

1. はじめに

2009年2月4日～6日に、東京お台場の日本科学未来館（図1）にて、宇宙光学システムと応用に関する国際会議2009（International Conference on Space Optical Systems and Applications 2009, ICSOS2009）が開催された。この会議は、光通信技術の宇宙応用として、将来の宇宙に応用可能な技術（光、テラヘルツ等）の宇宙実証や、それらのアプリケーション実現のための議論の場を提供し、アジア圏での本分野のコミュニティを形成することを目的として、情報通信研究機構（NICT）の主催により開催された。本稿では、その概要を報告する。



図1. 日本科学未来館の外観

2. ターゲットトピック

ICSOS2009で取り扱う研究分野は、光学技術に関して宇宙通信に係るほぼすべての領域を扱っている。その技術トピックは、

- ・ システムと応用

- 現在と未来のレーザ通信システムとシナリオ
- 次世代応用へのレーザ通信技術
- 宇宙及び地上の光学システム
- レーザビームの新規光学技術
- レーザ通信のための小型衛星システム
- 宇宙ライダーシステム
- 撮像システム
- ・ デバイス、コンポーネントとサブシステム
 - 宇宙ベース応用への新規光学デバイス
 - 光・電子サブシステム及びコンポーネント
 - 研究室レベルでの実証ハードウェア
- ・ 基本的リンク技術
 - 大気伝搬、伝送特性及び補償技術
 - 宇宙システムのための変調方式
 - 光と電波システムのトレードオフ
 - ミリ波・テラヘルツ通信デバイスとシステム
 - 量子通信と量子暗号
 - 光波・テラヘルツ波の標準化

となっており、光学技術に関する技術を幅広く含んでいる。

3. 開催状況について

ICSOS2009は今回が最初の会議であるが、宇宙光通信に関して1990年にATRで行われたInternational Workshop on Optical Space Communication (IWOSC)、1997年に当時CRL（現NICT）により開催されたCRL International Topical Workshop on Space Laser Communicationsを勘案すると、シリーズとしては日本で3回目の開催となる。ICSOS2009は、2009年2月4日～6日に3日間にわたり開催された。プログラム構成を表1に示す。初日はプレナリーセッションを含

む口頭発表及びポスターセッション、2日目は口頭発表のみ、3日目にはテクニカルツアーが実施された。会期を通して87名（プレス1名含む）の参加登録者があり、9カ国（Austria、Switzerland、Germany、England、Netherlands、USA、Morocco、France、日本）から研究者が集い、全体で42件の研究発表が行われ、活発な議論が行われた。内訳は、口頭発表が26件（招待講演10件）で、ポスター発表が16件行われた。

表1. プログラム構成

Time Table	
1st Day	
Time	Session
8:30	Registration open
9:30	Opening session
10:10	Coffee break
10:20	Plenary session I
11:50	Lunch
13:00	Plenary session II
14:00	Coffee break
14:10	Space laser communications technology
15:50	Poster session
17:00	1st day end
2nd Day	
Time	Session
8:30	Registration open
9:00	Developments in laboratory
10:00	Coffee break
10:10	Experimental demonstration
11:20	Coffee break
11:30	Quantum technology for space applications
12:20	Lunch
13:30	Novel optical devices
15:20	Coffee break
15:30	Space lidar technology
16:40	Awards ceremony
16:50	Concluding remarks
17:00	2nd day end
3rd Day	
Technical Tour	
We are planning the technical tour from around the venue to National Institute of Information and Communications Technology (NICT). After that, we will go sightseeing in Tokyo (Asakusa, Akihabara, etc.).	

4. オープニングセッション

オープニングセッションでは、高野組織委員長から歓迎の挨拶があった（図2）。過去の宇宙実証として米国でのGOPEXプログラムによるレーザー伝送実験、欧州でのSILEXプログラムによるSpot-4とARTEMIS間での衛星間光通信、日本のETS-VIやOICETSでの地上—衛星間の光通信などを挙げた後、これからは光だけでなくテラヘルツ波、紫外線、その先のX線さえも通信への適用可能性があることについて言及した。また、地球環境やエネルギー、経済などの危機的環境を解決する必要があること、宇宙基本法によりこれからの宇宙活動がフレキシブルになること等の展望を述べ、光学的な観測や通信技術がその突破口になる可能性があること、本会議の重要性を強調した。



図2. 高野組織委員長挨拶



図3. 毛利館長挨拶

また、NICT 主催者側として大森理事から、招待講演者をはじめ、国内外から参加頂いた研究者・聴講者への謝辞があった。今回、開催会場である日本科学未来館の毛利未来館館長から歓迎の挨拶があり、毛利宇宙飛行士自身がスペースシャトルからハイビジョンで撮影された地球の映像の紹介と共に、本会議で扱う技術が将来役に立つことを願うと挨拶があった（図3）。

JAXA 中村副組織委員長からは、地球観測ミッションをはじめ、JAXA で行われている光通信プロジェクトについて、光学技術の必要性と共に紹介があった。また、総務省宇宙通信政策課岡野課長より挨拶文が届き、衛星通信技術はユビキタスネットワーク社会において大きな役割を担い、経済発展や社会の活動の大きな礎になっており、光学技術によってさらなる大きな発展につながることを期待する旨の内容が紹介され、盛大に開催された。

5. プレナリーセッション

最初に、NICT 飯田氏より超高速な通信リンクの必要性が述べられた。Web2.0 が構成されている社会で、ある地球の外（この場合火星）にコミュニティを作り、そこでも Web2.0 を構成する場合を思考実験された。2002 年に、5 エクサ(10^{18})バイトが1年で新たに作られる情報量を仮定して、年に+30%の情報量が2050年まで毎年生み出されると考える。その結果、情報量は1.47 ヨタ(10^{24})バイトに達するとのことで、その中での表層 Web の情報を火星まで伝送するのに8Gbpsが必要になり光通信は必須となる。

TESAT 社の Lange 氏より、ドイツの TerraSAR-X 衛星と米国の NFIRE 衛星間での世界最高速の5.6Gbpsの成果が発表された。TerraSAR-X と地上局との通信実験にも言及され、現在はまだ通信実験はうまくいっていないが、雲がある中で光学追尾が継続して成功している例の紹介があった。将来には、TanDEM-X 衛星や Alphasat 衛星に搭載していく予定である。

ロンドン工科大学の Seeds 氏からは、コヒーレント通信の宇宙応用について話があり、ピエゾファイバストレッチャと注入同期法を用いて、光のフェーズロックループ (OPLL) を実現し、強度変調 (ASK) と位相変調 (PSK) を復調可能な受信器が示された。さらには、OPLL を利用したミキシングによりテラヘルツ波を発生するミキサも紹介され、テラヘルツ通信についても言及があった。

ジェット推進研究所 (JPL) の Hemmati 氏より、NASA における惑星間のレーザ通信技術の開発について発表があり、2020年までには、現在の光学技術を使うことで伝送レートを30dB改善することが可能であることが述べられた。これは、火星から1Gbpsでデータを伝送することに相当する伝送容量になる。

欧州宇宙機関 (ESA) の Perdigues 氏より、欧州での宇宙の光通信技術について報告があった。欧州連合 (EU) では GMES 計画 (Global Monitoring of Environment and Security: 全地球的環境・安全モニタリング) により、環境の管理や人の安全に有用な情報の提供を目的として地球環境を計測する宇宙政策を実施しており、Sentinel というシリーズの観測衛星が用いられる。ESA では、それらの観測衛星からのデータ中継に EDRS (European Data Relay Satellite System) というコンセプトを提案しており、3機の静止衛星で1機に1台光ターミナルを搭載し、600Mbps クラスのデータ伝送を行うとのことである。

米国海軍研究所 (NRL) の Thomas 氏より、チェサピーク湾上に16.2kmのレーザ伝送路を形成し、統計的に大気ゆらぎデータを取得しているということが述べられた。これらは、海洋上における大気標準モデルを作成することに生かされると思われる。また、Trident Warrior 2008 というキャンペーンで、軍艦同士で変調型レーザ反射器を用いて通信実験を行った例が紹介された。

日本からは、NICT の國森氏より、現在開発中の要素技術について発表が行われた。コヒーレント

通信用のデジタルコヒーレント受信機や、地上の可搬型小型望遠鏡システムについて現在の開発状況が述べられた。宇宙航空研究開発機構（JAXA）の山川氏からは、JAXAにおけるデータ中継の位置づけや、光衛星間通信実験衛星（OICETS）の衛星間通信の実証実験について紹介があった。また、現在開発されている質量 30kg 以下で、2.5Gbps の 2 値位相変調（BPSK）が伝送可能なコヒーレント光ターミナルについて、2010 年までにブロードボードモデルを開発することが述べられた。



図4. オーラルセッションの会場の様子



図5. ポスターセッションの様子

6. 学術セッション

学術セッションでは、オーラルセッション（図4）、ポスターセッション（図5）ともに、活発な議論が行われ、非常に有意義なものとなった。宇宙光通信に関する発表はもとより、テラヘルツを

含む光デバイス、レーザパワー伝送、量子通信、重力波検出、ライダ等、さまざまなトピックに関して発表が行われた。以下、おもなトピックを分野別に分けて簡単に紹介する。

1) 宇宙光通信応用技術

ドイツ航空宇宙局（DLR）の Perlot 氏から、OICETS の測定データを参考にした地球のリムにおける大気ゆらぎの影響が述べられた。地上からの光リンクの高度により大気ゆらぎを算出できることは、高高度プラットフォームに今後応用可能だということであった。

大学における小型衛星開発では、北海道工業大学の青柳氏により、衛星「大樹」に搭載する光通信機器の開発について発表があった。100Mbps クラスの伝送が可能であり、消費電力 1.5W、質量 3kg 以下のミッションである。この発表は、ホテルグランパシフィックで開催されたレセプション（図6）にて、将来性のあるミッション構想でシステム提案に優れていたということで、鈴木プログラム委員長より、学生奨励賞が授与された（図7）。

日本電気の池辺氏からの発表では、光通信を用いた様々な宇宙のロケーションからのデータ中継への展望が述べられ、三菱電機の小出来氏からは、衛星—地上間における精追尾機構の開発状況が述べられた。

スイス Oerlikon Space の Kudielka 氏より、火星と地球間でのパルス位置変調（PPM）による回線検討が報告され、実際にスペインのテネリフェ島において 142km の距離で通信実験を行った際の良好な結果が出されていた。

北海道大学の島薮氏からは、衛星間光リンクに位相共役を適用する考察の発表があり、増幅率が 8 倍以上の二重位相共役鏡を用いることで、100km を超えて 10Gbps の伝送が可能であることが示された。

NICT の高山氏より、可搬型小型望遠鏡システムが紹介された。天候の相関がない場所に、可搬型

望遠鏡システムを設置して、サイトダイバーシチ効果により宇宙からの光リンクの稼働率を上げるためのものである。

NICT の荘司氏より、電磁環境をデジタルサンプリングして、IP ベースの光通信回線で伝送するコンセプトが提案された。これは、低コストで無線環境を離れた場所に展開し提供できる技術であり、電波天文、地上ベースのデジタルビームフォーミング技術として、ギガビットの光通信リンクの応用アプリケーションとして面白いものである。



図 6. レセプションの様子



図 7. 学生奨励賞授与の様子

2) OICETS を用いた実証実験

スペースリンクの阿部氏より、ピエゾアクチュエータを用いた高速動作可能な精追尾機構の開発について報告があり、電気通信大学の竹中氏からは、その精追尾機構を用いて、シングルモードフ

ァイバに結合する実験が、実際の OICETS を用いた光地上局との光通信実験で行われ、実際にファイバ結合した結果が述べられた。

日本コントロールシステムの田中氏より、LDPC 符号のデコードをリアルタイムに行うためのフィールドプログラマブルゲートアレイ (FPGA) の開発について報告があり、FPGA 上のリソースを最大限に利用した LDPC デコーダが紹介された。この LDPC デコーダは、名古屋工業大学の門池氏より、OICETS との光リンクに適用するために設計されたもので、同氏より LDPC の符号化について、パラメータを検討した結果が報告された。これは、後日、実際に OICETS との光リンクを使って実験されている。

3) 地上の光通信技術

早稲田大学の Bekkali 氏からは、1km のビル間の空間伝送路において、ファイバ無線 (RoF) 技術を用いて 2GHz の W-CDMA 信号、ISDB-T 信号及び、WLAN 信号の伝送を RoF により光を用いて空間伝送した結果が報告された。同様に、大阪大学の東野氏より、4 つの異なる無線サービスを高密度波長分割多重方式 (DWDM) により光空間伝送する RoFSO システムにおいて、最適な電力配分について発表がなされた。同大学の Kim 氏からは、1km の伝搬路で $1.5\mu\text{m}$ のレーザを伝送し、時間に関する自己相関関数とスペクトルモデルを実験的に同定し、シンチレーションの確率分布の統計モデルと、ファイバ無線システムにおけるシャドーイングを加味したスループット特性が報告された。

大阪大学の河本氏からは、光受信機のアレイを用いて、室内 LAN における空間・時分割マルチアクセスシステムが提案され、端末の数によるシステムスループット特性について報告がなされた。

4) コンポーネント・新規デバイス開発

日本コントロールシステムの森本氏より、リアルタイムに 6Gbps の BPSK を復調可能なデジタルコ

ヒーレント光受信機の開発について報告があった。これは、高速アナログ／デジタル変換回路と、FPGAをベースに開発されているものである。

NICTの小山氏より、宇宙用の光ファイバ増幅器の開発について報告があり、搭載用光増幅器のターゲットのスペックは、波長 $1.5\mu\text{m}$ で、出力レベルは約2Wであり、来年に宇宙環境への耐性試験を予定している。

津村総合研究所の津村氏からは、圧電素子を用いた変調コーナキューブリフレクタの発表がなされた。

静岡大学の渡邊氏のグループからは、光制御で読み書きが可能な光再構成型ゲートアレイを用いたメモリについて発表があった。ホログラムを用いているため放射線で一部の領域が反転しても誤りが少ない特徴を持つ。光によるコンフィグレーションの書き換え特性や、三重冗長にした場合の特性について発表がなされた。

JAXA宇宙科学研究本部の宗正氏より、MEMS技術を使ったレーザコリメータ用の光アンテナが提案され、小型のフレネルレンズをMEMS技術により実際に成形し、理論との比較がなされた。

5) 量子技術

量子暗号では、ウィーン大学のRupert氏から、2015年打ち上げ予定の量子鍵配布ミッション(Space-QUEST)の紹介があり、1000kmを超えた距離で世界初の量子もつれ現象を宇宙ステーションを用いて実証することを目的に行っていると発表があった。また、NICTの豊嶋より、可搬型の量子鍵暗号システムについて報告をした。伝送距離70mの空間伝送により量子鍵配布実験を行い、98.1kbpsでふるい鍵が伝送できることが確認されている。ヨ一軸の自動回転補償機構が装備されており、移動体に適用可能である。

量子通信では、NICTの武岡氏より、古典的な情報理論限界を超える量子通信技術について報告があり、古典的に一番感度のよいホモダイン光検出

の感度を、現状到達可能な実験パラメータで超えるための検討が報告された。

6) 科学ミッション

天文台の川村氏より、日本の重力波検出ミッションDECIGOについて発表があった。DECIGOは、ドラッグフリーの衛星により、それらの間をレーザーリンクで結び、重力波による干渉の変化を測定しようという試みで、ダークエネルギーの特性、ブラックホールのメカニズム、拡大する宇宙の検証などに新たな道を開くということである。

理研の和田氏より、高エネルギー粒子による宇宙起因の瞬間発光現象を観測するJEM-EUSOミッションの宇宙用ライダの開発について発表があった。レーザには、LD励起のNd:YAG固体レーザの第3高調波を用いて355nmの波長を利用しており、これは高エネルギー粒子による地球大気における大気蛍光とチェレンコフ光を観測する波長に合わせて設計されているもので、この波長でライダにより雲の高度を30cmの精度で測定可能である。

7) 光電力伝送

ESAのSummerer氏より、レーザによるワイヤレス電力伝送について報告があり、JAXAでは太陽光で直接Nd:YAGレーザを励起して1GW伝送する計画があること、ESAでは2002年から産業界とレーザベースの太陽電力伝送の検討を始め、EADSアストリウムと月、火星、地球周回衛星、深宇宙ミッションへの適用では、月への伝送が一番良いとの結論で、1.5mの望遠鏡で6kWを伝送するシステムの検討を行っている。

8) 光学設計技術

ジェネシアの江野口氏より、宇宙における光学設計技術について、機械的・熱的な特性も合わせて、限られたリソースの中で設計する手法について発表があり、この技術が「ひので」搭載のコリメータの開発や、「れいめい」搭載のマルチスペクトルオーロラ

カメラに生かされているとのことである。

東京大学の宮村氏からは、空間光変調器を用いて、衛星における光学システムのひずみ補償に、ニューラルネットワークを用いる技術が提案され、シミュレーションにより評価が行われた。

9) ライダ技術

天文台の荒木氏より、「かぐや」搭載のレーザ高度計について発表があり、月の高度マップを作成した結果が報告された。また、JAXAの水野氏より、「はやぶさ」に搭載されたライダについて報告があり、小惑星「いとかわ」にランディングする際のレーザ高度計のレンジング結果と信号強度が報告された。

NICTの水谷氏より、CO₂と風観測用のコヒーレントドップラライダの開発状況の発表があった。CO₂は、地球温暖化の大きな指標であるが、CO₂吸収線の異なる波長のレーザを切り替えて濃度が測定される。発表では、10km先の風速を測定した結果と、1km先でのCO₂濃度を測定した例が示された。

以上、述べたように、新しく多岐にわたる分野の発表があったことが分かる。セッションの最後には、門脇副組織委員長より閉会の挨拶があり、発表された多岐にわたるこのような技術を通してこれからの友好な関係の構築と、この分野のより一層の発展を願い、その一端をNICTが担っていきたいと意志が表明された。そして大盛況のうちに、成功裏に会議を終えることができた。

7. テクニカルツアー

3日目のテクニカルツアーでは、午前にはNICTの見学が行われた。見学コースとしては、NICTの中で、日本標準時、高度衛星通信、衛星光通信、量子通信等の各研究室を訪問した。図8の写真は、その中で衛星光通信の光地上局施設を訪問した時のものであるが、活発に質疑応答がなされた。また、海外の研究者と個別の研究テーマでの議論が

盛り上がり、ツアー後に別行動で打ち合わせが行われるなど、有意義に実施することができた。今後の協力関係構築や、共同研究の推進に役立つことを願っている。

また、午後には、皇居、浅草を周り、屋形船に乗るツアーが行われた。皇居と浅草は、ツアーガイドによる英語での説明があり、初めて日本を訪れた外国人も参加されたため、様々な質問が飛び交っていた。屋形船は、外国人の中には、畳に長く座れないのでビール樽を椅子にする人がいるなど予想外の事もあったが、外国人には大変好評であった。筆者も初めての体験であったが、東京で日本の文化を味わってもらうには、屋形船はとてもよい選択であったと思われる。



図8. NICT 光地上局施設の見学の様子

8. あとがき

今回、「宇宙光学システムと応用に関する国際会議2009」と題してICSOS2009を開催し、光学技術を取り扱ったわけであるが、改めて宇宙において多岐の分野にわたる重要な技術であることが認識され、科学から工学までの応用分野で必須の技術であることが明らかとなったと思われる。光通信、光学観測、ライダ技術、量子技術、光電力伝送、新規光学デバイス等それぞれにおける中間的・派生的技術も含め、それぞれで行ってきた分野の横の連携をさらに強めて、今後の宇宙開発の有機的

な発展につなげるべきであるという印象を強く受けた。このような連携を国際的に展開し、継続的に続けていくことは、この分野での新たな国際連携プロジェクトが今後生まれてくる土壌になると思われる。

次回への反映事項としては、日本以外のアジア圏からの発表を集めることで、アジアパシフィックにおけるコミュニティ形成を実質的に行っていく必要性が挙げられるだろう。

また、ICSOS 国際会議は、1~2年周期で定期的で開催していく方向で検討されている。毛利宇宙飛行士からも、国外で開催してこそ真の国際会議であるとの助言を頂いた。現状、次回の開催については、NASA JPL と米国開催で調整しているところであり、詳細が決まり次第アナウンスする予定である。次回開催に向けて、参加者各位及び読者

の皆様へ引き続きさらなるご支援・ご協力をお願いする次第である。

なお、会議の内容についてさらに詳しい情報が欲しい方は、筆者 (morio(at)nict.go.jp) までご連絡を頂ければ幸いである。

謝辞

最後に、本会議の開催に関して、ご参集いただいたすべての参加者各位、ご尽力いただいた委員の方々をはじめ、テクニカルツアーに係る NICT 関係者の方々、会議開催にサポート・ご協力いただいた関係各位に、集合写真（図9）を掲載し深く感謝する次第である。

以上



図9. レセプションでの参加者の集合写真