

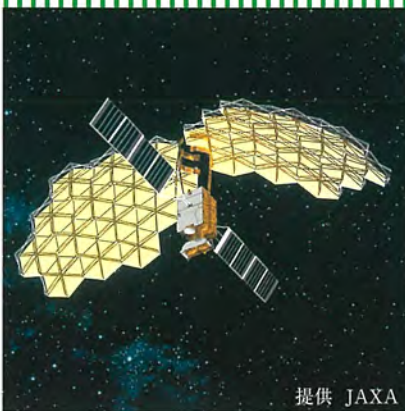
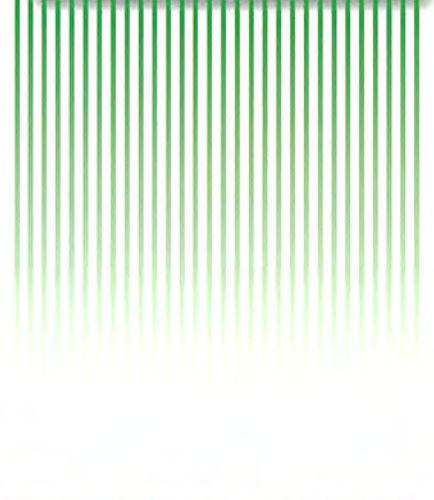
MITSUBISHI

三菱電機技報

Vol.79 No.8

2005 **8**

特集 「利用される宇宙」



提供 JAXA



目 次

特集「利用される宇宙」

利用される宇宙 1
岡崎健也

利用される宇宙産業化構想 2
永島敬一郎

位置情報ソリューションサービス“LBS” 7
浜津享助・澤本 潤・岩橋 努

高精度GPS測位サービス“PAS” 11
平野 剛・白井澄夫・島 光秀

位置時間証明情報提供サービス“COCO-DATES” 15
富樫昌孝・大野次彦・宮崎一哉・青柳秀典・小山幸春

静止衛星用標準バス“DS2000”のシステム技術 19
水溜仁士・野村高嗣

温室効果ガス観測技術衛星“GOSAT” 23
長谷川 光・宮崎洋彰・駒形文博・岡田賢二・石津忠明

宇宙ステーション補給機“HTV” 27
津屋直紀・名取直幸

超高速インターネット衛星“WINDS”搭載
Ka帯アクティブフェーズドアレーアンテナ(APAA) 31
北尾史郎・針生健一・白松邦昭

衛星搭載用機器 35
森田直哉・石原 隆・郷内敏夫・大塚正人

注入ドーピングによるGaNトランジスタの高性能化 39
大石敏之・吹田宗義・南條拓真・阿部雄次

フォーメーションフライト 43
吉河章二・小山 浩

小型衛星への取り組み 47
小山 浩・武田宗久・吉河章二・尾崎毅志・宮崎守泰

分散型宇宙太陽光発電システム“Solar Bird” 52
苗村康次・水野友宏・三神 泉・松岡知江・大塚昌孝

東京電力(株)向け新衛星通信システム 56
石井克幸・白井 忠・石川佳史・菅林 剛・高田淳一

衛星開発における品質信頼性向上活動 61
稲川美之

Space Solutions—Safe and Wealthy Society Solved by Space Utilization—
Space Solutions—Safe and Wealthy Society Solved by Space Utilization—
Kenya Okazaki

Space Industrialization Plan for Business Applications
Keiichiro Eishima

Location Based Solution Services “LBS”
Kyousuke Hamazu, Jun Sawamoto, Tsutomu Iwahashi

High-accuracy GPS Augmentation Service “PAS”
Takeshi Hirano, Sumio Usui, Mitsuhide Shima

Correct Coordinate and Date Stamp Service
Masataka Togashi, Tsugihiko Ono, Kazuya Miyazaki, Hidenori Aoyagi, Yukiharu Koyama

Features of the DS2000 Bus System for Geosynchronous Satellite
Hitoshi Mizutanari, Takatsugu Nomura

Greenhouse Gases Observing Satellite“GOSAT”
Hikaru Hasegawa, Hiroaki Miyazaki, Fumihito Komagata, Kenji Okada, Tadaaki Ishizu

H-II Transfer Vehicle “HTV”
Naoki Tsuya, Naoyuki Natori

Ka-band Active Phased Array Antenna(APAA) for Wideband InterNetworking engineering test and
Demonstration Satellite “WINDS”
Shiro Kitao, Kenichi Harui, Kuniaki Shiramatsu

Satellite Onboard Equipment
Naoya Morita, Takashi Ishihara, Toshio Gonai, Masato Otsuka

High Performance GaN Transistors with Ion Implantation Doping
Toshiyuki Otishi, Muneyoshi Suita, Takuma Nanjo, Yuji Abe

Formation Flight
Shoji Yoshikawa, Hiroshi Koyama

MELCO Activities for Futuer Small Satellites
Hiroshi Koyama, Munehisa Takeda, Shoji Yoshikawa, Tsuyoshi Ozaki, Moriyasu Miyazaki

Formation Type Space Solar Power Station —Solar Bird—
Koji Namura, Tomohiro Mizuno, Izumi Mikami, Tomoe Matsuoka, Masataka Ohtsuka

New Satellite Communication System for TEPCO
Katsuyuki Ishii, Tadashi Shirai, Yoshifumi Ishikawa, Tsuyoshi Sugabayashi, Junichi Takada

Reliability & Quality Improvement Activity for the Satellite Development
Yoshiyuki Inagawa

特許と新案

「歪補償回路」「ケーブル巻取り装置」 65

「宇宙太陽光発電方法, そのシステム, 発電衛星,
制御衛星及び電力基地」 66

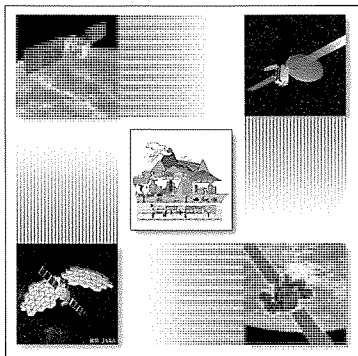
表紙

利用される宇宙

既に宇宙は、各方面で国民生活に欠かせないインフラになっている。

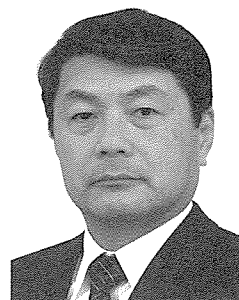
当社は、そのインフラを利用した事業として、PAS(測位サービス)やCOCO-DATES(“位置”/“時間”情報を証明するサービス)を展開している。さらに、防災・セキュリティ・交通等の分野でも人工衛星を利用した様々なソリューションを提供し、安全で快適な社会の実現を目指している。

これらを支える技術は過去30年以上にわたる豊富な経験を基に国内のみならず海外の衛星プログラムに参画し、衛星システム及び衛星搭載機器を製造・供給したことで培われた。その衛星プログラム数は国内外合わせて300以上に及ぶ。



利用される宇宙

Space Solutions—Safe and Wealthy Society Solved by Space Utilization—



岡崎健也
Kenya Okazaki

宇宙は気象・通信・放送などの面で既に国民生活に欠かせないインフラとなっており、昨今の大規模災害や地球環境観測、テロや防衛といった安全保障の観点からも、その活用を更に充実させる時期となっている。日本の宇宙開発は、1990年の日米衛星合意以降実利用ではなく研究開発型の衛星にシフトしていたが、今年度のJAXA(宇宙航空研究開発機構)長期ビジョンで示されたように“安全で豊かな社会の実現に貢献する”と謳(うた)い、宇宙利用への方向転換を目指している。産業界としても、“安心・安全”や“ユビキタス社会”というキーワードで表される事業の手段として、“利用される宇宙”を推進しなければならない。宇宙利用の主要機能である放送・通信、リモートセンシングに準天頂衛星システムによる“測位”という新規軸を加えてより広い事業分野に適用し、宇宙の産業化を推進していきたい。

宇宙開発は、リスクとコストが非常に高いにもかかわらず、そこから生み出される利益が市場価格で見れば極めて低い事業である。したがって、産業化のためには、国家インフラとして省庁による利用事業を推進するとともに、ユビキタス社会構築に有効なインフラとして商用ビジネスを開拓していく必要がある。衛星メーカーとしても、徹底した標準化や民生部品も活用して共通衛星バス(静止用/周回用)を進化させ、商用衛星にもスピノフすることにより打ち上げ回数を増加させて高品質かつ低コストの衛星を開発しなければならない。

省庁による“利用される宇宙”の最有力分野は、安心・安全を含む広義の安全保障である。大規模災害に対する危機管理システムの再構築や防衛力の質的向上には、宇宙利用によるソリューションが有効かつ有益である。三菱電機では、“VI(Victory)戦略”として、災害危機管理や防衛の両分野に宇宙を活用するデュアルユースの事業開拓に取り組んでいる。同報性・広域性を持つ通信衛星、全地球を網羅

しつつ定期的な同一地域監視を可能にするリモートセンシング衛星、高精度位置同定を可能にする準天頂衛星システムなどの測位衛星、柔軟にミッション搭載できる小型衛星の打ち上げ手段など事業化を推進している。

一方、商用ビジネス分野における利用される宇宙は、“AD(ADvance)戦略”として、地上と宇宙を補完的に、又は冗長的にシームレス接続したシステムソリューション事業を開拓している。PAS(Positioning Augmentation Service)では、GPS(Global Positioning System)衛星による位置情報に対し補正データを配信して精度向上サービスを提供し、準天頂衛星がサービスインすれば常に天頂においてGPS衛星の補完・補強機能を果たす。また、“COCODATES(Correct coordinates and date stamp)”では、食品トレーサビリティ等の実現のために、上記位置情報と気象衛星画像による時間証明とを融合したサービス事業を推進している。

宇宙利用のこれからのキーワードはLBS(Location Based Services)である。高精度の三次元地図上でリアルタイムに位置を測定し、その時間・位置に必要で有用な情報/サービスを提供するものである。上述した官公需及び民需双方の市場において、このコンセプトを是非とも生かして新規事業を創出していきたい。

日本の宇宙関連予算は、国家財政の制約から漸減状況にあり、米国の1/10、軍関係の予算も勘案すると1/15の状況にある。来年度からの第3期科学技術基本計画において、宇宙開発利用を国家基幹技術として位置付けて予算を獲得していかなければならない。準天頂衛星システムはその試金石であり、事業化を強力に進める所存である。そして、“見果てぬ夢だった宇宙を新しいインフラエリアとして開発利用する”を推進するので、今後ともご支援・ご協力をよろしくお願い申し上げたい。



永島敬一郎*

利用される宇宙産業化構想

Space Industrialization Plan for Business Applications

Keiichiro Eishima

要旨

時代は“地球にやさしい活動”と“持続可能な社会”の実現へと流れを転換している。18世紀から19世紀にかけてイギリスに始まり、欧州諸国に普及した産業革命以来約250年間で作り上げてきた社会構造を一気に変革し、地球環境問題などを解決する時期に直面している。地球の生態系など様々な分野に影響が出始めていることから、人類の生存基盤を揺るがす大問題として早急な対策が求められている。

さらに、日々の生活においては、より安全に安心して日常生活を営むことができる社会基盤を世界規模で作り上げることが切望されている。特に、自然災害の監視と被害の最小化支援システム及び人の行動状況を含む交通機関のより安全な運行管理システム等の早期実現が目ざされている。

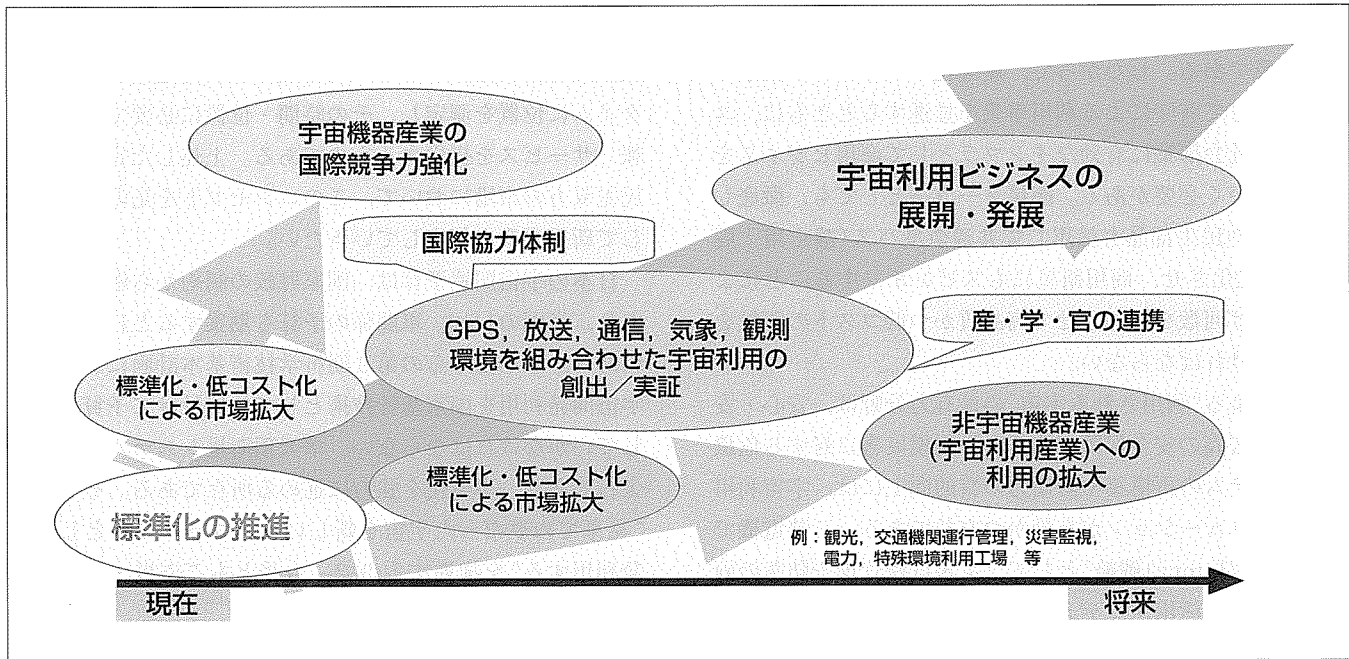
上記の課題を確実に解決するためには、地球規模で各国が協力して対応する必要がある。そのためには、地球全体規模から数m、数cm単位で地球の状況を把握して、将来の地球環境予測に基づき解決策を講じること及び交通機関のより安全な運行システムが不可欠である。この手段として宇宙技術を利用することが有効で、この分野の新しい産

業化が期待されている。

新しい産業の創出に向けて、観測衛星、測位衛星、通信放送衛星を連携して利用できる経済的社会基盤を構築することが出発点となる。この社会基盤の恩恵を受け、特に、土地利用、農林水産物生産、娯楽、旅行、通勤通学等の生活に密着した活動を地球にやさしい環境で営むとができるような産業構造再編への可能性が生まれてくる。また、宇宙技術の利用は、最近頻繁に発生している自然災害に対しても、その予防及び被害の最小化を可能にする。

地球にやさしい活動、持続可能な社会は地球上のすべての国々の共通認識に基づき実現することが重要である。この認識を確実なものにするための一つの手段として、国際標準を整備し、地球環境を悪化させない経済活動に基づく貿易を促進することが重要な要素となる。

時代の転換期にふさわしい宇宙技術を利用した経済的社会基盤に基づく新しい宇宙技術利用モデルと関連する国際標準化の進め方について、一つの構想を現状の技術動向を踏まえ以下に述べる。



宇宙技術利用における産業創出のトレンド

GPS (Global Positioning System)の位置情報利用にかかわるISO/TC204及び地理情報分野のISO/TC211の国際標準化活動と宇宙関連のISO/TC20/SC13(宇宙データ・情報転送システム)/SC14(宇宙システム及び運用)の国際標準化活動の密接な連携により、宇宙技術を利用した産業の創出を加速する。この産業化には、宇宙分野・地上分野及びサービス形態の3つの要素を統合したシステムに関連するモデルを志向し、安全で快適な観光旅行、交通機関の運行管理、災害監視、電力、特殊環境利用工場等の実現を目指す。

1. ま え が き

最初の人工衛星は、1957年に軌道に投入された旧ソ連のスプートニクである。それ以来、この宇宙に関連する技術は、幾つかの国、特に米国及び旧ソ連の国威発揚のために戦略的目的として精力的に開発された。最初の人工衛星の成功から約50年を経た現時点において、この宇宙技術は、開発から利用へと大きく転換している。

宇宙利用に関連する技術は、国の独立の証(あかし)として、地球環境を保全する経済的な活動の実現として、さらに、科学技術の進歩の源としてその存在がますます重要性を増している。

今日、様々な人工衛星が地球の周囲に存在し、それを利用した衛星システムが世の中に数多く普及している。資源探査・環境モニタなどの地球観測衛星、カーナビゲーションで知られる測位衛星及び気象・通信・放送などの通信放送衛星等、宇宙技術はいまや生活に不可欠な社会情報基盤となっている。この3種類の衛星の特長は以下のとおりである。

- (1) 地球観測衛星を利用した地球画像データは土地利用計画、農作物の収穫量予測、森林資源の評価、自然災害の予測と被害の最小化及び生態系の変化等の監視に採用され、持続可能な社会を実現するための役割を担っている。
- (2) 測位衛星を利用したナビゲーションシステムは、広い範囲のアプリケーションに適用できる。例えば、乗り物(航空機、列車、救急車、タクシー等)の業務管理のために使用され、特に、輸送システムの安全で規則正しい運行の実現等、位置情報をベースにしたサービスに期待されている。
- (3) 通信放送衛星は、デジタルマルチメディアサービス(テレビ、インターネット等)を提供するために通信放送産業に重要な役割を果たしている。特に、地上の通信及び放送の設備が整備されていない所ではその威力が発揮されている。

昨今注目されている地球環境の改善の実現と宇宙産業化構想を創出するには、上述した3種類の衛星の役割を連携させたシステム技術と個々の技術の国際標準を設定することが不可欠である。本稿では、地球環境の現状、宇宙産業化と国際標準化の動向及び利用される宇宙産業化構想の具体例について述べる。

2. 宇宙産業の範囲と現状の構造規模

宇宙産業化と言ってもその範囲は広範囲であり、今までに、様々な立場で、数多くの人々が論じている。例えば、①宇宙開発事業が産業として成立すること、②品質面、価格面で国際競争力のあるロケット及び衛星を開発・生産し、国の機関の利用(官の需要)だけではない商業的な

利用(民間の需要)を自立的に確立すること、③宇宙空間を利用した新しい産業を創造すること等の議論がある。

今回の“宇宙産業化構想”を検討するに際し、ロケット、人工衛星に搭載する宇宙機器に関連する産業化の側面だけではなく、宇宙利用の観点を重視し、広くユーザー産業界(特に、日常生活の効率化、安全・安心化に注目)に宇宙技術が利用されることに主眼を置く。

宇宙産業の範囲は、図1に示すように、人工衛星、ロケット等及び地上施設等の製造を行う“宇宙機器産業”、衛星通信・放送等の宇宙インフラを利用してサービスを提供する“宇宙利用サービス産業”、カーナビゲーションシステムや衛星携帯電話端末等の民生用機器を製造する“宇宙関連民生機器産業”及び“宇宙利用サービス産業”により提供されるサービスを利用し新たなサービスを提供する“宇宙ユーザー産業群”の4つのグループで構成される。

それぞれの産業の売上規模は宇宙機器産業：3,362億円、宇宙利用サービス産業：5,765億円、宇宙関連民生機器産業：7,458億円、ユーザー産業群：2兆1,873億円である。自動車産業界の上位8社の売上規模の合計は約43兆円と言われており、宇宙産業界の合計の売上げは自動車産業の1/11で、ユーザー産業群を除くと1/26で、宇宙産業界の規模は極めて小さい。本格的な宇宙の産業化を目指すためには、最終的なユーザー産業群の規模拡大につながる宇宙利用のアプリケーションを考え出すことが重要である。

3. 地球環境の悪化状況

森林の伐採、化学物質による大気・海洋・湖沼・河川の汚染、自動車等による大量の二酸化炭素の放出による温暖化、フロンガスによるオゾン層破壊、人口増加等により、地球的規模で環境破壊が広がり、人類を含む生物全体の生存が脅かされている。主な状況は次のとおりである。

- 森林破壊
- 生物多様性の減少
- 海洋環境の悪化
- 気候変動(進行する地球温暖化)
- 酸性降下物

このような広域の地球環境問題を理解し対策を講じるためには、まず、その実体を十分調査する必要がある。地球規模の広い領域を頻繁に監視するには、地球観測衛星が最適で、陸域、水域、及び大気の物理的特性等をモニタし、

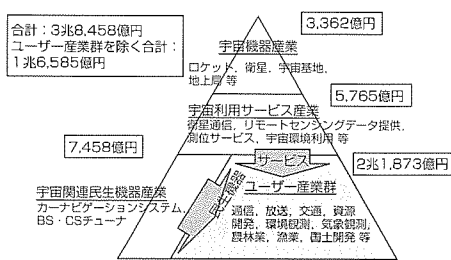


図1. 宇宙産業の構成及び規模⁽¹⁾

この結果に基づき地球環境破壊状況を評価し将来を予測し、対策を講じることが実行されているが、現状は必ずしも十分ではなく、世界各国が協力し対応することが検討されているが具体的な実行計画は今後に期待されている。

4. 緊急に解決すべき課題

地球環境の悪化状況として、3章に示した内容を含め、今後緊急に解決すべき課題は以下のとおりである。

地球規模で発生している自然現象として：

- 森林破壊
- 生物多様性の減少
- 海洋環境の悪化
- 気候変動(進行する地球温暖化)
- オゾン層破壊
- 酸性降下物
- 枯渇が懸念される水・資源・エネルギー

地域依存の人為的現象として：

- 安全を脅かす事故とテロ
- 交通機関のより安全な運行管理
- 急速に進む先進国の少子高齢化
- 後進国の人口増加と食料不足

上記には自然現象と人為的現象として区別して挙げたが、実態は相互に影響しあった結果として生じている現象が多い。宇宙技術を利用することにより、上記現象を地球全体規模から数m、数cm単位で地球の状況を把握して、将来の地球環境予測に基づき解決策を講じること及びより安全な運行管理システムの実現が可能である。

分解能1m程度で地球全体規模の地理情報の把握は観測衛星により可能であるが、衛星数量の関係で、リアルタイム性は困難な状況である。

一方、位置情報については、測位衛星用の受信機により、測位衛星からの電波が届く領域であれば、地球上どこでもリアルタイムで約10mの精度で把握できる。

上記の課題を解決する手段を具体的に検討し、実用化しているプロジェクト、デモンストレーションを完了し実用化に移るプロジェクト及び検討中のプロジェクトがある。次章以降にこれらのプロジェクトの現状について述べる。

5. 地球環境モニタの世界的動向

地球温暖化による砂漠化の急速な進展、水資源の不足、自然災害による被害などの危機を回避するためには、地球規模の諸現象について、正確かつ広範な規模で地球観測情報を取得し、流通させる必要性が認識され、地球観測サミット(Group on Earth Observations(GEO) : <http://earthobservations.org/>) が合計3回開催された。3回目は、2005年2月にブリュッセルで約60の国と欧州委員会、世界気象機関などの約30の国際機関が参加して開催され、今後

10年間の実施計画が設定された。その概要は次のとおりである。

- (1) 既存及び将来の人工衛星や地上観測などが連携した世界全域を対象とした包括的な全地球観測システムを今後10年間で構築する。
- (2) 国際調整の場として参加各国政府を中心とする地球観測グループを新たに設立し、事務局をジュネーブに設置する。

5.1 観測衛星による地球観測の現状

人工衛星による地球観測の特長として、低軌道の周回衛星では地球一周を約100分間で回り、一日に約15周地球を観測できることが挙げられる。すなわち、広域を瞬時に周期的に観測することが可能である。人工衛星の本格的な地球観測への利用は、米国がランドサット1号を打ち上げた1972年ごろから始まっている。代表的な衛星センサの空間分解能は、米国のランドサット衛星で30m、フランスのスポット衛星で20mとかなり粗く、きめ細かな森林の状況等を見るには無理があった。

冷戦の終結に伴い、1992年から衛星の性能に関する規制が緩和された。米国内の民間企業は、政府の認可を受けることで分解能1m程度の衛星を打ち上げ、データを自由に販売できることになり、農業等での利用は世界的な大きな流れとなっている。

我が国においては宇宙航空研究開発機構(JAXA)と環境省、及び国立環境研究所の共同プロジェクトによりGOSAT(Greenhouse gas Observing SATellite: 温室効果ガス観測技術衛星 : <http://www.satnavi.jaxa.jp/gosat/index.html>)を開発中で、温室効果ガスの濃度分布を観測することを計画している。

5.2 欧州の地球観測衛星計画

米国の反発で遅れていた京都議定書は今年2月に発効された。現在、欧州の各国は協力しあい、この取り決めを達成するため対策の検討を確実に進めており、従来の経済活動に反省が起きている。この反省は、衛星開発の計画にも現れている。GMES(Global Monitoring for Environment and Security)計画及びEarth Explorer計画を立ち上げ各種の地球観測衛星の打ち上げと長期的展望に基づき将来計画を設定している⁽²⁾。

衛星からの情報に基づき、海上における風力発電基地の最適場所を選定し、風力エネルギーを利用した電力の効率的生産に利用している(http://www.esa.int/export/esaSA/SEMORAYO4HD_earth_0.html)。

また、バッカスプロジェクトがEC委員会に支持され、フランス、イタリア、スペイン、ポルトガルの14の会社、研究所、及びワイン栽培者で組織され、衛星のデータを利用し、ワインの品質管理に適用しようとしている(<http://www.bacchus-project.com/>)。

6. 測位情報利用の世界的動向

位置情報サービスは米国のGPS衛星などを用いいろいろな分野で実現されている。大別すると次の3つに分類される。

- (1) 軍事目的
- (2) 公的利用：

国土地理院の電子基準点，測量，地殻変動観測，動物の行動パターン観測等

- (3) 民間利用：

カーナビゲーション，運送会社の車両管理，列車・船舶・航空機の運行管理，携帯電話利用，歩行者誘導，観光，農業等

6.1 測位衛星(GPS)による測位サービス

GPS利用で日常生活になくてはならないものになりつつあるカーナビゲーションは，1987年に商品化され2004年12月時点で約1,700万台が普及していると報告されている (<http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/index.html>)。

また，船舶の運行管理においても全面的にGPS利用に移行しつつある。さらに，航空機では，軍用機においては広く利用されているが，民間航空機においても本格的な利用のための準備が進められている。

民間航空機の航法システムは国際民間航空機関ICAO (International Civil Aviation Organization)が設定する国際標準方式に従って開発が進められている。現在，GPSを中心とした衛星航法システムが開発され一部運用されている。GPSだけでは不足する測位精度や信頼性を補強するために，日本付近にはMSAS (MTSAT-based Satellite Augmentation System)，米国付近にはWAAS (Wide Area Augmentation System)，欧州付近にはEGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)の整備が進められている。このうちWAASは，2000年から試験運用を開始し，2003年から運用されている。また，EGNOSについては，現在様々な試験が実施され，今年から来年にかけて本格運用が開始され，MSASについては，本年の2月にMTSAT (Multi-functional Transport SATellite)が打ち上げられ，試験運用が計画されている。

さらに，日本独自のアイデアで準天頂衛星システム⁽³⁾の計画がある。準天頂衛星システムは，3機の衛星が日本の天頂付近を代わる代わる飛行し，サービスを提供する。このシステムを利用することにより，静止衛星では高仰角が得られない中緯度に位置する都市部のビル，山間部の山陰に遮られない特性から，日本国土のほぼ100%をカバーし，衛星利用高度モバイル通信及びGPSを補う高精度測位サービスの提供による位置情報サービスの新たな利用の広がりが期待されている。

現在，日本付近の経度領域のサービスであるが，このシステムは将来日本より更に高緯度にある欧米の国々に新た

にそれぞれの経度付近にふさわしい準天頂システムとして整備される可能性もある。

鉄道へのGPS利用は上記の自動車，船舶及び航空機に比べ普及していないが，最近欧州を始めとしてGPS利用の有効性が再認識され，鉄道利用の開発が急速に進んでいる。我が国でもJR北海道を始めとする鉄道会社がGPS技術を利用した運行管理システムの開発を進めている⁽⁴⁾。

6.2 GPS技術の鉄道利用状況

現在の鉄道の運行管理システムは，定められた区間内に列車を入れないように管理する閉塞(へいそく)区間管理方式が主に採用されている。GPS技術はすべての列車の位置を検知することができ，ある列車の前後に走っている他の列車との安全間隔を管理することにより，閉塞区間管理方式よりもきめの細かい運行管理が期待できる。

線路沿いに立つ信号機や各種標識が不要になり，信号ケーブルなどに要する電気設備費をかなり削減できる。JR北海道では衛星を利用した新たな鉄道運行システムの開発に着手しており，“実用化後，信号ケーブルなどに要する電気設備経費を10億円単位で圧縮できるのに加え，安全性も格段に向上する。”と報道されている(2003.01.04 北海道新聞から)⁽⁵⁾。

欧州においてはLOCOPROL (LOW COst satellite based train location system for signalling and train PROtection for Low density traffic railway lines)プロジェクト⁽⁶⁾を通じてGPS技術を用い，試験運転がベルギーで約100名の乗客を乗せて実施され成功している。このプロジェクトは欧州各国の企業がコンソーシアムを構成し，フランス国有鉄道(SNCF)始め12社で開発している。

7. 利用される宇宙産業化のモデル

鉄道列車の運行管理システムを例にとり，観測衛星，測位衛星及び通信放送衛星を利用したモデルを図2に示す。列車に搭載したGPS受信機で列車の位置を検出し，あらかじめ備えているデジタル地図情報と照合し列車の地図上の位置を可能な限り精度良く解析する。列車運行密度の高い都市部では地上ネットワークを使用し，運行密度が低い農村・山岳地域では測位衛星により列車の位置を解析する。列車運行密度が低い地域では約100m程度の精度で検出できれば現状の閉塞区間管理並みの制御は可能である。上記

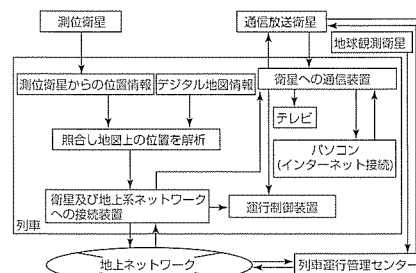


図2. 列車運行管理システム

のLOCOPROLプロジェクトでは平均300m程度の精度でデモンストレーションされている。

列車の位置情報は、地上ネットワークか通信放送衛星へ送信され、列車運行管理センターで全列車の運行管理を行う。列車運行管理センターの指令信号は地上ネットワークか通信放送衛星経由で列車へ送信され列車に搭載されている運行制御装置で自動運行する。列車の乗客向けにはテレビの鑑賞、インターネットサービスが受けられる装置を設置する。

あらかじめ備えているデジタル地図情報は、観測衛星からのデータを列車運行管理センターで必要に応じ解析し、タイムリーに更新する。この場合、通信放送衛星経由で実施するかマニュアルで実施するかは、地図情報更新の緊急性等を判断して行う。

図2に示した考え方は不審船の監視、森林の違法伐採の監視にも適用できる。

宇宙技術を利用した産業の創出には、図3に示すアプローチで利用するシステムの機能・性能向上及び運用コスト削減を計画し進める。

8. 関連する国際標準化の進め方

現在、宇宙技術に関する国際標準化活動はISO(国際標準機構)/TC20/SC13(宇宙データ・情報転送システム)とSC14(宇宙システム及び運用)⁽²⁾⁽⁷⁾で実施されている。SC13が1982年から、SC14が1993年から開始され、米国がMIL(MILitary specifications)規格又はANSI(American National Standard Institute), NASA(National Aeronautics and Space Administration)標準など多くの実績を背景としたISO提案を行う一方、欧州は欧州宇宙標準協会(ECSS)での標準を基礎とし体系的にISO提案をするという形で全体活動を主導している。

従来の活動は、単品の設計、試験、運用に関連する標準化を図る発想が根強く、地上でのサービス形態を考慮した宇宙・地上・サービス形態の3つの要素を統合したシステムに関連する標準化活動の提案はほとんどなかった。

今後は、7章に示したような宇宙技術を利用した産業化のモデルに基づき、国際標準を作る活動を展開すべきである。この場合、関連する企業、政府機関がパートナーとなり、企業、国、地域の壁を越え互いに協力し、まず国際標準を作ることにより、4章に示した緊急に解決すべき課題を解決する産業を創出できる。

特に、GPSの位置情報利用にかかわるISO/TC204と地理情報分野のISO/TC211との活動と宇宙関連の活動の

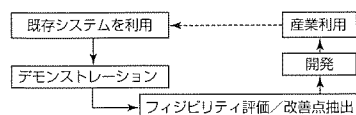


図3. 産業創出のアプローチ

ISO/TC20/SC13及びSC14の活動はお互い密接に連携する必要がある。特に、次の点に着目する。

- 衛星搭載の観測センサの校正・検証・データの利用方法
- 測位衛星及び補強用に使用する衛星の軌道上健康状況の利用者への送信及び異常が発生した衛星の代替手段

9. む す び

日常生活は“時間”と“空間”を管理することで成立していると言っても過言ではない。時間は個人個人が時計等を携帯することで管理できているし、公的にも様々な手段で管理され、社会生活が営まれている。

一方、空間については個人的にも公的にも時間のように管理できるツールは現状では存在していない。この空間管理の役割を担うものが位置情報と地理情報である。この位置情報と地理情報を個人的使用からグローバルに国家の区別なく公的に使用する有効な手段が宇宙技術(観測衛星、測位衛星及び通信放送衛星)の利用であり、宇宙の産業化が実現できる出発点にきている。

また、地球環境の改善のためにも宇宙技術を利用した産業化が切望されている。

上述した宇宙産業化のモデル構想に基づき、国際標準化活動を通じて本格的な宇宙の産業化のために努力していく。

参 考 文 献

- (1) 片野一幸：宇宙産業の市場規模と他産業への波及について、日本航空宇宙工業会会報、航空と宇宙、No.5(2004)
- (2) 永島敬一郎：人工衛星によるグローバル・エコシステムモニターの国際標準化に向けて、日本航空宇宙工業会会報、航空と宇宙、No.3(2004)
- (3) 中島 務、ほか：準天頂衛星システムの全体構想、三菱電機技報、77, No.8, 494~498(2003)
- (4) 柿沼博彦：宇宙と鉄道(GPS鉄道)、日本経済団体連合会会報、No.53(2005-3)
- (5) 北海道新聞(2003.01.04)：鉄道から信号、標識が消える、JR北海道GPSで列車誘導システム開発へ、http://www.c-crews.co.jp/gnext_express/news/back/0301/030108_09.html
- (6) Simsky, A., et al.: 2nd ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies NAVITEC '2004, ESA/ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 8~10(2004-12)
- (7) 堀井茂勝：ISO(国際標準機構)/TC20/SC14(宇宙システム・運用分科委員会)2005年総会、各分科会概要、日本航空宇宙工業会会報、航空と宇宙、No.6(2005)

位置情報ソリューションサービス“LBS”

浜津享助*
澤本 潤**
岩橋 努***

Location Based Solution Services “LBS”

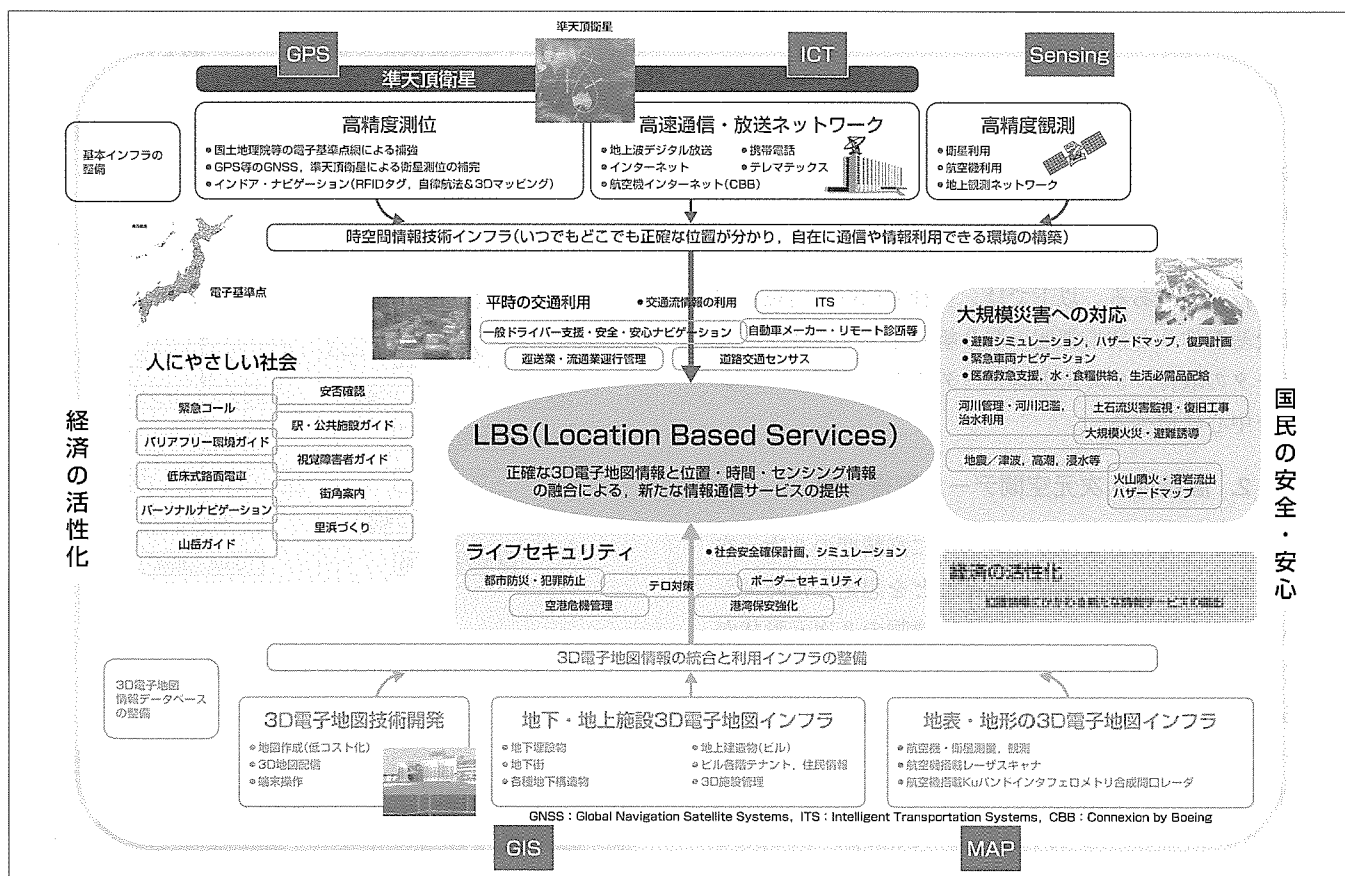
Kyousuke Hamazu, Jun Sawamoto, Tsutomu Iwahashi

要 旨

地理情報にリアルタイムで位置情報とコンテンツ情報を融合し、モバイル通信技術を用いて防災、セキュリティ、交通等の様々な分野で利用するのがLBS(Location Based Services)である。LBSは、GPS(Global Positioning System)衛星が利用できる屋外のみならず、屋内を含むシームレス測位システム、高精度3次元空間データ等の社会基盤と、通信システム、端末・表示システム等の技術を統合したものである。LBSの特長は、位置依存性、リアルタイム性、ユビキタス性、統合性・包括性、メディア融合性等にある。LBS実現のためには、これらを統合した利用システム技術の開発、及び官民の協力によるインフラ作りが必要である。三菱電機では、既にサービスを開始している“PAS(Positioning Augmentation Services：高精度測位サ

ービス)”や“COCO-DATES(位置時間証明情報提供サービス)”事業と連携し、高精度3次元空間データの取得、3次元空間データ基盤、シームレス測位等の基盤分野を中心に取り組んでいる。LBSは、国土管理やナビゲーションなどに大きく採り入れられていくであろう。カーナビゲーションやGPS携帯電話の普及、日本版E911(携帯電話を用いた高精度位置情報を伴う緊急通報システム)の2007年4月開始に伴う位置情報サービス等が注目されており、防災、安全・安心や効率・利便性、快適性の向上など、新しい付加価値を生み出すサービスへの期待は大きい。

当社では、長年培ってきたリモートセンシング技術、画像処理技術、通信技術を統合し、PASやCOCO-DATES事業と連動したLBS事業を始めつつある。



位置情報ソリューションサービス“LBS”

地理情報にリアルタイムで位置情報とコンテンツ情報を融合し、モバイル通信技術を用いて社会活動の広範な分野での利用を実現する新しい事業として、LBSを提案する。当社は、PASによる高精度測位と高精度3次元空間情報の融合に立脚したLBSを防災、セキュリティ、交通等の様々な分野で適用し、最先端統合サービスの提供を目指している。

1. ま え が き

地理情報システム (Geographic Information Systems : GIS) は, “地理的位置や空間に関する情報を持った自然, 社会, 経済等の属性データ (空間データ) を統合的に処理・表示するコンピュータ情報処理体系”である。阪神淡路大震災以降, データの共用やインターネットによる配信技術が飛躍的に伸長し, 従来の紙地図管理から, デジタル処理された2次元GISが実用化されるのとあいまって, 様々な分野で利用が進んでいる。一方, 米国が開発したGPSは, 当初の軍用目的の利用から発展し, 現在では世界中で広く民生分野で利用されている衛星測位システムである。当社は, 国土地理院がリアルタイム公開を行っている電子基準点網による観測データを用いてGPS衛星のデータからGPS測位の誤差要因を推定し, これを誤差補正データとする高精度測位サービスPAS⁽¹⁾を提供している。

これらの地理情報にリアルタイムで位置情報とコンテンツ情報を融合し, モバイル通信技術を用いて社会活動の広範な分野での利用を示す新しい概念として, Location Based Services (LBS) という言葉が用いられるようになった。当社は, PASによる高精度測位と高精度3次元空間情報の融合に立脚したLBSを防災, セキュリティ, 交通等の様々な分野で適用し, 最先端統合サービスの提供を目指している。

LBSの特長は, 位置依存性, リアルタイム性, ユビキタス性, 統合性・包括性, メディア融合性等にある。また, LBSの実現に必要な社会基盤と主要な技術課題に, GPS衛星が利用できる屋外のみならず屋内を含むシームレス測位システム, 高精度3次元空間データ, 通信システム, 端末・表示技術等がある。以下では, 当社のLBSの実現に向けた社会基盤作りと技術課題の取り組みを, 高精度3次元空間データの取得, 3次元空間データ基盤, 及びシームレス測位を中心に述べる。

2. 高精度3次元空間データ取得技術

LBSにおいて特に必要性が高いものに高精度の3次元空間データがある。地震, 津波, 洪水などを想定した防災システムでは, 自然地形に加え構築物や建物の3次元形状が必要である。広範囲の空間データ取得には衛星, 航空機等による上空からの撮影が一般的であるが, 高精度3次元空間データの取得手段として現在最も注目されているのはレーザ測量方式 (航空機搭載レーザスキャナ) である。このほかに, デジタルカメラ方式 (CCD (Charge Coupled Devices) 方式), 画像レーダ方式等がある。画像レーダ方式により3次元の国土データを収集することはこれまで夢の技術として追求されてきたものであるが, 当社では, 航空機搭載Kuバンドインタフェロメトリ合成開口レーダ

(Interferometry Synthetic Aperture Radar : InSAR) の実用化により, 水平分解能50cm, 高さ精度50cm以内の3次元空間データ取得に目処を付けた⁽²⁾。

2.1 InSAR

SARは, 電波を地表に照射し, 地表から散乱してきた信号を受信し, 振幅と位相を持つ画像を生成する。振幅を表示する通常のSARに対し, 位相情報を用いてSARを干渉計として使用するのがInSARで, 互いに隣接した2つのアンテナで観測して得たそれぞれの画像を干渉させ, 地形の標高等の情報を抽出することができる⁽³⁾。

2.2 InSAR処理

当社では, 2002年からKuバンド (周波数16.7GHz) の航空機搭載InSAR開発に着手し, 2003年に製作, 2004年に電波免許を取得した。航空機搭載InSARによる空間データ取得・画像生成には図1に示す2系統がある。その1は同図左のフローに示す2次元の水平面高分解能画像を生成するプロセスである。その2は同図右に示すもので, 2面のアンテナで受信された信号からインタフェロメトリ処理によりデジタル地表モデル (Digital Surface Model : DSM) を生成する。

2.3 飛行試験実証

セスナ機にKuバンドInSARを搭載し, 高度1万フィート前後での飛行により, 3次元空間データを経済的かつ効率的に取得する実証試験を進めてきた。図2にこの過程で得られたSAR画像例を示す。同図左は試験対象とした高知県の仁淀川支流の地形図, 同図中は2次元再生画像, 右はインタフェロメトリ処理で得られたDSMである。

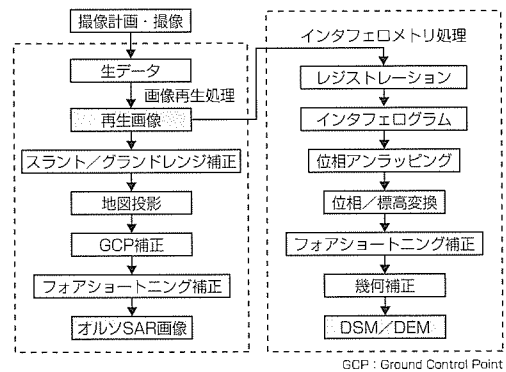


図1. InSARによる3次元空間データ生成

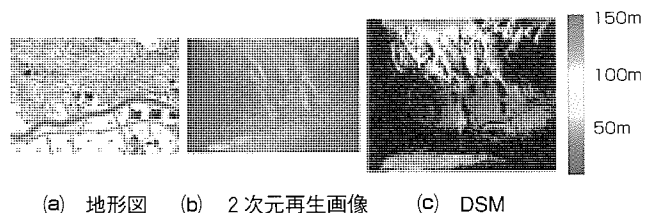


図2. InSARによる画像取得例 (高知県仁淀川支流域)

電波を用いるInSARは、光学的なデータ取得と異なる全天候型センサであり、夜間や噴煙に覆われた状況でも影響を受けることなくデータ取得が行える。このため、早期に災害の現状を把握するシステムとしても注目を集めている。

3. eジオラマシステム

InSAR等で取得された3次元地形データ+空中写真画像による3D表示をベースとする情報共有と、迅速・的確な意思決定を支援する3次元空間情報システムをeジオラマシステムと呼んでいる。図3にeジオラマシステムの構成を示し、以下にeジオラマシステムのデータ統合、データ管理、高速3次元表示のそれぞれの機能について述べる。

3.1 データ統合機能

データ統合機能は、人工衛星や航空機で取得した空中写真画像をInSAR等により取得した地形データであるDSM又はデジタル標高モデル(Digital Elevation Model: DEM)に張り付け、地物オブジェクト(建物、道路等)を付加することによって3次元空間モデルを構成する⁽⁴⁾。

データをポリゴン等に変換後、高速配信表示に適したデータ形式にエクスポートする。広範囲な領域を効率的に管理し、視点の移動に伴い高速に配信表示するためのメッシュを作成する。また、ポリゴン数等の調節によりデータリダクションし、空中写真画像を圧縮することによってデータの軽量化を図っている。

3.2 データ管理機能

携帯/車載GPS端末からの“位置情報”，水位・雨量・変位や、交通渋滞など各種の“センサ情報”，プレイバック可能な“監視カメラ映像”など位置に依存する情報をリアルタイムに統合・管理する。

データ管理におけるインデックス構築を行い、以下の処理の高速実行を行う。

- (1) 複数詳細度の地形データを、視点の移動に伴って高速に抽出する。日本全国表示から50cm解像度までの連続的視点移動を可能にする。
- (2) 広範囲の領域の中から、地形の表示領域に対応して地形に付加する地物オブジェクトのデータを高速に抽出す

る。

- (3) カメラ映像等の各種情報を、地形や地物オブジェクトと関連付けて効率的に管理する。

- (4) 時間軸に沿って取得される情報を有効に活用可能な管理を行い、センサ等から収集した情報をリアルタイムに更新して管理する。

3.3 高速3次元表示・操作機能

マルチ大画面、パソコン環境、Web環境、携帯電話に対応した高速な3次元空間モデルの表示・操作が行えるマルチモニター用3D地形表示エンジン“G-Viz2004”を開発した。ハザードマップなどのシミュレーション結果をインポートし、3次元空間モデル上で重畳表示を行うことも可能である。複数の画像を時間軸に沿って利用してアニメーション表示したり、カメラ映像等のリアルタイム情報取得地点を3次元空間上に反映したりすることができる。視点移動操作としては、前進、回転、視点高度の変更等の視点移動をスムーズに行うことができる。さらに、以下のような補助機能を利用することができる(図4)。

- (1) 二点間距離計測機能
- (2) 監視カメラ(JPEG(Joint Photographic Experts Group)2000動画)表示機能
- (3) 任意座標での地形断面表示機能
- (4) 座標と情報のリンク機能
- (5) 点描モードによる元データ精密表示

4. シームレス測位技術

携帯電話の普及に伴い、携帯電話からの110番通報が固定電話のそれを上回るようになったことを背景に、2007年4月から日本版E911(E110/119/118:携帯電話を用いた高精度位置情報を伴う緊急通報システム)が開始される。GPS携帯が普及するようになると、屋内からの緊急通報の要望も予想される。位置情報取得は非常時の緊急通報に限らず、地図情報配信とセットで屋内外での高精度なナビゲーションも期待されてきている。

当社では図5に示したように屋内外で高精度な測位がで

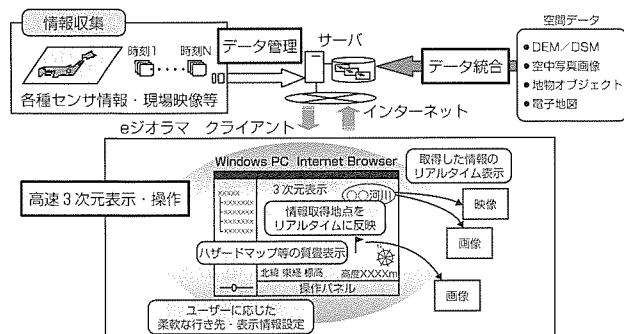


図3. eジオラマシステムの構成

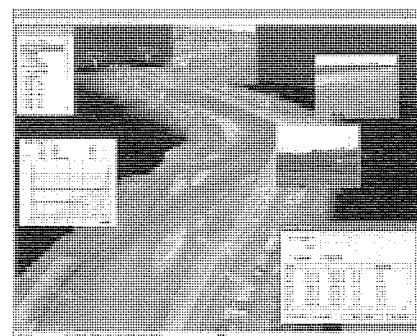


図4. eジオラマシステムによる河川における防災応用システムの表示例

きるシームレス測位技術・システムの開発を行っており、以下にそのキーとなるPASとRFIDについて述べる。

4.1 屋外測位：PAS

当社は、cm精度の高精度測位サービスPAS事業に続き、m精度でリアルタイム測位が可能な車載器、PDA(Personal Digital Assistance)の端末事業も開始している(詳細はこの特集の「高精度GPS測位サービス“PAS”」参照)。

4.2 屋内測位：RFID

中長距離RFID(Radio Frequency Identification)の登場により、屋内測位ができる環境も整いつつある。RFIDは従来から物流利用が主であるが、当社ではパッシブ型で7m級通信距離を実現するUHF(Ultra High Frequency)帯高精度電子タグ技術開発を進めており⁽⁵⁾、このRFIDタグ/リーダーを床や壁に張り、RFIDリーダー/タグ内蔵の携帯端末により位置情報の取得が可能となる。

5. 応用事例

5.1 施設管理や防災対策のための先進ソリューション

近年、我が国では、都市型災害や大規模災害が頻発し、これまでに経験したことのない大きな被害が発生している。こういった状況に対応して、社会施設の管理や防災対策のための先進ソリューションを提供する。

大画面ディスプレイ又は机上/携帯のパソコンで、現在の河川・海岸・道路などの状況を分かりやすく把握可能である。3次元表示により、現場の地形・環境を理解でき、監視カメラの映像により現在の状況を把握しテレメータ情報等を同時に表示することにより、状況判断を支援する。図4にeジオラマシステムによる河川における防災応用システムの表示例を示す。緊急対策や応急復旧作業を支援する。

5.2 3D携帯ナビゲーション

携帯電話の普及と3D地図環境整備を背景に、当社では、図6に示したような3D携帯ナビゲーションの研究開発を行っている。利用者が現在位置及び目的地を番地又は電話番号で入力することで経路検索し、経路途上の実画像をオンライン配信するとともに、図中例に示すように経路を実画像上にオーバーレイ表示し、分かりやすく道案内するものである。また、このサービス提供に加盟するレストランなどショップ情報が近傍でポップアップ表示するようなサービスへの展開が考えられる。

6. むすび

LBSにおける現在の我々の取り組みは、基盤構築の分野が中心になっているが、目指すところはいつでもどこでも享受することが可能な位置情報に基づくサービスである。すなわち、LBSでは、ユーザーの位置や環境に応じて適切なサービスとコンテンツが提供される。これらは5章で述べた代表的な応用事例、特定の分野だけでなく、位置情報

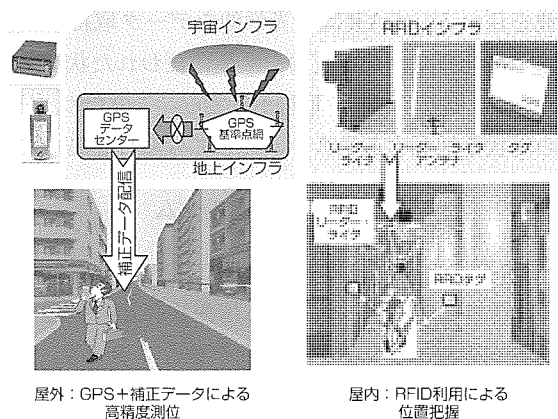


図5. シームレス測位のインフラ機器及びLBSサービスの提供

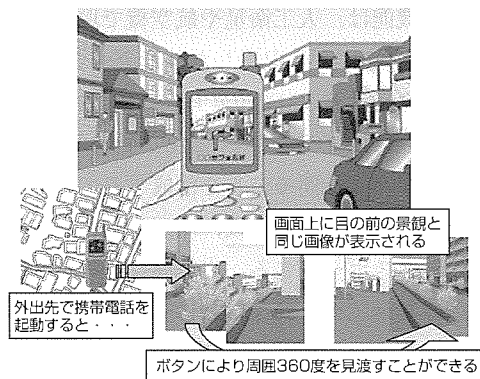


図6. 3D携帯ナビゲーション

を媒体として異なったサービスの統合や異なる情報の統合にも広げることができる。例えば、携帯電話に搭載したGPSによる歩行者ナビゲーションシステム上で、他の様々なサービスを統一的なインターフェースで利用することになるであろう。防災、安全・安心や効率・利便性、快適性の向上など、新しい付加価値を生み出すサービスとして、LBSを発展させていく所存である。

参考文献

- (1) <http://www.mitsubishielectric.co.jp/pas/>
- (2) 岩本雅史, ほか: インターフェロメトリックSARの位相アンラップアルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌(B), J82-B, No.3, 435~441 (1999)
- (3) 日本写真測量学会編, 合成開口レーダ画像ハンドブック, 朝倉書店, 208 (1998)
- (4) 菅沼優子, ほか: 物体の配置に考慮した建物内部の簡易三次元モデリング, 画像電子学会誌, 32, No.5, 691~699 (2003)
- (5) 福士豊世, ほか: 簡単・便利な電子タグを利用した各種応用ソリューション, 三菱電機技報 特集「ユビキタス社会を支えるITソリューション」, 79, No.4, 251~254 (2005)

高精度GPS測位サービス“PAS”

平野 剛*
白井澄夫*
島 光秀*

High-accuracy GPS Augmentation Service “PAS”

Takeshi Hirano, Sumio Usui, Mitsuhide Shima

要 旨

GPS(Global Positioning System)は高い利便性を持つためカーナビゲーションなどで広く用いられているが、数mから数十mの測定誤差が発生する。しかし近年、これらの誤差を精密に評価して補正を加える高精度GPS技術が発達し、cm級の測位精度が得られるようになり、RTK(Real-Time Kinematic)と呼ばれる方式を用いることで測量などに用いることができるようになってきた。

また、複数の電子基準点を利用したネットワーク型RTK-GPS方式が実用化され、広域を高精度で測位可能となり、基本的な社会インフラの一つとして重要な役割を果たすものと考えられる。

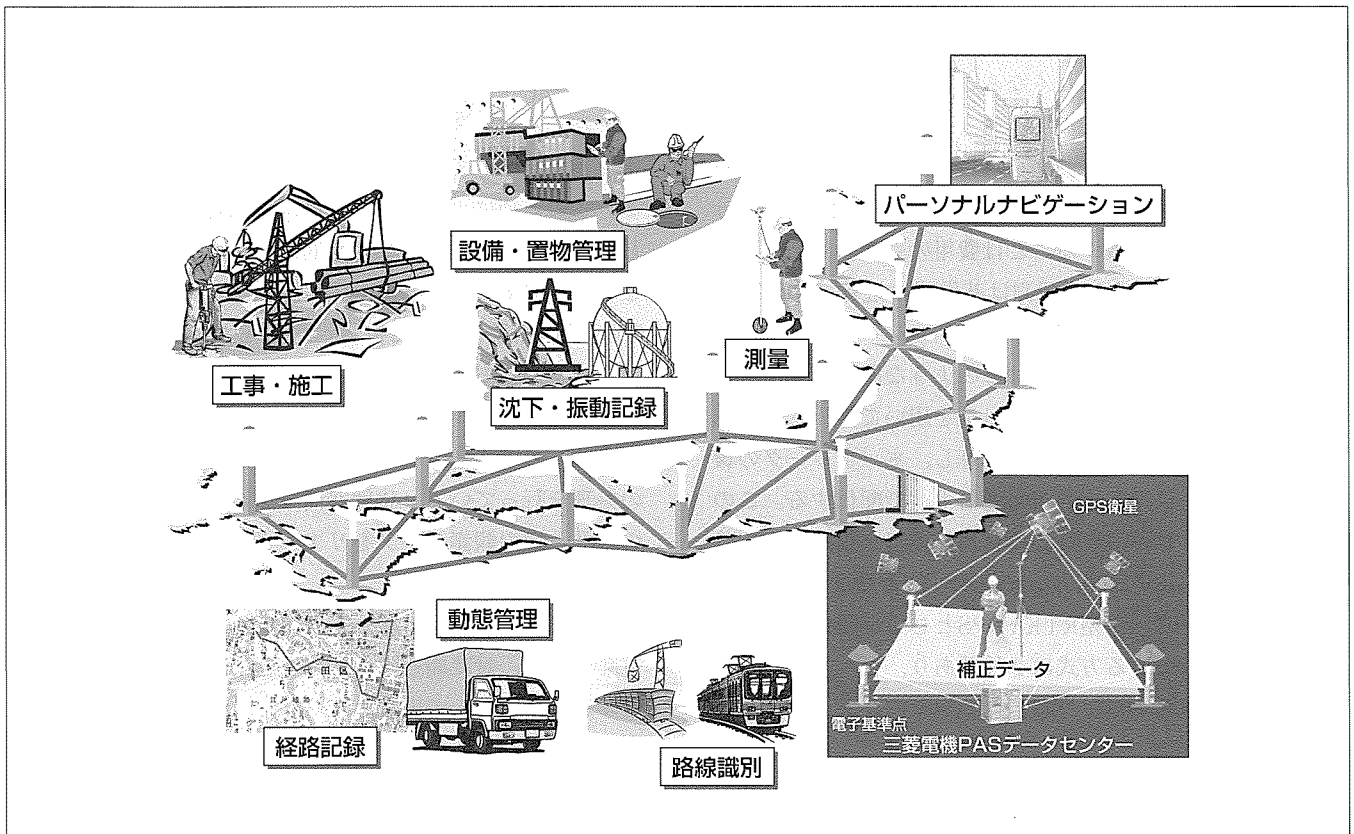
PAS(Positioning Augmentation Services)は、このネットワーク型RTK-GPS方式を採用し、国土地理院が日本全

国に設置した電子基準点網を用いることで、これら電子基準点から得られるGPSの誤差補正情報をユーザーに配信し、cm級の測位精度を実現するものである。

本稿では、ネットワーク型RTK-GPS方式のうち、FKP(FlächenKorrekturParameter：面補正パラメータ)方式の概念と特長を述べ、日本においてそのFKP方式で運用されているPASシステムの概要について述べる。

また、PASは、cm級を必要とする測量、土木、施工管理などだけでなく、数十cm級の測位精度も実現でき、PAS対応高精度GPS受信機“AQLOC^(注1)”により移動体やパーソナルナビゲーションなどにも展開しており、動態管理や設備管理などにも用いられている。

(注1) AQLOCは、三菱電機(株)の登録商標である。



高精度GPS測位サービスPASにおける補正データの配信

国土地理院設置の電子基準点網を利用し、GPS衛星からの電波を収集して、高精度の測位を実現するために必要な補正データを、FKP方式でPASデータセンターにおいて生成・配信する。この補正データの配信は片方向でよいので、将来、準天頂衛星を利用して放送形式での配信も可能となる。この高精度GPS測位サービスPASを用いることで、測量だけでなく、工事・施工管理、設備・置物管理、沈下・振動記録、移動体における経路記録、路線識別などを実現できる。

1. ま え が き

PASは、国土院が日本全国に設置した電子基準点網を利用し、高精度の測位を実現するために必要な補正值データを生成・配信する三菱電機のネットワーク型RTK-GPS測位サービスである。2004年5月から全国的にサービスを開始し、現在はcm級を必要とする測量分野だけでなく、数十cm級の測位精度を必要とする移動体やパーソナルナビゲーションなどにも適用されており、また、端末であるPAS対応高精度GPS受信機AQLOCと合わせて、基本的な社会インフラの一つとして重要な役割を果たしていくものと考えられる。

2. ネットワーク型RTK-GPS

従来のRTK方式は、観測地点の近傍の座標が既知の点(基準点)に基準局として搬送波受信が可能なGPS受信機を設置し、基準局と観測用のローバー(同じく搬送波受信機)を適当な通信手段で接続して、搬送波位相測位を行うものである。通信接続をしない場合には、同時に観測データを取得しておいて後処理で計算することも可能である。

このようなRTK方式は高精度の観測が可能であるが、あらかじめ観測点から遠くない正確な座標が既知である基準点に基準局設備を設置し通信手段を講じる手間と費用を要すること、基準点と観測点との距離が長いと誤差が急速に増大したり観測時間が長くなることなどの問題点があった。

常設の基準局ネットワークを構築すれば基準局を各ユーザーが設置する手間は省くことができるが、RTKに十分な密度で基準局を配置することは費用の点からも困難であり、実際にはRTKによる観測は基準局の近傍でしか利用することはできない。

ネットワーク型RTK-GPSはこのような問題を解決するもので、常設の基準局ネットワークを用いて観測したGPSデータから実時間で誤差情報を計算し、ネットワークの領域内のローバーにこれを適当な通信手段で配信する。この領域内であれば、ローバーと必要な通信機器を用意するだけでどこでも簡単にRTK相当の測位が可能となる。

現在、ネットワーク型RTK-GPSとして一般的に利用可能でよく知られている方式は2種類あり、それぞれ面補正パラメータ(FKP)方式、仮想基準点(VRS)方式と呼ばれる。

FKP方式では、状態空間モデルと呼ばれる広域の動的誤差モデルに基づいて配信センターで誤差補正量を計算し、これをFKPとしてローバーに配信する。FKP方式は、ドイツGeo++社で開発され、同社のソフトウェアシステムGNSMARTに実装されてヨーロッパ、日本などで使われている。一方、VRS方式は、ローバーの概略位置をセン

ターに送信しセンターにおいてその位置に基準点があったと仮定したときの仮想的な基準点観測情報を生成し、これをローバーに送信して仮想基準点との間でRTK測位を行うものである。

3. FKP方式の原理

3.1 状態空間モデル

ネットワーク型RTK-GPSにおいて、誤差を除去するために用いられている手法として二重位相差がある。一般にGPS観測では、擬似距離に対し発生する誤差として、衛星に起因する誤差(軌道誤差、時計誤差)、電波の伝搬経路に起因する誤差(電離層誤差、対流圏誤差)、受信機に起因する誤差(受信機時計誤差、アンテナ位相中心変位、内部雑音など)、受信環境に起因する誤差(マルチパス、外部雑音など)などがある。2つの観測点での同時観測値の差分をとることによって、これらのうち衛星に起因する誤差は取り除くことができる。また、2つの観測点間の距離が近ければ、伝搬経路に起因する誤差も同様にほぼ取り除くことができる。これが一重位相差である。さらにこの一重位相差を2つの衛星に関して差分すると、受信機に起因する誤差を取り除くことができる。これが二重位相差と呼ばれるものである。二重位相差は巧妙で有効な方法であるが、観測点間の距離が短い場合にしか適用できず、さらに、差分された観測量において単一観測点に対する情報は不十分なものになっている。

これに対してFKPでは、観測量の差分処理を行わない。すなわち、すべての誤差要因を消去せずに明示的に評価する。このために、観測量に含まれる誤差の要因をモデル化して計算する。これを状態空間モデル(State Space Model)と呼ぶ。これに対し一般のRTKないし仮想基準点方式のVRSは観測量を用いて直接計算するため、観測空間における誤差補正方式と言うことができる。

状態空間モデルは誤差の原因となる物理量を実時間で表現するものであり、モデルの記述と評価ではリアルタイムの処理を行っている。状態空間モデルの生成は、その地域の基準点網の観測データをリアルタイムで収集して行われる。

現在実装されている状態空間モデルは、衛星時計、軌道、電離層遅延、対流圏遅延などであり、関数モデルと確率モデルの組合せとして表現される。

3.2 面補正パラメータ(FKP)

状態空間モデルで得られる誤差補正量を記述するための手段がFKPである。図1に示すとおり、FKPは各基準点において傾きを持った線形平面として表現され、基準点位置における値はそこでの擬似距離(PRC)誤差補正量、平面の傾きはローバーと基準点間の緯度・経度方向の距離に対する誤差の比例定数である。FKPは各基準点において衛

星ごとに電離層依存の誤差とそれ以外の誤差量に分けて生成される。一般のRTKでは基準局から距離が離れるに従って誤差量が急速に拡大したが、FKPでは、面補正効果により基準点ネットワークがカバーする広い範囲で均一の測定精度が得られる。

FKPデータは、RTCM(Radio Technical Commission for Maritime services) 104 Type59のフォーマットで配信される。ローバーに最も近い基準点の観測情報も合わせて配信される。ローバーでは、2周波受信機で搬送波観測を行いながら、FKPによる補正計算のための専用ソフトウェアを用いて位相測位を行う。

4. FKPによる高精度GPS測位サービス

4.1 日本におけるサービス

日本では、三菱電機グループがFKPを用いた高精度GPS測位サービスを“PAS”という名称で2003年から運用している。

PASは、国土地理院が提供している全国の電子基準点のリアルタイムデータを使用し、一部離島と半島先端部などを除く全国をカバーしている。日本を13の地域に分割し、それぞれ20点から30点の電子基準点のリアルタイムデータを用いて状態空間モデルを生成し、FKP補正データの配信を行っている。補正データは、携帯電話、PHS、衛星携帯電話、インターネットなどを通じて配信される。通信にはパケット方式を用いることができ、モデムによる回線接続に比べて通信費用が非常に安価である。さらに、配信が片方向でよい特長を生かし、特定小電力無線などにより特定地域に一括配信することができる。

FKPは放送による配信も可能であるので、2009年に打ち上げが予定されている準天頂衛星から全国をカバーする補正データ配信が計画されている。準天頂衛星はそれ自身がGPS衛星の役割を持ち、3機の衛星が順次に日本の天頂付近に24時間滞留してGPSの機能を補完する。このため、GPS観測における可視衛星数が増加することになり、上空視界が悪い場所でもGPS測位可能な時間が増加する。これに加えて補正データも準天頂衛星から配信することで、高

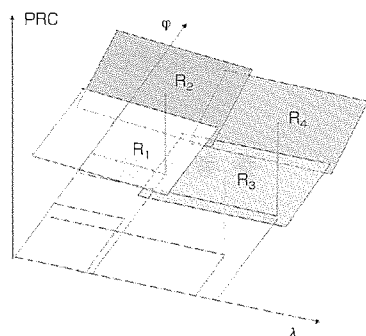


図1. 面補正パラメータ (FKP)

精度測位の可用性・利便性が大きく高まるものと期待される。

4.2 FKPの測位精度

FKPの測位精度の例としてPASサービスにおける実測例を図2に示す。これは固定観測点における連続観測の結果である。

4.3 PASにおける地殻変動の補正

日本列島は地殻変動のためプレートが移動し、このために世界測地系に対する日本の位置は年々ずれていく。また、地域により移動量は異なり、さらに、地震などの場合は不連続な変化も発生する。日本では測地成果2000として1997年時点の位置を基準に座標値を表すこととされており、GPSによる観測値も最終的には測地成果2000に準拠した値で表現することが必要となる。

FKPでは、すべての演算を物理的な世界で行うため、測地成果2000として表される過去の座標値に依存することなく観測を行うことができる。このため、FKPによって絶対座標を得た後、測地成果2000に対する地殻変動分の変位を観測と分離して計算し補正することにより測地成果2000対応の座標値が得られる。地殻変動の補正は、全国約1,200点の全電子基準点の地殻変動量を基に連続的な曲面で近似し補正するため、高精度な補正が可能で、補正量は特定の基準点のみに依存しない。補正後の残差については、シミュレーションにおいて図3に示すとおり全国平均値が0.27cmと高い精度で補正できていることを確認した。地殻変動補正の一例を図4に示す。これらの結果を見ると、1,200点のうち98%が補正残差1cm以内に収まっており、これらの点ではGPSの観測誤差を2cmとすれば地殻変動はこの半分以下の値まで補正できており、実用上十分と考えられる。

4.4 移動体における測位

FKP方式では移動体における高精度測位が可能である。これは、配信される補正データがローバーの位置に依存し

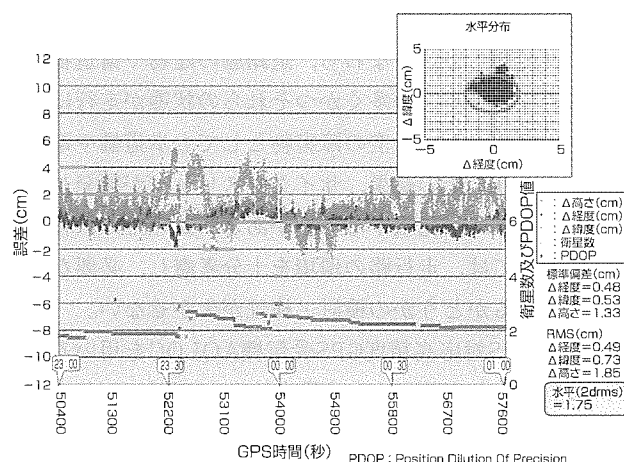


図2. PASの測位精度 (連続観測)

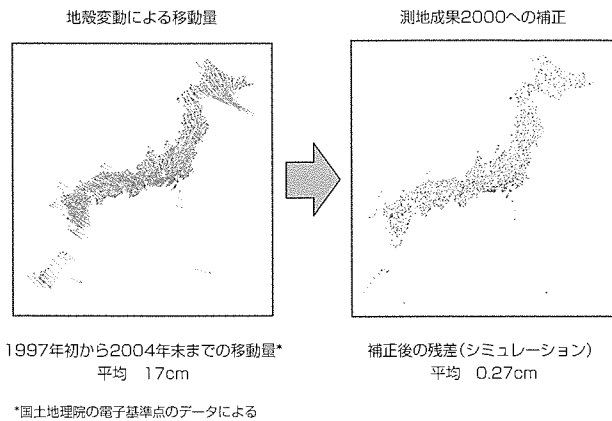


図3. 日本における地殻変動とその補正

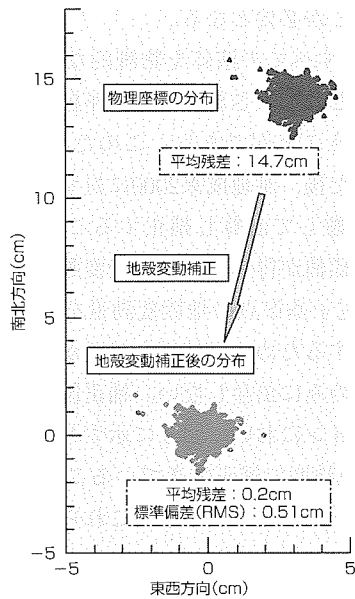


図4. 地殻変動補正例(桐生)

ないためである。

自動車にGPS受信機を搭載して走行することで、長距離にわたる測位が可能となり、駐車場内などにおける細かい動きもトレース可能となる。

なお、一般に、移動体測位では観測の環境条件が静止測位に比べて厳しい。すなわち、道路脇の建物や構造物により電波のマルチパスが多くかつそれらの状態が走行に従って刻々と変化する。上空の障害物としても歩道橋や電線などが多くあり、その結果、サイクルスリップが頻発したりミスフィックスが発生することがある。このため、移動体測位においては、走行路の環境を十分考慮し、必要な測位率が得られるかどうかの検討・検証が欠かせない。

また、PAS対応高精度GPS受信機AQLOCを用いることで、移動体から車速パルスを取り出して利用したり、ジャイロを搭載してトンネルなどのGPSから電波を受信できな

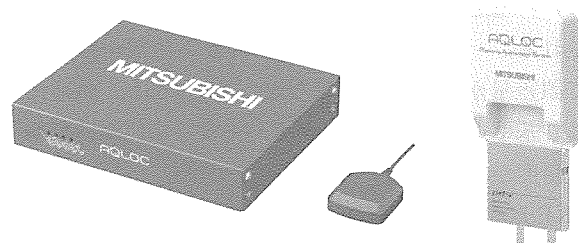


図5. AQLOC端末の例

い場所での補完に用いたりすることも可能となっている。図5にAQLOC端末の例を示す。

5. む す び

高精度測位技術は、測量分野だけではなく、社会施設管理、移動体管理、ナビゲーションシステムなどに広く使われていくと考えられる。LBS(Location Based Services)は、高精度測位技術をインフラの一つとし、電子地図と各種のコンテンツを組み合わせることによって実現される広範な社会サービスの概念である。リアルタイムの位置情報と豊富なコンテンツを精密な三次元デジタル地図情報と合わせて扱うことで、様々なアプリケーションを広げることができる。例えば、災害情報・気象情報・交通情報・観光情報などを位置情報と地図情報に融合・統合化することにより、より付加価値の高いサービスが可能になる。

PASのような高精度の測位サービスネットワークが普遍的に利用できることで、LBSによる空間情報社会の実現がより近いものになると考える。

今後、PASサービスの充実化を図るため、後補正サービスやサブm級の測位サービスを更に追加していく予定である。後補正サービスは、補正パラメータをデータセンターに保存しておくことにより、現場で取得した生データをデータセンターに送付することにより、後から測位計算をするものである。通信手段が届かない山間部での測位計算や土地家屋調査士のように過去にさかのぼって“測量成果値の復元・再現”を実現するのに寄与するメニューである。また、サブm級の測位サービスでは、cmまでの精度を必要としない分野で配信料を低く抑えたものとなり、移動体を中心にしたニーズに対応していくものであり、高精度測位サービスの適用分野を更に広げていくことに寄与するものとする。

参 考 文 献

- (1) 白井澄夫：国土位置情報サービスPASにおける精度検証，日本航海学会2003年度秋季研究会GPS研究会(2003)

位置時間証明情報提供サービス “COCO-DATES”

富樫昌孝* 青柳秀典*
大野次彦* 小山幸春*
宮崎一哉**

Correct Coordinate and Date Stamp Service

Masataka Togashi, Tsugihiko Ono, Kazuya Miyazaki, Hidenori Aoyagi, Yukiharu Koyama

要 旨

近年、社会システムで取り扱う“データ”の第三者による認証要求が高まっている。今回開発した位置時間証明情報サービス“COCO-DATES”は、“位置”と“時間”の情報をGPS(Global Positioning System：全地球測位システム)衛星からの位置情報と気象衛星からの雲の画像を基に生成する証明コードにより第三者の立場で認証することを可能にした世界でも初めてと言えるサービスである。

未来の雲の形を正確に予測するのは不可能であり、明日の日付など時間の偽造ができないため、極めて高い信頼性を実現している。

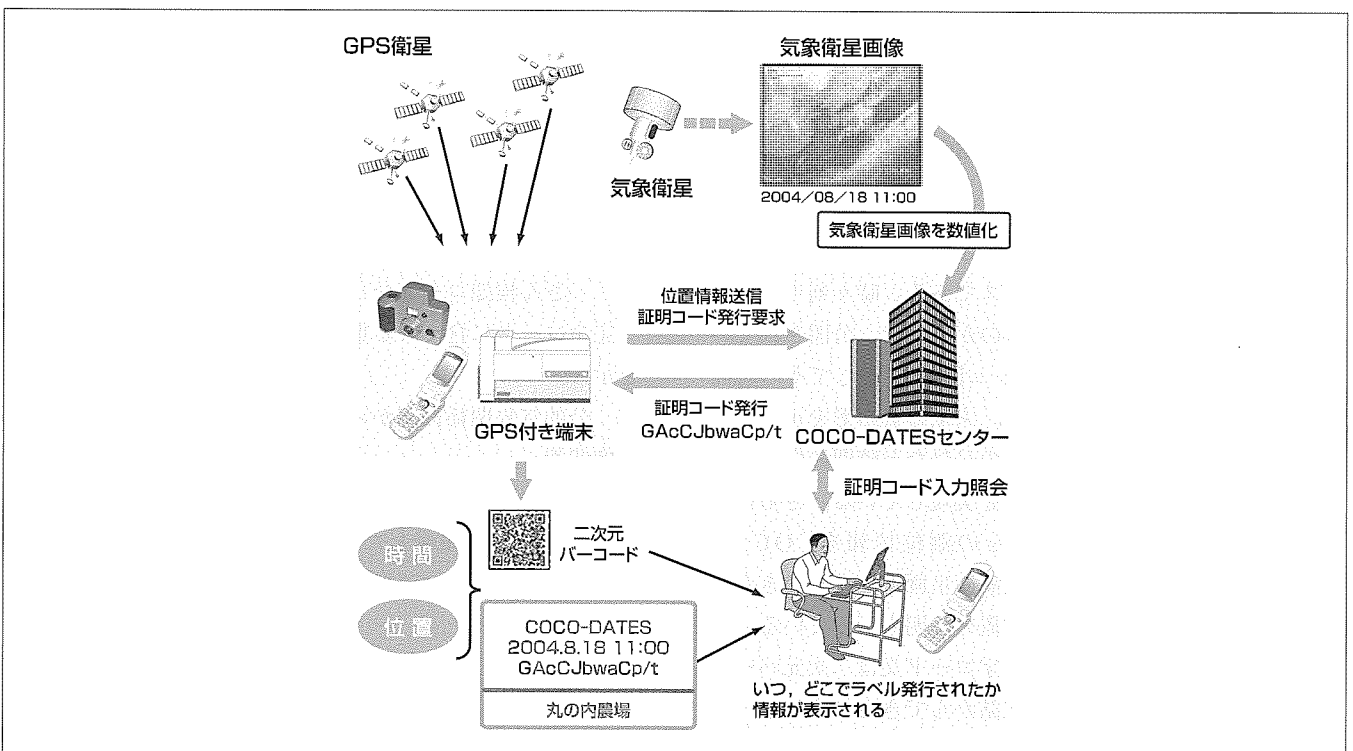
証明コードの照会は、文字コード又は二次元バーコードにより、パソコンや携帯電話から容易にできるようになっている。

COCO-DATESのビジネス例としては、写真による作業報告での活用がある。建設、土木工事現場等の作業報告

などの写真に証明コードを付与することで、“いつ、どこで、何を実施したか”を証明する証拠写真として活用できる。また、工事現場以外の活用例としては、産業廃棄物管理や訪問業務の行動管理、新聞・雑誌・テレビ媒体への投稿写真証明等もある。

COCO-DATES端末としては、カメラ(GPS)付き携帯電話やGPSアンテナと通信回線(PHS(Personal Handy Phone System)・無線LAN(Local Area Network))を装備した専用カメラがある。また、パッケージとしては、農作物生産管理支援システム“e農業日誌”や来場証明パッケージがある。

COCO-DATESは世界中で使用でき、本稿で紹介した以外にも様々な分野での需要が見込まれている。ビジネス展開、市場拡大に向けての実用化展開を加速することで、事業拡大を図る所存である。



位置時間証明情報提供サービス COCO-DATES

GPS付き端末(パソコン、専用カメラ、携帯電話など)から取得した位置情報をインターネットを介してCOCO-DATESセンターに送信することで証明コード発行要求を行う。COCO-DATESセンターは、その時刻での気象衛星画像と合わせてハッシュ関数により位置と時間を証明する証明コード(COCO-DATES証明コード)を発行する。端末側で受け取った証明コードはラベルや写真画像等に記載することで位置と時間の証明が可能となる。証明コードをパソコンや携帯電話を介してCOCO-DATESセンターに照会すれば、“いつ”“どこで”コードが発行されたかを確認できる。

1. ま え が き

世の中が高度化、複雑化する中、国民の安全・安心に対する関心は高まっており、情報セキュリティなどICT (Information & Communication Technology: 情報通信技術) を活用し、だれもが安全・安心に暮らせる社会システムの実現が期待されている。しかし、ICTによる社会システムが実現された場合でも、システムで取り扱う“データ”の信憑性(しんぴょうせい)や担保性が脆弱(ぜいじゃく)ではその信頼性は不十分であり、安全・安心にかかわる行為として正しく実施されたか、正しく管理されたか等の内容証明には第三者による認証要求が高まっている。

今回開発した位置時間証明情報サービス“COCO-DATES”は、システムの基本的なデータとして様々な場面で扱われる“位置”と“時間”の情報をGPS衛星からの位置情報と気象衛星からの雲の画像を基に生成する証明コードにより、第三者の立場で認証することを可能にした世界でも初めてと言えるサービスである。

単に数字や文字の羅列で自由に表現できてしまう位置、時間という事象をCOCO-DATESにより認証することで、いつ、どこで起きたものかを証明する証拠写真やトレーサビリティなど、様々な分野で信頼性の高いシステムやサービスの提供が可能になると考える。

本稿では、COCO-DATESの概要とこれを支える位置時間証明の技術を解説する。また、各種分野における適用事例とビジネス展開、これにかかわるパッケージや端末等について述べる。

2. COCO-DATESの概要

2.1 COCO-DATESの特長

COCO-DATESは、GPS衛星と気象衛星画像から位置と時間を証明する新しいサービスである。時々刻々と変化する雲の形から時間を証明するのが特長で、公開されている気象衛星画像を数値化(ハッシュ関数値化)してその時間と対照して証明するものである。未来の雲の形を正確に予測するのは不可能であり、明日の日付など時間の偽造ができないため、極めて高い信頼性を実現している。さらに、現場で受信したGPS衛星からの測位情報をCOCO-DATESセンターに送信し、気象衛星画像と分離できないように結合することにより、位置の証明も行っている。位置・時間の証明情報の照会は文字コード又は二次元バーコードにより、パソコンや携帯電話からできるようになっている。

現在、食品・産業廃棄物等のトレーサビリティ、写真による作業管理・行動管理、コピー・プリンター・FAXなどの文書管理などへの適用をねらい、展開を図っている。

2.2 システム構成と動作

COCO-DATESは、パソコンを始め、カメラ、プリンター、携帯電話等の様々な端末機器で利用できる。それぞれの端末で利用可能にするには、COCO-DATESセンターとインターネットを介した情報のやり取りを行うためのクライアント機能が必要となる。そのための開発環境としてC言語とJava^(注1)のライブラリを提供している。

COCO-DATESのシステム構成を図1に示す。基本的な動作は次のとおりである。

- (1) 端末からCOCO-DATESセンターにCOCO-DATES証明コード発行要求をリクエストとして送付する。
- (2) COCO-DATESセンターから端末にCOCO-DATES証明コードをレスポンスとして送り返す。

COCO-DATES証明コード発行要求には、端末のID、位置情報、認証用のコード、リクエストの改ざん検知コードなどが含まれる。端末のIDにより、端末を一意に特定でき、認証用のコードを検証することにより、端末の成りすましを防止できる。また改ざん検知コードを検証することにより、リクエストの改ざんを検知することが可能である。また、SSL(Secure Socket Layer)を利用することにより、リクエスト及びレスポンスを秘匿することも可能である。

2.3 COCO-DATES証明コード

COCO-DATES証明コードには次の2種類がある。実際にレスポンスとして端末に返すのは参照コードである。

- 完全コード：位置や時刻を証明するコードであり、参照コード、気象衛星画像のハッシュ値、位置情報、時刻、発行要求者、端末のID、発行者、シリアル番号、改ざん検知コードなどのデータを含む。
- 参照コード：完全コードを参照するためのコードであり、バージョン番号、発行者、シリアル番号、改ざん検知コードなどのデータを含む。

完全コードに含まれる重要な証明情報について次に詳細を示す。

- (1) 公的気象関係機関から定期的に配信される気象衛星画像情報

毎正時に静止気象衛星「MTSAT-1R」から受信した観測データをもとに生成した気象衛星画像情報のハッシュ値

(注1) Javaは、サン・マイクロシステムズ社の登録商標である。

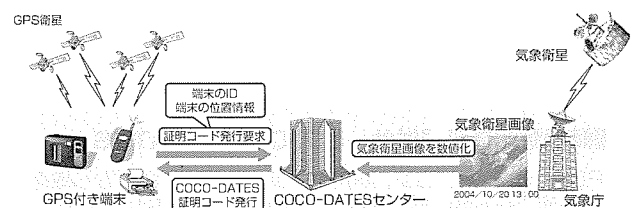


図1. COCO-DATESサービス

(CRYPTREC(CRYPTography Research Evaluation Committees)により電子政府推奨暗号リストに採用されたアルゴリズムを利用)を完全コードに格納する。

(2) 国家標準時配信機関の提供する時刻配信サービスから取得した時刻情報

独立行政法人「情報通信研究機構」(National Institute of Information and Communications Technology : NICT)の時刻配信サービスにより同期をとったシステムクロックの時刻を完全コードに格納する。時刻監査を実施し、標準時とセンター内システムクロックの誤差範囲を保証することが可能である。

(3) クライアントから送付された位置情報

クライアント機器に組み込まれたGPSアンテナによる測位情報を完全コードに格納する。必要に応じて高精度GPS測位サービスにより正確な位置に補正した上で利用することも可能である。

気象衛星画像情報を含むことがCOCO-DATESの最大の特長であり、これにより、

- 予測不可能な現象／事態を利用しているため、証明コードがある時刻以降に生成されたことを保証可能
- 公開情報を利用しているため、第三者検証が可能であり、例えば食品の生産／加工日時など新しいことをアピールしたい応用に適する。

2.4 タイムスタンプとの相違

総務省が平成16年11月5日に策定した「タイムビジネスに係る指針(ネットワークの安心な利用と電子データの安全な長期保存のために)」で言及されている「時刻認証事業」が提供するサービス、タイムスタンプサービス(図2)は、COCO-DATES同様、時刻に関する証明サービスの一種である。

タイムスタンプサービスの証明内容は次の2点である。

- デジタルデータの存在時刻(デジタルデータがいつから存在したかは証明できない)
 - その時刻以降のデジタルデータの非改ざん性
- 一方、COCO-DATESの証明内容は次のとおりである。
- 証明コードの生成時刻(デジタルデータと結合することですべていつから存在したかを証明できる)
 - 証明コードの要求端末の位置

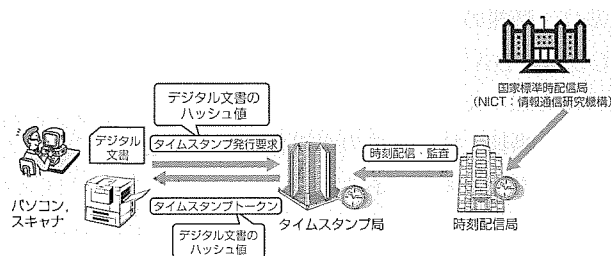


図2. タイムスタンプサービス

- 証明コードの要求端末(登録事業者)両者の相違を表1に示す。

3. COCO-DATESのビジネス展開

COCO-DATESの利用用途は多岐にわたる。ここでは、幾つかの事例について述べる。

3.1 写真による作業報告での活用

建設、土木工事現場等の作業報告、完了報告などの写真にCOCO-DATES証明コードを付与することで、“いつ、どこで、何を実施したか”を証明する証拠写真として活用できる。カメラ端末には、iアプリ^(注2)などでCOCO-DATESのソフトウェアを実装したカメラ(GPS)付き携帯電話やGPSアンテナと通信回線(PHS・無線LAN)を装備した専用カメラ(図3)等がある。

COCO-DATES証明コード付き写真は、撮影と同時にCOCO-DATESアーカイブセンターへ保管することにより、写真データの非改ざん証明も可能となり、より信頼性の高い写真として利用できる。工事現場以外の活用例としては以下がある。

(注2) iアプリは、(株)NTTドコモの登録商標である。

表1. COCO-DATESとタイムスタンプの相違

COCO-DATES	タイムスタンプ
対象はデジタルデータのみでなく、有体物も含む	対象はデジタルデータのみ
必要に応じて、デジタルデータの非改ざん証明も可能(ただし、デジタル署名との組合せが必要)	デジタルデータの非改ざん証明が可能
時間に加えて、位置、端末(登録事業者)の証明も可能	位置、端末(登録事業者)の証明は不可能
時間に対応したオリジナルコード(応用に応じた属性を含む)の発行が可能	時間に対応したオリジナルコードの発行は不可、デジタルデータに依存
証明コードとして、サイズの大きな完全コードとサイズの小さな参照コードの2種類のコードを発行	証明コードはサイズの大きな1種類のみを発行
標準規格、認定制度はいまのところない	標準規格、認定制度(財団法人日本データ通信協会)あり
世界で初めてのサービス	複数の商用サービスあり

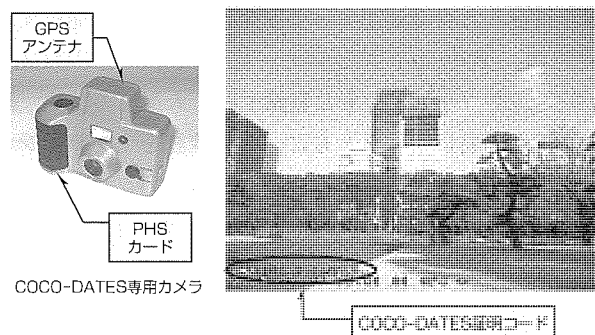


図3. 専用カメラによる写真例

(1) 産業廃棄物管理

排出、輸送、廃棄までの一連の処理に対して、それぞれの処理段階で廃棄物をCOCO-DATES証明コード付き写真で撮影し報告することにより、信頼の高い廃棄物管理が行える(図4)。

(2) 訪問業務の行動管理

配達、訪問看護、訪問介護など、訪問業務や派遣業務の際に現地の写真を撮影して訪問したことを証明する。

(3) 新聞、雑誌、テレビ媒体への投稿写真

契約記者が撮影する写真にCOCO-DATESを適用し、撮影した場所と時間を証明する。

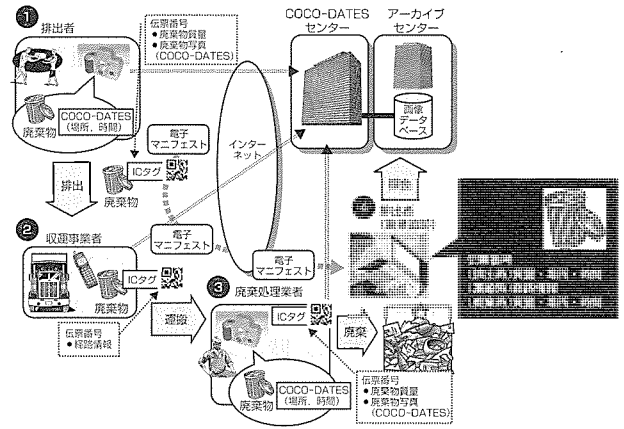


図4. 廃棄物管理

3.2 食品トレーサビリティでの活用

食品の安全確保、事故原因究明を目指したGAP(適正農業規範)を取り入れた生産管理情報(栽培履歴)システムや食品トレーサビリティシステムが注目されている。COCO-DATESはこれらのシステムに提供するツールとして、当社が第三者となって出荷場所や製造日付などを証明する機能を提供する。

農作物生産管理支援システム“e農業日誌”(三菱電機エンジニアリング社が開発)はCOCO-DATESと連動し、農作物の生産管理情報を発信するシステムである。GAPを取り入れることも可能で、圃場(ほじょう)での栽培履歴から“いつ、どこで、どのように栽培されたか”といったトレーサビリティを可能にする(図5)。

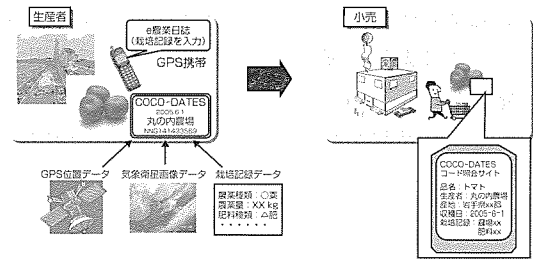


図5. e農業日誌とCOCO-DATES

3.3 文書管理での活用

コピー、プリンター、FAXなどの文書が出力される際にCOCO-DATES証明コードを付与し、“この書類は、いつ、どこで、出力されたか”を文書管理することができる。

3.1節の写真を使った証明と同様に、文書を出力する際に複合機が保持するCOCO-DATES証明コード付きデジタル文書データをCOCO-DATESアーカイブサーバへ保管することにより、出力された紙文書の非改ざん証明も可能となる。

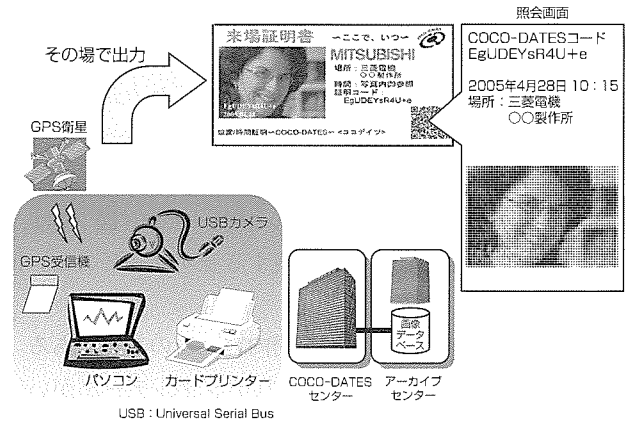


図6. 来場証明

3.4 来場証明, 入退場管理

外来者の来場証明や入退場管理への活用ができる。来場証明パッケージ(三菱スペースソフトウェア社が開発中)は、来場時にCOCO-DATES証明コード、本人写真、QRコード等を付与した身分証明カードをオンデマンドで発行すると同時に、アーカイブセンターに本人写真をCOCO-DATES証明コードとともに登録する。入退場の時間、場所の管理が容易になるとともに、本人確認をオンラインで行うことができるため、偽造防止効果の高いシステムを構築することが可能となる(図6)。

4. む す び

衛星を利用して位置と時間を証明するサービス“COCO-DATES”は、一般に公開された気象衛星画像からの情報を基に、情報の正当性を容易に確認することができる。

COCO-DATESは世界中で使用でき、本稿で紹介した以外にも様々な分野での需要が見込まれている。ビジネス展開、市場拡大に向けての実用化展開を加速することで、事業拡大を図る所存である。

静止衛星用標準バス“DS2000”のシステム技術

水溜仁士*
野村高嗣*

Features of the DS2000 Bus System for Geosynchronous Satellite

Hitoshi Mizutamari, Takatsugu Nomura

要 旨

静止衛星用標準バス“DS2000”は、三菱電機が参画してきた宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)や無人宇宙実験システム研究開発機構(以下、USEF)の衛星開発プログラムやこれまでの国内外商用衛星・機器商談を通じて培ってきた技術を基に、商用衛星顧客のニーズにこたえる下記要素を踏まえて確立した静止衛星用標準バスである。DS2000は、JAXAの技術試験衛星VIII型(ETS-VIII)をベースとし、個々の要素技術については2002年に打ち上げられたJAXAのデータ中継技術衛星(DRTS)の実績、その他衛星の開発実績に基づいている。

商用衛星市場における顧客の衛星に対する要求は、以下の4項目に大別される。

(1) 衛星の製造期間の短縮

(2) 衛星の製造コストの低減

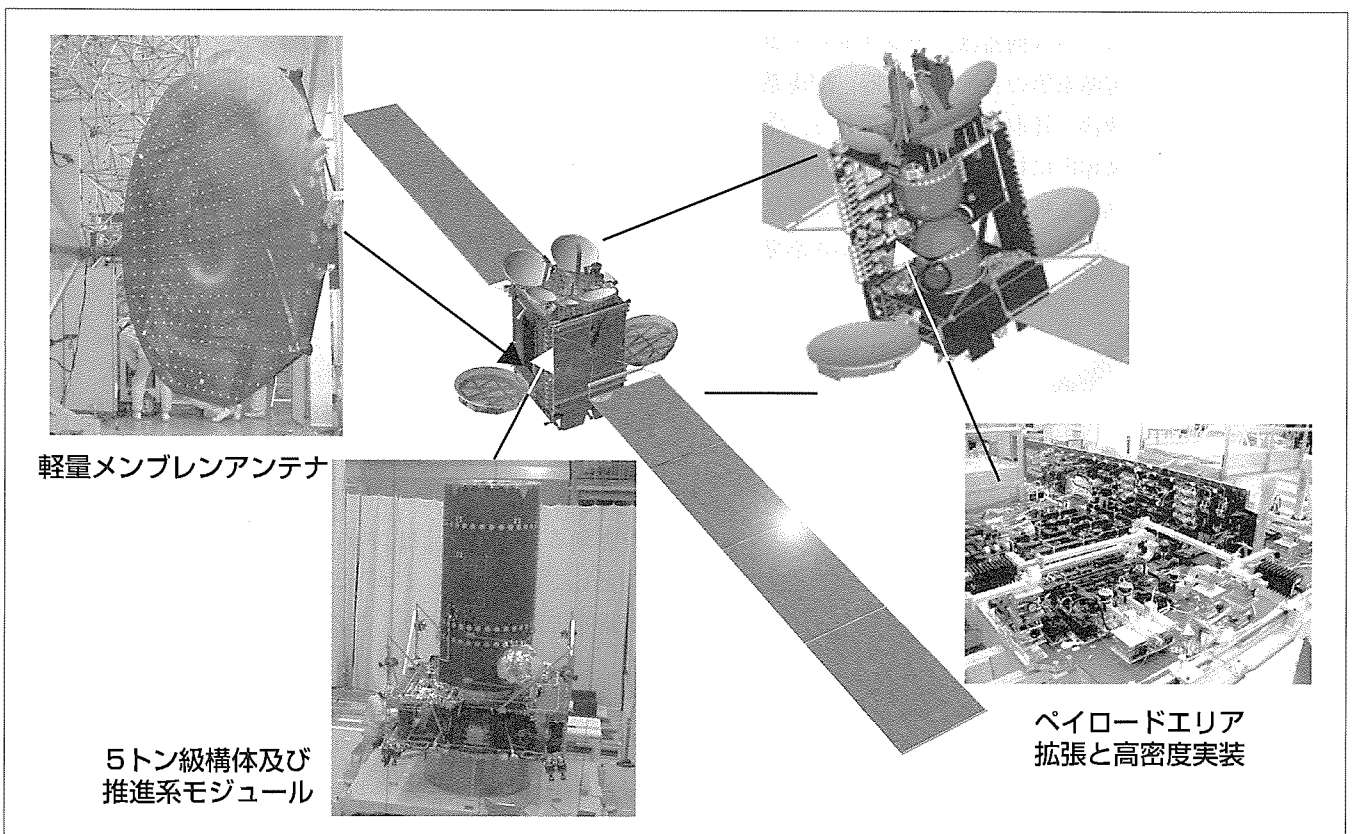
(3) 品質、信頼性の確保

(4) 運用安全性の確保

DS2000は、この要求にこたえるため使用構成機器のメニュー化・標準化、構体系の軽量化、推進系構成の標準化、通信ミッション等のペイロード搭載エリアの拡張、高密度実装化、商用通信衛星用軽量アンテナの採用、インテグレーション手法の適用⁽¹⁾及び設計ツールの整備等を踏まえて商用市場向けに確立した静止衛星用標準バスである。

本稿では、上記を実施した静止衛星用標準バスDS2000について述べる。

当社は、このDS2000を擁して国内外の商用衛星市場で衛星事業を展開している。



DS2000衛星バスシステムの概要

DS2000衛星バスシステムは、JAXAやUSEFの衛星開発プログラムへの参画やこれまでの国内外商用衛星・機器商談を通じて培ってきた当社技術をベースに、使用構成機器のメニュー化・標準化、構体系の軽量化、推進系構成の標準化、ペイロードエリアの拡張、高密度実装化、商用通信衛星用軽量アンテナの採用等を踏まえて確立した静止衛星用標準バスであり、以下の能力を持っている：

最大打ち上げ質量 5 トン、ペイロード搭載エリア 12m²(拡張可能)、電力規模 15kWmax、ミッション寿命 15年以上

1. ま え が き

静止三軸衛星の国際市場において、欧米の衛星メーカーは独自の標準衛星バスを装備してビジネスを展開している。欧米メーカーに対抗できる競争力を身に付けるために、当社は、欧米衛星メーカーの標準衛星バスと伍(ご)していける衛星バスの標準化を展開してきた。本稿で述べる衛星バスDS2000は、当社のJAXAやUSEFの衛星開発プログラムへの参画やこれまでの国内外商用衛星・機器商談を通じて培ってきた技術をベースにするもので、これに納期、コスト、品質、運用性といった商用衛星顧客のニーズを踏まえて商用市場向けに確立した静止衛星用標準バスである。

2. 衛星の構成

当社標準衛星バスDS2000を用いた商用通信衛星の外観を図1に示す。衛星の上面及び側面には通信用アンテナを配し、また、別の側面には電力発生源としての太陽電池パネルを配している。衛星は、静止軌道高度36,000kmで運用されるが、その時の姿勢から、通常図の上面を地球指向面、アンテナを搭載する側面を東面及び西面、太陽電池パネルを搭載する面を南面及び北面と呼ぶ。

図2に衛星内部概要を示す。衛星は、通信系ミッション等のペイロード機器及びその機能・性能を達成するためのバス機器で構成される。バス機器は、テレメトリ・コマンド系、姿勢制御系、電源系等の各種電子機器、機構系機器、構造系機器、熱制御機器、推進系機器等からなる。電子機器は、直方体の衛星構体内に搭載される。衛星を静止軌道へ運ぶための推進系燃料を搭載する大型タンクは衛星中心部に2台搭載し、電子機器は温度制御の観点から高発熱機

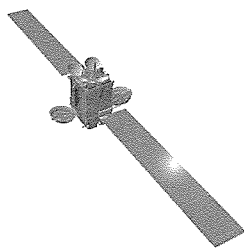


図1. 衛星の外観

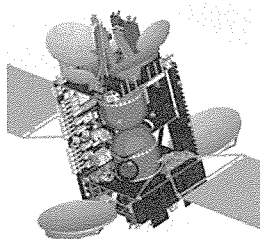


図2. 衛星の内部概要

器を衛星南北面パネルに配する。また、通信性能の効率を考慮し受信アンテナから送信アンテナに至る機器レイアウトを適切なものとしている。

3. 標準衛星バスDS2000

3.1 DS2000のコンセプト

DS2000のコンセプトは、以下に挙げる顧客の要求にこたえることを目的としたものである。

- (1) 衛星の製造期間の短縮
- (2) 衛星の製造コストの低減
- (3) 品質、信頼性の確保
- (4) 運用安全性の確保

JAXA、USEF等の衛星プログラムを通じて既に上記要求にこたえる技術を当社衛星製品に取り込んでいるが、さらに、商用衛星顧客の要求するレンジに適合させ、改善を加えるため各種施策を実施してきた。表1にその代表的な実施項目、コンセプトと客先ニーズとの対応を示す。

3.2 使用構成機器のメニュー化・標準化

商用衛星に求められるバスシステムの基本機能・性能に対応できる範囲で、内作及び調達構成機器の仕様の統一、設計の標準化を推進した。衛星によらず同一とすることが可能な姿勢制御系センサ、スラスタ、推進系機器等の調達機器に関しては同一仕様とし、かつ、ベンダー側の標準品をベースに品質要求を加味し仕様を決めることでコストの削減、品質の確保を図っている。また、必要電力量、テレメトリ・コマンド数、RF(Radio Frequency)周波数等、衛星の規模、仕様に依存する機器については機器構成をスライス構造とし、スライスの枚数を増減させることにより要求のバリエーションに対応させる、また、衛星の規模、仕様に依存しない部分は共通ハードウェアとし依存する部分のみを変更するといったコンセプトを取り入れ、衛星ごとの設計、解析量の削減を図った。

3.3 構体系の一体成形化と軽量化

衛星構体の中心部には、骨格を形成するための親柱となる約φ1.3m、高さ約4mの円筒状のセントラルシリンダが存在する。この部品はCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)表皮+アルミニウム製ハニカムコアのサンドイッチ構造である。従来は、この製造を半割の円筒をまず成形し、その後、接着で円筒型に組み立てていた。今回、成形治具、プロセス改善により円筒形の一体成形を実現し、成形と接着回数の削減により工期短縮を実現した。また、衛星打ち上げ質量要求を6トンから商用衛星として満足できる5トンに下げることにより構体の軽量化を実現した。一体化シリンダと2分割シリンダを図3に示す。

3.4 推進系構成の標準化

一般的な商用通信・放送衛星のアンテナ配置を踏まえ推進系スラスタの配置をトレードオフし、スラスタの標準配

置を決定した。スラスタは、一種類に統一することにより、コストの削減、工期、品質の安定化を図った。スラスタの衛星とのインタフェースもブラケットの標準化を推進した。これにより、衛星ごとの初期設計を不要とし設計コスト、期間の削減を図っている。

3.5 ペイロード搭載エリアの拡張

商用通信衛星では、より多くの通信系機器の衛星への搭載が求められる。この要求を考慮し、バス系機器の搭載を極力衛星下部へ集めた。また、一部ペイロードとのインタフェースが多いデータハンドリング系機器、電力ロスを少なく抑えるために太陽電池パドルの近くに配置することが好ましい電源系機器をペイロードエリアにフレキシブルに

配置するコンセプトとした。これにより、全体の構体サイズを変えることなくペイロードエリアの拡張を図り、高さ方向に約1.5倍の拡張を実現した。図4にDS2000構体を示す。

3.6 商用通信衛星用軽量アンテナ

数多くのアンテナ搭載を可能にするためには、アンテナの軽量化が不可欠である。通信アンテナの代表例として、メンブレンアンテナ及びデュアルグリッドアンテナを図5に示す。メンブレンアンテナは、3軸織りのCFRP表皮を採用し、バックストラクチャのみで保持することにより、従来のサンドイッチ構造反射鏡に比べ、約半分の軽量化を実現した。このアンテナの反射鏡は、打ち上げ時は衛星東西面に並行に収納されており、軌道上で展開される。

表1. 実施項目と効果

実施項目	要求	効果	解説
1 使用構成機器のメニュー化・標準化	工期短縮	○	商談ごとの新規要素を極力排除し、仕様を統一し、標準部品、図面、同じ調達機器を採用することで、初度費用を削減、工期短縮、品質の安定化を実現。衛星ごとに使用方法が異なるということもなくなり運用安全性向上。
	コスト削減	○	
	品質、信頼性	○	
	性能及び運用安全性	○	
2 構体系の一体成形化と軽量化	工期短縮	○	従来、半円筒の突き合わせで製造していた中央構体(円筒型)をプロセスの改良により円筒一体成形に改善。また、商用衛星市場でニーズの多い打ち上げ質量5トン以下に設計仕様を見直すことで軽量化を実現。工期短縮、打ち上げ総コストを含むコスト削減と安定した品質の確保。
	コスト削減	○	
	品質、信頼性	○	
	性能及び運用安全性	-	
3 推進系構成の標準化	工期短縮	○	設計変更が大きくシステム設計に影響を与える推進系の構成、レイアウトに関し、商用衛星のニーズに的を絞って標準化を図ることで、推進系自身の4要素(工期、コスト、品質、運用性)の改善のみならず、姿勢制御系、熱制御系の4要素の改善も実現。
	コスト削減	○	
	品質、信頼性	○	
	性能及び運用安全性	○	
4 ペイロードエリアの拡張・高密度実装化	工期短縮	-	構体系の構成改良とバス機器構成、レイアウトの改善により衛星全体の大きさを変えることなく客先の利用目的である通信系機器等のペイロードを搭載するエリアを拡張。これにより衛星能力増となり、コストパフォーマンスの改善。
	コスト削減	○	
	品質、信頼性	-	
	性能及び運用安全性	○	
5 商用通信衛星用軽量アンテナの開発と搭載方式のメニュー化	工期短縮	○	軽量かつ軌道上での安定した性能を発揮するメンブレンアンテナの製品化により、製造コスト、打ち上げ総コストを削減、品質及び通信性能の向上を実現。アンテナ搭載方式のメニュー化により設計時間を短縮。安定した品質を確保。
	コスト削減	○	
	品質、信頼性	○	
	性能及び運用安全性	○	
6 インテグレーション手法の標準化	工期短縮	○	工期短縮を目的として搭載機器から衛星システムにわたるインテグレーション手法の標準化を実施 ⁽¹⁾ 。
	コスト削減	○	
	品質、信頼性	○	
	性能及び運用安全性	○	
7 設計ツールの整備	工期短縮	○	商用衛星標準仕様の範囲で設計バリエーションに対応する各種設計ツールを整備継続中。一部適用を開始。標準プロセス適用により安定した設計が可能となり工期短縮、コスト削減を実現。
	コスト削減	○	
	品質、信頼性	○	
	性能及び運用安全性	-	

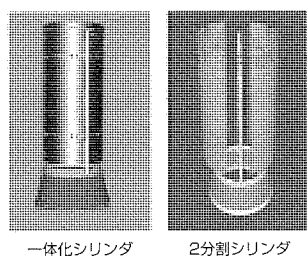


図3. セントラルシリンダ

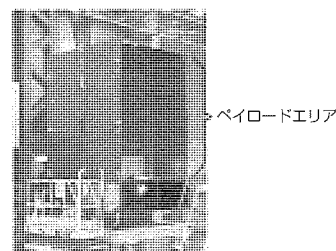
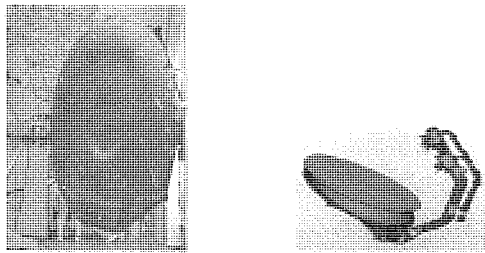


図4. DS2000の構体



(a) メンブレンアンテナ (b) デュアルグリッドアンテナ

図5. 通信用アンテナ

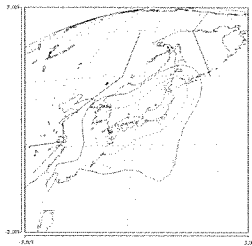


図6. 成形ビームの解析例

また、デュアルグリッドアンテナは、直交する2つの直線偏波を1つの鏡面で共用できるため、周波数有効利用を図ることができる。これらのアンテナ搭載方式のメニュー化を図り、設計時間の短縮化と安定した品質向上を実現している。

通信カパレッジ要求に柔軟に対応できるように鏡面修整設計を施すことで、複雑なビーム形状を鏡面の修整のみで実現できる。今回、波動的効果を考慮した設計法を導入することで、従来よりもより複雑なカパレッジ要求にも柔軟に対応できる設計手法を確立した。図6に高度な成形ビームの解析例を示す。

3.7 インテグレーション手法の標準化

DS2000衛星システムは、通信などの衛星ミッションをつかさどるペイロードモジュール、衛星を所定の軌道、姿勢、温度に維持し必要な電力をペイロードに提供するための基幹部分をつかさどるバス・推進モジュールにより構成される。この製造、組立て、試験を極力効率良く短期間実施可能とするために、ペイロードモジュールとバス・推進モジュールの組立てを並行作業で実施できるようにした。また、構体組立ての効率化、並行作業化、ハーネス配線作業及び試験の自動化等を実現し工期の短縮と品質の向上を図った⁽¹⁾。

3.8 設計ツールの整備

短工期、低コスト、高品質という顧客のニーズにこたえるため、設計自身も高品質かつ短工期である必要がある。この要求にこたえるため、商用衛星標準仕様の範囲での設計バリエーションに対応する各種設計ツールの整備及びパラメータデータの蓄積を継続している。表2にツールの一

表2. 商用衛星設計ツール一覧

電子化ICD(Interface Control Document)
コンポーネントデータベース/コンポーネントリスト
レイアウト設計ツール
電力解析ツール
バッテリーサイジングツール
太陽電池パドルサイジングツール
軌道・推進解析ツール
信頼度解析ツール
熱解析ツール
PDCU(Power Distribution Control Unit)サイジングツール
ODC(Ordnance Controller)サイジングツール
PCU(Power Control Unit)サイジングツール

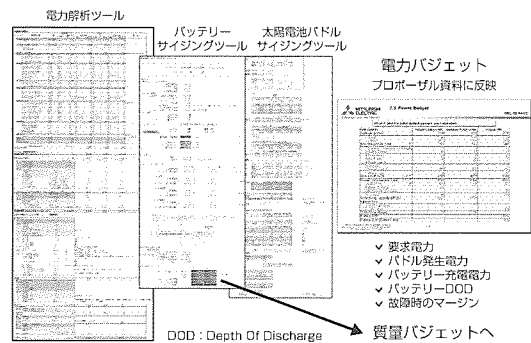


図7. 商用衛星設計ツールの出力例

覧を、図7に設計ツールの出力例を示す。

4. む す び

現在の商用衛星市場は1990年代後半の活況から比べて幾分冷え込んでいるが、航空機・船舶へのインターネット接続、双方向テレビ放送、測位サービス等、衛星を活用した事業が実現されてきており、今後衛星を使用した各種サービス、ビジネスの拡大が見込まれる。衛星バスは、利用も含めた大規模なシステムのインフラ部分として基幹をなすものである。

当社は、納期、コスト、品質、運用性といった商用衛星顧客のニーズにこたえるため、静止衛星用標準バスDS2000を擁して、国内外の商用衛星市場での受注活動を展開している。

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) 世古博巳, ほか: 商用衛星システム“DS2000”, 三菱電機技報, 77, No.8, 511~514 (2003)
- (3) Seko, H., et al.: Development of the DS2000 Platform for GEO/HEO Satellites, AIAA 2003~2353 (2003)

温室効果ガス観測技術衛星“GOSAT”

長谷川 光* 岡田賢二*
宮崎洋彰* 石津忠明*
駒形文博*

Greenhouse Gases Observing Satellite “GOSAT”

Hikaru Hasegawa, Hiroaki Miyazaki, Fumihiko Komagata, Kenji Okada, Tadaaki Ishizu

要 旨

温室効果ガス観測技術衛星“GOSAT” (Greenhouse Gases Observing Satellite) は、1997年に採択された京都議定書の第一約束期間(2008～2012年)における温室効果ガス観測ミッションの第一段階として、以下のような目標を遂行するために開発/利用される。

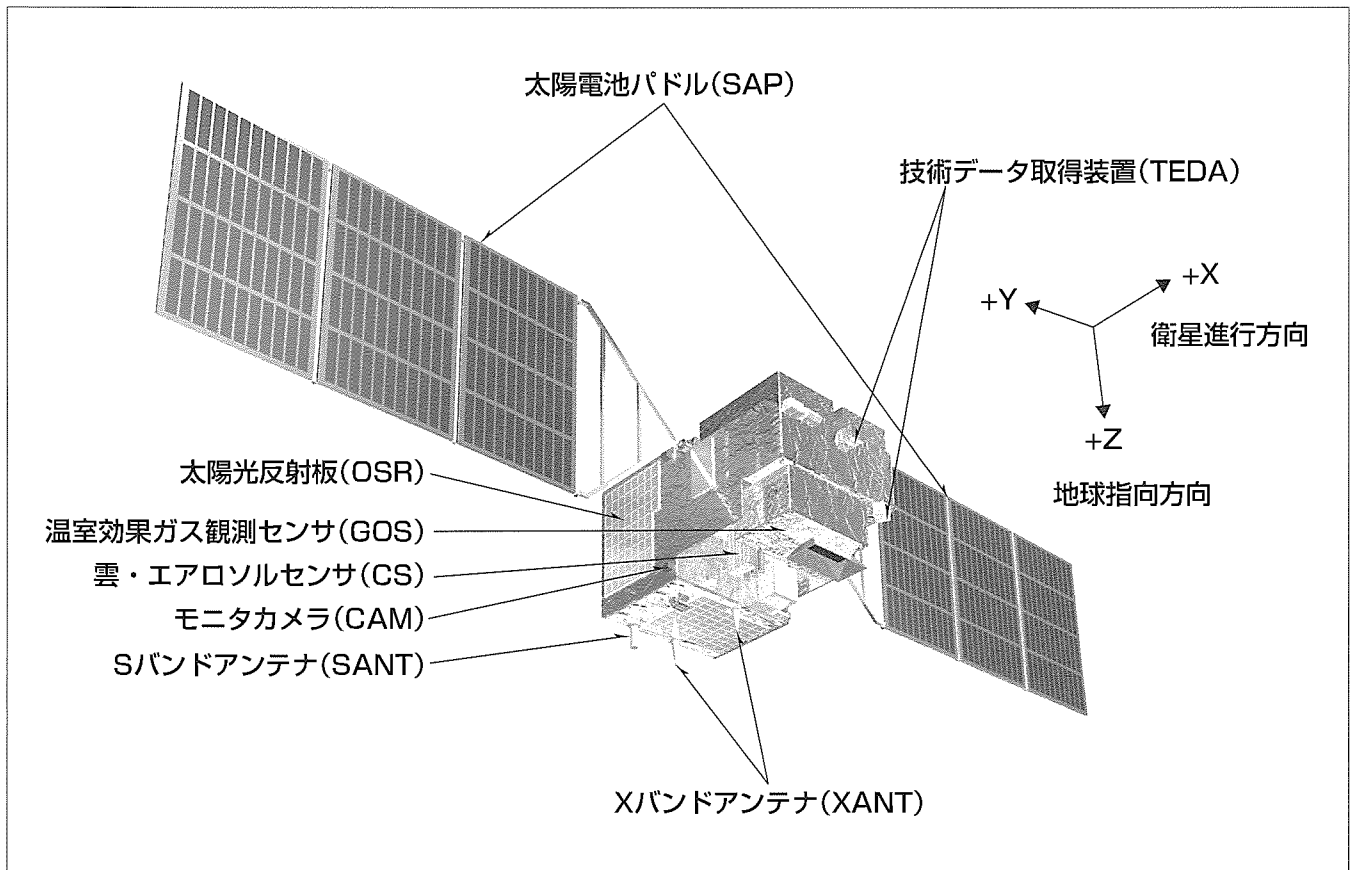
- 温室効果ガスの全地球濃度分布の測定
- 二酸化炭素吸収排出量の亜大陸単位での推定誤差の半減
- 温室効果ガス観測技術基盤の確立

現在、温室効果ガスの濃度分布は地上の観測地点や航空機から取得した測定データを使用して推定しているが、測定データが少なく地球規模での濃度分布を把握するのが困

難である等の問題がある。開発中のGOSATを使用することで温室効果ガスの濃度分布を地球規模で把握することが可能となるため、温室効果ガス吸収排出状況の把握など地球温暖化防止への国際的な取り組みに貢献することが期待される。

GOSATは宇宙航空研究開発機構(JAXA)、環境省及び国立環境研究所の共同プロジェクトで、JAXAは、衛星の開発、打ち上げ、及びデータ取得運用を担当し、環境省と国立環境研究所は、取得したデータを基に、温室効果ガス吸収排出状況の把握などの利用を担当する。

三菱電機は、JAXAの指導の下、衛星システムのプライムメーカーとして衛星本体の開発を担当する。



GOSAT軌道上想像図

GOSATは、温室効果ガスの観測を主要ミッションとした地球観測衛星であり、上図の+X方向を進行方向に、地球の南北を周回する極軌道を使用して、地球全域を観測する。衛星の形状は2翼式(SAPを2翼使用)の箱型で、片翼のみでも限定的な運用が可能な設計としている。外観は上図に示すとおりで、主要ミッション機器：GOS、CS、及び通信アンテナ：SANT、XANTなどが、地球指向面(+Z方向)に取り付けられている。

1. ま え が き

GOSATは、温室効果ガスの濃度分布を地球規模で測定するため、2008年に打ち上げが予定されている。当社は、JAXAの指導の下、衛星システムのプライムメーカーとして衛星本体の開発を担当する。昨今の環境観測技術衛星(ADEOS-II)太陽電池パドル系の軌道上事故など衛星の全損に至る重大事故を回避する観点から、GOSATでは、より信頼性を向上するための方策が採用されている。

本稿では、人工衛星での観測の利点、及びGOSATの概要を示すとともに、信頼性を向上するための方策についても述べる。

2. 人工衛星による観測の利点

温室効果ガスのこれまでの観測は、観測地点が少なく観測地域も限られていることから、グローバルなデータの取得が困難であった。また、各地域で取得した観測データについても、観測地点により使用する観測機器の違いや性能のばらつきなどから、容易にデータを比較/評価することができないなどの問題があった。

GOSATによる宇宙からの観測では、約98分で地球を1周することにより、地球表面のほぼ全域にわたって高頻度に温室効果ガスを観測することができ、従来に比べて圧倒的に多くの地点のデータを取得することが可能となる。また、同じセンサで観測することから、観測機器の違いや性能の

ばらつきによるデータへの影響はなく、温室効果ガスの濃度分布を高い精度で観測し、比較/評価することが可能となる。

3. 衛星システムの特長

GOSAT衛星システムブロック図を図1に、主要諸元を表1に示す。

3.1 複数の打ち上げ手段への適合性

打ち上げロケットとしてH-IIAをベースラインとしているが、バックアップとして、GX, ARIANE 5, DELTA II, DELTA IVを想定し、フェアリング包絡域及び機械環境条件に関して適合性のある衛星バスとしている。

表1. GOSATの主要諸元

項目	内容
打ち上げロケット	H-IIAロケット
射場	種子島宇宙センター
軌道	種類：太陽同期軌道 軌道高度：約666km 軌道傾斜角：約1.71rad(約98度) 周回周期：約5,880s(約98分)
打ち上げ時質量	約1,650kg
寿命	5年以上
ミッション機器	温室効果ガス観測センサ(GOS) 雲・エアロソルセンサ(CS) 技術データ取得装置(TEDA) モニタカメラ(CAM)

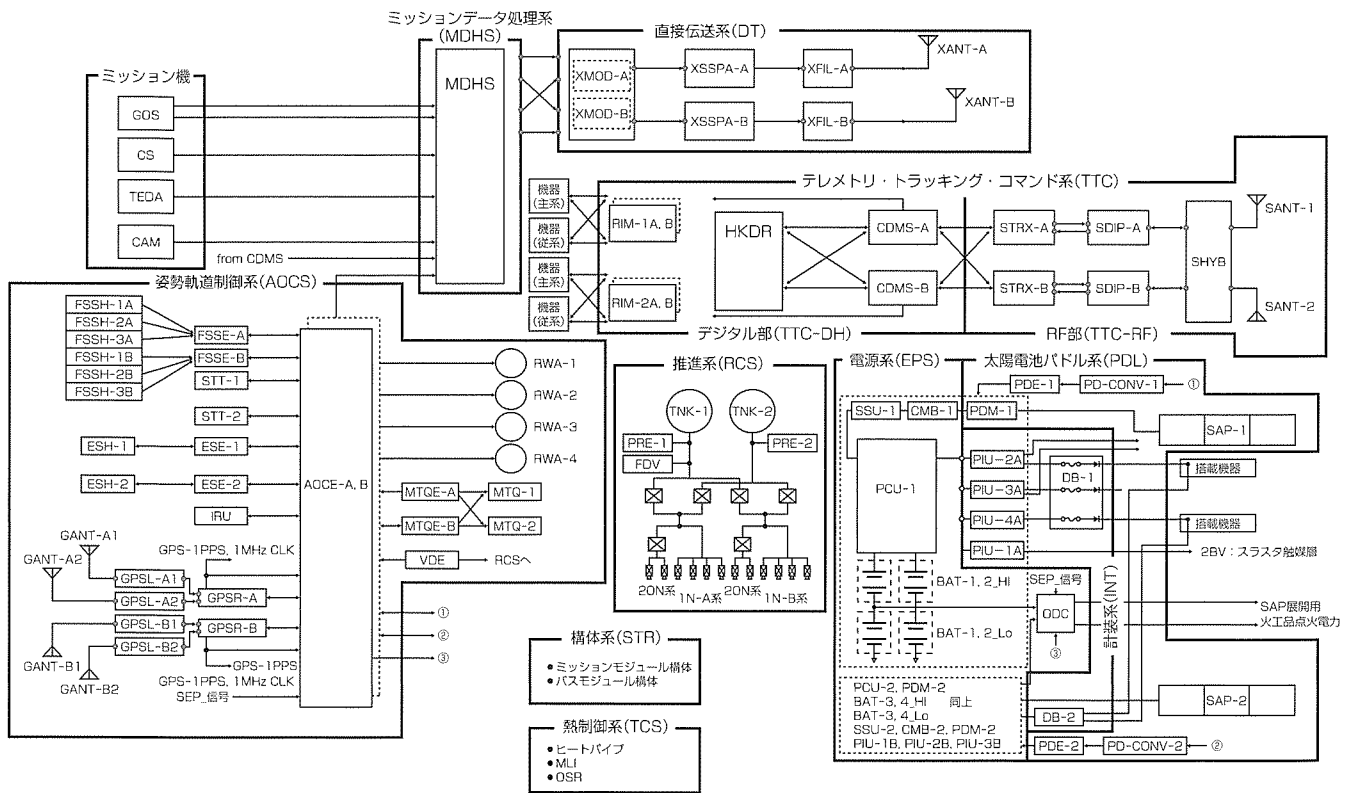


図1. GOSAT衛星システムブロック図

3.2 ミッション達成のための確実な衛星バス

衛星バスを構成する各サブシステムは開発実績、フライト実績のある確実な方式を採用し、高信頼性設計、ロバスト設計、故障検知・分離・再構成機能(FDIR)によりミッション達成が確実な衛星バスとしている。コンポーネントは、基本的に冗長構成とすることで衛星システムの信頼度を高める設計としている。コンポーネントに使用する部品は認定されたものを用い、コンポーネント単体試験、サブシステム試験、衛星システム試験を通じて初期故障を排除する。コンポーネントの不具合への対策として、従来方式の同じコンポーネントを複数持たせた冗長構成とするだけでなく、ほかのコンポーネントの組合せにより同じ機能を実現させる方式冗長へのアプローチも併用している。そのほかに、下記に示す方策をとることにより従来の衛星システムから生存性を強化したシステムとしている。

- 電源2バス化
- パドル一翼故障時にも限定的なミッション継続
- 姿勢系センサ二重故障に対しても対応可
- 推進系スラスト故障時における対応能力の強化
- 直接伝送系Xバンドアンテナの二重冗長化

4. 搭載ミッション機器

GOSATには、地球観測ミッション系としてJAXAと環境省が共同で開発を進めている温室効果ガス観測センサと雲・エアロソルセンサの2つのセンサが搭載される。そのほかに、技術データ取得装置とモニタカメラが搭載される。

4.1 温室効果ガス観測センサ(GOS)

地球から宇宙へ放射される赤外線を観測するセンサで、観測された温室効果ガスの吸収線スペクトルを分析し、地上の温室効果ガスの濃度を正確に求めることを目的としている。フーリエ分光により短波長赤外、熱赤外のバンドの観測を行う。センサは光学系ユニットと電気回路ユニット、制御系ユニットから構成され、衛星のミッションモジュールに搭載される。GOSの観測精度を満たすため、たとえ微量でも観測波長領域に吸収線を持つ気体を放出する材料を衛星に用いないこと、衛星が地上にある間は従来の衛星以上に厳しく汚染防止を管理すること、可動物から発生する擾乱(じょうらん)を小さく抑えることなどの衛星システムの管理や設計が必要である。

4.2 雲・エアロソルセンサ(CS)

GOSの補助センサとして、補正のための雲及びエアロソルの観測を行うためのセンサである。CSは光学系ユニットと電気回路ユニットから構成され、2つともミッションモジュールの地球指向面に搭載される。

4.3 技術データ取得装置(TEDA)

TEDAは衛星軌道上での宇宙環境をモニタする装置で、軽粒子モニタ(LPT)、重イオン観測装置(HIT)があり、電

気処理部とセンサ部から構成される。TEDAの各コンポーネントはミッションモジュールとバスモジュールに分散して搭載される。

4.4 モニタカメラ(CAM)

太陽電池パドルの展開状況や展開後の挙動、打ち上げ時のロケットフェアリングの開頭時や衛星分離時の汚染物質の放散の有無、軌道上での衛星外観のモニタを行い、衛星の健全性の評価や不具合時の原因究明のためのデータを取得することを目的としている。また、カメラヘッド1台をGOS光学ユニット内に搭載し、GOSの視野確認と視野レジストレーションを行う。CAMは合計8台のカメラヘッド、及びカメラ制御部、投光器から構成される。

5. 搭載バス機器

5.1 テレメトリ・トラッキング・コマンド系(TTC)

TTC系は、RF(Radio Frequency)部(TTC-RF)及びデジタル部(TTC-DH)から構成されており、地上局から直接コマンド信号を受信し、復調、復号して各サブシステムへ配信する。また、各サブシステムのテレメトリデータを取得、編集、記録、変調して地上局へ送信する。また、測距信号の中継機能、ミッションデータを補正するためのデータ収集/分配機能、異常時において負荷電力を下げるための軽負荷機能(LLM)、及び自動化・自律化機能等を持っている。GOSATでは、さらに超軽負荷機能(S-LLM)を追加し、衛星の生存性を高めている。

5.2 ミッションデータ処理系(MDHS)

MDHS系は、各種のセンサから送出されるミッションデータを処理して多重化し、大容量のメモリに記録するとともに、記録したデータを再生して直接伝送系へ伝送する機能を持っている。

5.3 直接伝送系(DT)

DT系は、MDHSから伝送されたデータをXバンド変調器(XMOD)でオフセット4相位相変調(OQPSK変調)し、XバンドのRF信号に変換した後、Xバンド高出力増幅器(XSSPA)で増幅して、地上局へ直接送信する。

5.4 電源系(EPS)

日照時に太陽電池パドルで得られた電力を受けて電圧を安定化し各機器に分配するとともにバッテリーを充電する。日陰時はバッテリーから各機器に電力を分配する。バッテリーとしては軌道上実績が豊富なNiCdバッテリーを採用している。生存性強化の観点から、GOSATでは、電源系を2系統保有するマルチバス構成としている。各バスラインからの電力をダイオードを通して各機器に分配しており、1つのバスラインが故障した場合でも電力を残りのバスラインから供給することが可能な設計となっている。

5.5 太陽電池パドル系(PDL)

軌道上で展開する2翼の太陽電池パドル上に張った太陽

電池セルで衛星の必要とする電力を発生する。GOSATの太陽電池パドルは片翼でもバス機器を動作させるのに必要な電力を確保でき、1翼が故障した場合でも部分的な観測の継続や不具合の把握・対策実施が行え、生存性の向上が図られている。PDL系は3枚の折り畳みパネルと展開機構でできており、2対の太陽電池パドルと、太陽電池パドルを太陽方向に向けるパドル駆動機構で構成されている。太陽電池パドルは打ち上げ時には保持開放機構で衛星構体側面に保持され、軌道上で火工品の作動により開放・展開される。太陽電池パドルは展開した状態で衛星取り付け部から先端まで約6mで、1翼当たりの太陽電池パドルが軌道上5年後に発生する電力は太陽光垂直入射の条件で2.0kW以上である。

5.6 姿勢軌道制御系(AOCS)

AOCS系は、搭載計算機(AOCE)、姿勢センサ及びアクチュエータから構成されており、衛星分離後の姿勢捕捉(ほそく)、ミッション運用時の高精度姿勢制御、軌道制御及びパドル制御等を実施する。最初の姿勢状態は衛星の進行面を太陽方向に指向させ、太陽電池パドルからの電力が確実に得られるようにしている。その後、ミッション運用が可能な地球指向の姿勢に移行させていく。姿勢捕捉においてはスラスタを使用した制御を実施する。衛星底面に取り付けられた4本の1ニュートン(1N)スラスタを使用することにより3軸の姿勢制御が可能である。ミッション運用時にはアクチュエータとしてはリアクションホイール(RWA)及び磁気トルカ(MTQ)を使用した姿勢制御を実施する。センサとしてはスターセンサ(STT)、GPS受信機(GPSR)及び慣性基準装置(IRU)を使用し、高精度な姿勢軌道制御が可能である。

5.7 構体系(STR)

GOSAT構体は、主に観測センサを搭載するミッションモジュール構体と、バス機器を搭載するバスモジュール構体で構成される。全体の寸法は打ち上げ方向の高さと横、奥行きがそれぞれ約3.6m, 1.8m, 2.0mである。ミッションモジュールとバスモジュールは物理的に分離が可能で、衛星の組立てが容易に行える。バスモジュール構体は中央に炭素繊維強化プラスチック(CFRP)のシリンダを持ち、4枚のウェッジで周囲の機器搭載パネルを支持するほか、底部にロケット分離部を持っている。また、シリンダ内部に推進系(RCS)の550mmφタンク2個を支持する。ミッションモジュール構体はパネルで構成される箱で、各パネルはCFRP表皮のハニカムサンドイッチとすることで軽量化を図り、同時に熱変形を小さくしてGOSの光学系の精度に影響しないようにしている。

5.8 熱制御系(TCS)

GOSATの熱制御は、GOSとCSの比較的大型のセンサユニットや、熱的にクリティカルな機器を衛星側とは独立した熱制御としてインタフェースを容易にし、それ以外のセンサ、バス機器は衛星一体として制御する設計である。熱制御はヒートパイプ、多層インシュレーション(MLI)、太陽光反射板(OSR)などの熱制御材による受動制御と、サーモスタットで制御されたヒーターによる能動制御を組み合わせた従来の衛星で実績のある方法で行い、搭載機器を所定の温度範囲に保つ。

5.9 推進系(RCS)

RCS系はヒドラジンを推進薬とするガスジェットによって推力を発生し、衛星の姿勢制御、軌道制御に用いられる。RCS系は550mm直径の推進薬タンク2個と4本の20Nスラスタ、8本の1Nスラスタと推進配管、各種バルブ、圧力センサ、フィルタなどで構成される。推進薬タンクは、5年以上の運用と、ミッション寿命末における投棄軌道への投入に必要な推進薬の搭載が可能である。20Nスラスタと1Nスラスタはそれぞれ2本と4本で必要な機能を果たすことができ、倍の数量を持つことで故障に対する冗長性を持っている。また、従来は4本の1Nスラスタ中、1本でも故障するとすべて他の4本へ切り換える必要があったが、GOSATでは、両方の対の中の健全なスラスタを選択して使用できるようにして冗長性を高めたことが特長である。

5.10 計装系(INT)

INT系は機械計装及び電気計装から構成される。機械計装としては搭載機器を保持するブラケット類、推進系タンクを保持するタンクサポート、バランスウェイト及び締結ねじ等がある。電気系計装としては、電力分配器(PIU)、ダイオードボックス(DB)、機器間ハーネス、同軸ケーブル、分離スイッチ、ボンディングストラップ、アンビリカルコネクタ等がある。

6. む す び

この開発を遂行するに当たり指導いただいたJAXAを中心とするGOSAT関係者に謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 文部科学省 宇宙開発委員会：温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)プロジェクトの評価報告書(2004-8-13)
- (2) JAXA：温室効果ガス観測技術衛星-GOSAT, 衛星パンフレット(2004-9)

宇宙ステーション補給機“HTV”

津屋直紀*
名取直幸*

H-II Transfer Vehicle “HTV”

Naoki Tsuya, Naoyuki Natori

要旨

H-II A能力向上型による2008年度の技術実証機打ち上げを目標に、国際宇宙ステーション(ISS)に補給を行う宇宙ステーション補給機(H-II Transfer Vehicle: HTV)の開発が進められている。HTVはフライトセグメント(軌道上部分)、グランドセグメント(地上運用設備)、ISSセグメント(日本実験棟(JEM)搭載機器)より構成され、フライトセグメントは補給キャリア、アビオニクスシステム、推進系より構成される。三菱電機は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の指導によりHTVのアビオニクスシステム、及びグランドセグメント・ISSセグメントの開発、並びに

飛行運用の計画を行っている。当社では、現在、JEMに搭載するためスケジュールが先行するISSセグメントは開発モデル試験の最終段階及びフライトモデルの設計、アビオニクスシステムは電気モジュールの各サブシステムの開発モデル製作・試験が行われている段階である。

本稿では、HTVの最新の設計とこれまでの開発進捗(しんちよく)の一部について述べる。また、HTVの量産計画、及びHTVのアビオニクスシステムを活用した派生型宇宙機の構想も述べる。



宇宙航空研究開発機構 提供

左上はISSセグメントの近傍通信システム(PROX)の中核機器であるPROX2(ベースバンド機器部分)エンジニアリングモデルである。
右下はPROX2のISSクルー用のコマンド端末(HCP)をレビューする宇宙飛行士らである。

図の上から時計回りに: PROXの通信用アンテナ*, GPS(Global Positioning System)アンテナ*, ISSクルー用のコマンド端末(エンジニアリングモデル)、レーザーダ・リフレクタ*(*)はフライトモデルを示す。

1. ま え が き

HTVは、米国のスペースシャトル、ロシアのプログレス、ソユーズ、欧州宇宙機関(ESA)のATV(Automatic Transfer Vehicle)とともに、ISSへの物資補給手段の一角を担う無人・自動ランデブ宇宙機である。HTVはISSへの補給物資輸送(最大6トン)を目的とする無人宇宙機であり、種子島宇宙センターから打ち上げ後、軌道傾斜角 51.6° 、高度350~460kmを飛行する国際宇宙ステーション(ISS)への自動接近飛行(ランデブ)を行う。ISS近傍、数十kmに到達後、ISSを管轄する米国航空宇宙局(NASA)の管制下で運用を開始し、ISS下方側から最終接近、停止し、宇宙飛行士の操作するロボットアームにより捕獲され、ISSに係留される。最大1か月程度のISS係留後、HTVは再度ロボットアームによりリリースされ、大気圏再突入により廃棄される。HTVはフライトセグメント(軌道上部分)、グラウンドセグメント(地上運用設備)、ISSセグメント(日本実験棟(JEM)搭載機器)より構成され、フライトセグメントは補給キャリア、アビオニクスシステム、推進系より構成される。当社は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の指導によりHTVのアビオニクスシステムの中核となる電気モジュール、及びグラウンドセグメント・ISSセグメントの開発を行っている。HTVのアビオニクスシステムは1997年に打ち上げられた技術試験衛星Ⅶ型(ETS-Ⅶ)ランデブ・ドッキングシステム(NASDA(National Space Development Agency of Japan)(当時)指導の下、当社が開発・運用)を原型とするが、有人宇宙システムであるISSへの接近・係留をそのミッションとすることから、対有人宇宙機システ

ム固有の軌道設計、アビオニクスシステム設計の安全要求が設計要求として課せられている。

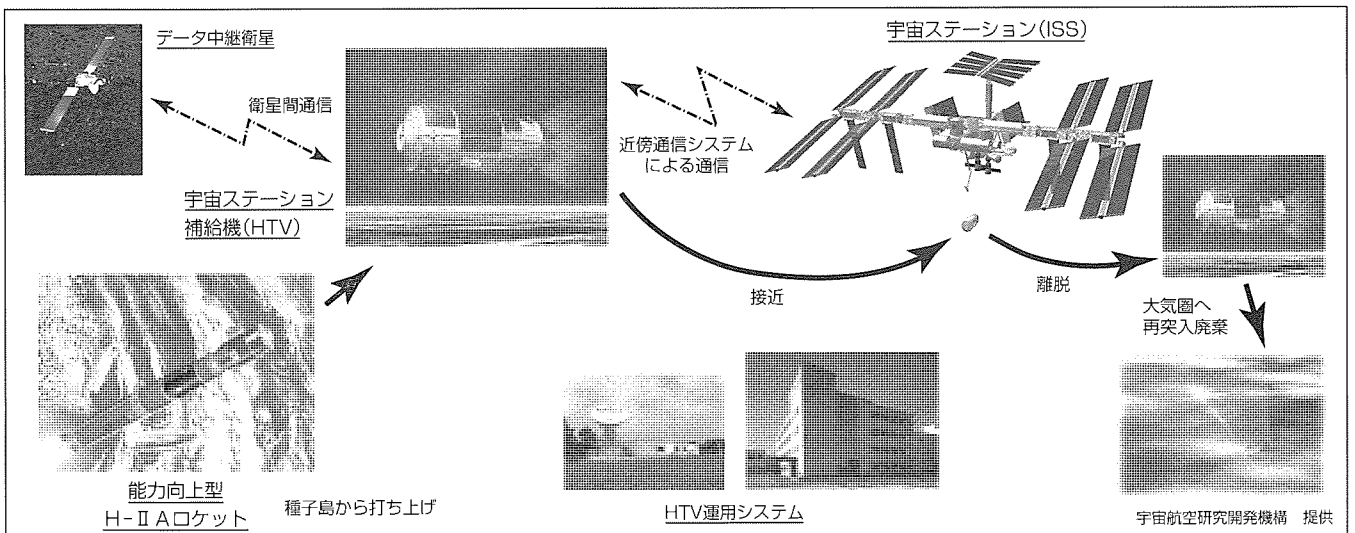
図1にHTVの飛行シーケンスを示す。

2. フライトセグメント

HTVフライトセグメントの外観・構成を図2に示す。

これまで基本設計審査、詳細設計審査及び安全審査の過程で、有人システム対応としてHTVには幾つかの設計変更が要求され反映された。主だった変更としては、電源バスを2冗長化してブスバー等の短絡・地絡が生じても、また配線等の地絡が生じても安全確保に必要な最小な電力を確保できること、2故障が生じてISSに危害を与えずかつ自力でISSから離脱できる(2フェールセーフのみならず部分的2フェールオペラティブ)ように、2冗長系であったコマンド系を3冗長系とし、HTVを操作及び監視(テレメトリ)できること、ロボットアームによりキャプチャされるためにISS構造物の下に入った際にでも2フェールまで姿勢制御が確実にできるようにジャイロを三重化するなどを行った。また、受動アンテナを含む単一故障点の除去を行い、セキュリティの強化・認定も要求された。

姿勢制御は三重系動作冗長のジャイロと動作冗長の地球センサを用いた局所水平及び慣性空間固定姿勢制御で、推進モジュールのスラスタ及びアンテナを必要な方向に指向させる。航法は、ISS遠方では、GPS絶対航法及び差分航法により、数10kmに接近し近傍通信システム(PROX)との通信が確立してISSのGPS航法情報が来るとGPS相対航法により、ISSの真下約500mに接近すると、JEM下のリフレクタをターゲットとしたランデブセンサ(RVS、レーザ



- 打ち上げ : H-II A能力向上型により200×300km、軌道傾斜角 51.6° の楕円軌道へ投入。
- ランデブ : 搭載されたGPSの絶対航法機能を使用し、位相調整、高度調整を実施する。ISS近傍の通信領域へ到達後、ISS後方の規定点で位置を保持。
- 近傍運用 : GPS相対航法機能を使用し、ISSへの最終接近を開始。ISS真下へ到達後、ランデブセンサによりISS下方からの接近を開始。規定点にて停止。ISSのロボットアーム(SSRMS)による捕獲を実施。
- 係留 : ISSのNode2下方ポートに係留。
- 離脱/再突入 : ロボットアームによりHTVをリリース。離脱後、再突入を実施。

図1. HTVの飛行シーケンス

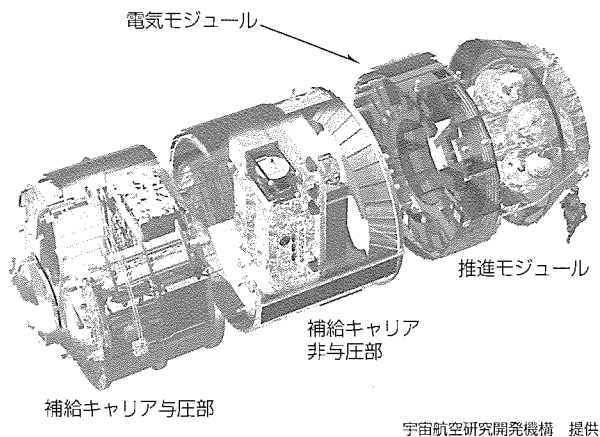


図2. HTVフライトセグメントの外観・構成

レーダが距離及び方位計測を行う。航法・誘導・制御系の要(かなめ)となるのは誘導計算機(GCC)及びアポポート・コントロール・ユニット(ACU)で、GCCは主にランデブを行うためのソフトウェアRVFS(Rendez Vous Flight Software)を持つ三重動作冗長の部分(Central Processor Unit: CPU)とそれを監視し多数決で異常判定を行う二重待機冗長な部分(Input/Output Controller: IOC)からなり、IOCが2故障してもACUがフライトセグメントをISS近傍から強制離脱(アポポート)させる安全化処置ができるように構成されている。なお、推進モジュールは2冗長な軌道変換用エンジンと並進・回転6軸方向の各2冗長なスラストモジュール群からなり、誘導計算機は検知したスラスト故障に応じてこれらを組み合わせて1故障でもミッション継続を、2故障では(かつ、やむを得ない場合)離脱を行う。スラスト噴射のための駆動回路も3系統持っている。増速量は三重冗長な加速度計により計測し、その故障も3系比較等によりGCCが判断する。

通信系はSバンドで、データ中継衛星を介して地上とリンクをとる衛星間通信装置(IOS)2系統と、ISS近傍で通信する近傍通信装置(PLS)2系統がある。近傍通信装置はPROXとの通信を行いISSクルー、グラウンドセグメント(OCS)からのコマンドやISSのGPS航法データを受信する。

コマンドの配信、テレメトリの収集及び編集を行うデータ処理系は3系統より構成されている。IOS、PLS及びISS係留中の1553バスからのコマンドを受け、暗号の復号を行ってフライトセグメント内に配信する。この際、コマンドの誤りがISSに危害(ハザード)を生じることのないように種々の誤りチェックを行い、また、特に直接的に機器を動かすパルスコマンドについては、コマンド駆動回路内の故障(2故障まで)で生じる誤コマンドの範囲を制限する設計を行った上で、その誤コマンドらがいかなるハザードも起こすことのないように適切な宛先(あてさき)の接続を行った。各種制御情報に用いるセンサ情報はデータ処理系

計算機(MCU)が収集し、必要な情報及び加工した情報を編集部(BIU)に送る。BIUは制御に使用しないテレメトリを収集し、MCUからの情報とまとめて編集する。MCUは推進系調圧弁FDIR制御、キャリアの火災検知及び付随処置、一次電池消費量積算、ヒーター制御なども行っている。

電力系は、飛行中には太陽電池、2次電池、1次電池を用い、ISS係留中にはISSから電源をもらう。各機器へはこれら電源からなる独立したバスを経て各機器へダイオード・オアを介して供給される。各バスには地絡対策が施されており、片方を喪失した場合にはそれを自動的に検知して衝突回避へ移行し、安全を確保するシステムである。

3. ISSセグメント

近傍通信システムはJEM内の衛星間通信システム(ICS)のラックに3つのORU(軌道上交換可能ユニット)として搭載される船内部分と、船外アンテナからなる。船内部分には、PROX 1はSバンド通信機器、PROX 2はベースバンド機器部及びクルー用コマンド端末(HCP:ハードウェアコマンドパネル)、PROX 3はGPS受信機部である。船外部分はJEM船内実験室及び船内保管室に搭載される6基の通信用アンテナ、及び2基のGPS受信アンテナである。これらはすべて2冗長系を持っている。ベースバンド機器部はISSからのコマンドを受信し暗号化してトランスポンダを介してHTVに送る。ISSのGPS受信機から得られる航法データもこの経路を用いてHTVに送られ、HTVの相対GPS航法に供する。また、HTVが送出するテレメトリをトランスポンダ経由受信し、PROXのテレメトリとともに編集してISSに送出する。これらテレメトリはISS上のクルー、HTV OCS及び米国の宇宙ステーションコントロールセンター(SSCC)に伝送され、近傍運用が行われる。HTVの挙動を見ながらクルーが行う“止まれ、下がり、離脱せよ”などの命令は可搬型端末HCPに用意され、クルーは目視、カメラ画像、テレメトリ表示、HCP上の表示などを見ながらHTVの最終接近を運用する。また、PROXにはHTVとの間で通信機能が維持されていることを監視するハートビート機能が組み込まれており、異常の場合にはコマンド操作をISSに危害が及ばぬような時間内に冗長側の通信経路に切り換える。また、トランスポンダにはHTV側のトランスポンダとの間で距離及び距離変化率(R&RR)を計測する機能がNASAから要求されており、フライトセグメントの各航法センサの有効性判定に用いられる。このように、PROXにはISSに安全に接近することができ、運用されるための種々な機能が盛り込まれている。図3にPROXとHTVのブロック図を示す。

4. 量産及び派生型へ向けて

米国のブッシュ大統領は2004年1月、ISS完成(およそ

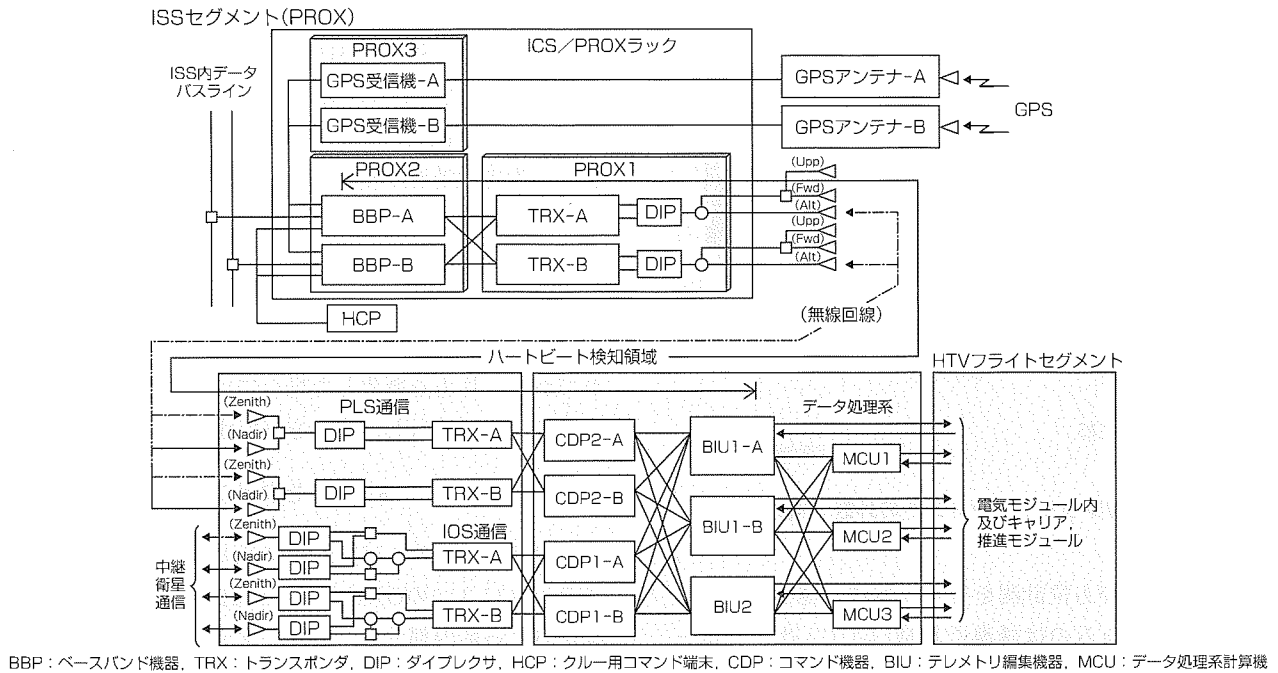


図 3. 近傍通信系PROXとHTVのブロック図

2010年)後のスペースシャトルの退役, 2020までの月有人探査, 火星へ探査などからなる宇宙探査の新ビジョンを発表した。これを受けてNASAでは, HTVをISSに受け入れるためのエンジニアリングを本格的に開始し, ISSへのインテグレーション作業, 運用計画作業は急速に進みだした。2008年のHTV実証機の翌年及び翌々年にはNASAからISS建設のための打ち上げも要請されているほか, シャトル退役後の補給にHTVを利用しようというNASA計画の下, 米国企業のスタディも行われており, 我が国に引き合いがくる見込みである。

また, HTVのアビオニクスシステムは, 一般衛星としての機能に加えて, GPS絶対航法による軌道変換, 相対GPS航法及び相対近傍センサ航法によるISSへの接近機能を持っているので, 種々の衛星又はそのバス部としてはもとより, 軌道間輸送機への応用, また, ETS-VIIなどで開発したドッキング及びロボティクス機能を備えることによりターゲット(衛星)への補給・交換などのサービス機への応用, 回収(部分)型への応用が可能である。また, ISSという有人施設に接近するために課せられる種々の安全要求に対応した構成, 故障検知処理機能が装備されていることから, 有人輸送機にもつながるものである。機体のみならず, 運用面に関してもHTV OCS, ISS上のクルー, 米国の宇宙ステーションコントロールセンター(SSCC)の3者が協調する管制運用計画, オフノミナル運用計画, 運用性を考慮した管制画面設計, 安全確保のための相互監視手

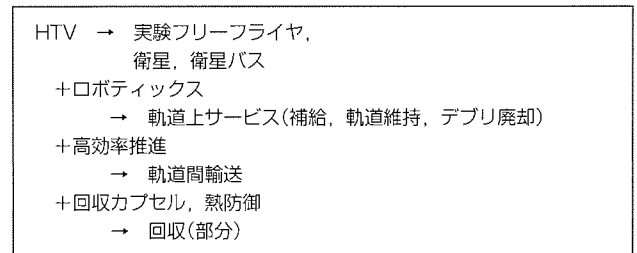


図 4. アビオニクスシステムの応用技術派生

順, 分散シミュレーションを用いた運用検証などが進められている。こうした活動も通して, 有人宇宙機につながる宇宙機の設計, 運用技術の習得, 蓄積を図りたい。図4にHTVのアビオニクスシステム応用技術の派生系統を示す。

5. む す び

HTVの最新の設計と開発進捗を紹介した。当社では, HTV実証機の開発を確実に進めつつ, これらの量産機の生産及び派生型への対応を積極的に進めていきたい。

最後に, HTVの開発に当たり指導いただいた宇宙航空研究開発機構, 及び関連会社に謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 津屋直紀, ほか: HTV: 宇宙ステーション補給機-対有人アビオニクスシステムの開発-, 三菱電機技報, 77, No.8, 520~523 (2003)

超高速インターネット衛星“WINDS”搭載 Ka帯アクティブフェーズドアレーアンテナ(APAA)

北尾史郎*
針生健一**
白松邦昭*

Ka-band Active Phased Array Antenna (APAA) for Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite “WINDS”
Shiro Kitao, Kenichi Hariu, Kuniaki Shiramatsu

要 旨

超高速インターネット衛星“WINDS”(Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite)は、政府IT戦略本部の「e-Japan重点計画」に基づいて宇宙航空研究開発機構(JAXA)と情報通信研究機構(NICT)において共同で研究開発が進められている。

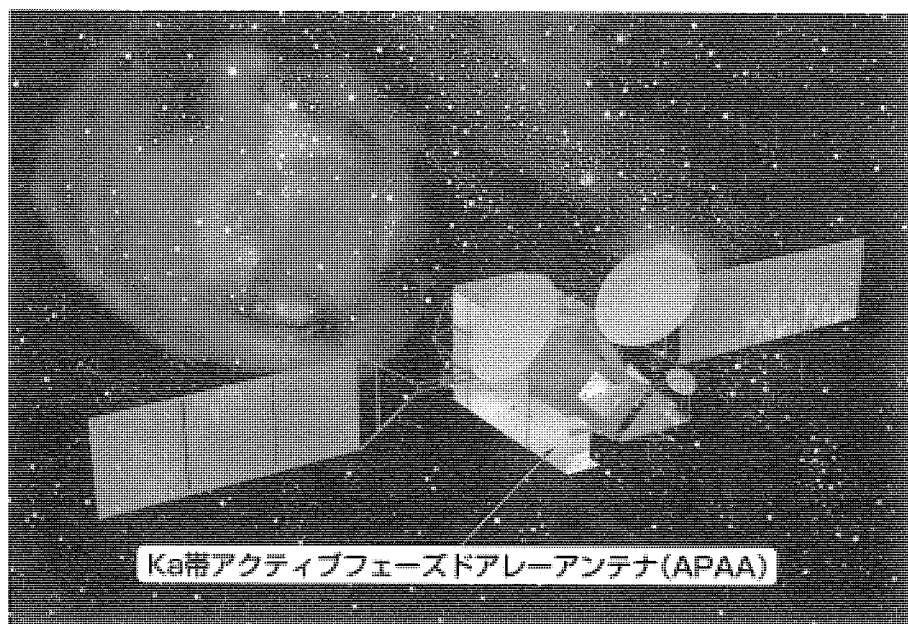
WINDSは、医療、災害対策、ITSなどの各分野における衛星利用を広域性・同報性・耐災害性等の衛星通信の特長を生かして推進し、最大1.2Gbpsの大容量データ通信を用いてアジア・太平洋地域を含む海外における国際的な衛星通信ネットワークの検証を行うことを目的に、H-II Aロケットにより2007年度に打ち上げを予定している。

上記目的の実現には、任意の地域にアンテナビームを形成し、柔軟に通信路を確保することが可能なビーム走査方式のアンテナが適しており、WINDSでは、電子的にアンテナビームを走査できるアクティブフェーズドアレーアンテナ(Active Phased Array Antenna: APAA)を採用している。また、Ka帯の周波数帯域を用いることで高速大容

量伝送を可能としている。

このKa帯APAAは、アンテナを構成する128素子のアンテナ素子を制御することにより、任意の方向にアンテナビームを向け、高いEIRP(Effective Isotropically Radiated Power)とG/T(Gain to noise Temperature ratio)を実現できる。また、送信及び受信用にそれぞれ独立した2つのビームを持ち、衛星内切換え時分割多元接続(Satellite Switching-Time Division Multiple Access: SS-TDMA)モード等の多様な運用に対応できる。

さらに、このKa帯APAAは、小型軽量化を図るため、RF(Radio Frequency)デバイスに、モノリシックマイクロ波集積回路(MMIC)等の小型/高密度実装技術を採用している。また、増幅器の発熱を効率良く放熱するために、ヒートパイプ連結による三次元排熱方式を用いた自己熱制御機能を持っている。これらのAPAAの小型化技術と衛星システムとの熱インタフェースの簡潔化により、他の衛星へ搭載可能な標準設計を実現している。



WINDSの外観とAPAA

写真は2007年度打ち上げ予定の超高速インターネット衛星WINDSの外観とKa帯APAAを示す(出典: JAXAのホームページ <http://www.jaxa.jp>)。

Ka帯APAAは、Ka帯高出力マルチビームアンテナ/マルチポートアンプが主なミッション機器とされており、三菱電機はAPAAの開発を担当している。

1. ま え が き

WINDSにはミッション機器の一つとしてKa帯APAAが搭載される⁽¹⁾⁽²⁾。このAPAAは送受信それぞれ128のアンテナ素子と各アンテナ素子に設けられた小型高密度RFモジュールにより送受各2ビームを独立に電子走査でき、衛星からの可視領域を対象に、地球上のほぼ全域に通信が可能となる。

このAPAAは、超高速通信用として、1995年からNICT(旧通信総合研究所；CRL)と要素技術開発を行い⁽³⁾、その後、WINDS搭載APAAの開発でJAXAとフライト品開発を行ってきた。

本稿では、APAAの運用・機能・要素技術及び主要諸元について述べるとともに、設計・開発状況について述べる。

2. APAAの運用

このAPAAは最大1.2Gbpsの大容量高速伝送を行うことを前提として設計され、運用では、622Mbpsの非再生中継による高速伝送と155Mbpsの再生中継による伝送を想定しており、地球局の規模に応じた多様な運用が可能である。APAAは、図1に示すように、地球上のほぼ全域をカバーするようにビーム走査範囲が設定されている。

APAAの最大の特長は任意の地点間で通信ができることである。災害時等に場所を選ばず通信回線を確保できることが、社会的・国際的にも期待されている。

3. APAAの機能

主な機能を以下に示す。

- (1) 28GHz帯のアップリンクRF信号を受信及び増幅する受信アンテナ機能
- (2) 18GHz帯のダウンリンクRF信号を増幅及び送信する送信アンテナ機能
- (3) 送受信各2ビームを持ち、独立にビーム走査可能なビーム制御機能



図1. APAAの運用例(通信カバレッジ)

- (4) 一定方向にビームを固定し、通信を連続して行う連続波モード機能、及び1ビームで複数の方向に時分割でビーム走査を行うSS-TDMAモード機能

4. 要素技術

このAPAAの開発における要素技術を以下に示す。

- (1) 衛星への搭載性実現のために、低消費電力化・小型化・軽量化が可能なMMICを用いた高周波デバイス(高出力増幅器・低雑音増幅器・移相器等)の開発及び高密度実装化を実施
- (2) 多様な通信方式に対応したAPAAのアンテナビーム制御を実現させるために、ビームを一定方向に固定する連続波モード、送受各2ビームを2msで最大8方向に高速ビーム走査するSS-TDMAモード、及びAPAAの自己診断を可能とする移相器自動設定モードに対応した制御回路を開発
- (3) 衛星システムと独立してAPAAを単独性能保証するために、APAA構体には自己熱制御機能を持った連結ヒートパイプによる三次元排熱方式を採用

5. 主要諸元

APAAの主要諸元を表1に、ブロック図を図2に、外観を図3に示す。APAAは主に送信アンテナ、受信アンテナ及びこれらを制御するビーム制御回路(BSC)、これらに電源を供給するDC/DCコンバータ(DC/DC)、ヒーター制御を実施するヒーター制御回路(HCU)、バス電圧をAPAA内部で分配する電力分配器(PDU)から構成される。

表1. APAAの主要諸元

項目	単位	APAA	
		送信アンテナ	受信アンテナ
アンテナ形式	-	直接放射フェーズドアレーアンテナ方式	
APAA寸法	mm	1,510×990×1,530	
APAA質量	kg	183	
アレー開口寸法	mm	649×539	287×468
周波数	GHz	17.7~18.8	27.5~28.6
素子数	-	128	128
偏波	-	直線偏波	
ビーム走査範囲	deg	長軸： $\theta = 8$ 以内，短軸： $\theta = 7$ 以内 $\phi = 0 \sim 360$ の楕円(だえん)範囲内	
ビーム数	-	2	2
EIRP	dBW	54.6/1波 52.1/2波	-
G/T	dB/K	-	7.1
移相器ビット数	bit	5	5
モード	-	SS-TDMAモード 連続波モード	SS-TDMAモード 連続波モード
ビーム走査 タイミング	ms	2 (TDMAモード)	
消費電力	W	750以下	

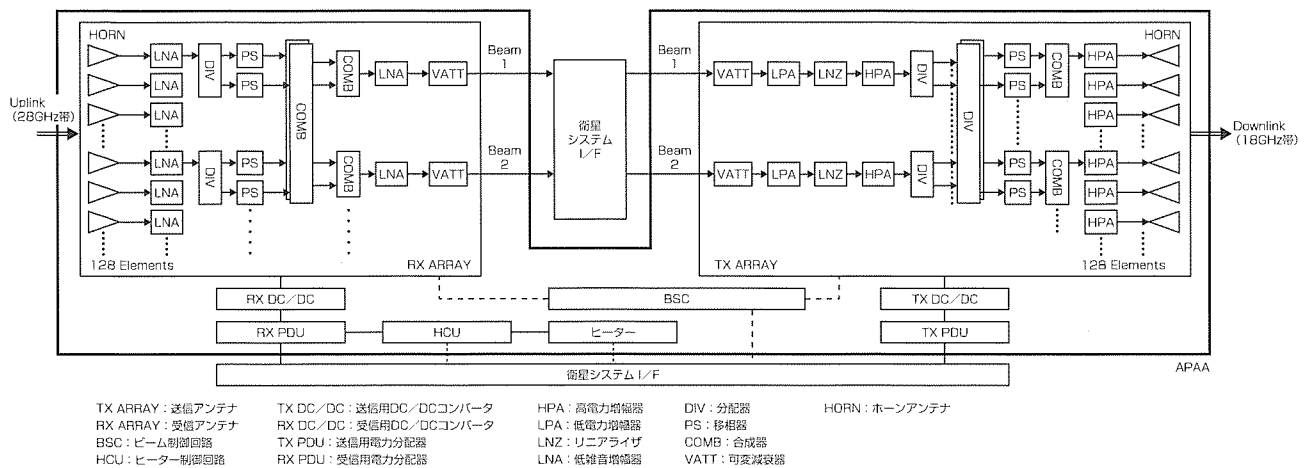


図 2. APAA のブロック図

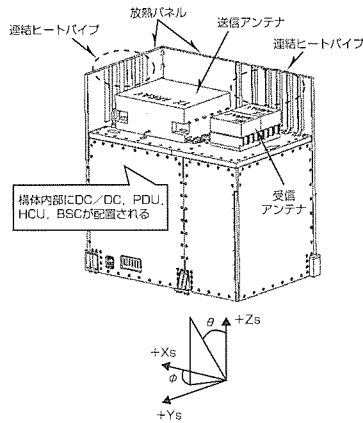


図 3. APAA の外観

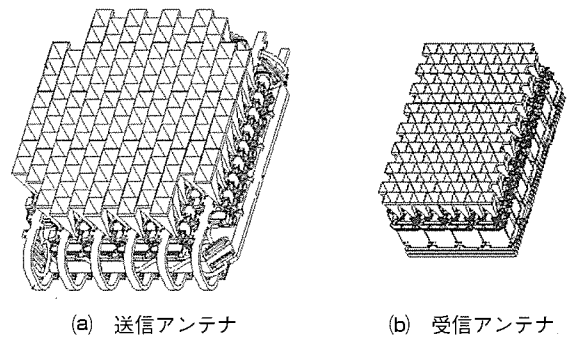


図 4. 送信/受信アンテナの外観

また、ヒートパイプはAPAA構体の3面のパネルにレイアウトされ、三次元排熱方式を実現している。

6. APAA技術開発

6.1 RF系

図4に送信及び受信アンテナの外観を示す。送信アンテナ、受信アンテナは、各々128の素子アンテナから構成される。素子アンテナはホーンアンテナを採用し、素子配列は静止軌道からの地球視野を考慮してグレーティングローブが地球視野外となるように設定している。図5に放射パターンの一例を示す。

また、送信及び受信アンテナ共に2ビームを実現するために各素子アンテナに対して2個の移相器を持ち、MMICを用いた高密度実装設計のモジュールの採用により小型化を実現している。また、高出力増幅器及び低雑音増幅器もMMICを用いて小型化しており、さらに、APAAの低消費電力、軽量化を実現している。

図6にエンジニアリングモデル(EM)開発フェーズで試作した送信及び受信アンテナの部分モデルの外観写真を示す。この部分モデルの開発によって、プロトフライトモデ

ル(PFM)に向けての改善点が明らかになったとともに、APAAとしてのRF性能の確認が実施できた⁽⁴⁾。

6.2 ビーム制御系

APAAのビーム制御はBSCで実施する。BSCは送信及び受信アンテナそれぞれ2ビームに対応した移相器(5ビットデジタル移相器)を独立制御する機能を持っている。また、BSCは4章で示した多様な通信に対応でき、例えば、SS-TDMAモードにおいては、高速(2ms)でビーム方向を切り換え、1ビームにつき最大8か所の方向での運用を可能とし、軌道上での温度変化によらずEIRPやG/Tを一定に保つための可変減衰器によるアンテナ利得制御機能を持っている。さらに、軌道上でのAPAA健全性確認のためのモード(移相器自動設定モード)に対応でき、APAAの各素子の移相器を自動で連続的に設定し、地上-衛星間でREV法(素子電界ベクトル回転法)を用いた自己診断が可能な機能を持っている。

6.3 熱制御系

APAAは衛星システムと独立した熱設計となっており、軌道上での温度制御はヒーター及びヒートパイプによる能動型熱制御方式を併用して自己熱制御する。ヒーターはコマンドにより直接ON/OFF制御可能なリプレースメントヒーターと、設定温度で自動的にON/OFF制御可能な熱

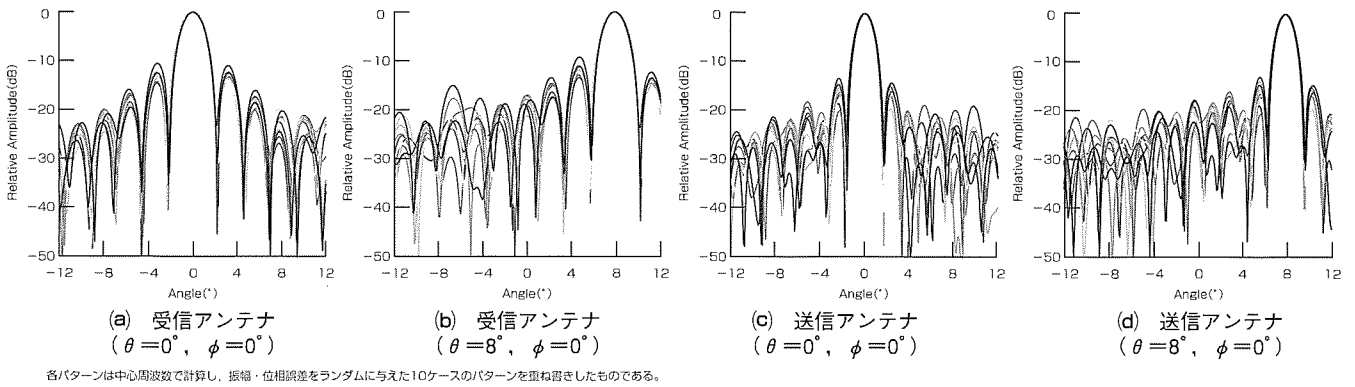
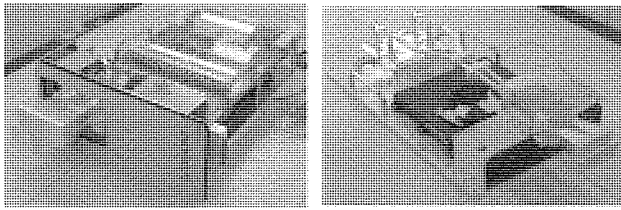


図5. アンテナ放射パターン(計算値)



(a) 送信アンテナ (b) 受信アンテナ

図6. 部分モデルの外観(4素子アレー)

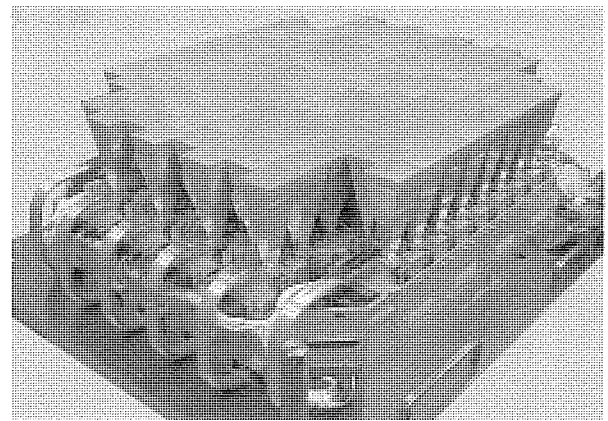


図7. 送信アンテナ(PFM)の外観

制御ヒーターの2種類から構成され、HCUを用いて制御される。また、ヒートパイプによる三次元排熱方式の採用によりヒーター電力/放熱面積の最適化を実施し、APAA構体の小型化が実現可能となっている。

7. 開発状況

APAA PFMは、構成コンポーネントの製造・試験を終え、現在、送信アンテナ及び受信アンテナの組立て・試験フェーズにある。これら試験結果からは、APAA全体性能を満足する結果が得られている。図7に現在製作中である送信アンテナ(PFM)の外観写真を示す。また、APAAの熱構造モデル(STM)の開発試験は完了し、現在PFM構体としてほぼ完成状態にある。2007年度に予定されている衛星の打ち上げに向けて、APAAのプロトフライト試験を進めている。

8. むすび

本稿では、WINDS搭載APAAの開発背景を述べ、運用・機能・要素技術・主要諸元を示し、Ka帯アクティブデバイスの開発、及びRF系、ビーム制御系並びに熱制御系について設計のポイントと特長を示した。

APAAのPFMでは構成コンポーネントの試験でAPAA全体性能を満足する結果が得られており、送受信アンテナの組立て・試験を経てAPAAのプロトフライト試験フェーズに入ることを述べた。

最後に、日ごろ、このAPAAの開発に当たり指導、鞭撻(べんたつ)をいただいているJAXA WINDSプロジェクトチームの各位及びAPAAの設計・製造に協力いただいている関係各位に感謝する。

参考文献

- (1) Yajima, M., et al.: Active Phased Array Antenna for WINDS, The 8th Ka-band Utilization Conference, September 25~27 (2002)
- (2) Akaishi, A., et al.: Ka-band Active Phased Array Antenna for WINDS Satellite, Proc. 21th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, AIAA-2003-2397, Yokohama, 1~8 (2003-4)
- (3) Aruga, H., et al.: Development Results of Ka-band Multibeam Active Phased Array Antenna for Giga-bit Satellite, AIAA-2000-1196, 25~32 (2000)
- (4) Takatsu, S., et al.: Development Results of a Partial Model of Ka-band Active Phased Array Antenna for WINDS Satellite, Technical Report of IEICE, SAT2004-136, 11~16 (2004-10)

衛星搭載用機器

森田直哉* 大塚正人*
石原 隆**
郷内敏夫*

Satellite Onboard Equipment

Naoya Morita, Takashi Ishihara, Toshio Gonai, Masato Otsuka

要 旨

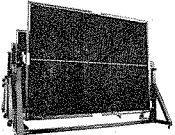
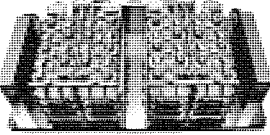
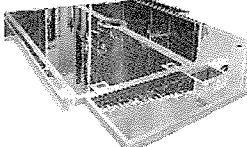
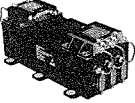
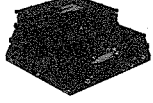

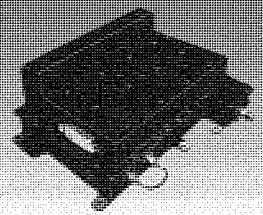
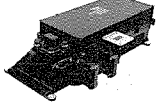


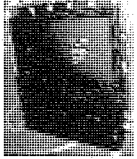



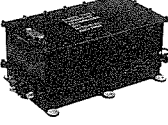
三菱電機は、1970年代の衛星システム開発初期から衛星搭載機器の開発を進めており、1980年代後半から海外の商用衛星市場への参入を開始した。以来、代表的な国際通信衛星機構であるINTELSAT (INternational TELecommunications SATellite organization) やINMARSAT (INternational MARitime SATellite organization) 向けを始めとして、数多くの海外衛星メーカーに衛星搭載機器を納入してきた。これらの豊富な軌道上実績は、商用衛星市場への参入に不可欠な要素であり、顧客から品質に関する高い信頼を得るための大きな条件となる。

衛星システムの市場競争力を強化するためには、ペイロード(ミッション機器)の搭載性の向上とともに高い信頼性があることが不可欠であり、衛星搭載機器の開発において

は小型・軽量化、高効率化と高信頼性化の実現が極めて重要な課題となる。

当社は、衛星システムにおけるバス系機器に対する小型・軽量化と低コスト化、高信頼性化の要求から、太陽電池パネルの高効率化、バッテリーの高エネルギー密度化、ヒートパイプパネルの高信頼性化を目的とした開発を進めている。

本稿では、電源系サブシステムの重要要素であるMJセル (Multi Junction Cell : 化合物系多接合セル) を用いた太陽電池パネルと、LIB (Lithium Ion Battery : リチウムイオンバッテリー) と、衛星の主構体を成し機器の高密度実装を可能とする光ファイバ埋め込みヒートパイプパネルに関して、最新技術と開発の状況について述べる。

バス機器			
			
太陽電池パネル	リチウムイオンバッテリー	ヒートパイプパネル	
RF機器			
			
C-LNA	C-Dual Power BTX	S band SSPA	
			
Ku-RX	Ka/IF-RX	Ku band SSPA	
			
IF/Ku-TX	IF/Ka-TX	X band SSPA	C band SSPA (Low Power)
LNA : Low Noise Amplifier, BTX : Beacon Transmitter, SSPA : Solid State Power Amplifier, RX : Receiver, TX : Transmitter			

衛星搭載用機器

衛星システムに搭載される主な機器を示す。バス系機器として太陽電池パネル、バッテリー、ヒートパイプパネル等があり、通信系ミッション用のRF (Radio Frequency) 機器として低雑音増幅器、固体電力増幅器等がある。

1. ま え が き

衛星搭載用機器に対しては、小型・軽量化、高効率化、高信頼性化の要求が年々高まっている。これを受けて、太陽電池パネルではシリコンセルからMJセルへの置き換えによる高効率化、バッテリーではNi-H₂セルとNi-Cdセルからリチウムイオンセルへの置き換えによる高エネルギー密度化、ヒートパイプパネルでは光ファイバの埋め込みによる高信頼性化を行う開発を進めている。

本稿では、これらの最新技術と開発の状況について述べる。

2. 太陽電池パネル

当社の衛星搭載用太陽電池パネル(SAP)は1976年に第1号機が打ち上げられて以来、50機以上の衛星搭載実績がある(表1)。1992年からは商用通信衛星向けSAPの輸出を開始し、国内衛星のみならず海外衛星においても設計・開発・製造・試験に豊富な経験を積んできた。また、複数の海外商用衛星システムメーカーとSAPに関する長期契約を締結したこともあり、より効率的にSAPの一環生産ができるよう2004年5月から当社鎌倉製作所相模工場に設計・製造・試験等、すべての業務を集結させ、生産能力の向上と効率化、さらにVM(Visual Management)手法を取り入れた高品質化を実現してきている。

現在、主な製品は、アルミハニカムコアをCFRP(炭素繊維強化プラスチック)表皮でサンドイッチした構造のリジッド型サブストレートに太陽電池やダイオード等の電子部品を搭載した太陽電池パネルである。この太陽電池パネルは、打ち上げ後、軌道上において片翼2~6枚構成の太陽電池パドルとして展開する構造となっている。

太陽電池パネルに実装している太陽電池としては、高効率シリコンセル(初期光電変換効率17%)が従来から用いられているが、最近では効率28%以上の化合物系多接合セル(MJセル)を用いた衛星が次第に増えつつある。高価であるためパドル面積を減らして機動性の向上をねらった観測衛星や、高出力通信衛星に用途が限られていたが、効率の向上とともに適用範囲が広がっている。シリコンセルは30年以上の衛星搭載実績があり、その豊富なデータからほぼ軌道上での振る舞いについての理解が得られている。一方、MJセルは、セルメーカーの変換効率向上に向けた研究開

発により、毎年のように効率が向上した新型のセルが登場している。このため、いずれのタイプのMJセルを用いて認定試験を行い、衛星に搭載するかを決定する際には、セルの将来開発動向を見据えたSAP開発の方向付けが重要となる。

MJセル搭載SAPに関して、当社では、2002年に初号機が打ち上げられて以来、数機に搭載し軌道上実績を積んできた。MJセル搭載SAPの外観の一例を図1に示す。用いられているセルは、逆電圧保護を目的とした個別ダイオードを1セルに1つずつ接続した、いわゆるコーナーダイオード型のものである。

一方、近年MJセルメーカーでは、ダイオード機能をセル自体に組み込んだダイオード一体型セルの開発を進めている。ダイオード機能がセルに組み込まれているため、従来のような外付けダイオードが不要であり、プロセスコスト低減に有利であるというメリットがある。

MJセルそのものについても、従来の2接合セルから現在は3接合セルが主流であり、更なる高効率化(変換効率40%程度)を目指して、研究機関では、4接合、5接合セルの研究が進められている。高効率化は主として1セル当たりの高電圧化として実現されるため、今後のバス電圧の高電圧化に向けたシステム設計にとっても有利なセルである。しかしながら、バス電圧の高電圧化は、宇宙環境でのSAPの帯放電に対し、従来よりも敏感なデザインとなるため、その対策技術の開発についても国内外の大学や試験機関、海外衛星システムメーカーと協力しながら推進している。

3. リチウムイオンバッテリー

当社の宇宙用リチウムイオンバッテリー(LIB)は、1998年から日本電池(現GS-YUASAテクノロジー)と共同で高エネルギー密度かつ大容量のリチウムイオンセル及びこれを構成する人工衛星用リチウムイオンバッテリーの開発を進め、各種の耐宇宙環境試験、安全性試験を実施し、宇宙用としてのバッテリーの開発を完了し、既に軌道上での実績を持っている。この実績を基に、拡販活動を実施し、現在、国内開発の人工衛星への搭載及び海外商用衛星へ搭載が予定されている。

表1. 太陽電池パネルの実績

	2005年4月現在		
	製造	打ち上げ	軌道上
パネル数	483パネル	337パネル	292パネル
出力	550kW	369kW	337kW
軌道上時間	-	2,297,328時間	1,833,624時間

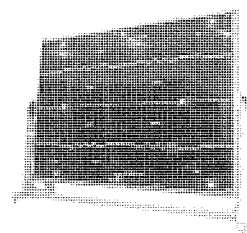


図1. MJセル搭載SAPの外観

当社のリチウムイオンバッテリーの特長は、①セル自身が充放電サイクルに強いリチウム酸コバルトを使用していること、②このセルに整合した放熱及びパッケージであること、③バッテリーセルの信頼性を上げ、故障予防のための過電圧保護回路を備えていること、④直列に接続されたバッテリーセルの開放故障時でも機能を維持できるバイパススイッチを備えることにより、静止衛星の条件で軌道上15年、低軌道周回衛星で5年間の運用を可能にしていることである。

(1) リチウムイオンセル

リチウムイオンセルの開発に当たり、現存する宇宙用セルとしては最もエネルギー密度が高く大容量なセルを目標とし、50A・h及び100A・hのリチウムイオンセルを開発した。このエネルギー密度は136W・h/kg(50A・hセル)及び146W・h/kg(100A・hセル)であり、従来の宇宙用セルの2倍以上の高い値である。

100A・hセルの外観写真を図2に示す。これらセルは、正極材料にコバルト酸リチウム(LiCoO₂)を用い、負極にはカーボン材料、電解液にはリチウム塩を溶解した有機電解液を使用している。図から分かるように、セル形状は放熱性に優れ、かつ、バッテリーに組み込んだ際に容積効率に優れた長円筒形である。端子気密部には超高真空の宇宙環境にも長期間耐えるセラミックハーメチックシールを採用しており、気密に対する高信頼性を実現している。

(2) パッケージ

バッテリーパッケージはセルの構造にマッチした放熱構造に設計されており、セル間の温度差が±3°以内、セル温度上昇が約10°以内に維持できる放熱構造となっている(真空中データ)。図3にこのバッテリー放熱の概念図を示す。

このリチウムイオンバッテリーの構造は、セルの充放電による膨張収縮を考慮したバンディング構造を採用し、セルにストレスを加えない構造となっている。バンディング構造を採用したことより、バッテリーの軽量化はもとより、バッテリー容量に応じたセル数の増減が容易にできる構成となっている。

この構成を採用した100A・h/24セル構造の静止衛星用バッテリーを図4に示す。このバッテリーのエネルギー密度

は110W・h/kgであり、ロケット打ち上げ環境及び軌道上環境試験を実施し、すべて問題なくクリアしている。

(3) 過電圧保護回路

バッテリーはセルを直列に複数接続して構成し、充放電はバッテリー一括で行われる。このため、バッテリーセル間で、セル電圧がばらつくと各セルの充電電圧に差が生じ、この結果、過充電になる可能性がある。特にリチウムイオンセルは従来のNi-H₂セル、Ni-Cdセルのように一定の飽和電圧が存在しないため、充電が継続すると過充電が加速することになる。この過電圧保護回路は、一定電圧以上に充電が持続する場合に、この充電電流をバイパスし、充電電圧が規定値以上にならないように制御する回路である。この回路の外観を図5に示す。

(4) バイパススイッチ

バイパススイッチは、直列に接続されたセルの一つが開放故障を起こした場合、充放電電流の経路がなくなってしまうバッテリーの機能を喪失してしまう。バイパススイッ

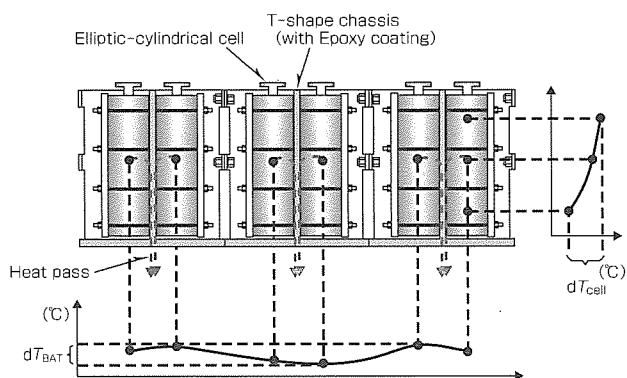


図3. バッテリー熱設計概念

構成: 100A・hセル24直列
 バッテリー容量: 8,640W・h
 質量: 78kg
 寸法: (W) 315mm
 (L) 705mm
 (H) 273mm
 エネルギー密度: 110W・h/kg

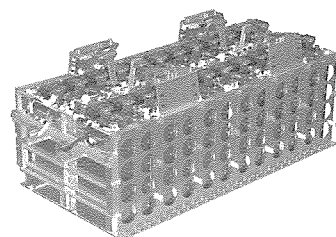


図4. 静止衛星用バッテリー(100A・hセル24直列)

セル公称容量: 100A・h
 質量: 2.7kg
 寸法: (W) 50mm
 (L) 130mm
 (H) 208mm

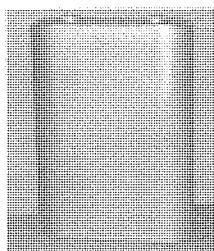


図2. 宇宙用バッテリーセル(100A・hセル)

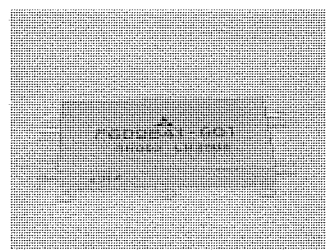


図5. 過電圧保護回路

チは、この機能喪失を防止するため、各セルごとにスイッチを並列に接続し、セルが故障を起こした場合に充放電電流をバイパスさせ、バッテリーの機能を維持できるようにするためのスイッチである。この回路の外観を図6に示す。

これらの要素技術を含めた総合的なバッテリーの開発を実施することにより、現存する宇宙用としては最も小型軽量のバッテリーを開発することができた。今後更なるバッテリーの小型化を目指し、175A・hセルの開発とこのセルを使用したバッテリー及び周辺回路の開発を行い大型化する商用衛星に対応していく。

4. ヒートパイプパネル

当社は、1987年の技術試験衛星ETS-V以降、数多くのヒートパイプパネルを開発し製造してきた。ヒートパイプパネルは、電子機器類を搭載し、かつ衛星の主構体をなすバスコンポーネントである。図7に示すように、作動流体としてアンモニアを用いたヒートパイプをアルミニウムハニカムコア/アルミニウム表皮のサンドイッチパネルに埋め込んだ構造となっており、軽量で高剛性という特性を持っている。ヒートパイプがパネル内に埋め込まれているため、パネル上に取り付けられた機器からの発熱を効率良く拡散・放熱することができ、機器の高密度実装を可能にしている⁽¹⁾。

近年、商用衛星の低コスト化、短工期化及び高性能化の要求はますます強くなってきており、ヒートパイプパネルの競争も激化しつつある。当社では、競争力強化のため、製品の付加価値向上につながる開発に取り組んでいる。ここでは、その一つとして光ファイバセンシング技術について述べる。

この技術は、光ファイバFBG(Fiber Bragg Grating)センサをヒートパイプパネルに埋め込み、FBGセンサを温度計測センサとして利用するものである。FBGセンサとは光ファイバのコア部の屈折率を周期的に変化させたもので、広帯域の光を入射するとその周期に対応した波長の光のみが反射する性質を持っている。この周期は外力によるひずみにより変化し、また屈折率は温度により変化するため、FBGセンサで反射する光のスペクトルを分析することによりひずみ、温度を計測することができる。このFBGセンサ部を多数持つ光ファイバをヒートパイプの溝を利用してヒートパイプパネル内に埋め込むことにより(図8)、次のような効果がある。

- (1) パネル内のヒートパイプ温度を容易に多点計測できるため、搭載機器実装設計とのインタフェース評価が明確になり、衛星システム側熱設計、検証試験が容易になる。
- (2) ヒートパイプパネルに多点の温度センサが埋め込まれているため、熱真空試験等の検証試験において衛星シ

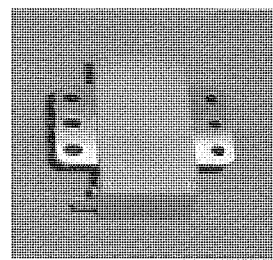


図6. バイパススイッチ

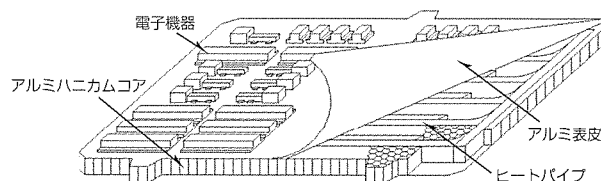


図7. ヒートパイプパネルの構成

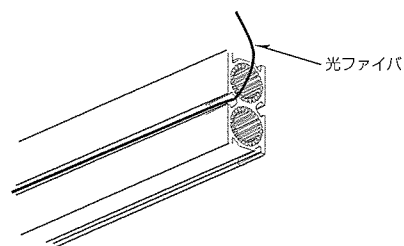


図8. 光ファイバのヒートパイプへの埋め込み

ステム側でパネル用の温度計測ケーブルを準備する必要がない。

- (3) 温度計測のみならず、ひずみ、加速度も計測できることから、製品データを蓄積することにより、定量的なヘルスチェック機能を持つヒートパイプパネルとして、品質保証の面から製品の信頼性向上が図られる。

この光ファイバFBGセンサは、複合材料の成形プロセスモニタリング⁽²⁾や航空機等の構造部材のヘルスモニタリングにも適用する研究が進められている。

5. む す び

本稿では、衛星搭載用機器に関する最新技術と開発の状況について述べた。いずれも小型・軽量化、高効率化、高信頼性化に適した機器であり、衛星システムの更なる高性能化、低価格化に寄与していくことになる。

参 考 文 献

- (1) 上小倉明宏, ほか: 衛星搭載用コンポーネント, 三菱電機技報, 77, No.8, 536~539 (2003)
- (2) 竹谷 元, ほか: FBGセンサによる衛星用複合材料の成形プロセスモニタリング, 第29回複合材料シンポジウム予稿集, 129~130 (2004)

注入ドーピングによるGaNトランジスタの高性能化

大石敏之* 阿部雄次*
吹田宗義**
南條拓真**

High Performance GaN Transistors with Ion Implantation Doping

Toshiyuki Oishi, Muneyoshi Suita, Takuma Nanjo, Yuji Abe

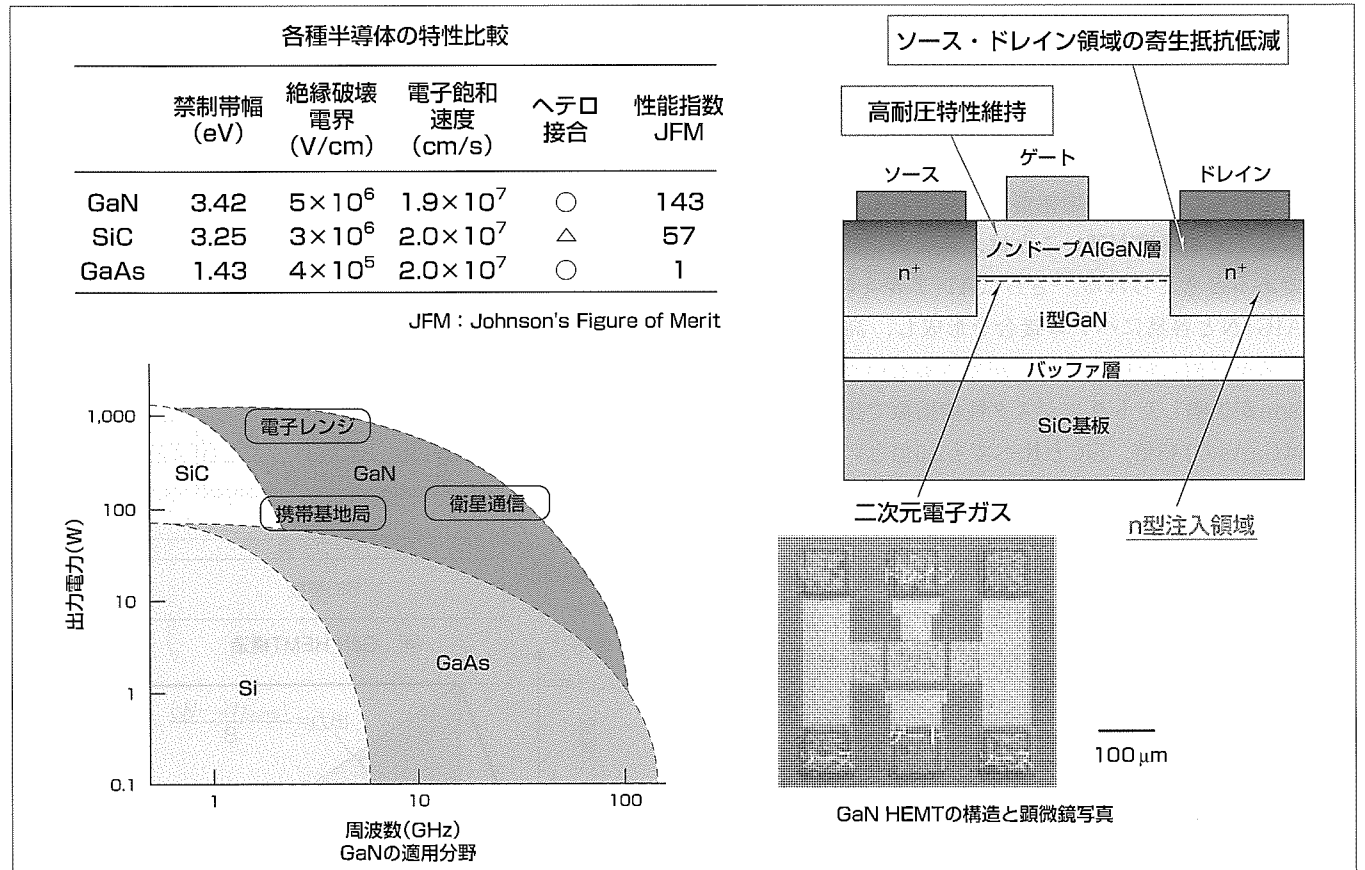
要旨

GaN(ガリウムナイトライド)半導体は、絶縁破壊電界が高く電子飽和速度も速いという優れた特性を持つため、次世代の高出力高周波トランジスタ材料として期待されている。特にAlGaN(アルミガリウムナイトライド)とのヘテロ接合を利用したHEMT(High Electron Mobility Transistor)は開発が活発で、単一の素子で100Wを超える高周波出力電力が得られている。しかし、禁制帯幅が広いため、寄生抵抗の低減が難しいという大きな課題がある。我々はこの課題に対して注入ドーピング技術を開発している。

本稿では、注入ドーピング技術を用いて寄生抵抗を低減

したGaN HEMTについて述べる。

注入ドーピング技術はソース/ドレイン電極の下にのみ高濃度不純物を形成する技術である。抵抗を下げるためには高温での熱処理が必要となるが、熱処理がトランジスタの他の部分に悪影響を及ぼすという問題がある。今回、この問題に対して、イオン注入と熱処理工程を最適化することで改善を進めた。その結果、熱処理温度を工夫することで、耐圧への悪影響を抑制しつつ、ドレイン電流を34%改善することができた。これは、最大出力電力、効率の改善につながると考えられる。



GaNの物性値、応用分野とトランジスタ構造

GaNはGaAsと比べ、ほぼ同じ電子飽和速度でより高い絶縁破壊電界を持っている。この優れた材料特性からSi, GaAsでは実現できなかった高出力高周波トランジスタが実現できると期待されている。GaNトランジスタの高性能化を進めるために注入ドーピング技術を検討し、最大出力電力、効率の改善につながる結果を得た。

1. ま え が き

GaN半導体は、材料特性がSi, GaAsより優れていることから次世代の光・電子デバイスとして注目されている。特に青色で輝く発光ダイオードとしての応用は有名であるが、高出力高周波トランジスタ、スイッチングデバイス等の電子デバイス用材料としても有望である。近年、国内外の多くの機関で活発な研究開発が行われ、5 GHz以下の周波数帯(S/C帯)において100Wを超える出力のトランジスタが報告されている^{(1)~(3)}。しかし、GaNの材料特性を考えると、更に高性能なトランジスタが実現できると予測される。GaNは、禁制帯幅が広く、良好なコンタクトが得られにくいいため、余分な寄生抵抗を生じやすい。この寄生抵抗の存在がGaNの優れた材料特性を生かしきれない理由の一つである。

本稿では、まず、GaN半導体の特長と応用について概観した後、寄生抵抗を低減する注入ドーピング技術について述べる。

2. GaN半導体の特長と応用分野

高出力高周波トランジスタでは、半導体材料の絶縁破壊電界、電子飽和速度が重要な指標となる。GaNは、絶縁破壊電界が高く(化合物半導体の代表であるGaAsと比較して10倍以上)、電子飽和速度も速い(GaAsとほぼ同じ)という特長を持っている。これは、GaAsのトランジスタと比較すると、ほぼ同じ電流をより高い電圧で駆動できることを示し、出力電力の大きな増幅器が実現できると予測される。また、電子飽和速度が速いことは、高周波領域での動作が可能であると考えられる。さらにAl(アルミニウム)を加えたAlGaNと容易にヘテロ接合を形成し、高濃度二次元電子ガスを界面に形成することができるという特長もある。Johnsonが提唱したトランジスタ性能指数で比較すると、GaNはGaAsの143倍、SiCと比べても2.5倍という高い値が得られ、高出力高周波トランジスタ用材料として非常に有望である。

さらに、GaNの構成元素はガリウム、窒素であり、As(ヒ素)のような有害物質を含まない。すなわち、GaNは地球に優しい材料であり、環境の点からも優れた材料と言える。

このように優れた特長を持つGaNの適用分野について述べる。出力電力と周波数が比較的低い領域はSi, より高周波領域はGaAs, より高出力領域はSiCが得意とする領域である。GaNは、これらの材料では実現できないような高出力でかつ高周波領域をカバーできると期待されている。情報化社会が進展すると大容量のデータをより高速で処理する要求が高まってくる。GaNはこの要求にこたえる材料で、高速大容量化が求められる携帯基地局や衛星通信で用いら

れる増幅器としての応用が期待されている。また、進行波管等の真空管が使用されている領域も半導体であるGaNで実現することができれば、小型・軽量の装置が実現できると予測される。

3. GaN HEMTの構造と特性

図1の(a)にGaN HEMT構造を示す。ヘテロ接合(AlGaN/GaN)を用いたHEMT構造が高出力高周波トランジスタの代表的な構造である。GaNより禁制帯幅の広いAlGaNをGaN上部に結晶成長させると、 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 以上の電子濃度を持つ二次元電子ガスが生じる。出力(ドレイン)電流はドレイン電極から二次元電子ガスを通じてソース電極へ流れる。このドレイン電流をドレインとソースの間に形成されるゲート電極で制御することで増幅器として動作する。

HEMTのトランジスタ特性(ドレイン電流-ドレイン電圧)の模式図を図の(b)に示す。ドレイン電圧が0V付近ではドレイン電流はドレイン電圧に比例して増加する。ニー電圧 V_k 以上ではドレイン電流はドレイン電圧に依存せず、一定の値を保つ。しかし、ドレイン電圧が破壊電圧 V_{br} に達するとドレイン電流は急激に増加し、トランジスタは破壊する。このような電流-電圧特性を持つトランジスタで得られる最大出力電力は図の(b)の三角形の面積に対応した値となる。GaNはその材料特性から V_{br} を高くすることができる。一方、 I_{dmax} を大きくするためには電流が流れる経路の抵抗を低減する必要がある。

また、効率は直流投入電力(I_b と V_b の積)と出力電力との比であるから、ドレイン電圧の低い領域での抵抗(オン抵抗)を低くすることで改善することができる。二次元電子ガスが存在する領域の抵抗は低いため、電極から二次元電

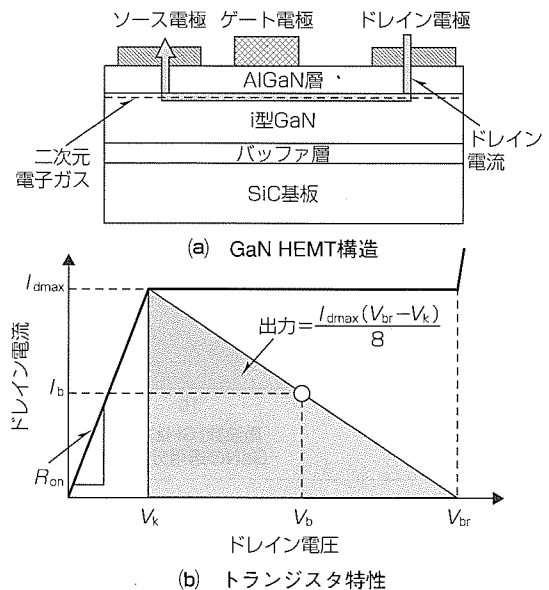


図1. GaN HEMTの構造と特性

子ガスまでの寄生抵抗成分を低減することが重要となる。

4. 注入ドーピングを用いたGaN HEMTの試作

GaN HEMTの出力電力、効率を向上させるためには寄生抵抗を低減することが重要であることを述べた。以下、寄生抵抗を低減する技術の一つである注入ドーピング技術について述べる。

4.1 注入ドーピングプロセス

注入ドーピングは高濃度の不純物領域を選択的に形成する技術である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。すなわち、ゲート領域の不純物濃度を低くしたままソース/ドレイン領域の不純物濃度を高くすることができるので、耐圧劣化抑制と寄生抵抗低減を同時に実現できる。図2に注入ドーピングプロセスを使ったHEMT作製プロセスを示す。注入ドーピング工程は、不純物を導入するイオン注入と不純物を電気的に活性化させる高温熱処理からなる。イオン注入では、不純物を注入する領域以外をレジストで被うことで選択的に不純物を導入する。今回、典型的なn型不純物であるSiを用いた。高温熱処理はSi原子を活性化すると同時に、イオン注入で生じた欠陥を回復させる働きもある。注入ドーピングを行った後は通常の作製プロセスでソース/ドレイン電極、素子分離領域、ゲート電極等を形成する。

図3に注入ドーピングの課題を示す。まず、第一は今まで述べたように注入領域の抵抗を減らすことである。このためには高温での熱処理が必要である。この熱処理で注入していない部分も高温に晒(さら)され、結晶又はその表面の状態が変化すると、ゲートリーク電流や耐圧等のトランジスタ特性に悪影響を及ぼすと考えられる。したがって、第二の課題は非注入領域におけるダメージを抑制することである。

4.2 コンタクト抵抗率とゲートリーク電流

今回、様々なイオン注入条件、熱処理条件を検討していく中、熱処理温度を工夫することで2つの課題を同時に解決できることを見いだした。以下、低抵抗化の指標としてコンタクト抵抗率、非注入領域のダメージの指標としてゲ

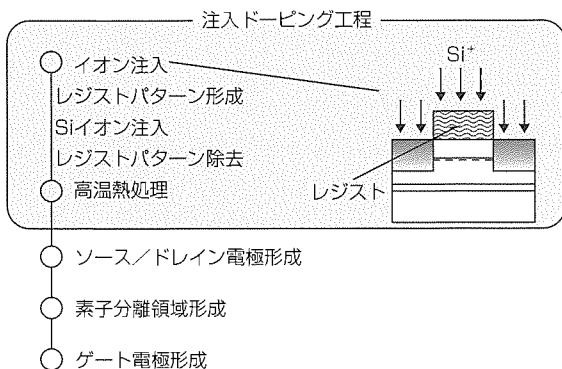


図2. HEMT作製プロセス

ートリーク電流を検討した結果について述べる。

図4にコンタクト抵抗率の熱処理温度依存性を示す。注入ドーピングを行わない場合、不純物の少ないノンドープAlGaN層に電極を形成するため、コンタクト抵抗率は $1.3 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ と高かった。注入ドーピング試料では熱処理温度の増加とともにコンタクト抵抗率は急激に減少した。熱処理温度1,150℃でトランジスタの電極として十分低い $4.0 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ という値が得られた。さらに、より高温の1,200℃で $2.1 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ という非常に低い値が得られた。熱処理温度の増加により不純物の活性化が促進されたためと考えられる。

ゲートリーク電流の熱処理温度依存性を図5に示す。1,150℃以下では熱処理なしの試料よりゲートリーク電流は少ないが、1,200℃では3倍も大きくなった。ゲートリーク電流は耐圧低下や素子劣化の原因となるため、熱処理温度は1,150℃以下にする必要がある。コンタクト抵抗率は熱処理温度1,150℃で十分低い値が得られていること(図4)から、熱処理温度を1,150℃にすれば2つの課題(低抵抗化、ダメージ抑制)を同時に解決できると考えられる。

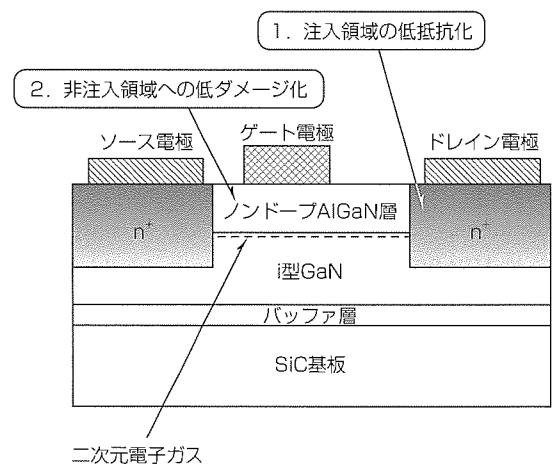


図3. 注入ドーピングの課題

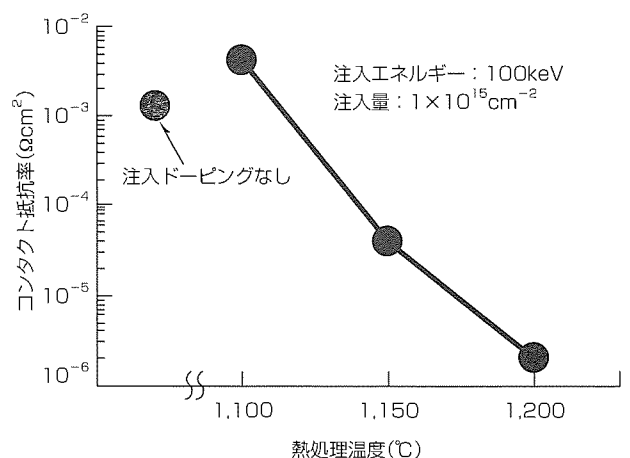


図4. コンタクト抵抗率

4.3 GaN HEMTの試作結果

イオン注入条件を最適化した後、ゲート長 $1\mu\text{m}$ のGaN HEMTを試作した。図6にドレイン電流-ドレイン電圧特性を示す。イオン注入は、加速エネルギー50keV、注入量 $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ で行った。比較のために、注入ドーピングを行わない試料を同時に作製した。まず、ゲート電圧1Vでの最大ドレイン電流は注入ドーピングなしの0.50A/mmと比べて34%増加し、0.67A/mmであった。これは、ソース・ドレイン領域の寄生抵抗が減少した結果である。また、オン抵抗は、 $6.9\Omega\text{mm}$ から $3.5\Omega\text{mm}$ とほぼ半減した。一方、ゲート電圧-10Vにおける耐圧は注入ドーピングなしで147V、注入ドーピング試料で194Vであり、非注入領域のダメージも抑制されていると考えられる。

5. む す び

GaN半導体の特長、応用について述べ、注入ドーピングによる寄生抵抗低減への取り組みを紹介した。熱処理温度を工夫することで、コンタクト抵抗を低減しつつ、非注入領域へのダメージも抑制できるプロセスが実現できた。この注入ドーピングプロセスでGaN HEMTを作製したところ、耐圧を劣化させることなく、ドレイン電流を増加することができた。この特性は最大出力電力、効率の改善につながる結果である。

参 考 文 献

- (1) Kikkawa, T., et al.: An over 200-W output power GaN HEMT push-pull amplifier with high reliability, 2004 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1347~1350 (TH3A-1) (2004)
- (2) Okamoto, Y., et al.: Improved power performance for a recessed-gate AlGaIn-GaN heterojunction FET with a field-modulating plate, IEEE Transactions on microwave theory and techniques, **52**, 2536~2540 (2004)
- (3) Kamo, Y., et al.: AC-band AlGaIn/GaN HEMT with cat-CVD SiN passivation developed for an over 100W operation, 2005 IEEE MTT-S Int.

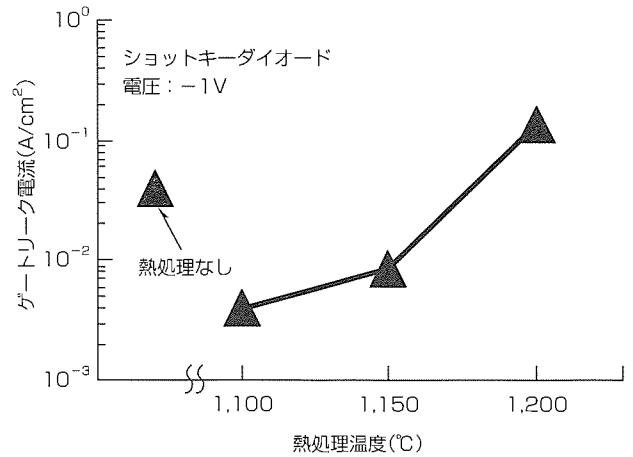


図5. 非注入領域のゲートリーク電流

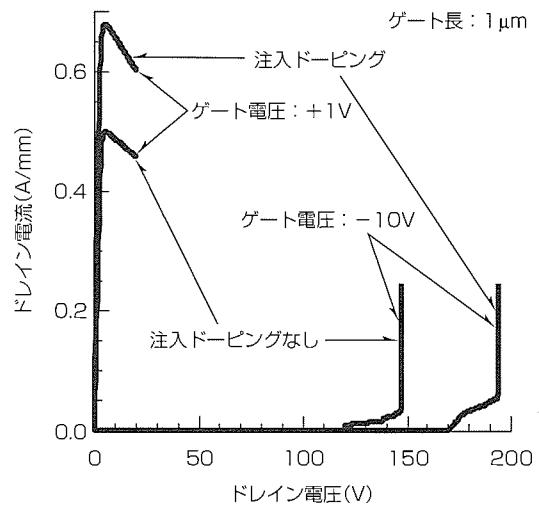


図6. GaN HEMTの電流-電圧特性

- Microwave Symp. Dig., WE1E-4 (2005)
- (4) Zolper, J. C., et al.: Electrical and structural analysis of high-dose Si implantation in GaN, Appl. Phys. Lett., **70**, 2729~2731 (1997)
- (5) Irokawa, Y., et al.: Electrical activation characteristics of silicon-implanted GaN, J. Appl. Phys., **97**, 083505 (2005)

フォーメーションフライト

吉河章二*
小山 浩**

Formation Flight

Shoji Yoshikawa, Hiroshi Koyama

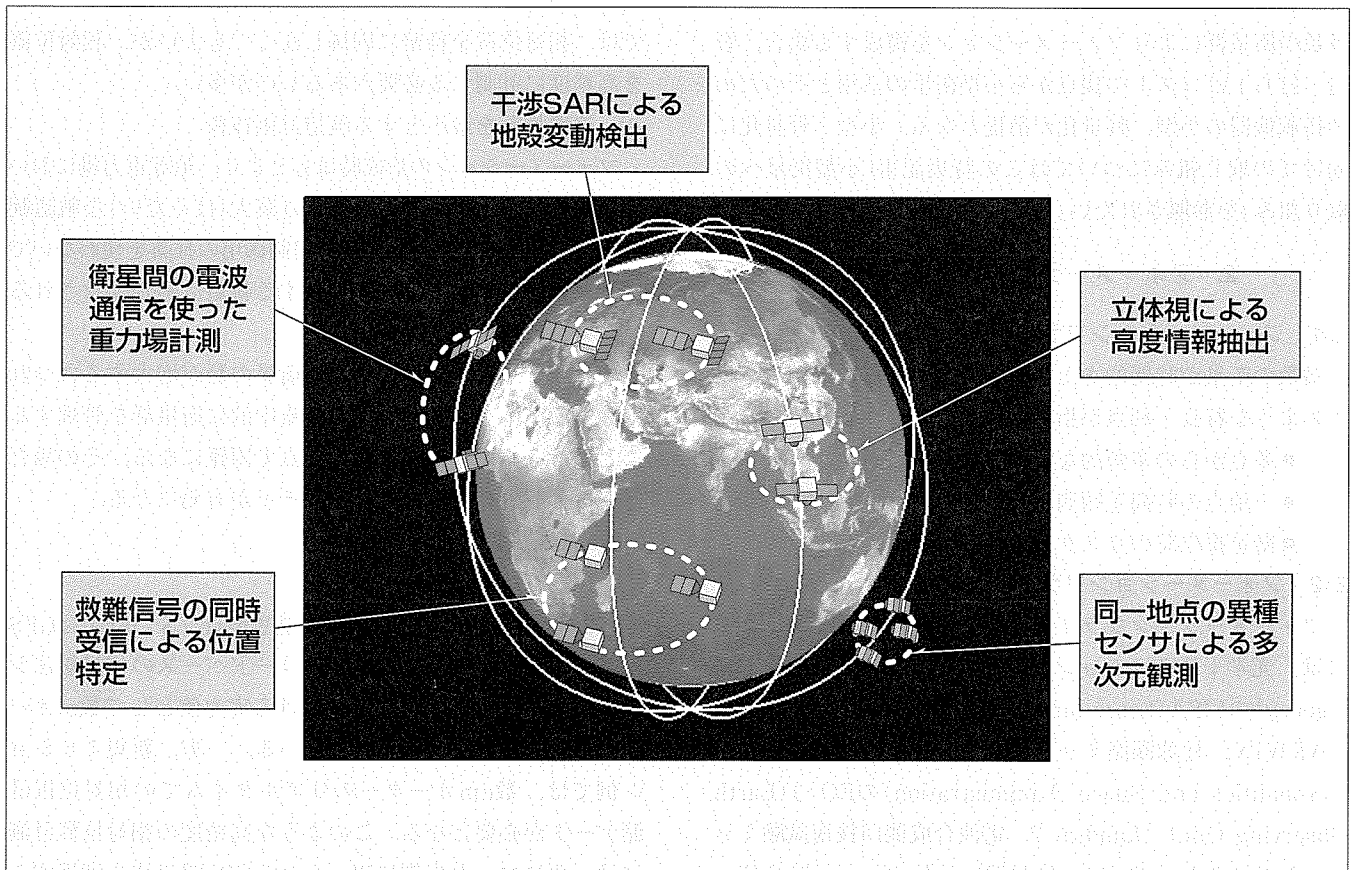
要 旨

複数衛星による協調的ミッションとしてすぐに思い起こされるのは、GPS(Global Positioning System)のように地球全域にわたって衛星を展開する、コンステレーションと呼ばれる手法である。一方、数kmの比較的狭い領域に衛星を展開して隊形を保ちながら飛行させるフォーメーションと呼ばれる新しい手法が注目を集めている。

フォーメーションフライトは、衛星の大型化の限界を打ち破る新しい概念で、例えば、二つの観測機器の基線長を長くするためには、大型の衛星の両端に搭載するよりも、2機の衛星にそれぞれ搭載して相対距離を延ばす方が効果

的である。さらに、多種、多様なセンサを複数衛星に分割して搭載することで、単に仮想的に超大型衛星を形成できるだけでなく、衛星損失時に一部センサの損失ですむというリスク分散や、衛星数を段階的に増やせるので機能の追加・更新が容易、又は、飛行隊形を縦一列にしたり横一列にしたりと変更して衛星資産を多様な用途に使用などと応用が広く、新規ミッションの創出が期待されている。

本稿では、このフォーメーションフライトの特長と技術課題及びその実現に向けた取り組みの一端について述べる。



フォーメーションフライトによる新しいミッション概念図

フォーメーションフライトは、数kmの比較的狭い領域に複数の衛星を展開して隊形を保ちながら飛行させる新しい手法である。衛星が空間的また時間的に分散することで、例えば、立体視、干涉SAR(Synthetic Aperture Radar)、多次元観測など、衛星の大型化の限界を打ち破る新しいミッションを実現する可能性を秘めている。

1. ま え が き

宇宙空間から地表面を2台のカメラで撮像して立体視を行う場合、高さ方向の計測精度は2台のカメラの相対距離に比例して向上する。衛星2機に1台ずつカメラを搭載するとき、衛星間の相対位置を正確に知ることができれば、相対距離を延ばして計測精度を大幅に向上できる。このように、数kmの比較的狭い領域に展開された複数衛星が隊形を保ちながら飛行して協調してミッションを行うことをフォーメーションフライトと呼び、複数の衛星が時間的また空間的に分散するメリットから新規宇宙機ミッションの創出が期待される。

一方、複数の衛星による協調的ミッションには前述のフォーメーションフライトの外に、地球全域にわたって衛星を展開するコンステレーションと呼ばれる手法が知られている。コンステレーションは、空間的また時間的に均一性が要求されるミッション、例えば、低軌道に配置した66機の衛星から移動体通信サービスを行うIridium^(注1)や高度約2万kmの軌道に配置した24機以上の衛星から測位サービスを行うGPSなどに採用されている。

本稿では、フォーメーションフライトを利用した新しい宇宙利用に向けた取り組みの一端について述べる。なお、多数の衛星群によりフォーメーションを構成する場合、製造・打ち上げコストの観点から小型衛星の活用とそのための搭載機器の小型／軽量化が前提となる。小型／軽量化に向けての取り組みについてはこの特集記事「小型衛星への取り組み」を参照されたい。

2. フォーメーションフライトとは

2.1 フォーメーションフライトの利点

複数の衛星が時間的また空間的に分散することから、以下のような特長・利点が指摘されている⁽¹⁾。

- 多点からの多角的な観測(立体視など)
- 一地点の時間差観測(短時間に变化する現象の観測)
- 衛星損失時のリスク分散(段階的な機能喪失)

2.2 フォーメーションフライトを利用したミッション

フォーメーションフライトの特長を利用したミッションには、光学干渉ミッションであるESA(European Space Agency)のLISA(Laser Interferometer Space Antenna)、DARWIN、地球観測ミッションであるNASA(National Aeronautics and Space Administration)のEO-1(Earth Observing One)/Landsat 7、電波合成開口技術試験ミッションであるTechSat21、衛星間の通信(光、電波)を使った重力場の計測を目的としたNASA/ESAのCHAMP(Challenging Mini-Satellite Payload for Geophysical Research and Application)/GRACE(Gravity Recovery

(注1) Iridiumは、Iridium LLCの登録商標である。

and Climate Experiment)等がある。また、将来の太陽光発電衛星群(SSPS)、観測、通信、発電等の機能ごとに特化した衛星の集合体で一つの衛星としての機能を果たすVirtual Spacecraft Bus(NASA)等の将来計画が知られている⁽²⁾。

2.3 新規ミッション例

多点からの多角的な観測を利用する例として、墜落したパイロットからの救難信号を複数衛星から同時に受信し、高精度にパイロットの位置を特定するミッションが考えられている。試算によれば、高度500kmの軌道上で相対距離5km離れた2機の衛星から受信する場合、衛星の相対距離を5cmの精度で計測できれば、パイロットの水平位置を10mの精度で特定できる。衛星1機の場合は、10kmの精度とされており、複数の衛星を用いる効果が顕著である。

3. 技術課題とその対応策

3.1 フォーメーションフライトの技術課題

以下では、航法誘導制御の観点でフォーメーションフライトに特有の技術課題を示す⁽¹⁾。

(1) 相対位置・速度の計測技術

フォーメーションの形成・維持のために相対位置計測が重要である。また、干渉計測などを目的としたミッションでは、相対位置を精密に制御しなくてもよいが、相対位置を高精度に計測する必要があるものが多い。

(2) 消費推薬を最小とする軌道計画技術

フォーメーションの形成時はもとより、地球重力場において任意の隊形を維持するためには莫大(ばくだい)な軌道制御を必要とする。できるだけ軌道制御用の推薬を使わないでフォーメーションを形成・維持する軌道計画が要求される。

(3) 多数の衛星の制御技術

フォーメーションを構成する衛星の数が増大するにつれて、ある衛星をリーダーとして集中的に衛星群を管理することは計算負荷・通信容量等の点で困難になる。その場合、例えば分散処理型のアーキテクチャが有効になる。

3.2 高精度相対位置計測

(1) GPS搬送波利用の必要性

1997年打ち上げの技術試験衛星Ⅶ型(ETS-Ⅶ)ではGPSのC/A(Coarse Acquisition)コードベースの相対航法システムが活用され、軌道上における実力値として数mオーダーの相対位置計測精度を得ている。一方、新規ミッション例では、数cmオーダーのリアルタイムでの相対位置計測データが必要となる。このような高精度の相対位置計測には、更にコード変調に用いられるGPS搬送波を利用することが必要となる(図1)。

(2) 波数の推定処理

GPS信号による測位は、GPS衛星の信号パターンに受信機内部で発生した信号パターンが同期するように調整し、

衛星から受信機に達するまでの時間(距離)を計測できることを利用する。直接計測されるのは信号パターンの位相であり、GPS衛星-受信機間に存在する信号パターンの個数分の波長を加え、距離に換算する必要がある。C/Aコードは信号パターンの長さが300kmもあるが、搬送波を利用する場合はその波長が信号パターンの長さ(L1帯の場合19cm)と短いため、波の個数(波数)を求めることが容易ではない。

GPS衛星の組合せを用いて高速に波数を推定する手法として、Hatch法とLAMBDA法が代表的である。Hatch法は、L1とL2信号の線形結合により、うなりに相当する波長の長いワイドレ線の波数を推定し、その結果から波長の短いL1の波数を解く方式で、飛行機の離着陸などに適用実績がある⁽³⁾。LAMBDA法は、各衛星の波数の探索空間を誤差分布に合わせて非対角化してから探索する方式で、測量分野で実績がある⁽⁴⁾。

搬送波の観測値に含まれる電離層遅延や受信機時計誤差などの共通部分を相殺するために、一つのGPS衛星から衛星#1と衛星#2で受信した信号の差(一重差)をとった上で、さらに別のGPS衛星からの一重差との差(二重差)をとることが通例であるが、二重差に含まれる観測誤差に大きな相関が生じる。Hatch法はこの相関を残したまま波数の探索空間を設定するのにに対して、LAMBDA法は、非対角化で相関をほぼ取り除いてから探索するため、計算量が大きくなるが探索に要する計測回数が少ないという特長がある。

(3) 相対航法精度の評価例

地上におけるRTK(Real-Time Kinematic)-GPS等の搬送波航法手法等を宇宙機用に拡張するためには、地上では基準局が静止しているが、フォーメーションフライトでは基準局も軌道運動していることや、異なる時刻に受信した観測データを同一の航法時刻での値に補正すること、宇宙機間のデータ転送帯域が限られることなどを考慮する必要がある⁽²⁾。

高度300kmの基準軌道から見て3機の衛星が円周上に5kmで等配される場合について、相対測位の評価シミュレーションを行った例を図2に示す。横軸は経過時間で、6,000秒がほぼ軌道一周期に相当する。上から3つは、それぞれ、衛星#1に対する衛星#2のx:進行方向、y:面

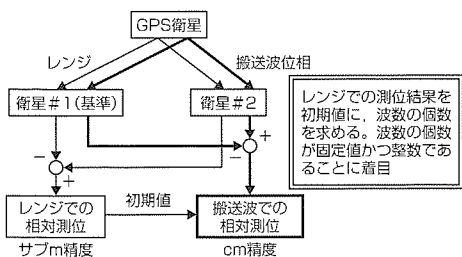


図1. GPS搬送波位相による高精度測位

外方向、z:地心方向の真値の時間履歴で、一番下が測位誤差の時間履歴を示す。図から、GPS衛星の見え方によって誤差が多少増減するが、相対位置誤差がcmオーダーに収まることが分かる。

3.3 消費推薬最小制御

(1) フォーメーション維持

円軌道を基準として狭い範囲での外乱のない相対軌道運動を考えると、進行方向のずれは保存されるので進行方向に一直線に並ぶ隊形を待機軌道として利用できる。一方、基準軌道の面外方向に初速を与えると軌道周期で単振動し、基準軌道の高度方向に初速を与えると面内を楕円(だえん)運動して一軌道周期後に元に戻る。局所水平面に射影した相対軌道が円軌道になるように両者の振幅を調整すれば、地球観測に適した軌道として利用できる。

これらの軌道は外乱のない場合にはフォーメーションを維持するための軌道制御が不要であり、このような軌道の選択によって貴重な推薬を節約できる。

(2) フォーメーション形成

フォーメーション形成は軌道一周回(2時間弱)で完了する。その間に衛星に働く自然外乱の影響を無視することができ、円軌道を基準とした狭い範囲での相対軌道運動は、初期位置・速度に関して線形な関係式で与えられる⁽⁵⁾。

$$x(T) = \Phi(T)x(0) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $x(t)$:時刻 t における相対位置・速度

$\Phi(T)$:状態遷移行列

スラスタを軌道制御に使用する場合、噴射時間は軌道周期に比べてはるかに短くインパルスとして近似できるため、次式が成り立つ。

$$x(T) = \Phi(T)x(0) + \sum \Phi_v(T - \tau_i)f_i \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 τ_i :制御時刻($i=1, 2, \dots, n$)

f_i :時刻 $t = \tau_i$ における軌道制御量

この式において Φ_v は状態遷移行列 Φ の下半分を抜き出した部分行列で、速度変化が相対位置と相対速度に生じる変化の感度を表している。式(2)から、時刻 T において目標

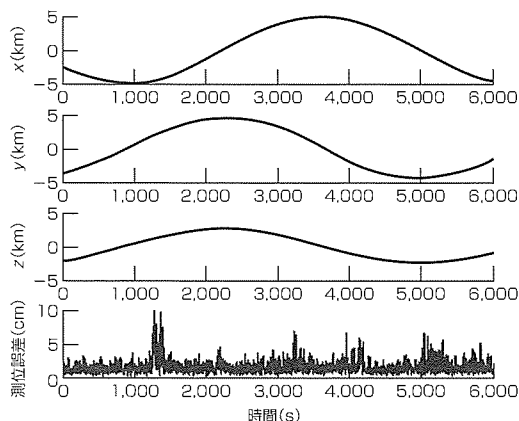


図2. 相対測位と測位誤差例

位置・速度 x_R となるような軌道制御量の中で、制御量の二乗ノルムの合計を最小にする制御量は次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$f = \Phi_v^T (\Phi_v \Phi_v^T)^{-1} (x_R - \Phi(T)x(0)) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $f = (f_1^T f_2^T \dots f_n^T)^T$

実際には外乱や制御誤差が原因で、計画した軌道に対してずれが生じるが、

$$x(t) = \Phi(t)x(0) + \sum \Phi_v(t - \tau_i) f_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

で与えられる準最適軌道に沿うようにフィードバック制御量を求めて、計画した軌道制御量に足し合わせることでずれを吸収できる。

(3) フォーマーションの形成例

例えば、高度約1,000kmの基準軌道の進行方向に100m間隔に並ぶ3機の衛星を、局所水平面に射影した相対軌道が半径1,000mの円になるように一軌道周期でフォーメーション移行するとき、燃料最小軌道は図3のようになる。必要増速度量は1.3m/sである。質量約1ton、推薬量約140kgの衛星を想定した場合、最大増速度量が約540m/sとなり、図に示すようなフォーメーションの形成を週1回のペースで5年間以上行うことができる。

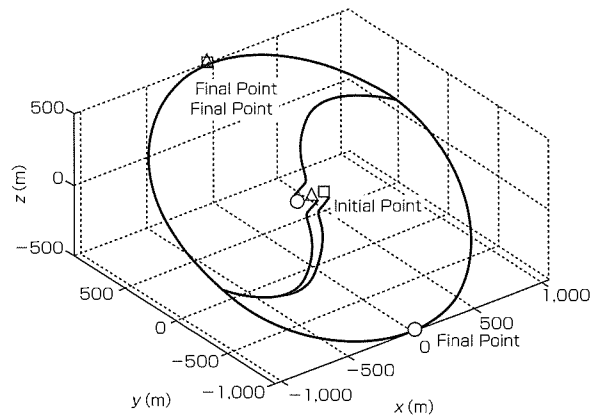


図3. フォーマーションの形成例

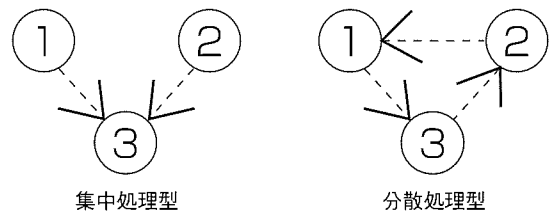


図4. データリンク構造

3.4 群衛星に適した航法構造

前述したGPS搬送波利用の高精度相対航法系では、フォーメーション宇宙機間で受信したGPS信号を受け渡す必要がある。この航法構造として集中処理型又は分散処理型が想定される⁽²⁾。前者は親衛星にすべての子衛星からのGPS観測データを伝送し、親衛星で全衛星の相対位置を推定する方式、後者は各衛星が隣接する衛星とのみ通信し、各衛星で隣接分の相対位置を推定して結果を順送りする方式である。衛星機数が3機の場合のデータリンク構造例を図4に示す。

搬送波航法を行うためには、宇宙機1機につき計測周期ごとに時刻情報、チャンネル数分の衛星番号、擬似距離、及び搬送波が観測データとして必要である。集中処理型では、親機に子衛星の機数分だけ観測データを集める必要があるが、分散処理型では自機の観測データと全衛星分の相対位置情報を順送りに転送すればよい。機数を横軸にとり、縦軸に伝送量及び相対位置誤差の見積りをもって図5に示す。両方式は許容伝送量、要求精度の観点から選定する必要がある。

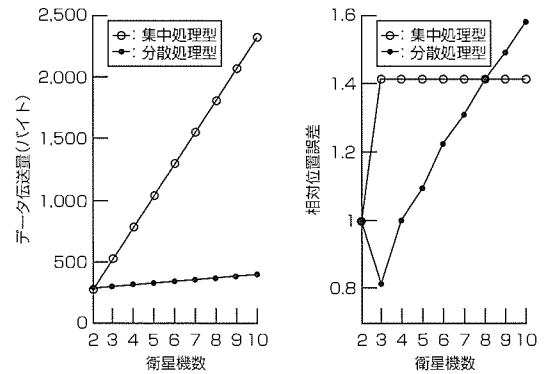


図5. 機数とデータ伝送量及び相対位置誤差の関係

4. む す び

フォーメーションフライトは、今後の宇宙利用の新しい潮流の一つである。本稿では、フォーメーションフライトを利用した新規宇宙機ミッションの創出に向けた取り組みの一端について述べた。

参考文献

(1) 中須賀真一：宇宙機のフォーメーションフライト，シ

ステム／制御／情報，45，No.10，1～6（2001）
 (2) 小山 浩，ほか：将来宇宙機における高精度GPS活用，計測と制御，44，No.4，263～265（2005）
 (3) Tsujii, T., et al. : Development of Kinematic GPS Software, KINGS, and Flight Test Evaluation, NAL TR-1357T（1998）
 (4) Teunissen, P., et al. : GPS for Geodesy, Springer-Verlag（1998）
 (5) Kaplan, M. H. : Modern Spacecraft Dynamics & Control, John Wiley & Sons（1976）
 (6) 山田克彦，ほか：宇宙機間の相対位置の制御について，日本機械学会論文集（C編），70，No.697，76～83（2004）

小型衛星への取り組み

小山 浩* 尾崎毅志***
 武田宗久** 宮崎守泰+
 吉河章二**

MELCO Activities for Futuer Small Satellites

Hiroshi Koyama, Munehisa Takeda, Shoji Yoshikawa, Tsuyoshi Ozaki, Moriyasu Miyazaki

要 旨

近年、我が国においても宇宙航空研究開発機構(JAXA)が開発中のINDEX(INnovative technology Demonstration EXperiment)衛星、大学宇宙工学コンソーシアム(UNISEC)が2002年に打ち上げたCube Sat等、小型衛星に対する取り組み気運が高まっている。また、この特集号の論文「フォーメーションフライト」において述べるとおり、複数衛星の協調によりミッションを行うフォーメーションフライト活用による今後の新規宇宙機ミッションの創出が期待されているが、多数の衛星群によりフォーメーションを構成する場合、製造・打ち上げコストの観点から小型衛星の活用が不可欠となる。小型衛星の実現に際しては、搭載機器の小型/軽量化が前提となる。本稿では、将来ミッションにおける活用を目指した三菱電機(MELCO)における搭載機器小型/軽量化に向けての取り組み状況について述べる。

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託により(財)無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)がシステム開発を実施しているSERVIS(Space Environ-

ment Reliability Verification Integrated System)プロジェクトにおいて、当社は、1号機においてスターセンサ統合型宇宙機制御装置(Satellite Controller Integrated with Star Sensors : SIS)が搭載されたとともに、2号機では先進衛星構体実験モジュールASM(Advanced Satellite Structure Experimental Module)の搭載が予定されている。また、当社としては、MEMS(Micro Electrical Mechanical System)を活用した実験モジュール搭載に関しても提案している。ここで、SISは、姿勢系センサの統合化、姿勢制御系とデータ処理系の統合化を目標とした将来の中小型衛星用統合型小型機器である。また、ASMは電子機器・計装系を構体パネルに組み込み、実装効率を向上させるための低価格構体パネルである。MEMS実験装置は、民生用MEMSの宇宙での利活用をねらった宇宙環境下における特性評価用の実験モジュールであり、超小型衛星実現の可能性を秘めている。

本稿では、上記各実験の概要について述べるとともに、これら機器を活用した将来発展性についても言及する。

<p>第一世代 従来型 ペイロード機器</p> <p>第二世代 組み込み型 ペイロード機器</p>	<h3>スターセンサ統合型 宇宙機制御装置</h3> <p>SISH : センサヘッド(7.85kg) SISE : 制御装置本体(7.96kg) SISS : 粗太陽センサ(0.54kg)</p>	<p>MEMSジャイロ</p> <p>MEMS加速度計</p>
<p>先進構体</p>		<p>MEMS</p>

三菱電機における小型衛星への取り組み

スターセンサ統合型宇宙機制御装置：スターセンサヘッド(SISH)で取得した恒星画像を基に、制御装置本体(SISE)において恒星の同定処理、姿勢決定処理を実施し、宇宙機本体の制御を実施する。また、初期運用時、異常時に備えるため粗太陽センサによる姿勢制御機能を持っている。先進構体：これまでの衛星の内部は大量のハーネスにより機器間のデータライン、電源ラインの結合がなされていた。先進構体は内部にデータライン、電源ラインがインストールされたパネルであり、ハーネスレスな衛星を実現する。MEMS：マイクロ電子機械素子であり、民生用として開発されたジャイロ、加速度計等の宇宙活用が期待される。

*鎌倉製作所(工博) **先端技術総合研究所 ***同研究所(工博) +情報技術総合研究所(工博)

1. ま え が き

観測頻度の向上及び新たな観測方式確立の観点から多数の衛星を活用したコンステレーション(異なった複数の軌道面に複数の衛星を配置し活用する手法)及びフォーメーション(複数の衛星を相互の近傍において編隊飛行させ、編隊飛行を活用し、高精度なインタフェロメトリー等を実現する手法)の活用が予想される。多数の衛星を同時に軌道面に配備するためには、複数打ち上げが可能であり、かつ単価の低い小型衛星の活用が不可欠となる。小型衛星は質量1トン~250kg程度のミッション実証衛星、質量250~100kg程度のいわゆる小型衛星、100kg以下のマイクロ、ナノ衛星に分類することができるが、上記ミッションに対しては、ミッション実証衛星の軽量クラスからいわゆる小型衛星クラスの衛星が必要となる。上記クラスの小型衛星を実現するためには抜本的な小型軽量化対策が必要となる。

2. 小型軽量化に向けての取り組み

2.1 小型化に向けての取り組み方針

衛星の小型軽量化のため機能の見直し単系化等が行われているが、機能性能を維持しつつ小型軽量化を達成するためには、複数の機器統合化、新規実装方法の採用、さらには新たな小型軽量化デバイスの採用等が必要となる。当社では、NEDOからの委託により、USEFが開発中のSERVIS-2号機において先進的な小型軽量機器の開発を担当している。SERVIS-2号機は2003年に打ち上げられたSERVIS-1号機の後継機であり、宇宙空間におけるミッション実証衛星として先進的機器、民生部品を活用した機器等の評価に活用を目指し2007年度に打ち上げを予定している。SERVIS-1衛星の外観を図1に示す。図中のペイロードユニット部分に実験機器が搭載される。SERVIS-2号機にはUSEFの指導を得つつ当社が開発したスターセンサ統合型宇宙機制御装置がバス機器として搭

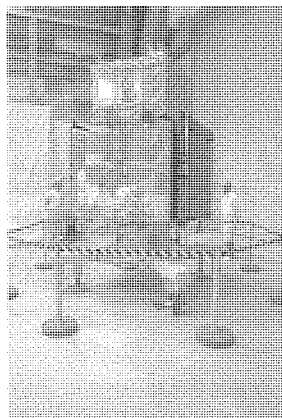


図1. SERVIS-1衛星

載される。実験機器として先進衛星構体実験モジュールが搭載されるとともに、MEMSについても搭載を提案している。スターセンサ統合型宇宙機制御装置の開発により従来は別機器であった誘導制御系、データ処理系、姿勢センサ系の統合/融合を目指している。先進衛星構体実験モジュールにより従来は単なる構造体であった構体パネルを機器配置のための基板、又は、機能要素(パネル一枚に姿勢制御機能を集約等)として活用することを目指している。また、MEMS活用により、機械部分の構造的制約により小型化が困難とされていた機器類の大幅な小型化軽量化を目指している。以下に、上記各機器の概要、開発状況について述べる。

2.2 スターセンサ統合型宇宙機制御装置

2.2.1 開発のねらい

従来の衛星では、姿勢制御系、通信及びデータハンドリング系といったサブシステムが個別に設計されており、共通部やインタフェース部が冗長な設計となっていることが多い。また、開発の細分化で、各部の設計余裕の総和が大きくなりがちな傾向があった。このため、これらのサブシステムを制御する電子機器を一つの装置に凝縮し、過剰なインタフェースを排するとともに、設計マージンを全体で最適化し、小型軽量化を実現することをこの機器のねらいとしている。制御装置の小型軽量化の副次効果として、構体系・電力系・熱制御系に関しても併せて小型軽量化が達成される。

2.2.2 開発の目標

制御装置の小型軽量化に向けて質量従来比約3分の1の実験装置を開発し、軌道上での動作実証を実施している。小型軽量化方策としては、太陽センサ、地球センサなどの複数のセンサからなる姿勢センサシステムをスターセンサに置換するほか、CCDやCPU等のコアとなる部分に高性能な民生品を採用している。また、周辺回路にはFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いてハードウェアのソフトウェア化を進めるとともに、高性能の民生CPUを採用して姿勢系及びデータ処理系の処理を統合化している。ここで、単純に民生品を採用しただけでは放射線耐性の問題、信頼性が低下する等の問題が発生するが、宇宙環境で使用するための独自の試験を実施するほか、多数決処理回路の導入等の工夫により高い信頼性維持を達成している。

2.2.3 構成

SISは、センサヘッド(SISH)、制御装置本体(SISE)及び粗太陽センサ(SISS)から構成される(扉ページ中央写真)。SISHは、民生CCDを検出素子とする4本のスターセンサのほかに4個の簡易的な1軸レートセンサを内蔵しており、SISH以外に姿勢センサを必要としないシステムを構築可能である。SISSは、異常時に電力を確保するための太陽

方向検出用として備えるもので、4つのフォトセンサで構成される。また、地上局から不可視中のミッション機器のデータを保持するためにデータレコーダ機能をSISEに内蔵するほか、データ処理機能としてSERVIS-1号機の別の実験機器であるリチウムイオンバッテリーの状態をモニタしてパケットテレメトリを生成する機能も備えている。SISの機能構成を図2に示す。

2.2.4 開発の経緯

1994年に社内研究開発に着手し、SERVIS-1号機にSISを搭載し、2003年10月打ち上げ後のチェックアウト試験で基本動作を確認し、以後2年にわたり軌道上試験を実施中である。

2.2.5 評価結果

放射線によって発生する代表的事象としてSEU (Single Event Upset: 荷電粒子の通過に伴うデータ化け)がある。SIS搭載の民生品CPUでは1日1個当たり平均0.023回SEUが発生しているが、多数決処理回路によりデータ化けを自動検出・修正し、正常な動作を継続している。また、データレコーダに採用した民生品SDRAMでは1日1個当たり平均0.21回SEUの発生が検知されているが、誤り訂正機能により訂正されており、全体での機能上の問題は発生していない。また、放射線の影響により使用した民生CCD上に白傷と呼ばれる画面の固定位置に輝度の高い点が数百個発生しているが、白傷を自動的に検出し、偽の星像として棄却するロジックを適用することにより、衛星姿勢が検出可能であることを軌道上試験により確認している。図3は別途衛星本体で実施している地球センサを使用した姿勢決定系の出力と、SISによる姿勢検出出力を同時プロットしたものである。ヨー軸を地球中心方向に向ける地球指向姿勢を保つために、慣性空間から見ると、SERVIS-1号機は軌道一周回(約105分)でロール軸回りに360°回転する。図からSISによる3軸姿勢検出結果が実績ある従来型姿勢決定値と一致することが確認される。

今後、SERVIS-1号機に実験ミッションとして搭載され

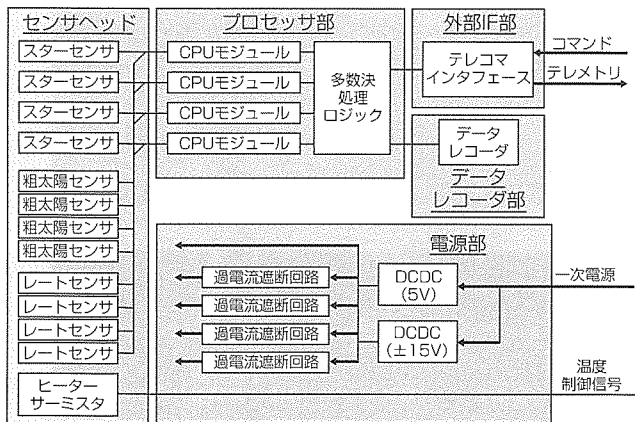


図2. SISの機能構成図

たSISの取得データ解析を基に設計改良を進め、SERVIS-2号機に対しては、衛星バス本体の制御装置として搭載することを予定している。

2.3 先進構体

小型衛星における構体の小型・軽量化を単に構造設計の側面からのみとらえた場合、それはすなわち構造材料の比強度、比剛性を増すということであり、既にCFRPないしアルミハニカムサンドイッチパネル構造による軽量構造が一般化した現在、更なる軽量化への貢献の余地は少ない。構体の機能を拡張し、荷重経路のみならずエレクトロニクスの経路として、更には一部のエレクトロニクスとしての機能をも統合した多機能化ができれば格段の小型軽量化が可能になる。このような考え方に基づいて開発を進めているのが先進構体である。図4に先進衛星構体について示す。図は、現在の衛星システムの主流である3軸衛星構体の一部を切り出したものである。左側の従来型構体では、バス周辺機器やインタフェース機器はアルミ筐体(きょうたい)に組み込まれた後、構体パネルに取り付けられており、構

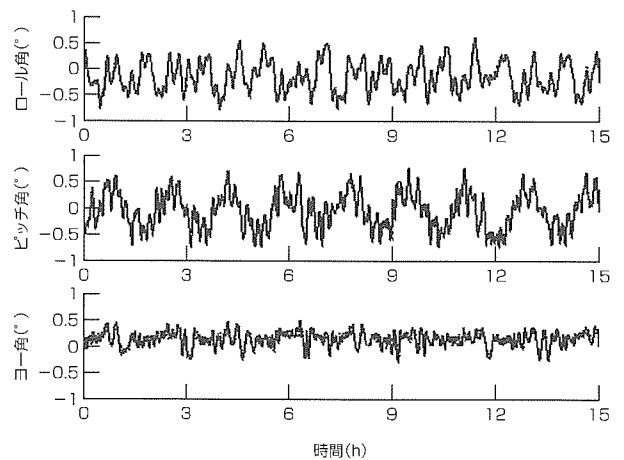
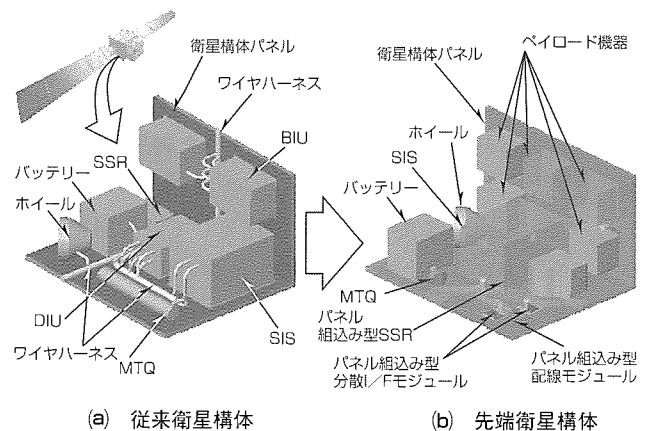


図3. 軌道上姿勢推定結果(2005年4月11日)
(実線: SIS推定値, 破線: 衛星本体推定値)



(a) 従来衛星構体 (b) 先端衛星構体

SSR: Solid State Recorder. BIU: Bus Interface Unit. MTQ: Magnetic TorQuer

図4. 先進衛星構体の概念

体内で一定の搭載面積を占めている。また、機器間はワイヤハーネスで三次元的に複雑に連結されることから多くの組立て工数を必要とするほか、ハーネス自身の質量も無視できない。先進衛星構体では、多くのバス機器を筐体から取り出し、モジュールとして構体パネル内部に直接実装するとともに、ワイヤハーネスも基板化し配線モジュールとしてパネル内部に組み込む。先進衛星構体の特長は、筐体やハーネスが排除されることによる軽量化やバス機器の空いたスペースをミッション機器に提供できることといった直接的な効果はもちろんのこと、電子部品が直接構体に実装されることによる熱パスの簡素化により、民生品の活用につながる環境温度の低減が図られる、多くのバス機器がパネルに組み込まれ、サブアセンブリー化されることにより組立て、試験工数の削減が期待される、など衛星の製造コストの削減に直結する重要な要素を持つことにある。

先進衛星構体における幾つかの技術課題のうち、構体系の剛性低下への懸念については、衛星構造の固有値解析の結果、パネル単体としての固有値は確かに低下するが、衛星構体全体としてはほとんど影響がないことが分かっている。また、エレクトロニクスの耐放射線対策として、問題となるチップ部を選択的に保護するスポットシールド技術を導入する。これら課題を含む先進構体の有効性についてはSERVIS-2のミッションASMとして検証を行うため開発が進められている。

2.4 宇宙におけるMEMS活用

衛星の小型化には搭載機器の小型化は不可欠であり、MEMS技術はセンサを始めとした機器の小型化を推進するためのキー技術として期待されている。また、衛星自体をMEMS技術で製作するシリコンサテライトも米国で提案されており、宇宙におけるMEMS活用は今後の衛星開発において重要な役割を担うものと考えられる。MEMS技術は、半導体のフォトリソグラフィを基本とした微細加工プロセスをベースに、可動及び非可動の三次元機能構造体を作り込む技術であり、1987年にシリコン基板上に可動歯車が形成できることが発表されて以来、種々のMEMSデバイスが開発されてきている。当社もMEMS技術の研究開発を積極的に進めており、加速度センサ、エアフローセンサ、非冷却赤外線イメージセンサ等を製品化し、また、次世代通信システムのキーとなるRF-MEMSの研究開発を行っている。ここでは、当社で開発しているMEMSデバイスを紹介するとともに、その宇宙への活用可能性に関し言及する。

図5に当社で製品化している $\pm 2G$ までの重力加速度を検出する低Gの加速度センサエレメントの写真を示す。図に示すように高アスペクト比のドライエッチングで形成された櫛(くし)歯構造をしており、加速度が矢印方向に作用したときの可動電極と固定電極間の静電容量の変化から加

速度の大きさを検出している。加速度センサやジャイロといった慣性センサは衛星では姿勢制御系等で使用されており、小型の慣性センサは衛星の小型化を実現する上で不可欠である。現状の民生用MEMS慣性センサは、宇宙で使用するレンジにおいて温度依存性、S/N比に関して要求仕様を満足しない状況であるが、MEMS慣性センサの高精度化と合わせて他のセンサと補完して利用する試みが検討されている。

図6には非冷却赤外線イメージセンサの断面SEM(Scanning Electron Microscope)写真を示す。このセンサは $40\mu\text{m}$ 角の画素から構成された 320×240 のイメージセンサである。図に示すように、当社独自のSOI(Silicon On Insulator)基板の単結晶シリコン層に形成したダイオード温度センサがシリコン基板をエッチングした空洞の上に細い支持脚で断熱保持されており、その上に赤外線吸収構造体が犠牲層エッチングの技術で形成されている。非冷却赤外線イメージセンサは物体が輻射(ふくしゃ)する赤外線を熱に変換して検出するセンサで、暗闇でも物体を検出できることから監視カメラとして使用されているが、宇宙では地球大気の温度を検出し、姿勢を検出する地球センサへの応用等が考えられる。

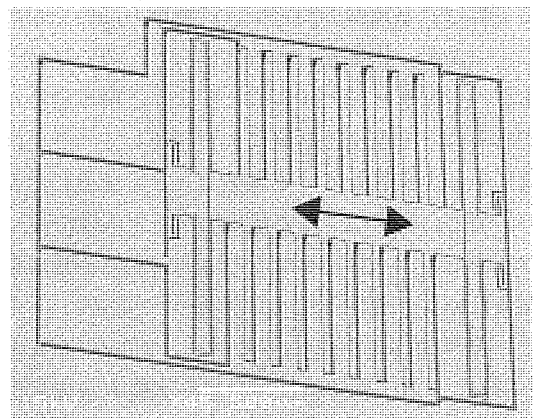


図5. 加速度センサエレメント

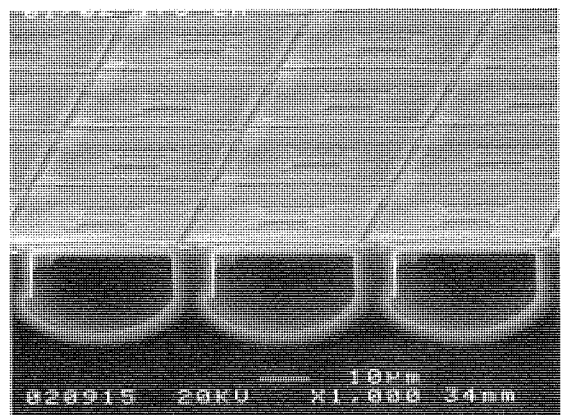


図6. 非冷却赤外線イメージセンサ

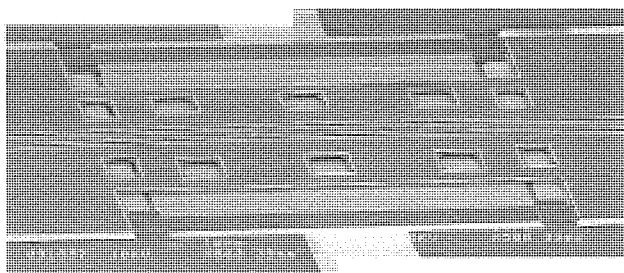
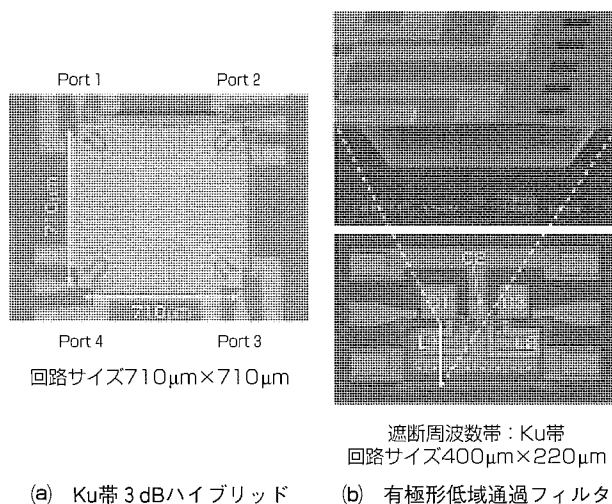


図7. RFスイッチ

図7には、RF-MEMSの例として、シリコン基板上に形成したRFスイッチを示す。当社は、集積化を目指して、片面からの加工で種々のRF-MEMSデバイスを統一的に製作できる独自の構造としてDAM(Dielectric Air Metal)構造を提案している。DAM構造はメタル層と誘電体層の間に空洞を設けた構造である。その製造方法は、まずシリコン基板をエッチングして、その上をメタライズし、有機犠牲層を成膜した後、平坦(へいたん)化をして、その上に誘電体層と種々の回路を形成し、最後に有機犠牲層をエッチングするものである。基本となるこの技術に応用することで種々RFデバイスを集積化することが可能となり、小型の無線通信システムを実現することができる。DAM構造による小型・低損失RF受動デバイスの実現例として、図8に、Ku帯3dBカプラ及び、遮断周波数がKu帯の有極形低域通過フィルタを示す。いずれのデバイスも、MEMSの微細加工技術による集中定数化とDAMの中空空洞化構造による誘電体損低減により、 1mm^2 以下のサイズにてKu帯で1dB以下の低損失性能を実現している。この技術は、衛星では、通信系やデータ処理系等への適用が考えられる。

3. 今後の小型衛星の活用に向けて

近年、衛星に特有の広域性に着目して、航空機や船舶等の広域移動体通信ネットワークや、全地球規模のリモートセンシングシステムの構築に向けた衛星の活用が注目を集めつつある。なかでも、衛星利用によるリモートセンシングシステムについては、気象/気候変動や環境の監視、防災/危機管理や緊急時の情報収集、又は農林/水産物や水資源などの安定供給支援等、まさに地球レベルで高まりを見せている。安心・安全の要求にこたえられる多くの可能性を秘めている。具体的には、衛星の利用により温室効果ガスの高精度観測による地球温暖化防止支援、気象の高頻度観測による高精度気象予報や災害(集中豪雨・台風・洪水など)監視、同長期継続観測による地球温暖化・エルニ



(a) Ku帯3dBハイブリッド (b) 有極形低域通過フィルタ

図8. RF MEMSの例

ーニョ・大気汚染などの気候変動の監視、危険/災害地域の高頻度高分解能撮像による防災及び災害時復旧支援、広域シームレスな高精度測位データの統合GIS(Geographic Information System)との融合、並びに地球規模の水循環観測による水循環変動予測などが可能になると期待される。これらのシステムを構築する上では、必要に応じたセンサを搭載した多数の小型衛星を低高度周回軌道に周回させることが有効と考えられる。可視光/赤外/電波等の高性能なセンサを搭載可能な小型・軽量の衛星を安価に実現することで、上述の種々のシステムへの小型衛星の活用が、今後、大いに期待できるものと考えられる。

4. むすび

SERVIS-2号機は2007年度の打ち上げに向け開発中である。本稿で述べた各小型機器、実験システムは、SERVIS-2号機に搭載され、軌道上における動作、機能性能の評価を予定している。得られた評価結果を基に、将来のコンステレーション、フォーメーションミッションへの利活用を目的とした中小型衛星への利活用推進を図っていく。本稿で紹介した各搭載/実験機器開発に際し、指導いただいたUSEFに対し、深謝する。

参考文献

- (1) 井上正夫, ほか: 小型・低コスト衛星の開発構想, 三菱電機技報, 71, No.9, 793~796 (1997)
- (2) 宮武克昌, ほか: スターセンサ統合型衛星制御装置の開発と宇宙実証結果, 第48回宇宙科学技術連合講演会, 58~63 (2004)

分散型宇宙太陽光発電システム “Solar Bird”

苗村康次* 松岡知江***
水野友宏** 大塚昌孝+
三神 泉**

Formation Type Space Solar Power Station -Solar Bird-

Koji Namura, Tomohiro Mizuno, Izumi Mikami, Tomoe Matsuoka, Masataka Ohtsuka

要 旨

中小規模の発電衛星群により打ち上げから運用に至る技術障壁を相対的に低くし、システムの成立性を向上できる分散型SSPS(Space Solar Power Station)“Solar Bird^(注1)”について述べる。

このシステムは、一体型SSPSと比較して、軌道上組立ての容易さ、段階的運用可能性、技術リスクの低さなどに優れている。一方、ビーム効率是一体型SSPSに比較して若干劣る。しかし、分散型SSPSでは、発電衛星間距離を最適化し、グレーティングローブ電力まで利用することにより、効率劣化を最小化でき、ビーム効率95%の条件では一体型SSPSに比べてレクテナ径1.3倍程度にすると同等の電力を受けられる。さらに、新たに開発したDDS(Direct Digital Synthesizer)駆動PLL(Phase Lock Loop)位相制御発振器を送電アンテナのビーム制御に適用することにより高精度位相制御とRF(Radio Frequency)損失の削減を

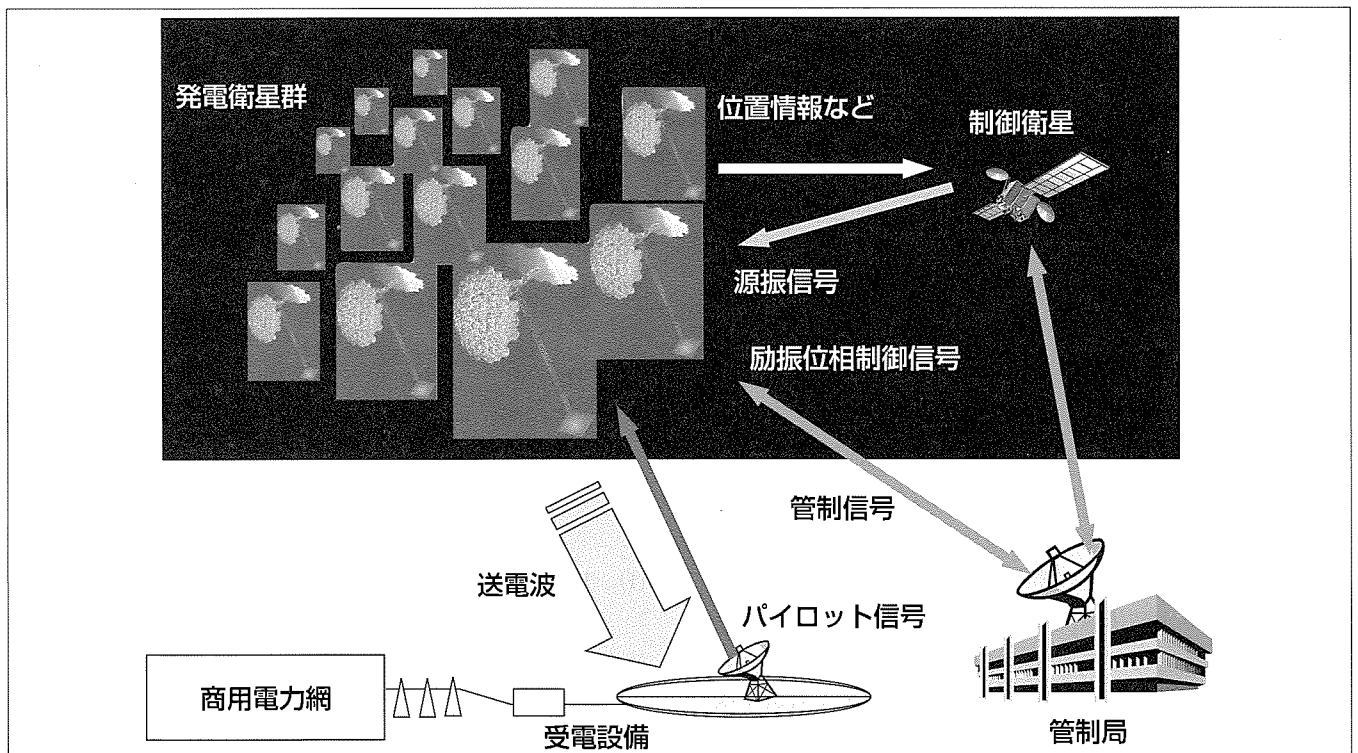
図っている。

発電衛星群を同心円上に配置し、同心円の中心をレコード盤軌道の中心とすることにより、隊形を維持するための推薬を最小にでき、分散型SSPS運用の成立性を示した。

SSPS開発では、開発すべき技術が多岐にわたるとともに実用開始まで長期にわたるため、開発の効率化と早期回収の観点での開発投資が重要である。そこで、以下の開発方針を明らかにし、ロードマップを提示した。

- (1) SSPSでしか開発できない固有技術を優先的に開発し、民生用の技術を適用するものは、開発状況を考慮して適用時期を設定する。
- (2) 技術開発成果を早期にビジネス展開するための派生技術も視野に入れた開発を行う。

(注1) Solar Birdは、三菱電機(株)の登録商標である。



分散型SSPSのシステム構成

分散型SSPSは、静止軌道上に配置した発電衛星群と地上設備で構成する。発電衛星は500機程度を想定し、5.8GHzのマイクロ波で電力を伝送し、1GWの電力を地上に供給する。発電衛星群で仮定のフェーズドアレーアンテナを構成するため、発電衛星群のフォーメーションフライト技術と発電衛星間の送信マイクロ波の共相性を保持するための源信統制技術が新たに必要になる。

1. ま え が き

宇宙では地上の5～10倍の太陽光エネルギーが得られる。そこで、太陽電池で発電した電力を地上に無線伝送する宇宙太陽光発電(SSPS)への関心が高まっている。背景には、①2050年ごろと言われる化石燃料の枯渇に対しクリーンな新エネルギーを得る、②運用時に環境を破壊しない、③小型・高信頼性機器を大量に使用するため産業への波及効果が高い、などがある。

米国では1970年代にNASAがリファレンスシステム(一体型SSPS)を提唱した⁽¹⁾。いったんは検討が中断されたが、1995年ごろ以後、研究を再加速している。

国内では京大生存圏研究所を始め大学・国研や宇宙航空研究開発機構(JAXA)、無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)の活動が盛んで、メーカーも開発成果を報告し始めている。しかし、実用SSPSを考慮したプロジェクトの本格立ち上げには至っていない。一体型SSPSでは、発電電力10GW、太陽電池パネル5×10km、送電アンテナ直径1km、受電設備10×13kmに達する。このシステム規模による問題を抑圧するため、中小規模化した発電衛星を複数機用いてフェーズドアレーアンテナ(PAA)を構成する“Solar Bird”コンセプト(分散型SSPS)を提案し、システム検討とその要素技術開発を行っている⁽²⁾。

本稿では、まず、分散型SSPSの概要について述べ、一体型SSPSとのトレードオフを行う。ついで、分散型SSPSに不可欠技術であるマイクロ波伝送⁽³⁾とフォーメーションフライト技術⁽⁴⁾について述べ、最後にロードマップについて述べる。

2. Solar Birdコンセプト(分散型SSPS)の概要

2.1 システム構成

分散型SSPSは、図1に示すように、静止軌道上に配置した発電衛星群と、地上設備で構成する。発電衛星は最終的には500機程度を想定し、5.8GHzのマイクロ波で電力を伝送し、1GWの電力を地上に供給する。発電衛星群で仮想PAAを構成するため、一体型SSPSにない以下の要素が

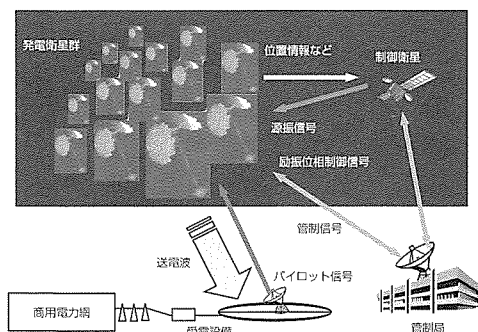


図1. 分散型SSPSのシステム全体構成

発生する。

- (1) フォーメーションフライト(相対位置制御)
- (2) 発電衛星間の源信統制技術

発電衛星は、二枚の鏡で太陽を追尾、集光するので軌道上の位置、姿勢が発電へ及ぼす影響を最小にできる。また、送電パネルの太陽電池パネル面で発電し、裏面のPAAで送電する。将来の技術進展を考慮して総合効率を10%とすると、固定反射鏡、追尾反射鏡の直径は約200mに、送電パネルは幅100～200mになる。発電衛星は約10トンであり、衛星バスは、既存のETS-VⅢクラスを想定している。

2.2 分散型SSPSの特長

一体型SSPSと分散型SSPSの比較を表1に示す。分散型SSPSは、ビーム効率が若干劣るものの軌道上組立ての容易さ、段階的運用可能性、技術リスクの低さなどに優れている。

3. マイクロ波電力伝送

3.1 分散型SSPSにおけるビーム合成⁽³⁾

図2に周波数5.8GHz、アンテナ径200m、発電衛星数25機(正方形配列)、伝送距離36,000kmの放射パターンを示す。図には、開口面積が等価な直径1kmのアンテナ放射パターンも併せて示す。また、図3に発電衛星間距離L

表1. 一体型SSPSと分散型SSPSの比較

比較項目	一体型SSPS	分散型SSPS
軌道上展開／組立て技術	EVA又はロボティクスによる組立て。低軌道で組立時は軌道変換が必要。	軌道上の組立ては小規模化が期待できる。展開機構も簡素化、単純化が可能。
衛星故障リスク	衛星故障による全ミッションの喪失のリスクが高い。修理を行う場合も作業性、組立性が困難。	衛星故障による全ミッションの喪失のリスク低減。低コスト短スケジュールで交換衛星の打ち上げが可能。
ミッションの拡張性	規模の拡大には、システムの設計変更／修正が必要。	衛星機数、配置位置、軌道を変更することにより可能。
ミッション寿命の長期化	衛星寿命に大きく依存する。	交換衛星を順次打ち上げることによりミッション寿命を延ばすことが可能。
姿勢安定化	超大型構造物は大きな外乱トルクを受けやすく姿勢の安定化が難しい。	分散小型化することにより個々の衛星の姿勢安定化が容易になる。
衛星航法・姿勢制御	航法は従来どおり。1機に対する制御のみ。	複数機の航法・姿勢制御技術開発が必要。
衛星運用	運用は従来どおり。	複数機の運用方法(親子衛星運用)開発が必要。
マイクロ波伝送効率	一体型アンテナによるサイドローブ低減。	グレーティングローブの低減が必要。ビーム効率は、大規模一体構造に比べ劣化する。

EVA : Extra Vehicular Activities

によって一定のビーム効率を得るために必要なレクテナ領域の直径を示す。これらの結果から、ビーム効率95%では、一体型SSPSの所要レクテナ径14.6kmに対して、分散型SSPSでは19.4kmと約1.3倍程度となり、発電衛星間距離を最適化し、グレーティングロブの電力まで含めて地上のレクテナで取得することにより、ビーム効率の劣化を最小限にとどめられる。

3.2 マイクロ波位相制御⁽²⁾

36,000km離れて直径十数km程度のレクテナに送電するには高度なビーム制御が不可欠である。SSPSでは、PAAの適用を前提に、ビーム制御にはRF移相器を用いている。しかしRF移相器での損失、量産時のばらつき、環境温度変動による位相誤差、などの課題がある。そこで、DDSの初期位相設定機能を用いてRF発振器の発信位相を直接制御するDDS駆動PLL位相制御発振器を開発している。図4にブロック図を示す。この方式では、高精度位相制御だけでなく、周波数の低いMHz帯の分配信号が適用でき分配損失の抑圧などの利点がある。

4. フォーメーションフライト

4.1 発電衛星群の軌道

発電衛星群の軌道としては、軌道長半径が静止軌道高度と同程度のものが最適である。また、衛星群の隊形を形成・維持するときの推進の消費を抑えるため、衛星に加える制御を最小にする必要がある。前記条件を満たすため、静止軌道でのレコード盤軌道を検討している。レコード盤

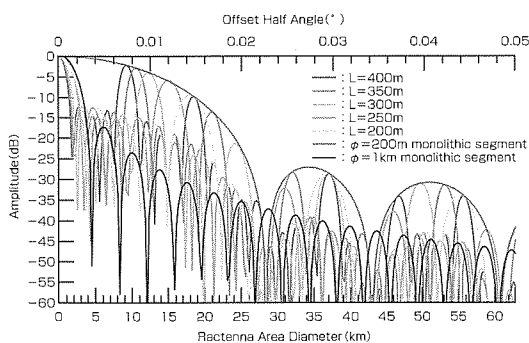


図2. 発電衛星群からの放射パターン

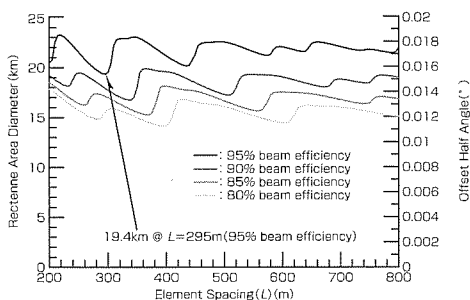


図3. 発電衛星間距離Lによる所要レクテナ径

軌道上はある基準軌道に対して一定の距離を保ちながら周回するので、隊形を形成する各衛星の離心率と軌道傾斜角を適切な関係にすることでレコード盤軌道が成立する(図5)。

発電衛星群の配置を検討した結果を図6に示す。同心円上に衛星を配置し、その中心をレコード盤軌道の中心にすることにより、隊形維持に必要な推進を最小にできる。

摂動がない理想環境下では、レコード盤軌道上に衛星を配置するだけで、隊形を維持できる。しかし、衛星には様々な力が働き、軌道がずれるので、隊形を維持するため、衛星に加える制御の最適化が今後の課題の一つとなる。

4.2 フォーメーション軌道制御ロジック

多数機のフォーメーションフライトの場合、地上から全衛星を管制するのは困難であり、編隊の中での自律的な管理が重要である。隊形管理アーキテクチャとしては、親・子衛星からなるグループ階層による手法がある。発電衛星群でも衛星間通信によりグループ内で相互の自律的監視を行い、限られた衛星のみを地上から運用する。

発電衛星群の隊形を維持・形成する軌道制御アルゴリズムも、重要な課題である。数mレベルの相対位置制御アルゴリズムは、十分な能力を持った航法系と制御系があれば

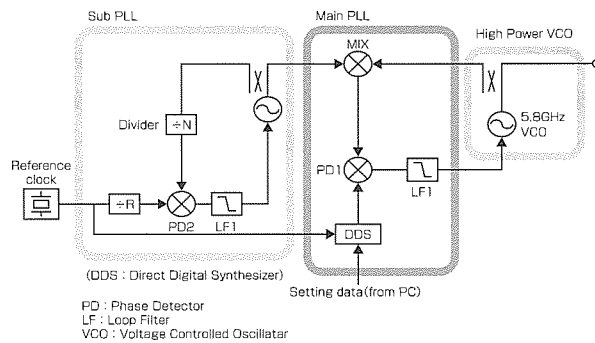


図4. DDS駆動PLL位相制御発信器のブロック図

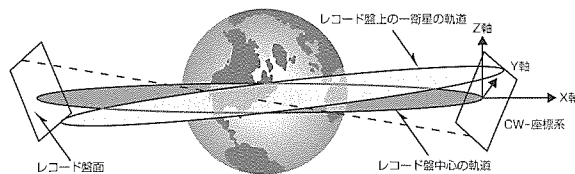


図5. レコード盤軌道の説明図

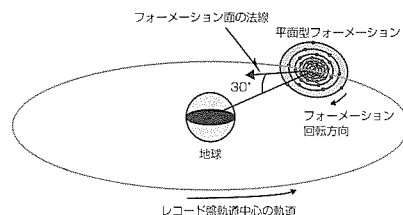


図6. フォーメーション形成の一例

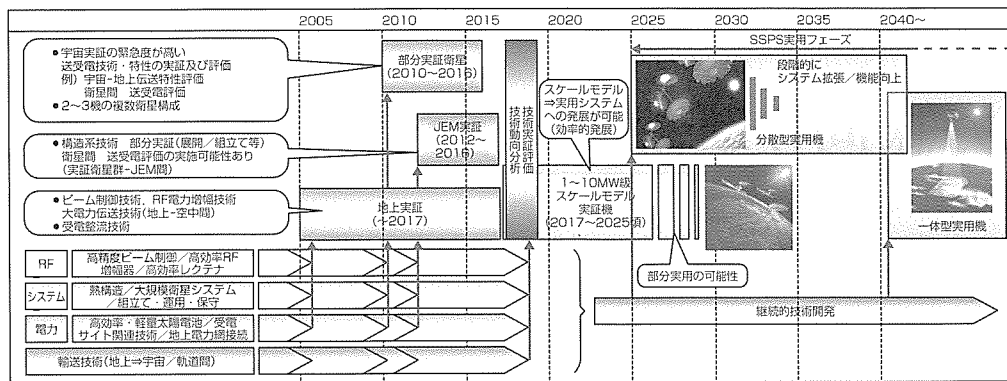


図7. Solar Bird 実現に向けたロードマップ

実現できる。JAXA 指導の下、技術試験衛星 VII 型ランデブ・ドッキング実験系の開発を行った。開発した航法誘導制御系では、衛星間通信に基づくオンボード自動飛行管理/制御機能により、相対GPS(Global Positioning System)、ランデブレーダ、及び近傍センサを活用した2衛星のフォーメーション制御(ランデブ)飛行に成功している⁽⁴⁾。

また、軌道投入後の隊形形成・維持に関しては、軌道移行の最適化レベルにより必要推薬量に大きな差が生じる。最適な隊形の維持と、そのための航法系に関しても、別途、社内開発している(この特集の「フォーメーション技術」参照)。

5. 実現へのロードマップ

分散型SSPSのロードマップを図7に示す。SSPS開発では、開発すべき技術が多岐にわたるとともに実用開始まで長期にわたるため、開発の効率化と早期回収の観点での開発投資が重要である。このため、SSPSでしか開発できない技術を優先的に開発し、民生技術は、その開発状況を考慮して適用時期を設定する。また、成果を早期に商用化するための派生技術を視野に入れた開発も重要である。

2025年ごろから運用を始めるには、以下の段階を踏んだ開発を早期に立ち上げる必要がある。

フェーズ1では、方式・技術の原理検証に続き、地上実証、JEM(Japanese Experiment Module)と小型衛星による部分実証を行う。地上では困難な検証に限った実証をJEM、小型衛星を用いて行う。大電力伝送の地上実証により、情報通信、災害対策、セキュリティなどで新ビジネスの創出を期待できる。併せて、周波数、静止軌道での配置などの国際調整事項への対応が必要になり、国主導での開発が望ましい。

フェーズ2では、1~10MW級実証機を開発し宇宙からの電力伝送を行うことによりパイロットプラント建設向けの技術獲得・新ビジネス創出のための技術PRを行う。

フェーズ3では、長期運用ノウハウを蓄積し、ビジネストライアルを行う。そして、順次、改良型の実証機を軌道

上に投入し、システム規模の拡大を図る。前述のように、分散型SSPSでは、段階的な運用と規模拡大が可能であり、実用システムのリスクを抑えた開発を行える。

6. むすび

中小規模の発電衛星群により打ち上げから運用に至る技術障壁を相対的に低くし、システムの成立性を向上できる分散型SSPSについて述べた。主な結論を以下に記す。

- (1) 一体型SSPSと比較検討の結果、分散型SSPSは、軌道上組立ての容易さ、段階的運用可能性、技術リスクの低さなどに優れている。しかし、ビーム効率は若干劣る。
- (2) 分散型SSPSでは、発電衛星間距離を最適化し、グレーティングロブ電力まで利用することにより、効率劣化を最小化でき、ビーム効率95%の条件では一体型SSPSに比べてレクテナ径1.3倍程度にすると同等の電力を受けられる。
- (3) 新たに開発したDDS駆動PLL位相制御発振器を送電アンテナのビーム制御に適用することにより高精度位相制御が可能となり、かつ、RF損失が削減できる。
- (4) 発電衛星群を同心円上に配置し、同心円の中心をレコード盤軌道の中心とすることにより、隊形を維持するための推薬を最小にできる。

参考文献

- (1) DOE and NASA report : Satellite Power System Concept Development and Evaluation Program, DOE/ER-0023 (1978)
- (2) Ikematsu, H., et al. : SPS Concept with High Efficiency Phase Control Technology, APMC2002, No.WS9-2, 97~104 (2002)
- (3) Mizuno, T., et al. : RF Transmission Power Distribution by Discrete Space Segments of SSPS, URSI2002, No.1667 (2002)
- (4) 小田光茂 : 技術試験衛星 VII (ETS-VII) 特集, 計測と制御, 38, No.11 (1999) (別冊)

東京電力(株)向け新衛星通信システム

石井克幸* 菅林 剛**
白井 忠* 高田淳一**
石川佳史*

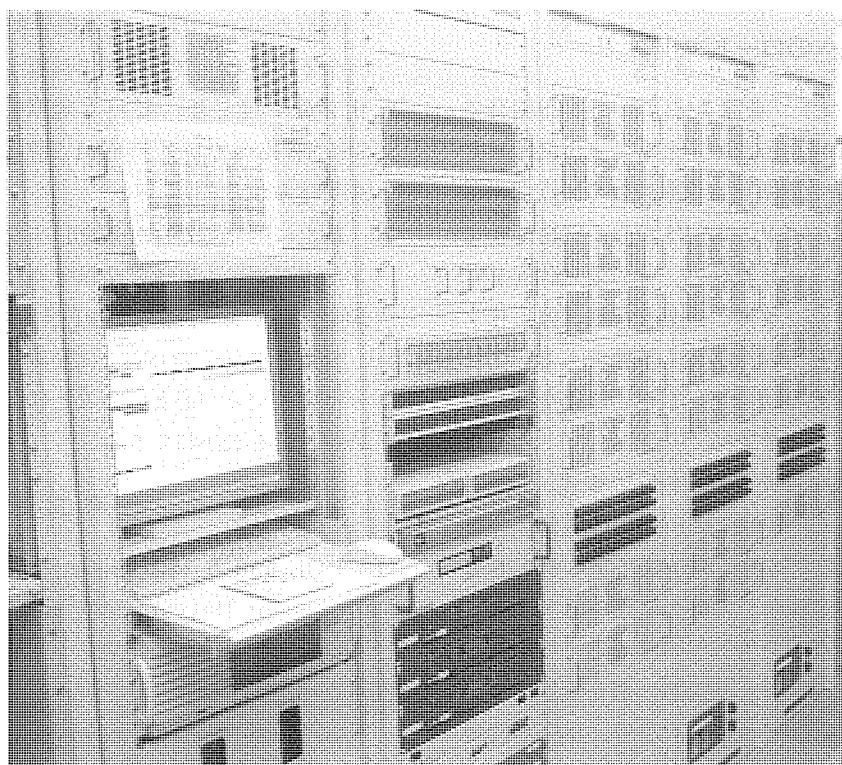
New Satellite Communication System for TEPCO

Katsuyuki Ishii, Tadashi Shirai, Yoshifumi Ishikawa, Tsuyoshi Sugabayashi, Jyunichi Takada

要 旨

我が国の民間通信衛星が運用開始した1989年当時、電話・データは低速デジタル変調方式、映像はアナログ変調方式で伝送されたので、衛星回線制御は回線ごとに専用装置を用いて行われた。その後、映像伝送用としてMPEG (Moving Picture Experts Group) 2方式が実用化され、併せて、デジタル変復調装置の高速化により衛星回線利用はすべてデジタル化された。衛星通信を経済的に利用するためには効率的な回線制御が重要であり、電話回線を通話時のみ割り当てるDAMA (Demand Assigned Multiple Access：要求時割当て多元接続) 装置が多くのシステムで

導入されたが、データ・映像回線の制御は別装置が利用された。近年になって電子メールやデジタル写真伝送が普及するに従い、衛星通信システムに対しても、これらのアプリケーションを利用するための開発要求が増加している。このたび、三菱電機は、東京電力(株) (TEPCO) 向けに、電話・データ・映像回線を統合した衛星回線制御が可能な第二代DAMA装置を開発し、新衛星通信システムへの移行に導入された。今後、このDAMA技術を活用した新たな衛星通信システム利用分野の開拓に向けて取り組んでいく。



東京電力(株)向け新衛星通信システムの構成

写真は、センター局に設置したDAMA親装置(手前のラック)、映像コーデックを実装したTVラック及び電話・データモデムを実装したIDU (屋内ユニット)ラックを示す。DAMA親装置のディスプレイ装置を見ながら、手前のオーダワイヤ端末により移動地球局のオペレータと連絡をとりながら映像伝送などの運用もこの場所においてできる。

1. ま え が き

東京電力㈱は、衛星回線の耐災害性、広域性、同報性の特長を生かし、衛星通信システムを1989年に導入した。当社は、非常災害時等に発生する局局部的な輻輳(ふくそう)を回避するため、各地球局間の回線割当てがセンター局で一斉に行えるSRCS(遠隔制御システム)などを納入し効率的な衛星回線運用実現に協力してきたが、このたび、システム更新の一環として、マルチメディア対応DAMA装置とDAMA方式に対応した変復調装置など通信機器及びサブ局、固定地球局、移動地球局(車載局)、可搬地球局などを納入し新衛星通信システムを完成させた。

新衛星通信システムでは、回線制御方式の変更に合わせて、電話・映像信号符号化方式や回線接続ルールの見直しを行い、利用する衛星中継器帯域幅の低減化や、移動局アンテナの自動展開機能追加など経済性・運用性向上も行った。

以下、当社が製作・納入した東京電力㈱向けの新衛星通信システム(以下、このシステムという。)について述べる。

2. システムの概要

システム更新の課題を“衛星中継器利用帯域幅の低減と運用の効率化”として、衛星回線制御方式にDAMA方式採用と、音声、映像信号符号化方式の見直しを行うとともに、切換工事の際に稼働中のシステムの運用を極力停止させないよう工程管理に注力した。既存システムでは各地球局間に多重伝送した衛星回線を設定しセンター局に設置したSRCS制御装置により伝送諸元の変更を行っていたが、このシステムでは、電話、データ回線、映像回線が1回線単位で通信要求に応じて制御するため回線効率が高くなった。さらに、従来専用の装置で行っていた映像配信システムにおける限定受信制御も、マルチメディアDAMA装置により一元管理することにした。

DAMA親装置はセンター局とサブセンター局に設置する局冗長構成として信頼性向上を図った。

各地球局間の通信は、常時接続が必要な監視回線を除き、すべてDAMA親装置により制御されたQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)-SCPC(Single Channel Per Carrier)方式とし、センター局(又はサブセンター局)と各地球局間で回線制御を行うための共通信号線(CSC)はTDM(Time Division Multiplex)・TDMA(Time Division Multiple Access)方式を採用した。

また、センター局・サブセンター局が送信する共通信号線周波数をF1、F2と専用にしてシステム制御権切換え時のトラブル解消、及び多局化への対応のほか、センター局・サブセンター局間でシステム制御権切換えが短時間で

支障なく実施できるよう局間データ回線によるシステム制御データの共有化を図った。

このシステムでは、衛星中継器(トランスポンダ)の使用帯域幅を低減するため、符号化方式の見直しを行い、電話回線はLD-CELP(Low Delay-Code Excited Linear Prediction)方式、映像回線はMPEG2方式を採用した。この結果、DAMA方式採用と合わせて、従来と同じ通信量が伝送品質を低下させることなく使用帯域幅は50%以下となった。一方、データ回線用変復調装置は16kbpsから2Mbpsまでのビットレート可変方式を採用し、データ通信に対して最適な情報速度が提供できるようにした。

3. システム構成

3.1 全体構成

このシステムは、システム制御機能を持つセンター局、サブセンター局のほかに通信を行う固定地球局、移動地球局、可搬地球局及び仮想地球局により構成している。図1はこのシステムの構成図である。

3.2 固定地球局

このシステムでは固定アンテナを使用する地球局を固定地球局と規定しており、センター局など既設の地球局はDAMA装置、電話・データモデムなどの増設を行った。新設した固定局のうち1局はサブセンター局(図2)であり、センター局のDAMA親装置と同等装置を設置して、DAMAシステムにおける局冗長構成によるこのシステムの信頼性向上を図った。

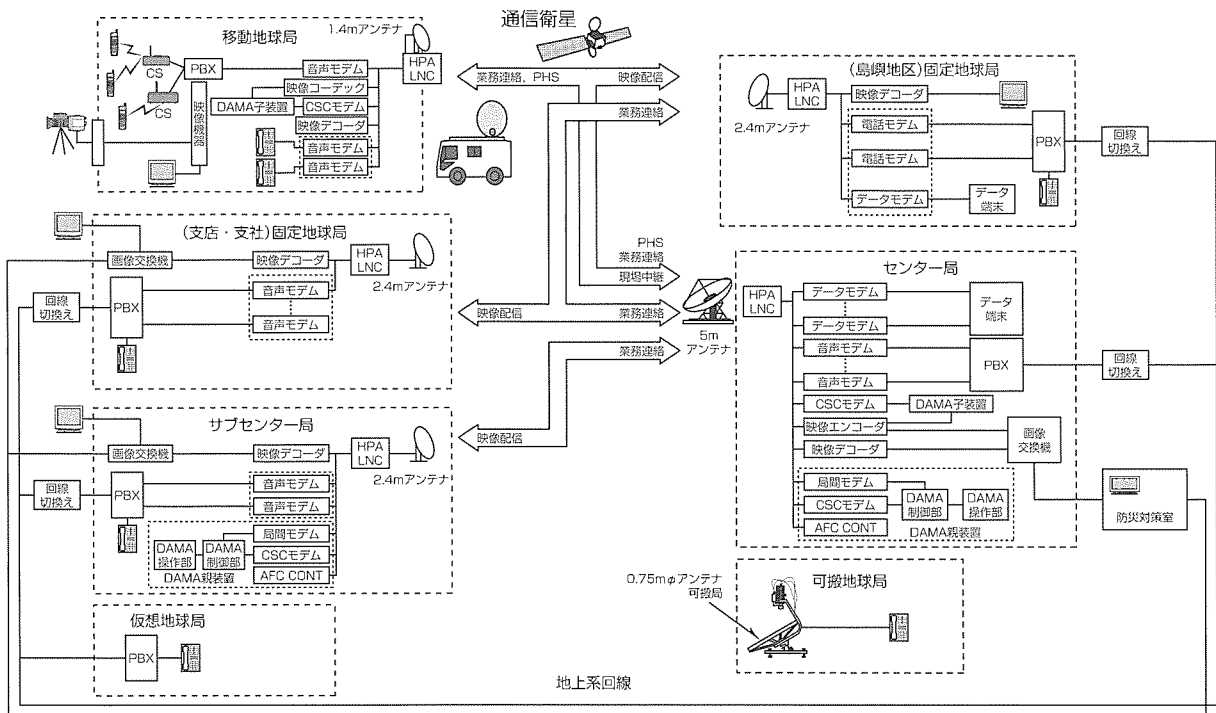
3.3 移動地球局

移動地球局の系統図を図3に示す。

- (1) アンテナは1.4mφ相当横長楕円(だえん)のオフセットグレゴリアン型を採用し、優れた広角放射特性実現と耐風性向上を図っている。
- (2) 衛星捕捉(ほそく)はGPS(Global Positioning System)を利用して位置情報を取得し、演算によって求め衛星方向にアンテナを展開するプログラム制御機能とDAMAシステムのCSC波の受信レベルを利用したピークサーチ機能を併用した自動展開機能を新たに採用した。この機能により、衛星捕捉に手間取ることなく、また、従来不可欠であった衛星捕捉後の微調整が不要となった。
- (3) 電話回線制御部(PHS交換機)を搭載し、衛星回線によるPHS(Personal Handyphone System)中継システムを構成し移動地球局に常設したPHS端末を利用して通話できるので、移動先での電話利用に便宜を図った。
- (4) DAMA子装置を開発してDAMAシステムによる映像エンコーダの送信周波数、送信ON/OFF制御を可能にした。

3.4 可搬地球局

可搬地球局の系統図を図4に示す。



CS : Cell Station, PBX : Private Branch eXchange
HPA : High Power Amplifier, AFC : Automatic Frequency Control

図 1. 新衛星通信システムの構成図

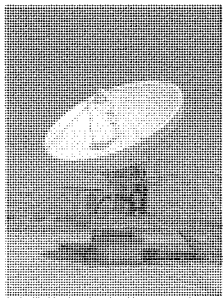


図 2. サブセンター局の外観

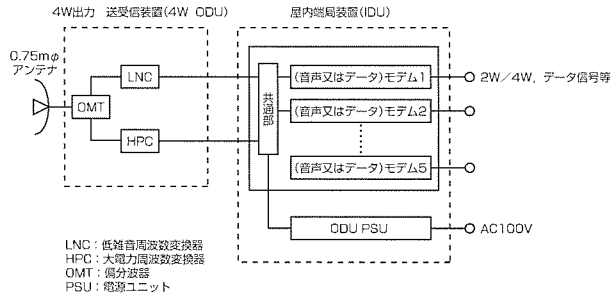


図 4. 可搬地球局の系統図

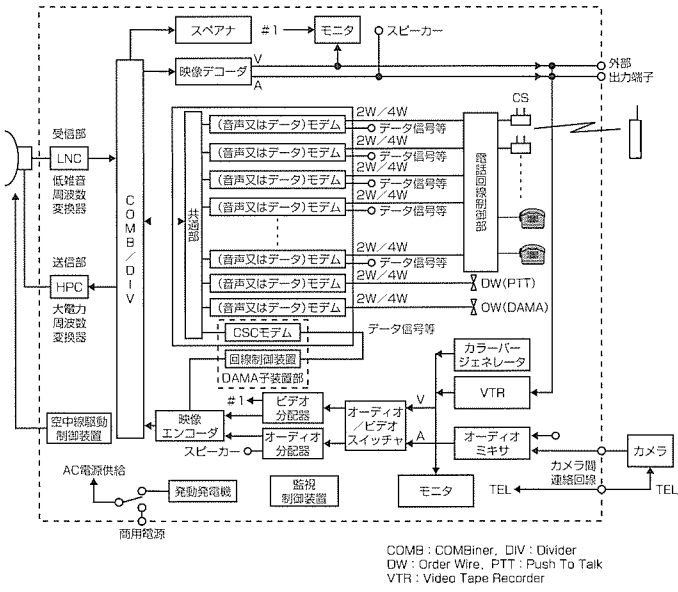


図 3. 移動地球局の系統図

COMB : COMBINER, DIV : Divider
DW : Order Wire, PTT : Push To Talk
VTR : Video Tape Recorder

- (1) 0.75mφアンテナと4W出力ODU(屋外ユニット)で構成し、VSAT(Very Small Aperture Terminal)の技術条件に適合しているので操作するために無線従事者の資格が不要である。
- (2) IDU(屋内ユニット)は電話モデムが最大5台実装して運用が可能である。
- (3) アンテナは4分割し、他の機材とともに人力による運搬を可能にした。
- (4) 衛星捕捉用に受信信号レベルを表示するアンテナポインタや、水準器、電話機など運用に必要な機材をすべて収納できるトランクとキャリングバッグを付属している。

4. 主要機能

4.1 回線監視・制御機能

このシステムでは、センター局、サブセンター局

に設置されたDAMA親装置により、音声通信、オーダーワイヤ、データ通信、映像伝送等のサービスを統合管理している。

表1に回線制御の主要諸元を示す。

(1) DAMA方式

このシステムではDAMA方式を回線制御の基本としている。DAMA方式とは、発信局から管制局に対し回線接続の要求を行い、管制局が通信回線の割当て、開放を管理する方式である。

DAMA方式は回線制御が複雑となるが、任意の地球局間で通信が可能となり、有限なトランスポンダ帯域を必要とときに必要な分だけ利用するためトランスポンダの利用効率が向上するという利点がある。

(2) 社内電話網との接続

東京電力㈱の社内電話網とシームレスに接続するため、局情報、番号情報のデータをDAMA親装置に保有しており、任意の局間でフルメッシュの接続が可能となっている。また、地球局間相互の接続可否情報や、衛星設備を持たない局との通信のための中継線接続経路を設定することが可能となっており、これにより着信局との接続制御を行っている。

(3) 映像回線の帯域管理

映像回線の帯域は音声回線に比較して大きいため、映像用の帯域を固定的に確保してしまうと、帯域の利用効率が低下する。そこで、映像回線の運用状況によりDAMA帯域を柔軟に変更できるようにしている。映像を配信する移動地球局の出動台数により、映像と車載音声回線の帯域を確保し、DAMA帯域の変更を行っている。

周波数配列のイメージを図5に示す。

(4) 通信グループ認識機能

オーダーワイヤ回線、社内電話はDAMA方式で回線接

続するが、相互の接続は禁止するため、通信グループ設定により別グループとして扱うことを可能とした。

(5) システム監視機能

管制局で各地球局単位の状態、管制局の主要装置の状態、回線接続状況、トランスポンダ帯域の使用状況をモニタし、制御端末にグラフィカルに表示する。表示例を図6に示す。

4.2 冗長局切換機能

DAMA親局装置をセンター局・サブセンター局の両局に設置し、DAMA管制局機能の冗長化を図っており、保守時又は故障時のバックアップを可能としている。

この両局間では、常時、衛星回線経由で呼情報の共有をしており、随時、管制局機能の切り替えが可能である。以下の3種類の切換機能を実現した。

(1) シーケンス切換機能

通常の切り替え時に使用する機能である。運用中の局、待機中の局いずれの局からでも操作可能の切換機能であり、制御端末のボタンを押下することにより自動的に切り替えが実施される。

(2) CSC変復調装置強制OFF機能

機器の電源OFFにより運用上切り替えを行う機能である。緊急時に、運用局の操作者が、専用スイッチを押下することで、従局操作者へ通知を行い、待機局により切り替えを行う。

表1. 回線制御の主要諸元

項目	仕様	
衛星回線伝送方式	PSK-SCPC	
回線割付け方式	DAMA方式	
	PAMA手動方式	
	固定割当て方式	
収容局数	102局	
収容回線数	300回線	
通信サービス	音声通信、オーダーワイヤ、SUT用オーダーワイヤ、映像、TV打合せ、データ通信等	
情報速度	音声、オーダーワイヤ	16kbps
	映像	2.4Mbps
	データ通信	16kbps～2 Mbps
その他機能	視聴可否制御、管制局切換え(シーケンス切換え、アタックキャリア)、優先割当て制御、システム監視、周波数ドリフト補正など	

SUT : Satellite Uplink Test

PAMA : Pre-Assigned Multiple Access

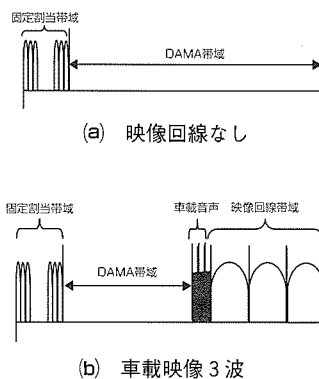


図5. 周波数配列のイメージ

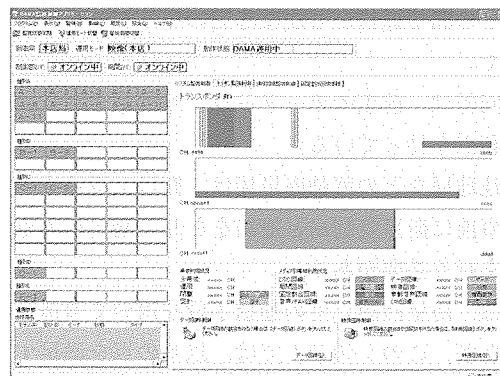


図6. 制御端末の表示例

(3) 運用局切換機能

このシステムに待機局からの切換操作が不能であり、かつ運用局に入局できない緊急時に、待機局の制御端末のボタンを押下することでDAMA運用局を切り換える機能を装備した。

待機局の制御端末のボタンを押下することで、運用局のCSC周波数に低レベルの干渉を与え、かつ、待機局用のCSC周波数にCSC波を送出することで、待機局を運用局に切り換えることができる。

この機能を運用するため、CSCによる制御を受けている各局には、CSC受信回線品質による運用局選択機能を装備した。

4.4 通信機能

(1) 音声通信機能

このシステムでは、音声符号化方式にLD-CELPを採用した。この方式の採用により、衛星帯域の有効利用を図り、1音声通話に使用する衛星帯域の最小単位を50kHzとすることが可能となった。これは、従来使用していた方式(Pulse Code Modulation : PCM)と比較し、約1/4の帯域での通信が可能となった。

また、変復調装置内にFAX信号変換機能を実装することで、音声インバウンド伝送によるFAX通信の最大速度を2.4kbpsから9.6kbpsに高速化した。

(2) オーダーワイヤ回線機能

このシステムでは、センター局、サブセンター局、移動地球局間で通話が可能なメッシュ通信タイプのオーダーワイヤ回線を設置した。

通常オーダーワイヤ回線は、非常災害時等に通信手段を確実に確保するホットライン的な利用を行うが、電話端末、衛星帯域を占有してしまう問題点があった。

このシステムでは、リソースの有効活用に主眼を置き、専用番号を付与しダイヤルすることにより確実に回線接続できる構成を採用した。

(3) 専用のオーダーワイヤ回線機能

前項のオーダーワイヤ電話同様、センター局、サブセンター局、移動地球局に加え、衛星管制局に設置された衛星管制局との間で通信が可能な専用のオーダーワイヤ回線を設置した。

この回線は、前項のオーダーワイヤ電話の利点に加え、以下の利点を持っている。

移動地球局などの移動衛星局は、衛星に電波を出力する際に、事前に衛星管制局と連絡をとり、衛星への電波送信テストを行う必要がある。

従来は、衛星回線以外の通信手段を用いて事前連絡を行っていたが、このシステムでは、以下の点を満足すること

で、衛星回線でクローズした、移動地球局の運用が可能となった。

- 移動地球局の衛星捕捉機能が規定を十分満足していること
- 機器が正常でない場合には電波を送出することができないこと
- 制御局からのCSCを介した制御信号に対して、正常に応答していること
- 通信に使用する衛星帯域が裏偏波に影響のない帯域であること

(4) 映像伝送機能

従来の使用していた衛星帯域の約半分での画像伝送が可能となった。また、設定ファイルの選択により容易に視聴可否の制御を実施することも可能であり、利便性の向上を図った。

(5) データ通信、社内LAN接続機能

島嶼地区にある事業所との社内LAN(Local Area Network)接続を、従来の48kbpsの通信速度から、64k, 128k, 256kbpsの通信に対応可能な設備を設置した。

また、制御端末からの操作により、通信速度16kbpsから2,048kbpsの間で任意のデータ変復調装置間における通信を行うことを可能とした。

5. む す び

以上に述べた東京電力(株)向け新衛星通信システムへの移行計画は、運用現場の意見を集約し、技術の新規性、回線運用の継続性、経済性など多数の項目について東京電力(株)と検討を重ねて仕様化した。また、更新範囲に島嶼地区や関東一円に配備された全地球局設備が含まれるので、作業効率を高めるために移行作業及び総合試験の実施予定日設定に注力した。

短期間で移行を完了させること、万一移行の途中に災害が発生した場合は移行前のシステムに戻して通信機能を確保することなどを条件に作業計画を何回も練り上げ実行に移すことができた。

このシステムでは、衛星通信における技術動向を反映させることにより既設システムの約半分の衛星中継器帯域で既設システムと同等以上の回線運用が可能となった。今後、このシステムの利便性を一層高めるため、最近利用頻度が高まってきたLAN間通信を衛星回線に接続するための技術などの開発を行い、様々な情報端末が取り扱うデータの集配信に対応可能な次世代システムへの展開について検討する。

最後に、このシステム構築に際して多数の指導・助言をいただいた関係各位に感謝する次第である。

衛星開発における品質信頼性向上活動

稲川美之*

Reliability & Quality Improvement Activity for the Satellite Development

Yoshiyuki Inagawa

要旨

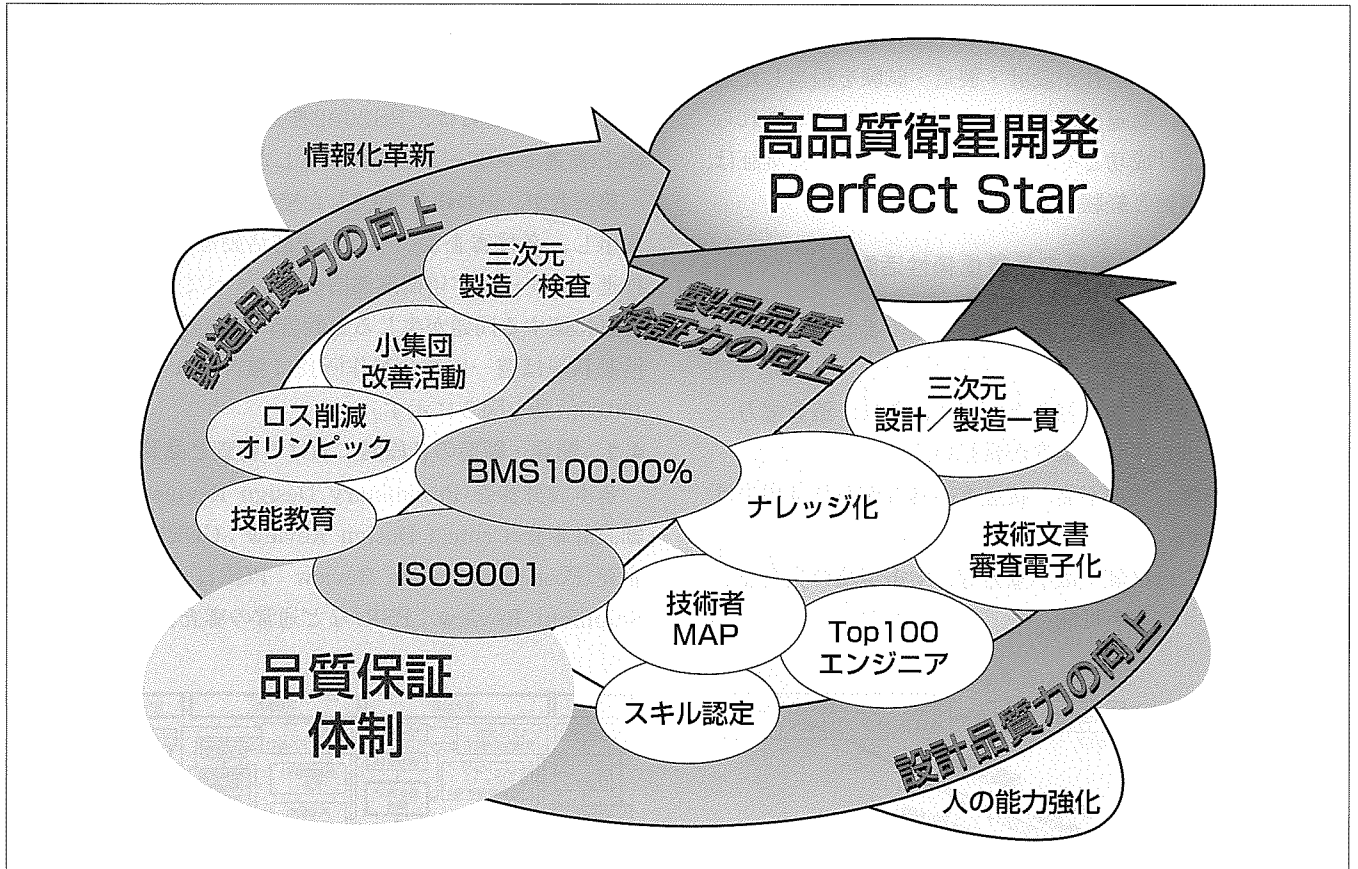
三菱電機は、2002年9月からの14か月間で、衛星9機を引き渡し、7機の打ち上げ及び軌道配置に成功するという大きな業績を上げた。

この連続打ち上げ成功の裏には、すべての人工衛星を100.00%成功させるため、従来の品質信頼性活動に加えて、特別組織であるPS2002推進センターを1997年7月に発足し、当社の宇宙開発・製作の核である鎌倉製作所の全従業員が一丸となって製品の高い品質と信頼性を確保するための着実に現実的な活動がある。

当社は、高品質という企業イメージを確立するために、この活動を衛星の開発・製造のみならず、衛星運用を含む総合的なシステムの品質向上にも広げている。それゆえ

2003年7月からは、PS2002推進センターを発展させ、BMS (Brand of Mission Success) 推進センターとして再設立した。

第三者が、いわゆる“独立した確認と検証”といった活動に従事し、各種審査及び不具合予防活動を展開する。BMS推進センターは宇宙関連部門が行うすべての活動を監視し、品質に関する問題が生じると勧告、追跡調査に取りかかる。こうした活動は週一回鎌倉製作所長に報告された上で実行される。ここでは、同センターの活動を始めた当社の品質確保活動について述べるとともに、設計品質力、製造品質力向上の要(かなめ)となる充実した宇宙事業インフラによる活動についても述べる。



衛星の品質信頼性向上施策

図は、従来の品質保証体制の上にBMS 100.00活動により第三者検証機能を強化し製品品質検証力を向上するとともに、品質を作り込む設計品質力及び製造品質力の向上施策を展開して、高品質衛星開発を達成するための品質信頼性向上施策を示す。

*鎌倉製作所

1. ま え が き

当社は、2002年9月からの14か月間で、衛星9機を引き渡し、7機の打ち上げ及び軌道配置に成功するという大きな業績を上げた(図1)。本稿では、それを支えた品質信頼性活動について述べる。

2. 衛星7機打ち上げ連続成功

宇宙航空研究開発機構(JAXA)のデータ中継技術衛星(DRTS)は、2002年9月10日にH-IIAロケットにより打ち上げられた。数回の軌道制御を経て静止軌道に到達し、世界で初めて低軌道衛星とのKaバンドによる衛星間通信を開始した。3.6m口径のアンテナにより低軌道衛星を追跡し、低軌道衛星が撮った画像データを地上局に中継する。

DRTSとともに打ち上げられた無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)の次世代型無人宇宙実験システム(USERS)衛星は、微小重力下での大型超電導材料製造などの宇宙実験を行った。8か月間の軌道上試験の後、再突入機“REV”は本体から切り離され、指定地点に国内で初めて帰還・回収に成功した。

OPTUS社のOPTUS-C1衛星は、2003年6月11日にフランス領ギアナから打ち上げられた。このオーストラリアの衛星では、当社は主契約者として、バスを製造した米国メーカーと組んだ。当社が設計・製造・試験を担当した通信ペイロードは、軌道上でその性能が実証された。これら7連続の打ち上げ成功とそれに続く軌道上での性能実証は、当社に多大な自信と経験をもたらした。

3. 人工衛星の品質信頼性活動

人工衛星の品質・信頼性面からの特徴をまとめると次のとおりである。

- (1) システム制約条件：打ち上げ年次、質量、消費電力、アライメント等の制約条件が厳しい。
- (2) 故障の影響：修理不能、軌道上不具合があれば損失は計り知れない。
- (3) 地上試験での検証：微小重力等、宇宙環境の完全なシミュレーションは不可能。

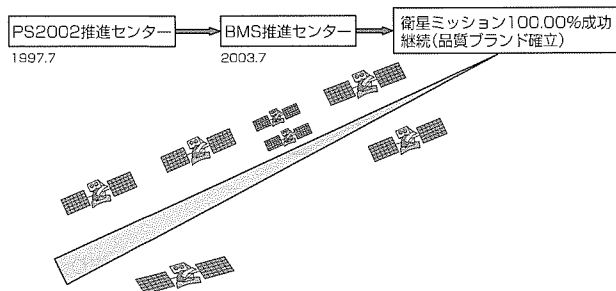


図1. 人工衛星7機連続打ち上げ成功

- (4) 規模：バス機器の部品点数、数十万点程度(大規模)。
- (5) 生産形態(開発期間)：生産数は限定→量産効果による品質安定化が難しい(数年に1機)。
- (6) 環境条件が過酷：熱真空、放射線等

前記人工衛星の特徴からその品質信頼性確保に当たっては体系的な信頼性確保の取り組みとシステムを構成する個々の部品の品質確保が必要であり、JAXA等の指導による品質・信頼性プログラム活動が展開されてきた。衛星開発段階を通して展開される各種信頼性評価業務の一例を図2に示す。

4. 更なる品質信頼性向上活動

1996年以降、国内の人工衛星の打ち上げが中断していたが、2002年以降に打ち上げ再開が決まり、6年間のブランクを乗り越えてすべての人工衛星を100.00%成功させるため、従来の品質信頼性活動に加えて、特別組織であるPS2002推進センターを1997年7月に発足し、当社の宇宙開発・製作の核である鎌倉製作所の全従業員が一丸となって製品の高い品質と信頼性を確保するための着実に現実的な活動に取り組んだ。この活動の結果が2002年度以降に打ち上げた7機の人工衛星すべてを100.00%成功に導いた。

当社は、高品質という企業イメージを確立するために、この活動を衛星の開発・製造のみならず衛星運用を含む総合的なシステムの品質向上にも広げている。それゆえ、2003年7月からは、PS2002推進センターを発展させ、BMS推進センターとして再設立した(図1)。

第三者が、いわゆる“独立した確認と検証”といった活動に従事し、各種審査及び不具合予防活動を展開する。BMS推進センターは宇宙関連部門が行うすべての活動を監視し、品質に関する問題が生じると勧告、追跡調査に取りかかる。活動状況は週一回鎌倉製作所長に報告される。主なBMS 100.00活動を図3に示す。

4.1 開発・製造の各段階における審査と品質確認

基本設計審査(Preliminary Design Review:PDR)、詳細設計審査(Critical Design Review:CDR)、認定試験後審査(Post Qualification Review:PQR)、出荷前審査(Pre Shipment Review:PSR)など通常の審査会の審査員に加

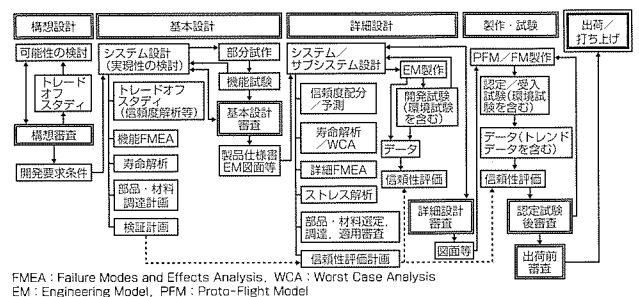


図2. 衛星開発での信頼性評価業務の一例

えて、審査責任を持つ有識者が参加し、品質確認を実施する。

また、特別審査(現品確認、ミッションサクセスレビューなど)を実施し、End to End試験の実施状況など、確実な審査(Review)と検証(Validation & Verification)を実施する。衛星開発での通常の信頼性・品質保証部門の主な活動と有識者による特別点検の関係を図4に示す。

4.2 単一故障点(Single Failure Point : SFP)の審査

故障すると衛星の生死にかかわるSFPについては、SFPごとにチェックシート(クリティカル品目リスト:CIL)が用意される。チェックシートでは、設計マージン、実証試験の進行状況、受入検査から最終機能試験までのトレンド解析と品質保証部によるダブルチェックにより製品検証を徹底する。

4.3 不具合予防活動

鎌倉製作所全体の品質意識向上を図るため展開している主な活動は次のとおりである。

(1) 5S3定、見える化活動

生産性向上と高品質製造の基本である整理、整頓(せいとん)、清掃、清潔、躰(しつけ)の5Sの徹底と“定位：定められた場所に品物がある”“定品：品物の表示が明確である”“定量：必要な数量が整っている”の3定を進めて正常/異常をだれもが見えるようにする活動を展開している。

この見える化活動により不具合に至る前に異常を発見し、迅速な処置により不具合予防を図っている。

(2) 変更管理の反映確認

衛星の設計は、開発機種のため、しばしば設計変更が発生

し、設計変更に伴う不具合の芽が作り込まれる。設計段階においては“認定状況確認リスト”により既存設計との違いを部品材料・工程・認定・製品レベルの各要素ごとに評価し、変更に伴う検証方法に漏れないか確認する。また、製造/試験開始に当たっては、人・手順・装置・材料の4M管理の変更点についても確認し、不具合予防を図っている。

(3) 品質ヒヤリと品質予知訓練(QYT)

不具合には至らなかったが異常を検知し事前処置したケースを品質“ヒヤリ”事象として収集するシステムを構築している。それらの品質ヒヤリ事例に基づき、危険予知訓練(KIT)の品質版である品質予知訓練(QYT)シートを作成し、設計・製造・試験にかかわるすべての部門でQYTを実行している。また、QYT結果分析により品質チェックポイントが明確にされ、その結果は、イントラネット上で全従業員に知らされる。QYT実施事例を図5に示す。

(4) 品質昼礼と現場診断

すべての部門において、各従業員の品質モラル向上のため、週1回の品質昼礼を実施し、QYT、不具合事例等の周知徹底を図っている。また、現場管理者を交えて毎週QC(Quality Control)巡視を実施するとともに定期的に鎌倉製作所長による試験施設の視察や現場パトロールを実施する。

(5) 重大不具合の再発防止対策/横通し

重大な不具合や人的ミスは、なぜなぜ分析や背景要因分析を実施し、物理現象のみならず心理的要因も探求され、マネジメント・コントロールのための対策が採用される。

(6) 試験時のダブルチェック

試験装置セットアップ、最終トルク締めなど、品証部門、検査員と試験員によるダブルチェックを徹底している。さらに、射場作業等の最終組立てには、前記ダブルチェックに加えて設計者自身も設計どおりに組み立てられたか立会確認を実施する。

5. 設計・製造品質力の向上

前述したBMS100.00活動により第三者検証機能が強化さ

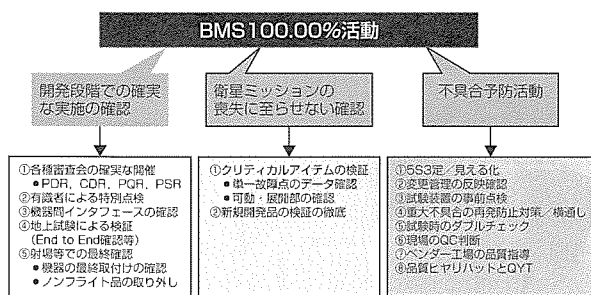


図3. BMS100.00の主な活動

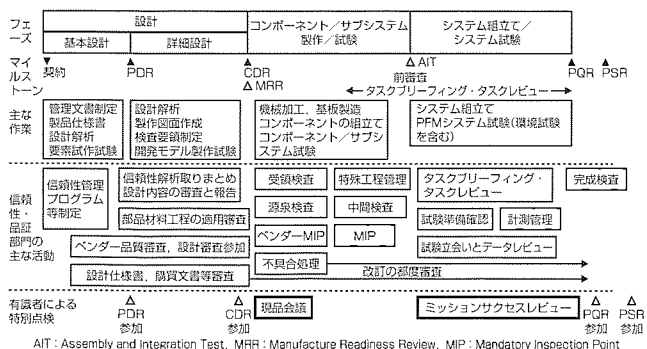


図4. 衛星開発を通じた有識者による特別点検

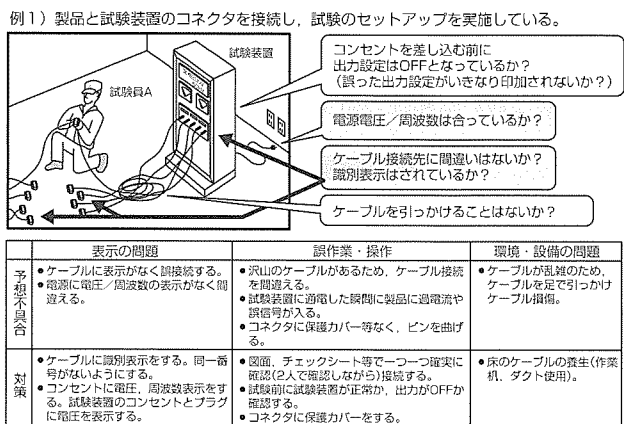


図5. QYT実施事例

れ、製品品質検証力が向上した。高品質衛星を開発するためには、品質検証力の向上の前に品質を作り込む設計品質及び製造品質力の向上が必要である(図6)。

鎌倉製作所では、これらの品質力向上活動を支援するためのインフラを構築するKamakura Digital Innovation (KDI)活動を並行して設けている。

KDI活動は、人工衛星の企画から開発/設計、製造、試験、運用に至るライフサイクルにわたるエンジニアリングデータベースの整備と同データベースを活用した三次元設計などの電気系/機械系設計と製造・試験の一貫管理機能、ソフトウェア開発の統合管理機能を整備して、人工衛星のライフサイクルを通してIT化を図ることで、設計・製造品質力向上を図るものである(図7)。

BMS100.00とKDIの活動が複合することによって品質管理活動は強化され、冒頭の衛星7機打ち上げ連続成功へと結び付いた。

6. 当社の組立て・試験設備

当社は、前述のKDI活動によるITインフラに加えて衛星組立て、インテグレーションと試験までを一貫して実施可能な全設備を保有している。総床面積8,500m²の建物には、熱真空チャンバ、振動試験装置、音響試験チャンバ、コンパクトアンテナテストレンジ等の必要な設備がすべてそろっている(図8)。

11.5m口径の熱真空チャンバは、宇宙環境での衛星の機能を検査するために、真空かつ厳しい温度環境を再現可能であり、30トンの加振能力を持つ振動試験装置及び音響試験チャンバは、ロケットによる打ち上げ時の厳しい機械環境を再現可能である。また、コンパクトアンテナテストレンジは、通信システムの性能を検証するための遠方フィールドレンジ環境を提供する。こうした設備は一つの建物のクリーンエリア内にあるため、外部の試験設備を使用するために衛星を持ち出す必要がない。

衛星システムの組立て、試験の間、当社の設備ならば衛星をクリーンで安全な状況下に置いておくことができ、不要な輸送リスクを省き十分な試験時間が得られる。

こうした一貫生産体制とBMS100.00活動により、当社は、高い品質と高い信頼性の衛星開発を保証する。

7. 標準衛星バスDS2000

衛星技術は成熟しているかのようだが、世界の商用衛星市場では、いまだ設計や製造における致命的不具合によって失敗する衛星が一定数ある。低価格と短納期に対する大きなプレッシャーが、不十分な試験と品質確保活動のレベル低下を導いている。BMS100.00は、製品の高い品質と信頼性を確保する着実で現実的な活動である。当社の近年の成功実績は、ひとえにBMS100.00の効果と、衛星の組立

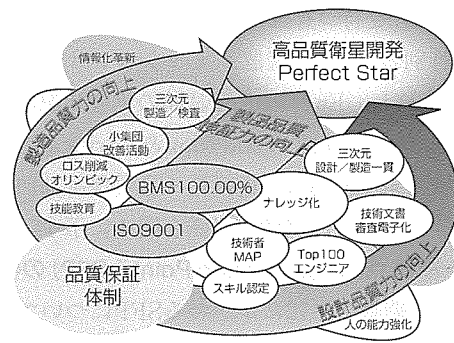


図6. 衛星の品質力向上施策

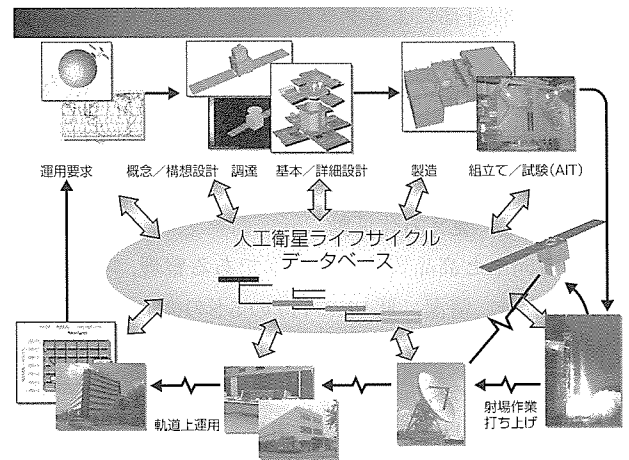


図7. 人工衛星のライフサイクルとKDI活動

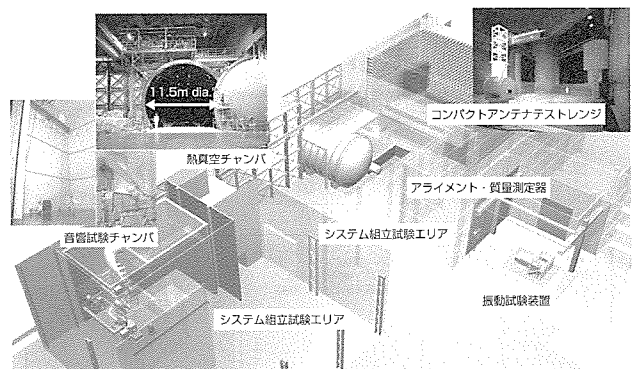


図8. 三菱電機衛星工場の鳥瞰(ちょうかん)図

て・試験の全工程を行うことができる設備の強みによるものだと言える。当社は現在、こうした成功と確実な技術を土台に、標準衛星バスDS2000を製造し、衛星開発を推進中である。DS2000バスは打ち上げ時質量5,000kg、高発生電力で最大15kWまでの多様なペイロードに対応できる衛星である。

8. むすび

BMS100.00活動を始めとする品質確保プログラムは、これからも当社製品の品質と信頼性を支え、保証していく。



特許と新案 * * *

三菱電機は特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

歪補償回路 特許第3528414号(特開平9-162656)

発明者 小倉 恵, 清野清春, 小野智彦

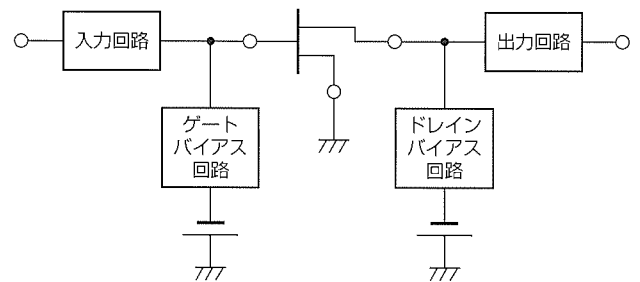
この発明は、高周波用高出力増幅器等の出力信号中に発生する非線形歪(ひずみ)を補償することを目的とした歪補償回路(リニアライザ)に関するものである。

従来は、分配器や結合器、減衰器を複雑に組み合わせて歪補償回路を構成していたので、回路規模が大きくなり、電力損失が大きいという問題があった。また、回路特性を広帯域化できないという特性上の問題もあった。

この発明は、ゲート/ソース/ドレイン端子を持つFET等の半導体素子に入出力回路を備えて歪補償回路を構成し、入力回路にはゲート端子を、出力回路にはドレイン端子又はソース端子のいずれか一方を接続し、出力回路に接続されないソース端子又はドレイン端子を接地し、半導体素子の接地されない端子に半導体素子のニー電圧以下の電圧を印加することを特徴としている。

この歪補償回路によれば、回路構成が簡素化されて回路規模を従来よりも縮小でき、消費電力が低減できるとともに、回路特性を10GHzまで広帯域化できる。

この発明により、人工衛星に搭載する高周波回路の軽量化・低コスト化を実現している。また、他の通信機器分野においても実用性を持った発明である。



ケーブル巻取り装置 特許第3022363号(特開平9-235073)

発明者 川口 昇

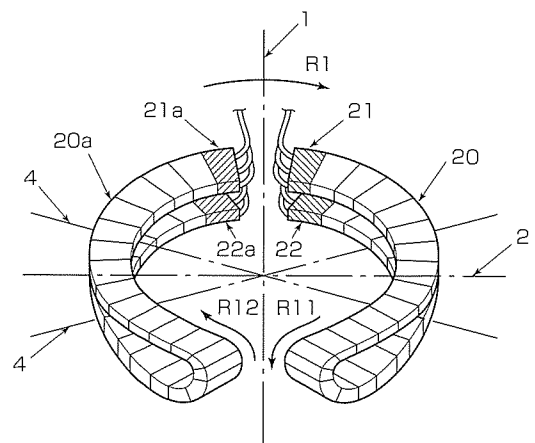
この発明は、多数のケーブル群を巻き取る装置で、主に一つの旋回軸回りに限られた空間内で多数のケーブル群を巻き取る装置に関するものである。

従来のケーブル巻取り装置では、収納枠をチェーン機構によって連結し自立させて収納枠及びケーブル群の自重を支えていたために、ケーブル質量が重くなったり、姿勢が変化したりすると、チェーン機構の変形が大きくなり負荷が増大したりスムーズな巻き取りができなくなっていた。

この発明では、一端が回転部、一端が固定部に接続された収納枠群を持つものであって、上記収納枠群は、回転部の回転に伴い、回転軸を中心とする円周方向に移動する第一の移動と、円周方向及び回転軸方向に移動する第二の移動を行い、上記連結枠は、上記収納枠が第一の移動を行う際に、収納枠の上下面のうち少なくとも一つの面が回転軸に垂直に交わる面に対して平行に移動するように上記収納枠への取付位置を調整したものである。

また、この巻取り装置を2体持ち、2体の回転軸は共有され、上記回転軸を介して互いに対向して配置されている

ものである。これにより、限られたスペースで収納枠を大きくすることができ、収納枠内に多くのケーブルを収納させることができる。また、収納枠群の質量を支持するガイド部を備えるため、収納枠又はケーブルの質量が増加したり姿勢が変化した場合でもケーブルの巻き取りをスムーズに行うことができる。





特許と新案***

三菱電機は特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

宇宙太陽光発電方法、そのシステム、発電衛星、制御衛星及び電力基地 特許第3613142号(特開2001-309581)

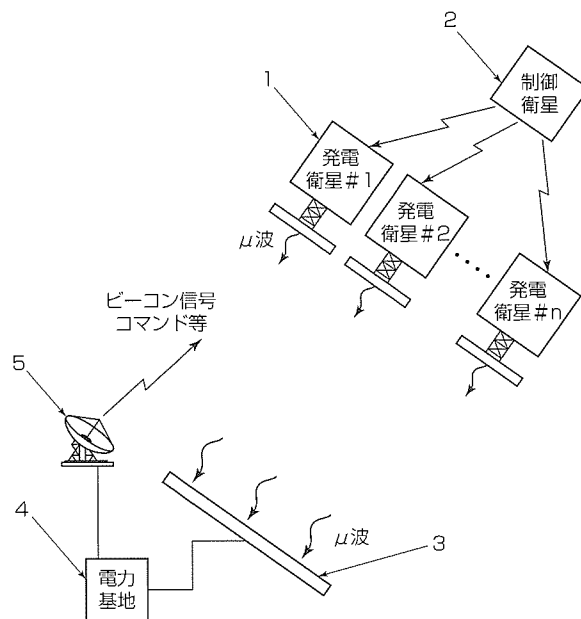
発明者 三神 泉, 佐藤裕之, 石川 幹

この発明は、宇宙空間において太陽光を受けて発電し、マイクロ波で宇宙空間を伝送して電力基地において集積し利用する宇宙太陽光発電システムに関するものである。

星を逐次増数することによって電力供給量を逐次高めていくことも可能となる。

従来の宇宙太陽光発電システムの一例として、反射鏡やレンズなどを組み合わせて太陽光を集光し、集光された光を構造的に核となるマイクロ波生成設備に照射し、マイクロ波変換して空間へ放出するシステムが案出されているが、原理的にマイクロ波生成設備や送信アンテナに電力が集中することになり、電力供給ラインでの放電破壊による電力伝送限界等のため、宇宙太陽光発電システムの発電能力に限界が生じるという問題があった。

この発明では、宇宙空間において複数の発電衛星を配置し、各発電衛星において太陽光から変換された電気エネルギーをマイクロ波に変換し、各発電衛星から送信する各々のマイクロ波の位相のずれを調整して電力基地に送信する。このような構成によって、宇宙からの送信点が1点に集中することなく各発電衛星に分散的に配置されるので、総合的に大電力のマイクロ波伝送が可能となる。また、発電衛



〈本号記載の商標について〉

本号に記載されている会社名、製品名はそれぞれの会社の商標又は登録商標である。

〈次号予定〉三菱電機技報 Vol.79 No.9 特集「設備ネットワークと診断技術／薄型DLP™プロジェクタ」

三菱電機技報編集委員	三菱電機技報 79巻8号	2005年8月22日 印刷
委員長 三嶋吉一	(無断転載・複製を禁ず)	2005年8月25日 発行
委員 小林智里 増田正幸 山木比呂志	編集人 三嶋吉一	
佐野康之 長谷川裕 堤清英	発行人 園田克己	
浜敬三 村松洋 松本修	発行所 三菱電機エンジニアリング株式会社 e-ソリューション&サービス事業部	
瀬尾和男 藤原正人 光永一正	〒102-0073 東京都千代田区九段北一丁目13番5号	
黒畑幸雄 部谷文伸	日本地所第一ビル 電話 (03)3288局1847	
事務局 園田克己	印刷所 株式会社 三菱電機ドキュメンテクス	
本号取りまとめ委員 水島浩	発売元 株式会社 オーム社	
青山朋	〒101-0054 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地	
	電話 (03)3233局0641	
	定価 1部945円(本体900円)送料別	
URL http://www.MitsubishiElectric.co.jp/giho/	三菱電機技報に関するお問い合わせ先 cep.m-giho@ml.hq.melco.co.jp	
英文季刊誌「MITSUBISHI ELECTRIC ADVANCE」がご覧いただけます	URL http://global.mitsubishielectric.com/company/r_and_d/advance/advance.html	