



家庭から宇宙まで、エコチェンジ  
eco Changes

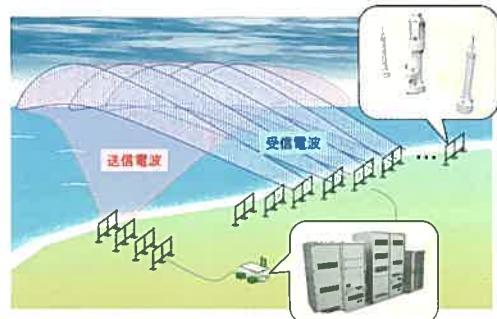
# 三菱電機技報

2

2017

Vol.91 No.2

## 安全・安心・防災への貢献



## 目 次

### 特集「安全・安心・防災への貢献」

安全・安心・防災への貢献	卷頭言	1
小山 浩		
安全・安心・防災に貢献する先進技術	卷頭論文	2
宮崎守泰		
準天頂衛星システムセンチメータ級測位補強サービス		7
廣川 順・藤田征吾・宮 雅一		
準天頂衛星システム利活用の構想及び実証成果		11
廣川 順・安光亮一郎・島 嘉宏		
先進光学衛星の目的と技術		14
阿波祐二・今城正雄・安藤聰祐		
陸域観測技術衛星ALOS-2の利用状況		18
小宮山信子・麻生紀子		
通信衛星・気象衛星の最新開発状況		23
関根功治・野口龍宏・坂井英一・米地寛夫		
海外向け三菱モービルマッピングシステム“MMS-G220”		27
石原隆一・加賀谷篤大		
航空機の安全運行に寄与する航空機搭載ドップラーライダ		31
田中久理・古田 匡・美濃部 正		
ヘリコプター衛星通信システム		
“デュアルアンテナヘリサットシステム”		35
福井貴之・佐藤勇人		
海洋レーダを用いた津波到達・波高予測技術		39
小柳智之・石川博章・有岡俊彦・平尾達哉		
検査機用高速カラーCIS“KD-CXシリーズ”		43
山縣浩作・伊藤 篤・時田直幸・太田 章		
自動車レーダ用ミリ波モジュール		47
稻常茂穂・鈴木拓也・神戸心一・宇田川重雄・倉茂和紀		
超音波による道路橋の滯水検知技術		51
木村友則・細谷 朗		

Contribution for Safety, Security and Disaster Management

Contribution for Safety, Security and Disaster Management  
Hiroshi Koyama

Advanced Technologies for Safety, Security and Disaster Management  
Moriyasu Miyazaki

Quasi-Zenith Satellite System Centimeter Level Augmentation Service  
Rui Hirokawa, Seigo Fujita, Masakazu Miya

Overview of Application on Quazi-Zenith Satellite System and Result of Demonstration  
Rui Hirokawa, Ryōichirō Yasumitsu, Yoshihiro Shimizu

Purposes and Technologies of Advanced Optical Satellite  
Yuji Awa, Masao Imaki, Akihiro Ando

Usage Situation of Advanced Land Observing Satellite-2  
Masuko Komiyama, Noriko Aso

Status of Recent Communication Satellites and Meteorological Satellites Series  
Koji Sekine, Tatsuhiko Noguchi, Eiichi Sakai, Hiroto Yonechi

Mitsubishi Mobile Mapping System “MMS-G220” for Overseas  
Ryuichi Ishihara, Atsushi Kagaya

Airborne Doppler LIDAR Contributing to Safe Operation of Aircraft  
Hisamichi Tanaka, Masashi Furuta, Tadashi Minobe

Helicopter Satellite Communication System “Dual Antenna Helisat System”  
Takayuki Fukui, Hayato Sato

Tsunami Wave Height Prediction Method by Ocean Surface Rader  
Tomoyuki Koyanagi, Hiroaki Ishikawa, Toshihiko Arioka, Tatsuya Hirao

High-speed Color CIS “KD-CX Series” for Inspection Machine  
Kosaku Yamagata, Atsushi Ito, Naoyuki Tokida, Akira Ota

Millimeter Wave Module for Automotive Radar  
Shigeho Inatsu, Takuya Suzuki, Shinichi Kambe, Shigeo Udagawa, Kazunori Kurashige

Technology of Water Detection in Road Bridge Using Ultrasonic Waves  
Tomonori Kimura, Akira Hosoya

### 特許と新案

「アンテナ装置」「海洋レーダ装置」	55
「車載装置」	56

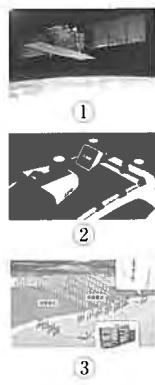
### 表紙：安全・安心・防災への貢献

三菱電機では、宇宙・防衛システムで培った技術を核に、安全・安心・防災に資する新たなソリューションの創出・提供に取り組んでいる。

①陸域観測技術衛星2号“だいち2号”(ALOS-2)は2014年に定常運用に移行し、それ以後、災害状況把握、地球規模の環境問題への対応等に貢献している。取得された画像は、災害時の利用とともに、平常時でも地殻変動や火山活動の定常監視、海水観測等に利用されている。

②モービルマッピングシステムの新製品“MMS-G220”である。走行しながら周辺の三次元空間情報を収集し、自動運転に必要となる高精度地図基盤情報の整備や、社会インフラ管理に貢献する。システムの着脱性が高く、海外での活用も期待されている。

③津波監視用海洋レーダのシステム構成、動作イメージである。沿岸から数十km先までの遠方の海面を監視でき、早期に津波を検知し、避難行動に必要な時間を確保する。



## 巻/頭/言

## 安全・安心・防災への貢献

Contribution for Safety, Security and Disaster Management

小山 浩  
Hiroshi Koyama

三菱電機は通信・放送衛星、地球観測衛星、測位衛星等の宇宙システム・機器に加え、安全保障に向けた防衛システム・機器、これらの事業で培った高度な技術を核とした高精度三次元空間位置計測用の“モービルマッピングシステム”，自動車用の“ミリ波レーダ用モジュール”，“ヘリコプター衛星通信システム”等の製品群を開発・提供しています。近年、これらのシステム・機器が提供する各種情報の利活用を図り、安全・安心・防災を含む様々な目的への利用を推進する動きが加速しつつあります。

2016年4月に閣議決定された宇宙基本計画では、民生分野における宇宙利用の推進が政策目標の1つとして規定され、宇宙を活用した地球規模課題の解決と安全・安心で豊かな社会の実現、及び関連する新産業の創出が謳(うた)われています。当社は商用通信衛星をはじめとし、気象観測を行う“静止気象衛星ひまわり”，地表の様子を広域かつ高精度な画像として捉える“先進光学衛星”，夜間・悪天候下でも地表の様子をレーダで精細に捉える“先進レーダ衛星”，国内及びアジア・オセアニア域に安定的に測位信号を配信する“準天頂衛星”等の開発・整備に携わっています。宇宙システムの最大の特長はその広域性にあります。これらの宇宙システムの活用によって、地震・津波・火山噴火・台風・集中豪雨等の大規模災害について、広域の情報を一括収集して被害軽減と災害発生後の対応能力を向上させることができるほか、日本と国際社会が直面する資源、エネルギー、気候変動、環境、食糧等の各種地球規模課題の解決への貢献も可能になります。さらに、これらの宇宙システムを活用して取得・蓄積された衛星リモートセンシング情報、衛星測位による位置情報等のいわゆる“ビッグデータ”を基にAI(Artificial Intelligence)等の情報処理技術や5G等の情報通信技術の駆使によって、新たな価値を持つ新サービス・新事業の創出が期待されます。

“準天頂衛星”に関しては、高精度位置情報の安全・安心・防災の分野での利用が新たなテーマとなります。“準天頂衛星”的利用によってセンチメータ級の高精度三次元位置情報を国内でリアルタイムに取得・活用でき、自動走行、エリア交通マネジメント、鉄道、IT農業、及び情報化施工等、様々な分野での新サービスの創出が期待され

ています。ここで、高精度な三次元位置情報を活用するためには、その情報を表示するための三次元地図が不可欠です。三次元地図を利用分野ごとに個別に整備するのではなく、共通基盤として整備することが効果的であり、これによつて利用自体の拡大・促進が加速されるとともに、データ取得の重複を避け、効率的なシステム整備が可能となります。

2016年5月に閣議決定された“科学技術イノベーション総合戦略2016”では、新たな経済社会としての“Society5.0”(超スマート社会)を実現するプラットフォームの1つとして、“三次元地図情報データベース”が位置づけられており、内閣府が推進する戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)との連携によって、新たなサービス創出の核となることが期待されています。特に、SIP“自動走行システム”との連携は重要であり、自動走行用のダイナミックマップの源泉データとして三次元地図情報の整備・更新が必須です。これには、三次元地図情報をリアルタイムで計測・生成可能な“モービルマッピングシステム”的活用が期待されています。先に述べた総合戦略2016では、“国及び国民の安全・安心の確保と豊かで質の高い生活の実現”も重要施策として示されており、効率的かつ効果的なインフラ維持管理・更新の実現、自然災害に対する強靭な社会の実現が具体的目標として規定されています。当社の“モービルマッピングシステム”によって取得された道路やトンネル壁面の劣化情報、超音波による滯水検知技術”によって得られた道路橋の劣化情報等は、上記インフラ維持管理に資する情報源になります。また、自然災害に対する予測、対応支援に際しては、津波の到達時刻や波高の予測に有用な“海洋レーダ”，風速・乱気流の計測が可能な“航空機搭載ドップラーライダ”，被災地上空での通信手段を提供する“ヘリコプター衛星通信システム”をはじめとした当社製品の活躍が期待されています。

この特集では、安全・安心・防災に関わる各種施策の実現に資する、当社の様々なシステムや機器の概要とともに、更なる利活用に向けた今後の可能性に関し、具体的な事例を含めて述べます。宇宙・防衛システムで培った技術を核に、安全・安心・防災に資する新たなソリューションの創出・提供に取り組んでいきます。

# 卷頭論文



# 安全・安心・防災に貢献する先進技術

*Advanced Technologies for Safety, Security and Disaster Management*

Moriyasu Miyazaki

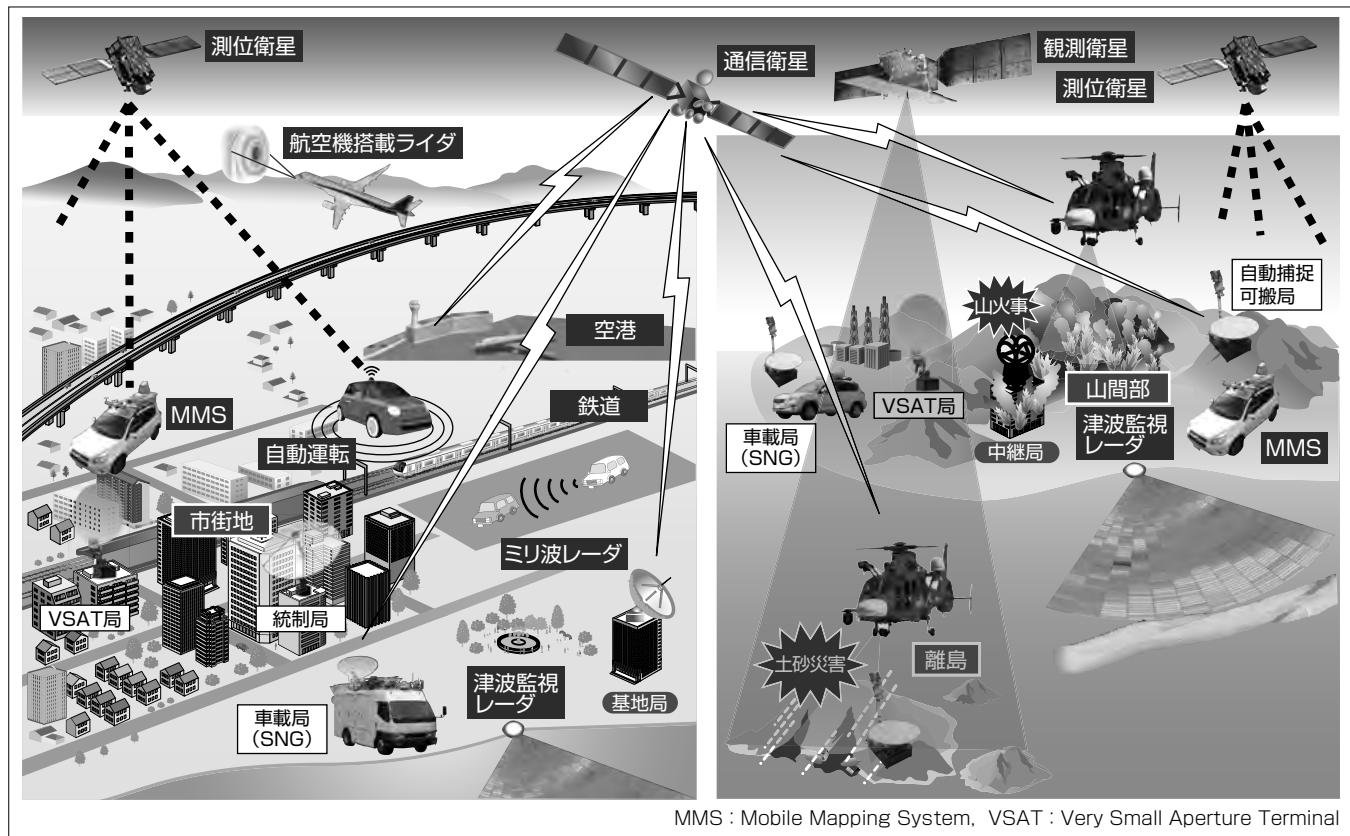
## 要旨

安全保障はもとより、近年の気象環境の急激な変化や地殻変動の活発化に伴う災害など日々の暮らしに潜む様々な危険に対して、安全・安心な暮らしを確保して防災対策を強化する試みが求められている。その達成に向けいち早く危険の予兆を捉えて早期に予防策を講じるには、実効的技術である観測技術、測位技術、及び通信技術がトータルとして広域性、常時性、即時性、正確性、及び適応性の5つの要素を備えることが有用である。

三菱電機は、合成開口レーダ(SAR : Synthesis Aperture Radar)や光学センサ(撮像、CO<sub>2</sub>等温暖化ガス、気象)などの衛星搭載センサ技術、津波監視や風計測など地上のレーダ・ライダ技術、準天頂衛星を利用したセンチメータ

級測位技術や高精度三次元地図生成などの地理空間情報利活用技術、広域性と常時性に優れた通信衛星、加えて適応性(機動性)にも優れたヘリサットやSNG(Satellite News Gathering)といった衛星通信システムなど、先に述べた5つの要素に対応して安全・安心・防災に大きく貢献する実効的技術を網羅的に開発し、製品として世に送り出している。

これらの実効的技術を基に、安全・安心・防災への備えをサービスとして提供する上でネットワーク技術の進展も不可欠である。中でも、IoT(Internet of Things)時代を支えるべく、多種多様な情報が混在する通信要求に応えるシステムとして、新世代ネットワークが期待されている。



## 安全・安心・防災に貢献する実効的技術

安全・安心な暮らしを確保し、防災に努めるにはいち早く危険の予兆を捉えて早期に予防策を講じることが重要である。そのための手段として、広域性と常時性に優れた衛星の利活用が極めて有用である。当社は、観測衛星、測位衛星、及び通信衛星を核に地上のレーダ、ライダ、及び様々な通信手段を連携させ、安全・安心・防災に貢献する実効的技術を備えた観測、測位、通信の各システムを網羅的に提供している。

## 1. まえがき

自然環境の急激な変化や地殻変動の活発化が表面化する中、日々の暮らしに潜む様々な危険に対して、安全・安心な暮らしを確保して防災対策の強化を図るために、常時観測して監視し、いち早く予兆を捉えて早期に予防策を講じることが求められる。そのために必要な実効的技術として、観測技術、測位技術、及び通信技術が挙げられる。さらに、これら実効的技術は相互に連携してシステム化され、サービス又はソリューションとして世の中に提供されることで初めて有効に機能する。したがって、そのためのシステム化技術としてのネットワーク技術も重要となる。

本稿では、先に述べた実効的技術に求められる必要条件として特徴的な5つの要素を挙げ、これら5要素を兼ね備える実効的技術としての衛星（観測、測位、通信）<sup>(1)</sup>、地上レーダ・ライダ<sup>(2)</sup>、及び衛星通信システム<sup>(3)</sup>などに関する当社の先進技術と製品、及び暮らしへの貢献例を示す。さらに、これらの実効的技術を基に安全・安心・防災への備えをサービスとして提供する上で不可欠な新世代ネットワーク<sup>(4)</sup>について、IoT、AI(Artificial Intelligence)、ビッグデータ解析などの注目技術とも関連付けながら、その役割を考察する。

## 2. 安全・安心・防災を支える実効的技術

人が安全・防災対策を講じて安心を得るための行動プロセスを時系列的に捉え、必要な技術を抽出してみると、危険につながりかねない状況を正確に捉えるための“観測技術”，状況変化などの事象が生じた位置を把握するための“測位技術”，及び取得した情報を確実かつ最速に伝送して集結・分配するための“通信技術”が挙げられる。ここで、これら3つの技術を実効的技術と位置付ける。これらの実効的技術について、利用の側面から捉えた場合に備えるべき特徴要素を考察する。まずは、迫り来る危険情報を網羅的に正しく把握できる“広域性”と、災害時等でも地上インフラ等の影響を受けにくく常に機能を失わない“常時性”が、3つの実効的技術の全てに求められる。このほか“観測技術”には、観測の基本である“正確性”に加え、素早く様々な観測対象に対応できる“即時性”と“適応性”も求められる。“測位技術”にも、“即時性”と“正確性”が重要である。また“通信技術”には、リアルタイムに情報を伝える意味での“即時性”と、電波環境やインフラの状況に応じた回線確保を確実に行える“適応性”も求められる。これらの実効的技術が備えるべき特徴の要

素とそれらを実現する当社技術の関係を俯瞰(ふかん)して図1に示す。まず、特徴的なのは、“広域性”と“常時性”的面で衛星利用が幅広く有用な点である。また、観測及び測位における“即時性”や“正確性”的確保には、レーダ・ライダの適用が有用である。一方、測位における“即時性”と“正確性”的確保には、GNSS(Global Navigation Satellite Systems)の活用も有用である。さらに、観測における“正確性”と“適応性”，及び通信における“適応性”的確保には、使用する電波や光の周波数・波長の選択が極めて重要であり、衛星搭載用のSAR、光学センサ(撮像、CO<sub>2</sub>等温暖化ガス、気象)，及び地上のレーダ・ライダではHF(High Frequency)帯から可視光までが、そして、衛星通信をはじめとする種々の無線通信でもVHF(Very High Frequency)帯からミリ波までの幅広い周波数・波長領域が適応的に選択・活用されている。

また、これらの実効的技術の能力を最大限に発揮させ、安全・安心・防災への貢献範囲を拡大するためには、一連の実効的技術が相互に連携して観測・監視システムを構築することはもとより、異種・多様なシステムが更なる連携を重ねることで機能・性能を向上させ、サービス拡大につなげる必要がある。安全・安心・防災へ貢献するシステムの拡大イメージを図2に示す。拡大は、3つのステップで進む。

技術	特徴	広域性	常時性	即時性	正確性	適応性
実効的技術	観測	衛星利用 SAR 光学(撮像、CO <sub>2</sub> 、気象) GNSS補強 準天頂(CLAS)	レーダ・ライダ適用 津波監視 衝突防止 風・乱気流計測 MMS RTK測位		周波数・波長選択 HF～ミリ波 赤外～可視 超音波	
	測位	無線 準天頂(CLAS)	RTK測位		L帯	
	通信	衛星通信	VSAT ヘリサット		VHF～ミリ波	
システム化技術		無線・有線融合、新世代ネットワーク、5G IoT、AI、ビッグデータ解析				

CLAS : Centimeter Level Augmentation Service, RTK : Real Time Kinematic

図1. 実効的技術が備えるべき特徴要素と当社技術の関係

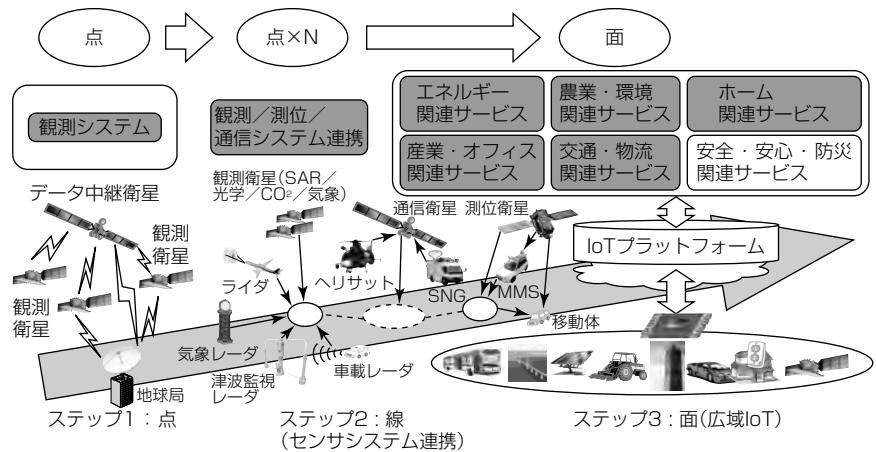


図2. 安全・安心・防災へ貢献するシステムの拡大イメージ

ステップ1では観測衛星など複数のセンサ群、ステップ2では観測と測位それぞれに資する種々のセンサ同士が通信ネットワークでつながりローカルなシステムを形成、ステップ3ではさらに異分野のシステムが相互にネットワークでつながり情報を共有し、正に広域IoTとして面的に広がるサービスを提供する。すなわち、点での観測から面的な広域観測へと発展し、観測・監視能力の飛躍的な向上が期待される。

一方、このようなシステムの拡大に伴い、行き交う情報量の爆発的な増加と、図2に示すような異分野サービス間でのネットワークの混在が予想される。これに対応するための、フレキシブルで賢い新世代ネットワーク網の検討がIoT・AI・ビッグデータ解析などの最新技術とも相まって進められており、将来における活用が不可欠である。

ここまで、安全・安心・防災に貢献する3つの実効的技術と、これらに求められる5つの要素を抽出するとともに、システム化技術としてのネットワーク技術の重要性について述べた。3章では、関連する当社の先進技術及び安全・安心・防災への貢献例を示す。

### 3. 当社の先進技術

#### 3.1 観測技術

##### 3.1.1 衛星搭載高性能センサ

地球観測への衛星利用は、先に述べたとおり“広域性”“常時性”、及び“適応性”など、安全・安心・防災への貢献に有用な多くの特徴要素を備えている。観測衛星には、地表や海洋の様子を撮像するSAR衛星や光学衛星、多波長のマイクロ波・ミリ波を利用して地球表面や大気中の様々な物質の分布・速度を観測する高性能マイクロ波放射系衛星、多波長の赤外光を利用して地球上のCO<sub>2</sub>などの分布や増減を観測する温室効果ガス観測衛星、さらには赤外光から可視光にわたる多くの波長を利用して大気中の水蒸気や雲の状態を観測する気象衛星などがある。衛星は地上から遠いことと電力に限りがあることから、観測の高精度化、高解像度化、及び低消費電力に資する技術開発に重点が置かれる。また、これまでに述べたとおり、衛星搭載センサが使用する電波や光の波長に応じて観測対象は多岐にわたっており、今後も観測対象の拡大が期待される。さらに、図2で示したような異種センサ間の連携が進めば、観測の“広域性”“常時性”、及び“正確性”などが飛躍的に向上し、関連サービスの機能・能力向上につながると期待される。

当社はこれまでに、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)及び気象庁をはじめとする関係機関の指導を受けて数多くの観測衛星の開発に携わってきた。

##### (1) SAR衛星

SARは昼夜や天候によらず観測可能という特長を持つことから、特に“常時性”に優れている。このため衛星搭載SARは、安全保障、海域(油流出、流氷監視等)や陸域(地

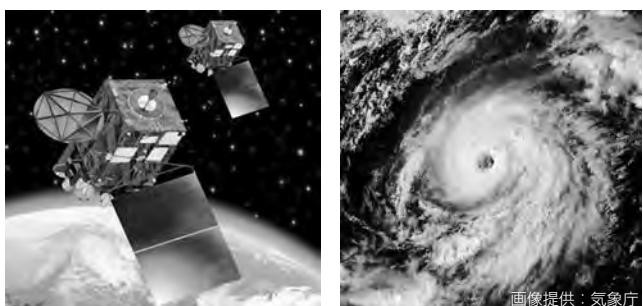
理情報、農業等)観測、温暖化対策に資する森林状況モニタリング、地殻変動や火山活動の定常監視、豪雨や地震等の災害状況把握等、幅広い分野で利用されている。特に地殻変動や植生状態把握に優れるL帯SARは日本が継続的に開発・発展させてきたセンサである。JAXAの下で当社も開発に携わった陸域観測技術衛星2号“だいち2号”に搭載されたL帯SAR“PALSAR-2(Phased Array-type L-band Synthetic Aperture Radar-2)”は、災害状況の把握、地球規模での環境問題への対応と経済・社会への貢献をミッションとしている。前号機“だいち”比で観測可能領域を3倍に拡大し、観測頻度を向上させるなどして、災害観測等の高度化を実現させたことで、新たに海洋状況把握等への利用が期待される。

##### (2) 光学衛星

日本での光学センサを搭載した地球観測衛星は年々進歩を遂げ、今では分解能1m以内で日本全域を高頻度に観測する技術を実現しつつある。このため、光学衛星は、防災・災害対策等を含む広義の安全保障、地図・地理空間情報の作成・更新等、様々なニーズに貢献している。また、センサの多波長化によって、植生・土壌分析等の定量分析機能も向上している。当社は、JAXAの下で大型光学センサに対して軸外し4枚鏡を採用し、コンパクト化を図りながら広域と長焦点を両立させ、広観測幅と高分解能を同時に満たす技術開発に成功している。また、当社独自の多彩な撮像制御技術や光学センサ製造技術を駆使し、高分解能化を図っている。さらに、画像データの地上への伝送処理でも、Ka帯適用による1.6Gbps世界最高速伝送系を提案している。

##### (3) 気象衛星“ひまわり”

気象衛星“ひまわり”は静止軌道から地球規模の広範囲にわたり、赤外光から可視光までの多数チャネルの波長を利用して、地球の大気中にある水蒸気や雲の状態を高分解能・高頻度に観測することによって、広域的な雲の動きはもとより台風や局地的大雨等を的確に監視する上で重要な国家インフラとなっている。気象庁によって2015年7月から運用が開始された“ひまわり8号(図3)”は、波長数を5から16に増強するなど、分解能・観測チャネル数・観測頻度で“ひまわり7号”より大きく性能向上を果たしている。当社は静止衛星標準バスDS2000に高度な姿勢制御技術やUHF(Ultra High Frequency)/Ku/Ka帯通信系



画像提供：気象庁

図3. ひまわり8号及び観測画像

を追加搭載し、気象観測に適する姿勢決定精度と低擾乱(じょうらん)性能、通信性能を実現している。

### 3.1.2 地上の高機能センサ

電磁波を用いるレーダは、SARと同様に昼夜を問わず観測が可能であり、HF帯からミリ波帯の適切な周波数帯を選択して用いることで航空機、船舶、車などの移動体をはじめ、津波、雨雲、河川水位など様々な目標の位置や速度を高精度に観測できるため、特に“常時性”、“正確性”及び“適応性”に優れています。安全・安心・防災を支える要のセンサと位置付けられる。一方、レーザ光を用いるライダは、大気中のエアロゾルを捉えるほど細いビームを目標に照射でき、風力発電の高効率化に有用な風向・風速観測や航空機の安全航行に有用な乱気流観測などで注目を集めています。さらには、MMSにも搭載され、車の自動運転などに有用な高精度三次元地図の作成にも役立っています。このほか、超音波を用いてインフラ構造物の損傷状態を非破壊で検査する技術、複写機や紙幣判別分野等の画像読み取り・検査を行う光学密着イメージセンサなど、様々な高性能センサが日々生まれています。次に、安全・安心・防災に向けて当社が開発を進めるレーダ・ライダの先進技術について述べる。

#### (1) 津波監視用海洋レーダ

大地震の発生によって津波が沿岸に到達する前に極力早くかつ高精度に到来を予測することは、避難行動に必要な時間を確保する上で極めて重要である。このような背景から、当社は、従来の海洋レーダを改良した津波監視用海洋レーダ(図4)の開発を行った。開発の成果として、海洋レーダによって計測される海表層流速場からリアルタイムでの津波挙動の推定を可能にした。この技術によって、津波の速度や到達予想時刻が、さらには、沿岸部の水深も加味することで津波の波高の推定も可能となった。

#### (2) 車載ミリ波レーダ

ミリ波レーダは天候に左右されにくく、視界の悪い夜間でも性能を落とさず、遠くまで検知できる特長がある。自動緊急ブレーキ等の自動車用安全運転支援システムや車間距離を一定に保つACC(アダプティブクルーズコントロー

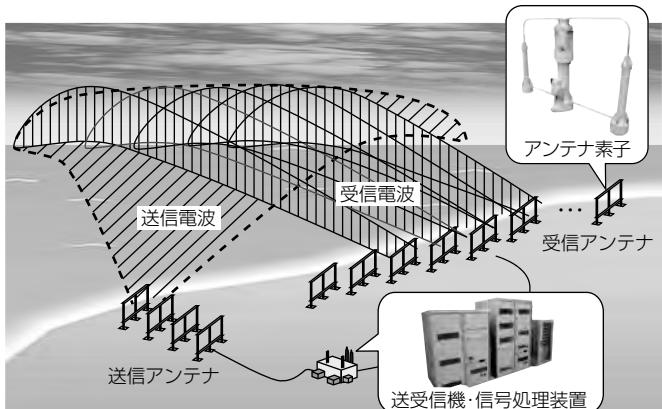


図4. 津波監視用海洋レーダの構成例

ル)用としてミリ波レーダを応用したシステムの開発が世界的に盛んである。さらに、最近では自動運転技術の開発が盛んに行われるようになり、安全センサとしての役割が今後も期待される。安全運転支援等を目的として搭載される自動車用のミリ波レーダで重視される性能は、主に検知距離能力と角度精度である。法的に送信電力の上限が決められている条件下で高い検知距離能力を得るために、アンテナを含めた送受信利得が高く雑音レベルが低いことが必要である。当社は、GaAs(ガリウムヒ素)による低位相雜音・高S/N(Signal to Noise)化、PLL(Phase Locked Loop)による変調補正の自動化、及び受信マルチチャネル化などの技術開発によって希望する性能を低成本で実現している。今後は、自動運転の実現に向けて車のトータルシステムの一部として求められる性能・機能が複雑化することが見込まれ、ミリ波レーダにもスマート化が求められる。

#### (3) 航空機搭載ライダ

旅客機の事故の約半数は乱気流等の気象現象に関連しており、乱気流事故の防止のためには乱気流を検知又は予測して対策を講ずることが有用である。航空機搭載ライダは、航空機に搭載された気象レーダ等の従来機器では検知が困難な晴天乱気流に対し、レーザ光を用いた遠隔気流観測技術で検知してパイロットへ情報を提供するとともに、最終的には制御技術によって機体の動揺を低減することで航空機の安全運航を可能とする。当社は既に、地上設置用の長距離型ドップラーライダを開発し製品化した。この製品化に当たり、長距離の観測のために必要な小型高出力光増幅器の実用化にも成功している。ここで得られた知見を基に、JAXAの指導の下、エアロゾルの希薄な高高度でも遠方の乱気流を検知するための開発を進めている。

### 3.2 準天頂衛星高精度測位技術及び利活用技術

2018年度から準天頂衛星システム(QZSS: Quasi-Zenith Satellite System)の実用サービスが開始される。QZSSの主な特長に、日本全国で水平誤差6cm以下、垂直誤差12cm以下の高精度測位を可能とするセンチメータ級測位補強サービス(CLAS)があり、IT農業・情報化施工、自動車の自動運転・安全運転支援等の新たな分野の利活用が期待されている。自動車分野では、CLASと高精度三次元ダイナミックマップと併用することで、自動運転システムの性能向上や適用範囲拡大が期待される。また、IT農業分野へのCLAS適用は、農機運転の自動化による省力化や精密土壤マップ・肥料散布地図の活用による収穫量拡大への貢献が期待できる。

なお、三次元ダイナミックマップの開発には、3.1.2項で述べたMMSが重要な役割を果たす。MMSは、車両にGPS(Global Positioning System)などのGNSS受信機IMU(Imperial Measurement Unit: 慣性航法装置)、レーザスキャナ、カメラ等各種センサを搭載し、走行しながら周辺の三次元空間情報(形状、色、及び座標)から成る“点群”を精密か

つ効率的に収集する。当社は、MMSに対して高い技術力を持ち、“点群”的絶対位置精度10cm以下を実現している。

### 3.3 衛星通信技術

#### 3.3.1 通信衛星

通信衛星は、固定通信・移動体通信等の通信インフラを平常時に提供するとともに、災害時・緊急時には地上通信インフラに替わって対象地域に通信サービスを提供できるなど“広域性”“常時性”，及び“適応性”に優れ、安全・安心を得る上で欠かせない。ただし、これらの特長を最大限に発揮させるためには、柔軟に周波数や周波数帯域幅を変更できる衛星搭載中継器の適応性、干渉・妨害に負けない信頼性、及び衛星管制の保全性などの確保が重要となる。このためには、アンテナのアダプティブ化、搭載中継器のデジタル化、及び信号の暗号化や拡散符号化などが求められる。当社は、2002年打上げのデータ中継技術試験衛星(当時、NASDA)以来、通信放送衛星6機の実績を基に、今後必要な先進技術の開発を着実に進めていく。

#### 3.3.2 ヘリサット

災害・危機管理の分野では、迅速かつ的確に情報を収集・整理し、情報通信基盤を通じて住民や関係機関に伝達することによって、被害や事故の件数の軽減、質的な改善が見込まれる。従来、被災地での空撮映像の伝送には地上で整備した中継局を経由して伝送を行う“ヘリコプターテレビ伝送システム(ヘリテレ)”が用いられていた。しかしながら、東日本大震災や熊本地震等の巨大地震や津波では地上の中継局が被災し、情報収集に時間を要する課題が発生している。このような状況を改善するため、当社では、他社に先駆けてヘリコプターから直接通信衛星を介して情報を伝送するシステム(ヘリサットシステム)を開発し、市場投入を果たした。ヘリサットシステムは通信衛星を介して直接通信を行うため、運用地域、飛行高度に依存せずリアルタイムで情報収集が可能である。ヘリコプターから直接衛星通信を行うシステムの有用性は運用事例からも明らかであり、現在、このシステムは地震や大雨による河川の氾濫、火山の噴火等、広域災害時に迅速な情報収集手段として活躍している。

## 4. フレキシブルな通信ネットワーク

安全・安心・防災への対応をより確実なものへ高めるためにフレキシブルで賢い通信ネットワークの構築が不可欠なことは、先に述べたとおりである。今後、IoTの適用が本格化して異分野サービスの大量情報が混在して行き交うことが予想される中で、図2のステップ3に示すような面的広がりを持つ観測システムを機能させるためには、多種多様な通信が混在しても必要な通信品質を確保できる高度な通信ネットワークが求められ、この要求を満たすための

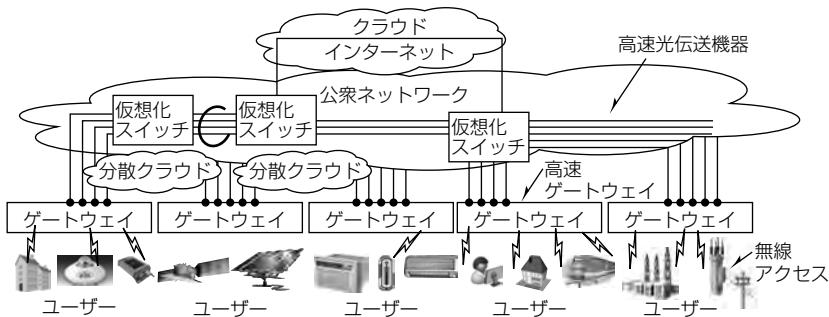


図5. 新世代通信ネットワークの構成イメージ

新世代ネットワークの検討が進んでいる。図5はその構成イメージであり、多接続、高信頼、低遅延、小容量、大容量といった多種多様な要求のデータ配信が混在することになる。現状、電話回線以外はインターネット経由となるため品質や低遅延を保証できない。IoT普及期には、伝送容量を保ちつつ電話と同じような品質保証と更なる低遅延の仕組みを公衆ネットワークの中に持つ必要がある。そのため、光回線やゲートウェイの高速化、ネットワーク仮想化、分散クラウド化、第5世代移動通信システム(5G)などの無線と有線の統合など、革新が見込まれる新世代ネットワークへの期待が高まる。次世代ネットワークがインフラ網として構築され、IoT、AI、ビッグデータ解析などの最新技術と相まっていくことで、状況に応じてフレキシブルでかつ高品質なネットワーク網を実現できると考える。

## 5. むすび

安全・安心な暮らしを確保して防災対策の強化を図るために必要な技術を俯瞰し、実効的技術として“観測技術”“測位技術”“通信技術”を挙げ、これらの技術に求められる5つの特徴要素を抽出した上で、実効的技術の実現例である当社の先進技術と製品について述べた。また、これらの実効的技術を連携させてより高度なソリューションを提供する上で不可欠な、新世代通信ネットワークへの期待を示した。

## 参考文献

- (1) 小山 浩, ほか: 宇宙利用拡大と情報通信社会を支える先端技術, 三菱電機技報, **89**, No.3, 152~156 (2015)
- (2) 長谷川広樹, ほか: 宇宙利用の新たな動向, 三菱電機技報, **90**, No.2, 98~102 (2016)
- (3) 尾崎 裕, ほか: 災害・危機管理・報道に威力を發揮するヘリコプター及び小型車載用衛星通信システム, 三菱電機技報, **84**, No.8, 466~470 (2010)
- (4) 中尾彰宏, ほか: ネットワーク仮想化サービス基盤の進展と今後の展望[Ⅰ]—進化形ネットワーク仮想化と統合管理技術—, 電子情報通信学会誌, **99**, No.12, 1184~1190 (2016)

# 準天頂衛星システム センチメータ級測位補強サービス

廣川 類\*  
藤田征吾\*  
宮 雅一\*\*

Quasi-Zenith Satellite System Centimeter Level Augmentation Service

Rui Hirokawa, Seigo Fujita, Masakazu Miya

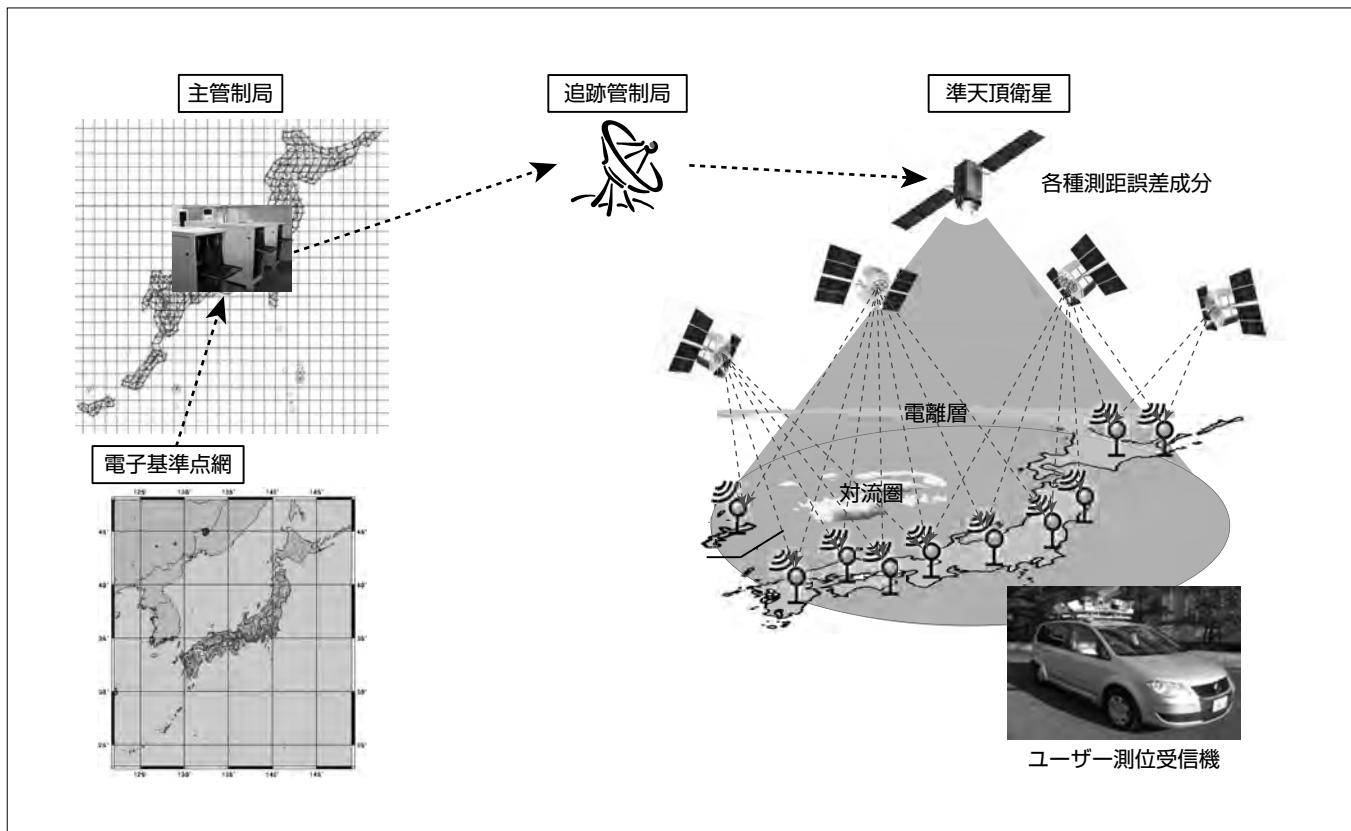
## 要旨

準天頂衛星システム(QZSS)の2018年度からの実用サービス開始に向けて、センチメータ級測位補強サービス(Centimeter Level Augmentation Service : CLAS)を開発している。従来のGPS(Global Positioning System)の測位精度は約10mであり、信頼性も保障されない。しかし、CLASは衛星測距データに含まれる各種誤差を補正するデータを準天頂衛星経由で配信することで、高い測位精度(水平：6cm)と信頼性を実現する。また、測位衛星の異常をリアルタイム監視するインテグリティ監視機能を持ち、測位情報の信頼性を確保することができる。

CLASは、オープン仕様の衛星配信型の高精度・高信頼補強サービスとして世界初<sup>(注1)</sup>であり、各誤差のダイナミクスに応じた情報圧縮技術を適用して1/1,000のデータ圧縮を実現することで、伝送速度が低い衛星回線経由の全国

サービスを可能にした。CLASでは、日本全国約300点の電子基準点網で取得した各測位衛星の観測データを用いて、主管制局で観測データに含まれる各種測距誤差を推定し、補正情報及びインテグリティ情報を生成する。これらの情報は準天頂衛星から放送し、測位受信機で各測位衛星の測距データを補正することで、高精度測位を可能にする。このシステムの開発では、海外を含む普及促進のために伝送フォーマットを国際標準規格に基づき新たに定義・規格提案中である。主要な仕様である高精度解を得るまでの初期化時間及び測位精度について評価を行い、仕様を満たすことを確認した。2017年3月から試験放送を開始し、早期の普及拡大につなげる。

(注1) 2016年2月4日現在、当社調べ



## 準天頂衛星システムセンチメータ級測位補強サービス

電子基準点網(日本全国約300点)で取得した観測データから各衛星の測距誤差成分(軌道、時計、信号バイアス、電離層遅延、対流圏遅延)を推定し、圧縮及びインテグリティ情報付与後、衛星経由で配信する。ユーザー測位受信機は、各衛星の観測データを補強データで補正し、高い測位精度(水平：6cm)と信頼性を実現する。

## 1. まえがき

準天頂衛星システム(QZSS)は、2018年度からの実用サービス開始を目指して日本が独自に開発中の衛星測位システムである。米国のGPSと互換性を持つ測位信号を送信する補完機能と、測位精度を向上させる補強情報を日本国内向けに配信する補強機能を併せ持っている。補強機能では世界初のオープン仕様の衛星配信によるセンチメータ級測位補強サービス(CLAS)を提供する。CLASは、従来のGPSカーナビゲーション等で約10mであった精度を6cm(水平)と飛躍的に高めるものであり、自動車の自動運転や情報化施工等の様々な用途への応用が期待されている。また、このシステムでは、安全に関わるシステムへの適用に際して必要とされるインテグリティ機能を高精度測位システムとして世界で初めてサポートしている。

本稿では、三菱電機が開発するCLASの特長及び開発状況について述べる。

## 2. センチメータ級測位補強サービス

### 2.1 開発状況

宇宙基本計画(2015年1月)では、準天頂衛星システムの整備について、4機体制によるサービスを2018年度から開始し、2023年度を目途に持続測位が可能になる7機体制を目指すとされている。この計画に基づき、2017年度は3機の衛星(準天頂衛星2機、静止衛星1機)を打ち上げ、2010年度に打ち上げ済みの準天頂衛星1号機と合わせて合計4機の体制で運用を開始する計画である。また、並行して衛星の管制や測位システムで使用される情報の生成を担当する地上システムや利用実証に使用されるプロトタイプ測位端末も開発されており、2017年度からサービスの普及拡大に向けた本格的な利用実証を行う予定である。

### 2.2 マルチGNSSと高精度測位

衛星測位システム(Global Navigation Satellite System: GNSS)では、ユーザー受信機側で4機以上の衛星からの測距信号を受信し、衛星と受信機間の距離を正確に知ることで、受信機の三次元の位置と時計誤差を知ることができる。GNSSは、従来、米国のGPSだけが普及していたが、近年、ロシアのGLONASS、欧州のGalileo、中国のBeidou、インドのIRNSSが配備中又は実運用されており、2020年代には140機を超える衛星が運用される予定である(図1)。衛星測位システムは全て軍用(又は公共用途)と民生用のデュアルユースであるが、従来、民生用の信号は1つに限定されており、電離層遅延などの誤差を補正して、センチメータの精度で測位を行うためには、軍用の複数の信号をサポートする特殊な受信機を購入する必要があった。こうした高性能受信機は高価

(200万円以上)であり、従来は測量などの用途に限定されていた。マルチGNSS化及びGPS近代化プログラムによって、2000年以降、新世代の測位衛星が整備され、民生用信号だけで複数の周波数を用いた測位が可能になりつつある。これによって、数年後には、民生用GNSS受信機市場で複数周波数による高精度測位に対応したGNSS受信チップが登場し、自動車向け等に普及することで、量産単価も数千円(従来比約1/1,000以下)と大幅に低下すると予想される。

### 2.3 高精度測位補強方式の課題

センチメータ級の測位精度を実現するためには、約20,000km離れた衛星と受信機の間の距離をセンチメータの精度で観測する必要がある。しかし、これらの距離情報には図2に示すような様々な誤差が含まれており、補強システムによる補正が必要である。主な測距誤差要因は、衛星に起因するグローバル誤差(衛星軌道誤差、衛星クロック誤差、衛星信号バイアス誤差)、電離層遅延及び対流圏遅延に起因するローカル(又はリージョナル)誤差、マルチパス及び受信機バイアス誤差等に起因するユーザー受信機誤差の3種類に大別される。従来のRTK(Real Time Kinematic)方式では、位置が正確に分かっている基準局で各衛星の電波を受信して衛星・受信機間の幾何学的距離と観測距離の差からコード及び搬送波波相の測距誤差を算出し、モバイル回線等によってユーザー受信機に伝送す

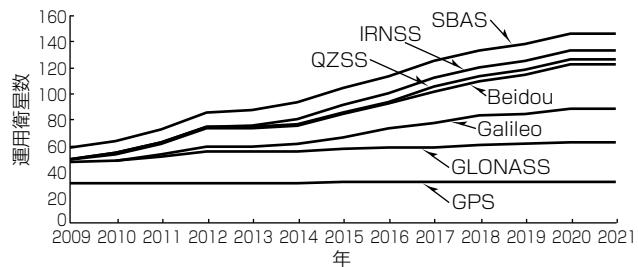


図1. 衛星測位システムでの運用衛星数の変化

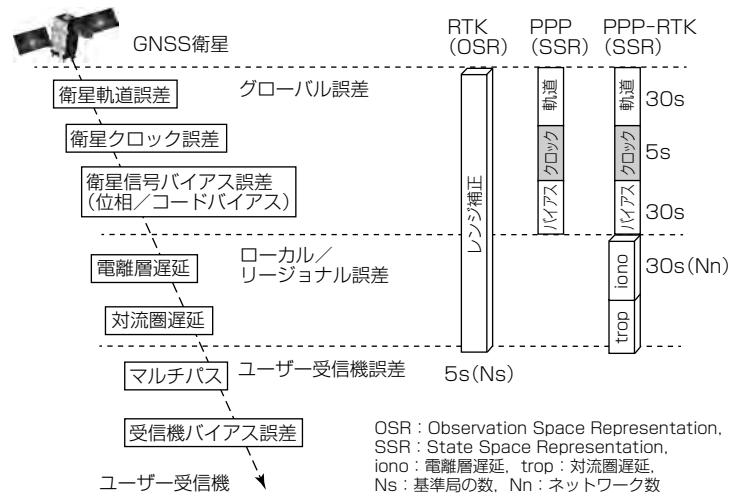


図2. 測距誤差と各補強方式による補正の比較

る。このRTK方式は、精密解を得るまでの初期化時間が数秒程度と短い利点があるが、測距誤差を伝送するために伝送効率が低く、また、基準局と受信機間の距離が10km程度に制限され、広域サービスを行うことは困難であった。精密単独測位(Precise-Point Positioning: PPP)方式は、処理サーバで広域に配置された複数の監視局受信機の観測データからグローバル誤差成分を推定し、ユーザー受信機に配信する。この方式は、Lバンド衛星回線のような低速な回線でも広域サービスが可能であるが、ローカル誤差成分をユーザー受信機側で推定・補正する必要があるため、精密解を得るまでの初期化に20分以上かかるという課題がある。

## 2.4 PPP-RTK方式による高精度補強

CLASがサポートするPPP-RTK方式は、グローバル誤差成分に加えて、ローカル誤差成分も配信するため、初期化時間を30秒以下に低減することができる。PPP及びPPP-RTK方式では、各誤差成分を推定して補正データとして配信することで、グローバル・ローカル誤差伝送の冗長性をなくすとともに、各誤差成分のダイナミクスに応じて更新間隔や分解能を適切に設定することで、所要伝送量を従来方式に対して大幅に低減できる。PPP-RTK方式の実現には密に配置された基準局網が必要であり、日本国内では、国土地理院が約1,300局を整備・運用する電子基準点網(GEONET)を利用する。

## 2.5 CLASの信号系

CLASのユーザーインターフェース仕様IS-QZSS-L6<sup>(1)</sup>及びサービス仕様PS-QZSS<sup>(2)</sup>に規定された主な仕様を表1に示す。補強対象として、現在及び将来に整備される衛星測位システム(GNSS)の多くの信号に対応する。高精度測位解を得るまでの初期化時間は補強データ取得に要する最大の時間(30秒)を含み60秒としている。CLASの補強データは、準天頂衛星のL6信号(中心周波数: 1,278.75MHz)で放送される。伝送データ速度は2,000bpsで、8ビットCSK(Code Shift Keying)によってデータ変調する。L6信号のデータチャネルについて、準天頂衛星1号機は1チャネルだけであるが、2号機以降は2チャネル持っている。1チャネルをCLASが使用し、残る1チャネルは実験用として使用される予定である。

表1. CLASの主な仕様

項目	仕様
補強対象のGNSS信号	GPS: L1C/A, L1C, L2P, L2C, L5 QZSS: L1C/A, L1C, L2C, L5 Galileo <sup>(注2)</sup> : E1b, E5a GLONASS(CDMA) <sup>(注2)</sup> : L1OS, L2OS
サービスエリア	日本国及び領海
位置精度(オープンスカイ)	水平6cm(95%), 垂直12cm(95%)
初期化時間	60秒以下(95%)
サービス可用性	0.99以上(コンステレーション) 0.97以上(衛星) 0.92以上(高仰角(60°))

(注2) 電子基準点網がサポート後、一定の試験期間を経て、サービス追加を予定。  
CDMA: Code Division Multiple Access

## 2.6 システム構成と処理の流れ

CLASを実現するシステムは、宇宙セグメント(衛星)、制御セグメント、ユーザーセグメント(測位受信機)で構成している。制御セグメントを構成するセンチメータ級測位補強情報生成設備では、電子基準点網で取得した測位衛星の測位信号観測データを入力とし、次の処理を行う。

- ①補正情報の生成と圧縮
- ②インテグリティ監視とインテグリティ情報(補正情報の品質指標)の生成
- ③補強情報フレームの生成

電子基準点は、日本全国約1,300点の中から約300点を選定して使用する。

センチメータ級測位補強情報は、主管制局から追跡管制局を経由して準天頂衛星へ向けてアップリンクされる。

準天頂衛星では、センチメータ級測位補強情報がL6信号によって日本全国へ送信される。ユーザー端末は、準天頂衛星からの補強情報と測位衛星からの測位信号を用いて測位演算を実施し、位置情報を出力する。同時に、補強情報のうちのインテグリティ情報を用いて、ユーザーは得られた補正情報の信頼度をリアルタイムに確認することができる。

## 2.7 メッセージフォーマットの仕様

L6メッセージの基本的なデータ構造は、準天頂衛星1号機のLEX(L-band EXperiment)信号と互換性を保つように設計しており、ヘッダ部(49ビット)、データ部(1,695ビット)、リードソロモン符号(256ビット)の合計で2,000ビットの1メッセージを構成し、1秒で伝送する。データ部には、複数の補強メッセージがストリーム形式で伝送されている。

補強メッセージは、日本国内限定の仕様になることを回避して普及を促進するため、国際標準規格であるRTCM(Radio Technical Commission for Maritime services)規格<sup>(3)</sup>に互換性を持つ形式を採用している。ただし、PPP-RTK方式の標準規格は未定義であるため、インテグリティ情報を含むPPP-RTK用圧縮フォーマットCompact SSR<sup>(4)</sup>を汎用の規格として定義し、RTCM委員会に提案中である。Compact SSRは、CLASへの適用を意図して設計されているが、地上系配信サービスや欧米他の地域にも適用可能な汎用性を持っている。規格化には数年単位の時間を要するが、既に主要な受信機メーカーの賛同を得られており、デファクト標準となることが期待される。

## 2.8 メッセージ伝送周期

メッセージ伝送周期を表2に示す。Compact SSRでは、

表2. メッセージ伝送周期

補正内容	配信間隔
衛星クロック誤差	5秒
衛星軌道誤差、衛星信号バイアス誤差(位相/コードバイアス)、URA、マスク	30秒
電離層遅延、対流圏遅延	30秒

URA: User Range Accuracy

10種類のメッセージを定義しており、CLASでは最も変動周期が短い衛星のクロック誤差を5秒、それ以外の成分は30秒周期で配信する。また、配信するメッセージには、補正情報の精度指標が複数含まれ、測位受信機でのインテグリティ機能で補強後の測距精度を推算する際に使用される。

### 3. 補強機能性能の評価

全国に設置されている電子基準点の周囲の環境によってマルチパス等の状況は異なり、電離層や対流圏等の変動要因も存在するため、このシステムの構築に当たっては広範なデータの蓄積とチューニングが必要である。この開発では、開発設備でプロトタイプ設備を整備し、長期にわたる評価を実施している。

#### 3.1 初期化時間

図3に精密解を得るまでの初期化時間に関する評価結果を示す。初期化時間は、全国のモニタ点(60点)で観測データを対象にして搬送波位相のアンビギュイティ決定時間と定義されている。30秒以内に累積度数が96.9%になり、仕様値(95%)を実現している。

#### 3.2 測位性能評価

全国の電子基準点から複数のモニタ局を選定し、このサービスの補強情報を適用後の測位精度を解析によって求

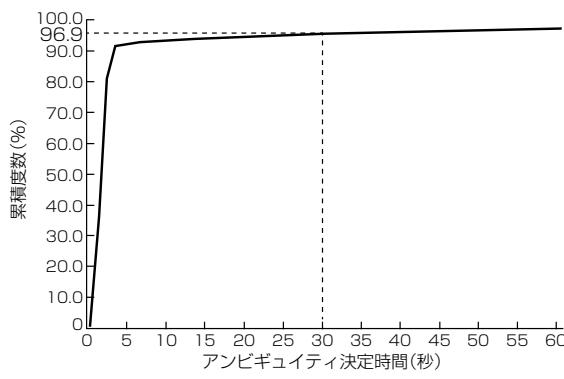


図3. アンビギュイティ決定までの時間

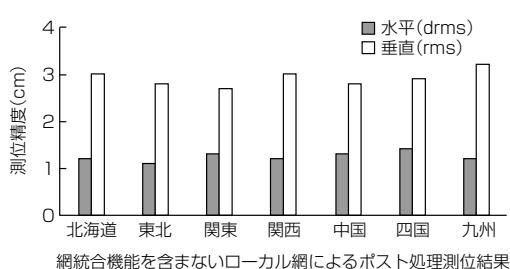


図4. 測位精度の一例

表3. 移動体測位時の再初期化時間の一例<sup>(注3)</sup>

周回	従来方式(秒)	CLAS(秒)
1	27	10
2	21	18
3	20	15
4	20	13

(注3) 網統合機能を含まないローカル網によるリアルタイム測位結果

めた結果の一例を図4に示す。水平精度は約1cm(drms)、垂直精度は約3cm(rms)といずれも仕様値を満たす結果が得られている。

次に、移動体への適用時の性能評価の一例を示す。自動車等の移動体への適用に際しては、可用性を担保するためジャイロや車速パルス等の他のセンサとの複合航法システムを構成するが、システムの低コスト化のために、衛星測位の中止を少なくすることが求められる。具体的には、建物やトンネル等の遮蔽物の影響によって測位を中断した際に、再度精密解が得られるまでの時間を短くする必要がある。表3には、当社鎌倉製作所のテストコースで試験車両を複数回走行させ、電波遮蔽物を通過後、再度精密解を得るまでに要した時間を計測した結果を示す。

CLASは、高い伝送効率を確保しつつ、比較対象である従来のネットワークRTK方式に対して、良好な性能を示していることが分かる。

### 4. むすび

2018年度の実用準天頂衛星システムのサービス開始に向けて開発中のセンチメータ級測位補強サービス(CLAS)の開発状況について述べた。このサービスは、日本全国を対象にセンチメータ級の位置情報を提供するものであり、IT農業、情報化施工等様々な用途が期待される。また、三次元ダイナミックマップとの連携によって自動車の自動運転への応用も期待される。このシステムの完成に向けて、測位チューニングを継続するとともに、ユーザー拡大の活動を促進するため、2017年初めからの試験放送期間中に各種の利用実証を実施する計画である。また、各測位受信機メーカーに対しては、補強データ伝送フォーマットの国際標準規格化を推進して必要な技術情報を提供することで、対応する端末の早期の製品化を求めていく。

### 参考文献

- 準天頂衛星システムサービス(株)：“準天頂衛星システムサービスユーザインタフェース仕様書 センチメータ級測位補強サービス編”について、IS-QZSS-L6-001(Draft) (2016)
- 準天頂衛星システムサービス(株)：“準天頂衛星システムサービスパフォーマンススタンダードセンチメータ級測位補強サービス編”について (2016)
- RTCM Standard 10403.2 : Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services, RTCM Special Committee No.104 (2013)
- RTCM SC-104 QZSS Working Group : Specification of Compact SSR Messages for Satellite Based Augmentation Service, RTCM Paper 008-2016-SC104-922 (2015)

# 準天頂衛星システム 利活用の構想及び実証成果

廣川 類\*  
安光亮一郎\*  
島 嘉宏\*\*

Overview of Application on Quazi-Zenith Satellite System and Result of Demonstration

Rui Hirokawa, Ryoichiro Yasumitsu, Yoshihiro Shima

## 要旨

2018年度から実用サービスが開始される準天頂衛星システム(QZSS)では、その特長であるセンチメータ級測位補強サービス(CLAS)によってIT農業、情報化施工、自動車の自動運転・安全運転支援等の新たな分野での利活用が期待されている。CLASでは、利用拡大に向けた試験サービスを2017年初めから実施するとともに、レンタル利用が可能なプロトタイプ端末を用意して利用実証を希望するユーザーに対応している。この端末は移動体測位に対応しており、水平6cmの測位精度を確認している。

センチメータ級での利用拡大が期待される自動車分野では、三次元ダイナミックマップの整備を並行して進めることで、自動運転システムの可用性拡大や性能向上が期待できる。また、IT農業分野では、農機運転の自動化による

省力化や精密土壤マップ・肥料散布地図の活用による単位面積当たりの収穫量拡大への貢献が期待できる。自動車市場分野へ高精度測位の応用拡大に向けては、自動車の市場の中心が海外であることから、同種のサービスの海外展開が強く望まれる。準天頂測位システムが対応可能なアジア・オセアニア地域については、豪州や台湾を始めとする基準点網を整備済みのエリアを中心に、利用実証を開始している。また、他のアジア主要国の多くでも基準点網を整備する計画があり、CLASの普及が期待できる。一方、欧米については、補強サービスや地図インフラの標準化活動等を通じて補強サービスプロバイダ、測位端末メーカー等の仲間を増やしていく、補強サービス業者が異なる場合でも同一の端末を使用できる仕組みを構築する計画である。



GPS : Global Positioning System

## 準天頂衛星システムによる高精度測位の想定利用シーン

準天頂システムのセンチメータ級測位補強サービスが実現する高精度測位は様々な利用が期待されている。代表的なアプリケーションとしては、自動車の自動運転・安全運転、ロードプライシングによる安全・環境への貢献、鉄道の運行管理や保守、災害前後解析・災害状況把握等の災害に強い街づくり等が挙げられる。

## 1. まえがき

2018年度から準天頂衛星システム(QZSS)の実用サービスが開始される。QZSSは、米国のGPSと互換性を持つ測位信号を配信する補完サービスと、測位信号を補正することで高精度化する補強サービスで構成される。QZSSの特長として、日本全国で水平6cmの高精度測位を可能にするセンチメータ級測位補強サービス(CLAS)の提供が挙げられる。

本稿では、利用拡大に向けたCLASの実証機会の提供とCLASによって広がる利活用の構想について述べる。

## 2. CLASのサービス開始に向けた利用実証環境整備

### 2.1 サービスの仕様定義

CLASのサービス仕様PS-QZSS<sup>(1)</sup>及びユーザーインターフェース仕様IS-QZSS-L6<sup>(2)</sup>は、準天頂衛星システムサービス(株)(QSS)が運営するWebサイト上で提供される。PS-QZSSは、サービス範囲、精度、アベイラビリティ、継続性、インテグリティ、初期化時間で構成されている。IS-QZSS-L6では、信号仕様、メッセージ仕様及び主要なユーザーアルゴリズムが提供されている。IS-QZSS-L6での測位補強情報に関するユーザーインターフェースポイントを図1に示す。CLASによる補強サービスは、主に多周波の搬送波位相観測が可能な受信機を対象とする。各國の衛星測位信号は、L1帯(1.5GHz)、L2帯(1.227GHz)及びL5帯(1.176GHz)を利用しておおり、既存の高精度受信機はこれらの信号に対応している。一方、CLASはL6帯(1.278GHz)を利用しており、L6対応の受信機を用意する

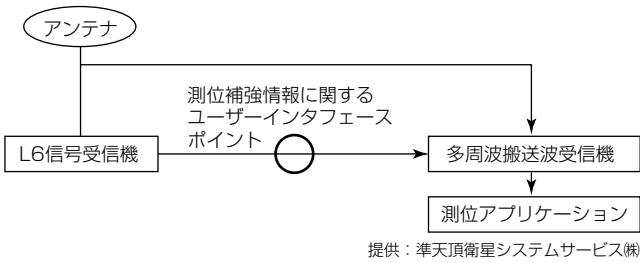


図1. CLASユーザーインターフェースポイント



図2. CLASプロトタイプ端末

か、既存の受信機を拡張する必要がある。これらの仕様を参照することで、CLAS利用ユーザー、測位受信機メーカーは、独自の利用開発を推進できる。

### 2.2 利用実証インフラの整備

CLASは、2017年初めに予定している準天頂衛星初号機のQSSへの運用移管後に試験配信を連続的に行う予定である。QSSでは、複数のGNSS信号とL6信号に対応し、CLAS補強サービスによる高精度測位が可能なプロトタイプ端末(図2)を利用拡大用に準備しており、希望する利用者はレンタル利用して評価を行うことができる。表1にCLASプロトタイプ端末の仕様を示す。また、この端末による測位結果の一例として2016年10月6日に関西地域で計測した定点試験の測位結果を図3に示す。水平3.7cm(95%, drms)、垂直5.8cm(95%, rms)と高い測位精度が得られている。

## 3. CLASの利活用の構想

### 3.1 CLASの高精度位置情報利用社会の到来

CLASの主な想定用途は、測量、情報化施工、IT農業分野であり、工機・農機運転の自動化などによる効率化、省力化が期待されている。また、高精度三次元位置情報に

表1. CLASプロトタイプ端末の仕様

項目	仕様値
補強対象信号	GPS : L1C/A, L1C, L2P, L2C, L5 QZSS : L1C/A, L1C, L2C, L5
補強信号	QZSS : L61, L62
測位方式	PPP-RTK方式
測位出力形式	NMEA-0183形式(USB又はイーサネット <sup>(注1)</sup> )
出力レート	10Hz以上
アンテナ	JAVAD製 GrAnt-G5T
電源	電圧：DC 9～30V、消費電力：25W以下

(注1) イーサネットは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。

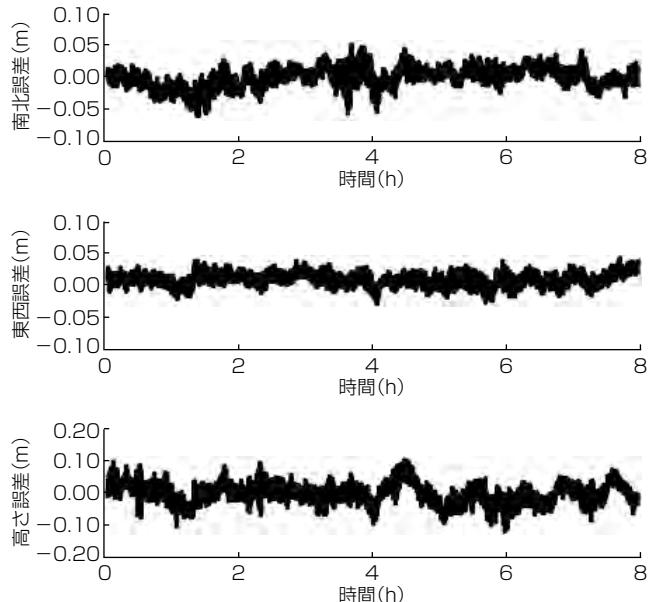


図3. CLASプロトタイプ端末による測位結果

に関する共通基盤と併せ、自動車の自動運転・安全運転支援やロードプライシング、鉄道の運行管理や保守等への展開も期待されている。さらに、精密な三次元位置情報に基づく、防災・減災といった災害に強い街づくり、老朽化した社会インフラの管理効率化等も用途として構想されている。特に就農者の高齢化が進む農業分野、省力化による生産性向上が求められる建設分野・情報化施工分野における機械の自動化に大きな貢献が期待される。

### 3.2 CLAS利用拡大の方向

準天頂衛星システムの計画では、宇宙基本計画に基づき、2017年に3機の実用衛星を打ち上げ、2010年に打ち上げている実証衛星の1号機を加えて、2018年に4機体制で実用サービスを開始する。さらに、2020年に設計寿命に達する1号機の後継機を打ち上げた後、2023年までに3機を追加して、持続測位可能な7機体制を確立する。4機体制でのCLASのサービス提供範囲は日本国内を対象とするが、将来的にはアジア・オセアニア地域への拡張が可能である。各国で整備済み又は整備が進む基準点網を活用することによってPPP(Precise-Point Positioning)-RTK(Real Time Kinematic)方式に基づくCLASの海外展開がなされ、各国の農業、鉄道、自動車分野等への応用が期待される。各国の測位インフラ基盤運営機関との連携の下、産業競争力を強化し、持続的な成長を実現する経済の好循環を創出することができると考える。次に具体的な利用拡大分野として、自動車と農業における適用例を示す。

### 3.3 自動運転・安全運転支援

デジタル地図の三次元化及びダイナミックマップ化に伴い、高精度衛星測位と車載センサとの複合センシングが可能になり、自動車の水平・垂直方向の位置精度が向上する。これによって、車線単位での経路検索が可能になり、自動運転・安全運転支援の実現に貢献できる(図4)。また、道路勾配等の影響によって、これまでカメラやレーダ等でのセンシングが困難であった箇所でも情報取得が可能になり、上り坂頂上付近の見通しが悪いところで徐行をしたり、勾配に応じた速度調整によって渋滞を緩和したり、出会いがしらの交通事故を低減できる可能性がある。

### 3.4 IT農業分野

農地のデータを三次元化することによって、日本に多く存在する傾斜・勾配地の田畠などでも自動走行が可能になる。例えば、センサと組み合わせて高さや斜面方向(日照、水はけ等)に応じたきめ細かな管理が可能である。さらに、農業従事者の高齢化が進み、以前よりも作業の安全性や省力化が求められるが、三次元位置情報を用いることで作業の自動化が進むことによって、作業の安全性向上・省力化に貢献することが期待できる。

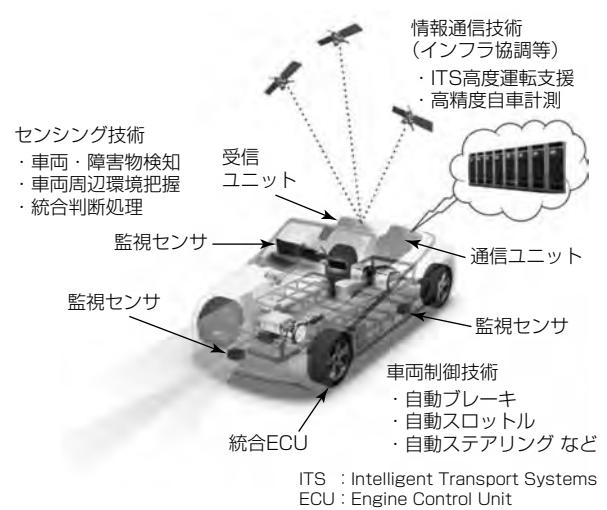


図4. 自動運転・安全運転支援への貢献

## 4. むすび

2018年度からの実用サービスの提供開始に向けて開発中の準天頂衛星システムの実証状況及び利活用構想について、センチメータ級測位補強サービスの利活用を中心に述べた。各国がそれぞれ衛星測位システムを整備するマルチGNSS(Global Navigation Satellite System)の時代となり、2020年代には140機近い測位衛星が運用される時代となる中で、最大衛星機数も7機と少なく、サービス範囲もアジア・オセアニア地域に限定される準天頂衛星システムが確固たる地位を保つためには、センチメータ級測位補強サービスを始めとする特長あるサービスを広域に展開し、関連する市場を早期に立ち上げていくとともに、継続的に市場のフィードバックを取り込んで改善を続け、より広範なニーズに応えていく必要がある。

## 参考文献

- (1) 準天頂衛星システムサービス(株)：“準天頂衛星システムサービスパフォーマンススタンダードセンチメータ級測位補強サービス編”について, PS-QZSS (2016)
- (2) 準天頂衛星システムサービス(株)：“準天頂衛星システムユーザインタフェース仕様書 センチメータ級測位補強サービス編”について, IS-QZSS-L6-001 (Draft) (2016)
- (3) RTCM Standard 10403.2 : Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services, RTCM Special Committee No.104 (2013)
- (4) RTCM SC-104 QZSS Working Group : Specification of Compact SSR Messages for Satellite Based Augmentation Service, RTCM Paper 008-2016-SC104-922 (2015)

阿波祐二\*  
今城正雄\*  
安藤聰祐\*

# 先進光学衛星の目的と技術

Purposes and Technologies of Advanced Optical Satellite

Yuji Awa, Masao Imaki, Akihiro Ando

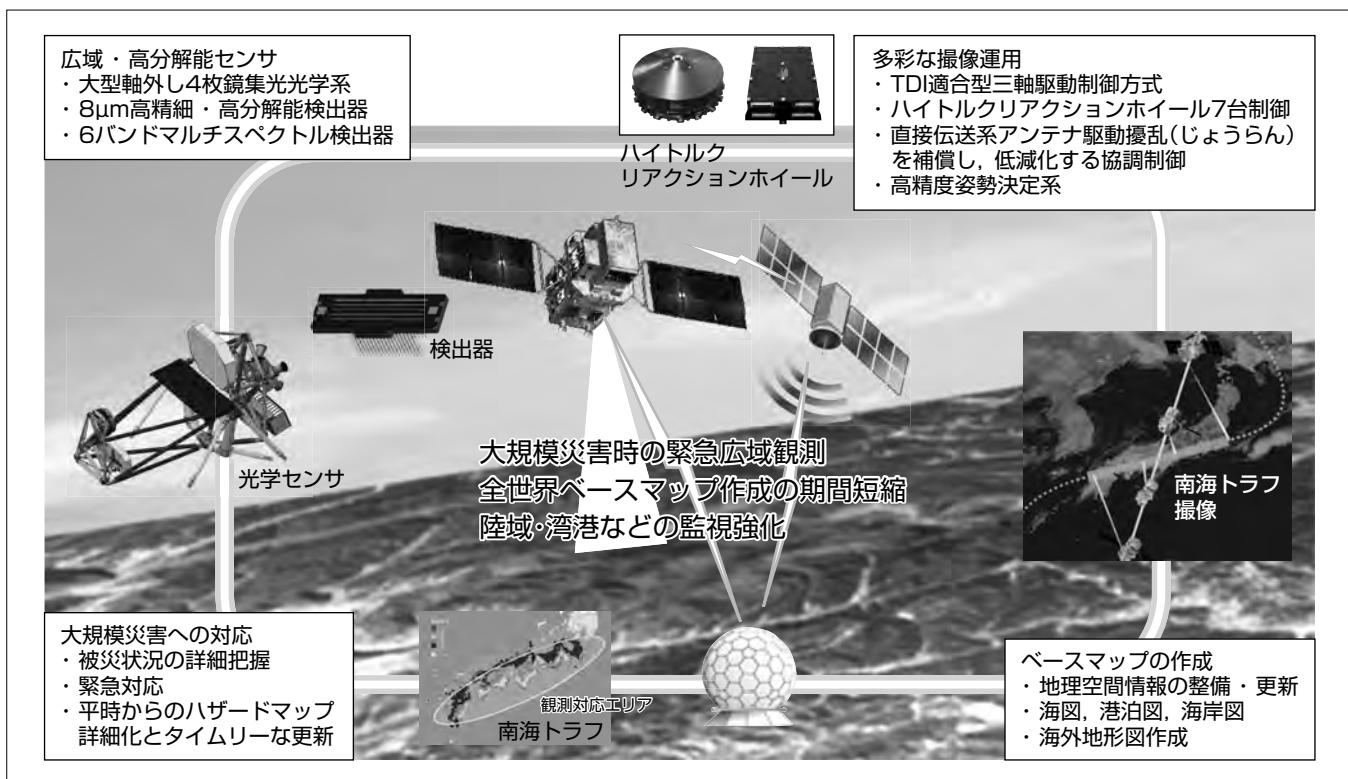
## 要旨

先進光学衛星は、陸域観測技術衛星“だいち”(Advanced Land Observing Satellite : ALOS)で獲得した広域・高分解能観測機能を発展させ、分解能 1 m 以内で日本全域を高頻度に観測し、広義の安全保障、地図・地理空間情報の整備・更新等、様々なニーズに対応することを目的に国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)の下、開発を進めている。

これらの目的の実現に向けて、先進光学衛星の光学センサには、広い観測幅と高分解能を両立させるために“大型軸外し 4 枚鏡集光光学系”を採用した。欧米の高分解能衛星が搭載する“コルシュ光学系”に対し、広域・高分解能性能の両立を実現している。また、衛星バス技術としては、①災害時の緊急対応の画像取得撮像と②効率的な地図・地

理空間情報(ベースマップ)取得を実現するために、衛星システムの構成を次のとおりとした。

- ①ハイトルクリアクションホイール(RWA) 7 台の最適配置によって、1,500 km に及ぶ南海トラフ地震発生領域の緊急時の広域撮像を可能にする機動性に優れた姿勢制御システムを採用した。
- ②“だいち 2 号”(ALOS-2) の観測データ伝送系の 2 倍の伝送速度要求を実現するために、Ka 帯による 1.6 Gbps の世界最高速度の伝送系を採用するとともに、取得画像データの蓄積容量制約を排除するために、フラッシュメモリによる 950 G バイト以上の大容量データレコーダを採用した。



## 先進光学衛星の役割と適用技術

先進光学衛星は、防災・災害対策等を含む広義の安全保障、地図・地理空間情報の整備・更新等の様々なニーズに対応することを目的にしている。開発に当たって、TDI(Time Delayed Integration)適合型三軸駆動制御方式等の当社独自の多彩な撮像制御技術とミラーや検出器等の当社が持つ光学センサ製造技術を駆使し、世界最先端の性能を実現する。

## 1. まえがき

日本での光学センサを搭載した地球観測衛星は年々進歩を遂げ、2006年に打ち上げた陸域観測技術衛星だいち(ALOS)ではパンクロ(Pa)：2.5m、マルチ(Mu)：10mの分解能を達成し、災害監視や地図作成等の分野に広く活用された。先進光学衛星ではこの高性能化トレンドを継続・継承することで国内光学センサ技術の確保に貢献するとともに、更に技術を発展させることによって、防災・災害対策等を含む広義の安全保障、地図・地理空間情報の整備・更新等、様々なニーズに対応することを目的として開発を進めている。

図1に地球観測衛星性能ベンチマークとして、近年開発された海外光学センサに対する先進光学衛星の性能比較を示す。地球観測衛星のミッション性能は、高分解能・狭観測幅(狭域)、低分解能・広観測幅(広域)といった2つのトレンドに大別される。これは搭載する光学系の性質によって方向性が分かれることに起因する。先進光学衛星では両者の特長を兼ねそろえた性能である“広域・高分解能”を実現する。図2に搭載する光学センサの波長域を示す。先進光学衛星では“だいち”と比較してMuバンド数を4から6バンドに増加させ、植生・土壤分析等の定量分析機能を向上させている。

図3にユーザーニーズと、それに対応する先進光学衛星技術を示す。日本の地球観測衛星として“大規模災害への対応”と“ベースマップの作成”に対する要求は高い。大規模災害に対し、被災状況を詳しくかつタイムリーに把握することが重要であり、観測衛星には高分解能・即時性が

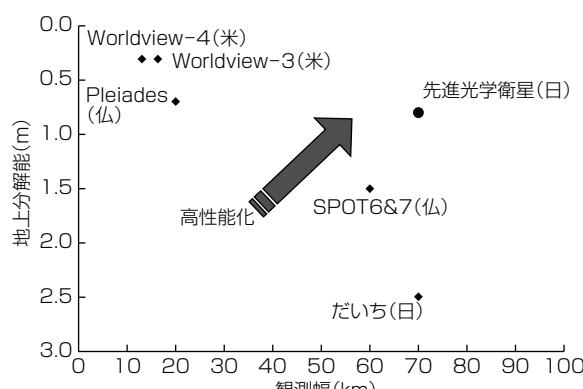


図1. 衛星搭載光学センサベンチマーク

求められる。また、平時との比較が必要なことから、被災前のデータ収集を効果的に速やかに実施することが必要で、広域性・高頻度が要求される。これらの要求に対し、先進光学衛星では、広域・高分解能の光学センサを搭載し、緊急撮像にも対応したフレキシブルな撮像運用が可能な機能を具備する。ベースマップの作成に関しては、地形図や海図又は頻繁に変更する都市部の地形を詳細にデータ収集することが重要で、詳細で正確なデータを幅広く・高頻度に収集することが求められる。先進光学衛星では、広い領域を高分解能で画像取得し、大容量の画像データを処理可能な伝送システムを実現する。また、多波長センサを具備し、画像データから植生や土壤の定量的分析が可能である。

本稿では、これまでに開発した地球観測衛星の技術をベースに、先進光学衛星に要求される広域・高分解能の大形光学センサ及びその特長を十分に活用したバス技術について述べる。

## 2. 先進光学衛星システム

### 2.1 性能

表1に先進光学衛星システムの諸元を示す。この衛星は当社標準プラットフォームバスであるDS2000をベースとした観測衛星システムである(図4)。広域・高分解能の光学センサを搭載し、大容量の画像データの伝送システムとして光衛星間通信機器を搭載した光データ中継衛星との光衛星間通信リンクによる大容量データ伝送を実現する構成としている。

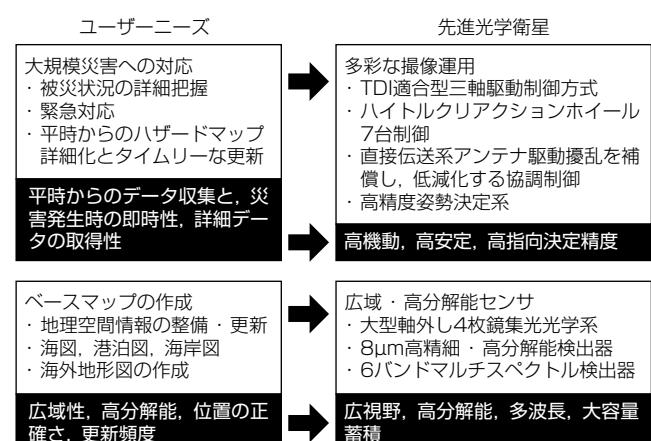


図3. ユーザーニーズと先進光学衛星技術

衛星	波長	400nm			500nm			600nm			700nm			800nm																									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9								
先進光学衛星	Pa																																						
	Mu/バンド1	Coastal																																					
	Mu/バンド2							Blue																															
	Mu/バンド3										Green																												
	Mu/バンド4											Red																											
	Mu/バンド5												RedEdge																										
	Mu/バンド6																																						
だいち	Pa																																						
	Mu/バンド1					Blue																																	
	Mu/バンド2								Green																														
	Mu/バンド3										Red																												
	Mu/バンド4											RedEdge																											

図2. センサバンド

表1. 先進光学衛星システムの諸元

軌道高度	670km(赤道上)
軌道種別	太陽同期準回帰軌道
降交点通過地方太陽時	10:30
回帰日数	35日
ミッション	広域・高分解能の光学観測
データ伝送系	直接伝送(Ka帯: 1.6Gbps以上, X帯: 0.8Gbps以上, 光データ中継)
質量	2,700kg以下(打上時)
寸法	5×14×3.5(m)(太陽電池パドル展開時)
設計寿命	打ち上げ後7年

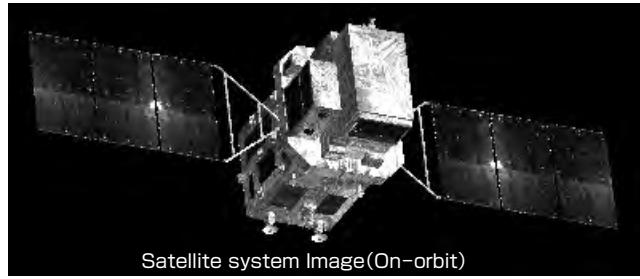


図4. 先進光学衛星システムのイメージ

表2. 広域・高分解能センサの諸元

センサバンド	Pa/Mu 6バンド
地上分解能(GSD)	Pa: 0.8m/Mu: 3.2m
観測幅	70km
波長域(Pa)	520~760nm バンド1: 400~450nm バンド2: 450~500nm バンド3: 520~600nm バンド4: 610~690nm バンド5: 690~740nm バンド6: 760~890nm
波長域(Mu)	量子化ビット数 11ビット

## 2.2 観測ミッションの性能

表2に広域・高分解能センサの諸元を示す。焦点面分光方式を採用しPa・Muセンサを同一鏡筒で集光する。特にMuセンサは6バンドを持ち、植生や土壌分析等に効果的な波長帯を設定している。光学系は軸外し4枚鏡を採用して広域と長焦点を両立させ、検出器に宇宙用TDI-CCD(Charge Coupled Device)としては最高性能である画素ピッチ8μmを採用することで“広域・高分解能”的な光学センサを実現している。

## 3. 先進光学衛星適用技術

### 3.1 多彩な撮像運用を可能にする衛星システム

先進光学衛星では光学センサにTDI-CCDを適用する。この検出器は光電変換された信号成分を電荷レベルで転送する構造を持っており、転送方向と転送タイミングに対し衛星進行方向と視点移動速度を合わせることによってアナログ信号加算を可能にする。S/N比(Signal to Noise ratio)を実効的に向上させる非常に有効な手段である。ただし、この検出器は信号加算期間にわたって指向軸を安定して制御する必要があり、一般的なプッシュブルーム撮像制御だけでは効果的な信号積算や様々な地上対象に対す

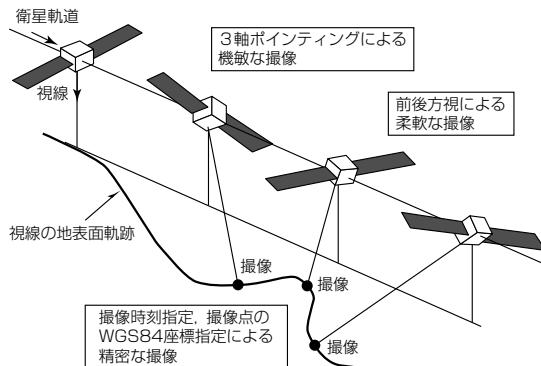


図5. TDI適合型三軸駆動制御



図6. ハイトルクリアクションホイール

る柔軟な撮像に対応できない場合がある。特に先進光学衛星では南海トラフ等の大規模な地形画像を一度に取得するといった要求がある。1回の撮像が長時間に及ぶため、長時間の高精度な指向制御が必要になる。この要求に対し先進光学衛星では当社が培ってきた姿勢制御技術を活用し、TDI適合型三軸駆動制御方式(TDI Pointing Control: TPC)を適用する(図5)。

TPCは、視点運動見積りを厳密に求める(数値解析)ことによって制御誤差を抑制するとともに、ロール方向だけではなくピッチ・ヨー方向も含めたフレキシブルな3軸のポインティング制御で様々なターゲットに対応可能な方式である。

また、先進光学衛星は高いアグリティ性能を確保するためにハイトルクリアクションホイール(HTRW)(図6)を7台搭載する。ロール軸だけではなく、南海トラフ撮像や立体観測時に求められるピッチ・ヨー軸の動力性能を高めるため、7台の配置形状を最適化することで、直下方向に対して60°ポインティング時にも迅速に撮像可能な構成としている。

### 3.2 広域・高分解能光学センサ

#### 3.2.1 広角集光光学系

衛星搭載用光学センサはフェアリング寸法制限等の打上げ環境に対応するため、コンパクトな光学系が要求される。一方、広域・高分解能化への要求はともに光学系を大きくする設計(長焦点距離・広視野化)となり、コンパクト化と相反する。先進光学衛星では6°の広い視野を確保するために軸外し光学系タイプを選択し、4枚のミラーの全てに曲率を持たせることによって従来の3枚方式に比べて全長を30%短くした光学系を設計した。これによって“広角・高分解能”なコンパクトな集光光学系を実現する(図7)。

構造設計としては、4枚全てのミラー支持にバイポッド方式を採用することによって光学系を低歪(ひずみ)で保持し、各ミラーの面変形を抑制している。鏡筒は熱変形ノミ

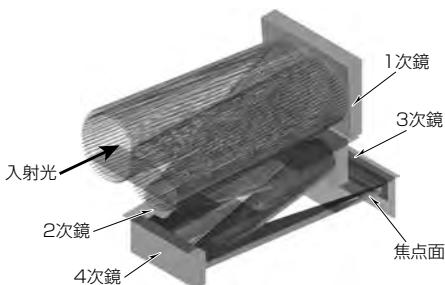


図7. 広角集光光学系



図8. 高安定鏡筒とミラー支持構造



図9. ミラーの製造フロー

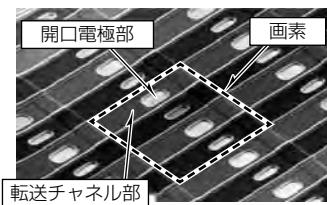
ナルゼロ・膨潤変形ゼロのCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)ロッドを採用することで光学系を高安定に保持し、各ミラー間のアライメントずれを抑制している(図8)。

ミラー素材にはゼロ膨張ガラスであるクリアセラムZ<sup>(注1)</sup>を採用し、衛星搭載向けに強度を確保しつつ軽量化を実施している。先進光学衛星では硝材からミラー面研磨、光学系組立て調整と、全製造・試験工程を国産メーカーで実施する。特に軽量化加工は自社工程であり、これまで5組の光学系を製造、軌道上実績を上げている(図9)。

(注1) クリアセラムは、株オハラの登録商標である。

### 3.2.2 高精細TDI-CCD検出器

集光光学系と並んで光学センサのキーパーツである検出器は、当社開発品であるTDI-CCDを採用する。当社熊本製作所のSi(シリコン)プロセスを用いてウェーハ製造し、当社鎌倉製作所でアセンブリ化している。素子の基本構造は当社独自の表面入射構造をベースとしており、高感度ながら高いMTF(Modulation Transfer Function)性能を両立した構造である。衛星搭載用として国内で先駆けて画素ピッチの高精細化に取り組み、先進光学衛星で採用する画素ピッチ8μmは国内唯一の軌道上実績を持つ。Mu検出器は32μmピッチの画素構造で6バンドの波長帯で個別に画像取得が可能である。ステッパマルチ転写を駆使し、6バンドの検出器素子を1つのパッケージに実装可能とした(図10)。



(a) 走査型電子顕微鏡の画像



(b) Mu検出器

図10. TDI-CCD構造

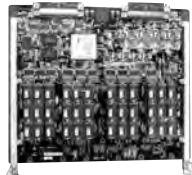


図11. MDPのメモリボード試作品

表3. メモリボードの主要諸元

レコーダ方式	半導体メモリレコーダ(NANDフラッシュメモリ)
記憶容量	950Gバイト(EOL)以上
入力インターフェース	チャネルリンク
出力インターフェース	ウィザードリンク

EOL : End Of Life

### 3.2.3 国産データレコーダ

先進光学衛星に搭載するミッションデータ処理装置(MDP)は、大容量の画像データを扱うため、2007年からJAXAと開発を進めてきた国産NVDR(Non-Volatile Data Recorder)の開発技術を適用する。国産NVDRで用いたフラッシュメモリは、従来のデータレコーダーに用いられてきたSDRAMに比べて圧倒的にデバイスの記録容量密度が向上するメリットがある。一方で、アクセス速度の観点及び不良ブロックの発生などの宇宙用途に対して克服すべき課題があるが、インターリープアクセス方式の採用や誤り訂正技術の適用によって宇宙用としての性能・信頼性を確保している(図11及び表3)。

図12. パンシャープン画像

図12に示すは、パンシャープン画像です。これは先進光学衛星で得られた1m級分解能の光学画像シミュレーションによって得られたものです。

## 4. む す び

先進光学衛星は、日本の観測衛星技術を発展させるとともに、防災・災害対策等を含む広義の安全保障、地図・地理空間情報の整備・更新等のニーズに貢献することを目的として開発を進めている。当社独自の多彩な撮像制御技術と光学センサ製造技術を駆使し、世界最先端の性能の実現に向け開発を実施中である。図12は先進光学衛星で得られる1m級分解能の光学画像シミュレーションによって得られたパンシャープン画像である。全地球規模での画像データ取得によって日本だけではなく世界中の様々なニーズに対応する。

## 参 考 文 献

- (1) 匂坂雅一：先進光学衛星について、第2回先進光学衛星利用ワークショップ (2016)
- (2) 度會英教：衛星システムの概要と観測性能、第2回先進光学衛星利用ワークショップ (2016)

# 陸域観測技術衛星ALOS-2の利用状況

小宮山倍子\*  
麻生紀子\*\*

Usage Situation of Advanced Land Observing Satellite - 2

Masuko Komiya, Noriko Aso

## 要 旨

陸域観測技術衛星2号“だいち2号”(Advanced Land Observing Satellite-2 : ALOS-2)は、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)の下、開発が進められ、2014年5月24日にH-II A24号機によって打ち上げられた。高性能マイクロ波センサ“Lバンド合成開口レーダ PALSAR-2(Phased Array-type L-band Synthetic Aperture Radar-2)”を搭載し、災害状況把握、地球規模の環境問題への対応、経済・社会への貢献をミッションとする。合成開口レーダ(SAR)は昼夜や天候によらず観測可能という特長を持つが、特に地殻変動や植生状態把握に優れるLバンド帯域のSARは日本が継続的に開発・発展させてきたセンサであり、PALSAR-2はふよう1号(Japanese Earth Resources Satellite-1 : JERS-1)、だい

ち(ALOS/PALSAR)に続く3世代目となる。

ALOS-2衛星開発では、前号機ALOSで得られた様々な知見を反映し、新たにスポットライトモード(分解能1~3m)や広域観測490kmモードを追加し、幅広いニーズに対応する。左右観測機能を持たせることに加えて、観測可能領域を約3倍に拡大して観測頻度を向上させ、ALOSで実施していた災害観測等の高度化とともに、今後の海洋状況把握等でも利用が期待される。

ALOS-2で取得された画像は、2014年8月20日の定常運用移行後、国土地理院等による定常的地殻変動モニタリング、関東・東北豪雨や熊本地震等の災害状況把握等、国内外の災害状況把握や地域観測等、幅広い分野で利用が進んでいる。



## ALOS-2の概要とデータ利用

ALOS-2は、ふよう1号(JERS-1)、だいち(ALOS/PALSAR)に続く3世代目となるLバンド合成開口レーダPALSAR-2を搭載している。2014年8月20日の定常運用移行後、取得された画像は、災害時の防災機関による利用とともに、平常時でも国土地理院や気象庁による地殻変動や火山活動の定常監視、海上保安庁による海氷観測等の利用が定着している。

## 1. まえがき

衛星搭載SARは、安全保障、海域(油流出、流氷監視等)、陸域(地理情報、農業等)等、幅広い分野で利用されているが、近年は更なる高分解能化、広観測幅化とともに複雑なニーズに応えるため、コンステレーション型の衛星システムも増えつつある。表1に各国の衛星搭載SARを示す。

ALOS-2搭載のPALSAR-2は、ふよう1号(JERS-1)、だいち(ALOS/PALSAR)に続く3世代目であり、前号機のALOSユーザや新たなユーザーからの要望を反映し、ALOSから様々な性能向上を図っている。

本稿では、2章でALOSから性能向上を図ったALOS-2システムについて述べ、3章で国内外でのALOS-2データの利用状況について述べる。

## 2. ALOS-2“だいち2号”システム概要

ALOSからの主な向上点は、次のとおりである(表2)。

- (1) 回帰日数を46日から14日に短縮し、干渉SAR処理などで必要となる同一観測条件の機会を増加した。
- (2) 左右観測や入射角範囲の拡大によって観測可能範囲を大幅に拡大した。
- (3) 84MHzの帯域幅によってLバンドでは最高の分解能(レンジ方向3m)を実現した(図1)。さらに、アジャス方向分解能1mのスポットライトモードを新規整備した。
- (4) 高速マルチモード変調器による800Mbpsの高速直接伝送を実現した。

### 2.1 衛星システム

図2にALOS-2の外観と主要諸元を示す。主センサと

表1. 各国の衛星搭載SARの概要<sup>(1)</sup>

国名等	衛星名	運用機関等	用途	性能等	
				周波数帯	分解能
日本	ALOS-2	JAXA	政府(多目的)	L	1~100m
米国	Lacrosse	NRO	軍事(インテリジェンス)	不明	不明
カナダ	RADARSAT-2	MDA	商用	C	3~100m
欧州	Sentinel-1	ESA	政府(多目的)	C	5~40m
	TerraSAR-X/TanDEM-X	AirBUS Defence and Space/DLR	商用	X	1~30m
	SAR-Lupe	Bundeswehr	軍事(インテリジェンス)	X	0.5~1m
	CosmoSkymed	e-Geos	商用(デュアルユース、多目的)	X	1~100m
イスラエル	TecSAR	Tsahal	軍事(インテリジェンス)	X	不明
インド	RISAT-1	ISRO	政府(多目的)	C	2~50m
	RISAT-2	ISRO	政府(多目的)	X	1~8m
中国	Yaogan6, 13, 18等	中国軍?	政府(軍用?)	不明	不明

表2. だいちとだいち2号の性能比較

	だいち	だいち2号
回帰日数	46日	14日
観測可能範囲	約870km(右方向だけ)	約2,320km(左右観測)
分解能	10m(ストリップマップ) 3/6/10m(スポットライト)	1~3m(スポットライト) 3/6/10m(ストリップマップ)
データ伝送	138Mbps(直接伝送) 及びデータ中継衛星経由	800Mbps(直接伝送) 及びデータ中継衛星経由

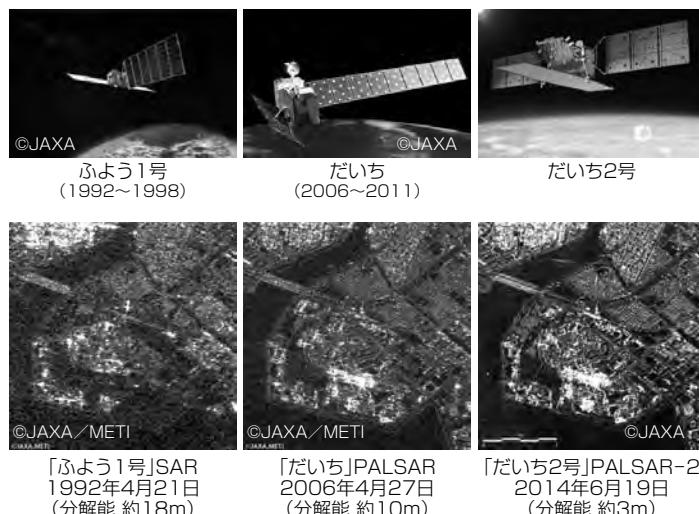
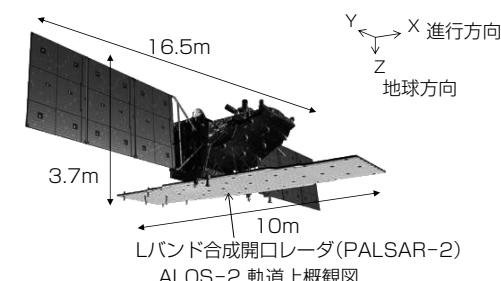


図1. 分解能向上の変遷



種類	太陽同期準回帰軌道(14日回帰)
運用軌道	628km(赤道上)
通過時刻	12:00(正午)@赤道上(降交軌道)
設計寿命	5年(目標7年)
打上	時期: 平成26年(2014年)5月 ロケット: H-IIA
衛星	質量: 約2トン パドル: 2翼パネル
ミッションデータ伝送	直接伝送及びデータ中継衛星経由
合成開口レーダ周波数	Lバンド(1.2GHz帯)
観測性能	スポットライト: 分解能: 1~3m 観測幅: 25km 高分解能: 分解能: 3/6/10m 観測幅: 50/50/70km 広域観測: 分解能: 100/60m 観測幅: 350/490km

技術実証ミッションとして小型赤外カメラ(CIRC)、船舶自動識別(AIS)信号受信機(SPAISE2)を搭載

©JAXA

図2. ALOS-2の外観と主要諸元

なる1.2GHz帯LバンドSARを搭載し、 $3 \times 10(m)$ の大型展開アンテナを持つ(図3)。ALOSでは1翼であった太陽電池パドルを2翼にしてサバイバビリティを向上させ、また、高精度自律軌道制御技術による位置・回帰精度の向上によって、基準軌道に対して半径500mのチューブ内を飛行することが可能であり、干渉SAR解析の精度向上に寄与している。また、技術実証機器として衛星搭載船舶自動識別システム(SPAISE2)を搭載している。

## 2.2 観測ミッション性能

PALSAR-2は窒化ガリウム素子の採用、ビームの二次元走査、デュアルビーム方式等の適用によって、広観測幅かつ高画質の観測が可能となっている。図4にALOS-2の観測モードを示す。ALOS/PALSARからの観測モードを継承するとともに、スポットライトモードや広域観測の観測幅拡大(490km)モードを追加、さらに、6m分解能のフルポラリメトリ(4偏波による観測)や広域観測モードの2偏波化も実現して幅広いユーザーニーズへの対応を図っている。

## 2.3 観測運用

ALOS-2の観測は、基本観測シナリオをベースとする平常時観測と災害発生時等の緊急観測に区分される。

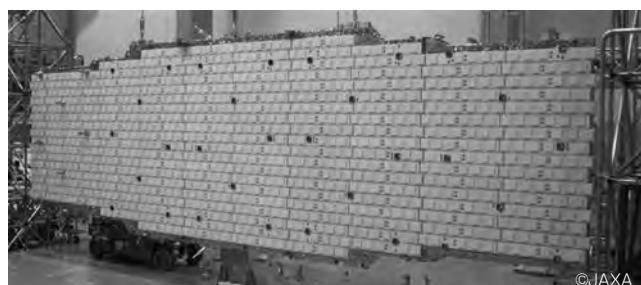


図3. 大型展開アンテナ

### (1) 平常時観測(ベースマップ)

基本観測シナリオは、ミッションの目的に合致する利用実証等に必要な観測を効率的に行うための平常時の観測計画である。シナリオは、年2回開催されるJAXAの運用調整会議でユーザー機関や配布事業者との調整の上、日本域と世界全域(日本域除く)に分けて作成される。日本域シナリオは災害時の緊急観測で発災前後の比較や地殻変動検出のための干渉SAR処理に資するベースマップ整備を目的として、様々な条件の観測を取りまとめている。

### (2) 緊急観測

災害発生時等、緊急の観測を必要とする場合には、防災機関や海外の連携機関からの要請に基づいて観測を実施する。緊急観測は、JAXA衛星利用運用センターが主体となり実施される。

図5にALOS-2の緊急観測のタイムラインを示す。ALOS-2の日本域観測時間(降交点地方太陽時)は、ALOSを踏襲しており12:00頃と0:00頃である。海外商用SAR衛星は6:00と18:00の観測が多い中で、夜中の観測が可能な点は防災ユーザーからも強く支持されている。観測要求は、最短で観測用コマンドアップリンク1.5時間前まで受付可能である。観測実施後1時間程度で標準処理データを提供、観測後2時間程度で災害速報図を提供可能である。ALOSでは受付は5時間前、画像提供は観測後3時間以内であり、ALOS-2では大幅なタイムライン改善が図られていることが分かる。

## 3. 国内外でのALOS-2データ利用

### 3.1 災害監視

ALOS-2観測運用開始後、日本では御嶽山等の火山噴火、関東・東北豪雨、熊本地震等数多く災害が発生し、観測要請に基づく緊急観測が実施されている。

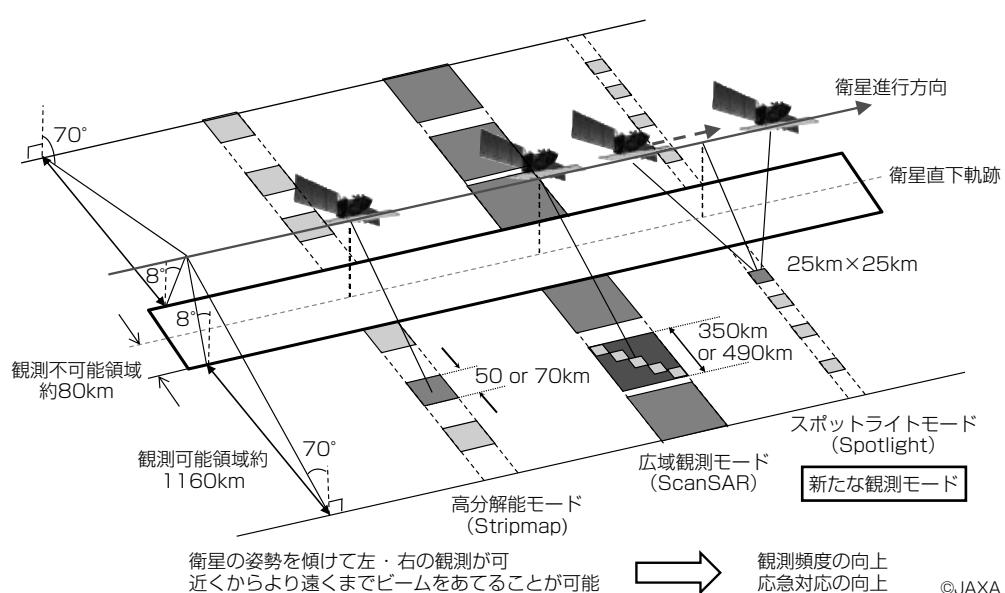


図4. ALOS-2の観測モード

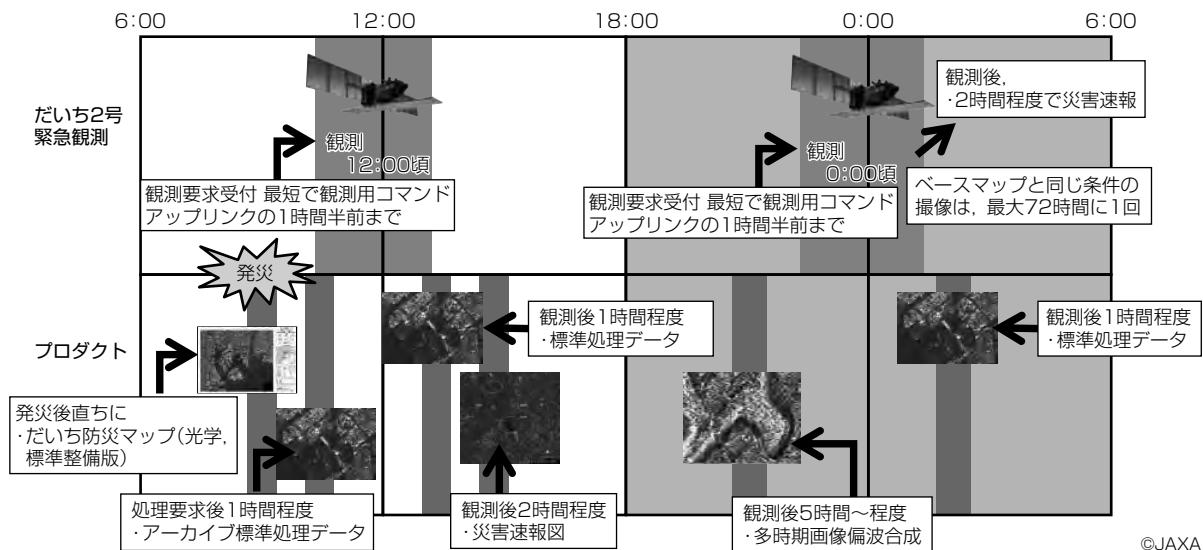
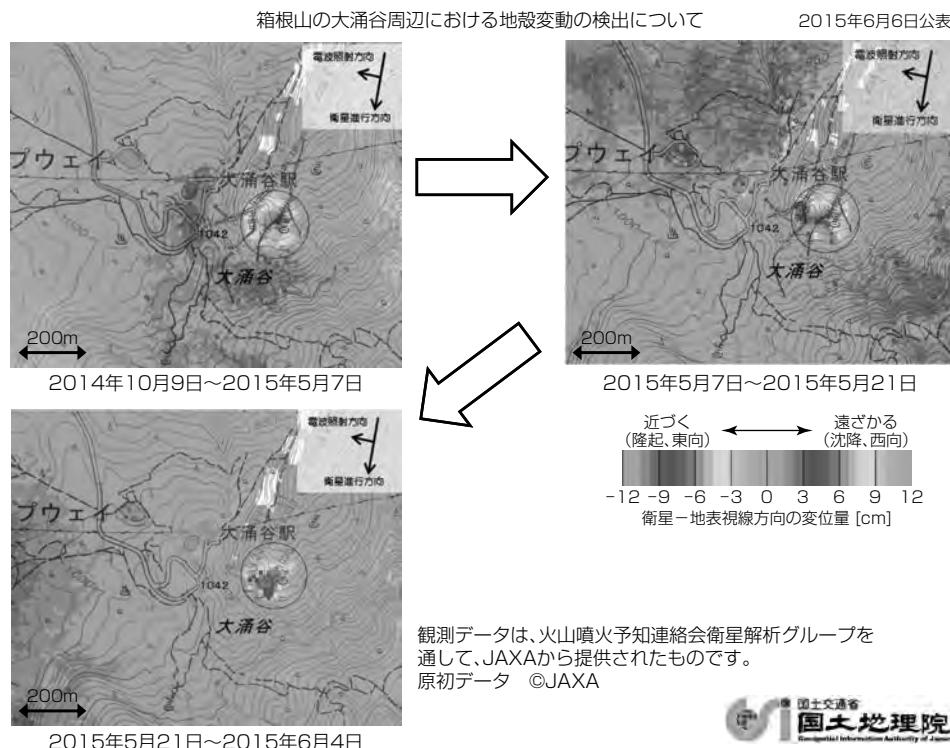


図5. 緊急観測のタイムライン



出典：国土地理院ウェブサイト <http://www.gsi.go.jp/common/000105083.pdf>

図6. 箱根山地殻変動

図6に2015年の箱根山地殻変動に対する国土地理院の解析結果を示す。箱根山の事例では、大涌谷の直径約200mの範囲で約6cmの隆起が確認され、規制区域への立入り再開及び安全対策の判断材料として活用された。

また、図7に2016年4月の熊本地震の解析結果を示す。熊本地震については、地震に伴う土砂流入や植生喪失等の状況が災害前後の画像比較によって明瞭に確認できる。

海外の災害への対応は、国際災害チャーターやセンチネルアジア等の国際連携の枠組みに基づき画像提供が行われている。2015年4月のネパール地震ではセンチネルアジア

の要請に基づき、ICIMOD(国際総合山岳開発センター)に提供するとともに、現地入りした日本赤十字社と現地支援組織に活動拠点へのアクセスルートの資料として活用された。図8に国土地理院による解析結果を示す。20cm以上の地殻変動が見られる領域は、カトマンズ北東約20kmを中心として、東西150km程度、南北100km程度の範囲で、最大で約1.4m隆起していることが推測された。

さらに、ALOS-2の高分解能・高精度化を生かした新たな防災関連の利用分野として、ダム等社会インフラの可視化が困難な微小な変動量推定手法の研究開発も始まっている。

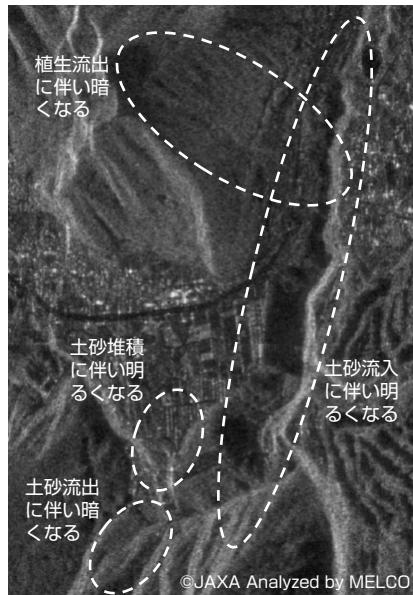


図7. 熊本地震の解析結果

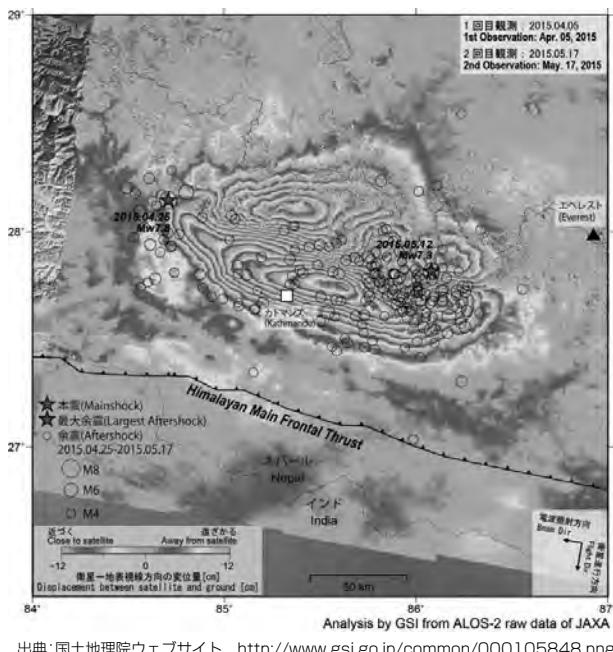


図8. ネパール地震の解析結果

### 3.2 地球観測

地球、地域観測分野では、ALOSから継続して海水観測や森林観測が行われている。

#### (1) 海水観測

オホーツク海における冬期の海水分布を迅速かつ的確に把握・周知することで船舶等の海難を防止するために設置されている海上保安庁海水情報センターでは、航空機や船舶等からの海水情報に加え、ALOS-2画像を利用し、悪天候下でも充実した海水情報を提供している。図9にALOS-2画像を利用した海水密接度の例を示す。

#### (2) 森林観測

LバンドSARは、合成開口レーダの中でも長い波長を使用するため雲や雨を透過して観測可能であり、雲の多い熱

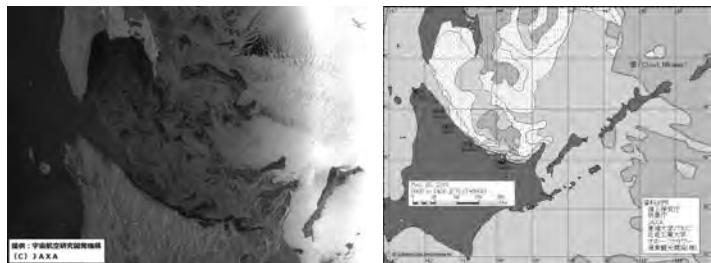


図9. ALOS-2画像と海水密接度

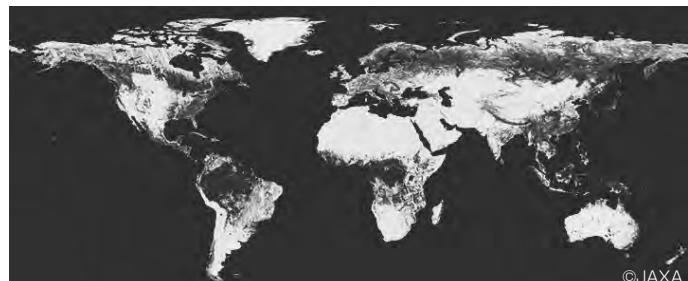


図10. 森林・非森林マップ

帶雨林でも定期的に観測できるという利点がある。JAXAでは地球温暖化や生物多様性の減少などの地球環境変化把握に資するデータとして、全球25m分解能の森林・非森林マップ(図10)を公開・更新している。

### 4. むすび

ALOS-2は、当社が培った様々な技術の集大成として開発し、世界に誇る日本のLバンドSAR衛星として現在順調に運用されている。国内では、災害時の防災機関による利用とともに、平常時でも国土地理院や気象庁による地殻変動や火山活動の定常監視、海上保安庁による海水観測等の利用が定着している。また、全球的な活動としては温暖化対策に資する森林状況モニタリング等も継続的に実施されている。

さらに、ALOS-2の高性能化によって、社会インフラのモニタリング等新たな分野への適用も様々な機関によって積極的に進められている。2020年には先進光学衛星の打上げが予定されており、SAR衛星と光学衛星の連携による統合的かつ高度な地球観測を担う社会インフラとして活躍することが期待される。

### 参考文献

- 日本航空宇宙工業会：世界の宇宙インフラデータブック2014衛星編
- 宮崎景太：だいち2号の防災対応の取り組み、ALOS-2利用シンポジウム（2015）
- 麻生紀子：陸域観測技術衛星2号「だいち2号(ALOS-2)」について、先端技術の軍事利用に関するセミナー（2015）

# 通信衛星・気象衛星の最新開発状況

関根功治\* 米地寛夫\*  
野口龍宏\*  
坂井英一\*\*

Status of Recent Communication Satellites and Meteorological Satellites Series

Koji Sekine, Tatsuhiko Noguchi, Eiichi Sakai, Hiroo Yonechi

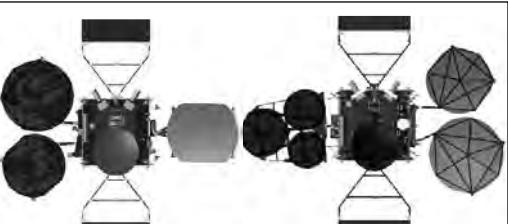
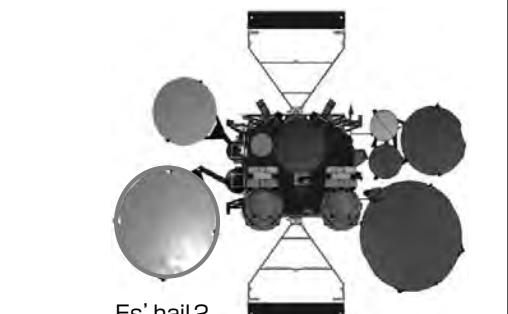
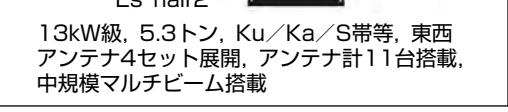
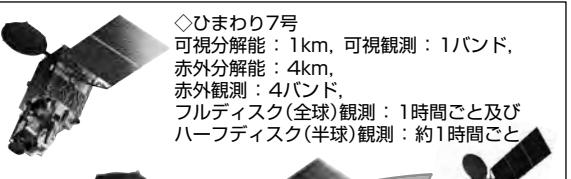
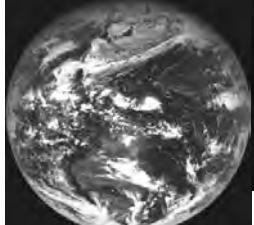
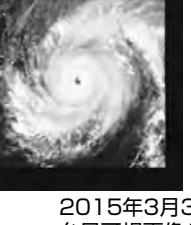
## 要旨

三菱電機の静止衛星事業は2002年打上げのデータ中継技術試験衛星(国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 当時、(独)宇宙開発事業団(NASDA))以来、通信衛星6機、気象衛星3機、準天頂測位衛星1機の着実な運用と性能向上を重ねてきており、現在7機の静止衛星標準バス“DS2000”衛星を開発製造中である<sup>(1)(2)</sup>。

通信衛星は固定通信・移動体通信等の通信インフラを定常に提供するとともに、災害時・緊急時には地上通信インフラに替わって対象地域に通信サービスを提供できる。近年Ku/Ka帯のマルチビームを用いたHTS(High Throughput Satellite)は商用通信衛星需要の過半を占めるようになっているが、更にチャネライザやビームフォーミング技術を組み合わせることで、通信需要の変化に柔軟に対応した通信サービスを提供できる。当社も次世代チャ

ネライザの開発等によって最新の技術動向に対応していく計画である。当社製造の最新の商用通信衛星としては、トルコTURKSAT社の通信衛星TURKSAT-4AとTURKSAT-4B、カタールEs'hailSat社の通信衛星Es'hail 2がある。

また、気象衛星は静止軌道からの高分解能・高頻度観測によって、台風や局地的大雨等を的確に監視する上で重要な国家インフラとなっている。気象庁によって2015年7月から運用が開始されたひまわり8号は、分解能・観測バンド数・観測頻度に関してひまわり7号より大きく性能が向上している。2016年11月にはひまわり9号が打ち上げられて、静止軌道で試験中である。当社はDS2000バスに広帯域姿勢センサ・低擾乱(じょうらん)ホイール・気象ミッション計算機・UHF/Ku/Ka帯通信系を追加搭載し、気象観測に適する姿勢決定精度と低擾乱性能、通信性能を実現している<sup>(3)</sup>。

通信衛星の最新動向	気象衛星の最新動向
 <p><b>TURKSAT-4A</b> 8.6kW級, 4.8トン, Ku/Ka/C帯等, 東西アンテナ3セット展開, 中規模マルチビーム搭載</p>  <p><b>TURKSAT-4B</b> 8.6kW級, 4.8トン, Ku/Ka/C帯等, 東西アンテナ3セット展開, 中規模マルチビーム搭載</p>  <p><b>Es'hail 2</b> 13kW級, 5.3トン, Ku/Ka/S帯等, 東西アンテナ4セット展開, アンテナ計11台搭載, 中規模マルチビーム搭載</p>	 <p>◇ひまわり7号 可視分解能 : 1km, 可視観測 : 1バンド, 赤外分解能 : 4km, 赤外観測 : 4バンド, フルディスク(全球)観測 : 1時間ごと及び ハーフディスク(半球)観測 : 約1時間ごと</p>  <p>◇ひまわり8号/9号 (2014年/2016年打ち上げ) 可視分解能 : 0.5~1km, 可視観測 : 3バンド, 近赤外・赤外分解能 : 1~2km, 近赤外・赤外観測 : 13バンド, フルディスク観測 : 10分ごと及び 領域観測 : 2.5分ごと</p> <p>気象センサの性能向上</p>  <p>衛星バスの性能向上 高精度化・高速データ処理 ・放熱計姿勢角推定 長期 14μrad-p ジッタ 4μrad(<math>1\sigma</math>) ・観測データ生成・伝送 66Mbps(7号:2.3Mbps)</p>   <p>2015年3月31日気象庁提供の 台風可視画像(2.5分ごとに領域観測)</p> <p>2014年12月18日 気象庁提供の初画像</p>

## 通信衛星・気象衛星の最新動向

近年、静止通信衛星ではマルチビームによる通信容量増大とともに、各チャネルの周波数・帯域のフレキシブル化も同時に進んでおり、当社もKa帯マルチビームを含む通信衛星を開発している。気象衛星ではひまわり7号に続き8号、9号を開発して最先端の気象インフラを提供している。

## 1. まえがき

本稿では安全・安心に向けた通信衛星の技術動向と当社の最新の商用通信衛星、及び広帯域姿勢決定機能と低擾乱性能を確認した、気象衛星ひまわり8号の軌道上性能について述べる。

## 2. 安全・安心に向けた通信衛星の動向

### 2.1 通信衛星のトレンド

衛星通信で近年求められている要求として、①端末の小型化と通信の大容量化、②非常時通信への対応がある。この要求に対する技術的な解として、①マルチビームによるスループット向上と②通信ペイロードの帯域・周波数・カバレッジの軌道上フレキシビリティ化が、近年実用化されつつある。これらは①衛星バスの大型・大電力化と②通信ペイロードのデジタル化によって可能となっており、欧米各社も衛星バスと通信システムの開発を加速させている。

UHF/L/S帯における狭帯域の音声中心のサービスでは、運用に制約があるケースがあるものの、ここ数年でスマートフォンサイズの衛星通信端末が出現している。一方、比較的広帯域が確保しやすいKu/Ka帯等では、総帯域で100Gbps級のHTSと呼ばれる衛星が実現され、移動体で使用する小型のアンテナでも100Mbpsクラスの通信が可能となってきている。

### 2.2 求められる通信技術

このような動向の中で、安全・安心に向けた衛星通信システムに対して、次のような要件が求められている。

#### (1) フレキシビリティの高い通信技術

マルチビームの採用によって衛星システム全体での利用可能帯域幅は飛躍的に向上するが、ビームによって必要帯域幅が異なる。また、通信需要は定常時には都市部に集中するが、災害発生時には帯域の狭いビームで需要が急増することも想定される。このようなケースでも、柔軟に帯域や周波数を変更できる衛星通信システムへの要望が高まっている。マルチビーム衛星にチャネライザやビームフォーミング技術を適用し、各照射ビームの周波数・帯域・覆域を需要に合わせて変更できるシステムである(図1)。

#### (2) デジタル化による搭載中継器の標準化

通信ペイロードの大規模化、周波数プラン・ビーム接続要求の複雑化に伴い、多数の出入力フィルタや機械スイッチ等アナログ機器だけによる設計・実装・試験は、物理的に限界となりつつある。中継器のデジタル化技術は(1)の通信フレキシビリティ確保とともに、設計標準化・実装効率向上・運用自由度向上につながる可能性を持っている。

#### (3) 干渉・妨害への耐性確保

静止軌道は物理的にも周波数的にも限られた資源である一方、静止衛星の数と使用帯域は増加の一途をたどってい

るため、隣接又は同一軌道衛星間の電波干渉問題は年々深刻化している。さらに、近年、意図的に通信衛星の運用を妨害するジャミング局の存在も問題となっており、このような干渉・妨害への耐性を持つ機能が求められている。具体的には、先に述べた周波数や覆域のフレキシビリティ機能とともに能動的にジャミングに対してヌル形成を行い、干渉・妨害を回避する技術が重要となってきている。

#### (4) 衛星管制の保全性確保

衛星管制のための通信(テレメトリコマンド)に関しては、安全・安心を提供するための衛星では保全性確保に留意する必要がある。この実現のため、管制通信データの高度な暗号化や拡散符号化、使用周波数のアジャイル化技術が求められている。

### 2.3 当社の取組み例

当社における通信衛星の開発でも、2.2節で述べた技術要件の取組みを継続的に行っている。代表的な例として、2.2節で述べた要件(1)～(3)を満たすデジタルチャネライザの開発が挙げられる。当社は2009～2012年にかけて第1世代のチャネライザを開発した<sup>(4)</sup>。さらに、帯域・チャネル数等の性能を格段に向上させた第2世代チャネライザを、現在総務省・情報通信研究機構の指導の下で開発中である。安全・安心に向けた通信衛星への期待は今後ますます拡大すると考えられ、その実現には衛星搭載系とともに、地上処理系の通信ネットワークシステム抜きに議論することはできない。今後は衛星搭載系と地上システムを統合したシステム構築を進めていく予定である。

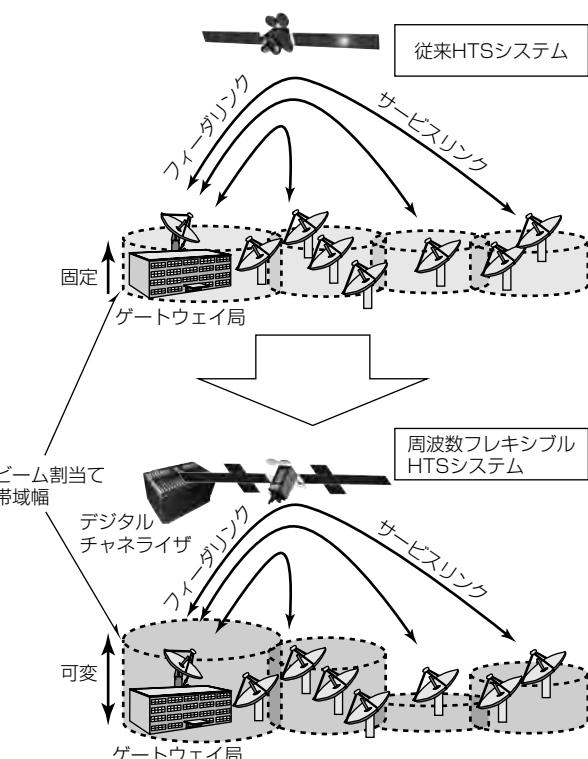


図1. 従来型HTSと周波数フレキシブルHTSの比較

### 3. 最新の商用通信衛星

#### 3.1 通信衛星TURKSAT-4AとTURKSAT-4B

TURKSAT-4A(図2)及びTURKSAT-4B(図3)は、当社がトルコの国営衛星通信会社“Turksat Satellite Communication, Cable TV and Operation AS”から受注した通信衛星で、当社静止衛星標準バスDS2000衛星としては7機目、8機目の衛星である。TURKSAT-4AとTURKSAT-4Bは、それぞれ2014年及び2015年にILS社プロトンロケットによって打ち上げられ、軌道上で設計どおりの良好な通信性能とバス性能を確認して運用されている。TURKSAT-4Bは、中規模のKa帯マルチビームペイロードを搭載しており、この実績を足掛かりに当社も今後の大規模HTSへの発展を計画している。

#### 3.2 通信衛星Es'hail 2

また、Es'hail(エスヘイル)2(図4)は、当社が2014年にカタールの国営衛星通信事業者であるEs'hailSat社から受注した通信衛星で、DS2000としては16機目のものである。2017年度にSpace-X社のFalcon-9ロケットで打ち上げられ、東経26度に配置される予定である。この衛星の打上質量は約5,300kg、太陽電池パドルの寿命末期での発生電力は13kW以上であり、Ku/Ka帯を中心に11台のアンテナを地球指向面及び東西面に搭載し、表1に示すように中東・アジア・北アフリカ地域へ放送・通信サービスを提供する。特に、衛星放送サービスでは、通常のKu帯でのサービスと



展開アンテナ3枚のうち、2枚の展開試験写真を示す

図2. TURKSAT-4Aのアンテナ展開試験



図3. TURKSAT-4BのCATR  
(Compact Antenna Test Range)  
アンテナパターン試験



図4. Es'hail 2の軌道上コンフィギュレーション

表1. Es'hail 2の通信系

衛星	周波数	地域	サービス
Es'hail 2	Ku/Ka帯	中近東 アジア 北アフリカ	衛星放送
	Ka帯	カタールなど	衛星通信
	S/X帯	グローバル	アマチュア無線サービス

ともに、干渉(ジャミング)発生時の耐性を考慮して、Ka帯でも地上局からのアップリンクを受信できる通信系を搭載している。また、世界初となる静止軌道上からの衛星アマチュア無線サービスのペイロードを搭載している。

この衛星は当社が製造し、納入してきたDS2000バス商用衛星の中では最大級のペイロード搭載能力と発生電力を持つものとなる(図4)。

### 4. 気象衛星の性能向上

#### 4.1 気象観測能力の向上

ひまわり8・9号は、ひまわり7号と比較して、主に次の3項目に関して飛躍的な性能向上が図られている。それらの詳細を表2に示す。

- (1) 観測バンド数は、5バンドから16バンドへ
- (2) 空間分解能は、波長に依存するが約2倍
- (3) 空間頻度は、フルディスク(全球)観測が6倍、領域観測機能向上

この性能向上によって、全球だけではなく日本付近の観測や多くの台風、積乱雲を高頻度かつ高精度に観測可能であり、近年の激しい気象変化に対して機動性を発揮できる。

#### 4.2 姿勢制御系の高精度化

ひまわり8・9号では恒星センサ(STT)による高精度姿勢決定系を搭載している。ひまわり7号の地球センサ(ESA)、太陽センサ(FSSA)ベースの姿勢決定系に比較して、センサやアルゴリズム自体の高精度化とともに、ESAの月・太陽干渉や、FSSAの検知可能領域切替えによる姿勢変動がなくなることで、常時高精度の姿勢制御を実現しており、気象観測画像の精度向上に貢献している。

図5に、ひまわり7号とひまわり8号の姿勢決定値テレメトリを示す。ESA/FSSAベースの7号に比較して8号は常時高精度の推定を行っていることが確認できる。

DS2000は、TURKSAT-4A/B、Es'hail 2など、商用通信衛星でもSTT搭載の高精度姿勢決定系を標準化しており、高精度が要求されるマルチビームミッションにも対応する。

表2. ひまわり7号とひまわり8・9号の性能比較

	衛星	ひまわり7号	ひまわり8・9号
観測 バンド数	気象センサ	イメージヤ	可視・赤外放射計(AHI)
	可視観測	1バンド (白黒)	青、緑、赤の3バンド
	近赤外観測	なし	3バンド
	赤外観測	4バンド	10バンド
	合計	5バンド	16バンド
観測分解能	可視分解能	1 km	0.5~1 km
	近赤外・赤外分解能	4 km	1~2 km
観測頻度	フルディスク(全球) 観測間隔	1時間	10分
	ハーフディスク(半球) 観測間隔	約1時間	なし
	領域観測間隔	なし	2.5分

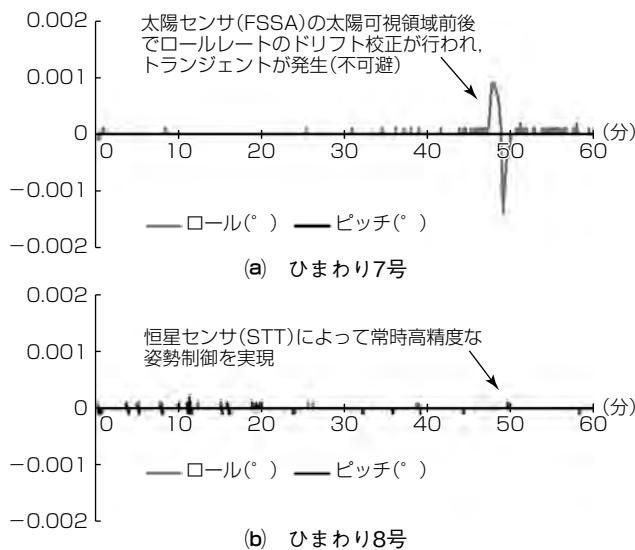


図5. ひまわり7号と8号の姿勢テレメトリーの比較

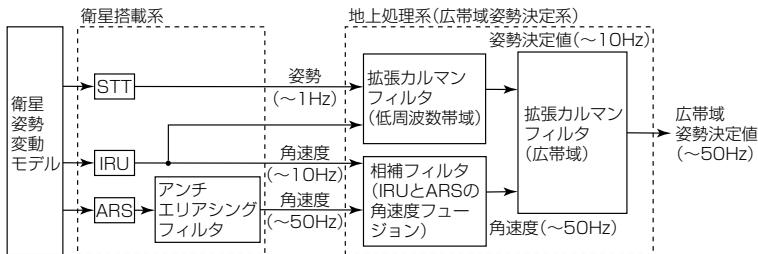


図6. 高精度・広帯域姿勢決定系のブロック図

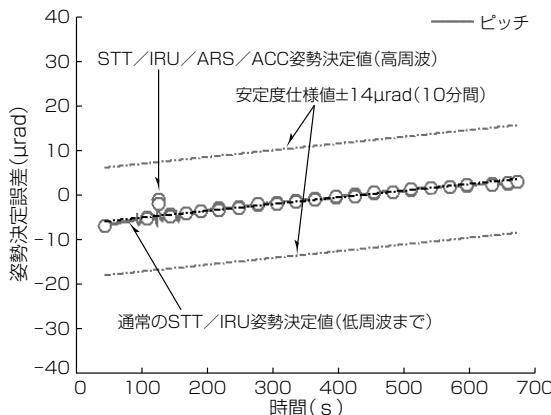


図7. 高精度・広帯域姿勢決定系の性能

#### 4.3 地上処理による高周波姿勢決定

ひまわり8・9号では、STT、慣性基準装置(IRU)、及び高周波レートセンサ(ARS)、加速度計(ACC)を光学ベンチに搭載することによって、センサ間の相対アライメント誤差を最小化している。地上処理系ではこれらSTT、IRU、ARS、ACCのデータを使用して高周波領域を含めた放射計(光学ベンチ)の姿勢決定を行い、リアルタイムで気象画像の幾何補正を行っている(図6)。図7に高精度・広帯域姿勢決定誤差を示す。算出された誤差は、安定度仕様値±14 μrad(10分間)に対し、十分小さいことを確認した。

一方、高精度観測には、高周波数成分による影響も低く抑えることが要求されている。そのため、当社がこれまでの高精度観測衛星開発で構築した擾乱管理技術を適用し、

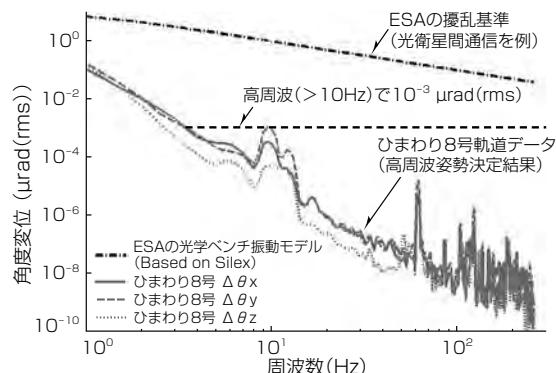


図8. ひまわり8号の光学ベンチの姿勢安定度

低擾乱コンポーネントを積極的に採用する等して擾乱源による影響を、4 μrad(rms, 10分間)と非常に低レベルに抑える設計を行っている<sup>(5)</sup>。

図8にひまわり8号の軌道上での光学ベンチ姿勢安定度の周波数特性を示す。10Hz以上の高周波でも10<sup>-3</sup> μrad(rms)以下と、非常に安定していること、及びESA(European Space Agency)の設計基準と比較しても非常に低いレベルを実現していることを確認している。なお、図中で確認される61Hz, 122Hz, 183Hz等の周波数は、放射計内部の冷凍機起因の成分である。

#### 5. むすび

通信衛星の最新の技術動向とともに、当社の最新の海外商用通信衛星と気象衛星の軌道上広帯域精度検証結果について述べた。今後、大電力化と通信ミッションの高度化とともに、気象衛星の運用成果を反映させて更なる高精度化も図っていく。

#### 参考文献

- (1) 関根功治, ほか: 宇宙利用の技術動向と事業展開—世界の衛星リーディングカンパニーを目指して—, 三菱電機技報, 85, No.9, 496~502 (2011)
- (2) 関根功治, ほか: 静止衛星標準バス“DS2000”的開発と今後の指針, 三菱電機技報, 90, No.2, 115~118 (2016)
- (3) 西山 宏, ほか: ひまわり8号打ち上げ成功と定常運用開始, 三菱電機技報, 90, No.2, 107~110 (2016)
- (4) 江島二葉, ほか: 次世代高速衛星通信用デジタルチャネライザ, 三菱電機技報, 88, No.2, 127~130 (2014)
- (5) Takahara O., et al.: Prediction of the Micro vibration from Ground Test and Its In-orbit Evaluation of the Geostationary Meteorological Satellite “Himawari-8”, Proc. of the 67th International Astronautical Congress, 26~30 (2016)

# 海外向け三菱モービルマッピングシステム “MMS-G220”

石原隆一\*  
加賀谷篤大\*

Mitsubishi Mobile Mapping System "MMS-G220" for Overseas

Ryuichi Ishihara, Atsuhiro Kagaya

## 要旨

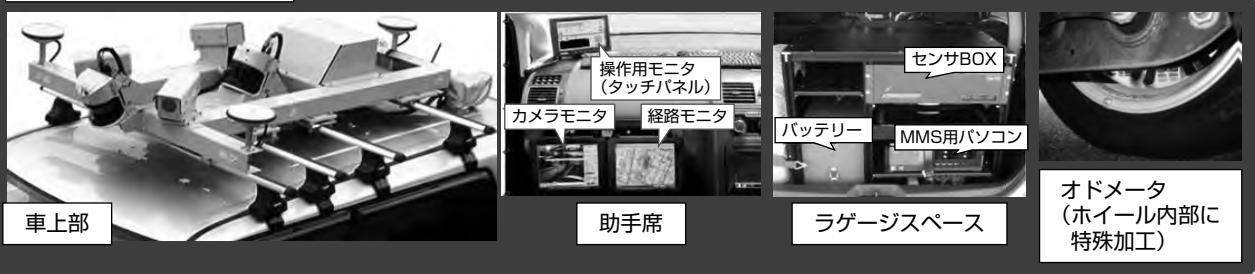
MMS(Mobile Mapping System)とは、車両にGPS(Global Positioning System)などのGNSS(Global Navigation Satellite System)受信機、慣性航法装置(Inertial Measurement Unit : IMU)、レーザスキャナ、カメラ等各種センサを搭載して、走行しながら周辺の三次元空間情報(形状、色、及び座標)を精密かつ効率的に収集するシステムである。これらはGNSSから得られる正確な位置、姿勢によって実現している。三菱電機のMMS(以下“三菱MMS”という。)は、国内では既に測量、地図作成などに100台以上を販売しており、各種業務の高効率・高精度化に貢献している。さらに、応用製品として、トンネル内の形状管理、河川部

土地形状管理、地下埋設物管理、及び都市景観収集など、用途に応じてカスタマイズした製品も投入している<sup>(1)</sup>。

今回、MMSの新製品として、機器を集約して車両への取付けを容易にした“MMS-G220”を開発した。搭載車両の多様化による活用範囲の拡大とともに、着脱性を生かして海外への事業展開を行う計画である<sup>(2)</sup>。

この製品は今後、2018年から本格サービスが始まる準天頂衛星の利用が可能で、正確で効率的な測量や社会インフラ管理の需要が見込まれる韓国をはじめとしたアジア・オセアニア地域に対して2016年10月から先行発売しており、国内向けは2017年度に製品化を予定している。

現行機(MMS-K220)



開発機(MMS-G220)



## 開発機“MMS-G220”と現行機“MMS-K220”との比較

現行機と同等の計測精度を維持しながら機器を集約し、ユーザー自身で簡単に着脱可能な小型軽量の新型車上部を開発した。また、車上部は専用キャリーケースで手軽に持ち運びでき、多様な車両への搭載を実現した。操作性や、消費電力の面では、データ通信インターフェースをUSBで取りまとめ、ノート型パソコン1台での運用を実現した。モニタや各種周辺機器を削減したことにより操作性の向上につながり、消費電力も低減した。

## 1. まえがき

MMSでは、車両に搭載したGNSS受信機、IMU及びオドメータ(進行距離計測器)によって車両自己位置に関連するデータを取得するとともに、レーザスキャナとカメラのデータを同時に収集できる。これらのデータに後処理をかけることで、車両周辺の三次元空間情報(形状、色、及び座標)を精密かつ効率的に得ることができる。MMSで取得した三次元空間情報は“点群(Point Cloud)”と呼ばれ、車両周辺の形状を再現した点の集合体であり、1つ1つの点に緯度、経度、高度といった三次元座標情報が付加される。

図1は三菱MMSの現行機“MMS-K220”で取得した点群の例であり、それぞれの点の絶対位置精度は10cm以下を実現している。

三菱MMSは従来、車両の上に大型で剛性のあるユニットを搭載し、車内後部に機材収納用ラックを設置していたため、車両に特別な加工が必要で、ユーザーでの着脱作業は不可能であった。しかし、車両と一体になっていることはMMSの修理や点検の際に非常に不便であるため、ユーザー自身で車両以外の部分を運搬、装着でき、車両を選ばず搭載できるシステムが望まれていた。MMS-G220は、特にこれらの課題解決のために開発した製品である。

三菱MMSは国内では既に測量や地図作成などの用途に100台以上を出荷済みであり、各種業務の高効率・高精度化に貢献している。これらの実績をベースにMMS-G220を市場へ投入することで、海外への事業拡大を目指す。



図1. MMSで取得した点群

## 2. 海外での市場調査

このシステムを開発するに当たり、海外でのMMSの要求仕様や市場規模を確認するため、市場調査を行った。三菱MMSは、将来拡張性として準天頂衛星の補強情報利用も検討しているため、ターゲットを準天頂衛星の受信が可能なアジア各国に絞り、各国での電子基準点整備状況、要求内容、市場規模等について調査を実施した。

この調査結果から、韓国インフラ整備状況や精度・仕様の市場要求が日本と近い状況にあることが確認された。市場規模に関しても、冬季のオリンピックイヤーである2018年に向けて、高精度地図情報の整備が迅速に進められており、今後も拡大が期待される。したがって、MMS-G220の海外展開の足掛かりとして、まずは韓国市場を狙いつつ、徐々にその他の東南アジア・オセアニア諸国へ展開していくことにして、開発を始めた。開発の主な目標を次に挙げる。

- (1) ユーザー自身による着脱作業の実現
- (2) 低消費電力化
- (3) 位置計測精度(10cm以下)を維持

## 3. MMS-G220の開発成果

### 3.1 MMS-G220の構成

MMS-G220は車上部に設置する2つのユニット(メインユニット、アンテナフレームユニット)とタイヤに設置するオドメータ(進行距離計測器)、及び車内部(助手席、ラゲージスペース)のノート型パソコンで構成している。開発したMMS-G220の外観を図2に、構成を図3に示す。また、表1にMMS-K220との仕様比較を示す。

車上部の分割化によって、従来、専用車両固定となっていた機器を人手(2人)で着脱することが可能となった。さらに、装置を集約することで、車内部の機器をノート型パソコン1台とし、構成機器を大幅に削減できた。配線作業も簡易なものにできた。



図2. MMS-G220の外観

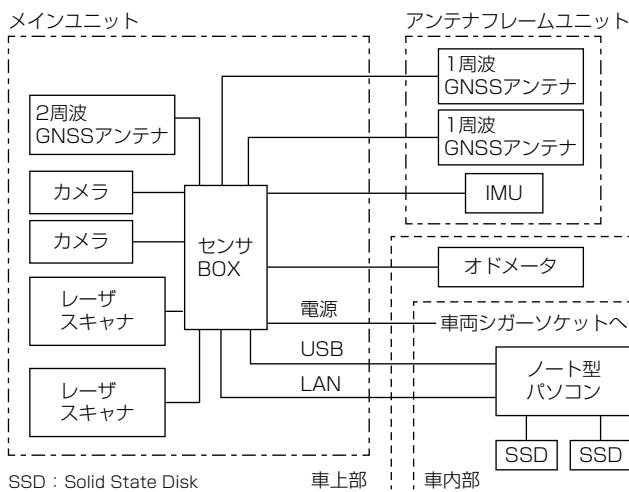


図3. MMS-G220の構成



図4. MMS-G220の精度評価(イメージ)

表1. MMS-K220とMMS-G220の仕様比較

仕様項目	MMS-K220	MMS-G220
カメラ	搭載台数	2台
	画素数	500万画素
	最速撮影枚数(1台)	10枚/秒
レーザスキャナ	搭載台数	2台
	反射輝度	取得可能
	取得点数	27,100点/秒 (1台当たり)
連続記録容量	最大到達距離	65m
	データログ	最大8時間
	カメラ画像	最大90,000枚/台
質量	車上部	メインユニット: 約35kg アンテナフレーム ユニット: 約25kg
	車内部	約70kg
車上／車内間配線	17本	3本
消費電力(Typ.)	12V DC 160W以下	12V DC 90W以下
車両最高速度	80km/h	80km/h

### 3.1.1 車上部

着脱可能な構成にするため、フレームを分割可能な構造とし、前方のメインユニット部にレーザスキャナ、カメラ及び車内に設置していたセンサBOXを1ユニットに集約した。センサ構成は市場調査の結果から道路計測用途をターゲットとし、標準タイプのレーザスキャナ2台と標準タイプのカメラ2台とした。

アンテナフレームユニットには、1周波GNSSアンテナ及びIMUを搭載した。三菱MMSの特長である3アンテナ平面による平面を用いた高精度な姿勢計測を現行機から受け継いだ構成としている。

### 3.1.2 車内部

汎用的なUSBインターフェースの採用によって各種データ収集を1台のノート型パソコンに集約する。構成機器を大幅に削減し、40%以上の消費電力低減を実現した結果、車両のシガーソケットからの電源入力が可能となった。追加バッテリーも不要となり、ラゲージスペースがフリー化された。

車上部と車内部間の配線は、現行機の17本から14本減

表2. MMS-K220とMMS-G220の絶対位置精度評価結果

	MMS-K220	MMS-G220(着脱後)
水平方向(XY誤差)	5cm以下	5cm以下
垂直方向(Z誤差)	10cm以下	10cm以下

らし、電源、USB、LANの3本にした。

### 3.1.3 オドメータ

従来、ホイール内部に特殊加工を施していたオドメータは機器を変更し、ユーザーが着脱できる外付けオドメータを採用した。

### 3.2 精度検証結果

MMS-G220の精度を確保するには、3アンテナ平面を構成する車上部の剛性が必要となる。したがって、着脱性と剛性との両立が課題となった。MMSでは3アンテナ平面に対するレーザの取付け角度やカメラの取付け角度をキャリブレーションによって精密に決定しているが、このキャリブレーションが着脱作業によって変動しないかどうかをMMS-G220では評価した。

精度評価方法のイメージを図4に示す。まず、キャリブレーションを実施してレーザやカメラの角度を決定した後、着脱作業を行い、着脱後に取得した点群の精度を確認する。車両の走行ラインから垂直に約7m離れた箇所における地物測量結果の精度を、水平方向、垂直方向それぞれで確認する。MMS-K220と同時走行を行い、比較して確認した。

結果は表2のとおりであり、MMS-K220の位置計測精度(絶対位置精度10cm以下)を維持できていることを確認した。

### 3.3 運搬性

MMS-G220は、図5のようにキャスター付きのキャリーケースにユニットごとに収納可能ため、航空便などで国内外を問わず目的地へ運び込み、現地でレンタカーなどに搭載しての出張計測を行うことができる。

### 3.4 デザイン性

今回のMMS-G220の開発ではデザイン性を重視し、コンパクトで汎用性の高いシンプルな形を目指した。機器構成を一から見直し、部品ごとに別れていたカバーも大胆にまとめ



(a) メインユニット用

(b) アンテナフレームユニット用

図5. MMS-G220のキャリーケース

た。また、流線形のデザインの採用によって、車両や町並みにもなじむ形状とした(2016年度グッドデザイン賞受賞)。

#### 4. 海外市場での事業活動状況

現在、韓国をはじめとしたアジアやオセアニア各国でMMS-G220の拡販活動を実施中である。当社のグローバルネットワークを生かした拡販活動を展開し、準天頂衛星システムとも連携した地球規模での社会インフラ構築への貢献を目指す。

#### 5. む す び

海外向け三菱モバイルマッピングシステムMMS-G220の開発の動機、製品仕様、開発成果、海外での事業活動状況について述べた。開発成果に関しては、次の3点の主目標を達成した。

- (1) ユーザー自身による着脱作業の実現では、2人での着脱作業が可能になった。
- (2) 低消費電力化では、現行機比の40%以上を削減できた。  
(車両シガーソケットからの電源入力が可能になった。)
- (3) 位置計測精度は、現行機と比較して着脱後の精度の低下がなく、10cm以下を維持できた。

MMS-G220は道路測量作業を効率的かつ高精度に行う機器として、今後アジア各国の高精度地図情報整備やインフラ管理に貢献していく。また、現在、日本をはじめ、世

界各国で自動運転の研究開発が進められており、その重要なインフラとなる高精度地図基盤情報の整備が各国で重要な課題となりつつある。特に道路の最新状況をいかに地図データとして取り込み、配信していくかは自動運転システムを実現するための重要な課題であり、当社は日本国内での課題を解決するためのDMD(Dynamic Map Data)システムの構築に参画している<sup>(3)</sup>。MMS-G220は、国内に向けては2017年度に販売開始予定であり、このシステム実現のキー技術として期待されている。

今後、三菱MMSは、安全で安心できる社会インフラの実現にグローバルな目線で貢献していくことを目指す。

#### 参考文献

- (1) 小澤 正, ほか: モバイルマッピングシステム(MMS)の進化, 三菱電機技報, 90, No.2, 147~150 (2016)
- (2) 三菱電機ニュースリリース2016年9月28日: 三菱モバイルマッピングシステム「MMS-G220」発売のお知らせ  
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2016/0928-b.html>
- (3) Koyama H., : Activity Plan of Dynamic Map Study for SIP-adus, Dynamic Map Study Consortium, 2nd SIP-adus Workshop (2015)

# 航空機の安全運行に寄与する 航空機搭載ドップラーライダ

田中久理\*  
古田 匠\*  
美濃部 正\*

Airborne Doppler LIDAR Contributing to Safe Operation of Aircraft

Hisamichi Tanaka, Masashi Furuta, Tadashi Minobe

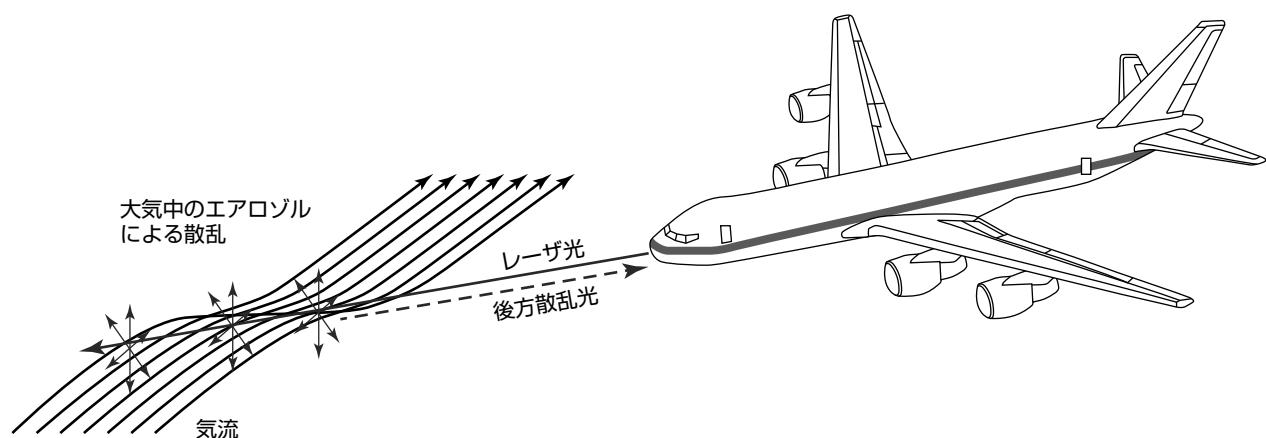
## 要旨

旅客機の事故の約半数は乱気流等の気象現象に関連している。乱気流事故の防止のためには乱気流を検知又は予測して対策を講じることが有効である。

航空機搭載ドップラーライダ(LIDAR : LIght Detection And Ranging)(以下“航空機搭載ライダ”という。)は、航空機に搭載された気象レーダ等の従来機器では検知が困難な晴天乱気流に対して、レーザ光を用いた遠隔気流観測技術で検知し、パイロットへ情報を提供するとともに、最終的には制御技術によって機体の動揺を低減することで航空機の安全運航を可能とすることを目指している。

航空機搭載ライダを用いたシステムの開発と導入を3段

階に分けて考えると、現在は最初の段階となる技術実証の段階にあり、この後、2023年頃までを試用期間と位置付け、2023年頃からを旅客機への搭載・普及段階と想定している。技術実証の段階では航空機搭載ライダを小型ジェット機へ搭載し、高高度巡航時や離着陸時の乱気流検知の実験を予定しているほか、大型ジェット旅客機への搭載実験も検討中である。また、旅客機への搭載・普及段階の初期では、乱気流の“予告・警報装置”として導入され、続いて制御技術と統合することで“自動動揺低減装置”に発展すると予想している。



## 航空機搭載ライダ

航空機に搭載されたドップラーライダから、航空機の前方に向かってパルス状のレーザ光を放射する。レーザ光は大気中の微細な水滴やほこりなどのエアロゾル粒子によって散乱され、後方散乱された光の一部は航空機に搭載されたライダに戻される。軽いエアロゾルは風と一緒に移動するので、散乱されたレーザ光の波長はドップラー効果のためにエアロゾルの速度に比例してシフトし、風速の測定が可能になる。

## 1. まえがき

三菱電機では1990年代からドップラーライダの開発を進めており、2000年にはレーザ光の発振・增幅・受信部分を光ファイバ部品で構成したドップラーライダの開発に成功した。その後、長距離計測可能な高出力ライダの開発を進め、長距離型ドップラーライダの製品化を行ってきた。

本稿では当社が開発した乱気流の検知を目的としたドップラーライダについて述べる。

## 2. 亂気流事故

国土交通省運輸安全委員会の事故調査報告書に基づいた分類によれば、日本の航空機事故の原因は図1に示すように約半数が乱気流などの気流変化が関連していると報告されている<sup>(1)</sup>。また、航空事故としては認定されない乱気流による軽傷以下の事故は、この事故データよりも数が多い。これらのことから、乱気流は航空機の安全を確保するために配慮すべき重要な因子と考えられる。

乱気流に遭遇した旅客機では、乗員や乗客が予期していないタイミングで機体が動搖し、身体や物品が浮き上がり、また、落下することによって客室内で事故に至る。

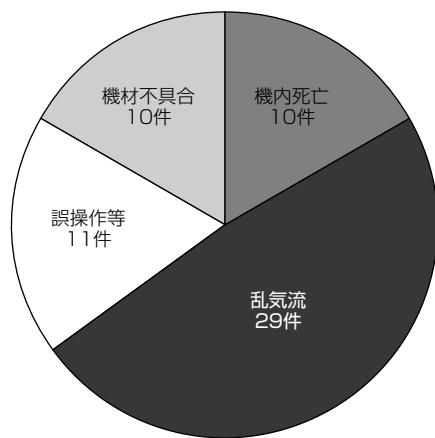


図1. 日本国内での大型航空機事故原因(1990~2008)<sup>(1)</sup>

このような事故の多くは、シートベルトを確実に締め、物品を固定してさえいれば防げる可能性が高いと言える。しかし、実際の旅客機では客室サービスの提供やエコノミークラス症候群の防止などのため、シートベルトを装着しつづけることは困難である。乱気流の遠隔観測によって遭遇前に乱気流で機体が動搖する可能性があることが分かれば、回避飛行やシートベルトサインの点灯などによって、乱気流事故を低減させることができる。

## 3. 航空機搭載ライダ

ドップラーライダは、レーザ光を大気中に放射し、大気中のエアロゾル(ちり等の微粒子)からの後方散乱光を受信し、そのドップラー周波数の変位(ドップラーシフト)を検出することで遠隔の風速を計測する装置である。

### 3.1 航空機搭載ライダの動作と原理

航空機に搭載されたドップラーライダの動作の概念図を図2に示す。ドップラーライダは航空機の前方の風の乱れを検知するため、航空機の前方に向かってパルス状のレーザ光を放射する。レーザ光は大気中の微細な水滴やほこりなどのエアロゾルによって散乱され、後方散乱された光の一部は航空機に搭載されたライダに戻される。軽いエアロゾルは風と一緒に移動するので、散乱されたレーザ光の波長はドップラー効果のためにエアロゾルの速度に比例してシフトし、風速を測定できる。また、同時にレーザ光の送信パルスと後方散乱された光の受信との間の遅延を測定することによって距離情報も得ることができる。

図3のブロック図は、ドップラーライダの動作原理を示す。1つの主発振器のレーザ出力をパルス増幅のための種光として使用すると同時に参照光としても使用する。種光は増幅器で増幅された後、光アンテナに伝送され航空機前方の大気に放射される。光アンテナは、遠方の大気のエアロゾルからの微弱な後方散乱光を受信する。受信した後方散乱光の波長はエアロゾルの速度によってドップラーシフトし、風速はドップラーシフトに比例する。このドップ

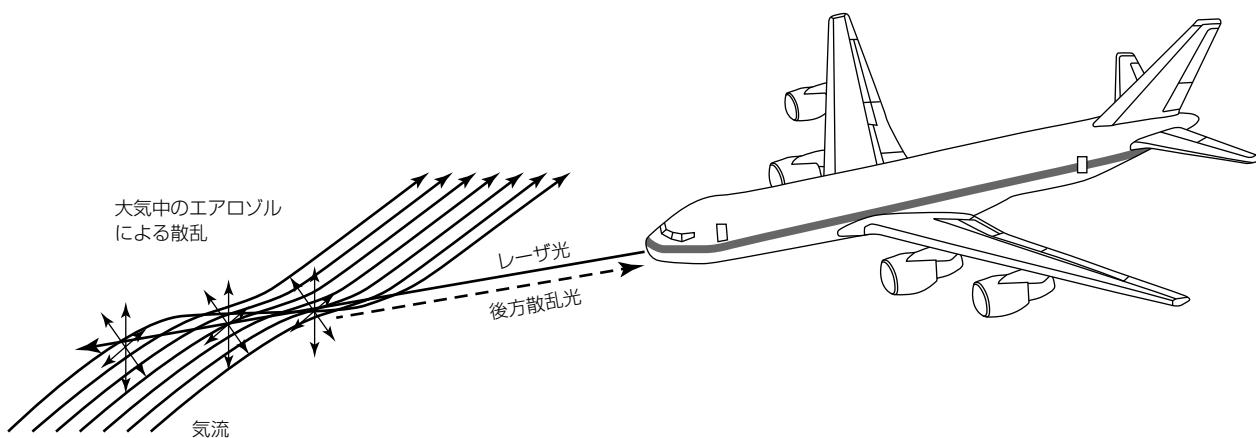
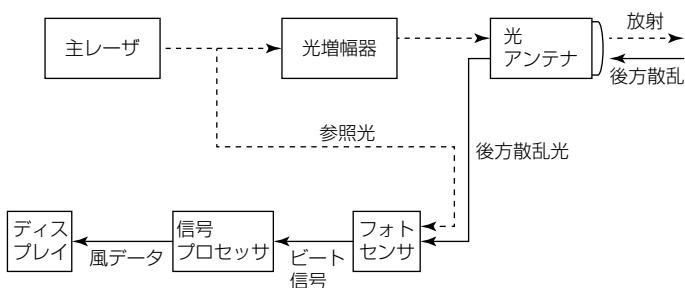


図2. 航空機搭載ライダの動作概念図

図3. ドップラーライダのブロック図<sup>(2)</sup>

ラーシフト量は、フォトセンサで後方散乱光を参照光と光学的に結合することで生成されたビート信号のパワースペクトルとして信号プロセッサによる処理で検出される。この処理で、レーザ光の送信パルスと後方散乱された光の受信との間の遅延時間量を複数の区間で区切ってセグメント化することで、距離区間でのセグメント化が行われる。これによって、複数にセグメント化された各距離区間の風速が同時にディスプレイでリアルタイムに監視できる。

ドップラーライダは大気中のエアロゾルからの散乱波を受信するため、晴天時の風速を計測できるという特長を持っている。しかしながら、航空機にドップラーライダを搭載して使用する場合、高度が高くなるにつれてエアロゾルの粒子密度が低下するため、高高度では風速の測定が困難になるという課題がある。

### 3.2 高出力光増幅器

当社は、2000年に光ファイバ部品で構成したドップラーライダの開発に成功し、その後、地上設置用の長距離型ドップラーライダを製品化した。この製品化に当たり、長距離の観測のために必要な高出力光増幅器の実用化にも成功している。当社の長距離型ドップラーライダに使用している高出力光増幅器は航空機搭載にも適した多くの特徴を備えている。光増幅器を使用したライダは、光学装置の小型化、省消費電力化、冷却システムの小型化に適した構成であり、また、防塵(ぼうじん)性があり、電磁ノイズの放射も少ないなどの点で航空機への搭載に適した方式と言える。さらに、取り回しの容易な光ファイバケーブルによって、レーザ源と送受信装置を分離でき、設置場所の制約が大きい航空機への搭載に当たり柔軟な配置が可能である。レーザ光としては、人間の目に対する安全性の高い1.5μm帯を用いている。

当社が開発した光増幅器は、高ピークパワー光導波路増幅器方式を採用しており、地上設置用の長距離型ドップラーライダでは、3mJクラスの光アンテナ出力を実現している。

### 3.3 航空機搭載ライダの開発と飛行実験

図4は、2011年度に当社が開発した航空機搭載ライダの外観を示す。この製品は、光アンテナ部に光学望遠鏡及び導波路方式の光増幅器を内蔵し、光送受信部には主レーザ発振器及びドップラーシフトをビートとして検出するた

図4. 2011年度開発の航空機搭載ライダ<sup>(3)</sup>図5. 航空機へのドップラーライダ搭載<sup>(4)</sup>

めのヘテロダイン検波器を内蔵している。また、信号処理はパソコンと高速デジタル信号処理ボードを含む複数の拡張ボードによって実現されている。冷却システムとして液体冷却を採用し、冷却装置によって、光増幅器、レーザダイオードなどの発熱を効率的に排熱することで装置の小型化を実現している。

この航空機搭載ライダは、小型ジェット機ガルフストリームII型に搭載され、実際の飛行実験<sup>(1)</sup>によって高高度での風観測の能力が実証された。小型ジェット機への搭載に当たっては、光アンテナ部以外の装置類(光送受信機、信号処理装置、冷却装置など)は、図5に示すように航空機のキャビンの左側のラックに設置され、光アンテナは、胴体の下部に設けたフェアリング内に収納し、フェアリングの前面に設けた窓から航空機の前方にレーザ光を放射するように構成されている。

#### 4. 今後の開発課題

これまでの航空機搭載ライダの開発と実際の飛行実験を通じて、高高度での風観測の能力が実証されるとともに、旅客機に搭載するための次の2つの課題が明らかとなり、それらを解決する新技術の開発に取り組んでいる。

##### 4.1 観測距離の向上

先に述べたように旅客機が巡航する高高度では大気中のエアロゾルの密度が低いため、散乱されるレーザ光の強度が低くなり、観測距離を確保することが難しい。この課題を解決するため、当社ではレーザ光の高出力化と、光学望遠鏡の高性能化の2つの技術を開発中である。

レーザ光の高出力化については、今まで当社のドップラーライダに採用している高出力光増幅器を踏襲し、動作パラメータをチューニングすることによって基本性能を改善して高出力を得ることに加え、微小な偏光の揺らぎを自動的に補正する自動補正機構を開発中である。光学望遠鏡については、大口径化による光学基本性能の向上に加え、アクチュエータを用いた電動式焦点調整機構を開発中である。これらの技術を航空機搭載ライダに採用することによって、高高度でも10kmを超える観測距離が安定して得られる性能を目指している。

##### 4.2 小型・軽量化

レーザ光を放射するための窓を設けたフェアリング内に収納する光アンテナ部は特に小型・軽量化の要求が厳しい装置であるが、観測性能の向上のためのレーザ光の高出力化による発熱量の増加、光学望遠鏡の高性能化に伴う大型化などは、小型・軽量化には不利な要因となる。観測性能を向上させつつ小型・軽量化を実現するために、幾つかの新技術の開発を進めている。光学望遠鏡にはカーボン繊維樹脂を用いた新素材の採用を進めており、小型・軽量でありながら強靭(きょうじん)で、しかも温度特性に優れた光学望遠鏡を実現する目処(めど)を得た。また、従来は光アンテナ装置内の光学定盤上に平面的に展開されて大きな面積を占めていた空間光学系は、新たに開発した三次元的な

折り返し構造を採用して小型化を進める予定である。

これらの新技術を採用した試作機は既に地上試験の段階に入っており、航空機への搭載に更に一步近づいたと考えている。

#### 5. むすび

旅客機の事故防止のために、乱気流を検知・予測することが重要である。乱気流の検知を目的とした航空機搭載ライダは、レーザ光を用いた遠隔気流観測技術であるドップラーライダを用いて乱気流を検知し、航空機の安全運航に寄与することを目指している。当社では、既に製品化している地上設置用のドップラーライダを応用した航空機搭載用ライダを試作し、乱気流検知の検証を進めている。

乱気流の検知を目的とした航空機搭載ライダを実用化するためには、エアロゾル密度の低い高高度で使用可能にするための観測距離の向上と、航空機への搭載を容易にする小型・軽量化を進める必要がある。観測距離の向上のためには、レーザ光高出力化と光学望遠鏡の高性能化が必要となるが、これら2つは小型・軽量化には不利な要因となる。小型・軽量化を図るために、新素材の採用と三次元的な折り返し光学系を開発し、観測距離を向上させつつ小型・軽量化を両立させる装置の目処を得た。

新たに開発した要素技術を活用した試作機の地上試験を現在実施しており、乱気流の検知を目的とした航空機搭載ライダの実用化に近づいている。

#### 参考文献

- (1) 乱気流検知技術の最新研究動向、公益財団法人航空機国際共同開発促進基金、解説概要22-1 (2010)
- (2) Inokuchi, K., et al.: Development of an Onboard Doppler LIDAR for Flight Safety, Journal of Aircraft, **46**, No. 4, 1411~1415 (2009)
- (3) 町田 茂：乱気流事故防止機体技術(SafeAvio), JAXA航空シンポジウム2014資料 (2014)

# ヘリコプター衛星通信システム “デュアルアンテナヘリサットシステム”

福井貴之\*  
佐藤勇人\*

*Helicopter Satellite Communication System "Dual Antenna Helisat System"*

Takayuki Fukui, Hayato Sato

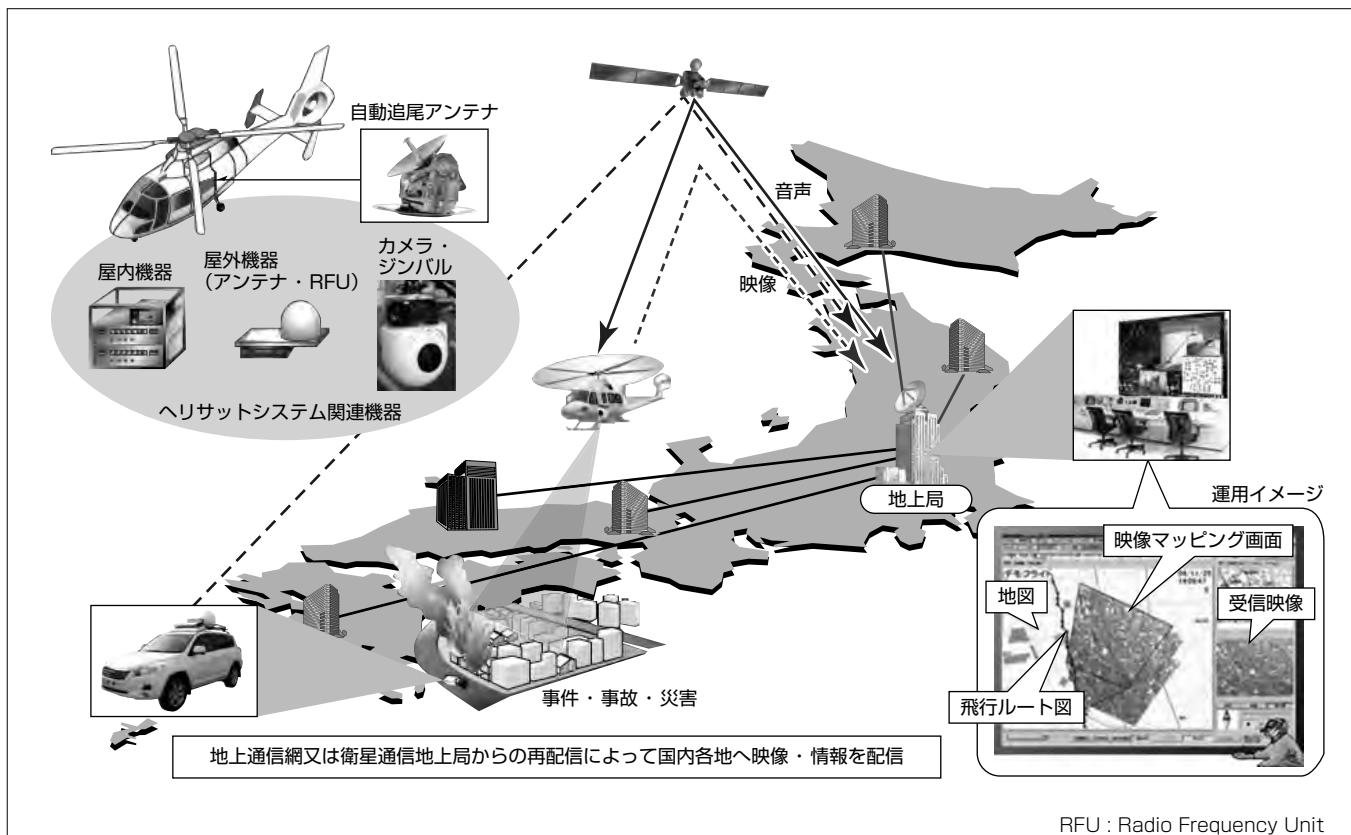
## 要旨

従来、被災地での空撮映像の伝送には地上で整備した中継局を経由して伝送を行う“ヘリコプターテレビ伝送システム(ヘリテレシステム)”が用いられていた。しかし、東日本大震災のような巨大地震や津波では地上の中継局が被災し、情報収集に時間を要するなどの課題が発生していた。

このような状況を改善するため、三菱電機では、他社に先駆けて2013年3月にヘリコプターから通信衛星を介して直接情報を伝送する“ヘリコプター衛星通信システム(ヘリサットシステム)”の市場投入を行った。これまでのヘリサットシステムの運用事例として、2014年の広島県土砂災害と御嶽山噴火、2015年の口永良部島噴火と鬼怒川氾濫、2016年の熊本地震等があり、広域災害時の迅速な情報収集手段として活用されている。

ヘリサットシステムは通信衛星を介して直接通信を行うため、運用地域、飛行高度に依存せずリアルタイムで情報収集が可能である。一方、飛行姿勢によっては、ブロッキング(アンテナ装置が機体の方向に指向した場合、自動的に電波の送信を停止する機能)によって映像の伝送が中断してしまうという課題が残されている。

この課題を解決するために、当社では、ヘリサットシステムの機能向上としてアンテナ装置を2台装備する“デュアルアンテナヘリサットシステム”を開発した。2台のアンテナ装置を全天がカバーできる位置に装備し、電波を送信中のアンテナ装置がブロッキングとなる前に別のアンテナ装置に切り替えることでブロッキングを解消する。



## ヘリコプター及び小型車載用衛星通信システムの利用イメージ

衛星通信の広域性と移動体の機動性を活用し、使用衛星のサービスエリア内からリアルタイムに情報を伝送することで、広域災害、事件、事故の発生時に、被災地の情報を迅速かつ的確に収集できる。

## 1. まえがき

災害・危機管理の分野では、迅速かつ的確に情報を収集・整理し、情報通信基盤を通じて住民や関係機関に伝達することによって、被害や事故の件数の軽減、質的な改善が見込まれる。このため、情報通信技術が国民の被害を適切に回避するための大きな役割を果たすことが期待されている。

従来、被災地での空撮映像の伝送には地上で整備した中継局を経由して伝送を行う“ヘリコプターテレビ伝送システム（ヘリテレシステム）”が用いられていた。しかし、東日本大震災のような巨大地震や津波では地上の中継局が被災し、情報収集に時間を要するなどの課題が発生していた。

このような状況を改善するため、当社では、他社に先駆けて2013年3月にヘリコプターから通信衛星を介して直接情報を伝送する“ヘリコプター衛星通信システム（ヘリサットシステム）”の市場投入を行った。現在、このシステムは地震や大雨による河川の氾濫、火山の噴火等、広域災害時に迅速な情報収集手段として活用されている。

ヘリサットシステムは通信衛星を介して直接通信を行うため、運用地域、飛行高度に依存せずリアルタイムで情報収集が可能である。一方で、飛行姿勢によっては、ブロッキング（機体に電波を送信しないようにアンテナ装置が機体の方向に指向した場合、自動的に電波の送信を停止する機能）によって映像の伝送が中断してしまうという課題が残されている。

この課題を解決するために、当社では、アンテナ装置を2台装備するデュアルアンテナヘリサットシステムを開発した。

本稿では、ヘリサットシステムの概要、運用事例、デュアルアンテナヘリサットシステム開発における開発課題及び解決手法について述べる。

## 2. ヘリサットシステム

### 2.1 システムの構成と導入効果

このシステムは要旨の図に示すようにヘリコプターから直接通信衛星を経由し、撮影した被災地等の動画像情報及び撮影位置情報等を地上局へ伝送する機能とヘリコプターと地上局間の双方向音声通信を実現する機能を持つ。ヘリコプターに搭載される装置は衛星通信用自動追尾アンテナ装置、送受信機（RFU）、屋内機器（変復調装置、アンテナ制御装置）、映像装置（カメラ・ジンバル）等から構成され、地上には通常の衛星通信用アンテナ・送受信設備にこのシステム用の復調装置と映像装置を追加した構成である。次にこのシステムの導入効果を述べる。

- (1) 地上中継局を必要とせず、地上局1局で広域をカバー可能（広域性）
- (2) 自動衛星捕捉、追尾機能のアンテナ装置を適用するこ

とによって、通信対象局をマニュアル指向する手間を削減（操作性）

- (3) 山岳や高層建築物の影響を受けず近接撮影、谷あい等でも安定な伝送が可能（耐環境性）
- (4) 複数受信局で同報受信することによって各拠点で同時にリアルタイムに情報共有が可能（同報性）
- (5) 災害等によって道路等が破壊された場合でも伝送が可能（抗堪（こうたん）性）
- (6) 双方向音声通信によって常時連絡回線が確保でき、地上局からヘリコプターへ撮影箇所の指示等が可能（利便性）
- (7) 地上中継局が不要なので、管轄区域が広範囲なほどコストパフォーマンスに優れる（低コスト）

### 2.2 主要技術

#### 2.2.1 間欠送信方式

ヘリコプターが衛星と通信する際、通信路にヘリコプターのブレード（回転翼）があるため、データ伝送の妨げ、及びブレードでの電波の反射による他のシステムへの干渉が起こり得る。これらの対策として回転するブレードの間隙を狙って送信する間欠送信方式を採用している。この間欠送信のタイミングは、ヘリコプターの姿勢、衛星の位置及びブレードが回転するタイミングによって決定され、フライト姿勢によって時々刻々と変化するため、正確かつ動的なタイミング制御が求められる。また、ブレードによるブロッキングの時間率も送信ビームの方向によって変化する。

この方式では送信データを適当な長さのバーストに分割し、このバースト単位で送信ON/OFF制御を行っている。また、ブレードの回転タイミングはヘリコプターの標準的なセンサ（磁気的に回転を検出するマグネティックピックアップセンサ等）から1回転に1回出力される信号を用い、ヘリコプターの姿勢と衛星の位置から決定されるビーム方向とブレードが重なるタイミングを演算し、送信のON/OFF制御を行う（図1）。

#### 2.2.2 追尾方式

Ku帯を用いた衛星通信装置では、衛星追尾での追尾誤差による回線品質の劣化を防止するだけでなく隣接衛星への干渉に配慮する必要があり、厳しい追尾精度が要求される。

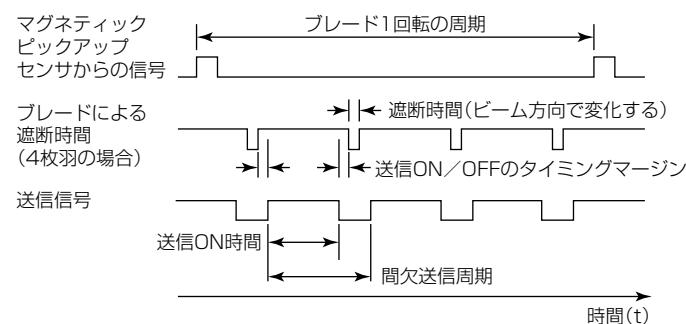


図1. 間欠送信方式による送信のON/OFF制御

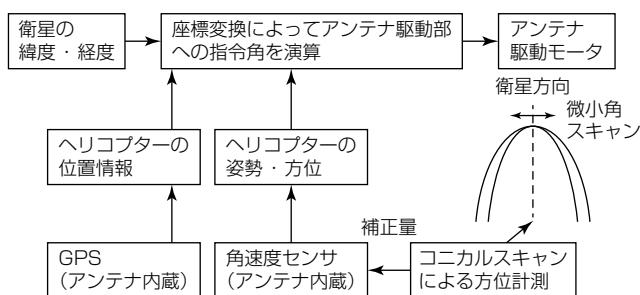


図2. 追尾制御方式の動作

近年、移動体(航空機、船舶)向けに衛星通信を利用したブロードバンドサービスが開始されているが、ヘリサットシステムではこれらのアンテナで標準的に用いられる追尾方式と同じコニカルスキャン方式を採用している。この方式は、衛星方向を中心にビームを微小角ずらし、円を描くようにスキャンすることで、受信電力が最大になる方向を検出し、高精度追尾を実現している。

なお、システム起動時の衛星初期捕捉は、GPS(Global Positioning System)アンテナで検出したヘリコプターの位置・方位情報をアンテナに内蔵された角速度センサによる姿勢情報によって衛星の指向方向を演算し、この方向を中心に衛星を探す(図2)。

### 3. 運用事例

#### 3.1 従来システムとの画質の比較

従来のヘリテレシステムとヘリサットシステムの画質性能比較を図3に示す。

従来システムではリアルタイムで映像が伝送できなかった地域に、ヘリサットシステムを適用することによってリアルタイムで映像が伝送できている。また、画質面でもヘリサットシステムで伝送した映像は鮮明であり、被災地の細部まで情報収集が可能である。

#### 3.2 運用事例

2013年3月のヘリサットシステム市場投入後の運用事例を表1に示す。土砂災害、火山の噴火、地震等の広域災害時にヘリコプターの機動性を活用した初期の情報収集に貢献している。また、長野、岐阜県の御嶽山、鹿児島県の口永良部島の噴火での情報収集の際も、ヘリサットシステムはリアルタイムでの情報収集に貢献している。従来のシステムではリアルタイムに情報収集ができない地域での災害であったため、これらの事例で改めてこのシステムの有効性を示すことができた。

### 4. デュアルアンテナによる機能向上

#### 4.1 ブロッキング

電波法では、電波を送信する際、物理的に電磁干渉を発生させてはならないことが定められている。ヘリサットシステムでは電波法を遵守するため、機外に搭載されたアン

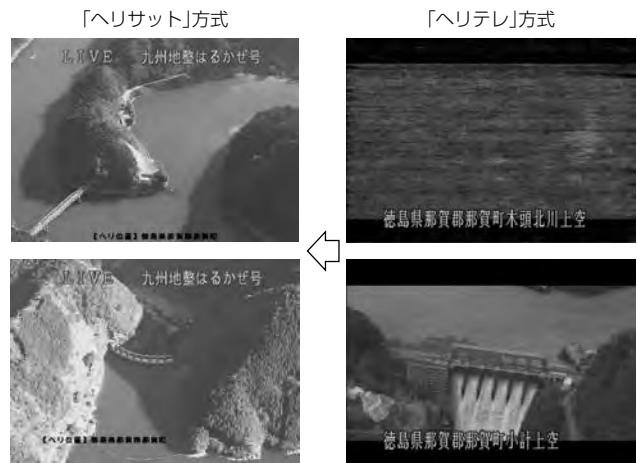


図3. ヘリテレシステムとヘリサットシステムの画質性能比較

表1. ヘリサットシステムの運用事例			
時期	場所	災害内容	運用内容
2014年8月	広島県	土砂災害	初期被害の情報収集及び収集した情報による救急隊員の人員配置の計画
2014年9月	長野、岐阜県	御嶽山噴火	初期被害の情報収集、火山活動の経過観察
2015年5月	鹿児島県	口永良部島噴火	初期被害の情報収集、火山活動の経過観察
2015年9月	茨城県	鬼怒川氾濫	初期被害の情報収集、浸水状況の経過観察、収集した情報による排水車の配置の計画
2016年4月	熊本県	大地震	初期被害の情報収集及び収集した情報による救急隊員の人員配置の計画

テナ装置が機体の動搖によって機体の方向に指向した際、自動的に電波の送信を停止する機能がある。この電波の送信を停止する状態をブロッキングと呼び、ブロッキング状態では映像・音声が地上に伝送できない状態になる(図4)。ヘリコプターは運用中に姿勢が変化(ロール、ピッチとともに $\pm 30^\circ$ 程度動搖)するため、ヘリコプターの片側にアンテナ装置を搭載する現行のヘリサットシステムではブロッキングが発生してしまうという課題がある。

ヘリコプターのブレードより上部にアンテナ装置を纏装(ぎそう)することでブロッキングを解消することができるが、ヘリコプターへの取付け部分強度不足や改造範囲が非常に大きくなるといった課題があるためブレードよりも下部にアンテナ装置を纏装する必要がある。

#### 4.2 デュアルアンテナヘリサットシステム

ブロッキングの課題を解決するために、今回、デュアルアンテナヘリサットシステムの開発を行った。デュアルアンテナヘリサットシステムは、アンテナ装置2台でシステムを構築する。2台のアンテナ装置を全天がカバーできる位置(機体の左右)に装備し、電波を送信中のアンテナ装置が機体の動搖などでブロッキングとなる前に電波を送信するアンテナ装置の切替えを行うことでブロッキングとなる姿勢をなくしてブロッキングを解消することが可能になる(図5)。

#### 4.3 デュアルアンテナヘリサットシステムの開発

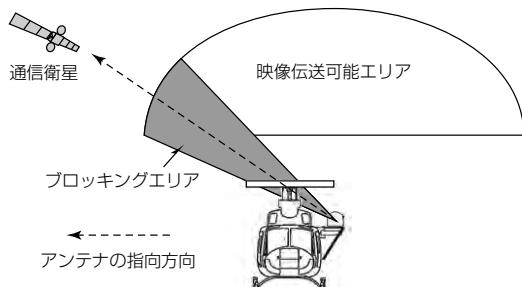


図4. 現行のヘリサットシステムでのブロッキング

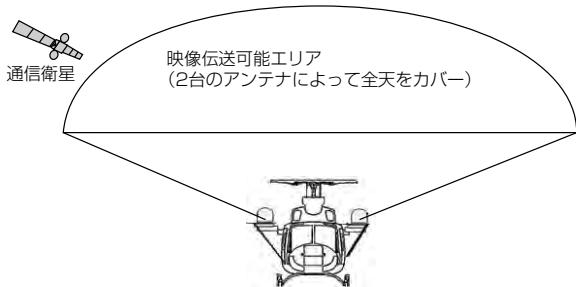


図5. デュアルアンテナによるブロッキングの解消

#### 4.3.1 開発課題

デュアルアンテナヘリサットシステムでは機体の動揺に応じてアンテナ装置の切替えを瞬時に実行する必要がある。しかし、ヘリサットシステムでは、2.2.2項の追尾方式で述べたとおり、コニカルスキャン方式(衛星からの受信波の受信強度を用いた追尾方式)を用いて衛星追尾を行っているため、ブロッキング状態で衛星からの受信波が受けられないアンテナ装置は受信波の強度が判定できず、衛星追尾ができないという問題点があった。

この問題点はコニカルスキャン方式による追尾の代わりに、航空機の管制に用いられる高精度の姿勢センサ(図6)を適用し、姿勢センサの情報だけを用いて衛星追尾を行う“プログラム追尾”に方式変更することで解決できる。しかし、高精度の姿勢センサは寸法・質量が大きく、非常に高額であるため、現行のヘリサットシステムと比較し、質量、寸法、コストが大幅に増加してしまうという課題がある。

#### 4.3.2 解決手法

問題点と課題を解決するための、デュアルアンテナヘリサットシステムでは、コニカルスキャン方式で高精度の衛星追尾を行っているアンテナ装置の姿勢の情報をブロッキング状態のアンテナ装置と共有することにした。衛星追尾を行っているアンテナ装置の姿勢の情報を共有することで、ブロッキング状態のアンテナ装置は高精度の姿勢情報を取得し、姿勢センサを用いて擬似的に“プログラム追尾”を行うことが可能になる(図7)。

この手法を適用することで、2台のアンテナ装置が常に高精度で衛星方向を指向できる。それによって、機体の動揺に応じて瞬時に電波を送信するアンテナ装置の切替えが



出典 : [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/33/Gyroscope\\_hg.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/33/Gyroscope_hg.jpg)  
Photo by Hannes Grobe(2005)/Adapted.  
CC-BY-SA-2.5(<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/>)

図6. 航空管制用の高精度の姿勢センサ

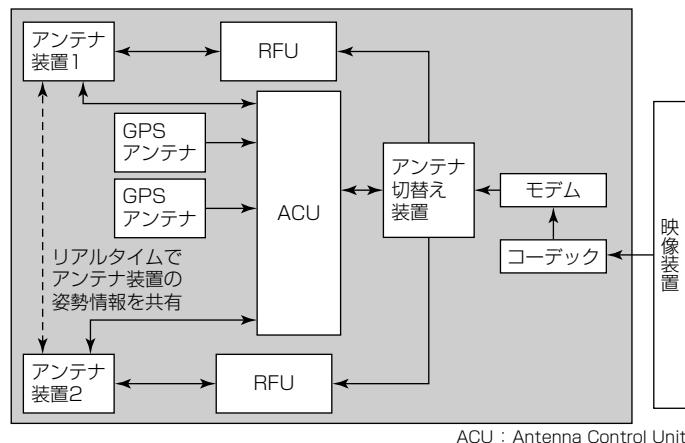


図7. デュアルアンテナヘリサットシステムの構成

可能になり、ブロッキングを解消するデュアルアンテナヘリサットシステムを実現した。

## 5. むすび

災害・危機管理・報道分野で次世代システムとして活躍しているヘリコプター衛星通信システム(ヘリサットシステム)の運用事例と機能向上について述べた。

ヘリサットシステムの有用性は運用事例からも明らかである。このシステムが、災害・危機管理・報道の各分野に普及し、威力を発揮することを期待する。また、今後も最新技術を適用し、システムの機能向上を継続していく。

## 参考文献

- (1) 総務省消防庁 防災情報室：ヘリコプターによる被災地情報収集の在り方検討会報告書 (2007)
- (2) 総務省消防庁 防災情報室：消防防災ヘリコプターに搭載する直接衛星通信システムの実用化に向けた共通仕様書策定等に関する検討会報告書 (2008)
- (3) スカパーJSAT株：ヘリコプターからのHDTV伝送(高画質伝送)のための衛星通信技術に関する調査検討報告書 (2009)
- (4) スカパーJSAT株：移動体衛星通信(ヘリサットシステム)における高速大容量伝送技術の検討報告書 (2010)

# 海洋レーダを用いた 津波到達・波高予測技術

小柳智之\* 平尾達哉\*  
石川博章\*\* 有岡俊彦\*

Tsunami Wave Height Prediction Method by Ocean Surface Rader

Tomoyuki Koyanagi, Hiroaki Ishikawa, Toshihiko Arioka, Tatsuya Hirao

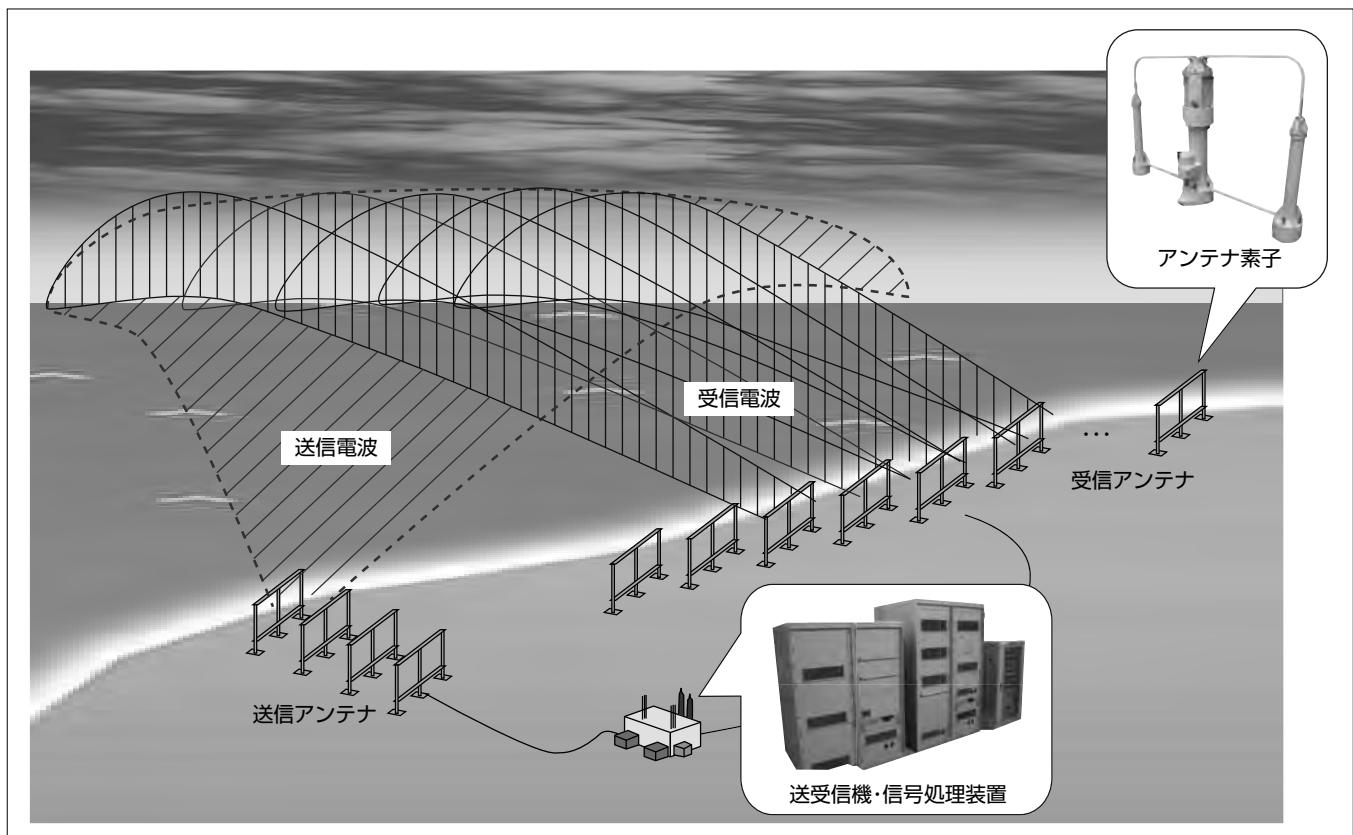
## 要旨

近年、日本の沿岸部では、大地震の発生によって津波が襲来することが懸念されている。津波が沿岸に到達する前に、可能な限り早く精度良く到来を予測することは、効率の良い避難行動や対応を行うために重要である。そのため、津波の沖合での正確な波高値や流速値をリアルタイムで知ることが課題となっている。従来、津波の波高値の計測手段として、沖合に設置されたGPS(Global Positioning System)ブイ等を用いる方法がある。しかし、GPSブイは設置位置(点)での計測しかできないため、広範囲にわたり多数設置する必要がある。

一方、海洋レーダは陸上から面的に広範囲の海の状況を高い時間・空間分解能で計測できるため、日常の沿岸環境

監視での有用性が検証されてきた。特に沿岸部から遠い海面を観測することによって、津波が到達するまでの時間を確保できることもメリットの1つである。ただし、海洋レーダが計測するのは海表面の流速(表層流速)であり、津波の波高を直接求めることができないといった課題がある。また、表層流速から津波に起因する流速成分を抽出する技術についても、いまだ十分な開発がなされていなかった。

このような背景の下、三菱電機では従来の海洋レーダを改良した津波監視用海洋レーダの開発を行った。このシステムによって、海洋レーダで計測される表層流速から津波の波高をリアルタイムで推定できる。



## 津波監視用海洋レーダのシステム構成

津波監視用海洋レーダは海面に電波を送信する送信アンテナ、海面で反射した電波を受信する受信アンテナ、電波の送受信を行う送受信機、流速成分の算出や解析等を行う信号処理装置で構成している。このレーダはHF(High Frequency)帯の電波を使用することで、沿岸(レーダ設置位置)から数十km先までの海面を監視できる。

## 1. まえがき

近年、日本の沿岸部では、大地震の発生によって津波が襲来することが懸念されている。津波が沿岸に到達する前に、可能な限り早く精度良く到来を予測することは、効率の良い避難行動や対応を行うために重要である。そのため、津波の正確な波高値や流速値をリアルタイムで知ることが課題となっている。海洋レーダは陸上から広い範囲の海の状況を高い時間・空間分解能で計測できるため、日常の沿岸環境監視における有用性が検証されてきた。特に沿岸部から遠い海面を観測することで、津波が到達するまでの時間を確保できる。

海洋レーダは、HF帯(短波帯(3~30MHz))の電波を海面に照射し、散乱された信号を受信することで沿岸から数十km先までの表層流速を計測する装置である。図1に示すように、陸上に設置したアンテナから海面に電波を照射すると、電波の波長 $\lambda$ の半分の長さの間隔を持つ波によって反射された電波(反射波)は、位相がそろうことで強め合う。この現象をブリッジ散乱共鳴という。反射波は受信信号としてアンテナに帰ってくる。帰ってきた受信信号を周波数解析し、得られたドップラースペクトルにおける一次散乱ピークの位置からドップラーシフト量を算出して表層流速を求める。なお、1台の海洋レーダでは、海洋レーダに近づく方向又は遠ざかる方向だけ、すなわち、一次元の視線方向の表層流速だけが計測できる<sup>(1)</sup>。

本稿では、1台の海洋レーダで計測した表層流速から津波の波高をリアルタイムで推定する技術について述べる。

## 2. 津波の波高推定技術

### 2.1 概要

1台の海洋レーダによって計測できるのは表層流速の視線方向成分だけであり、直接波高を推定することはできない。今回、1台の海洋レーダから得られる一次元の流速情報に浅水長波理論を適用することで波高を推定する技術を開発した。津波伝播(でんぱ)解析で用いられる波高分布と流速分布に関する基礎方程式である浅水長波理論を、1台のレーダから得られる視線流速情報だけで解析できるモデルにし、この方程式を解くことで波高をリアルタイムで推定する。

### 2.2 基礎方程式

津波は長波の一種であるので、表層流速と海底面上の流

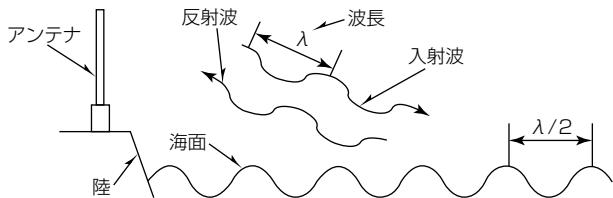


図1. 海洋レーダによる表層流速の算出

速はほぼ一定とみなすことができる。そのため、次のような非線形長波理論(浅水長波理論)に基づく平面二次元モデルが使用される<sup>(2)</sup>。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} \left( M \sqrt{M^2 + N^2} \right) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} \left( N \sqrt{M^2 + N^2} \right) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここで、 $\eta$ は水位(静水面からの水面の変化量、すなわち波高)、 $M$ ,  $N$ は $x$ 及び $y$ 方向の線流量、 $n$ は海底摩擦係数(マニングの粗度係数)、 $D$ は全水深(水位 $\eta$ 及び静水深 $h$ を用いれば、 $D = \eta + h$ )、 $t$ は時間、 $g$ は重力加速度である。また、 $x$ 及び $y$ 方向の流速(水粒子速度)は $U = M/D$ 、 $V = N/D$ である。図2に波高の定義を示す。

### 2.3 波高分布推定式

海洋レーダが1台で、視線方向の流速成分だけしか算出できないことを考慮し、一次元の表層流速分布から津波の水位 $\eta$ の分布(波高分布)を推定することを考える。なお、次の説明では、 $M_r$ は視線方向( $r$ 方向)の線流量、 $U_r$ は海洋レーダによって計測される視線方向の流速とする。

海洋レーダの照射領域を図3のような円筒座標系とすると、式(2)の運動方程式は、 $D$ が十分大きいとして第2、第3、第5項を消去して線形化し、さらに、 $D \approx h$ とすると、

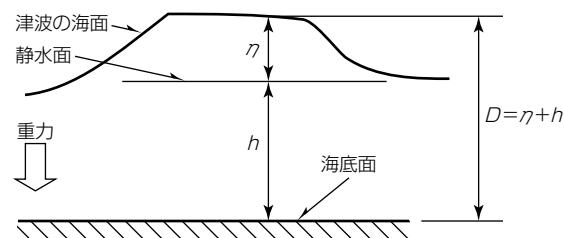


図2. 波高の定義

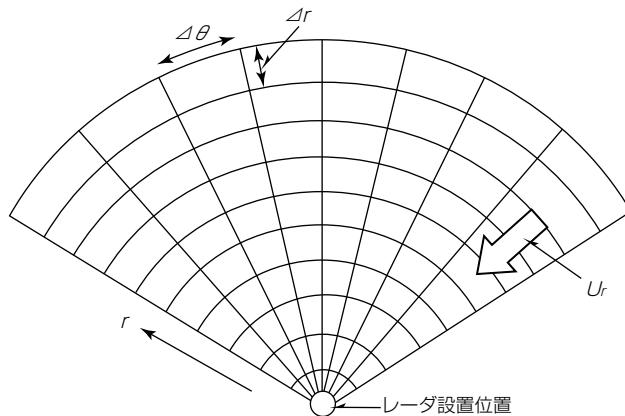


図3. 海洋レーダの照射領域

$$\frac{\partial M_r}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial r} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

となる。波高分布推定には式(4)を変形した次式を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial r} &= -\frac{1}{gh} \left( \frac{\partial M_r}{\partial t} \right) \\ &= -\frac{1}{g} \left( \frac{\partial U_r}{\partial t} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (5) \end{aligned}$$

式(5)は、海洋レーダを中心とした前進差分によって1回の計算で解くことができる。なお、波高分布推定には境界条件が必要であるが、海洋レーダ照射領域の扇の頂点の水位 $\eta_{Rader}$ は1台の水位計で計測できるため、 $\eta_{Rader}$ を境界条件とし、海洋レーダから視線方向( $r$ 方向)に式(5)を積分することで水位 $\eta$ の分布、すなわち波高分布を算出できる。

### 3. 開発技術の評価例

現時点では海洋レーダで津波発生源近くを観測した例はほとんど存在しない。よって、波高推定に使用する元データとなる津波の流速や水位 $\eta$ の分布は事前に津波伝播のシミュレーションを実施し、そのデータを用いた。

津波のシミュレーションの初期条件としては、海面に初期水位分布 $\eta_0$ を与える、基礎式は式(1)から式(3)を時間の経過に対して解いた。空間差分では、スタッガード格子(格子中央で波高 $\eta$ を定義し、線流量 $M$ 及び $N$ は格子の辺で定義)を用い、時間差分では、蛙(かえる)とび法(Leap-Flog法:  $\eta$ と $M$ 及び $N$ の計算時刻を計算時間間隔 $\Delta t$ の1/2だけずらす方法)を用いた。また、式(2)、式(3)での非線形項(第2、3項)は安定化のために風上差分を用いた。さらに、今回は陸上への津波の遡上は解かず、海底摩擦係数(マニングの粗度係数)は海だけの領域での津波に一般に用いられる $n = 0.025$ とした。

図4に解析領域を示す。海洋レーダは( $x = 0$ )の陸上に配置されるとし、津波がレーダ配置位置へ直接伝播するケース(CASE1)及び、半島や島で反射して複雑な流れ場を形成しつつ、間接的にレーダ配置位置へ伝播するケース(CASE2)の2つ場合について評価した。解析領域は180km角の領域とし、 $x$ 方向格子数× $y$ 方向格子数= $I \times J = 180 \times 180$ 、格子1つの幅 $\Delta x = \Delta y = 1,000\text{m}$ の直交格子を用いた。また、 $x = 0$ ( $J = 0$ )を除いた周囲境界は無反射(自由透過境界)とし、静水深 $h$ の分布は図5のように $x$ が50km以上で1,000m、 $x$ が50km未満では、 $x$ に対して線形に増えるものとした。さらに、初期条件として初期水位 $\eta_0 = 5\text{m}$ を与えた、時間刻み1秒で計算を行った。

図6に津波シミュレーション結果を示す。CASE1では、陸へ向けて直接津波の本流が伝播し、約30分後にレーダ設置位置に到達する。さらに、CASE2では津波の本流は島に衝突して拡散後に島を回りこみ、一部は半島で反射した後、レーダ設置位置に到達する。

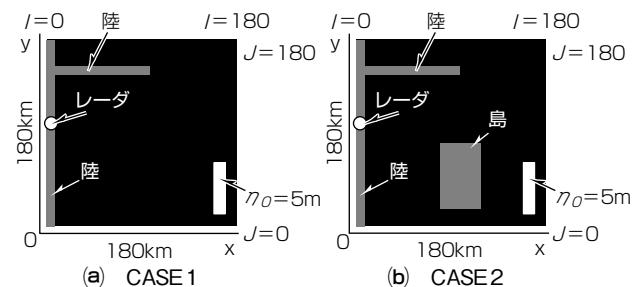


図4. 津波シミュレーションの解析領域

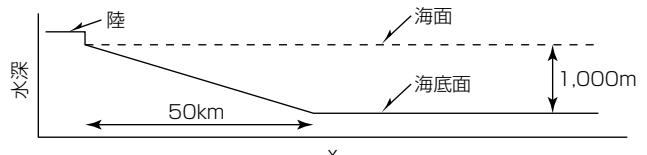


図5. 静水深の分布

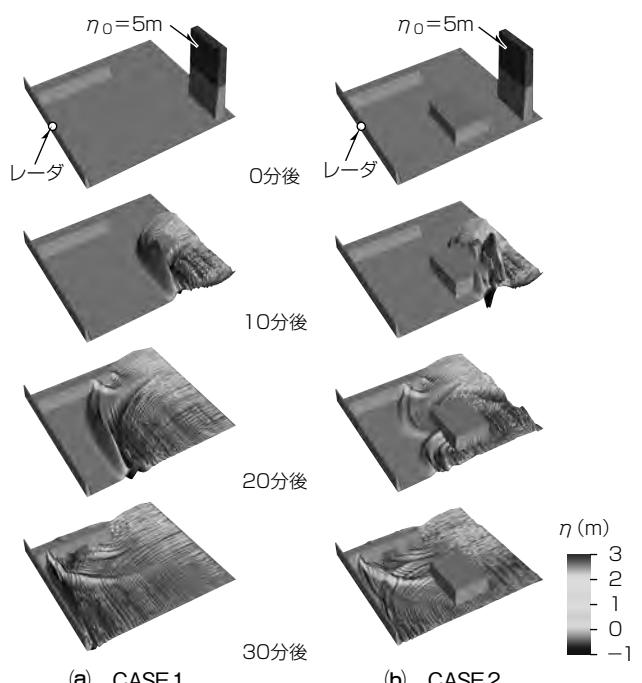


図6. 津波シミュレーション結果

次に、波高分布の推定を行った。波高分布は実施した津波シミュレーション結果から、海洋レーダで計測される60秒間隔の2時刻 $r$ 方向の流速を抽出し、式(5)を用いて推定した。この時間間隔は海洋レーダシステムでのデータ処理的に実現可能なレベルである。ここでは、流速の計測誤差がないものと仮定した。図7に示すように海洋レーダを設置し、海洋レーダの照射領域で $r$ の最大値は50kmとし、 $r$ 方向の格子分割は1,000m刻みとした。

このようにして、一次元の $r$ 方向流速分布だけから波高を推定した結果を図8に示す。津波が海洋レーダの照射領域に入る20分後以降のデータを示し、比較のために津波シミュレーション(図6)から直接得られた $\eta$ も示した。60秒間隔の流速データを使用したため、津波シミュレーションの結果から水位 $\eta$ の分布が鈍る傾向にはあるが、一次元流速だけの使用にもかかわらず、津波の到来方向や流れの方

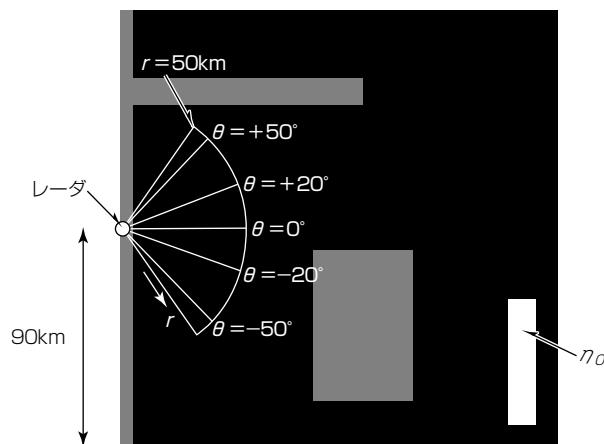


図7. レーダ設置位置と照射領域

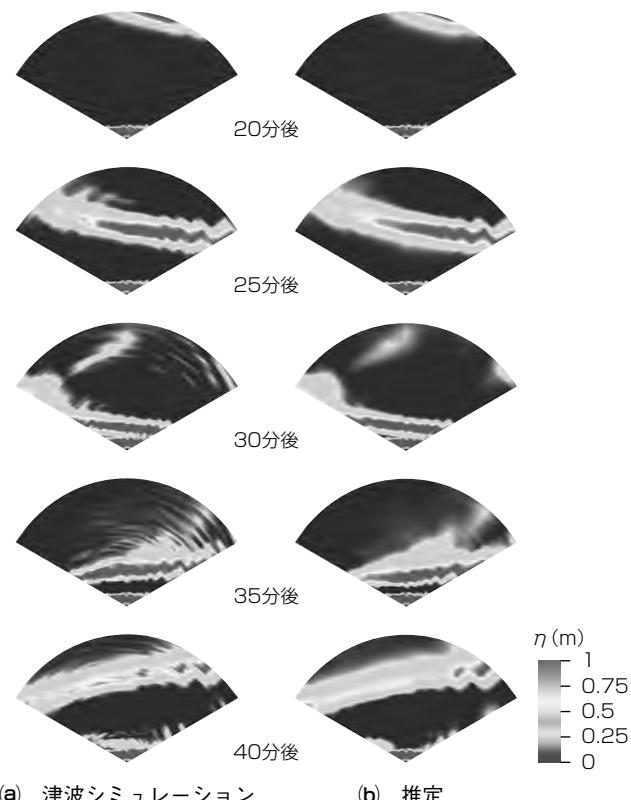


図8. CASE1の津波シミュレーションと推定との波高比較

向など非常に良く推定できることが分かる。これは、沖で発生した津波は陸側へ向かうため、全体的に見ても陸方向への流速成分が陸と平行な成分より支配的であること、さらに、海洋レーダ照射の領域を円筒座標系としたことによる。

次に、図9に $\theta$ 方向の角度が $-50^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+20^\circ$ ,  $+50^\circ$ の5方向の線上(図7)での $\eta$ の距離変化を示す。ここで $r$ が5km以下は陸の領域(高さ1mとした)である。分布には鈍りが見られるが、水位 $\eta$ の値を良く推定できることが分かる。これらから、海洋レーダシステムで十分波高を推定可能であることが分かった。なお、陸に到達する津波の波高は沖合で推定された津波の水位 $\eta$ や視線方向流速 $U_r$ を初期条件とした津波シミュレーションを、レーダ照射領域を含んだ領域で実施することによって推定可能である。

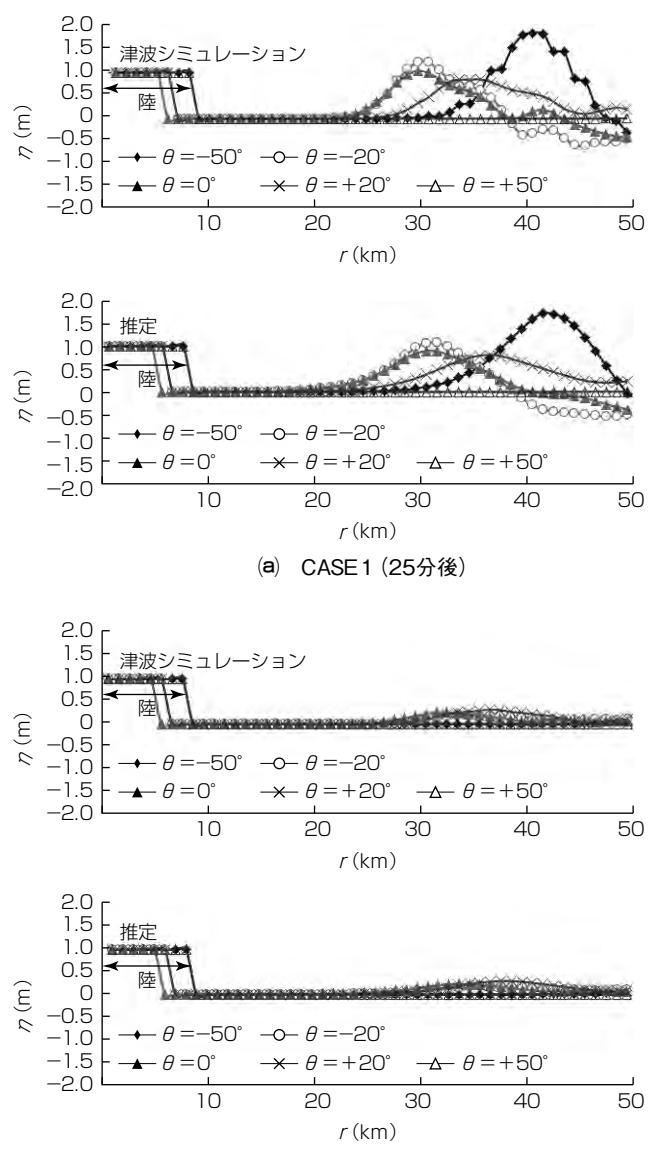


図9. 津波シミュレーションと推定との波高の距離変化比較

#### 4. む す び

海洋レーダ1台を用いて計測される流速情報(視線方向流速)と浅水長波理論から津波の波高を推定する技術について述べた。その他、当社では、表層流速の中で大きな割合を占める定常流の動きを予測して除去した津波成分を抽出する技術も開発している。これらの技術によって、早期の津波検知と避難行動に必要な時間の確保を支援できる。

#### 参 考 文 献

- (1) 石川博章, ほか: 海洋レーダーを用いた津波到達・波高予測技術, 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, 164-1, 152~155 (2016)
- (2) 後藤智明: 津波の線形, 非線形および波数分散現象, 水工学に関する夏期研修会講義集, 35-B, B.9.1~B.9.20 (1999)

# 検査機用高速カラーCIS “KD-CXシリーズ”

山縣浩作\* 太田 章\*  
伊藤 篤\*  
時田直幸\*

High-speed Color CIS "KD-CX Series" for Inspection Machine

Kosaku Yamagata, Atsushi Ito, Naoyuki Tokida, Akira Ota

## 要旨

2017年度で量産30周年を迎える三菱電機の密着イメージセンサ(Contact Image Sensor : CIS)事業の製品群は、複写機や紙幣判別分野等の画像読み取りデバイスとして広く使われている。

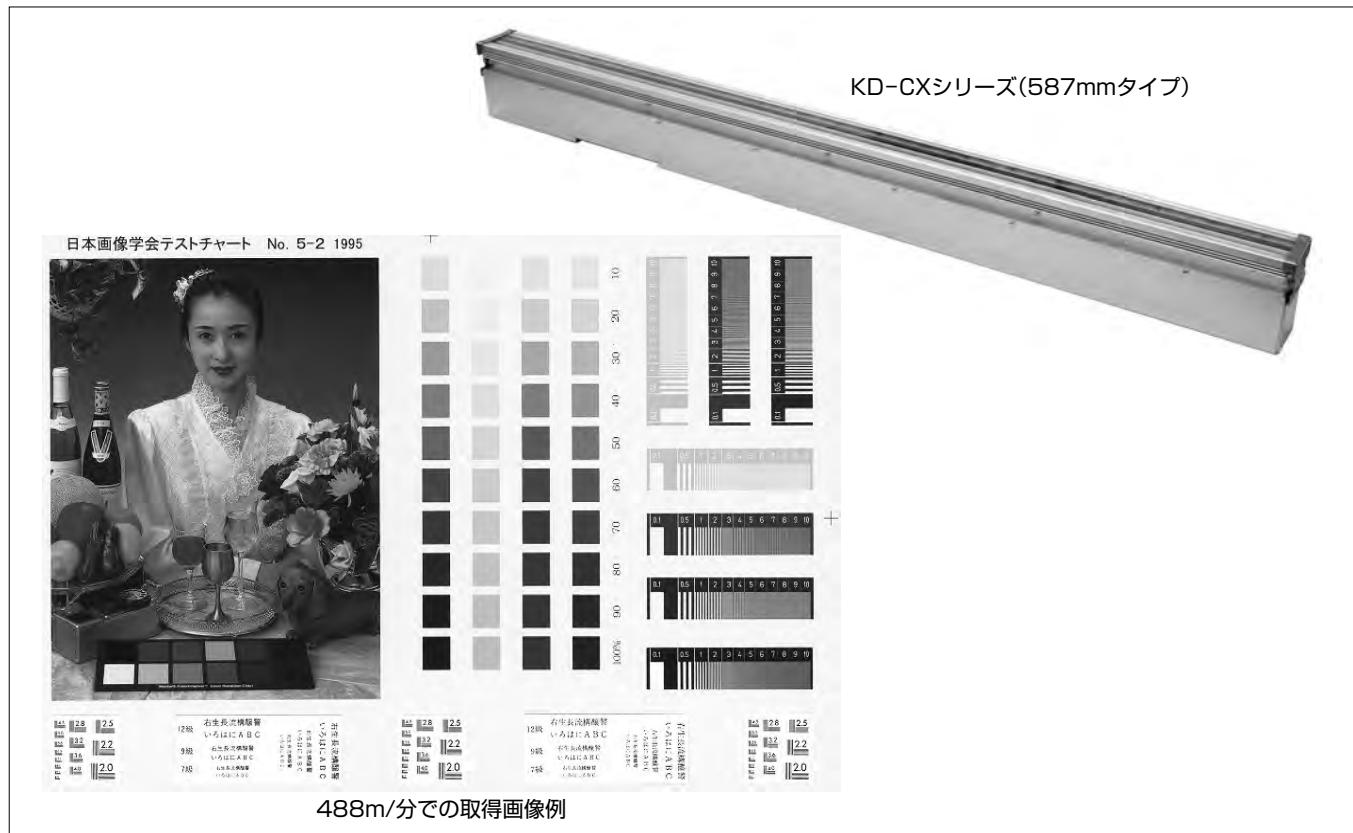
今回、マシンビジョン分野、主に商業用カラー印刷機の光学検査用途向けに解像度300dpi(最高解像度は600dpi)で96kHz(印刷物の搬送速度換算で488m/分、従来比4倍)の高速読み取り性能を持つカラーCIS“KD-CXシリーズ”を開発した。最高動作速度35MHzのカラーセンサIC(フォトダイオードアレー)を搭載したほか、画像インターフェースには25Gbpsの大容量データ転送が可能なCoaXPress<sup>(注1)</sup>を採用し、高速印刷機のフルカラーインラ

イン検査に適用可能な性能をCISとして初めて<sup>(注2)</sup>実現した。断面サイズ112×62(mm)のコンパクトな筐体(きょうたい)内にレンズと照明を一体化しており、ラインカメラと照明を複数配置した従来の検査システムと比べて小さなスペースに設置可能で、取付け・メンテナンスも容易である。読み取りサイズは、印刷用紙サイズに合わせた367mm, 587mm, 807mmの3種類をラインアップした。

読み取り性能とユーザビリティを大きく改善したKD-CXシリーズは、今後も需要の高まるマシンビジョン分野の生産性向上・安心の提供に貢献していく。

(注1) CoaXPressは、一般社団法人日本インダストリアルイメージング協会の登録商標である。

(注2) 2016年12月7日現在、当社調べ



## 検査機用高速カラーCIS“KD-CXシリーズ”と取得画像例

検査機用高速カラーCIS“KD-CXシリーズ”によって、高速印刷装置のフルカラーインライン検査に適用可能な性能をCISとして初めて実現した。コンパクトな筐体内にレンズと照明を一体化しており、ラインカメラと照明を複数配置した従来の検査システムと比べて小さなスペースに設置可能である。左下の画像は、日本画像学会のテストチャートをKD-CXシリーズの最高速度で読み取ったものである。

## 1. まえがき

2013年度に、印刷機やフィルム製造装置用の光学情報読み取りイメージセンサとして“KD-AXシリーズ”を立ち上げ、当社の密着イメージセンサ(CIS)としては初めてマシンビジョン業界に参入した。従来、複数のカメラとレンズ、照明を用いて構成していた検査システムを、照明内蔵のコンパクトなCIS 1台で実現できる利点があり、徐々にCIS方式が採用されるようになってきた。しかし、商業用印刷機やフィルム製造ラインにおける製造工程中(オンライン)の画像検査には、複写機や紙幣判別分野で利用されてきたCISと比べ更に高速読み取りが求められるため、KD-AXシリーズでは印刷機のオフライン検査機としてしか対応ができなかった。また、初めてマシンビジョン業界へ参画したこともあり、仕様・機能面で改善の余地があった。今回、これらの市場要求を踏まえて性能を大幅に改善した新シリーズの製品化を行った。

本稿では、今回のKD-CXシリーズ製品化に当たり、特に技術的課題の大きかった高速化の実現方法と利便性向上について述べる。

## 2. CISの構造と動作原理

図1に一般的なCISの構成部品とその断面を示す。ガラス面上を印刷物や紙幣などの読み取り対象物が通る際、内蔵したLED光源によって照射された対象物からの反射光がロッドレンズアレーを介して、CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)ラインセンサ(以下“センサIC”という。)上に結像される。画素は図の奥方向に一定間隔で配置されている。画素間隔はCISの用途によって100から600dpiまでの種類がある。また、読み取り幅は、紙幣判別用途向けでは紙幣の短手サイズの100mm及び長手サイズの200mm程度、複写機向けではA3用紙短手のおよそ300mmサイズとA0用紙の900mmサイズのバリエーションがあり、製品長さ全体にわたって画素が一列に(カラーセンサの場合、RGB(Red Green Blue)の三列で)配置される。画素はフォトダイオードアレーであり、ここで光電変換された電気情報がセンサICから出力

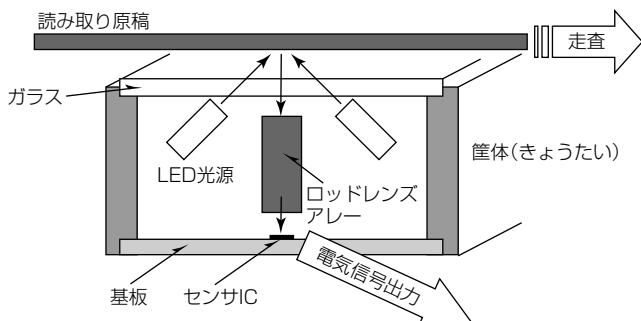


図1. CISの原理図

され、CIS上の基板に配置されたICでアナログ/デジタル変換とデジタル画像処理が行なわれ、各種装置用の出力インターフェースを介してデジタル電気信号として出力される。使用しているロッドレンズアレーは正立等倍光学系であり、画像歪(ひずみ)が少なく、読み取り対象物のサイズを精度良く検出することが可能である。

ただし、CISは、この正立等倍光学系のロッドレンズアレーを使うことで非常にコンパクトになる一方、焦点深度が浅く焦点の合う距離がガラス面上の近接領域に限られることがデメリットとなる。これが、密着イメージセンサと呼ばれる所以(ゆえん)であるが、実際はガラス面から数mm離れた位置を焦点にする製品も多い。マシンビジョン向けCISでは未乾燥のインクなど接触状態で読み取りの難しい対象物が多いため、この距離を従来設計手法の中でできるだけ離したガラス面から12mm(光源レス製品ではレンズ上面から14.5mm)離れた位置を焦点の設計中心としている。

## 3. 高速化

従来のKD-AXシリーズでは、対応可能な最大媒体搬送速度は、ラインレートが解像度によらず最大22kHzであったため、解像度600dpi読み取り時で約58m/分、解像度300dpi読み取り時で約116m/分であった。今回、市場調査の結果を踏まえ、印刷機のオンライン検査用途に対応するため、同用途で主として使用されている解像度300dpi(検査対象となる欠陥サイズ0.1mm相当)で、媒体搬送速度450m/分以上の性能を出すことを目標に製品開発を行った。今回開発したKD-CXシリーズの内部回路ブロック図を図2に示す。3.1節以降で、速度制約となる部分の課題解決方法について述べる。

### 3.1 センサICの高速化

高速化及び利便性向上(4章)を実現するため、KD-CXシリーズ用にセンサICを新たに開発した。このセンサICの駆動周波数は複写機向けCIS用に高速化を実現したセンサICと同じ35MHz(従来のKD-AXシリーズ比で2.2倍)とし、機能として新たにビニング機能と電子シャッター機能(4.1節)を組み込んだ。ビニング機能とは、高解像度のセンサにおいて、低解像度設定時に複数の画素の電荷情報を1つの画素として出力する機能である。ビニング処理に要する時間が追加となるものの、出力する画素数が減少するため、低解像度設定時の情報読み出し速度が向上できる利点がある。

センサICの駆動周波数向上とビニング機能追加によって、解像度300dpiモード時の1ラインの読み出し期間は、従来比約4倍の $10.4\mu s$ (96.2kHz)までを対応可能とした。媒体搬送方向に等倍な画像を得ることを考えると300dpi( $=86.7\mu m$ )の距離を1ライン読み出し期間内に搬送されることとなり、その結果、 $86.7\mu m \times 96.2K \times 60s = 488m/min$ の速度での読み出しが可能な構成となる。

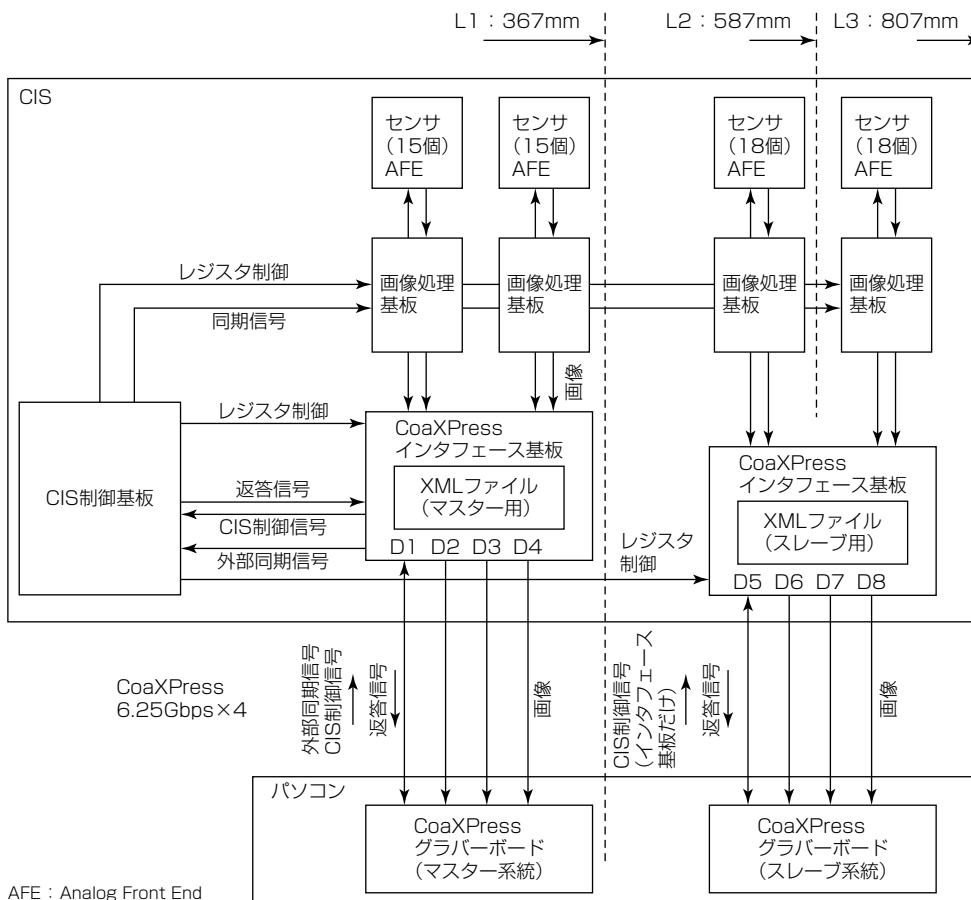


図2. KD-CXシリーズの内部回路ブロック図

また、画像のSNR(Signal to Noise Ratio)を確保しつつ約4倍の高速化を果たすためには、約1/4の蓄積時間で画像情報を読み取ることになり、CIS自体の性能向上が必須となる。これについては、センサICの画素感度を高めることに成功し、これを適用することでKD-AXシリーズと同等レベルのSNRを実現している。

### 3.2 製品インターフェース

488m/分の速度で300dpiの画像を読み出す場合、今回ラインアップした製品長の1つである367mmサイズを考えると、画像データを10ビット長/色とした場合 $367\text{mm} \times 11.8\text{画素} \times 3(\text{RGB}) \times 10\text{ビット} \times 96.2\text{K} = 12.5\text{Gbps}$ の画像伝送が必要となる。

従来のKD-AXシリーズで採用したCameraLinkインターフェースの最大伝送速度は4.08Gbps/ch(Medium Configuration時)であり、規格の速度を達成するために367mmサイズで4ch分のコネクタ8個が必要であった。今回はこれを打破するため、マシンビジョン業界で新たな規格として採用が見込まれるCoaXPressインターフェース(Ver.1.1)を採用した。この規格では、1本の同軸ケーブルで6.25Gbpsまでのデータ転送が可能で、4本使用して最大25Gbpsまでを1つのグラバーボードで受け取ることができる。さらに、同軸ケーブルはCameraLinkケーブルよりも屈曲性が良く、最大伝送長も10m以上が期待で

き、更なる高速伝送対応を目指す当社CISの次世代インターフェース規格として最適と判断し、選定した。これによって、開発目標仕様を満たす画像伝送が可能なシステムを構築できた。

### 4. 利便性の向上

KD-AXシリーズでマシンビジョン向けのCISを提案してきたが、顧客から機能面で改善要望があった。KD-CXシリーズでは、これらの改善要望に応えることで製品の利便性を向上させている。

#### 4.1 電子シャッター制御機能

通常、センサIC上の画素はリセット動作期間以外は光の蓄積を常時行うため、センサの光蓄積期間は読み取り周期に依存している。このセンサを読み取り周期が変動するシステムで使用した場合、読み

取り周期変動に応じてセンサの出力が変動してしまう問題が生じる。この問題を回避するため、従来の当社CISでは内蔵した光源をCIS動作と同期してパルス点灯を行う制御方式を採用し、“光蓄積期間 = 光源点灯期間”とすることで、センサの出力を安定化させてきた。しかし、検査用途では、内蔵光源だけでなくユーザーが用意する外部光源を用いて照明し、検査する場合もある。この場合はCISと光源点灯の同期がとれず、読み取り周期変動の影響を受けてしまう。

そこで、センサICの光蓄積時間を読み取り周期とは独立に制御可能な機能を新たに搭載した。具体的には、設定情報に基づき、リセット動作状態を保持することができるようにして、光の蓄積動作を時間的に止められるような設計を盛り込んだ。これを電子シャッター機能と呼ぶ。これによって、外部光源がDC点灯だとしても、電子シャッター機能を使うことで光の照射量(光蓄積時間)を一定に保つことができる。

#### 4.2 GenICamへの対応

CISで採用したCoaXPress規格では、そのインターフェースとしてGenICamと呼ばれる規格にのっとって通信制御が行われる。この規格では、CIS内部にカメラ定義ファイル(Camera Definition File)と呼ばれるカメラ(=CIS)の画素数・読み取り速度等の決められた仕様が一覧となったファイルに書き込まれており、動作開始時に所定操作でグラバーボード側へ転送される仕組みになっている。この規

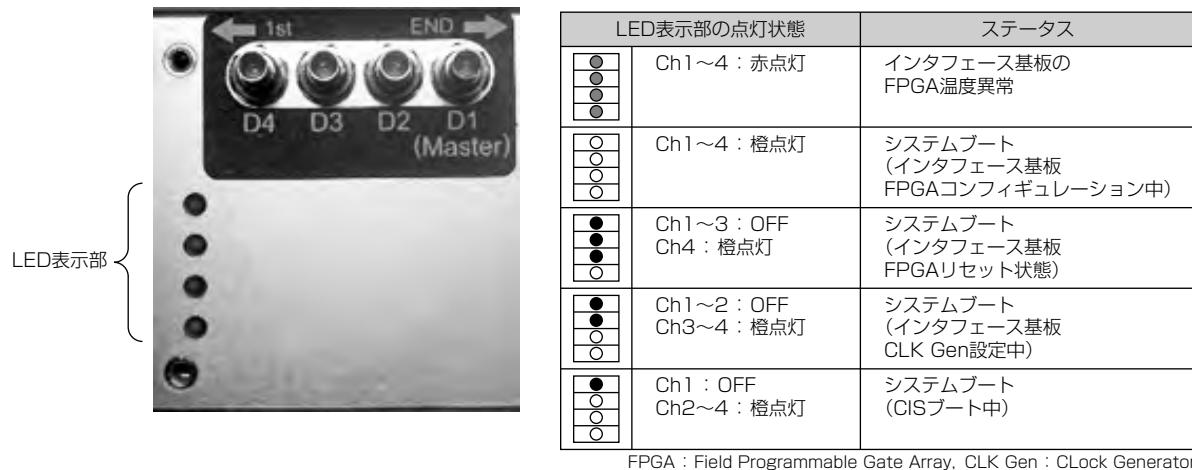


図3. LED表示部と表示説明

格ではCIS内部にXML(eXtensible Markup Language)仕様に沿ったカメラ定義ファイルが書き込まれており、これによって、接続されるグラバーボードがどのメーカーのものであっても、CISの制御情報を読み取ることができ、汎用のソフトウェア上から簡単に制御が可能となる。この規格に適合させることで、既に複数社のグラバーボードとの接続が確認できており、ユーザーの立ち上げ時の開発工数の削減にもつながることを期待している。

#### 4.3 LEDインジケータ

KDシリーズはB2Bで開発する複写機用途や金融端末用途のCISとは異なり、汎用製品として販売を進めていること、また、CISを触ることが初めてのユーザーも多いため、CISの動作状態を見た目で分かりやすく表示してほしいとの要望が多かった。

今回、CISの裏面にLED 4個を用いたインジケータ表示機能を設けた(図3)。CoaXPress規格として、立ち上げ時の動作状態のモニタ表示機能が義務付けられているが、これに更に機能を追加し、CISの立ち上げ手順などの状態であるか、また、内部でエラーが発生した際にもLED点灯状態でアラームを上げることができる表示を専用に追加した。

これらの対応によって、特にCISを初めて使用するユーザーの製品立ち上げ時の開発の負荷低減に役立つものと考える。

#### 5. むすび

今回製品化したKD-CXシリーズの主な仕様を表1に示す。300dpi読み取り時には、KD-AXシリーズの約4倍となる11μs/ライン(90.9kHz)、等倍読み取り時の媒体搬送速度488m/分を実現した。GenICam機能に対応することで、各社が独自に選択するグラバーボードから専用ソフトウェア開発をすることなくレジスタ制御が可能となった。

表1. KD-CXシリーズの主な仕様

項目	KD6R367CX	KD6R587CX	KD6R807CX
読み幅	mm	367	587.2
有効画素数	pixel	8,640×3	13,824×3
画素密度	dpi	600	
データフォーマット	–	CoaXPress Rev.1.1	
読み取速度(kHz/ライン)	10ビット	600dpi	50.6/55.0(外部/内部同期モード)
		300dpi	80.9/96.2(外部/内部同期モード)
		200dpi	100.9/130.6(外部/内部同期モード)
		150dpi	115.2/159.1(外部/内部同期モード)
	8ビット	600dpi	55.0/55.0(外部/内部同期モード)
	300dpi	91.8/96.2(外部/内部同期モード)	
	200dpi	112.0/130.6(外部/内部同期モード)	
	150dpi	125.9/159.1(外部/内部同期モード)	
出力データレート	Gbps max	6.25×4×1系統	6.25×4×2系統
光源	–	白色LEDアレー	
露光制御	–	LEDパルス制御/電子シャッター機能	
焦点位置	mm	12(ガラス面からの距離)	
外形寸法(L×W×H)	mm	434×62×112	654×62×112
質量	kg	2.6	3.9
		5.1	

さらに、外部光源との組合せにも対応できる電子シャッター、動作状態のモニタが可能なLEDインジケータ機能等、利便性も向上を果たした。今後、更なる長尺タイプをラインアップに増やす予定である。

当社のCIS技術でマシンビジョン業界に貢献できるよう、各種分野の光学読み取り検査に適した製品を提供し、品質向上と世の中の安心に貢献する製品提供への一助になる製品展開を進めていく。また、CIS開発としては、弱点である焦点深度の大幅な向上、レンズレス構成<sup>(1)</sup>などにもチャレンジして、更に使いやすいラインセンサを指向し、社会に広く貢献していく。

#### 参考文献

- (1) Kawano, H.: Lensless image scanner using multilayered aperture array for noncontact imaging, SPIE. Optical Engineering, 55, No.10, 103106 (2016)

# 自動車レーダ用ミリ波モジュール

稻常茂穂\* 宇田川重雄\*  
鈴木拓也\* 倉茂和紀\*  
神戸心一\*

Millimeter Wave Module for Automotive Radar

Shigeho Inatsune, Takuya Suzuki, Shinichi Kambe, Shigeo Udagawa, Kazunori Kurashige

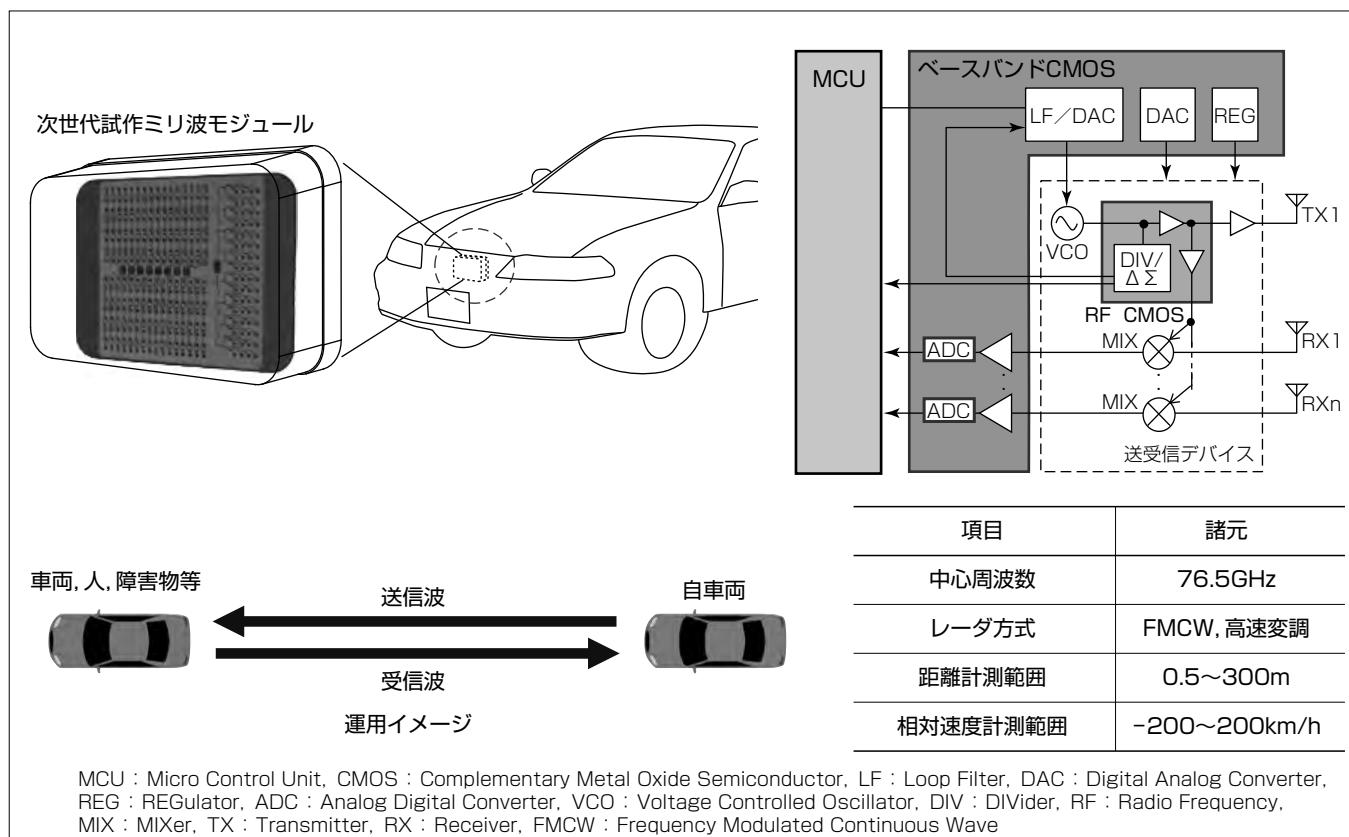
## 要旨

近年、自動車用安全運転支援システム(プリクラッシュセーフティ、自動緊急ブレーキ等)や車間距離を一定に保つACC(アダプティブクルーズコントロール)として、76GHz帯小電力ミリ波レーダを応用したシステムが各自動車メーカーから発売されている。ミリ波レーダは天候に左右されにくく、視界の悪い夜間でも性能を落とさず、遠くまで検知できるという特長がある。最近では自動運転技術の開発が盛んに行われるようになり、安全センサとしての役割が今後も期待される。

衝突防止を目的としたミリ波レーダの開発の歴史は古く、日本でも1980年頃から試作が行われているが、周波数が高いことから安価に使えるデバイスがなく、長年実用化に

結び付かなかった。三菱電機鎌倉製作所では宇宙・防衛機器開発で培ったミリ波帯MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)やその利用技術を応用して、1998年から自動車レーダ用ミリ波モジュールの開発を本格的に開始した。2003年1月の量産開始以来、小型化、低コスト化を進め、広く普及することで安全社会に貢献している。

今回、GaAs(ガリウムヒ素)による低位相雑音、高S/N(Signal to Noise)比、PLL(Phase Locked Loop)による変調補正の自動化、受信マルチチャネル化、コスト低減を図った次世代のミリ波モジュールを試作・評価とともに、近年急激に拡大した生産規模に対応するため、製造や検査の自動化ラインを整備した。



## 次世代ミリ波モジュールの試作

自動緊急ブレーキ等で使われるミリ波レーダは自動車のフロントグリル付近又はバンパー付近に位置しており、ミリ波モジュールはその中のアンテナから送受信部、ADC、マイコンまでをまとめたものである。次世代のミリ波モジュールでは新たにCMOS ICを開発し、製品特性の安定化、調整検査削減、小型化を図る。試作では乗用車相当の目標物で250m以上離れた位置でも十分なS/N比を確保できることを確認した。

## 1. まえがき

安全運転支援等を目的として搭載される自動車用のミリ波レーダで重視される性能は主に検知距離能力と角度精度である。法的に送信電力の上限が決められているため、高い検知距離能力を得るために、アンテナを含めた送受信利得が高いことと雑音レベルが低いことが必要である。アンテナについては温度特性に優れた高利得のものを開発し、雑音特性についてはGaAsプロセスによってVCOやミキサを用いて低雑音化を図っている。また、角度精度を高めるには受信チャネル間のアイソレーション特性を高め、振幅・位相の温度安定性を保つことが重要であり、このために独自のデバイス構造を採っている。

本稿では、今回試作した次世代ミリ波モジュールとそのフィールド試験結果及びミリ波モジュールの生産体制について述べる。

## 2. ミリ波モジュール

### 2.1 構成

ミリ波モジュールは、放射素子・分配回路・合成回路・マイクロストリップ変換器からなるアンテナ、VCO・増幅器・ミキサ等の高周波半導体素子が搭載される送受信デバイス、及び、送受信デバイスの制御と受信信号の処理を扱うMCUから構成され、ミリ波レーダの主要部分を占める。対応できるレーダ方式はFMCW方式と高速変調方式である。

量産開始以来、主に構造の簡素化・機能集約(集積化)・基板材料費の削減を実施することで、小型・軽量化による低コスト化を進めつつ高性能化を実現してきた。現在開発中の次世代ミリ波モジュールでは、新たにCMOS ICを開発し、低コスト化と製品特性の安定化、調整検査削減を図る。

図1のCMOS ICはVCOの変調補正回路とVCOの出力增幅を行うアンプを一体化したRF CMOS部と、送受信デバイス内の各ICのバイアス制御回路、及び受信信号の増幅、ADCを含むベースバンドCMOS部からなる。

次世代ミリ波モジュールの開発では、最新の技術動向調査と想定されるシステム要求を反映して機能・性能の拡充を行っている。より遠くまで検出し、かつより広く見たいという要求のバランスを取るため、アンテナについては高利得化に加えて広角化を優先した素子配列のものも用意している。今後、顧客の要求に合わせてアンテナ特性と送受信チャネル数の適正化を図っていく。

### 2.2 アンテナ

レーダアンテナには高利得、低サイドロープ、高信頼性等が要求され、航空機、船舶等では導波管スロットアレー方式が主流となっている。当社でも自動車用としてこの技術を応用し、製品化した例があるが、現在では薄型化、軽

量化に加えて広角化と低コスト化で有利となるマイクロストリップアレー方式を採用している。基板材料はPTFE(フッ素樹脂)ではなく、より温度特性が優れ、自動車の厳しい環境条件に適合する樹脂材料を採用した。アンテナ設計は各チャネルの中央から給電する方式とし、自動車レーダ用に最適化した素子配列と励振分布を用いて、導波管スロットアレーに匹敵する高利得、低サイドロープ特性を実現している。偏波は45度偏波とし、対向車との干渉低減を図っている。回路パターン形成は一般的な基板製造工程での製造を可能とし、高精度で大量生産を実現している。

図2に今回試作したアンテナを示す。送信は64素子をまとめて1チャネルとし、受信は32素子をそれぞれまとめたものを並べて8チャネル構成とした。水平面及び垂直面のアンテナ特性を図3に示す。サイドロープ特性として、-35~-40dBが得られている。

### 2.3 送受信デバイス

MMICを安定に動作させ、かつミリ波帯送受信信号をアンテナ給電点に伝送するために、従来の送受信デバイス

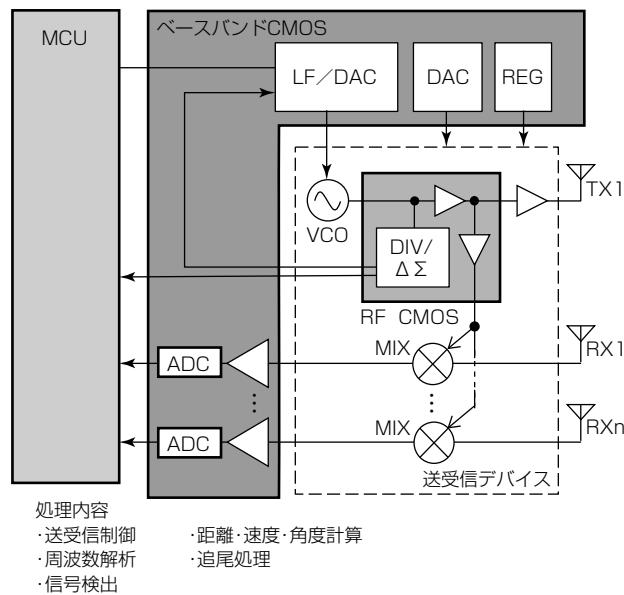


図1. ミリ波モジュールブロック図

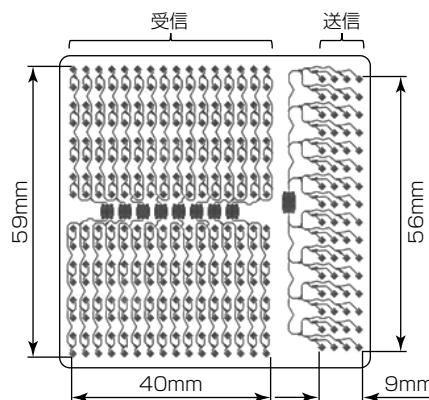


図2. アンテナ

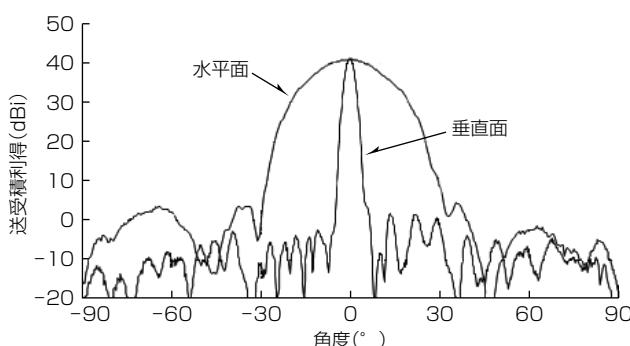


図3. 放射パターン評価結果

はセラミックパッケージ、ダイボンディング／ワイヤボンディングが主流であったが、低コスト化のために樹脂パッケージ、フリップチップ／リフロー実装を適用している。樹脂パッケージはMMICが実装された高周波用樹脂基板上にはんだボールを搭載して、制御基板上にBGA(Ball Grid Array)実装する構造によって、従来セラミックパッケージで使用されていた複雑な蓋材や信号接続ピンなしで、各IC間のアイソレーション／シールド機能とRF／制御信号接続機能を実現している。また、セラミックパッケージと比べて、制御基板との線膨張係数差がなくなり、耐環境性でも実装／接合信頼性が優れている。このBGA構造によって、ミリ波帯送受信信号は送受信デバイスから制御基板の反対面に実装されたアンテナ給電点に最短給電される(図4)。これによってアンテナと同一面に送受信回路を構成する場合に必要とされるMMICからアンテナまでの引き回しが不要になり、各チャネル間が等長かつ1dB未満の低損失なRF配線接続を実現している。

送受信IC(MMIC)は機能／性能によって、GaAsとCMOSプロセスを使い分けている。高速かつ直線性の高いFM変調を実現するオープンループ及びクローズドループ(PLL)方式の変調補正回路、受信ADCを含むベースバンド及びバイアス制御回路をCMOSプロセスによって集積化している。一方、 $1/f$ 雑音特性や出力電力に優れるGaAsプロセスを発振器及びフロントエンドアンプに用いることによって、オープンループ方式で $-105\text{dBc/Hz}$  @ 1 MHz off、PLLでは $-88\text{dBc/Hz}$  (FOM(Figure Of Merit) =  $-223\text{dBc/Hz}$ ) @ 1 MHz offの低位相雑音、出力 $>10\text{dBm}$  @  $125^\circ\text{C}$ を実現している(図5)。

受信系は $1/f$ 雑音の低いGaAs SBD(ショットキバリアダイオード)を用いて、LNA(低雑音増幅器)なしのMIXダイレクトコンバージョン方式のマルチ受信構成(8チャネル)となっており、LNAありの場合と同等の雑音性能を維持している。MIX回路はダイオードだけをチップ化／実装し、樹脂基板上でフィルタ回路を形成したディスクリート構成とすることで低コスト化を実現している。これらの構成によって利得温度偏差は $-30\sim125^\circ\text{C}$ で2 dB未満、受信各チャネル間の振幅／位相トラッキング特性はそれぞれ、 $\pm 0.5\text{dB}$ 、 $\pm 3^\circ$ 以下となっており(図6)、ミリ波レーダ

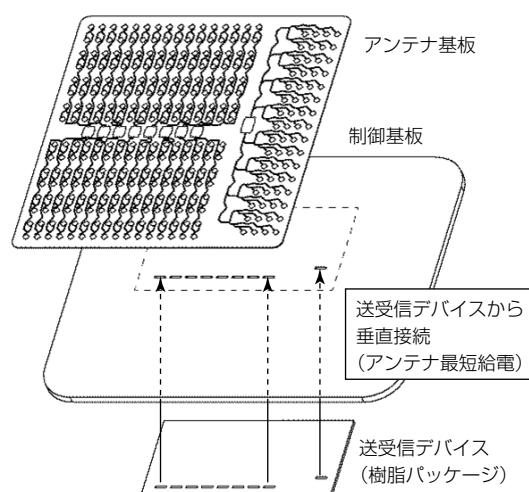


図4. RF信号接続構造

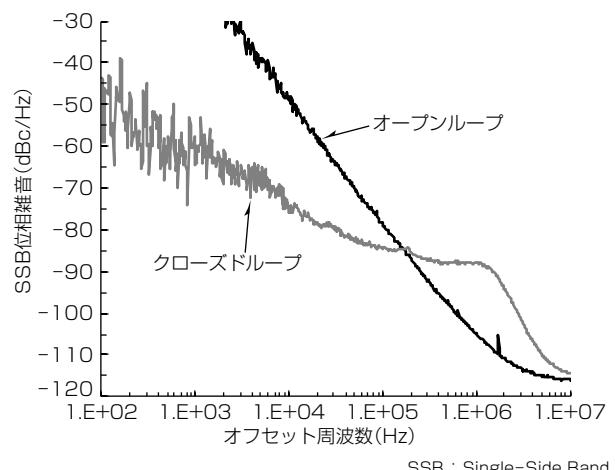


図5. 送信位相雑音特性(77GHz帯)

として高い角度検出特性が期待できる。

## 2.4 フィールド試験結果

試作ミリ波モジュールを試験車両のエンブレム付近に取り付け、目標物としてコーナーリフレクタ(反射断面積が乗用車相当の約15dBsm)と乗用車を用いて検知距離性能を確認した。図7はコーナーリフレクタを250m離れた位置から見たもので、10dB以上のS/N比が得られている。また、図8は乗用車を目標物としてレーダを搭載した試験車両を接近させた例で、約200mの位置でも十分なS/N比であることが分かる。

## 3. 生産体制

### 3.1 品質活動

量産開始以来、自動車レーダ用ミリ波モジュールは人命に関わる重要な部品であるとの認識の下、過去のトラブル事例の水平展開、不良を発生させない活動、不良を流出させない活動、作業者の意識向上活動を活動方針とし、製品設計、工程設計、工程検証、量産までの各ステップでの実情に応じた種々の取組みを実施してきた。

最近は、新規点・変化点管理及び検証強化とロバスト性

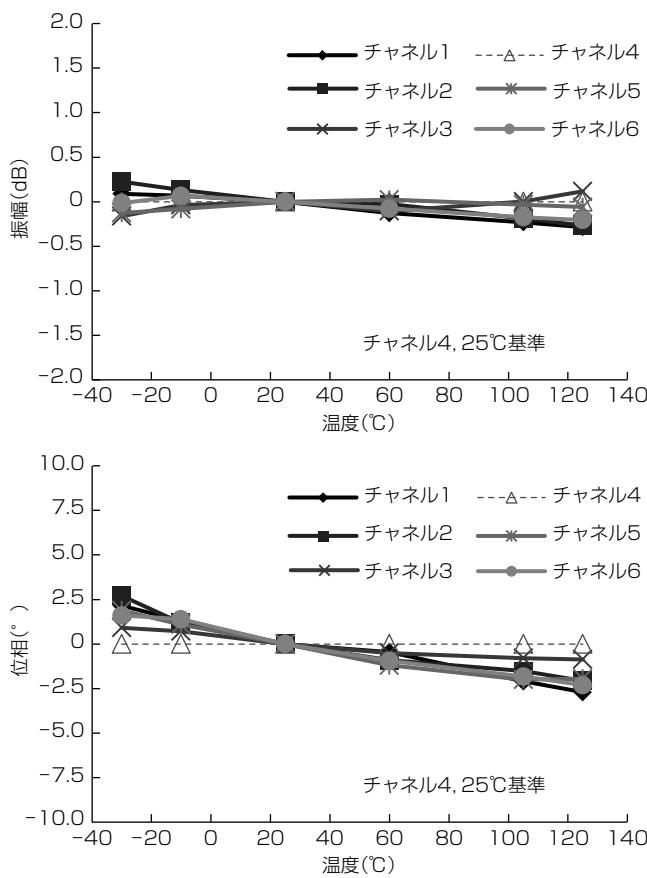


図6. 受信チャネル間の振幅／位相トラッキング特性

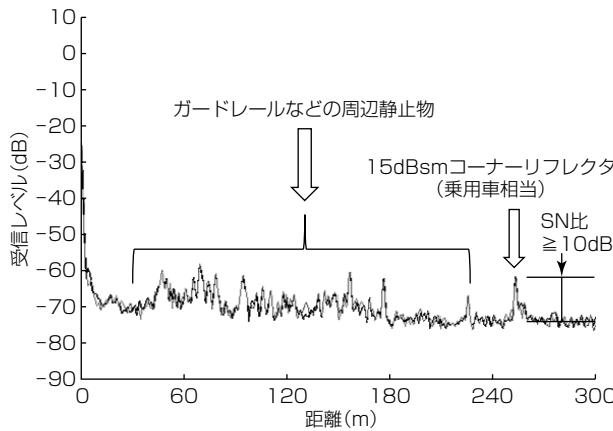


図7. コーナーリフレクタの受信信号スペクトル

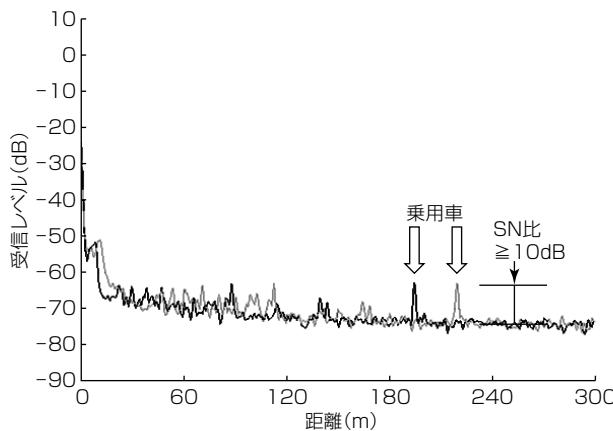


図8. 乗用車の受信信号スペクトル



図9. ミリ波デバイス専用製造ライン



図10. 自動調整検査ライン

確保、部品購入先・外注先への管理強化、工程内品質・異常見える化と対策処置時間短縮化を重点事項として実施中である。

### 3.2 製造・検査ライン

製造ラインは、送受信デバイス組立てとミリ波モジュール組立てに分かれる。前者はデバイスパッケージ製造自動化ライン、後者はSMT(Surface Mount Technology)実装自動化ラインを複数持っている(図9)。

また、量産検査ラインは、常温、高温、低温で測定可能なインライン検査装置を複数導入しており、完全自動で全数検査に対応している。主な検査項目は電波法に関する送信電力、周波数等の送信特性とレーダ動作を模擬した受信スペクトル特性である(図10)。

製造・検査ラインは、全部品と工程履歴のトレーサビリティデータや、各種の製造・検査結果のトレンドデータをサーバ上で管理しており、必要時には瞬時にデータを確認することができる。

### 4. むすび

次世代試作ミリ波モジュールの構成、アンテナ特性、送受信デバイスの構造や特性について述べ、フィールド試験結果について示した。コスト低減や調整検査の負荷を減らすために新たに開発したCMOS ICによって検知距離等、所望の性能が得られることを確認した。

今後は製品化に向けて送受信チャネル数やアンテナビームパターンの適正化、信頼性評価等を計画している。

# 超音波による道路橋の滯水検知技術

木村友則\*  
細谷 朗\*\*

Technology of Water Detection in Road Bridge Using Ultrasonic Waves

Tomonori Kimura, Akira Hosoya

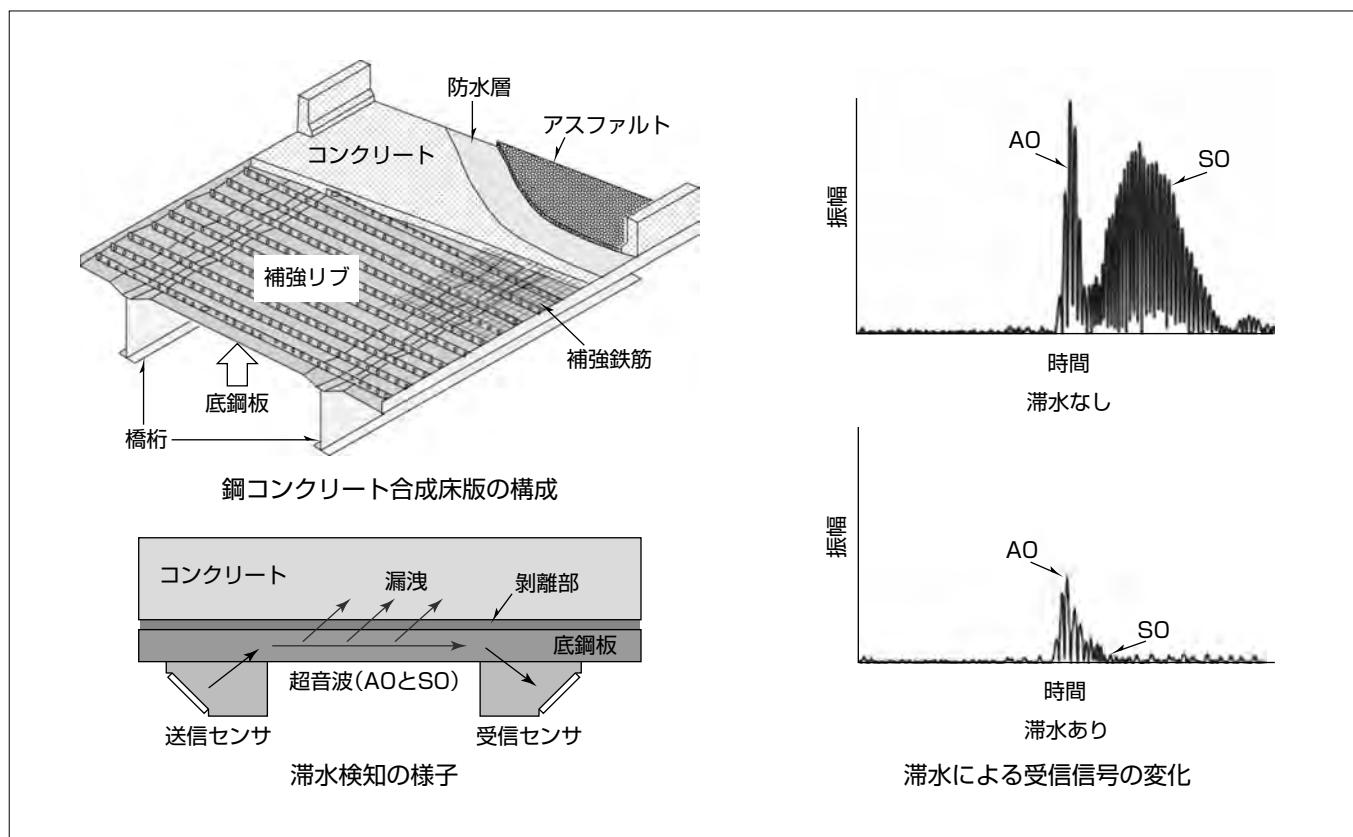
## 要旨

近年、各種構造物の老朽化が問題となってきている。老朽化した構造物を放置しておくと、人命に関わる重大な事故を引き起こす可能性があり、安全・安心な社会を実現するためにはこれら構造物の維持管理が不可欠である。すなわち、検査を行って問題があれば補修を行う必要がある。

検査方法として、多くの場合目視検査が行われているが、構造物内部の状態を目視で検査することは難しい。内部の状態を検査する方法としてX線や超音波による方法があるが、使いやすさやコストの面から超音波による非破壊検査が多く用いられている。

超音波を用いて構造物内部の状態を非破壊で検査する技術の一つとして、道路橋の滯水検知技術がある。道路橋に

用いられている鋼コンクリート合成床版(しょうばん)は、コンクリートが劣化してくると底鋼板との剥離部に雨水が滯水する。この滯水を検知すれば、間接的にコンクリートの劣化を診断できる。今回、底鋼板に超音波の板波を伝搬させ、受信信号の振幅から剥離部滯水を検知する技術を(株)横河ブリッジと共同で開発した。送信センサと受信センサを底鋼板に設置し、2つのモード(AOとSO)の板波を伝搬させる。剥離部が滯水すると、コンクリートへ超音波のエネルギーが漏洩(ろうえい)していくが、モードによって漏洩量が大きく異なることを利用すると、鋼コンクリート合成床版の劣化診断に有効な情報が得られる可能性がある。



## 鋼コンクリート合成床版と滯水検知

上側の図は、鋼コンクリート合成床版の構成を示している(株)横河ブリッジから提供)。アスファルトの下に防水層を介してコンクリートがある。コンクリートは補強リブや補強鉄筋で強度を保っている。コンクリートの下側に底鋼板がある。左下の図は、超音波による滯水検知の様子を示している。右下の図は、滯水によって超音波の受信信号が変化する様子を示した実験例である。

## 1. まえがき

近年、橋梁(きょうりょう)に用いられている床版の損傷が顕在化している。鋼コンクリート合成床版の損傷事例の報告はないが、将来的に損傷が発生する可能性はある。鋼コンクリート合成床版のコンクリートが劣化すると水が浸入し、底鋼板との剥離部が滯水する。剥離部滯水を検知することによって、コンクリートの劣化を間接的に診断することができる。今回、板波による鋼床版Uリブ内滯水検知技術<sup>(1)</sup>を応用し、コンクリートと底鋼板との剥離部滯水検知技術を(株)横河ブリッジと共同で開発した。

本稿では、道路橋の滯水検知方法と試作したセンサによる実験結果について述べる。

## 2. 2つのモードを用いた滯水検知方法

鋼床版Uリブ内滯水検知では、A0モード(以下“A0”という。)の伝搬減衰を大きくするためセンサ間距離を約400mmとした。しかし、合成床版の剥離は、大きさ200mm以下の場合もある。今回、S0モード(以下“S0”という。)も併用して大きさ200mm以下の剥離部滯水を検知する技術を開発した。

### 2.1 くさびを用いた板波の送信

図1に、くさびを用いて鋼板に対して斜めに超音波を入射して、板波を送信する様子を示す。縦波入射角を $\alpha$ とすると、鋼板中には

$$\frac{\sin \alpha}{V_w} = \frac{1}{V_s} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

というスネルの法則を満足する板波が伝搬する。ここで、 $V_w$ はくさびの縦波音速、 $V_s$ は板波の位相速度である。

### 2.2 音場シミュレーションの条件

A0とS0の板波を同時に送受信でき、かつ、滯水検知可能な入射角 $\alpha$ を求めるため、音場シミュレーションを行った。モデルは二次元弾性波FDTD(Finite Difference Time Domain)法<sup>(2)</sup>を用いた。図2に、音場シミュレーションで用いたセンサの応答特性を示す。鋼板の塗装の影響を低減させるため、鋼床版Uリブ内滯水検知と同様に今回も中心周波数は約0.4MHzとした。

厚さ6mmの鋼板を伝搬する板波の位相速度及び群速度の分散特性を図3に示す。ここでは高次モードは省略して示している。位相速度の分散特性から、周波数0.4MHz帯の場合、A0とS0を同時に送受信するには位相速度3,000~4,000m/sとする必要がある。

音場シミュレーションでのセンサと試験体との相対的な位置関係を図4に示す。大きさ200mm以下の剥離部が対象なので、センサの遠方同士の距離を200mmとした。実際のコンクリートは骨材を含んだ複合材料であるが、ここでは簡単のため、縦波音速4,200m/s、横波音速2,000m/s、

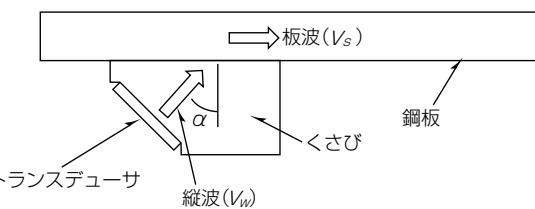


図1. くさびを用いた板波の送信

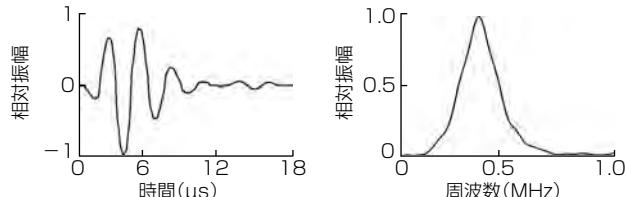
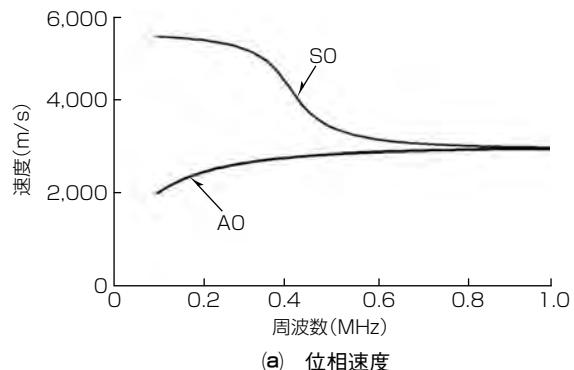
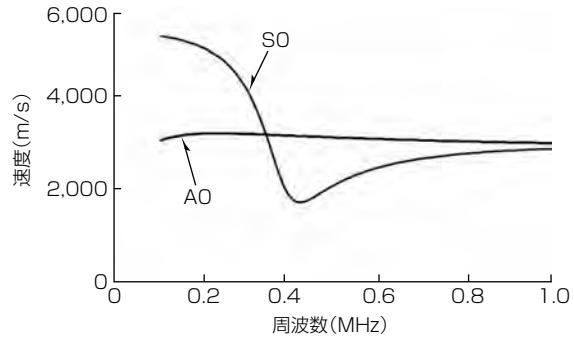


図2. 音場シミュレーションで用いたセンサの応答特性



(a) 位相速度



(b) 群速度

図3. 鋼板を伝搬する板波の分散特性

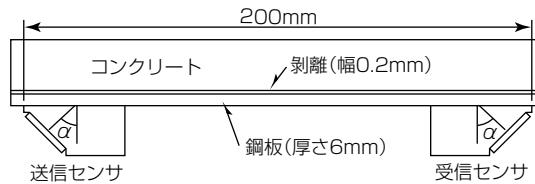


図4. センサと試験体との相対的な位置関係

密度2,300kg/m<sup>3</sup>の一様材料とした。また、くさびの縦波音速は2,360m/sとした。剥離の幅は0.2mmとし、この部分が空気の場合及び滯水した場合の受信信号を求めた。

### 2.3 音場シミュレーションの結果

入射角 $\alpha$ を46°として音場シミュレーションを行った。図5及び図6に、それぞれ、剥離部が空気の場合及び滯水した場合の音場シミュレーション結果を示す。図では粒子速度の絶対値を濃淡で示している。

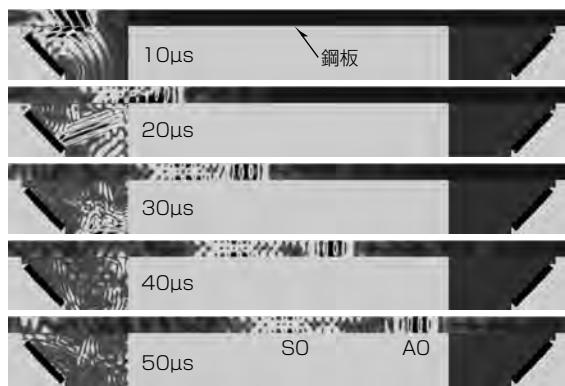


図5. 剥離部が空気の場合の音場

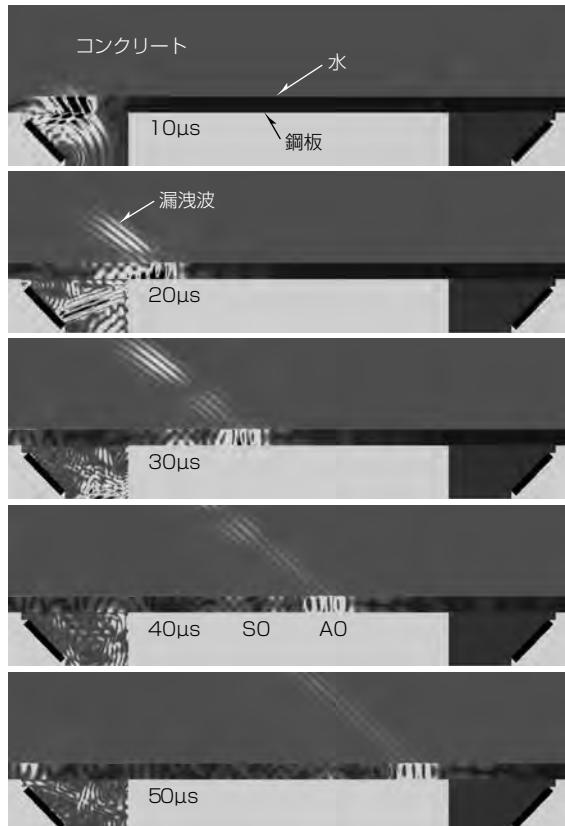


図6. 剥離部が滯水した場合の音場

図5から分かるように、2つの板波が伝搬していく。図3(b)の群速度から分かるように、0.4MHz帯では速い波がAO、遅い波がSOである。剥離部が滯水した場合には、図6に示すように、SOのエネルギーの多くがコンクリートへ漏洩していく。このため、AOよりも伝搬減衰が大きい。

#### 2.4 入射角に対する信号振幅の変化

入射角 $\alpha$ を43°から49°まで変化させて受信信号を求めた。図7に、 $\alpha=43^\circ$ 、 $\alpha=46^\circ$ 、及び $\alpha=49^\circ$ のとき得られた受信信号を示す。各図ともに、剥離部が空気の場合と滯水した場合の信号を上下に並べて示している。

図7に示すように、AOとSOの両方とも受信されているが、振幅変化に大きな差異がある。SOは剥離部が滯水すると急激に振幅が低下するが、AOは半減する程度である。この特徴を用いれば、滯水検知は可能と考えられる。

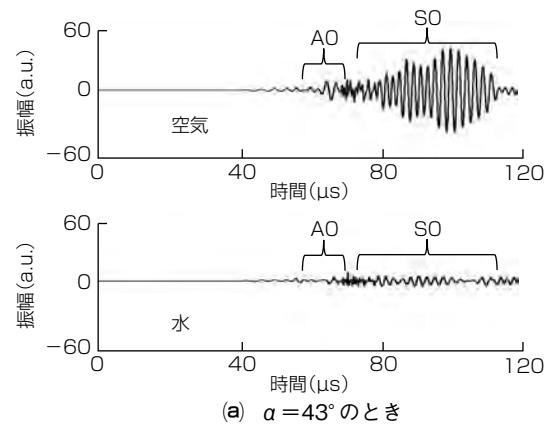
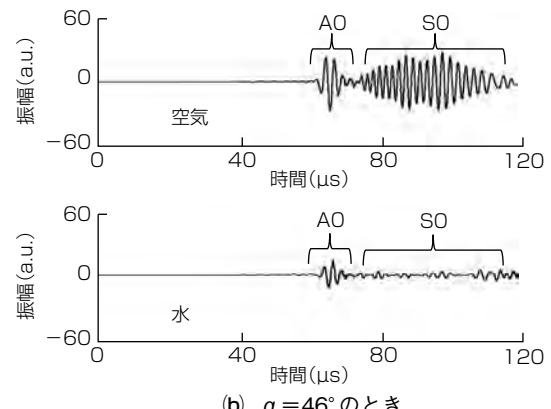
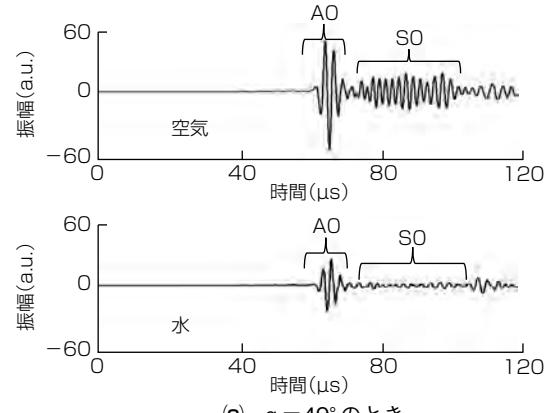
(a)  $\alpha = 43^\circ$  のとき(b)  $\alpha = 46^\circ$  のとき(c)  $\alpha = 49^\circ$  のとき

図7. 音場シミュレーションで得られた受信信号

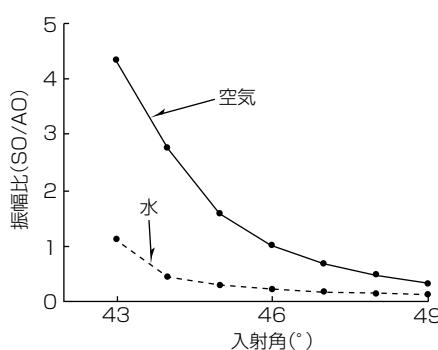


図8. 入射角に対する振幅比の変化

図8に、入射角に対する振幅比(SO/AO)を示す。剥離部が滯水するといずれも振幅比は低下し、その変化は入射角が小さい方が顕著である。

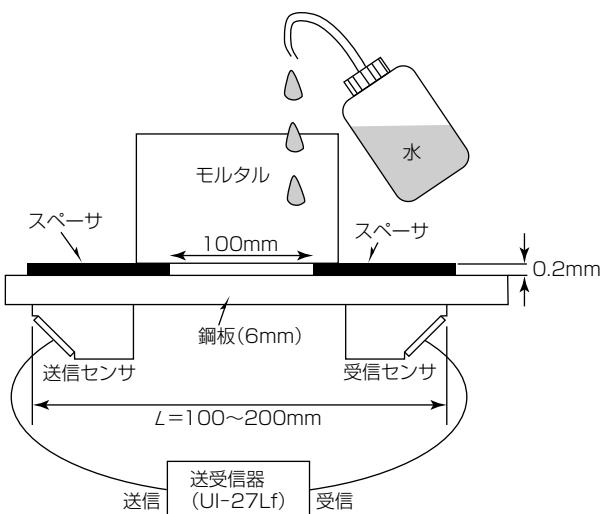


図9. 実験系

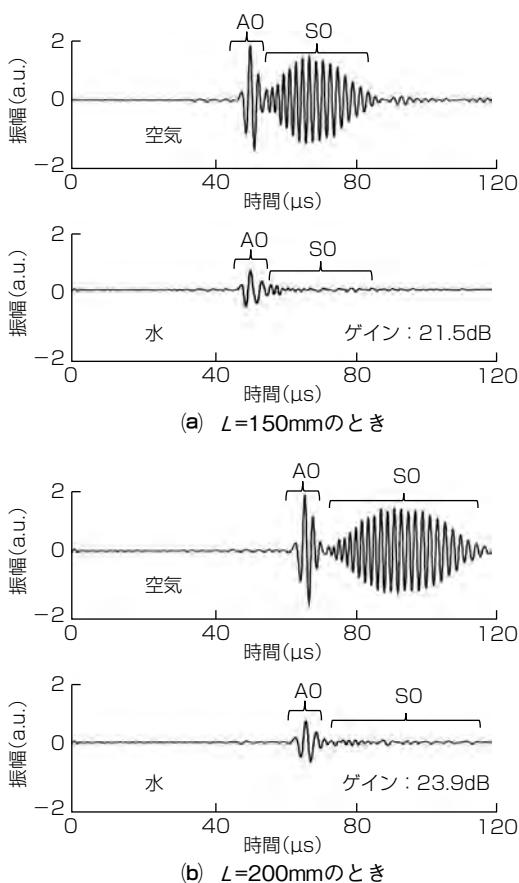


図10. 実験で得られた受信信号

### 3. 実験結果

#### 3.1 実験系

図8に示したとおり、入射角が小さい方が滯水に対して振幅比は大きく変化する。しかし、図7(a)に示したとおり、A0の振幅が小さくてノイズに埋もれる可能性がある。そこで、A0の振幅も十分大きく得られるように、入射角46°のセンサを試作して実験を行った。くさびの材質は、縦波音速2,360m/sのポリスチロールを用いた。実験系を図9に示す。送受信器には、1MHz以下の低周波帯でも使用

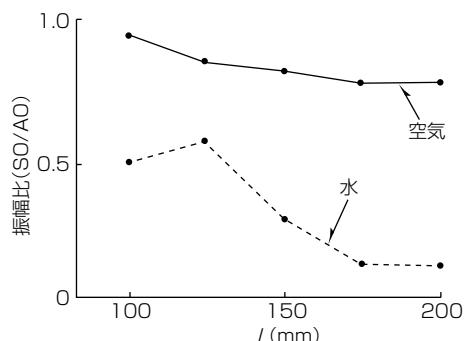


図11. センサ間距離に対する振幅比の変化

可能な菱電湘南エレクトロニクス(株)製の探傷器“UI-27Lf”を用いた。コンクリートの代用品としてモルタルを用い、スペーサで0.2mmの剥離を模擬した。剥離を模擬した領域は100mmである。

図9に示す距離Lを100~200mmで変化させ、剥離部が空気の状態での受信信号と、水を滴下して滞水させた状態での受信信号を測定し、振幅比(S0/A0)を求めた。

#### 3.2 受信信号

図10に、 $L = 150\text{mm}$ 、及び $L = 200\text{mm}$ で得られた受信信号を示す。各図ともに、剥離部が空気の場合と水の場合の信号を上下に並べて示している。また、実験における探傷器のゲインも合わせて示している。

図10に示すように、水を滴下して剥離部を滞水させるとA0とS0とともに減衰するが、音場シミュレーションと同様にS0の方が大きく減衰することが確認できた。

距離Lに対する振幅比の変化を図11に示す。剥離部が空気の場合、振幅比は1.0から緩やかに減少していく。一方、剥離部が水の場合には、 $L = 125\text{mm}$ 以降急激に減少する。例えば、振幅比のしきい値を0.5とすれば、大きさ200mm以下の剥離部滞水を検知できる可能性がある。

### 4. むすび

2つのモードの板波を用いて、コンクリートと底鋼板との剥離部が滞水しているかどうかを検知する技術について述べた。音場シミュレーションを行い、S0とA0の振幅比を用いる方法が有効であることを示した。また、センサを試作して実験を行い、大きさ200mm以下の剥離部滞水を検出できる可能性があることを確認した。今後、フィールド試験を行い、この技術の妥当性検証を行う予定である。

### 参考文献

- (1) 木村友則, ほか: 板波による鋼床版デッキプレート貫通亀裂の検出, 日本国際学会 2013年秋季研究発表会講演論文集, pp.1353-1356 (2013)
- (2) 木村友則, ほか: 弾性波FDTD法による音場シミュレーションの超音波斜角探傷への適応, 電子情報通信学会技術研究報告, US2005-124 (2006)