

FEATURE

光衛星通信が開く 超高速ワイヤレス通信の未来



CONTENTS



FEATURE

光衛星通信が開く超高速ワイヤレス通信の未来

1 INTERVIEW

超小型衛星が見せる新たな可能性

豊嶋 守生

4 深宇宙光通信と衛星レーザ測距への応用

スペースデブリの観測に使えるフォトン検出技術

國森 裕生

6 衛星ー地上間光空間通信のための環境データ情報収集システム

サイトダイバーシティ効果の検証

鈴木 健治

8 光学望遠鏡を用いた人工衛星の光学観測システムの開発

衛星の安全運用・衛星通信実験を支える基盤技術

布施 哲治

ヒカリ

10 HICALI の開発

静止衛星ー地上間の超高速光衛星通信を目指して

久保岡 俊宏

TOPICS

12 NICTの知的財産⑥

電界イメージング装置 一見えない電波を撮影してその場で把握するー

13 Awards

13 サイバー攻撃誘引基盤“STARDUST”を開発

INFORMATION

14 NICTオープンハウス2017 開催のお知らせ

14 NICTオープンハウス2017沖縄 開催のお知らせ

表紙写真

主鏡の大きさが1 mの光学望遠鏡。衛星からの光を集光することにより衛星からのデータを受信します。超小型光通信機器である小型光トランスポンダ (SOTA) を用いた実験では主にこの望遠鏡を用いて実験を実施しました。この光学望遠鏡はカセグレン、ナスミス、クーデの3つの焦点面を持っています。

本頁左上の写真が50 kg級小型衛星に搭載されたSOTAです。世界に先駆けて、低軌道衛星と地上間で1.5 ミクロン帯の光通信技術の基礎研究と衛星搭載機器の宇宙環境における実証を目指し開発されました。最近、量子通信の基礎実験にも成功し Nature Photonics に掲載されました。望遠鏡直径は約5 cm、質量は約6 kg。

光衛星通信が開く超高速ワイヤレス通信の未来

INTERVIEW

超小型衛星が見せる新たな可能性



豊嶋 守生 (とよしま もりお)
ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
室長

1994年郵政省通信総合研究所（現NICT）入所。ETS-VIによる光通信実験に従事し、その後NASDA（現JAXA）出向、ウィーン工科大学在外研究を経て、OICETS、SOTA、HICALI等の衛星搭載光通信機器の研究開発や、光衛星通信及び量子鍵配送等の実験に従事。博士（工学）。

次々に打ち上がる高精細な地球観測衛星。商用や研究用、教育用にも多く使われるようになった多種多様な超小型衛星。宇宙開発は、より我々の生活の身近なところで、様々な「便利」をもたらす存在になりつつある。そうしたなか、光衛星通信を中心に、衛星通信におけるデータ伝送技術のブレークスルーを目指して研究開発を進めているのが、ワイヤレスネットワーク総合研究センター宇宙通信研究室である。室長の豊嶋守生氏に、その研究内容について伺った。

■各国で進む「メガコンステレーション」

——まず、現代における宇宙通信技術の動向について教えていただけますか。

豊嶋 近年、各国で積極的に進められているのがメガコンステレーション計画*と呼ばれるものです。これらは宇宙開発そのものを革新する可能性を持っており、また、そのうちいくつかの計画で光衛星通信の利用が考えられています。

特に光衛星通信の最近の動向としては、欧米や日本で光データ中継衛星システムの実用化が計画されています。アメリカ航空宇宙局（NASA）では、ゴダード宇宙飛行センター（GSFC）のLLCD（月レーザー通信実証）計画により、2013年9月打ち上げの衛星を使い、月-地上間の距離で622 Mbpsの光通信回線確立に成功。また今後、LCRD（レーザー通信中継実証）計画で、2019年4月に光データ中継衛星システムの静止軌道への打ち上げを予定しています。欧州では、欧州宇宙機関（ESA）が欧州データ中継システム（EDRS）と呼ばれる静止衛星での光データ中継サービスを運用しており、地球環境計測を行うコペルニクス計画で打ち上げられた5機の低高度軌道（LEO）Sentinel衛星のデータ伝送に、

光通信が実用化されています。日本でも、宇宙航空研究開発機構（JAXA）により光データ中継衛星（JDRS）の計画が進められているところです。

——宇宙通信研究室の体制と、その主な研究テーマはどうなっているのでしょうか。

豊嶋 研究室の拠点は小金井の本部と鹿児島宇宙技術センターの2カ所で、研究者や学生、派遣スタッフなど約50名の体制で研究開発にあたっています。研究テーマには、電波による衛星通信、光（レーザー）による衛星通信の2つの大きな柱があり、これらを用いて海洋や宇宙空間まで利用可能な通信ネットワーク環境を展開し、移動体や災害・減災に役立つ衛星通信技術を確認するのが目標です。

近年、世界各国で100 Gbpsのキャパシティを超えるKa帯通信衛星、いわゆるハイスループット衛星（HTS）と呼ばれる衛星がサービスを開始しています。しかし、HTSはユーザ回線を束ねた衛星と地上とを結ぶフィードリンクと呼ばれるゲートウェイの通信回線容量に限界があり、その通信容量を拡大する技術が切望されています。当研究室では、この課題への回答として、光による本格的なマルチギガビット衛星通信技術——次世代の大容量通信の要求を解決する10 Gbps級の光通信インフラの基礎技術の確立を目指し、研究開発を実施しています。

* 多数の小型衛星群や無人航空機群を連携・協調させて特定の目的を果たさせるもの。コンステレーションは「星座」の意味で、特に衛星を利用したものを衛星コンステレーションと呼ぶこともある。Google（米）やFacebook（米）を中心に、Space-X（米）、Onesat（米）、O3b（英）、Leosat（米）、Kaskilo（旧eightyLEO、独）等、多くの計画が進められている。

光衛星通信が開く超高速ワイヤレス通信の未来

INTERVIEW

超小型衛星が見せる新たな可能性

■エクストラサクセスを達成した
SOTAプロジェクト

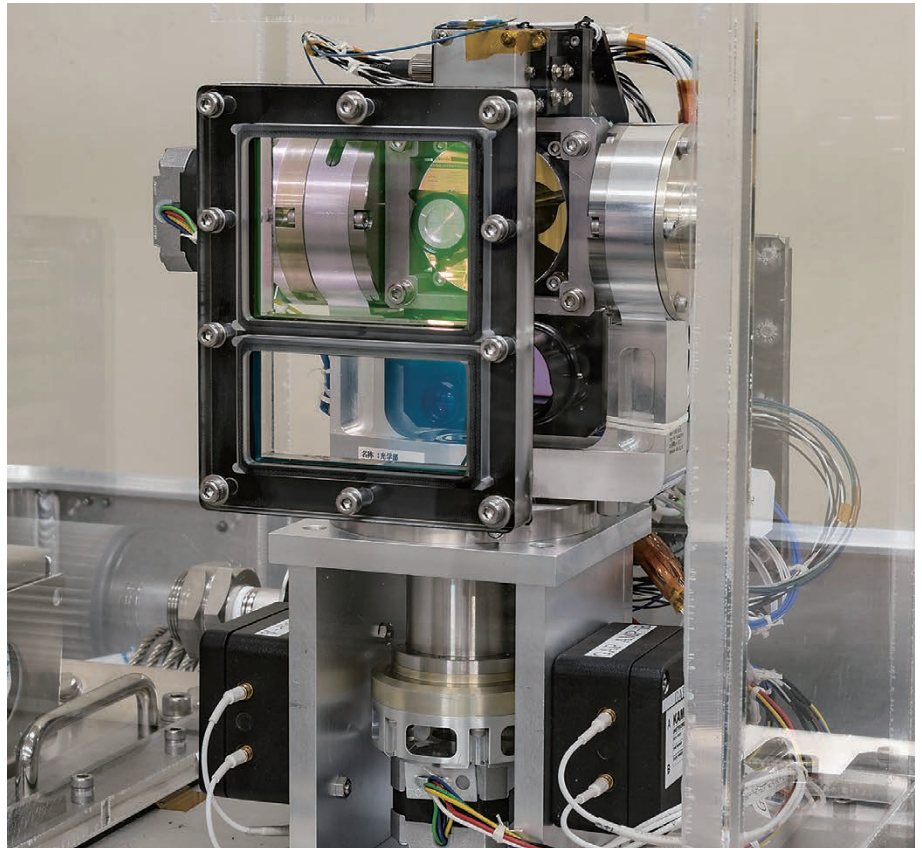
——昨年末に終了した小型光トランスポンダ（SOTA）プロジェクトも、その一環ということですね。

豊嶋 SOTAプロジェクトは、光衛星通信技術の超小型衛星への展開を目指して、6 kg級の超小型光通信機器（小型光トランスポンダ、SOTA）を開発、これを50 kgクラスの宇宙光通信技術実証衛星「SOCRATES」に搭載して実証試験するというもので、民間と協力して計画を進めました。

プロジェクトは2009年にスタートし、その後基本設計、詳細設計を経てフライトモデルを製作。これを搭載したSOCRATES衛星は2014年5月に低高度軌道に打ち上げられました。実証実験では、1.5マイクロンレーザー光と独自に実装した誤り訂正機能を用いて、衛星搭載カメラによる画像を光通信回線経由で伝送することに世界で初めて成功しました。また、低軌道衛星として周回中に各国からアクセスできるため、フランスのCNES、ドイツのDLR、カナダのCSA、欧州のESA等の世界の宇宙機関と、SOTAを用いた国際共同実験も実施しました。特にCNESの光地上局とは、SOTAを用いて補償光学（AO）実験にも成功しています。

光衛星通信実験においては、望遠鏡のオペレーションや通信実験は秋岡エキスパート、小山主任研究員、宗正研究員、竹中研究員が中心に行い、国際共同実験についてはコレフ研究員を中心に企画から実施まで行い、偏光測定実験は、カラスコ・カサド研究員と竹中研究員が主に実験を推進しました。

SOCRATES衛星の運用終了に伴い、実験は2016年11月をもって終了しましたが、



超小型衛星に搭載されたSOTA。望遠鏡直径は約5cm、質量は約6kg。

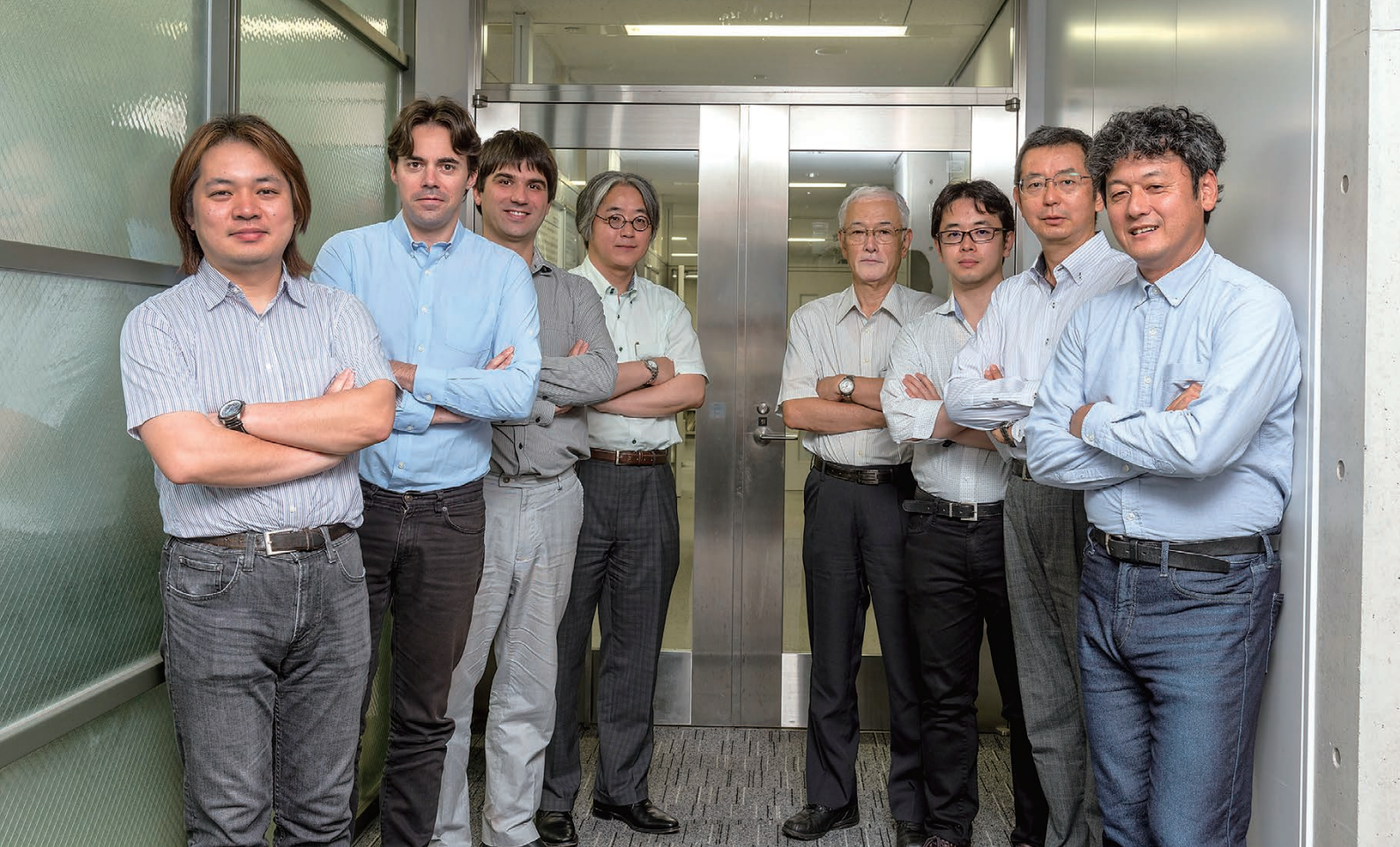
この間、2年以上の運用期間にわたって光通信実験、量子鍵配送基礎実験（NICT未来ICT研究所と共同）及び国際共同実験を実施。エクストラサクセスを達成することができました。

——SOTAプロジェクトで困難だった点、革新的だった点などを教えてください。

豊嶋 これ以前の成功例は数百kgの衛星を用いた実験であり、50 kgクラスの小型衛星へのレーザー通信機器搭載は、プロジェクト立ち上げ時点では誰も可能だとは信用してくれなかったレベルの話でした。

小型衛星の場合、とにかく小さいパッケージの中に様々な機能を詰め込む必要があります。通信のためのレーザービームはシャープなので、質量による慣性モーメントの安定性に頼れず、姿勢を安定させづらい小型衛星を追尾・通信するのは至難の業です。誰もやったことのない実験だけに過去のデータもなく、設計は手探りで進めていくような状態でした。

材料面でも課題がありました。宇宙では熱に強い材料であることが大前提です。変形してしまうと正確な通信ができなくなってしまうからです。温度変化で熱変形しやすい金属材料は、宇宙では“ぐにゃぐにゃ”



SOTAプロジェクトチーム

左から、宗正 康、カラスコ カサド アルベルト、コレフ ディミタル（主に衛星実験担当）、豊嶋 守生、小山義貞、竹中 秀樹（主に衛星搭載機器開発担当）、鈴木 健治（サイトダイバーシティ担当：P6-7執筆）、久保岡 俊宏（衛星軌道決定担当：P10-11執筆）。ほかに國森 裕生（地上局開発担当：P4-5執筆）、布施 哲治（衛星軌道決定担当：P8-9執筆）。

と言っているほど柔らかい。一方で過酷な宇宙空間の環境下、熱変形しにくい材料は非常に高価です。しかし、将来の実用化を考える上でも「リーズナブルな価格でミッションを遂行できる」ことは欠かせません。そこでSOTAプロジェクトでは、構造材に全て安価で入手しやすいアルミ合金を使用しています。これは熱変形しやすい素材なのですが、変形することを計算に入れて、それを打ち消す——いわゆる熱的補償（アサーマル化）を考えた構造設計を行うことで、問題を解決しています。

■光衛星通信が開く未来

——現在進行中、さらにこれからのプロジェクトを教えてください。

豊嶋 要素技術の研究において、光ファイダリンク技術に関しては光通信用のAO技術の研究開発が必要であると考えています。また、その他の研究として、大口径望遠鏡を活用したデブリに関する研究、将来の光通信のための気象予測を行うた

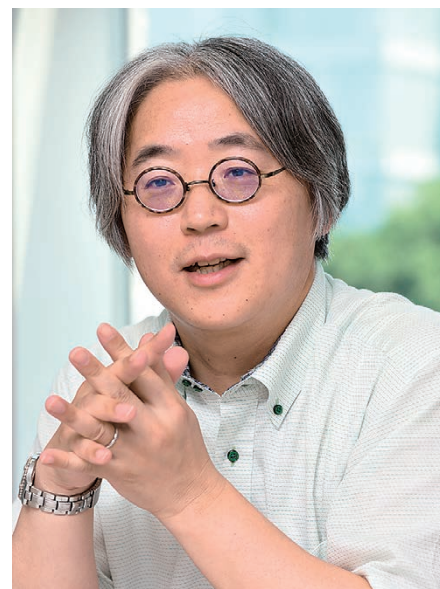
めの環境データ収集やサイトダイバーシティに関する研究、軌道を精密に決定するための光学観測による軌道決定技術等を進めています。今後に関しては、超高速先進光通信機器「HICALI」（High speed Communication with Advanced Laser Instrument）の開発プロジェクトとして、2021年打ち上げ予定のETS-IX衛星に搭載する10 Gbps級の衛星搭載光通信機器の研究開発を推進しており、光ファイダリンクの基礎技術の実証を目指しています。

——光衛星通信の発展によりどのような展望がもたらされるか、ユーザからの期待や社会へのインパクトについてお聞かせください。

豊嶋 光データ中継衛星の利用を中心に、アジア、アメリカ、ヨーロッパ各地で、光衛星通信の利活用は更に進んでいくものと考えられます。

SOTAプロジェクトの成功を受けて、メガコンステレーションの構想や光通信システムを適用する動きは、いよいよ活発化し

ています。例えば多数の超小型衛星を大容量の光通信で結べば、宇宙空間にクラウド的にスーパーコンピュータを構築でき、災害等に対しロバストなシステムも可能になるなど、様々な未来が想定できると思います。今後、世界各国で加速するであろう光衛星通信技術の実用化やビジネスモデル構築を目指した動きがますます注目されます。



深宇宙光通信と衛星レーザ測距への応用

スペースデブリの観測に使えるフォトン検出技術



國森 裕生 (くにもり ひろお)
ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
主任研究員

大学卒業後、1981年に郵政省電波研究所（現NICT）入所。時空計測、電気通信標準化、衛星レーザ測距、光宇宙通信の研究に従事。

皆 さんは人工衛星が、夕暮れにゆっくりとした流れ星のように飛行しているところをご覧になったことがあるでしょうか？ NICT宇宙通信研究室では、宇宙-地上統合ネットワークを研究しており、人工衛星と電波や光で通信し、また探知する技術の開発と実験を国内外の機関と協力して行っています。本記事では深宇宙と呼ばれる超遠距離との通信に使う光の要素技術について紹介します。

■背景

人類最初の人工衛星スプートニクが1957年に打ち上げられてから60年、人工衛星は地球近傍を中心に現在では約1,000機が通信、気象、地球観測の分野で運用されています。最も明るい人工天体は、1980年代から建設が始まった国際宇宙ステーション（ISS）で高度約400 kmのところを飛行しています。地球の半径が約6,400 kmですのでその6~7%のところ、地球全体からみれば地表すれすれといってもいいくらいの距離です。ほとんどの衛星がこのような高度1,000 km以内の低軌道で地球を周回しています。さらに、

静止衛星となると、赤道上空36,000 kmを飛んでいます。その先には地球の唯一の自然の衛星、月があり、地球から静止衛星の約10倍の38万 kmの距離があります。その先は「はやぶさ」などでおなじみの深宇宙と呼ばれる探査の世界ですが、最も近い惑星、金星の最接近でも月との距離の約100倍、4,200万 kmです。深宇宙とは一意の定義があるわけではありませんが、国際電気通信連合では電波の利用の観点から200万 km以遠をそのように呼んでいます。深宇宙との通信では、距離の2乗に反比例し減衰する電磁波のエネルギーを検知するために、大出力の送信機、高感度（大型アンテナ、低雑音）の受信機が必要です。

また、別の観点から、60年前はわずか1機だった衛星が、現在では1,000機も運用されています。これに伴い、スペースデブリと呼ばれる宇宙ゴミ（ロケットの一部や運用済み衛星、破片）が、把握している約10 cm以上のものだけで2万個、小さくて不明なものも含めると数十万個発生していることが問題となっていることはご存知でしょうか。宇宙通信の応用で開発している通常のレーザレーダーは、再帰性ミラーを搭載した衛星を対象としているため、ス

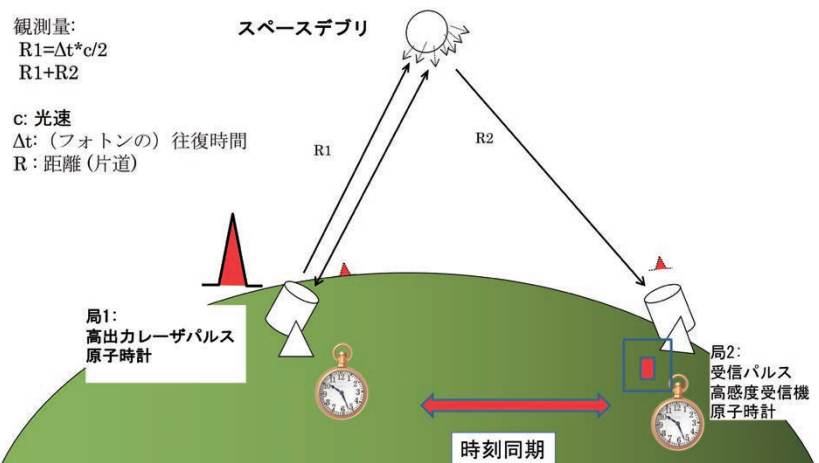


図1 高感度折り返し通信実験と衛星レーザ測距（実験イメージ）

ペースデブリに光を当てても散乱してしまいます。このため、スペースデブリの把握にはハイパワーのレーザと高感度の受信機が必要となります。図1に実験イメージを示します。



図2 NICT小金井局1 m級望遠鏡配置



図3 1.5 m望遠鏡による衛星レーザ測距

■光地球局

NICT本部（小金井）には図2に示すように複数の1 m級望遠鏡があり、光地球局として運用しています。このうち、1.5 m望遠鏡と75 cm望遠鏡を用いてスペースデブリの観測システムを構築してきました。1.5 m望遠鏡による衛星レーザ測距の写真を図3に示します。移動する衛星へ向けて正確に光パルスを送送するため望遠鏡ジンバルの追尾精度を1秒角オーダーで制御する装置、高出力パルスレーザ（探知用のナノ秒：1ナノは10億分の1）、ピコ秒レーザ（1ピコは1兆分の1）、パルスの時間の位置で情報を変復調するPPM（Pulse Position Modulation）送受信装置、単一フォトン検出器が含まれます。

距離を精密に計測するための基となる周波数（10 MHz）はNICTが維持しているUTC（NICT）から光ファイバーを介して使用しています（図2 赤線）。

■超高感度リンクの確立

NICTは本分野で国際共同実験を推進しています。Space Environment Research Center（SERC）は2014年に豪州で設立された官民共同の研究組合でスペースデブリの観測、予測、除去の研究を行っています。NICTはレーザ測距技術を用い、2015年度には、現在小惑星に向けて飛行中の日本のはやぶさ2衛星が地球SWING-BY通過時に光リンクをつくる共同実験をJAXA、国立天文台、千葉工業大学とともに実施しており、このうちSERCのシステムで約

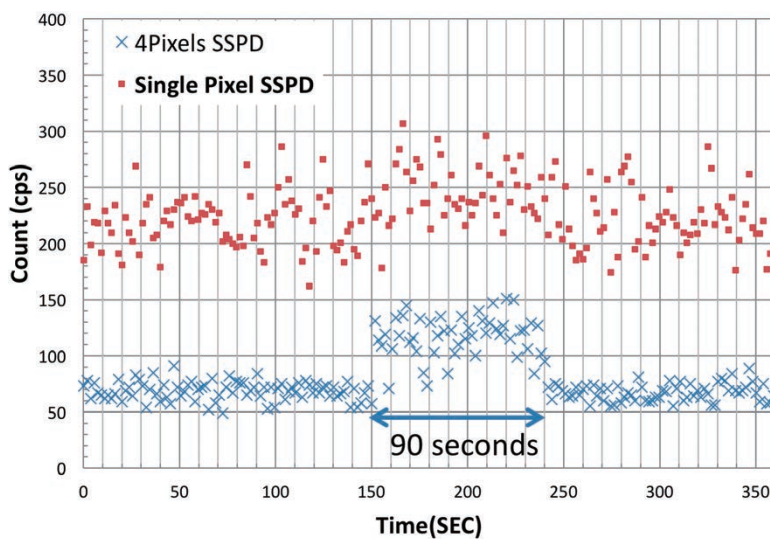


図4 SSPDによるSOTA信号フォトンカウント例

600万 kmの距離でUPLINKを確立しました（JAXA-WEB http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20151225_02_e/）。

また、NICT未来ICT研究所で開発された超高感度の検知器（超電導ナノワイヤ単一フォトン検出器：SSPD）の1つを1.5 m光地上局にて運用し、光通信の折り返し反射微弱信号検出を行う研究も実施中です。

低軌道衛星SOTAからの信号のフォトンレベルの受信に成功しました。図4にSOTA衛星からのフォトンのカウント数を示します。2種類のSSPDのうちアレイ型の4Pixels SSPDにだけ信号が得られました。現在4Pixels SSPDの性能確認のため地上局における通信、計測システムのレベルアップを行っています。

■今後の展望

超高感度な通信方式のアプリケーションについて日本で進めている次期技術試験衛星に搭載する光通信装置を高感度に受信するため、本文でご紹介したSERCや西オーストラリア大学などの豪州関連機関と共同研究を締結し、スペースデブリ観測と光宇宙通信共通課題である大気ゆらぎを補正するAO（補償光学）技術について情報交換を行っています。これを基にNICTの局上空の大気ゆらぎの測定のためのシステム仕様を作成するなど深宇宙通信の課題解決に向け、深宇宙探査ユーザの要求を収集しながら、日本として将来の探査衛星ミッションの基盤的技術を開発していきます。

衛星－地上間光空間通信のための環境データ情報収集システム

サイトダイバーシティ効果の検証



鈴木 健治 (すずき けんじ)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
主任研究員

1983年郵政省電波研究所（現NICT）入所。
以来、衛星管制技術、移動体衛星通信の研究、MVLの研究、JEM開発、小型衛星を用いた研究、RF・光マルチフィードバックに関する研究に従事。

衛星通信や地球観測衛星の通信容量の増大化に対応するため、電波であれば帯域を広く確保するため、より高い周波数への移行や、さらには光空間通信の利用が期待されています。高い周波数の電波の場合、雨による降雨減衰に対する対策が必要となりますが、光空間通信となると地上局の上空に雲があるだけで光空間通信ができなくなってしまいます。衛星－地上間光空間通信において、地上のネットワークでつながれた複数の地上局の間で、図1に示すとおり、どこかに晴れ間があつて光空間通信回線の確立が可能な地上局を選択する“サイトダイバーシティ”が有効と考えられます。これまで気象衛星「ひまわり」やアメダス等の気象庁のデジタル気象統計情報を利用したサイトダイバーシティ効果を解析する研究は行われてきていますが、実際に地上局間で定量的・統計的に環境データ情報を蓄積し解析処理された例はありませんでした。そこで、解析可能な雲量・雲高、統計

的晴天域分布等の環境データ情報の長期的な収集・蓄積・解析を行う環境データ情報収集システムを構築し、サイトダイバーシティ技術の確立を目指しています。

■環境データ情報収集システム

環境データ情報収集システムは、図2の日本地図上で北は北海道大樹町から南は沖縄まで全国10ヵ所に、図3のような環境データ情報収集装置を置いて、各観測局で取得した環境データ情報をセンター局のサーバに集め、データベースに蓄積し統計処理・解析するためのものです。環境データ情報収集装置には、環境データ情報として晴天域を識別するための全天カメラ、雲の量と高さを計測するための雲量・雲高計と各種気象センサーが装備されています。図2のリアルタイム環境データ情報表示例では10局のうち4局が光通信可能という判定となっています。

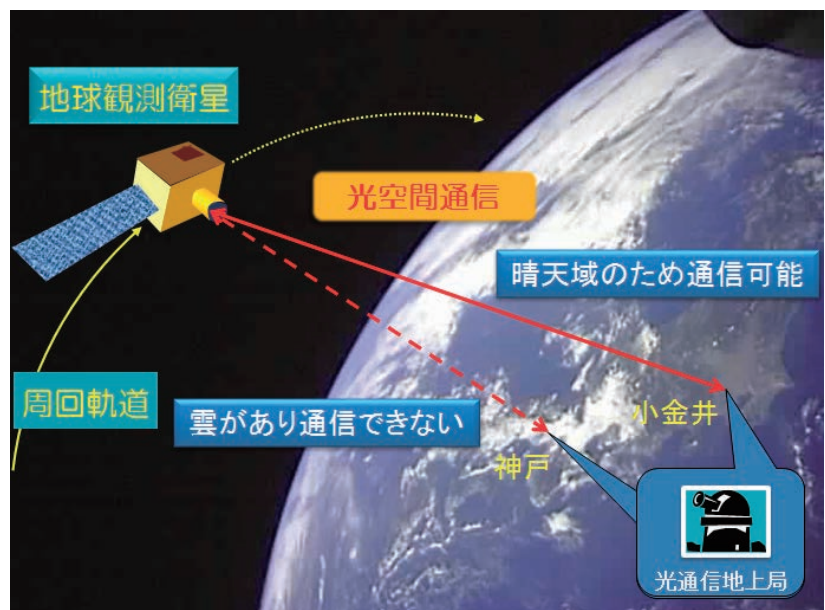


図1 サイトダイバーシティによる光空間通信回線確立イメージ



図2 リアルタイム環境データ情報表示例
<http://sstg.nict.go.jp/OBSOC/>

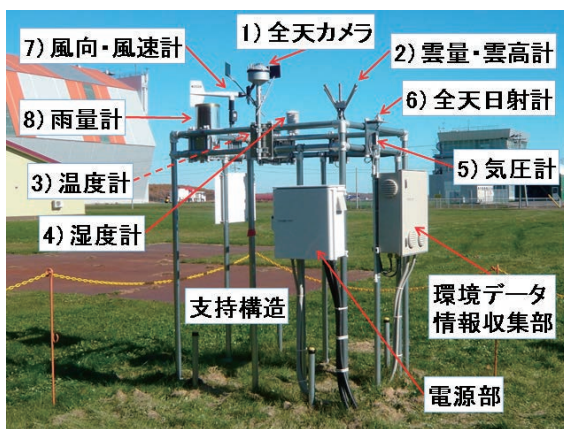


図3 環境データ情報収集装置外観 (大樹町多目的航空公園内)

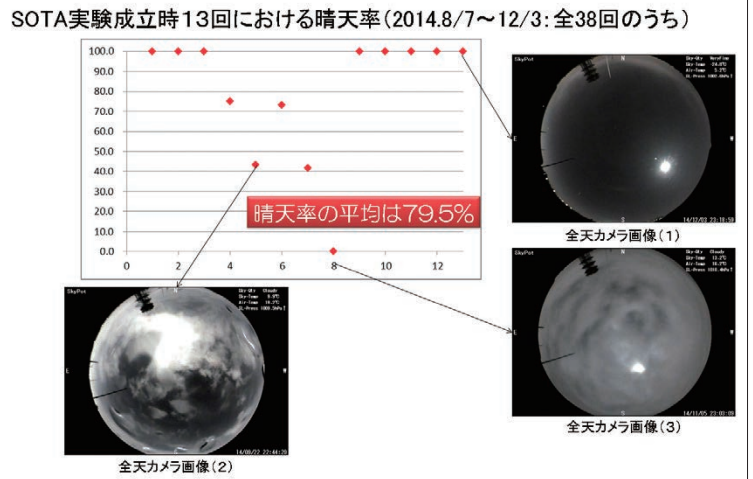


図4 SOTA実験時の晴天率 (光空間通信が確立できた場合)

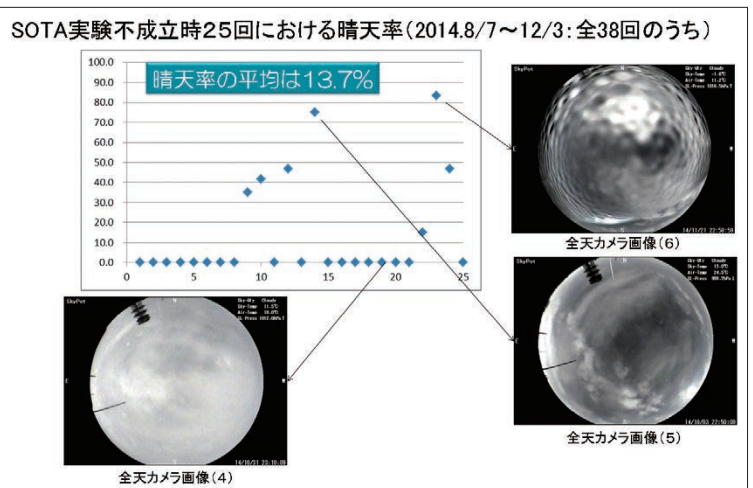


図5 SOTA実験時の晴天率 (光空間通信が確立できなかった場合)

■環境データ情報を用いた晴天率解析

2014年6月1日から2015年5月31日までの1年間の年間晴天率を計算したところ神戸56.8%、小金井56.4%、鹿島54.4%が良い結果となり、次いで北陸45.3%、沖縄47.2%と思ったほど悪くない結果となりました。九州のはがね山は35.3%と低くなっています。

2014年8月から12月の期間においてSOTA*を使った周回衛星光空間実験時間帯に晴れ間があって実験が可能であった場合と、雨または曇りのため実験ができなかった場合の環境データ情報から計算された実験時間帯1時間の晴天判定による晴天率を比較しました。天候状況によって衛星からの光のビーコン信号が受信または光空間通信回線が確立できた13回の晴天率の平均は79.5% (図4) でした。全天カメラの画

像(1)のように快晴の場合がほとんどですが、全天カメラ画像(2)のように晴天率は40%でも雲がまばらで晴れ間があって実験ができた時もありました。また、全天カメラ画像(3)では薄雲が全天を覆って晴天率が0%の場合でも、レーザ光が透過し実験が成立したこともありました。次に、光空間通信回線が確立できなかった25回の晴天率の平均は13.7% (図5) という結果となりました。全天カメラ画像(4)のように全天が雲に覆われた状態がほとんどでしたが、全天カメラ画像(5)では晴天率が75%でも薄雲に覆われていたためレーザ光が透過せず実験できなかったり、全天カメラ画像(6)のように降雨の後で曇りにもかかわらず晴天率が83.3%と判定されたこともありました。以上のとおりばらつきはあるものの平均的には晴天率の妥当性が確認されました。

■今後の研究目標

—サイトダイバーシティ効果の検証—

光空間通信に使用するレーザ波長と環境データ情報との相関を検証し、季節変動をとらえるため、少なくとも3年以上の環境データ情報を継続的に収集・蓄積解析して、サイトダイバーシティ効果の有効性を実証します (例えば、年間を通じて日本のどこの局を何局使えば効果的にサイトダイバーシティが組めるかなど)。また、将来的には周回衛星通過時における環境データ情報から光空間通信可能な地上局の予測を行い、最適地上局の選択アルゴリズムを検討する予定です。

* SOTA (Small Optical Transponder) 超小型光通信機器

光学望遠鏡を用いた人工衛星の光学観測システムの開発

衛星の安全運用・衛星通信実験を支える基盤技術



布施 哲治 (ふせ てつはる)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
主任研究員

1999年大学院博士後期課程修了。国立天文台ハワイ観測所を経て、2010年NICT入所。軌道力学や光学観測技術を基に次期技術試験衛星に搭載の光通信機器や衛星光通信地上局システムの研究開発に従事。電気通信大学客員准教授を兼務。博士（理学）。

人 工衛星の位置を正確に知り高精度の軌道を把握することは、衛星の安全運用や衛星通信実験の実施を支える基盤技術です。ワイヤレスネットワーク総合研究センターの鹿島宇宙技術センター（以後、鹿島センター）とNICT本部（東京・小金井市）にある光学望遠鏡に超高感度カメラを取り付け、人工衛星の光を背景の星像と共に撮像、得られた画像データから人工衛星の位置を測定し、最終的には衛星の地球周回の運動を明らかにする技術開発を行っています。また、得られたノウハウは、将来の衛星光通信用地上局の開発にも役立てられます。

背景

鹿島センターでは、1990年代から2台の広視野の口径35 cm光学望遠鏡を用いた人工衛星の光学観測を実施しています（図1）。設置当時の望遠鏡システムは、地上から眺めると見かけの運動がない静止衛星に特化したもので、見かけの移動速度が高速な低軌道衛星の光学観測には対応できないものでした。同望遠鏡システムは2011年3月の東日本大震災の際に被害を

受けたこともあり、2011年度中に新規架台に交換するとともにCCDカメラや制御計算機を刷新、静止衛星に加えて低軌道衛星の撮像も行えるように改修し、あらゆる衛星の光学観測に対応できるシステムになりました。

静止衛星をとらえる

新観測システムに搭載されている超高感度CCDカメラはGPS同期ルビウム時刻周波数発生器を用いた制御計算機システムにより制御されており、カメラシャッター速度は30マイクロ秒の精度で撮像のタイミングが計れるように製作されています。同カメラと広視野の望遠鏡を組み合わせることで、横方向1.6度、縦方向1.1度という、満月6個分の視野を一度に撮像することが可能です（図2）。

静止衛星を観測するには、望遠鏡を衛星の方向に向けた後に静止させて撮像します。この状態では、地球の自転運動によって恒星の見かけの位置は移動していき、露出時間に応じた長さの線像に写ります。一方の静止衛星は、その名のとおり地球の自転と同じ角速度で運動していることから、地表に対しては静止しており点像の姿として写ることになります。

図3は、超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS)の方向に望遠鏡を向けて撮像した画像データで、きずなは画面右下に点像となって写っています。一方、左上にも点像が見られ、背景の恒星との相対位置関係から位置を測定、データベースと比較したところCHINASAT 5A衛星（中国）であることが判明しました。

各衛星の運用者は自身の衛星の位置は電波による測定から把握していますが、周辺の他衛星やスペースデブリ（ロケットの残骸や使用済みの衛星など）の状況を知るには他国の情報に頼らざるを得ない状況で



図1 研究本館屋上の2台のドーム

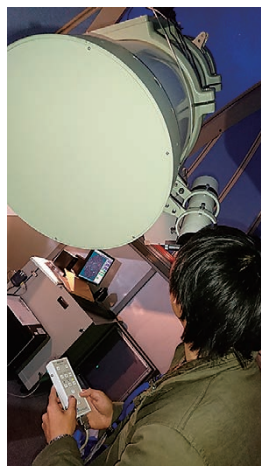


図2 観測準備風景

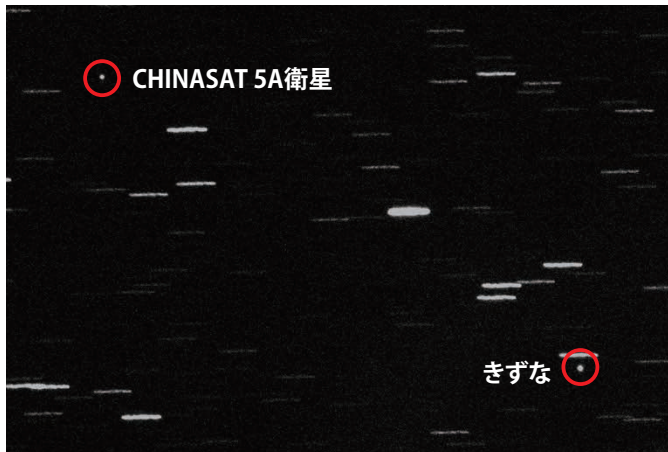


図3 きずな（右下）とCHINASAT 5A衛星（左上）



図4 高速に移動するISS



図5 口径25 cm 可搬型望遠鏡



図6 特別な機器を使わずに観測できる可搬型望遠鏡の観測システム
(実験工程記録のためスマートフォンでPC画面撮影中)

す。混雑する静止軌道上で衛星を安全に運用したり、スペースデブリの接近・衝突の危険から衛星を守ったりするには、本観測システムの利用が有効であることが認められています。

■低軌道衛星をとらえる

望遠鏡を恒星の運動を追従する恒星追尾モードにして撮像すると、恒星は点像となります。例えば、宇宙航空研究開発機構から提供される国際宇宙ステーション（ISS）の位置予報情報を基に、通過が想定される夜空に望遠鏡を向け恒星追尾で撮像すると図4のような写真が得られます。一般的に提供される情報は精度の低いものですが、広視野光学系の本観測システムでは精度の低い位置予報でも、おおよそ視野の中に衛星は入ります。本観測システムを用いれば、提供された位置情報よりも高精度な軌道が得られる仕組みです。本システムは衛星や

ロケットの開発者や運用者からも注目されており、これまでに数多くの方が視察に訪れています。

■NICT本部の可搬型システム

鹿島センターの望遠鏡システムは移動することはできませんが、NICT本部の口径1.5 m望遠鏡に同架させた口径25 cm望遠鏡とデジタル一眼レフカメラからなる装置は、将来的には可搬型観測システムとして活躍する予定です。利用している一眼レフカメラは内蔵の赤外線カットフィルターを取り除くなどの改造を施しており、近赤外線で光通信を行う衛星の撮像も可能になっています。

図6は、NICT本部の口径1 m望遠鏡と光通信を行う超小型衛星SOCRATESを可搬型望遠鏡にて試験観測している様子です。カメラは離れた制御室にあるノートPCからコントロールできます。SOCRATES衛星は

高速移動する低軌道衛星のため、架台として利用する口径1.5 m望遠鏡を恒星追尾させながら、衛星が放つ通信光を撮像しました。

今後さらに時刻精度が高いカメラに変更することで、可搬型ながら高精度な衛星軌道が得られるシステムとなることに期待が寄せられています。

■今後の展望

これまで蓄積してきた衛星観測技術の応用範囲は広く、現在のように安全な衛星運用や衛星通信実験を支えるだけでなく、世界的に整備が急務とされる宇宙状況監視（Space Situational Awareness：SSA）体制においてはノウハウをそのまま生かすことができます。また、今後打上げ予定の衛星が投入される軌道周辺における他衛星やスペースデブリの状況把握に役立つとともに、衛星光通信用地上局の開発にも観測技術は転用されていく予定です。

光衛星通信が開く超高速ワイヤレス通信の未来

ヒカリ
HICALIの開発

静止衛星-地上間の超高速光衛星通信を目指して



久保岡 俊宏 (くぼおか としひろ)
ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
研究マネージャー

大学院修了後、科学技術振興事業団科学技術特別研究員（派遣先：海上保安庁水路部海洋研究室）を経て、2000年通信総合研究所（現NICT）入所。人工衛星の光学観測～軌道決定の研究に従事し、2015年から光衛星通信の研究にも参画。博士（理学）。

宇 宙通信研究室では、2021年に静止軌道に打ち上げ予定の次期技術試験衛星に搭載する通信機器の開発を進めています。本衛星での通信は、Ka帯の電波と、レーザー光という2種類の電磁波を用いた「ハイブリッド」であるという特徴があります。本記事では、次期技術試験衛星での光を使った衛星通信の目標や、機器の開発状況について紹介します。

■光による衛星通信

NICTでは、1980年代からレーザー光を用いた光衛星通信の研究を進めてきました。1994年に打ち上げられた「きく6号」では、人工衛星と地上とで世界最初の双方向光伝送実験に成功し、2005年に打ち上げられた「きらり」(OICETS)では、世界初の地上-低軌道衛星間でのレーザー通信実験（伝送速度10 Mbps）を実施しました（図1）。2014年に打ち上げられた宇宙光通信技術実証衛星（SOCRATES: Space Optical Communications Research Advanced TEchnology Satellite）では、

50 kg級の超小型衛星に小型光ターミナル（SOTA: Small Optical TrAnsponder）を搭載し、主にNICT本部（東京・小金井市）の地球局（沖縄、鹿島）との間で通信実験を実施しました。これは、小型衛星と地上局間で行われた初めての光衛星通信実験になります。

これらの経験を基に、2021年打ち上げ予定の次期技術試験衛星では、赤道上空36,000 kmの静止軌道にある衛星との間で上り、下り共に10 Gbpsという世界最高レベルの地上-静止衛星間の光データ伝送を可能とする超高速光通信システムを実証し、光ファイダリンクの基礎技術を確立する計画です。この次期技術試験衛星に搭載する光通信機器をHICALI（HIgh Speed Communication with Advanced Laser Instrument）と呼んでいます（図2）。

■搭載機器

HICALIは、送受信の信号を処理する光コンポーネント、電波を使った通信機器との接続のためにデータ変換を行う部分、レーザー光を送受信する望遠鏡、精密に地上のターゲットに指向するための粗捕捉及び精追尾機構からなります。HICALIでは、波長が1.5 μm の近赤外線のレーザー光を用いる予定です。この波長域は、地上での光ファイバーを使った通信で広く用いられているため、地上の光通信ネットワークで利用された超高速デバイス、装置、方式などを宇宙光通信に適用することができます。ただし、10 Gbpsクラスの超高速光通信に使えるデバイスは、まだ宇宙空間での開発・実証がなされていません。このため、地上用のデバイスを使うことになるのですが、そのためには宇宙空間の放射線などの過酷な条件下で長期間壊れないようにすることが必要です。主要な光通信デバイスについては、宇宙空間での環境耐性や信頼性

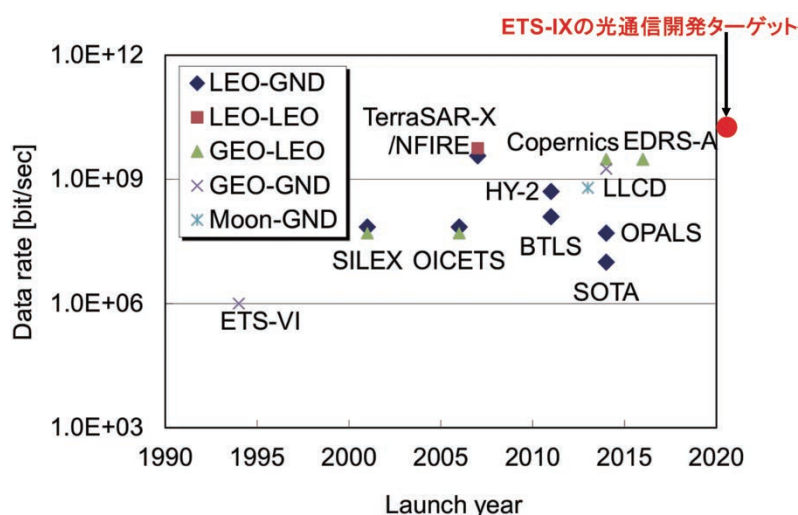


図1 光衛星通信における伝送速度向上のトレンド

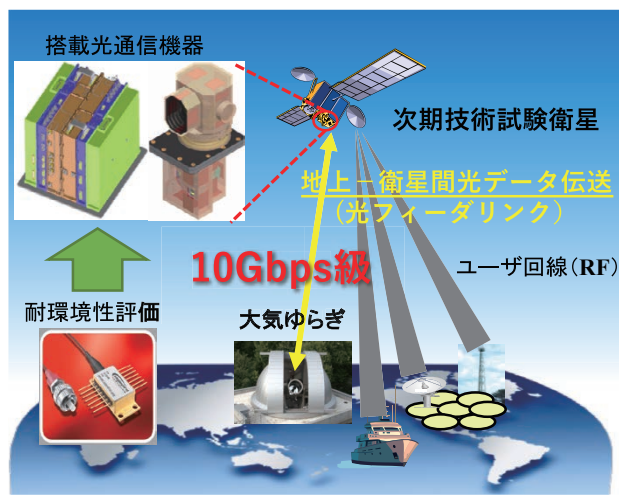


図2 次期技術試験衛星における光衛星通信実験の概念図

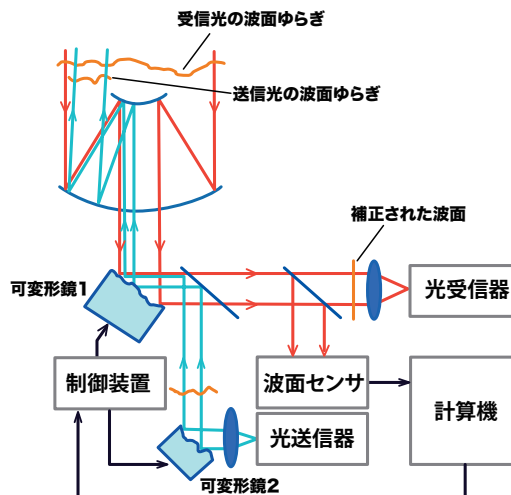


図3 上りと下りの両方の光信号に対応した補償光学 (AO) システム

を確保するためのスクリーニングプロセスの確立を目指し、信頼性が確保できたものを採用していく予定です。また、複数の波長のレーザーを使うことで、光ファイバーを使った地上での高速通信に用いられている光波長多重通信 (WDM: Wavelength Division Multiplex) の衛星-地上間光通信での実証も目指しています。

■地上局に関する技術的課題

静止衛星と地上局間の光衛星通信には、衛星方向に雲があると通信光が遮られて通信ができない、大気のゆらぎの影響を受けやすいといった問題点があります。天文観測の分野では、大気ゆらぎの影響を軽減するために、星の像の乱れをシャックハルトマンセンサー*1などの波面センサーで観測し、可変ミラーを変形させて対象となる天体の像の乱れを補正するという補償光学 (AO: Adaptive Optics) の技術が普及してきました。ところが、光衛星通信の場合は、対象の衛星が動いていることによって生じる光行差*2を補正する必要があり、天文用のAOシステムはそのまま使うことができません。現在、我々は光行差を補正し光通信への適用を可能にするAOシステムの開発に着手しています (図3)。また、天文用としては宇宙からの光に対する大気のゆらぎの影響を補償すればよいのに対して、双方向の光衛星通信の場合、地上から衛星に向けて照射するアップリンクの光に対しても大気のゆらぎの影響を軽減する必要があります。後者については、波面を送信開口より広い受信開口でセンシングし、伝搬路が異なる波面を推定することで波面

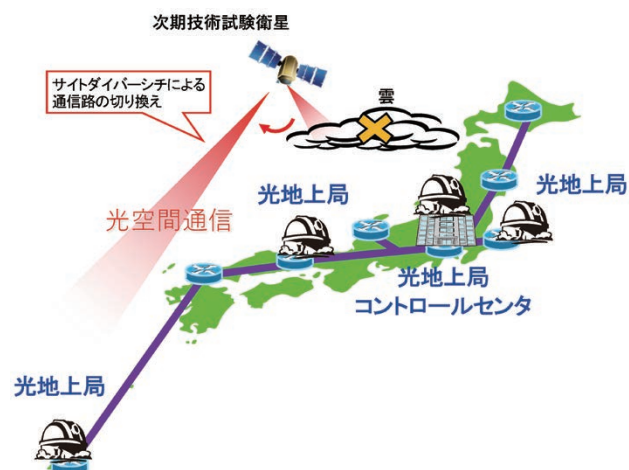


図4 衛星-地上間の光通信におけるサイトダイバーシティの概念図

補償を行う方式を提案しています (平成29年1月特許出願)。

一方、雲の影響を回避するためには、全天カメラ、雲量計等からなる環境データ計測装置を日本全国の10カ所に配置し、そこから得られたデータを基にどのエリアが晴れて光通信が可能かどうかを予測し、そのエリアにある地上局との光通信を行うというサイトダイバーシティの実証 (本特集号P6-7参照) を目指しています (図4)。

■今後の展望

HICALIで実証を目指している光ファイダリンクについては、将来的に、通信の大容量化に伴い帯域が逼迫している電波でのファイダリンクに置き換わる可能性のある技術であると考えています。現在、宇宙データシステム分野における標準化活動である CCSDS (The Consultative Committee

for Space Data Systems) では、衛星内、衛星-地上局間及び深宇宙-地上局での宇宙データの通信・交換の標準的方式の議論が進められています。この検討会では、用いるレーザーの波長、通信方式、符号化技術などについて議論が進められています。

HICALIの開発においては、将来的には開発したシステムを広く普及させることを念頭に、標準的な技術の採用と共に、標準化の議論への提案も進めていくことを計画しています。

*1 シャックハルトマンセンサー
高速で撮影可能な撮像素子の前に2次元のマイクロレンズアレイを配したデバイス。光の波面形状や強度分布を高速に測定するために用いる。

*2 光行差 (こうこうさ)
観測者が光を出している物体に対して相対的に動いているとき、光の方向がずれて見える現象のこと。



電界イメージング装置

— 見えない電波を撮影してその場で把握する —

電波や電磁界は、私たちの周囲にあまねく存在しますが、人間の目には映りません。これらを撮影し、その場で動画として表示する技術が、本発明の電界イメージング装置「電界カメラ」です。アンテナから放射される電磁界や回路を巡る電気信号はどのように振る舞うのか？ 電界カメラを用いると電波や電磁界がリアルタイムで映像化されるため、それらの挙動の実際を即座に把握できます。

■技術の概要・適用分野等

電界カメラの外観が図1aに示されています。手前の黒い部分が下向き観察窓です。図1bにはその内部構成が、市販Bluetoothモジュールからの電波放射を撮像する例と共に示されています。そこでは、放射電波の電界により結晶板の屈折率が変化する電気光学効果が、超並列性を有する高速CMOSイメージセンサと組み合わされています。

図2には、モジュール基板に実装されたチップアンテナ（図1c）の一部から電波が放射される様子がコマ送り図（対応する動画像：<http://lei-camera.nict.go.jp/>）により示されていますが、電波の振る舞いの詳細が一目で分ります。最新の電界カメラ技術では、撮影可能な電波や電磁界の周波数は自動車のミリ波レーダーより高い100 GHzに及び、微細な電界映像の分解能はミクロン領域に達しています（詳細：<https://www.nature.com/articles/s41598-017-08442-8>）。

顕微鏡、望遠鏡、赤外カメラなどのように、肉眼で見えなかった身近なものをその場観察可能とした技術は広範な応用を生み出しましたが、高周波の電波や電磁界をその場で可視化する電界カメラにも大きな展開が期待されます。その適用範囲は電気を扱う分野全般で多岐にわたりますが、思いもよらない新規分野が出現するかもしれません。

■利用・応用・連携先の探索

試作電子回路基板、テストICチップや試作アンテナの動作解析、エレクトロニクス機器の故障解析、高周波回路に発生するノイズの対策などが、電界カメラ技術の当座の適用対象と考えられます。リアルタイム映

像で観察する手法の有効性や効率性は高く、作業時間の大幅短縮という大きなメリットがもたらされると期待されます。

本技術に興味をお持ちの産学の方は、下記連絡先までお問い合わせください。

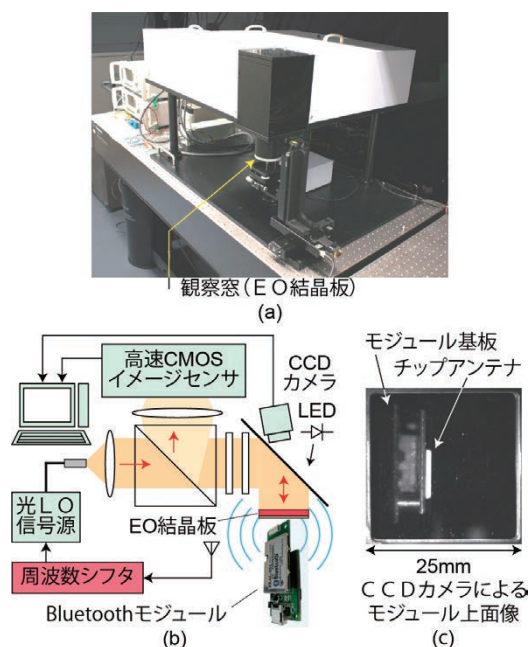


図1 電界カメラ1号機外観 (a)、内部構成 (b)、実装されたチップアンテナ (c)

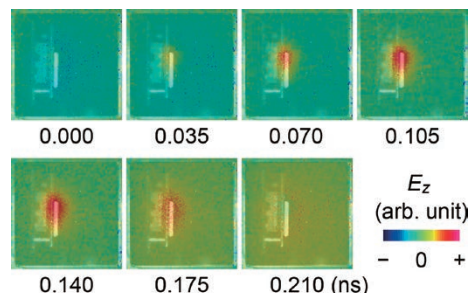


図2 光学像（図1c）に重畳表現させた電波放射撮影結果（コマ送り）

〈特許情報〉

公開番号：特開2017-156248

発明の名称：電界イメージング装置

〈連絡先（問合せ等）〉

イノベーション推進部門 知財活用推進室

E-mail: ippo@ml.nict.go.jp

TEL: 042-327-6950 FAX: 042-327-6659

Awards

情報処理学会論文賞は情報処理学会創立10周年を記念して、昭和45年に創設された賞です。機関誌に発表された論文（2016年度の対象論文は591編）のうち、特に優秀な著者に授与されます。

一般社団法人 情報処理学会

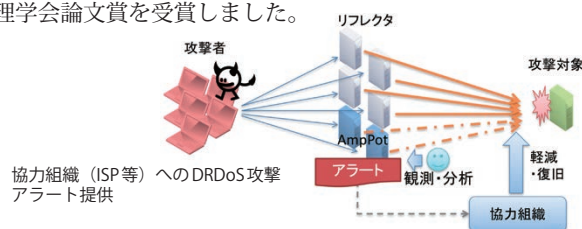
平成28年度 情報処理学会論文賞 ————— IPSJ Best Paper Award (2016)

～『早期インシデント対応を目的としたDRDoS攻撃アラートシステム』～

概要

NICTサイバーセキュリティ研究所では、インターネット上のDNS、NTPサーバ等のサーバ群を悪用して通信を増幅させるリフレクション型サービス不能攻撃（DRDoS攻撃）を迅速に検出するために、横浜国立大学、ドイツのSaarland大学、NICTとの共同研究により開発したDRDoS攻撃を観測するおとりシステム「AmpPot」により、DRDoS攻撃の発生を早期に通知するアラートシステムを提案、有効性を実証しました。

本研究成果について発表した論文『早期インシデント対応を目的としたDRDoS攻撃アラートシステム』が、平成28年度情報処理学会論文賞を受賞しました。



牧田 大佑 (まきた だいすけ)

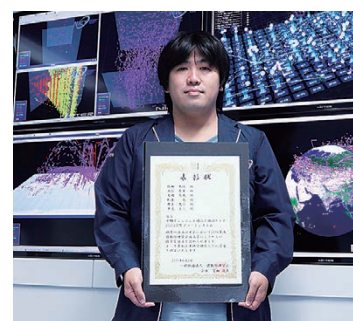
サイバーセキュリティ研究所
サイバーセキュリティ研究室
研究員

井上 大介 (いのうえ だいすけ)

サイバーセキュリティ研究所
サイバーセキュリティ研究室
室長

中尾 康二 (なかお こうじ)

サイバーセキュリティ研究所
主管研究員



筆頭執筆者の牧田大佑研究員

受賞の言葉

本論文では、DRDoS攻撃と呼ばれるDoS攻撃の発生を通知するアラートシステムを提案し、そのシステムを実際に構築・運用することで、その有用性を検証しました。情報処理学会の論文誌において、このような榮譽ある賞を頂けたことを誇りに思います。また、本受賞に際し、ご支援を頂いた方々に深く感謝致します。

data

●受賞日：2017年6月2日

●受賞内容：『早期インシデント対応を目的としたDRDoS攻撃アラートシステム』が2016年度情報処理学会論文賞にふさわしい優秀な論文と認められたため

●共同受賞者：西添友美（NTTコミュニケーションズ株式会社）、吉岡成成（横浜国立大学大学院環境情報研究院／先端科学高等研究院准教授）、松本勉（横浜国立大学大学院環境情報研究院／先端科学高等研究院教授）



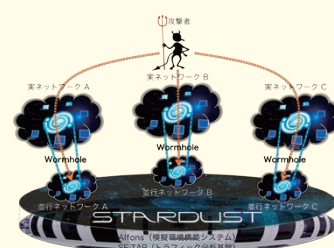
サイバー攻撃誘引基盤“STARDUST”を開発

政府や企業等の組織を精巧に模擬した「並行ネットワーク」に攻撃者を誘い込み、その攻撃活動をステルスに長期観測することで、従来では収集が困難であった攻撃者の組織侵入後の詳細な挙動が、リアルタイムで把握可能に。

■ Interop Tokyo 2017で話題をさらったSTARDUST

標的型攻撃に代表される政府や企業等の組織をねらったサイバー攻撃では、メール等に添付されたマルウェアが使用されますが、その対処は被害後のマルウェア解析にとどまっており、組織への初期侵入情報しか得られませんでした。

NICTサイバーセキュリティ研究所では、標的型攻撃等のサイバー攻撃対策として、政府や企業等の組織を精巧に模擬した「並行ネットワーク」に攻撃者を誘い込み、その攻撃活動を攻撃者には察知できないよう（ステルス）に長期観測することで、従来では収集が困難であった攻撃者の組織侵入後の



詳細な挙動をリアルタイムに把握可能にするサイバー攻撃誘引基盤「STARDUST」を開発しました。「並行ネットワーク」は数時間程度で構築可能で、その上では組織の情報資産を模した情報が配置された各種サーバや数百台のPCが実稼働し、あたかも実在の組織のように振る舞います。Interop Tokyo 2017で動態展示を行い、複数のメディアがSTARDUSTの稼働の様子を取り上げました。

STARDUSTは、実データセットを自ら作り出せる研究基盤として、産学及びセキュリティ関係機関との共同利用などを進めながら、攻撃者観測のステルス性高度化等の開発を行い、原因・攻撃者特定技術の確立を目指します。

NICT

オープンハウス2017

11月9日(木)・10(金) 9:30~17:00

※10日は16:30まで。無料、事前申込不要(一部除く)

NICT では、最新の研究成果を講演、ラボツアー、ワークショップ、技術展示でご紹介する「NICT オープンハウス 2017」を開催します(詳細は Web サイトをご確認ください)。

【11月9日(木):午前】

特別講演:坂村 健氏

INIAD(東洋大学情報連携学部) 学部長

【11月9日(木):午後】

ワークショップ:IoT、ビッグデータ、オープンイノベーションに関するパネル討論

【11月9日(木)・10日(金)】

技術展示:最新の研究成果についての展示

【11月9日(木)・10日(金)】

講演会:NICTの研究者による最新の研究成果の講演

【11月9日(木)・10日(金)※事前申込制】

ラボツアー:研究施設見学による、最新の研究活動のご紹介

ラボツアー(一例)



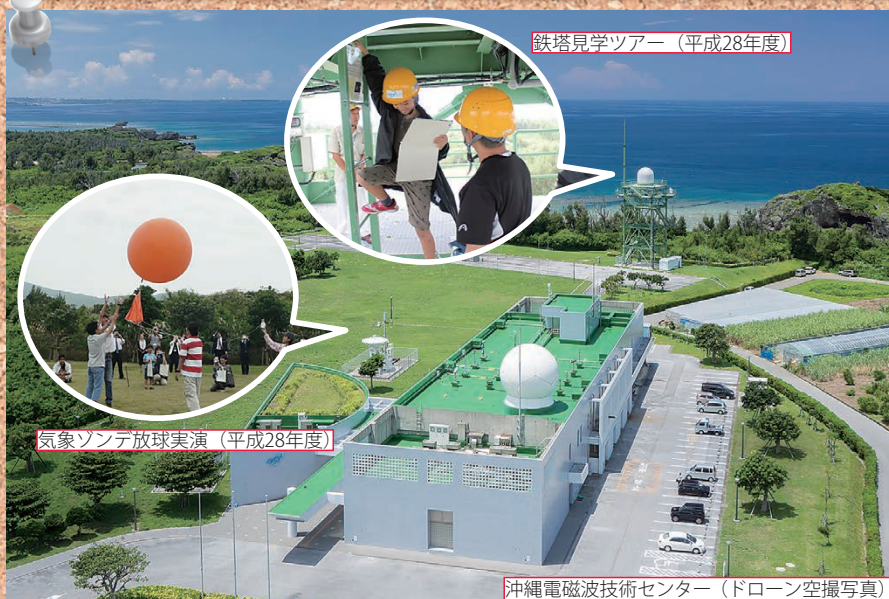
光・電子融合デバイス作製環境(クリーンルーム)



人工衛星との光通信を可能にする大型望遠鏡

会場:情報通信研究機構本部
〒184-8795
東京都小金井市貫井北町4-2-1

お問い合わせ:情報通信研究機構 広報部
TEL:042-327-5322
<http://www.nict.go.jp/>



鉄塔見学ツアー(平成28年度)

気象ゾンデ放球実演(平成28年度)

沖縄電磁波技術センター(ドローン空撮写真)

沖縄電磁波技術センター施設一般公開

NICT
オープンハウス
2017

沖縄

日時 2017年11月23日(木・祝)

10:00~16:30(受付は16:00まで)

会場 沖縄県国頭郡恩納村字恩納4484

主な内容

- ※電波・光に関する実験・体験コーナー
- ※施設見学ツアー、展示室公開
- ※総務省沖縄総合通信事務所の紹介
- ※電波監視車両の展示、おもしろ電波教室

詳細 <http://okinawa.nict.go.jp/>



NICT NEWS No.466 OCT 2017

編集発行
国立研究開発法人情報通信研究機構 広報部
NICT NEWS 掲載URL <http://www.nict.go.jp/data/nict-news/>

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1
TEL: 042-327-5392 FAX: 042-327-7587
E-mail: publicity@nict.go.jp
URL: <http://www.nict.go.jp/>
Twitter: @NICT_Publicity

ISSN 1349-3531 (Print)
ISSN 2187-4042 (Online)

〈再生紙を使用〉

R270