定点滞空飛行船を用いたデジタル放送実験

A Digital Broadcasting Experiment Using an Autonomous Stationary-keeping Airship

正会員 永塚 守[†], 鈴木 幹雄[†], 三浦 龍[†]

Mamoru Nagatsuka[†], Mikio Suzuki[†] and Ryu Miura[†]

Abstract A broadcasting system using a stratospheric platform, which is an air vehicle capable of remaining stationary at an altitude of 20 km, has been studied. Advantages of such a system are that it has a wider line-of-site area than a terrestrial system and a shorter propagation distance than a satellite system. However, such air vehicles have not been realized yet. An experiment in which a broadcasting signal is transmitted from a stationary airship at an altitude of 4 km is presented. The service area was defined as an area where the angle of elevation to the airship exceeded 10 degrees. A helical antenna was developed to provide higher gain in the oblique direction to distribute power uniformly. Received power was measured and reception using off-the-shelf receivers was verified in two flight tests. Stable reception was confirmed at several receiving points in the service area despite instability immediately below the airship.

キーワード：成層圏プラットフォーム、飛行船、デジタル放送、ヘリカルアンテナ、ISDB-T

1. ま え が き

電波により伝送を行うテレビジョン放送は、その送信形態により地上放送と衛星放送に分けることができる。地上放送は、鉄塔や山岳地形を利用して送信アンテナを設置する送信形態であり、日本では50年以上をかけて全国に送信所が整備されてきた。VHF帯もしくはUHF帯を使用し、伝搬は直接波のほか、反射波と回折波が主体となる。送信アンテナは、広いサービスエリアを得るために、なるべく高いところに設置される。しかし、例えば、都市部において、鉄塔の高さはせいぜい500 m程度であり、受信アンテナから送信アンテナが見通しとなる確率は低い。遮蔽が多いという意味では、送信電力は必ずしも有効に利用されているとは言えない。また、しばしばマルチパスによる受信障害が発生する。

一方、衛星放送には、受信点から見て高い仰角に配置される静止衛星が用いられる。周波数はマイクロ波帯であり、見通しでの直接波による伝搬が用いられる。直接波による伝搬という面では送信電力が有効に利用されていると言えるが、一方で伝搬距離が36,000 km以上となり、自由空間

伝搬損は大きい。

そこで、鉄塔や山岳よりも高く、人工衛星よりも低い高度に滞空する飛行体の利用が考えられる。成層圏（一般的に高度12 kmから50 km程度）の中でも気流が安定している高度20 km付近に飛行体を滞空させ、成層圏プラットフォームとして利用するシステムの研究開発が進められている。飛行体を使用することにより、受信点から送信点を見た仰角が高いというメリットを享受しつつ、伝搬距離を地上放送に近い水準まで短くしようという考え方である。

日本では、1998年から国の研究開発プロジェクトとして、成層圏プラットフォームに利用する飛行船と、通信放送ミッションおよび地球観測ミッションの研究開発が進められてきた^{1)~3)}。これ以外でも、国内外において通信アプリケーションの研究開発が進められている^{4)~6)}。しかし、世界的に見ても、成層圏に自律的に長時間滞空できる飛行船はまだ実現されていない。

このような状況の中で、放送システムの検討も行われてきたが^{7)~9)}、概念検討や計算機シミュレーションがほとんどであり、飛行体を使用した実験はほとんど行われていない。我々はこのような中で、米国NASAが開発した高度20 kmに到達可能なソーラプレーンを利用し、2002年に実験を行った¹⁰⁾。UHF帯において地上デジタル放送信号伝送実験を実施し、成層圏からの送信に特別な問題はないことを実証した。しかし、機体への取り付け機器の制限などから、受信点として機体直下しか想定しておらず、放送システムとしては、必要なエリアの広がり方を考慮していないと

2005年7月、映像情報メディア学会放送技術研究会で一部発表
2006年5月15日受付、2007年1月11日最終受付、2007年1月23日採録

[†]独立行政法人情報通信研究機構

(〒239-0847 神奈川県横浜須賀町光の丘3-4, TEL 046-847-5050)

[†]National Institute of Information and Communications Technology
(3-4, Hikarino-oka, Yokosuka, Kanagawa 239-0847, Japan)

図 1 定点滞空飛行試験機
Low altitude stationary flight test vehicle.

いう問題があった。

本論文では、高度 4 km で定点滞空可能な飛行船を使用し、UHF 帯による放送実験を行った結果を報告する。飛行船を使用したシステムのメリットである広いサービスエリアを実現し、エリア内で均一な受信電力を得られるシステムを構築するため、新たな送信アンテナを開発して飛行船に搭載し、その特性を測定した。また、市販の地上デジタル放送受信機によって、動揺する飛行船から送信された信号が受信できるかの確認も行った。

本論文は、以下、次のように構成される。2 章では成層圏プラットフォームの概要と、放送システムへの応用について述べる。3 章では、開発したアンテナを含む実験システムの詳細を述べ、4 章では実験の状況と受信結果について述べる。5 章でその結果を分析し、6 章で全体をまとめ、今後の課題について述べる。

2. 飛行船の利用

2.1 成層圏プラットフォームと定点滞空飛行船

成層圏プラットフォームを実現するには、高度 20 km に到達し、長期間安定して定点に滞空できる飛行船が必要である。翼によって揚力を得る固定翼型の飛行船の中にも高度 20 km に到達可能なものがある。しかし、この種類の飛行船が高度を維持するには、常に対気速度を一定以上に保つ必要がある。したがって、完全に定点に留まることは困難である。

この点で、対気速度と関係なく、低比重のガスを擁することから得られる浮力を使う飛行船は、成層圏プラットフォームに適していると言える。

すでに述べたように、1998 年から日本でも成層圏プラットフォームに使用するための飛行船の開発が開始された。宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、成層圏プラットフォーム研究開発の途中段階の目標として、高度 4 km での自律的な定点滞空が可能な飛行船（定点滞空飛行試験機）を開発した。外観を図 1 に示す。この飛行船は無人で、地上から遠隔操縦される。全長 68 m、全高 21 m、重量約 6 t である。

本研究では、この飛行船を使用した。飛行船の下部中央に吊り下げられたゴンドラ（外部コンパートメント）内に

図 2 プラットフォーム直下からの距離と仰角の関係（飛行体高度：20km）
Relation between distance from the point just below the platform and elevation angle.

図 3 日本への成層圏プラットフォーム配置例
An example of stratospheric platform deployment.

無線機器を装備し、実験を行った。

2.2 飛行船からの送信

高度 20 km に滞空させた成層圏プラットフォームを通信・放送用途に用いる場合、広い範囲を見通すことが可能であることが利点となる。

例えば、地球を半径 6,378 km の球とみなし、高度 20 km からの光学的見通し範囲を計算すると、プラットフォーム直下の点から 504 km の範囲となる。また、直下の点からの距離と、その点からプラットフォームを見た仰角の関係は図 2 のようになる。仰角 20 度となる距離は 54 km、10 度なら 108 km、5 度で 194 km である。

そこで、仰角 10 度以上となる半径 108 km の円を日本地図上に配置した例を図 3 に示す。一部離島を除く全土を、20 の円でほぼカバーできることがわかる。すなわち、仰角 10 度以上でプラットフォームが見える範囲をサービスエリアと設定すれば、20 機の成層圏プラットフォームを配置することで、一部離島を除いた日本全土をカバーすることが可能であることになる。

本研究では、図 4 に示すように、受信点から送信点を見た仰角 θ が 10 度を越える領域をサービスエリアと定義した。サービスエリアを広く取るために、さらに仰角が低い領域までをサービスエリアと定義することも考えられる。

図 5 実験システムの構成
The experiment system configuration.

図 4 サービスエリアの定義
Definition of the service area.

しかし、水平に近い方向に電波を放射すると、エリア外への干渉の制御が困難になる事態も予想されるため、暫定的に 10 度に設定した。

ここで、エリア内の受信電界強度分布に着目すると、送信点直下では伝搬距離が短く、エリア周辺部に行くにつれて長くなる。大地を平面と仮定すると、伝搬距離 l_p は次のようになる。

$$l_p = \frac{h}{\sin \theta} \quad (1)$$

θ が 10 度であるエリア外縁では、 l_p が中心に比べて 5.8 倍となり、自由空間伝搬損は 15.2 dB 大きくなる。また、エリア周辺部では送信点を見る仰角が低くなるため、地形や建築物の影響を受けて、さらに減衰が増える可能性がある。

本研究では、このような問題を考慮し、アンテナビームの中央よりも周辺方向に利得が高いアンテナを開発し、実験を行った。

3. 実験システム

3.1 全体の構成

実験システムは、図 5 に示すとおり三つのブロックから構成される。地上に設置したフィーダリンク送信ブロックにより、デジタル放送信号を生成し、搭載機器に向けて送信する。飛行船上の搭載機器ブロックでは、この信号を受信し、周波数変換と増幅を行い、地上に向けてデジタル放送信号を送信する。地上の受信ブロックによりこの信号を受信する、という構成である。

デジタル放送信号の規格としては、地上デジタル放送の規格である ISDB-T を使用した。OFDM 方式を使用した ISDB-T は、地上伝搬路に特有のマルチパスの影響を受けにくいという特長を有する。本研究で扱う飛行船から地上

図 6 受信に用いたアンテナ
リングアンテナ (左) 反射板付きクロスダイポールアンテナ (右)
The antennas used for reception.
Ring antenna (left) and cross dipole antenna with reflector (right).

に対する伝搬では、マルチパスは発生しにくいと予想されるため、必ずしも ISDB-T の特長が活かされるとは言えない。しかし、成層圏プラットフォームが地上放送ネットワークに取り入れられて利用されることを想定し、ISDB-T 方式を採用した。

周波数、出力、偏波、アンテナの構成は図 5 のとおりである。なお、周波数の端数は、ISDB-T の規定による 1/7 MHz のシフトである。

フィーダリンク回線送信アンテナの半値幅は 28 度であり、手動により飛行船を追尾する機構とした。受信用パッチアンテナの半値幅は 55 度で追尾機構はなく、飛行船が水平飛行したときに鉛直方向に指向するよう固定された。

搭載機器ブロックには AGC 機能が備えられており、受信電力が -81 dBm 以上 -46 dBm 以下であれば、増幅器出力電力は (37 ± 0.5) dBm の範囲に調整される。

受信ブロックには、自動車に搭載する構成と飛行船直下に固定して受信する構成の 2 種類を用いた。

自動車に搭載する構成では、発電機を備えた自動車を受信点まで移動後、停車して測定を実施した。円偏波用のリングアンテナ (図 6 の左側) から得られた信号を 2 分割し、テレビ受像機と測定器に入力した。パイプ状およびリボン状の部品から構成されているため、受風面積が小さく、屋外でも安全に任意の方向に指向させることが可能である。自動車搭載の受信セットは 2 組を使用した。

図 7 ヘリカルアンテナの外観
Appearance of the helical antenna.

飛行船直下に固定して受信する構成では、天頂に向けて固定した反射板付きクロスダイポールアンテナ（図 6 の右側）を使用し、得られた信号を増幅して室内に引き込んだ後、自動車での受信と同様にテレビ受像機と測定器に接続した。

3.2 飛行船に搭載する送信アンテナ

2.2 節で述べたように、サービスエリア内では、中心付近に比べ周辺部で伝搬距離が大きく、自由空間伝搬損も大きくなる。そこで本研究では、このような自由空間伝搬損の差を指向性パターンで相殺するアンテナの開発を試みた。理想的なアンテナが実現できれば、サービスエリア内で均一な電界強度が得られる。

アンテナから見て鉛直線方向から角度 ϕ だけずれた方向（図 4）では、伝搬距離は次のようになる。

$$l_p = \frac{h}{\cos \phi} \quad (2)$$

したがって、鉛直方向でのアンテナ利得を $G_0(\text{dB})$ とすれば、 ϕ 方向のアンテナ利得 $G_\phi(\text{dB})$ を次のようにすればよい。

$$G_\phi = G_0 - 20 \log(\cos \phi) \quad (3)$$

今回使用する 500 MHz 付近の帯域では波長が 60 cm 程度となることを考慮し、ヘリカルアンテナの使用を検討した。アンテナは飛行船の Gondola 下部の金属板（ベースプレート）に取り付けて、これを反射板として利用することになる。また、飛行船の運航に支障とならないよう、ベースプレートの突起が 60 cm を超えないことを外形寸法の条件とした。

アンテナの外観を図 7 に示す。ベースプレートに取り付けた際に外に出る部分は円筒形のレドームに覆われており、その直径は 125 mm、長さは 590 mm である。なお、ベースプレート内側に収容される部分にも、整合器を収容したシャシがある。図 8 に、アンテナが取り付けられた Gondola を示した。矢印で示した部分がアンテナである。

アンテナの指向性パターンを電波暗室にて測定した。電波暗室内では Gondola に取り付けられた状態で測定することが困難であったため、180 cm 四方のアルミ板を反射板とした状態で測定を行った。結果を図 9 に示す。横軸は、アンテナ中心軸からの角度である。

図 8 Gondola に取り付けられたヘリカルアンテナ
The helical antenna installed beneath the gondola.

図 9 ヘリカルアンテナの指向性パターン
Pattern of the helical antenna.

実線で示したのが、測定されたヘリカルアンテナの特性である。±73 度付近に最大値、±42 度付近に最小値があることがわかる。破線は、アンテナの中心軸が鉛直線と一致しているという条件の下、式 (3) に示した理想的な指向性パターンであり、±80 度において、実線で示した実測特性と合わせてある。±80 度において回線設計が成立するように送信電力を決定すれば、使用するアンテナの利得が理想特性を上回る方向である限り、回線が成り立つことになる。このヘリカルアンテナの場合、±42 度付近で理想特性を下回る部分があるが、下回る角度範囲はそれぞれ 10 度未満であり、下回るレベルも 2 dB 以内である。正面方向や±60 度方向で理想的な特性より 6 dB 以上大きなゲインが得られているものの、サービスエリア外周の方向により大きな電力を放射するという設計方針を概ね満足するアンテナが実現できたと言える。

また、軸比の測定も実施した。直線偏波のログペリアンテナから送信し、偏波面を回転させながら、利得の最大値と最小値を測定した。図 10 に、横軸 5 度間隔で測定した結果を示す。

軸比は、最大値と最小値の間隔、すなわちグラフ上の二つのプロットの間隔で表される。もともと利得の高い±70 度より外側と正面方向では 3 dB 以内の軸比が得られているが、それ以外の方向では大きく、50 dB 以上となった方向もある。軸比が大きくなる方向において直線偏波のアン

図 10 ヘリカルアンテナの軸比特性
Axial ratio pattern of the helical antenna.

表 1 ISDB-T の設定
Options of ISDB-T.

モード	モード 3 (有効シンボル長 1,008 μ s)
ガードインターバル比	1/16
キャリア変調方式	64QAM
内符号符号化率	2/3
時間インターリーブ長さ	I=4

表 2 受信機の特性
Characteristics of receivers.

	必要入力レベル (dBm)	許容周波数偏差 (kHz)
機種 1	-82	+240 / -260
機種 2	-81	+110 / -130
機種 3	-80	+250 / -250
機種 4	-81	+250 / -250

テナで受信すると、偏波面が直交して受信電力に損失が生じる可能性がある。3.1 節で述べたように、本実験では、対向する受信アンテナに円偏波アンテナを使用した。

3.3 市販受信機の利用と信号パラメータ

本研究では、受信機には家庭用の市販品を使用した。そのため、伝送パラメータには、(社)電波産業会 (ARIB) による地上デジタルテレビジョン放送運用規定¹¹⁾に基づいた設定を使用した。主要なものを表 1 に示す。

この設定での伝送ビットレートは 17.2 Mbps であり、走査線 1,080 本インタレースの HDTV 信号が十分に伝送可能な容量である。また、ARIB の標準規格に掲載されている所要 CN 比の参考値は、18.7 dB である。この所要 CN 比に対し、雑音温度を 300 K、雑音指数を 7.0 dB として必要な入力レベルを試算すると -80.6 dBm となる。

本実験で使用したものを含む受信機 4 機種に対して、必要な入力レベルと許容周波数偏差を調べた結果を表 2 に示す。必要入力レベルは、上で試算した値にほぼ等しく、下回っているものもあった。許容周波数偏差は機種によって異なっているが、100 kHz 程度の周波数偏差は許容できることがわかる。ただし、この許容周波数偏差は中心周波数のみを操作し、信号のクロック周波数は変動させない条件での測定結果である。

3.4 回線設計

フィーダリンクの回線設計表を表 3 に、UHF 放送波の回線設計表を表 4 に示した。表中では、アンテナ利得は等

表 3 フィーダリンクの回線設計表
Link budget of feeder-link.

水平距離 (km)	0.0	2.0
高度 (km)	4.0	4.0
仰角 (deg)	90	63
送信電力 (dBm)	37.0	37.0
ケーブル等損失 (dB)	5.0	5.0
送信アンテナ正面利得 (dBi)	14.8	14.8
伝搬距離 (km)	4.0	4.5
周波数 (MHz)	2002	2002
伝搬損失 (dB)	110.5	111.5
受信アンテナ正面利得 (dBi)	7.6	7.6
指向方向のずれ (deg)	0	27
指向性損失 (dB)	0.0	2.5
ケーブル等損失 (dB)	1.0	1.0
受信電力 (dBm)	-57.1	-60.6
予想 CN 比 (dB)	44.2	40.7

表 4 UHF 放送波の回線設計表
Link budget of UHF broadcasting link.

水平距離 (km)	0	10	22.7
高度 (km)	4.0	4.0	4.0
仰角 (deg)	90	22	10
送信電力 (dBm)	37	37	37
ケーブル等損失 (dB)	0.5	0.5	0.5
受信点への方向 (deg)	0	68	80
送信アンテナ利得 (dBi)	-6.0	0.9	0.6
伝搬距離 (km)	4.0	10.8	23.0
周波数 (MHz)	479	479	479
伝搬損失 (dB)	98.1	106.7	113.3
受信電界強度 (dB μ V/m)	63.7	62.0	55.1
受信アンテナ利得 (dBi)	7.7	8.4	8.4
ケーブル等損失 (dB)	0.5	0.5	0.5
受信電力 (dBm)	-60.4	-61.4	-68.3
単独 CN 比 (dB)	38.9	37.9	31.0
総合 CN 比 (dB)	36.4	35.8	30.5

方性アンテナに対する絶対利得で表記してある。また、自由空間伝搬損による電力損失を中心とした表記法で作成してあるが、表 4 については、受信点の電界強度も併せて示した。

フィーダリンクの回線設計では、送信アンテナから見た仰角が 60 度以上の範囲に飛行船があることを想定している。回線設計表では、水平距離の項に、飛行船が送信アンテナ真上から水平にどれだけ離れているかを示してある。0.0 は送信アンテナ真上、2.0 は送信アンテナ真上から 2.0 km 離れた位置で、送信アンテナから見た仰角は 63 度となる。送信アンテナは手で飛行船を追尾し、飛行船搭載の受信アンテナは追尾機構を持たない想定とした。したがって、送信側アンテナ利得は常に正面の最大利得が適用され、受信側では指向方向のずれによる損失が生じる。ケーブル等損失の値は、主にフィーダの損失を考慮したものである。送信側では、電力増幅器のある室内からアンテナのある屋上までフィーダを引き回すため、5 dB としている。

予想 CN 比は、回線計算により得られた受信電力値と、雑音温度 300 K で雑音指数が 5.0 dB の場合の理論的な雑音電力を比較して算出したものである。なお、送信電力は、フィーダリンクの受信段階で CN 比が 40 dB 程度となることを目安として決定した。

UHF 放送波の回線設計では、受信点直下からサービスエリアの最外周部までの代表的な3点を想定した計算を行い、水平距離の項は、飛行船直下の点から受信点までの距離を示している。飛行船の高度は4,000 mを想定し、それぞれ受信点から飛行船を見た仰角が求めている。水平距離22.7 kmは、仰角が10度になる点であり、サービスエリアの境界にあたる。

受信点への方向は、飛行船からの鉛直線と、飛行船と受信点を結ぶ線のなす角度である。送信アンテナ利得は、受信点への方向に対応する送信アンテナの利得である。飛行船が水平に飛行し、送信アンテナの中心軸が鉛直線と一致していると仮定し、図9から読取った値である。

3.1節で述べた構成のとおり、受信アンテナには、飛行船直下では反射板付きクロスダイポールアンテナを、それ以外の点ではリングアンテナを想定した。それぞれ、飛行船の方向に理想的に向いている仮定である。受信機の雑音指数を7.0 dBと仮定したこの回線単独でのCN比と、送信時にすでにCN比が40 dBに劣化していることを考慮した総合CN比を求めた。上で述べた所要CN比(参考値)18.7 dBと比較すると、10 dB以上のマージンがあることになる。アンテナにより受信した電力を2分配して使うことを考慮した3 dBの劣化を考慮しても、回線は成立することがわかる。また、3.2節で述べたように、アンテナ中心軸から80度方向にあたるサービスエリア端で回線が成り立てば、図9での理想特性との間の議論から、わずかな例外を除いたほとんどの点で回線が成り立つことが明らかである。

4. 実験

4.1 飛行パターンと受信位置

実験は、飛行船自体の飛行試験の実施に合わせ、2004年11月19日および同22日の2回にわたり実施した。いずれのフライトにおいても、飛行船自体の所定高度到達能力や定点滞空能力を実証するといった試験課題があり、飛行パターンについては、本実験に対して必ずしも最適なものとはならないという前提での実施であった。場所は北海道の十勝地方沿岸部である。大樹町の多目的航空公園に設置された飛行船格納庫および飛行管制棟を中心として、飛行船の運用が行われた。放送実験の地上設備は3階建ての管制棟内に、アンテナは屋上に設置した。

測定実施場所周辺の地図を図11に示す。飛行船は図中の管制棟上空の高度4,000 mに滞空することが基本となる。図中の距離は、各点と管制棟との間の水平距離を示す。これらの受信点のうち、1回目の実験では、管制棟、旭浜港、広尾シーサイドパークの3地点、2回目の実験では、管制棟、アイホシマ川、旭浜港、レインボー大橋の4地点で受信を行った。

送信点の位置を把握するため、1回目と2回目の実験における飛行船の高度、および飛行管制棟を基準とした東西・

図11 実験場所周辺地図
Map of experiment site.

図12 飛行船の位置(第1回)
The airship's position in the 1st flight.

図13 飛行船の位置(第2回)
The airship's position in the 2nd flight.

南北方向位置を、図12、13に示す。なお、東西は東を正、南北は北を正として表現してある。

1回目の実験では、飛行船は13時27分頃から13時44分頃まで、飛行管制棟の東400 m/北300 m付近において、高度約3,600 mでの定点滞空飛行を行った。風上である西西南西方向に船首を向け、左右に100 m程の幅で移動を繰り返す自動的な定点滞空飛行である。その後高度を上げ、14時07分頃に高度4,000 mに到達した後、下降を開始した。電波を発射して実験を実施したのは、13時19分から14時25分の間であった。

2回目の実験では、3回の定点滞空飛行を行った。10時23分頃から10時37分頃まで飛行管制棟の東550 m/北150 m/高度4,000 m付近で、10時49分頃から11時00分頃まで飛行管制棟直上/高度3,700 m付近で、11時02分頃から11時06分頃まで飛行管制棟の東450 m/北250 m/高度3,700 m付近で、それぞれ定点滞空飛行を実施した。

図 14 受信電力 (第 1 回)
Received power in the 1st flight.

図 15 受信電力 (第 2 回)
Received power in the 2nd flight.

その中でも、11 時 00 分頃までの飛行管制棟直上での 1 回は、パイロットの操作による精密な定点滞空であった。それ以外の 2 回は、北西方向に船首を向け、左右に 100 m 程の幅で移動を繰り返す自律的な定点滞空飛行であった。電波を放射して実験を実施したのは、10 時 16 分から 11 時 27 分の間であった。

4.2 受信結果

各地点での受信レベルを図 14、15 に示す。スペクトラムアナライザの測定記録から帯域電力を求め、アンテナ出力端の電力に換算して表示したものである。なお、図 15 では、4 地点での結果を提示するため、便宜上、グラフ 2 面に分割して示す。

図 14 の 1 回目の実験においては、旭浜港と広尾シーサイドパークでは、定点滞空飛行の時間において安定した受信電力が得られた。

飛行高度 4 km で飛行船が水平に飛行していると仮定した表 4 の回線設計からアンテナ出力端での電力を求めると、

旭浜港に相当する水平距離 10 km の地点では -60.9 dBm、広尾シーサイドパークに近い水平距離 22.7 km の地点では -67.8 dBm と予想される。これらの数値と比較すると、旭浜港では 3 dB 程度、広尾シーサイドパークでは 1 dB 程度高いレベルが得られている。

定点滞空地点からおよそ 21 km の水平距離を持つ広尾シーサイドパークにおいても、定点滞空飛行以外の時間も含め、受像機により安定した受信が可能であったことが確認されている。

一方、飛行管制棟屋上での受信電力測定結果は、定点滞空飛行時間中においても 10 dB 以上変動する不安定な状態が記録されている。このデータを記録した時点では、自動測定プログラムが信号の復調を確認する機能を有しており、受信レベルが下がって復調が不可能になるとプログラムが停止した。手動により回復操作を行うまでの間のデータが記録されていない。少なくとも、データの欠測期間の最初の時点では、受信不可能であったことになる。このような急激な受信電力の変化は、これまでに議論してきたアンテナパターンや回線設計では説明することが困難である。アンテナを飛行船に取り付けたことによるアンテナパターンの変化が疑われるが、第 2 回の結果と合わせて、次章で考察する。

図 15 の 2 回の実験においては、車載用受信セットのうち 1 セットは、最初から 10 時 34 分までレインボー大橋で受信を行い、次にアイホシマ川まで移動して 11 時 17 分から受信を行った。このため、移動の時間帯には欠測となっている。

残りの 1 セットは終始旭浜港で受信を行ったが、途中で自動測定システムを停止し、周波数偏差などの他の測定を試みていたため、10 時 45 分から 11 時 08 分までの間のデータが欠測している。

1 回目の結果と同様に、管制棟屋上での受信電力に限って、一気に 10 dB 以上の低下が起こるような、激しい受信電力の変動が認められる。このような場合には、復調も不可能となった。(1 回目の実験で発生した復調不可能によるデータ欠測の問題は、この実験までに解消した。)

それ以外の受信点では、数 dB の変動があるものの十分な受信電力が得られており、市販受信機で受信が可能であった。3.4 節の仮定を使ってアンテナ出力端での受信電力の予想値を算出すると、レインボー大橋は -63.3 dBm、旭浜港は -60.9 dBm である。これら 2 点での実測の受信電力のうち、機体位置や高度が表の算出条件に近い 10 時 30 分頃の定点滞空飛行時のデータに着目すると、レインボー大橋はほぼ一致、旭浜港は 1 dB 程度小さな値が得られている。アイホシマ川での予想値は -67.8 dBm であるが、実測値は 10 dB ほど高い。測定が行われた 11 時 08 分以降に、飛行船が定点滞空位置から大きくはずれていたことが原因と考えられる。

図 16 推定された送信アンテナ利得 (第1回)

Estimated gain of the transmitting antenna in the 1st flight.

図 17 推定された送信アンテナ利得 (第2回)

Estimated gain of the transmitting antenna in the 2nd flight.

5. 実験結果の分析

5.1 アンテナの指向性

図 14, 15 で受信電力を示したが、飛行船の位置や姿勢はさまざまであり、これらの影響を考慮する必要がある。そこで、図 12, 13 に示した位置のほか、真方位角、ピッチ角、ロール角の記録を使い、飛行船の機体を基準とした相対的な受信点の方向を計算した。相対的な受信点の方向の表現には、相対受信点方位（船首方向を 0 度、右舷方向を 90 度とする。）と、送信アンテナの中心軸と受信点への直線がなす角度である受信点オフセット角を使用する。

また、これらの飛行記録から送受信点間の距離も計算することができる。伝搬路が理想的な自由空間伝搬路であると仮定すると、伝搬損失が計算可能である。さらに、受信アンテナの利得を図 5 のとおりとすれば、測定された受信電力との差し引きにより、送信アンテナの利得が推定できる。

横軸に受信点オフセット角をとり、縦軸に対応する時刻の送信アンテナ利得をとったグラフを、図 16, 17 に示す。これらのグラフは、横軸にアンテナの中心軸を基準とした角度、縦軸にアンテナ利得をとっているという点から、図 9 と同じ表現である。そこで、同図から得られたデータを重ねてプロットした。送信アンテナが電波暗室内で測定した際と同じように理想的に動作し、理論的な伝搬が実現していれば、これらの値は一致することになる。

図 18 方位により利得が影響を受けている例
An example of directional dependency.

管制棟屋上以外で、リングアンテナにより受信したデータは、電波暗室で測定した特性と比較し、1 回目の場合 +4 dB から -6 dB の範囲内、2 回目の場合 +2 dB から -5 dB の範囲内に分布している。

このばらつきの原因として考えられるのは、まず、飛行船の形状による指向性への影響である。飛行船の形状は左右に対称であるものの、アンテナ取付位置に関して点対称とは言えない。したがって、飛行船からみた相対受信点方位によって指向性パターンが異なる可能性がある。飛行中に方位は常に変動しており、同じ受信点オフセット角であっても推定された利得にばらつきが生じる原因になっていると考えられる。

例えば、図 18 は 1 回目の 13 時 26 分 58 秒から 13 時 45 分 48 秒までの定点滞空飛行中の旭浜港での受信に関するデータである。上のグラフはこの時間中の飛行船から見た受信点の方向を示したもので、横軸が相対受信点方位、縦軸が受信点オフセット角である。定点滞空飛行中であるので、横軸が -70 度から -30 度までの範囲で、縦軸はおおよそ 68 度から 72 度までの狭い範囲での変動が見られる。同図の下側のグラフは、横軸は上のグラフと同じ相対受信点方位、縦軸が図 16 に示した送信アンテナ利得を示したものである。上のグラフから、受信点オフセット角の変動が 4 度程の狭い範囲にとどまっていることが確認できるが、下のグラフでは -45 度方向で特異的に、1 から 2 dB の利得低下が認められる。このように機体を基準にして見ると、方位によって利得が変動していることが確認できる。

また、送受信点間の伝搬が、直接波のみの単純な伝搬路でなかった可能性がある。受信点には、周辺に建築物が少なく飛行船が容易に見通せる場所を選び、自動車との位置関係など伝搬路に影響を及ぼす恐れのある試験機材の配置にも留意した。しかし、仰角が小さい場合、必ずしも反射波が受信アンテナに入射しなかったとは言い難い。特に、大地での反射は不可避であると考えられる。飛行船の位置が常に変動することから、ハイトパターンによる確認は不可能であった。

さらに、受信アンテナの指向方向と飛行船の方向のずれ

図 19 受信が不可能であった相対的方向
Relative directions of the receiving point during reception failure.

を考慮していないという問題もある。いずれの受信アンテナも指向性が広いため、ほとんどの受信データでは 1 dB 以下の影響に過ぎないと考えられる。しかし、2 回目の 11 時 08 分以降ではアンテナ指向方向のずれが拡大しており、影響を受けている可能性がある。図 17 に示したアンテナ利得の推定値で、受信点オフセット角 64 度付近のアイホシマ川での値がアンテナパターンより小さくなる方向で乖離しているのは、11 時 25 分以降送信停止までの間の受信アンテナと飛行船の方向のずれの影響である可能性が大きい。その大きさは最大で 4 dB 程度と考えられる。

5.2 受信不可能な領域

図 16, 17 において管制棟屋上での受信に着目すると、受信点オフセット角が 10 度以下の領域で、電波暗室での測定データから 20 dB 程度の乖離が見られる。4.2 節に述べた、10 dB 以上の幅で受信電力が一気に低下する現象である。

この現象が発生した際の飛行船と受信点の位置関係を確認するため、相対受信点方位と受信点オフセット角を局座標表示でプロットし、図 19 に示した。点線が飛行船の動きによる受信点位置の推移であり、太線部分は推定されたアンテナ利得が電波暗室での測定データに比べ、-10 dB 以下となった位置を示している。太線部分はいずれのフライトでも機体から見て前方にあり、受信点オフセット角が 10 度以内で発生していることがわかる。

また、このときの受信信号の状態を確認した。スキャタードパイロットを抽出し、帯域内の周波数特性を得た例を示す。図 20 は 11 月 22 日の 10 時 45 分 48 秒頃の例であり、周波数選択的にレベルの落込みがあることが確認できる。このことから、直接波と同等のレベルの遅延波が到来し、受信信号に混入している可能性を考えることができる。遅延時間は短く、図 20 から推定することは容易ではない。しかし、落込みの間隔は 12 MHz より大きいと見られるため、遅延時間はその逆数である 83 ns より小さいと推定される。伝搬距離差に換算すれば、大きくても 25 m である。

飛行船直下以外では遅延波の影響がないことを考えると、UHF 放送波回線での多重伝搬により遅延波が生じていると考えられる。また反射体は、伝搬路から 25 m 以内に存在す

図 20 受信不可能時の周波数特性の例
An example of frequency characteristics during reception failure.

図 21 着地用機構に反射した場合の電波行路
Path of radio wave reflected by landing gear.

ることになる。管制棟屋上に設置した受信アンテナの指向性を考慮すれば、受信アンテナ周辺には直接波と同等のレベルの反射波を生じるような地上の構造物は存在しなかった。伝搬路の途中には何ら反射体は存在しないため、飛行船底面の構造による反射の影響が疑われる。

飛行船底面は図 8 からわかるように、単純な平面板ではなく、送信アンテナから放射された電波を反射し得る構造が存在する。これらは飛行船の航行や運用に必要な機構であり、多くは金属製である。

ここでは仮に、送信アンテナから後方約 5 m の距離にある着地用機構により反射が生じ、受信点に到達している可能性を検討する。図 21 は飛行船のゴンドラを進行方向左側真横から見た、送信アンテナと着地用機構の位置関係を示した図である。受信アンテナは数千メートルの距離を隔てた地上に設置されている。送信アンテナから放射された電波は着地用機構に反射し、直接波に比べ、およそ送信アンテナと反射体との距離に相当する約 5 m の行路差をもって地上の受信アンテナに到達する。このとき、受信点の方向がアンテナ取り付け軸から前方 5 度、反射体の方向が後方 85 度とすれば、図 9 から、反射体方向へのアンテナ利得は、受信点方向に比べておよそ 6 dB 大きいと推定される。反射体は波長より充分小さく複雑な構造を有していることを考慮し、反射損失を 6 dB と見積もれば、直接波と反射波は同レベルとなり、今回の受信障害の原因と推定できる。ただし、図 8 からわかるように、送信アンテナ周辺には着地用機構の他にも反射の原因となり得る構造が存在しており、詳しい原因の特定については、電磁界解析などの方法により別途検討する必要がある。

6. む す び

成層圏プラットフォームを利用した放送システムを実証するため、高度 4 km に定点滞空可能な飛行船を使用した実験を行った。飛行船を仰角 10 度以上で見ることができ、およそ半径 23 km の円内をサービスエリアと仮定し、UHF 帯の地上デジタル放送方式 (ISDB-T) により実験を行った。サービスエリア内での受信電力を均一にするため、正面方向よりも周囲の方向に大きな利得を有するアンテナを開発した。

2 回の実験の結果、サービスエリアの中心、すなわち飛行船の直下の領域を除き、市販受信機によって良好に受信できることが確認された。サービスエリアの中心部では、飛行船の動きによって 10 dB を超える受信電力の変動が起これること、またその際には、強力な遅延波の存在をうかがわせる周波数選択的な受信レベルの減少が起これていることが確認された。現時点では飛行船底部の構造による反射で遅延波が到来している可能性が指摘できるが、電磁界解析等によって詳細な検討が必要である。

なお、今回の実験で受信確認した領域は、半径 23 km のサービスエリアのうちの一部に過ぎないことに留意する必要がある。また、本実験で使用した飛行船はすでに解体されており、追加実験を行うことはできない。

今後、成層圏プラットフォームによる放送システムを実用化するためには、アンテナ特性の最適化、飛行船構造によるアンテナ特性への干渉の防止手法の確立、サービスエリア外への干渉の抑止技術の開発などの課題の解決が必要である。

最後に、本実験においてご協力いただいた、宇宙航空研究開発機構航空プログラムグループ各位、ならびに森下洋治氏をはじめとする実験にご協力いただいた関係各位に感謝申し上げます。

〔文 献〕

- 1) K. Eguchi, Y. Yokomaku and M. Mori: "Overview of stratospheric platform airship R&D program in Japan", Proc. AIAA 14th LTA TCCE (July 2000)
- 2) 長谷: "成層圏プラットフォームを使った無線通信システムー 21 世紀の革新的通信インフラー", 映像学技報, **25**, 34, pp.19-25 (May 2001)
- 3) 三浦, 鈴木: "空に浮かぶ IT 基地「成層圏プラットフォーム」の実現をめざして", 信学技報, **105**, 188, pp.155-160 (Jul. 2005)
- 4) Iskandar, and S. Shimamoto: "Channel Characterization and Performance Evaluation of Mobile Communication Employing Stratospheric Platforms", IEICE Trans. Commun., **E89-B**, 3, pp.937-944 (Mar 2006)
- 5) T. C. Tozer and D. Grace: "High-altitude platforms for wireless communications", IEE Electronics & Communication Engineering Journal, **13**, 3, pp.127-137 (Jun. 2001)
- 6) J. Thornton, D. Grace, C. Spillard, T. Konefal and T. C. Tozer: "Broadband communications from a high-altitude platform: the European HeliNet programme", IEE Electronics & Communication Engineering Journal, **13**, 3, pp.138-144 (Jun. 2001)
- 7) 森下, 広瀬, 大須賀, 河野: "成層圏プラットフォームの概念検討結果ー放送システムー", 2000 信学総大, B-5-181 (Mar. 2000)
- 8) 都竹, 長谷, 鈴木, 森下: "成層圏プラットフォームによるデジタル放送の検討", 2001 信学総大, B-5-309 (Mar. 2001)
- 9) 崎本, 馬場, 米澤, 都竹: "成層圏プラットフォームによるデジタル放送の基礎検討", 映像学技報, **29**, 15, pp.1-4 (Feb. 2005)

- 10) M. Nagatsuka, Y. Morishita, M. Suzuki, and R. Miura: "Testing of Digital Television Broadcasting from the Stratosphere", IEEE Trans. Broadcast., **50**, 4, pp. 360-368 (Dec. 2004)
- 11) (社)電波産業会: "地上デジタルテレビジョン放送運用規定"

ながつか
永塚

まゐる
守

1990 年、東京工業大学工学部卒業。1992 年、同大学院修士課程修了。同年、郵政省通信総合研究所 (現、独立行政法人情報通信研究機構) 入所。2002 年、横須賀無線通信研究センター。2006 年 4 月から総合企画部勤務。地上デジタル放送、成層圏プラットフォームに関する研究に従事。博士 (工学)。正会員。

すずき
鈴木

みきお
幹雄

1970 年、慶応義塾大学工学部電気工学科卒業。同年、三菱電機株式会社入社。1998 年より、通信・放送機構 (現、独立行政法人情報通信研究機構) 横須賀成層圏プラットフォームリサーチセンターにおける通信放送ミッションに関する研究開発に従事。現在、新世代ワイヤレス研究センター有期研究員。

みうら
三浦

りゅう
龍

1982 年、横浜国立大学工学部卒業。1984 年同大学院修士課程修了。同年、郵政省通信総合研究所 (現、独立行政法人情報通信研究機構) 入所。現在、新世代ワイヤレス研究センターユビキタスモバイルグループサブリーダー。成層圏プラットフォーム、アレーアンテナ信号処理に関する研究に従事。博士 (工学)。