

## 7 結言

### 7 Concluding Remarks

門脇直人

KADOWAKI Naoto

情報通信研究機構 (NICT) は、1970 年代より様々な衛星通信・放送技術の研究開発に取り組んできた。世界の Ka 帯衛星通信技術の先鞭をつけた実験用中容量通信衛星 CS シリーズでは、帯域幅 200 MHz の広帯域通信を実現するなど、衛星通信の黎明期からブロードバンド衛星通信の基礎を築いてきており、2008 年に打ち上げられた WINDS では、チャンネルあたりの最大伝送容量 1.2 Gbps を達成している。しかし、近年の衛星通信の大容量化に対する要求は年々大きくなる一方である。例えば、近年、高精細な観測センサを搭載した地球観測衛星が打ち上げられるようになったが、通信容量は年々増加の一途をたどっている。そのデータ伝送速度は、2015 年には 20 Gbps を超える容量が必要と言われている。最新の Ka 帯衛星通信システムである KA-SAT や ViaSat では、総合伝送容量が 70 ~ 100 Gbps という大容量伝送を実現するものが現れてきたが、これでも 20 Gbps のチャンネルはわずかに 3 ~ 4 チャンネルしか提供できない。十分な通信要求を満たす大容量衛星伝送を可能とするものとして、レーザ通信に対する期待は大きい。

NICT は 1994 年に技術試験衛星 VI 型 (ETS-VI) 搭載用の光通信基礎実験装置 (LCE) を開発し、世界初となる衛星を用いたレーザ通信実験を実施した。伝送速度は 1 Mbps であったが、NICT の光地上局と静止軌道程度の高度の衛星との間での回線確立に成功した。

光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS) は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発した衛星であるが、光衛星間通信技術の開発のため NICT の研究者も JAXA の開発チームに参画し、主に光通信ミッションの搭載機器開発に携わった。光通信では、非常に高精度な捕捉追尾精度を実現する必要があるが、軌道上で想定される宇宙

環境において、例えば熱歪等により所望の特性が得られないなど、開発段階において多くの苦労があった。しかしながら、欧州宇宙機関 (ESA) の ARTEMIS 衛星との衛星間通信を実現するためのインターフェース要求条件を満たすことを必須条件とし、日本の技術で開発できた衛星であることを考えると、衛星搭載用の光通信技術の獲得と発展に寄与した意味合いは大きく、日本の技術の高さを示したといえる。

「きらり」は衛星開発に加えて、打ち上げにおいても多くの苦難に見舞われた。当初は、J-I ロケットにより打ち上げられる計画であったが、プロトフライト試験を終了後、プロジェクトは凍結された。しかしながら、その間も信頼性の維持向上や打ち上げ機会の確保など、関係者のたゆまぬ努力により、打ち上げロケットをドニエプルロケットに変更し、2005 年 8 月に成功裏に打ち上げが実現された。その後、ESA との協力により世界初の 50 Mbps での双方向衛星間光通信実験、さらに低軌道衛星では世界初となる NICT 光地上局-「きらり」間光通信実験を次々と成功させ、この分野で世界をリードする成果を出した。

その後、NICT が先導し光地上局を所有する NASA ジェット推進研究所 (JPL)、ESA、ドイツ航空宇宙センタ (DLR) と連携し、NICT の光地上局を含む地球上で様々な立地条件の光地上局 4 局と「きらり」との国際共同レーザ通信実験を、JAXA との協力の下に実現した。その結果、これまでは少なかった地上-衛星間のレーザ伝搬データとして、異なるサイト条件における多くの貴重なレーザ大気伝搬特性を取得することができた。これらは今後、様々なサイト条件における大気ゆらぎのモデル化や将来の光通信におけるシステム設計において重要な基礎データとなる。さらに、衛星-地上間の光伝搬モデルを標準化する

ることにより、将来、通信事業者や宇宙利用を行うユーザにとって利用価値の高いツールを提供することとなり、実用化に向けて一歩駒を進めることができる。

いつも指摘されることであるが、レーザー通信は天候が悪いと通信ができない。しかしながら、地上に複数の地上局を配置し、気候条件の良い光地上局を用いることにより、軌道上から地上へデータを伝送することができる。幸いにも、先に述べた世界の4局の光地上局と「きらり」との国際共同レーザー通信実験では、1局毎ではリンクを確立した成功率は低いが、4局を合わせると99%以上の確率で軌道上から地上へのリンクを確立することが可能であった。この結果は、このようなサイトダイバーシティの有効性を示しているものである。地上の光ファイバ網が急速に進展していることを考えると、複数の光地上局を地上の光ファイバ網で接続し、大容量のリモートセンシングデータを途切れることなく受信するようなアプリケーションは実現性が高いと言えよう。

レーザー通信で、さらに将来期待されるのは、量子暗号による高度に安全なワイヤレス通信である。地上の光ファイバにおける量子鍵配送は、100 km程度が伝送できる限界であり、不確定性原理により信号をコピーできないため、全世界に量子鍵配送ができない。しかしながら、空間伝送を用いると低軌道衛星から量子鍵配送が可能である。つまり、衛星を用いた量子鍵配送は地球規模で利用可能となる。量子鍵配送には、通常偏光が用いられるため、宇宙-地上間における伝搬路における偏光特性が重要であるが、これまで実測されたデータが無かった。NICTは、衛星を用いた量子鍵配送の可能性を探るため、「きらり」を用いて宇宙-地上間での偏光特性も取得するなど、当初には計画されていなかったエキストラサクセ

スとなる結果を出すことができた。

「きらり」を用いたレーザー通信は、技術的にかなり挑戦的であり、また多彩であるが、その内容はなかなか知りたい状況であったかもしれない。本特集号では、「きらり」の軌道上実験結果のほぼ全てを網羅し、まとめることに努めた。そして、多くの興味ある読者に知って頂き、広く活用されることを期待している。「きらり」のレーザー通信実験においては、幾つもの組織による多くの関係省庁、関係機関の関係者、技術者が開発を進め軌道上実証をすることができた。これまでの関係各位のご努力に敬意を表し、感謝を申し上げたい。

2011年3月11日には東日本大震災が発生し甚大な被害となった。衛星からの観測データが被災地把握に非常に貢献した。将来、レーザー通信により観測衛星等と地上間において、特にダウンリンク回線の超大容量化が実現すれば、より多くの高精度な観測データがほぼリアルタイムに取得することになる。その結果、災害時に被災地域の詳細かつ迅速な状況把握が可能となり、発災直後の的確な救援活動の計画にもつながるなど、大きな社会貢献となる。欧米では、既に5.6 Gbpsを超える軌道上での衛星間レーザー通信が実現されているが、我が国として数十 Gbpsの超大容量ダウンリンクを実現することが、技術開発における優位性を確保するだけでなく、人類の安全・安心な生活につながっていくことは疑いない。「きらり」の開発及び実証実験の成果を有効に活用し、新たな大容量衛星搭載レーザー通信ミッション計画を立ち上げ次のステップに進むべく、NICTワイヤレスネットワーク研究所では一層の努力をしていく所存であるが、関係各位のご理解、ご協力を合わせてお願いする次第である。



かどわき なおと  
門脇直人

ワイヤレスネットワーク研究所  
研究所長  
博士 (情報科学)  
衛星通信システム  
naoto@nict.go.jp