

低高度軌道衛星からの無線データ伝送の 世界最高速（毎秒 2.65 及び 3.3 ギガビット）を達成

1. 発表者：

中須賀 真一（東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙専攻 教授）

齋藤 宏文（宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 名誉教授）

白坂 成功（慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆低高度軌道衛星からの無線データ伝送の世界最高速（毎秒 2.65 及び 3.3 ギガビット）の実証実験に小型衛星を用いて成功した。
- ◆天候に左右されず、低価格なシステムが可能な X 帯（8GHz）の電波を、偏波多重（注1）と高度な変調方式（64APSK 及び 256APSK）（注2）を用いて、世界最高レベルの周波数利用効率（注3）で利用した。
- ◆多数の小型地球観測衛星群（注4）による、“いつでも どこでも”地球表面の光学画像やレーダ画像を取得するミッションが、今後の社会や経済活動に大きな変革をもたらすと予想される。今回の軌道上実証は、これらの地球観測監視ミッションの大量なデータを低価格で地上に伝送する技術に大きく貢献すると期待される。

3. 発表概要：

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所 齋藤宏文教授（研究当時、現名誉教授）、国立大学法人東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 中須賀真一教授、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 白坂成功教授の研究グループは、内閣府革新的研究開発促進プログラム（課題名 オンデマンド即時観測が可能な小型合成開口レーダ（注5）衛星システム、2015-2018年）にて、低高度軌道の小型衛星からの超高速データ伝送通信システムを開発しました。そして、2019年1月に打ち上げられた宇宙航空研究開発機構の革新的衛星技術実証1号機 小型実証衛星1号機（RAPIS-1）（注6）を用いて軌道上の実証実験を行いました。

RAPIS-1衛星からの X 帯（8GHz帯）の超高速データ伝送信号を、JAXA 追跡ネットワーク技術センター臼田宇宙空間観測所にある宇宙科学研究所所有の10mアンテナにて受信した後、データレコーダに一旦記録し、ソフトウェアにて復調復号を行いました。その結果、低高度衛星からの無線を用いたデータ直接伝送として世界最高速となる毎秒 2.65 ギガビット及び 3.3 ギガビットの通信速度を実験的に実証することに成功しました。

この通信システムは、天候に左右されず低価格なシステムが可能な X 帯（8GHz）の電波を、偏波多重と高度な変調方式である 64APSK（64 値振幅位相偏移変調）及び 256APSK（256 値振幅位相偏移変調）技術を用いて、世界最高レベルの周波数利用効率（8.4bit/s/Hz、及び 10.8bit/s/Hz）で有効に利用しています。

今後の宇宙利用では、多数の小型地球観測衛星群により、“いつでも どこでも”地球表面の光学画像やレーダ画像を取得するミッションが、社会や経済活動に大きな変革をもたらすと予

想されます。今回の軌道上実証は、これらの地球観測監視ミッションの大量なデータを低価格で地上に伝送する技術に大きく貢献すると期待されます。

4. 発表内容：

背景

近年の宇宙からの地球観測分野では、観測技術の高度化により地表分解能や観測精度の向上が進み、これに伴う観測データの大容量化が進んでいます。また、小型衛星を多数機打ち上げた衛星群（コンステレーション）によって特定の地域を観測する頻度を高めて、毎日、あるいは数時間ごとにその地域の観測を行い、さまざまなビジネスに利用する事が日本やアメリカで実施ないしは計画されています。以上のような状況のもと、観測衛星から地上局への観測データ伝送通信の高速化が望まれています。添付資料 表1には、地球観測衛星の直接データ伝送通信の動向をまとめてあります。

各国の宇宙機関では周波数帯域が広くとれる無線領域である Ka 帯（25.5–27 ギガヘルツ、周波数帯域幅 1500 メガヘルツ）の電波を利用して、高い通信速度を実現する研究を行っています。NASA は 2022 年に打ち上げ予定の NISAR という大型衛星にて、この Ka 帯を使用して毎秒 4 ギガビットのデータ直接伝送を行おうと、準備をすすめています。JAXA も 2020 年代中頃を目標に、Ka 帯を用いて地球観測衛星から地上局へ平均毎秒 8 ギガビットの伝送速度を目指しています。また、高速通信としては宇宙光通信も有力な方法です。

ただし、Ka 帯や光を用いた通信方式は、基本的な観測衛星から直接地上局へ伝送する方式では、降雨や雲などの影響で性能が低下しやすい問題があります。また、Ka 帯の通信システムは現在では低価格化が困難です。このため、雲や降雨の影響をほとんど受けない X 帯と呼ばれる 8.025-8.4 ギガヘルツ（周波数帯域幅 375 メガヘルツ）の電波による通信が、現在では最も普及している観測データの高速度伝送方法となっています。表1に示すように、この X 帯の高速度通信としては、大型の地球観測衛星 WorldView-3 が毎秒 1.2 ギガビット（毎秒 12 億ビット）の通信速度を実用化しています。小型衛星としては、最近、米国 Planet 社の超小型衛星（Cube Sat）Dove が毎秒 1.6 ギガビット（毎秒 16 億ビット）の通信速度を達成しています。

しかし、通信速度の向上の要求は更に大きく、これらの通信速度を超える技術開発が求められています。X 帯の電波は低価格な通信システムが可能で、天候に左右されないという大きなメリットがあるものの、周波数帯域幅は Ka 帯の約 1/4 であるため、通信速度を現在以上に向上させるためには、電波の電界方向の違いを利用した偏波多重技術や高度な変調方式を用いて、高い周波数利用効率を達成することが課題でした。

本研究の内容

通信システム

JAXA 宇宙科学研究所の齋藤宏文教授（研究当時、現名誉教授）のグループは、2010 年頃から小型衛星からの高速データ伝送の研究を宇宙科学研究所工学委員会の経費で開始しており、2014 年には東大の小型衛星ほどよし 4 号衛星にて、毎秒 500 メガビットの高速データ通信に成功しました。

この成果を発展させて、JAXA 宇宙科学研究所、東京大学、慶應義塾大学からなるチームは、8GHz 帯の電波を使用して低高度衛星からの超高速伝送通信システムを、内閣府の革新的研究開発促進プログラム ImPACT（課題名：オンデマンド即時観測が可能な小型合成開口レーダ衛

星システム、2015-2018年)にて開発しました。自然災害などの緊急事態が発生した際に、観測に最適な軌道へ小型衛星を速やかに打ち上げ、対象地域の合成開口レーダ撮像を行い、直ちに国内の地上局へ観測データ伝送することを目的として、ベンチャー企業や東大大学院生とともに開発を行って来ました。添付資料の表2には、開発した直接データ伝送システムの主要諸元を示しました。図1は、開発された人工衛星搭載の送信機と偏波共用の中利得アンテナの外観を示します。図2には、人工衛星搭載の機器と地上受信局からなる、直接データ伝送システムのブロック図を示しています。

軌道上実証試験

このようにして開発された送信機と搭載アンテナは、JAXAの革新的衛星技術実証1号機小型実証衛星1号機RAPIS-1に搭載され、2019年1月に打ち上げられました。衛星からの信号はJAXA追跡ネットワーク技術センター臼田宇宙空間観測所にある宇宙科学研究所所有の10mアンテナにて受信されました。このような高速の伝送信号を受信しながら直ちに復調できる復調装置は未だありません。このため、受信信号は一旦データレコーダに記録され、衛星受信が終了した後に、本プロジェクトで新たに開発したソフトウェア復調器で復調作業を行いました。

世界最高の無線通信速度

RAPIS-1衛星からの信号を受信復調した結果、2偏波多重の64値振幅位相偏移変調(64APSK)方式では毎秒2.65ギガビット(26億5000万ビット)、及び、2偏波多重の256値振幅位相偏移変調(256APSK)では毎秒3.3ギガビット(33億ビット)の通信速度の軌道上実証に成功しました。この通信方式では、電波の周波数帯域幅を非常に効率的に使用しており、周波数1ヘルツあたりの情報伝送速度としては、64APSK方式では1ヘルツ当たり毎秒8.4ビット、256APSK方式では1ヘルツ当たり毎秒10.8ビットという世界最高クラスの値を達成しています。

この通信システムは、衛星からの信号を受信中に即時に復調できるリアルタイム復調ではありませんが、表1に示すように、RAPIS-1衛星で実証した通信速度は無線を用いて行われた低軌道衛星からの直接データ伝送において、公開されているものとしては現時点での世界最高速度です。また、低軌道衛星からの256APSK方式の通信は、公表されたものとしては世界初のものです。以下には、本研究の特徴を解説します。

高速信号処理

複数の情報ビットを担う変調波形の単位をシンボル(注7)と呼びますが、本システムでは、X帯で使用できる周波数幅(315メガヘルツ)を効率的に使用するために、1秒間に300メガシンボル(毎秒3億シンボル)を送信します。この信号処理のために最先端の民生用信号処理デバイスを人工衛星で使用しています。

高度な変調方式

今回用いた通信変調方式は64値振幅位相偏移変調(64 Amplitude Phase Shift Keying, 64APSK)と、256値振幅位相偏移変調(256 Amplitude Phase Shift Keying, 256APSK)と呼ばれる方式です。これは、1つのシンボルで6ビット、及び8ビットの情報を伝送できる周波数利用効率の極めて高いものです。

例えば、64APSKでは、1シンボルで6ビットの信号列(0,1,0,1,0,1)や(1,0,1,0,1,0)など $64(=2^6)$

通りのパターンのいずれかの信号列を送ります。図3には、JAXA10mアンテナで受信して復調したRAPIS-1衛星からの超高速信号を振幅と位相の座標平面(I-Q平面)で表した信号点の分布(コンステレーション)を示します。上段は64APSK変調方式であり、64個の異なるデータ点が確認できます。各々の信号点を6ビットの信号列に対応させることで、1シンボルで6ビットの信号列を伝送できます。同様に、下段は256APSK変調方式であり、1シンボルで8ビット列を伝送するので、256個のデータ点が確認できます。なお、左側は左旋円偏波チャンネル、右側は右旋円偏波チャンネルです。

図3から理解できるように、このような高度の変調方式では、コンステレーション平面での信号点の分布を非常に密に配置させています。ちょっとした信号波形の歪が、信号点の配置位置をずらせてしまう危険性があります。このため、送信信号の変調、増幅の過程で信号が歪むことを極力抑圧する設計を人工衛星搭載の送信機で行うことが必要でした。本研究では特に、高効率で歪みの少ない窒化ガリウムトランジスタを用いた信号増幅器の開発に成功しました。

偏波多重

本通信方式では、衛星から地上局に伝搬する電波の電界の向き(偏波と呼びます)として、2つの偏波チャンネル(電界が右ねじの向きに進む右旋円偏波、及び、左ねじの向きに進む左旋円偏波)を使用して偏波多重を行っています。この各々の偏波で独立な情報ビットを送信することで、2チャンネルの通信路を実現しています。この2チャンネルの電波は、周波数は共通であり、偏波(電界方向)の回転していく方向だけが異なります。加えて、64APSKと256APSKでは、図3のようなコンステレーション平面で信号点が非常に密に配置されているため、ひとつの偏波チャンネルにもうひとつの偏波チャンネルからの信号が漏れこんでくると、コンステレーション上での信号点がずれてしまい、正しい通信ができなくなります。このような偏波チャンネルをまたぐ信号の漏れ込みは、衛星搭載アンテナや地上アンテナで起きやすいです。これを防止するために、搭載アンテナと地上アンテナにおいて2つの偏波チャンネルがまじり合わないよう、高性能なセプトム型ポラライザと呼ばれる偏波分離装置を開発することに成功しました。

これらの技術開発により、貴重なX帯の周波数帯域幅を無駄なく有効に使用することができました。2チャンネル合計で、64APSK変調で通信速度毎秒2.65ギガビット、256APSK変調で3.3ギガビットを達成しました。なお、これらの通信速度には使用した誤り訂正符号の符号化効率を考慮しています。

今後の発展

今研究成果は、自然災害等の直後のオンデマンドな即時観測のデータを直ちに国内地上局へ伝送するシステムに、システムの信頼性を高めつつ、今後利用されていくと思われます。

一方、国内外で計画されている多数機の小型衛星群(コンステレーション)による地球観測や通信ミッションでは、図4に示すように、グローバルに配置されている海外地上局を使用し、多数の小型衛星からのデータをいち早くユーザへ届ける必要があります。このため、地上局で信号を受信しながら復調できるリアルタイム復調器の開発と普及が待たれます。JAXAでは、このような高速データ伝送の地上復調器の研究に着手しています。また、広く海外にも普及した通信規格を使用する必要もあります。JAXAでは、本システムに使用している通信規格DVB-S2X(注8)が宇宙通信の国際規格に採用されるよう標準化活動も実施しています。

今回開発された通信技術は、基本的な要素は X 帯にかぎるものではなく、今後は、Ka 帯を用いたデータ伝送でも活用されていきます。本技術を Ka 帯に適用した場合には、Ka 帯の周波数を更に効率に利用でき、毎秒 10 ギガビットを越える超高速データ伝送も可能となっていきます。

今回開発された小型合成開口レーダ (SAR) システムの技術は、JAXA の宇宙イノベーションパートナーシッププログラム (注 9) を通じ、スタートアップ企業においても活用され 2020 年に軌道上実証される予定です。さらに、2020 年代中頃には 25 機の小型 SAR 衛星群を実現することが計画されています。本高速通信技術も、そのような今後の民間ビジネスに利用されることが期待されています。

発表論文：

電子情報通信学会 欧文論文誌 IEICE TRANS. COMMUNICATION (査読付き) に採択決定し、掲載予定。

Tomoki KANEKO, Noriyuki KAWANO, Yuhei NAGAO, Keishi MURAKAMI, Hiromi WATANABE, Makoto MITA, Takahisa TOMODA, Keiichi HIRAKO, Seiko SHIRASAKA, Shinichi NAKASUKA, Hirobumi SAITO, and Akira HIROSE, “2.65 Gbps downlink communications with polarization multiplexing in X-band for small earth observation satellite,” IEICE Transactions on Communications. Vol.E104-B, No.1, pp., Jan. 2021.

小型衛星の最大の国際会議である小型衛星カンファレンス (本年はオンライン会議) にて 2020 年 8 月 6 日に口頭発表決定

Hirobumi Saito, Keishi Murakami, Yoshinori Kunii, Takahisa Tomoda, Tomoki Kaneko, Noriyuki Kawano, Shinichi Nakasuka and Seiko Shirasaka.” Demonstration of 2.65 / 3.3 Gbit per sec X band Radiowave Down link Communications from LEO Small Satellite,” 34th AIAA Utah State University **Small Satellite Conference** , , #SCC20-X11-01, Aug. 6th , 2020

国際会議講演 5 件

国内学会講演 6 件

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構を通して委託されたものです。RAPIS-1 衛星による軌道上実証については宇宙航空研究開発機構 革新的衛星技術実証プログラムに、臼田 10m アンテナでの作業については同機構 追跡ネットワーク技術センターに、受信経費については同機構宇宙科学研究所戦略的研究開発経費に、各々、お世話になりました事を感謝いたします。

5. 問い合わせ先：

【研究に関すること】

東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻

教授 中須賀 真一 (なかすか しんいち)

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

電話：03-5841-6590

E-mail：nakasuka@space.t.u-tokyo.ac.jp

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

名誉教授 齋藤 宏文（さいとう ひろぶみ）

〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1, 田中孝治研究室気付け

E-mail：koubun@isas.jaxa.jp、saito.hirobumi@aoni.waseda.jp

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科

教授 白坂 成功（しらすか せいこう）

〒223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1

電話：045-564-2581

E-mail：shirasaka@sdm.keio.ac.jp

【報道に関すること】

東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻 中須賀研究室

金子 真理（かねこ まり）

電話：03-5841-6590

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 白坂研究室

蔭木 麻子（かげき あさこ）

電話：045-564-2581

E-mail：asako.kageki@sdm.keio.ac.jp

6. 用語解説：

注1）偏波多重：右旋円偏波／左旋円偏波のように2つの独立な電界方向を持つ電波に、独立な情報を乗せることで、通信できる情報量を増加させる通信方式。限られた周波数帯域幅を用いてより大量の情報を伝送できる。なお、右旋円偏波／左旋円偏波とは、電波の電界の向きが、電波の伝搬に伴って右ネジの方向に回転していくものを右旋円偏波、左ネジの方向に回転していくものを左旋円偏波と呼ぶ。

注2）変調方式（64APSK 及び 256APSK）：1回の変調で送られる1まとまりのデジタルデータをシンボルと呼び、1シンボルで6、あるいは8ビットの情報を伝送するために振幅変調と位相変調両方を組み合わせた変調方式。1シンボルで伝送できるビットの組み合わせには $2^6=64$ 通り、あるいは $2^8=256$ 通りがある。図3参照。

注3）周波数利用効率：電波を用いた情報通信では、大量の情報（ビット）を限られた電波の周波数領域を用いて伝送する必要がある。この効率を表す指標として、周波数の幅1ヘルツの電波を用いて伝送できる通信速度（bit/s）を周波数利用効率（bit/s/Hz）と呼ぶ。例えば、移

動体通信である LTE 通信規格では 7.5bit/s/Hz, 最近の 5G 通信規格では 3~9bit/s/Hz と言われている。本研究で衛星軌道と地上の間で実現した周波数利用効率 (8.4、及び 10.8bit/s/Hz) は、これらの最先端地上通信に匹敵するか、それよりも効率が高いと言える。

注 4) 衛星群 (コンステレーション) ミッション: 地球周回軌道に多数の衛星を打ち上げ、通信や地球観測などのミッションを行うこと。衛星群をコンステレーションと呼ぶ。図 4 参照。

注 5) 合成開口レーダ: レーダの一種で、航空機や人工衛星に搭載し、移動させることによって仮想的に大きな開口面 (レーダアンテナの面積) として動作させて、地上分解能を向上させたもの。

注 6) 革新的衛星技術実証 1 号機 小型実証衛星 1 号機 (RAPIS-1) : JAXA の小型実証衛星 1 号機 (RAPIS-1 : RAPid Innovative payload demonstration Satellite 1) は、公募により選定された部品・機器の実証テーマを軌道上で実証するための小型衛星。2019 年 1 月にイプシロンロケットにて打ち上げられた。

注 7) シンボル: 1 回の変調で送られる 1 まとまりのデジタルデータを“シンボル”と呼ぶ。64APSK 変調のように、6bit の情報を同時に 1 シンボルを用いて送る場合、シンボルは $64(=2^6)$ 通りある。図 3 参照。

注 8) DVB - S2X : ETSI (European Telecommunications Standards Institute, 欧州電気通信標準化機構) により規定され、衛星放送の伝送路規格 としては現在世界的にも一般的に使われている 通信規格 DVB-S、DVB-S2 の上位規格にあたる。効率のよい誤り訂正符号、64 値以上の多値変調などを導入し伝送容量を拡大し、ロールオフ率 5%にまで対応している。

注 9) JAXA 宇宙イノベーションパートナーシップ (J-SPARC) : 宇宙ビジネスを目指す民間事業者等と JAXA との対話から始まり、事業化に向けた双方のコミットメントを得て、共同で事業コンセプト検討や出口志向の技術開発・実証等を行い、新しい事業を創出する共創型研究開発プログラムです。2018 年 5 月から始動し、現在、約 20 プロジェクトを進めています。

<https://aerospacebiz.jaxa.jp/solution/j-sparc/projects/synspective/>

Synspective 社 : <https://synspective.com/>

7. 添付資料：

表1 地球観測衛星の直接データ伝送通信

本研究が RAPIS-1 衛星で達成した毎秒 2.65、及び 3.3 ギガビットは、現時点での世界最高速である。

| 人工衛星 | 打ち上げ年 | 周波数帯 | 周波数幅 (MHz) | 多重化方式 | 変調方式 | 通信速度 (Gbps) | 周波数利用効率 (bps/Hz) |
|----------------|-------------|----------|---------------|-----------|-------------------|-----------------|---------------------|
| WorldView3 | 2014 | X | 375 | 偏波 | 8PSK | 1.2 | 3.2 |
| ALOS-2 | 2014 | X | 375 | なし | 16QAM | 0.8 | 2.13 |
| Dove | 2019 | X | 288 | 偏波/周波数 | 32APSK | 1.6 | 5.56 |
| RAPIS-1 | 2019 | X | 315 | 偏波 | 64/256APSK | 2.65/3.3 | 8.4/10.8 |
| NISAR | 計画 2022 | Ka | 1500 | 偏波 | QPSK | 4 | 2.7 |

表2 開発した直接データ伝送システム

| | |
|---------|-----------------|
| 周波数 | 8.025-8.40 GHz |
| 周波数帯域幅 | 315 MHz |
| シンボル速度 | 300 Msps |
| 変調方式 | QPSK-256APSK |
| 通信速度 | 3.3Gbps max/2ch |
| ロールオフ係数 | 0.05 |
| 通信規格 | DVB-S2X |
| 誤り訂正符号 | LDPC, BCH |
| 偏波 | 右旋/左旋円偏波、2ch |
| システム | 27dB以上(含む大気効果) |
| 交叉偏波識別度 | |



©ImpACTプログラム 慶應義塾大学/東京大学/宇宙科学研究所

図1 開発された超高速 X 帯送信機 (左) と偏波共用中利得アンテナ

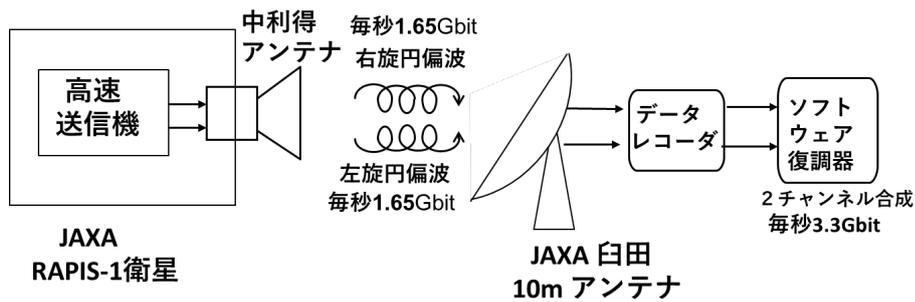


図2 RAPIS-1衛星と受信アンテナを含む直接データ伝送システム

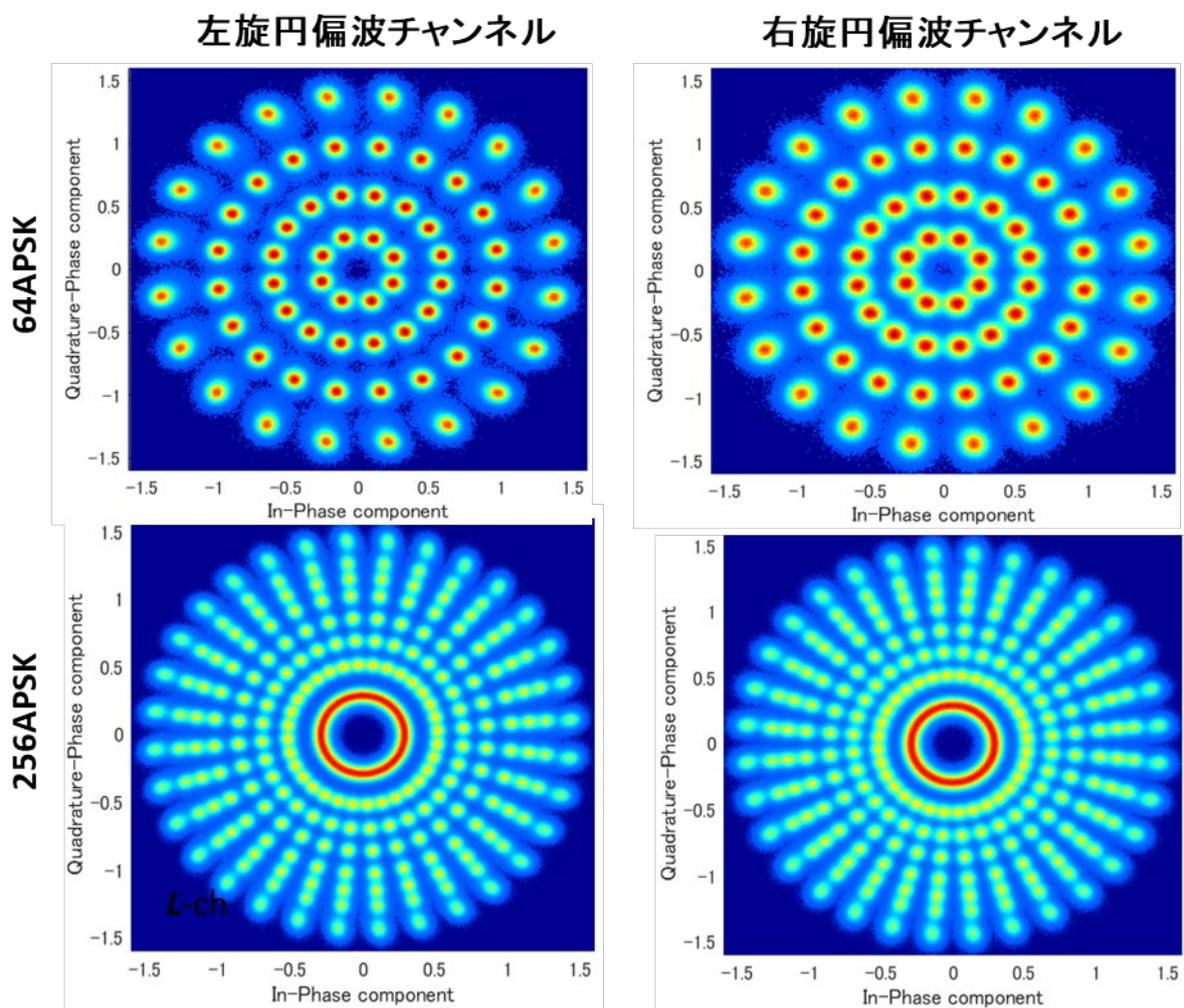


図3 JAXA10mアンテナで受信して復調したRAPIS-1衛星からの超高速信号を振幅と位相の座標平面(I-Q平面)で表した信号点の分布(コンステレーション)。左側は左旋円偏波チャンネル、右側は右旋円偏波チャンネル。上段は64APSK変調方式であり、64個の異なるデータ点があり、1シンボルで6ビットの情報を伝送する。2チャンネル合計で通信速度毎秒2.65ギガビット。下段は256APSK変調方式であり、256個のデータ点があり、1シンボルで8ビットの情報を伝送する。2チャンネル合計で通信速度毎秒3.3ギガビット。通信速度は誤り訂正符号の効率が含まれている。

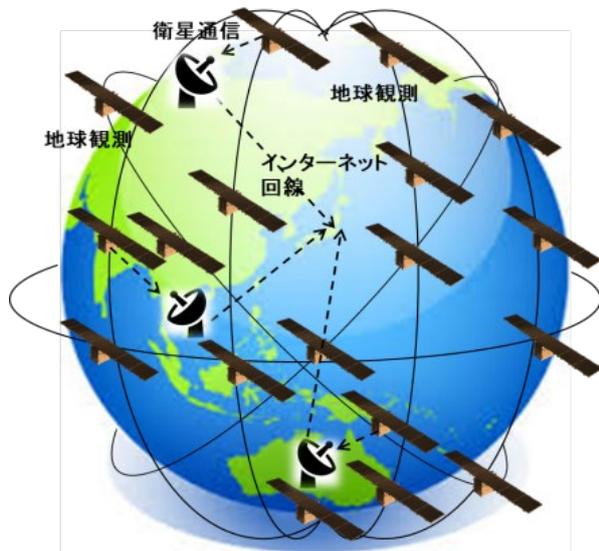


図4 多数の小型衛星によるコンステレーション地球観測ミッション

衛星で観測された地表の情報を早期にユーザに届けるため海外地上局に向けて送信する。海外局で受信されたデータは、インターネット回線等によって日本のセンターへ伝送される。