

門脇直人

Abstract

インターネットが人のコミュニケーションにとどまらず、センシングや機器制御などに広く利用されるようになり、いわゆる Internet of Things (IoT) が進展しつつある。また、モバイルの世界は第5世代移動通信 (5G) が2020年頃の実用化を目指して研究開発が精力的に行われており、IoTの一層の進展を促すこととなるであろう。IoTでは、人がいない場所にも通信手段を提供する必要がある。海洋域や空域、宇宙にその範囲は拡大する。そこで重要になるのが衛星通信である。ここでは、IoTや5Gが本格的に普及する時代に衛星通信が果たす役割と、要求を満たすために必要となる技術について概観する。

キーワード：無線通信, IoT, 5G, 衛星通信

1. はじめに

2020年代には、第5世代移動通信システム (5G) や人間以外のもの同士が直接インターネットでつながる Internet of Things (IoT) が進展する。そのような環境では、誰でもがあらゆる情報にアクセスできるだけでなく、多様なセンシングやそれらのデータ利活用によるアクチュエーションなど、安全・安心や生活の質 (QoL: Quality of Life) の向上につながるマシンツーマシン (M2M) 通信が実現すると期待されている。対象となる情報のデータ量は微小なものから大容量なものまで多様であり、かつ通信の対象範囲は地球上の至る所のみならず上空や宇宙空間に広がる。そのような広域において要求される通信環境を実現するには、衛星通信システムの利活用は必須である。一方で、これまでの衛星通信システムは、主に放送サービスや固定網のバックアップ、船舶や航空機を対象とした移動体通信等に利用されてきており、上記のようなIoT/5Gの中での利活用を想定すると、例えば、衛星通信を5Gの超大ゾーンのコントロールプレーンとして利用してデータプレーンを広域に制御するネットワーク機能や、個々のデータ量は小さいが、

非常に広範囲に多量に分散されたセンサのデータ収集を実現する衛星通信方式の確立、多数の無人航空機 (UA: Unmanned Aircraft) による小容量データから映像を含む大容量センシング情報の収集及びUA群制御のための衛星通信技術の確立など、新たな技術開発課題が出てきている。そこで本稿では、IoT/5G時代に要求される衛星通信システムの要件やそれに対応する技術開発動向を俯瞰する。まず2.において、IoT/5G時代に期待される衛星通信の利活用形態を俯瞰し、3.において、それらを実現するための技術開発課題について述べる。4.ではそれらに関連する最新の技術開発動向と将来展望について述べる。

2. IoT/5G時代の衛星通信の利活用について

地上系の移動通信システムは、現在第4世代と言われる Long Term Evolution (LTE) や WiMAX の普及段階にあり、ブロードバンド化が一層進展している。端末側も、スマートフォンの普及が急速に進んでおり、2015年3月時点で我が国では6,850万台となり、従来の携帯電話の5,800万台を超えている。利用形態もスマートフォンやタブレットを対象としたブロードバンドサービスが主流となりつつある。また、広く利用可能となったインターネットを利用して、センサやアクチュエータ、サーバなどを接続して監視や情報収集、機器制御などを行うIoTと言われる新たな利活用が進みつつある。

門脇直人 正員：フェロー 国立研究開発法人情報通信研究機構
Naoto KADOWAKI, Fellow (National Institute of Information and Communications Technology, Koganei-shi, 184-8795 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.99 No.3 pp.248-253 2016年3月
©電子情報通信学会 2016

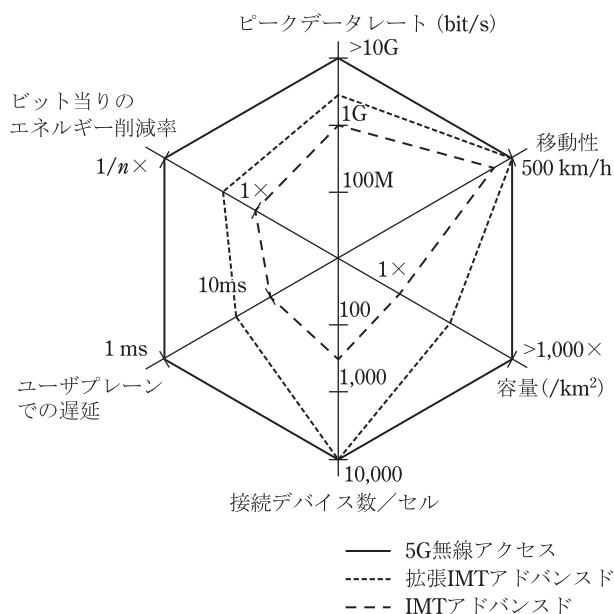


図1 5G無線アクセス技術の最大システム性能 (文献(1) Fig. 8.3.1-1 を和訳)

2020年頃の実用化を目指して標準化や技術開発が進んでいる5Gについては、一層のブロードバンド化やIoTへの利用も視野に入れた議論が進められている。電波産業界(ARIB)がまとめた2020年以降の移動通信システムに関するホワイトペーパー⁽¹⁾では、ビデオストリーミングやM2M通信など、5Gで想定されるアプリケーションをユーザスループット、移動性、遅延の三つの軸で評価し、ユーザ要望の多様性を指摘している。また、図1に示すように、5Gが提供する最大性能として、ピークデータレート10 Gbit/s以上、移動性500 km/h以上、システム容量はIMTアドバンスドの1,000倍、1 ms以下の遅延等を示している。更にユーザ密度のより高い環境での利用と同時に、ユーザ密度の低い地域でのカバレッジ拡大を課題としている。一方で、ITU-Rにおける5Gの議論においては、衛星通信への言及はほぼないと言ってよい状態であるが、前述のARIBのホワイトペーパーが、衛星通信システムとの協調に言及しているほか、2015年10月に開催されたKa and Broadband Communications Conferenceの講演においても5Gにおける衛星通信の役割について言及された⁽²⁾。

衛星通信システムの特長は、広域カバレッジ、同報性、広域高速移動体への対応力などにあり、IoT/5Gが普及する時代になってもこれらの特長を生かした利活用によって、通信環境の充実に資することは間違いない。例えば前述したとおり、5Gでも課題としているユーザ密度の低い地域におけるカバレッジ拡大手段をはじめとして、以下のようなアプリケーションにおいて衛星通信の利用が極めて有効であると考えられる。

- (1) 海洋域における新たなアプリケーション
 - (a) 海洋資源調査のためのブロードバンド通信
 - (b) 海洋環境調査
 - (c) 津波監視
 - (d) 貨物船モニタリング・制御
 - (e) 安全保障等
- (2) 航空機を対象としたアプリケーション
 - (a) 航空機乗客に対するブロードバンドサービス
 - (b) 航空機運用の高効率化や安全性高度化のための航空機モニタリング
 - (c) UAを用いたリモートセンシング及びUA群制御用ネットワーク等
- (3) 宇宙空間における通信アプリケーション
 - (a) 衛星リモートセンシングのための大容量ダウンリンク
 - (b) 惑星、小惑星等の資源調査等のための通信ネットワーク
 - (c) 太陽活動など地球上に影響を与える宇宙環境監視のための通信ネットワーク等
- (4) 5Gネットワークの一部機能の分担
 - (a) 超大ゾーン・低消費電力コントロールプレーン用ネットワーク
 - (b) 階層的バックホール(遠距離、バックアップ等)

3. IoT/5G時代に必要とされる衛星通信技術

IoTでは、微小容量から大容量まで多様なデータが対象となり、カバレッジも陸上のみならず、アプリケーションによっては海上・海中、上空、宇宙と非常に広範である。5Gでは、複数のネットワーク技術を複合的あるいは統合的に活用してそれらの要求を満たすことを想定している。衛星通信がこのような環境中で利活用されるためには、以下のような研究開発が必要である。

3.1 海洋域アプリケーションへの対応技術

前述した海洋域を対象としたアプリケーションのために要求される技術として、以下の2点が主要な技術開発課題である。

- (1) 広範な海洋域に分散する多数のセンサからのアップリンク収容技術

海表・海中温、波高、水質などを計測する比較的小容量のデータ収集を行うためのセンサノードは、環境モニタリングや津波検出などで広範に分散することが想定される。これらのノードは電力に余裕がないことから、

アップリンクの衛星側の受信利得・雑音温度比 (G/T) を大きくし、かつ広域のカバレッジを確保する技術が必要となる。また、非常に多数のノードからのデータを効率的に伝送するための通信方式や多元接続方式、帯域制御技術等に関しても開発課題がある。

(2) 広範な海洋域を対象とするブロードバンド通信技術

海洋資源調査については、高精細画像や超音波サウンドデータ、サンプリング物質解析データなど大容量データが多いため、広範な海洋域にブロードバンド回線を提供する必要がある。この場合、海洋域からのアップリンクに 10 Mbit/s 以上の大容量が要求されており、衛星側の G/T のみならず海上の地球局の等価等方放射電力 (EIRP) も大きくする必要があり。Inmarsat-5 など既存の衛星インターネットでは、一般にフォワードリンク、すなわち衛星からユーザへのダウンリンクが大容量で、アップリンクに関しては最大でも数 Mbit/s⁽³⁾ であり、前述の要求を満たしておらず、この点が新たな開発課題である。

3.2 航空機アプリケーションへの対応技術

前述の海洋域アプリケーションへの対応技術は、UA を用いたリモートセンシングや航空機乗客に対するブロードバンドサービス、航空機運用効率化等にも必要な技術であり、海洋域以外の大陸上空にカバレッジを広げることで利用可能となる。

3.3 宇宙空間における通信アプリケーション対応技術

宇宙空間でのアプリケーションに関しては、衛星通信技術は必須であり、これまでに衛星間通信や衛星リモートセンシングのためのデータ伝送技術が研究開発されてきている。リモートセンシングに関しては、高精細化の更なる進展やハイパスベクトルセンシングなど、伝送速度の高速化要求は大きくなり続ける傾向にある。また、将来期待されている惑星、小惑星の資源調査では、地上の IoT 同様に多種多様な情報の取得、伝送が必要になると同時に、超遠距離通信を実現することが必要である。また、電波伝搬や人工衛星の誤動作に影響を与える太陽活動などの宇宙空間での環境監視も、IoT の一部として利活用される可能性があるが、これについても超遠距離通信が必要で、伝送容量も大きくなる傾向にある。これらの要求を満たすための重要技術は光宇宙通信技術である。

3.4 5G ネットワーク技術の応用

5G の議論においては衛星通信への言及がほとんどない状態であるが、5G 技術として提案されているものの中

には、衛星通信システムに応用することでシステムの効率化や利用形態の拡大に結び付くと思われる技術要素が存在している⁽⁴⁾。ここでは、そのような技術例として示されているもののうち、以下の3点を紹介する。

(1) Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

Massive MIMO は 100 個以上の非常に多数のアンテナ素子を用いる MIMO 技術であり、5G の重要な構成技術の一つである。Massive MIMO では、装置規模や計算量がこれまでの MIMO に比べて格段に大きくなるため、RF 装置の回路規模や計算量の削減を目的とした研究が盛んに行われている⁽⁵⁾。この研究成果は、衛星搭載用マルチビームアンテナのビーム形成技術に応用することで、衛星搭載機器の軽量化、低消費電力化、あるいはビーム数の増加をもたらす可能性がある。

(2) 多元接続技術

5G では、信号間の直行性を崩して干渉除去技術を組み合わせることで高い周波数利用効率を実現する Non Orthogonal Multiple Access (NOMA)⁽⁶⁾ と呼ばれる多元接続方式が提案されている。また、Filtered OFDM⁽⁷⁾ や Filter Bank Multicarrier (FBMC)⁽⁸⁾ 等の信号処理によりキャリア間干渉を除去する技術も提案されており、これらの技術を用いると精密なタイミング同期が不要になる可能性がある。広域カバレッジのためユーザの位置による伝送路の遅延量の差が大きくなる衛星ネットワークにおいては、精密なタイミング同期が不要になれば、システム設計での簡素化が可能になるなどのメリットが考えられる。

(3) モバイルフェムトセル

モバイルフェムトセル (Mobile Femtocell⁽⁹⁾) は鉄道やバス等の移動体に設置する小形基地局の概念であり、移動体内のユーザが多い場合は、通信容量の増加とともにハンドオーバーのシグナリングを激減できる利点があり、5G のアーキテクチャの一部として提案されている。この技術を船舶や航空機の乗客向けサービスに適用すると、5G 端末を持つユーザの利便性は大きく高まると期待される。図 2 にモバイルフェムトセルを船舶に応用する例を示す。

4. 最新の衛星通信技術開発動向と将来展望

近年、世界の衛星通信事業において注目を集めているのは、ハイスループット衛星 (HTS: High Throughput Satellite) である。2011 年に打ち上げられた ViaSat-1 は米国の人口の多い地域を 72 ビームでカバーし、Ka バンド (アップリンク 30 GHz 帯, ダウンリンク

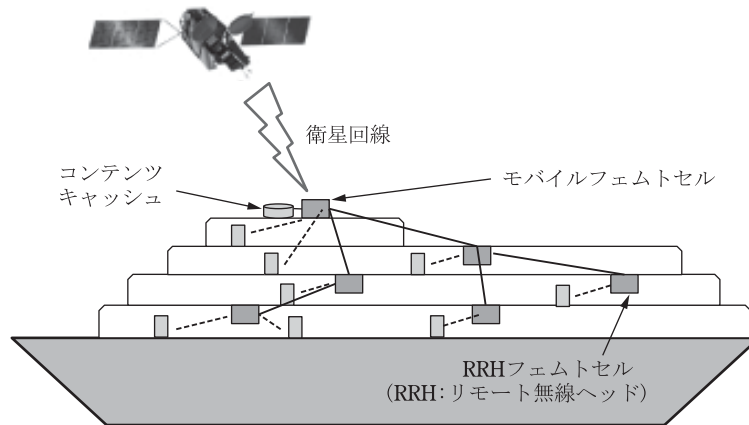


図2 モバイルフェムトセルの船舶への適用例

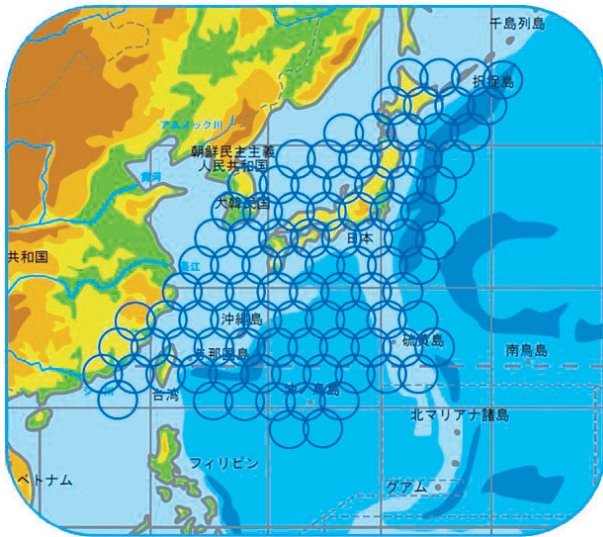


図3 STICSの超マルチビームアンテナカバレッジ 日本のEEZをほぼ全域固定マルチビームでカバー。

20 GHz帯)の4周波数帯域を再利用することで、衛星全体として140 Gbit/sのスループットを提供可能としている⁽¹⁰⁾。Kacific社はこのような技術を用いて、太平洋島嶼国に適切な価格でブロードバンド回線の提供を計画している⁽¹¹⁾。これは5Gで必要とされるルーラル地域への大容量バックホール回線提供の実現につながるものである。

一方、3. で示した開発要素のある技術に関しては、以下に示すように現在様々な研究開発が行われている。

(1) 広域に分散する多数のセンサノード収容技術

2013~2014年に、きく8号(ETS-VIII)を用いたGPS津波系の実証実験が行われている⁽¹²⁾。これは海洋域におけるセンサネットワーク実現に向けた研究開発の一例である。また、国立研究開発法人情報通信研究機構

(NICT)が実施した衛星地上統合移動体衛星通信技術(STICS)の研究開発においては、100ビーム級の高利得マルチビームアンテナ用デジタルビームフォーミング(DBF)技術、及び中継器の効率的帯域割当を可能とするデジタルチャネライザ技術が開発されている⁽¹³⁾。図3はSTICSで検討された固定型マルチビームアンテナのカバレッジであり、日本の排他的経済水域(EEZ)全域をカバーしている。世界的に、海洋域のブイからのデータ収集には、Argos衛星やIridium衛星が利用される例が多いが、今後、データの多様性が増し、トータルのデータ容量も大きくなると、STICSのようなG/Tが大きく非常に広域をカバーする衛星ネットワークの実現が望まれる。

(2) 海洋域を含む広域を対象としたブロードバンド衛星通信技術

近年打ち上げられたInmarsat-5シリーズ衛星3機により、極域を除くほぼ地球全域において、ダウンリンク最大50 Mbit/s、アップリンク5 Mbit/s程度のKaバンドサービスが2015年末には提供される⁽³⁾。また、2016年内に打ち上げられる予定のViaSat-2は、北米大陸から大西洋北部をカバーし、この海域・空域の船舶や航空機へのブロードバンドサービスを開始する予定である⁽¹⁴⁾。これにより、船舶や航空機の乗客へのブロードバンドサービスは大きく飛躍するものと思われる。一方で、海洋資源調査や科学研究、国土保全、安全保障等の分野では、海洋域や航空機等からの高精細映像や容量の大きいデータ伝送が必要とされることから、アップリンクで数十Mbit/s程度の伝送容量が要求される。現在、NICTでは内閣府が主導する戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)で、国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)が中心となって進めている「次世代海洋資源調査技術」の研究開発に参加して、小形の無人海上プラットフォーム(ASV)に設置可能なきずな

(WINDS)⁽¹⁵⁾用超小形地球局 (USAT) を開発している。これは直径 45 cm のアンテナを有する USAT で、EIRP を最大限増加させてアップリンク 6 Mbit/s を実現する計画である⁽¹⁶⁾。船舶設置用の直径 60 cm アンテナを有する USAT では、既にアップリンク 10 Mbit/s を達成している⁽¹⁷⁾。衛星搭載中継器の G/T を更に大きくする技術も必要であり、アンテナ利得とビーム数、ビーム形成方式等についてのシステム設計と技術開発が必要である。

(3) 光宇宙通信技術

光宇宙通信技術に関しては、我が国は世界で最も早く研究開発に取り組んだ国の一つであり、NICT は特に衛星と地上間の光通信実験を実施している。具体的には、1994 年にきく 6 号 (ETS-VI) と地上間での 1 Mbit/s 双方通信に成功、2006 年にきりり (OICETS) と地上間でアップリンク 2 Mbit/s、ダウンリンク 50 Mbit/s の双方向通信に成功している⁽¹⁸⁾。これらは光衛星間通信で利用されている 0.8 μm 帯を使用している。また、NICT は 2014 年に光通信実験機器 (SOTA: Small Optical Transponder) を 50 kg 級小形衛星搭載で打ち上げ、光ファイバなどで利用されている 1.5 μm 帯での衛星・地上間実験を実施している⁽¹⁹⁾。これらの成果を基に、将来必要とされるであろう数十 Gbit/s の光ダウンリンクの技術確立に取り組んでいる。

海外では、米国 NASA が打ち上げた LADEE 衛星により、2014 年に月周回軌道と地上間で 600 Mbit/s の双方向光通信実験に成功⁽²⁰⁾しており、深宇宙における光宇宙通信の利用に見通しが得られている。

このように、光宇宙通信は、国内外共に精力的な技術開発が行われており、近い将来の実用化が期待されている。

(4) 新たな衛星通信システム構想

近年、非静止衛星による新たなシステム構想が複数出現している。その中でも英国の O3b は、2013 年 6 月～2014 年 12 月にかけて赤道上空約 8,000 km の軌道に 12 機の衛星を打ち上げ、南北緯度 62 度以下の範囲で Ka バンドブロードバンドサービスを開始している⁽²¹⁾。海運業、旅客船事業者等が利用を開始しており、海洋域でのブロードバンドサービスの今後の展開が期待されている。また同社は、上記システム以外に、OneWeb と称する Ku バンドの低周回軌道 (LEO) 衛星システムを構築する計画⁽²²⁾であり、2018 年から 648 機の衛星を高度 1,200 km に打ち上げる予定である。SpaceX 社も 4,000 機の LEO 衛星によるインターネットサービスシステムを計画⁽²³⁾しているほか、Facebook 社はボーイング 737 の主翼程度の大きさの UAV 型通信プラットフォームを成層圏に打ち上げる計画⁽²⁴⁾、Google 社も成層圏に

10 万個のバルーン型通信プラットフォームを打ち上げる Loon プロジェクト⁽²⁵⁾を推進している。これらが実現すると、静止通信衛星よりも遅延が小さく、かつブロードバンドサービスを地球上全地域に提供することが可能となり、IoT の世界規模の展開や 5G ネットワークの利用形態の拡大が著しく進む可能性を有している。

5. おわりに

IoT が進展しつつあり、次世代の移動通信技術である 5G が 2020 年頃に実用化されようとしている状況の中で、今後の衛星通信の役割、ポテンシャルと、利活用のための技術開発要素について述べた。IoT では通信範囲が海洋域、上空、宇宙と非常に広範囲に及ぶと予想されることから、衛星通信の利用は不可欠であろう。また 5G の技術の中には、衛星通信に適用できる新しい技術も含まれていると同時に、多様なネットワーク技術を複合的に利用する環境の中で、衛星通信が一定の役割を果たし得るものと思われる。IoT/5G 時代の衛星通信の利活用に関して、今後更なる議論の高まりを期待する。

文 献

- (1) "Mobile communications systems for 2020 and beyond," Whitepaper of ARIB 2020 and Beyond AdHoc Group, Ver. 1.0.0, Oct. 2014.
- (2) G.E. Corazza, "5G: Flexible networks for humans and things," Proc. 21st Ka and Broadband Communications Conference, Oct. 2015, <http://proceedings.kaconf.org/papers/2015/op4.pdf>
- (3) P.J. Hadinger, "Inmarsat global xpress: The design, implementation, and activation of a global Ka-band network," 33rd AIAA International Communications Satellite Systems Conference, no. AIAA 2015-4303, Sept. 2015.
- (4) 三浦 周, 辻 宏之, 岡本英二, "5G モバイルネットワークにおける衛星通信の役割に関する調査研究," 信学技報, SAT2015-19, RCS 2015-141, pp. 47-52, Aug. 2015.
- (5) 須山 聡, 小原辰徳, シンキユン, 奥村幸彦, "高周波数帯ハイブリッドビームフォーミングを用いた超高速 Massive MIMO におけるアナログビームフォーマ構成の検討," 2015 信学総大, no. B-5-105, 滋賀県草津市, March 2015.
- (6) Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access," Proc. IEEE VTC-Spring' 13, Sept. 2013.
- (7) J. Li, K. Kearney, E. Bala, and R. Yang, "A resource block based filtered OFDM scheme and performance comparison," 20th International Conference on Telecommunications, Casablanca, Morocco, May 2013.
- (8) A. Farhang, N. Marchetti, L.E. Doyle, and B. Farhang-Boroujeny, "Filter bank multicarrier for massive MIMO," The 80th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), Vancouver, Canada, Sept. 2014.
- (9) C.X. Wang, F. Haider, X. Gao, X.-H. You, Y. Yang, D. Yuan, H.M. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir, "Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks," IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, pp. 122-130, Feb. 2014.
- (10) E. Hudson, "Broadband satellite networks... 1Gbps to 200 Gbps and beyond," Proc. 33rd AIAA Colloquium, pp. 12-44, Sept. 2015.
- (11) J.-S. Prolon, "A high throughput satellite for the pacific region: Tailoring a game-changing technology to an underserved, challenging market," Proc. 33rd AIAA Colloquium, pp. 129-157, Sept. 2015.
- (12) 山本伸一, 川崎和義, 寺田幸博, 加藤照之, 橋本剛正, 本橋修, 齊田優一, 松澤 亮, "技術試験衛星 VIII 型 (ETS-VIII) を

用いた海上ブイからのデータ伝送実験—津波の早期検出を目指して—,” 信学技報, SAT2014-26, pp. 5-10, Aug. 2014.

- (13) 辻 宏之, 三浦 周, 岡田和則, 織笠光明, 藤野義之, 豊嶋守生, “衛星/地上共用携帯電話システムの開発と現状,” 信学技報, SAT2013-18, AP 2013-56, pp. 41-46, July 2013.
- (14) P.B. de Selding, “ViaSat eyes late-2016 launch for next-gen broadband sat,” pp. 21, Space News, Sept. 14, 2015.
- (15) “超高速インターネット衛星(WINDS)特集号,” 情報通信研究機構季報, vol. 53, no. 4, pp. 1-118, 2007.
- (16) N. Katayama, N. Yoshimura, T. Takahashi, and M. Toyoshima, “Conceptual design of high-speed satellite communication equipment for ASV,” Proc. 21st Ka and Broadband Communications Conference, Oct. 2015, http://proceedings.kaconf.org/papers/2015/ka15_5.pdf
- (17) T. Takahashi, N. Yoshimura, A. Akaishi, N. Katayama, M. Toyoshima, N. Kadowaki, S. Ishibashi, T. Fukuda, and H. Yoshida, “The tele-operation experiment of the hybrid remotely operated vehicle using satellite link,” Proc. OMAE2015, no. OMAE2015-41645, May 2015.
- (18) T. Jono, Y. Takayama, K. Shiratama, I. Mase, B. Demelenne, Z. Sodnik, A. Bird, M. Toyoshima, H. Kunimori, D. Giggenbach, N. Perlot, M. Knapek, and K. Arai, “Overview of the inter-orbit, and the orbit-to-ground lasercom demonstration by OICETS,” Proc. SPIE, vol. 6457, pp. 645702-1-645702-10, 2007.
- (19) 秋岡眞樹, 高山佳久, 小山善貞, 三宅 明, 山田 守, “超小型

衛星 SOCRATES ミッションについて,” 第 57 回宇科連講演集, no. JSASS-2013-4001, 2013.

- (20) <http://www.nasa.gov/lade>
- (21) <http://www.o3bnetworks.com>
- (22) <http://oneweb.world>
- (23) <http://spacenews.com/spacex-opening-seattle-plant-to-build-4000-broadband-satellites/>
- (24) <http://www.theguardian.com/technology/2015/jul/31/facebook-finishes-aquila-solar-powered-internet-drone-with-span-of-a-boeing-737>
- (25) <https://www.google.com/loon/>

(平成 27 年 10 月 30 日受付 平成 27 年 11 月 25 日最終受付)



かどわかき なおと
門脇 直人 (正員:フェロー)

1984 東北大学大学院工学研究科修士課程了, 同年三菱電機株式会社入社, 1986 郵政省電波研究所(現情報通信研究機構:NICT)入所. 1990~1991 豪州 AUSSAT 社客員研究員. 2004~2006 ATR 適応コミュニケーション研究所. その後 NICT ワイヤレスネットワーク研究所長を経て, 現在, 同機構執行役/経営企画部長. 博士(情報科学).