



家庭から宇宙まで、エコチエンジ



# 三菱電機技報

2

2018

Vol.92 No.2

## 進化する宇宙利用への貢献



## 目 次

### 特集「進化する宇宙利用への貢献」

我が国製造業への期待	卷頭言	1
高田修三		
宇宙システム利活用の新時代	卷頭論文	2
小山 浩・外口 靖・宮前靖彦		
準天頂衛星システムのセンチメータ級 測位補強サービスが拓く高精度測位社会		7
廣川 類・島 嘉宏・安光亮一郎		
準天頂衛星2~4号機		11
小淵保幸・望月恭介・高山哲也		
準天頂衛星4機同時並行運用を実現した地上システム —24時間衛星測位サービス提供に向けて—		15
峰田信之・山中 剛・森田直樹・梅壽政徳・木村剛久		
準天頂衛星対応高精度測位端末"AQLOC"		19
萩藤裕一		
三菱モービルマッピングシステム "MMS-G220Z"		23
富樫健司		
広範囲かつ高分解能な地球観測を 実現する先進レーダ衛星ALOS-4		27
岡田 祐・白坂道明・笠間 緑・横田裕也・楠田洋一郎		
超低高度を利用する観測衛星“つばめ”		31
功刀 信		
技術試験衛星9号機と将来展開		35
小田原 靖・小濱達夫・大谷冬彦・佐倉武志		
高周波数分解能と低位相雜音の両立を実現する 衛星通信用Ka帯コンバータ		39
清水俊之・中村圭佑・森 茂久・田島賢一・上谷裕志		
SNG向け屋内／屋外型Ku帯100W 半導体電力増幅器 "SX-6020/6101"		43
小坂田 寛・山本敦士・中田浩志・西原 淳・山添裕啓		
衛星管制ソフトウェア "Birdstar" の海外製衛星への適用		47
石井俊直・原内 聰・小林和貴		
新衛星機器生産工場の稼働と衛星機器事業の展望		51
竹谷 元・大川義幸・田島範一・下平久代		

関連拠点紹介	55
--------	----

### 特許と新案

「統合管制装置及び統合管制プログラム」	
「指定点投影方法、プログラムおよびコンピュータ」	57
「測位装置」	58

### Contribution for Evolution of Space Utilization

Expectations for Japan's Manufacturing Industries	
Shuzo Takada	

### Beginning of New Era for Utilization of Space Systems

Hiroshi Koyama, Yasushi Toguchi, Yasuhiro Miyamae	
---	--

### High-accuracy Positioning Society Pioneered by Centimeter Level Augmentation Service of Quasi-zenith Satellite System

Rui Hirokawa, Yoshihiro Shima, Ryoichiro Yasumitsu	
--	--

### Quasi-zenith Satellite 2-4

Yasuyuki Obuchi, Kyosuke Mochizuki, Takuya Takayama	
---	--

### Ground System with Concurrent Operation of 4 Quasi-zenith Satellites

—To Provide 24-hour Satellite Positioning Service—	
Nobuyuki Mineta, Tsuyoshi Tanaka, Naoki Morita, Masanori Bajju, Takehisa Kimura	

### High-precision Positioning Receiver "AQLOC" for Quasi-zenith Satellite

Yuichi Hagito	
---------------	--

### Mitsubishi Mobile Mapping System "MMS-G220Z"

Kenji Togashi	
---------------	--

### Advanced Radar Satellite ALOS-4 for Wide Area and High Resolution Global Monitoring

Yu Okada, Michiaki Shirasaka, Yukari Kasama, Yuya Yokota, Yoichiro Kusuda	
---	--

### "TSUBAME" : Observation Satellite Using Super Low Altitude

Makoto Kunugi	
---------------	--

### Engineering Test Satellite 9 and Future Evolution

Yasushi Odawara, Tatsuo Kohama, Fuyuhiko Otani, Takeshi Sakura	
--	--

### Ka-band Converter for SatCom Achieving High Frequency Resolution and Low Phase Noise Property

Toshiyuki Shimizu, Keisuke Nakamura, Shigehisa Mori, Kenichi Tajima, Yuji Tsuchitani	
--	--

### Indoor/Outdoor Ku-band 100W SSPA "SX-6020/6101" for Satellite News Gathering

Hirosi Osakada, Atsushi Yamamoto, Hiroshi Nakata, Jun Nishihara, Hiroaki Yamazoe	
--	--

### Application of Satellite Control Software "Birdstar" to Foreign-made Satellite

Toshinao Ishii, Satoshi Harauchi, Kazuyoshi Kobayashi	
---	--

### Operation of New Factory for Production of Satellite Equipments and Prospects of Satellite Equipment Business

Hajime Takeya, Yoshiyuki Okawa, Noriochi Tajima, Hisayo Shimodaira	
--	--

### 表紙：進化する宇宙利用への貢献

三菱電機では、今後の宇宙利用に基づくソリューションを支える技術、製品の開発に取り組んでいる。



- ①先進レーダ衛星(ALOS-4)は、広域かつ高分解能な地球観測衛星システムとして、開発中である。火山活動、地盤沈下、地滑り等の異変の早期発見によって、災害発生時の迅速な対処に貢献する。
- ②準天頂衛星システム(みちびき)は、2018年度から4機体制での実用サービスが開始され、複雑な日本の地形でも広範囲にわたって、高精度な測位情報を提供できるようになり、高精度測位社会の実現に向けて、更なる発展を目指す。
- ③モービルマッピングシステムの新製品"MMS-G220Z"は、高精度地図基盤情報の基となる三次元空間情報を効率的かつ高精度に取得可能な装置であり、ダイナミックマップを構築するためのキー技術として期待されている。

## 巻/頭/言

## 我が国製造業への期待

Expectations for Japan's Manufacturing Industries

高田修三  
Shuzo Takada

日本はものづくり大国である。その我が国で最近海外子会社を十分管理できていなかったり、データ改ざんが行われたりなどの残念な事件が相次いで生じている。日本の製造業は大丈夫かとメディアでも取り上げられている。筆者も色々申し上げたいことはある。しかしそうした事柄以上に自分が我が国製造業に10年来心配している1つのことがある。それは“規模の市場からの逆算とスピード”である。本稿でその点を取り上げたい。

2008年に出版された書籍に“カーライル”というプライベートエクイティ投資会社の戦略について解説した書籍がある。出版当時非常に反響があったが、今回、本誌への寄稿に際し改めて同書のポイントを紹介すると次のとおりである。

1989年にベルリンの壁が崩壊し、新たな世界秩序が生まれ始めた。1990年代に発展したパソコンとインターネットは、世界中を瞬く間につなげてしまった。そして2000年代にかけてITと金融がビジネスのメカニズムを変えていった。1990年代初期までは実体経済と金融経済の規模はさほど違わなかった(実体経済を若干レバレッジした程度)。この時代には、事業機会があれば経営者は内部留保に加えて銀行から担保の範囲内で借り入れて投資を行った。

しかし、1990年代以降様々な金融手法が発明されて普及が拡大した。同時期にITが世界をつなげたことで、金融経済の舞台もグローバルなものとなった。様々な金融商品も生み出され、そのリスクもサブプライムローンに見られるように世界中に分散した。こうした流れの中で、投資資金についても、世界の中で資金需要のある場所に次々と、短時間で巨額の資金が動くようになった。

この頃から日本の有力な工業製品の国際競争に変化が生じ始める。いわゆる“技術で勝ってビジネスで負ける”という現象である。液晶でも太陽電池でも日本企業も積極的に投資を行った。ただし、日本企業は自分のリソースで何とかしようと考える。海外展開もまず日本の国内を固め、基盤を作り、その余勢をかけて海外に展開しようと考える。

ところが、海外勢の競合企業は日本企業を上回る規模の投資で市場成長期のパイの大半を取り込みにかかってきた。海外のライバルは、自分が投資できる規模というロジックではなく、今後の競争に勝ち残るために幾ら必要かという、必要な資金を先に計算して必要な投資を算出する。

市場をグローバルに捉え、戦いの帰趨(きすう)を制するものはスピードであると覚悟する。そのために必要な資金も人材も逆算してそろえる。要すれば外部調達も行い、自前主義に捕らわれない。当たり前のように思われる話だが、このことが指摘されてから10年経て現実に対応できているのであろうか。

ある家電メーカー幹部の方が、“自分の会社と韓国最大手の企業の比較を行った。最初彼らが自分たちの会社をマーケティング・ドリブン・カンパニーと称する意味が分からなかった。マーケティングとは営業販売のことと思っていた。しかし、マーケティングは企業戦略そのものであり、ビジネスの中核であった。ただ、そのことに気づいたのは負けた後だった。”という話を伺ったことがある。今もその他の会社で同じ過ちを繰り返してはいないだろうか。

昨今、衛星の小型化、コンステレーション化、衛星データの安全保障、防災、農林水産業、交通など様々な分野での利用、さらにAI(Artificial Intelligence)の活用など、様々な変化が宇宙産業で生じている。巷間(こうかん)、“New Space”と呼ばれ非常に目の離せない分野ともなっている。この“New Space”といわれる分野で勝ち残って発展していくプレーヤーにはこれらの“規模の市場からの逆算とスピード”が不可欠である。良い技術があってそれだけでは“技術で勝ってビジネスで負ける”になってしまう。

製造業は資本財を用いて生産性を上げていく産業であり、一人当たり平均付加価値額でみればサービス業よりも高い。このため豊かな国つくりを目指して世界中で製造業の争奪戦になっている。我が国政府もそのための環境整備に精一杯努めねばならない。大切な我が国製造業でも時代や環境の変化に応じつつビジネスを大いに発展させることを切に期待している。

# 巻頭論文



## 宇宙システム利活用の新時代

Beginning of New Era for Utilization of Space Systems

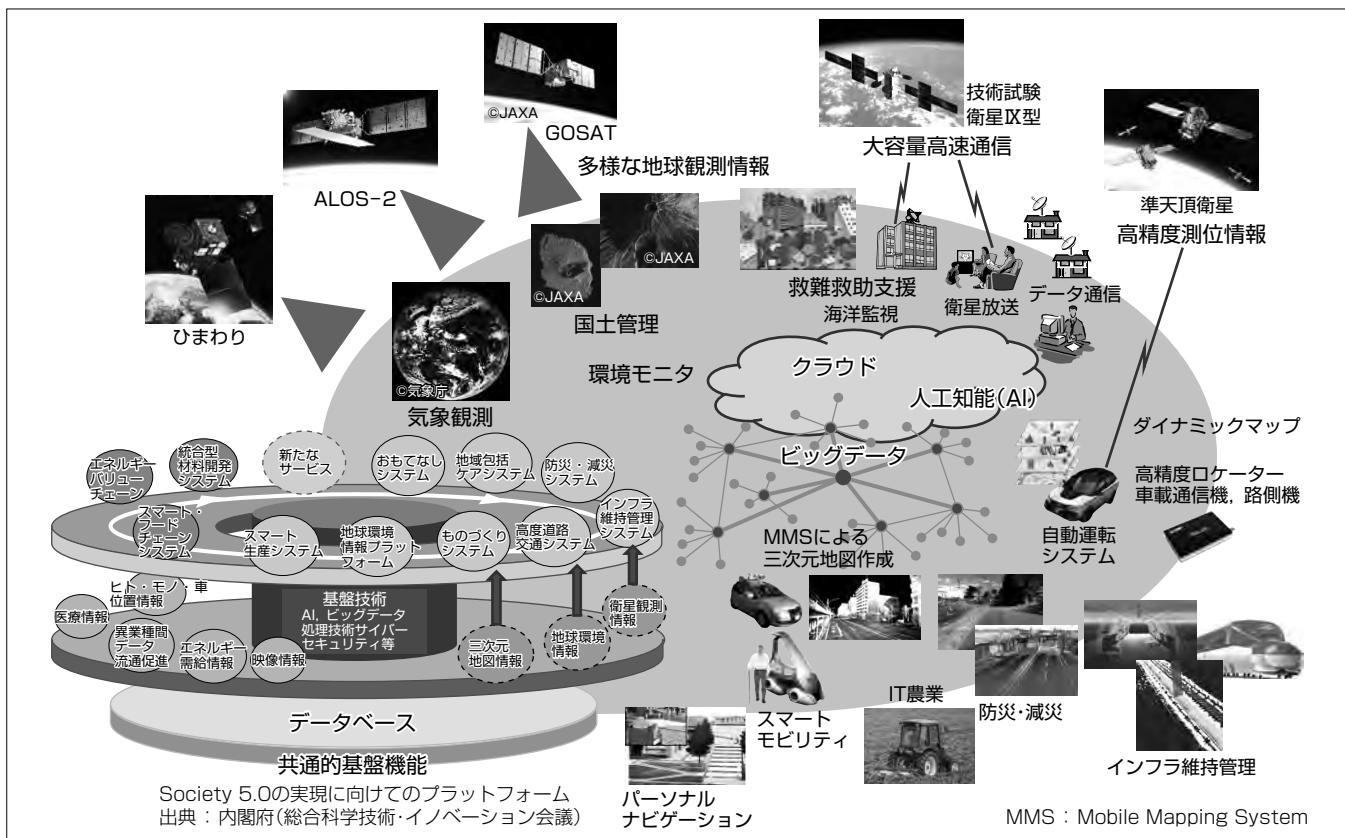
Hiroshi Koyama, Yasushi Toguchi, Yasuhiko Miyamae

### 要 旨

現在、宇宙システムの利活用は新たな段階に移行しつつある。国内外での技術革新、IT事業者を中心とした異業種からの新規参入等を背景に、衛星から得られる様々な情報の質の向上、処理データ量の大幅な増加(ビッグデータ化)のトレンドが顕著である。

こうした流れを受け、国内でも、リモートセンシングの分野では、観測情報多様化とともに、高頻度かつ高解像度情報の提供が可能になりつつある。また、衛星測位の分野では、2018年度から準天頂衛星のセンチメータ級高精度衛星測位サービスが開始される。衛星通信の分野でも、高速大容量化の動きが顕著である。

これらの衛星から得られる各種データと様々な地上データを組み合わせることによって、多様な分野での新規ソリューション創出が期待される。内閣府、経団連(一般社団法人 日本経済団体連合会)、COCN(一般社団法人 産業競争力懇談会)が提唱するSociety 5.0で、ロボットやAI等の先端技術をあらゆる産業や社会生活に取り入れることで、サイバー空間とフィジカル空間を融合したモノとサービスを提供する複数のシステムが定義されている。これらシステムの共通的基盤となるプラットフォームとして、各システムに共通するデータベースが位置付けられており、衛星からのデータが重要な構成要素の1つとなる。



### Society 5.0の実現に向けたプラットフォーム構築と宇宙システム利用への展開

Society 5.0の実現に向け、衛星観測情報、三次元地図情報等を含むデータベースの整備が進められる。リモートセンシング衛星による地球観測データ、測位衛星である準天頂衛星による高精度測位データを人工知能(AI)、ビッグデータ処理技術等の最新の情報処理技術と融合することによって、防災・減災、インフラ維持管理、道路交通の高度化、地球環境情報の把握、農業・建設のスマート化等に向けた、様々なソリューション創出が期待される。これら各システム間の情報伝達を担う衛星通信に対しても、更なる高度化が要望されている。

## 1. まえがき

2017年5月に内閣府で制定された“宇宙産業ビジョン2030”<sup>(1)</sup>では、宇宙システム利活用の加速がIoT(Internet of Things), ビッグデータ, 人工知能(AI)等とともに、成長産業を創出するフロンティアとして位置付けられている。また、同年6月に発表された“未来投資戦略2017”でも、宇宙からの情報をSociety 5.0の実現に不可欠となるビッグデータ基盤として位置付けており、AI等の解析技術と組み合わせつつ、新たなビジネスの創出を図るとしている。

三菱電機は内閣府・宇宙開発戦略推進事務局、宇宙航空研究開発機構のプロジェクトを通じ、種々のリモートセンシング衛星、測位衛星(準天頂衛星)、通信衛星の開発を行ってきた。

本稿では、リモートセンシング、測位、通信の各分野での今後の宇宙システム利活用に基づくソリューションの将来像、それらを支えるために当社が現在開発、整備に取り組んでいる宇宙システムの概要について述べる。

## 2. リモートセンシング衛星の利用動向と当社の技術

### 2.1 リモートセンシング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、気象変動、環境、食糧等の各種地球規模の課題の解決に貢献することができる。

陸域での地震・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、海洋での流氷、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、観測衛星には可視光、赤外、電波等を使ったセンサが搭載され、様々な観測要求に対応している。また、高度な観測要求に対応するため、観測衛星で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に届ける衛星-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。また、温室効果ガスの継続モニタリングについては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している。

### 2.2 当社の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月に陸域観測技術衛星2号“だいち2号(Advanced Land Observing Satellite-2 : ALOS-2)”が打ち上げられ、搭載されたL帯合成開口レーダ(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、昼夜を問わず、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帯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。また、電波を用いていることから昼夜を問わず、また雲や火山の噴煙等にも影響されずに画像を取得することができるため、災害時の状況把握に欠かせないセンサとなっている。また、合成開口レーダは単に画像を取得するだけではなく高さ情報を取得することができるため、地震による地盤の変化や火山活動による地面の変化を定期的に把握することで防災・減災に活用されている。

また、現在当社ではALOS-2の後継機である先進レーダ衛星(ALOS-4)(図1)をJAXA(国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構)の下、開発中である。先進レーダ衛星はALOS-2のL帯合成開口レーダを踏襲しつつ、新たにデジタル・ビーム・フォーミング(DBF)技術を採用している。このDBF技術によって分解能(3m)を維持しつつ観測幅をALOS-2の4倍(200km)まで拡大しており、広域災害時に一度に広範囲の観測を行うことができるようになる。また、データ伝送速度もALOS-2の800Mbpsに対し、約4倍の3.6Gbpsを実現し、より多くのデータを一度に配信することで災害発生時の迅速な対処に貢献することが期待される。

一方、光学センサを搭載する観測衛星としては、JAXAの下、先進光学衛星(ALOS-3)を開発している。先進光学衛星は、陸域観測技術衛星“だいち”に搭載された光学センサのミッションを引き継ぐ衛星である。“だいち”に搭載された光学センサと比較して、高分解能かつ広域の撮像を実現する。分解能は“だいち”的パンクロ2.5mに対し0.8mと大幅に向上させつつ、観測幅は70kmと広域化を実現する。先進レーダ同様、高分解能・広域撮像を実現することで、災害監視、海洋観測、地理空間情報の取得に役立つ。

また、環境観測分野では、地球温暖化防止を目的とし、



図1. 先進レーダ衛星(ALOS-4)

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(Greenhouse gases Observing SATellite : GOSAT)”を開発した。“いぶき”は、2009年1月に打ち上げられた後、設計寿命5年を大幅に超えて、今なお運用されている。“いぶき”的観測データは、米国、中国、日本を始めとする世界50か国以上、2,500以上の機関のユーザーに配信され、日々活用されている。また、当社では“いぶき”的後継機であるGOSAT-2を開発中で、搭載センサを含む衛星システム及び地上システムの開発を担当している。GOSAT-2に搭載される温室効果ガス観測センサ2型(TASNO-FTS-2センサ)は“いぶき”搭載センサと比較して二酸化炭素の測定精度を向上させるとともに、新たな観測波長領域を追加したことでの一酸化炭素の観測を可能にしている。これによって、従来、自然由来の二酸化炭素の区別が困難であったのに対し、一酸化炭素の検出を合わせて行うことで人為発生の温室効果ガスを効率的に観測することが可能になる。また、観測対象地域に雲がある場合、自動的に雲の領域を避けて観測する“インテリジェントポインティング機能”を新たに備えることで、高度な観測が可能となる。さらに同じくGOSAT-2に搭載される雲エアロゾルセンサ2型(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation/Cloud and Aerosol Imager 2 : TASNO-CAI-2)では雲やエアロゾルの観測を行うことで、TASNO-FTS-2(Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation/Fourier Transform Spectrometer 2)が観測したデータの補正を行うとともに、現在環境問題となっているPM2.5の観測が可能である。

今回述べたALOSシリーズ、GOSATシリーズでは、当社の観測衛星向け標準衛星バスを採用している。多数の打ち上げ実績を持つ当社の高品質・高信頼性・低コスト標準衛星バスに、高性能センサを搭載することで、今後も様々な観測衛星の開発に携わり、安全・安心社会への実現に貢献していく。

さらに、当社ではこれまでの観測衛星にない超低高度(約200km)で地球を周回する“つばめ(SLATS)”を開発し、2017年12月に打ち上げた。衛星の軌道高度を低くするとレーダでは電力を大幅に低減することができる。また光学センサでは小さな口径でも分解能を確保することができるため、小型軽量化・低コスト化が期待できる。しかし、このような超低高度で周回する衛星は空気抵抗の影響によって通常の衛星と比較してすぐに地球に落下してしまうことになる。今回SLATSでは、イオンエンジンを採用することによって、燃料効率がよく長期間超低高度を維持させることができ可能となっている。またSLATSでは超低高度環境での衛星に対する様々な影響をモニタすることを計画しており、これらの成果を将来の小型・低コストの超低高度観

測衛星につなげることが期待されている。

### 3. 測位衛星の利用動向と当社の技術

#### 3.1 準天頂衛星システムの概要

日本独自の衛星測位システム構築の第一歩として2010年に準天頂衛星初号機が打ち上げられた。この初号機の成功実績を基盤に、2017年には後続の準天頂衛星3機の整備が完了した。地上軌跡が8の字を描く準天頂軌道に3機(初号機・2号機・4号機)、静止軌道に1機(3号機)の準天頂衛星が配置され、4機体制の準天頂衛星システムが完成した(表1)。準天頂衛星は、米国GPSの測位信号と互換性のある測位補完機能と、ユーザーがより高精度な測位結果を得られるように誤差補正情報を配信する測位補強機能を持つ。さらに、静止軌道の3号機は、災害情報の通信機能を持っている。準天頂軌道に衛星3機を配置できることによって、常に日本の天頂付近から信号を配信できるため、高層ビル街や山間部のような電波が届きにくい地域でも、高精度の測位情報を取得できるようになる。

#### 3.2 センチメータ級測位補強サービスの特長

準天頂衛星システムでは、測位補強機能としてセンチメータ級測位補強サービス(CLAS)<sup>(2)(3)</sup>が提供される。従来のGPSの測位精度は約10mであり、信頼性も保証されないが、このサービスは衛星測距データに含まれる各種誤差を補正するデータを準天頂衛星経由で配信することで、高い測位精度(水平／静止：6cm(95%))と信頼性を実現する。また、測位衛星の異常をリアルタイム監視するインテグリティ監視機能を持ち、測位情報の信頼性を確保することができる。このサービスでは、日本全国約300点の電子基準点網で取得した各測位衛星の観測データを用いて、主管制局で観測データに含まれる各種測距誤差を推定、補正情報及びインテグリティ情報を生成する。これらの情報を準天頂衛星から放送、測位受信機で各測位衛星の測距データを補正することによって、高精度測位を可能にする。

#### 3.3 高精度測位社会実現への取組み

農機・自動車の自動走行といった高精度衛星測位アプリケーションの創出・普及に向けては、同種のサービスを日

表1. 準天頂衛星(2, 3, 4号機)の主要諸元

	2・4号機(準天頂軌道)	3号機(静止軌道)
衛星バス		DS2000
	GPS測位補完(L1C/A, L1C, L2C, L5)	
搭載ミッション	サブメータ級測位補強(L1S)	
	センチメータ級測位補強(L6)	
L5S(測位技術実証)	L1Sb, L5S(測位技術実証)	
宇宙環境データ取得装置	メッセージ通信(S, Ku)	
発生電力(EOL)	6.3kW(2枚構成×2翼)	
ドライ質量	1.6トン	1.7トン
打ち上げ質量	4.0トン	4.7トン
軌道上寿命		15年以上

EOL : End Of Life(寿命末期)

GPS : Global Positioning System(全地球測位システム)

本以外の国・地域でも提供するとともに、高精度位置情報を利用するための高精度地図インフラ及び測位端末の整備が必要である。当社は、高精度三次元地図の整備を行うダイナミックマップ基盤企画(株)に出資し、2017年度事業会社化を支援するとともに、欧米を中心とした世界各地に高精度補強サービスを提供するSapcorda社に出資した。また、海外を含む測位端末及びアプリケーションの開発・普及促進のため、伝送フォーマットを国際標準規格に基づき新たに定義、規格提案中である。

いよいよ高精度測位情報を誰もが容易に利用できる時代が到来する。高精度測位情報の利活用を促進させ、新規ソリューションビジネスの立ち上げ、展開を目指す。また、社会インフラとしての性能及び利便性向上に継続的に取り組み、準天頂衛星システムの更なる発展を目指す。

#### 4. 地理空間情報としての衛星利用の拡大

当社はこれまでFKP(Flaechen Korrektur Punkt)方式によるセンチメータ級高精度測位サービスを手掛け、このセンチメータ級高精度測位技術を利用してMMSを製品化し、高精度移動体測量の事業分野を開拓してきた。そして近年、国内外での自動運転の実用化に向けた取組みの中で高精度三次元地図が、車両に搭載されるセンサの1つに位置付けられ、この整備が進められている。当社は、MMSを利用して収集される高精度三次元点群データを活用したダイナミックマップ(自動走行／安全運転支援を行うため、時間的変化度合いに応じた情報を階層別に構成した高精度三次元地図)(図2)普及に向け、その根幹をなす三次元地

図共通基盤データの効率的な整備・維持に向けた技術開発推進に取り組んでいる。

折しも第5期科学技術基本計画(科学技術基本法に基づき日本政府が策定する、2016~2020年度の5か年間の科学技術の振興に関する総合的な計画)で、超スマート社会の実現(Society 5.0)の方針が示され、サービスや事業のシステム化、複数システムの連携、共通的なプラットフォーム(共通基盤)構築の動きが加速している。そして2017年9月には経済産業省と総務省から“認定データバンク制度”創設の方針が打ち出され、2018年度にも関連する法整備が行われる見込みである。このデータバンクは、複数の企業などがばらばらに持っている地図情報やその出典となった計測データ、衛星画像などを集め、このデータの共同利用を通じて新規事業の創出や生産性向上を狙ったものであり、対象のデータとして先に述べた三次元地図共通基盤データも想定されている。なお、この三次元地図共通基盤データはあくまで“基盤”となるものであり、展開を狙うサービスやビジネスに応じて様々な付加価値を基盤上に階層的に積み重ねたものが目的に応じて整備されていくものと考える。例えば自動運転向ければ、道路形状や各種ライン、標識・標示などの基盤データ上に、ランドマーク情報、交通規制情報、事故・渋滞情報、周辺車両からの情報(ドライブレコーダや車両の挙動など)、歩行者情報などが更新頻度などに応じて階層的に構築されることになり、その基となる各種情報が多種多量に蓄積されていくことになるであろう。

このようにセンチメータ級高精度測位技術を利用した高精度三次元点群データの活用範囲拡大と共に加えて多種多量のデータがデータバンクとして集約されビッグデータ化していく流れが見えており、こうした中で当社は、これらのデータバンクを支える基盤システムの提供、その基盤システム等に蓄積されていくビッグデータを効率的に処理して新たなサービスや付加価値を引き出すソリューションの提供に取り組んでいく(図2)。この具体事例としては、三次元地図共通基盤データの活用先として自動走行／安全運転支援に向けた高精度三次元地図の整備が先行していて、ダイナミックマップを整備するための“サーバシステム”，AI技術や画像認識技術等を活用してMMS計測データから三次元地図共通基盤データを効率的に整備・維持する“自動図化・差分抽出ソフトウェア”的開発を行っている。

#### 5. 通信放送衛星の利用動向と当社の技術

静止通信衛星市場では、地上での通信需要の急速な拡大を受け、高速大容量通信の需要が高まっている。通信総量拡大と通信単価削減のためにマルチビームの数に比例して通信帯域を拡大できるKa/Ku帯のHTS(High Throughput Satellite)が主流となっており、これに伴い

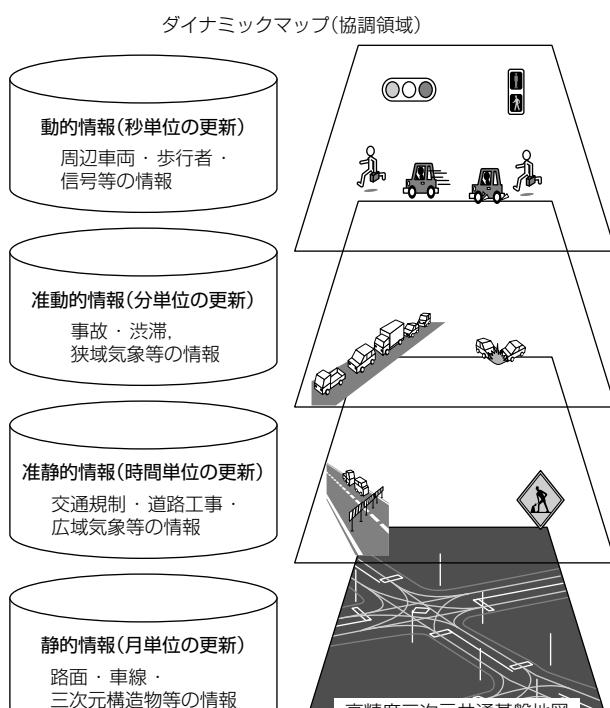


図2. ダイナミックマップの概念図

# 卷頭論文

衛星バスへの大規模ペイロード搭載要求が顕著となっている。同時に化学推進に比較して比推力が5~10倍となる高効率の電気推進をバス系の標準とすることで衛星の搭載推薦を削減し、大電力衛星でも安価なロケットで打ち上げることで初期の資本的支出の最小化を図ることが衛星オペレータのビジネスモデルの基調となっている。

搭載通信ペイロードでは、HTS技術と並行してフィルタリング・周波数変換・ルーティングの各機能をデジタル化し、各通信チャネルの帯域や周波数、接続、アンテナ覆域をコマンドで可変にすることで、打ち上げ後の通信需要変化というリスク又は機会に能動的に対応可能なデジタルペイロードの要求が多くなっている。デジタル化は、通信ペイロードの可変性・柔軟性向上とともに設計標準化の可能性も持っている。すなわち衛星ごとの個別仕様に応じて、数多くの機械的スイッチ・同軸ケーブル・導波管接続で実現する複雑なルーティングや、高度化する周波数非干渉化のために調整難易度の高いアナログの入出力フィルタや周波数変換器で実現しているペイロードの物理的構成をデジタルペイロードによって標準化できる可能性を持っている。静止衛星自身も低高度・中高度の非静止系の通信コンステレーションとの競合や融合が本格化し、衛星バス・通信システムの更なる性能向上とコスト競争力強化が強いられている。

この静止及び非静止のHTSに関する通信サービス需要予測に関して一例を示す。図3は2016年の総務省資料(調査はNorthern Sky Research社実施)によるC/Ku帯固定通信サービス(FSS), HTS衛星通信サービス(静止及び非静止)の収入予測である。C/Ku帯FSS収入は今後安定しつつも漸減する傾向であるのに対し、HTSサービスの収入が2025年には全体収入の50%近くを占めるとの予測である(2015年時点では既に約10%)。その2025年のHTS収入の約8割が静止衛星、約2割が非静止衛星による供給であるとの図3の予想を踏まえると、まず静止衛星の性能向上(通信性能・大電力・電気推進)とコスト競争力獲得が優先度の高い重要な課題であることが分かる。

このような世界市場・通信技術の大きな流れを踏まえ、2014年度から3年間開催された総務省主催の「次期技術試験衛星に関する検討会」の中で産官学代表者によって次世代通信衛星の重要性と方向性が討議され、2016年4月1日に閣議決定された「宇宙基本計画」の中で、“通信・放送衛星に関する技術革新を進め、最先端の技術を獲得・保有していくことは、我が国安全保障及び宇宙産業の国際競争力

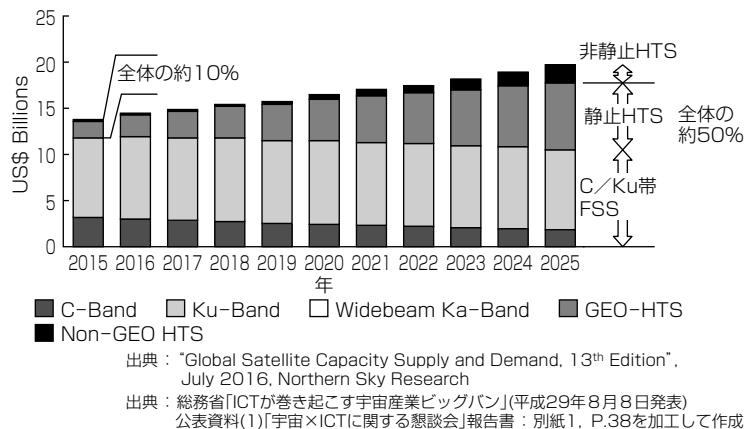


図3. 衛星通信サービスの収益予想

の強化の双方の観点から重要である”と改めて方向付けされた。これらの背景によって技術試験衛星9号機が2016年度予算化され、当社は衛星バス開発、及び総務省担当の次世代デジタル通信ペイロードの開発を進めている。この技術試験衛星9号機の開発を通して“次世代通信衛星”を確立し、2020年代早期に年間2機の商用衛星を受注することによって、当社の宇宙事業全体の売上げ1,500億円を目指している。

## 6. む す び

リモートセンシング、測位、通信の各分野での宇宙システム利用の動向、それらを支える宇宙システム、提供可能な情報に関して述べた。“宇宙産業ビジョン2030”では、宇宙利用の拡大に向け、衛星データの利活用促進が必要であり、衛星データへのアクセス性改善、衛星データの継続性強化、リモートセンシング衛星や準天頂衛星等の衛星データと地上データを統合した新たな活用事例の創出及び、潜在ユーザーとしての省庁・自治体等との連携による利用拡大と産業化等を目指すことが示されている。

これら動向を踏まえ、宇宙システム利用の裾野拡大、新たなソリューション創出に資する宇宙システムの提供を念頭に、今後の宇宙システムの開発、整備に取り組む。

## 参 考 文 献

- (1) 内閣府 宇宙政策委員会：宇宙産業ビジョン2030 (2017)
- (2) Cabinet Office : Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Centimeter Level Augmentation Service, IS-QZSS-L6-001 (Draft) (2017)
- (3) Cabinet Office : Quasi-Zenith Satellite System Performance Standard, PS-QZSS-001(Draft) (2017)

# 準天頂衛星システムのセンチメータ級測位補強サービスが拓く高精度測位社会

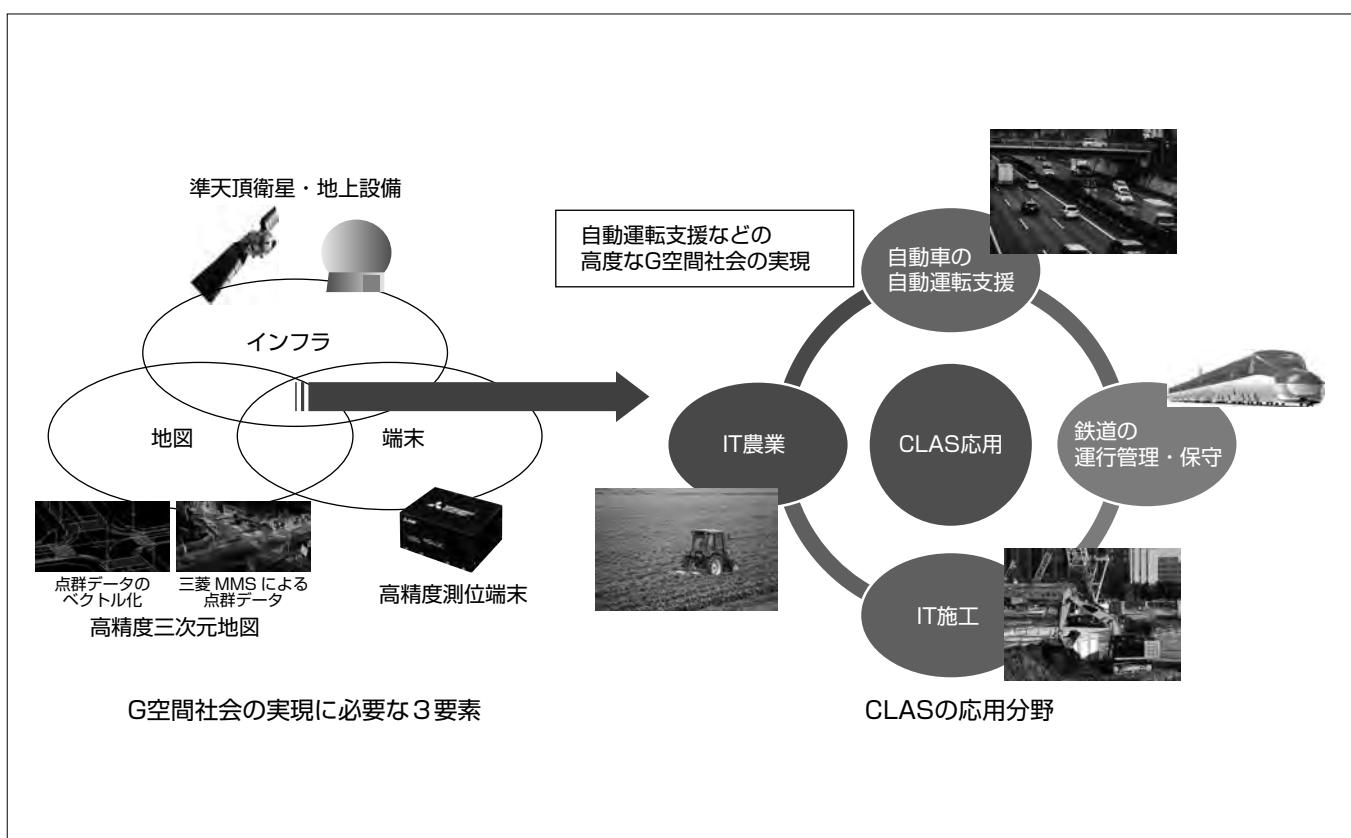
廣川 類\*  
島 嘉宏\*\*  
安光亮一郎\*

*High-accuracy Positioning Society Pioneered by Centimeter Level Augmentation Service of Quasi-zenith Satellite System*  
Rui Hirokawa, Yoshihiro Shima, Ryoichiro Yasumitsu

## 要旨

2018年度に実用サービスが開始される準天頂衛星システムでは、従来の測位精度を飛躍的に高めるセンチメータ級測位補強サービス(Centimeter Level Augmentation Service : CLAS<sup>(1)(2)</sup>)が提供される。CLASでは、衛星測距データに含まれる各種誤差を補正するデータを準天頂衛星経由で配信することで、高い測位精度(静止時仕様値水平: 6 cm)を実現する。また、測位衛星の異常をリアルタイム監視するインテグリティ機能を持ち、測位情報の信頼性を確保できる。CLASは、正確な位置情報に様々な情報を組み合わせて高度に活用する“G空間社会(地理空間情報高度活用社会)”の実現に向けて、IT農業、IT施工、自動車の自動運転、鉄道の運行管理・保守等、様々な分野への応用が期待されている。また、三次元ダイナミックマッ

プとの連携によって、自動車の自動運転支援等の分野への応用も期待されている。このサービスの普及を促進するため、2017年9月に準天頂衛星による試験サービスが開始され、各種の利用実証が行われている。また、CLAS評価用として測位端末を開発し、一般ユーザーへの貸出しを行っている。このシステムの開発では、海外を含む普及促進のために伝送フォーマットを国際標準規格と互換性を持つ形式で定義・採用した。自動車市場等に向けた高精度測位チップの量産化によって、劇的な低コスト化が図られ、普及が促進することが期待される。また、同種の補強サービスの欧米を初めとする世界各国への展開を計画する海外他社と協業し、端末の相互運用性を確保し、国際展開が基本の自動車市場等での普及を促進することにした。



## 準天頂衛星センチメータ級測位補強サービス

電子基準点(日本全国約300点)で取得した観測データから各衛星の距離誤差成分(軌道・クロック・信号バイアス・電離層遅延・対流圏遅延)を推定、圧縮及びインテグリティ情報付与後、衛星経由で配信する。ユーザー測位受信機は、各衛星の観測データを補強データ補正、高精度測位結果(精度: 静止時仕様値水平6cm)を得る。

## 1. まえがき

近年、スマートフォンに搭載されるナビゲーションアプリケーションに代表される地理空間情報の利活用が注目されている。正確な位置情報に様々な情報を組み合わせて高度に活用する“G空間社会”が実現することで、ルート検索や運行情報取得といったサービスだけでなく、従来は人間が行っていた物流業務や機器操作を自動化する等、新たな応用が可能となる。情報技術の飛躍的な進歩によって、モノのインターネット化(Internet of Things : IoT)が進んでおり、人工知能(AI)技術の進歩と相まって、大量の情報が瞬時にビッグデータとして処理・活用される第4次産業革命が訪れつつある。その鍵となる“いつ・どこで・何が・どのように”という地理空間情報を高度に活用したG空間社会を実現するためには、位置を正確に知るためのインフラ、位置情報を有用な情報と結びつけるための高精度な地図、有用な情報を提供する端末(アプリケーション)からなる3つの要素の整備が必要不可欠である。

当社は、G空間社会の実現に向けたこれら3要素の整備に総合的に取り組んでおり、準天頂衛星システム(Quasi-Zenith Satellite System : QZSS)による測位補強インフラの構築、ダイナミックマップ基盤(株)(DMP)による高精度三次元地図基盤の整備、高精度測位端末の開発・製品化を行っている。準天頂衛星システムの最大の特徴の1つは、センチメータ級の極めて高い測位精度を実現する補強サービスであるセンチメータ級測位補強サービス(CLAS)を提供することである。このサービスは、従来のGPS(Global Positioning System)カーナビゲーション等で数mであった精度を6cm(静止時仕様値水平)と飛躍的に高めるものであり、IT農業、IT施工、自動車の自動運転支援、鉄道の運行管理・保守等の様々な用途への応用が期待されている。このサービスは日本全国をサービスエリアとして2018年度から開始される。また、当社が出資するSapcorda社によって、欧米を始めとする世界各国への同種の補強サービスの提供も計画されている。

本稿では、当社が開発に参画する準天頂衛星システムとセンチメータ級測位補強サービスの開発状況、及びこのサービスを応用したアプリケーションの可能性について述べる。

## 2. 準天頂衛星システムの特徴と開発状況

### 2.1 準天頂衛星システムの特徴

準天頂衛星システムは、2018年度からの実用サービス開始を目指して日本が独自に開発中の衛星測位システムである。準天頂衛星システムは、米国のGPSと互換性を持つ測位信号を送信する補完機能と、測位精度を向上させる補強情報を日本国内向けに配信する補強機能を併せて持っている。準天頂衛星は、静止衛星の軌道を傾け、かつ日本

上空に長時間とどまるよう離心率を付けた特殊な軌道を採用している。このため、日本地域で衛星を高い仰角で観測できる時間が長く、ビルの谷間のような衛星測位にとって厳しい環境でも活用できる。

### 2.2 準天頂衛星システムの開発状況

宇宙基本計画(2015年1月)では、準天頂衛星システムの整備について、4機体制によるサービスを2018年度から開始、2023年度を目途に持続測位が可能となる7機体制を目指すとされている。この計画に基づいて3機の衛星の開発・製造が行われ、2017年6月に準天頂衛星2号機、8月に3号機、10月に4号機が打ち上げられた。並行して衛星の管制や測位システムで使用される情報の生成を担当する地上システムや利用実証に使用されるプロトタイプ測位端末も開発されており、実運用サービスに先行してサービス普及につながる利用実証などをを行うため、試験サービスが開始されている。今後、4機の衛星及び地上システム・測位端末からなるシステムの総合的な機能・性能を確認した後、2018年度から実運用を開始する予定である。

## 3. CLASの開発状況

### 3.1 CLASシステムの特徴

CLASでは、国土地理院が日本全国に整備した約1,300点のうち約300点の電子基準点のGNSS(Global Navigation Satellite System : 全地球航法衛星システム)受信機で観測されたGNSS測距データを用いて補強情報データをリアルタイム生成し、準天頂衛星から配信する(図1)。

補強情報は、SSR(State-Space Representation)方式によって衛星起因の誤差(軌道、クロック、信号バイアス)及び大気遅延起因の誤差(電離層遅延、対流圏遅延)として誤差要因ごとにモデル化され、cmレベルの高い精度で推定される。このデータを各誤差のダイナミクス・特徴に基づき圧縮することで従来比1,000倍以上に伝送帯域を圧縮し、準天頂衛星のL6測位信号(2,000bps)による日本全国向けサービスが可能となった。CLASの主要諸元を表1に示す。CLASは、マルチGNSSに対応し、補強対象としてGPS、準天頂衛星(QZSS)以外にGalileo(EUの全地球航法衛星システム)をサポートする。これによって、都市部で

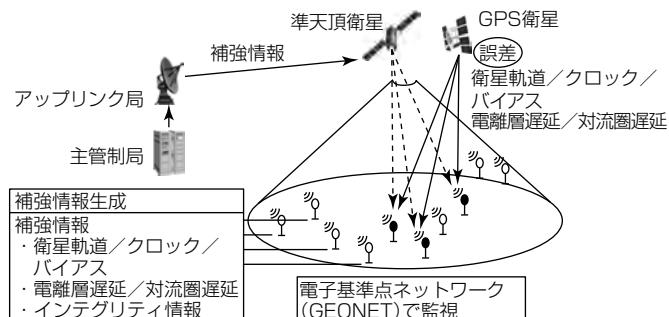


図1. CLASの構成

表1. CLASの主要諸元

項目	仕様
補強対象信号	GPS : L1C/A, L1C, L2P, L2C, L5 QZS : L1C/A, L1C, L2C, L5 Galileo : E1B, E5a
サービスエリア	日本国及び領海(約80万km <sup>2</sup> )
位置精度 (オープンスカイ, 95%)	静止: 水平6cm/垂直12cm 移動: 水平12cm/垂直24cm
初期化時間(95%)	60秒以下(補強情報取得時間を含む)

も安定して必要な可視衛星数を確保するとともに、民生信号だけ受信可能な安価な多周波受信モジュールによる高精度測位システムの構築が可能となる。

補強データの配信フォーマットとしては、日本国内限定の仕様となることを回避し、普及を促進するため、国際標準規格RTCM(Radio Technical Commission for Maritime services)<sup>(3)</sup>に互換性を持つCompact SSR形式<sup>(4)</sup>を採用している。Compact SSRは大気遅延補正量の伝送及びインテグリティ機能に対応する初のオープンフォーマットであり、また、従来方式(RTCM SSR)に対して60%以上の伝送効率改善を実現している。この仕様は衛星配信だけでなく、地上配信にも対応し、CLAS以外の高精度測位補強サービスにも適用可能な柔軟性を持っている。

### 3.2 インテグリティ機能

自動車の安全運転支援のような用途では、95%値やrms値で表現される一般的な精度指標では不十分であり、より確度の高い保護レベル(例: 信頼度99.9%以上)に基づくインテグリティという機能が必要となる。CLASは高精度測位システムとして世界で初めて<sup>(注1)</sup>インテグリティ機能をサポートし、ユーザーシステムで確度の高い測位結果を得る手段を提供する。CLASのインテグリティ機能では、システムモニタ機能によって、サービスエリアでのユーザー測位性能を常時監視しており、例えば故障した測位衛星をすみやかに検知し、補強対象から外すことができる。また、補強データ(衛星起因及び大気遅延起因)の確度に関する情報を放送することで、ユーザーシステム側で保護レベルと呼ばれる信頼度の高い精度指標の推算が可能となる。ユーザー側では、システムの特徴に応じて保護レベルを推算し、警報限界を超える場合は衛星測位を使用不可として、代替モードへの切替えを行う(図2)。

(注1) 2016年2月4日現在、当社調べ

### 3.3 ユーザー測位端末の開発

2017年9月から日本全国をサービスエリアとするCLASの試験サービスが開始され、準天頂衛星に対応した受信機による評価が可能となっている。試験サービスでは、一般ユーザーによる評価を容易にするため、当社が開発したプロトタイプ端末(図3)を評価用に貸し出している。この端末は、後述する各種の利用実証に供されており、CLASが提供するセンチメータ級の測位精度を実証している。

現在、CLASに対応する受信機の開発が複数のメーカー

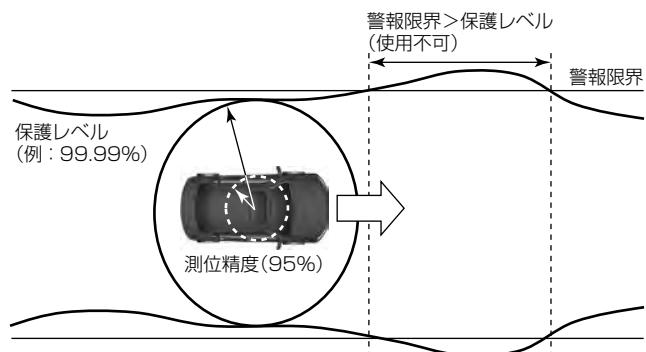


図2. インテグリティ機能での保護レベルと警報限界



図3. CLASプロトタイプ端末(外形寸法: 178×142×90(mm))

によって行われており、2018年度以降、現行のカーナビゲーション用GNSS受信モジュールに相当する小型で安価なCLAS対応受信モジュールの市販化も計画されている。従来、センチメータ級測位を行うためには、軍用信号を受信可能な高価な受信機が必要であり、補強サービスのインフラ確保も課題であったため、その用途が測量などの一部用途に限定されていた。マルチGNSS及びGPS近代化信号に対応するCLAS対応の端末が自動車向けなどの用途で量産されることで、端末コストが数千円にまで下がり、従来比1/1,000の劇的な低コスト化を実現することで、サービスの普及が加速するものと予想される。

## 4. 高精度測位社会に向けたCLAS応用

高精度測位社会の実現に向けて期待されるCLASの応用先は多岐にわたるが、代表的な分野として、IT農業、IT施工、自動車の自動運転支援、鉄道の運行管理・保守が挙げられる。次に、各分野での応用の可能性と実証試験について述べる。

### 4.1 IT農業分野

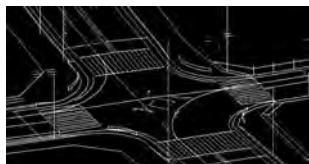
農業人口の高齢化に伴い、農機の自動走行化・ロボット化による省力化が期待される。また、土壤の精密な地図を作成し、土壤の成分に応じた最適な肥料を与えることで、単位面積当たりの収穫量の増加を試みるといった精密農業への応用も期待される。農機の自動走行を行うためには、耕作地の轍(わだち)を精密にトレースすることができる高い測位精度が要求される。また、モバイル通信環境が整っていない山間部等で使用可能な可用性も求められる。内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)“次世代農林水産業創造技術”で、準天頂衛星からのCLAS補強信号



図4. 農機自動走行の様子(提供: 北海道大学)



図5. 農機隊列走行の様子(提供: 北海道大学)



点群データのベクトル化



三菱MMSによる点群データ

図6. 高精度三次元地図による交差点データ化事例

をリアルタイムで使用して、農業用トラクターを自動走行させる実証実験が2017年10月23日に北海道上富良野町で実施された。実験には、北海道大学と主要な農機メーカーが参加し、各自が独自に開発した自動走行可能な農機によって、定められた経路に沿って、数センチの精度で正確に走行できることを実証した。ほかにも北海道大学では農機自動走行(図4)、農機隊列走行(図5)させる実証実験を実施している。

#### 4.2 自動車の自動運転支援分野

当社は、ネットワークRTK(Real-Time Kinematic)方式に基づくセンチメータ級高精度測位技術の応用としてMMS(Mobile Mapping System)を製品化し、移動体測量という新しい分野を切り拓(ひら)いてきた。MMSは、複数のレーザ測距センサとカメラを搭載し、周囲のレーザ点群データを取得するとともに、高精度な位置姿勢決定技術

を活用して、各点に高精度な位置情報を付与することができる。近年、急速に広まりつつある自動運転分野では、これらの高精度点群データを利用して車線などの有用なデータを認識・抽出することで、ダイナミックマップと呼ばれる高精度三次元地図(図6)を基盤とした階層構造データベースの構築が始まっている。

#### 5. むすび

2018年度の準天頂衛星システムのサービス開始に向けて開発中のセンチメータ級補強サービス(CLAS)の開発状況及びCLASが切り拓くと期待される高精度測位社会の構想について述べた。このサービスは、日本全国を対象にセンチメータ級の位置情報を提供するものであり、農機、IT施工の自動化等様々な用途が期待される。また、三次元ダイナミックマップとの連携によって自動車の自動運転への応用も期待される。各測位受信機メーカーに対しては、補強データ伝送フォーマットの国際標準規格化を推進、必要な技術情報を提供することで、対応する端末の早期の製品化を求めていく。また、Sapcorda社との連携によって補強サービス自体についても欧米展開を含む国際化を進め、相互運用性を確保することで、世界レベルの高精度測位社会の実現に貢献する。

#### 参考文献

- (1) Cabinet Office : Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Centimeter Level Augmentation Service, IS-QZSS-L6-001(Draft) (2017)
- (2) Cabinet Office : Quasi-Zenith Satellite System Performance Standard, PS-QZSS-001(Draft) (2017)
- (3) RTCM SC-104 : RTCM Standard 10403.2 Differential GNSS(Global Navigation Satellite Systems) Services (2013)
- (4) RTCM SC-104,QZSS Working Group : Specification of Compact SSR Messages for Satellite Based Augmentation Service, RTCM Paper 080-2017-SC104-1034 (2017)

小淵保幸\*  
望月恭介\*\*  
高山拓也\*\*

# 準天頂衛星2～4号機

Quasi-zenith Satellite 2-4

Yasuyuki Obuchi, Kyosuke Mochizuki, Takuya Takayama

## 要旨

日本独自の衛星測位システムとして計画されている“みちびき”は、2010年打ち上げの初号機、2017年打ち上げの2～4号機の計4機が軌道上で試験サービス中である。このシステムは、日本天頂付近の高仰角から信号を送出できる準天頂軌道衛星3機と、東経127度の静止軌道から信号を送出できる静止軌道衛星1機からなり、山間部や都心部の高層ビル街など、複雑な日本の地形でも広範囲にわたって測位サービスを終日提供することができる。2～4号機の開発は、初号機同様に衛星バスとして三菱電機標準衛星バス“DS2000”をプラットフォームとして進めた。DS2000は、バス技術として確立後も、軌道上実績を積み重ねながら継続的に機能・性能向上を図ってきており、初号

機に比べてバス機能・品質の向上を果たしている。さらに今回は、精度の高い各工期の緻密な組合せによって、約2か月差で並走する3機連続の製造・試験・射場作業・初期運用を実現した。また測位ミッションに関しては、パッチ方式のL帯アンテナや、センチメータ級測位補強信号を生成する測位ペイロードサブシステム2の開発を担当、性能確認を経て完遂した。この測位ミッションの軌道上実績の蓄積は、今後のみちびき7機体制を含む、衛星測位サービスに関する技術確立の第一歩であり、現在詳細設計を進めている初号機後継機へもこれらの開発品が搭載される計画である。当社は今回の準天頂衛星3機連続開発の成功を糧とし、更なる衛星の高品質化を目指していく。



準天頂衛星4機の軌道上イメージ(CG画像)

準天頂軌道衛星3機(初号機、2号機、4号機)、静止軌道衛星1機(3号機)からなる準天頂衛星システム(みちびき)は、4機体制となることで24時間安定した高精度な測位サービスを提供することが可能となった。左端が初号機、左から3番目が3号機、それ以外の同仕様の2機が2号機及び4号機の三次元CGモデルである。

## 1. まえがき

準天頂衛星システム(みちびき)は、日本独自の衛星測位システムとして計画され、2018年度に衛星4機体制となることを目指し、2010年9月に初号機、2017年6月に2号機、同年8月に3号機、同年10月に4号機を打ち上げ、現在4機での試験サービス中である。

準天頂衛星2～4号機は、当社標準衛星バスDS2000<sup>(1)(2)</sup>をベースに開発された初号機の技術を利用して開発された。また、初号機の2020年度の運用終了を控え、初号機後継機の開発を進めている。この開発では、2～4号機の実績を十分に生かし、更に信頼性を上げたDS2000バスをベースにしている。

本稿では、当社が推進した、これら準天頂衛星システムの開発について2017年に打ち上げられた2号機から4号機を中心に述べる。

## 2. 準天頂衛星システム

準天頂衛星システムは準天頂軌道衛星3機(初号機、2号機、4号機)と静止軌道衛星1機(3号機)から構成される。準天頂軌道衛星は、それぞれ異なる軌道面に配置し、いずれか1機が日本上空に滞在するようにすることで、高層ビルの多い都市部でも安定して信号が受信でき、測位可能な状況を広げる効果がある。準天頂軌道とは、地球の自転軸に対して傾いた梢円(だえん)の軌道を、地球の自転と同じ周期で巡ることで日本上空に長くとどまることが可能な軌道である。図1に準天頂軌道イメージを、図2に準天頂衛星の軌道上配置イメージを示す。また、2～4号機の衛星システム構成を図3に示す。衛星バスシステムとしてはDS2000を採用、3機共通の搭載ペイロードとして測位ペイロード1(生成信号:L1-C/A, L1C, L2C, L5, L1S, L1Sb(3号機だけ), L5S)、測位ペイロード2(生成信号:L6)から構成される。

### 2.1 準天頂衛星初号機

初号機は、高精度測位実験機器を搭載した、日本付近

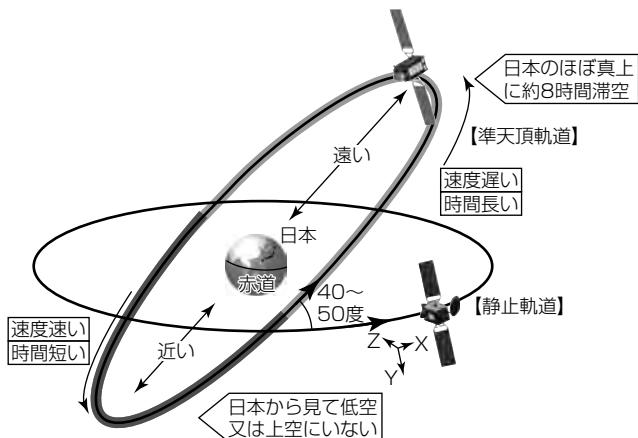


図1. 準天頂軌道イメージ

で高仰角からの測位信号のサービスが可能な準天頂軌道を周回する衛星で、2010年9月11日に打ち上げられ、試験サービス運用を継続している。搭載ペイロードとしては測位ペイロード(生成信号:L1-C/A, L1C, L2C, L5, L1-SAIF, LEX)、技術データ取得装置(TEDA)、準天頂衛星モニタカメラ(CAM)から構成される。

### 2.2 準天頂衛星2・4号機<sup>(3)</sup>

2・4号機(図4)は、全く同じ仕様で設計・製造し、2017年6月1日に2号機が、同年10月10日に4号機が打ち上げられた。いずれも打ち上げ後の軌道上性能確認を終え、現在試験サービス中である。

2・4号機の衛星システム構成は、初号機とほぼ同じであるが、新規となる測位ペイロード2は、測位信号の追加及び今後の測位信号拡張を前提とし、当社が開発を担当したサブシステムである。また、初号機のTEDAと同様の利用を目的とした、宇宙環境データ取得装置(SEDA)が搭載されている。

### 2.3 準天頂衛星3号機<sup>(3)</sup>

3号機(図5)は、2017年8月19日に東経127度の静止軌道上に打ち上げられた。

3号機の衛星システム構成は、2号機及び4号機と比較してメッセージ通信ペイロードが追加になっており、メッセージ通信用の展開型のS帯アンテナ(直径約3.2m)及び非展開型のKu帯アンテナ(直径約0.7m)がそれぞれ衛星の東面及び西面に搭載されているほか、測位ペイロード1の測

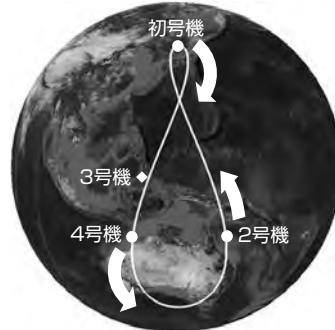


図2. 準天頂衛星の軌道上配置イメージ

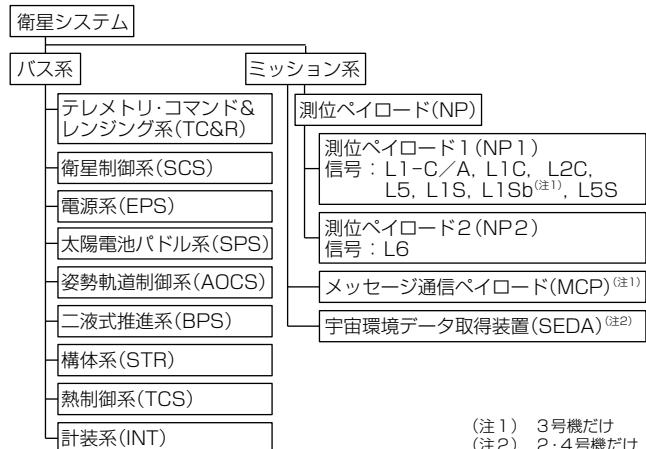


図3. 衛星システム構成

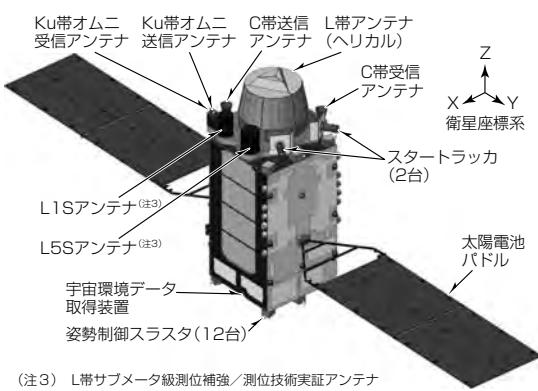


図4. 準天頂衛星2・4号機

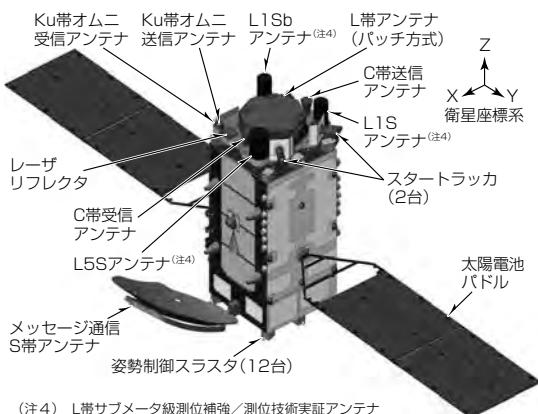


図5. 準天頂衛星3号機

位信号としてL1Sb信号が追加されている。なお、SEDAは搭載されていない。

また、地球指向面搭載のL帯アンテナがほかの準天頂衛星搭載のヘリカル方式と異なり、当社による新規開発となるパッチ方式アンテナを採用している。パッチ方式はヘリカル方式と比較して、薄型化かつ利得・耐電力性能向上を実現しており、地球指向面の機器搭載性が向上している。

### 3. 衛星システムの開発

#### 3.1 衛星システムの製造

準天頂衛星2～4号機は、約2か月差で並走する3機連続の製造・試験・射場作業を実現した。それぞれシステムインテグレーション完了後、2号機は2016年7月、3号機は2016年9月、4号機は2016年11月に衛星システム試験を開始し、9か月ほどで一連の試験を完了、打ち上げ射場での約50日間の打ち上げ準備作業(推薦充填や打ち上げ前試験等)を経て、2か月間隔で軌道上へ打ち上げられた。

2～4号機は、当社衛星標準バスDS2000のこれまでの製造ヘリテージを十分に活用することで、初号機からも表1に示すとおりのバスシステムとしての進化を遂げている。太陽電池パドルは発電高効率化によってパネル枚数を3枚から2枚へダウンサイジングしているほか、衛星バスを構成する各コンポーネントの統合及びコンパクト化等によって、バス質量を250kg以上低減化しており、衛星寿命を15年以上に延ばすことにも可能にした。そのほか、測位サービス

表1. 準天頂衛星2～4号機の初号機との比較

項目	初号機	2号機・3号機(静止)・4号機
発生電力EOL	5.3kW(3枚構成2翼)	6.3 kW(2枚構成2翼)
消費電力	ペイロード1.9kW	ペイロード2・4号機: 1.9kW 3号機: 2.5kW
質量 (ペイロード/バス)	355kg/1,445kg	2・4号機: 370kg/1,180kg 3号機: 475kg/1,210kg
打ち上げ質量/設計寿命	4,000kg/10年以上 (12年目標)	2・4号機: 4,000kg/15年以上 (H-IIA202ロケット) 3号機: 4,700kg/15年以上 (H-IIA204ロケット)
測位信号	L1-C/A, L1C, L2C, L5, L1-SAIF, LEX	L1-C/A, L1C, L2C, L5, L1S, L5S, L6 (3号機はL1Sb及びメッセージ通信S帯信号追加)

EOL : End Of Life

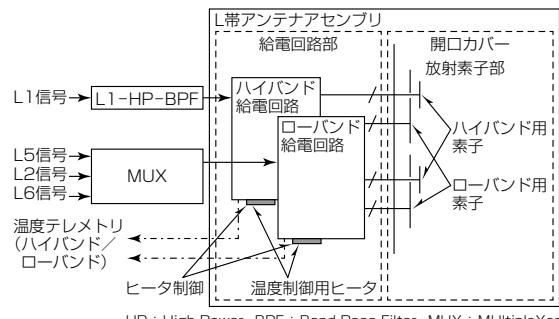


図6. パッチ方式L帯アンテナの構成

精度にかかる極めて重要な要素の1つに、衛星の質量中心位置決定精度が挙げられるが、今回の2～4号機では、これまでのDS2000製造で培った質量特性値シミュレーション技法を用いて、高精度な質量中心位置管理がなされた。この技法の確からしさについては衛星システム試験で実証され、測位精度に貢献することになった。製造ヘリテージの活用は、システム性能の向上だけでなく、同時にシステムの高品質化と工程精度向上・リスク低減化にも大きく寄与している。

また、搭載ペイロードのうち、次節以降に示すパッチ方式のL帯アンテナ(3号機搭載)及び測位ペイロード2サブシステム(3機共通)の中核であるペイロードサービスユニット(Payload Service Unit : PSU)の開発を当社が担当した。打ち上げ後の軌道上試験で、バス性能を始め、これらの開発機器を含む測位ペイロードの機能及び測位サービスの性能も確認され、測位衛星としての軌道上実証がなされた。

#### 3.2 パッチ方式L帯アンテナ<sup>(4)</sup>

パッチ方式L帯アンテナの構成を図6に示す。このアンテナは、ハイバンド用(L1信号用)とローバンド用(L5, L2, L6信号用)との2種類の給電回路からなる給電回路部と、ハイバンドとローバンドとの2周波共用パッチアンテナ20素子からなる放射素子部で構成される。

ハイバンド用とローバンド用の2種類の給電回路に分離することによって、給電回路への入力電力の一極集中を回避し、大電力に対する耐性を向上させている。この耐電力性能については、このアンテナに接続する増幅器の出力変動等を考慮し、要求の入力電力より約2.3dB増の電力印加でも放電しないことを実機試験で確認している。

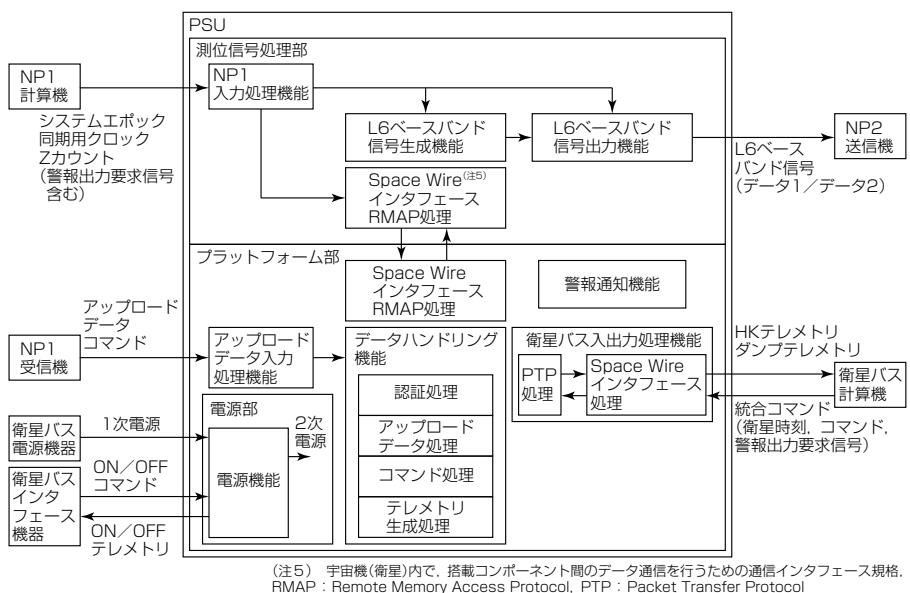


図7. PSUの機能ブロック図

また、2種類の給電回路を重ねた上にパッチアンテナ方式の放射素子部を搭載することで、低姿勢化を実現した。

アンテナ高さについては、海外GNSS(Global Navigation Satellite System)衛星搭載の測位アンテナ(ヘリカル方式)と比較すると、給電回路を含めても既存アンテナ部分の約半分である。低姿勢化を特長とするこのL帯アンテナは、ロケットへの搭載性、搭載品の視野確保、質量軽減の観点からも有効な技術として貢献できる。

なお、このアンテナは静止軌道に投入される準天頂衛星3号機用として開発したが、準天頂軌道用のL帯アンテナとして、衛星軌道の違いによって要求マスクパターンが変化してもこの設計のまま適用可能である。この節で述べた有用性と、今回の軌道上での性能実証を踏まえ、現在、当社で設計中である初号機後継機(準天頂軌道に投入)には、このアンテナが採用されている。

### 3.3 ペイロードサービスユニット<sup>(5)</sup>

ペイロードサービスユニット(PSU)は、測位ペイロード2サブシステムの構成コンポーネントの1つで、地上システムからのアップロードデータを基に、センチメータ級測位補強信号(L6ベースバンド信号)を生成・配信する機器である。持続測位可能な7機体制へ向けた信号配信システム技術の確立を目的として、PSUの開発を行った。

PSUの機能ブロック図を図7に示す。PSUの主な動作は、地上システムからNP1受信機を経由してアップロードデータを受信し、アップロードデータから測位メッセージを抽出する。次に、測位メッセージにPRN(Pseudo Random Number)コードを用いたCSK(Code Shift Keying)変調を施し、L6ベースバンド信号を生成する。そして、このL6ベースバンド信号を、アップロードデータに指定された時刻に、NP2送信機へ送信する。また、衛星バスとテレメトリ／コマンドのデータインタフェースを行い、PSU内部の

テレメトリ情報を取り集め、HK(House Keeping)テレメトリを生成・送信する。準天頂衛星システムでは、直接サービスをユーザーへ提供するという利用形態から、高い抗たん性と可用性が求められており、これらを実現するための様々な機能具備がPSUの大きな特徴の1つとなっている。また、PSUは、当社の標準衛星バスDS2000バスアーキテクチャの衛星制御器をベースにしており、基本設計の流用による設計・製品品質の向上、及びバス機器との使用部品共通化による部品コスト削減を図っている。

この節で示した性能が軌道上でも実証され、この機器も初号機後継機に引き続き搭載する計画で開発を進めている。

## 4 す す ひ

2017年に打ち上げられた準天頂衛星2～4号機の開発について述べた。打ち上げ後、2～4号機は軌道上での性能確認を経て、2018年度の4機体制サービスインを目指し、試験サービス実施中である。現在、当社鎌倉製作所では、2020年度に衛星寿命を迎える初号機の後継機を設計・開発中である。この初号機後継機の衛星システムの設計には、これまでの準天頂衛星4機の開発で培った測位衛星開発のヘリテージを最大限活用し、更なる高品質化を図っており、2020年度の打ち上げを目指し、システムの基本設計を完了して詳細設計フェーズに移行している。引き続き、安定した高品質の衛星システムの供給及び測位精度の向上を目標に、開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 永島敬一郎, ほか: 国際競争に比肩する衛星インテグレーション技術—グローバル衛星メーカーを目指して—, 三菱電機技報, 78, No.10, 683~688 (2004)
  - (2) 関根功治, ほか: 静止衛星標準バス“DS2000”的開発と今後の指針, 三菱電機技報, 90, No.2, 115~118 (2016)
  - (3) 小淵保幸, ほか: 準天頂衛星システムの衛星開発, 第58回宇宙科学技術連合講演会講演集2C17 (2014)
  - (4) 望月恭介, ほか: 準天頂衛星搭載用L帯アンテナプロトフライト試験結果, 第60回宇宙科学技術連合講演会講演集3K14 (2016)
  - (5) 高山拓也, ほか: 準天頂衛星搭載用ペイロードサービスユニットの開発, 第60回宇宙科学技術連合講演会講演集3K15 (2016)

# 準天頂衛星4機同時並行運用を実現した地上システム —24時間衛星測位サービス提供に向けて—

峰田信之\* 梅壽政徳\*  
田中 剛\* 木村剛久\*  
森田直樹\*

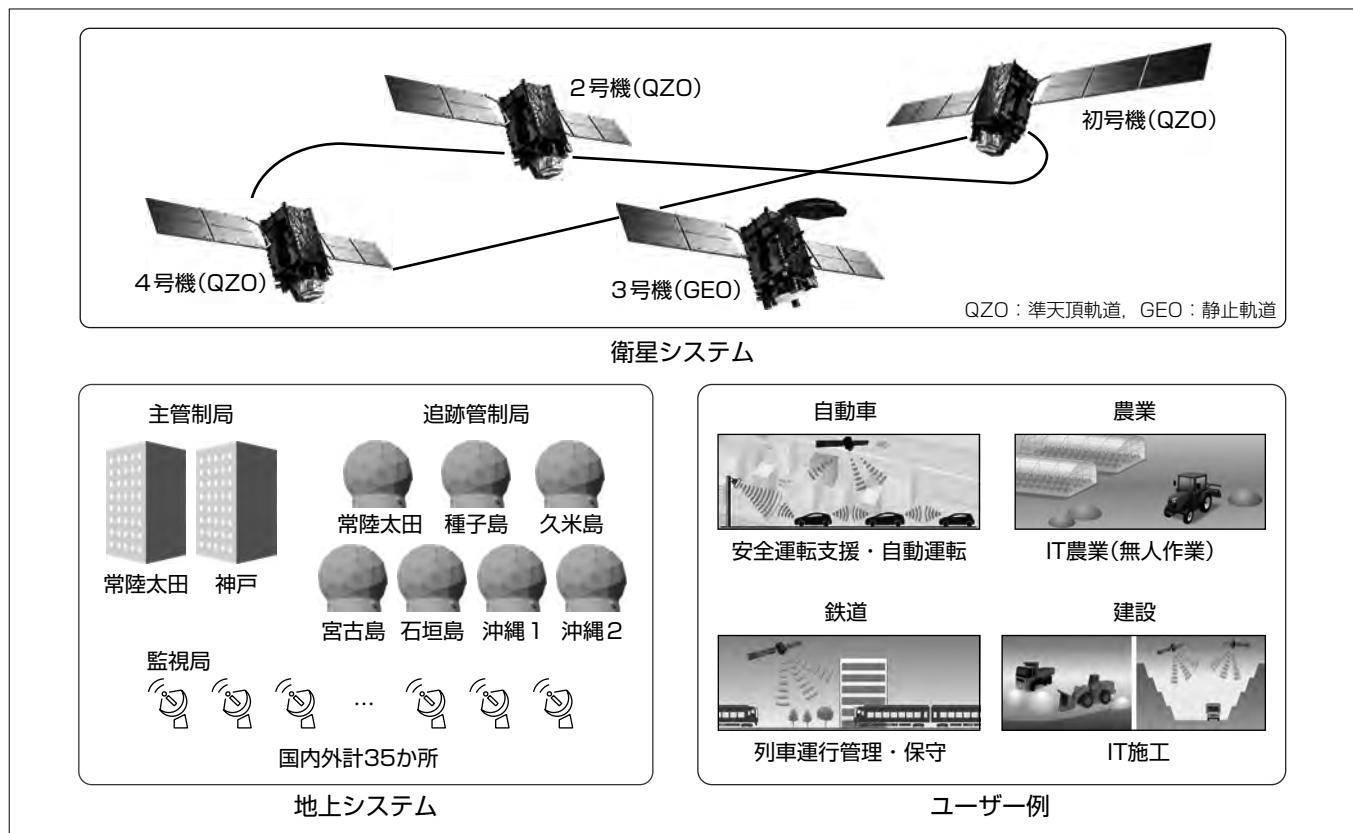
*Ground System with Concurrent Operation of 4 Quasi-Zenith Satellites—To Provide 24-hour Satellite Positioning Service—*  
Nobuyuki Mineta, Tsuyoshi Tanaka, Naoki Morita, Masanori Baiju, Takehisa Kimura

## 要旨

準天頂衛星システムは、準天頂衛星(Quasi-Zenith Satellite: QZS)4機(準天頂軌道衛星3機、静止軌道衛星1機)を日本上空に配置することによって衛星測位サービス(日本版GPS(Global Positioning System))、サブメータ級測位補強サービス、センチメータ級測位補強サービス等の24時間衛星測位サービスを提供するシステムであり、日本での測位精度向上に加えて、これらサービスを利用し

た様々な事業への展開も期待されている。また、準天頂衛星システムは2023年度を目指して、7機構成での運用を計画している。

三菱電機は、この準天頂衛星システムでの地上システムのうち、全衛星の衛星管制システムや、全サービスの状態監視システム、センチメータ級測位補強サービス等を行うためのシステム開発を担当した。



## 様々な分野への利用が期待される準天頂衛星システム

準天頂衛星システムは、衛星4機からなる衛星システムと、主管制局、追跡管制局、監視局からなる地上システムで構成され、そのサービスは自動車分野、農業分野、鉄道分野、建設分野など、多様な分野での利用が期待される。

## 1. まえがき

本稿では、準天頂衛星システムの地上システムのうち、当社が担当した、衛星管制の中核を担う衛星管制システム、サービス監視の中核を担うサービス監視システム、及び衛星を24時間追跡し続ける追跡管制局のアンテナシステムの技術的なポイントを述べた後、今回の大規模プロジェクトの推進に当たって重点的に取り組んだ事項について述べる。

## 2. 準天頂衛星システムの構成

準天頂衛星システム構成の概念図を図1に示す。

準天頂衛星システムは、準天頂軌道衛星3機と静止軌道衛星1機の計4衛星を同時に追跡管制して、次に示すサービスを提供するシステムである。

- (1) 衛星測位サービス
- (2) サブメータ級測位補強サービス
- (3) センチメータ級測位補強サービス
- (4) 測位技術実証サービス
- (5) 災害・危機管理通報サービス
- (6) 衛星安否確認サービス
- (7) 公共専用サービス
- (8) SBAS(Satellite-Based Augmentation System)配信サービス
- (9) データ提供サービス

また、4機の衛星を同時並行で管制するために、衛星の追尾・通信を行うための追跡管制局は、日本南方を主体に、全7局の構成となっている。追跡管制局が南方を主体に配置されている理由は、準天頂軌道衛星が24時間常時可視となる位置的な利点があるためである。

## 3. 準天頂衛星システムの設計

### 3.1 衛星4機同時管制

準天頂衛星システムの特徴として、日本とその近傍に、測位系や災害対応系の24時間サービスを提供するために、準天頂軌道衛星3機のうち1機を常に高仰角に配置し、静止軌道衛星1機を組み合わせることで測位信号の常時放送サービスを実現している。図2に衛星配置・軌道の概念図を示す。

地上システムでは、この4機の衛星を常時かつ同時に運用していく必要がある。この“4機同時並行運用”を実現するシステムとして、当社は自社製の衛星管制システムと

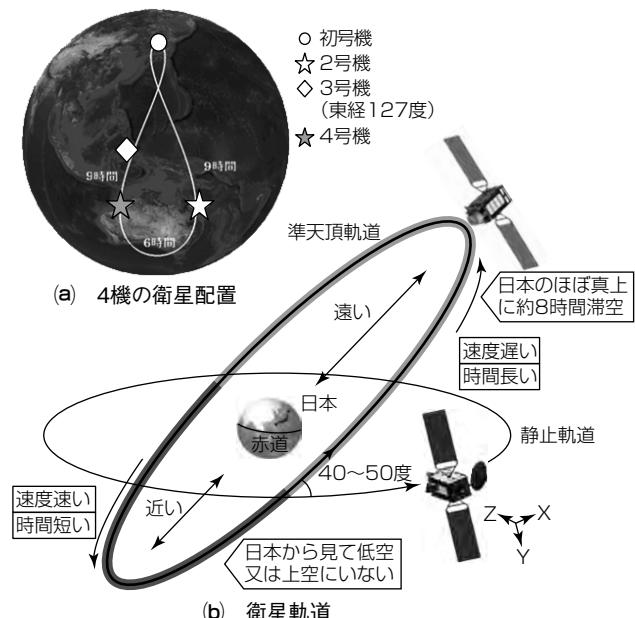


図2. 衛星配置・軌道の概念図

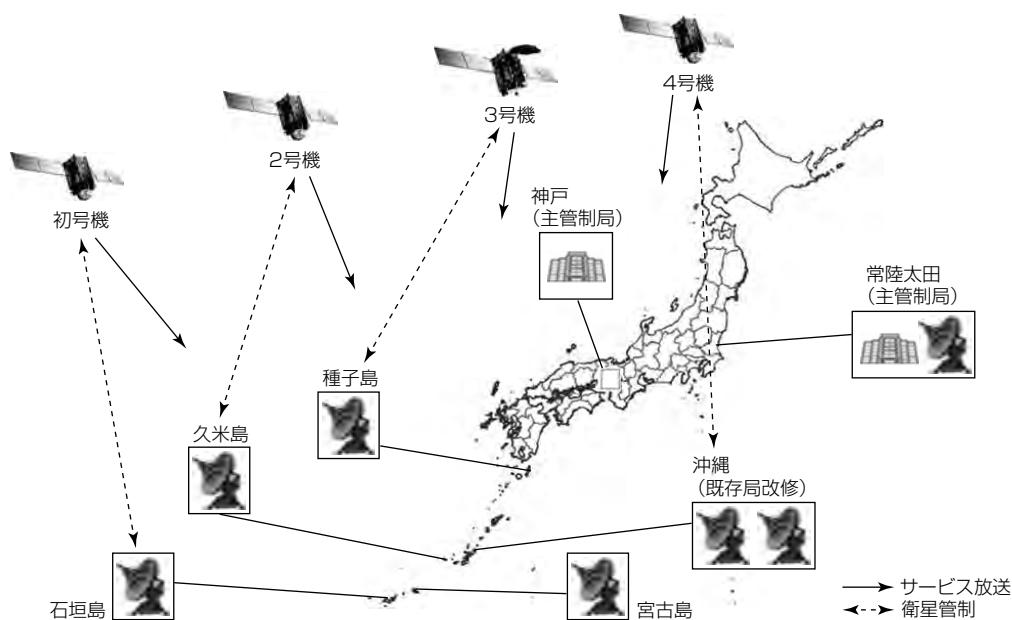


図1. 準天頂衛星システム構成の概念図

して、気象衛星ひまわりや商用衛星の管制で実績のあるBirdstar<sup>(注1)</sup>を適用した。

Birdstarは、衛星管制用画面構築のフレキシブル性を持っており、運用者が日々の運用に最適な画面構成を実現できる。また、運用のための操作端末は、複数衛星の同時運用を前提としており、今回の準天頂衛星システムのような4機同時並行運用に適したシステムとなっている。図3にBirdstarによる衛星管制用の画面例を示す。

また、今回の準天頂衛星システムの特徴として、“24時間365日のサービス提供が必要”という命題があり、サービスを提供するためのシステム、衛星を管制するためのシステムを具備している“主管制局”は、同時に被災を避けるため、東日本(常陸太田)と、西日本(神戸)に分散配置されたサイトダイバーシティ構成になっており、かつそれぞれの主管制局の中でも系を冗長構成としている(合計4系の4重冗長構成)。

しかし、衛星を制御するための制御コマンドは、各々の系がそれぞれ送信してしまうと、コマンドの制御順が崩れてしまい、衛星運用事故の原因となるため、衛星に対する制御コマンドは常にただ1つの系でだけ送信可能とする必要がある。この点について、Birdstarでは、“制御権”という概念を適用し、システム上も複数の系が同時にコマンド送信できないように排他制御し、その制御権を取得している系情報を運用者が一目で認識できる工夫を取り入れている(図4)。

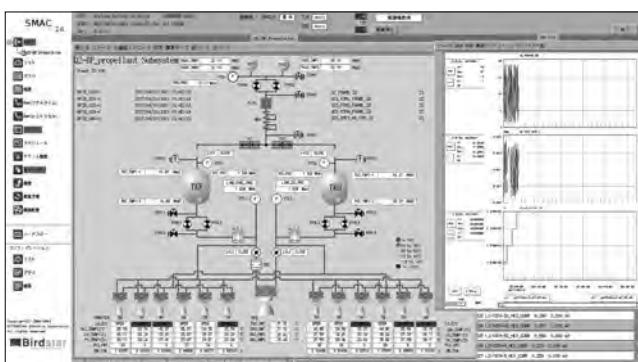


図3. Birdstarによる衛星管制用の画面例



図4. 制御権を取得している系であることを明示

(注1) 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。ORAMSでの軌道運用計画を基にSOPSで計画立案を行い、SMAC、GMACが計画に従って制御コマンドを実行する。

### 3.2 サービス運用常時監視

準天頂衛星システムは、測位系サービス、災害対応系サービスを含め合計9つのサービスを同時並行で常時提供し続けるシステムである。どのサービスも常時提供が命題であり、よって運用者は全サービスを常時並行監視し、万一の障害発生時にはサービス中断時間を最少にするよう努めなくてはならない。この要求を実現するシステムとして、当社は、“サービスの提供状態”とそれを実現している“各システムの動作状態”“4機の衛星の状態”等を統括的に一元監視するシステムを開発し、“総合システム監視”として適用した。図5は総合システム監視のサマリー画面例である。

運用者は、総合システム監視画面と音の鳴動でサービスや衛星の異常を即時に認識し、画面に示された障害情報から、該当障害発生時に取るべき処置をすみやかに行う仕組みが構築されており、総合システム監視システムは、障害発生時のサービス中断を最小限にするための運用者への橋渡しを行う重要なシステムとなっている。

### 3.3 準天頂軌道衛星の軌道決定

準天頂衛星システムでは、4衛星同時並行運用が前提であり、常に4機の衛星の追尾を継続する必要がある。衛星追尾のためには、それぞれの衛星軌道状態を特定(軌道決定)し、全ての追跡管制局に対して、アンテナを常時衛星指向させるためのアンテナ予報値を生成しなくてはならない。

当社は、システムの中核となるこの要求を、いずれもBirdstarで実現している。衛星の軌道決定には、衛星と追跡管制局間の距離計測(レンジング)や距離変化率(レンジレート)の計測結果を用いることで1局だけの計測結果でアンテナ予報値に必要となる精度を得ている。また、準天頂衛星システムの特徴として、測位サービスを提供しているという点がある。測位サービスはGPSに見られるように、ユーザーが自身の位置を正確に把握するためのサービ

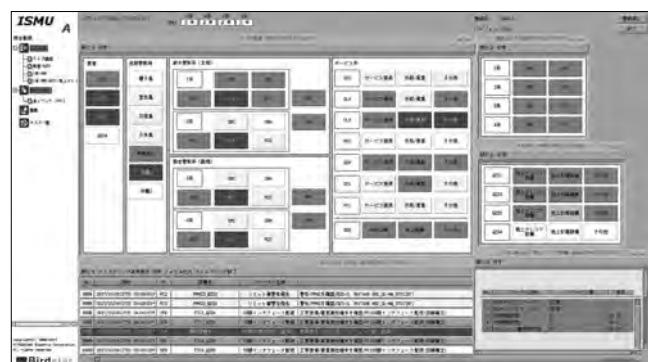


図5. 総合システム監視のサマリー画面例



図6. 追跡管制局から見た衛星のみかけ上の軌道位置



図7. 準天頂衛星システム用3軸駆動アンテナ

スであるが、これはとりもなおさず“衛星の正確な位置が把握できている”ということになる。測位サービスから得られる“高精度の衛星位置情報”を最大限活用して、アンテナ予報値の源泉として使用できるようにBirdstarに機能追加することで、より安定的な衛星追尾運用を可能にしている。

### 3.4 3軸駆動アンテナ

追跡管制局のアンテナは、その構造上アンテナを駆動させるためのケーブルは巻取り構造になっており、ケーブル長の限界を超えてアンテナは回転できない。周回衛星を追尾するためのアンテナでは通常、地上局から見た衛星の軌道から、最適なアンテナの駆動経路を算出し、衛星が可視となる前に、最適位置(衛星可視中に巻取りケーブルの巻取り限界が来ないような追跡開始位置)にアンテナを駆動させ、また衛星が非可視となった後に巻取りケーブルを巻き戻す処理を入れることで運用できる仕組みとなっている。しかし、今回の準天頂衛星システムの特徴として、図6に示すように追跡管制局から見た衛星のみかけ上の軌道位置は“8の字”を描くようになるとともに、24時間常時可視のため、周回衛星用アンテナのように“可視前に最適位置にアンテナを駆動”させたり、“非可視となった後に巻取りケーブルを巻き戻す処理”を行うことができない。

この課題を解決するために当社は、JAXA(国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構)等で運用実績のある3軸駆

動アンテナ<sup>(注2)</sup>を採用し、かつ特殊な8の字構造の軌道を描く準天頂衛星に適用できる専用の3軸制御アルゴリズムを開発し、ケーブルの巻き戻しの不要な24時間常時追尾可能アンテナを実現した(図7)。

(注2) 方位方向の軸(“アジマス軸”という。), 仰角方向の軸(“エレベーション軸”という。)に加えて、衛星が天頂付近を通過する際に、衛星追尾を継続させるための3つ目の軸(“クロスエレベーション軸”という。)の合計3つの軸構造を持ったアンテナである。

## 4. む す び

準天頂衛星システムは、2018年度からのサービス開始に向け、初号機の運用移管、2号機から4号機の打ち上げ・運用開始と推移しており、サービス開始に向けて準備が進められている。当社が担当しているサービスを滞りなく開始させる努力をするとともに、衛星管制システムやサービス監視システムは運用者の声をできるだけ反映して運用者がより使いやすいシステムになるように改善を重ねていき、ユーザーに安定的にサービスが提供できる状態を継続するための努力を続ける。

また、準天頂衛星システムを利用した事業分野へのサービス拡大や、将来的にはアジア・太平洋地域にサービス範囲が拡大されて地域の安全・安心に貢献していくことを切望する。

# 準天頂衛星対応高精度測位端末“AQLOC”

萩藤裕一\*

High-precision Positioning Receiver "AQLOC" for Quasi-zenith Satellite

Yuichi Hagito

## 要　旨

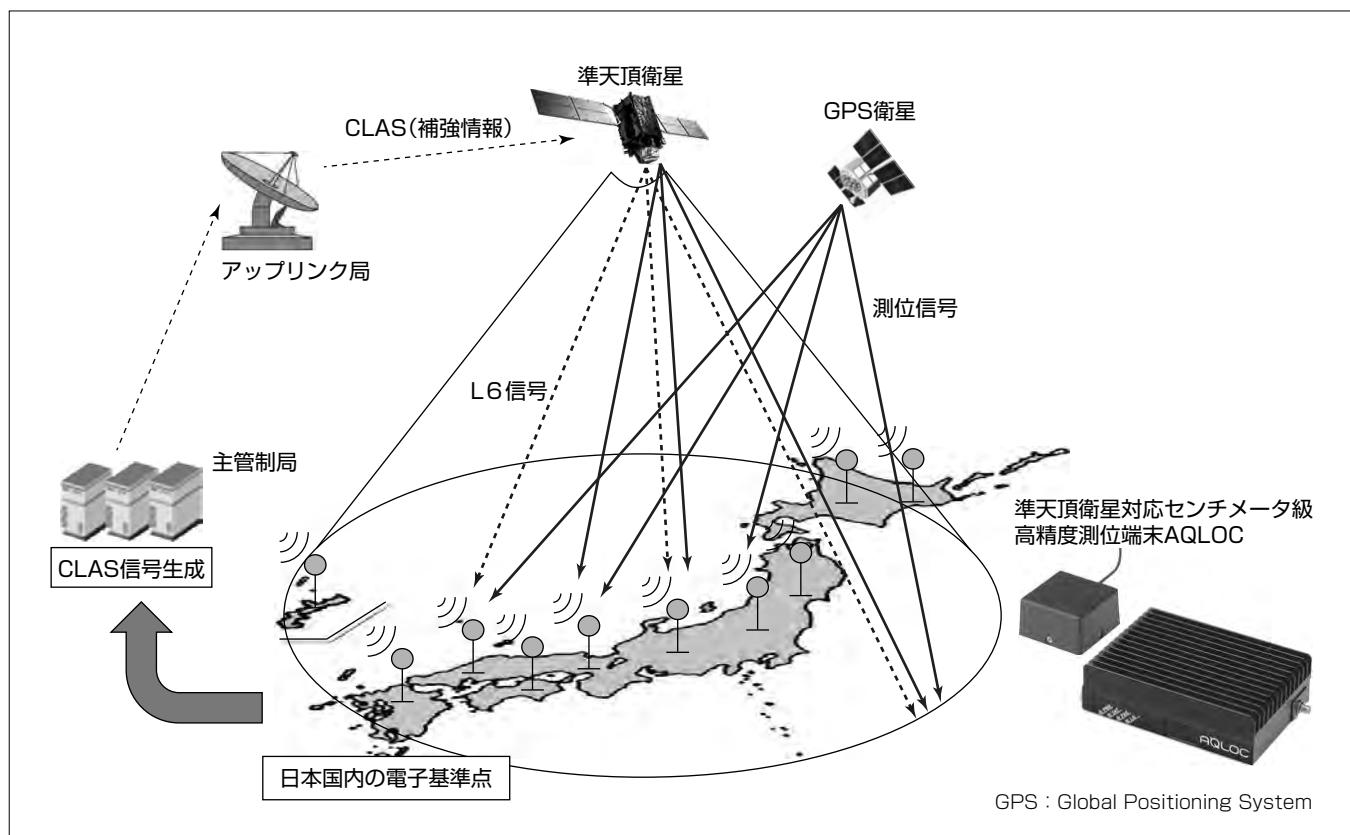
準天頂衛星システム(QZSS)の2018年のサービス開始に向けて、特に準天頂衛星のセンチメータ級測位補強サービス(Centimeter Level Augmentation Service : CLAS)に対応した、センチメータ級高精度測位端末“AQLOC”を開発した。

CLASは、日本全国約300点の電子基準点で受信した各測位衛星からの測位信号を用いて、各種測距誤差を推定し、センチメータ級の補強情報を生成する。生成した補強情報を情報圧縮技術によって1/1,000にデータ圧縮することで、準天頂衛星の衛星回線(L6信号)で日本全国で利用可能な補強情報の配信サービスを可能にしている<sup>(1)</sup>。

従来、三菱電機は準天頂衛星システムのCLASの効果検

証及びアプリケーションの開拓・開発に用いるための実証実験用端末を販売してきた。この実証実験用端末では、アンテナや測位信号を受信する測位受信機は海外メーカーからの購入品を使用していたが、今回開発したAQLOCではアンテナ及び測位端末全体を国産化・内製化し、小型化を実現した。

これまでCLASのアプリケーション創出のための取組みとして、GNSS(Global Navigation Satellite System)測量、IT農業、IT施工、自動車の自動運転・安全運転支援等の実証実験を行ってきた<sup>(2)</sup>。より小型化したAQLOCを用いて実証実験段階から実用化に向けた取組みを展開とともに、海外展開も含めた市場拡大を推進する。



## CLAS及び高精度測位端末“AQLOC”

CLASは日本全国約300点の電子基準点で受信した各測位衛星からの測位信号を用いて、各種測距誤差成分(軌道、時計、信号バイアス、電離層遅延、対流圏遅延)を推定してセンチメータ級の補強情報を生成し、データ圧縮後衛星経由で配信する(L6信号)。高精度測位端末AQLOCは各衛星の測位信号に対してL6信号を用いた補正を行うセンチメータ級の高精度測位を実現する。

## 1. まえがき

2018年度から準天頂衛星システム(QZSS)の実用サービスが開始される。準天頂衛星システムのサービスの特長としては、米国のGPSと互換性を持つ測位信号を送信し、測位に使用できる衛星数を増やす効果のある衛星測位サービスと、測位の性能向上のための補強情報を配信する測位補強サービスがある。測位補強サービスとして、当社が開発するCLASを用いたアプリケーションの実用化及び高精度測位市場の拡大を狙い、CLASに対応したセンチメータ級の高精度測位端末AQLOCを開発した。

AQLOCシリーズは2005年にサブメータ級測位端末として開発し、インフラの発展に対応してセンチメータ級に発展させたものであり、本稿では、この開発の内容について述べる。

## 2. 高精度測位端末AQLOC

### 2.1 サブメータ級測位端末

AQLOCは、“Accuracy Location”から命名した測位端末の製品名であり、2005年に移動体向けサブメータ級測位端末として販売開始した。インターネット経由又は私設電子基準点から無線LAN等で補強情報を受信し、サブメータ級(約1mの精度)を実現する独自の1周波DGPS(Differential GPS)アルゴリズムを搭載している。また、車速パルス及びIMU(Inertial Measurement Unit)を組み合わせたDGPS-INS(Inertial Navigation System)複合測位アルゴリズムを開発し、衛星からの信号が受信できない領域での自律測位に対応した。これによって空港内の車両位置管理システムなどの衛星測位環境のよいところだけではなく、工場敷地内などの衛星が捕捉しづらい部分があるようなところでも活用されている。

図1にサブメータ級測位端末の構成を示す。1周波アンテナ及び1周波測位受信機は市販品を採用している。

### 2.2 準天頂衛星向け実証実験用端末

準天頂衛星初号機が2010年に打ち上げられ、準天頂衛星を用いたセンチメータ級の高精度測位の実証検証が様々な分野で行われるようになり、実用化に向けた検討が立ち上がってきた。センチメータ級の高精度測位利用促進及び市場拡大のため、センチメータ級の高精度測位に対応した端末の需要が高まり、サブメータ級測位端末であったAQLOCをセンチメータ級の高精度測位端末へと発展させた実証実験用端末を開発した。図2に実証実験用端末の外観及び構成を示す。

準天頂衛星からのセンチメータ級測位補強信号(L6信号)を受信するためのL6受信機を開発し、センチメータ級の高精度測位で用いる多周波の測位信号の受信については、海外メーカーの市販4周波アンテナ及び2周波測位受信機

を採用し、当社独自のセンチメータ級測位アルゴリズムを搭載することで、L6信号を用いたセンチメータ級の高精度測位を実現した。センチメータ級測位アルゴリズムは、

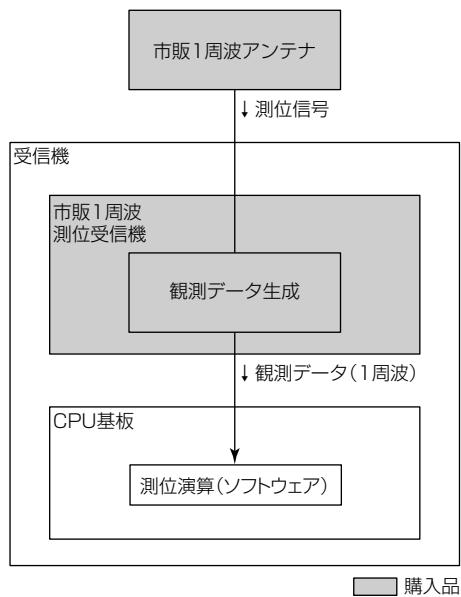
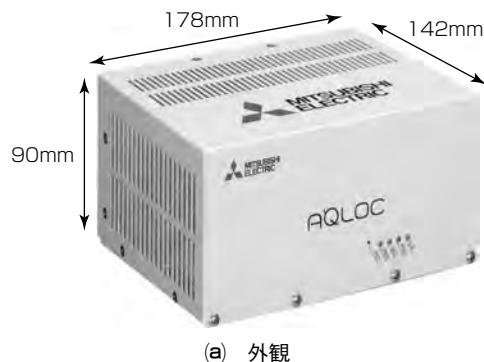


図1. サブメータ級測位端末の構成



(a) 外観

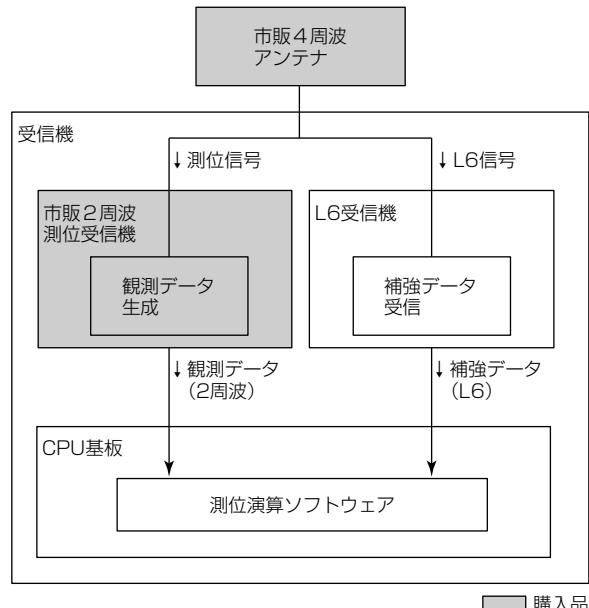


図2. 実証実験用端末

衛星測位(PPP(Precise Point Positioning) - RTK(Real Time Kinematic))と、INS複合(PPP-RTK-INS複合)があり、これらは従来道路測量と高精度地図作成に用いられているMMS(Mobile Mapping System)の後処理ソフトウェアに採用してきたアルゴリズムを発展させ、リアルタイム化したものである。

### 2.3 センチメータ級高精度測位端末

実証実験用端末はあくまで技術実証やアプリケーション検討のための実験用の端末であり、実用化を想定するにはより小型軽量で安価な端末が必要となる。

表1. 受信対象信号

対象システム：信号名称	周波数(MHz)	備考
GPS/QZS:L5, Galileo:E5	1176.45	測位信号
GPS/QZS:L2	1227.60	測位信号
QZS:L6	1278.50	L6信号
GPS/QZS:L1, Galileo:E1	1575.42	測位信号

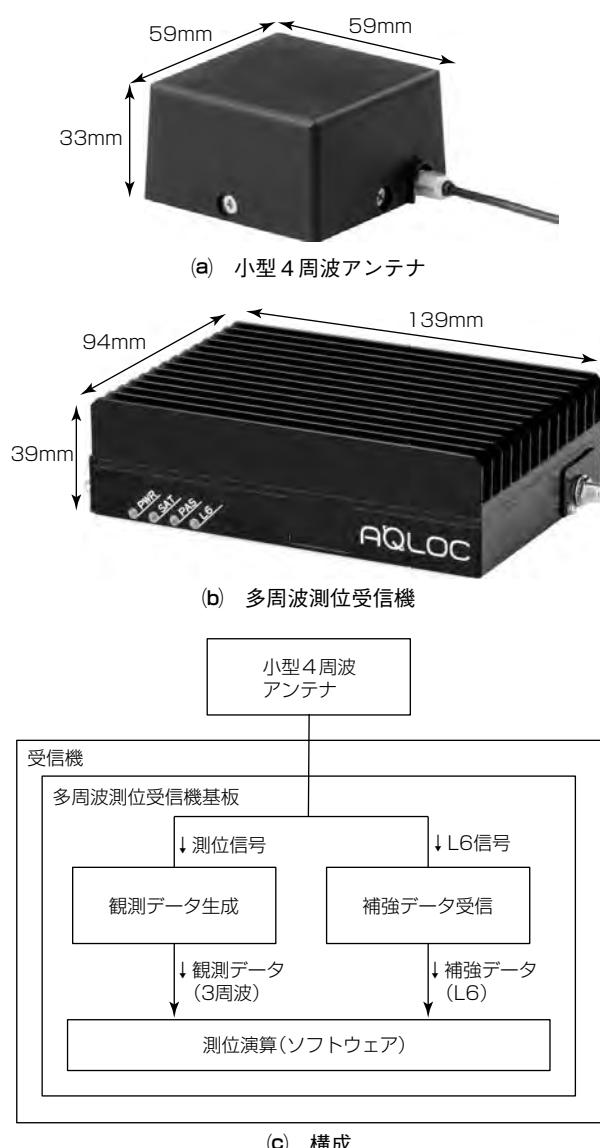


図3. センチメータ級高精度測位端末

### 2.3.1 小型4周波アンテナ

主に測量分野で用いられているセンチメータ級の高精度測位に対応した多周波アンテナは直径20cm程度のものが一般的に使用されているが、高精度測位を様々な分野で用いられるようになると、様々な機器への取付け可能なサイズであることが求められるため、適用可能な機器・システム・アプリケーションの拡大を狙い、小型4周波アンテナの開発を実施した。受信対象とするシステム信号名称及び周波数を表1に示す。

アンテナはより小型であることに加え、干渉対策が必要となる。具体的には、L1の近傍となる1.5GHz帯に携帯電話LTE(Long Term Evolution)のBand21が割り当てられており、携帯電話基地局の近傍でL1が受信不能になるという事例が報告されている。そのため、このアンテナではLTEのBand21に対する耐性を考慮したフィルタ構成にしている。

小型4周波アンテナの外観を図3(a)に示す。市販海外メーカーアンテナに対して小型化・低価格化を実現した。

### 2.3.2 多周波測位受信機

実証実験用端末では、市販2周波測位受信機と開発したL6受信機の2枚構成となっていたが、小型化・低価格化を図るため、一体化したセンチメータ級高精度測位対応の多周波測位受信機を開発した。

多周波測位受信機の外観を図3(b)に、構成を図3(c)に示す。測位信号とL6信号を1枚のPCA(Printed Circuit Assembly)で受信・測位演算を行うことができ、衛星からの信号だけでセンチメータ級の高精度測位を実現している。

## 3. AQLOCの利活用

開発した高精度測位端末AQLOCを用いた実証実験、提案活動を展開している。CLASによるセンチメータ級高精度測位の効果を図4に示す。

測位補強がない場合の衛星測位結果は、数m~10m程度の誤差を持つのに対し、CLASによる測位補強があればセンチメータ級の高精度が得られる。この高精度な位置情報の活用先として移動体を中心に検討が進められており、それらの事例について述べる。

### 3.1 自動車分野

現在、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(cross-ministerial Strategic Innovation promotion Program : SIP)では、“自動走行システム”として、官民挙げた取組みが行われている。この自動走行の分野では、自動走行のためのレーン単位の高精度地図(ダイナミックマップ)の製作が進められており、地図の高精度化と、それに伴う車両位置情報の高精度化が注目されている。CLASの活用によって高精度な地図と自動車の高精度な位置情報が得られるようになり、自動走行の実現に貢献する

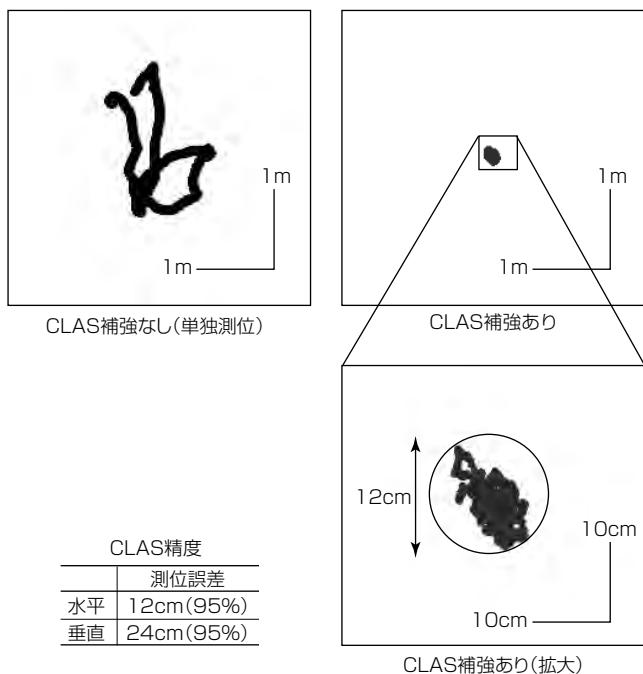


図4. センチメータ級高精度測位の効果

ことが期待される。自動走行の前段階としては、カーナビゲーションでの道路単位でのナビゲーションからレーン単位でのナビゲーションに高度化することが予想される。

高精度地図のデータ取得を行うMMSでは高精度測位技術が活用されている。これまでMMSでは後処理で高精度測位を実施していたが、準天頂衛星のCLAS活用によって計測しながら高精度な位置情報を取得することが可能になる。後処理を実施しなければ正しく計測が行われていたか判断できなかったものを、現場で確認することができるようになり、計測の効率化が期待されている。

### 3.2 IT農業とIT施工

高精度な位置情報の活用として、IT農業やIT施工では高精度測位技術が利用されている。これまで、私設電子基準点やインターネット経由での地上回線による補強情報

が用いられてきた。しかし、これらの利用にはインフラ設備やランニングコストが必要となることから、衛星からの信号だけで高精度測位が可能となるCLASに対する期待は大きく、今後の普及・発展が見込まれる。農機の自動走行や道路上の除雪システムでの活用など自動車の自動走行と同様な利用方法、でき形管理など高精度測位の活用シーンが増加していくものと考えられる。

### 3.3 測量

測量の分野ではGNSS測量として、衛星測位を用いた測量が行われている。後処理による解析や地上回線によって補強情報を取得した高精度測位が利用されており、CLASによって衛星からの信号だけで高精度測位が利用可能となることで利便性の向上と更なる普及が期待される。

## 4. むすび

2018年度から実用サービス開始となる準天頂衛星システムのセンチメータ級測位補強サービスに対応した高精度測位端末AQLOCを開発した。アンテナも小型化によって搭載性が向上し、高精度測位の活用シーンの拡大に貢献することが期待される。また、測位端末としては国内だけでなく海外でも幅広く活用可能であることが求められる。準天頂衛星システムのセンチメータ級測位補強信号と互換性のある海外のサービスプロバイダとの連携など高精度測位端末AQLOCを用いる機器・システム・アプリケーションをグローバルに展開できるよう発展させていく。

## 参考文献

- (1) 廣川 類, ほか: 準天頂衛星システムセンチメータ級測位補強サービス, 三菱電機技報, 91, No.2, 101~104 (2017)
- (2) 廣川 類, ほか: 準天頂衛星システム利活用の構想及び実証成果, 三菱電機技報, 91, No.2, 105~107 (2017)

# 三菱モービルマッピングシステム “MMS-G220Z”

富樫健司\*

*Mitsubishi Mobile Mapping System "MMS-G220Z"*

Kenji Togashi

**要旨**

モービルマッピングシステム(Mobile Mapping System: MMS)とは、車両にGNSS(Global Navigation Satellite System)受信機、慣性航法装置(Inertial Measurement Unit: IMU)、車両の移動量を測定するオドメータなどの測位装置と、レーザスキャナ、カメラ等の計測装置を搭載したシステムである。走行しながら道路周辺の三次元空間情報(位置、形、色)を収集することができるため、従来の測量手法と比較して、広範囲を効率的に計測できるという特長がある。このため、公共測量や地図作成などの分野では既に広く利用されている。

三菱電機のMMS(以下“三菱MMS”という。)は、既に公共測量用途や地図作成用途向けに100台以上を販売してき

ており、測量を始め各種業務の効率化に貢献している。さらに近年では、応用製品として、路面性状調査、道路周辺のインフラ設備管理、トンネル内空の形状管理、河川堤防の形状管理、地下埋設物管理、及び都市景観計測など、用途に応じてカスタマイズした製品を販売している。

今回、海外向けMMSである“MMS-G220”をベースとして、より高効率・高精度な計測が行えるように改良した“MMS-G220Z”を開発し、2017年度から販売を開始している。

広範囲を高精度に計測可能な高精度レーザ搭載のほか、GNSS対応による衛星可視時間の増加、衛星不可視下での精度向上などを実現した。

**三菱モービルマッピングシステム“MMS-G220Z”**

車上部のメインユニット内にGNSSアンテナ1台、カメラ2台、標準レーザスキャナ2台、各センサを制御するセンサBOXを搭載、高精度レーザユニット内に、高精度レーザスキャナ1台、IMU(慣性航法装置)1台を搭載、アンテナフレームユニットにはGNSSアンテナ2台を搭載している。右後輪の内側にタイヤの回転を計測するオドメータを設置し、車内にはこれらのセンサデータを収集する記録ユニットを搭載している。

## 1. まえがき

近年、道路などインフラの分野では、設計・施工・管理にいたるまで、IT技術の普及が進み、三次元空間データの利用は日常のものとなってきている。また、急速に広まりつつある自動運転分野では、ダイナミックマップと呼ばれる高精度三次元地図を基盤とした階層構造データベースの構築が始まっている<sup>(1)</sup>。このような三次元空間情報の広がりを背景に、当社のMMSも2007年の“MMS-Sシリーズ”販売開始から10年を経て、測量分野を始めとして、地図作成、道路性状調査、トンネル変状点検、道路周辺インフラ点検など、様々な幅広い分野で活用されている。

本稿では、2016年度海外向けとして開発した“MMS-G220”をベースにして、広域の三次元情報を効率良く高精度に計測するための改良開発を行った“MMS-G220Z”について述べる。

## 2. MMS

MMSは、車両にGNSS受信機、慣性航法装置、車両の移動量を測定するオドメータなどの測位装置と、レーザスキャナ、カメラ等の計測装置を搭載したシステムであり、走行しながら道路周辺の三次元空間情報(位置、形、色)を収集できる<sup>(2)</sup>。MMSで取得される三次元空間情報は、車両周辺のレーザスキャンデータから生成した点群と呼ばれる、1点ごとに座標値を持つ点の集合体である。

図1は、三菱MMSで計測した点群の例であり、それぞれの点の絶対座標精度は10cm以下を実現している。MMSは、従来の測量手法と比較すると、広範囲を効率的に計測できるというメリットがあり、公共測量や地図作成などの分野で広く利用されてきている。

## 3. 三菱MMS-G220Z

### 3.1 開発の目的

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



図1. 三菱MMSで計測した点群の例

くても操作できるものにしている。しかし、三次元空間データの活用の広がりによってMMSが一般化している中で、操作性だけでなくユーザーが計測の成果物を生成するところまで、トータルで使いやすく作業効率の良い機材が望まれている。

この開発は、このようなユーザーの要望に応えるために、次の4項目の実現を目的としている。

- (1) 運用時間の拡大による計測作業の効率化
- (2) 衛星不可視区間の座標補正作業の効率化
- (3) 複数車線の計測の効率化
- (4) MMS機材の車両載せ替えの容易化

### 3.2 システム構成

MMS-G220Zは、2016年度に開発した海外向けMMSであるMMS-G220をベースとして、高精度レーザスキャナを搭載した機種である<sup>(3)</sup>。車上部の3つのユニット(メインユニット、アンテナフレームユニット、高精度レーザユニット)と、タイヤホイール部に設置するオドメータ(進行距離測定器)、及び、車内部の記録ユニットで構成される。メインユニットの電源は、車両のシガーソケットから受電する。また、消費電力の大きい高精度レーザスキャナ及び記録ユニットの電源は、ベース車両をハイブリッド車にして、AC100V電源を利用するか、又は可搬型の蓄電池を利用する。開発したMMS-G220Zのユニットごとの外観を図2に、構成を図3に示す。また、表1に従来機の“MMS-K220”との仕様比較を示す。

#### 3.2.1 車上部

車上部のユニット構造化によって、従来は専用車両固定となっていた機器を着脱することを可能にしている。メインユニット部には2周波GNSSアンテナ、標準レーザスキャナ2台、カメラ2台、及び、センサBOXを内蔵している。

アンテナフレームユニットには、1周波GNSSアンテナ2台を搭載し、メインユニットに搭載した2周波GNSSアンテナと合わせて、3アンテナで平面を形成することで、GNSS測位による高精度な姿勢計測を行う。



図2. MMS-G220Zのユニット

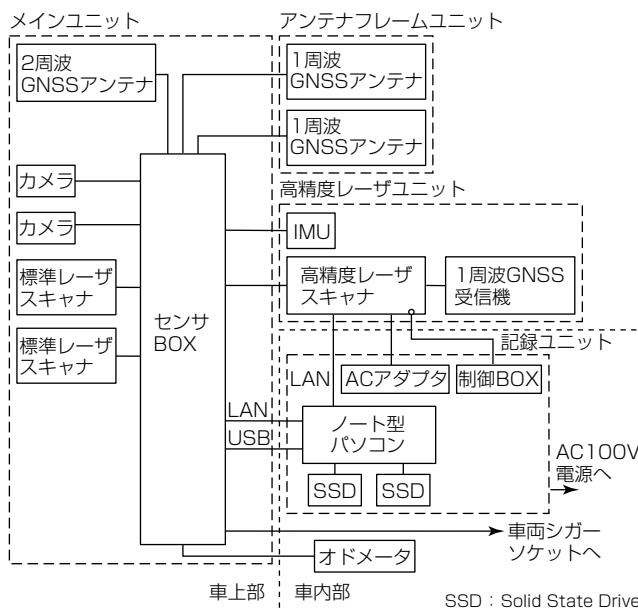


図3. MMS-G220Zの構成

表1. MMS-K220とMMS-G220Zの仕様比較

仕様項目	MMS-K220	MMS-G220Z
カメラ	搭載台数	2台
	画素数	500万画素
	最速撮影枚数	10枚/秒(1台当たり)
レーザ スキャナ (標準)	搭載台数	2台
	取得点数	27,100点/秒(1台当たり)
	スキャン速度	最大100Hz
	最大到達距離	65m
レーザ スキャナ (高精度)	搭載台数	-
	取得点数	1,016,000点/秒
	スキャン速度	最大200Hz
	最大到達距離	119m
質量	車上部	約60kg
	車内部	約70kg
車上～車内間配線本数	17本	6本
消費電力(Typ.)	AC100V 160W以下	AC100V 300W以下 DC12V 90W以下

また、アンテナフレームユニットの後部中央に、高精度レーザユニットを固定できる構造とし、1周波GNSSアンテナ高は、高精度レーザユニットによる遮蔽を受けない高さに配置している。

高精度レーザユニットには、1秒間に約100万点のレーザ計測が可能な高精度レーザスキャナとIMUを内蔵しており、アンテナフレームユニットの上に設置される。

### 3.2.2 車 内 部

車内部は、装置を集約することで後部座席に設置可能な記録ユニット1台だけとし、車両への着脱作業を容易にしている。

記録ユニットには、操作用のノート型パソコンと高精度レーザスキャナの制御BOX及びACアダプタを内蔵するほか、オプションの全方位カメラの制御用パソコンも収容で

きる構成としている。車上部との接続は、メインユニット間で2本、高精度レーザユニット間で3本の計5本で構成される。また、全方位カメラを搭載した場合には、追加で2本接続される。

### 3.3 主な改良点

次に、この開発で実施した従来機種MMS-K220からの主な改良点を述べる。

#### 3.3.1 マルチGNSS対応

当社MMSは衛星測位によって高精度な三次元位置情報を取得しているが、これまでのGPS測位に加えて、マルチGNSS(GPS + GLONASS)による測位に対応したことによって、従来のGPS単独で運用した場合と比較して可視衛星数が増加し、運用可能な時間が拡大している。

図4は、当社MMSで従来のGPS測位方式とマルチGNSS測位方式による測位率を比較したものである。この例は、高速道路、山間部、市街地を含む道路を約6時間にわたり計測した場合である。GPS測位方式では74.4%の測位率に対し、マルチGNSS測位方式では、90.7%の測位率が得られており、マルチGNSS化によって測位率が向上していることが分かる。

#### 3.3.2 カメラ性能向上

従来のCCD(Charge Coupled Device)カメラよりも高感度なCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)カメラを採用したことによって、これまで難しかった明け方や夕方の低照度環境でも解像度の高い画像の取得を可能にした。

図5は、夜間計測でのMMS-G220Zと従来機種MMS-K220との画像比較である。従来のカメラでは夜間に道路標識を視認することは困難であるが、MMS-G220Zに搭載したカメラでは、夜間でもヘッドライトに照らされた標識を視認することができる。

#### 3.3.3 衛星不可視下での性能向上

測量用途では、衛星不可視下での精度が向上することによって、従来よりも計測後の衛星不可視区間の座標補正作業の省力化が図れるというメリットがある。

当社MMSでは、衛星測位によって高精度に車両の位置姿勢を計測しているが、トンネルや高層ビル群などの衛星測位できない場所では、IMUとオドメータのデータによって車両の位置姿勢を計測している。このため、衛星不可視下での精度向上にはIMUが重要なキーパーツである。MMS-G220Zは、従来よりも高精度なIMUを搭載するとともに、衛星不可視下での測位処理の高度化を図り、精度向上を実現している。図6は、現行IMUと高精度IMUをMMSに搭載し、衛星不可視下で8の字走行、右旋回、左旋回を各10分間行ったときの車両の位置誤差を比較したものである。MMSに搭載された高精度IMUによって、現行IMUに比べて衛星不可視下での位置精度が向上することを確認した。

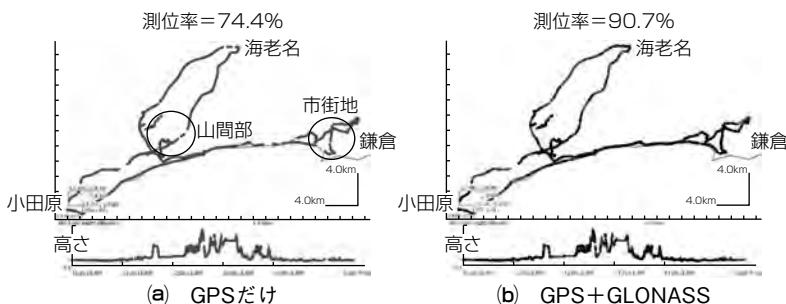


図4. MMS計測でのGPS測位とGNSS測位の測位率比較



図7. 高精度レーザによる点群



図5. MMS-G220ZとMMS-K220の夜間画像比較

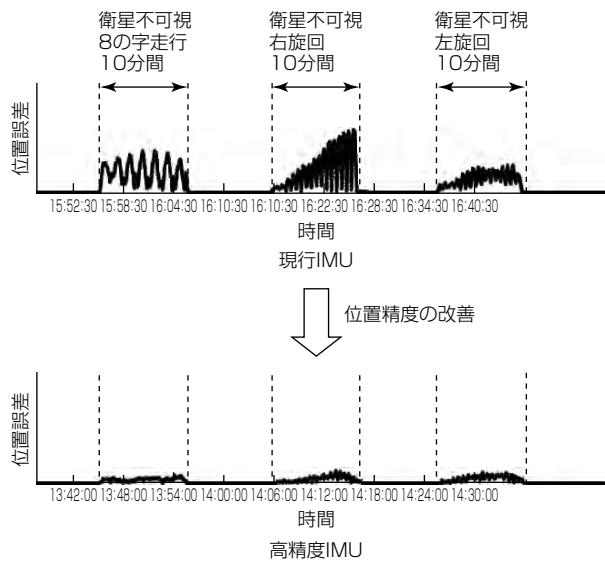


図6. 衛星不可視下の位置精度の改善

### 3.3.4 高精度レーザ搭載

MMS-G220Zでは、複数車線の道路計測時でも1回の走行で高密度な点群データの取得を可能にするために高精度レーザを搭載した。高精度レーザの計測範囲は標準レーザの2倍近い約120mに達する。最大スキャン速度は標準レーザの2倍の200回転で、時速80km走行時に車両進行方向の点間隔約11cmで計測が可能である。また、レーザ取得点数は標準レーザの約20倍の毎秒約100万点で点群データを取得できる。これによって、車両横方向10m先の路面でも点間隔約6cmで計測できる。車両横方向の広い範囲で高密度の点群が得られるため、一度の走行で複数車線の計測が可能となり、計測対象路線の往復走行回数の削減、業務効率の向上が期待される。

図7に高精度レーザで複数車線の道路を計測した例を示す。高密度な点群データが道路及び道路周囲の構造物で取得できていることが確認できる。

## 4. むすび

三菱モービルマッピングシステムMMS-G220Zの開発背景、製品仕様、特長について述べた。この開発は、MMSユーザーの利便性向上を目指とした開発であり、成果として次の4点を実現している。

- (1) マルチGNSS対応、カメラ性能向上によって、運用可能時間の拡大を実現。
- (2) 高精度IMU対応によって、衛星不可視性能を向上させ、衛星不可視区間の座標補正作業を効率化。
- (3) 高精度レーザ搭載によって、複数車線の計測の効率化と計測精度の向上を実現。
- (4) ユニット構造によって、ベース車両の老朽化等に伴う、載せ替え作業の省力化を実現。

現在、日本を含む世界各国で、自動運転の実用化に向けた研究が進み、自動運転システムの重要なインフラであるダイナミックマップの基盤となる、高精度地図基盤情報の整備が喫緊の課題となっている。これまで述べてきたように、MMS-G220Zは、高精度地図基盤情報の基となる三次元空間情報を効率的かつ高精度に取得可能な装置であり、ダイナミックマップを構築するためのキー技術として期待されている。

今後も、三菱MMSは、安全で安心できる社会インフラの実現に向け貢献していく。

## 参考文献

- (1) 高田広章, ほか: ダイナミックマップ-自動走行/協調運転支援のための情報プラットフォーム、システム/制御/情報, 60, No.11, 457~462 (2016)
- (2) 西川啓一, ほか: MMSの最新動向、建設の施工企画, 740, 58~64 (2011)
- (3) 石原隆一, ほか: 海外向け三菱モービルマッピングシステム“MMS-G220”, 三菱電機技報, 91, No.2, 121~124 (2017)

# 広範囲かつ高分解能な地球観測を実現する先進レーダ衛星ALOS-4

岡田 祐\* 横田裕也\*\*\*  
白坂道明\*\* 楠田洋一郎\*\*  
笠間 縁\*

Advanced Radar Satellite ALOS-4 for Wide Area and High Resolution Global Monitoring

Yu Okada, Michiaki Shirasaka, Yukari Kasama, Yuya Yokota, Yoichiro Kusuda

## 要旨

先進レーダ衛星ALOS-4 (Advanced Land Observing Satellite-4)は陸域観測技術衛星2号“だいち2号”<sup>(1)</sup>の後継機であり、L帯合成開口レーダPALSAR-3 (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar-3)を搭載した地球観測衛星である。先進レーダ衛星では、“だいち2号”で実現した優れた空間分解能(3m級)を実現しつつ、デジタルビームフォーミング(DBF)技術の適用によって、観測幅を4倍(200km)まで拡大し、観測頻度を飛躍的に向上させる。これによって、火山活動、地盤沈下、地滑り等の異変の早期発見など、減災への取組みで重要な役割を担う。メインセンサはL帯の合成開口レーダ(SAR)であり、“だいち2号”と同様のアクティブフェーズドアレーナンテナ(APAA)を搭載し、4倍の広域化と優れた画質を両立させるために、アンテナ面積を“だいち2号”から約20%拡大する。また、広域化実現のための新しい取組み

としてDBF技術を導入する。海洋監視等の広域観測では、DBF技術とAPAAの組合せによって、最大700kmの観測幅を実現する。さらに、第三世代衛星搭載自動船舶識別装置実験(Space-based Automatic Identification System Experiment 3 : SPAISE 3)システムの同時観測によって、海洋監視での船舶識別の高度化を実現する。これらミッションセンサの飛躍的な性能向上を実現するため、衛星バスでは、Ka帯直接伝送系を導入し、最大3.6Gbps(周波数多重時)を実現し、ミッションセンサの広域化に対応する。また、衛星バスを先進光学衛星と積極的に共通化することによって、高信頼性のバスを確実に開発し、かつ“だいち2号”で実現している軌道保持精度(±500m以内)を維持しつつ、レーザリフレクタを搭載することによって、干渉SARによる地殻変動検出等のSARプロダクトの高品質化を実現する。



## ALOS-4の特長及び主要諸元

ALOS-4はL帯合成開口レーダを搭載し、昼夜観測が可能な高分解能SARデータを地球に伝送する。SARセンサでは世界最先端の技術を導入することによって、前号機“だいち2号”的4倍の観測幅と同等の分解能で実現する。衛星バスでは、広域化に対応した高速データ伝送(3.6Gbps)を実現するとともに、先行して開発が進められている先進光学衛星との共通化設計によって、高い信頼性を達成する。

## 1. まえがき

先進レーダ衛星ALOS-4は、地域観測・災害状況把握などで貢献している“だいち2号(ALOS-2)”の後継機として、開発が行われている。現在運用中のだいち2号のミッションを引き継ぎ、全天候型の災害観測、森林観測、海水監視、船舶動静把握等の継続的、かつ高度の活用を実現する。また、我が国が長年培ってきたL帯SARの強みである地殻・地盤変動観測を更に進化させて、広域かつ高分解能観測による高精度な衛星システムとして実現させることが強く求められている。搭載するSARセンサPALSAR-3は、従来SAR技術の活用と同時にデジタルビームフォーミング等の新規SAR技術を導入する必要がある。また、衛星バスは先行して開発が行われている先進光学衛星の開発成果を最大限に取り込むとともに、Ka帯による大容量データ伝送の開発等を行う必要がある。

本稿ではALOS-4に搭載されるPALSAR-3、及び、衛星システムについて述べる。

## 2. 先進レーダ衛星システム

### 2.1 SARセンサPALSAR-3

衛星に搭載されるSARセンサPALSAR-3は、前号機であるだいち2号に搭載されたPALSAR-2からの機能を継承しつつ、飛躍的な性能の改善を実現している。表1にPALSAR-3の観測性能を示す<sup>(2)</sup>。

PALSAR-2と同様にPALSAR-3は、アクティブフェーズドアレーランテナ(APAA)を採用して二次元の電子ビーム走査が可能である。これによって、高分解能化に特化したスポットライトモード、スキャンSAR方式を

表1. PALSAR-3の観測性能

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

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

用いた広域観測モードなど、多様なニーズに対応した観測を可能とする。

PALSAR-3では、新たにデジタルビームフォーミング(DBF)技術を導入することによって、分解能及び画質を維持したまま最大4倍の観測幅を実現する。地球に向けて電波を送信するときは広く電波を照射し、地上から反射した信号を受信するときは、DBF技術によって数百ビーム以上の狭いビームを高速に形成することで、広域化と高分解能化の両立を実現する。また、スポットライトモードは、新たにスライディングスポットライト方式を導入することによって、PALSAR-2の1.4倍の観測幅を実現する。200km観測幅を観測した場合の画像例を図1に示す。1回の観測幅を拡大することで、観測頻度の向上などミッションに必要な性能を実現する。

近年、各国でL帯SAR衛星の開発が計画されている。図2は、各国で検討されているL帯SAR衛星との比較を示したものである。ALOS-4では、分解能及び観測幅ともに世界トップクラスの性能を実現する。

### 2.2 衛星システム

ALOS-4はALOS-2の後継機に当たり、ALOS-2か

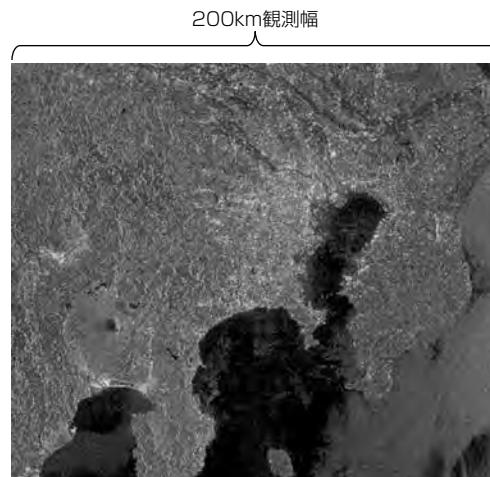


図1. 200km観測幅のSAR画像例  
(PALSAR-2のデータを基に作成)

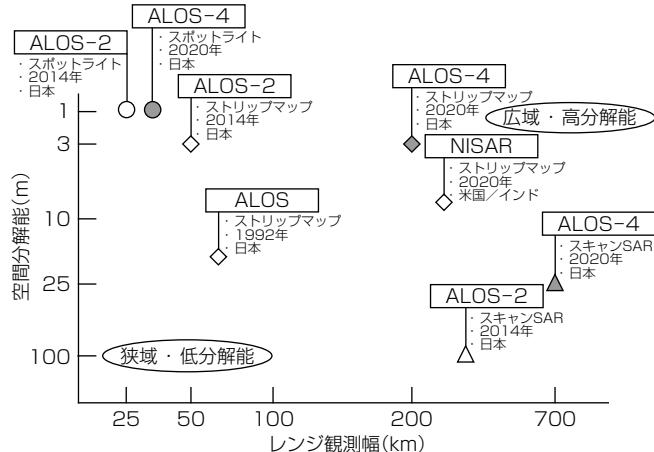


図2. L帯SAR衛星の動向

表2. ALOS-4の主要諸元

軌道高度	628km(赤道上)
軌道種別	太陽同期準回帰軌道
降交点通過地方太陽時	10時30分
回帰日数	14日(1日の周回数 15-3/14周回)
軌道傾斜角	97.9度
ミッションセンサ	L帯合成開口レーダPALSAR-3 第三世代衛星搭載AIS実験(SPAISE 3)システム
データ伝送速度	3.6Gbps(最大)
衛星質量	2,990kg以下
設計寿命	打ち上げ後7年
打ち上げロケット	H3ロケット試験機1号機(予定)
打ち上げ時期	2020年度

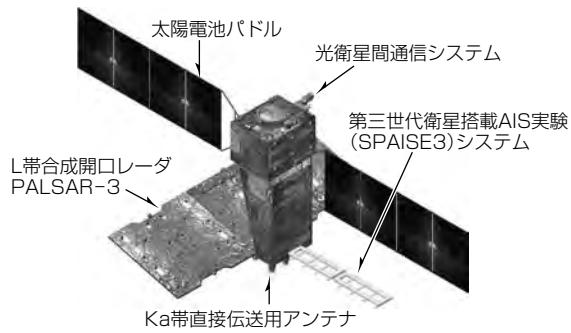


図3. ALOS-4のイメージ

ら継承される全自動化運用要求だけでなく、ユーザーニーズの高度化によって衛星システムに対して、次のとおり要求が高度化している。

- (1) 高分解能観測
- (2) 高頻度観測(年4回→年20回)
- (3) 広域／迅速な観測(観測幅の拡大: 50km→200km)
- (4) 伝送データの大容量化(0.8Gbps→3.6Gbps)
- (5) 衛星寿命(5年間→7年間)

表2にALOS-4の主要諸元を示す。

衛星システムとしては、高度なユーザー要求を満たすために搭載するメインセンサであるSARセンサの飛躍的な性能改善だけでなく、迅速なデータ提供のための大容量データ伝送の実現(最大3.6Gbps(Ka帯直接伝送系の周波数多重伝送))と電力量の拡大への対応(バッテリーの大容量化等)が重要となっている。それ以外にも、国産H3ロケット試験機による初めての打ち上げ、SPAISE 3の搭載システムとの同時観測要求、光衛星間通信システム採用による伝送頻度の向上、衛星の長寿命といった開発要素がだいち2号と比較しての新規要素となる。衛星バスとしては先行して開発中の先進光学衛星<sup>(3)</sup>と積極的に共通化することによって開発リスクを低減し、飛躍的な性能改善を実現するPALSAR-3と高信頼性な衛星バスを両立させる衛星システムを実現する(図3)。

### 3. 課題と解決策

#### 3.1 PALSAR-3

PALSAR-3では、新たにDBF技術を導入することに

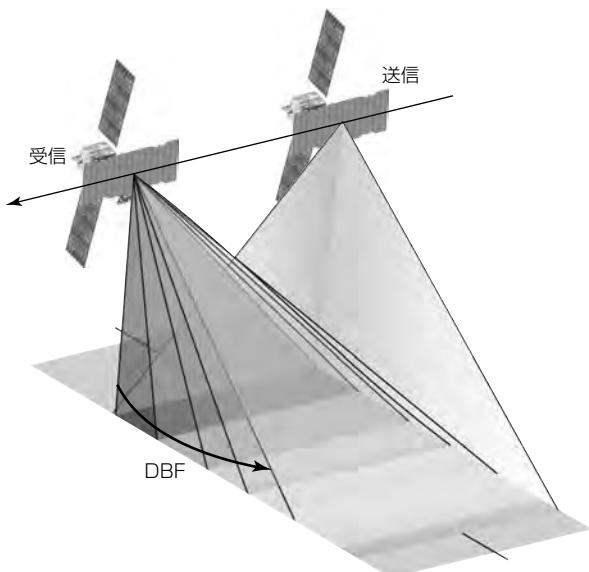


図4. DBF技術による送受信の概念図

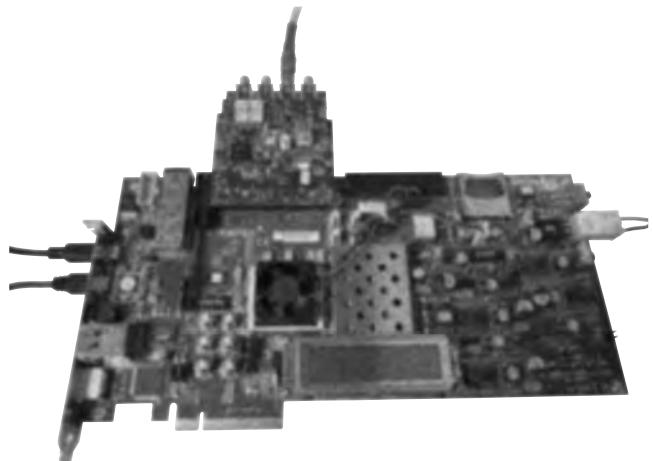


図5. PALSAR-3用DBFUのブレッドボードモデル

よって、飛躍的な性能向上を実現する。PALSAR-3を実現するための課題と解決策を次に示す。

#### (1) デジタルビームフォーミングユニット(DBFU)の開発

DBF技術は、素子アンテナ(又はある程度素子アンテナの信号を合成したサブアレーインテナ)からのアナログ受信信号を一度A/D(Analog to Digital)変換器でデジタル信号に変換した後で、位相の調整と信号の合成を行う方法である。DBF技術を用いた送受信の概念図を図4に示す。地球に向けて電波を送信するときは広く電波を照射し、地上から反射した信号を受信するときは、狭いビームを高速に形成する。A/D変換後の信号から、ms以下の時間に数百以上のビームを形成するために、高速に処理する必要がある。また、DBFの受信系統ごとに受信機、A/D変換器が必要となるため、ハードウェア規模が大きくなる。PALSAR-3では、PALSAR-2で実績のあるコンポーネントをベースに小型化を実施し、また、自社開発済みのサイドプレーン筐体(きょうたい)を活用することで、搭載可能なDBFU装置の開発を行う。図5に開発中

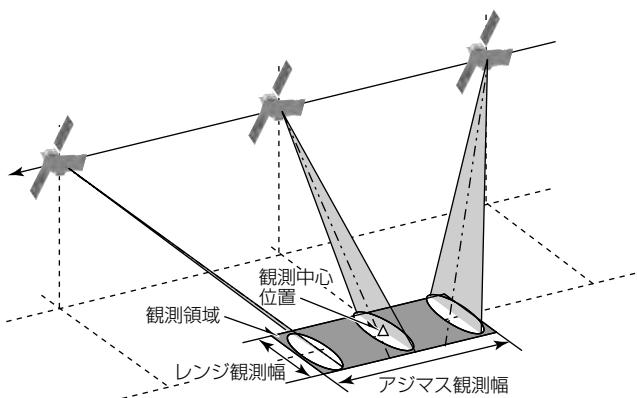


図6. スライディングスポットライトモードの観測イメージ

のPALSAR-3用DBFUのプレッドボードモデルを示す。

## (2) スライディングスポットライト方式

PALSAR-2に搭載されていたスポットライトモードは、地表面の同じ場所に電波を照射し続けることによって、高分解能化を実現していたが、観測幅はビームの照射している範囲に限られていた。PALSAR-3で実現するスライディングスポットライト方式を採用して観測幅の広域化を行う。スライディングスポットライト方式の観測イメージを図6に示す。スライディングスポットライト方式は、高分解能化が可能なスポットライトモードと広域観測が可能なストリップマップモードの中間的な観測方法で、観測幅と分解能の両パラメータのバランスをとったモードである。ビームの照射範囲をスライドさせながら電波の送受信を行い、観測幅がビームの照射範囲に制限されないため、分解能を維持したままPALSAR-2の25kmから35kmへの観測幅の広域化が可能である。

## 3.2 衛星システムのデータ伝送の高速化

PALSAR-3の高空間分解能・広域観測幅に対応する大容量の観測データを、衛星システムで蓄積し、地上へ伝送するために、Ka帯直接伝送系の周波数多重によって、最大3.6Gbpsの伝送速度を実現する。

データ伝送の高速化に伴い増幅器の高出力化が必要になるが、増幅器のバックオフ(動作点での出力レベルと飽和出力レベルとの差)を小さくして高出力化すると非線形歪(ひずみ)が発生し、通信品質が劣化する。そこで増幅器の非線形歪み対策として衛星側のデジタル変調器で補償するDPD(Digital Pre-Distortion)を実施する。

衛星搭載用に適した容易な歪み補償の方法として、デジタル変調器で増幅器の歪み特性と逆特性の振幅・位相情報をLUT(Look Up Table)として用意し、との信号にかけあわせることで歪みを補償する(図7)。またKa帯TWTA(Travelling Wave Tube Amplifier)の経年変化に対応したLUTを地上側で作成し、コマンドでKMOD(Ka-band MODulator)にアップロードすることで、通信品質を維持する。

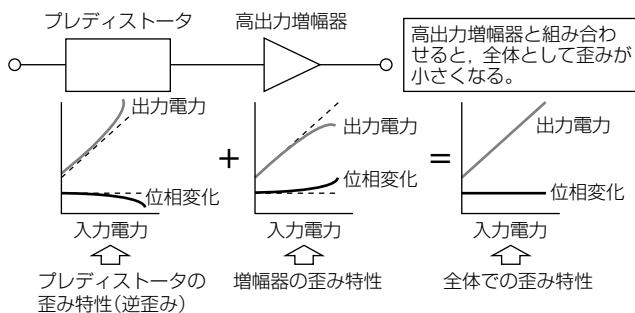


図7. LUTを用いたDPDの動作原理

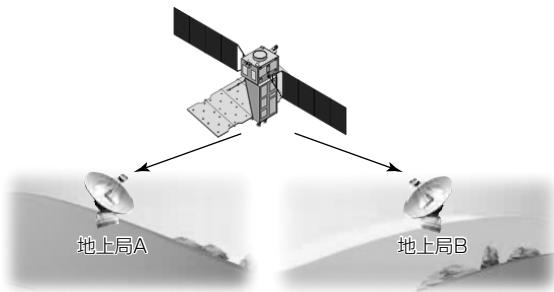


図8. 2局同時伝送運用のイメージ

さらに、TWTAから出力される2波のKa帯変調信号をKa帯合成器で合波し、高調波成分である2倍波を減衰させることで周波数多重化を行い、3.6Gbpsの伝送を実現する。また、2台のKa帯アンテナ各々で1波ずつ1.8Gbpsの伝送によって、異なる2つの地上局への同時伝送を可能にする。図8に2局同時伝送運用のイメージを示す。

## 4. むすび

先進レーダ衛星ALOS-4の衛星システム及びSARセンサPALSAR-3の概要、課題とその対応策について述べた。先進レーダ衛星で採用する技術は観測衛星とL帯SARの将来開発への貢献のほか、三菱電機の国際競争力を強化するものである。今後、2020年度の打ち上げ成功を目指して、開発を行っていく。

## 参考文献

- 針生健一, ほか: 陸域観測技術衛星2号(ALOS-2) —最先端LバンドSARによる高精度な地球観測を目指して—, 三菱電機技報, 85, No. 9, 521~524 (2011)
- Motohka, T., et al.: STATUS OF THE ADVANCED LAND OBSERVING SATELLITE-2 (ALOS-2) AND ITS FOLLOW-ON L-BAND SAR MISSION, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2427~2429 (2017)
- 阿波祐二, ほか: 先進光学衛星の目的と技術, 三菱電機技報, 91, No. 2, 108~111 (2017)

# 超低高度を利用する観測衛星“つばめ”

功刀 信\*

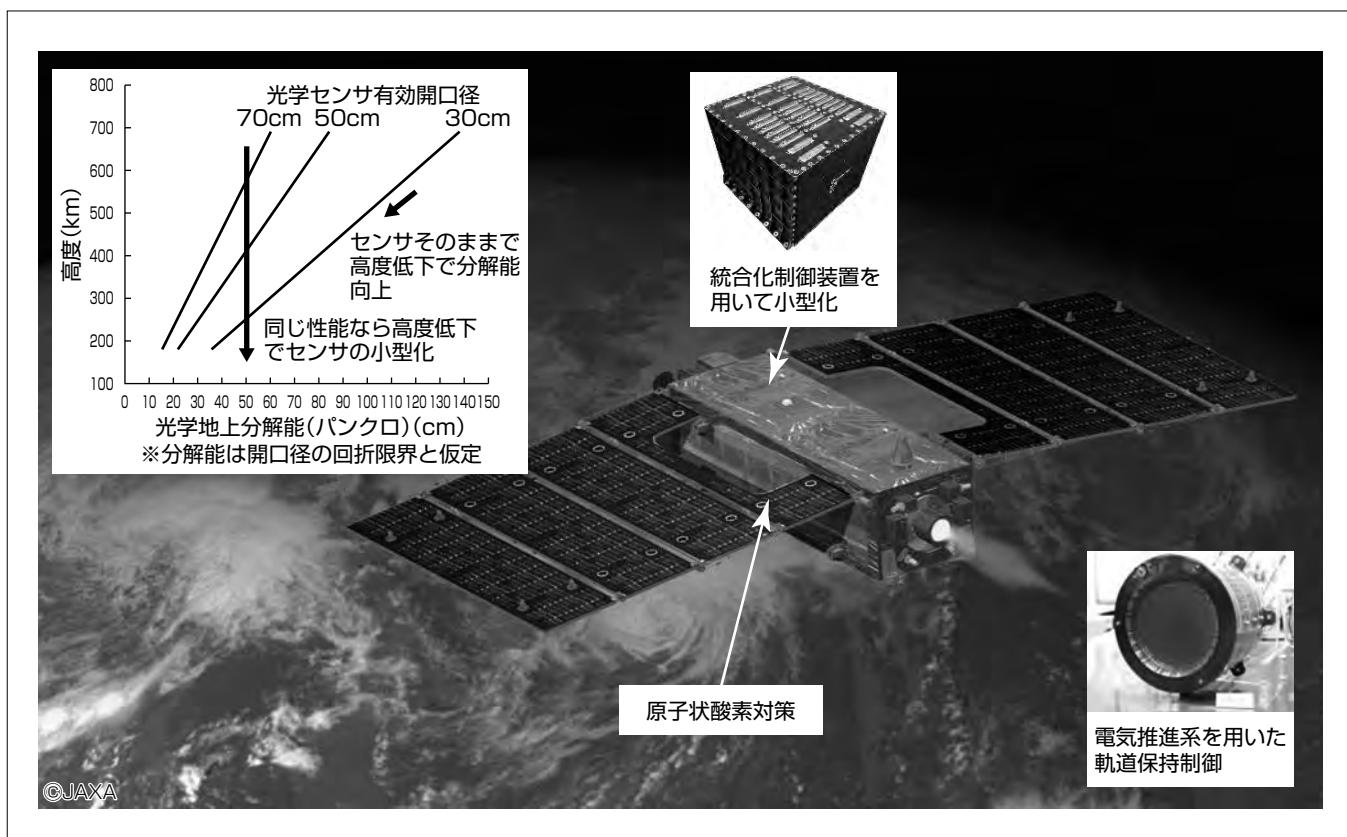
"TSUBAME" : Observation Satellite Using Super Low Altitude

Makoto Kunugi

## 要旨

“つばめ”(超低高度衛星技術試験機: Super Low Altitude Test Satellite(SLATS))は、2017年12月23日にH-II A37号機で打ち上げられた衛星で、今まで日本の衛星では使用していなかった超低高度(高度300km以下)を飛行する光学センサ等のミッションセンサを搭載した衛星である。通常の観測衛星は、高度600~800km程度を飛行する。超低高度を飛行することによって、同じ観測性能を確保するセンサを小型化できる利点があり、同様に衛星自体も小さくできる利点がある。しかし、高度が低いことで大気密度が高くて大気抵抗が大きくなるため、軌道を維持することが難しくなるほか、高層大気中の原子状酸素にさらされて衛星の表面が削られるという課題がある。その対策としてこの

衛星では衛星を小さくして大気抵抗を減らし、制御効率(比推力Isp: 単位推力を発生する時間で評価する指標)が高いイオンエンジンを用いて高度の維持を図るとともに、原子状酸素の影響を受けにくい素材を用いることによって、超低高度の利用技術、運用技術などの技術習得を行う。また、小型高分解能光学センサを搭載しており、軌道高度の変化に対する光学センサ画像の確認を実施する。さらに、原子状酸素の流量計測の装置や材料の劣化を確認する装置を搭載しており、原子状酸素の分布や材料が劣化していく過程などのデータを取得することで今後の超低高度の利用拡大とそれに適した衛星の開発を促進することを目的としている。



## 観測衛星“つばめ(SLATS)”

中央に見えるのは、イオンエンジンである。上有る三角すい形状のものはSバンドアンテナで、原子状酸素対策のためゲルマニウムコーティングを施したポリイミドと呼ばれる素材の三角すい形状のカバーでアンテナを保護している。太陽電池パドルは固定翼であり、これを太陽方向に向ける姿勢を定常姿勢としている。太陽電池パドルは太陽電池セルの間を原子状酸素対策で目地埋めをするとともに裏面にSLI(Single Layer Insulation)と呼ばれる素材を施している。

## 1. まえがき

“つばめ(SLATS)”は、2008年にプロジェクトが立ち上がり、2009年に三菱電機がプライムメーカーとして受注をした衛星である。その当時は、“Smaller, Faster, Cheaper”という考えが宇宙開発に導入されていた時期であり、その後のベンチャー企業などが育っていった時期でもある。その中でSLATSは、高度300km以下の超低高度の利用を目的にその技術課題の克服、新たな知見、その後の利用拡大などを目的に開発が進められた小型の衛星である。超低高度では、大気密度が濃く空気抵抗が大きいため、抵抗の小さい小型の構体、軌道維持のための効率の良い推進系の利用が必要であり、かつ原子状態の酸素による材料の劣化を防ぐ技術が必要となる。

本稿では、超低高度を利用するための課題を示し、それらを解決してきた開発内容について述べ、今後の超低高度の利用などについても述べる。

## 2. SLATSの概要

### 2.1 超低高度の利用

宇宙空間は、真空という言葉が使われるが、一般の観測衛星が利用する軌道高度約600km前後でも非常に希薄な大気は残っており、空気抵抗によって衛星の軌道が落ちていく。そのため、5年程度の軌道上寿命を持たせるため、化学推進系を用いた軌道維持を行っている。したがって衛星の寿命はその化学推進系の搭載推薬量に依存する。また、この高度を利用している理由には観測の際の太陽光との関係や地球との距離を一定に保つのに都合が良いことが挙げられる。しかし、高度600km程度から詳細な観測を行う場合には、かなり分解能の高い観測機器を使用する必要が生じる。それに対して軌道高度約300km以下の軌道を利用できれば、同じ分解能で地球上の距離に換算した指標(Ground Sampling Distance: GSD)を小さくすることができ、より詳細な観測が可能になる。しかし、そのためには

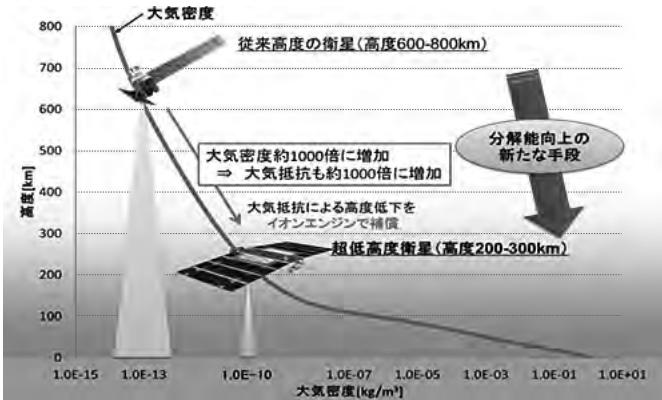


図1. 高度と大気密度の関係

は、超低高度での課題の対策が必要になる。

### 2.2 超低高度での課題と対策

超低高度を利用するためには、幾つかの解決すべき課題がある。特に大気密度は急激に濃くなるため、高度600kmに比べて大気抵抗がおよそ1,000倍になる(図1)。

この大気抵抗に逆らって軌道(高度)維持を行うことが必要であり、化学推進系では、すぐに推進薬が枯渇してしまうため、もっと効率の良い推進系によって軌道を維持する必要がある。SLATSでは、制御効率(比推力 $I_{sp}$ <sup>(注1)</sup>)の大きい電気推進系(イオンエンジン)を使用して軌道高度の維持を図る。併せて、大気抵抗を受けにくい形状や小型化などを行い、軌道維持を図る。

また、もう1つの課題に原子状酸素の影響が挙げられる。高度300km以下の宇宙空間では、酸素が原子状化しており、通常人工衛星に使われている熱防御材等の材料が影響を受け、削られて破損していく。それに対して原子状酸素に耐性のある材料を表面に施したり、原子状酸素が内部に入ってしまうような処置を施したりしている。特に外部に露出している太陽電池パドルの表面、通信用のアンテナのカバーなどに対策を行っている。

(注1) 単位推力を発生できる時間の指標、単位は秒。化学推進系ではおよそ200~300秒、電気推進系(イオンエンジン)ではおよそ1,000~2,000秒。

## 3. SLATSの開発

### 3.1 主要諸元

SLATSの主要諸元を表1に示す。

一般的の観測衛星(約2,000kg)に比べて1/5程度の質量となっているほか、飛行中の前面形状は約60cmの矩形(くけい)となっており、空気抵抗を削減できる。

### 3.2 SLATSの構成

SLATSの機器構成を図2に示す。図に示すように通常の衛星とは異なり、冗長系を持つのは、電源系、通信系、姿勢制御系(制御器は冗長構成であるが、姿勢制御用のセンサ等のコンポーネントは単系)だけである。

冗長構成を持つ部分は少ないが、これらの機器を通常衛星より小さい構体の中に搭載しており、ハーネスの引き回

表1. SLATSの主要諸元<sup>(1)</sup>

項目	仕様
主要ミッションセンサ	(1)原子状酸素(AO)モニタシステム (a)原子状酸素衝突フルエンスセンサ(AOFS) (b)材料劣化モニタ(MDM) (2)小型高分解能光学センサ(SHIROP)
サイズ	2.5(X) × 5.2(Y) × 0.9(Z) (m) (軌道上展開状態)
質量	400kg以下(暫定)
発生電力	1,140W以上(暫定)
設計寿命	2年以上
運用軌道	軌道高度 268~180km
打ち上げ年月日	2017年12月(予定)
打ち上げロケット	H-II Aロケットによる相乗り打ち上げ (主衛星：“しきさい(GCOM-C)”)

し、組立て時の治工具や組立て手順等にも工夫が必要となる。また、3.3節に示すようなコンポーネント数の削減、小型軽量化が必要となる。

### 3.3 小型軽量化

構体のサイズは、 $0.6 \times 0.6 \times 2.2$ (m)程度であり、この中に衛星で使用する機器を搭載するため、機器の小型軽量化が必要である。そのためSLATSでは、統合化制御装置として、図3に示すようなコンポーネントの統合を図って、小型軽量化を行っている。

この統合化制御装置によって衛星の姿勢軌道制御、データ記録、データ処理・通信を行う。

### 3.4 イオンエンジンの開発

大気抵抗が大きい超低高度での軌道維持のために制御効率の高い電気推進系(イオンエンジン)を搭載している(図4)。

このイオンエンジンを用いて、高度260~220km程度の

軌道維持を行う。

### 3.5 原子状酸素対策

原子状酸素対策としては、飛行中に前面となる部分に図4の機体のイオンエンジンと反対側に示すようなバンパを搭載し、原子状酸素が直接構体に当たることを防ぐとともにデブリの衝突の回避及び、衛星の放熱面を守る役割を持たせている。また、外部に出ている通信アンテナには、ゲルマニウムコーティングを施した熱防御材をレドームとして付けている。

太陽電池パドルの表面(太陽電池セル側)は、セル間の目地を原子状酸素に強い接着剤で埋めている。セルの裏面には、SLIと呼ばれるITO(Indium Tin Oxide)コーティングが施された熱防御材を施している。

### 3.6 ミッション機器

SLATSに搭載されているミッション機器は超低高度で

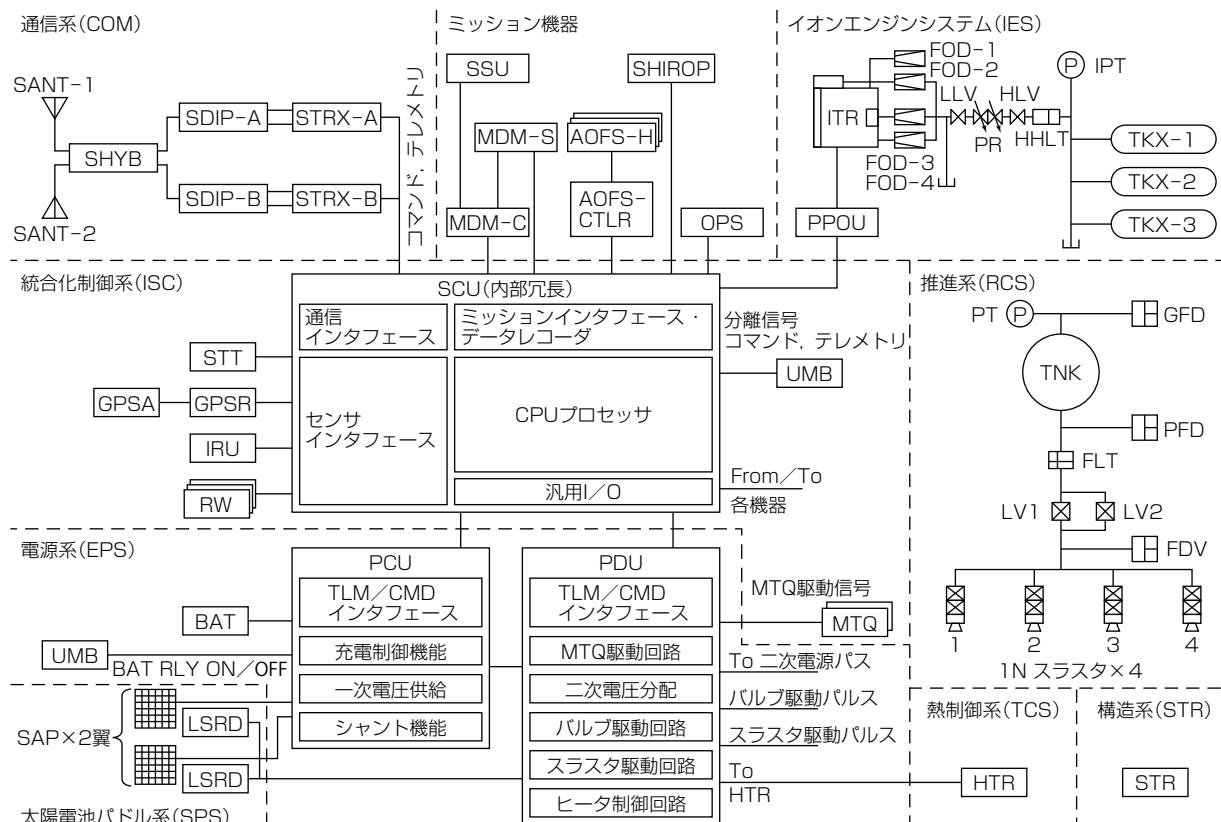


図2. SLATSの機器構成

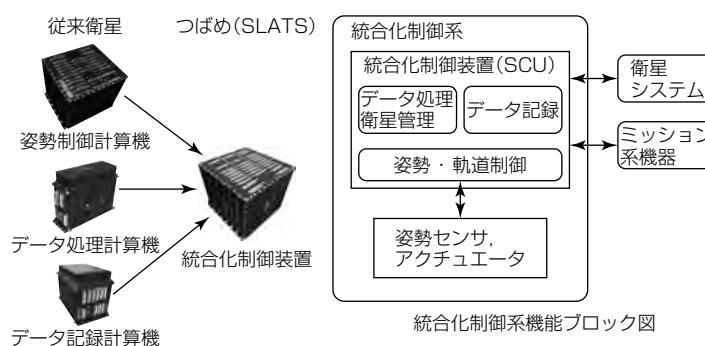


図3. 統合化制御系

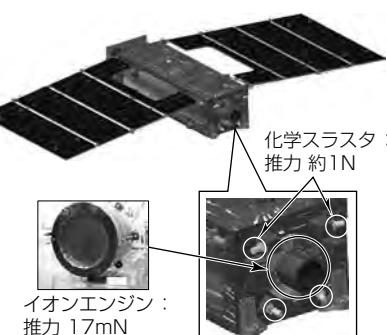


図4. イオンエンジン

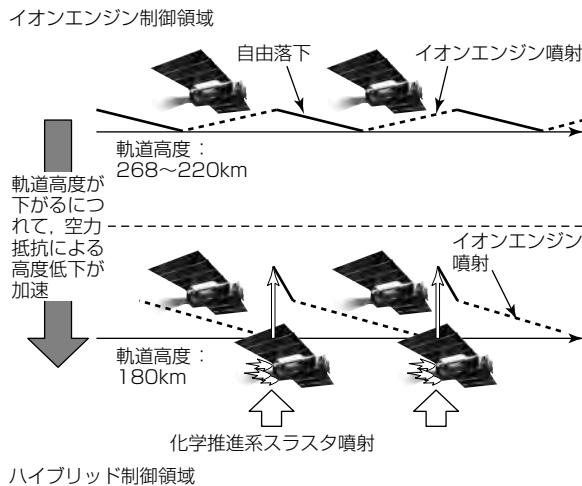


図5. 軌道保持制御のイメージ

の観測を行う小型高分解能光学センサ(SHIROP)と原子状酸素衝突フルエンスセンサ(AOFS)、材料劣化モニタ(MDM)等である(図2)。SHIROPは、超低高度での観測性の確認を行う。AOFSは、超低高度での原子状酸素の振る舞いを観測する機器である。また、MDMは、原子状酸素によって材料が劣化していく状況をモニタして今後の超低高度利用の際の材料の開発等に役立てる。

### 3.7 軌道保持制御

軌道保持制御のイメージを図5に示す。SLATSでは、軌道高度180~268kmで、高度を保持する制御を試みる。軌道高度220~268kmでは、イオンエンジンだけで空力抵抗に打ち勝って高度の保持が可能である。地球観測を行っていない時間帯にイオンエンジンを噴射して高度を保持する。一方で、高度180kmまで低下すると、空力抵抗が更に増大し、イオンエンジンの噴射だけでは高度保持が難しくなる。そのため、イオンエンジンで極力高度低下を抑えつつ、所定の高度保持範囲を超えて低下した場合には化学スラスタを噴射して高度を上昇させるハイブリッド制御を実施する。

### 3.8 運用

SLATSは、相乗り衛星(しきさい: GCOM-C)とともに打ち上げられるため、一旦しきさいの運用軌道である、約800kmまで上がる。しきさいを分離した後、H-II A二段目の再着火によって高度を643×450km(遠地点高度643km、近地点高度450km)まで下げた状態で分離される。そこからは、まず高度400km程度まで化学推進系を使用して高度を落とし、それ以降は、大気抵抗を利用してミッション運用軌道である270kmまで下がってくる運用を計画している(図6)。

空力抵抗を利用して軌道を落とす受動的な軌道制御を行うため、図7に示すように空力抵抗を大きく受けたり、小さく受けたりする姿勢制御を実施する。

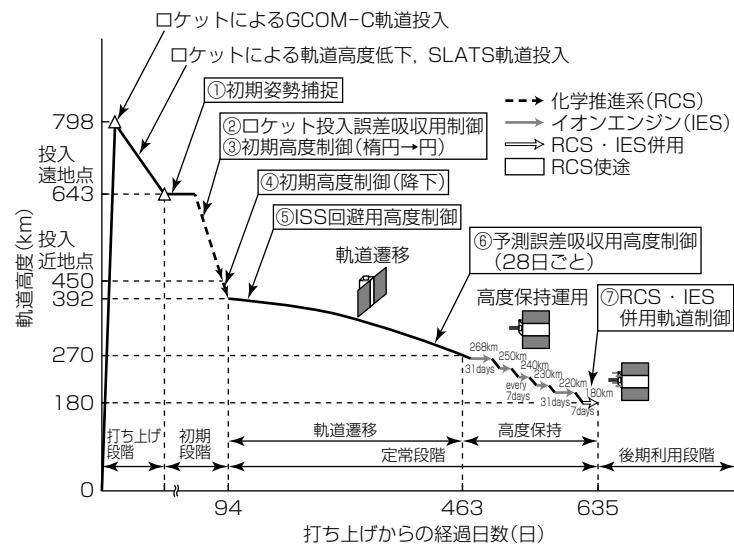


図6. SLATSの軌道運用

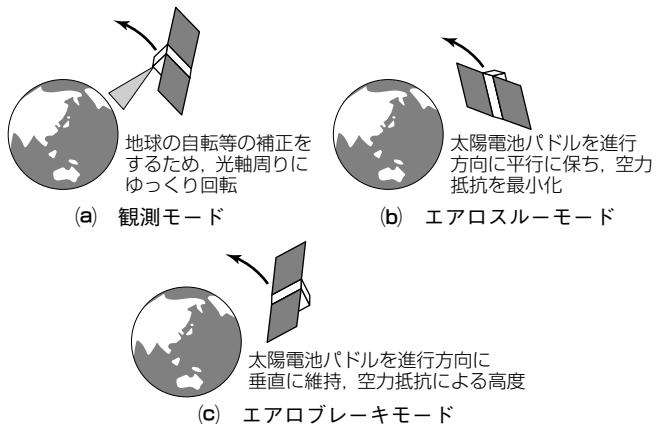


図7. SLATS特有の姿勢制御モード

## 4. むすび

“つばめ”は、先に述べたように今までにないコンセプトで設計を始め、新規要素の強い機能や性能、コンポーネントを搭載しており、今まで使用したことのない超低高度を飛行し、その利用のための技術的確認を行うとともに今後の超低高度利用のための知見を集めることを目的としている。“つばめ”は、2017年12月23日に打ち上げられ、現在初期チェックアウトを行っている。この後、運用を通じて軌道上で集められたデータから将来の超低高度の利用範囲の拡大を目指す予定である。

## 参考文献

- (1) JAXA SLATSホームページ, <http://www.satnavi.jaxa.jp/project/slats/>
- (2) 高畠博樹, ほか:超低高度衛星技術試験機(SLATS)の研究開発状況, 第57回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1G09 (2013)

# 技術試験衛星9号機と将来展開

Engineering Test Satellite 9 and Future Evolution  
Yasushi Odawara, Tatsuo Kohama, Fuyuhiko Otani, Takeshi Sakura

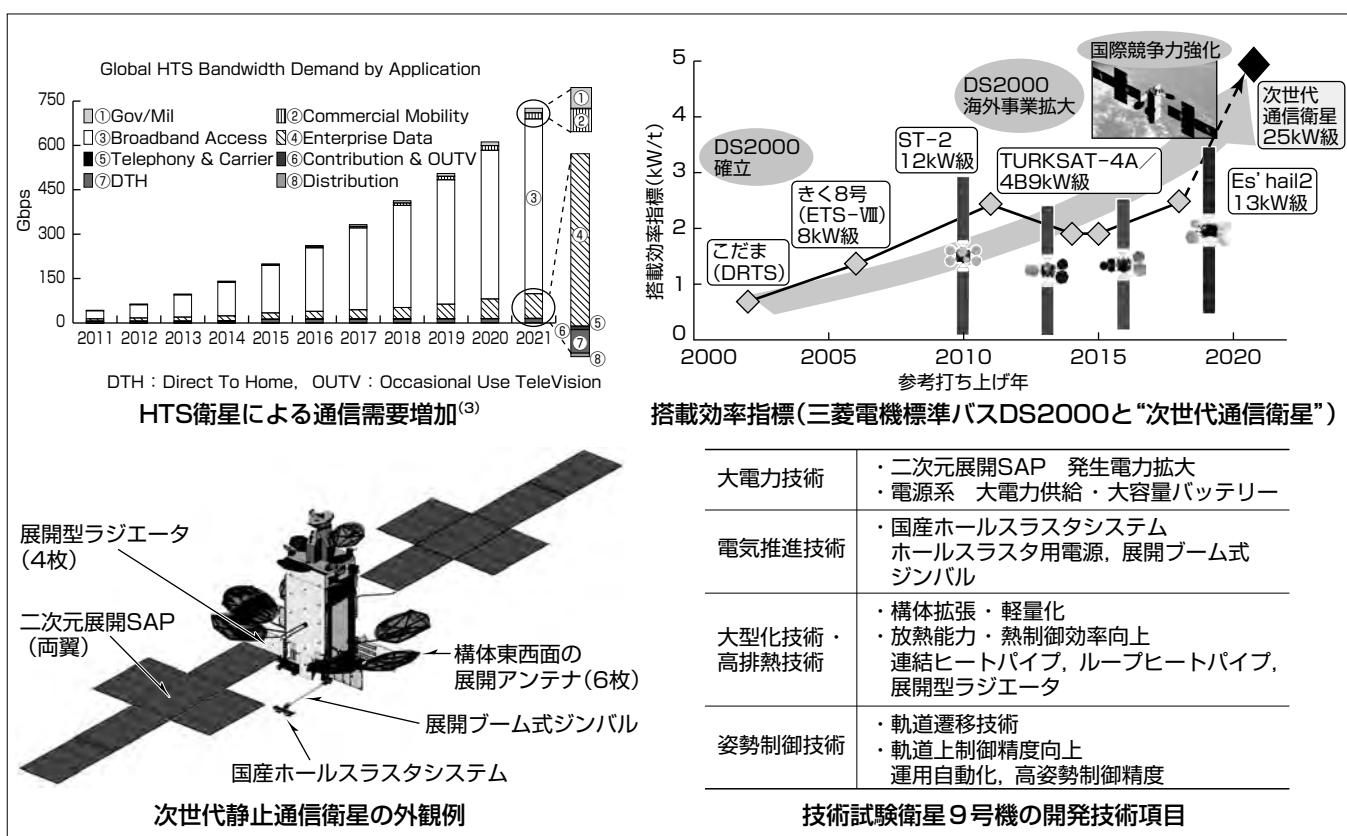
小田原 靖\* 佐倉武志\*  
小濱達夫\*  
大谷冬彦\*

## 要旨

世界市場では通信単価低減を目指して、HTS(High Throughput Satellite)を用いた大容量高速通信を指向しており、HTS専用及びHTS混載のマルチミッションペイロードが主流化し、これに対応する大電力大型衛星バスの投入が必須となっている。同時に化学推進に比較して比推力が5~10倍となる高効率の電気推進によって衛星の搭載推薦質量を削減し、次世代通信衛星では搭載効率指標(発生電力(kW)/打ち上げ質量(t)の比)を5.0に向上させることで、国際競争力の強化を目指している<sup>(1)</sup>。大電力大型・電気推進バスとなる次世代静止通信衛星の実現に向けて、技術試験衛星9号機では、大電力、電気推進、大型化・高排熱、姿勢制御の分野で新たに技術開発を行う<sup>(2)</sup>。二次元展開太陽電池パドル(Solar Array Paddle : SAP),

電力制御器、電力制御分配器、国産ホールスラスタシステム(JAXA開発の国産ホールスラスタ、ホールスラスタ用電源、展開ブーム式ジンバル、展開型ラジエータ、ループヒートパイプ)を主要開発品として新規を開発し、技術試験衛星9号機で軌道上実証を行うことで新技術の確立を図る。また、電気推進による軌道遷移運用、定常軌道制御運用によって、次世代静止通信衛星での姿勢制御技術を獲得する。

技術試験衛星9号機での開発によって、発生電力として数kW~25kWの衛星バス、推進系として電気推進/化学推進/電気・化学のハイブリッド推進を組み合わせた衛星バスのラインアップの充実化を図り、商用衛星市場での受注の機会をこれまでより拡大することが可能になる。



## 次世代静止通信衛星の傾向と技術試験衛星9号機の開発技術項目

HTS衛星を用いた大容量高速通信需要が増加しており、大規模な衛星バスが必要になる一方、搭載効率指標を大きくし、初期の資本的支出を最小化することがビジネスモデルの基調となっている<sup>(1)</sup>。次世代静止通信衛星での実現に向け、技術試験衛星9号機で新規技術の開発を行う。

## 1. まえがき

技術試験衛星9号機は三菱電機が国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)から2017年4月に受注し、2021年度にH3ロケットで打ち上げる予定の衛星である。本稿では、大電力大型・電気推進バスとなる次世代静止通信衛星の実現に向けた技術試験衛星9号機について2章でまとめ、主要な開発技術項目について具体的に3章で述べる。4章では技術試験衛星9号機の開発によって、衛星バスラインアップの充実化が図られ、商用衛星市場での受注機会が拡大することを述べる。

## 2. 技術試験衛星9号機

技術試験衛星9号機は、2020年代の国際商用衛星市場で競争力のある次世代静止通信衛星の実現に向けて開発を進めており、次の特長を持つ。

表1. 技術試験衛星9号機の諸元

項目	諸元
打ち上げ	2021年度 H3ロケット試験機2号機
打ち上げ質量	4.5t級
設計寿命	衛星バス16年
発生電力	25kW級
排熱能力	約8kW (このうち展開型ラジエータ2枚で約2kW分を排熱)
推進系システム	国産ホールスラスターと海外製ホールスラスターを合計4台搭載
軌道遷移	全電化推進システム(ホールスラスター)で打ち上げから静止軌道まで到達可能とする。
軌道制御	ホールスラスターで、寿命末期まで軌道制御可能とする。 静止GPS受信機を用いた軌道遷移中及び静止軌道での軌道決定を行う。
自律化運用	

### (1) 大電力化／高排熱化

- ①発生電力25kW級の大電力・大容量を実現し、通信衛星の高速大容量化の需要に対応
- ②大電力化による発熱量増大に対応した高排熱性の実現

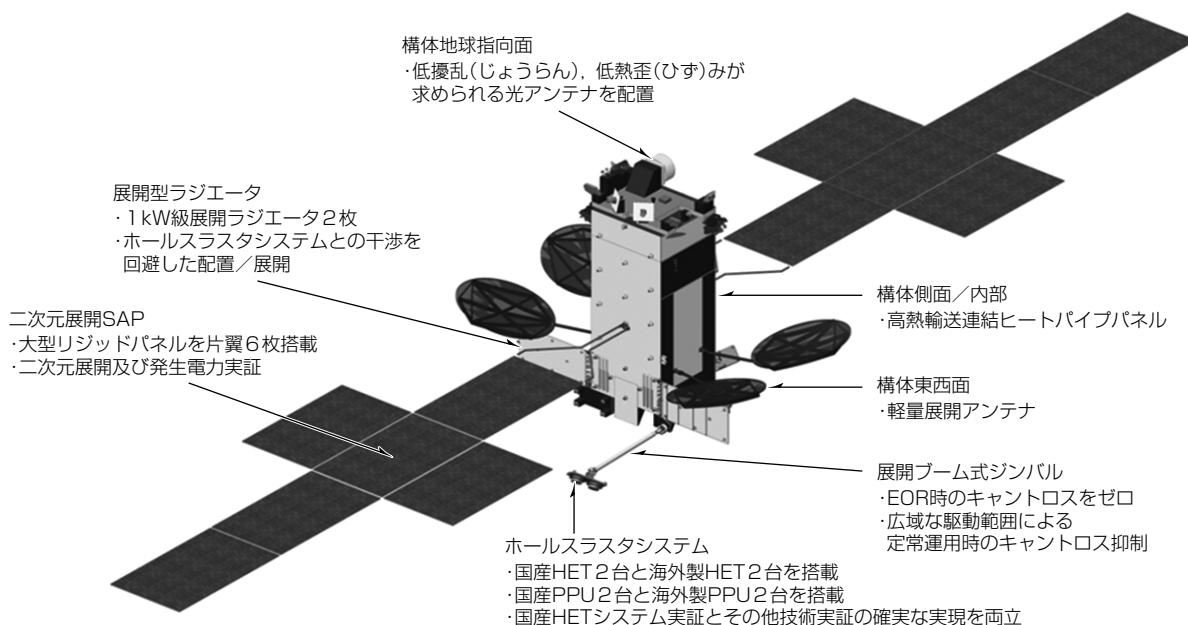
### (2) 全電化／軌道遷移／軌道制御

- ①6kW級の国産大出力ホールスラスタシステムを搭載することで、軽量化・全電化を実現
  - ②大出力ホールスラスタシステムによって、衛星打ち上げ後の軌道到達時間を諸外国の全電化衛星と比べて短縮
  - ③国産GPS(Global Positioning System)受信機を初めて静止衛星に搭載することで、軌道遷移及び軌道制御の自律化運用を実現し、軌道上での衛星運用を省力化
- 技術試験衛星9号機の諸元を表1に、外観と開発技術を図1に示す。技術試験衛星9号機の開発では、打ち上げ質量4.5t級、発生電力25kW級の大電力・大容量化とともに、次世代静止通信衛星で想定される発熱量10kWにも対応可能な排熱技術開発を行う。推進系としてホールスラスタサブシステムの開発による全電化衛星を実現し、打ち上げ後の電気推進による軌道制御技術も確立する。

## 3. 技術試験衛星9号機の開発技術

### 3.1 大電力化・高排熱技術

次世代静止通信衛星に要求される大電力バスの実現のため高効率セルを使用した二次元展開SAP、大電力対応の電源系による30kW給電技術を開発する。また、大電力化に対応した排熱が必要になることから、展開ラジエータ／高熱輸送連結ヒートパイプを用いた10kW排熱技術を開発する。



EOR : Electric Orbit Raising, HET : Hall-Effect Thruster, PPU : Power Processing Unit

図1. 技術試験衛星9号機の開発技術

SAPは当社の標準バス“DS2000”で採用している一次元展開から新たに二次元展開方式となる。発生電力25kWを実現する受光面積確保とイナーシャ、ハーネス長抑制のため、大型リジッドパネルを使用し、4枚のストレートパネルと2枚のサイドパネルによる二次元展開を実現する(図2)。これによって、寿命末期16年後に発生電力25kW以上の供給を可能にする。

大電力化対応の電源系技術として、DS2000衛星バスの電源系を構成する各機器を新たに開発する。電力制御器は将来への多様なミッションに対応した拡張性を確保するため、日照／日陰15kW以上の大電力化と併せ、軽量化を図る。電力制御分配器は大電力化に加え、ライス構成の変更によって従来サイズを維持したまま分配電力・分配系統数を倍増した機器開発を行う(図3)。バッテリーは150Ahセルの2並列化技術開発によって、大容量化を実現する。

10kW級の排熱能力を確保するため、新たな技術開発を行う。高熱輸送ヒートパイプは機軸・南北・東西方向でパイプ径・厚を最適化し、輸送能力向上と軽量化を両立させる。南北・東西連結ヒートパイプを実現することで、更なる効率向上を図る(図4)。

大型展開型ラジエータは、1枚当たり3式のリザーバ外付け型ループヒートパイプ(LHP)を使用し、約1kW/枚の排熱を実現する(図5)。また、展開方式としては、2枚の展開型ラジエータパネルを最小限の保持解放機構で固定することで、部品点数を低減し、低コスト化を行っている。

### 3.2 全電化技術と軌道遷移・制御技術

バス質量の大半を占める推薦質量を大幅に低減可能な全電化推進衛星技術が不可欠であり、電気推進による軌道遷移に必要な推力を確保するためにホールスラスタシステムの開発を行う。

6kW級国産ホールスラスタに対応する専用電源装置と



図2. 二次元展開パドル

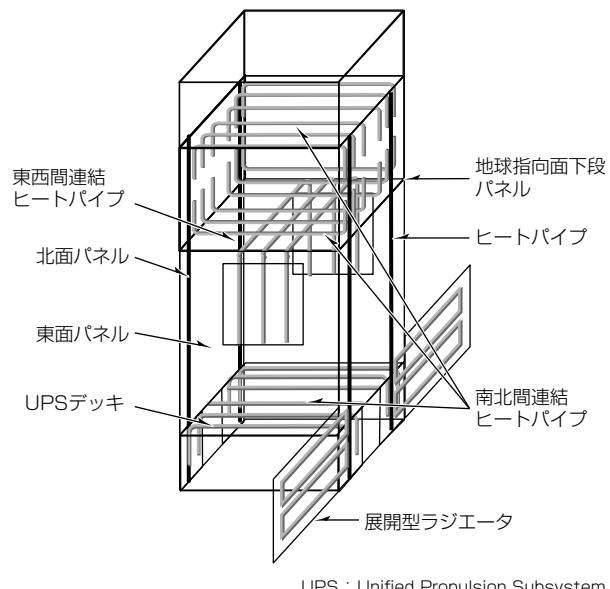


図3. 次世代通信衛星向け電力制御分配器構造

して、軌道遷移モード及び定常軌道制御モードの両方に対応した最高効率95%の世界最小クラスのサイズの高効率電源開発を行う。

ホールスラスタを2軸ジンバルに搭載し、衛星本体から2軸で展開するブーム上にジンバルを配置することによって、衛星に対する展開位置・噴射方向を柔軟に設定することが可能である。電気推進による静止化までの軌道遷移期間を短縮するために、ホールスラスタの噴射ベクトルを軌道遷移で必要な並進力( $\Delta V$ )方向に一致するように調整可能な方式を採用している。また静止軌道では遷移軌道と異なり、必要とする $\Delta V$ 方向が軌道面外・面内と2方向になるため自由度の高い4軸機構で蓄積角運動量最小化(積極的なアンロード)と $\Delta V$ の最適化を同時に実現する。

図6は遷移時の軌道計画例、及び発生電力を最大化する



UPS : Unified Propulsion Subsystem

図4. 南北／東西連結ヒートパイプ

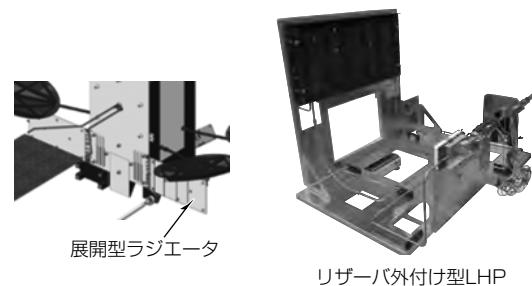
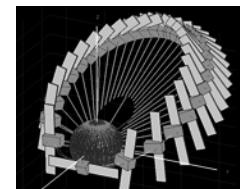


図5. 大型展開型ラジエータ



(a) 電気推進による遷移軌道  
プロファイル



(b) ヨーステアリング制御  
による発生電力最大化

図6. 衛星姿勢制御の例

表2. 静止衛星市場への対応

想定用途	小型通信衛星			中型通信衛星			大型HTS衛星／大型DBF衛星	
衛星 ライン アップ	衛星外観							
	発生電力／ SAP(片翼)	$\sim 13\text{kW} / 2\sim 3\text{枚}$			$13\sim 18\text{kW} / 3\sim 4\text{枚}$			$18\text{kW} \sim / 4\sim 6\text{枚}$
	推進系構成	全電化	ハイブリッド	化学	全電化	ハイブリッド	化学	全電化
	打ち上げ質量	2~2.5t	3~4t	3.5~4.5t	2.5~3.5t	4~5t	4.5~5.5t	3.5~5t

DBF : Digital Beam Forming

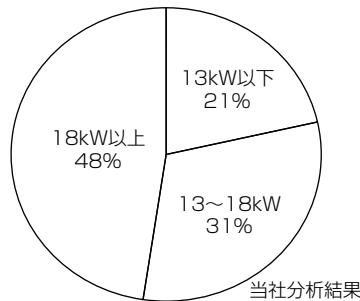


図7. 2020年代の衛星バス発生電力の市場ニーズ想定

ことで複数(2~3台)のホールスラスタに大電力を供給するためのヨーステアリング制御の例である(ヨー角と駆動角でパドルセル面を太陽方向に正対させる)。

#### 4. 将来展開

技術試験衛星9号機の開発によって、これまでの発生電力18kW級までのDS2000衛星バスから、発生電力25kW級の大電力バスの要求に対応が可能になり、2020年代の発生電力の市場ニーズ(図7)への100%対応がほぼ可能になる。また、推進系として、ホールスラスタサブシステムの開発によって、全電化衛星バスとしての対応も可能となり、軌道遷移の期間が短い化学推進、軽量化が図れる全電化推進、及び化学推進と電気推進を併用したハイブリッド推進をラインアップにそろえることで要求に応じた自在性

を確保できる。

全発生電力ラインアップに対して全電化推進／ハイブリッド推進／化学推進の全ラインアップをそろえることで、商用静止衛星市場での受注の機会がこれまでより拡大する(表2)。

#### 5. むすび

市場動向から次世代静止通信衛星バスに求められる仕様と技術試験衛星9号機での開発技術項目を示し、主要開発技術である大電力化・高排熱技術、全電化技術と軌道遷移・制御技術について開発内容を述べた。また、技術試験衛星9号機の開発によって、将来、商用静止衛星市場での受注機会の拡大が図れることを述べた。

#### 参考文献

- (1) Nishi, K., et al.: Conceptual Design of Japan's Engineering Test Satellite-9, 35th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (2017)
- (2) 関根功治：技術試験衛星9号機の開発と今後の商用展開, KDDI財団 2017年度衛星通信年報 (2017)
- (3) Global Assessment of Satellite Supply & Demand 9 th Edition

# 高周波数分解能と低位相雑音の両立を実現する衛星通信用Ka帯コンバータ

清水俊之\* 田島賢一\*\*  
中村圭佑\* 土谷裕志\*\*\*  
森 茂久\*

*Ka-band Converter for SatCom Achieving High Frequency Resolution and Low Phase Noise Property*  
Toshiyuki Shimizu, Keisuke Nakamura, Shigehisa Mori, Kenichi Tajima, Yuji Tsuchitani

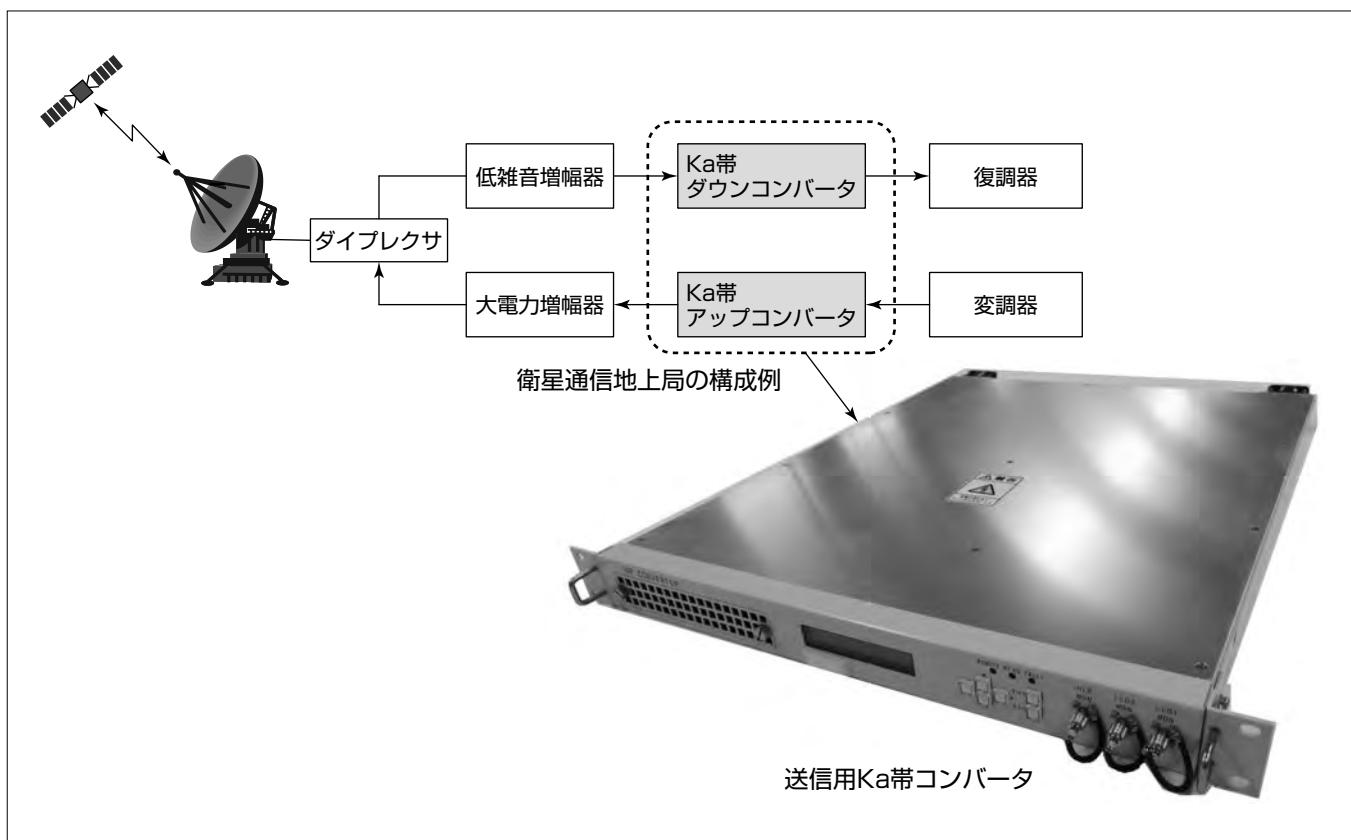
## 要旨

近年、衛星通信(SatCom)全般でKu帯周波数の枯渇に伴い、Ka帯を用いたサービスが拡大しつつある。ITU(International Telecommunication Union)から管制用途のフィーダリンク周波数のKa帯への割当てが既に勧告されている。また、移動体通信でも、大容量通信の利用ニーズの高まりを受け、世界各国でKa帯を用いたHTS(High Throughput Satellite)の打ち上げが計画・実現段階にある<sup>(1)</sup>。今後、ますます衛星通信のKa帯への拡大が予想され、それらを実現するKa帯RF(Radio Frequency)回路、とりわけキーデバイスであるコンバータの高性能化・高機能化が期待されている。

今後のKa帯コンバータの需要を見据え、衛星管制と移動体通信の両アプリケーションへ適用可能な衛星通信用

Ka帯コンバータを開発した。この開発では周波数設定自由度を保つつ、低離調、高離調の低位相雑音特性を実現するためのDDS(Direct Digital Synthesizer)駆動型PLL(Phase Locked Loop)及びミキシングダウンPLLを組み合わせた局発信号源構成を採用している。開発品の実測結果から、両構成で懸念されるスプリアス特性の劣化を解決し、他社より優れた周波数分解能と実測で他社に匹敵する低位相雑音の両立を実現した。

今後、開発したKa帯コンバータを国内管制局事業、移動体通信事業への展開を図るとともに、今回蓄積したKa帯RF回路の開発で得られた知見を他Ka帯事業に展開していく。



## 衛星通信地上局用Ka帯コンバータ

上の図は、衛星通信地上局の構成例である。衛星管制用のコンバータはアンテナと接続され、衛星通信を実現する。右下の図は、送信用Ka帯コンバータの開発品である。パネルフェースには盤面操作用のLCD(Liquid Crystal Display)画面、スイッチ及び保守点検用の局発信号モニタポートを配置し、運用面での使用性を考慮した。

## 1. まえがき

近年、衛星通信全般でKu帯周波数の枯渇に伴い、Ka帯を用いたサービスが拡大しつつある。ITUから管制用途のフィーダリンク周波数のKa帯への割当が既に勧告されている。また、移動体通信でも、大容量通信の利用ニーズの高まりを受け、世界各国でKa帯を用いたHTSの打ち上げが計画・実現段階にある。今後、ますます衛星通信のKa帯への拡大が予想され、それらを実現するKa帯RF機器、とりわけキーデバイスであるコンバータの高性能化・高機能化が期待されている。

**2章**で衛星管制及び移動体通信に要求される技術課題、  
**3章**で周波数設定自由度と低位相雑音化の両立への課題、  
**4章**で今回製品化したKa帯コンバータの性能及び実測結果について述べる。

## 2. 衛星通信用Ka帯コンバータの技術課題

### 2.1 衛星通信でのコンバータの役割

衛星通信で、コンバータは送受信信号の周波数変換機能を担う装置である。衛星通信地上局の構成例を図1に示す。通信量の大容量化やアンテナの小型化要求に対応するため、衛星-地上局間を伝播(でんぱ)するRF信号の周波数にはL～Ka帯の高周波が選ばれる。一方、送信信号を生成する変調器、受信信号からデータを取り出す復調器のインターフェースであるIF(Intermediate Frequency)信号は70／140MHzやL帯、S帯など回路内の取扱いが容易な比較的低い周波数で実現される。これらの周波数の違いを吸収するため、局発信号を用いた周波数変換を行うコンバータが用いられる。

### 2.2 衛星管制と移動体通信での通信の特徴

衛星管制と移動体通信での通信の特徴と、それぞれの通信でのコンバータへの技術課題について述べる。

#### 2.2.1 衛星管制

衛星管制では、衛星に対する姿勢制御と通信制御を目的とした数100bps～1Mbps程度の低ビットレートの狭帯域変調信号の送受信を行う。衛星管制でのコンバータに要求される技術課題を次に示す。

- (1) 高い設定周波数分解能と広い周波数設定範囲を持ち、周波数調整に対し柔軟に対応できること
- (2) 低離調の位相雑音特性が良好であり、狭帯域信号の伝送が可能であること

特にKa帯のコンバータは周波数変換に用いる局発信号の周波数が高いため、周波数設定の自由度を維持しつつ低離調の位相雑音特性を低減するためには局発の信号源に工夫が必要である。

#### 2.2.2 移動体通信

移動体通信では主として放送やブロードバンド回線の

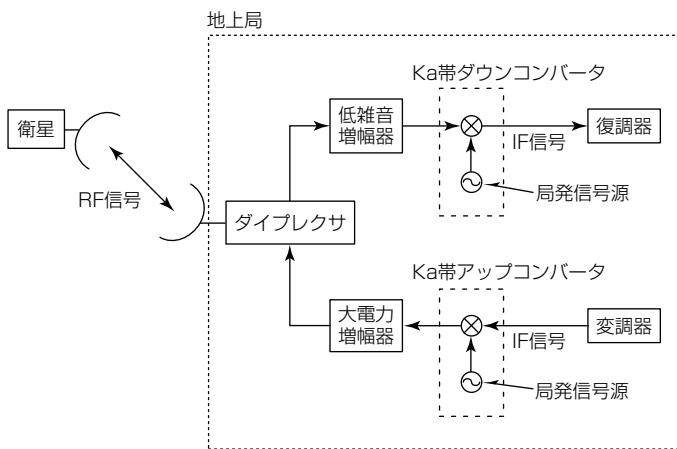


図1. 衛星通信地上局の構成例

シンボル間距離縮小⇒位相雑音によるBER劣化感度増

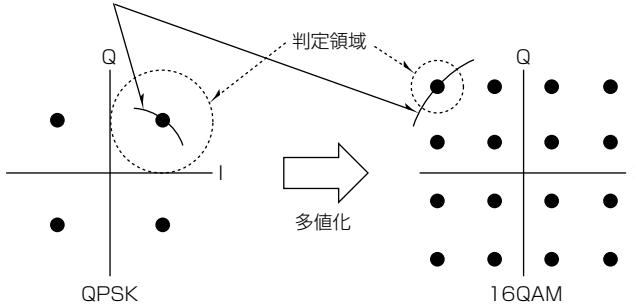


図2. 変調信号を多値化した場合の位相雑音の影響例

提供を目的とし、高速通信を実現するため広帯域な多値変調信号を用いた数100Mbps以上の伝送を行う。現在、8PSK(Phase Shift Keying), 16APSK(Amplitude PSK), 16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)等の多値変調信号を用いるHTSの実現が計画されている。

これらの広帯域な多値変調信号を用いる場合、変調信号の帯域幅に応じて高離調でも低位相雑音特性が要求される。変調信号を多値化(QPSK(Quadrature PSK)→16QAM)した場合の位相雑音の影響例を図2に示す。多値変調信号ではシンボル間距離が縮小されてコンステレーションが配置されることから、位相雑音特性に対する感度が高まり、位相雑音特性の劣化がビット誤り率(Bit Error Rate: BER)の劣化へ直結する。このことから、高速通信を実現する移動体通信に用いるコンバータには厳しい位相雑音特性が要求される。

#### 2.3 開発の狙い

今後の衛星通信のKa帯拡大によるコンバータ需要へ対応するため、今回製品化したKa帯コンバータは、衛星管制と移動体通信に要求される技術課題を踏まえ、次の特長の実現を目指して開発を行った。

- (1) 周波数設定自由度の実現(高設定周波数分解能、広周波数設定範囲)
- (2) 低離調、高離調の両域での低位相雑音の実現

### 3. 周波数設定自由度と低位相雑音の両立

図1に示すとおり、コンバータの内部には局発信号源が実装されており、同じく内蔵されるミクサに対して局発信号を供給する。2章で述べたコンバータの周波数設定の自由度や低位相雑音はこの局発信号源に対して課せられた要求でもある。この章では、局発信号源の周波数設定自由度と低位相雑音の両立について述べる。

#### 3.1 局発信号源の構成

局発信号源は周波数の正確性を期すため、一般に基準信号に同期する位相同期発振器の構成を用いる。位相同期発振器の構成は数多く存在するが、ここでは代表的な構成例について述べる。図3に位相同期発振器の構成例<sup>(2)(3)(4)</sup>を示す。また、表1に位相同期発振器の各構成例の比較を示す。

図3(a)に示したプリスケーラPLL(Phase Locked Loop)は一般的な位相同期発振器の構成である。分周比Rで分周した基準信号と分周比Nで分周した電圧制御発振器出力を位相比較器で位相比較し、その結果得られる電圧に基づいて電圧制御発振器の出力周波数が決定される。この出力信

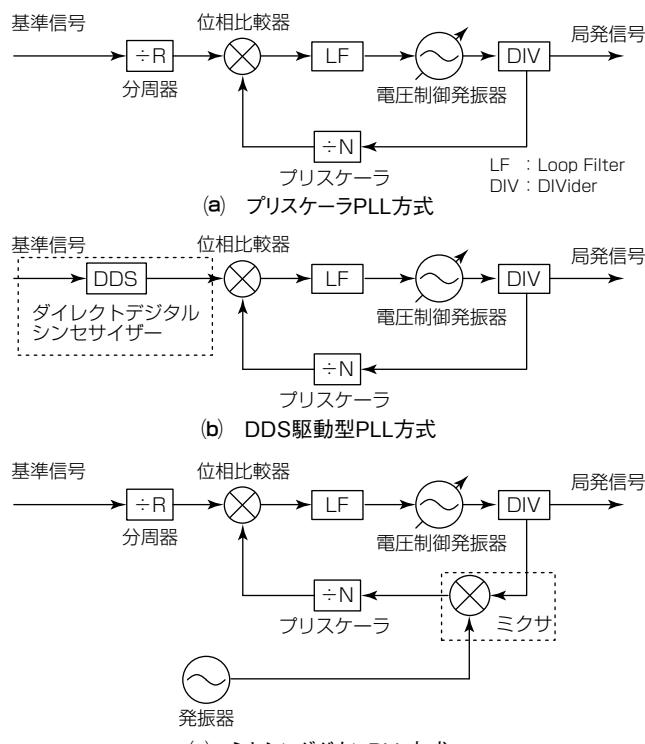


図3. 位相同期発振器の構成例

表1. 位相同期発振器の各構成例の比較

実現方式	周波数設定分解能	位相雑音(位相比較器雑音成分)	スプリアス特性
プリスケーラPLL	低分解能	雑音大	-
DDS駆動型PLL	高分解能	雑音大	量子化雑音(DDS) エイリアス(DDS)
ミキシングダウンPLL	低分解能	雑音小	ミキシング プロダクト

号を局発信号としてミクサへ供給する。この場合、周波数設定分解能は分周後の基準信号で決定され、自由度が低い。また、位相雑音を決定する要因の1つである位相比較器の雑音成分もN倍されるため大きくなる。

図3(b)に示したDDS(Direct Digital Synthesizer)駆動型PLLは分周比Rの代わりにDDSを用いる構成である。DDSを用いることによって1Hz以下の分解能を実現することも可能になる。ただし、DDSは内蔵するDAC(Digital to Analog Converter)に起因する量子化雑音、エイリアスによるスプリアスも出力するため、スプリアス特性の劣化が懸念される。一方、位相雑音での位相比較器の寄与はプリスケーラPLLと変わらず、ループ内の分周期のNによって決定される。

図3(c)に示すミキシングダウンPLLはループ内にミクサを実装し、電圧制御発振器出力を低い周波数へ変換する構成である。ループ内で周波数変換を行うことで、ほかの構成に比べて分周比Nを小さくすることが可能である。ほかの構成と同様、位相比較器の雑音がN倍されるが、Nが小さくなるため、位相比較器の雑音の寄与を極めて小さくすることができる。ただし、ループにミクサを用いることによってミクサから出力されるスプリアスへの対策が必要であり、DDS駆動型PLL同様スプリアス特性の劣化が懸念される。

#### 3.2 開発品構成の検討結果

開発品のKa帯コンバータに内蔵する局発信号源は、高い周波数分解能と低位相雑音を実現することを目標にDDS駆動型PLLとミキシングダウンPLLを組み合わせて実現することにした。両構成を組み合わせることによって、DDSの高分解能と周波数変換による位相雑音の低減が可能となる。DDSの量子化雑音やエイリアスによるスプリアスは事前評価で行った確認結果に基づいて設計を行い、ミクサから出力されるスプリアスはコンバータ設計に用いる独自のシミュレータを用いたシミュレーション結果に基づいて対策を行った。

#### 4. 開発品Ka帯コンバータの性能

表2に送信用Ka帯コンバータ開発品の性能一覧を示す。参考に海外他社同等品の性能指標も列記する。当社開発品では周波数分解能1Hzを達成している。また、10Hzから100Hz離調の位相雑音特性は他社を凌駕(りょうが)した特性が得られている。また、10kHz離調以上の高離調の位相雑音特性についても移動体専用品以外のコンバータに対して優位な特性が得られている。

表3に受信用Ka帯コンバータ開発品の性能一覧を示す。送信同様、参考に海外他社同等品の性能指標も列記する。受信用も当社開発品では周波数分解能1Hzを達成しており他社に対して優位性を確保できている。また、10kHz離調以上の高離調の位相雑音特性についても移動体専用品

表2. 送信用Ka帯コンバータ開発品の性能一覧

	当社開発品	A社(管制用)	A社(移動体用)	B社	
入力周波数	70/140MHz	70/140MHz	L帯	70/140MHz	
出力周波数	30GHz帯	30GHz帯	30GHz帯	30GHz帯	
利得	13dB以上	30dB nom	30dB nom	40dB nom	
周波数分解能	1 Hz	1 kHz	固定	100Hz	
スプリアス	-60dBc以下	-60dBc以下	-65dBc以下	-40dBc以下	
位相 雑音	10Hz	-59dBc/Hz	-49dBc/Hz	-41dBc/Hz	-53dBc/Hz
	100Hz	-69dBc/Hz	-63dBc/Hz	-64dBc/Hz	-70dBc/Hz
	1 kHz	-76dBc/Hz	-69dBc/Hz	-94dBc/Hz	-81dBc/Hz
	10kHz	-94dBc/Hz	-79dBc/Hz	-102dBc/Hz	-87dBc/Hz
	100kHz	-94dBc/Hz	-91dBc/Hz	-107dBc/Hz	-90dBc/Hz
	1 MHz	-107dBc/Hz	-109dBc/Hz	-124dBc/Hz	-100dBc/Hz

表3. 受信用Ka帯コンバータ開発品の性能一覧

	当社開発品	A社(管制用)	A社(移動体用)	B社	
入力周波数	20GHz帯	20GHz帯	20GHz帯	20GHz帯	
出力周波数	70/140MHz/S帯	70/140MHz	L帯	70/140MHz	
利得	12dB以上	30dB nom	35dB nom	40dB nom	
周波数分解能	1 Hz	1 kHz	固定	100Hz	
スプリアス	-60dBc以下	-60dBc以下	-65dBc以下	-40dBc以下	
位相 雑音	10Hz	-41dBc/Hz	-49dBc/Hz	-41dBc/Hz	-58dBc/Hz
	100Hz	-66dBc/Hz	-63dBc/Hz	-64dBc/Hz	-78dBc/Hz
	1 kHz	-83dBc/Hz	-69dBc/Hz	-94dBc/Hz	-88dBc/Hz
	10kHz	-102dBc/Hz	-79dBc/Hz	-102dBc/Hz	-93dBc/Hz
	100kHz	-102dBc/Hz	-91dBc/Hz	-107dBc/Hz	-95dBc/Hz
	1 MHz	-117dBc/Hz	-109dBc/Hz	-124dBc/Hz	-105dBc/Hz

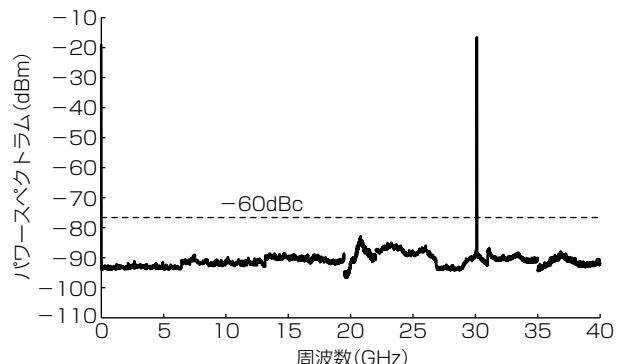


図6. 送信用Ka帯コンバータのスプリアス実測結果

相当の特性が得られている。

図4に送信用Ka帯コンバータ開発品の位相雑音実測結果、図5に受信用Ka帯コンバータ開発品の位相雑音実測結果を示す。送受とも高離調の位相雑音特性も実測では移動体専用品相当の良好な位相雑音特性を示している。また、図6に送信用Ka帯コンバータのスプリアスの実測結果を示す。局発信号のリークやその他スプリアスもなく、スプリアス特性は-60dBc以下であることを確認した。

これらのとおり、開発したKa帯コンバータは送信用、受信用とも良好な位相雑音特性を示していることを確認した。また、採用した局発信号源の構成によって懸念されたスプリアス特性も良好であることを確認した。

## 5. む す び

拡大するKa帯の衛星通信への適用を狙って開発を行ったKa帯コンバータについて述べた。この製品は衛星管制用途、移動体通信用途の両方に適用可能となるよう周波数設定の自由度を持たせつつ、専用品に匹敵する低位相雑音特性を実現しており、他社より性能面で優位である。今後、国内管制局事業、移動体通信事業への展開を図るとともに、今回蓄積したKa帯RF回路の開発で得られた知見を他Ka帯事業に展開していく。

## 参 考 文 献

- (1) 後藤祐介：次期技術試験衛星の実現に向けて、通信ソサイエティマガジン、電子情報通信学会、11, No.1, 72~78 (2017)
- (2) 伊東健治：低雑音PLLシンセサイザの基礎、MWE2014 基礎講座 (2014)
- (3) 小沢利行：PLL周波数シンセサイザ・回路設計法—LSIの使い方とトラブルシューティング—、総合電子出版社 (1994)
- (4) 小宮 浩：高周波PLL回路のしくみと設計法第二版、CQ出版社 (2013)

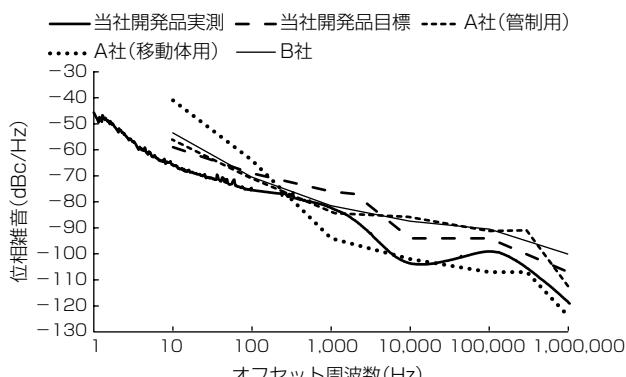


図4. 送信用Ka帯コンバータの位相雑音実測結果

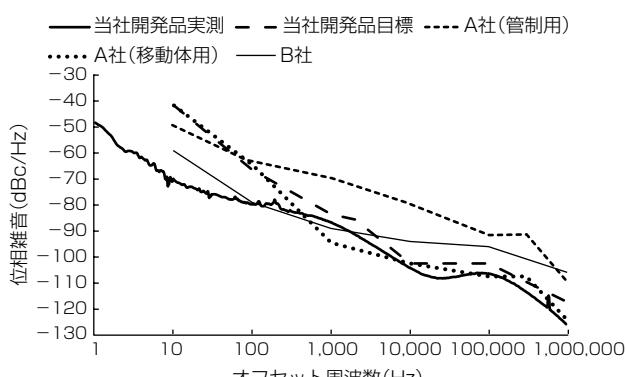


図5. 受信用Ka帯コンバータの位相雑音実測結果

# SNG向け屋内／屋外型Ku帯100W半導体電力増幅器“SX-6020／6101”

小坂田 寛\* 西原 淳\*  
山本敦士\* 山添裕啓\*  
中田浩志\*

*Indoor/Outdoor Ku-band 100W SSPA "SX-6020/6101" for Satellite News Gathering*

Hiroshi Osakada, Atsushi Yamamoto, Hiroshi Nakata, Jun Nishihara, Hiroaki Yamazoe

## 要旨

放送局向けの衛星通信を用いた報道映像素材伝送(Satellite News Gathering : SNG)向け屋内／屋外型Ku帯100W-SSPA(Solid State Power Amplifier : 半導体高出力増幅器)の開発成果を述べる。SNGシステムでは、故障した場合に、運用停止期間を可能な限り短縮するよう要求されている。従来、高出力増幅器には高出力が容易に得られるマグнетロンや進行波管などが用いられていたが、電子管を用いることから寿命が短くて定期的な交換が必要であることや、海外調達が中心であったため故障時に修理時間が長期化するなど保守性に問題があった。一方、SSPAは携帯電話を始めとする通信機器にも広く使用されているが、扱える出力電力やDC-RF(Radio Frequency)変換効率が電子管に比べて劣るため、システム要求を満た

すには消費電力・発熱の面で問題があった。しかし、近年、電力密度が高く、DC-RF変換効率の高いGaN(窒化ガリウム)FET(Field Effect Transistor)の登場によって、SNGシステム内部に使用する増幅器の半導体化が進んでいる。今回、三菱電機製GaN FETを用いたKu帯100W-SSPA“SX-6020／6101”を開発し、低消費電力化と供給性確保の両立を図ることに成功した。また低消費電力化は騒音の原因となるファンの騒音レベルの低減に寄与し、静音性の向上を実現した。その結果、当社従来型GaN SSPA比較で、消費電力を75%に抑え、騒音レベルを屋内型で10.9dB、屋外型で7.2dBの低減を達成した。さらに、オプションで変調装置からのL帯信号をKu帯に周波数変換する周波数変換器も内蔵でき、変調装置との連接も容易である。



屋内型100W-SSPA(SX-6020)



屋外型100W-SSPA(SX-6101)

## SNG向け屋内／屋外型Ku帯100W-SSPA

左は、SNG向け屋内型100W-SSPAである。放送中継局車及び固定局室内の19インチラックに収納可能で、高周波信号及び制御ケーブル等は背面アクセスである。前面にはモニタ端子及び電源・アラーム表示ランプを装備している。右は、SNG向け屋外型100W-SSPAである。放送中継局車上に搭載されるアンテナの根元に配置される。直射日光防止のための日よけを搭載し、防水・防塵(ぼうじん)性はIP55を達成した。

## 1. まえがき

近年、GaN FET等の登場によって、送信機の半導体化が進んでいる。従来用いられていた進行波管はDC-RF変換効率は高いが、電子管を用いることから寿命が短く、システム運用期間内で定期的に交換をするため、保守性に問題があった。電力密度の高いGaN FETは高出力化が可能であり、また、当社製GaN FETを用いることで、低消費電力化と供給性確保の両立が期待できる。また、ファンの静音性が求められている。

本稿では、2章でKu帯を利用したSNGシステムの技術課題について述べ、3章で今回製品化した屋内／屋外型Ku帯100W-SSPA SX-6020／6101について述べる。

## 2. Ku帯を利用したSNGの技術的課題

### 2.1 SNGを用いた衛星放送と要求事項

図1にSNGシステムの運用概念図を示す。現場で撮影した映像を衛星経由で車載局から固定局へ伝送するシステムをSNG(Satellite News Gathering)と呼ぶ。固定局間で伝送を行う場合もある。

映像伝送のため、広帯域通信が可能な周波数帯として、従来はKu帯が使用されており、車載の場合、搭載装置には低消費電力化・小型化が求められる。また、SSPA出力からアンテナ入力端までの低損失化・車室スペースの有効利用のため、SSPAの配置場所を車上に展開するアンテナの根元に設置することも考えられるが、その際、SSPAには防水・防塵性が求められる。また、高出力のため相応の発熱があるため排熱用ファンが設けられるが、ファンの回転音は、比較的静かな固定局では相対的に騒音レベルが高いため、可能な限りの静音性が求められている。

### 2.2 製品化への技術課題

SNGシステム用100W-SSPAに要求される技術課題を次に示す。

- (1) 低消費電力化と保守性の向上
- (2) 低騒音であること
- (3) 屋外型に防水性・防塵性を持たせること

## 3. Ku帯100W-SSPA SX-6020／6101

Ku帯100W-SSPA SX-6020／6101は、次の特長を持つ半導体高出力増幅器である。

- (1) 固定局／車載局に使用可能
- (2) 屋内／屋外対応
- (3) 64APSK(Amplitude Phase Shift Keying),  $\alpha = 0.05$  の高密度トランスポンダに使用可能
- (4) 最大運用出力100W
- (5)  $-20\sim55^{\circ}\text{C}$  の環境下で使用可能
- (6) 当社製GaN-FET使用による調達安定性の確保
- (7) モジュール交換による運用／保守・交換性の向上

### 3.1 Ku帯100W-SSPAの構成

この装置の構成を図2、主要性能を表1に示す。内部にアップコンバータを備え、L帯のIF(Intermediate Frequency)周波数からKu帯に周波数変換し、増幅器によって100W出力可能とする。

### 3.2 開発課題

- (1) 低消費電力化と保守性の向上

SNGシステムでは、故障した場合でも、運用停止期間の可能な限りの短縮が要求される。従来、高出力増幅器には高出力が容易に得られるマグネットロンや進行波管が用いられていたが、電子管を用いることから寿命が短く、保守性に問題があった。一方、半導体増幅器はGaAs(ガリウムアロイ)を用いており、高出力化と長寿命化が実現された。

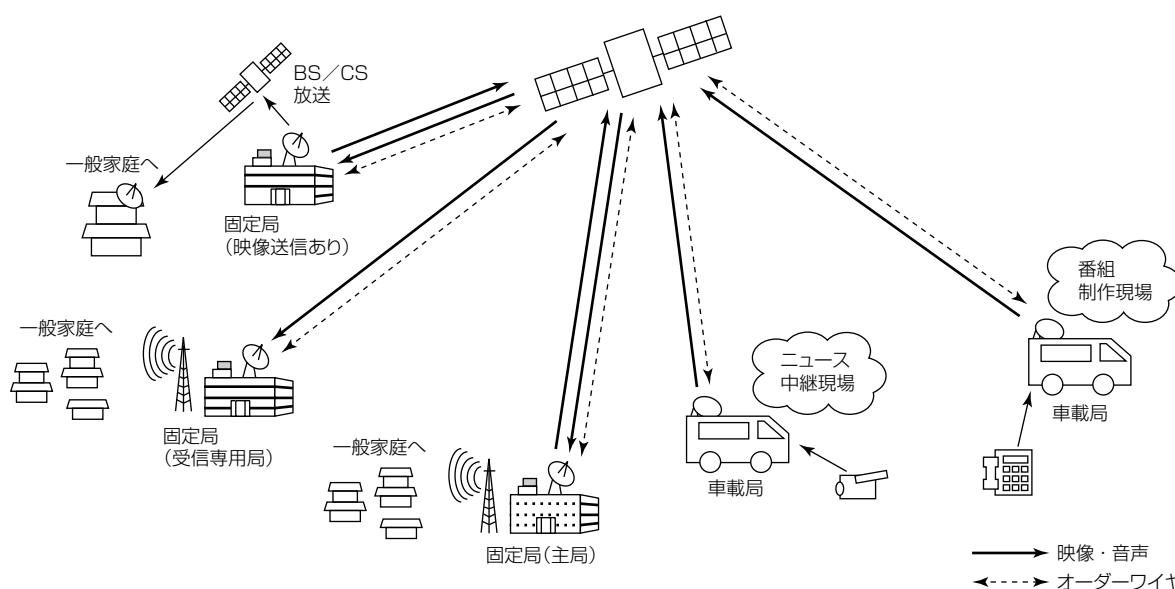


図1. SNGシステムの運用概念図

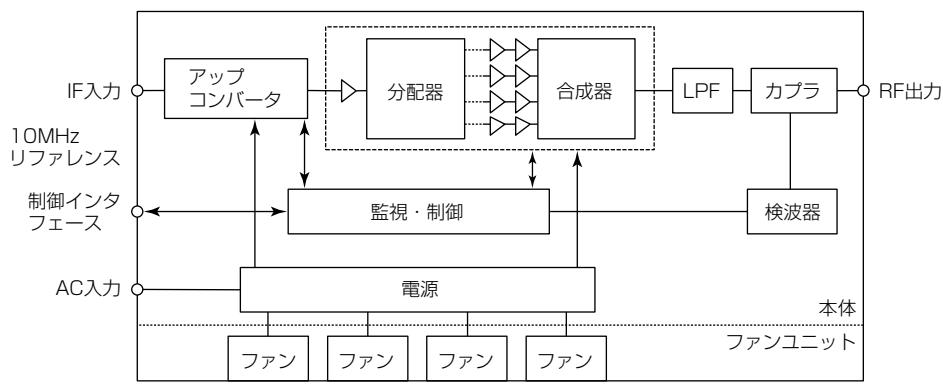


図2. Ku帯100W-SSPAの構成

表1. 主要性能

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

RH : Relative Humidity

ムヒ素) FETなどの素子単体が出現して久しいが、扱える出力電力やDC-RF変換効率が電子管に比べて劣るため、システム要求を満たすには消費電力・発熱の面で問題があった。各々の長所、短所を表2に示す。

しかし、近年、電子管とGaAs FETの長所を持ち合わせたGaN FETの登場によって、SNGシステム内部に使用する増幅器の半導体化が進んでいる。図3にGaN FETの特長を示す。

当社では、これまで、他社製50W GaN FETを用いて8合成することで100W出力を実現していたが、GaN FET単体の出力が小さいため、合成回路の合成数が増加することで合成損失が増加して消費電力が増加する課題があった。

そこで、今回の開発では、新たに開発した当社製100W GaN FETを用いて、増幅器前後の分配器・合成器を8合成から4合成に減らし、100W出力を実現した。また、入出力の分配器と合成器を従来のトーナメント型から直列型にすることで配線長を短くし、更なる低損失化を図った。その結果、消費電力は、当社従来比75%まで低減でき、低消費電力化を実現した。また、GaN FETを他社製から当社製にすることで、供給性を向上させた(図4)。

表2. 増幅器種別性能比較

	電子管	GaAs FET
長所	高出力、高効率	小型・軽量、長寿命、低電圧
短所	大型、高電圧、短寿命	低出力、低効率

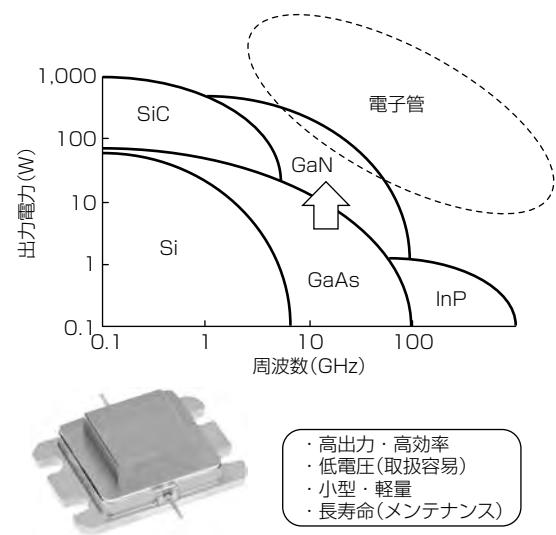


図3. GaN FETの特長

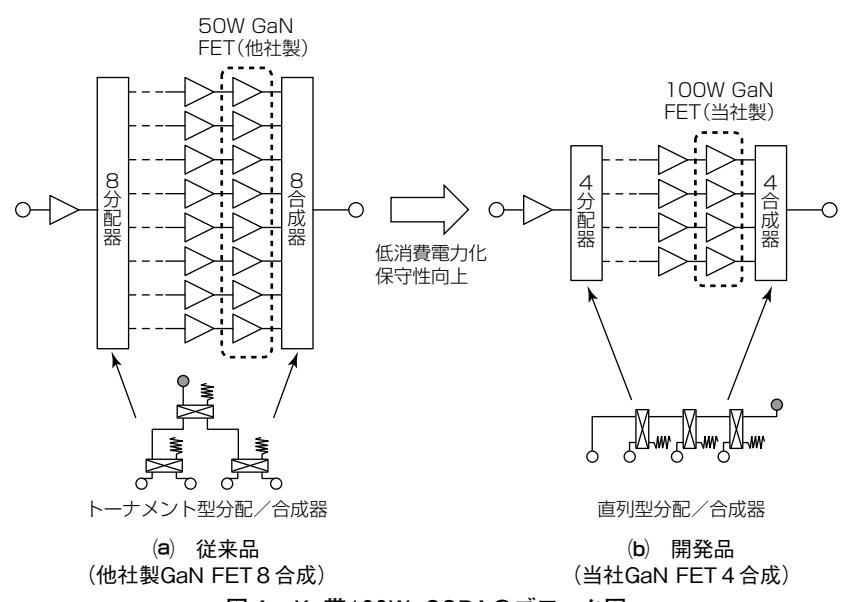


図4. Ku帯100W-SSPAのブロック図

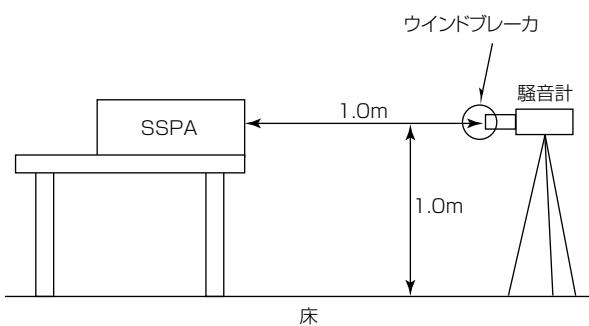


図5. 騒音レベルの測定環境イメージ

表3. 騒音測定結果 単位：dB(A)

距離 = 1.0m	従来品	開発品	改善度
屋内型	66.5	55.6	10.9
屋外型	75.0	67.8	7.2

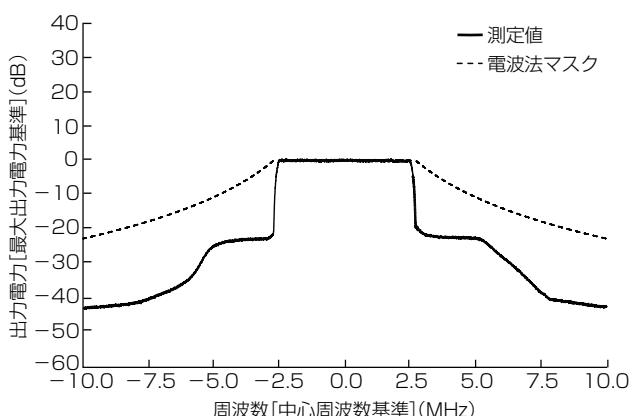


図6. Ku帯100W-SSPAのスペクトラムリグロース

### 3.3 特 性

図6にSSPAの主要性能であるスペクトラムリグロース特性を示す。変調波信号は64APSKで、出力100W時の特性を示す。100W出力時で、電波法を十分に満足する性能が得られた。

### 4. む す び

放送局向けの衛星通信を用いたSNG向け屋内／屋外型Ku帯100W-SSPA(Solid State Power Amplifier: 半導体高出力増幅器)の開発成果を述べた。低消費電力化、静音性を重視して屋内／屋外型ユニットの開発を行った。電子管から固体半導体への置き換えによる保守性の向上、及び当社製GaN FETを用いた低消費電力性・供給性確保の両立、並びに騒音レベルの低減を実現し、車載局、主局(固定局)での問題を解決又は軽減した。送信機の消費電力を当社比75%に抑え、騒音レベルを屋内型で元66.5dB(A)から10.9dB、屋外型で元75.0dB(A)から7.2dBの低減を達成した。さらに、オプションで変復調装置からの1GHz帯出力をKu帯に周波数変換する周波数変換器を内蔵しており、変復調装置との接続も容易である。

### (2) 低騒音であること

図5に騒音レベルの測定環境イメージを示す。

騒音レベルの測定は、被測定物であるSSPAの高さが1.0mとなるよう絶縁性土台の上に配置し、想定される運用方法に近い状態で1.0m離れた地点に集音マイクを置いて実施した。低消費電力化及び低騒音ファンの選定によって、従来のSSPAに比べて、屋内用では10.9dB(A)、屋外用では7.2dB(A)の改善効果が得られた(表3)。

### (3) 屋外型に防水性・防塵性を持たせること

中継局車室内のスペース有効活用と、アンテナ給電部の損失最小化のため、車上搭載のアンテナの根元にSSPAを配置する場合、耐環境性として防塵・防水性の確保が必要である。当社では大雨や砂ぼこりを想定して、噴流水に対する保護と、機器の正常動作や安全性を阻害するほどの粉塵が内部に侵入しないことを目標としており、このSSPAでもIP55の規格を満足する耐環境性を実現した。

# 衛星管制ソフトウェア“Birdstar”の海外製衛星への適用

石井俊直\*  
原内聰\*\*  
小林和貴\*

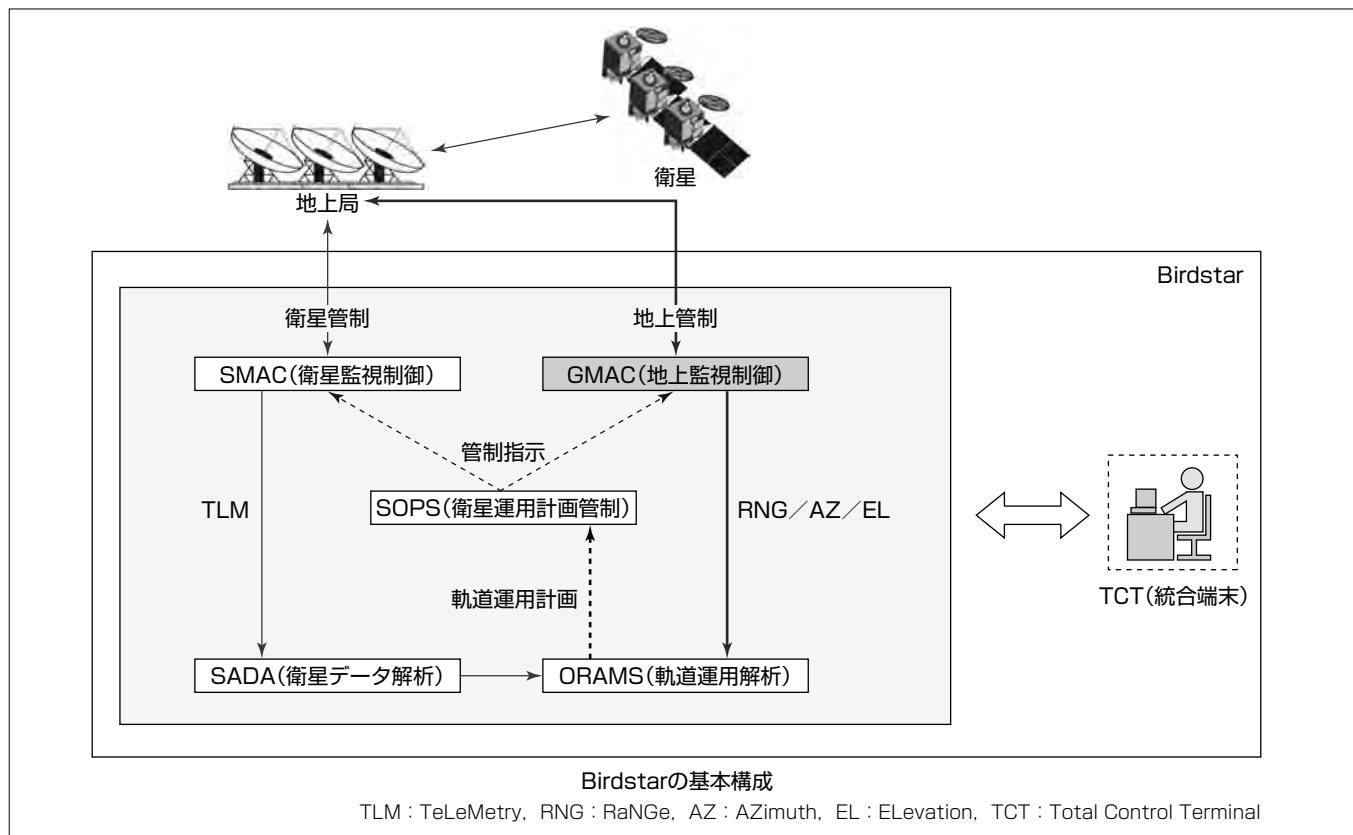
*Application of Satellite Control Software "Birdstar" to Foreign-made Satellite*

Toshinao Ishii, Satoshi Harauchi, Kazuyoshi Kobayashi

## 要旨

衛星管制ソフトウェア“Birdstar”は、これまで気象衛星ひまわり8号・9号に代表される三菱電機製人工衛星の多くに適用してきた。今回、海外製衛星向けの衛星管制システムに適用して初の海外製衛星適用となった。衛星管制ソフトウェアは、テレメトリの送受信指示、運用計画立案、軌道運用計画などの機能を持つ。基本的な機能は変わらないが、衛星ごとにカスタマイズする必要がある。この

案件では初の海外製衛星適用であることに加え、顧客もBirdstarを初めて採用するため、ソフトウェアへの要求が開発初期段階で出そろわず、手戻りも含めた開発量が増大すると予想した。そこで、ソフトウェア開発で一般的になりつつあるアジャイル開発の手法を取り込んで開発を行うことによって、変化を許容して対応した。



## 衛星管制ソフトウェア“Birdstar”

海外製衛星の管制システムにBirdstarを初適用した。衛星管制に必要な基本機能を適用させるとともに、全サブシステムの英語化とユーザビリティの向上を図った。

## 1. まえがき

これまで当社では、当社製人工衛星の地上設備だけを製造してきた。自社製の衛星管制システムを、他社製の人工衛星に適用した実績がなかったが、今回海外衛星メーカー製造の人工衛星の管制システムを受注し、初の海外メーカー製人工衛星に適用することとなった。実績のある気象衛星ひまわりや準天頂衛星など公官庁向けとは異なる民間会社による衛星管制運用向けの機能拡張やユーザビリティ向上を行った。

本稿では、今後Birdstarを拡販していく上でマイルストーンとなるこの開発のプロセスについての分析結果を述べる。

## 2. システム構成

衛星管制システムは、主に“変復調設備”と“計算機システム”で構成される。変復調設備は、高周波設備(アンテナ)を介して衛星に対して、衛星コマンド送信や衛星テレメトリの受信を実施するために、信号の変復調を実施する設備である。計算機システムは、衛星管制システム用Birdstarのソフトウェア群を用いて、衛星へのコマンド送信指示やテレメトリ受信、スケジュール管理、軌道運用計画を実施するシステムである。システムの各要素は冗長構成を基本とし、障害発生時に衛星管制運用に支障をきたさない構成となっている。

## 3. Birdstar

Birdstarは、当社が持つ衛星管制ソフトウェアパッケージの標準基盤(総称)である。今回は、コマンド送信、テレメトリ受信、レンジング、スケジュール管理を行うオンライン機能と、データ蓄積・解析、軌道運用計画を行うオフライン機能を備えており、次の4種のソフトウェア(サブシステム)で構成される。

- (1) 衛星監視制御を行うSMAC(Satellite Monitor And Control software)
- (2) 衛星データ解析を行うSADA(SAtellite Data Analysis software)
- (3) 衛星運用計画管制を行うSOPS(Satellite Operation Planning & Scheduling software)
- (4) 軌道運用解析を行うORAMS(ORbitAl Mission analysis software)

Birdstarは、今まで運輸多目的衛星ひまわり7号(2006年打ち上げ)<sup>(1)</sup>を始め、当社製衛星の管制システムの多くに適用してきた実績がある。特長として、衛星運用や計画、解析手順を、シナリオを用いて半自動で実行でき、運用者の操作ミスや操作負担を低減できることが挙げられる。システムはサーバ&クライアント方式を採用し、システム全体を端末1つで操作できる。また全サブシステムの画面・操作に統一感を持たせることで、高いユーザビリティを備えている。



図1. Birdstarの各サブシステムのメイン画面

図1は、Birdstarの各サブシステムのメイン画面を重ねた図である。統一的な構成として、左上にロゴ、上部に各種ステータス表示、左に各種機能を開くアイコンがある。

## 4. 新機能と開発経緯

本稿では、まず、開発の全体を紹介し、次にシステム開発で大きな課題であった“テレメトリ処理の課題と対策”そして“ユーザビリティの向上”について述べる。理想的なウォーターフォール開発プロセスであれば、開発仕様の特定は要求分析の段階で完了するべきである。しかしながら、このシステムの開発ではそれは困難であった。また、この状況は一般的になっていて、対応策が重要な課題となっているものである。

### 4.1 開発の全体

この開発は、当社衛星向け機能のベースから、海外メーカー製衛星の管制を行うシステムを、COTS(Commercial Off The Shelf)品である衛星モジュール・計算機・ネットワークなどのインテグレーションを含めて構築することであり、受注から納品までのおよそ17か月で行われた。ソフトウェア開発の観点で分類すると次の4つのフェーズに分けることができる。

第一フェーズ(約4か月)では、衛星メーカーから衛星仕様に関する文書が提供され、これを基に作成した衛星管制システム仕様書を作成し、顧客による承認を受けた。ただ、この段階で当社と衛星メーカーが直接会話をすることはなく、ドキュメント及び当社が契約した衛星コンサルタントからの情報だけで衛星管制システムの設計を行った。

第二フェーズ(約6か月)では、衛星メーカーに当社衛星管制システムの仕様の開示・説明を行い、直接お互いの疑問点について明らかにするプロセスが始まった。

第三フェーズ(約4か月)では、衛星メーカーに衛星管制システムをパソコン1台に集約した簡易版を提供し、衛星メーカーで運用リソースの開発が始まった。また、顧客も衛星管制システムを実際に試用する機会が増えていった。

第四フェーズ(約3か月)では顧客施設に設備を構築、運用トレーニングの提供、顧客による運用リソースの開発が開始された。

次に、通常のウォーターフォールモデルでは第一フェーズで決定すべき仕様でありながら、仕様決定できなかった事項について、課題と対策について述べる。

#### 4.2 テレメトリ処理の課題と対策

##### 4.2.1 テレメトリ・コマンド方式

###### (1) 課題

衛星管制のリアルタイム処理を担うSMACの機能は大きくテレメトリ処理(衛星が送信する衛星の状態を受信して解釈する)と、コマンド処理(制御するコマンドを衛星に届ける)に分けられる。初めての衛星であったため、第一フェーズから次の対応を必要とした。この衛星のコマンド処理は、BirdstarがサポートしているCCSDS(Consultative Committee for Space Data Systems)と呼ばれる標準方式とは異なる方式であり、そこで従来のコマンド処理を流用する段階でコスト及び期間的な課題が発生した。一方、テレメトリ処理はインターフェースこそBirdstarがこれまでサポートしてきたCCSDS方式であるが、様々な点で基本的な考え方方が異なっており、早急な対応が解題となった。例えば、衛星の機器を特定するテレメトリのIDがこの衛星では冗長系で同一であった。また衛星内通信経路が複数あり、重複したIDのため地上では衛星機器を判別できなかった。一方でテレメトリID体系が複雑になると運用者の負担を増大することが問題となった。

###### (2) 対策

地上でのテレメトリID体系に工夫を加えることでこの問題に対応した。例えば衛星メーカーの定義したIDがAB1234の場合、経路を表す番号xを導入して経路ごとに0xAB1234を待機系のID、1xAB1234を運用系のIDなどテレメトリIDについてプレフィックスを付けて細分化した。衛星定義のIDであるAB1234は全ての経路から受信したデータ運用系テレメトリ(1xAB1234)を集約したデータとした。これによって、定常時は、細かな区別を運用者が意識する必要がないので衛星定義IDを使い、経路や系の区別が必要なときは、プレフィックス付きのIDでデータを区別できる。

##### 4.2.2 リアルタイム統計処理

###### (1) 課題

従来のBirdstarのテレメトリ定義フォーマットには、衛星メーカーが定義する工学値変換(衛星から受信した生データを運用者が理解しやすい形に変換すること)のうち、リアルタイム統計処理を定義するための仕様が含まれていなかった。

###### (2) 対策

この件に対しては、まず、Birdstarが別途使用している合成テレメトリと呼ぶ種類の定義フォーマット形式でその一部のセマンティクス(解釈)を変更することによってデータ定義インターフェースを実現した。インターフェースが流用

であることで、データ定義を行う衛星メーカーに想定外の追加を受け入れてもらった。

さらに課題であったリアルタイム統計処理の実現は、専用のサーバプロセスを追加することで実現した。Birdstarは基本アーキテクチャがクライアント・サーバ型であり、プロセス間インタフェースがフレームワーク化されているため、こうしたプロセスの追加といった拡張は容易に行えるような設計になっている。

リアルタイム統計処理は、第一フェーズでは想定できなかった機能であったが、設計チームの力が有限である以上、常に起こりえることであり、完璧な想定を第一フェーズで仕上げるよりも、ある程度の想定外を認めて、それに対応してゆく方がトータルのコストが低い場合もある。

#### 4.3 ユーザビリティ向上の課題と対策

第一フェーズではスクリーンキャプチャとその説明などによる仕様確定を行ったが、第二フェーズの終盤から実運用者が使用する機会が徐々に増えた結果、顧客からユーザビリティ改善に関する要望が多く出るようになった。今回の開発では多面的に検討した結果、要望のほぼ全てに何らかの形で対応した。

##### 4.3.1 形・色・音のカスタマイズ

###### (1) 課題

ユーザビリティ上の要望で最も項目数が多かったのが、グラフィカルユーザーインターフェース(GUI)周りの形・色・音に関するものであった。ユーザーの特徴や経験などによってユーザビリティの高さの形態が変わってくる。

形のカスタマイズで修正が多かったのは、文字表示数に関連するものであった。表示文字は時刻や“O.K.”などの画面ソフトウェアが定義しているものに加え、衛星メーカーが定めるテレメトリ定義やコマンド定義からのものがある。衛星メーカーが定義した表示すべき文字数が想定よりも大幅に多いものであった。

色に関する要望も少なくなかった。例えばイベント画面と呼ばれる情報の表示画面では、イベントの種類や、失敗か成功か又は正常か異常かといったイベントの内容による色分けを細かく行う必要があった。また、音声を運用者がカスタマイズしたいという要望もあった。

###### (2) 対策

文字表示数に対しては、設計段階で最大20文字としていたものの、最終的に100文字まで表示できるように画面レイアウトを変更した部分もある。

図2に色に対する対策後のユーザーインターフェースのイベント画面の例を示す。情報の種類ごと、同種情報でもその内容に応じて表示色を細かくカスタマイズ可能とした。さらに、画面の色をカスタマイズする仕組みもユーザーに開放した。これに伴い色カスタマイズリソース(設定ファイル)を運用環境に配信するためのツール整備も行った。なお、色のカスタマイズは、図に示したイベント画面だけ

従来の表示			
9	2017/10/15(月) 09:00:00.000	操作	その他のリモート用チェック (Normal)
4	2017/10/15(月) 15:00:00.000	操作	PLANNING TIME ADJUST
5	2017/10/15(月) 15:00:00.000	操作	実行時間と目標時間調整 (PLANNING TIME ADJUST)
6	2017/10/15(月) 15:00:00.000	判定	OK: DTTH01(DELTA TIME) < DTMAX 10 SEC
7	2017/10/15(月) 15:00:00.000	コマンド	[OK] DTTH01(DELTA TIME) < DTMAX 10 SEC
8	2017/10/15(月) 15:00:00.000	コマンド	[OK] DTTH01(DELTA TIME) < DTMAX 10 SEC
9	2017/10/15(月) 15:00:00.000	判定	OK: DTTH01(DELTA TIME) < DTMAX 10 SEC
10	2017/10/15(月) 15:00:00.000	操作	正規化リモート用PIU
11	2017/10/15(月) 15:00:00.000	操作	正常終了リモート用PIU

従来コード			
			↓
check AB1234==OK waitMax 5			
			waitMaxを使用したコード
			↓

図2. ユーザインターフェースのイベント画面例

ではなく、テレメトリプロット(グラフ)などについても同様に運用者によるカスタマイズ可能範囲が大幅に広がった。

管制システムでは、瞬間的に運用者に気づいてもらう必要があること(イベント)には、画面表示に加えて音声を鳴動させるのが一般的である。Birdstarではプリセットとなっている8種類の音声をイベントに関連付けて鳴動する仕組みがある。このシステムでは、色のユーザカスタマイズ同様、音声ファイルの内容を運用者が変更するためのツールも併せて整備した。

#### 4.3.2 ユーザマクロ機能の充実

##### (1) 課題

衛星の制御は個々のコマンド送信とテレメトリの判定を組み合わせた手順である。衛星制御手順は衛星メーカーが指定するが、衛星管制ソフトウェアはこうした手順を実行する仕組みを持っている。Birdstarではコマンドと判定等を論理的に並べたもの全体をPIU(Procedures and Instructions Unit)と呼んでいる。インタープリタで実行処理されるPIUには、コマンドを衛星に送り、それに伴ってテレメトリが変化するのを待って判定し、次に移るというパターンが多く登場する。従来のPIUでは一定時間(例えば5秒)の待機処理(sleep)を行い、その後にテレメトリを判定するという形で記述するのが一般的であった。このやり方で現実の衛星制御手順を全て記述できる。ところが顧客からこのやり方では、判定ロジックを個々に記述する必要があり、処理に必要な時間も長くなってしまうため、もっとスマートな方法を実現してほしいとの要望があった。これは設計者視点では見落としてしまう視点であった。

##### (2) 対策

テレメトリの判定には“waitMax”というマクロを付けることとなった。この指定によってテレメトリが条件を満たすかど

```

n=0
Block1
n=n+1
check AB1234==OK
if TRUE break
else
  if 5<n break
  sleep 1
  goto Block1
end

```

従来コード

```

check AB1234==OK waitMax 5
waitMaxを使用したコード

```

図3. PIUのユーザマクロ機能waitMax

うかの判定を最大で指定された時間だけ待機させる処理が組み込まれる。これによって、判定ロジックの記述が不要となり、しかもテレメトリが所望の値に変化した段階で判定が完了するため処理にかかる時間も短くすることができた(図3)。

これは、カスタマイズの域を超えて要望に取り組むことでより良い新機能を見つけることができた例であった。

## 5. む す び

本稿では、海外製衛星に適用した衛星管制システムについて述べ、このシステム向けのソフトウェア開発プロセスについての事例について述べた。衛星の仕様は当社衛星とは多くの点で異なっていたが、Birdstarの基本機能と非互換な改造はなく、全体的には従来の機能を活用して新しい衛星に対応するシステムを構築することができた。衛星が変わったことで入れ替えられた機能モジュールはなく、これについては、Birdstarの新規開発当初の基本的な設計の先見性によるところが多い。海外製衛星に初対応できたことは、今後拡販していく上でのマイルストーンとなるだろう。

機能の変更・追加の必要性が開発の中盤以降に特定された事例を述べたが、ユーザビリティ改善としてそれらは現実的には避けられなかった。一方で、開発の後期にも課題が発生することをあらかじめ折り込み、ソフトウェア開発で一般的になりつつあるアジャイル開発の手法を使用し、積極的に課題に対応することで得られた成果もあった。衛星運用の専門家であり経験豊富な顧客が徐々に感じた要求を取り込むことで、今までにない視点から見直すことができ、Birdstarのユーザビリティは確実に向上した。設計審査会での設計どおりに開発されたならばこのような進化はなかった。今回のシステム開発では、顧客の要求変化や追加は対応しなくてはならないという以上に、変化に前向きに対応することがより高い品質、ひいては、顧客の満足につながることを感じた開発であった。

## 参 考 文 献

- 三菱電機(株)ホームページ：ひまわり7号(MTSAT-2)  
<http://www.mitsubishi-electric.co.jp/society/space/satellite/observation/mtsat2.html>

# 新衛星機器生産工場の稼働と衛星機器事業の展望

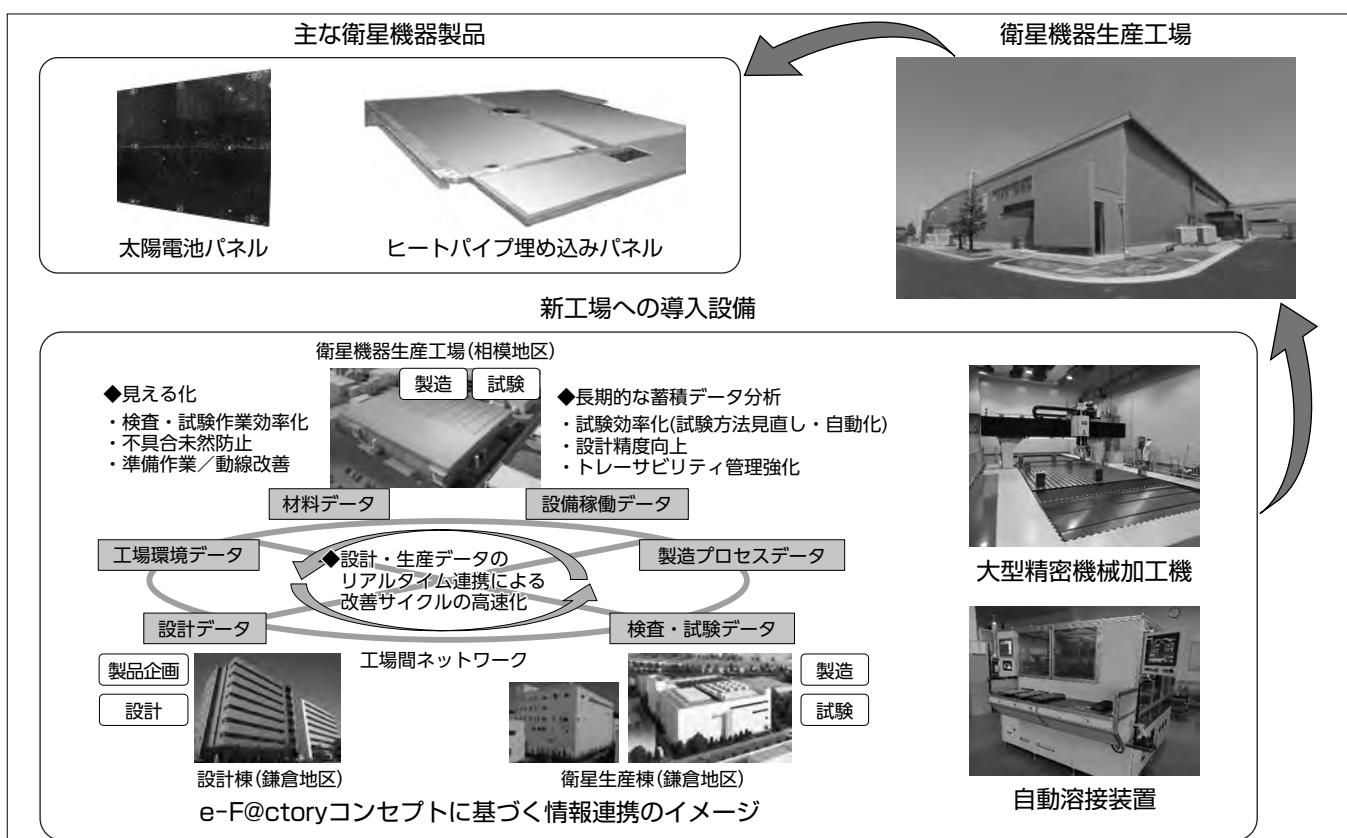
竹谷 元\* 下平久代\*  
大川義幸\*  
田島範一\*

*Operation of New Factory for Production of Satellite Equipments and Prospects of Satellite Equipment Business*  
Hajime Takeya, Yoshiyuki Okawa, Noriichi Tajima, Hisayo Shimodaira

## 要旨

三菱電機は、太陽電池パネル、ヒートパイプ埋め込みパネル、衛星構体パネル等の衛星機器を鎌倉製作所相模工場で生産し、自社の衛星に搭載するほか海外衛星メーカーにも供給するなど、人工衛星関連事業を国内外で展開している。近年では、衛星利用の拡大に伴う衛星機器の需要の増加と競争の激化から、これまで積み重ねてきた高い品質力に加え、コスト低減、工期短縮も強く求められている。一方、衛星システムへの電気推進の利用拡大や、大電力が必要なHTS(High Throughput Satellite)へ対応するため、衛星機器も大電力化に対応する必要があり、太陽電池パネルやヒートパイプ埋め込みパネルの大型化が求められている。当社は、これらのニーズに対応するため、相模工場内に新たに“衛星機器生産工場”を建設し、2017年10月から

稼働を開始した。これによって部品の製造から各種パネルの製造・試験までを一貫して行う体制を構築した。新工場には、大型パネル生産に向け、大型精密機械加工機や三次元測定機、大型熱硬化炉等を新たに導入した。また、コスト低減、工期短縮施策の一環として自動溶接装置などの自動生産設備も導入した。さらに、当社のFA統合ソリューション“e-F@ctory”コンセプトに基づくIT技術を導入し、改善サイクルを高速化し、工期短縮、コスト低減、品質向上を推進する。これらの施策によって、生産能力を従来比最大2倍に増強し、衛星システムメーカーとしての競争力強化を図るとともに、衛星機器事業の発展と衛星関連事業全体の拡大に貢献していく。



## 新衛星機器生産工場の特徴と主要製品

新工場では、太陽電池パネル、ヒートパイプ埋め込みパネル・衛星構体パネルなどの衛星機器を生産する。大型パネルへ対応した大型精密機械加工機や、自動溶接装置などの自動生産設備を導入し、さらに各種改善サイクルを高速化し、工期短縮、コスト低減、品質向上を推進するためe-F@ctoryコンセプトに基づくIT技術を導入した最新の工場である。

## 1. まえがき

当社は、人工衛星に搭載される太陽電池パネルを始めとする衛星機器を鎌倉製作所相模工場で生産し、自社の衛星に搭載するほか海外衛星メーカーにも供給するなど、人工衛星関連事業を国内外で展開している。しかし近年は、衛星利用の拡大に伴う衛星機器需要の増加や競争の激化から、衛星機器には極めて高い品質だけでなく、コスト低減、工期短縮も強く求められる状況にある。そこで今回当社は、これらのニーズへ対応するため、相模工場内に、新たに“衛星機器生産工場”を建設し、2017年10月から稼働を開始した。**図1**に工場の外観を、**表1**に概要を示す。

新工場は、大型精密機械加工機や自動溶接装置などの自動生産設備導入で、生産能力を従来比最大2倍に増強するとともに、これまで相模工場内に点在していた製造・試験エリアを集約することで、部品の製造から各種パネルの製造・試験までを一貫して行う体制を構築している。また、生産性向上のため、e-F@ctoryコンセプトに基づくIT技術を積極的に導入している。

本稿では、まず新工場で生産される主な製品として、太陽電池パネル、ヒートパイプ埋め込みパネル、衛星構体パネルについて述べ、次いで新工場とその新規導入設備の特徴、最後に衛星機器事業の展望について述べる。

## 2. 新工場で生産される主な衛星機器

### 2.1 太陽電池パネル

太陽電池パネル(Solar Array Panel : SAP)は、人工衛星の搭載機器へ電力供給をする製品である。常に放射線や紫外線にさらされ、かつ60~-170°Cの温度変化が加わる過酷な宇宙環境で運用されるが、運用期間中は確実に電



**図1.** 鎌倉製作所相模工場内に新設された衛星機器生産工場

**表1. 衛星機器生産工場の概要**

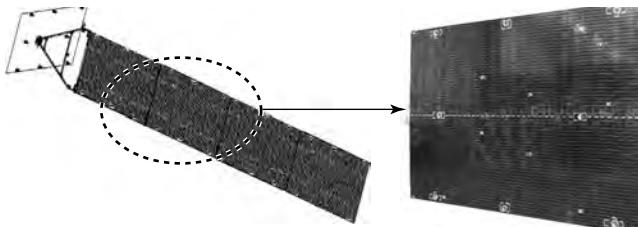
所在地	神奈川県相模原市中央区宮下一丁目1番57号
建築面積	約7,430m <sup>2</sup> (延床面積: 約9,940m <sup>2</sup> )
構造	鉄骨造、2階建、高さ11m
主な生産品目	太陽電池パネル、衛星構体パネル、アンテナ、ほか
竣工・稼働開始年月	2017年5月竣工、2017年10月稼働開始
環境・省エネルギー対策	太陽光発電システム(発電容量56kW)、ヒートポンプ式空調システム、LED照明(約1,000台)、電力設備監視システム

力供給を継続できる寿命と、高性能、高品質、及び軽量化が要求される。図2に代表的なSAPの外観を示す。図に示すように、SAPは主に構造部であるサブストレート(SuBStrate : SBST)と太陽電池セルにカバーガラスが接着されたCIC(Coverglass Integrated Cell)，及びこれらを電気的につなぐインターロコネクタから構成されている<sup>(1)</sup>。前述のような厳しい要求に答えるための技術として、SBSTは、高剛性のCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic : 炭素繊維強化プラスチック)材料によって製造された、厚さ約0.1mmの表皮材と低密度のハニカムコア材を組み合わせたサンドイッチ構造とすることで、高剛性、かつ世界最軽量級の質量を達成している。また金属部品であるインターロコネクタには、人工衛星の運用期間中の環境温度変動から、材料の熱膨張差によって生じる熱応力が数千サイクル負荷されるが、この環境下でも熱応力で破壊しない高い信頼性が求められる。このため、まずインターロコネクタ形状は、詳細な熱応力解析と部品に対する熱サイクル試験を繰り返すことで慎重に決定され、さらに、冗長系を持たせる設計とすることでインターロコネクタの破断による発電力低下を防いでいる。また製造時でも、インターロコネクタは厚さ0.1mm以下の非常に薄い金属箔(はく)をエッティングで加工し、溶接性を上げるためにめっき処理を行った後に曲げ加工でストレスリリーフを設けているが、傷や凹(へこ)み、欠陥があるとそこから破断が起こることから、製造プロセスを厳しく管理している。

このように多くの厳しい製造要求が課せられるSAPは、大型の複合材の高精度成形・加工技術や、CICの量産技術が必要となる。当社のSAPは近年では打ち上げられた全商用衛星の約30~40%のシェアを占める世界的に信頼されている製品であり、これまで1,000枚以上の製造実績がある。現在、衛星の大電力化が進行しつつあり、太陽電池パネルには大電力化のための大型化が求められる状況にある。3章で述べる新工場では、製造技術の改善に加え、大型化への対応を行った。

### 2.2 ヒートパイプ埋め込みパネル

ヒートパイプ埋め込みパネル(HPP)は、搭載機器の発熱をパネル面内に均一に広げる機能を持つ構造体であり、アルミ表皮、アルミコア材を用いたハニカムサンドイッチパネルに多数のヒートパイプが縦横に埋め込まれたパネル



**図2.** 太陽電池パネル



図3. ヒートパイプ埋め込みパネルの外観

構造である<sup>(2)</sup>。図3に外観を示す。ヒートパイプ外付け型と異なり、埋め込むための高度な成形技術が必要であるが、搭載面に凸凹がなく機器の配置に制約がないことが特長である。

当社はこれまでに、国内外衛星向けに30年以上のHPP事業経験があり、国内外の衛星100機以上の搭載実績がある。海外市場でのシェアは約25~35%で推移している。またパネルとしては累計900枚以上が軌道上に打ち上げられている。これに加えて、社内でヒートパイプの設計・製造・試験が可能なことから、品質・工程管理面に強みがあり、製品サイズもこれまでの最大5.5m級から、新工場の大型設備導入によって最大7mのパネルまで製造可能となった。

### 2.3 衛星構体パネル

衛星構体パネルは、衛星の箱型構造を構成するパネル部材であり、打ち上げ時に搭載機器を支持し、軌道上での寸法安定性が要求される。表皮材には熱膨張の小さなCFRPが主に採用されており、1980年代半ば以降、海外への納入実績も多数ある。これらのパネルについても大型設備導入によって7m級のパネル製造が可能となっている。

### 3. 新工場と新規導入設備の特徴

衛星機器需要の増加から、2018年度以降のSAP、HPP、衛星構体パネル生産数の増大が見込まれており、生産能力確保と合わせ生産性向上が必要となった。今回、新たに衛星機器生産工場を建設することで必要な生産スペースを確保するとともに工場間移動の排除や自動機などの新生産設備導入、e-F@ctory コンセプト(PDCA(Plan Do Check Action)サイクルを高速化できるIT等の技術活用によって、改善効果を最大化し、トータルコストを削減する考え方導入による生産性向上を企図した。

#### 3.1 新工場

新工場の計画時には、SAP・HPP・衛星構体パネルそれぞれの製造工程で製品の流れや作業者の配置、リードタイム等を分析し、ムダ作業を排除し、必要な作業スペースを算定するとともに、作業時に要求される天井高さやクレーン等の付帯設備を調査して工場仕様に反映した。物流動線計画では、図4に示すように前工程となる既存の衛星機器材料工場と隣接させ、専用の渡り廊下を設けて屋外移

衛星機器生産工場(新工場)

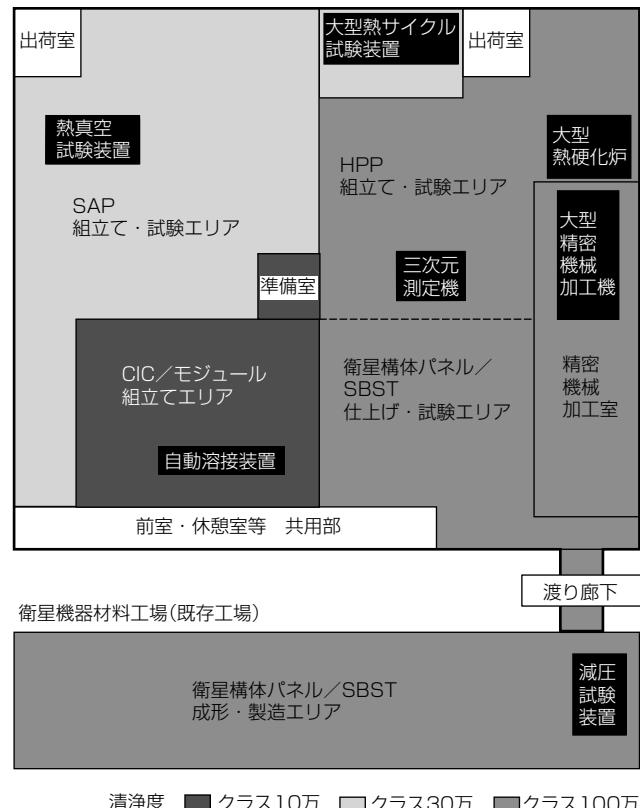


図4. 新工場のレイアウト

動を廃止することや、大型製品の取扱いが容易に行えるよう柱間隔を15mと大きくし、作業性の向上を図った。また、異なる3つの製造環境に対応したエリア(クラス10万、30万、100万)の清浄度管理では、エポキシ系接着時の汚染原因となるシリコーン系の雰囲気がほかの製造エリアに入り込まないよう給排気バランスを検討し、製造環境が製品品質へ悪影響を及ぼさないようにした。さらに精密機械加工室では、室温の変化による加工精度への影響を避けるため、清浄度管理に加えて室温の変化を±1°Cに抑えるとともに、装置や製品へ当たる風速を考慮して設計した。

#### 3.2 新規導入設備

衛星の高機能化に伴い衛星の電力消費量は増加傾向にあり、客先・市場動向からはSAP及びHPPの大電力化(大型化)が要求されている。新工場建設とともに製品の大型化に対応するための製造・試験設備を計画した。図5に示す7m×5mの大型パネルを高精度で加工できる大型精密機械加工機や、寸法・平面度を測定できる三次元測定機、HPPの成形や部品接着後の硬化を行う大型熱硬化炉、製品のスクリーニングを行う大型熱サイクル試験装置を新たに導入した。

また、従来の生産能力を最大2倍に向上させるため、図6に示す太陽電池のインターフォネクタを自動で溶接する自動溶接装置の導入や、衛星構体パネルへ部品を自動で接着する自動充填装置など、多点数の繰り返し作業や人手依存作

- ・各種パネルの穴あけや外形加工を高精度に加工する装置
- ・将来の大型化に対応し、7m×5mの加工が可能



図5. 大型精密機械加工機

- ・太陽電池(CIG)にインタークネクタを自動で溶接する量産対応装置



図6. 自動溶接装置

- ・人工衛星打ち上げ時の減圧環境を模擬し、パネルの成形品質を確認する装置
- ・減圧能力  
1.0気圧→0.2気圧/40秒(打ち上げ時の2倍速相当)



図7. 減圧試験装置

業を自動化し、省力化・品質向上を図った。

新工場では、衛星機器の性能・品質を保証するため各種試験も実施しており、SAPの宇宙空間での品質確認を行う熱真空試験装置に加え、図7に示すような衛星打ち上げ時に発生する大気圧から真空状態への急激な変化を模擬し、パネルの成形品質を確認する減圧試験装置を導入した。なお、この試験装置は大型パネルを試験できる国内唯一の設備である。

### 3.3 e-F@ctoryコンセプトに基づく生産性向上

CFRPに代表される複合材製品は、材料やプロセス個々の基準値を満たしても材料の組合せや製造プロセス内のばらつきによって製品品質が安定しにくい課題がある。そこで新工場では、図8に示すようなe-F@ctoryコンセプトに基づいたIT化を図ることで、日々の管理指標である能率や仕掛け量に加え、製造プロセス管理項目や品質管理等の状況を見る化し、蓄積したデータの分析を行えるようにする。

具体的には、受入れ時の材料の素性・有効期限、製造・試験工程での加工・試験条件、中間検査結果、工場環境(温湿度等)などの各種データを蓄積しながら、品質や製品特性との相関性を分析したトレンド管理を行う仕組みを構築する。さらに今後は、装置稼働状況、現場の作業スペースの占有状況や進捗状況を加味した生産計画の作成を支援し、工場全体での生産最適化を狙っている。この工場で取

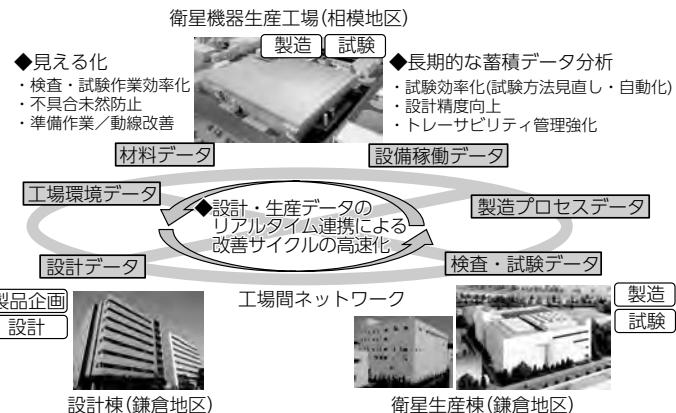


図8. e-F@ctoryコンセプトに基づく情報連携のイメージ

得した情報は、工場間ネットワークを介して鎌倉地区にある設計棟や衛星生産棟とも接続し、設計・生産データのリアルタイム連携を行うことで改善サイクルの高速化を図り、工期短縮、コスト低減、品質向上に寄与していく。

### 4. 衛星機器事業の展望

世界の衛星システムメーカー各社では、競争力強化のため、衛星プラットフォームのリニューアルを進める時期となっており、衛星システムの低コスト化と、電気推進の採用拡大や大出力搭載機器の増加に基づく大電力化の開発が進められている。このため衛星機器製品に対しても、高品質だけでなく低コスト化と工期短縮や、大電力化に対応した製品の投入が必須になっている。これらのニーズに対応するため、新工場を立ち上げ、大型パネル専用ラインの構築、装置の自動化、e-F@ctoryコンセプト導入に伴うIT化等の生産改革を進める。すなわち、①生産スペースの確保と動線の改善による生産性の向上、②自動溶接装置導入など装置の自動化による量産化、③SAP、HPPとともに大電力化に対応する7mサイズ大型パネル向け生産設備・試験装置・専用生産ラインの構築、④IT化による各種改善サイクルの高速化を実現して、生産性及び製品品質の維持・向上を継続して発展させる。これらの生産改革によって、顧客の多面的なニーズへの対応力強化だけでなく、当社の衛星システムメーカーとしての競争力強化に貢献していく。その結果、衛星関連ビジネス全体のリノベーションに遅れることなく、衛星機器事業の発展と、衛星関連事業全体を拡大していく。

### 参考文献

- (1) 桜井也寸史, ほか:輸出用衛星搭載コンポーネント, 三菱電機技報, 83, No.3, 191~194 (2009)
- (2) 小林 孝, ほか:人工衛星用ヒートパイプのロバスト熱性能・質量最適化設計, 日本機械学会, 第12回設計工学・システム部門講演会講演論文集, No.02-31, 194~197 (2002)