

## 特集

# 光宇宙通信技術の研究開発動向

情報通信研究機構

豊嶋守生

### はじめに

宇宙空間における通信は、空間的に離れた場所へ情報を伝送するために、通常電波が用いられている。しかし、近年、光ファイバ通信をはじめとする光学技術やレーザ技術の発達に伴い、レーザ光線つまり光波を用いて離れた宇宙機器間で通信を実現できる時代に突入した。電波も光波も同じ電磁波であるが、とりわけ宇宙における光波の利用は、使用レーザの周波数が非常に高いことに起因して、小型・軽量化、高速・大容量化などの特徴を有し、周波数資源の有効活用や法的規制が無いこともあり、電波よりも将来に向けて有望な手段である。欧州では、低高度軌道（LEO）の観測衛星と静止軌道（GEO）の衛星間において、既に2003年から50Mbpsの光通信回線が定常的に運用されている。日本においては、光通信機器を搭載した国産衛星が2005年8月に打ち上げられ、欧州の衛星との間で光衛星間通信実験が成功裏に実施された。しかし、一方で米国では2010年に火星からの観測データ伝送に光通信を用いる計画を進めていたが、2005年に中断されている。このような状況の中で、世界各国で光宇宙通信技術の研究開発は継続して行われており、その一部の技術は成層圏プラットフォームなどの大気中の光通信にも生かされている。本稿ではそれらの研究開発動向を紹介する。

### 過去の光通信の宇宙実証

アメリカ航空宇宙局（NASA）による開発では、1992年にジェット推進研究所（JPL）により、GOPEX計画で6万～600万kmかなたにあるガリレオ探査機へ3.5WのNd:YAGレーザを送信し、固体撮像カメラにより受信に成功した<sup>1)</sup>。1995年には、技術試験衛星VI型（ETS-VI）を用いて日米共同実験によりJPLテーブルマウンテン光地上局との間で地上-衛星間光通信実験（通称GOLD）に成功した<sup>2)</sup>。2010年に波長1.06μmで火星からの観測データ伝送に、伝送速度1～30Mbpsの光通信を用いるMLCD計画を進めていたが、2005年に計画は中断された<sup>3)</sup>。

米国国防総省（DOD）による開発では、STRV2が2000年6月に打ち上げられ、弾道弾防衛局（BMDO）により開発された光通信機器でTSX-5衛星に搭載された。5.4インチの望遠鏡で質量は31.5ポンド、消費電力75Wで1Gbpsの通信が可能であったが、衛星のヨー軸周りの姿勢誤差が大きく光通信は実現しなかった<sup>4)</sup>。また、2001年5月に打ち上げられたGeoLITEは、国家偵察機構（NRO）により開発された先端光通信システム（1.5μm技術）を搭載し、地上-静止衛星間の光通信実験は成功裏に実施された<sup>5)</sup>。1Gbps程度の通信を行ったと推測され、静止軌道上で9年間軍用に利用される予定であるが、詳細は不明である。

欧州宇宙機関(ESA)では、SILEX計画により、2001年11月に静止衛星ARTEMISと地球観測衛星SPOT4との間で、50Mbpsの光衛星間通信により観測画像の伝送に成功しており、既にデータ中継の定常回線とし

て運用されている<sup>6)</sup>。また、ESAの光地上局のあるスペイン テネリフェ島との地上-ARTEMIS 衛星間の光通信も成功裏に実施されている<sup>7)</sup>。さらに、2003年9月に光衛星間通信実験衛星(OICETS)に搭載する光衛星間通信機器(LUCE)のエンジニアリングモデル(EM)をテネリフェ島のESA光地上局まで運び、静止軌道上のARTEMISと日本製のLUCE EMとの光通信実験も成功裏に実施されている<sup>8)</sup>。

日本においては、技術試験衛星VI型(ETS-VI)が1994年8月に打ち上げられ、静止トランスファー軌道となったが、アップリンク波長 $0.514\mu\text{m}$ 、ダウンリンク波長 $0.830\mu\text{m}$ で、伝送速度1Mbpsの世界初の地上-衛星間通信実験が成功裏に実施された<sup>9)</sup>。また、国産衛星OICETSが2005年8月に打ち上げられ、ARTEMISとの間で光衛星間通信実験を実施している。これについては後述する。

### 光宇宙通信の動向

平成17年度が一番ホットな話題としては、2005年12月に日本の宇宙航空研究開発機構(JAXA)のOICETS衛星と欧州のデータ中継衛星ARTEMIS衛星との間で光衛星間通信実験が宇宙実証されたことである<sup>10)</sup>。OICETSは、2005年8月にウクライナ製のドニエプルロケットによりカザフスタンのバイコヌールから打ち上げられ、軌道高度610km、軌道傾斜角 $97.8^\circ$ の太陽同期軌道へ投入された<sup>11)</sup>。OICETSには、 $0.8\mu\text{m}$ 帯半導体レーザとアバランシェフォトダイオード(APD)をベースにした光通信技術を用いているLUCEが搭載されている。LUCEは送信波長 $0.847\mu\text{m}$ 、受信波長 $0.819\mu\text{m}$ で送受信共用光学系であるが、偏光と波長分離により送受信光のアイソレーションをとる設計となっている。打ち上げから衛星バス系のチェックアウトが始まり、2005年9月~11月にはLUCEのチェックアウトが行われ、シリウス等の恒星や火星等の惑星を用いた捕捉追尾実験に成功し、12月にARTEMISとの間で双方向通信という意味において世界初の光衛星間通信実験が成功裏に実施された。光通信の伝送速度は、送信50Mbps、受信2Mbpsであり、10年以上前の設計で今となっては速度的に時代遅れの感もあるが、捕捉追尾系については将来も同様の追尾技術が必須であり、光衛星間通信に必要とされる基礎技術の宇宙実証を行うことができたといえる。さらに、紙ベースのインタフェースで日本独自の技術開発を行い宇宙実証できたことを考えると、光通信に関し国際的インタフェース標準が確立できたことは意義深いことである。

また日本においては、2004年11月に情報通信研究機構(NICT)が開発した小型光通信機器を用いて、約4kmの高度にある成層圏プラットフォーム-地上間で捕捉追尾実験に成功している<sup>12)</sup>。その小型光通信機器は、小型の精追尾ミラーやファイバカップリング機構を持ち、追尾は波長 $0.98\mu\text{m}$ 、通信は波長 $1.55\mu\text{m}$ である。またNICTでは、次期の宇宙実証としてSmartSatの1号機により小型光通信機器を2007年に宇宙実証する計画であったが<sup>13)</sup>、SmartSatの次期シリーズに延期されている。

OICETSに続く一番早い宇宙実証として、ドイツ航空宇宙局(DLR)の開発しているXバンドの合成開口レーダ(SAR)を搭載したTerraSAR-Xという衛星がある(図1)<sup>14)</sup>。この衛星は2007年にドニエプルロケットにより太陽同期軌道の高度514km、軌道傾斜角 $97.44^\circ$ に打ち上げられる予定で、観測データのダウンロードのために光通信機器を搭載しており、5.5Gbpsで地上局と光通信を行う計画である。LCTSXと呼ばれる搭載光通信機器部は、ドイツのTesat Spacecomにて開発中であり、BPSK(Differential Phase Shift Keying)ホモダインコヒーレント通信を行う予定である(図2)<sup>15)</sup>。光通信機器は、6000kmで8Gbps、

20000km で 1Gbps、72000km で 500Mbps の伝送速度を実現し、10 年間で稼働率 0.9998、MTTF 1.35Mh の動作保証をしており、TerraSAR-X 搭載機器と同様の設計の光ターミナルが米軍の NFIRE 衛星へ供給される予定で、欧州と米国の衛星間で 5.5Gbps の光衛星間通信が実現される予定である<sup>15)</sup>。SAR は 384 個の送受信機によりフェーズドアレー処理され、測定時には Spotlight Mode、Stripmap Mode、ScanSAR Mode の 3 つの測定モードを持っており、そのうちの Spotlight Mode では、10 x 5 km のエリアを地上 1 m の解像度で測定可能で、画像は商用販売される予定である。また、TerraSAR-X の光地上局には、アンテナ開口直径 40cm の可搬型の望遠鏡システムを開発中で、GPS とスターキャリブレーションにより自動で地上局位置等を校正するようになっている (図 3)<sup>16)</sup>。送信ビームは 350 $\mu$  ラジアン程度でビーコン無しで捕捉追尾を行い、捕捉時間には約 100 秒程度が予想されている。既に、この可搬型光地上局は、2005 年 9 月にスウェーデンにおいて気球と地上間で 60km を越える距離において 1.5 $\mu$  m で 1.2Gbps の通信実験に成功している実績を持つ<sup>17)</sup>。

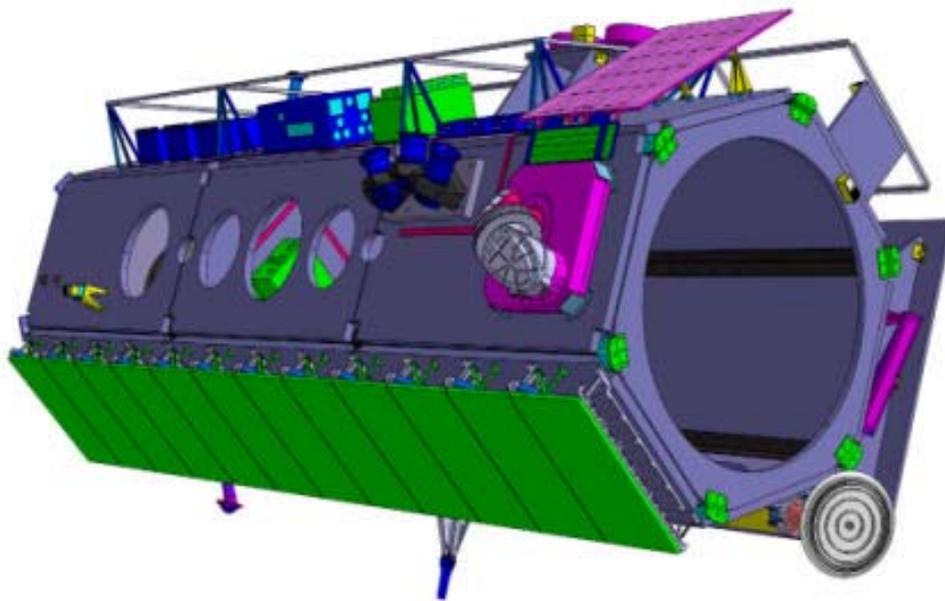


図 1. DLR の開発している TerraSAR-X 衛星と搭載光ターミナル LCTSX<sup>14)</sup>

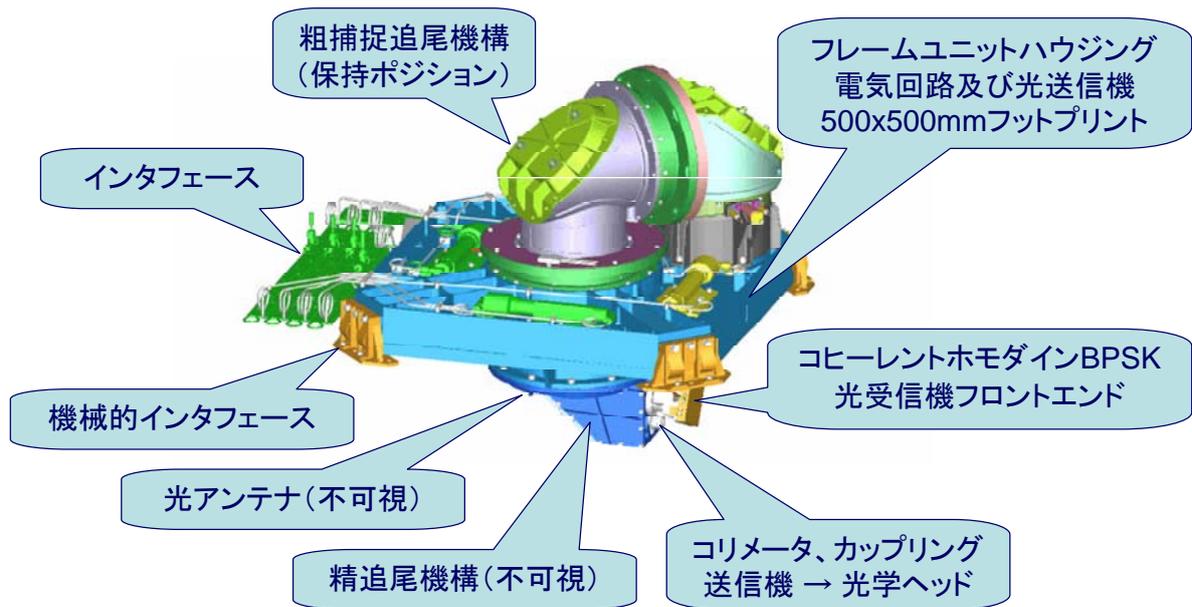


図 2. ドイツの Tesat Spacecom による搭載光通信機器 LCTSX<sup>15)</sup>



図 3. アンテナ開口直径 40cm の可搬型光地上局<sup>16)</sup>

また、TerraSAR-X とほぼ同じ設計ものをさらにもう 1 機上げて、2 台の衛星でランデブー航行による高解像度インタフェロメトリ観測を行い、高度方向に 3m の解像度で観測を行う Tandem-X という計画も進行

中である<sup>18)</sup>。これは、各衛星のアポジとペリジを北極上と南極上で互いに少しずらすことで、常に一定の距離を保ち、お互いの位置がスクリューのようにらせん状に回転するよう飛行させることが可能であり、衝突することが無く軌道として面白いものである。Tandem-X 開発は 2005 年秋には Phase—B になるようである。

DLR では、口径 6.5 cm の潜望鏡型のアンテナを持つ成層圏用の光ターミナルについても開発中である(図 4)<sup>16)</sup>。低コストで開発しているとのことで、アンテナ部の可動機構などはワイヤを用いたシンプルな物となっている。これは、COST という EU において政府間で科学技術研究を推進する枠組みの下、成層圏プラットフォームにおける開発がアクションとされ、DLR は広帯域通信に関する研究開発を行う CAPANINA というコンソーシアムのメンバーとして、地上間での光通信実験を実施しているものである。9 月にスウェーデンにおいて、60km を越える距離で気球での 1.2Gbps の光通信実験に成功している。実験後、成層圏用の光ターミナルはパラシュートで落下され回収されている。ビーコンにはエアセンサの感度を得るため 980nm、通信にはファイバ技術を利用し 1.5  $\mu$ m を用いている。

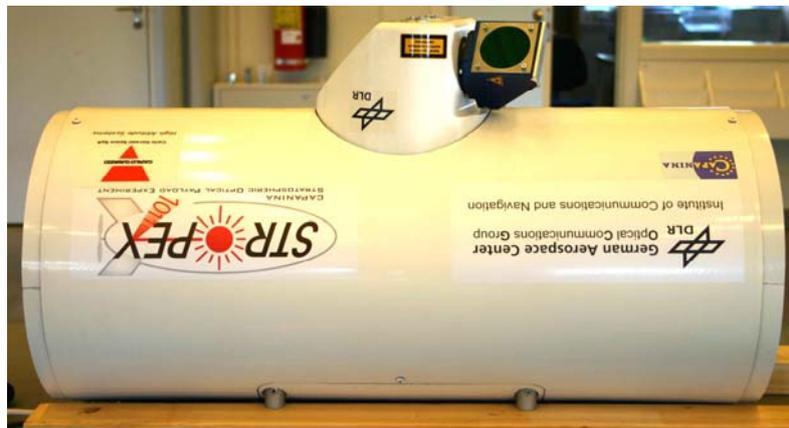




図 4. DLR の成層圏通信自由空間実験レーザーターミナル (FELT)。  
FELT 外観 (上図) と、バルーン実験に供され搭載された FELT (下図) <sup>16)</sup>

スイスの Contraves Space では、以前から光宇宙通信に幾つかの光通信ターミナルのラインナップを用意している。以下がそのシリーズである (図 5) <sup>19)</sup>。

- ・ OPTEL-02 : 2,000km の距離で 1.5Gbit/s の伝送速度を実現する近距離用ターミナル
- ・ OPTEL-25 : 25,000km の距離で 1.5Gbit/s の伝送速度を実現する中距離用ターミナル
- ・ OPTEL-25 GEO : OPTEL-25 の GEO 用ターミナル
- ・ OPTEL-80 : 80,000km までの距離で 2.5Gbit/s の伝送速度を実現する長距離用ターミナル
- ・ OPTEL-DS : 火星や L2 の距離をカバーする深宇宙用ターミナル
- ・ OPTEL-AP : 成層圏プラットフォーム用のクロスリンクターミナル

最近、成層圏プラットフォーム用の OPTEL-AP と深宇宙用の OPTEL-DS が新たに加わった。特に成層圏用の OPTEL-AP は、光アンテナに超軽量でコストパフォーマンスがよい電子成形されたニッケルの主鏡で反射面に金を用いており、波面精度は少々劣るが近距離の成層圏用のアプリケーションとしては回線マージンもあるため十分な性能を持っている。例えば、ビーム広がり角は  $190\mu\text{rad}$  程度であり、回折限界で使用する必要が無い。この主鏡は直径 25cm でイタリアの Media Lario という会社が製造している <sup>20,21)</sup>。成層圏用のターミナルは、飛行船などに載せて使用することで、例えば、劇場やスポーツイベントなど、一時的に大容量通信が必要とされるような用途にも有意義であるというニッチな用途に使用されることもにらんで開発が進められている。もちろん、地方の一時的な災害時の通信にも有効である。また、深宇宙用の OPTEL-DS は、最近ラグランジュポイントへの観測プロジェクトが ESA でいくつか進んでいるが、そのデータ通信をにらんでいる <sup>22)</sup>。例えば、X 線天文観測の XEUS、地球外惑星探査の DARWIN、重力波検出の LISA、ハッブル望遠鏡の 3 倍の口径を持つ JWST、遠赤外やサブミリ波をカバーする 3.5m 宇宙望遠鏡の

Herschel/Planck、銀河の 3 次元地図を作る GAIA、恒星の明るさを測定して惑星や星の内部構造を明らかにする Eddington などがある。伝送距離 0.01AU で 10Mbit/s 以上、0.5AU で 2.8Mbit/s 以上、3.0AU で 0.3Mbit/s の伝送速度を実現する。搭載側ターミナルは 26cm の光アンテナで重さ 20kg、消費電力 50W である。光地上局に光のフォトンバケットとして 10m 級の光アンテナを想定しており、こちらにはコストがかかりそうである。

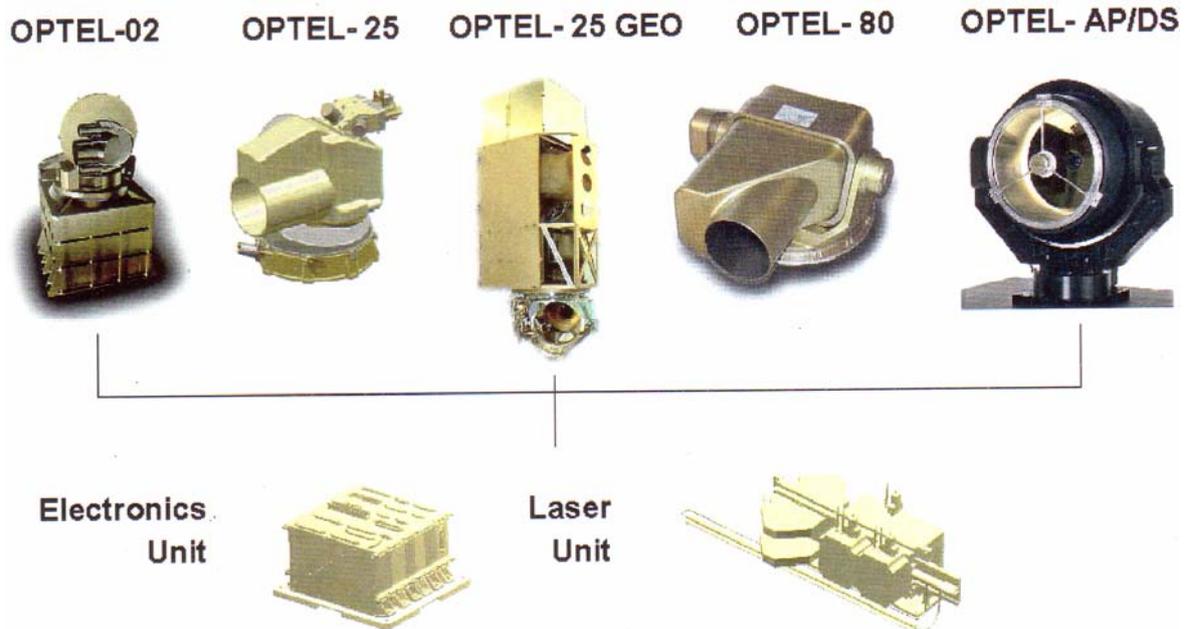


図 5. Contraves Space による搭載光通信機器 OPTEL シリーズ 19,20)

また、Contraves Space では、2007 年打ち上げの SMOS という L バンド (1.4GHz) 合成開口レーダ衛星を手がけているが、この衛星内部には光ファイバを用いた電波の干渉計が組み込まれている<sup>23)</sup>。100 個以上もあるセンサからの信号を光ファイバでつなぎ、デジタル処理で電磁放射の画像を得る信号処理回路がマイクロ波/光ハーネス (MOHA) として形成されている。これらは、言わば Radio over fiber (ROF) 技術の宇宙利用版であり、今後はマルチプラットフォーム間での電波干渉計測などにおいて、さらに地上の電波・ミリ波フォトニクス技術が応用されていくと考えられる。

ESA では、フォーメーションフライトの衛星間通信に光リンクを使い、複数の小型クラスタ衛星で大型の通信衛星の機能を構成する SkyLAN という計画がある<sup>24)</sup>。お互いの衛星の機能は再構成が可能であり、現在 4 台の衛星を同一軌道に一直線に並び、地球から見て 2 度程度の間隔で配置する方式を採用するようである。採用する光ターミナルは OPTEL-02 で、3.5cm の開口径で 1064nm を用いて 3000km 程度の距離を 512Mbps で通信する。

また EADS Astrium では、データ中継衛星の ARTEMIS 後継機として Alphasat に光通信機器を搭載することを考えている<sup>25)</sup>。Alphasat はフォーワード 155Mbps×1、リターン 311Mbps×3 の回線を持つ。SILEX の第 2 世代の通信機器として、通信用 0.4W、ビーコン用 30W で 0.8μm 帯で約 1Gbps/terminal を実現す

る光ターミナルを検討しており、データ中継のために2台の光通信機器を搭載する予定である。2005年11月には、TerraSAR-Xに搭載されたTesatのターミナルとContravesのOPTELシリーズのターミナルをAlphasatへ搭載するプロポーザルも出されている。Alphasatは2009年に打ち上げ予定である。以上のように、EADS Astrium（フランス）は商用回線としてSILEXの第2世代のターミナルを考えており、また、Tesat（ドイツのEADS Astriumに属する）とContraves（スイス）ではデータ中継と深宇宙への利用を考えたPhase-A検討も行われる予定であり、ESAではこれらの相乗作用を期待している。

また、最近の新しい話題として宇宙量子通信がある。ウイーン大学他、ウイーン工科大、ドイツ、イタリア、フランスによる共同提案として、国際宇宙ステーション（ISS）を用いた地上間での量子暗号通信実験が計画されている<sup>26)</sup>。ウイーン大学Zeilinger教授のグループは、1997年に世界で始めて量子テレポテーションを実験で実証したのを皮切りに、1999年には量子もつれによる量子暗号、2003年には量子純粋化において世界で最初の実証を行ってきており、量子情報通信分野で著名な業績を上げている。既に、この宇宙量子暗号通信実験のための搭載光ターミナルの検討は行われており、前述のOPTEL-25というモデルがベースでISSのコロンバスモジュールに2台搭載される（図6）<sup>27)</sup>。量子もつれを使った量子テレポテーション実験は、ISSからの見通し内においてヨーロッパの2つの光地上局を同時に使う必要があるため、この量子通信実験のための光地上局には、スペイン2局（本土1局、カナリア諸島テネリフェ島1局）、イタリア1局が現在検討されている。ESAのISS搭載ミッション選定では、基礎物理分野で評判がよく、2011年に打ち上げを計画している。

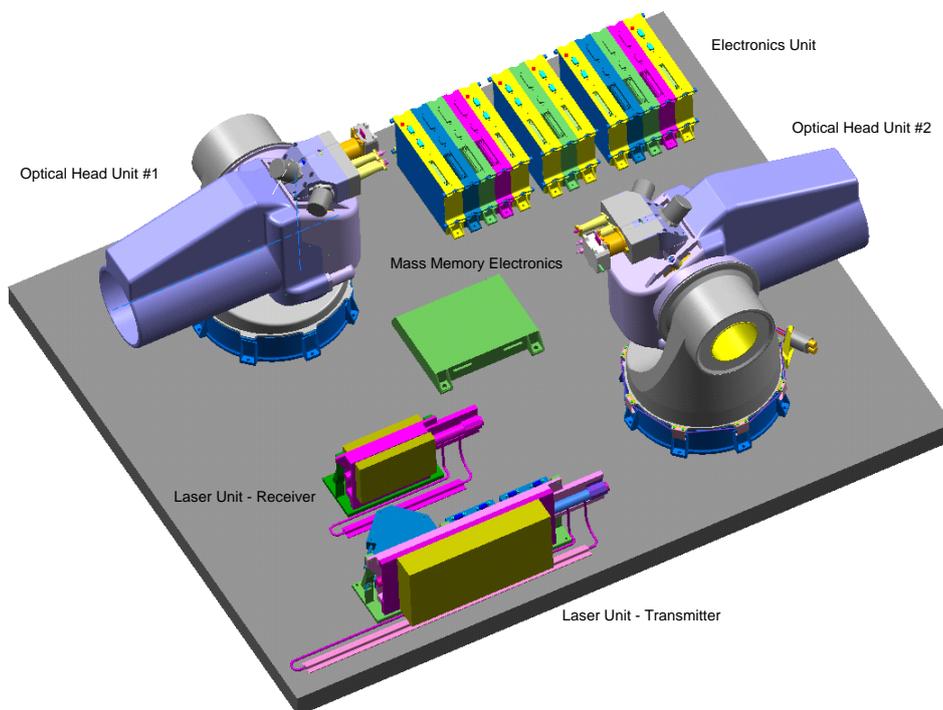


図6. 宇宙量子暗号通信実験のための搭載光ターミナル<sup>27)</sup>

## まとめ

将来、光通信技術は、宇宙において情報通信革命を起こし、宇宙通信は大跳躍を遂げるのではないかと期

待されている<sup>28)</sup>。高速光衛星間通信ネットワークはもとより、宇宙におけるシェアドプロセッシングやシェアサーバの用途、宇宙版 ROF 技術による高解像度マルチプラットフォーム観測、再構成・アップグレード可能な RF アクセスネットワーク、相互運用・相互接続可能なトランスペアレントな宇宙通信、降雨減衰などを補償できるマルチプラットフォーム間ダイバーシチ宇宙通信、災害時などで孤立した地上ネットワーク間の再構成再接続のネットワークなど、衛星における情報の新たな処理形態の創造と関連アプリケーション産業の創出が期待される。図 7 に、送信ビーム広がり角と伝送速度による利用用途の分類を示す<sup>29)</sup>。光通信技術は、電波では実現できない光技術の特色を生かした用途に使われていくべきであり、今後さらに地上の電波・ミリ波フォトニクス技術が宇宙へ応用されていくと考えられる。

一方、宇宙政策的な面では、ドイツの様に独自の宇宙開発プログラムを持ち、ESA が光通信の今後の計画を持ち合わせていなくても、TerraSAR-X のようにドイツ独自で光通信の計画を遂行することができている。この辺は、きちんと宇宙開発プログラムを策定し、日本独自で計画を遂行していくことが望まれるという点で、今後日本でも見習うべき点である。

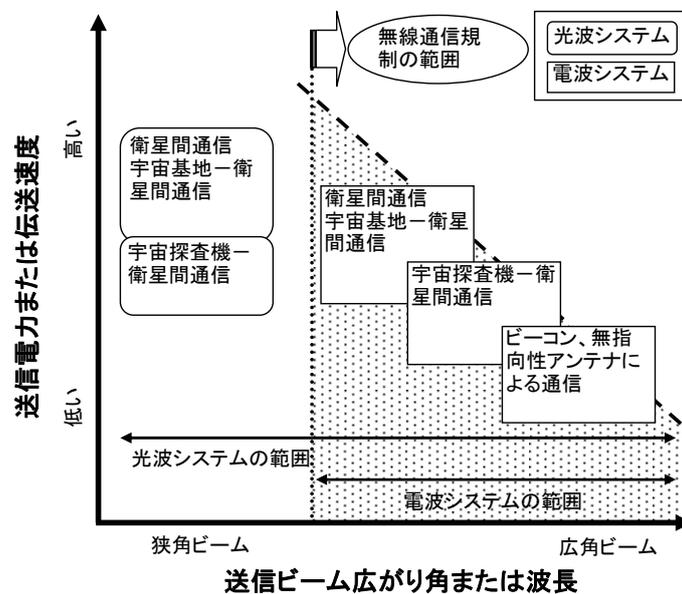


図 7. 送信ビーム広がり角と伝送速度による利用用途の分類。ハッチング部分は、送信利得減衰と法規制による範囲で、電波システムが利用される領域を示している<sup>29)</sup>。

### 謝辞

本稿作成に当たり、DLR の Dr. Giggenbach 氏、Dr. Horwath 氏、Tesat Spacecomm の Dr. Lange 氏、Contraves Space の Dr. Baister 氏、Dr. Dreischer 氏に写真及び図の提供及び掲載許可を頂いた。ここに感謝する次第である。

### 参考文献

(1) K. E. Wilson, and J. R. Lesh, "An overview of the Galileo optical experiment (GOPEX)," The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-114, Jet Propulsion Laboratory, 192-204 (1993). [http://tmo.jpl.nasa.gov/tmo/progress\\_report/42-114/114Q.pdf](http://tmo.jpl.nasa.gov/tmo/progress_report/42-114/114Q.pdf)

- (2) K. E. Wilson, J. R. Lesh, K. Araki, and Y. Arimoto, "Overview of the Ground-to-Orbit Lasercom Demonstration," *Space Communications* 15, 89-95 (1998).
- (3) D. M. Boroson, "Overview of NASA's Mars laser communications demonstration system," *Proc. SPIE*, vol.5338, pp.16-28, Jan. 2004.
- (4) I. I. Kim, B. Riley, N. M. Wong, M. Mitchell, W. Brown, H. Hakakha, P. Adhikari, and E. J. Korevaar, "Lessons learned for STRV-2 satellite-to-ground lasercom experiment," *Proc. SPIE* 4272, 1-15 (2001).
- (5) [http://www.nro.gov/PressReleases/prs\\_rel49.html](http://www.nro.gov/PressReleases/prs_rel49.html)
- (6) T. T. Nielsen, G. Oppenhaeuser, B. Laurent, and G. Planche, "In-orbit test results of the optical intersatellite link, SILEX. A milestone in satellite communication," 53rd International Astronautical Congress, IAC-02-M.2.01, Huston, Oct. 2002.
- (7) M. Reyes, S. Chueca, A. Alonso, T. Viera, Z. Sodnik, "Analysis of the preliminary optical links between ARTEMIS and the Optical Ground Station," *Proc. SPIE* 4821, pp. 33-43 (2003).
- (8) M. Toyoshima, S. Yamakawa, T. Yamawaki, K. Arai, M. Reyes, A. Alonso, Z. Sodnik, and B. Demellenne, "Long-term statistics of laser beam propagation in an optical ground-to-geostationary satellite communications link," *IEEE trans. Antennas and Propagat.*, 53(2), 842-850 (2005).
- (9) Y. Arimoto, M. Toyoshima, M. Toyoda, T. Takahashi, M. Shikatani, and K. Araki, "Preliminary result on laser communication experiment using Engineering Test Satellite-VI (ETS-VI)," *Proc. SPIE* 2381, pp. 151-158 (1995).
- (10) [http://www.jaxa.jp/press/2005/12/20051209\\_oicets\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2005/12/20051209_oicets_j.html)
- (11) [http://www.jaxa.jp/press/2005/08/20050824\\_oicets\\_index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2005/08/20050824_oicets_index_j.html)
- (12) 勝尾双葉、木内等、森川栄久、有本好徳、「定点滞空試験機による成層圏プラットフォーム通信・放送システム実証実験～光通信実験～」、電子情報通信学会信学技報、Vol. 104、No. 640、SANE2004-81、pp.25-29、2005年1月。
- (13) Y. Koyama, E. Morikawa, K. Shiratama, R. Suzuki, and Y. Yasuda, "Optical terminal for NeLS in-orbit demonstration," *Proc. SPIE*, vol.5338, pp.29-36, Jan. 2004.
- (14) [http://www.eid.dlr.de/tsx/start\\_en.htm](http://www.eid.dlr.de/tsx/start_en.htm)
- (15) R. Lange and B. Smutny, "In-Orbit Verification of Laser Communication Terminals," 23rd ICSSC of AIAA, No. I000280, Rome, September (2005).
- (16) D. Giggenbach, J. Horwath, "Optical Free-Space Communications Downlinks from Stratospheric Platforms – Overview on STROPEX, the Optical Communications Experiment of CAPANINA," IST Mobile Summit 2005, Dresden, 19-22 June (2005).
- (17) <http://www.capanina.org/>
- (18) <http://www.dlr.de/hr/tdmx/>
- (19) [http://www.contraves.com/produkte\\_frame\\_optical\\_e.htm](http://www.contraves.com/produkte_frame_optical_e.htm)
- (20) [http://www.esa.int/home-ind/ESA-Article-fullArticle\\_par-17\\_1069167507211.html](http://www.esa.int/home-ind/ESA-Article-fullArticle_par-17_1069167507211.html)
- (21) <http://www.media-lario.it/>
- (22) T. Dreischer, K. Kudielka, T. Weigel, and G. Baister, "Integrated RF-Optical TT&C Subsystems for Missions to Mars and to Libration Points," 23rd ICSSC of AIAA, No. I000153, Rome, September

(2005).

- (23) [http://www.esa.int/esaLP/ESAMBA2VMOC\\_LPsmos\\_0.html](http://www.esa.int/esaLP/ESAMBA2VMOC_LPsmos_0.html)
- (24) J-D. Gayrard, G. Baister, M. Molina Cobos, and A. Cotellessa, "Optical Inter-Satellite Links for SkyLAN Clusters of Broadband Communications satellites," 23rd ICSSC of AIAA, No. I000040, Rome, September (2005).
- (25) B. Chene, C. Michel, and B. Laurent, "A Proposed Data Relay Infrastructure in Europe After Artemis in Orbit Validation," 23rd ICSSC of AIAA, No. I000124, Rome, September (2005).
- (26) M. Aspelmeyer, T. Jennewein, M. Pfennigbauer, W. R. Leeb, and A. Zeilinger, "Long-distance quantum communication with entangled photons using satellites," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 9, No. 6, pp. 1541–1551, 2003.
- (27) M. Pfennigbauer, M. Aspelmeyer, W. R. Leeb, G. Baister, T. Dreischer, T. Jennewein, G. Neckamm, J. M. Perdignes, H. Weinfurter, and A. Zeilinger, "Satellite-based quantum communication terminal employing state-of-the-art technology," Journal of Optical Networking 4, pp. 549-560 (2005).
- (28) V. W. S. Chan, "Optical satellite networks," Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, pp. 2811–2827, 2003.
- (29) 豊嶋守生、「衛星間レーザー通信の捕捉・追尾・指向技術—電波と光波通信システムの比較と利用動向—」、電子情報通信学会誌、Vol.88、No.4、pp.276-283、2005年4月。