

# 宇宙光通信の最新事情および今後の動向について

情報通信研究機構 ワイヤレスネットワーク研究所  
宇宙通信システム研究室 研究マネージャー 高山 佳久

## 1. はじめに

近年の我々の生活には人工衛星の利用が不可欠となり、宇宙で取り扱われるデータ量も急速に増加している。大容量データ伝送の必要から使用する周波数は次第に高くなり、現在はKa-bandの利用が進むと同時に、将来のより高速なデータ伝送を目指してレーザー光の利用による通信の研究開発が進んでいる<sup>[1]</sup>。

電波と比べて波長が短いレーザー光は、口径が小さいアンテナを使用しても、空間伝搬損失やシステム間の干渉を抑えることができる。また光の周波数帯は、現在の国際的な周波数調整の対象に含まれていない。高速伝送の可能性に、こうした特徴や事情も合わせて考慮され、衛星と衛星、衛星と地上、月や深宇宙と地上など、広い範囲へ光通信を適用する議論が、宇宙機関による会合において始まっている<sup>[2][3]</sup>。

特に宇宙機関による会合の一つである宇宙データシステム諮問委員会（The Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS）では、内設されているグループの一つSpace Link Services area(SLS)において、光通信の議論を行うワーキンググループOptical Communications Working Group (SLS-OPT) の第1回会合が2014年3月に開催された。これまでの宇宙における実証例や地上における関連技術を考慮した標準化の議論が進行中である<sup>[3][4]</sup>。

本稿では、宇宙光通信の最新事情および今後の動向について述べる。まず宇宙光通信に特有の技術を紹介し、次にこれまでに行われた軌道上での実証例を整理する。また、最近

の国際的な議論について紹介し、技術検討の動向と今後の計画を紹介する。

## 2. 宇宙光通信に特有の技術

宇宙光通信の特徴の一つに、レーザー光の鋭い指向性の利用が挙げられる。指向性の程度を試算する例として、周波数25GHz（波長1.2mm）の電波と、波長1.5 $\mu$ mのレーザー光が、開口径が等しいアンテナから射出される場合を仮定する。

波長が異なる二つの電磁波をそれぞれ、口径が等しい理想的なアンテナから射出すると、これらの伝搬に伴う広がり角の比は、波長の比に等しいと考えられる。このため波長1.5 $\mu$ mの光は、周波数25GHz（波長1.2mm）の電波と比べて、8,000分の1小さい広がり角度で射出される。これは受信面上の照射領域において、レーザー光の方が、単位面積当たり $8,000^2 = 6,400$ 万倍高い電力を届けられることを示す。従って、通信相手に高い電力を届けるという観点からは、レーザー光の使用は効果的と言える。しかし同時に、この結果は、レーザー光の照射面積は電波と比べて6,400万分の1小さく、通信相手を的確に照射すること自体に難しさが生じることを示している。このため、宇宙光通信では、鋭い指向の光で的確に相手を照射するための方法が必要となる。

宇宙光通信に特有となるこの方法は、光回線を形成する手順と、これを維持する技術とで構成される。図1は、通信相手となる局に、自局の方向を検出させて光回線を形成する手順である。これまでに、広がり角の大きいビー

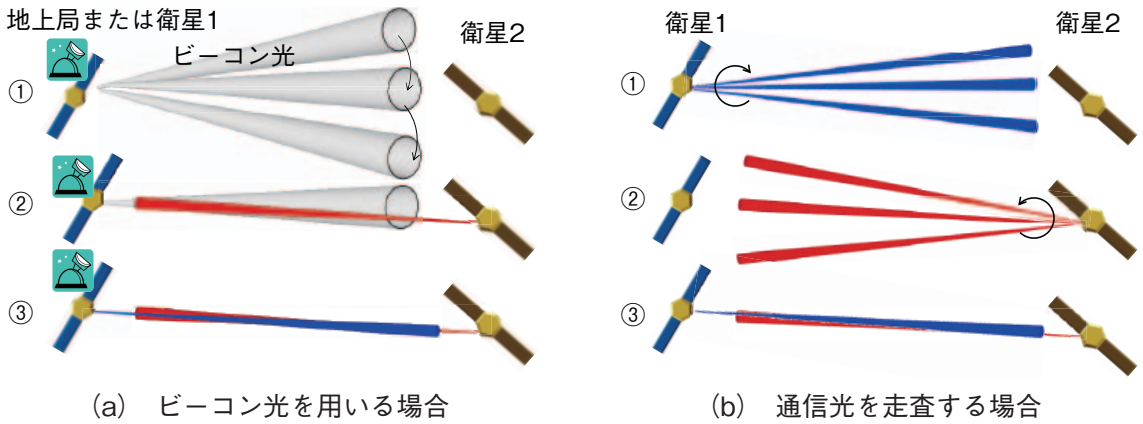


図1 光回線の形成

コン光を用いる例と、これを用いない例が実証されており、これらをそれぞれ図1 (a) および (b) に示す。図1 (a) は、ビーコン光を用いる場合である。同図①では、衛星1が軌道情報から推定した衛星2の方向へ広がり角の大きいビーコン光を照射する。②では、衛星1のビーコン光を検出した衛星2が、その到来方向に基づいて検出した衛星1の方向へ、通信光を射出する。衛星1が衛星2からの通信光を検出すると、衛星1は衛星2へ向けて通信光を射出する。互いに相手局の方向を検出した③の状態に達すると、両者間での通信を実施できるようになる。図1 (b) はビーコン光を用いない場合である。同図①では、衛星1は鋭い指向の通信光の射出方向を制御して、軌道情報から推定する衛星2の存在方向を走査する。②では同様に、衛星2が衛星1の方向を走査する。衛星1および2は互いに、相手局

から届く光の到来方向を頼りに通信光の走査範囲を狭め、③のように両者の通信光が互いを照射する状態に至ると、データ伝送を行う。

また図2は、形成した光回線を維持する技術である。衛星が地球を周回する速度は、低軌道衛星の場合は約7km/s、静止軌道衛星の場合は約3km/sとなる。このような高速に移動する局を相手に通信を行う場合、射出された光が到達するまでの間に、相手局が移動する距離を無視できない。従って、衛星2からの通信光が衛星1へ届き、その到来方向に基づいて衛星1が衛星2へ向けて通信光を射出する場合、光が到達するまでに衛星2が移動する位置を見込む角度を補正する必要が生じる。この角度は光行差補正角と呼ばれ、衛星の軌道情報などに基づいて算出される。

図3に光通信装置の構成例を示す。同図では三つの駆動系を組み合わせている。一つ目

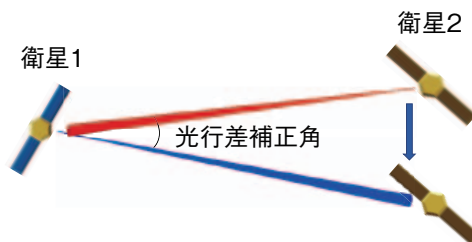


図2 光行差補正

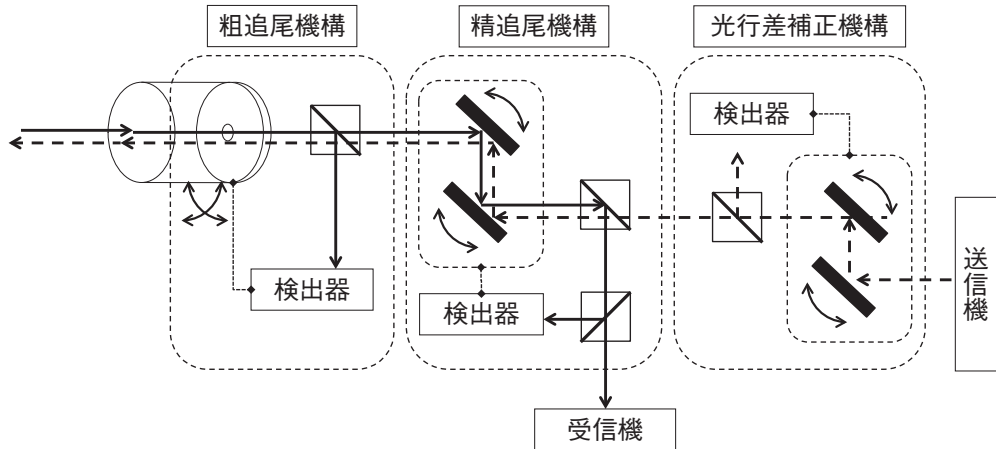


図3 光通信装置の構成例

は、光アンテナの指向方向を制御する粗追尾機構、二つ目は内部光学系に導かれた光の微小な角度変化を補正する精追尾機構、三つ目は射出光へ光行差補正角を与える光行差補正機構である。これらを併用することにより、高速で移動する衛星を相手とした宇宙光通信において光回線を形成し、これを維持しながら

らデータを送受する。

### 3. 宇宙光通信の実証例

宇宙光通信に関する軌道上での実証例を図4に示す。同図中、GEOは静止軌道、LEOは低軌道、GNDは地上を記す。GEOとLEOと記した枠内では、衛星名とその打上げ年を示し

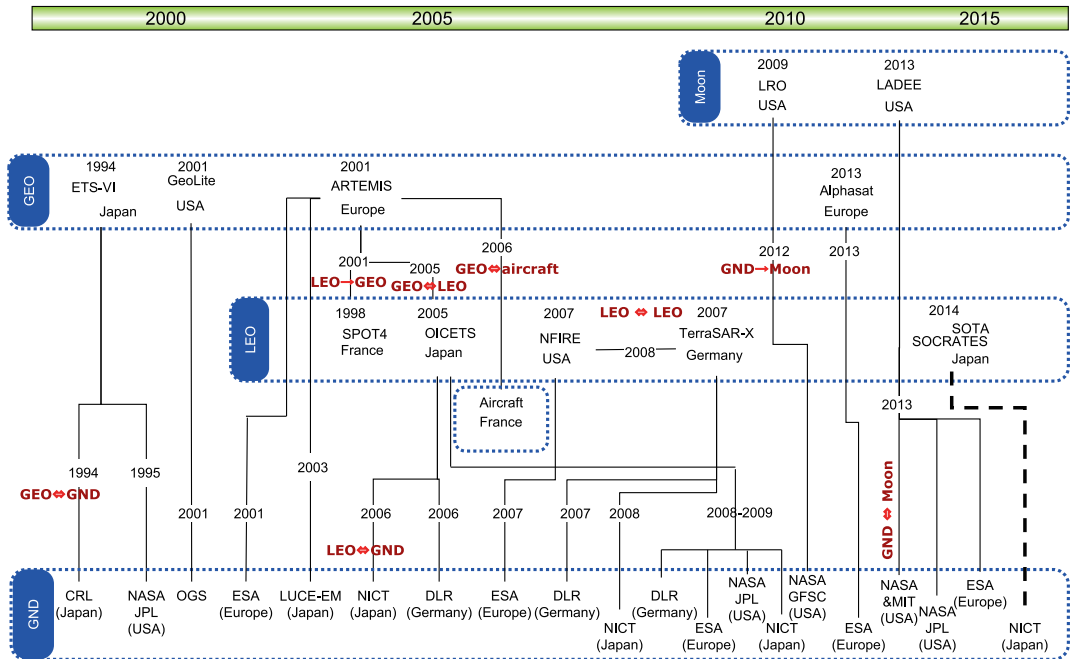


図4 宇宙光通信の実証例

ている。またGNDの枠内には、光地上局を保有する機関の略称を示している。CRLは通信総合研究所（現 独立行政法人情報通信研究機構NICT）、NASAは米国の航空宇宙局、JPLはジェット推進研究所、DLRはドイツ航空宇宙センターおよびESAは欧州宇宙機関である。なお図中の実線は、光通信実験の組み合わせを示し、それぞれの実験が初めて行われた年を付記している。

静止軌道、低軌道および地上を結ぶ宇宙光通信の組み合わせは、(1) 静止軌道－地上、(2) 静止軌道－低軌道、(3) 低軌道－地上、(4) 低軌道間、(5) 静止軌道間に区分できる。

図4に示すように、衛星を用いた初めての光通信は、組み合わせ(1)で行われた。1994年に打上げられたNASDA（現 独立行政法人宇宙航空研究開発機構、JAXA）の衛星ETS-VIとCRLの光地上局との間での光通信である。この実験においては、地上から衛星へは波長 $0.5\mu\text{m}$ 帯、衛星から地上へは波長 $0.8\mu\text{m}$ 帯のレーザー光が用いられた。2001年には米国が静止衛星GeoLiteを打上げ、地上との光通信実験に成功したという報告がある。また同年には、ESAが静止衛星ARTEMISを打上げ、フランスの宇宙機関CNESの低軌道衛星SPOT4からの片方向通信を行ったが、組み合わせ(2)における双方向通信は、JAXAの低軌道衛星OICETSとARTEMISとにより2005年に初めて実施された。使用波長は $0.8\mu\text{m}$ 帯である。また2006年3月には、OICETSとNICTの光地上局との間で双方向光通信を行い、組み合わせ(3)での初めての成果となった。

これらの成果により、静止軌道、低軌道および地上を結ぶ全てにおいて、世界初となる成功に日本の技術が貢献していると言える。

2008年3月には、米国の低軌道衛星NFIREとDLRの低軌道衛星TerraSAR-Xが、組み合わせ(4)を波長 $1\mu\text{m}$ 、5.6Gbpsのデータ伝送を行っ

た。2009年には、JPL、DLR、ESAおよびNICTがそれぞれ保有する光地上局とOICETSとの国際共同実験が行われ、同年9月末までの間に、全ての機関が衛星との光通信実験に成功した。また最近では、月と地上との間で光通信が実施された。ここでは、地上の光通信で広く採用されている波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯の光が使用されている。2014年5月にはNICTの小型光通信装置（SOTA）が搭載された衛星SOCRATESが打ちあげられ、現在、軌道上試験の最中である。

#### 4. 技術検討の動向と今後の計画

宇宙通信における光の利用について、国際的な議論が始まっている。国際電気通信連合の無線通信部門ITU-Rのほか、図5に示すように、宇宙機関間での周波数調整を行うSpace Frequency Coordination Group(SFCG)、宇宙機関間での相互運用に関する議論を行うThe Consultative Committee for Space Data Systems(CCSDS)、両者の議論に影響を持つInter-agency Operations Advisory Group (IOAG) が検討を進めている。

ITU-Rにおいては、例えばResolution 118の文書で3THz以上の周波数について述べられており、20-275THzの周波数帯に関してもRecommendation S.1590が発行されている。2003年、SFCGからはOptical Communicationsという文書が発行され、CCSDSにおいては2009年に、宇宙光通信の技術検討を行う委員会としてThe Optical Channel Coding and Modulations Special Interest Group under the Space Link Services Areas (SLS-OCM) が設立された。SLS-OCMでは、衛星間、衛星－地上間、深宇宙－地上間などのシナリオを想定した通信方式や符号技術などの議論が行われ、その設立の翌年にはIOAGの中にも宇宙光通信の議論を行う会合Optical Link Study Group (OLSG) が発足した。OLSGはFinal reportとし

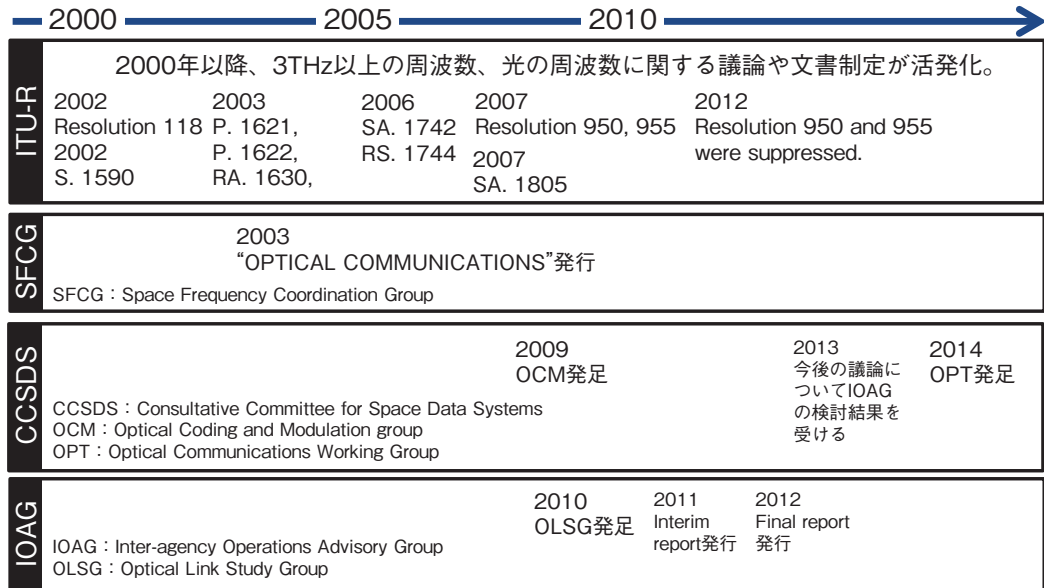


図5 宇宙光通信に関する議論

て、宇宙光通信の現状および今後の議論項目などを整理した文書を発行し、これらの議論をCCSDSにて継続する方針を示した<sup>[5]</sup>。その結果CCSDS内において、SLS-OCMに代わり改めてOptical Communications working group (SLS-OPT) が設立され、第1回会合が2014年3月に開催された。

これまでに挙げられた検討すべき項目のひ

とつに、波長の選択がある。これまでの軌道上実証では、 $0.8\mu\text{m}$ 帯、 $1.0\mu\text{m}$ 帯、および $1.5\mu\text{m}$ 帯が使用されたが、高速データ伝送への可能性から、今後の宇宙光通信では $1.0\mu\text{m}$ と $1.5\mu\text{m}$ が議論の中心となっている。文献 [5] に記述されている宇宙実証の計画を表1に示す。また図6には、図4に示した実証例を使用波長に着目して再整理した結果を示す。現在の議

表1 宇宙実証の計画<sup>[5]</sup>

名称	区分	波長	
		Downlink [nm]	Uplink [nm]
LCT-125 (DLR TerraSar-X 2009)	LEO-GND	1064	1064
Optel- $\mu$ (ESA RUAG Space 2017)	LEO-GND	1545, 1565	1064
OSIRIS (DLR-IKN)	LEO-GND	1545	1560
LEOLINK (NASA-JPL)	LEO-GND	1550 C-band CWDM	1568
SOTA (NICT)	LEO-GND	1550 and 975	1064
LCT-135 (ESA Alphasat 2013)	GEO-GND (Earth relay Feeder Link)	1064	1064
LCRD (NASA 2017)	GEO-GND (Earth relay Feeder Link)	1550	1558
LLCD (NASA 2013)	Moon-GND	1550	1558
DOT (NASA-JPL 2018)	Mars-GND	1550	1030

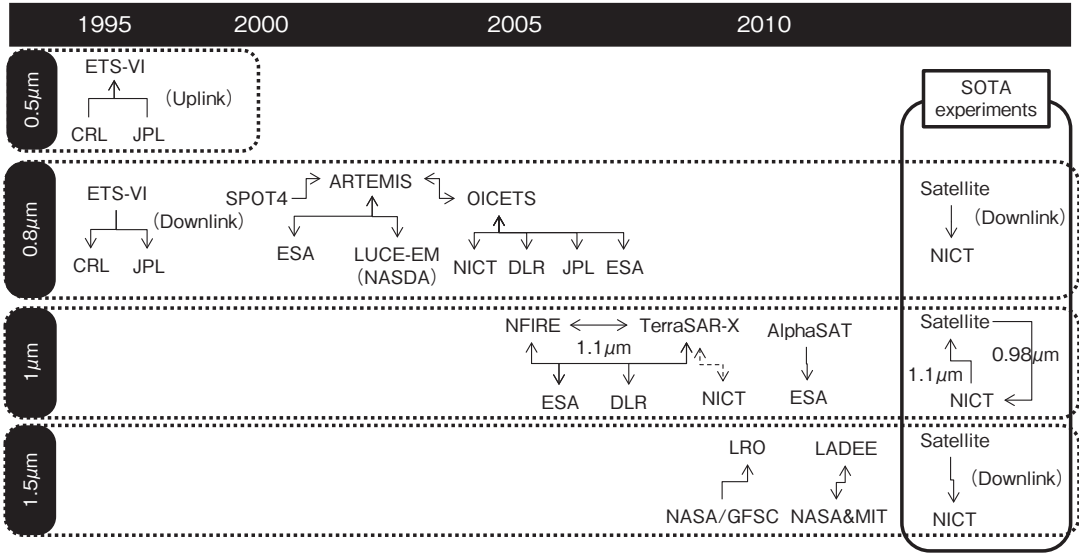


図6 宇宙光通信の実証例（使用波長による分類）

論では、採用する波長を一つに特定するに至ってはいない。しかし表1および図6より、使用波長として1.5μmの採用が増えている傾向を見ることができる。

なお、表1中の「区分」に着目すると、衛星-地上間の光通信が多く計画されているこ

とがわかる。CCSDSの議論においても、衛星-地上局間光通信に着目した議論は進んでおり、雲の遮蔽など天候の影響を避けて宇宙と地上との接続確率を向上させるサイトダイバーシティの重要性が高まっている。図7にサイトダイバーシティの概念図を示す。複数



図7 サイトダイバーシティの概念図

の光地上局を地上のネットワークを介して相互に接続することにより、天候の影響を避けられる地上局が、衛星と光通信を行うものである。

## 5. おわりに

本稿では、宇宙光通信についてのこれまでの軌道上実証例を示し、宇宙機関の間で進んでいる議論を紹介した。この分野において日本が示した成果は大きく、静止軌道、低軌道および地上との間をそれぞれ接続する組み合わせの全てにおいて、世界初の成果に貢献している。宇宙光通信で採用する波長としては現在、 $1.0\mu\text{m}$ と $1.5\mu\text{m}$ が検討されているが、これまでの実証例と今後のプロジェクトを波長に着目して整理することにより、 $1.5\mu\text{m}$ 帯の採用が増えている傾向を見ることができる。

## 文 献

- [1] 門脇直人、豊嶋守生、三浦周、山本伸一、高橋卓、吉村直子、辻宏之、滝沢賢一、高山佳久、宗正康、“新たな広がりを見せる衛星通信技術の最新動向”、電子情報通信学会論文誌、B, J97-B, 11, pp. 979-991 (2014).
- [2] 向井達也、高山佳久、倉伸宏、ニコラス・ペルロット、“CCSDS で始まった光通信の議論について”, Space Japan Review, 73, 4&5, pp.1-3 (2011)
- [3] 荒木智宏、稲川慎一、“CCSDS における光通信技術の標準化活動について”, Space Japan Review, 86, 6-9, pp. 3 (2014).
- [4] <http://public.ccsds.org/default.aspx>
- [5] Klaus-Juergen Schulz, John Rush, “Results of the Optical Link Study Group”, Proc. Space Ops. 1275004, pp. 1-10 (2012).