

3-2 成層圏プラットフォームを用いた無線通信システム

3-2-1 成層圏プラットフォームを用いた通信・放送システムの研究開発

3-2-1 R&D Program on Telecom and Broadcasting System Using High Altitude Platform Stations

三浦 龍 大堂雅之

Ryu MIURA and Masayuki OODO

要旨

成層圏プラットフォームを無線中継基地とする通信・放送システムは、その各種アプリケーションの中でも最も経済波及効果が高いものとして期待されている。これを実証するための通信・放送システムの研究開発は、通信・放送機構と通信総合研究所が中心になって進めており、固定通信、移動通信、放送の3分野で評価試験用搭載機器と地上機器の開発が順調に進んでいる。これらのうち固定通信と放送に関する機器は、航空宇宙技術研究所で開発中の定点滞空飛行船への搭載試験の前に、平成14年度に予定されているヘリコプタ及び航空機を用いた事前飛行試験において、その性能を評価する予定である。また、移動通信と放送に関しては、同じく平成14年度に予定されている米国NASAが開発した太陽電池駆動による成層圏無人航空機パスファインダープラスに搭載して高度20 kmでの試験も行われる予定である。本報告ではこれらの進捗状況を報告する。

Telecommunication and broadcasting systems using radio-relay/base stations on board the high altitude platforms are expected to create the largest business market among its possible applications. Telecommunications Advanced Organization (TAO) and Communications Research Laboratory (CRL) is conducting R&D on the telecom and broadcasting system to demonstrate its feasibility. Prototype onboard equipment and ground equipment are being developed on schedule in the fixed, mobile, and broadcasting services. The performance of them will be demonstrated and evaluated in the preliminary flight test planned in 2002 using a helicopter, a jet and a stratospheric unmanned solar plane, Pathfinder Plus, which was developed by NASA, before the flight test using the low-altitude powered test airship being developed by National Aerospace Laboratory.

[キーワード]

成層圏プラットフォーム, 高々度プラットフォーム, 飛行船, ソーラープレーン, マルチビームアンテナ

stratospheric platform, high altitude platform, airship, solar plane, multibeam antenna

1 まえがき

高度約20kmの成層圏に大型の飛行船を停留させ、これを通信、放送、環境計測に用いるための成層圏プラットフォーム開発構想が文部科学省と総務省の省庁連携により進められている[1]~[5]。成層圏プラットフォームを無線中継基地とする通信・放送システムは、その各種アプリケーションの中でも最も経済波及効果が高いものとして期待されている。これを実証するための通信・放送システムの研究開発については、通信総合研究所(CRL)と通信・放送機構(TAO)の横須賀リサーチセンターが中心となり固定通信、移動通信、放送の3分野を中心として評価試験用の搭載機器と地上機器の開発が順調に進んでいる。これらの機器は、飛行船搭載の前に代替機に搭載して事前飛行試験を行い、その性能を評価する予定である。一方、飛行船の開発は航空宇宙技術研究所(NAL)また追跡管制システムの開発についてはTAOの三鷹リサーチセンターが中心となって進められている。日本における研究開発体制を図1に示す。本稿ではこれらのうち、通信・放送システム開発の進捗状況を紹介

する。

2 地上系、衛星系と並ぶ第3の通信インフラの候補

地上無線回線では障害物が多くて電波が遠くに届かず、衛星回線では障害物は少ないものの遠すぎて電波が弱くコストがかかる。そこで今注目されているのが、その間に位置する成層圏と呼ばれる未開拓空間の利用である。飛行船や気球等を比較的気流の安定している成層圏に停留させ、通信システムの中継に使うという発想は古くからある。しかし地上の約1/20の気圧でかつ風速30m以上の風が吹くこともある成層圏に安定に飛行船を停留させるには、電力供給、飛行制御、打ち上げ回収、膜材、安全性等の問題を克服しなければならず、これまで実現した例はない。その一方最近は、携帯電話などの移動通信やインターネットの急速な普及により経済的なブロードバンドと呼ばれる高速無線アクセスシステムへの需要が高まっており、成層圏プラットフォームはこれらのサービスをビジネスユーザや個人ユーザに対して経済的に提供す

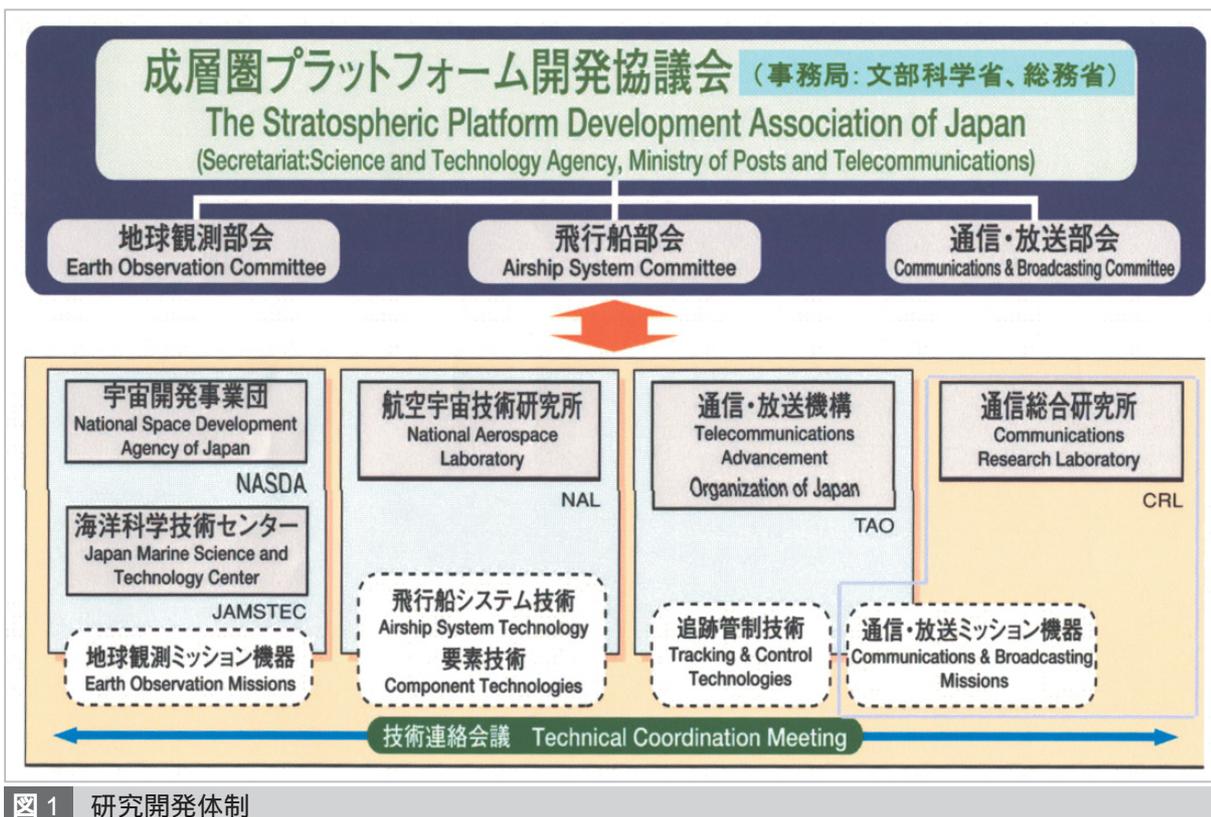


図1 研究開発体制

るインフラになるものと期待されている。図2にサービスのイメージを示す。

成層圏プラットフォームが提供する無線通信システムの特徴は以下に集約される。

- (1) 高い見通し率と少ない伝播遅延時間：成層圏プラットフォームは、高さ2万メートルの高高度タワーとみなすことができる(東京タワーの60倍以上)。すなわち、地上のユーザからみて障害物などに影響されない高い仰角による見直し回線が得やすいため、周波数にもよるが一つのプラットフォームで半径50km～200kmの広い範囲をカバーできる。送信電力が小さくすむため、アンテナや無線装置が小さくできる。また衛星に比べると圧倒的に地上に近く伝播遅延時間が少ないため、音声電話をした場合などの声の遅れがほとんどない。
- (2) 電波環境性：無線通信に対する需要が急増している昨今、異なるシステム間での周波数共用や人体への影響など、電波環境という視点が重要になってきている。地上系の移動通信回線や放送回線などでは、地上に非常に近いところでの伝播を基本としているため、建物や樹木、地面の起伏などの影響を受けやすく、通常極めて大きな送信電力で送信して回線品質を維持している。例えば、VHFによる放送電波の東京タワーからの送信電力は50kWに達するが、電波は必ずしも100km届くとは限らない。また送信局周辺と遠方とでは、40dB(1万倍)の電力差を生じることとなる。成層圏からの送信であれば、同じエリアをカバーするために必要な送信電力は数10W程度で済み、余分な電波を周囲に放射することはほとんどなく、またサービスエリア内の電力差も10数dB(数10倍)で済む。
- (3) 経済性と低リスク：例えば半径100kmの範囲を地上の鉄塔などによる基地局でくまなくカバーしようとする1500局以上の設置が必要となるが、成層圏プラットフォームなら一つないし二つでカバーできる。すなわち、地上無線通信網において非常に多数の基地局やそのための鉄塔等を設置することでカバーすることができる領域を、少数の成層圏プラットフォームで一度にカバーでき、極めて経済

的なネットワークの構築ができる可能性がある。一例として、図3に日本全国をほぼカバーする成層圏プラットフォームの展開例を示す。最低サービス仰角を10度と仮定した場合、所要プラットフォーム数は16となる。またグローバルサービスに適している衛星システムに比べ、成層圏プラットフォームは需要のある地域を中心としたローカルサービスに適しており、例えば海上やほとんど人のいない地域にも展開せざるを得ない周回衛星システムなどに比べてビジネス上、高い効率が期待できる。すなわち、成層圏の高さは、ある特定の地域のユーザを広範囲にかつぎめ細かくカバーするのに適当な高さであるといえることができる。

- (4) 柔軟性：災害やイベント等、ニーズに応じた柔軟なプラットフォーム配置と通信回線提供が可能となる。搭載機器の不具合やバージョンアップの必要なきときは、搭載機器をいったん地上に回収することさえ可能と期待され、柔軟性に関しては衛星システムにはまねができない。

成層圏プラットフォームを用いた通信放送ミッションの構想は、最終的な実用イメージとして、多数の成層圏プラットフォームを上空に数10～100km程度の間隔でメッシュ状に配置し、これを中継局あるいは基地局とするもので、固定通信のみならず、移動通信、放送、地球環境計測、電波監視など様々な応用が想定される。中でもミリ波帯等の高い周波数を使い、パーソナルユーザを対象として片側20Mbps以上の伝送速度を提供する高速アクセスネットワークは、成層圏プラットフォームの特徴を生かしたアプリケーションの一つと考えられ、動画や大容量コンテンツをストレスなくやりとりできる高速インターネットや高品質デジタル放送などのサービスが衛星や光ファイバなどの地上インフラを介さずに実現できる可能性をもたらす。またプラットフォーム間の空間を光回線で結ぶことにより広域にわたり無線のみで回線を接続することが可能となる。衛星回線と比較した場合、衛星はグローバルサービスに適しているのに対し、成層圏プラットフォームは地域に密着した高密度ローカルサービスに適している。

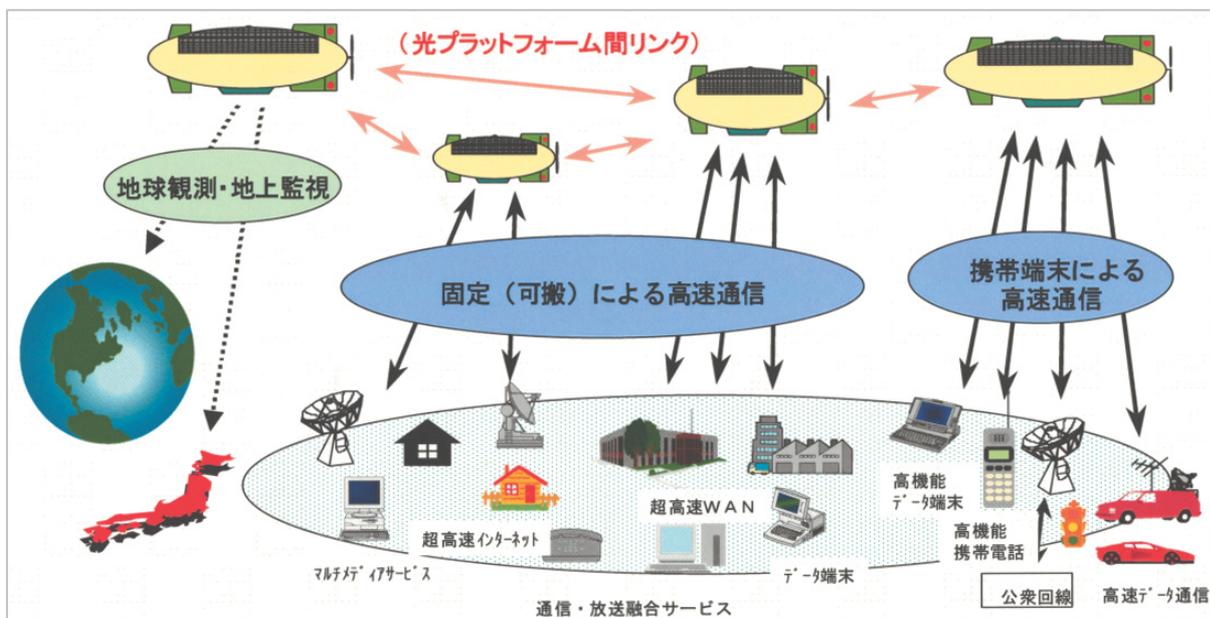


図2 成層圏プラットフォームによるサービスイメージ

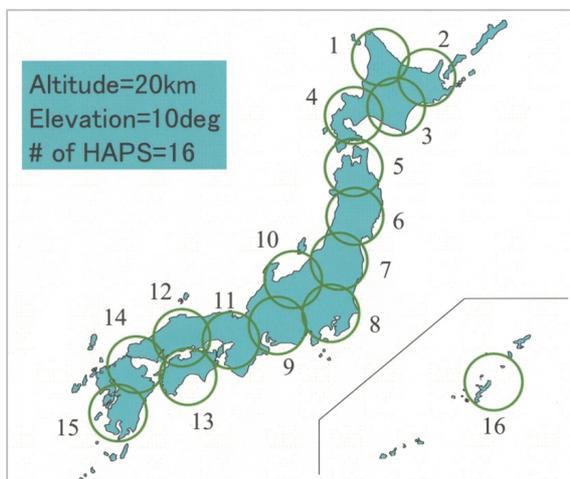


図3 日本での展開例

3 通信・放送ミッションに適したプラットフォームの比較

通信・放送ミッション用の無線機器を搭載する成層圏プラットフォームに要求される条件としては、以下のような項目が挙げられる。

- ① 成層圏(高度20km前後)まで上昇し、ある範囲内で定点滞空できること、
- ② 昼夜一貫して長期継続運用が可能であること、
- ③ できるだけ複数種類のミッションを同時に搭載するために多くのミッション重量が許容でき、それへの十分な電力が供給でき

ること、

- ④ 無線搭載機器は必要に応じて地上あるいは海上回収が可能なこと、そして、
- ⑤ 成層圏の環境にやさしいこと。

これらの条件を満たす候補としては、大きく分けて、無人動力付飛行船¹⁾¹⁶⁾、ソーラープレーン(太陽電池駆動無人航空機)⁷⁾、有人航空機(ジェット)⁸⁾の3種類の機体が考えられている(図4)。表1にこれらの大雑把な比較を示す。搭載重量、環境への影響などを考えるとやはり飛行船方式が最有力候補となる。しかしこれらの条件を満たす飛行船を成層圏まで上げるには、大型化が避けられず、逐次克服しつつあるものの様々な技術課題が残されている。したがって、最終目標としては無線機器の飛行船への搭載を目指すものの、その前の段階の部分的な事前実証試験としては、必ずしも大型の飛行船にこだわる必要はなく、また上記の条件をすべて満たす必要もないと考えている。ソーラープレーンや有人航空機方式、あるいは小型の飛行船でも、それに適したアプリケーションが存在する可能性もある。

図5に1999年にNALが実施したフィージビリティ検討で描かれた成層圏飛行船の想像図を示す¹⁾¹³⁾。船内は複数のヘリウムガスバッグで構成され、上面に太陽電池パネルを装備し、3基の推進モータを備えている。夜間運用のために再

表1 主な成層圏プラットフォーム候補の比較

| | 大型飛行船(無人) ^(*) | ソーラープレーン(無人) | ジェット機(有人) |
|------------|------------------------------------|--|----------------------------|
| 全長 | ~ 200m | ~ 70m | ~ 30m |
| 全備重量 | ~ 30ton | ~ 1ton | ~ 2.5ton |
| 推進エネルギー源 | 太陽電池 | 太陽電池 | 化石燃料 |
| 飛行継続時間 | ~ 3年間程度 | ~ ? | 8時間 |
| 定点滞空精度(半径) | ~ 1km | ~ 1.5km | ~ 10km |
| ミッション機器重量 | ~ 1000kg | ~ 100kg | ~ 1000kg |
| ミッション許容電力 | ~ 10kW | ~ 1kW | ~ 20kW |
| システム例 | 日本, Korea, China, 米国 Sky Station 他 | Helios, Pathfinder Plus (米国 AeroVironment) | HALO (米国 Angel Technology) |

(*) NAL フィージビリティ検討より [1,3] (1999年)



図4 成層圏プラットフォーム候補

生型燃料電池を搭載する。検討によれば、飛行船の長さは245m、重量は32.4トン、推進に必要な電力約200kWという結果になった。このとき、搭載できるミッションペイロード重量は約1トン、その最大許容消費電力は10kWと算定された。なお、これらのパラメータは実際の技術開発の状況により随時見直しが行われている。

当初はこのような飛行船のエネルギー源として、地上から高出力マイクロ波により電力伝送を行うことが検討され、通信総合研究所でも開発及び実験がなされたが¹⁰⁾、結局周囲に及ぼす電磁環境の問題がネックとなり、太陽電池と燃料電池の組合せへと方針転換がなされたという経緯がある。表2に日本における当面の飛行船開発のステップを示す。

4 CRL/TAOでのこれまでの研究開発と事前実証計画

国によるプロジェクトとしての通信・放送ミッション開発のターゲットは、そのコンセプトの実証である。基本的な要素技術は衛星や地上

成層圏プラットフォーム飛行船システムの概念

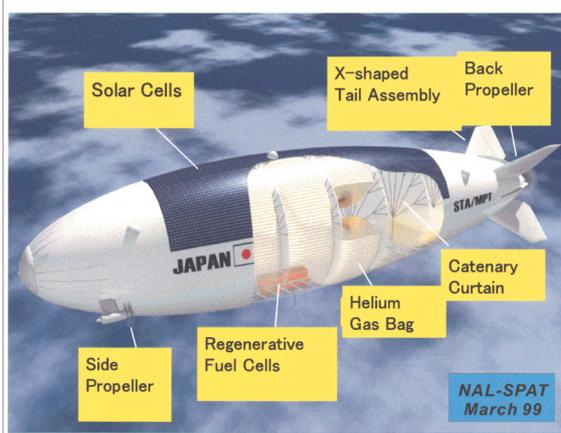


図5 飛行船のフィージビリティ検討結果 (NAL、1999年)

の無線システムで蓄積された技術の延長線上にあるが、特に高周波においては成層圏高度特有の環境条件、回線条件での運用経験や特有の技術が世界的にみてもまだなく、また実際に通信ユーザに対してどのような恩恵をもたらすかを示すシステム実現例がない。このため、これをいち早く実証し、その技術的、ビジネス的、社会的な将来性と方向性を確立することが現時点

表2 日本における当面の飛行船開発・試験のステップ
(担当機関：NAL、サポート：国内重工メーカ)

| 飛行実験 | 名称 | 高度目標 | 特徴 | 試験項目 |
|------------|----------------------|------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 2002～2003年 | 成層圏滞空試験機 (現在、開発中) | 15km | 45m級、無動力 ペイロード40kg | 材料、熱制御等の成層圏での基礎データ取得、地球環境の計測 |
| 2003～2004年 | 定点滞空試験機 | 4km | 65m級、動力付き ペイロード250kg | 機体制御、運用等の低高度での基礎データ取得、通信ミッション基礎実験 |
| 2006年以降 | 技術実証機 | 20km | 150m級、動力付き ペイロード 500～1000kg? | 機体に関する成層圏での総合データ取得、成層圏での通信ミッション実験 |

での最重要課題となっている。これが達成できマーケットが見えてくれば、あとは事業者やメーカの出番となる。

CRL/TAOによる通信・放送ミッション開発は1998年に始まり、固定通信、移動通信、放送の3分野で概念設計、搭載機器開発及び地上機器開発を進めてきた^{[12][4][5]}。これらの成果は、一般にプロジェクトの状況を広く知ってもらうために、国内外の学会等や新聞等で広く発表するとともに、将来のビジネス上の戦略として一部特許化も進めている。またそのほか、成層圏プラットフォームを地上の違法無線局の電波監視に用いた場合の性能を調べるための評価試験の実施を平成13年度に予定している。各アプリケーション試験用搭載機器の概要は次のとおりである。

- (1) 高速固定アクセス：位置の固定したユーザに対して2M～150Mbps程度の高速アクセス回線を小型のアンテナと無線機で提供し、動画伝送や高速インターネット環境を経済的に提供するもので、ITUでは48/47GHz帯と31/28GHz帯の使用が固定アクセス用として既に認められている^{[16][17]}。これまでこれに用いるための搭載用プロトタイプアンテナとして、2種類の搭載用マルチビームアンテナを開発した(後述)。複数のユーザが混信することなく同じ周波数を共用する空間分割多元接続方式(SDMA)、プラットフォームの動揺補償、地上ユーザの自動捕捉、高速動画伝送などの機能評価が可能である。
- (2) 次世代移動通信：次世代携帯電話(IMT-2000)の規格の一つであるW-CDMAの多数の地上の基地局の機能を少数の成層圏プラッ

トフォームに肩代わりさせようとするもので、ゼロに近い状態からインフラ整備をする必要がある場合は、大幅なコスト削減と電波強度の弱い不堪地域の減少に有効である。ITUでは地上のIMT-2000用バンドの一部が成層圏プラットフォームを使ったIMT-2000サービスに使うことが認められている^[16]。これまでそのための搭載用アンテナとして、切替型平面アンテナとマルチヘリカルアンテナの2種類の搭載用アンテナ及びスルーレピータ方式の試験用搭載中継器を開発した。地上ユーザ側は、市販の次世代携帯電話端末と同じもので成層圏プラットフォームに384kbpsでアクセスすることが可能である。

- (3) デジタル放送：従来の地上放送は、建物や地形の起伏による電波の減衰を補って放送受信が難しい地域をできるだけ減少するため送信局から大電力で送信するとともに、各地に多くの中継局を設置しているが、成層圏プラットフォームならば1機で広域なカバーエリアが得られ、しかもわずかな送信電力で済む。衛星放送に比べると当然カバーエリアは小さいが、その分、地域に密着した放送手段の実現に適している。ITUではまだ成層圏プラットフォームを使った放送サービスをするための周波数は確保されていないが、400～500MHz帯のUHFを使ったスルーレピータ方式のデジタル放送試験用搭載中継器を開発した。アンテナはドゥルーピングダイポールを用いる。直交周波数分割多重(OFDM)変調方式によるハイビジョンTV放送などの性能評価が可能である。
- (4) 電波監視：成層圏プラットフォームのもつ

強力な見通し能力を用いたアプリケーションとして、光や電波による地上観測や不法電波監視がある。電波監視は従来地上の監視用アンテナを用いて行われているが、そのアンテナを成層圏高度まで上げることによりマルチパスや遮蔽の影響が減るため、高精度かつ広範囲な電波源の位置同定が実現できることが期待されている。この基本概念を実証するため、2台の8素子線形アレーアンテナ(2GHz帯)を直交させて用いて地上電波源の位置同定を高分解能到来方向推定アルゴリズム及びレイトレーシング手法を使って行うためのデータ収集装置を開発した。

以上述べた成層圏中継試験用無線機器は、できるだけ成層圏に近い環境で機能評価し、早期に成層圏プラットフォーム通信・放送システムのコンセプト実証につなげる必要がある。このためCRL/TAOでは、飛行船に搭載する前の段階での事前実証試験を平成14年度に計画している^[2]。事前実証試験に用いる予定の飛翔体は次の3種類を予定している。

- (1) ヘリコプタ(川崎バートル): 優れたホバリング能力を持っており、定点滞留性では他の飛翔体に勝る(半径150m以内)。一方、成層圏高度まで到達することはできず、最高到達高度は3~4km程度である。このため、比較的高い定点滞留性が要求されるアプリケーションである、固定アクセス用に開発したMBHアンテナとDBFアンテナをこれに搭載して30GHz以上のミリ波帯を使った高仰角からのアクセス試験を行う。本機は、実験が予定されている横須賀YRP上空での飛行許可が実際に得られるかどうかの確認のため、YRPに飛来し上空3000mでのホバリング試験を実施し、問題ないことを確認した(図6)。なお、電波監視基礎実験については、より小型のヘリコプタを使用し、実際に電波源位置同定試験を実施する。
- (2) 小型ジェット機(Gulfstream II): 定点滞留性ではヘリコプタに劣り(旋回半径10km以上)、かつその際30度近くのパンク角が生じてしまうが、高度14km前後まで到達することができ、成層圏に近い環境での試験が可能である。このため、搭載機器に指向性アンテ



図6 横須賀YRPに飛来した川崎バートル(2001年3月)

ナを必要としないUHF等の低い周波数を使ったデジタル放送試験に使用する。

- (3) ソーラープレーン(Pathfinder Plus): 米国NASAが開発し、現在同AeroVironment社が所有するHelios(翼長75m)とPathfinder Plus(翼長37m)がある。これらは太陽電池だけの電力で成層圏まで上昇する能力をもち、既にHeliosは高度30km(2001年8月)、Pathfinder Plusは高度24km(1998年8月)まで到達することにハワイで成功している^[7]。定点滞留性は、気流にも影響を受けるが数km以内が可能である。ただし、ミッション搭載重量は限定されており、50~100kg程度である。ソーラープレーンはそれ自身が成層圏プラットフォームの候補の一つとされており、NASAもその方向性を支援していると言われる。Heliosは残念ながら平成14年度は改造などで使用できないため、Pathfinder Plusを使い、中継器が軽量で済むW-CDMA信号中継及びUHFデジタル放送の試験に使用する。

CRLとTAOの役割分担としては、TAOが全体システムの概念設計や搭載中継器、地上機器の開発を実施し、CRLは研究要素の強い搭載用のアンテナを中心とした要素技術の開発を担当している。表3に当面の研究開発スケジュールを示す。事前実証試験のあとは、NALの開発する試験用飛行船に通信機器を搭載し、飛行船による本格的な成層圏実証を目指して計画を推進していく予定である。

表3 研究開発スケジュール

| | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006~ |
|----------------|------------|--------------|----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 飛行船 | フェージビリティ検討 | | 要素技術 R&D | システム設計の最適化 | | 成層圏滞空試験 | 低高度定点滞空試験 | 成層圏技術実証試験 | |
| 通信・放送 ミッション | 概念設計 | 搭載機器・要素技術R&D | 地上機器 | システム設計の最適化 | 事前実証試験 | 定点滞空機搭載試験 | 搭載 | 機體改良 | 技術実証試験 |
| プロジェクト評価 | | WRC-2000 | | | WRC-2003 | | | | WRC-2006 |

5 海外の動向

海外においても近年、事業化に向けた動きが活発化している。この背景には、後述するように世界無線通信会議 WRC-2000 において、使用可能周波数の拡大がなされたことが大きなトリガになり、にわかにビジネスとしての現実味を帯びたと想像される。主な動きを以下に挙げる。

(1) Sky Station 社 (米国)

世界で最初に設立された成層圏飛行船による通信事業を目指したベンチャー企業であり、ITU において 47/48GHz 帯及び 2GHz 帯周波数を使用できるように活発に活動した会社である。150m 級飛行船により高速固定アクセス回線(2Mbps ~ 10Mbps)を 47/48GHz 帯で、また IMT-2000 移動通信回線を 2GHz 帯で提供することを目指す^[6]。2000 年末に最初のテスト飛行を実施するとしていたが、いまだに発表されていない。しかし、米国 Lockheed Martin Global Telecommunications 社をシステムインテグレータに指定し(その後、この契約は解消したとの情報あり)、最近では新しい飛行船のデザインを描いているともいわれており、まだ当面その動きを見守る必要がある。

(2) NASA / AeroVironment 社 (米国)

NASA は、飛行船ではなく、前述の太陽電池を主翼上側前面に貼り付けた軽量の無人ソーラープレーンを高度 17km ~ 30km で運用することを提案し^[7]、主に地球観測に用いることを目的にこれまで 6 千万ドル以上を投じて Helios 等の機体を開発してきた。ソーラーカーなどを手がけるベンチャー企業の AeroVironment 社はこれを通信基地として用いる構想を

持つ。この機体は環境にもやさしく実用化も近いが、ミッション重量が 100kg 以内に制限されてしまう点、また耐風性能の限界から、現在のところ飛行地域が限定されるなどの課題がある。なお、この機体を利用して通信事業を行うことを目指した Sky Tower 社及びその日本での代理店である日本成層圏通信㈱が既に設立されている。

(3) Angel Technologies 社 / Ratheon 社 (米国)

小型の有人ジェット機を高度 17 ~ 20km で運用する計画を持っている^[8]。パイロットは例えば 8 時間ずつ 3 交代勤務とする。この方式は、ほぼ既存の技術で最も低コストで成層圏プラットフォームを実現する手段を提供している。既に HALO-Proteus と呼ばれる専用の航空機が開発されており、1998 年に高度 15km において最初のデモ飛行に成功している。Angel Technologies 社が機体を Ratheon 社が通信ミッションを担当する。

(4) 欧州宇宙機関 (ESA) / Lindstrand 社 (英国)

飛行船形式の成層圏プラットフォームのフェージビリティ検討を ESA からの契約で、気球メーカーである Lindstrand 社が 1998 年に実施したが、その後契約はされていない。

(5) Advanced Technologies Groups 社 (英国)

輸送用や観光用、監視用の SkyCat シリーズや広告用やパイロット訓練用の AT-10 など数々の低高度飛行船開発の実績を持つ^[11]。成層圏(高度 20km)用としては、StratSat という名前で開発が始まっており(図 7)、一時 SkyStation 社との契約もあったが、現在は切れている。長さは 200m、耐風能力 35m/s ペイロード重量 2 トンを目指している。動力源は、太陽電池のほか、わずかな時間率で起こる強風環境への対応としてディーゼルエンジンとの併用を提案している。2003 年には約 120m の長さのスケールモデルを製作し、太陽電池とディーゼルエンジンあるいはマイクロ波送電との併用により高度 10km での試験飛行を行う計画のようである。

その他、韓国(航空宇宙研究所及び電気通信研

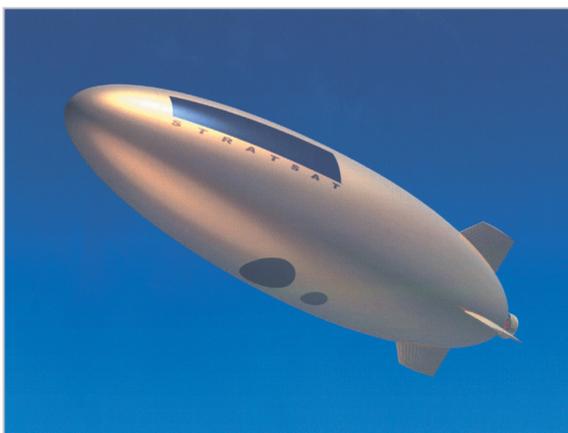


図7 Advanced Technologies Group 社の StratSat™ イメージ

研究所)や中国(上海交通大学及び北京清華大学)などでも研究が開始され、東南アジア、南米やアフリカなどの国々がユーザとしての関心を示している。さらに、英国クランフィールド大学の Spacebird 構想、同ヨーク大学の Helinet 構想、同サレー大学の Sirius 構想など独自の成層圏プラットフォーム研究構想を打ち出したり、米国陸軍が高高度飛行船プログラムを開始、Lockheed Martin Naval Electronics & Surveillance Systems 社がこれに応募する動きをみせるなど、各方面で関心が高まっている。ただ、通信ミッションの開発に関しては、現在のところ日本が世界をリードしていると考えられる。

6 搭載用マルチビームアンテナプロトタイプ

搭載用ミッションの中でも、技術開発要素が強く開発期間を要する高速アクセス用アンテナについて、1998年度よりCRLにおいて開発に着手している。成層圏プラットフォーム搭載用高速アクセス用アンテナには以下のような機能が要求される。

高速回線のための十分な帯域を確保するため、高い無線周波数の利用(例えば10GHz以上)

高周波になると、通信品質は熱雑音支配となり高い利得の指向性アンテナが必要。

成層圏から地上のサービスエリアを見た視野角は120度以上にも達するため、広い視野角と高い利得と両立し、かつ周波数の有

効利用を図るため、送受信とも100ビーム以上のマルチビームアンテナが必要。

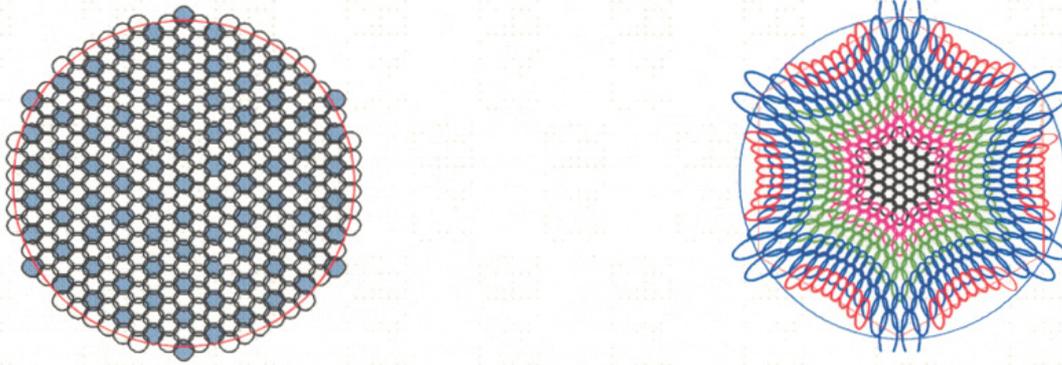
プラットフォームは気流や気圧の変化で位置や姿勢が変動するため、ビーム制御を行って地上のフットプリントに対する姿勢変動の影響をキャンセルする必要あり。

特に、に関しては、成層圏プラットフォームへの周波数分配を議論しているITU-Rにおいて、Kaバンドを使った高速アクセス用のマルチビームフットプリントパターンとして、同一周波数帯を使用する他の業務(地上の固定通信業務や衛星通信業務など)への干渉を軽減する必要上、図8に示すような300~400ものセルを生成するものがモデルとして示されている^{[17][18]}。(a)は各ビームの地上でのフットプリントが地上からの仰角方向に関わらずみな同じ大きさの円形パターンとなるようにしたモデルで、アンテナが生成するビームの断面は楕円となる。またb)は地上からの仰角によって幾つかのゾーンに分けて各ゾーン内のビーム利得は同じになるようにし、ビームの断面は全て円形となるようにしたモデルで、地上のフットプリントは必然的に楕円となる。

これらの要求に答える搭載用マルチビームアンテナとしては、これまで機械駆動型のマルチビームホーン(MBH)アンテナと電子走査型のデジタルビームフォーミング(DBF)アンテナの2種類の開発を行ってきた^[11]。図9に各アンテナの基本構成(受信の場合)、表4に各アンテナの基本諸元、図10に各アンテナの写真を示す。開発期間と予算上の制約から、プロトタイプアンテナはコンセプトを実証できる最低限の機能を備え、アンテナ素子数を減らした機能限定モデルとし、150-200m級技術実証機への搭載試験を想定して開発した。成層圏は、気圧が地上の1/20、温度が-50以下にもなる過酷な環境であるが、ミッションを搭載するシェルタ内で温度・圧力制御することで、できるだけ地上の装置を流用できるようにしてコストを下げている。

以下に各アンテナの特徴を述べる。

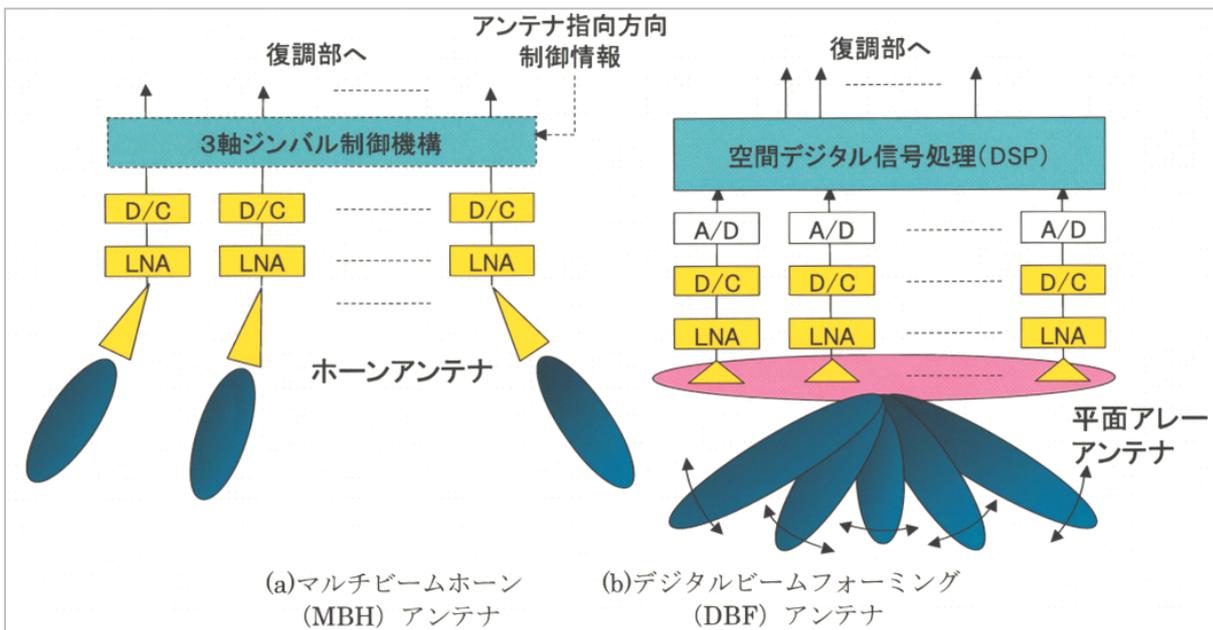
- (1) 機械駆動式マルチビームホーン(MBH)アンテナ
3軸機械駆動によりジンバル制御された基台に固定された複数のホーンアンテナを用いるマルチビーム方式で、各ホーンアンテナごと



(a) 一様円形フットプリントモデル (367 beams)

(b) 複数ゾーン円形ビームモデル (397 beams)

図8 ITU-Rでの勧告化が検討されているマルチビームフットプリントの典型例



(a)マルチビームホーン (MBH) アンテナ

(b)デジタルビームフォーミング (DBF) アンテナ

図9 開発中の実証機搭載用マルチビームアンテナの基本構成

表4 マルチビームアンテナプロトタイプの主な諸元

| 項目 | マルチビームホーンアンテナ | デジタルビームフォーミングアンテナ |
|--------------|--|---|
| 周波数帯 | 送信 47.2 - 47.5GHz 受信 47.9 - 48.2GHz | 送信 27.5 - 28.35GHz 受信 31.0 - 31.3GHz |
| アンテナ形式 | 7素子コルゲートホーン | 16素子(4×4)パッチアレー |
| スポットビーム幅 | 12度 | 10～13度 |
| マルチビーム数 | 固定ビーム7 | 固定ビーム9、適応可変ビーム3 |
| 帯域幅 | 300MHz以上 | 3MHz以上 |
| 送信 eirp | 6.3dBW以上 | 11～15dBW |
| 受信 G/T | -15.4dB/K以上 | -13～-17dB/K |
| プラットフォーム動揺補償 | 姿勢センサ及び 3軸ジンバル機械駆動制御 | 受信信号のデジタル信号処理による 適応ビーム形成 |
| 最大伝送速度 | 25Mbps以上 | 2～4Mbps |
| 消費電力 | 1.0kW以下 | 1.6kW以下 |
| 重量 | 150kg以下 | 74.2kg |
| その他 | 周波数繰返し数7以下 同一周波数ビーム間アイソレーション30dB以上 | サンプリングレート32MHz 分解能12ビット 信号処理デバイス:FPGA (RX:100k gates×61, TX:100k gates×31) |

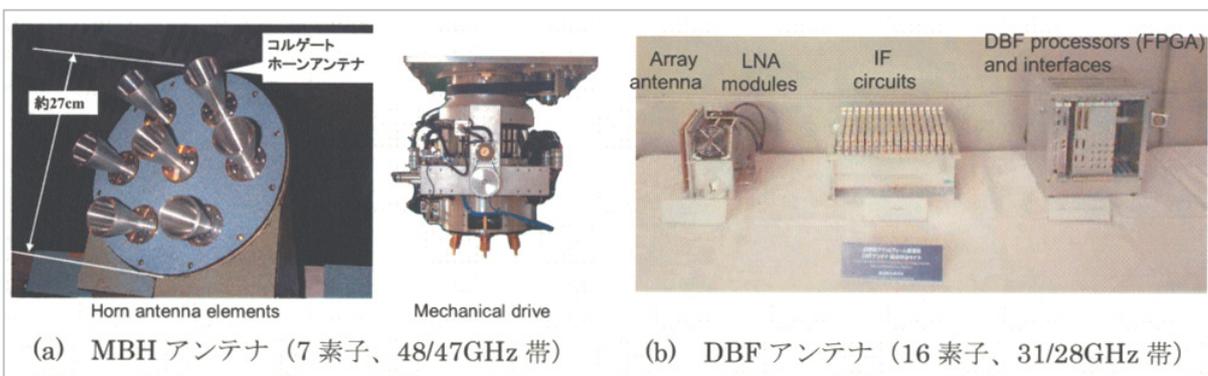


図 10 搭載用マルチビームアンテナプロトタイプ

に、地上に相対的に固定のフットプリントを形成する。周波数は48/47GHz帯、アンテナ素子数は7としており、主に高速フィーダリンク回線や高品質業務用回線などへの用途が想定される。このアンテナの主な特長は以下のとおりである。

ほぼ既存の技術を用いて広帯域なアンテナが実現可能。

利得、軸比などの広角特性が良好。

開発費は比較的低コスト。

本アンテナで構成されるフットプリントは固定のセルとなるため、地上のセルラシステムと同様に、7あるいは4等の周波数繰り返しによりビーム毎に周波数を使い分ける必要があり、後述のDBFアンテナに比べて柔軟性に劣る。また、サイドロープレベルの十分低いアンテナを設計する必要がある。また地上ユーザ局が移動する場合やプラットフォーム本体が気圧変動などにより垂直方向にドリフトする場合には、ビーム間のハンドオーバーが必要となる。このアンテナでは、1アンテナ素子ごとに指向性アンテナとしての開口を必要とするため、数10～100素子以上で構成する場合にはアンテナ規模が巨大化するとともに、中継器と各アンテナを個別に接続するケーブルの数も増え、ジンバルの回転が困難になるため、大規模マルチビームアンテナにはあまり適していないと考えられる。

(2) デジタルビームフォーミング(DBF)アンテナ
アクティブアレーアンテナと空間デジタル信号処理の組合せによりビームを形成する方式で、スマートアンテナ、ソフトウェアアンテナとも呼ばれる次世代型のインテリジェントなアンテナである。地上ユーザ局からの受

信信号を空間並列処理してアンテナパターンによる自動捕捉追尾や干渉分離などを実現する。また送信側では受信側で得られた到来信号方向の情報をもとにビームを形成し、空間電力合成を行う。機械駆動部分がないため多素子大規模マルチビーム生成に適していると考えられる。DBFアンテナは、最近では移動通信システムの容量と品質を大きく改善するために基地局アンテナに採用されるようになってきた。しかし、10GHz以上の高周波を用いる多素子のアレーアンテナではまだ実現例はほとんどない。ただ、MBH方式に比べると未経験部分が多く部品数も多いため、現状では開発コストは高くなり、消費電力も大きい。以上のような状況に基づき、実証機用のアンテナは、広帯域性よりもビーム形成の高機能化に重点を置いた性能評価(Proof of concept)に目標を絞り、素子数を16(4×4正方配列)に限定したアレーアンテナとし、将来の多素子DBFアンテナ実現に向けた基礎データを取得するものとしている。周波数は新規分配された31/28GHz帯を用いることとし、高密度に分布した多数の個人ユーザ等によるアクセス回線での使用が想定される。このアンテナの主な特長は以下のとおりである。

- ① 地上ユーザ局の通信要求に応じた柔軟かつ正確な送受信ビームステアリング(あるいはビームポインティング)が複数のユーザに対して独立に可能(適応可変マルチビームによるビームオンデマンド)。フットプリントに固定のセルは存在せず、ハンドオーバー頻度が低減。
- ② 特定の地上のユーザに対して常に搭載ア

ンテナの最大利得を提供、かつサイドローブレベル制御可能により、回線品質が安定化し、空間分割多元接続(SDMA)による周波数有効利用、通信容量の増大が可能。

- ③ 不要な到来干渉波の除去や同一バンドを共用する衛星システム等の他のシステムへの干渉軽減、通信信号や不法電波の発信源に対する到来方向推定などが可能。
- ④ 1部の素子の不具合に対してロバスト。
- ⑤ 信号処理による送受信アレーアンテナの高速キャリブレーションが可能。

DBFアンテナのデジタル信号処理デバイスには高速並列処理に適しかつアルゴリズムの書替えが可能なFPGA(Field Programmable Gate Array)及びプログラム開発が容易な汎用高速MPU(Micro Processing Unit)を採用し、高速並列処理性能とプログラム開発性の両立を目指している。課題としては、デジタルデバイスの処理速度の向上による広帯域化、大規模アレーでの能動素子が集積化した場合の放熱問題の克服、大きな走査角で利得や軸比の向上などが考えられる。

DBFアンテナのビーム形成アルゴリズムの開発にあたっては、将来の実用機を想定して多素子アレーや電力制限型回線、バースト信号、SDMAなどを考慮する必要がある。このため、アルゴリズムは、少ない演算量、並列処理への適合性、低CNR環境での安定動作、所望波の高速捕捉性能、十分な干渉抑圧性能などを満たすよう設計することが求められる。

その候補の一つとして、既知の参照系列を用いた最大比合成方式^{12[13]}を検討し、プロトタイプアンテナに実装した。この方式は、従来ダイバーシチ方式の一つとして用いられてきた最大比合成の考え方を発展させて非ブラインド型処理によるマルチユーザ対応とし、かつこれを多素子DBFアンテナに適用するため簡易な演算方式で実現するものである。また低CNR信号に対応するため、固定のマルチビームを先に形成する空間DFTをプリプロセッサとするビームスペース処理方式を採用している。シミュレーション検討によると、本方式では低CNR環境下(アンテナ1素子あたり0dB以下)でも10シンボル余りでの希望信号の自動ビーム捕捉が可能で

あり、また異なるユーザ局で別々の参照系列を用いるようにすることで、それらの到来方向が異なる場合にはこれを互いにあるアイソレーションを保ちつつ分離受信することが可能である(図11)。さらに、受信で得られたアレーの重み係数を周波数の異なる送信アレーの重みに変換することも容易である。本方式は干渉波が存在する環境での最適解(ウィナー解)を求めるものではないが、複雑な行列演算等を用いていないため、それを用いる方式(Recursive Least Square: RLSやDirect Matrix Inversion: DMI等の最適化方式)に比べ、多素子の場合には1ケタ~2ケタ以上の演算量低減が可能である。また、並列演算が可能であるため、FPGAやASICなど空間的に分散した回路資源を効率的に使うデバイスへの実装が容易である。このビーム形成の原理を応用した送受信アレーアンテナの高速キャリブレーション手法の開発も行っている^{14[15]}。

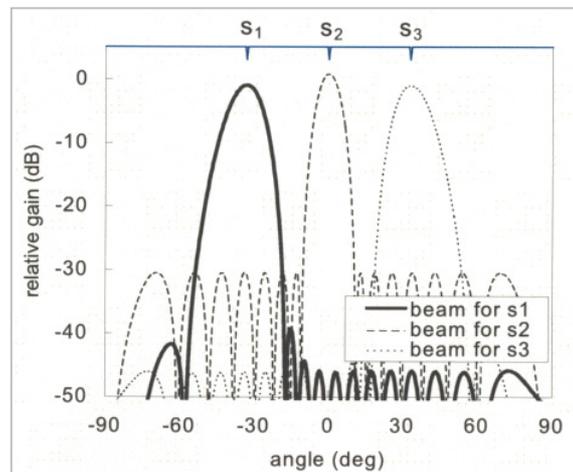


図 11 既知の参照系列を用いた最大比合成によるDBFアンテナパターン形成シミュレーション例(16素子リニアアレーによる3波の分離受信)

7 まとめ

総務省と文部科学省が中心となって進められている成層圏プラットフォームの研究開発状況の概要について報告した。CRLでは、無線イノベーションシステムグループのほか、これまでの当所の研究ポテンシャルを生かすために放送システムグループ、光宇宙通信グループなど他のグループとも連携して検討を進めている。そ

のほか、当グループではTAOの横須賀リサーチセンターと協力し、ITUにおける周波数分配獲得を推進する総務省を技術的に支援するための寄与活動を精力的に行っている。これまで多数の技術検討文書を提出してWRC-2000(イスタンブール)において31/28GHz帯の条件付承認を獲得したほか、合計7本の新暫定勧告案を作成し、これらの勧告化を目指して活動を継続している[19]。成層圏プラットフォームによる通信技術には、ハード、ソフト、ネットワーク、プロトコル等の分野でまだ世界的にも未着手の課題が多くあり、日本がリーダーシップをとって世界に貢献できる数少ない技術の一つであるということが出来る。そのためにも欧米とも協力しながら、国家主導から民間主導へと移るための一つ

のキーイベントである成層圏における実証実験をできるだけ早期に実現するよう努力しているところである。

謝辞

本プロジェクトをともに推進し、かつご指導いただき通信・放送機構及び航空宇宙技術研究所の関係者、当所の放送システムグループ並びに光宇宙通信グループ、その他関係各位に深く感謝いたします。また、DBFアンテナのアルゴリズム検討でご支援いただき金榮洪特別研究員(上海交通大学教授)電波監視にかかわる基礎実験でご協力いただき無線アクセスグループの辻宏之主任研究員に感謝いたします。

参考文献

- 1 第1～3回成層圏プラットフォームワークショップ (SPSW'99～01)予稿集, 1999～2001.
- 2 平成12年度成層圏プラットフォーム研究開発報告書, 通信・放送機構, May 2001.
- 3 航空宇宙技術研究所ホームページ, <http://www.nal.go.jp/Welcome-e.html/>
- 4 通信総合研究所ホームページ, <http://www2.crl.go.jp/mt/b181/research/sbf/index-e.html/>
- 5 通信・放送機構ホームページ, <http://www.yrp.tao.go.jp/>
- 6 Sky Station社ホームページ, <http://www.skystation.com/>
- 7 AeroVironment社ホームページ, <http://www.aerovironment.com/>
- 8 Angel Technologies社ホームページ, <http://www.angelhalo.com/>
- 9 Advanced Technologies Group社ホームページ, <http://www.airship.com/>
- 10 Y. Fujino, M. Fujita, N. Gaya, M. Onda, S. Kunimi, and M. Ishii, "Wireless Power Receiving System for Microwave Propelled Airship Experiment," Space Technology, Vol. 17, No. 2, pp. 89-93, Dec. 1997.
- 11 R. Miura, M. Oodo, and Y. Hase, "Development of Multibeam Antennas in the Millimeter-Wave Band On Board Stratospheric Platform," Proc. AP-2000, Davos, Switzerland, Apr. 2000.
- 12 R. Miura, M. Oodo, A. Kanazawa, and Y. Koyama, "Maximal-Ratio-Combining Array Beamformer Assisted by a Training Sequence for Space Division Multiple Access In Power-Limited Channels," IEICE Trans. Commun., Vol. E83-B, No. 2, pp. 394-405, Feb. 2000.
- 13 R. Miura, M. Oodo, Y. Hase, T. Inaba, T. Sakamoto, and M. Suzuki, "Digital Beamforming Array Antenna On-Board Stratospheric Platform for Quick-Response SDMA in the Band 31/28 GHz," Proc. WPMC'01, Aalborg, Denmark, Sep. 2001.
- 14 M. Oodo and R. Miura, "A Novel Calibration Method for DBF Transmitting Array Antennas," Proc. AP-2000, Davos, Apr. 2000.
- 15 T. Nakamura, R. Miura, M. Oodo, and T. Ikegami, "Calibration of a DBF Receiving Array Antenna by Using a Reference Sequence," Proc. WPMC'00, Bangkok, Nov. 2000.
- 16 WRC-2000 Final Acts, ITU, Istanbul, Jun.2000.
- 17 ITU-R Doc. 9B/44, Nov. 2000.
- 18 ITU-R Doc. 9B/114, Oct. 2001.

19 大堂雅之, 三浦龍, “成層圏プラットフォームを用いた無線通信システムにおける周波数共用技術の研究とITUへの寄与活動,” 本CRL季報横須賀無線通信研究センター特集号.



みうら りゅう
三浦 龍

無線通信部門 横須賀無線通信研究センター 無線イノベーションシステムグループリーダー 博士(工学)
成層圏プラットフォームを用いた通信・放送システムの研究開発



おお どう まさゆき
大堂雅之

無線通信部門 横須賀無線通信研究センター 無線イノベーションシステムグループ研究員 博士(工学)
成層圏プラットフォーム搭載用アンテナ、周波数共用技術