

衛星通信機器の高速化に向けた 研究開発動向

Recent R & D for High Speed Data Transmission System for Satellite

荒木智宏 稲岡和也 田島成将 島田政明

Abstract

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では地球観測衛星の高性能化に対応するため、観測データ伝送システムの高速化を進めている。衛星からの直接データ伝送系及び衛星間通信の動向を述べるとともに、実運用間近の X バンド 16 Quadrature Amplitude Modulation (16QAM) 変調器、研究中の 2 Gbit/s 以上の超高速システムの紹介を行う。

キーワード：衛星通信、高速化、QAM、X バンド、Ka バンド

1. はじめに

地球観測衛星 (Earth Observation Satellite, 以下 EOS) には、大別して地球全体を比較的粗い分解能で観測するものと、光学観測若しくはレーダ観測にて、1 m 以下の高い分解能で地表を観測するものが存在する。宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, 以下 JAXA) では、陸域観測衛星 (Advanced Land Observing Satellite, 以下 ALOS) シリーズが後者に該当する。

ALOS シリーズは、単に高分解能で地表を観測するのではなく、地図作成・地域観測・災害状況把握・資源探査といった幅広い分野で利用されるデータを取得するため、広い観測幅を併せて実現し、極力短時間で地球全体の撮像を行わなければならないミッション要求を有している⁽¹⁾。このため光学センサを例にとると、「だいち」(ALOS, 2006 年打上げ, 2011 年運用終了) では、光学センサ (PRISM) は分解能 2.5 m で観測幅 70 km、後継機の ALOS-3⁽²⁾ では、分解能 0.8 m で観測幅 50 km という性能を有している。ALOS-3 の仕様は、高分解能を有する米国の Ikonos⁽³⁾ の分解能/観測幅 0.82 m/11.3 km, GeoEye1⁽⁴⁾ の 0.41 m/15.2 km, あるいはフラ

ンスの Pleiades⁽⁵⁾ の 0.7 m (地上処理にて 0.5 m)/20 km に比べると、非常に広い観測幅であり、世界的に見てユニークなものである。

ALOS シリーズの高分解能と広い観測幅による地球全体の撮像を行うミッション要求より、衛星上で膨大な観測データが発生する。圧縮技術 (一例として、ALOS/PRISM では JPEG) を駆使し圧縮を行っても、ALOS-3 では毎日 1 TByte を超えるデータが発生する。この大容量データを極力遅滞なく地上局に伝送し、処理する必要がある。

観測センサが有意義な観測データを多量に取得したとしても、地上に伝送できなくては無意味である。よって、EOS の成否は高速データ伝送の実現と MDHS の高性能化に強く左右される。

そこで、JAXA では、主として ALOS シリーズの高性能に伴う観測データの大容量化に対応するため、図 1 に示す、ミッションデータの記録・再生を行うミッションデータ処理系 (Mission Data Handling System, 以下 MDHS), EOS から地上局に直接データを送信する直接データ伝送系 (Direct Transmission, 以下 DT), 静止軌道のデータ中継衛星を介して地上局にデータを送信する衛星間通信系 (Data Relay and Communication, 以下 DRC) から構成される、ミッションデータ伝送システム (図 1) の高速化を進めている。

本稿では、このうち DT の動向を中心に解説し、DRC 及び MDHS の動向についても紹介する。

荒木智宏 正員 独立行政法人宇宙航空研究開発機構研究開発本部
E-mail araki.tomohiro@jaxa.jp
稲岡和也 正員 独立行政法人宇宙航空研究開発機構研究開発本部
田島成将 島田政明 独立行政法人宇宙航空研究開発機構研究開発本部
Tomohiro ARAKI, Kazuya INAOKA, Members, Yoshiyuki TASHIMA, and Masaaki SHIMADA, Nonmembers (Aerospace Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency, Tsukuba-shi, 305-8505 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.96 No.4 pp.274-279 2013 年 4 月
©電子情報通信学会 2013

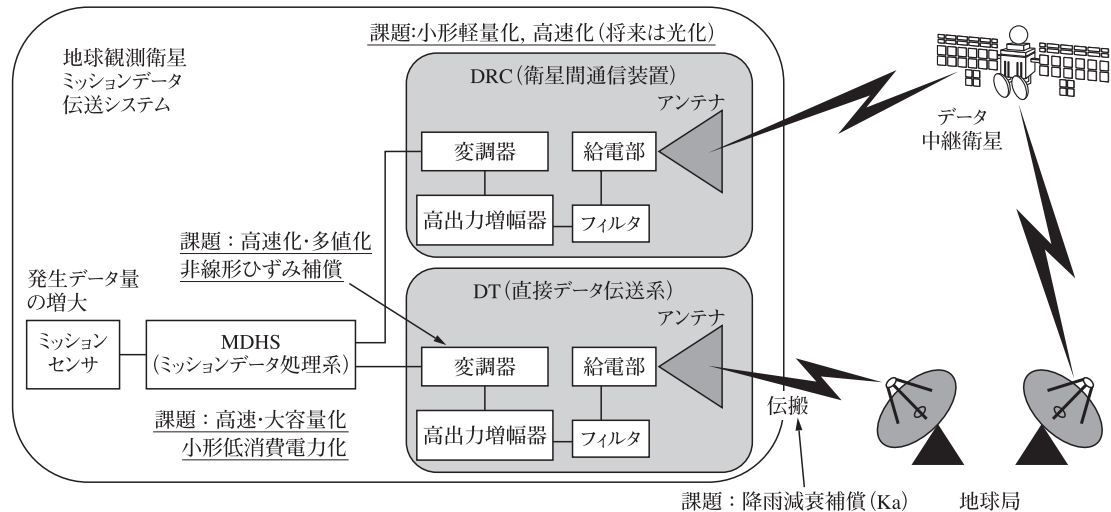


図1 ミッションデータ伝送系の概要と技術的課題

2. JAXA での研究開発動向

ミッションデータ伝送システムの高速度の一環として、ALOS 後継の L バンド合成開口レーダ (SAR) 搭載衛星である陸域観測衛星 2 号 (ALOS-2)⁽⁶⁾ (2013 年度打上げ予定) への搭載に向け、従来の QPSK 変調方式に加えて、X バンド (8 GHz 帯, 帯域 375 MHz) で 800 Mbit/s, 1 キャリヤの DT を実現するために必要な 16 QAM 変調方式を具備した X バンド高速多モード変調器 (XMOD) を開発した^{(7), (8)} (3.1 参照)。

また、次のステップとして DT の更なる高速化を目指し、2010 年度から 2 Gbit/s 以上の超高速変調器の研究開発を実施している^{(9), (10)}。本研究は、国際電気通信連合 (ITU) の無線通信規則において地球探査衛星サービスに分配された X バンドでは、XMOD からの更なる高速化は困難であると判断し、Ka バンド (26 GHz 帯, 帯域 1.5 GHz) への移行を前提として研究を進めている。これらについては、3.2 で詳述する。

EOS→地球向けの DT では、特定の地球局の上空を通過する際にしかデータ伝送ができず、一般に極軌道の EOS が日本国内の地球局と通信できるのは 1 日 4 回、合計 30 分程度である。この時間内では後述の 2 Gbit/s の DT が実現されたとしても約 450 GByte/日しか伝送できないため、観測データ量が多い ALOS シリーズでは、8~9 時間の通信可能時間を確保できる静止軌道のデータ中継衛星を用いた衛星間通信の使用が必須であ

■ 用語解説

デジタルプレディストーション方式 高出力増幅器で発生するひずみに対して、逆のひずみを事前に加えておいて系全体でのひずみを低減するものである。

る。

現在運用中のデータ中継衛星「こだま」(DRTS) は、Ka バンド (地球周回衛星→DRTS 26 GHz 帯, DRTS→地球局 20 GHz 帯) 回線で最大 277.52 Mbit/s (変調方式 QPSK) のデータ中継が可能であり、ALOS, ALOS-2 から 277.52 Mbit/s のミッションデータ伝送を中継する衛星間通信能力を有している⁽¹¹⁾。また、計画中の DRTS の後継機システムと ALOS-3 の組合せでは、800 Mbit/s (変調方式 QPSK, 400 Mbit/s×2 キャリヤ) の衛星間通信によるミッションデータ伝送を実現する予定である⁽¹²⁾。なお、図 2 に示す ALOS-2 搭載の DRC⁽¹³⁾ では、図 3 に示す ALOS DRC から ALOS-2 DRC への顕著な変化として、ALOS DRC では、軽量化のために、回線設計・機器構成の見直し等を行った結果、ALOS-2 DRC では、ALOS DRC に比べて、小形・軽量化 (約 160 kg→50 kg 以下)、低消費電力化 (約 280 W→約 130 W) を実現する。

なお、ALOS-3 の DRC では、Ka バンドの 2 キャリヤ化による、800 Mbit/s のミッションデータ伝送を実現するため、ALOS-2 DRC と比較して 10 kg 程度以上の質量増大と 100 W 以上の消費電力増加が見込まれる。

また、Ka バンド衛星間通信の Gbit/s 級への高速化は、大幅な消費電力増大を招く。そのため、ALOS-2/3 に比べて更にデータ量が増大すると予想される将来の ALOS シリーズ衛星に備え、JAXA では、小形軽量化・低消費電力化に有利なため Gbit/s 以上の高速通信に適する光 (レーザー) を用いた衛星間通信 (光衛星間通信) の実用化が必要と考えている。光は雲を透過できず、衛星から地上への光通信の実現には多くの課題があるため、当面は、DT には Ka バンドを用い、高速の衛星間通信には光を用いる考えである。指向性の高いレーザーを用いることにより必要となる高精度の捕捉追尾技術の

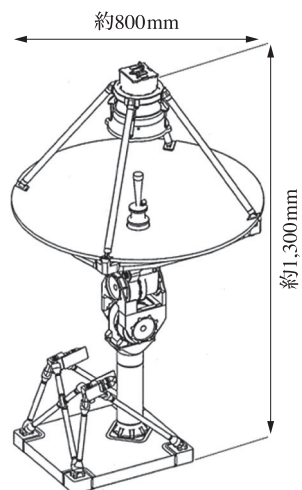


図2 ALOS-2/3 搭載 DRC (外観)

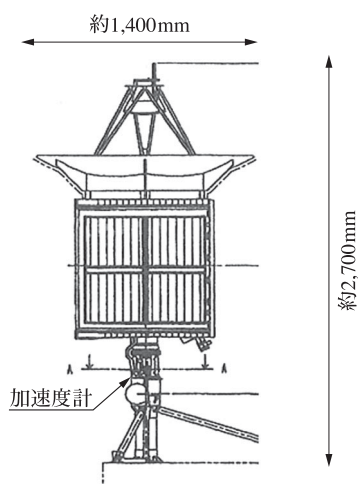


図3 ALOS-搭載 DRC (外観)

軌道上実証のため、2005年に打ち上げられた「きらり」(Optical Inter-orbit Communications Test Satellite, OICETS)において、欧州宇宙機構 (ESA) の Artemis 衛星の間での捕捉追尾、双方向通信を成功させた^{(14)~(16)}。OICETSの成果を受け、光衛星間通信を実用化するための研究を行っている^{(17), (18)}。

既述のように、EOS→地球向けのDTは、特定の地球局の上空を通過する際にしか通信ができない。DRTSによる衛星間通信も、EOSがDRTSから見て地球の反対側にいるときには通信ができない。そのため、一般に観測データは、センサで取得後一旦MDHS内のデータレコーダ部に記録し、DT若しくはDRCでデータ伝送が可能なタイミングでMDHSから再生する運用を行う。このため、MDHSはセンサから出力される高速のミッションデータを記録し、保持し、DT/DRCでの通信を行う際に、DT/DRCに対して高速でデータ再生を行う必要がある。

ALOSで64 Mbit SDRAMを用いたデータレコーダ部(記憶容量96 GByte)を開発・搭載し、これに続いて512 Mbit SDRAMを用いたデータレコーダ部を開発し、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)と第一期水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W1)に搭載した。

今後の衛星に搭載するため、より集積度の高いDDR3-DRAMないしはフラッシュメモリを使用した小形・低消費電力で高速・大容量のデータレコーダを有するMDHSを研究・開発している⁽¹⁹⁾。

3. 高速伝送技術

3.1 XMODの開発

DTにおいては、地球観測衛星における取得データ量の増大に 대응するため、各国で高速化が進められている。図4に、主要な世界のDT開発状況を示す。

本節では、JAXAが開発を行った、16 QAM変調方式で800 Mbit/sのDTを実現する、XMODについて解説する。更に3.2で、2020年頃の実用化を目指す2 Gbit/s級DTに向けた研究について解説する。

開発したXMODの外観を図5に、主要開発結果を表1に示す。本XMODは内部冗長構成となっている。16 QAM 800 Mbit/sの通信モードのみならず、QPSK 400 Mbit/s、200 Mbit/sの通信モードも有している。なお、衛星搭載用変調器として、16値変調の実現は、我が国が世界に先んじている。

また、XMODを開発するにあたり、宇宙用として以下の技術をJAXAとしては初めて適用している。

- ① SRAM型FPGA⁽²⁰⁾の使用。多値・デジタル変調を極力小形な搭載用変調器として実現するため、現状で使用可能な最も高速大容量の宇宙用FPGAを採用した。
- ② SRAM型FPGAの放射線によるビット反転の対策として、プログラム領域の定期的な上書きを行うスクラビング機能、放射線エラー (Single Event Functional Interrupt) 時に実施するFPGA再構成 (リコンフィギュレーション) 機能、三重冗長化&多数決判定手法を適用し、耐放射線性評価で対策の効果を確認した。
- ③ 使用したFPGAは、Column Grid Array (CGA)型1,140 pinの高密度実装部品であるためFPGAと基板間の熱応力ひずみが実装上の課題であった。衛星搭載用として、CGA実装工程を確立し、長時間熱サイクル試験による寿命評価で良好な結果を得た。
- ④ XMODの前段のMDHSとの高速データI/Fには、Wizard Link⁽²⁰⁾と呼ばれる2.5 Gbit/s高速シリ

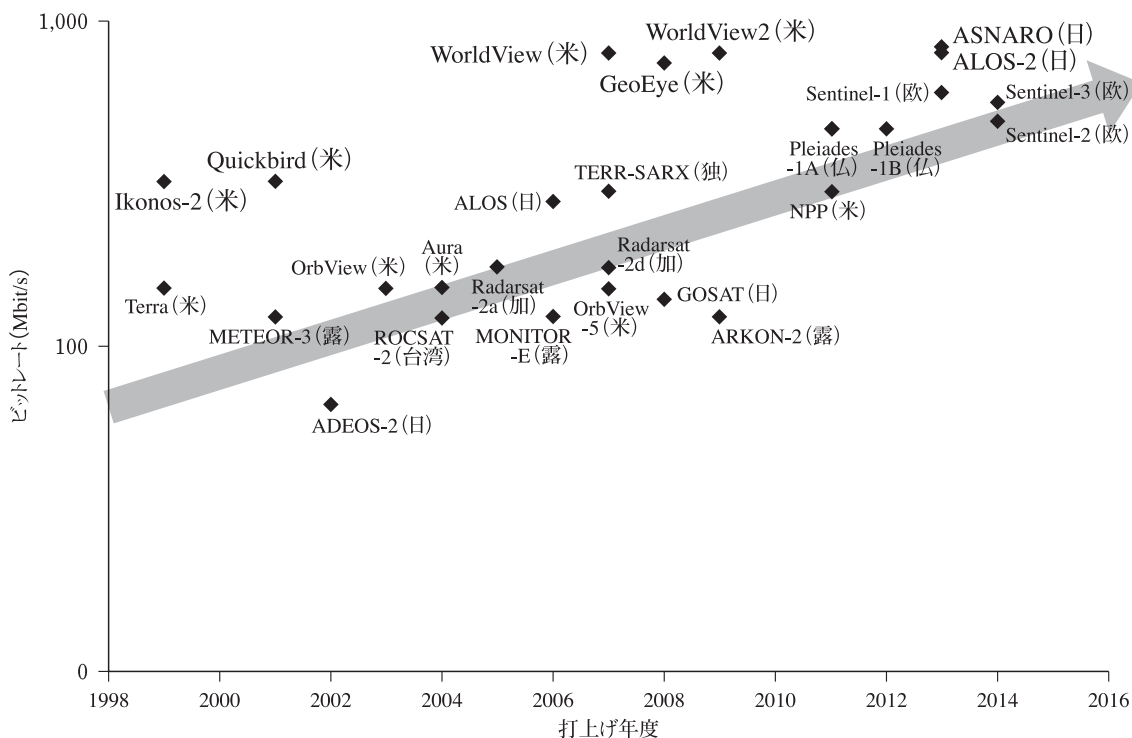


図4 世界のDT開発状況 2012年度以降は、想定。WorldView, GeoEyeは、偏波多重方式。ALOS-2は1偏波。



図5 XMOD (衛星搭載品) 外観写真

表1 XMOD 主要開発結果

項目	開発結果
変調方式 /通信レート /帯域幅	16 QAM/800 Mbit/s/241 MHz QPSK/400 Mbit/s/240 MHz QPSK/200 Mbit/s/123 MHz
出力電力	+5.1 dBm
ナイキストフィルタ	ルートコサインロールオフ特性 ロールオフ率0.4
外部 I/F	MDHS: Wizard Link ⁽²⁰⁾ テレメトリ/コマンド: EIA-422 RF出力: 同軸コネクタ
消費電力	20W
動作電圧	+30~53 V
動作温度	-20~+55°C
質量・寸法	2.83 kg 277×106×186 mm

アル伝送方式⁽²¹⁾を採用した。Wizard Linkの伝送評価試験及び放射線試験を実施し、必要な性能を有することを確認した⁽²²⁾。

XMODの開発に関する詳細は、文献(7)、(8)を参照頂きたい。

3.2 次世代高速伝送システム^{(9)、(10)}

図4のトレンドから、2020年頃には2 Gbit/s程度の高速DTが必要になると予想される。また、その後も更なるDTの高速化が必要になると考えている。

前記XMODからの更なる高速化として、Kaバンド

(26 GHz帯)による2 Gbit/s級DTへの高速化、及び光衛星間通信に対応するDRTS→地球局20 GHz帯回線の高速化を目的として、次世代高速伝送システムの研究を行っている。

高速化にあたっての主な課題としては、①2 Gbit/s以上のデジタル高速変調回路の実現性評価、②高速化に伴う送信電力の増大に際し、電力増幅器を飽和点に近い領域で効率的に動作させるには、非線形ひずみ補償が必要となり、その非線形ひずみ補償技術の実現性評価、③Xバンドからより広帯域のKaバンドへの移行に伴

う降雨減衰対策，が挙げられる。

課題①について，2 Gbit/s からの更なる高速化が可能な方式として，XMOD で採用した 16 QAM から更なる多値化の変調方式を採用することとした。周波数効率向上の観点で 64 QAM シングルキャリアの試作を行い，併せて XMOD で使用した部品で 2 Gbit/s を実現可能な方式として 32 QAM デュアルキャリアの 2 方式の試作を行った。試作の結果，32QAM デュアルキャリア方式，64 QAM シングルキャリア方式では共に良好な結果を得ており⁽¹⁰⁾，搭載化可能と考えている。

課題②については，フィードバック方式，フィードフォワード方式，プレディストーション方式の比較を行い，トレードオフの結果，回路規模が小さいこと，広帯域化が可能なことから，フィードバックなしのデジタルプレディストーション方式^(明語)を採用し，試作によるハードウェア実現性評価を行った。非線形増幅器と組み合わせ，非線形ひずみ補償回路の補償効果の試作評価を行い，入力レベルに対して逆ひずみを加えることで補正後は増幅器出力レベルが線形出力になっていることを確認した^{(9), (10)}。

課題③については，Ka バンド回線で予想される降雨減衰量の見積りと複数の降雨減衰補償方式を検討した。X バンドはほとんど降雨の影響を受けないが，Ka バンドでは特に低仰角で降雨の影響を強く受け，例えば，JAXA 地球局が設置されている千葉県勝浦では，Ka バンドの降雨減衰量は ALO-S2 の軌道を想定すると，不稼働率 1%，仰角 5° 以上の条件で約 12 dB になる^{(23), (24)}。

降雨減衰の補償方式としては，VCM 方式，強力な誤り訂正符号 (LDPC: Low Density Parity Check) の採用が考えられ，それぞれの特徴は下記のとおりである。

① VCM (Variable Coding and Modulation) 方式

天候によらず，地球局での衛星仰角を基準に，低仰角では降雨時でも通信可能な QPSK 変調方式を用い，高仰角では降雨減衰量は減少するため高速通信レートが可能な多値変調方式 (32 QAM, 64 QAM) に切り換える。多値変調方式において降雨減衰補償が必要なのは低仰角時であり，低仰角時に補償が不要な QPSK を使用し降雨減衰対策と総スループット量増大を同時に実現する。

② 誤り訂正能力の高い符号 (LDPC) の採用

従来のリードソロモン符号より高性能を実現できる LDPC 符号を用いた接続符号を採用する。

4. ま と め

JAXA における衛星通信機器の高速化に向けた研究開発の必要性と動向を概説し，ALOS-2 に搭載され打上げ間近の XMOD の機能性能，開発結果の概要を述べ

た。また，研究中の 2 Gbit/s 以上を狙う第 2 世代高速通信システムの方向性について紹介した。

誌面の都合上，それぞれの詳細は述べられないので，詳細は参考文献を御覧頂ければ幸いである。

文 献

- (1) http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/index_j.html
- (2) H. Imai, H. Katayama, M. Takasaki, T. Tadano, Y. Hatooka, S. Suzuki, and Y. Osawa, "Outline of advanced land observing satellite-3 and its instruments," Proc. SPIE, vol. 8176, 81760R, 2011.
- (3) <http://www.spaceimaging.co.jp/product-service/about-IKONOS/ta%20bid/123/Default.aspx>
- (4) http://www.spaceimaging.co.jp/product-service/optical_satellite/aboutGeoEye1/tabid/99/Default.aspx
- (5) <http://www.astrium-geo.com/jp/2032-pleiades->
- (6) S. Suzuki, Y. Kankaku, and Y. Osawa, "Development status of PALSAR-2 onboard ALOS-2," Proc. SPIE, vol. 8176, 81760Q, 2011.
- (7) K. Inaoka, M. Shirakura, T. Sunaga, M. Shimada, and N. Takata, "Development of an X-band multi-mode high speed modulator-design and development test results of engineering model-," 28th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), no. 2011-j-10, Okinawa, Japan, Oct. 2011.
- (8) 稲岡和也，須永輝巳，稲森一郎，白倉政志，島田政明，高田昇，"高速マルチモード変調器 (XMOD) の開発—機器概要と部分開発モデル試験結果—," 信学技報, SANE2010-43, pp. 157-162, June 2010.
- (9) 田島成将，稲岡和也，荒木智宏，白倉政志，島田政明，"地球観測衛星用超高速データ伝送システムの一検討," 信学技報, SANE2012-21, pp. 7-11, June 2012.
- (10) K. Inaoka, M. Shirakura, Y. Tashima, T. Araki, and M. Shimada, "Study on ultra-high-speed transmission system for earth observation satellites," Proceedings of 18th Ka and Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference, PROVINCES II, KA 16 Earth Observation Payloads & Components, pp. 563-570, 2012.
- (11) 篠原幸一，"データ中継衛星「こだま」(DRTS)の衛星概要及び実験運用成果について," 信学通誌, no. 3, pp. 45-53, Dec. 2007.
- (12) Y. Sudo, H. Kohata, E. Tomita, and T. Hanada, "Ka-band high data rate transmission tests for DRTS follow-on mission," 29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2011), no. AIAA 2011-8016, pp. 117-123, Nov. 2011.
- (13) 荒木智宏，稲岡和也，田島成将，島田政明，鳩岡恭志，大澤右二，"ALOS-2 ミッションを支える高速データ伝送システム (その 1) 衛星間通信サブシステム," 第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演集, no. 1K11 (JSASS-2012-4215), 2012.
- (14) http://www.jaxa.jp/projects/sat/oicets/index_j.html
- (15) 日本航空宇宙学会誌 特集「光衛星間通信実験衛星 (OICETS) 「きさらり」の開発と軌道上実験, vol. 55, pp. 8-15, 37-42, 102-107, 2007.
- (16) T. Jyono, 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 orbit-to-ground laser communication demonstration by OICETS," Proc. SPIE, vol. 6457, 645702, 2007.
- (17) 山川史郎，城野 隆，"光衛星間通信技術：将来の宇宙通信インフラストラクチャの構築," レーザー研究, vol. 39, no. 1, p. 17, 2011.
- (18) T. Hanada, S. Yamakawa, and H. Kohata, "Study of optical inter-orbit communications technology for next generation space data-relay satellite," Proc. SPIE, vol. 7923, 79230B, 2011.
- (19) 関 妙子，市川 倫，阿部まみ，板尾彰二，佐々木 通，"フラッシュメモリを用いた宇宙不揮発データレコーダ," 2012 信学総大, no. B-2-55, p. 288, March 2012.
- (20) http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds653.pdf
- (21) <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlk2711-sp.pdf>
- (22) 稲岡和也，須永輝巳，稲森一郎，白倉政志，島田政明，高田

昇, “X帯高速マルチモード変調器の開発—宇宙用高速シリアルライザ/デシリアルライザ (SerDes) の適用評価—” 2010 信学ソ大, no. B-2-10, Sept. 2010.

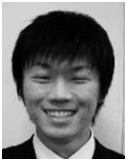
- (23) 電気通信技術審議会答申 諮問第6号, “通信衛星3号等の中継器の効率的利用のための技術的条件及び地球局の標準化,” pp. 192-218, Sept. 1986.
- (24) ITU-R Recommendations, P. 618-10 “Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-space Telecommunication Systems,” 2009.

(平成24年12月6日受付 平成24年12月27日最終受付)



あらき ともひろ
荒木 智宏 (正員)

平2慶大・理工・電気卒。平4同大学院修士課程了。同年宇宙開発事業団(現宇宙航空研究開発機構)入社。光衛星通信技術の研究、通信・データ処理機器の研究開発等に従事。



いなおか かずや
稲岡 和也 (正員)

平20 阪府大大学院理学系研究科修士課程了。同年宇宙航空研究開発機構入社。宇宙搭載用の通信・データ処理機器の研究開発等に従事。



たしま よしゆき
田島 成将

平17九大・理・地球惑星科学卒。平19同大学院修士課程了。同年宇宙技術開発株式会社入社。衛星の実験運用業務に従事。平23から独立行政法人宇宙航空研究開発機構に出向。通信・データ処理機器の研究開発等に従事。



しまだ まさあき
島田 政明

昭53 郵政省電波研究所(現独立行政法人情報通信研究機構)入所。ミリ波・準ミリ波帯衛星通信の研究、技術試験衛星VI型「きく6号」搭載用中継器の開発に従事。平8宇宙開発事業団(現独立行政法人宇宙航空研究開発機構)入社。通信放送技術衛星「かけはし」、技術試験衛星VIII型「きく8号」、超高速インターネット衛星「きずな」の通信ミッションの開発に従事。現在、通信・データ処理グループ勤務。

