

2 研究活動 ネットワーク基盤技術

2.3 宇宙通信システム技術

2.3.1 概要

第1期中期計画では、超高速衛星通信システムの研究開発と宇宙通信システム基盤技術の研究開発を進めた。この期間には、技術試験衛星 VIII 型「きく8号」(ETS-VIII) 及び、超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS) の開発を行った。また、光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS) と光地上局との間で双方向光通信実験に世界で初めて成功した。

第2期中期計画では、スペース・インフォネットワーク技術の研究開発と通信を支える宇宙基盤技術の研究開発を進めた。この期間には、WINDS の打上げ及び WINDS を用いた世界最高速の1.2 Gbps 衛星通信技術の実証を行い、東日本大震災の災害対策支援として WINDS による臨時衛星回線を提供した。衛星搭載通信機器高度化の研究においては、将来のデータ伝送系に必要な10 Gbps クラスのミリ波・光衛星通信技術の基礎技術研究を進めた。

第3期中期計画では、ブロードバンド衛星通信システム技術の研究開発と超大容量光衛星／光空間通信技術の研究開発を進めた。ブロードバンド衛星通信システム技術の研究開発としては、WINDS をテストベッドとした実証実験を実施し、数十 Mbps を実現する航空機等搭載用モバイル衛星通信地球局の開発や、海洋資源調査等

の社会貢献プロジェクトに参画し、研究開発から実用システムへの展開を図った。後者の超大容量光衛星／光空間通信技術の研究開発では、数十 Gbps を有する光通信インフラの要素技術を確立し、小型衛星搭載用の小型光トランスポンダを開発し、小型衛星による光通信実験及び量子鍵配送に関する基礎実験の宇宙実証を目指した。

2.3.2 日韓高速衛星通信実験(平成14年)

日韓郵政大臣会合で合意された「高度情報通信に関する共同実験の推進」の中の重要課題とされた日韓高速衛星通信実験として、韓国電子通信研究院(ETRI) と共同で平成14年日韓共催ワールドカップにおいて高精細パノラマ映像を日本側、3次元高精細映像伝送を韓国側が担当し、デモンストレーション実験を実施した(図2.3.1)。

- ① KOREASAT-3 で、Ka バンドのトランスポンダ(155 Mbps) を使用した。
- ② ハイビジョン映像を横に3面つなぎ合わせた高精細パノラマ映像を伝送し、日本韓国両国のスタジアムの試合を、バーチャルスタジアムとして遠隔地に再現する技術実証を確立した。



図2.3.1 高精細パノラマ映像のデモの様子(パシフィコ横浜の国際メディアセンターにて)

2.3.3 技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」(ETS-VIII)による高度移動体衛星通信実験

平成18年12月に打ち上げられた ETS-VIII は、大型展開アンテナを搭載し、携帯電話程度の大きさの端末で移動体衛星通信を実現することが主目的で、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と NICT が共同開発した。アンテナの展開には成功したが、S バンド受信機の低雑音増幅器 (LNA) の電源が入らない不具合があり、JAXA、製作メーカー及び NICT で構成する「きく8号通信系ミッション機器不具合原因究明合同チーム」を設置し、約1年をかけて不具合原因を特定した。不具合原因は、DCDC コンバータからの電流を各 LNA へ分配するダイオードの取り付け部に導電性異物が入り短絡したことによるものであった。このため受信系は、時刻比較ミッション用の小型アンテナで代用し、携帯端末側も外付けの70 cm アンテナや地上中継装置を使用し、失われた機能を補填して実験を行える体制を整えた。送信系は問題なく動作し、大型展開アンテナに関する軌道上での特性を測定した。基本性能評価及び地球局基本性能評価等を行い、航空機搭載合成開口レーダ (Pi-SAR2) による観測データを、航空機上から衛星 (ETS-VIII) 経由で、地上へと伝送する実験に成功した。これにより災害時に迅速に対応し、観測追加の指示を受けるなどインタラクティブな観測運用が期待される (図2.3.2)。衛星センサネットワーク実験では5機関 (独立行政法人国立高等専門学校機構高知工業高等専門学校、国立大学法人東京大学地震研究所、日立造船株式会社、JAXA、NICT) の共同研究により津波の早期検出を目指した海上ブイからのデータ伝送実験を実施し、将来の津波早期検出に利用可能なことを示した (図2.3.3)。

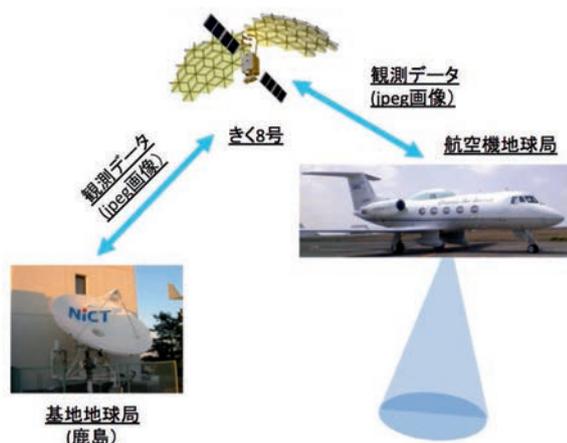


図2.3.2 ETS-VIIIによる観測データ伝送システム

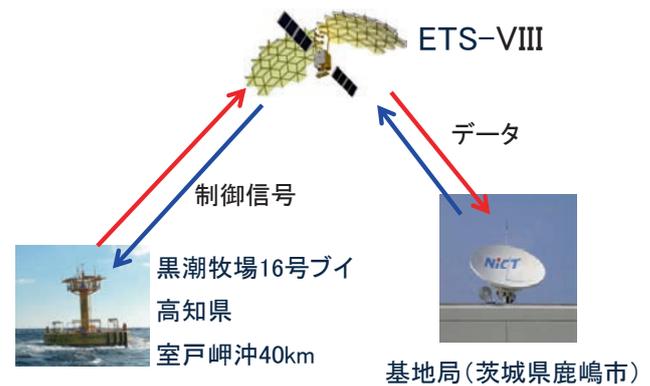


図2.3.3 ETS-VIIIを用いた海上ブイからのデータ伝送実験

2.3.4 超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS)

平成20年2月に打ち上げられた WINDS は、日本及びアジア・太平洋地域におけるデジタルデバイド解消、災害時の通信回線バックアップ、及び超高速衛星回線の提供のための基本技術実証を目的に開発された衛星である。WINDS は、JAXA と NICT が共同で開発し、NICT は衛星搭載ベースバンド交換機の開発を担当した。地上施設に関しては、1.2 Gbps/622 Mbps 高速モデムや5 m アンテナの大型地上局及び2.4 m アンテナの超高速小型地球局 (車載局) の開発を NICT が担当した。1.2 Gbps/622 Mbps TDMA 方式通信装置の改良により、622 Mbps × 2波伝送及び衛星通信では世界最高速の1.2 Gbps 多地点衛星通信を達成した。多地点 SS-TDMA 実験を実施するために、可搬型 SDR-VSAT を整備し、大型局、車載局との3地点間での622 Mbps 通信実験を実施し基本特性を取得した。WINDS を使用した実験では、NHK と共同でスーパーハイビジョン伝送実験 (札幌テレビ塔からの映像を研究開発テストベッドネットワーク (JGN) と WINDS 経由で NHK 放送技術研究所へ伝送) を実施し、伝送された映像を技研公開来場者に公開した。また、国立天文台等と共同で平成21年7月の皆既日食の映像を硫黄島から WINDS とインターネット経由で配信する実験を実施した。その他にも外科手術の立体ハイビジョン映像伝送実験や立体4K 映像伝送実験などを実施してきた。災害時の衛星通信に関しては、各地防災訓練に参加するとともに、平成22年10月に開催された APEC 情報通信大臣会合での大規模地震発生を模擬した実験などを実施している。平成23年3月

の東日本大震災に際しては、東京消防庁の支援要請に基づき、WINDS を用いて東京消防庁作戦室(大手町)と緊急消防援助隊指揮支援本部(気仙沼市)との円滑な情報共有を実現した(図2.3.4)。また、防衛省からの支援要請に基づき物資輸送拠点となった陸上自衛隊松島基地と入間基地を WINDS 回線で接続し、ネットワーク環境を提供した。東日本大震災後には WINDS を使用して世界最高性能の移動体地球局として24 Mbps での通信が可能な小型車載地球局(図2.3.5 (a))及び船舶地球局を開発した。平成25年2月には、災害時等に専門家でも運用可能なフルオート可搬型地球局(図2.3.5 (b))及びハブとなり得る大型車載地球局を開発した。これらの地球局を用いて各地で行われる防災訓練等に参加するとともに、様々な機関と意見交換を行い、また次期衛星の検討を実施した。平成25年9～10月に海洋域からのブロードバンド衛星通信の実証を目指し、海洋研究開発機構(JAMSTEC)の海洋調査船「かいよう」からの洋上衛星通信実験を実施し、世界初の陸上からの無人探査機「おとひめ」の遠隔操作実験を実施した(図2.3.6)。

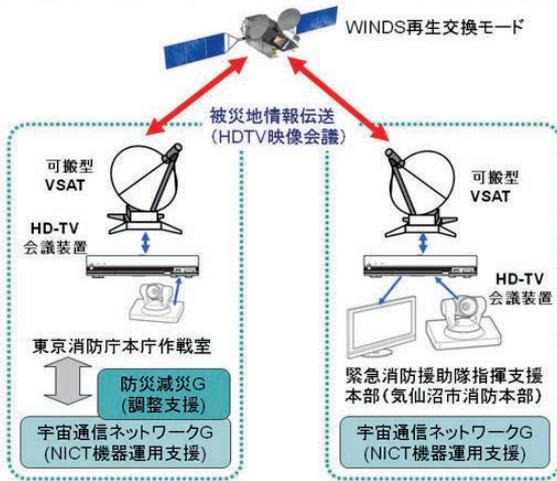


図2.3.4 WINDS を用いた災害対策活動支援システム

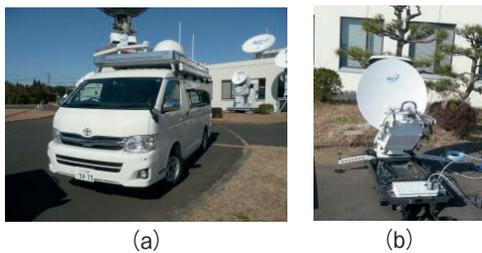


図2.3.5 移動体地球局 (a: 小型車載地球局、b: フルオート可搬型地球局)



図2.3.6 無人探査機「おとひめ」の衛星経由遠隔操作実験

2.3.5 準天頂衛星

準天頂軌道を用いる衛星の軌道保持方法に関する研究や準天頂衛星の通信分野、放送分野、測位分野、地球観測分野への利用に関する研究を実施し、有効性を示した。特に、平成10年に打上げられた通信放送技術衛星(COMETES)が静止化に失敗し、衛星仰角が変化し、仰角80度以上となることがあったため、高層ビルの密集する東京丸の内での衛星伝搬実験を実施し、準天頂衛星の特徴である高仰角によるビルのブロッキングが大幅に改善されるという有利性を証明した。NICTは、これまで衛星が地球に対して描く軌跡(図2.3.7)にちなんで「8の字衛星」という名称を使用していたが、「静止衛星」のようにわかりやすい名称の「準天頂衛星」と命名した。平成11年8月に「準天頂衛星システム検討委員会」を立ち上げ、通信システムに必要な技術、サービス、ビジネスプラン、コンソーシアムの実現の可能性、出資者を調査・検討し、平成11年11月に「準天頂衛星シンポジウム」を開催した。その後、準天頂衛星の実現に向けた働きかけが功を奏し、平成15年に通信・放送・測位の衛星プロジェクトが開始されたが、平成18年には通信・放送が撤退し、測位だけとなり、平成22年9月の準天頂衛星初号機(QZS-1、「みちびき」)の打上げ後、国の研究機関で技術実証実験、民間等で利用実証実験が行われている(CRL(現NICT)、NICTでの開発・実験は「2.16 時空標準技術」を参照)。現在、内閣府では4機の衛星体制による平成30年のサービス開始に向けて、開発・整備が進められている。

プターから撮影した画像情報を、実用衛星 (Superbird) を経由し、消防庁所有の消防・防災通信システムへ伝送し、消防・防災通信ネットワーク (実用システム) への接続性を確認した。ヘリコプター衛星通信システムは商品名「ヘリサット」(図2.3.9)として三菱電機が商品化し、総務省消防庁所有のヘリコプターに導入されたのを始め、各自治体のヘリコプターに導入され始めている。また、ヘリコプター衛星通信システムの技術的条件が定められたことに伴う無線設備規則の整備に協力した。

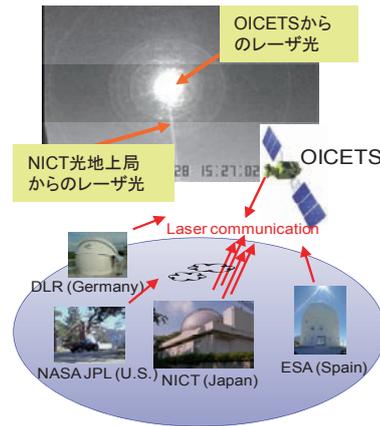


図2.3.10 OICETSによる衛星-地上光通信国際協同実験



図2.3.9 ヘリサットの外観

2.3.8 光衛星通信に関する研究

(1) 光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS)との通信実験

平成17年8月に打ち上げられた OICETS と、NICT 本部の宇宙光通信地上センターに設置した光地上局との間で平成18年3月に双方向光通信実験を実施し、世界で初めて成功した。アップリンク、ダウンリンクとも 10^{-4} ~ 10^{-5} の BER を大気擾乱のもとで達成した。また、世界で初めて衛星の光信号の偏光特性を取得し、宇宙量子鍵配送の基礎データを得た。光地上局の光学的衛星追尾技術を維持・更新・発展させ、OICETS との光通信実験を NICT が主導し、世界の3機関 (NASA/JPL、ESA、DLR) と国際協同実験 (図2.3.10) を実施した。実験では将来の光通信の標準化につながる条件の異なるサイトでの伝搬データを取得し、衛星と地上を結ぶ光回線上の雲による遮蔽特性を衛星画像により評価した。その結果、国内に4局以上の光地上局を配置することで、高い確率で雲の影響を回避できること (ダイバーシチの有効性) を示した。また、ドイツ TerraSAR-X 衛星との光学追尾実験を実施した。

(2) 光衛星通信に関する基礎研究

衛星搭載用光衛星通信機器要素技術の研究開発として、光ファイバ増幅器の宇宙環境適応性試験 (放射線試験、振動試験等) を実施し、宇宙用光ファイバ増幅器の衛星搭載性を確認した。デジタルコヒーレント光受信機を開発し、6 Gbps BPSK 復調を確認した。その後、複数の光変調方式に対応可能なデジタルコヒーレント受信機の地上試験モデルを開発し、3 Gbps、6 Gbps の BPSK 及び6 Gbps の QPSK 復調機能を FPGA を用いて実装し実現した。

空間量子鍵配送に関する研究開発として、平成20年10月に ESA 量子鍵配送実験国際協力の合意により、トピカルチーム会合に参加し、国際協力を推進し、ウィーン大学との共同研究を実施した。また、空間量子鍵配送装置を開発し、平成21年3月に地上実験として1kmの空間量子鍵配送実験を実施した。平成22年10月に空間量子暗号機器による1.37kmの空間量子鍵配送実験をビル間で実施し、大気ゆらぎのデータをシンチロメータにより同時に計測した (図2.3.11)。



図2.3.11 空間量子鍵配送実験 (ビル間1.37km)

地上系アプリケーションとして、光通信信号を $1.5\ \mu\text{m}$ シングルモードファイバーと直接接続し、空間伝送できる超小型空間光通信装置を開発し、平成20年10月に40 Gbpsの光変調信号を32チャンネル波長多重した光信号を伝送することにより、地上の近距離通信で1.28 Tbpsの世界最高速を達成した。また、100 Gイーサネット光空間伝送を達成した。総合伝送速度1.28 Tbpsを達成した超小型光無線通信装置の実用化に向け、精追尾機構に関する設計技術を民間企業等に技術供与するとともに大学や研究機関との共同研究を行った。平成24年2月に数十 Gbpsの高速データ伝送を行う光通信装置を車両に搭載できるよう改造し、走行する車両と地上固定局との見通し間で行う光通信実験を実施した。平成26年3月には、ネットワーク化された光地上局を小金井・沖縄・鹿島に設置し、気象センサデータ等を活用するサイトダイバーシチを技術実証するテストベッド構築を推進した(図2.3.12)。宇宙データシステム諮問委員会(CCSDS)において、宇宙光通信の標準化に関して、今後整備される文書の一つ“Real-Time Weather and Atmospheric Characterization Data”を、NICTがEditorとなり標準化寄与文書として編纂予定である。

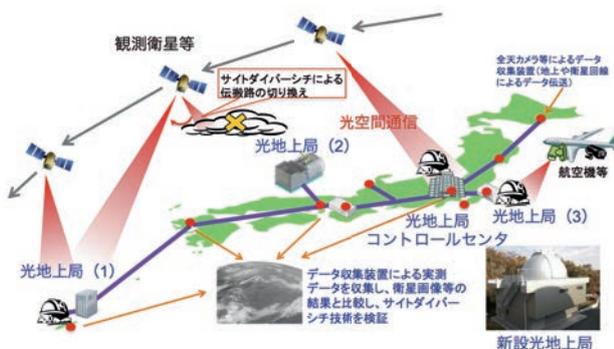
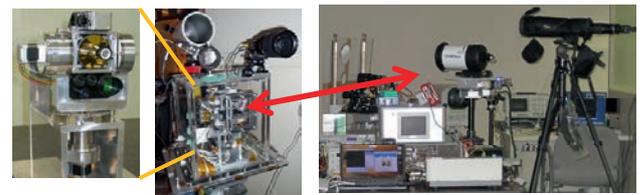


図2.3.12 ネットワーク化された光地上局テストベッド

(3) 小型衛星搭載機器を用いた光通信の衛星実証計画

小型衛星搭載用の小型光トランスポンダ(SOTA)の開発を進め、EFMの宇宙環境試験を行い、符号技術の検討及び地上局大型望遠鏡の新設を進めた。SOTAのEMやEFMと対向する距離約1 km間の光通信試験を行い、大気ゆらぎの影響下における光学的な捕捉追尾機能及び通信機能の動作を確認した(図2.3.13)。平成26年5月に、SOTAを搭載した50 Kg級小型衛星SOCRATESが打ち上げられ、実験も順調に行われている。



SOTAのEFM

対向試験装置

図2.3.13 距離約1km間の光通信試験

2.3.9 再構成通信機

近年の商用衛星の設計寿命は10年から20年程度であり、これまでの衛星搭載中継器は軌道上で搭載機器を変更できないことから、地上の技術革新があった場合、それに追従して新しい機能、性能の追加が難しかった。再構成通信機は自らの構成を変えることが可能で、かつ、仮に機器の一部が故障しても、機能が全て失われるのではなく、残った部分を有効活用し、再構成することによって段階的な能力低下が行える。そこで地上通信網との融合を含めたアプリケーション実験を考慮したEFMの開発を行った。さらに、再構成通信機自体の高機能・高性能化のための広帯域化を目指し、16 APSK-OFDM(3.2 Gbps) RF信号ダイレクト変復調装置を開発した。平成26年4月に10 GbEインタフェースを介して、4K超高精細映像のWINDS衛星映像伝送実験(図2.3.14)に成功した。

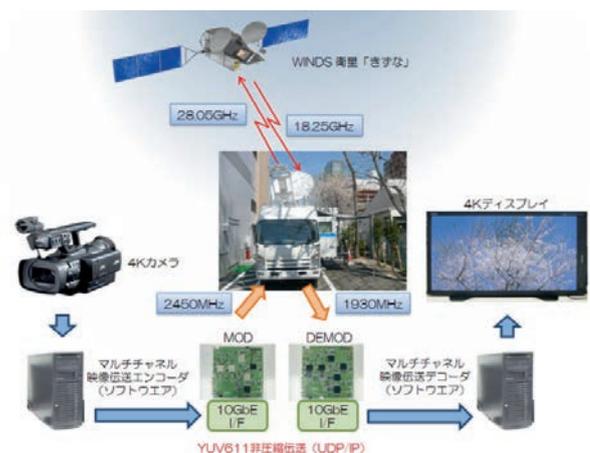


図2.3.14 16APSK-OFDM(3.2Gbps) 4K超高精細映像WINDS衛星映像伝送実験概念図

2.3.10 軌道に関する研究

(1) 軌道上保全技術

故障衛星の遠隔検査技術の研究として、故障したターゲット衛星に接近し、画像情報処理により遠隔検査するための要素技術である衛星遠隔検査用カメラについて、デジタルカメラ及び画像処理装置から成るミッション機器を搭載したマイクロラブサット1号機が、平成14年に打ち上げられた。マイクロラブサット衛星が停波となった平成18年秋までの間に、民生技術を活用して開発した低コストで高性能な搭載計算機とカメラの軌道上遠隔検査の部分的先行宇宙実証に成功した。また、カメラ駆動用2軸機構や制御回路用の動作ソフトウェア・方向制御プログラムなどを開発し、機能試験用カメラの開発を完了した。さらに、ステレオカメラを用いた対象衛星までの距離測定方法を考案し、シミュレーションにより検証した。

(2) 精密軌道管理技術に関する研究

通信衛星の通信信号相関を用いる多地点受動測距方式を開発するとともに、主局における測距機能及び遠隔局を含む2局に拡張したリアルタイム測距機能を開発した。平成22年度に実用衛星通信システムに適用し運用した結果、世界水準の10倍の精度(10 cm)を得るとともに、軌道決定精度1 m (RMS) を実現した(図2.3.15)。これにより実用衛星での通信回線運用条件に合わせ、データ量を削減しても軌道決定精度を維持できることを示した。Cバンド及びKuバンド衛星の通信信号を受信し、衛星の軌道位置を監視する可動基線電波干渉計、Cバンド可搬型小型電波干渉計、光学望遠鏡による静止衛星軌道観測システムを組み合わせ、静止衛星軌道監視の長期的運用を平成12年度より実施した(図2.3.16)。特に混雑が激しい軌道位置に対し、高精度の連続監視データを取得し、衛星運用機関へ情報提供すると共に、平成13年度より望遠鏡画像に基づく静止衛星の位置情報をインターネット上で提供した。

低軌道小型衛星を観測可能とするため、既存の35 cm望遠鏡を改良し、衛星の位置検出精度を向上させ、低軌道衛星の追尾試験及び主焦点部に接続したCCDカメラによる撮像テストを平成25年度より実施した。小型光トランスポンダを用いた軌道決定の実験に向けて、衛星

からのレーザ光の波長に対する補正レンズ系の透過率の調査を実施した。SLR技術やキャリア信号を用いた受動測距による軌道決定技術の開発も継続した。

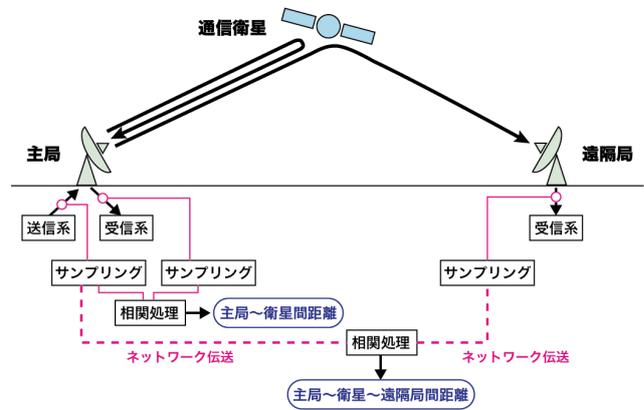


図2.3.15 リアルタイム多地点受動測距の原理

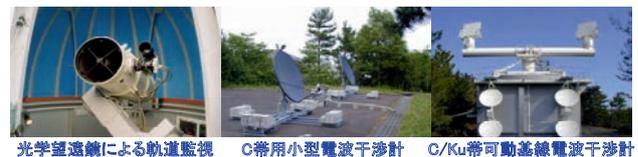


図2.3.16 光学望遠鏡と電波干渉計を組み合わせた軌道監視

2.3.11 適応型衛星通信技術の研究開発

Ka帯の降雨減衰対策の研究開発として、衛星と地球局が連携した適応通信制御による回線稼働率向上のための技術開発を平成19年度から22年度にかけて行った。APAA技術を高度化するスキャンニング型可変スポットビームアンテナ技術の研究を進め、ビーム指向方向やビーム径を可変とする光制御ビーム形成方式を開発した。多値変調技術、誤り訂正符号化技術及び送信電力制御等の組み合わせにより、Ka帯における回線マージンとして30 dB以上を確保し、回線稼働率が99.99%以上を確



図2.3.17 適応型デジタル中継器と対応する地球局装置を接続した総合試験環境の外観

保できることを示した。また、マルチビーム及び偏波多重技術等を総合して、周波数利用効率が10倍以上得られることを示した(図2.3.17)。

2.3.12 ミリ波衛星通信の研究開発

ミリ波帯で広帯域の実時間遅延(TTD)特性を有する光制御アレイアンテナ技術を開発・実証した。光制御アレイアンテナ技術において、レーザダイオード(LD)光源の温度・電流制御による振幅、位相制御を0.1 dB、0.3度の精度で達成した。アンテナ素子毎に光ファイバと変調器を用い、LDの温度と電流を制御する方式の光制御フェーズドアレイアンテナをマイクロ波帯において実証した。ミリ波衛星通信回線の降雨減衰補償技術では、複数のKu帯衛星の降雨減衰データを取得し、衛星軌道ダイバーシティにおいて方位差を40度とれば良いことを明らかにした。

電波利用料(平成17～21年度)により、地上と航空機を40 GHz帯のミリ波を用いた高速リンクを実現するため、航空機搭載アンテナ及び地上アンテナを開発した。航空機-地上局間で100 Mbpsの接続を達成し、インターネット接続を確立した(図2.3.18)。

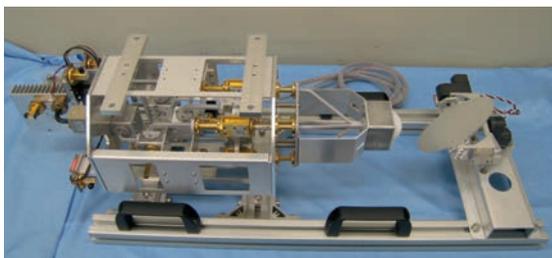


図2.3.18 航空機を捕捉追尾するミリ波帯地上アンテナ