

成層圏プラットフォームを用いた通信・放送システム開発計画

R&D Project on Telecom and Broadcasting System Using High Altitude Platforms

三浦 龍

Ryu Miura

独立行政法人 通信総合研究所

Communications Research Laboratory (CRL)

1. はじめに

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）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）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。さらに、将来の実用化をにらみ、成層圏プラットフォームで使うことのできる周波数を国際的に確保するための国際電気通信連合（ITU）での活動も総務省の技術的支援というかたちで精力的に行っている。本稿ではこれらの進捗状況を紹介する。

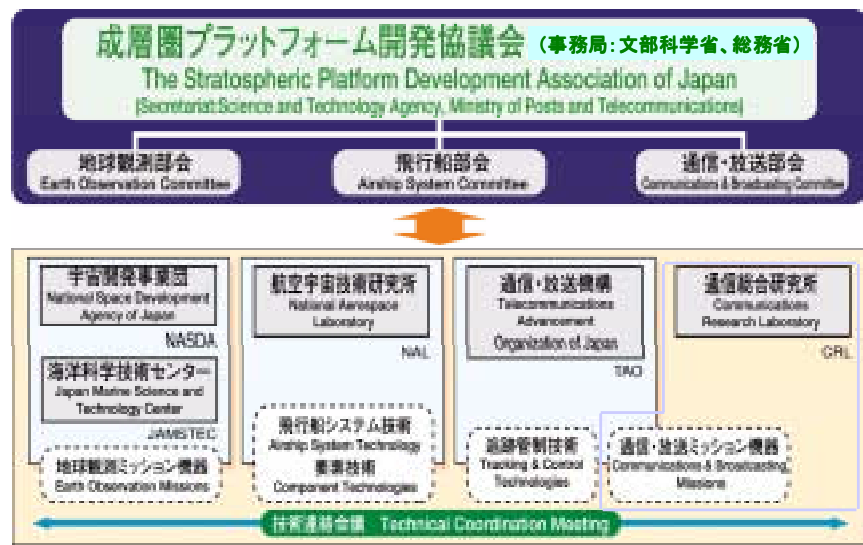


図1 研究開発体制

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ないし、衛星回線は障害物は少ないけれどもこんどは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、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通し回線が得やすいため、周波数にもよるが 1 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 100km も届かない。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と 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 1 つないし 2 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え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うことができる。
- (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どときには、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真似ができない。

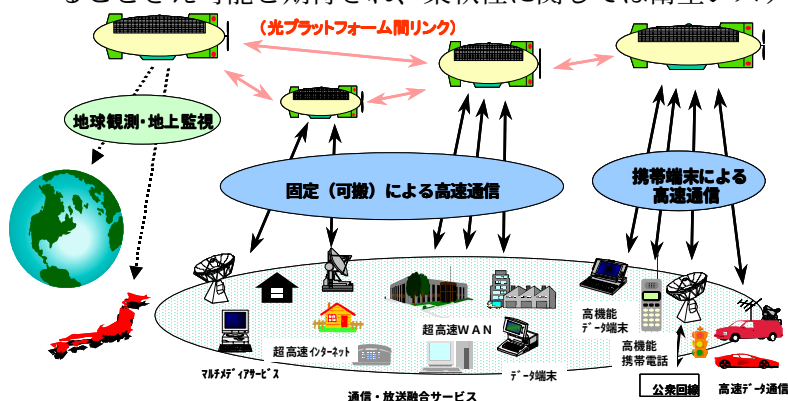


図 2 成層圏プラットフォームによるサービスイメージ

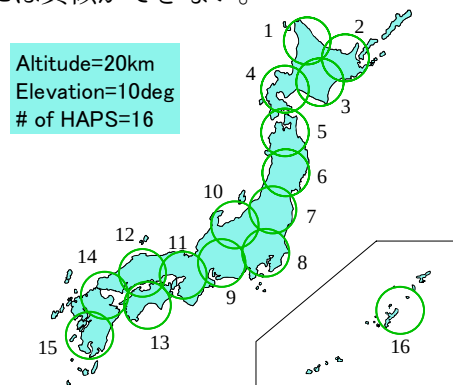


図 3 日本での展開例

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 10～100 km 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。

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, 6]、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、また上記の条件を全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。

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） ^{(*)1}	ソーラープレーン（無人）	ジェット機（有人）
全長	～200 m	～70 m	～30 m
全備重量	～30 ton	～1 ton	～2.5 ton
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)	～1 km	～1.5 km	～10 km
ミッション機器重量	～1000 kg	～100 kg	～1000 kg
ミッション許容電力	～10 kW	～1 kW	～20 kW
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)

(*)1 NAL フィージビリティ検討より[1,3](1999 年)



(a) 大型飛行船（NAL 設計）



(b) ソーラープレーン (Helios)



(c) 成層圏ジェット (HALO)

図4 成層圏プラットフォーム候補

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[1,3]。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。

なお、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および実験がなされたが[9]、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。

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)

開発終了時期	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

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、ならびに地上機器開発を進めてきた[1,2,4,5]。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通りである。

- (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すでに認められている(後述)。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1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 サービスに使ってよいことが認められている。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

成層圏プラットフォーム飛行船システムの概念

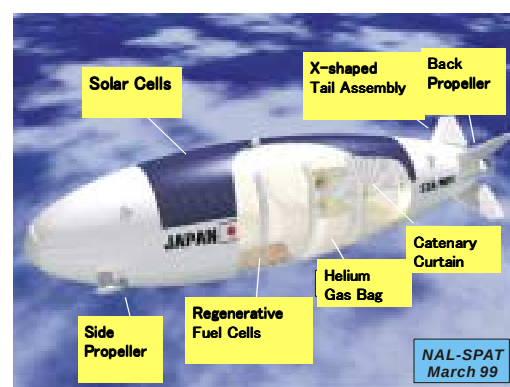


図5 飛行船のフィージビリティ検討結果
(NAL、1999 年)

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ならびに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行体はヘリコプタ、小型ジェット機、ソーラープレーンの3種類である。この中で、ソーラープレーンには、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、すでに 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半径 1.5km 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体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 信号中継および 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めざ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	フイービリティ検討			システム設計の最適化					
				要素技術 R & D					
					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			システム設計の最適化					
		搭載機器・要素技術 R&D							
			地上機器				搭載		
				事前実証試験				機器改良	
					定点滞空機搭載試験			技術実証試験	
									搭載
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 帯および 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（図 6）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、

未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、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 8 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もつ。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めざした Sky Tower 社およびその日本での代理店である日本成層圏通信 (株) がすでに設立されている。



図6 Sky Station 社の飛行船イメージ

(3) Angel Technology 社/Ratheon 社 (米国)

小型の有人ジェット機を高度 17~20km で運用する計画をもっている[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。すでに 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 Technology 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ィ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。

その他、韓国や中国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が独自の成層圏プラットフォーム構想であるスペースバード構想を打ち出したり、米国陸軍が高々度飛行船プログラムを開始、Rockheed Martin Tactical Defense 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。

- (i) 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)。
- (ii) 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。
- (iii) 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、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。
- (iv) 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を固定する必要あり。

ただし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た機能限定モデルとなった。150-200m 級技術実証機への搭載試験を想定して開発が始まった。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ス内で温度・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る予定である。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[10]。図 7 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 8 に各アンテナの写真を示す。

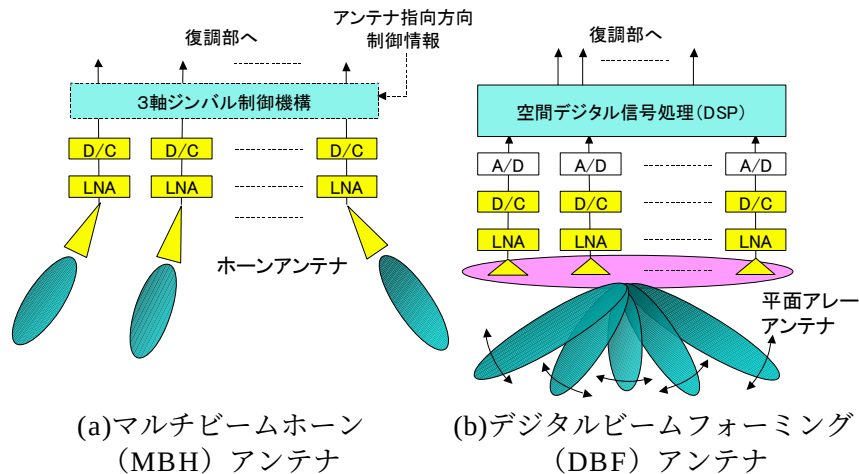
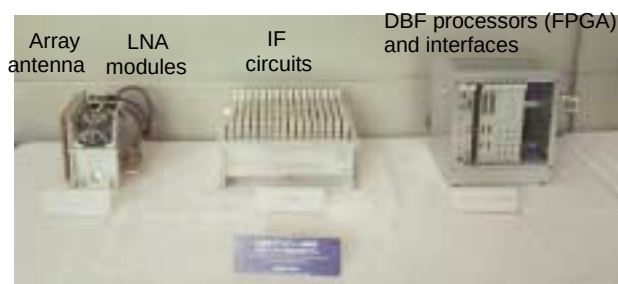


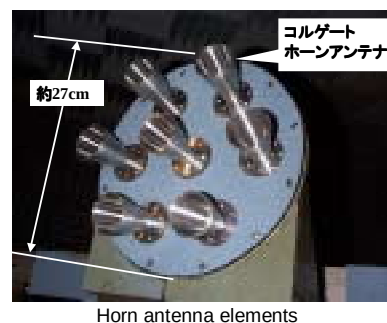
図7 開発中の実証機搭載用マルチビームアンテナの基本構成

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 47.2-47.5 GHz 受信 47.9-49.2 GHz	送信 28.5-27.35 GHz 受信 31.0-31.3 GHz
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	-15.4 dB/K 以上	-13～-17dB/K
プラットフォーム動揺補償	姿勢センサおよび 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	サンプルレート 32MHz 分解能 12 ビット 信号処理デバイス:FPGA (RX:100k gates x 61, TX: 100k gates x 31)



(a) DBF アンテナ (16 素子、31/28GHz 帯)



(b) MBH アンテナ (7 素子、48/47GHz 帯)



Mechanical drive

図8 搭載用マルチビームアンテナプロトタイプ

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、各ホーンアンテナ毎に、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通りである。

- (a) ほぼ既存の技術を用いて広帯域なアンテナが実現可能。
- (b) 利得、軸比などの広角特性が良好。
- (c) 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、サイドローブ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み合わ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。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、10 GHz 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、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おいた性能評価 (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としての使用が想定される。このアンテナの主な特長は以下の通りである。

- (a) 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。
- (b) 地上のユーザには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。
- (c) 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与干渉軽減、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。
- (d) 1 部の素子の故障や不具合に対してロバスト。
- (e) 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、現在検討を進めている。

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[11,12]を検討している。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マルチユーザ対応（非ブラインド型処理）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9）。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）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。さらに、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[13,14]。

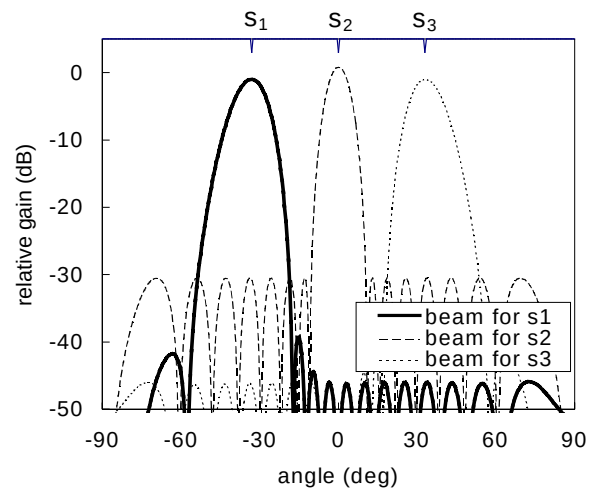


図9 既知の参照系列を用いた最大比合成による DBF アンテナパターン形成シミュレーション例（16 素子リニアアレーによる3波の分離受信）

5. ITU における周波数獲得活動

このような新しい無線システムを実用化する際、周波数の確保が重要であり、実際にビジネスとして成立するかどうかの鍵を握っている。特に 40GHz 以下はすでにいろんな無線サービスに隙間なく分配され、使用されている。このような状況の中で成層圏プラットフォームが使用できる周波数を確保するためには、すでに分配されている既存の無線サービスとの間の周波数共用条件を明確化し、異なる無線サービス間の干渉を軽減する技術を ITU（国際電気通信連合）の無線通信セクターである ITU-R で検討を行い、さらに WRC（世界無線通信会議）において承認しなければならない。これまでに WRC において成層圏プラットフォーム（HAPS）での使用が認められた周波数帯を表5に示す。この中で、日本としては総務省主導のもと、固定アクセス用として 47GHz 帯よりも降雨減衰の少ない 31/28GHz 帯の獲得活動を展開しており、CRL/TAO は多数の寄与文書提出を通じてこれを技術的な側面から強力にサポートしてきた。その結果、韓国やオーストラリアなどアジア太平洋地域の国々の協力も得て、WRC-2000（イスタンブール）においてこの周波数帯が認められたことは日本として注目すべき成果だったといえる。このほかの周波数帯としては、表にみるように 48/47GHz 帯が固定通信用、2GHz 帯が IMT-2000 移動通信用に使用できるようになっている。これらは主に米国 Sky Station 社の努力によるものである。

表5 HAPS で使用できる周波数帯（WRC-2000 以降）

周波数帯	使用できる地域	電波の方向	提供できるサービス	共用しなければならないサービス
47.9-48.2 GHz 47.2-47.5 GHz	全地域	上り・下り	固定業務	固定業務、移動業務 固定衛星業務(上り) 近接に電波天文バンドあり
31.0-31.3 GHz	アジア 12 ヶ国	上り	固定業務	固定業務、移動業務 一部地域で宇宙研究業務 隣接に宇宙科学業務(受動センサ)あり
27.5-28.35 GHz	アジア 12 ヶ国	下り	固定業務	固定業務、移動業務 固定衛星業務(上り)

1885-1980 MHz 2010-2025 MHz 2110-2170 MHz	第1および第3地域 (南北アメリカ以外 の全地域)	上り・下り	IMT-2000 基地局	固定業務、移動業務 (特に地上の IMT-2000 サービスや従 来の移動通信サービス)
1885-1980 MHz 2110-2160 MHz	第2地域(南北アメ リカ)	上り・下り	IMT-2000 基地局	

表6 31/28GHz 帯の使用に関する脚注 (WRC-2001 Final Acts)

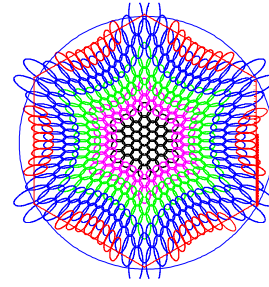
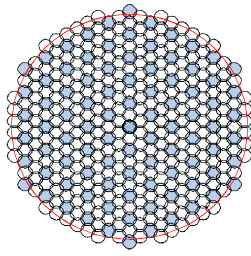
Article S5 周波数分配表 27.5-28.5 GHz FIXED
S5.537A (S5.5SSS) In Bhutan, Indonesia, Iran (Islamic Republic of), Japan, Maldives, Mongolia, Myanmar, Pakistan, the Dem. People's Rep. of Korea, Sri Lanka, Thailand and Viet Nam, the allocation to the fixed service in the band 27.5-28.35 GHz may also be used by high altitude platform stations (HAPS). <u>The use of the band 27.5-28.35 GHz by HAPS is limited to operation in the HAPS-to-ground direction and shall not cause harmful interference to, nor claim protection from, other types of fixed-service systems or other co-primary services.</u>
Article S5 周波数分配表 31-31.3 GHz FIXED
S5.543A (S5.5RRR) In Bhutan, Indonesia, Iran (Islamic Republic of), Japan, Maldives, Mongolia, Myanmar, Pakistan, the Dem. People's Rep. of Korea, Sri Lanka, Thailand and Viet Nam, the allocation to the fixed service in the band 31.0-31.3 GHz may also be used by high altitude platform stations (HAPS) in the ground-to-HAPS direction. <u>The use of the band 31.0-31.3 GHz by systems using HAPS shall not cause harmful interference to, nor claim protection from, other types of fixed-service systems or other co-primary services, taking into account No. S5.545. The use of HAPS in the band 31.0-31.3 GHz shall not cause harmful interference to the passive services having a primary allocation in the band 31.3-31.8 GHz, taking into account the interference criteria given in Recommendations ITU-R SA.1029 and ITU-R RA.769. The administrations of the countries listed above are urged to limit the deployment of HAPS in the band 31.0-31.3 GHz to the lower half of this band (31.0-31.15 GHz) until WRC-03.</u>

ただし、これらの周波数帯は多数の既存業務でも使用されているため、それらとの共用条件の検討が緊急の課題となっている。31/28GHz HAPS での使用も現在のところ条件付である。表6は WRC-2000 の最終成果 Final Acts に新規記載された脚注である[15] (無線通信規則に反映予定)。下線部に示すように、28GHz 帯、31GHz 帯ともに、同一周波数帯を使用する他の業務(service)に対して干渉を与えてはならず、また保護を要求してはならない、という規定に加えて、31GHz 帯のほうは隣接の受動業務 (電波天文や地球探査衛星) に有害な干渉を与えてはならない、という条件がついている。さらに WRC-03 までは 31GHz 帯はその 300MHz 帯域の下半分しか使えないことになっている。使用できる国も 12 ヶ国に限定されている。現在、これらの制約条件をできるだけ緩和し、この周波数帯を使ったビジネスがやりやすくなるよう、ITU-R における周波数共用検討を進め、衛星、固定通信、移動通信、天文、地球探査衛星等の関係者とも密接に情報交換しながら、多数の勧告案成立に向けて努力している。

今成立をめざしている勧告案は次のとおりである[16]。

- (1) HAPS による 31/28GHz 帯固定通信業務の典型的な特性仕様
- (2) HAPS と他の業務との間の 31/28GHz 帯干渉軽減技術
- (3) HAPS と既存の固定通信業務との 31/28GHz 帯周波数共用
- (4) HAPS と固定衛星業務との 31/28GHz 帯周波数共用
- (5) HAPS からの国境を越えた干渉回避
- (6) HAPS の 31GHz 帯上り回線と電波天文との両立性
- (7) HAPS の 31GHz 帯上り回線と地球探査衛星との両立性

これらの文書のなかで、(1)にはこの周波数帯を他の業務と共用して HAPS を運用するために必要な当面の典型的技術的条件が記載されている (日本が提案)。今後、実用に向けた搭載機器を開発していくにあたっては、それらの技術条件に近くなるように設計を進めていく必要がある。とくに、ここに記されている 300~400 ものセルを生成するマルチビームフットプリント[12] (図 10) を実現するには、ビーム形成機構をはじめとする搭載機器の大幅な小型化、軽量化、大容量化を実現する必要がある。またそのほかの技術課題として、搭載用アンテナのアンテナパターン改善、適応変調や伝送速度可変技術、既存の他の無線業務と共存するための動的チャネル割当て (DCA) 技術、帯域外放射の低減ならびに線形性のよい送信機の開発などがあげられる。



(a) Uniform footprint model (367 beams)

(b) Multiple zone model (397 beams)

図 10 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

6. 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。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数多くあり、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ひとつであるといえる。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ひと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。

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] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] M. Oodo and R. Miura, "A Novel Calibration Method for DBF Transmitting Array Antennas," Proc. AP-2000, Davos, Apr. 2000.
- [14] 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.
- [15] WRC-2000 Final Acts, ITU, Istanbul, June 2000.
- [16] ITU-R Doc. 9B/44, Nov. 2000.