

## 5-4 OCTL と OICETS 間光リンク実験 (OTOOLE)

### 5-4 The OCTL-to-OICETS Optical Link Experiment (OTOOLE)

Keith. E. Wilson

Keith. E. Wilson

#### 要旨

OTOOLE デモンストレーションは、2009年5月と6月に実施され、安定した低高度軌道 (LEO) を周回する OICETS 衛星とジェット推進研究所 (JPL) 光通信望遠鏡研究所 (OCTL) との間で光リンクを実証した。準備された軌道要素を用いた望遠鏡の指向追尾能力を事前に検証するため、反射鏡を搭載した LEO 衛星へ 20  $\mu$ rad のアップリンクビームによる一連の実験が先行して行われた。OTOOLE 実験は、様々な大気条件の下で成功裏に4回実施され、リンクモデルを実証し、宇宙-地上間光通信リンクを確立するための新たな捕捉追尾方式を検証した。

The OTOOLE demonstration was conducted in May and June 2009 and demonstrated a robust optical link between the low Earth orbiting (LEO) OICETS satellite and the JPL Optical Communications Telescope Laboratory. A series of precursor experiments with 20- $\mu$ rad uplink beams were conducted with LEO retro-reflecting satellites to validate the telescope's ability to point to and track these targets from the proposed ephemeris file format. The OTOOLE experiments were successfully conducted on all four attempts under a variety of atmospheric conditions, and validated link models and proved out new strategies to acquire and track space-to-ground optical communications links.

#### [キーワード]

空間光通信, 大気伝搬, レーザビーム伝送, シンチレーションインデックス

Free-space optical communication, Atmospheric propagation, Laser beam transmission, Scintillation index

### 1 はじめに

2009年の光通信望遠鏡研究所 (OCTL: Optical Communications Telescope Laboratory) と OICETS 間光リンク実験 (OTOOLE: OCTL-to-OICETS Optical Link Experiment) は、20年以上の歴史を持つアメリカ航空宇宙局 (NASA) ジェット推進研究所 (JPL) において実施されたもので、一連のレーザー通信において最新のものである。90年代にGOPEX (Galileo Optical Experiment)、CEMERLL (Compensated Earth-Moon-Earth Retro-reflecting Laser Link) や GOLD (Ground-to-Orbiter Laser Demonstra-

tion) で称される JPL 実験は、光宇宙-地上間リンクへの主要な課題を緩和する手法を発展させた [1]-[3]。最近10年にわたる2000年当初からの GEOLITE、SPOT-4、ARTEMIS、OICETS、NFIRE のような、衛星間、衛星と航空機間、衛星と地上間における光リンクの開発の加速に貢献した、これらの主要で影響力の強い実証を以下に述べる [4]-[7]。

1992年、JPL はカリフォルニアのライトウッドにある TMO (Table Mountain Observatory) の地上局とニューメキシコのアルバカーキにある SOR (Starfire Optical Range) から Galileo 宇宙機へ向けた7日周期で光リンクのデモンスト

レーションを行った。GOPEX はアップリンクビーコンだけの実験であったが、マイクロリアンレベルの狭ビーム (60  $\mu$ rad、110  $\mu$ rad) を、深宇宙探査機へ初のレーザー伝送を実証した。記録されたデータからは、アップリンク信号の電力に深いフェージングがみられ、シンチレーションを緩和する手法の必要性が明らかとなった。さらに、アップリンクができなくなる悪天候による影響により、高いリンク利用率を確保するために、最初の TMO 枠とその後の SOR 枠における最後の 3 日間の実験において、サイトダイバーシチの必要性が明らかとなった。

1994 年 JPL CEMERLL 実験が実施され、SOR はアップリンクのシンチレーションに対して、事前に大気ゆらぎを補償する補償光学 (アダプティブオプティックス) に挑戦した。SOR 上空での大気中高度 15 km に集光した 200 W の銅気体レーザーによるレイリーガイド星により、1064 nm における Q スイッチアップリンクビームをアポロ 15 号が設置した月面反射器へ伝送し、高次の補償を実現した。予見された解析では、チップチルト補償がない反射器のリターンは大きかったが受信は時折であった。チップチルト補償は、アイソプラナティック角度以下の角度で参照ビーコン光が必要であり、現在の技術ではビーコンとして振る舞う明るい自然のガイド星を必要とする。しかしながら、Hadley Rille における反射鏡の設置場所と月面の端では、3-mrad という離角は、1064 nm のビームのアイソプラナティック角度 12  $\mu$ rad よりも明らかに大きいものであった。CEMERLL の結果では、アイソプラナティック角度以内にダウンリンクビーコンが利用できない場合に、それは例えば火星における宇宙機にレーザー通信リンクを用いるような場合には、シンチレーション低減へ様々なアプローチを必要とすることが明らかとなった。

一般的なアップリンクシンチレーションの問題は、JPL の最初のマルチビーム低減技術のデモンストレーション時である 1996 年まで解決されていなかった。1994 年 8 月に静止トランスファー軌道に打ち上げられた技術試験衛星 VI 型 (ETS-VI) では、マルチビームアプローチを試験するユニークな機会が得られた。ETS-VI 衛星は、TMO からも可視可能な 3 日周期の準回帰軌道であっ

た。GOLD 実験と名付けられた 1.024 Mbps のアップリンクとダウンリンクのマンチェスタ符号をデモンストレーションした。ダウンリンクデータストリームでは、1.024 Mbps の PN 符号のデータや、ビットが 8 回繰り返す 128 kbps でのレーザーシステムの搭載機器のステータスのテレメトリデータが生成された。GOLD はまた、アップリンクデータストリームを検出して、地上局へのリアルタイムにダウンリンク再送することを実証した。

静止衛星の距離での双方向ブロードバンド光リンクの実証に加え、GOLD はアップリンクへのシンチレーション緩和の手法を模索し提供した。アップリンクビームのシンチレーションの要因は、大気中を伝搬するビーム内での干渉によるものである。GOLD のシンチレーション緩和の手法は、(i) Fried コヒーレンス長以上にアップリンクの開口を離してビームを空間的にインコヒーレントにすることであり、(ii) それぞれのレーザーに時間遅延を加えてスペクトル的にレーザーのコヒーレンス長以上になるようにビームを配置することである [8][9]。このマルチビームのアプローチは、1996 年の GOLD における第 2 フェーズで初めて行われたものである [10]。ビームの数を 1 から 4 本に増加するにつれて、宇宙機においてサージとフェージングが減少することが示された。マルチビームのアプローチは、光行差補正角度がアイソプラナティック角度を超える場合に、宇宙機へ光ビーコンをアップリンクしてシンチレーションを低減する手法として、現在受け入れられている技術である。

## 2 OTOOLE の実験準備

OTOOLE は、北緯 34.382°、西経 - 117.683°、高度 2.26 km に位置する OCTL から実施された [11]。OCTL 施設は、TMF (Table Mountain Facility) にあるいくつかの望遠鏡施設の 1 つで、南カリフォルニア San Gabriel 山に位置する (図 1)。OCTL 望遠鏡は、1 m のリッチクレチアン方式で F ナンバー 75.8 のクーデ焦点系の主鏡望遠鏡と、20 cm の F ナンバー 15 の捕捉追尾用望遠鏡を有する。高度 250 km の LEO 衛星を追尾できる仕様であり、最速の追尾速度で天頂角 6

度まで追尾可能であり、仰角で 10 deg/sec、方位角で 20 deg/sec の性能である。OTOOLE では、OCTL 施設の周りの木々は、図 2 に示すように仰角 20° である。この制限は、実際に意味あるサポートをすることを考慮した際に、衛星の可視パスを制限することになる。

## 2.1 OCTL におけるレーザー安全システム (LASSO)

OCTL からのレーザービームの伝搬は、米国連邦航空局 (FAA) と US Space Command's Laser Clearing House (LCH) の調整を必要とする。LASSO は JPL で開発された 3 段階のレーザー安全システムで、レーザーを途中で妨害するリスクを持つ物体を検出し、大気中や地球近傍でレーザービームを安全に伝搬させるために遮断することができる [12]。第 1、第 2 段階のシステムでは、安全なレーザービーム伝送を確保する。第 1 段階では、3.4 km までレーザービームを妨害するリスクのある物体を、長波 (8 μm-14 μm) の赤外 (LWIR) カメラで検出する。第 2 段階のシステムでは、54 km までの航空機を X バンドのレーダで検出する (図 3)。さらに、FAA は OCTL に地上での監視を付けるように要求した。第 3 段階の安全対策は、OTOOLE では不要であると考えられ、LCH により要求を撤回された。

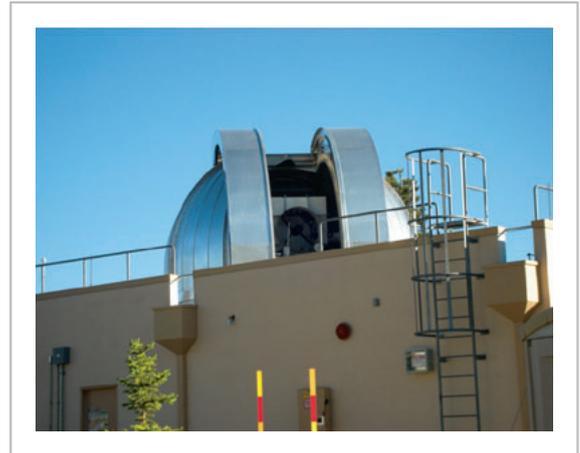


図 1 南カリフォルニア San Gabriel 山に位置する OCTL 望遠鏡施設

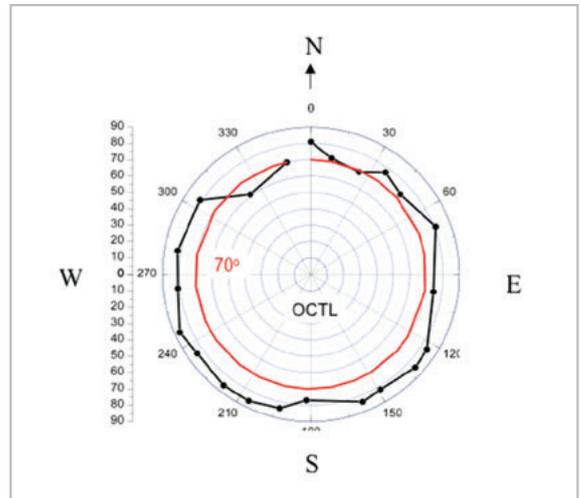


図 2 OCTL 施設における木々によるアップリンク仰角 20 度の制限

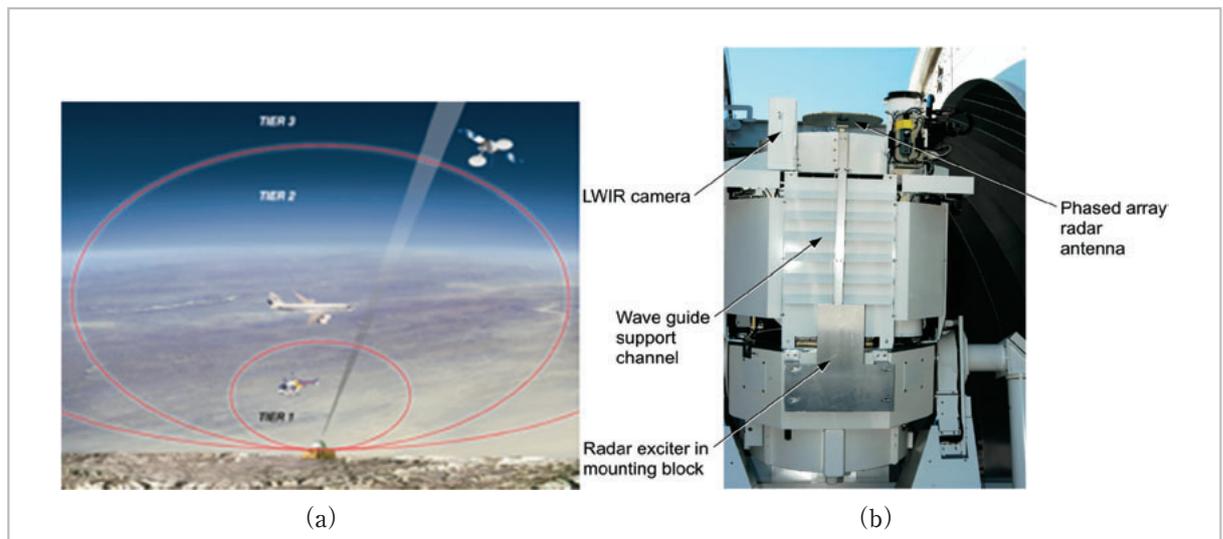


図 3 (a) 大気中や地球近傍でレーザービームを安全に伝搬させるための 3 段階レーザービーム伝搬安全システム (b) OCTL 望遠鏡に実装された LWIR カメラと X バンドレーダ

## 2.2 先行実験

一連の先行する実験は、600 km の OICETS への OCTL 望遠鏡の指向精度を実証するために行われた (図 4)。軌道の予想フォーマットファイルを統合する国際レーザ測距サービス (ILRS) は、LEO (Stella, Ajisai, and Starlette) や中高度軌道の Lageos の反射鏡を持つ衛星への望遠鏡の指向追尾ファイルを生成した [13]。アップリンクビームの広がり角はミリラジアン程度のオーダーであったが、しかしながら、20- $\mu$ rad の狭レーザビームの LEO 衛星への伝送は、OICETS を指向

追尾する能力に自信を与えるものとなった。

## 2.3 アップリンクビーコンと通信

アップリンクビーコンと通信ビームでは、1996 年の GOLD 実験で行ったマルチビームシンチレーション低減手法を採用した。4 本のマルチモードファイバにカップリングされた 801 nm の 1 W ビーコン半導体レーザの概要と 3 つのシングルモード 819 nm の 2 Mbps アップリンクのための通信レーザを図 5 に示す。819 nm のハイパワーレーザは限られていたのと、波長を安定させ

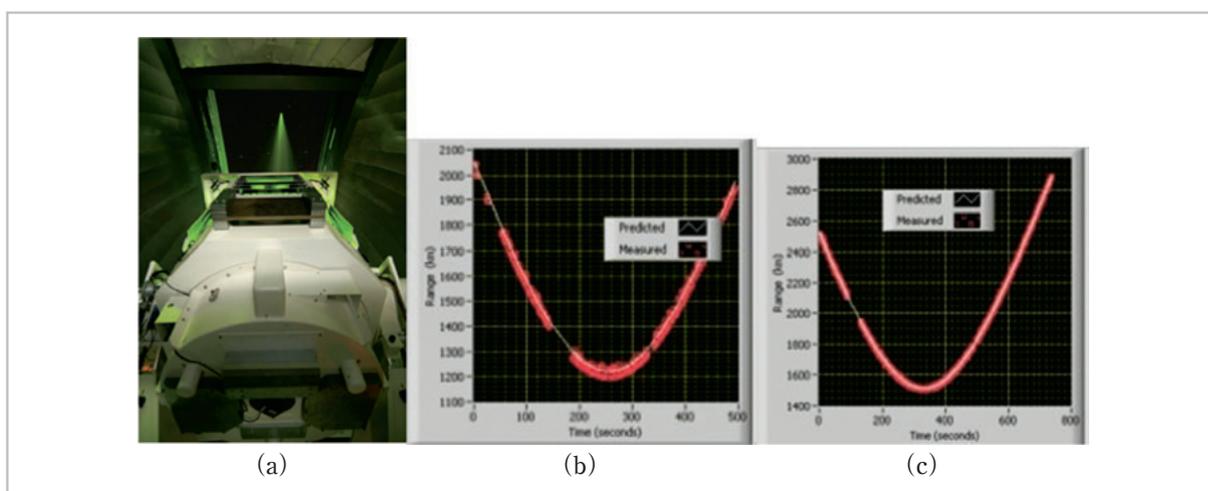


図 4 (a) Q スイッチ 532 nm レーザの反射鏡衛星へのレーザビーム伝送、(b) 2009 年 3 月 29 日の Starlette 衛星からの反射レーザ信号、(c) 2009 年 3 月 30 日の Ajisai からの反射レーザ信号。図中の信号に中断があるが、これは US Space Command からの要求された予想されたレーザ安全に対する回避安全システムのため

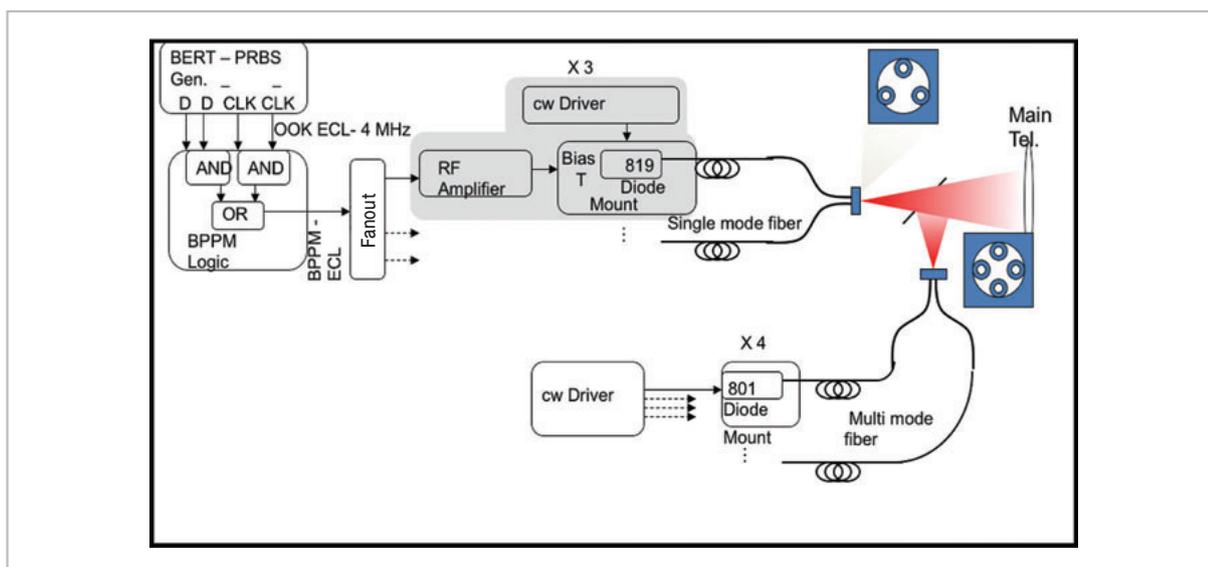


図 5 アップリンク通信とビーコンレーザの概要

るため 55.5°C に温度制御された 2 つの 25 mW のファイバブラッググレーティングレーザと 1 つの 10 mW のレーザが通信用のアップリンクに用いられた。

図 6 は、クーデ焦点の光学ベンチ上の送信の構成である。ビーコンと通信ビームは、ラマンフィルタでノッチされ、46 cm の焦点距離を持つ軸外パラボリックミラーを通してそれぞれ反射及び透過され 1 m 望遠鏡開口のクーデミラーの第 7 鏡へ送信される。アップリンクの射出されるビーコンと通信ビームは、それぞれ 2 mrad と

1 mrad であった。

## 2.4 ダウンリンク

図 7 (a) は、受信プラットフォームの概要を示している。コンポーネントの写真を図 7 (b) に示す。プラットフォームは 20 cm 捕捉望遠鏡にマウントされており、1 m アップリンク望遠鏡にアライメントされている。847 nm のダウンリンク信号の一部、20% は、視覚的にダウンリンクを確認するため最初に捕捉カメラに分岐し受信される。残りの 80% の信号は、801 nm と

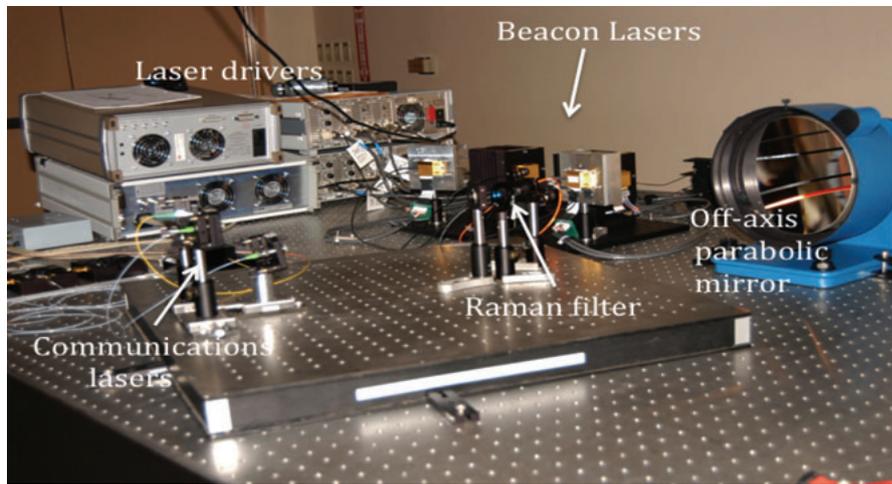


図 6 軸外パラボリックミラーへのラマンフィルタを通したアップリンクビーコンと通信レーザ。軸外パラボリックミラーから反射されたビームは、クーデ焦点の第 7 ミラーに結合される

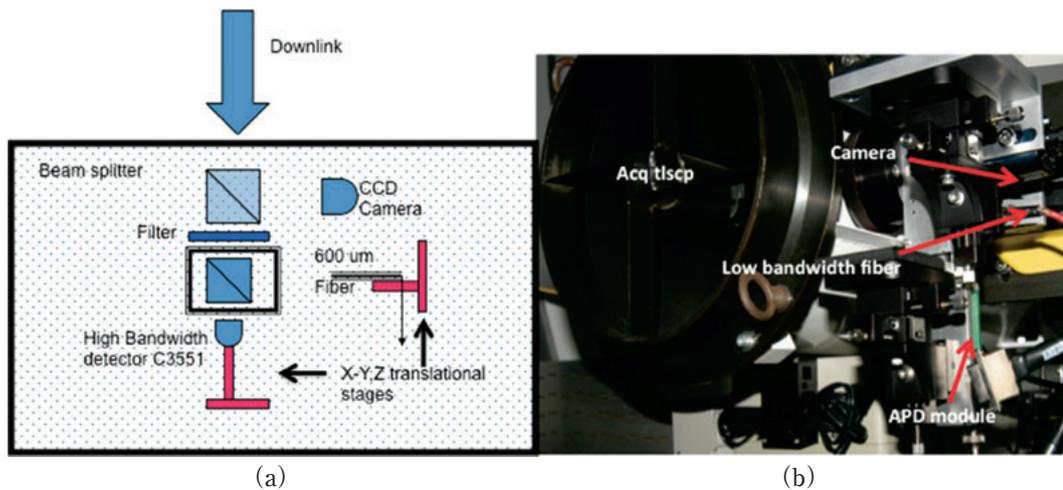


図 7 (a) OTOOLE の概要と (b) CCD カメラ、低周波のダウンリンクの電力変動を測定するための光ファイバと BER 測定のために 100 MHz の APD モジュールが実装された OTOOLE 20 cm 受信望遠鏡

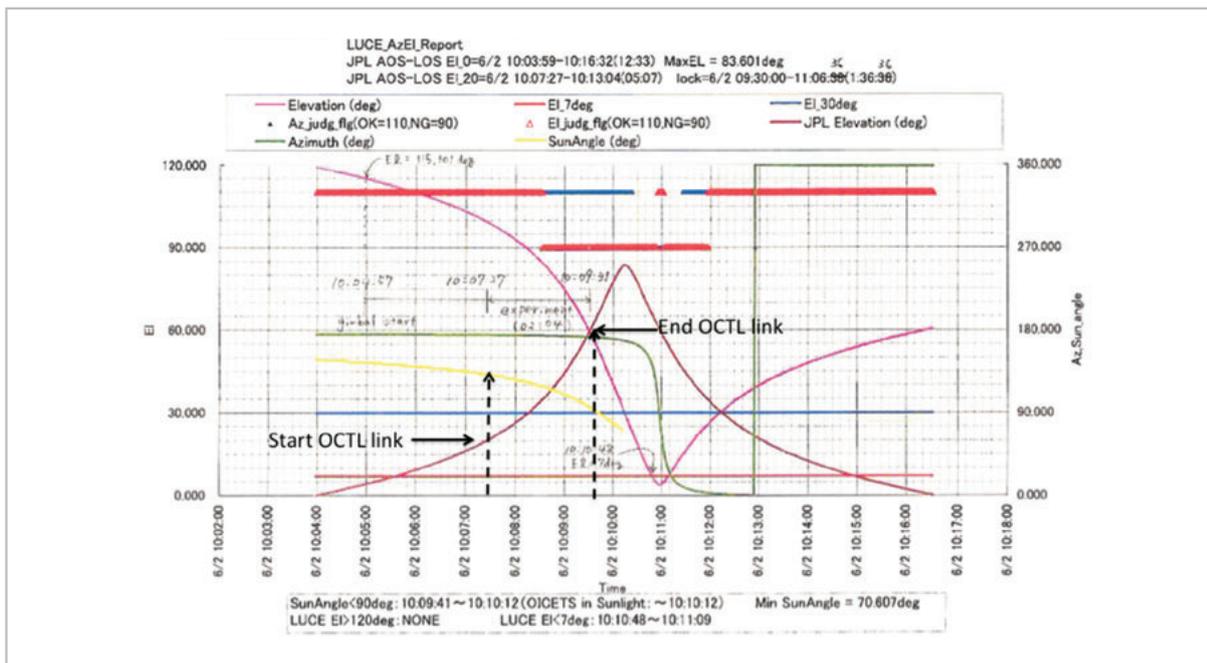


図 8 2009年6月2日のOCTLとOICETSリンク。OCTL地上局上空での衛星の仰角と方位角と太陽の角度を示している

819 nm のアップリンクビームのレイリー後方散乱を抑制するために、中心周波数 850 nm で 10 nm のバンドパスフィルタを通過する。フィルタを通過した信号の一部は、600 μm のマルチモードファイバと 1.5 mm 直径の 100 MHz の Si APD 検出器へ均等に分けられる。もう1つのファイバ端には、ダウンリンクの電力変動を測定するために、25 kHz のシリコンの光検出器が結合されている。アバランシェ光検出器 (APD) により、強度変調されたダウンリンクの 49.3724 Mbps データストリームのビット誤り率 (BER) が測定される。

### 3 OTOOLE の運用と結果

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、衛星へのリンクのため、10 回の機会を 2009 年の 5 月 12 日から 6 月 18 日の間で提案してきた。JPL では、2009 年 5 月 20 日に 7 回のパスを実施できる許可を得た。OCTL での木々によるスカイラインを考慮すると、南中する角度は仰角 50 度より大きい衛星パスで実施することを事前に決定した。南中する角度が 50 度を超えるのは 5 月 21 日から 6 月 18 日まで OICETS で 4 回のパスで

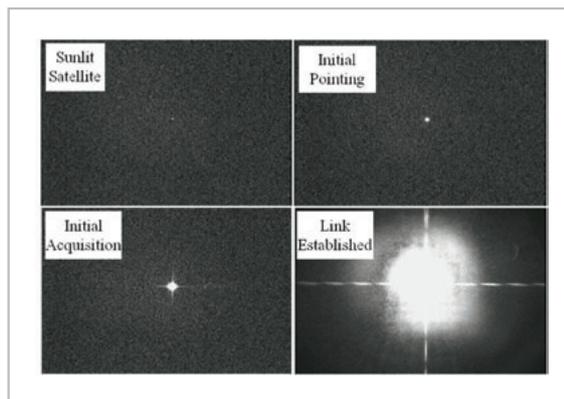


図 9 リンク確立の図式的なシーケンス

あった。光リンクの時間は、衛星仰角と太陽と地球の角度で決まる。2009 年 6 月 2 日の図式的な関係を図 8 に示すが、リンクは OCTL からの仰角 20° から始まり、衛星への太陽の角度が 90° 以下になるように 60° で終わっている。

図 9 にダウンリンクの図式的なシーケンスを示す。最初は衛星に太陽が当たっているところから開始され、初期のダウンリンクの指向捕捉が確立される。表 1 に、本サイトでの 4 回の実験における実験時間と大気の状態について詳細を示す。

衛星の捕捉シーケンスとして、OCTL 望遠鏡

の追尾は仰角0°から開始された。ビーコンと通信レーザは、初期段階では通信レーザは55.5°Cに温度安定された状態で、フルパワーで運用された。衛星でアップリンクビーコンが受信され、ダウンリンクが地上局に返されると、ビーコンビームは低減し、衛星の精追尾に供するように通信ビームの電力を持続した。

図10 (a) と (b) に、6月4日と11日のパスにおける仰角によるアップリンクとダウンリンク

の電力を示す。図10 (b) における周期的な落ち込みは、OICETSのリンクの特性によるものである。6月4日のダウンリンクには見られなかったが、図10 (a) はパス中で2つの区別できる落ち込みが見て取れる。BER測定を行うこれらの2つのパスは、図11 (a) と (b) に示されている。ほとんどのリンクの期間では、落ち込みはなく、BERは $10^{-6}$ であった。ダウンリンク信号を開口で平均すると、開口内でいくつかのスペック

表1 OTOOLE 実験の詳細

Experiment date	5/21/09	6/2/09	6/4/09	6/11/09
Latest CPF files received, day, PST	5/20/2009 04:53	6/1/2009 04:52	6/3/2009 04:52	6/10/09 04:52
Start pass (0 deg elev.)	2:53:00	3:04:00	03:22:30	3:46:50
End Pass (0 deg elev.)	3:05:00	3:16:30	3:43:10	3:59:20
Max elevation, deg	61	81	58	51
LUCE start (el, PST)	19.8 deg, 2:56:25	20 deg, 03:07:27	53 deg, 03:28:25	20 deg, 02:52:04
LUCE end (el, PST)	54.2 deg, 3:01:49	60 deg, 03:09:31	20 deg, 03:30:43	48.7 deg, 02:54:19
Pass duration above OCTL tree line, sec	324	350	330	320
LUCE track duration, sec	324	124	138	135
OCTL link duration, sec	140	100	138	130
Link percentage of track	43.21%	80.65%	100.00%	96.30%
Weather	Clear	Clear	Overcast	Clear
Wind speed, km/hr	10.85 gusts to 29	10 gusts to 18	23 gusts to 40	6 gusts to 10
Data products				
Uplink beacon power, W	1.8	1.8	1.8	1.8
Average uplink comm power, mW	7	10	22	22
Downlink power received, nW	213-1075	170-300	150-300	100-750
Downlink comm BER	10 E-1 to < 10 E-6	10 E-2 to 10 E-5	10 E-4 to < 10 E-6	10 E-1 to 10 E-5

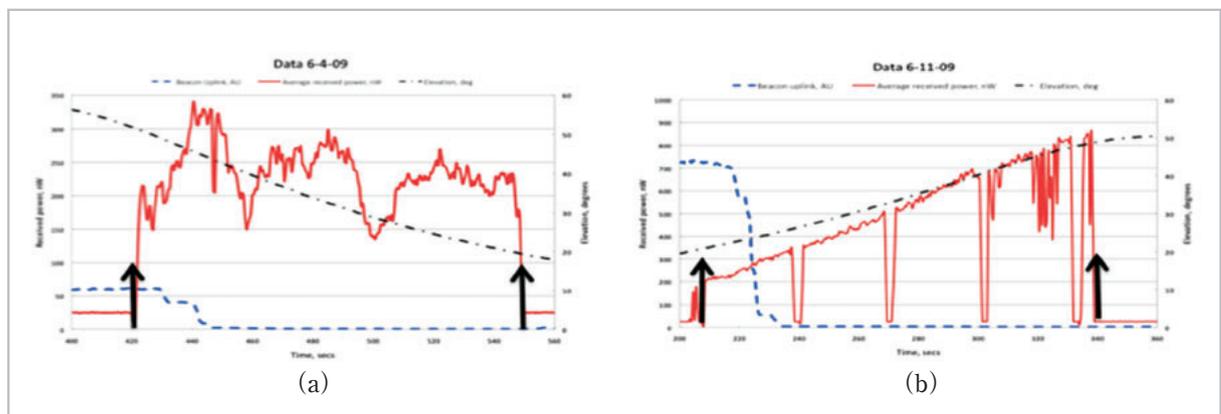


図10 衛星可視パスにおける (a) アップリンクビーコンとOICETS衛星からのダウンリンク受信電力のプロット。衛星の仰角も同時に示した。(b) ダウンリンク電力の落ち込みは、衛星の追尾の問題による

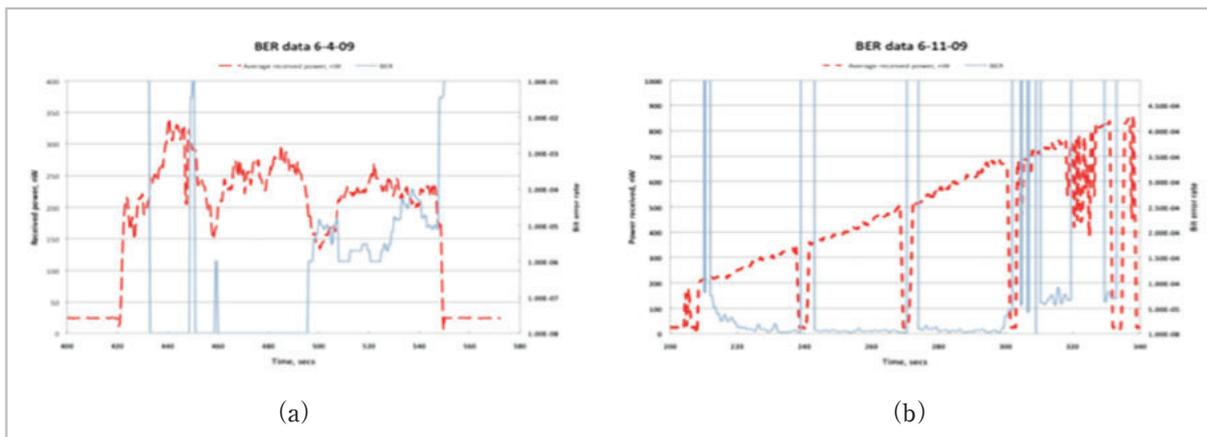


図 11 (a) 6月4日と (b) 6月11日における BER 測定

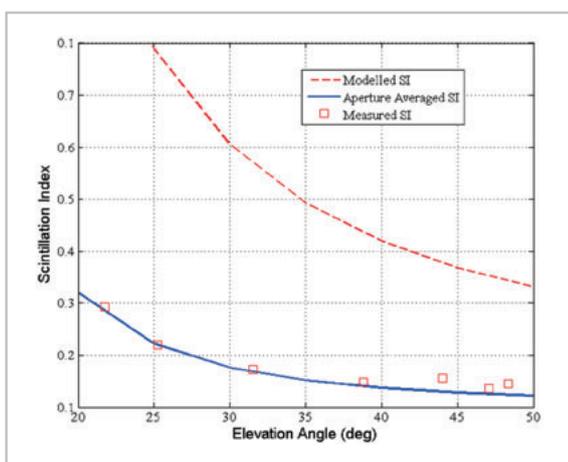


図 12 20 cm ダウンリンク受信機によるシンチレーションの開口平均による低減効果

ルを包含でき、シンチレーションを緩和でき、SNRを高めBERを改善することができる [14]。OTOOLE ダウンリンクは、シンチレーション効果を低減するため 20 cm 開口の受信望遠鏡で平均化した。図 12 に、開口平均効果のモデルとよく一致している衛星仰角に対する測定結果を示す。

表 2 に、粗追尾センサと精追尾センサによる平均信号レベルを示す。また、衛星により計測されたアップリンク BER の結果も示す。

#### 4 まとめ

OCTL の木々によるスカイラインを考慮し、5月21日から6月18日までの間で7回の機会のうち4回のパスが選定され、その4回の試みで

表 2 粗追尾 (801 nm) と精追尾 (819 nm) センサによるアップリンク信号レベル

Date	Coarse sensor		Fine Sensor		BER
	Level, dB	SNR, dB	Level, dB	SNR, dB	
May 21, 2009	- 82.5	12.7	- 58.34	20.7	7.4 E-4
June 2, 2009	- 88.6	6.6	- 72.8	6.3	N/A
June 4, 2009	- 84.7	10.5	- 63.6	15.5	1.4 E-4
June 11, 2009	- 86.2	9	- 68.3	10.8	7.7 E-4

様々な大気条件の下で OTOOLE チームは成功裏に OICETS 衛星への双方向のリンクを実証した。衛星への太陽の角度と、OCTL からの仰角 20° 以上になる条件によりリンク時間が制限された。先行した実験では、予測軌道要素を統合した ILRS を用いて望遠鏡が OICETS 衛星を追尾できる能力があるかどうかを確認し、測定されたダウンリンク信号の強度によりリンクモデルを実証することができた。

#### 5 謝辞

著者は、本実験を推進するに当たり、JPL の Dr. A. Biswas, Dr. J. Kovalik, Dr. M. Wright, Dr. W. Roberts, Mr. V. Garkanian, Mr. C. Esproles 及び Ms. D. Mayes、また、プログラマネージャ Dr. S. Townes and Dr. D. Antsos に OTOOLE メンバとしての貢献に感謝する。著者はまた、NASA マネージャの Mr. John Rush と Dr. Barry Geldzahler への支援と援助に感謝する。NICT の Dr. M. Toyoshima と Dr. Y.

Takayama 及び JAXA の Dr. S. Yamakawa の協力に感謝する。

本研究は、NASA の契約の下、カリフォルニ

ア工科大学、ジェット推進研究所において実施された。著作権は2012年カリフォルニア工科大学。米国政府の援助に感謝する。

## 参考文献

- 1 K. E. Wilson and J. R. Lesh, "GOPEX: A Laser Uplink to the Galileo Spacecraft on its Way to Jupiter," SPIE Free-Space Laser Communication Technologies Proceedings, Vol. 1866, pp. 138–147, Jan. 1993.
- 2 K. E. Wilson, "Overview of the Compensated Earth-Moon-Earth Laser Link (CEMERLL)," SPIE Proceedings, Vol. 2123, pp. 66–74, Jan. 1994.
- 3 K. E. Wilson, J. R. Lesh, K. Araki, and Y. Arimoto, "Overview of the Ground-to-orbit Lasercom Demonstration," Invited Paper SPIE Free-Space Laser Communication Technologies Proceedings, Vol. 2990, Feb. 1997, San Jose, CA.
- 4 [http://www.spaceandtech.com/spacedata/logs/2001/2001-020a\\_geolite\\_sum.shtml](http://www.spaceandtech.com/spacedata/logs/2001/2001-020a_geolite_sum.shtml)
- 5 T. T. Nielsen and G. Oppenhaeuser, "In Orbit test result of an Operational Inter-satellite Link between ARTEMIS and SPOT4," Proc. SPIE 4635, pp. 1–15, 2002.
- 6 Takashi Jono, Yoshihisa Takayama, Koichi Shiratama, Ichiro Mase, Benoit Deme-lenne, Zoran Sodnik, Aneurin Bird, Morio Toyoshima, Hiroo Kunimori, Dirk Giggenbach, Nicolas Perlot, Markus Knapek, and Katsuyoshi Arai, "Overview of the inter-orbit and orbit-to-ground laser communication demonstration by OICETS," Proc. SPIE 6457A, 2007.
- 7 Renny A. Fields, David A. Kozlowski, Harold T. Yura, Robert L. Wong, Josef M. Wicker, Carl T. Lunde, Mark Gregory, Bernhard K. Wandernoth, Frank F. Heine, and Joseph J. Luna, "5.625 Gbps bidirectional laser communications measurements between the NFIRE satellite and an optical ground station," SPIE Proceedings Vol. 8184, Sept. 29, 2011, Edinburgh, UK.
- 8 K. E. Wilson, J. R. Lesh, K. Araki, and Y. Arimoto, "Overview of the Ground-to-orbit Lasercom Demonstration," Invited Paper SPIE Free-Space Laser Communication Technologies Proceedings, Vol. 2990, Feb. 1997, San Jose, CA.
- 9 M. Jeganathan, K. Wilson, and J. R. Lesh, "Preliminary analysis of Fluctuations in Received Uplink Beacon Power Data Obtained from GOLD Experiments", JPL Telecommunications and Data Acquisition Report 42-124, February 15 1996.
- 10 Deep Space Optical Communications, A. John Wiley & Sons publisher 2006 pp. 467–516. H. Hemmati Editor.
- 11 K. Wilson, A. Vaughan, J. Wu, D. Mayes, J. Maloney, and R. Sobek "Preliminary Characterization Results of the OCTL Telescope," Special Issue on Optical Communications: Inter Planetary Network Progress Report, Vol. 42–161, May 15, 2005.
- 12 Keith E. Wilson, "Laser Uplink Safety For Future NASA High-Bandwidth Spacecraft Communications," Paper #C102, ILSC LIA Conference March 2009, Reno, NV.
- 13 [http://ilrs.gsfc.nasa.gov/products\\_formats\\_procedures/predictions/cpf.html](http://ilrs.gsfc.nasa.gov/products_formats_procedures/predictions/cpf.html)
- 14 K. E. Wilson, A. Biswas, S. Bloom, and V. Chan, "Effect of Aperture Averaging on a 570 Mbps 42 km Horizontal Path Optical Link," SPIE Proceedings Vol. 2471, April 1995.

(平成 24 年 3 月 14 日 採録)



**Keith E. Wilson**  
アメリカ航空宇宙局  
ジェット推進研究所  
Ph.D.  
光通信  
kwilson@jpl.nasa.gov