地球環境の変化を捉えることで、気象・降水予測など様々な分野で、欧米からアジアにいたるまで裾野の広いニーズに応えている。温室効果ガスの継続モニタリングは、人類だけでなく全ての生態系が持続的な活動を続ける地球環境を維持する上で重要な情報を提供する。また、気象衛星ひまわりの観測データに関しても、国内だけでなくアジア太平洋の30以上の国や地域に配信され、これら地域の気象業務に欠かせない存在となっている。

### 2.2 当社観測衛星及び関連利用技術

陸域・海洋観測分野では、2014年5月に陸域観測技術



図1. ALOS-2

衛星2号(ALOS-2)(図1)が打ち上げられ、搭載されたLバンド合成開口レーダ(PALSAR-2)によって、国土データの蓄積や災害時の状況把握のための観測が始まっている。PALSAR-2は、電波を用いたセンサであり、昼夜問わず、また台風や火山の噴煙等の大気状態が悪い場合でも観測できる特長とともに、Lバンド合成開口レーダとしては世界最高レベルの高分解能(1m)や広域(490km)の観測性能を実現している。またALOS-2は、基準軌道に対して±500mの軌道を保持できる自律軌道制御技術、800Mbpsという高速データ伝送技術等を備えることで高精度な観測データを迅速にユーザーに送る能力を持っている。さらに、これらの衛星運用を支える地上システムは、緊急事態に柔軟に対応し、ユーザーに配信する画像プロダクトの視認性をより高めるため、これまで培った画像処理技術をベースに構築されている。今後は、より高度なユーザーニーズに応えるため、多くの有効な情報を得ることができる判読性の高い情報提供を目指していく。

大気・気候観測分野では、海洋観測衛星(MOS-1)搭載のマイクロ波放射計(MSR)、環境観測技術衛星(ADEOS-II)搭載の高性能マイクロ波放射計(AMSR)、米国NASAの衛星Aqua搭載の改良型マイクロ波放射計(AMSR-E)に続いて、2012年に打ち上げられた水循環変動観測衛星(GCOM-W1)搭載の高性能マイクロ波放射計(AMSR2)を開発し、継続的な性能向上を実現している。AMSRのデータは、米国、中国、日本を始めとする全世界の機関・組織が利用しており、利用データ量は年間約300万ファイルに上る。また、地球温暖化防止のため、主要な温室効果ガスである二酸化炭素・メタンを測定する温室効果ガス観測技術衛星“いぶき”(GOSAT)の観測データは、地球温暖化・気候変動の解明のため、米国、中国、日本を始めとする世界50か国以上、2,500機関以上のユーザーに配信され、日々活用されている。“いぶき”の後継機では、当社は搭載センサを含む衛星システム、及び観測データ処理を含む地上システムの開発を担当している。

気象観測分野では、運輸多目的衛星2号(ひまわり7号)

に続き、2014年10月に打ち上げられたひまわり 8 号、2016年に打上げ予定のひまわり 9 号と地上画像処理システム開発を担当している。ひまわり 8 号は、可視+赤外チャネル数、観測頻度、観測対象とも飛躍的に向上させた気象観測センサを搭載し、衛星の姿勢決定精度だけでなく、広帯域放射計姿勢決定系も適用している。同等の放射計は2016年に打上げ予定である米国の気象衛星GOES-Rにも搭載予定であるが、ひまわり 8 号が世界に先駆けて観測データを発信することになる。

### 3. 通信放送衛星の利用動向と当社の技術

#### 3.1 通信放送衛星における市場動向、及び利用者ニーズ

世界の衛星通信・放送需要は今後も拡大基調にあり、大容量通信かつ長寿命(10~15年)を志向する静止衛星では、衛星電力及び質量が増大し、大型化する傾向にある。通信・放送事業者が高機能的衛星を長期にわたり持つことで効率化を図ろうと企図していることが背景にある。

従来使用されているC帯、Ku帯は既に、周波数制約上飽和状態にあるが、これら帯域の通信放送衛星については継続的な切換え需要が期待される。一方、Ku帯より高い周波数帯のKa帯では、広帯域、狭ビーム幅による大容量伝送が可能のため、新規の大容量通信需要を満たすKaバンドマルチビームによるHTS(High Throughput Satellite)の活用が注目されている。HTSは仏国Eutelsat社、米国Viasat社ほか、既に軌道上に衛星を配備して運用を行っており、ブロードバンド・インターネット、直接放送衛星など多様な用途に使用されつつある。また、衛星質量低減による打上げコスト削減を図るため、静止軌道への投入用推薬を不要とするオール電化衛星の技術(電気推進技術)も今後、不可欠な技術として普及しつつある。

#### 3.2 当社通信放送衛星ラインアップと関連技術

当社は(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)委託によるデータ中継技術衛星(DRTS)、技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)の開発成果をベースに、社内開発、衛星生産方式の標準化、工期短縮などの諸施策を実施し、衛星標準バス“DS2000”を確立し、DS2000バスの商用衛星市場への投入を実現した。DS2000バスを採用した通信放送衛星として、2005年にスーパーバード<sup>(注1)</sup>C2号機(SB-C2)を受注し、2008年に軌道上引き渡しを行った。さらに、2008年には日本初の海外市場向け国産衛星となるシンガポールと台湾の通信会社が共有するST-2を受注し、2011年に軌道上引き渡しを行った。その後、欧米の衛星メーカーと厳しい競争の下、2011年にトルコのTURKSAT-4A/4B 2機を、2014年にカタールのEs'hail2を受注する等、軌道上実績を積み上げ、国際市場における認知度を高めつつある。これらの通信放送衛星の通信系の帯域情報を表1に、また、代表例としてTURKSAT-4A/4Bを図2に示す。

SB-C2の通信系はKu帯であったが、その後に受注した

表1. 当社通信衛星の通信系帯域情報

衛星名	帯域
SB-C2	Ku帯
ST-2	C帯
	Ku帯(K1)
	Ku帯(K2)
	Ku帯(K3)
TURKSAT-4A	Ku帯
	Ka帯
TURKSAT-4B	C帯
	Ku帯
	Ka帯



図2. TURKSAT-4A/4B

衛星では時代の趨勢(すうせい)を反映し、Ka帯の搭載が要求される等、大容量通信に対応する技術開発が求められている。世界の商用通信放送衛星市場における国際競争力の維持・拡大には、次世代に向けた衛星バスの大型化、通信ペイロードにかかわる要素技術の継続的な開発と軌道上実証・運用実績を蓄積することが重要である。今後のトレンドであるKu/Ka帯でのマルチビーム技術、フレキシブルペイロード技術(衛星の打上後であっても利用者の増減に合わせてサービスエリア、及び各サービスエリアへの通信容量を自在に変更する通信技術)が特に重要である。海外技術レベルへのキャッチアップ、凌駕(りょうが)に向け、通信技術試験衛星によるこれら次世代通信技術の早急な開発、軌道上実証の実施が期待されている。

(注1) スーパーバードは、スカパーJSAT株の登録商標である。

### 4. 測位衛星の利用動向と当社の技術

#### 4.1 測位衛星整備の国際動向、準天頂衛星の特長

GPS(米国)、GLONASS(ロシア)に加え、Galileo(欧州)、BeiDou(中国)等の測位衛星整備が進められている。我が国でも2011年の閣議決定を受け、準天頂衛星4機体制の整備、及び持続測位が可能となる7機体制に向けた検討が開始されている。準天頂衛星はGPSと互換性のある測位信号を天頂近傍から送信して安定した測位精度維持に貢献する

とともに、測位精度向上のための補正情報を送信(以下“測位補強”という。)して大幅な測位精度向上を可能とする。測位補強による高精度測位の提供が準天頂衛星システムのユニークな特長である。

#### 4.2 準天頂衛星の整備状況と提供サービス

準天頂衛星初号機“みちびき”が2010年に打ち上げられ、開発主体であるJAXAを中心に技術実証が、衛星測位利用推進センター

(SPAC)を中心に利用者・事業者の立場から準天頂衛星の効用を確認する利用実証が進められている。“みちびき”に加え、追加3機の整備が並行して進められており、2018年から4機体制での測位関連サービスの提供が予定されている。準天頂衛星から提供される主要な測位関連サービスは次のとおりである。

- (1) 測位補完サービス：GPSと同一信号を天頂から提供
- (2) 測位補強サービス：測位精度を向上させるための補正信号を提供
- (3) 簡易メッセージ・メッセージ通信サービス：災害時の緊急通信

当社は準天頂衛星システム3機の開発とともに、地上の運用管制設備、及び高精度測位補強設備の整備を担当している。現在2種類の測位補強サービスが計画されているが、当社は日本全土で数cm精度での測位を可能とするCLAS (Cm Level Augmentation Service)の整備を担当している。

#### 4.3 高精度測位補強と活用分野

通常の衛星測位では測位衛星の軌道推定誤差、電離層遅延等、複数の誤差要因によって、位置決定精度が劣化する。これら誤差に対する補正情報をリアルタイムで提供するものがCLASであり、“みちびき”での利用実証によって日本全土で数cm精度での測位が実現できることが確認されている。CLASは当社で手掛けていたFKP(Flächen Korrektur Punkt)方式によるcm級高精度測位サービスを基に、衛星配信用に独自の改良を加えたものである。CLASの仕組みを図3に示す。

衛星による測位情報の利活用分野は多岐にわたる。当社はcm級高精度測位の有用性に着目し、CLASを核とした新たな測位利用の創出・拡大を目指している。社内外の測位関係機関、利用ユーザーとの連携の下、自動運転支援、ロードプライシング、鉄道、パーソナルユース等と多方面への利活用検討を推進している。

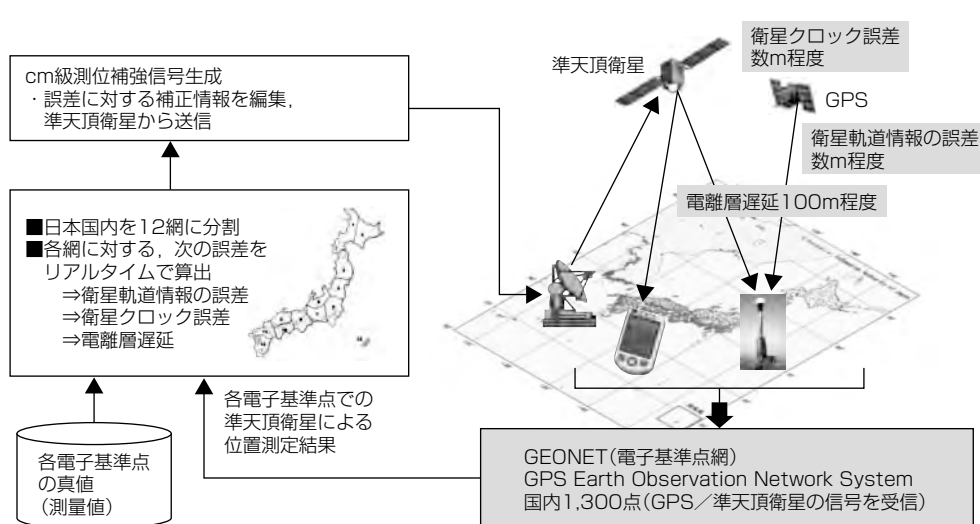


図3. CLASの仕組み



図4. MMS

### 5. 地理空間情報としての衛星利用の拡大

#### 5.1 準天頂衛星が拓(ひら)く高度情報化社会

これまで当社ではFKP方式によるcm級高精度測位サービスを手掛け、情報化施工分野向けなどにcm級高精度測位を利用したシステムを開発してきた。また、cm級高精度測位を利用した自律走行車を開発し、その発展形としてMMS(Mobile Mapping System)(図4)を製品化し、移動体測量という新たな分野を切り開いてきた。

しかしながら、MMSでは測位補強情報は計測後にダウンロードし、後処理で測位演算を実施するという非リアルタイムなアプリケーションにとどまっていた。

2018年からの準天頂衛星によるCLASサービス開始後は、日本全国でシームレスなリアルタイムサービスを提供することが可能となり、MMSもリアルタイムでのサービスや新たなアプリケーションを生み出すことが可能となる。また、その頃にはロシアのGLONASS、欧州のGalileoが整備されるとともに、GPSでも従来のL1C/Aに加え、L1C、L2C、L5といった民生用信号に対応した衛星(準天頂衛星はこれらの信号に対応している)の整備が進んでいく。マルチGNSS(Global Navigation Satellite System)環境が整うとともに、多周波・多衛星を利用するcm級高精度測位でも、民生用信号だけで高精度測位が可能となることは非

常に大きなメリットとなり、可用性が大きく向上すると考えられる。

世界的にマルチGNSS化が進むことでcm級高精度測位で使用する受信機も低価格化することが予想される。これまでcm級の位置情報を利用していたのがBtoB(Business to Business)市場の一部だけであったものが、BtoC(Business to Consumer)分野まで急速に拡大していく可能性が高い。準天頂衛星及びCLASによって、いつでも・どこでも・誰でもcm級の高精度な位置情報を活用できる時代が訪れるのである。

## 5.2 cm級高精度測位の利用構想

利用分野としては、先に述べたMMSのリアルタイム化が挙げられ、それはすなわち自律走行車＝自動運転につながるものとなる。既に各種センサを利用したレーンキープ等が実用化され始めているが、そこにcm級の高精度な位置情報を付加することで、更なる進化が期待される。産業競争力懇談会(Council on Competitiveness-Nippon: COCN)におけるサービスの検討では、これらの分野をモビリティ・ロボット(動体)と定義し、この分野に属するカテゴリーとして、自動運転、高齢者・障がい者支援、ドローン自動運転、IT農業、ロードプライシング、ビックデータ収集等が挙げられている。高精度な位置情報を活用することで、これらの移動体の制御が可能になることが期待される。

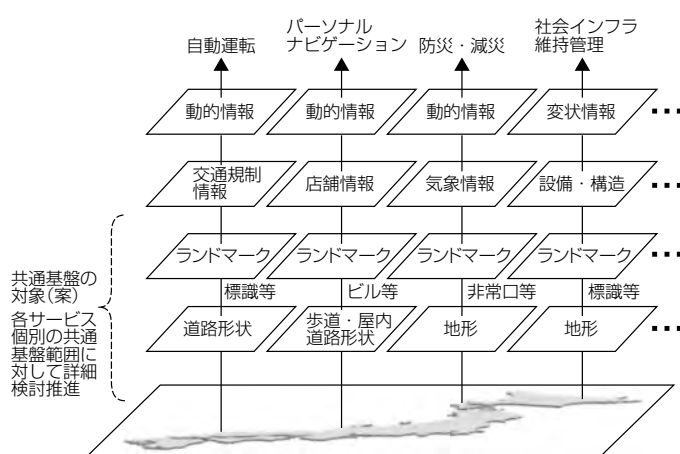
制御の前段階としてのナビゲーション(誘導)分野では、自動車ナビゲーション、パーソナルナビゲーション、地図整備・防災等のカテゴリーでの活用が見込まれる。特に自動車ナビゲーションでは従来の方路でのナビゲーションから車線ごとのナビゲーションもcm級の位置情報によって可能になると考えられるため、更なる発展が期待できる。

また、先般のトンネル崩落事故を受けて、インフラ総点検が打ち出されるなど、社会インフラ(管理)分野として、社会インフラの維持管理、情報化施工、BIM(Building Information Modeling)/CIM(Construction Information Modeling)への利活用が求められている。これらの3分野は、独立しているものではなく、相互に連携している。cm級の高精度な位置情報の活用によって相乗効果が生み出されるものであり、我が国の産業・社会の発展に大きく寄与するものである。

## 5.3 産業界の連携

cm級の高精度な位置情報の活用に関する検討は、当社だけでなく産業界全体の関心事であり、SPACを中心とした高精度衛星測位サービス利用促進協議会(QZSS Business Innovation Council: QBIC)で各種アプリケーションの検討、標準化活動、実証実験が進められている。

また、どのアプリケーションでも端末側で高精度な位置情報が得られるというだけではシステムとして成立せず、これらに共通する高精度な地図データを利用することが前



出典: COCN 2014年度プロジェクト中間報告「3次元位置情報を用いたサービスと共通基盤整備」中間報告<sup>(3)</sup>

図5. 三次元位置情報の共通基盤

提となる。このため、COCNで、“3次元位置情報を用いたサービスと共通基盤整備”というプロジェクトが立ち上がり、高度情報化社会を実現するための共通基盤整備検討が進んでいる<sup>(3)</sup>。当社も参加している、このプロジェクトでは、各種アプリケーションの実現のため、これまで整備が進められてきた二次元中心の地図から三次元を中心とした高精度な三次元位置情報を含んだ地図への進化が検討され、共通的に利活用できる基盤の整備を目指している(図5)。

## 6. む す び

ICT技術の進展に呼応し増大しつつある衛星利用の動向を示し、これらを実現するために当社が蓄積してきた衛星技術及び関連利用技術について述べた。

また、これらの各種衛星利用の集大成として、地理空間情報としての複合的な衛星データ利用に向け、準天頂衛星による高精度測位利用を中核とした当社の利用拡大取組みについて述べるとともに、地理空間情報の利活用を1つの基軸として我が国産業界の取組みについても言及した。

衛星は、作って飛ばすことを第一目標とした時代から、飛ばして得られた付加価値によって評価される時代へと変化しつつある。当社は、我が国の衛星でのリーディングカンパニーとして、衛星開発だけでなく、利用による付加価値創出に照準を合わせ、世界的な衛星利用の拡大に今後とも貢献していく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) 三菱電機技報, 特集「飛躍する宇宙利用」, **85**, No.9 (2011)
- (2) 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)
- (3) 産業競争力懇談会: 3次元位置情報を用いたサービスと共通基盤整備, 2014年度プロジェクト中間報告 (2014)  
<http://cocn.jp/common/pdf/thema69-S.pdf>

# 静止気象衛星ひまわり 8 号・9 号の地上システム

腕野一磨\*  
田中 剛\*  
西村修司\*

Ground System for Himawari-8/-9 as Geostationary Meteorological Satellite

Kazuma Udeno, Tsuyoshi Tanaka, Shuuji Nishimura

## 要 旨

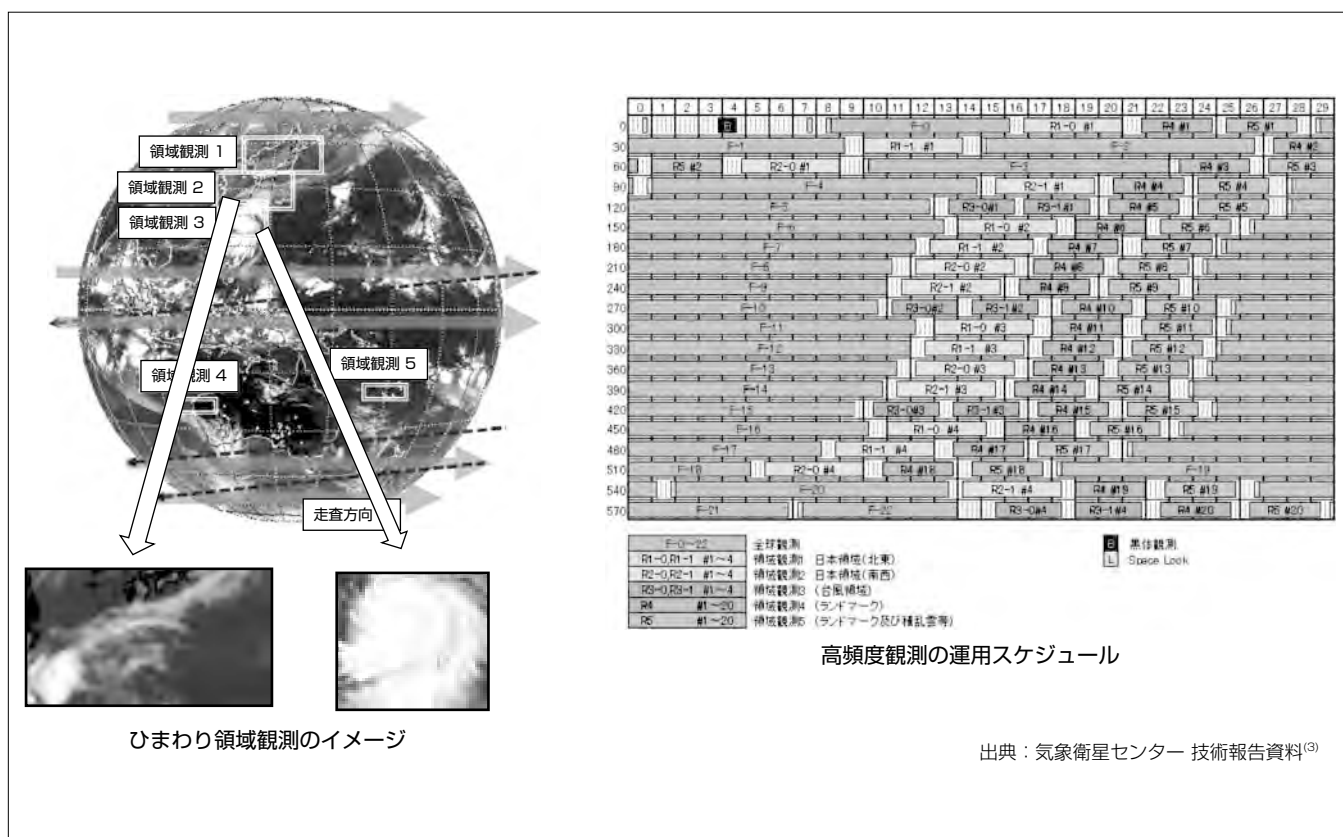
気象庁は1978年から約35年にわたって気象衛星ひまわり  
の観測情報等を利用して気象予報を実施している。そして  
2015年には現行のひまわり 7 号の観測機能が設計寿命を迎  
える。後継機のひまわり 8 号が2014年10月 7 日に無事打ち  
上げられ、2015年夏以降に本格運用を開始する予定である  
(ひまわり 9 号は2016年夏期に打ち上げ予定)<sup>(1)(2)</sup>。

ひまわりを利用した気象観測は、国民の日常生活に身近  
な天気予報や洋上の台風監視、また地球規模の雲、水蒸気  
分布等の観測に有効であり、その観測情報は日本国内だけ  
でなく気象衛星を持たないアジア・太平洋地域にも提供さ  
れ、気象情報・防災情報として広く有効活用されている。  
また、昨今短時間に急激に変化する集中豪雨や竜巻等の局

地的な気象現象の予測に対する期待も高まっており、さら  
に重要性を増している。

ひまわり 8 号・9 号の衛星では、必要な観測領域に対し  
て2.5分ごとの高頻度観測が可能な先進機能を搭載してお  
り、刻々と変化する台風進路や局地的気象現象に追従して  
柔軟に観測領域を選択することによって、きめ細かい気象  
予報に役立てることができる。

本稿では、衛星の高頻度観測機能に対応した運用を実現  
するため、地上設備から衛星に対して観測対象領域情報を  
2.5分ごとに繰り返し指示するシステム機能を開発するに  
当たっての課題と対策、及びシステム設計上考慮した点に  
ついて述べる。



## ひまわり 8 号・9 号の観測イメージと運用スケジュール

左は、観測された部分的な領域画像イメージの例として台風領域の観測イメージを示す。右は、定常運用パターンでの10分間観測運用と2.5分ごとの領域観測の運用スケジュールを示す。

# 1. ま え が き

ひまわり 8 号・9 号の 2 機の衛星は 2015 年から 2029 年度まで 15 年間にわたって日本初の衛星運用 PFI (Private Finance Initiative) 事業によって運用されることとなり、“気象衛星 ひまわり 運用事業 (株) (略称 HOPE) <sup>(4)</sup>” が 2010 年に受注した。

ひまわり 地上システムには衛星運用 PFI 事業向けシステムとして 2 つの要件が求められる。1 つは安定的に確実な運用サービスを継続できること、もう 1 つはひまわり衛星の観測機能の特長を生かした運用機能を持つことである。

本稿では、これら 2 つの要件を満たすシステム開発のポイントを述べる。

## 2. ひまわり観測運用の概要

### 2.1 ひまわり地上システム構成

ひまわり 地上システムは主局・副局の 2 局から構成され、各局には衛星と電波を送受信するアンテナ設備を配置するアンテナサイト (AS) と計算機システムが稼働するデータセンター (DC) を配置し、主に主局データセンターから 24 時間体制で衛星管制運用と観測データ運用が行われる。

局配置、アンテナ設備、計算機システムの各設備で冗長構成をとり、複数経路で観測データを受信・伝送することによって、大規模災害発生時にも運用継続可能な堅牢 (けんろう) なシステム構成とした。これによって、設備点検と保守や機器故障で冗長システムに切り換える際にも、衛星と電波を送受信するアンテナ設備の切り換え処理時間を最小化することが可能となり、安定的かつ確実な運用サービスが継続可能な構成とした。

データセンターの地上システムは、次の 3 つの主要システムから構成される (図 1)。

#### (1) 衛星管制システム

衛星の状態監視、軌道制御、領域観測指示等の衛星管制全般を行う。

#### (2) 放射計データ処理システム (RDACS)

観測画像データの受信、観測画像ファイルの作成と伝送、観測領域の選定処理等を行う。

#### (3) 通報局処理システム

船舶や離島等の通報局で観測されてひまわりで中継された気象情報を受信し、気象庁に伝送する。

(1)、(3) を三菱電機が整備し、(2) は気象庁から貸与されている。

### 2.2 ひまわり観測運用の概要

衛星管制システムが指示した観測計画情報に従って衛星上で観測された観測データを地上設備が受信し、即時に気象庁にデータを伝送する。気象庁は受信した観測データを最適化処理した後、国内外の様々な政府機関や民間機関に伝送し、広く活用される (図 2)。

ひまわり観測運用では、全球観測や日本領域観測といった固定領域の観測運用に加え、ひまわり衛星の観測機能の特長である 2.5 分ごとに指定が可能な可変領域の観測運用を行う。固定領域観測は衛星上で繰り返し自動的に観測され、可変領域観測は台風や積乱雲の指定領域等の観測領域を地上システムから指定して期待する領域を観測する。

可変領域観測は、気象庁が指定した観測領域指定情報が RDACS 経由で衛星管制システムに送られ、衛星管制システムが観測領域を運用計画に取り込んだ後、衛星に観測指示情報として登録する。自然現象の変化に柔軟に対応した観測領域を指定するため、気象庁からの指定情報は観測開始直前の 2 分前まで可能とし、受信後 2 分間で衛星に登録処理する (図 3)。

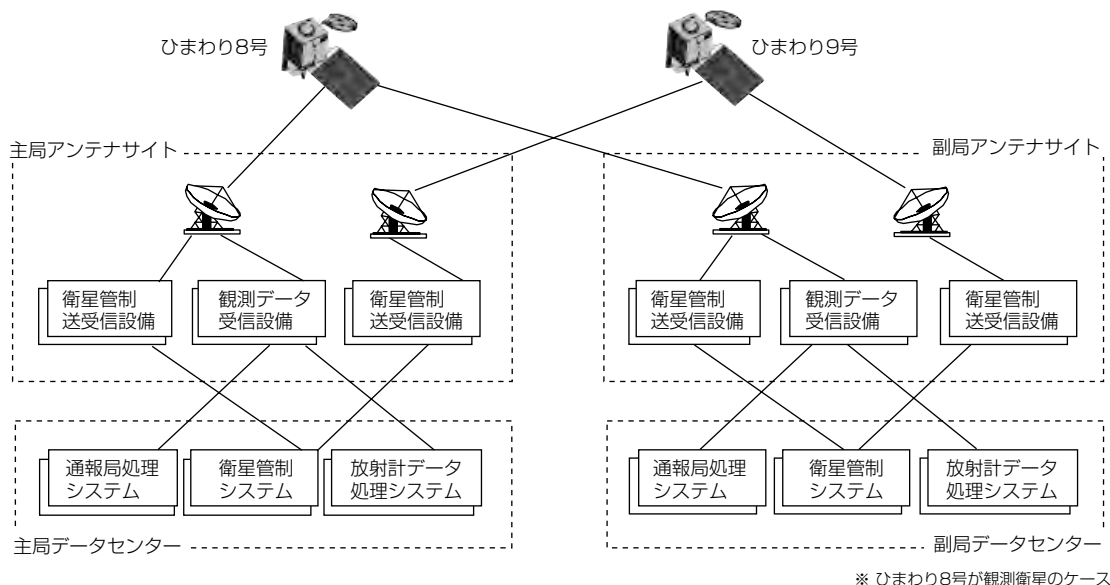


図 1. ひまわり地上システムの構成 (イメージ)

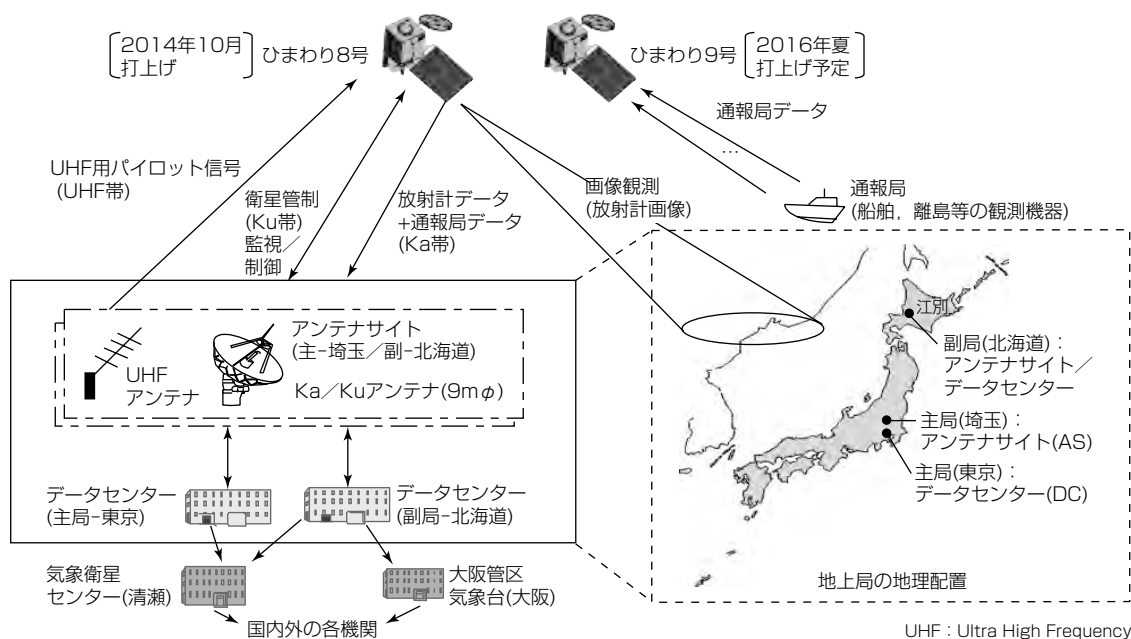


図 2. ひまわり運用概念図

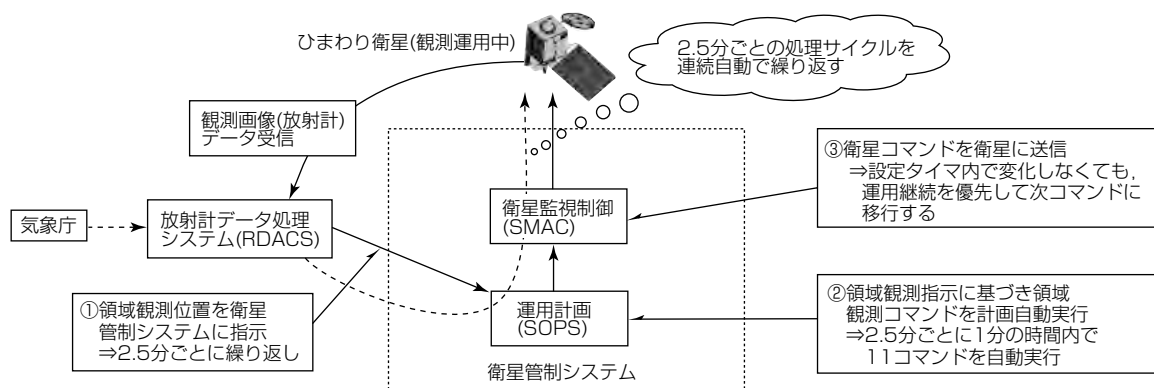


図 3. 観測領域指定にかかわるデータフロー

観測領域指定情報を地上設備内で効率的かつ確実にインタフェースし、24時間連続的に繰り返すことができるシステムの詳細を次に述べる。

### 3. 運用要求実現のためのシステム課題と対策

#### 3.1 観測運用要求における課題

地上システムでは2.5分間の観測スケジュールごとに観測開始2分前まで11か所の観測領域指定を受け付ける。2.5分間の流れを図4に示す。この観測領域指定コマンド11個の送信には1分弱の時間を要するため、観測開始1分前から衛星にコマンド送信する設計とした。衛星は観測領域の指定がなかった場合は、前回登録した指定領域の観測を繰り返すことになり2.5分ごとに確実に指定する必要がある。2.5分間のうち1分間がこの気象衛星特有の観測領域指定運用で占有することになることから、この観測領域指定運用を確実に地上システム実現のために次に述べる3つの課題に対応した。

##### 3.1.1 観測領域指定以外の衛星運用時間(課題①)

観測領域指定は観測開始1分前にコマンド送信して衛星で即時実行するためリアルタイムコマンド方式による運用とし、ほかの衛星運用は残り1.5分の間に一旦、衛星にコマンド登録を行い、時刻指定でコマンド実行をするストアードコマンド方式とする必要がある。

##### 3.1.2 観測領域指定以外の地上局運用時間(課題②)

コマンド送信は地上局アンテナから衛星にアップリンクを行い、衛星とのコマンド送信回線を確立する必要がある。この運用は1分の時間を要する。また、衛星は2つの地上局アンテナから同時にコマンド送信回線を確立すること(ダブルアップリンク)を故障要因となるため禁止している。そのため定常は常時1つの地上局アンテナからコマンド送信回線を確立しておくことで対応しているが、保守などによってコマンド運用局を切り換えることは観測運用中も必須の運用であり、1.5分の空き時間で実施する必要がある。

	観測A開始時刻 観測B 2.5分前	観測B 2分前	観測B 1分前	観測B開始時刻 観測C 2.5分前
RDACS(気象庁指示)	観測B指示送付締切り		観測C指示送付締切り	
衛星管制システム(計画管制)	他計画運用指示	観測B指示取り込み 観測B位置指示		他計画運用指示
衛星管制システム(監視制御)	観測指示以外CMD運用		観測B指示送信	観測指示以外CMD運用
衛星(CMD受信)	観測指示以外CMD受信		観測B指示登録	観測指示以外CMD受信
衛星(観測)	観測A(2.5分間)		観測B(2.5分間)	

CMD：コマンド

図4. 観測領域指示運用

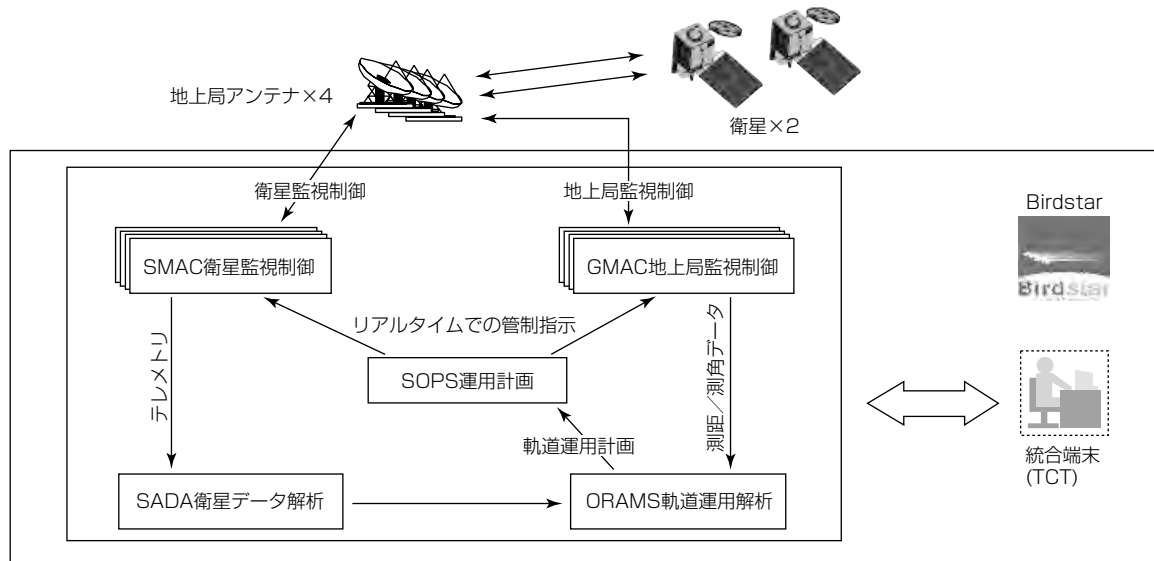


図5. 統合計画管制

### 3.1.3 運用者の負荷軽減(課題③)

ひまわりはPFI事業として運用コストを抑えるために、必要最小限の運用者で2衛星の同時運用を行う。観測領域指定のような密な運用は運用負荷が高く、運用ミスを誘発する可能性がある。運用の計画自動化を最大限図ることで安定的な運用を実現する必要がある。

### 3.2 地上システムでの対策

これらの課題に対して主に衛星管制システムで対策を行った。衛星管制システムには衛星管制ソフトウェア“Birdstar”を適用している。Birdstarは当社で開発したソフトウェアパッケージであり、“衛星監視制御(SMAC)”“地上局監視制御(GMAC)”“運用計画(SOPS)”“軌道運用解析(ORAMS)”“衛星データ解析(SADA)”といったソフトウェアから構成される(図5)。

ORAMSでの軌道運用計画を基にSOPSで計画立案を行い、SMAC、GMACが計画に従いコマンド実行をする。

#### 3.2.1 統合監視機能(課題③への対策)

SOPSはこれまでオフラインでの運用者による計画立案の支援ソフトウェアであったが、今回、統合監視機能として8号・9号の衛星監視制御装置及び地上アンテナ4台の

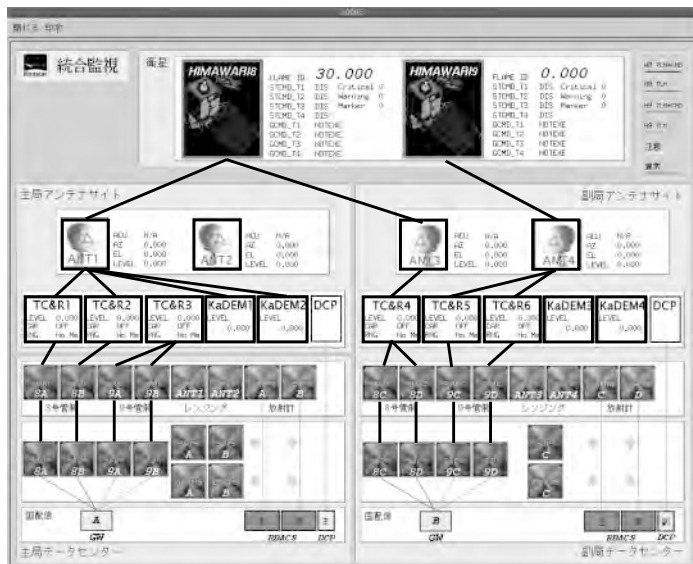
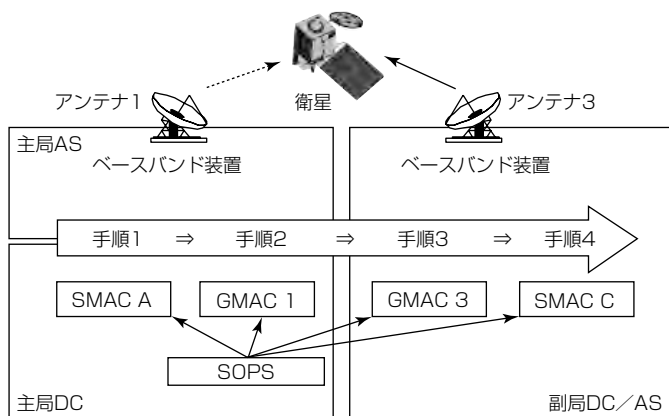


図6. 統合監視画面

地上局監視制御装置を監視して、統合計画管制機能として計画運用指示を行うリアルタイム機能を構築した。代表的な監視情報を全ての衛星監視制御装置及び地上局監視制御装置から収集して、2つの衛星及び2つの地上局の統合的な実行状況を図6のように監視可能とした。図の画面では、



手順	ソフトウェア	内容
1	SMAC A	衛星とのコマンド送信回線を停止
2	GMAC 1	アンテナ1のアップリンクを停止
3	GMAC 3	アンテナ3のアップリンクを開始
4	SMAC C	衛星とのコマンド送信回線を確立

図7. コマンド系切換え

衛星管制システムから衛星までの接続状況を表示しており、各種異常を検知した際には運用者に報知する。

### 3.2.2 統合計画管制機能(課題①, ②, ③への対策)

SMACは衛星ごとに主局2系統, 副局2系統の計4系統による冗長構成としている。SOPSは計画実行時刻の1分前にこれら4系統のうちコマンド送信可能な系を確認して計画実行指示を行う。SMACの突発的な故障など、コマンド送信可能な系が見つからない場合にはアラーム鳴動で運用者に報知して再接続を促し、計画実行時刻まで計画送信のリトライを繰り返す。

また、衛星運用だけでなくコマンド運用局の切換えといった地上局運用も定常は計画運用を行う。SOPSは1.5分の中で切換えに必要となる手順を各ソフトウェアに実施させる。図7は手順1から手順4を順番に計画実行することでコマンド運用局をアンテナ1からアンテナ3に切り換える例である。

### 3.2.3 コマンド系切換え機能(課題②, ③への対策)

電波干渉や地上局設備故障などによって、突発的にコマンド運用局の切換えが必要となった場合に備えて、運用者がSOPSからコマンド系の切換え手順を手動で実行できる機能を設けた。運用者が画面上で“コマンド運用停止”を選択することで図7の手順1, 手順2を実行し, “アンテナ3コマンド運用開始”を選択することで手順3, 手順4を実行する。これによって運用者は短時間でコマンド運用局の切換えを行うことができる。

### 3.2.4 自動アップリンク停止機能(課題②, ③への対策)

運用人員の最小化のために地上局アンテナサイトは通常、無人としている。被災などデータセンターからの遠隔制御ができなくなった場合にアップリンク停止が行えないと別

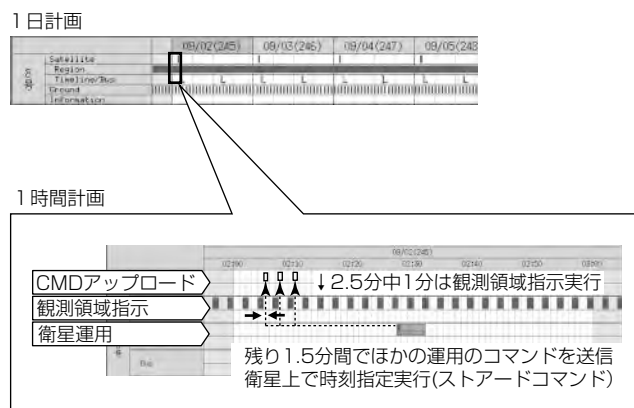


図8. アップロード計画分割

の地上局に切り換えての運用継続ができない。この対応として、アンテナサイト側のベースバンド装置にデータセンターからの接続を監視してネットワークの切断を検知した場合にアップリンクを自動停止する機能を備えた。

### 3.2.5 アップロード計画分割機能(課題①, ③への対策)

SOPSでの計画立案機能の1つとしてストアードコマンドのアップロード計画分割機能を開発した。衛星に登録するストアードコマンドの送信運用を1コマンド当たりの送信時間を考慮して15分間隔に自動的に分割して割当てを行う(図8)。これによって運用者の計画立案負荷を軽減している。

### 3.3 対策の効果

3.2節で示した各種対策を組み合わせることによって、気象衛星特有の密な観測領域指定運用を継続した上で、運用者の負荷を極力抑えた形での衛星及び地上局の運用を実現した。この対策によって計画的な衛星運用やコマンド運用局の切換えで指定領域の観測を止めることなく継続可能となる。また干渉や災害など突発的なコマンド運用局の切換えが発生した場合にも、運用者の初動支援及び対応負荷の抑制によって短時間での切換えを可能とした。

## 4. む す び

ひまわり地上システムは2015年度からHOPEが気象庁に対する衛星運用サービスを開始する予定であり、今後2029年度まで15年間の長期間にわたる事業として、観測データを安定提供し続ける重要な役割が期待されている。

## 参 考 文 献

- (1) 気象庁のホームページ, <http://www.jma.go.jp/jma/>
- (2) 気象衛星センター, <http://www.jma-net.go.jp/msc/ja/>
- (3) 横田寛伸, ほか: 静止地球環境観測衛星「ひまわり8号及び9号」の紹介, 気象衛星センター技術報告, No.58, 121~138 (2013)
- (4) 気象衛星ひまわり運用事業(株), <http://hope-pfi.jp/>

# 準天頂衛星システムによる都市部での衛星測位の可用性の拡大

瀧口純一\* 富樫健司\*\*  
中田圭二\*\*  
津田喜秋\*\*

Availability Enhancement of Satellite Positioning Service in Urban Canyon Utilizing Quasi-Zenith Satellite System

Junichi Takiguchi, Keiji Nakata, Yoshiaki Tsuda, Kenji Togashi

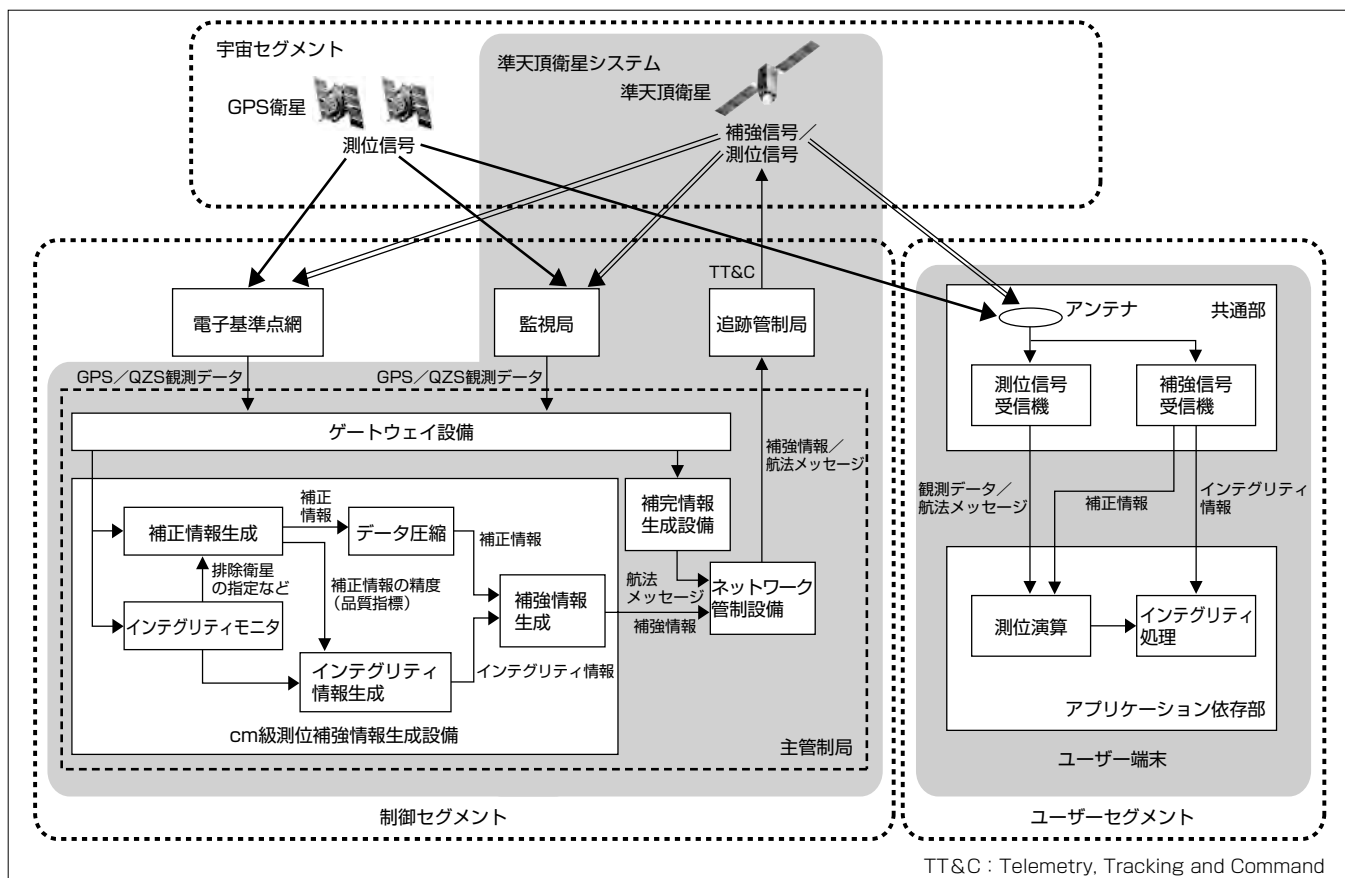
## 要 旨

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

準天頂衛星は、常時高い仰角にある測位衛星として、GPS衛星と同様の測位信号を放送することによって、GPS衛星と組み合わせて、幾何学的配置を表すPDOP(Position Dilution Of Precision)が改善される。同時に、準天頂衛星から高精度の補強情報を放送すれば、いつでもどこでも高

精度測位サービスが受けられるようになる。

代表的な都市部の丸の内で、移動体を用いた準天頂衛星システムの補完・補強機能の実証実験を行い、補完と補強の相乗効果によって、GPS衛星だけの測位結果に対して、準天頂衛星を1機追加すると、測位率が約1.7倍に改善すること、さらに準天頂衛星による改善結果に対してINS(Inertial Navigation System)を複合させることによって、GPS衛星だけの測位結果の3.5倍の測位率となることを確認した。また、レーンナビゲーションの判断基準となる車線幅の1/4(1.0m)以下の位置の品質を確認した。なお、丸の内地区では、GPS+QZS(Quasi-Zenith Satellite)の場合、平均仰角マスクは46.7度であり、4機体制では利用可能時間率は約80%であることを確認した。



## 準天頂衛星による測位システムの構成

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

## 1. ま え が き

衛星測位システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)は、米国のGPSが一般にも良く知られているが、そのほかに、ロシアのGLONASS(Global Navigation Satellite System)が現在実運用中で、日本の準天頂衛星システム(Quasi-Zenith Satellite System: QZSS)<sup>(1)</sup>、欧州のGalileo、中国のBeiDou、インドのIRNSS(Indian Regional Navigational Satellite System)が開発中である。衛星測位システムは、現在、身近にはカーナビゲーションに広く使われている他に、船舶や航空機の航法支援、測量や地盤監視などに用いられている。

衛星測位システムでの位置測定の方法は、測位衛星から放送される測位信号を測定点においた受信機で受信して、測位衛星と測定点との正確な距離を求め、三辺測量の原理で測定点の位置を求めるものである。測位信号の搬送波を用いて高精度な測位を実現するには、測定点の座標値(x, y, z)と受信機クロック誤差及びアンビギュイティと呼ばれる観測される測位信号に含まれる波長の整数倍の波数を未知数として求めるため、通常5機以上の測位衛星が必要となる。GPSは、6つの軌道面に各々4機配置の合計24機の測位衛星と予備の測位衛星が地球を周回しているが、時間帯によって日本上空での可視衛星数が減少し、位置の品質に影響する測位衛星の位置精度劣化率(PDOP)が大きくなる場合があり、高精度かつ安定な測位が全ての時間帯でできないのが現状である。

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

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

本稿では、4機によって構築される衛星測位システムとしての準天頂衛星システムについて述べる。そして、このシステムの最も特徴的な効果として、都市部での移動体を

用いた衛星測位の可用性の拡大効果について述べる。

## 2. 準天頂衛星システム

### 2.1 準天頂衛星システムの概要

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

準天頂軌道衛星は、昇降点赤経がみちびきと±135度の位置関係を持ち、離心率0.075、近地点引数270度、軌道傾斜角47度以下、軌道長半径42,164km(平均)の楕円軌道をとる。この軌道によって、日本から見ると、約1日で元の位置まで周回する非対称8の字軌跡となり、複数機構成で日本上空で常に高仰角が確保できる。東京では、24時間常時どれか1機の仰角は70度以上が確保できる。静止軌道衛星は、東経90度から180度のいずれかの位置に配置するが、東経135度付近になった場合には、常に仰角48度付近に見ることができる。

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

一方、電子基準点は、日本に約1,300点あるが、そのうち日本本土と近海をカバーするcm級測位補強情報を生成するためには200点以上を活用する。cm級測位補強サービス(Centimeter Level Augmentation Service: CLAS)<sup>(2)</sup>では、電子基準点網で取得した準天頂衛星とGPS衛星の測位信号の観測データを入力し、放送用の補強情報(補正情報+補正情報の品質を表す指標となるインテグリティ情報)の生成と2 kbpsへの圧縮、異常監視等を行う。また、このシステムのベースであるCMAS(CentiMeter-class Augmentation System)は、水平3 cm(drms)以下、垂直6 cm(rms)以下のcm級の正確度を持つ<sup>(3)</sup>。

航法メッセージとcm級測位補強情報は、主管制局から追跡管制局を経由して準天頂衛星へ向けてアップリンクされる。準天頂衛星では、cm級測位補強情報は、L6信号によって日本全国へ放送される。航法メッセージは、各種補完信号に重畳されて準天頂衛星から放送される。ユーザー端末は、準天頂衛星からの補強情報と準天頂衛星とGPS衛星からの測位信号を用いて測位演算を実施し、位置情報を出力する。同時に、補強情報のうちのインテグリティ情報を用いて、ユーザーは得られた位置情報の信頼度をリアルタイムに確認することができる。

準天頂衛星システムは、2018年4月から運用を開始する

ことになっている。

## 2. 2 補完・補強信号

準天頂衛星のGPS補完サービスは、米国が運用するGPS衛星と組み合わせ、準天頂軌道を利用して衛星の幾何学的配置を改善することによって、都市部や山間部での測位可能エリア及び時間を拡大させることを目的とする。

準天頂衛星から放送するGPS補完に関する測位信号は、近代化GPSとの共存性、相互運用性を確保するため、L1C/A信号、L1C信号、L2C信号、L5信号を用い、近代化GPSからの仕様変更を最小限に抑えることとしている。

測位補強に関する信号としては、cm級測位補強情報がL6信号(みちびきでは独自の実験用信号であるLEX(L-band EXperiment)信号<sup>(4)</sup>に対応)に割り当てられる。補強情報生成設備で、電子基準点網のGPS観測データに基づいて状態空間モデル(State Space Model:SSM)と呼ばれる広域の動的誤差モデルを使用し、このモデルから算出した衛星クロック誤差、衛星軌道誤差、電離層遅延、対流圏遅延、シグナルバイアス等の各誤差に対する補正値をSSR(State Space Representation)<sup>(5)</sup>として生成する。さらに、このSSRをL6信号に対応させるために各誤差の物理的特性を利用して2kbpsに圧縮し、cm級測位補強情報(コードドSSRメッセージ)として、L6信号を介して日本全国に放送する。

## 3. みちびきによる効果の検証

### 3.1 評価システム(ユーザーセグメント)

準天頂衛星からの測位信号が受信できる受信機(LEX信号受信機)を搭載した高精度GPS移動計測装置<sup>(6)</sup>(以下“MMS(Mobile Mapping System)”という。)を用いて、高層ビルを含む繁華街である丸の内では位置の品質・測位率を測定する実験を実施した。MMSを用いた評価システムの構成を図1に示す。MMSは、準天頂衛星とGPS衛星の信号を受信する測位信号受信アンテナや測位信号と複

合して位置の品質を改善し、かつ、測位信号を受信できないときも継続して測位計算を実施するINS及び画像情報を取得するためのビデオカメラやレーザスキャナを屋根に搭載し、取得データを処理・記録する制御装置を車内に搭載している。

実験では、丸の内をMMSで走行し、みちびきとGPS衛星の測位信号及びセンチメートル級測位補強情報を受信し記録する。

受信した準天頂衛星とGPS衛星の測位信号及びcm級測位補強情報及びINSのデータを使用して、後処理によって、①GPS衛星だけによる測位計算、②準天頂衛星+GPS衛星による測位計算、③準天頂衛星+GPS衛星による測位計算結果とINSとの複合計算を実施した。真値は、測定地域の丸の内から約5km離れた新宿に私設の基準点を設置して、公共測量として国に認められている方式であるFKP(Flächen Korrektur Parameter)方式とINSとの複合測位計算を後処理で実施した結果とした。

### 3.2 準天頂衛星による測位率改善

丸の内を走行して測位計算した結果を図2に示す。それぞれGPS衛星だけによる測位結果、準天頂衛星とGPS衛星を用いた測位結果、さらに準天頂衛星とGPS衛星の測位信号にINSを複合させて測位計算した結果を示す。図中の黒

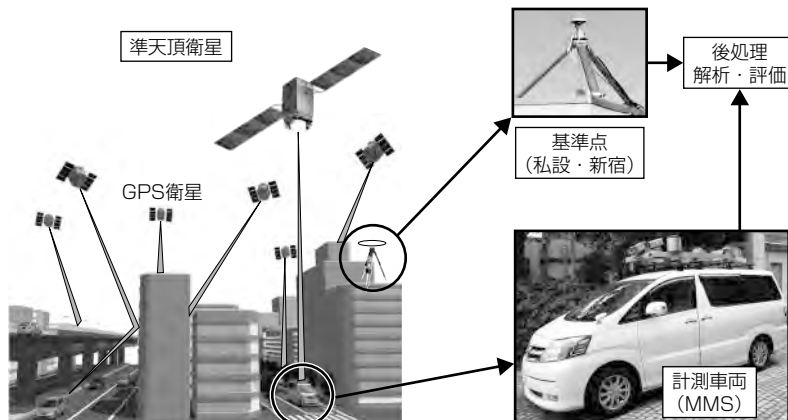


図1. 評価システムの構成

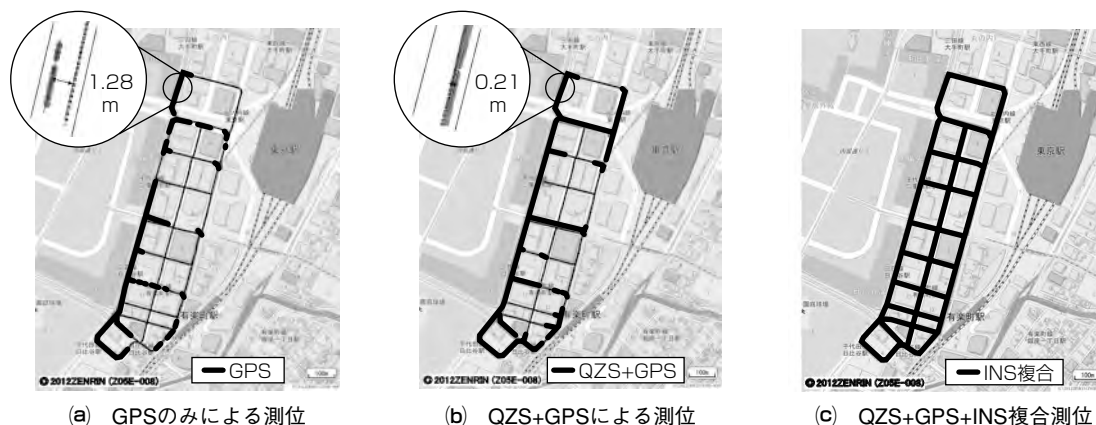


図2. 丸の内地区の測位処理結果

表 1. 準天頂衛星による測位率の改善効果

No	処理内容	測位率	
		FIX率	改善度
1	GPSだけによる測位	28.6%	—
2	QZS+GPSによる測位	47.3%	1.7倍
3	QZS+GPS+INS複合測位	100%	3.5倍

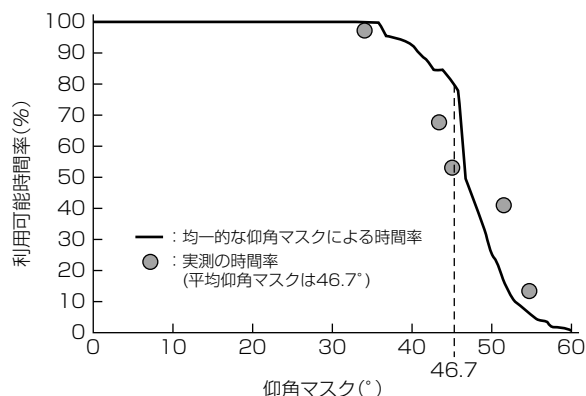


図 3. 丸の内地区の衛星仰角マスクと利用可能時間率

線は、参照値を示す。表 1 にそれぞれの測位率(FIX率)を示す。GPS衛星だけの測位結果に対して、準天頂衛星を 1 機追加することによって、28.6%から47.3%と、約1.7倍に改善した。さらに、INSを複合させることによって、100% (GPS衛星だけの測位結果の3.5倍)の測位率を達成できた。

図 3 にMMSで取得した天空写真から求めた 4 機体制時の準天頂衛星+GPS衛星による、丸の内地区での仰角マスクと利用可能時間率(可視衛星 5 機以上)の関係を示す。丸の内地区での平均仰角は46.7度という厳しい環境であるが、準天頂衛星の補完効果によって、利用可能時間率を約80%確保できることが確認できた。

### 3.3 補完と補強の相乗効果

表 1 に示すとおり、GPS衛星だけの場合と準天頂衛星+GPS衛星の場合では、明らかに準天頂衛星が加わったほうが位置の品質が向上していることが分かる。また、準天頂衛星の補完・補強信号の双方を測位演算の対象とすることで、GPS衛星だけを用了ときに現れていたマルチパスの影響による最大2.5m程度の誤差が低減できたことが確認できる(図 4)。これは、準天頂衛星の高仰角特性によるマルチパスが少ない信号によって、測位演算で、マルチパスを含むGPS信号による影響を効果的に低減できたことによるものであり、準天頂衛星の補完と補強の相乗効果である。

この補完と補強の相乗効果によって、車線幅の1/4である1.0m以下が出せる領域の拡大を確認した。これらの結果は、例えば自動運転システム等で、車両の自己位置精度が向上することで、車載カメラやレーザなど他の搭載センサで得られる車両の自己位置を算出する際のCPU処理負荷が軽減可能であることを意味し、この側面からも、準天

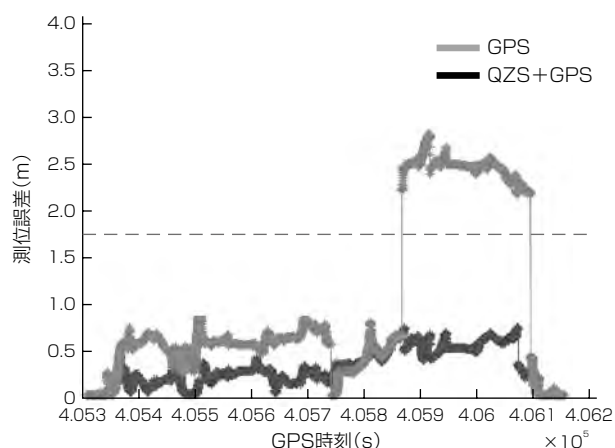


図 4. マルチパス低減による正確度向上

頂衛星の利用は、自動運転システム等の自車位置を利用したアプリケーションの中で有効に働くものと期待される。

## 4. む す び

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

今後、準天頂衛星システムは、自動車、位置情報サービス、農業、建設、防災等の多種多様なサービスへの利用が期待される。

## 参 考 文 献

- (1) Inaba, N., et al.: QZSS System Design and Initial Performance Verification, Proc. of ION ITM 2011, 1109~1117 (2011)
- (2) 瀧口純一, ほか: 準天頂衛星システムにおけるセンチメートル級測位補強サービスの設計, 第58回宇宙科学連合講演会, 2C14 (2014)
- (3) Saito, M., et al.: Centimeter-class Augmentation System Utilizing Quasi-Zenith Satellite System Performance Verification, ION GNSS 2011 (2011)
- (4) 宇宙航空研究開発機構: 準天頂衛星システムユーザインタフェース仕様書(IS-QZSS) 1.5版 (2013)
- (5) Wuebbena, G., et al.: PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks, ION GNSS 2005 (2005)
- (6) 瀧口 純一, ほか: モービルマッピングシステムにおけるGPS/IMU/オドメトリ複合航法のデータ処理と精度管理, 信頼性, 32, No. 2, 120~126 (2010)

# 準天頂衛星cm級測位補強サービスの鉄道環境での評価試験

加賀谷篤大\* 金井利喜\*\*\*  
角谷卓磨\* 横山啓之\*\*\*  
白樫智也\*\*

*Evaluation of Centimeter Positioning Reinforcement in Railway Environment*

*Atsuhiko Kagaya, Takuma Kadoya, Tomoya Shirakashi, Toshinobu Kanai, Hiroyuki Yokoyama*

## 要 旨

準天頂衛星(Quasi-Zenith Satellite: QZS)を利用したcm級測位補強サービスは、GPS(Global Positioning System)による測位で発生する誤差を補正するための情報を配信し、cm級の高精度測位を行うサービスである<sup>(1)</sup>。

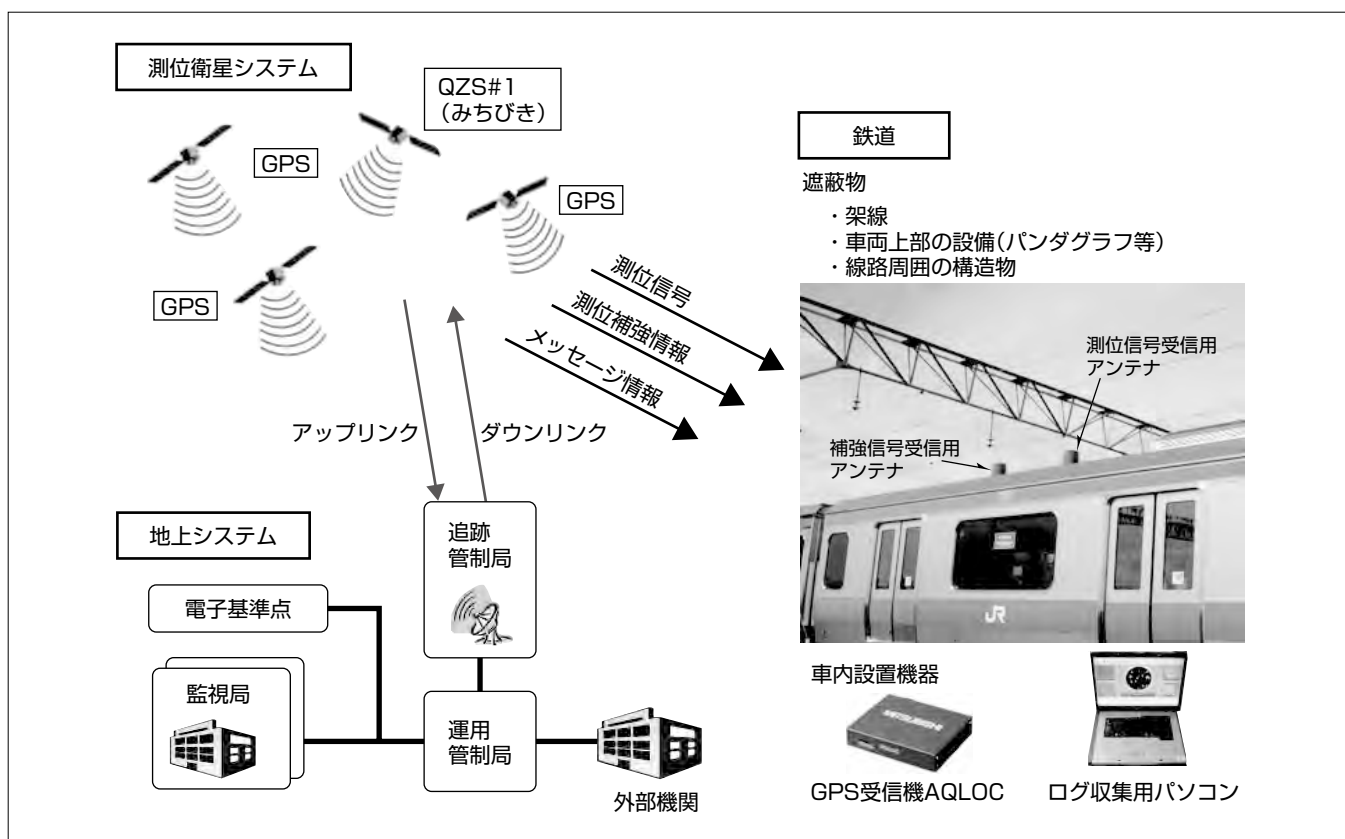
測位補強サービスで得られる高精度な自己位置及び時刻は、自動車、鉄道を始め様々なアプリケーションに応用できるという期待が高まっている。

その中でも鉄道は、列車位置及び時刻管理が重要な交通機関であるため適用は効果的と考えられている。一方、鉄道では運行面での安全に対する要求は厳しく、現状準天頂

衛星の利用検討を行うに当たり、鉄道環境下における性能評価及び実績が不十分である。

本稿では、東日本旅客鉄道(株)の埼京線E233系7000代一般形直流電車(以下“E233系電車”という。)にGPSと準天頂衛星の受信システムを搭載し、埼京線／川越線の大崎～南古谷間で鉄道車両の高精度測位計測試験を行った結果について述べる。この試験における確認項目は次の3点である。

- (1) 実路線での動作を確認
- (2) 都市部での測位精度の実力確認
- (3) 鉄道環境下(高圧線、車体の振動等)での精度確認



## 鉄道環境下での測位

左側が準天頂衛星測位システム、右側が評価を行う鉄道である。電子基準点での観測データから補強情報を生成し、準天頂衛星を介して配信する。鉄道側には、車両屋外上部に補強信号受信用アンテナ及び測位信号受信用アンテナ、車内にそれぞれの受信機を設置し測位演算を行う。架線、車両上部の設備、周囲構造物が存在する鉄道環境下で高精度測位の評価を行う。

## 1. ま え が き

近年、準天頂衛星のcm級測位補強サービスを利用した地上システムについて検討が進められている。

利用アプリケーションの例として乗務員支援システムや列車運行管理システムが挙げられている。衛星測位を使用することで、鉄道車両の自己位置に加えて、正確な時刻が得られるため、列車位置及び時刻管理が重要な鉄道分野への適用は効果的と考えている。

鉄道で衛星測位を使用する際、衛星からの信号の遮蔽が問題となる。鉄道車両上部には、空調設備、パンダグラフ等の車両設備が取り付けられている。このため、GPSアンテナと車両設備との間隔が狭くなり、低仰角の衛星からの信号を遮る可能性がある。また鉄道環境下には、高架下や周囲構造物といった遮蔽物が多く存在する。準天頂衛星を利用した高精度測位を鉄道に適用するためには、現状の精度を把握する必要がある。

本稿では、埼京線E233系電車にGPSと準天頂衛星の受信システムを搭載し、埼京線／川越線の大崎～南古谷間で高精度測位を行った結果について述べる<sup>(2)</sup>。

## 2. 高精度測位と実験目的

### 2.1 準天頂衛星による高精度測位

準天頂衛星には、高精度測位を行うための機能として、主に測位補強と測位補完がある。測位補強は、測位精度向上のための補強情報を送信するものである。測位補完は、GPSと互換性のある信号を送信し、GPSと組み合わせることで安定した測位精度を得るものである。この2つの機能を主とすることで、高精度測位を実現している。

### 2.2 鉄道環境下での実験目的

鉄道分野では、準天頂衛星を利用した高精度測位に対して、次が期待されている。

#### (1) 位置情報

列車運行管理システム、乗務員支援システム等への適用。特定の地上設備によらず、自律して列車位置把握可能。

#### (2) 速度認識

空転・滑走の影響を受けない速度管理。

#### (3) 時刻補正

鉄道システムで取得したデータの時刻管理。

#### (4) 設備管理

電力、保線信号等に分かれる種々の地上設備を緯度経度情報で一元管理。

このように多くの期待があるが、準天頂衛星を利用した高精度測位の鉄道への適用は前例がないため、実路線計測を行い、鉄道システムに使用可能か否かを判断するための基礎データ取得が必要となる。

したがってこの実験では、準天頂衛星を利用した高精度

測位サービスを鉄道分野に適用するため、次を確認する。

#### (1) 実路線における動作を確認

#### (2) 都市部における測位精度の実力確認

#### (3) 鉄道環境下(高圧線、車体の振動等)での精度確認

## 3. 試 験 概 要

### 3.1 試験機器構成

この試験の機器構成を図1に、アンテナ設置外観を図2に示す。準天頂衛星補強信号受信アンテナ及びGPS測位信号受信アンテナは、車両上部に進行方向に並ぶように設置している。車内には準天頂衛星補強信号用受信機及びGPS測位信号用受信機を設置し、各々対応するアンテナと接続している。GPS測位信号用受信機は、三菱電機製高精度測位端末“AQLOC”を使用した。

AQLOCで準天頂衛星補強信号用受信機から得られた補強情報を用いて測位演算を行い、データを取得している。測位結果は、ログ収集用パソコンに保存すると同時に、自己位置をリアルタイムに地図上にプロットしている。

### 3.2 試験区間

この試験は、2013年10月10日、11日の2日間行い、両日ともJR東日本川越車両センターから大崎駅までの区間を走行した。

この区間は、川越車両センターから大宮駅までの川越線は周囲構造物が少ない見晴らしの良い区間、また大宮駅から大崎駅までの埼京線は、高層ビル群等の周囲構造物が多く、見晴らしの悪い区間となっている。

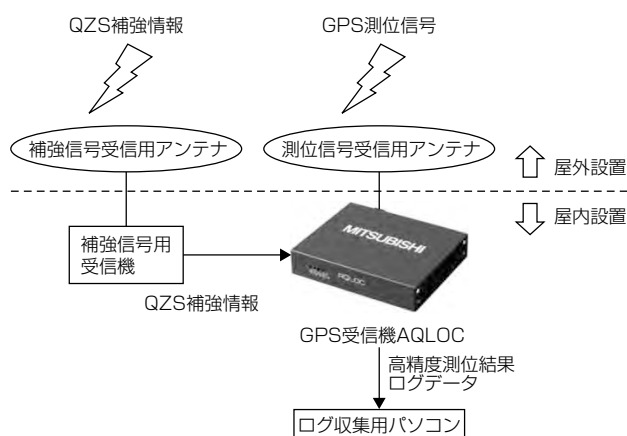


図1. 機器構成

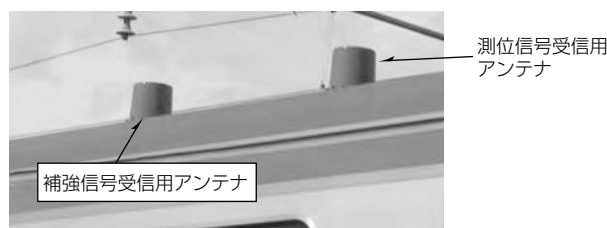


図2. アンテナ設置外観

## 4. 試験結果

### 4.1 測位結果

図3に全区間の測位結果を示す。図中の黒色は往路(川越車両センターから大崎駅)を、灰色は復路(大崎駅から川越車両センター)を示している。大宮駅付近では、地下トンネル及び新幹線高架下の影響によって、測位不能となっている。新宿駅から大崎駅の区間では、高層ビル群等周囲構造物の影響で測位不能となる地点が多くなっている。

指扇駅付近の測位結果を図4に示す。川越車両センターから大宮駅までの区間は単線区間となっているが、指扇駅の前後では上下線のホームが分かれるため、複線に合流又は分離するようになっている。往路と復路の結果を比較すると、単線区間ではプロット点が重なっており、同一線路上を走行していることが分かる。駅を出入りする際は上下線が分かれる様子が確認できる。駅構内では、屋根の影響によって、測位不能となっている。

浮間舟渡駅付近の測位結果を図5に示す。浮間舟渡駅付

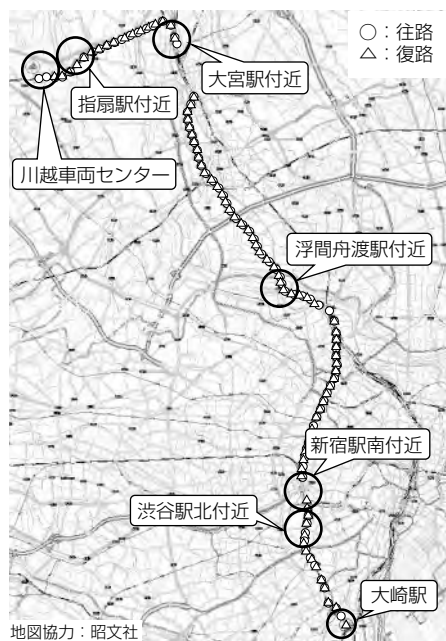


図3. この試験における全区間

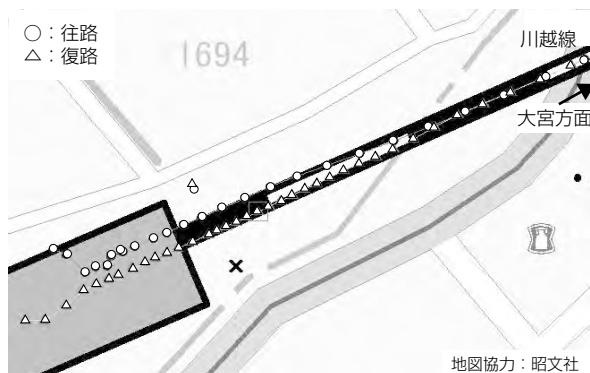


図4. 指扇駅付近の測位結果

近は上下線が分かれている複線区間となっており、測位結果も上下線が判別できる結果になっている。

指扇駅を含む川越線や埼京線赤羽駅以北の区間といった周囲に衛星からの信号を遮る構造物が少ない区間では高精度測位が実現できていると言える。

### 4.2 測位補強

埼京線の都心部を走行した際の測位結果を示す。図6に渋谷駅北側の測位結果を示す。往路では測位結果に乱れはないが、復路で乱れが発生しており実際には走行できない場所にプロットされている。測位結果に乱れが生じる原因は渋谷駅構内の屋根である。渋谷駅構内に進入した際に、GPS及び準天頂衛星の信号が遮蔽され測位不能状態になる。その後発進し、GPSを再捕捉するため測位は再開できている。しかし、準天頂衛星の補強信号を受信できておらず、GPS単独の測位となっているため精度が不安定な結果となっている。

### 4.3 測位補完

準天頂衛星によるcm級高精度測位では、測位衛星数を増加させる測位補完効果が重要である。しかし、現在の準天頂衛星“みちびき”による実験システムでは測位補完効果には対応していない。将来的に対応する予定であるため、この試験の結果から測位補完効果が得られた場合について検証する。



図5. 浮間舟渡駅付近の測位結果



図6. 渋谷駅北側の測位結果



図7. 新宿駅付近の測位結果



図8. 新宿駅上空の衛星配置<sup>(3)</sup>

図7に新宿駅付近の測位結果、図8に新宿駅付近走行中の衛星配置を示す。丸印がGPS衛星数5機以上、三角印がGPS衛星4機のとを示している。新宿駅付近では周囲に高層ビルが多いため、高精度測位に必要な有効衛星数5機以上を確保できない区間が多い。準天頂衛星の測位補完効果があれば、今回の実験でGPS衛星数4機となっていた地点を5機とすることができる。これによって、高精度測位に必要な有効衛星数5機以上を確保できる区間が増え、測位精度向上につながる可能性があることを確認できた。

#### 4.4 測位精度検証

図9に川越車両センター停車時の測位結果を示す。横軸を経度方向、縦軸を緯度方向としている。ここでは、列車の停車位置の真値は不明であるため、平均座標から緯度・経度方向及び高さ方向の精度を求めた結果、緯度・経度方向精度2.66cm[drms]、高さ方向精度5.18cm[rms]となった。この精度は、公共測量にも用いられているRTK (Real Time Kinematic) -GPS測量及びネットワークRTK-GPS測量と同等の精度であり、準天頂衛星センチメートル級測位補強サービスで列車の位置を高精度に得ることが可能と考えられる。

走行時における精度検証として、図10に示す10月10日の往路と10月11日の往路における直線区間で測位結果の比較検証を行った。10月10日における直線走行時の測位結果の近似直線に対して、10月11日の測位結果がどの程度誤差を持つかを算出した。結果を表1に示す。

この結果には測位誤差だけでなく、車体の振動等も含まれているが、異なる日に同じ車線を走行した際の再現性を示している。表1からこの手法によって得られる位置精度は、線路間幅よりも十分小さく、上下線を判別可能な精度が得られていると言える。

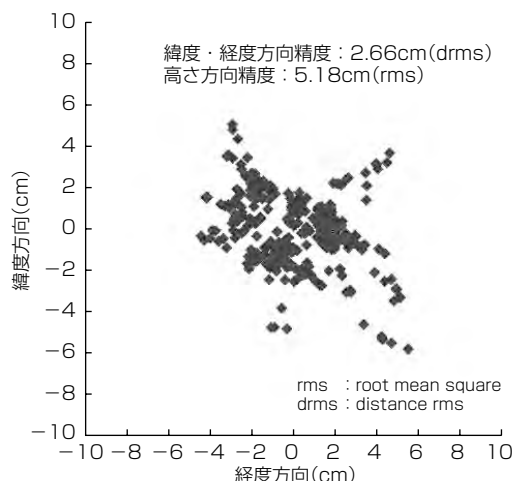


図9. 静止時の測位結果

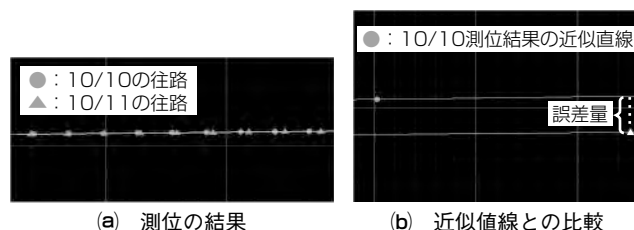


図10. 走行時の精度検証

表1. 走行時の誤差

項目	誤差値 (cm)
誤差平均	8.81
誤差最少	2.94
誤差最大	15.05

## 5. む す び

鉄道環境下における準天頂衛星を利用したcm級測位補強サービスの評価を行った。今回走行をしたJR埼京線では、線路周辺の構造物でGPS/準天頂衛星が遮蔽されなければcm級高精度測位結果が得られ、上下線の判別等が行えることが確認できた。

一方で、トンネル、高架下、都市部で周囲構造物の遮蔽によって、精度劣化又は測位不能となる区間も確認できた。この区間に対応するためにはINS (Inertial Navigation System: 慣性航法装置) 複合技術の検討が必要であることも確認できた。

INS複合技術に加え、今後は他路線も含め測位データを収集するとともに、鉄道向けアプリケーション・サービスへの応用を検討する。

## 参 考 文 献

- (1) 齊藤雅行, ほか: 準天頂衛星による測位システムの構築, 三菱電機技報, 88, No. 2, 105~110 (2014)
- (2) 金井利喜, ほか: 埼京線E233系を用いた準天頂衛星による高精度測位の評価, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 第51回, No.409 (2014)
- (3) QZレーダー: [http://qz-vision.jaxa.jp/USE/ja/qz\\_radar](http://qz-vision.jaxa.jp/USE/ja/qz_radar)

# 陸域観測技術衛星 2 号 (ALOS-2) 向け データ中継衛星通信系アンテナ用メカニズム

大和光輝\* 猿渡英樹\*\*  
徳永裕典\* 鳩岡恭志\*\*  
中川 潤\*

*Data Relay Communication Antenna Mechanism for Advanced Land Observing Satellite-2*

*Mitsuteru Yamato, Hironori Tokunaga, Jun Nakagawa, Hideki Saruwatari, Yasushi Hatooka*

## 要 旨

陸域観測技術衛星 2 号 ALOS-2 (だいち 2 号) に搭載された新規開発のデータ中継衛星通信系アンテナ (DRC アンテナ) に使用しているメカニズム (角度検出器付マイクロステップ対応アクチュエータ, S 帯及び Ka 帯ロータリージョイント) の特長及び開発試験結果について述べる。

三菱電機が開発してきた従来の宇宙用アクチュエータは、フルステップ型ステップモータを使用していた。今回開発したマイクロステップ対応アクチュエータによって、リニアで円滑な駆動が可能となり、衛星の指向精度要求が厳し

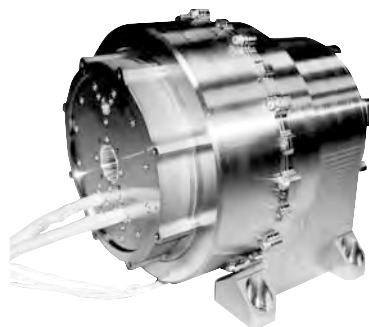
く、駆動時発生擾乱 (じょうらん) 量を制限されているようなアプリケーションにも対応できるようになった。

また、JAXA ミッションとして宇宙用としては国内初<sup>(注1)</sup>となるロータリージョイント (S 帯及び Ka 帯) の開発を行った。これによって、可動部に従来のフレキシブル RF (Radio Frequency) ケーブルを使用していた場合と比較して RF 損失を改善でき、またアンテナ全体の軽量・コンパクト化を実現できた。

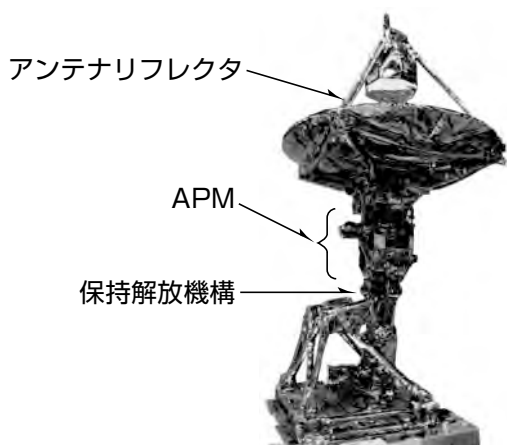
(注 1) 2014 年 8 月 29 日現在、当社調べ



ALOS-2 (だいち 2 号)



角度検出器付マイクロステップ対応  
アクチュエータ



展開状態



収納状態

ALOS-2 向け DRC アンテナ

## ALOS-2 向け DRC アンテナの基本構成

ALOS-2 向け DRC アンテナの形状と基本構成を示す。APM (Antenna Pointing Mechanism) は、2 台のアクチュエータで構成している。宇宙用アンテナメカニズムには軽量・コンパクト・長寿命であることが要求される。

## 1. ま え が き

2014年5月24日、陸域観測技術衛星2号ALOS-2(だいち2号)は、種子島射場から打ち上げられた。また、2014年6月には、同衛星に搭載された新規開発のデータ中継衛星通信系アンテナ(DRCアンテナ)を用い、データ中継技術衛星DRTS(こだま)との通信を行うことに成功した。

本稿では、DRCアンテナに使用しているメカニズム(角度検出器付マイクロステップ対応アクチュエータ、S帯、及びKa帯ロータリージョイント)の特長及び寿命試験結果について述べる。

表1. DRCアンテナの諸元

項目	設計結果
機械系	寸法 収納時: 1,036×770×高さ769(mm) 展開時: 高さ1,421mm(MLIは除く) アンテナ開口径: $\phi$ 770mm
	質量 20.7kg
	消費電力 アクチュエータ: 2.8W/軸 max @+24℃ 角度検出器: 1.2W/軸 max
	駆動角範囲 X軸(FB軸)周り: $\pm 85^\circ$ 以上 Y軸(LR軸)周り: $\pm 90^\circ$ 以上
	駆動速度 各軸1.5°/s以上
	駆動寿命 7年相当以上
RF系	チャンネル数 S帯: 1 ch, Ka帯: 1 ch
	利得 S帯: 18.8dBi以上(フォワード), 19.5dBi以上(リターン) Ka帯: 41.9dBi以上(リターン)

MLI: Multi Layer Insulation

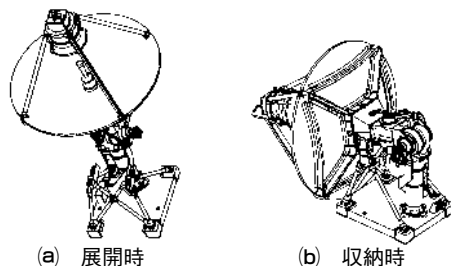


図1. DRCアンテナ

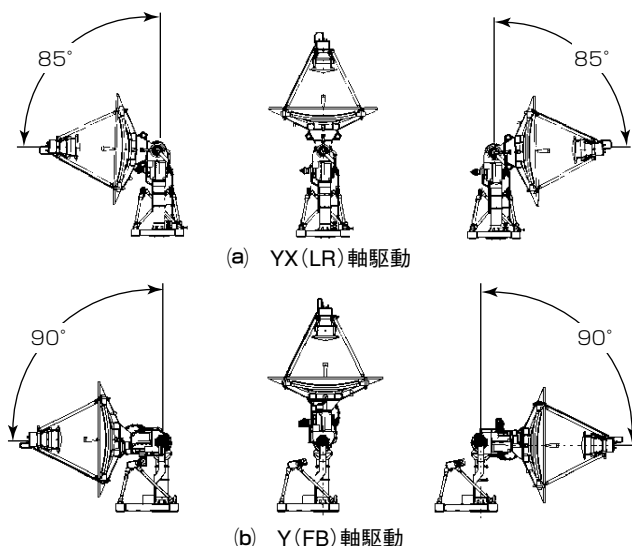


図2. DRCアンテナの駆動角範囲

## 2. ALOS-2向けDRCアンテナ

表1にDRCアンテナの諸元を示す。また、図1、図2にDRCアンテナの外観及び駆動角範囲を示す。

DRCアンテナは、APMと呼ぶ2軸ジンバル上にアンテナを配置しており、軌道上で2軸周りに独立に回転駆動する。打上げ時の収納形態では保持解放機構の2か所で可動部を締結固定しており、軌道上では締結ロッドを火工品を用いて切断することによって解放動作を行う。

## 3. DRCアンテナ用メカニズム

### 3.1 角度検出器付マイクロステップ対応アクチュエータ

表2にアクチュエータの主要諸元を示す。また、図3にAPMとアクチュエータの外観を示す。

APMを構成する2軸のアクチュエータは、三菱電機宇宙用標準アクチュエータ“MSA20(MELCO space Standard Actuator 20)”を用いている。その構成はステップ角度0.6°の2相バイポーラスステップモータ(巻線冗長)、減速比1/160のハーモニックギヤ、レゾルバ型角度検出器からなり、ハーネスを通すため中空軸構造としている。アクチュエータ部には合成炭化水素系のMAC(マルチアルキレーテッドシクロペンタン) 그리스/オイルを使用しており、特にハーモニックギヤとその潤滑システムは、JAXA研究開発本部の開発品に準拠している。

表2. アクチュエータの主要諸元

項目	諸元
モータ	2相バイポーラスステップモータ(巻線冗長)
モータ駆動方式	電流制御型マイクロステップ駆動
モータステップ駆動速度	0~400pps(フルステップ時) 0~3,200pps(マイクロステップ分割1/8ケース)
モータ基本ステップ角	0.6°(フルステップ時)
自起動トルク	72Nm以上 @400pps, +24℃
ギヤ	ハーモニックギヤ, 減速比160:1
アクチュエータ駆動分解能	0.00375°(フルステップ時) 0.000469°(マイクロステップ分割1/8ケース)
角度検出器	レゾルバ型角度検出器 主/従 各1ch
角度検出器モニタ分解能	0.000687°(19bit)

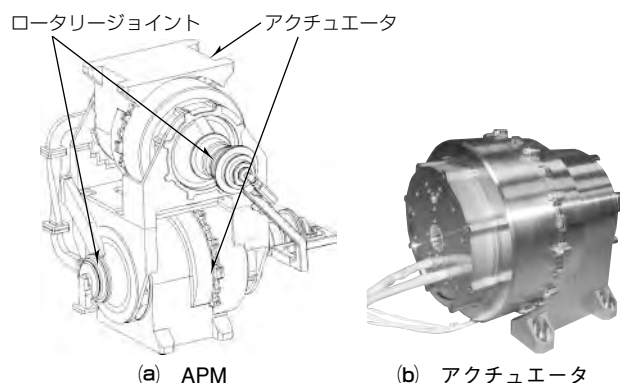


図3. APMとアクチュエータ

将来的にこのDRCアンテナが、アンテナ駆動時の発生擾乱量要求が厳しいアプリケーションにも使用できることを想定し、アクチュエータのモータは、円滑なマイクロステップ駆動に対応させるために、三菱電機従来品と比較して、ディテントトルクの低減化を図っている。

図4に、マイクロステップ駆動時のアクチュエータ出力軸角度履歴を示す。このDRCアンテナ用にはフルステップの8分割のマイクロステップ駆動を行っている。フルステップ駆動時の角度履歴と比較して、リニアで円滑な駆動ができていることが確認できる。マイクロステップ駆動用モータは、フルステップの64分割以上まで対応できることを別途確認しており、三菱電機の今後の宇宙用低擾乱型ステップモータの先鞭(せんべん)をつけることとなった。

### 3.2 ロータリージョイント

ロータリージョイントとは、相対的に回転駆動する部位で、RF信号を非接触で伝達するデバイスである。非接触であるがゆえに、動作時回転速度に制約がなく、また動作

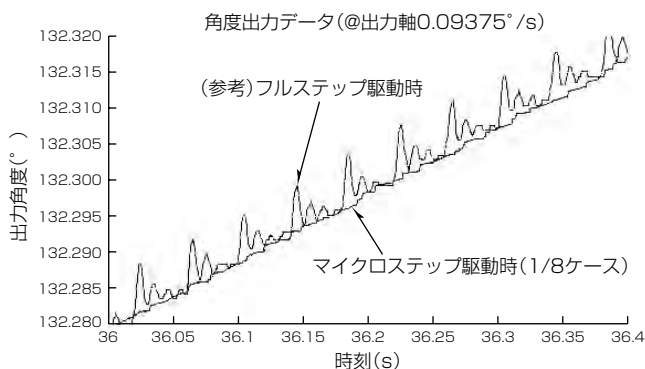


図4. マイクロステップ駆動時の角度履歴

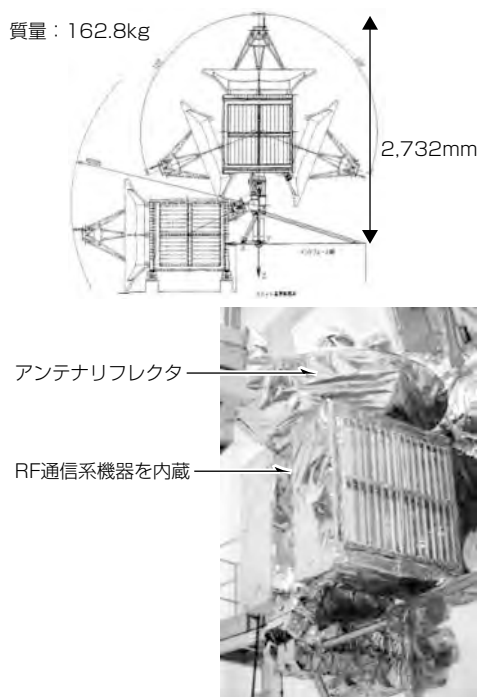


図5. ALOS(だいち)向けDRCアンテナ

寿命が比較的長いという特長を持つ。従来の衛星ALOS(だいち)向けDRCアンテナ用メカニズム(APM)では、可動部のRF信号の伝達にはフレキシブルRFケーブルを用いており、このケーブルの曲げによって可動部の相対運動を許容する構成であった。

しかしながらフレキシブルRFケーブルを採用した場合には次の課題があった。

- (1) RF損失が大きく、アンテナと通信系機器までの距離を短くする必要がある。またRFケーブルを通過させるための周波数コンバータが必要となる。
- (2) 動作時にケーブルの曲げや伸ばしを伴うので、ケーブルの動作寿命の制約がある。
- (3) ケーブル実装のために、比較的大きなスペースを必要とする。

特に(1)については、アンテナ近傍にRF通信系機器を配置する必要があるため、アンテナ可動部が非常に大きくなってしまいう課題があった。図5にALOS(だいち)向けDRCアンテナを示す。今回開発したALOS-2向けDRCアンテナは、ロータリージョイントを採用したことによって、ALOS向けDRCアンテナと比較して、劇的に軽量・コンパクトとなっていることが確認できる。

先に述べた(1)~(3)の課題を解決するため、ALOS-2向けDRCアンテナの開発で、JAXAミッションでは宇宙用としては初めてとなるロータリージョイント(S帯及びKa帯)の開発を行った。表3にロータリージョイントの主要諸元を、図6にロータリージョイントの外観を示す。

ロータリージョイントの回転部は軸受で構成し、アクチュエータに採用しているものと同一の合成炭化水素系のMACグリス/オイルを潤滑施工することによって、寿命要求を満足させている。このロータリージョイントは認定

表3. ロータリージョイントの主要諸元

項目		諸元	
		S帯用	Ka帯用
RF系	VSWR	1.3以下	1.3以下
	通過特性	0.3dB以下	0.3dB以下
	耐電力	7 W max	30W max
機械系	寸法	φ50×89(mm)	φ50×40(mm)
	質量	172g	72 g

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

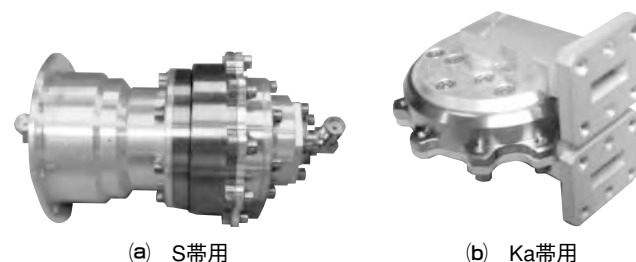


図6. ロータリージョイント

表 4. 寿命試験の条件

大項目	項目	内容
駆動条件	駆動範囲	$\pm 90^\circ$ 往復
	入力軸速度	$\pm 240^\circ/\text{s}$ ( $\pm 40\text{rpm}@3,200\text{pps}$ )
	出力軸速度	$\pm 1.5^\circ/\text{s}$ ( $4\text{ min/rev}@3,200\text{pps}$ )
	出力軸負荷	$\pm 0.58\text{Nm}$ (正弦波負荷) (実機の外部慣性加速トルクは $0.03\text{Nm max}$ )
環境条件	温度	$-10\sim+60^\circ\text{C}$ , 12日/1 サイクル
	真空度	$0.4\text{E}-04\sim 1.33\text{E}-3\text{Pa}$
測定項目	最小自起動電流	各温度移行前に計測@3,200pps (原点位置で測定)
	駆動時電流/電圧	モニタのみ
	駆動時角度出力	モニタのみ
	RF特性	VSWR, 挿入損失
寿命判定基準	最小自起動電流	$0.35\text{A}@3,200\text{pps}$ を超えた時
試験目標	第一次目標	出力軸28,000回転 (ミッション期間 5 年相当)
	第二次目標	出力軸40,000回転 (ミッション期間 7 年相当)
	第三次目標 (試験終了)	出力軸56,000回転 (ミッション期間10年相当)

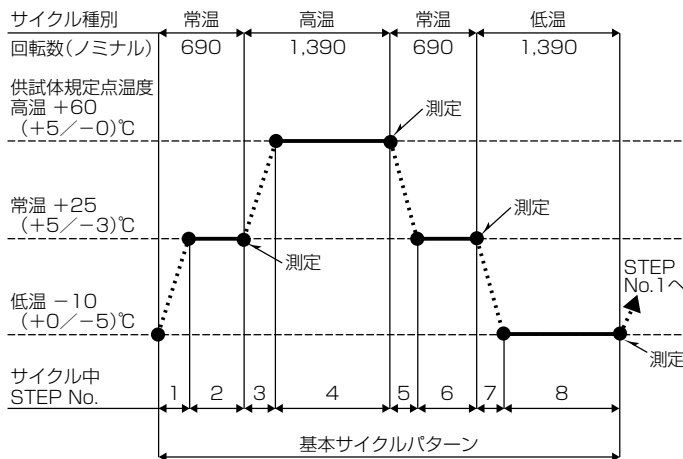


図 7. 試験時の温度プロファイル

試験によって、所望の仕様を満足することを確認できた。

### 3.3 1軸APM部分モデルによる寿命試験

APMを構成する2軸のアクチュエータ及びロータリージョイントが、DRCアンテナの寿命要求に適合していることを確認するために、APM 1軸分の部分モデルによる寿命試験を実施した。APM部分モデルはアクチュエータ1台、ロータリージョイントS帯用1台、Ka帯用1台で構成している。

表 4 に試験条件を示す。また、図 7 に試験時の温度プロファイルを、図 8 に試験コンフィギュレーションを示す。

動作寿命に関して、第一次目標：出力軸28,000回転(ミッション期間 5 年相当)、第二次目標：出力軸40,000回転(ミッション期間 7 年相当)、第三次目標：出力軸56,000回転(ミッション期間10年相当)として実施した試験は順調に推移し、最終的に出力軸81,571回転(ミッション期間

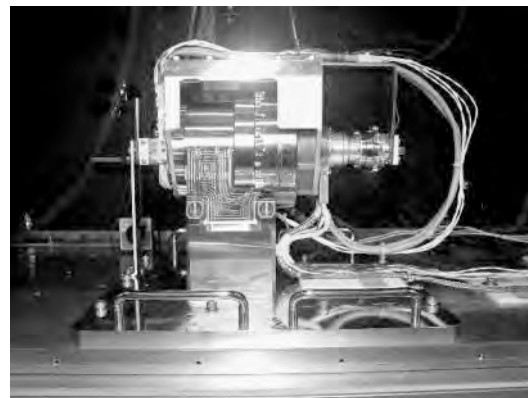


図 8. 試験コンフィギュレーション

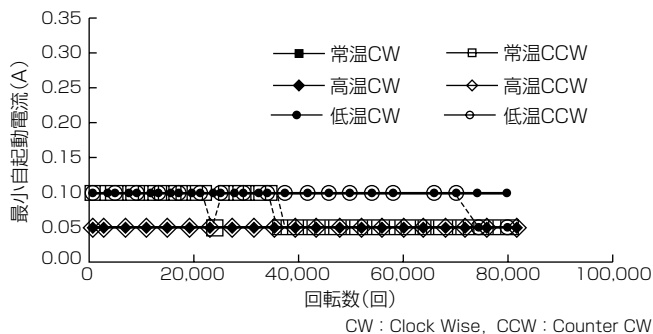


図 9. 最小自起動電流測定結果トレンドグラフ

14.6年相当)に到達し、試験期間の時間的な制約から試験は打ち切った。なお、試験打ち切り時点でも、供試体は寿命判定基準まで劣化しておらず、健全な状態(動作性、角度検出機能、及びRF機能)を維持していた。

図 9 に寿命判定基準とした、アクチュエータの最小自起動電流測定結果トレンドグラフを示す。アクチュエータの最小自起動電流を測定することによって、アクチュエータ内部抵抗トルクを間接的に評価することができる。最小自起動電流値は、寿命判定基準である0.35Aに対して余裕を持って推移しており、試験開始時の状態とほぼ同程度か、やや抵抗トルクが減少している傾向が確認できる。

この寿命試験結果から、APMを構成する2軸のアクチュエータはDRCアンテナの寿命要求に対して適合していることが確認できた。

## 4. む す び

今回開発したDRCアンテナに用いているメカニズムについては、地上認定試験及び寿命試験でALOS-2の要求仕様に適合することを確認でき、また軌道上でも所望の性能を発揮していることが確認できた。

このメカニズムは、ALOS-2以外の衛星でのDRCアンテナ用メカニズムとしても、また、別のアプリケーションとしても汎用的に十分活用できるものと考えている。

# 衛星搭載型合成開口レーダの利用技術

遠藤 勉\* 中村聖平\*  
 入部紘一\*\* 吉岡秀樹\*  
 横田裕也\*\*\*

Advanced Techniques for Satellite Synthetic Aperture Radar Applications

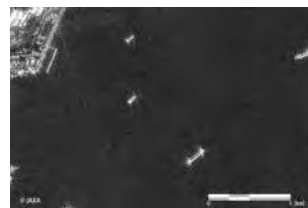
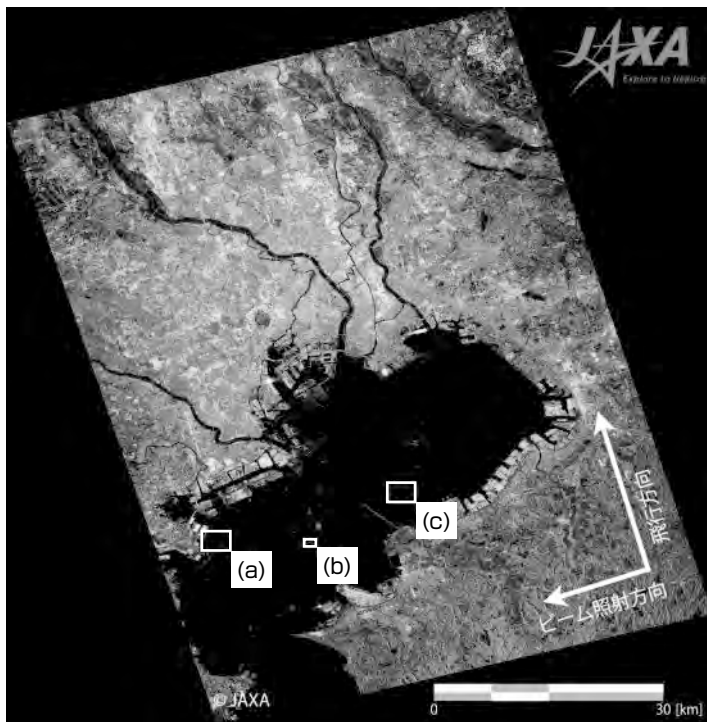
Tsutomu Endo, Koichi Iribe, Yuya Yokota, Shohei Nakamura, Hideki Yoshioka

## 要 旨

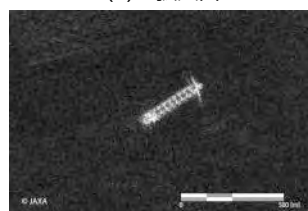
衛星搭載型合成開口レーダ(以下“衛星SAR”という。)は、航空機搭載型に比べ、高高度から観測を行うため広範囲の観測が可能である上、台風や噴煙等の大気条件によって観測の可否に対する影響を受けない利点を持つ。また、ほぼ一定軌道を安定して飛行するため定点観測を得意とする。これまでに災害を始め、多岐にわたる分野での衛星SARの利用があった。2011年5月に運用を終えた我が国の衛星SARであるPALSARが成果をあげた災害分野での利用はその一例である。三菱電機は衛星SARの更なる利用のため、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)の下、陸域観測技術衛星2号(ALOS-2)に搭載するLバンド衛星SARであるPALSAR-2を開発した。高分解能化や広域化を

現したPALSAR-2は、例えば災害分野の利用で、これまで困難であった日本家屋のような密集した建物の識別や、希望する観測エリアが一度の観測で収まることによるモニタリングの効率化が期待される。

本稿では、衛星SARの利用についての事例を示し、SARデータの解析や最新の研究成果から、PALSAR-2に期待される利用について述べる。また、これまでに取得した最新のPALSAR-2のSAR画像を用いて、当社が開発した衛星SARの利用を支える技術について述べる。さらに、将来のSAR技術開発のため、JAXAと共同開発したPALSAR-2に実装してある実験モードについても述べる。



(a)の拡大図



(b)の拡大図



(c)の拡大図

【出典】 [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/img\\_up/jpal2\\_check005\\_20141107.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/img_up/jpal2_check005_20141107.htm)

## 高分解能と広域観測を両立させるPALSAR-2のSAR画像(画像提供：JAXA)

2014年8月29日に高分解能3mモードで観測された東京湾のPALSAR-2のSAR画像である。良好な雑音等価後方散乱係数(NESZ)に加え、分解能3m及び観測幅50km以上という、高分解能と広域観測を両立させるPALSAR-2によって、拡大図からは海上の船舶の有無を確認できるだけでなく、船舶の進行方向、そして船舶の特徴的な形状から船種の推定を、広範囲にわたって実施可能であることを示している。

## 1. ま え が き

2014年5月に打ち上げられたALOS-2に搭載されているPALSAR-2は、Lバンドの衛星SARであり、昼夜天候を問わずいつでも、地表面を1～3mの高分解能で観測することが可能である。490kmを超える広域観測、さらにPALSARを踏襲した多偏波観測機能などによって、今後、様々な分野で利用されることが期待されている<sup>(1)</sup>。

本稿では、衛星SARの利用を支える技術に対する当社の取組みについて述べる。

## 2. 衛星SARの利用とPALSAR-2への期待

表1に衛星SARの利用について実例を示し、PALSAR-2で新たに開発した技術、SARデータの解析や最新の研究成果から、PALSAR-2へ期待される利用についてまとめた。利用を支える技術については3章で述べる。

## 3. 衛星SARの利用を支える技術

### 3.1 デュアルビームSAR技術

広範囲にわたって高分解能で観測する要望があるが、SARは原理上、アジマス方向の分解能と観測幅がトレードオフの関係にあり、高いアジマス分解能を実現するため

には、観測幅を狭める必要がある。PALSAR-2では、広域かつ高分解能なプロダクトの実現のためにデュアルビームSAR技術を採用した。デュアルビームSAR技術は、図1に示すとおり、1つの開口から送信された信号を位相中心の異なる2つの受信開口で受信することで、PRF(パルス繰り返し周波数)を低下させる。PALSAR-2では、この技術を標準実装することによって、PALSARでは難しかった分解能と観測幅に関して飛躍的な性能の改善を同時

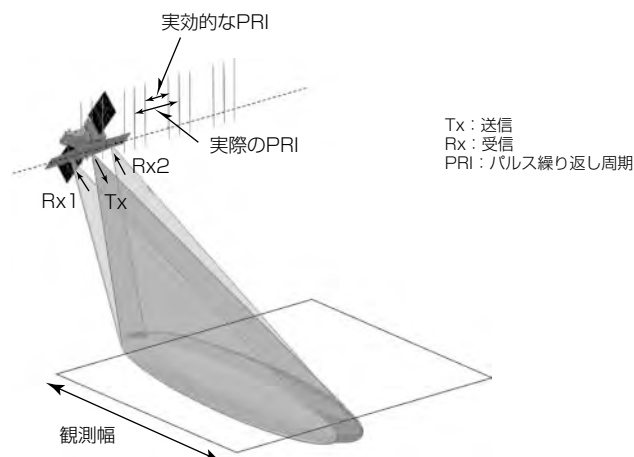
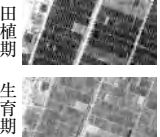
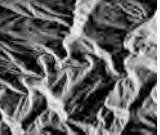




図1. デュアルビームSAR技術による観測の概念図

表1. 衛星SARの利用とPALSAR-2への期待

利用分野	衛星SARの利用例	PALSAR-2への期待	利用を支える技術
農業	○作付状況の把握 <sup>(2)</sup> 作物の成長に対するSAR受信信号レベルの違いを利用した、作付面積の把握及び作付状況の把握へ利用 画像提供：農業環境技術研究所／RESTEC／JAXA 	良好なNESZ <sup>(注1)</sup> に加え、高分解能化と広域化を両立した観測によって、農作物の作付面積や収量に関わる統計値の精度向上と管理の効率化	デュアルビームSAR技術
土木	○道路や線路の保守点検・管理 <sup>(2)</sup> 定期的に取得したSAR画像から抽出した変化から、川の氾濫や崖崩れの様子が分かり、周囲を走る道路や線路の点検、補修工事の優先順位を正しく設定することへ利用 画像提供：Pi-SAR-L2/JAXA 	高分解能化と広域化を両立させた観測画像の活用(定期的に取得した画像間の変化抽出等)による保守点検作業の効率化 回帰日数の短縮化による、時間分解能の向上、地形及び地殻変動量の推定精度の向上	デュアルビームSAR技術 —
災害	○被災エリアの地殻変動モニタリング <sup>(2)</sup> 差分干渉SAR技術によって推定された地殻変動から、被害規模の想定と復旧計画の立案へ利用 画像提供：JAXA／METI 	高分解能化技術によって、識別困難であった観測対象の状況把握が可能になり(例えば橋梁の形状)、防災のための詳細な災害ハザードマップ作成が可能 広域化技術によって、希望する観測エリアが一度の観測で収まることによるモニタリングの効率化(観測タイミングを待たなくて済む)	スポットライトモードSAR技術 スキャンSAR技術
海洋	○船舶の安全を確保 <sup>(2)</sup> SAR画像とAISデータを組み合わせて利用することで、船舶の詳細な分布状態が分かり、海上での安全確保へ利用 画像提供：JAXA／METI 	広域化技術による航行状況モニタリングの効率化 PALSAR-2 SAR画像とALOS-2搭載の自動船舶検知システム(AIS)等の他のセンサの情報との組み合わせによって、船舶の状況確認に対する精度の向上	スキャンSAR技術 ATI技術
森林	○炭素循環モデリングや林業のための森林樹高推定 <sup>(4)</sup> 偏波干渉SAR技術によって推定された森林樹高から、炭素循環モデリングのためのバイオマス量の推定や森林管理へ利用	高い偏波分離度等による高精度な多偏波観測技術と回帰日数の短縮化及び良好なNESZによる高品質な干渉SAR技術の組み合わせ(偏波干渉SAR技術)によって、樹高等の森林パラメータ推定精度の向上	ポーラメトリックSAR技術、偏波干渉SAR技術

(注1) NESZ(Noise Equivalent Sigma Zero)は、S/N(Signal to Noise)比が1となる場合の後方散乱係数を表す。値が低いほど、SARの受信信号に対する感度が高いことを示す。

RESTEC：リモートセンシング技術センター、METI：経済産業省

に実現した。表2にPALSARとPALSAR-2の性能比較を示す。ストリップマップモードでは3mの高分解能化と50km以上の広い観測幅を同時に実現した。

### 3.2 スポットライトモードSAR技術(高分解能化技術)

災害発生後の被災地の詳細な状況を把握するなどの観測対象に対する高い識別性が要求される観測のため、PALSAR-2ではスポットライトSAR技術を採用し、1～3mの分解能を実現した。スポットライトSAR技術は、図2に示すとおり、画像化対象領域に、スポットライトのようにビームを当て続けることで、長い合成開口長を確保して高分解能化を図る技術である。さらに、デュアルビームSAR技術との併用によって、観測幅も25kmと広い範囲をカバーできるため、大規模災害時にも対応可能となる。

図3に、スポットライトSAR技術によって観測された神戸市周辺のSAR画像を示す。右に示す神戸空港連絡橋付近の拡大図から、橋梁(きょうりょう)の形状を明瞭に確認できることが分かる。仮に橋梁が被害を受けた場合、被害状況の確認に有用であると見込まれる。

### 3.3 スキャンSAR技術(広域化技術)

観測対象が広大な海洋や災害等の分野でのモニタリングでは、瞬時に広範囲の観測が必要である。広範囲の観測を実現する観測方式として、PALSAR-2ではスキャンSAR技術を採用している。スキャンSAR技術では、図4に示

すとおり、带状領域をバースト様に観測し、それらをエレベーション方向に移動(スキャン)させながら観測することで、大きな刈り幅での観測を実現する。

PALSAR-2では、5スキャン及び7スキャンでの観測が可能であり、デュアルビームSAR技術との併用によって、観測幅350kmに加えて、観測幅490kmの超広域観測を実現している。図5にPALSAR-2のスキャンSAR技術の観測結果を示す。一度に北海道がほぼ収まる領域の観測が可能である。さらに、観測制御方式の改善による高頻度でのスキャンSARインターフェロメトリが可能となり、広域災害のモニタリングに期待が高まっている。

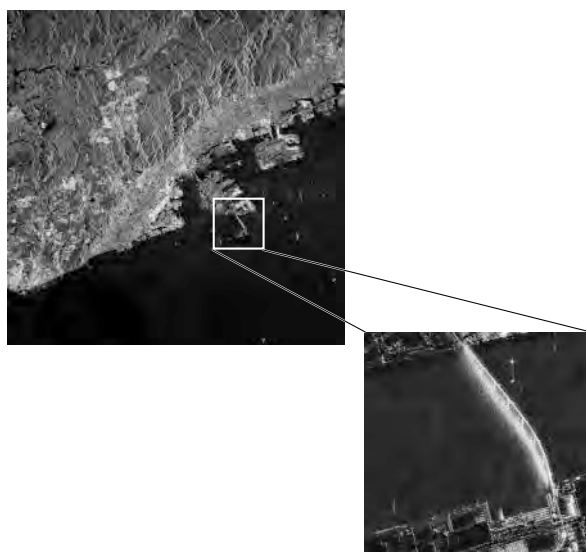


図3. PALSAR-2のスポットライトSAR技術による観測結果(神戸市周辺と橋梁・2014/06/20観測(画像提供: JAXA))

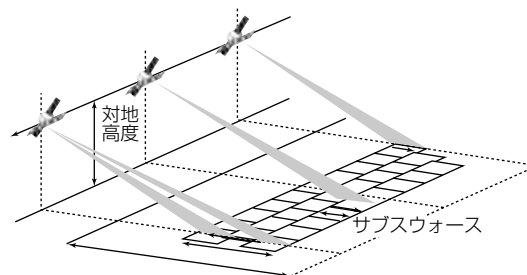


図4. スキャンSAR技術による観測の概念図

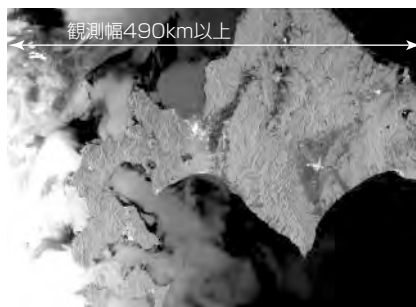


図5. PALSAR-2のスキャンSAR技術による観測結果(北海道周辺・2014/07/05観測(画像提供: JAXA))

表2. PALSARとPALSAR-2の性能比較

	PALSAR	PALSAR-2
イメージ図		
運用期間	2006～2011年	2014年～
送信電力	2,000W級	5,100W級
スポットライトモード 分解能／観測幅／NESZ	なし	1～3m／25km／-24dB以下
ストリップマップモード 分解能／観測幅／NESZ	10m／70km／-21dB以下	3m／50km／-24dB以下 10m／70km／-26dB以下
スキャンSARモード 分解能／観測幅／NESZ	100m／350km／-23dB以下	60m／490km／-26dB以下 100m／350km／-26dB以下
ポーラリメトリックSARモード 分解能／観測幅／NESZ	30m／30km／-28dB以下	6m／30km／-25dB以下

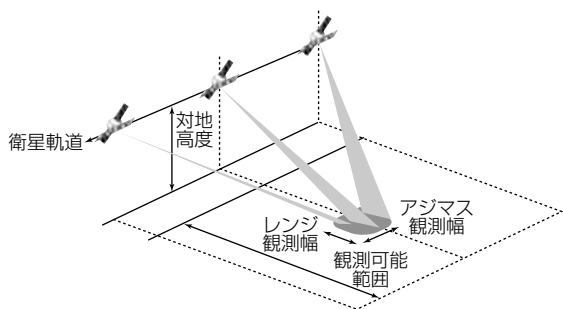


図2. スポットライトSAR技術による観測の概念図

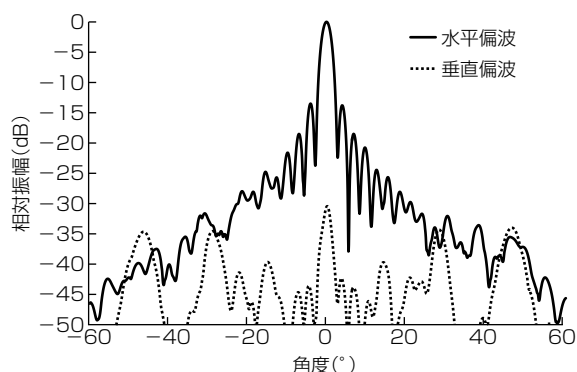


図 6. 水平偏波と垂直偏波の間の偏波分離度  
(PALSAR-2のアンテナパターン地上試験結果)



(a) HH偏波のSAR画像



(b) VH偏波のSAR画像

図 7. PALSAR-2 ポーラリメトリックSAR技術による観測結果  
(テーマパーク駐車場・2014/06/19観測(画像提供: JAXA))

### 3.4 ポーラリメトリックSAR技術(多偏波観測技術)

水平偏波と垂直偏波による送受信の組合せによって多偏波観測するポーラリメトリックSAR技術を採用しており、単一偏波観測に比べ、観測対象の表面粗さや形状等の情報をより多く取得できる。

高精度なポーラリメトリックSAR観測の実現のためには、水平偏波と垂直偏波で高い偏波分離度が要求されるが、図 6 に示すPALSAR-2のアンテナパターン地上試験結果として、偏波分離度30dB以上を達成している。

図 7 は、同一の観測対象に関する(a)HH偏波、(b)VH偏波のSAR画像であり、画像中央には駐車場がある。駐車場にある街灯のボールの偏波散乱特性によって、ボールは

VH偏波では現れないがHH偏波では現れていることを確認できる(複数の白い点)。

## 4. 将来SAR技術開発への取組み

PALSAR-2では、SAR利用技術実証のための実験モードとして、CP(Compact Polarimetry)技術とATI(Along Track Interferometry)技術を搭載している。CP技術は、PALSAR-2の多偏波観測機能を活かし、送信偏波を円偏波とすることで実現している。CP技術によって、多偏波観測に比べて広域での偏波観測が可能となる。また、デュアルビーム技術実現のために実施しているアンテナ開口の前開口、後開口の信号を独立した受信システムで受信していることを活用することでATI技術を実現している。ATI技術によって、移動目標検出が可能となり、都市域や海洋における船舶のモニタリングなどに効果を発揮することが期待されている。

また、PALSAR-2の観測データとALOS-2搭載の船舶自動識別システム(AIS)等の他のセンサの取得情報を組み合わせることによって、船舶の検知、分類、そして速度検出までを一連に処理し、高次レベルプロダクトとして出力する手法も提案されている<sup>(3)</sup>。さらには、ALOS-2で実現された回帰日数の短縮化及び高出力化による良好なNESZによって、観測対象の高度情報を抽出するSAR干渉技術を高品質に実現できる見込みである。偏波観測技術と組み合わせることによって、森林の樹高を精度よく推定することへの期待がある<sup>(4)</sup>。

## 5. む す び

衛星SARの利用とPALSAR-2への期待、そして利用を支える技術について、PALSAR-2によって取得された最新のSAR画像を用いて示した。SARを開発し、SARの利用を通して社会貢献を志向する当社は、更なる利用拡大のため、一般ユーザーが要望する高次レベルプロダクトの提供を念頭に置いた技術開発を今後も推進していくことによって、更なる貢献を目指している。

## 参 考 文 献

- (1) Kankaku, Y., et al.: PALSAR-2 Launch and Early Orbit Status, IGARSS, 3410~3412 (2014)
- (2) ALOS-2 SOLUTION BOOK 2nd edition  
[http://www.sapc.jaxa.jp/use/PDF/ALOS\\_JP\\_web.pdf](http://www.sapc.jaxa.jp/use/PDF/ALOS_JP_web.pdf)
- (3) Arii, M., et al.: Applicability of ALOS2 to Maritime Surveillance, EUSAR, 1~4 (2014)
- (4) Hajnsek, I., et al.: Tropical-Forest-Parameter Estimation by Means of Pol-InSAR: The INDREX-II Campaign, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47, No.2, 481~493 (2009)

# 静止軌道衛星用 次世代リチウムイオンバッテリー

岡 寿久\* 半田誠一\*  
大迫庸介\* 清川 丈\*  
吉岡省二\*

New Generation Lithium-Ion Battery for Geosynchronous Earth Orbit Satellite

Toshihisa Oka, Yosuke Osako, Shoji Yoshioka, Seiichi Handa, Takeshi Kiyokawa

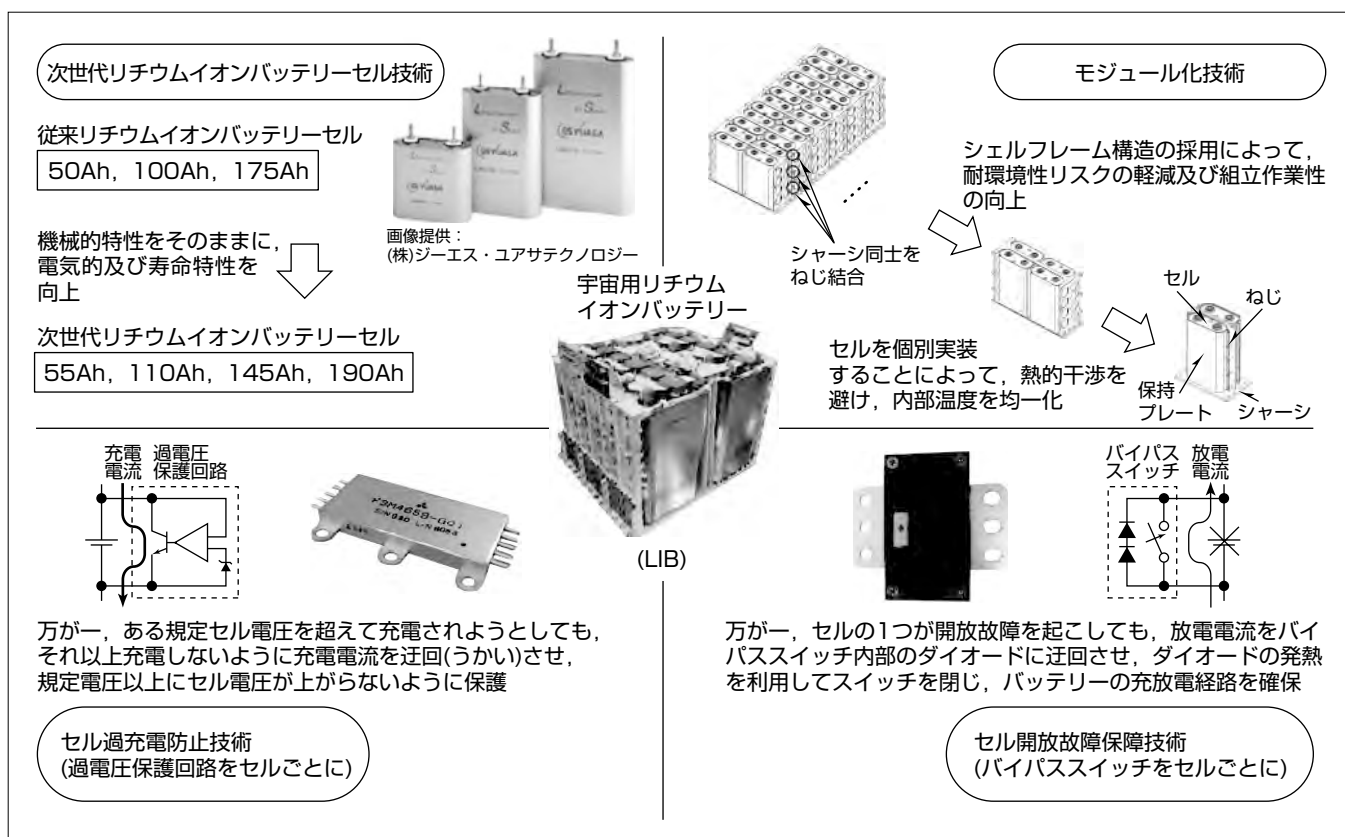
## 要 旨

衛星搭載用電源機器のキーデバイスであるバッテリーの小型・軽量化及び高機能化は衛星全体の小型・軽量化を可能とする。携帯電話／スマートフォンや車載用バッテリーとして広く普及しているリチウムイオンバッテリーは、エネルギー質量効率が高く、放電電圧が高い充放電効率の良いバッテリーであり、人工衛星用バッテリーシステムにも多くのリチウムイオンバッテリーが使用されている。

三菱電機は継続的に衛星搭載用リチウムイオンバッテリーの開発／生産を行い、国内のみならず世界中の衛星システムメーカーにリチウムイオンバッテリーを供給し、既に

150台以上の軌道上運用実績がある。海外商用衛星市場で当社リチウムイオンバッテリーの世界シェアは約35%を得ており、新たに開発した次世代リチウムイオンバッテリーを中心に更なるシェア拡大に向けて拡販活動を行っている。

近年は、衛星電力要求が増加傾向にあり、バッテリー高効率化のニーズに対応するため、130Wh/kg以上の高いエネルギー質量効率を実現した次世代リチウムイオンバッテリーを開発し、静止衛星軌道の運用パターンで15年以上の寿命を満足し、充放電2,000サイクル以上でも容量保持率90%程度の寿命特性を実現した。



## 衛星搭載用リチウムイオンバッテリーの基本技術

衛星搭載用リチウムイオンバッテリーを構成する基本的な技術を示す。宇宙環境で使用される衛星搭載用リチウムイオンバッテリーは、大容量化のみならず、ロケット及び宇宙環境に適合する耐環境性及び万が一の搭載部品の故障にも対応するための保護／保障機能を持っている。

## 1. ま え が き

1990年代に市場に流通して以来リチウムイオンバッテリー(LIB)セルは、携帯電話／スマートフォンや車載用バッテリーとして急速に普及している。衛星搭載用バッテリーでも、従来のNi-H<sub>2</sub>バッテリーセルから性能、信頼性、品質面で優位なリチウムイオンバッテリーセルに着々と切換えが進められており、今後事業の拡大が期待されている。

当社は、2001年以降継続的に米国のSPACE SYSTEMS/LORAL (SSL)社に納入し、2005年の同社向けiPStar衛星搭載用リチウムイオンバッテリーを機にフライト実績が認められ、SSL社のみならずフランスのTHALES ALLENIA SPACE (TAS)社、インドのINDIAN SPACE RESEARCH ORGANISATION (ISRO)などの衛星システムメーカーに多くのリチウムイオンバッテリーを供給し、現在までに150台以上の軌道上運用実績がある。海外商用衛星市場で当社リチウムイオンバッテリーの世界シェアは約35%を得ており、新たに開発を実施した次世代リチウムイオンバッテリーを含め更なる拡販を行っている。

本稿では、これら製品で確立した技術と最近の開発成果について述べる。

## 2. 衛星搭載用リチウムイオンバッテリー

### 2.1 特 徴

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

リチウムイオンバッテリーは、2009年に電気自動車(EV)が発売されたことや、スマートグリッド向けなど、国策を背景とした市場を対象に急成長を見せているが、衛星搭載用の機能としては、

- (1) 充放電サイクルに強い(低軌道では数万サイクル)
  - (2) 長寿命(静止衛星：15年以上、低軌道衛星：5年以上)
  - (3) 軽量でエネルギー質量効率が高い
  - (4) 衛星搭載性(熱的・機械的な特性)に優れる
- 等が要求される。

当社の衛星搭載用リチウムイオンバッテリーは、1998年から(株)ジーエス・ユアサテクノロジー(旧日本電池と旧ユアサコーポレーションが経営統合)と共同開発を進め、海外衛星向けとして初めて2005年8月にSSL社向けiPStarに搭載され、現在も正常に運用されている。この実績を皮切りにリチウムイオンバッテリーの搭載が拡大できた。これまで1つの故障もなく正常に作動を続けており、高い信頼

性を裏付けている。

リチウムイオンバッテリーセルには正極にコバルト酸リチウム(LiCoO<sub>2</sub>)を用いて高い充放電電圧を得るとともに、負極にはカーボン材料を用いて容量の確保を図っている。バッテリーとしてはセルごとに、セル故障対策のための過電圧保護回路、直列に接続されたバッテリーセルの開放故障時でもバッテリー機能を維持できるバイパススイッチを独自に自社開発し、長寿命化を支える高信頼性技術を持っている。

衛星搭載用リチウムイオンバッテリーセルとしては、エネルギー密度が高い大容量セルを目標として開発した。エネルギー質量効率は代表値で140Wh/kgとなっており、従来の衛星搭載用セルであるNi-H<sub>2</sub>に比べて2倍以上の高い値である。バッテリーレベルでも筐体(きょうたい)や保護回路などの軽量化を図り、100Wh/kg以上の高いエネルギー質量効率を実現し、競争力強化を図っている。セルの形状としては長楕円(だえん)円筒形という独自の形状を採用しており、容積効率が高い一方で、バッテリー筐体フレームとの接触面積を大きく取れるため、セル内部での温度均一性に優れている。

バッテリーはセルを直列に複数接続して構成し、充放電はバッテリー一括で行う。このため、セル電圧がばらつくと各セルの電圧に差が生じ、この結果、特定のセルが過充電になる可能性がある。これを防ぐのが過電圧保護回路で、充電が持続し、一定電圧以上にセル電圧が上昇する場合に、その充電電圧を迂回させ、充電電圧を規定値以上にならないように制御する(特許2003-427961)。

バイパススイッチは直列に接続されたセルの1つが開放故障を起こした場合でも、充放電電流の経路を確保してバッテリーの機能を喪失しないようにするためのスイッチである。これによって、1セル故障に対し、バッテリー冗長を構成する必要がなく、エネルギー質量効率が損なわれない重要な技術の1つである。セルごとにスイッチを並列に接続し、セルが故障を起こした場合に自動で作動し、バッテリー機能を維持できるようにしている(特許2005-063869)。

図1に代表的なリチウムイオンバッテリーを示す。

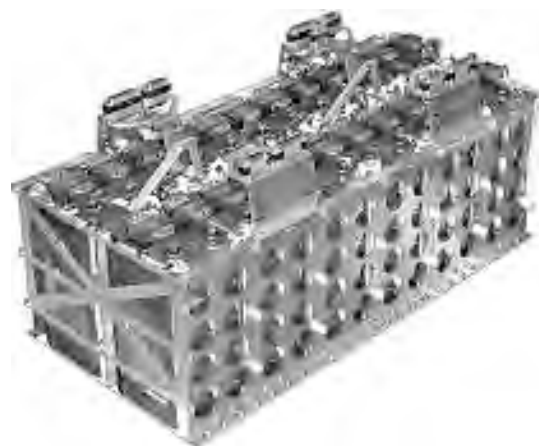


図1. 代表的なリチウムイオンバッテリー

## 2.2 構造

当社リチウムイオンバッテリーの実装方法は、振動及び衝撃環境に適した独自のシェルフレーム構造を採用している。図2に従来のNi-Cdバッテリー等で採用されていたスタック構造とシェルフレーム構造の概念図を示す。シェルフレーム構造を採用することによって、セル実装時にセル外形寸法公差の影響を受けにくくなり組立作業性の向上が図れ、さらに、セルを荷重パスから除外し、局所的な応力集中を緩和することによって耐環境性のリスクを軽減できる(特許2002-305758)。

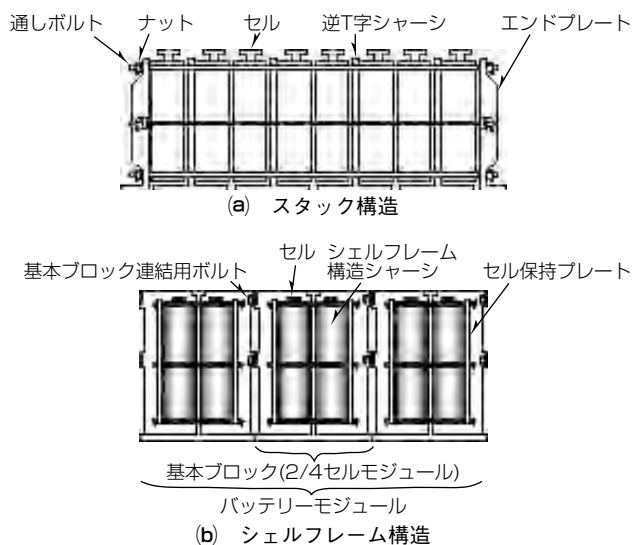


図2. バッテリーの構造比較概念図

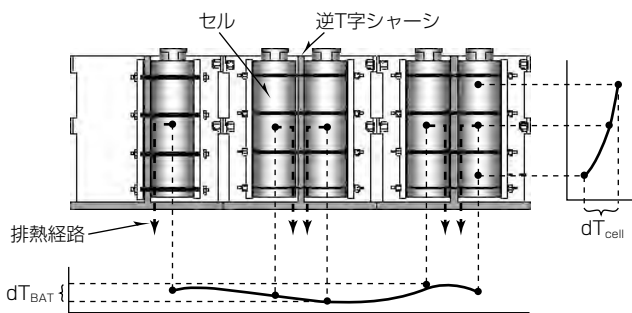


図3. バッテリーの熱設計概念図

バッテリーの熱設計概念図を図3に示す。セルを個別実装することによって別のシャーシに実装されているセルとの熱的干渉を避け、バッテリー内部の温度を均一化している。

## 3. 次世代リチウムイオンバッテリー

### 3.1 次世代リチウムイオンバッテリーセルの採用

当社で採用していたリチウムイオンバッテリーセルのラインアップは容量、寸法及び質量の異なる50Ah/100Ah/175Ahセルであり、それらを衛星搭載用バッテリーとして実装している。近年、衛星運用の長寿命化及び小型・軽量化が進んでおり、バッテリーに対する軽量化の要求も強いが、バッテリーの機構部材による大幅な軽量化は難しい状況である。

そこで、従来のセルの外形寸法及び質量はそのまま、近年の発展した市場のリチウムイオンバッテリーセル技術を採用し、リチウムイオンバッテリーセルのエネルギー質量効率を165Wh/kgに高くした次世代セルを用いてバッテリーを実装することによってバッテリー機械及び熱的機能はそのままに電気性能の向上を実現した。次世代リチウムイオンバッテリーセルは長寿命化も図られており、この採用によって、バッテリーの寿命性能が従来の約3倍向上した。これによって、バッテリーを構成するセル段数を削減することが可能となり、バッテリーの軽量化に寄与することができる。

### 3.2 次世代リチウムイオンバッテリーの検証試験

過酷な振動及び衝撃、真空環境等の一般のバッテリーにはない環境を試験評価するため、図4に示す衛星の環境条件下でのリチウムイオンバッテリーの電気特性、機械性能等を実機で試験(認定試験)・検証し、耐環境設計仕様を満足することを確認した。その後、軌道上での寿命特性を把握するため寿命試験を実施している。

次世代リチウムイオンバッテリーの認定試験による検証結果から、バッテリーの機械及び熱的機能が従来の衛星搭載用バッテリーと同等の衛星環境(ロケット打上げ、宇宙環境)に十分適合していることを確認した。また、電氣的

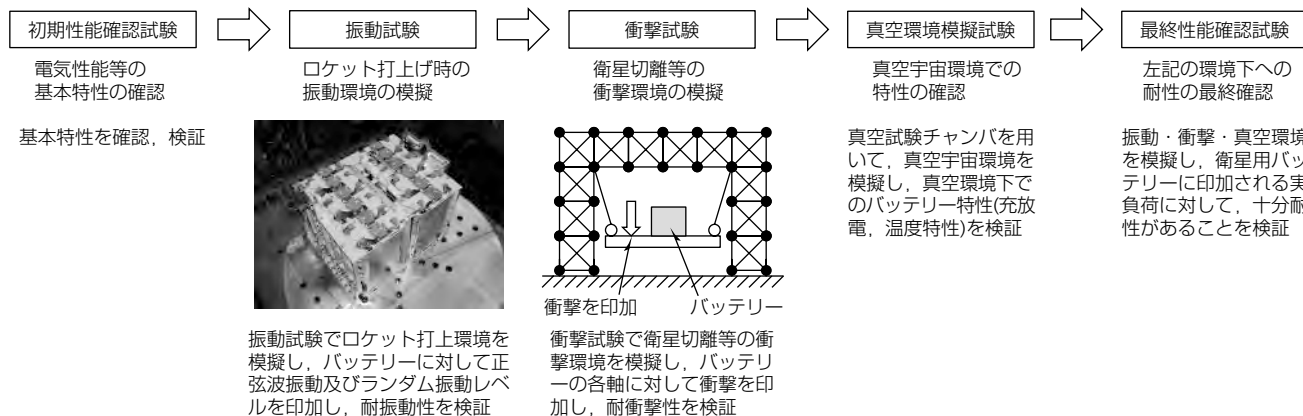


図4. 宇宙環境を模擬した検証試験



図 5. 次世代リチウムイオンバッテリーの検証モジュール

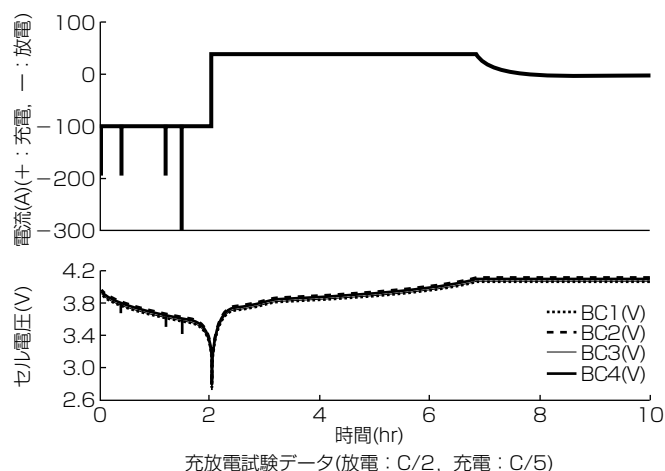


図 6. 次世代リチウムイオンバッテリーの充放電特性

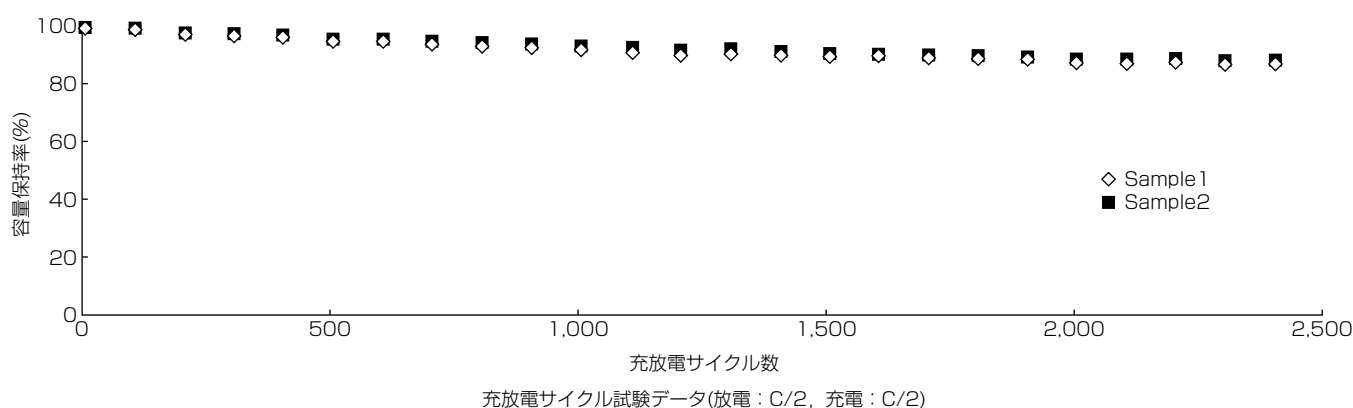


図 7. 次世代リチウムイオンバッテリーの充放電サイクル寿命特性

にはエネルギー質量効率の高い次世代セルを採用したことによってバッテリーとして130Wh/kg以上の高いエネルギー質量効率を実現し、現在実施している充放電サイクル寿命試験から静止衛星軌道の運用パターンで15年以上の寿命を満足できる特性である。次世代リチウムイオンバッテリーの検証モジュールを図5に示す。次世代リチウムイオンバッテリーの代表的な充放電特性を図6に示す。次世代リチウムイオンバッテリーを用いた充放電サイクル寿命特性(放電深度100%サイクル@25℃)を図7に示す。実衛星運用のバッテリー環境温度より温度を高く、さらに放電深度も深い加速寿命試験で、充放電2,000サイクル以上でも容

量保持率が90%程度と寿命特性が非常に良く、長寿命要求の衛星運用に適したバッテリーであることを検証した。

#### 4. む す び

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

これらの成果を当社商用衛星DS2000及び海外衛星メーカーへ拡販していくことによって国内外シェアNo. 1を目指していく所存である。

# 風況観測用ライダ“DIABREZZA”

梶山 裕\* 小竹諭季\*\*\*  
藤井康宏\*  
酒巻 洋\*\*

*Doppler LIDAR System "DIABREZZA" for Measuring Wind Condition*

*Yutaka Kajiyama, Yasuhiro Fujii, Hiroshi Sakamaki, Nobuki Kotake*

## 要 旨

風力発電分野で、風況調査の際に風況観測用マスト建設の必要がない風況観測用ドップラーライダ (Light Detecting And Ranging : LIDAR) に注目が集まっている。ライダはレーザ光を大気中に放射し、大気中のエアロゾル (塵 (ちり) 等の微粒子) からの散乱光を受信し、そのドップラー周波数の変位を検出することで遠隔の風速を計測する装置である。

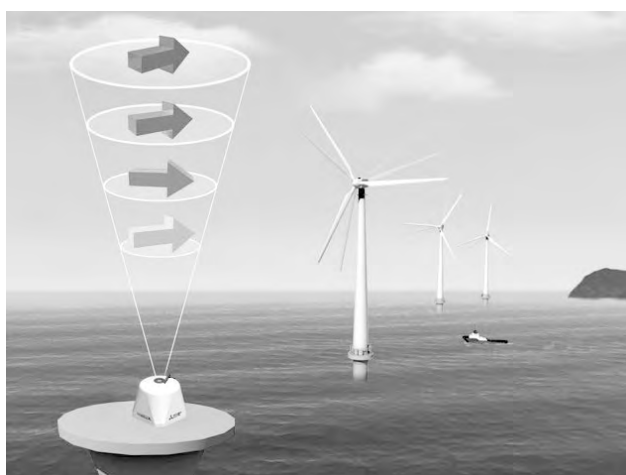
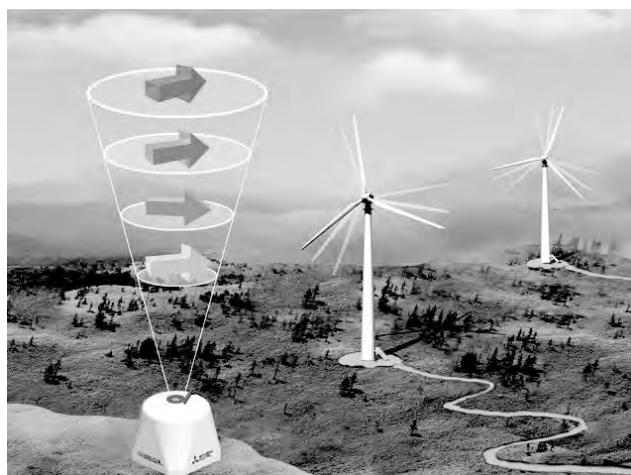
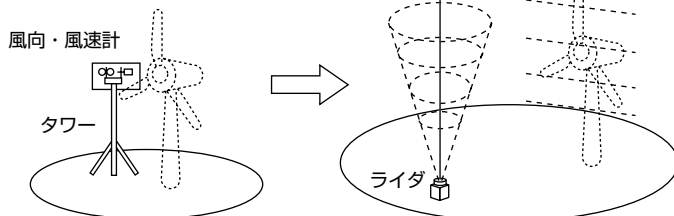
三菱電機は風況観測用ライダ“DIABREZZA”を開発した。風況観測用マストでは計測できない高度まで水平風向風速・鉛直風速を計測することができる。風計測精度に関しては、風力発電分野における欧州の主要研究機関である

オランダエネルギー研究センター (Energy research Centre of the Netherlands : ECN) による第三者検証を受け、風力事業への導入基準をクリアしていることが承認された。

また、洋上風力発電の拡大を見込み、洋上 (浮体上) に設置することを想定した動揺補正機能や、天候変化に応じて観測パラメータを自動調整する環境適応制御機能も搭載しており、屋外での設置・計測が可能な耐環境型小型ライダとなっている。

本稿では当社が今回開発した風況観測用ライダについて述べるとともに、これまでに開発したナセル搭載型・長距離観測型のライダについて述べる。

- ・風車の大型化＝タワー<sup>(注1)</sup>の大型化に伴って、タワーの建設コストの増大や、国内の建設基準法の制約を受ける。
- ・ライダを活用することで、タワーでは観測できない100m以上や、高度ごとの風の計測が可能になる。



(注1) タワーは、風向・風速計を設置した風況観測用マストである。

## 陸上及び洋上での風力発電を想定した風況観測

風車の大型化に伴って風向・風速計を置くタワーを大型化する必要が生じ、タワー建設コストの増大や建築基準法の制約などの問題が生じている。この問題に対し、当社の風況観測用ライダは高度ごとに観測が可能であるため、もはやタワーを建設する必要がなく、ハブ高さとブレード先端における風速を同時にリアルタイムで計測することができる。

## 1. ま え が き

再生可能エネルギーの中で拡大が期待されている風力発電では風車建設候補場所の風況調査は必須であり、これまででは風車ハブ高と同じ高さに風向風速計を設置した風況観測用マストを建設し観測してきた。しかし、風車の大型化に伴い風車ハブが地上高100m前後となるが、国内では建築基準法の制約によってマストの建設が難しく、また、今後拡大が期待されている洋上風力発電の場合はマストの建設費の増大が事業上の課題となってきた。

このため、マストの建設を必要とせず、レーザ光を用いて上空の風向風速を地上から観測するライダを開発した。このライダの製品概要と主要技術を述べる。

## 2. 原 理

ライダはレーザ光を大気中に放射し、大気中のエアロゾル(大気中の塵、目に見えない数ミクロンの浮遊粒子)からの散乱光を受信し、そのドップラー周波数シフトから風速を観測する。レーザ光はビーム方向のみの風速しか観測できないが、このレーザ光を斜め上空に向け順次切り替えながら放射し、その受信した複数のビーム方向の風速をベクトル合成することで上空の高度ごとの三次元風向風速が観測できる。

当社は1990年頃から気象観測、航空機の飛行安全等の用途に各種ライダを開発・製品化してきた。類似の観測装置としてはレーダやソーダがある。レーダは雨滴や雲などからの反射波を観測するが、ライダは晴天でも観測でき、電波法上の免許も不要である。また、レーダやソーダに比べてビームが細いので、一般的に局所的に正確な観測が可能である。

## 3. 装 置

風況観測用ライダは、風況観測用マストでは計測できない高度を含む、40～250mまでの水平風向風速・鉛直風速(三次元風ベクトル)を計測することができる。このライダは耐環境型であり、風車建設予定地の屋外(洋上の浮体上も含む)での設置・計測も可能である。ライダの外観を図1に示す。



図1. 風況観測用ライダ

このライダは、天候変化などに応じて観測パラメータを自動調整して所望の高度でのデータ取得率を最大化する環境適応制御機能(5.1節)を持つ。また、洋上浮体へ設置することを想定した遠隔監視制御機能・動揺補正機能(5.2節)もオプションとして用意している。

### 3.1 性 能

風況観測用ライダの主要性能を表1に示す。

このライダは図2のように、上部のウィンドウから放射方向を固定した5つのレーザ光を放射することで、それぞれのビーム方向の風速を観測している。

これらのビーム方向の風速を組み合わせることで、上空の高度ごとの水平風向風速データや鉛直風速データが得られる。この5方位のビーム走査は電氣的切替え方式であり、従来の機械的走査に比べて瞬時に計測が可能である。また、駆動系をなくしたことでメンテナンスフリー化と長寿命化を実現している。また、アイセーフ波長(近

表1. 風況観測用ライダ主要性能

項目	性能
観測距離	40～250m(実際の観測距離はエアロゾル濃度等によって変化する。)
高度分解能	20m, 25m, 30m(最小4mごと)
走査パターン	スイッチ切替え方式
ビーム走査方向	0°(北)/90°/180°/270°/鉛直
レンジ数	20/40レンジ切替え
出力/表示データ	・水平風向風速の各レンジごとの分布 ・鉛直風の各レンジごとの分布 ・10分間平均風向風速データ
風速観測範囲	0～60m/s
風向風速更新周期	最速2s以内
レーザ波長	1.55μm帯の単一波長(JIS C 6802 クラス1Mに相当)
外部温度・湿度範囲	-20～+40℃, 0～100%RH
耐環境性	IP67, 重塩害仕様
本体寸法・質量	・W550×H550×D550(mm)(突起物は除く) ・50kg
電源条件	DC+24V ±10%
適合規格	CEマーク, RoHS

RH: Relative Humidity, RoHS: Restriction of Hazardous Substances

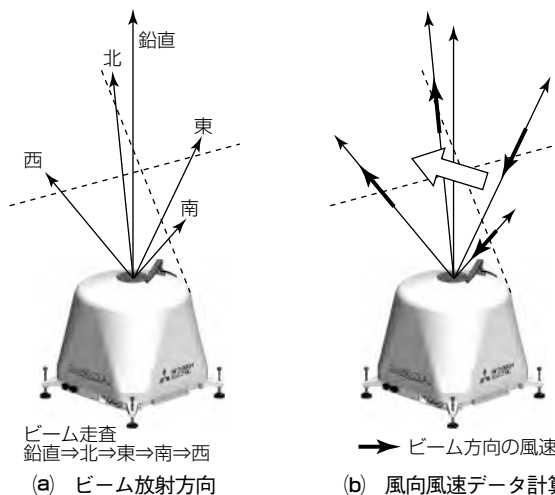
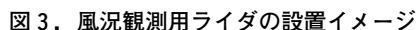


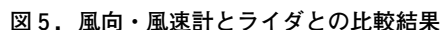
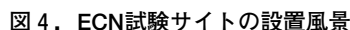
図2. 風況観測用ライダビーム走査

構成品名称		数量
ライダ本体装置		1
付属品	洗浄水タンク	1
	各種接続ケーブル類	1
オプション	外部ユニット(動揺補正&遠隔監視制御機能含む)	1
オプション	電源ユニット (AC/DC変換機能含む)	1



外部ユニットオプションを用いた場合(浮体での使用時)  
の構成部品を表2、設置イメージを図3に示す。

評価では、マストの高度100mに位置する三杯式風速計・矢羽根式風向計と、ライダによって計測された水平方向風向・風速値との比較を行った。ライダ計測における高度分解能設定は25mである。ライダは1秒ごとに風向・風速計測を行うが、10分間のデータを平均し平均値どうしの比較を行った。図5に風向・風速計とライダの水平風向風速値の比較結果を示す。風速値に関して、回帰直線 $y=ax$ で近似したときの傾き $a$ は0.986、決定係数 $R^2$ （相関係数の二乗値）は0.990であった。風向値に関しては、 $a=1.002$ で、 $R^2=0.998$ であった。これらの値は、欧州の洋上風力研究開発プロジェクトNORSEWInD (NORthen Seas Wind Index Database) で要求されているライダの性能条件<sup>(1)</sup> ( $0.98 < a < 1.01$ ,  $R^2 > 0.98$ ) を満足する結果であるとしてECN側から承認された<sup>(2)</sup>。環境適応制御機能(5.1節)によって、曇天や雨天時の環境下でも有効データ取得率95%以上を得ることができた。



この制御機能を搭載したライダの構成を図7に示す。このときユーザーは所望の観測距離を入力することで、信号処理装置内部で取得した距離-SNR特性から、これらの観測距離を最大化するために最適な焦点距離と積算時間をリアルタイムに自動で設定する。

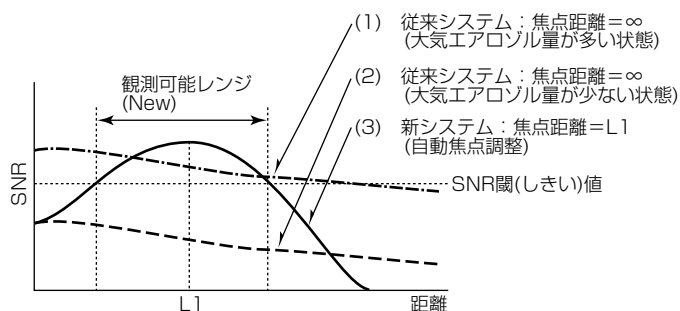


図 6. 環境適応制御の効果

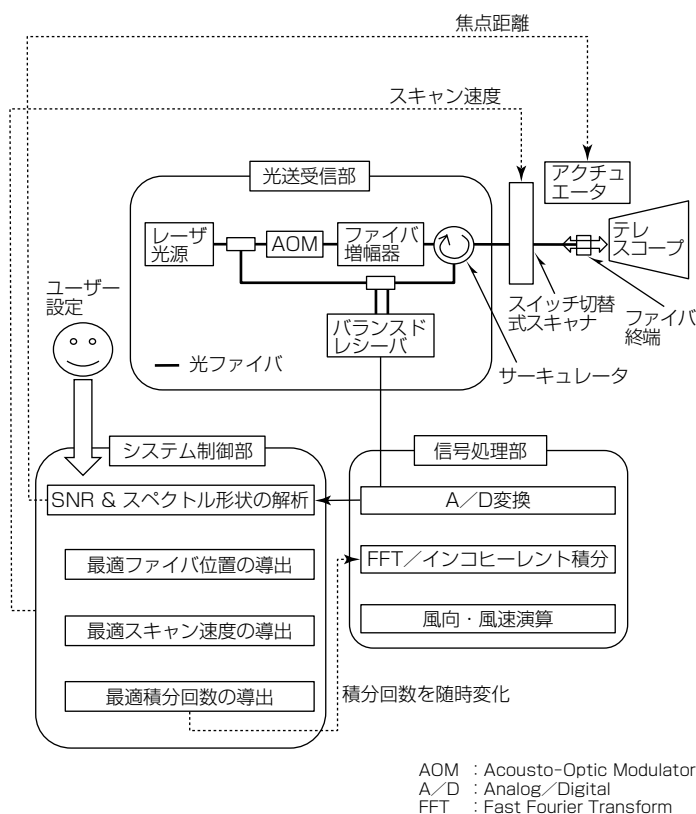
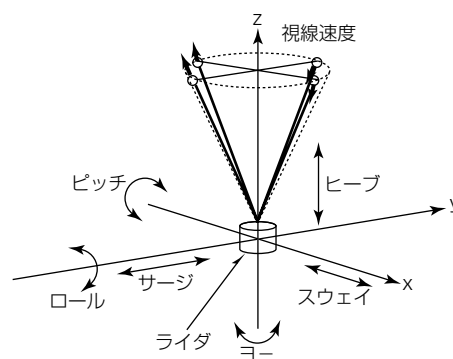


図7. システム構成図

## 5.2 動揺補正機能

パイ等の浮体にライダを搭載する場合、浮体の動揺による風計測結果の劣化が懸念されるため、浮体動揺の影響を排除する動揺補正機能を開発した。図8に、動揺の定義と動揺補正処理の概念図を示す。

浮体動揺が風計測結果に及ぼす影響としては、浮体の回転運動によって姿勢角が変化することで風の 3 軸 (x-y-z) 成分が変わり、風の水平・垂直成分の計算精度が劣化するものと、浮体の並進運動によって並進速度が風のドップラー計測値そのものに重畳するものが支配的となる。その他、浮体の重心と、動揺センサ、ライダの位置関係によって生じる相対速度についても考慮した。動揺補正処理では、動揺センサから得られる 3 軸の姿勢角 (ロール/ピッチ/ヨー)・角速度 (ロール/ピッチ/ヨー)・並進速度 (サージ/スウェイ/ヒープ) を用いてこれらの動揺の影響を除

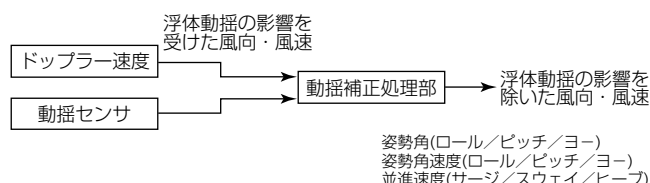


図 8. 動揺の定義と動揺補正処理の概念図

去する。さらに、回転運動・並進運動が大きく、風向風速推定演算を行う観測領域の風の一様性が確保できない場合には、計測値を無効とする品質管理処理も持っている。

## 6. その他のライダの概要

その他のタイプのライダーについて述べる。

## 6.1 ナセル搭載型

風力発電事業分野でのその他のライダ利用としては、風車評価・制御、ウィンドファーム監視が考えられる。従来、風車評価は風況観測用マストで観測した風速と風車の発電量との比較で実施されてきた。先に述べた地上設置型ライダでも比較可能だが、ナセルにライダを搭載すれば風車からの距離方向の風速を観測し、発電量との比較が可能となる。さらに、ライダが観測した前方の風速風向の変化を風車のヨー角やブレードのピッチ角制御に活用することで、突風等による風車ブレードの負荷軽減・寿命向上や、発電効率向上につながると期待されている。

当社はナセル搭載型ライダ(プロトタイプ機)を三重大学と(独)産業技術総合研究所に納入した。その性能を表3に示す。図9は三重大学へ納入したナセル搭載型ライダの外観を示す。図10は、産業技術総合研究所の風車とナセル上のライダの搭載状況である。

## 6.2 長距離観測型

当社は観測距離が20km超の長距離観測型のライダも販売している。この長距離観測型は、航空機の運航に悪影響を及ぼす空港周辺の気流観測を主目的として開発し、国内外の空港への展開を計画している。さらに近年、ウィンドファームの建設前の風況観測や、建設後のウィンドファーム全体の監視・制御を行うことも計画している。長距離観測型ライダの性能を表4に示す。外観を図11に示す。この長距離観測型ライダには、新たに開発した高出力を実現

表 3. ナセル搭載型ライダの性能

項目	性能
観測距離	40～250m (実際の観測距離はエアロゾル濃度等によって変化する。)
距離分解能	25m, 30m, 50m
走査方向数	9 方向
ビーム指向方向	水平： $-15^{\circ}$ , $0^{\circ}$ , $+15^{\circ}$ 垂直： $-10^{\circ}$ , $0^{\circ}$ , $+10^{\circ}$



(a) 光アンテナ装置



(b) ライダ本体装置

図 9. 三重大学向けナセル搭載型ライダ



(a) 風車



(b) ナセル上のライダ(背面)

図10. 産業技術総合研究所向けナセル搭載型ライダの状況

できる“導波路型光アンプ (Waveguide Amplifier : WGA)”を流用した。

## 7. む す び

当社のライダ開発について述べた。小型及び長距離観測型ライダの開発・商品化を進めていき、風力発電分野だけでなく、気象・環境計測や航空機の運航・管制等の用途での適用も目指していく。当社製を含むライダが様々な分野で有効活用されていくことを期待する。

表 4. 長距離観測型ライダの性能

項目	性能
観測範囲	水平方向：400m～20km (実際の観測距離はエアロゾル濃度等によって変化する。)
最大処理距離	30km (距離分解能150m時)
距離分解能	30m, 75m, 150m
ビーム走査範囲	水平方向：0～360° 仰角方向： $-5^{\circ}$ ～180°



図11. 長距離観測型ライダ

## 参 考 文 献

- (1) Hasager, C. B., et al. : Hub Height Ocean Winds over the North Sea Observed by the NORSEWInD Lidar Array : Measuring Technique, Quality Control and Data Management, Remote Sens., **5**, 4280～4303 (2013)
- (2) 三菱電機 風力発電向けの風計測ライダを開発, 三菱電機ニュースリリース2014年5月28日  
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2014/0528.html>
- (3) Kameyama, S., et al. : Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing, Appl. Opt, **46**, No.11, 1953～1962 (2007)
- (4) Kotake, N., et al. : Concept of wind LIDAR system with the adaptive parameter tuning to atmospheric condition, Proceedings of 17th Coherent Laser Radar Conference (2013)

# 40GHz帯を用いた移動体無線通信システム

金正利和\*  
鈴木清文\*  
塚本 薫\*\*

Mobile Wireless Communication System on 40GHz Frequency Band

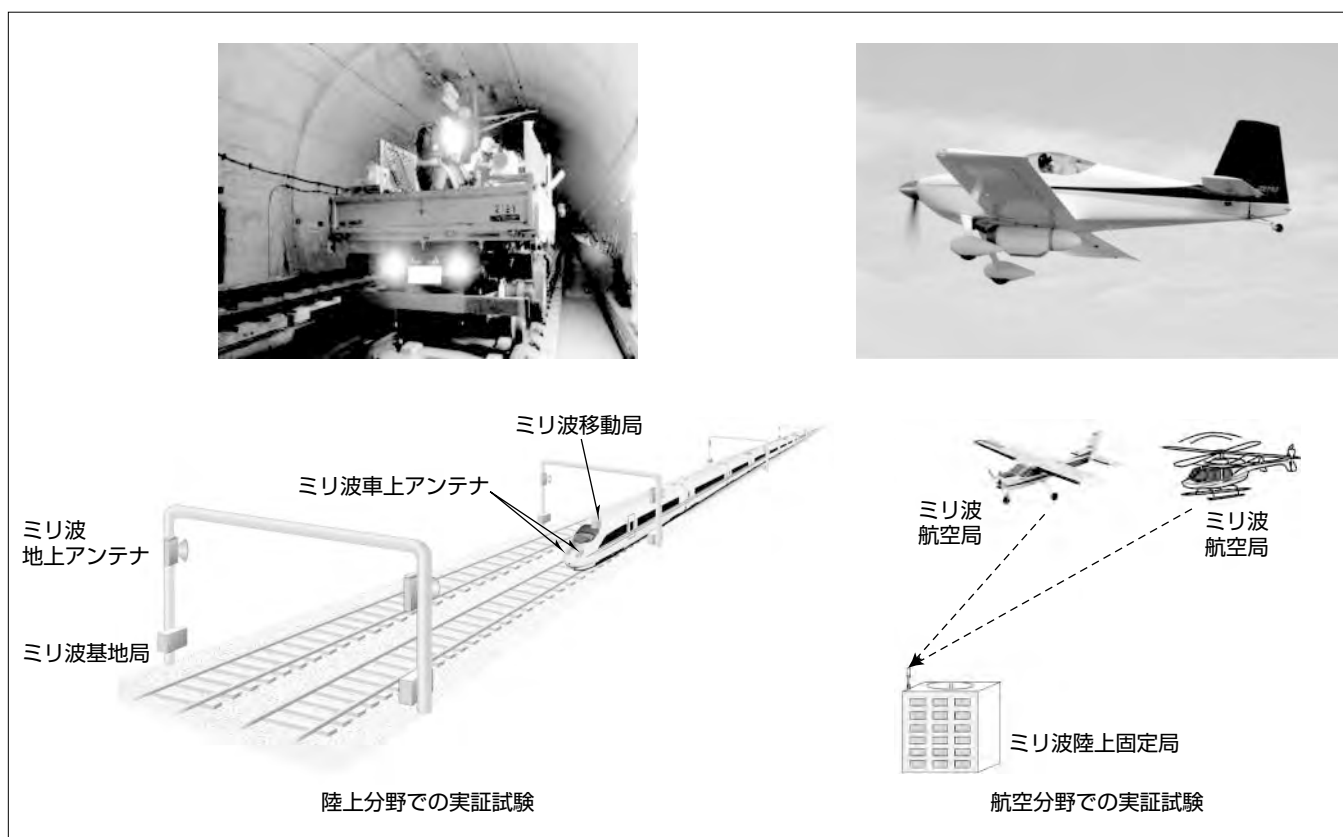
Toshikazu Kanemasa, Kiyofumi Suzuki, Kaoru Tsukamoto

## 要 旨

移動体通信分野は、利用周波数帯の需要が増加する中、携帯電話等によるワイヤレスブロードバンド環境の整備が進められており、鉄道等の陸上分野や飛行機やヘリコプター等の航空分野で必要とされるブロードバンド環境の整備が検討されている。航空分野の一部で衛星通信等によって実現されているが、今後見込まれるワイヤレスブロードバンド環境の急速な発達に対して、将来的に更なる大容量通信への要求が増大すると想定される。これらのブロードバ

ンド通信に対する需要に対応するために、30GHz帯を超えるミリ波帯を利用したシステムの実現が期待されている。

三菱電機は、無線通信におけるミリ波帯の必要性に早くから着目し、社会に貢献できる製品開発を目指して継続的な開発を進めてきた。ミリ波帯の基本的特徴及びこれまでに各種機関と協調して実施してきた40GHz帯ミリ波を用いた移動体無線通信システムの実証試験結果を述べるとともに、今後の実用化に向けた取組みについて述べる。



## 40GHz帯を用いた移動体無線通信システムの実証試験

40GHz帯ミリ波移動体無線通信システムの陸上及び航空分野における実現性確認として実施した、実環境における実証試験の状況を示す。この試験で、送信局からデータを送信して受信局で受信電力とビット誤り率を測定した結果、100Mbps通信が可能であることを確認した。

## 1. ま え が き

他の周波数帯と比較したミリ波帯の電波が持つ主な特徴を次に挙げる。

### (1) 大容量通信特性

ミリ波の最大の特徴でありメリットでもある。利用可能な周波数帯が広帯域に確保されており、大容量通信に適した周波数帯である。

### (2) 小型化特性

周波数が高く波長が短いため、アンテナや電子部品の小型化が可能である。

### (3) 高指向特性

周波数が高いためミリ波の伝播(でんぱ)特性は直線性が強くアンテナビームは高い指向性を得ることが可能である。

### (4) 耐干渉性

周波数が高いため電波伝搬は高減衰特性を示し、隣接通信システム間の電波干渉の影響が少ない。

### (5) トンネル内長距離伝送特性

(4)のとおりの高減衰特性を持つため伝送距離に制約があるが、鉄道等のトンネル内では導波管効果を伴うため数kmの伝送を行うことが可能である。

これらの特徴を持つミリ波帯で、40GHz帯を用いた大容量移動体無線通信システムが各種検討されており、本稿では陸上分野及び航空分野で、これまでに実施された実証試験について述べる。

## 2. 陸上分野での実証試験

陸上分野では、特に鉄道分野でミリ波帯を用いた大容量通信の実現が注目されている。ミリ波帯を用いた列車無線システムについて様々な検討が行われており、実環境における実験がこれまで報告されているが、伝送速度や伝送距離などが実用化に向けた課題となっていた。

トンネルを使用した実環境における走行試験及び自動車を使用した高速移動試験(100km/h)を実施して良好な結果が得られたが、ここではトンネルでの100Mbps無線伝送の試験結果について述べる<sup>(1)</sup>。

### 2.1 試験概要

移動局アンテナ、基地局アンテナともに指向性アンテナを使用し、図1のように移動局アンテナと基地局アンテナを正対させた状態から移動局を直線的に移動させ、伝送速度100Mbpsの通信試験を実施した。移動局アンテナは、

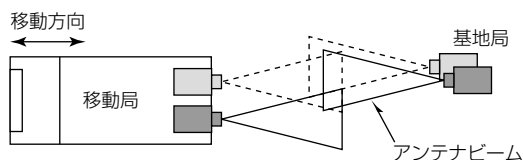


図1. 試験概要

移動局の運転席と反対側に設置されている。トンネル試験と高速移動試験に共通の試験諸元を表1に示す。

トンネル試験は、建設中のトンネルで実施した。走路を図2に示す。移動局(送信局)を設置した軌陸車によって線路上を15km/hで走行し、基地局(受信局)で受信電力とビット誤り率を測定した。また、軌陸車の車輪に設置した車軸パルスと線路脇に設置したRFID(Radio Frequency Identifier)によって、移動局の移動距離情報を取得した。基地局アンテナは上下方向に2個設置し、移動局アンテナは上下方向又は左右方向に2個設置した。アンテナ設置例を図3に、トンネル試験の試験諸元を表2に、それぞれ示す。

表1. 共通の試験諸元

項目	諸元
変調方式	64QAM-OFDM
最大伝送速度	100Mbps
送信電力	10mW
空中線利得	32dBi
アンテナ半値角	±1.0~1.5°

QAM-OFDM: Quadrature Amplitude Modulation-Orthogonal Frequency Division Multiplexing

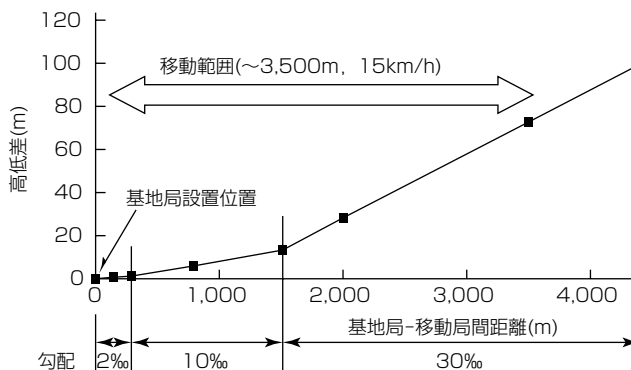


図2. トンネル試験走路

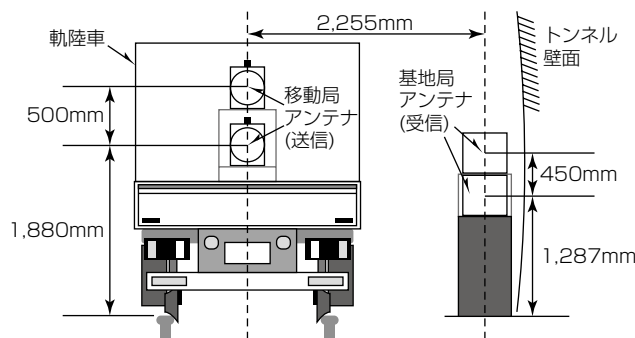


図3. トンネル試験アンテナ設置例(移動局アンテナ上下設置)

表2. トンネル試験の試験諸元

項目	諸元
搬送波周波数	46.8GHz
アンテナ数	基地局: 2, 移動局: 2
走行距離	基地局~3,500m
移動速度	15km/h
移動局位置情報取得	車軸パルス, RFID

## 2.2 試験結果

移動局は、基地局から遠ざかる方向に移動した(図1で左方向に移動)。ダイバシティ非適用時(1送信1受信)、送信ダイバシティ適用時(2送信1受信)、受信ダイバシティ適用時(1送信2受信)、送受信ダイバシティ適用時(2送信2受信)の受信電力特性とビット誤り率特性を測定した。ダイバシティ非適用時(1送信1受信)、送受信ダイバシティ適用時(2送信2受信)の結果を図4及び図5に示す。また、500mごとの場所率を表3に示す。ここで場所

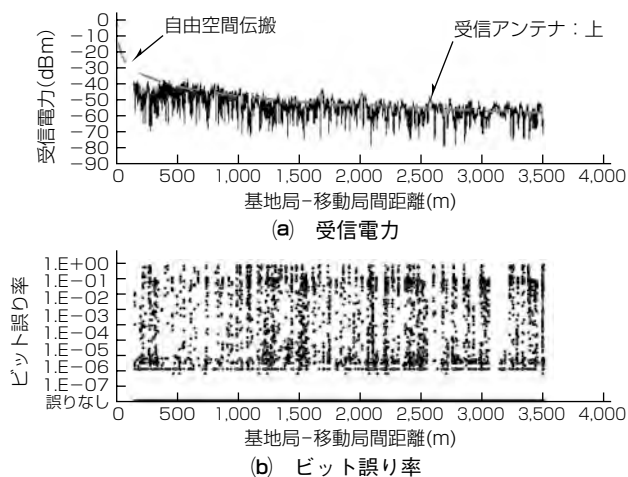


図4. ダイバシティ非適用(1送信1受信)時の試験結果

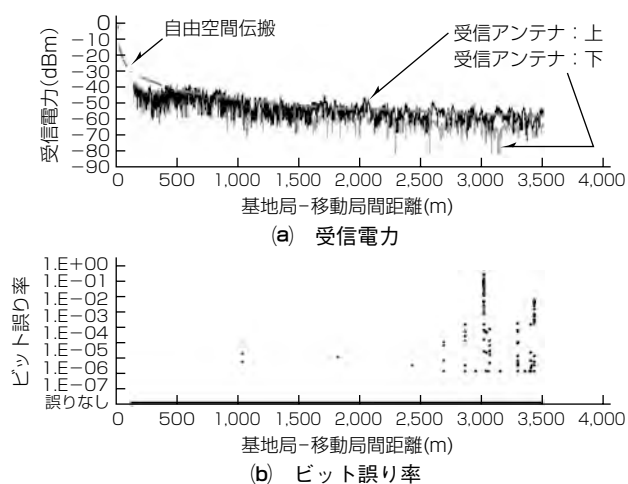


図5. 送受信ダイバシティ適用(2送信2受信)時の試験結果

表3. ダイバシティ適用有無による場所率比較

基地局-移動局間 距離(m)	1送信 1受信	2送信 1受信	1送信 2受信	2送信 2受信
~500	89.64	99.73	99.93	100.00
~1,000	91.50	99.86	99.86	100.00
~1,500	87.63	99.42	99.26	99.98
~2,000	87.08	99.50	99.26	99.98
~2,500	85.57	99.27	98.97	99.98
~3,000	85.21	98.95	98.31	99.95
~3,500	84.90	98.43	97.21	99.70

単位: %

率とは、移動距離を0.1mごとに区切り、各区间でビット誤りが発生しない確率、すなわち、100Mbps通信が可能となる確率を示している。ダイバシティによって受信電力の低下を抑圧できることによって、ダイバシティ適用時にはビット誤り率特性が改善されることが分かる。

表3に示すとおり、2送信2受信の構成、基地局-移動局間距離が3,000m以下の範囲、及び99.9%以上の高い場所率で100Mbps通信が実現可能であることを確認できた。

## 3. 航空分野での実証試験

航空分野では、マイクロ波を用いた対地通信や衛星通信が実用化されているが、航空機で計測・撮影されたデータ・映像等の大容量データを短時間で地上にダウンロードを行うためにミリ波帯の利用が検討されている。

ここでは、小型航空機に航空局を設置し、陸上固定局との間で実施した通信実験について述べる。

### 3.1 試験概要

航空局にはアクティブフェーズドアレイアンテナ(APAA)を使用し、陸上固定局には機械駆動アンテナを使用し、図6のように陸上固定局の上空に航空局を搭載した小型航空機を巡回状態で飛行させ、通信試験を実施した。試験諸元を表4に示す。

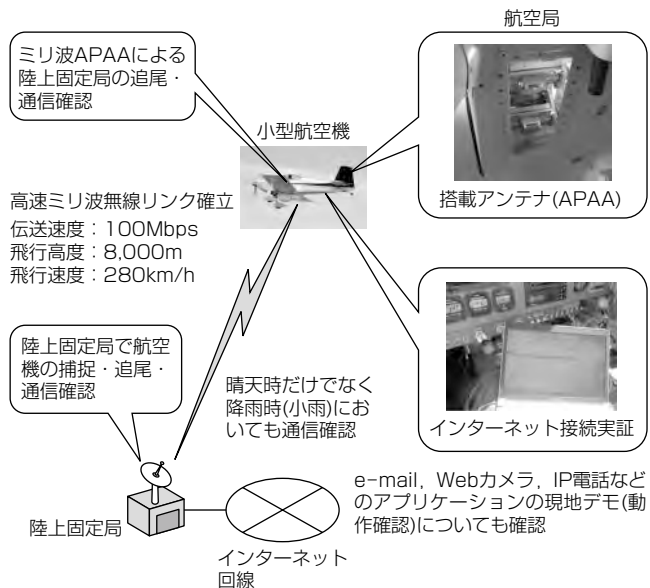


図6. 試験概要図

表4. 試験諸元(航空局)

項目	諸元
搬送波周波数	43.5~43.8GHz
変調方式	QPSK
最大伝送速度	100Mbps
EIRP	24dBW
G/T	-7.9dB/K

QPSK : Quadrature Phase Shift Keying  
EIRP : Equipment Isotropical Radiated Power  
G/T : Gain to noise Temperature

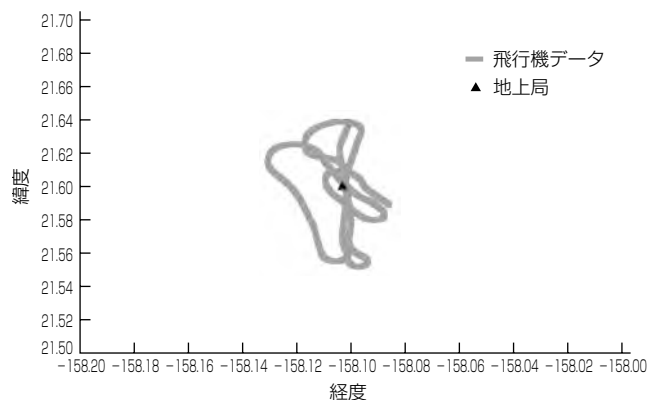
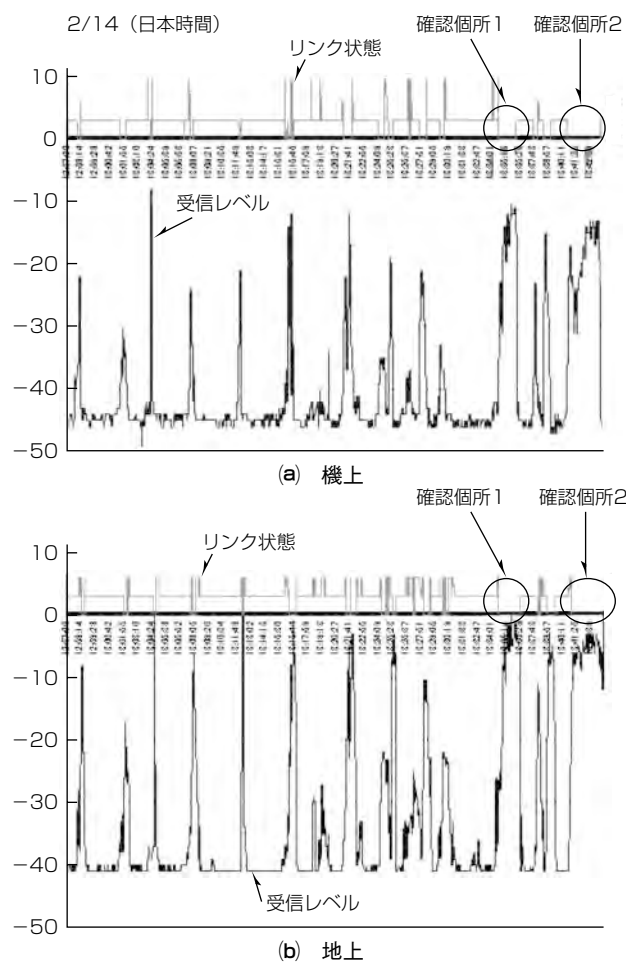


図 7. 飛行軌跡


図 8. 試験結果(受信レベルとリンク状態)  
機上・地上で同期して受信レベルが変動

### 3.2 試験結果

航空局が陸上固定局の上空飛行時に、陸上固定局から航空局に送信するパケットを航空局で折り返し、再び陸上固定局で受信することによって、リンク確立状態、受信レベル、及びパケット到達率を取得した。このときの伝送速度

表 5. 試験結果(パケット到達率)

項目	確認箇所 1	確認箇所 2
地上から送信したパケット数	847	1,658
機上で受信したパケット数 (=機上から送信したパケット数)	847	1,658
地上で受信したパケット数	847	1,658
地上⇒機上の確達率(%)	100	100
機上⇒地上の確達率(%)	100	100

は、1.5Mbpsから100Mbpsまで切り換えて試験した。図 7 に飛行軌跡を、図 8 に機上と地上におけるモデムの受信レベルとリンク状態を示す。図 8 の丸で囲っている 2 か所について、パケットの到達率を確認した結果を表 5 に示す。モデムのリンクが確立した状態で、陸上固定局から航空局へ送信するアップリンクでも、航空局から陸上固定局へ送信するダウンリンクでもパケットロスなく通信できており、航空機-陸上間における100Mbpsの双方向IP通信による大容量通信が実証できた。

### 4. む す び

40GHz帯ミリ波を用いた移動体通信システムの実証試験について述べた。今回述べた各試験での伝送速度は100Mbpsであったが、今後は伝送速度1Gbps以上の移動体通信システムの実現を目指していく。一方、陸上及び航空の各分野で、実用化に向けた活動が今後ますます盛になると予想され、航空分野の成果はITU-R(International Telecommunications Union-Radiocommunication sector)のレポート(ITU-R M.2282-0)に採択されており、鉄道に関してはITU-R(SG5 WP5A)で議論が始まっており、ミリ波通信技術の標準化活動も活発に行われている。今後豊富な可能性を持つミリ波帯電波の様々な特徴を存分に活かして社会に貢献できる通信システムを開発していく。

この試験は、総務省平成21年度研究委託“ミリ波帯高速移動体通信システム技術の研究開発”及び平成24年度の技術試験事務“40GHz帯を用いた移動体通信システムの周波数有効利用技術に関する調査検討の請負”の中で実施した内容であり、有益な助言を頂き、試験にも多大な協力を頂いた(独)情報通信研究機構及び(株)三菱総合研究所に深く感謝する。

### 参 考 文 献

- (1) 塚本 薫, ほか: 40GHz帯を用いた移動体無線通信システムのフィールド試験, 電子情報通信学会技術研究報告, **113**, No.246, 43~48 (2013)

# 位相回転系列を用いた拡散通信モデム

白井 忠\*  
松木優治\*  
岡崎彰浩\*\*

## Spread Spectrum Modem Using Phase Rotation Sequences

Tadashi Shirai, Yuji Matsuki, Akihiro Okazaki

### 要 旨

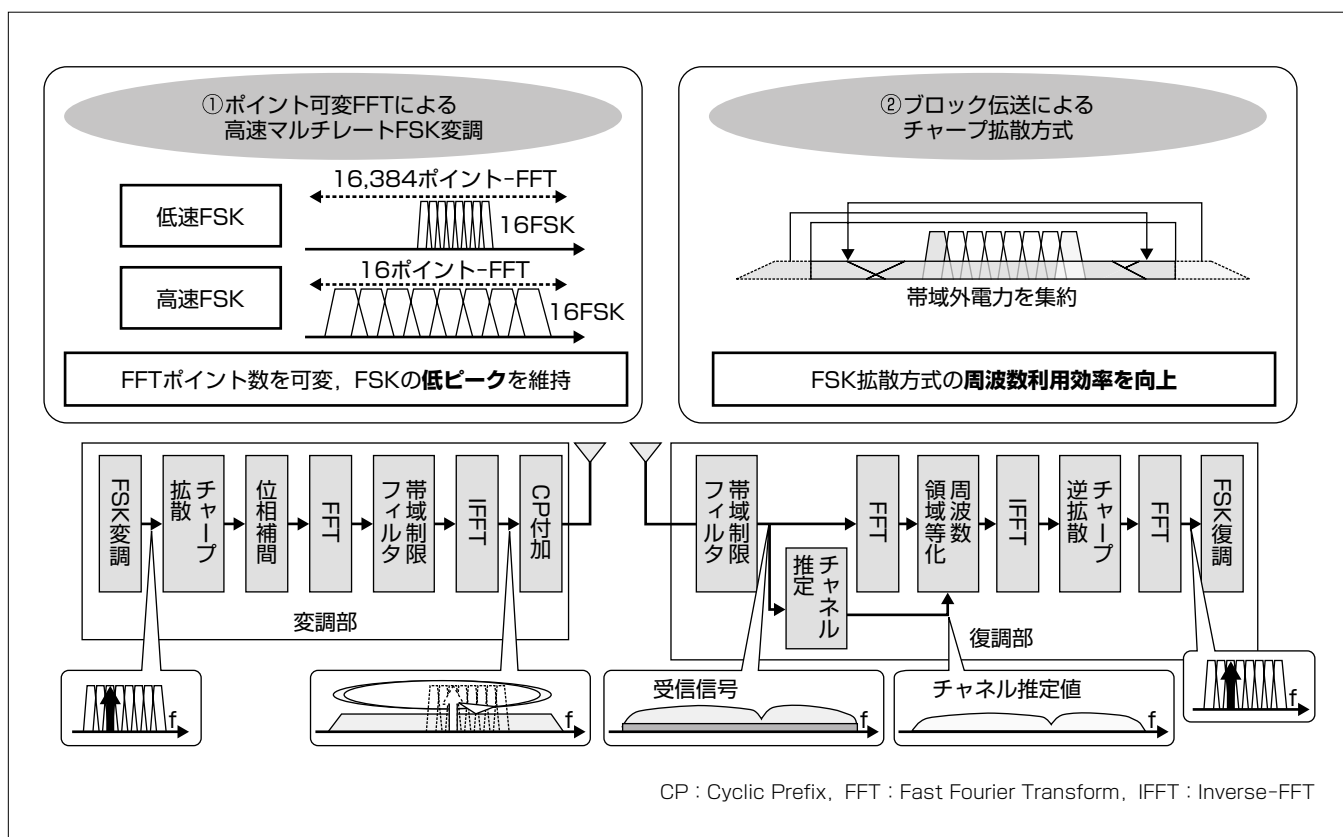
衛星通信は、これまで広域性、同報性、耐災害性等の特長を持つ無線通信路として、様々な分野で活用されてきたが、近年は洋上を航行する船舶や航空機など、移動体向けのサービスとしてもますます重要な通信路となっている。また装置の小型化、通信の大容量化を主眼に置いたKaバンドを使用したHTS(High Throughput Satellite)のサービスが始まるなど、衛星通信は、国内外で注目を集めている分野である。

これら衛星通信を始めとして、通信に使われる技術のうち、直接スペクトル拡散方式は、雑音や干渉に強く、秘匿性が高いことで、セルラーシステムから防衛・宇宙通信などの用途まで幅広く活用されているが、ピーク対平均電力

比(Peak-to-Average Power Ratio : PAPR)が高いため、装置の大きさ、消費電力に課題がある方式であった。

このたび三菱電機は、一次変調にFSK(Frequency Shift Keying)、二次変調に位相回転系列を採用し、低PAPR特性を実現する拡散通信方式を開発して実ハードウェアでの特性評価を行った。その結果、この方式は従来方式と比較してPAPRを約2 dB抑圧可能であること、さらにBER(Bit Error Rate)特性の改善も見込めることから、装置の小型化・低消費電力化に適した方式であることを確認した。

今後は、これらの開発成果を移動体搭載衛星通信機器に適用するなど、衛星通信分野を始めとする無線通信分野の発展に向けて取り組んでいく。



### 位相回転系列を用いた拡散通信モデム

位相回転系列を用いた拡散通信モデムの構成を示す。定包絡線変動特性を持つFSK変調信号と位相回転系列を乗算することによって実現するチャープ拡散を組み合わせた拡散通信モデムを開発した。拡散信号処理はブロック単位とすることで帯域制限を効果的に行い、また、周波数領域等化によって、波形歪(ひず)み補償を実現した。

## 1. ま え が き

直接スペクトル拡散方式(Direct Sequence-Spread Spectrum: DS-SS)は、雑音や干渉に強く、秘匿性が高いことから、セルラーシステムから防衛・宇宙通信まで幅広く用いられている通信方式であり、衛星通信では、この特長と併せて、隣接する衛星に対する軸外輻射(ふくしゃ)を低減することを目的として活用されてきた。近年の衛星通信システムに数多く利用される移動体通信機器は、装置の小型化、低消費電力化の観点から、電力増幅器を効率よく動作させることが重要であるが、従来の拡散方式は、M系列などの符号系列を用いるため、PAPRが大きく、より大型の電力増幅器が必要という課題があった。

この課題に対し、これまで当社は、一次変調にFSK、二次変調に位相回転系列という、ともに振幅一定の信号という特徴を持つ方式を組み合わせ、包絡線変動の少ない低PAPR特性を実現する拡散通信用の変復調方式を検討してきた<sup>(1)(2)(3)</sup>。ここで、一次変調に使われるFSKは、一般的には周波数利用効率が劣るという欠点があるが、拡散通信に適用することで、その欠点を補うことができる。このたび、これらの検討結果を実装した拡散通信モデムを開発し、特性評価を行ったので、結果について本稿にまとめる。

## 2. 位相回転系列を用いた通信方式

今回開発した変復調方式は、変調帯域をN個のサブキャリアに分割し、その中のM個を用いてFSK信号を生成し、情報ビットに応じてそのうちの1つを選択する一次変調方式を採用した。二次変調方式は、FSK信号に位相回転系列を乗じ拡散処理を行う方式とした。この様子を図1に示す。

M値FSK信号と位相回転系列は、ともに振幅一定で位相のみが変化する信号であり、拡散後信号はそれぞれの位相を加算した信号として表現可能であるが、位相回転系列は複素信号であるため、拡散処理に複素乗算が必要となり、実ハードウェア上で実現するには、演算処理量が大きくなる欠点があった。今回、一次変調信号と拡散符号がともに定振幅で位相のみで表現可能な信号であることを利用して、拡散処理を位相演算に置き換えることで処理量を削減し、ハードウェア実装を可能とした。

また、拡散後の信号に、CPを付加したブロック伝送方

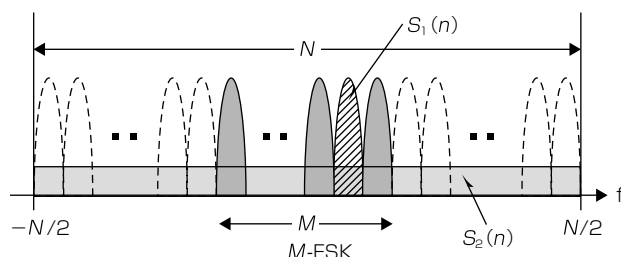


図1. M値FSK信号の拡散

式を採用した。CPとは、データ部の後部分のコピーであり、信号の拡散処理をこのブロック単位で実行することで、拡散信号をブロック帯域内に制限できるという利点がある。さらに、復調処理時でもCPを活用することによって、周波数領域等化を用いた波形歪み補償が可能となり、伝送路の周波数変動に対する耐性向上を実現した。

## 3. 開発したモデム

### 3.1 ハードウェア構成

開発したモデムのハードウェア構成を図2に示す。モデムは、DAC(Digital Analog Converter)、ADC(Analog Digital Converter)、FPGA(Field-Programmable Gate Array)などで構成し、変調、復調といった信号処理はFPGAを用いて実現した。変調用FPGAは、入力されたデータを変調してDACへ出力し、DACは入力された信号をアナログ信号に変換し、IF(Intermediate Frequency)周波数の信号として外部に出力する。一方、受信したIF周波数の信号はADCへ入力され、デジタル信号に変換後、ADCから信号を受けた復調用FPGAは復調処理を行い、復調データとして外部に出力する構成とした。

### 3.2 信号処理

#### 3.2.1 変調部

変調部の機能ブロックを図3に示す。変調部ではFSKによって一次変調した信号を拡散系列によって拡散する。拡散された信号は、2章で述べたとおり振幅一定の信号となる。

ただし、位相回転系列に対し、従来のオーバーサンプル処理のように0信号挿入後に帯域制限処理を行うと、ピーク電力が大きくなるため、今回は位相補間と自己折り返し処理を組み合わせる手法を採用し、モデムに実装した。

#### (1) 位相補間

ここで用いる補間処理は、従来の補間処理であるサンプル間に0を挿入する方式とは異なり、より確からしい信号

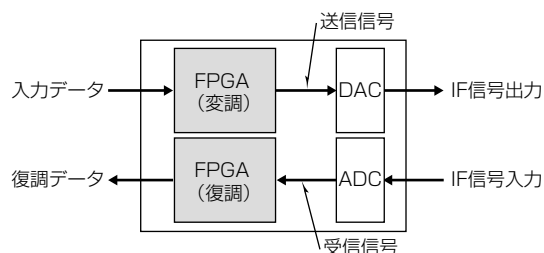


図2. モデムのハードウェア構成

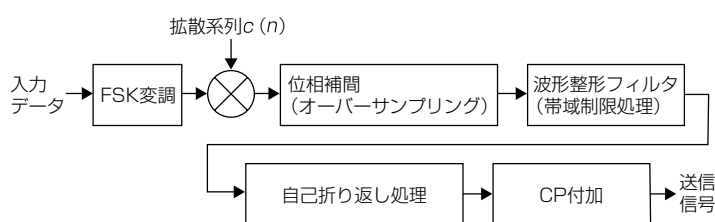


図3. 変調部の機能ブロック図

補間を行う方式を採用した。 $v$ 倍オーバーサンプルを行う場合、 $S_2(n)$ と $S_2(n+1)$ の間に補間される信号を $S_{2,ovs}(n, v)$ とし、 $v=2$ の場合のイメージを図4に示す。図のように $S_2(n)$ 、 $S_2(n+1)$ を両端とする弧を二等分する位置に $S_{2,ovs}(n, 2)$ を挿入し、半径 $A$ の円周上で補間を行う。このため、補間後の信号も振幅一定の位相回転系列となり、帯域制限後のピーク電力の増大を抑えることができる。

## (2) 自己折り返し処理

通常、オーバーサンプルしたFSK信号に帯域制限フィルタを適用すると波形歪みが発生するため、この方式では、帯域制限フィルタによって除去された基本信号成分を、フィルタ通過後に帯域内に折り返して加算する方式を採用した。オーバーサンプル数2の場合の自己折り返し処理の様子を図5に示す。この自己折り返し処理を行うことで、

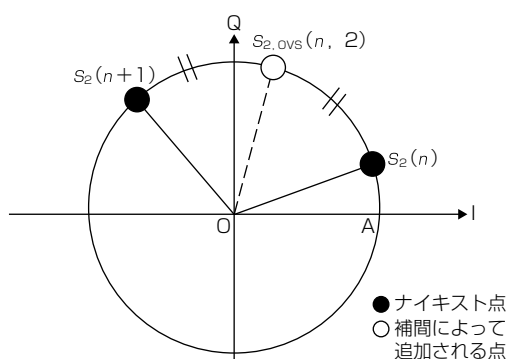


図4. 位相補間

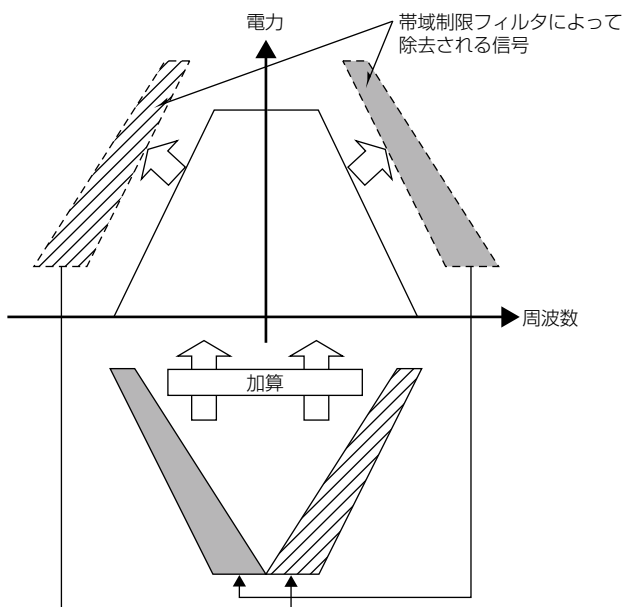


図5. 自己折り返し処理

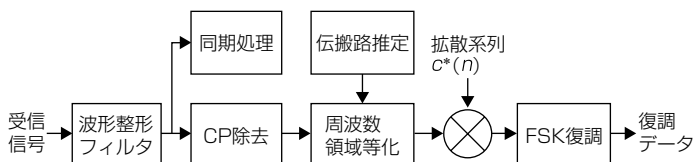


図6. 復調部の機能ブロック図

一度フィルタで除去された信号を、再び送信信号内に戻し、フィルタによる波形歪みを低減した。

## 3.2.2 復調部

復調部の機能ブロック図を図6に示す。復調部は、波形整形フィルタ後の信号に対し同期処理及び復調処理を行う。同期処理は、拡散周期の検出、周波数オフセット推定及びサンプルタイミング誤差検出を行う。復調処理は、CPを除去した信号を用いて周波数領域等化処理を行い、検出された拡散周期をもとに逆拡散処理を行ったうえでFSK信号の復調を行う。FSK復調処理では、FSKのサブキャリアの振幅値を比較し、最大のサブキャリアを選択することで、所望の信号を得ることができる。

## 4. 特性評価

開発したモデムを用いて、位相回転系列によるスペクトル拡散方式の諸特性を評価した。実機評価時の主要諸元を表1に示す。また、測定の様子を図7に示す。

### 4.1 送信特性

モデムから送信した送信信号のスペクトルを、図8に示す。 $f_c$ 及び $T_c$ はそれぞれ中心周波数とチップレートを表す。FSK変調した信号が位相回転系列によって拡散され、 $1/T_c$ の幅で帯域幅を持っていることが分かる。

次に、送信信号のコンステレーションを図9に示す。図は振幅の最大値を1として正規化している。図から、単位円状に信号が遷移しており、ピーク振幅が出現していないことが分かる。信号が単位円の内側を遷移しているが、これは送信信号を波形整形フィルタによって帯域制限していることによる遷移である。

表1. 主要諸元

項目	内容
変調方式	16値FSK
拡散符号	位相回転系列
拡散率 $N$	4.096
オーバーサンプル数 $v$	2
波形整形フィルタ(送受)	ルートロールオフフィルタ(ロールオフ率0.5)



図7. モデムの評価測定の様子

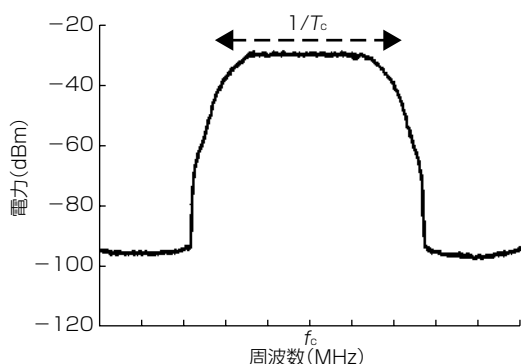


図 8. 送信スペクトル

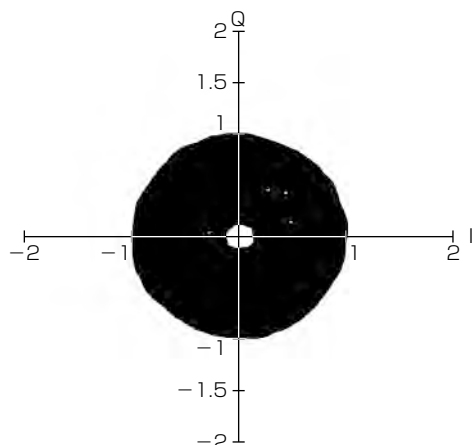


図 9. 送信コンスタレーション

## 4.2 PAPR特性

モデムのPAPR特性とシミュレーション結果を図10に示す。また一次変調をBPSK (Binary Phase-Shift Keying) として拡散系列にPN (Pseudo-random Noise) 系列を用いる従来のDS-SSの特性も併せて示す。

縦軸のCCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) は相補累積分布関数を表す。CCDF=1.0×10<sup>-3</sup>で従来のDS-SSとの特性を比較すると、この通信方式は従来のDS-SSよりもPAPRが約2 dB改善し、1.1dBとなり、従来の方式と比較してPAPR特性を抑圧していることを確認した。

## 4.3 BER特性

モデムのBER特性の測定結果を図11に示す。図から、16FSKの理論値と実機で取得したデータの差は、BER=1.0×10<sup>-3</sup>で約0.7dBの差であり、伝搬路推定誤差やクロック偏差、アナログ部での量子化誤差等、理論値の計算には含まれていない要素を考慮すると実機の劣化量が小さいことが分かる。また、従来のDS-SSで使用されるBPSKの理論値と比較した場合、BER=1.0×10<sup>-3</sup>で、この通信方式の誤り特性が優れていることを確認した。

## 5. む す び

一次変調をFSK変調とし、位相回転系列によって拡散する方式を実ハードウェアに実装して特性を評価した結果、送信信号のスペクトルから期待通りに拡散されていること、

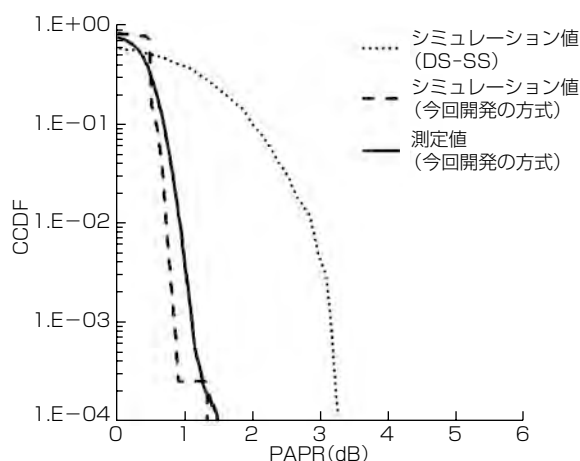


図10. PAPR特性

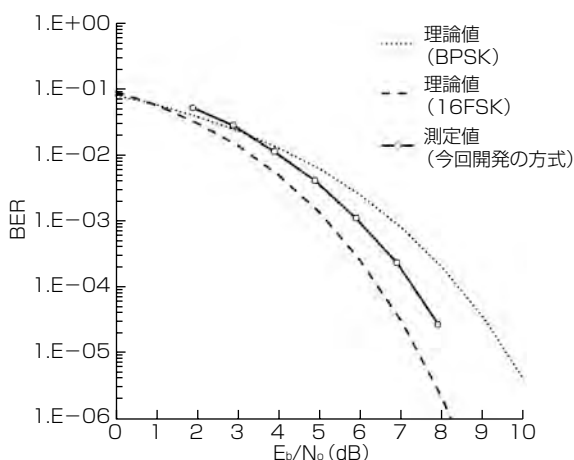


図11. BER特性

PAPR特性は、CCDF=1.0×10<sup>-3</sup>点で従来方式よりも約2 dBよい1.1dBと小さい値であること、及びBER特性は、理論値からの大きな劣化がなく、従来のDS-SSより誤り特性が優れていることを確認した。

このことから、この方式は、拡散通信を行う上で、PAPA特性やBER特性で、従来の方式より優位であり、装置の小型化、低消費電力化に有効であることを実証することができた。今後は、これらの開発成果を、移動体搭載衛星通信機器に適用し、衛星通信分野を始めとする無線通信分野の発展に向け取り組んでいく。

## 参 考 文 献

- (1) 佐野裕康, ほか: 周波数領域で逆拡散・復調が可能な直接スペクトル拡散方式に関する検討, 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-5-82 (2009)
- (2) 岡崎彰浩, ほか: シングルキャリアブロック伝送を用いたMFSK/DSの多元接続容量の一検討, 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-5-12 (2011)
- (3) 尾崎圭介, ほか: MFSK/DSブロック伝送におけるPAPR低減手法, 電子情報通信学会論文誌, J98-B, No.1, 53~64 (2015)

# 衛星用太陽電池パネルの健全性評価手法

関根一史\* 小林裕希\*\*\*  
 竹谷 元\*\* 宇都宮 真†  
 世古博巳\*\*

Health Monitoring Method for Satellite Solar Array Panel

Kazushi Sekine, Hajime Takeya, Hiromi Seko, Yuki Kobayashi, Shin Utsunomiya

## 要 旨

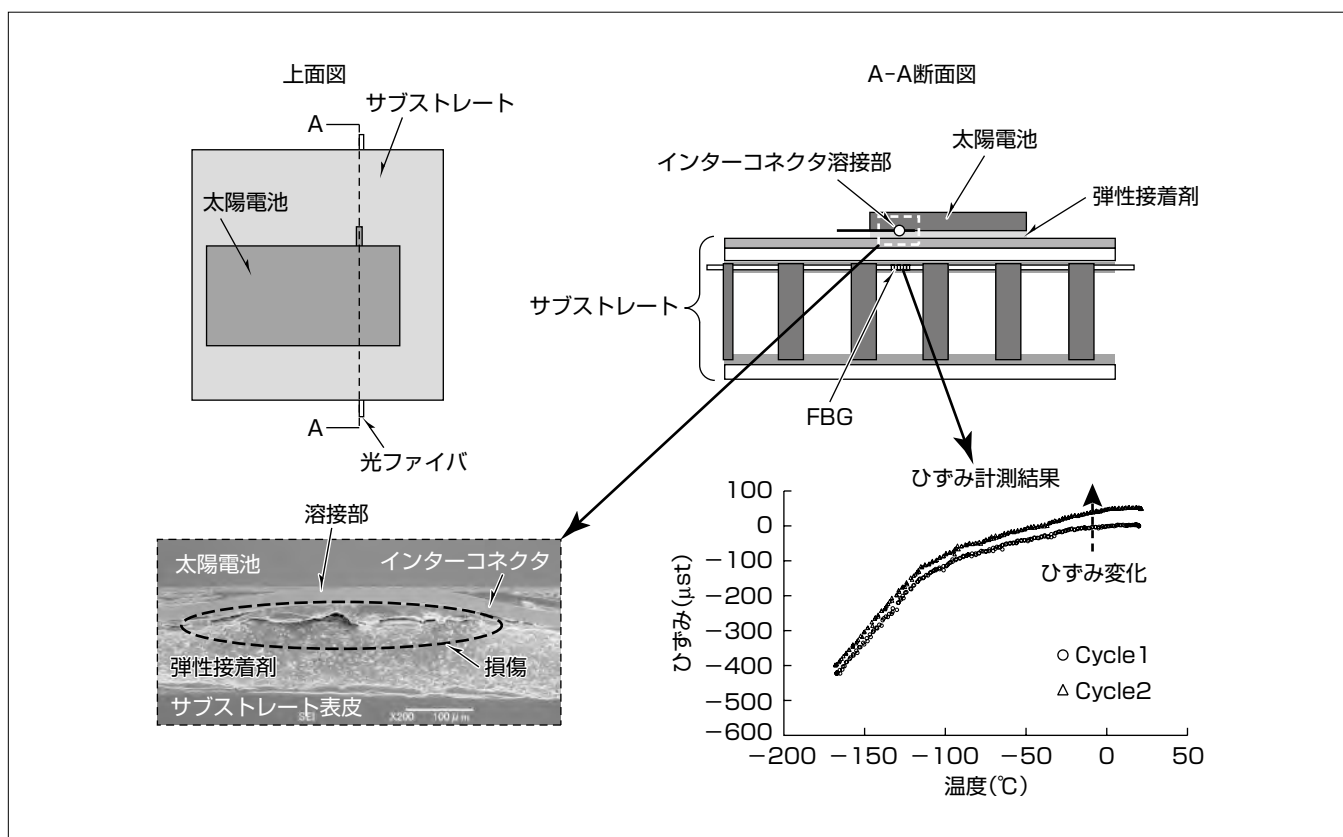
衛星用太陽電池パネルは、軽量かつ高剛性であることが求められており、その構造部材(サブストレート)には、炭素繊維強化プラスチック製の薄い表皮とアルミハニカムコアとを接着したサンドイッチ構造が用いられている。

しかしながら、太陽電池パネルでは、宇宙の低温環境で発生する熱応力によって、太陽電池の割れや出力端子の剥離等の損傷が発生し、発生電力の低下が起こる懸念がある。この問題を防止するためには、熱応力を考慮してパネルを設計し、地上試験で健全性を確認することが重要である。

そこで三菱電機は、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)とともに、光ファイバセンサの一種であるFBG(Fiber Bragg Grating)センサを用いて、太陽電池パネルの健全性を評価する手法を開発した。FBGセンサは、小型軽量、

耐電磁干渉性、低損失等の特長を持ち、ひずみや温度を多点で計測できるセンサである。この手法では、宇宙環境を模擬してクーボンパネルの低温環境試験を実施し、FBGセンサでパネル内部の見えない箇所の損傷を検知する。損傷が検知された場合、その断面を観察して損傷箇所を特定し、パネルの健全性を評価する。

FBGセンサによるパネル内部の損傷検知性能の検証を行い、ひずみの変化から内部損傷を検知できることを実証した。さらに、損傷が検知された箇所の断面を観察して損傷箇所を特定し、この手法の有効性を確認した。今後は、この手法の標準化を進めて整備し、ほかの衛星コンポーネントへの適用拡大を進めていく。



## 衛星用太陽電池パネルの損傷検知結果の一例

損傷を検知するためのFBGセンサを内蔵した太陽電池パネルの構成図(左上、右上)である。FBGで計測したひずみの変化(右下)からパネル内部の見えない箇所の損傷(左下)を検知する手法を開発した。

## 1. ま え が き

衛星用の太陽電池パネルは、軽量であり、高剛性であることが要求されている。このため、太陽電池を貼り付ける構造部材(サブストレート)には、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)製の薄い表皮とアルミハニカムコアとを構成材料とするハニカムサンドイッチパネルが使用されている。

しかしながら、表皮の薄いサブストレートでは、CFRP表皮とアルミハニカムコア間の熱膨張差に起因して、表皮にハニカム形状に応じた周期的な凹凸(ディンプル)が発生する<sup>(1)(2)(3)</sup>。太陽電池をディンプルの残留したサブストレートに接着したパネルでは、宇宙の低温環境でディンプルの深さが増大して熱応力が発生し、太陽電池やその出力端子(インターコネクタ)に損傷を与えて、発生電力の低下が起こる懸念がある。そのため、熱応力を考慮してパネルを設計し、地上試験でパネルの損傷検知を行って健全性を評価し、軌道上での不具合を未然に防止することが重要であり、その評価手法が必要である。

太陽電池パネルのような構造内部の損傷を検知するデバイスとして、光ファイバセンサの一種であるFBGセンサが考えられる。FBGセンサは、小型軽量、耐電磁干渉性、低損失等の特長を持ち、温度やひずみを多点で計測できるセンサである。図1に示すように、FBGセンサは、光ファイバのコア中に屈折率を周期的に変化させた回折格子(グレーティング)を形成したものである。広帯域の光をFBGに入射させると、式(1)のブラッグ波長( $\lambda_B$ )と呼ばれる特定波長の光スペクトルを反射し、それ以外の波長の光は透過する。

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $n$ は光ファイバの有効屈折率、 $\Lambda$ は格子間隔である。屈折率や格子間隔が温度やひずみに依存するため、ブラッグ波長の変化量を計測することで、ひずみや温度を求めることができる。

そこでこの開発では、太陽電池パネルの健全性評価手法の開発を目的として、FBGセンサを用いた太陽電池パネル内部の損傷検知に関する検討を行ってきた<sup>(4)</sup>。

本稿では、低温におけるサブストレート表皮のひずみ挙

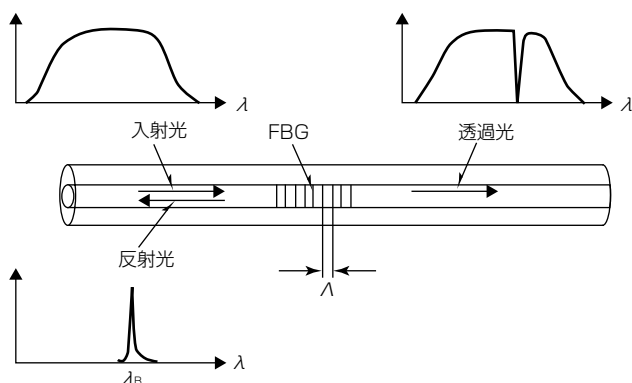


図1. FBGセンサの計測原理

動から、ディンプルの深さ変化挙動を評価し、FBGセンサによる太陽電池パネル内部の損傷検知性能の検証を行った結果について述べる。

## 2. 試 験 方 法

### 2.1 材料及び試験片

まず始めに、FBGセンサを実装した縦90mm、横90mmのサブストレートの試験片を用いて実験を行った。試験片の表皮は、厚さ50μmのポリイミドフィルムと、平織りのピッチ系炭素繊維とエポキシ樹脂を材料とするプリプレグ一層とを180℃で一体成形した厚さ130μmのCFRP製平板である。試験片のコアは、アルミハニカムコア(HEXCEL社製、AL3/8-5056-.0007P)であり、その高さは25.4mmである。これらの表皮とハニカムコアとを、厚さ60μmのエポキシ系のフィルム接着剤を用いて120℃でプリキュア成形し、試験片を製作した。このとき、CFRP表皮の一方の繊維方向とコアのリボン方向が一致するようにした。

FBGセンサは、外径250μm(クラッド径125μm)であり、グレーティングの長さが5mmのものを使用した。試験片におけるFBGセンサの配置図を図2に示す。図の(a)に示すように、ハニカムコアのリボン方向と光ファイバの軸方向を合わせて、ハニカムセル中央部にFBGの中心部が位置するようにFBG-Aを、ハニカムコア壁部にFBGの中心部が位置するようにFBG-Bを配置した。図の(b)に示すように、FBG-Aは、サンドイッチ成形時に表皮とフィルム接着剤との間の接着層内に埋め込んだ。このとき、FBG周りの接着層に空孔(ボイド)が残存しないように実装した<sup>(5)</sup>。

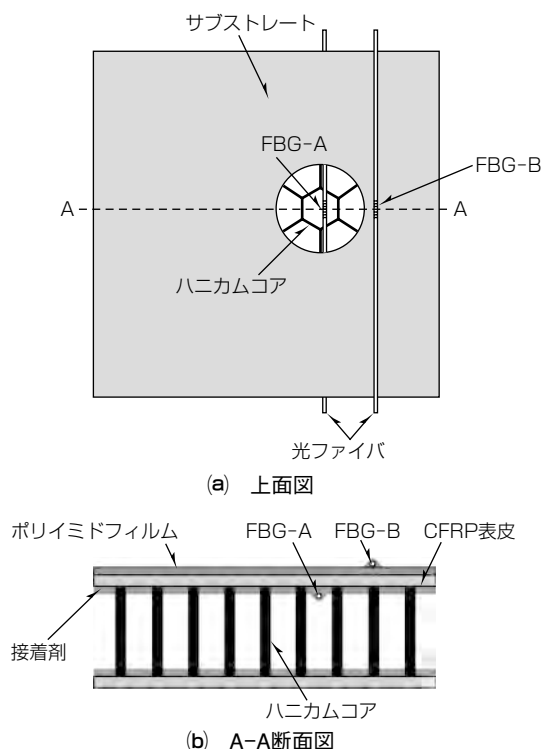


図2. サブストレート試験片のFBGセンサの配置図

また、FBG-Bは、成形後のサブストレートの表面にシアノアクリレート接着剤で接着した。

次に、太陽電池をサブストレート試験片の表面に接着した太陽電池パネルの試験片を用いて実験を行った。試験片の太陽電池は、表面にカバーガラスを接着し、裏面にインターコネクタを溶接したCIC(Connector and Coverglass Integrated Cell)である。CICの裏面とサブストレートの表面にプライマー処理を行い、シリコン系接着剤(弾性接着剤)を用いて常温で接着し、試験片を製作した。太陽電池パネル試験片におけるFBGセンサの配置図を図3に示す。図に示すように、インターコネクタの溶接部の下方にFBGの中心部が位置するようにFBG-Aを配置した。

## 2.2 低温環境試験

サブストレート試験片を恒温槽(Despatch Industries社製, 935E)内に設置し、常温から $-170^{\circ}\text{C}$ まで $-2.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で降温して、試験片のひずみを計測した。このとき、試験片の表面に取り付けた熱電対を用いて、温度を計測した。また、ASE(Amplified Spontaneous Emission)光源(三菱電線工業(株)製, LA158-D16FSSI)と光スペクトラムアナライザ(株)アドバンテスト製, Q8384)からなる光計測系を用いて、FBGの反射光スペクトルを計測し、その半値全幅の中心波長を求めた。

次に、反射光スペクトルの中心波長の変化をひずみに換算した。FBGは温度とひずみに感度を持つため、反射光スペクトルの中心波長の変化には、温度とひずみの両方の寄与が含まれる。そのため、計測された中心波長の変化量から、熱電対で計測した温度変化から換算した中心波長の変化量を引き、ひずみの寄与分を抽出してから、ひずみに換算した。このとき、温度と中心波長変化の関係及びひ

ずみと中心波長変化の関係は、光ファイバ固有の定数であり、約 $0.01\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ 、 $0.0012\text{nm}/\mu\text{st}$ である。

同様に、太陽電池パネル試験片を恒温槽内に設置し、常温から $-170^{\circ}\text{C}$ まで $-2.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で降温する試験を二回実施し、試験片のひずみを計測した。

## 3. 試験結果

### 3.1 サブストレート表皮のひずみ挙動の評価

非接触三次元形状測定装置(三鷹光器(株)製, NH-3N)を用いて、サブストレート試験片の表面形状を計測した。その結果、FBG-A接着箇所のディンプル深さは常温で $41\mu\text{m}$ であった。

次に、低温環境でのディンプル深さの変化を評価するために、ディンプル中央位置に接着したFBG-Aのひずみ変化を計測した。低温への温度変化によって表皮に発生するひずみを説明するためのサブストレート断面図を図4に示す。図に示すように、低温への温度変化に伴い、ハニカムセル中央位置の表皮に接着したFBG-Aには、ディンプルの深さ変化による局所的な曲げひずみと熱ひずみの両方が加わると考えられる。そこで、ディンプル深さ変化に対応する曲げひずみを求めるためには、ハニカムコア壁上位置の表皮に接着したFBG-Bによる熱ひずみを計測し、FBG-Aのひずみから引き算する必要がある。

FBG-AのひずみからFBG-Bのひずみを引いて求めた曲げひずみの計測結果を図5に示す。図から、低温への温度変化に伴って、曲げひずみが線形的に増大していることが分かる。これは、FBG-Aが表皮とコアとの接着層内に、すなわち表皮の局所的な曲げに対して引張りひずみが発生する位置に接着されていることから、ディンプルの深さが増大していると考えられる。これによって、低温への温度変化に伴って、ディンプルの深さは線形的に増大することが分かった。

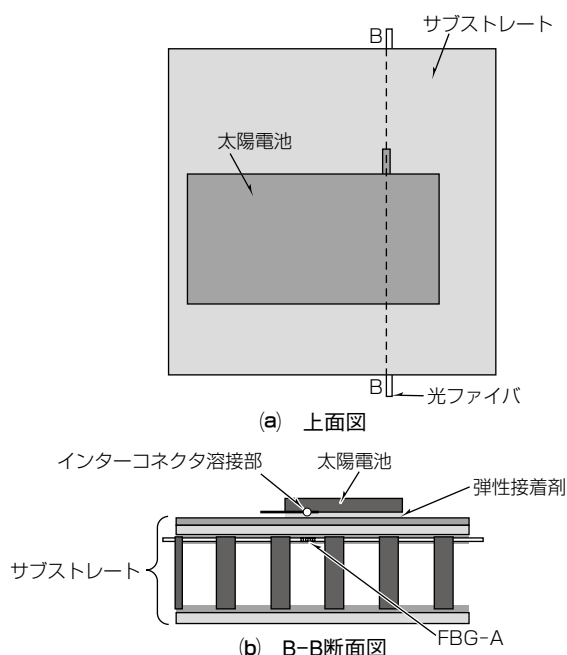


図3. 太陽電池パネル試験片のFBGセンサの配置図

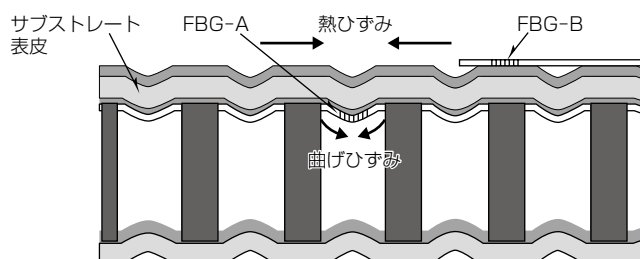


図4. 低温への温度変化時のサブストレート断面図

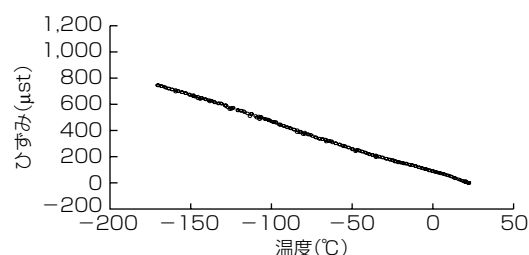


図5. サブストレート表皮の曲げひずみの計測結果

### 3.2 パネル内部の損傷検知性能の評価

太陽電池パネル試験片の低温環境試験を繰り返し2回実施し、その内部ひずみを計測した。FBG-Aによるひずみの計測結果を図6に示す。Cycle1のひずみと比較して、Cycle2のひずみは正側に変化しており、差が見られた。この結果から、FBG-Aの接着位置上方のパネル内部で損傷が発生し、熱応力が解放されてディンプルが深くなり、ひずみが正側に変化した可能性が考えられる。

そこで次に、FBG-Aの接着位置上方の試験片断面を観察し、損傷の有無を確認した。FBG-Aの接着位置を通り、ハニカムコアのリボン方向に平行な図3のB-B断面で試験片を切断して研磨し、SEM(Scanning Electron Microscope)を用いて断面を観察した。FBG-A上方の太陽電池パネル断面のSEM画像を図7に示す。図から、弾性接着剤の凝集破壊と思われる損傷が発生していることが分かった。

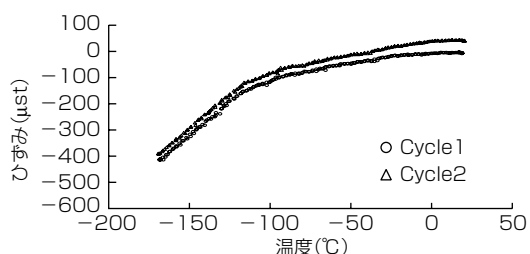


図6. 太陽電池パネル内部のひずみ計測結果

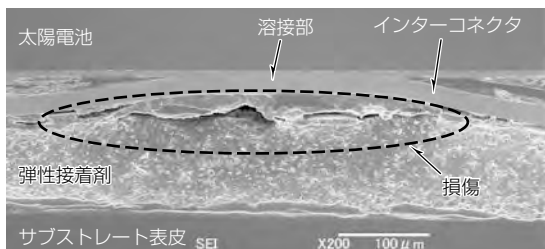
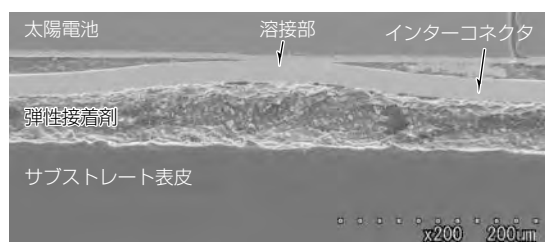
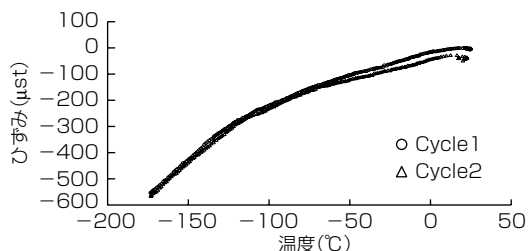


図7. FBG-A上方の太陽電池パネル断面のSEM画像



(a) FBG上方の太陽電池パネル断面のSEM画像



(b) 太陽電池パネル内部のひずみ計測結果

図8. パネル断面のSEM画像とひずみ計測結果

一方で、損傷が発生しない場合、これらのひずみ変化は起こらないことを確認した。同じ構成の試験片でのFBG上方の太陽電池パネル断面のSEM画像とひずみ計測結果を図8に示す。図のように損傷が見られない場合、Cycle1とCycle2のひずみはほぼ一致していた。なお、室温付近で若干のひずみ差が見られたが、Cycle2ではひずみが負側に変化しており、損傷の影響ではないと考えられる。

このように、ひずみ変化と損傷の有無との間に相関を確認できたため、FBGセンサで低温への温度変化時に発生するパネル内部の損傷を検知できることが示せた。なお、パネル内部で損傷が検知されたが、その損傷箇所は弾性接着剤であり、太陽電池やインターコネクタには損傷が発生していないため、パネルは健全であることが分かった。

## 4. む す び

太陽電池パネルの健全性評価手法の開発を目的として、低温温度変化時のサブストレート表皮のひずみ挙動の評価と、FBGセンサによる太陽電池パネル内部の損傷検知性能の検証を行い、次の結果を得た。

- (1) サブストレート表皮のディンプル中央位置のひずみ評価結果から、低温への温度変化に伴って、ディンプルの深さは線形的に増大することが分かった。
- (2) 低温への温度変化時のパネル内部のひずみ計測と断面観察の結果から、FBGセンサを用いてひずみ変化を計測することで、内部損傷の発生を検知できることが示せた。また、損傷が検知された箇所の断面を観察して損傷箇所を特定し、この手法の有効性を確認した。

## 参 考 文 献

- (1) 井上登志夫, ほか: ハニカムサンドイッチパネルの熱変形と熱応力, 第34回構造強度に関する講演会, 1B11 (1992)
- (2) 本池 誠, ほか: 薄いCFRP表面板を有するハニカムパネルの曲げ特性, 第40回構造強度に関する講演会, 1B9 (1998)
- (3) Watanabe, N., et al.: Thermal Buckling Behavior of Very Thin CFRP Face in Al Honeycomb Sandwich Plates for Various Lamination, AIAA Paper 98-1994, 2413~2422 (1998)
- (4) Sekine, K., et al.: Study on Damage Detection for a Satellite Solar Array Panel using Optical Fiber Sensors, Proceedings of the 12th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing (2012)
- (5) 三菱電機㈱: 光ファイバセンサを備えたハニカムサンドイッチ構造体およびその製造方法, 特開2013-156200 (2013)

# 設計品質リスクを未然にあぶり出す新手法 “XCN（クロスチェック付きなぜなぜ分析）”

鶴田明三\*  
春名一志\*\*

New Analytical Method" XCN" to Manage Risks of Quality during Early Design Phase

Hirozoh Tsuruta, Kazushi Haruna

## 要 旨

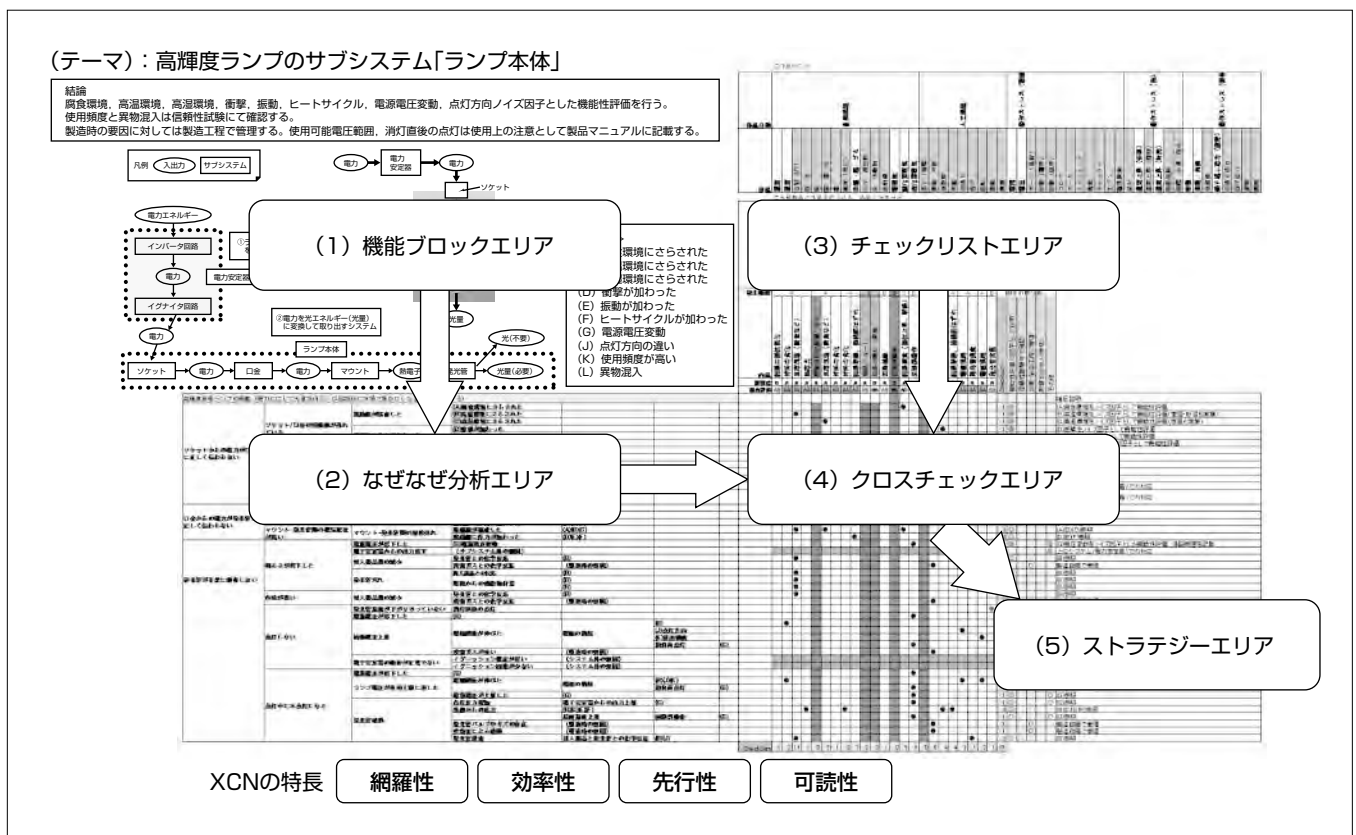
製品設計・開発の初期段階で、手戻りや品質に関するリスク要因を見える化する新手法“XCN(クロスチェック付きなぜなぜ分析)”を開発した。設計・開発の初期段階で品質を高めるためには、顧客の使用条件や環境条件の機能への影響といった品質リスク要因を的確に見極める必要がある。品質リスク要因に対しては、対策を設計に織り込んだり、設計審査で対策の妥当性を審議したり、シミュレーションや試作での評価・検証の条件に採用したりできる。

XCNの主な構成は、①“設計した機能が市場(使用段階)で働かなくなる”という想定をトップ事象とした“なぜなぜ分析”，及び②製品が曝(さら)される外乱(顧客の使用条件・環境条件)と、それによって製品の内部で発生・変化

し得る内乱との組合せで構成される“チェックリスト”からなる。トップダウン思考の“なぜなぜ分析”とボトムアップ思考の“チェックリスト”の検討内容をクロスチェックすることで網羅性を高め、品質リスク要因の抽出漏れを高確率で防止する。

さらに、全部品の分析を必要としないため分析の効率性が高く、詳細な部品表を必要としないため設計・開発の初期段階で活用できる先行性がある。また原因と結果の関係の可読性が高くレビューしやすいという特長を持つ。

現在XCNの集合研修や説明会で、三菱電機の各製作所の設計部門、品証部門への展開を図り、設計・開発の段階での品質作り込みに活用している。



## XCN(クロスチェック付きなぜなぜ分析)

XCNは、不具合要因の想定を行うトップダウン思考の“なぜなぜ分析”と、顧客の使用条件・環境条件が製品内部に与える影響を列挙したボトムアップ思考の“チェックリスト”の組合せをクロスチェックすることで、使用段階での品質リスク要因の抽出漏れを効率的に防ぐ。設計・開発段階でXCNを適用することでリスクに気づき、設計仕様に織り込んだり、シミュレーションや試作での評価・検証条件に反映したりできる。

## 1. ま え が き

製品出荷後に保管・搬送・使用される段階(以下、まとめて“使用段階”という。)での品質不具合や、開発中の手戻りの原因の大半は、設計・開発段階で十分に品質に関するリスク(以下“品質リスク”という。)を抽出・評価・対応できていないことで生じる。また、品質不具合や手戻りは、事前にその原因が掴(つか)めていれば未然に対応できることが多い。

従来、特性要因図によって品質リスクを抽出したり、発生した不具合をトップ事象にしたなぜなぜ分析やFTA(故障の木解析)を行って再発防止を図ったり、FMEA(故障モードと影響解析)で部品ごとの故障モードから上位アイテムへの影響を解析したりして、できるだけ設計・開発段階で品質リスクに対応してきた。

品質リスク抽出手法には、①品質リスクの抽出漏れが少なく(網羅性)、②適度な負荷で実施可能であり(効率性)、③設計・開発の上流で実施でき(先行性)、④第三者が内容をレビューしやすい(可読性)ことが求められるが、従来の方法は一長一短があると考えている。

本稿では、この課題を解決するために開発した品質リスク抽出手法“XCN(クロスチェック付きなぜなぜ分析)”について述べる。

## 2. XCNの概要と実施手順

### 2.1 XCNで着目する品質リスク

開発・設計の初期段階で考慮すべき品質リスクには人的な要因や管理的な要因もあるが、XCNでは製品機能(動作、性能)及びそれらの安定性に係わる物理現象的な要因を扱う。特に製品の使用段階での多様な顧客の使用条件・環境条件を抽出し、その対応を事前検討することが目的である。XCNでは、顧客の使用条件・環境条件による製品内部への影響及び製品機能の喪失・低下までの因果関係を見える化する。想定された品質リスクに対しては、その対策を設計に織り込んだり、設計審査で対策妥当性を審議したり、シミュレーションやプロトタイプでの評価・検証の条件(品質工学におけるノイズ因子)に採用したりすることで未然防止を図ることができる。

### 2.2 XCNの構成

XCNの主な構成は、①“設計した機能が市場(使用段階)で働かなくなる”という想定をトップ事象とした未然防止型の“なぜなぜ分析”、及び②製品が曝される顧客の使用条件・環境条件(外乱)と、それによって製品の内部で変化し得る現象(内乱)との組合せで構成される“チェックリスト”からなる。トップダウン思考の“なぜなぜ分析”とボトムアップ思考の“チェックリスト”の検討内容をクロスチェックすることで、品質リスク要因の抽出漏れを高確率で防止するところが、XCNの最大の特徴である。

### 2.3 XCNの実施手順

要旨の図にXCNで使用するシートの概観と5つのエリアを示した。XCNの手順を、それらのエリアに対応づけて述べる。

#### 2.3.1 機能ブロックエリア

[STEP1]対象の製品・システムの機能を整理

対象とする製品(又はその一部であるサブシステム)に対して、機能ブロックとそれらの関係(情報やエネルギーの流れ)を明らかにするための機能ブロック図を作成する。これはXCNとして新規の内容ではないが、[STEP3]のなぜなぜ分析や、[STEP6]の外乱から内乱への展開を確実に行うために役立つ。後に故障モードの“種類”が推測可能な単位に分かれていればよく、部品単位の展開は必要ない。高輝度ランプの機能ブロック図の作成例を図1に示す。XCNの対象範囲はランプ本体とした。

#### 2.3.2 なぜなぜ分析エリア

[STEP2]トップ事象の定義(機能の否定)

XCNのなぜなぜ分析では、まだ発生していない品質不具合の想定を行う。[STEP1]で定義した機能を、““入力”に応じて“出力”を得る”という表現で表す。この機能表現の否定をトップ事象とするが、XCNでは、使用段階の要因に着目するため、“電力に応じて光量を得る機能が、出荷後働かなくなる(低下する)”をトップ事象とする。

[STEP3]なぜなぜ分析の実施

先に述べたトップ事象が発生する要因をなぜなぜ分析を用いて展開する(図2)。XCNでは真の原因を追究するのではなく、物理的な外乱が出てくるまで実施する。“なぜ”の回数は、なぜなぜ分析で通常推奨されている5回にこだわらない。外乱とは、顧客の使用条件(消灯直後に点灯、長期間使用しなかった等)や使用環境(高温環境、高湿環境、振動等)で、製品の外側にある要因である。検討範囲外の部分の変動要因も外乱と考える(電源電圧変動など)。また、外乱によって製品内部で変化・変動する現象のことを内乱という。なぜなぜ分析では、外乱の1つ上位(図2では左)の要因は内乱になる。なぜなぜ分析実施後は、十分性や論理構造等のチェックを行うルールがあるが、説明は割愛する。

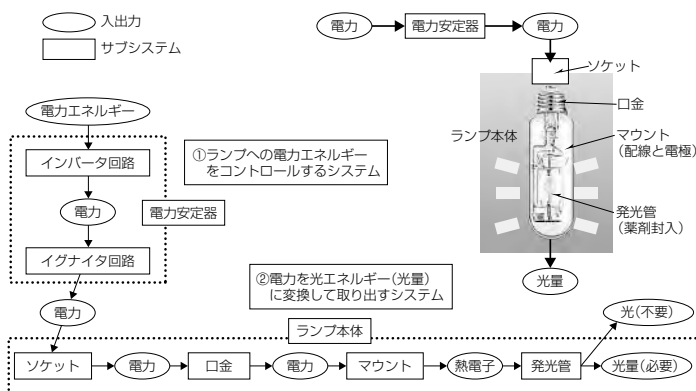


図1. 高輝度ランプの機能ブロック図

高輝度放電ランプの機能「電力に応じて光量を得る」 が出荷後に市場で働かなくなる（機能低下する）			
ソケットからの電力が口金に正しく伝わらない	ソケット／口金の接続部が外れている	接続部が腐食した	(A) 腐食環境にさらされた
			(B) 高温環境にさらされた
			(C) 高温環境にさらされた
		接続部に外力が加わった	(D) 衝撃が加わった
			(E) 振動が加わった
			(F) ヒートサイクルが加わった
	ソケットー口金間の電気抵抗が高い	出荷時の接続部強度が低い（製造時の要因）	
		ソケットの銅端子が腐食した	
		ソケットの銅端子のバネ性劣化	
		口金側溶接部腐食	
口金からの電力が発光管に正しく伝わらない	電源が故障している（停電）	（サブシステム外の要因）	
		（サブシステム外の要因）	
	電源ーソケット／口金間の電源配線が切れている	（サブシステム外の要因）	
		（サブシステム外の要因）	
口金ーマウント間の電気抵抗が高い	マウントー発光管間の電気抵抗が高い	接続部が腐食した	
		接続部に外力が加わった	
	マウントー発光管間の電気抵抗が高い	接続部が腐食した	
		接続部に外力が加わった	
発光管が正常に動作しない	明るさが低下した	電源電圧が低下した	(G) 電源電圧変動
			(サブシステム外の要因)
		電子安定器からの出力低下	発光管との化学反応
			残留ガスとの化学反応（製造時の要因）
		封入薬品量の減少	封入薬品との反応
			電極からの飛散物付着

図 2. なぜなぜ分析の例

### 2.3.3 チェックリストエリア

XCNのチェックリストを作成する（図 3）。チェックリストの作成は製品分野共通でよく、XCN実施のたびに新作する必要はない。ここではチェックリストを新作する場合について述べる。2.2節で述べたように、チェックリストは、製品が曝される外乱と、それによって製品の内部で発生・変化し得る現象である内乱との組合せで構成される。[STEP 4] 外乱のデータベース整備

まず外乱のチェックリストのヒントとなる、外乱のデータベースを整備しておく。外乱に関する類似製品の市場情報、過去トラブル情報、信頼性マニュアル、試験規格、関連文献<sup>(1)</sup>などの情報から、顧客の使用条件や環境条件に関するキーワードを冗長に列挙する（図 3 の上段）。データベースの項目は製品分野共通でよく、その企業（事業部）のナレッジとして共有し、継続的に拡張していくとよい。

#### [STEP 5] 外乱の選択

XCNを実施する対象について、[STEP4]のデータベースから明らかに関係しないものを取り除き、そのキーワード（例えば“温度”）から外乱の要因（例えば“高温環境”）を作成する（図 3 の中段）。

これは技術者だけで行うのではなく、営業部門や品証部門など顧客の情報に詳しいメンバーが参画することが望ましい。

① 外乱マスタ	
外乱	温度 湿度 日照(UV) 雨・水 風 雷・雹・氷 電 高度(気圧) 砂塵・塵・ゴミ かび・微生物 虫・小動物 放射線 電磁波 酸化雰囲気 酸化雰囲気 落下(衝撃) 振動・共振 加速度 荷重 引き張り 曲げ 回転 揺動 開閉
② 当該製品の外乱を絞り込み、内乱に対応付け	
外乱	高温環境 高温環境 ヒートサイクル 液体の浸入(結露等による) 異物類(塵埃、ゴミ、虫など) 電磁波ノイズ 腐食雰囲気(酸化・硫化) 電圧変動 購入部品メーカー要因 寸法・物性のばらつき 配線断線、接続部はずれ 配線断線、接続部はずれ 電極損耗 発光管浸食 電極損耗
内乱	配線の抵抗変化 材料の劣化 反応促進(腐食など) 熱応力 樹脂材料の膨潤・劣化 反応促進(腐食など) 材料の劣化 材料の劣化 配線断線、接続部はずれ 回路ショート 部品の酸化・腐食 回路断線 回路断線 配線断線(抵抗上昇、断線) 回路断線 購入部品の特性ばらつき 寸法・物性のばらつき 配線断線、接続部はずれ 配線断線、接続部はずれ 電極損耗 発光管浸食 電極損耗

図 3. チェックリストの例

#### [STEP 6] 外乱から内乱への展開

対象製品が[STEP5]で取り上げられた外乱に曝された場合に、どのような影響が製品内部に発生するかを外乱ごとに列挙する（図 3 の下段）。例えば、“高温環境（外乱）”に対応する内乱は、“配線の抵抗変化”“材料の劣化”“反応促進（腐食など）”“熱応力”等である。内乱はFMEAの故障モードに相当する。外乱が内乱を発生させないと判断される場合は、外乱を見え消して、“検討したが影響なしと判断”したことを残す。影響が不明な場合、内乱は空欄としておき、情報が増えた際に追記する。

これは製品の構造、動作原理、故障モードに詳しい技術者が中心となって、機能ブロック図を参照しながら実施する。内乱の想定は、まずは内乱の種類が列挙できればよく、大まかな“部品の寸法変化”程度の表現でよい点がXCNの効率性を高めている。“部品”について、内乱の場合分けが必要かどうかは、後のクロスチェック時に再検討する。

この後、外乱、内乱の検討優先順位をそれぞれ発生頻度と影響度でABC評価するが、説明は割愛する。

### 2.3.4 クロスチェックエリア

#### [STEP 7] クロスチェックと漏れていた要因の追加

要旨の図で示したように、左側になぜなぜ分析、右上部にチェックリストを配置し、その交差する部分にクロスチェックエリアを設ける。チェックリストの1つの列は“外乱＋内乱”の組合せになっているので、この組合せに対応するなぜなぜ分析の行を探して、対応する交点にすべて印(●)を打つ（図 4）。これをすべてのチェックリストの列について行う。チェックリストの外乱＋内乱ペアがなぜなぜ分析の行に対応しない場合は、なぜなぜ分析に漏れがあると考え、なぜなぜ分析に戻って該当する外乱＋内乱ペアが入るべき“枝”を検討し、なぜなぜ分析に追加する。次に、なぜなぜ分析の各行の内乱＋外乱ペアがチェックリストの各列と対応しているかを同様にチェックする。なぜなぜ分

## ◇一般論文◇

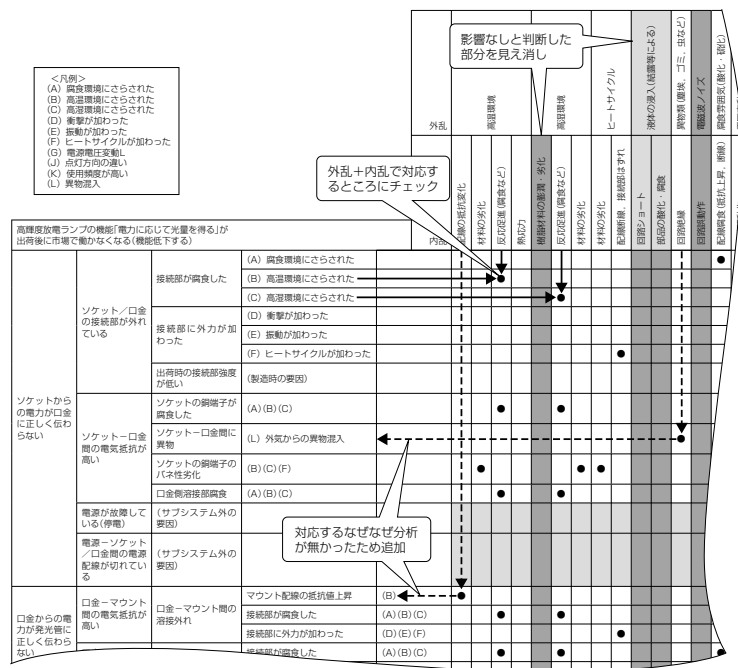


図4. クロスチェック

析の文言の不適切や、チェックリスト側の漏れに気づいた場合も適宜、追加・修正する。

クロスチェックを繰り返し、なぜなぜ分析やチェックリストを充実化していく過程で、漏れていた故障モードや原因について新たな気づきが得られることが実感できる。

### 2.3.5 ストラテジーエリア

#### [STEP 8] 品質リスクに対する戦略の明確化

抽出された外乱1つ1つに対してどのように対処するかの方針を定める。この方針は必ずしも最終決定ではなく、設計審査のインプット情報として、方針の妥当性を審議することもある。対処方法は、まず設計に対策を反映することを基本として、次のような項目を設定している。製品によって項目を変更する場合もある。

- (1) 機能性評価を実施
- (2) 信頼性試験等の規格試験で確認
- (3) 公差・製造工程で管理
- (4) 影響が少ないため無視
- (5) その他(防護, マニュアルでの注意喚起など)

(1)は“品質工学”<sup>(2)</sup>で知られる評価方法の1つで、抽出した外乱をノイズ因子(誤差因子ともいう)とする場合である。複数の外乱を取り上げ、複合的に組み合わせて機能の安定性を評価する。開発・設計上流での早期・短期間での品質の見える化に効果を発揮する手段として、(2)の信頼性試験の前段階の評価として推奨している。

XCNでは外乱・内乱がどんな不具合現象につながるのかの情報がなぜなぜ分析に示されているので、対処方針を策定する上で役立つ。

#### [STEP 9] 結論の明記

[STEP8]の検討結果を簡潔にまとめ、結論を記載する。

### 3. 効果と適用事例

社内でXCNの効果を検証した結果、なぜなぜ分析の展開行数は、なぜなぜ分析だけを個人が実施した場合に比べて平均4.4倍となり、内乱・外乱の網羅性が向上したことを確認している。これはクロスチェックによる漏れ防止の効果もさることながら、トップ事象設定方法のルール化や十分性・論理構造チェックの効果も含まれる。また、詳細な部品表を必要としないため、開発・設計の上流で活用できる先行性を持つ。また部品ごとの解析を必要としないので、効率的である。XCNはフォーマット化されており、レビューは結論から、個々の外乱とその対策方針、外乱が内乱を経てどのように不具合事象に波及していくのか、を順番に理解することができるので可読性が高い。これは有識者からアドバイスや指摘をもらう上で非常に重要なことである。

開発・設計プロセスにおける、XCNの適用事例を次に挙げる。

- (1) 通信機器の事例：XCNで50数件の品質リスク要因(内乱・外乱)を抽出し、それらを開発プロセスのどの段階で検証するかの計画策定に活用した。XCNのシートの右欄に更に評価内容の詳細や実施フォローの項目まで追加して管理できるように様式を改良した。
- (2) 電力機器の事例：要素開発段階にXCNを導入して品質リスクの見える化を行い、設計審査の組上(そじょう)に載せる仕組みを構築して開発の手戻り削減活動につなげた。
- (3) FA機器の事例：新製品で採用予定の新機能すべてにXCNを適用して品質リスク内容をレビューし、必要に応じて機能性評価によって弱みを具体的に抽出した。

### 4. む す び

現在、各製作所の設計品質に係わるキーマンに対してのXCNの教育や、全国4拠点での技法説明会を実施している。また豊富な事例と詳細なマニュアルをイントラネットで共有して活用を促進している。実際に活用できるようになるためには、座学だけでなく有識者によるトレーニングも必要であるが、使用することによって気づきが得られ、技術者の教育のためのツールとしても期待が高まっている。

今後は、実製品の開発に適用した場合の品質改善、手戻り削減等の効果の検証をさらに実施していく所存である。

### 参 考 文 献

- (1) 越川清重, ほか: 実務にすぐ役立つ信頼性技術, 日刊工業新聞社, 143 (1982)
- (2) 田口玄一(監修), ほか: 品質工学便覧, 日刊工業新聞社 (2007)