



ISSN 1349-1121  
JAXA-RM-13-004

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### インマルサット通信衛星サービスによる 無人航空機の飛行通信実験

松田 幸雄, 都甲 章己

2013年10月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# インマルサット通信衛星サービスによる 無人航空機の飛行通信実験\*

松田幸雄\*<sup>1</sup>, 都甲章己\*<sup>2</sup>

## An UAV Over-the-horizon Wireless Communication Flight Experiments Using Inmarsat Satellite Communication Service\*

Yukio MATSUDA\*<sup>1</sup> and Syouki TOGOU\*<sup>2</sup>

### Abstract

In the operation of UAV in an area with many obstacles, it is necessary to use over-the-horizon wireless communication system. For this purpose, we made an attempt to utilize inmarsat satellite service, and developed a device to keep a constant direction (south: inmarsat satellite direction) in any airframe yaw angle fluctuation. In a flight experiment, using an inmarsat satellite modem on board, we could stably receive down link data of airframe motion and images with camera from UAV.

Keywords: UAV, Unmanned aircraft, Satellite communication, Inmarsat

### 概要

無人航空機の運用に必要な無人航空機と地上間の相互無線通信を、インマルサット商用衛星サービスにより行うことにより、電波が直接到達できない運用範囲における見通し外通信(送受信点間が遠距離のため地表面が球面である影響や、山岳などにより見通しの得られない地点間で用いられる通信)が可能であることを、無人航空機を用いた飛行実験により検証した。その結果、機体に搭載する衛星通信端末のアンテナを、機体の運動に対して常に一定方位に維持する機器の開発により、無人機の運用における旋回運動等において、見通し外通信が安定的に可能であることを実証した。

---

\* 平成 25 年 5 月 13 日受付 (Received 13 May, 2013)

\*1 航空本部 運航システム・安全技術研究グループ  
(Operation Systems and Safety Technology Research Group, Institute of Aeronautical Technology)

\*2 元 航空プログラムグループ 無人航空機利用技術チーム  
(Unmanned Aircraft Utilization Technology Team, Aviation Program Group)

## まえがき

航空プログラム・無人航空機利用技術チームでは、災害発生時に無人航空機を運用して、被災状況を上空から把握することを目的とした「災害監視無人機システムの研究開発」を実施した。一般に無人航空機の運用では、機体を運用する地上設備(地上局)と飛行中の無人航空機間での無線通信が不可欠である。これは、飛行前に設定された経路を無人航空機が飛行している状況や、無人航空機の正常な機能継続を把握するために、無人航空機から定期的に地上局に向けた情報伝送(ダウンリンク)と、地上側から搭載機器への制御指令や状況変化に対応して飛行を中断・帰投させる、などの指示指令(アップリンク)が必要であることによる。この場合、一般的にこのような用途に用いられるUHF無線通信では、その周波数帯の電波の性質より、地上局と無人航空機間が見通し距離内(無線通信上の見通し範囲を示し、目視できる範囲ではない)であることが条件となる。しかしながら、地表面が球面である影響により両者間の距離が見通し距離を超える場合や、山岳など障害物がある場合では、電波が直接到達できない運用範囲での無線通信(見通し外通信)の手段が無ければ無人航空機は運用できない。

本報告は、この見通し外通信の手段として、インマルサット商用衛星の通信サービスの1つであるブロードバンド・サービス(Broadband Global Area Network: BGAN)を利用した地上局と無人航空機間の相互通信を、無人航空機の飛行実験で検証した結果について述べる。

## 1. 見通し外通信の手段

見通し外通信を行うには、何らかの中継局を地上、空中または宇宙空間に設ける必要があり、その具体的な手段としては次のような方法が考えられる。

- 1) 地上に中継地点を複数設置するか、既存の中継システムを利用する(図1-①)
- 2) 飛行体に中継機器を搭載させこれを運用する(図1-②)
- 3) 一般への通信サービスを行っている商用人工衛星サービスを利用する(図1-③)

この中で1)の地上中継方式は、中継設備の設置のためその地点へのアクセス方法があることが前提であり、また電源供給・保守などが必要で、さらに中継局の設置場所により無人航空機の運用範囲が限定される。次に既存の無線中継設備には、携帯電話システムの中継設備と全国に設置されているV、UHF帯を使用した高出力設備であるアマチュア無線用のリピータ設備があるが、両者とも電波法上の制約により一般的な利用はできない※。

---

※携帯電話、アマチュア無線用リピータにかかる電波法上の制約

電波法では、電波を発する機器・装置を「無線局」と規定している(受信専用、微弱な電波を発するものを除く)。全ての無線局はその設置について免許を取得する必要がある。免許には有効期間、無線局の種別、無線局の目的、通信の相手方、無線設備の移動範囲(移動局の場合)、周波数、電波形式、空中線電力が規定されている。またその操作には機器操作範囲の免許を有する無線従事者が必要である。ただし微小電力に限定して特別に許可されている免許を必要としない特定小電力局、及び免許は必要ではあるが届出のみで可能な簡易無線局等がある(両者とも無線従事者を必要としない)。この無線局事項によれば、携帯電話は「陸上移動無線局(包括免許)」であり、その移動範囲は「地上」に限定され電波法上の「上空」移動での通信は違法となる。またアマチュア無線用リピータの利用は、「無線局の目的、通信の相手方」について、それぞれアマチュア業務、アマチュア無線局に限る、とされており、その利用は違法となる(ただしアマチュア無線用リピータを使った災害時の非常通信訓練等は、大学・地方自治体等関係機関内のアマチュア無線局により試みられている)。

2)の飛行体による中継手法は、旧航空宇宙技術研究所で実施された「成層圏プラットフォーム研究開発」等があるが、その運用には多大な費用と設備・人員が必要であり、無人航空機はそれらのシステム全体の中での位置付けに留まる。また無線通信設備も特別に開設された無線局で行われるため、一般的な利用にはなじまない。

以上より現時点で電波法を遵守し、かつ一般的な利用が可能な方法は3)の商用衛星サービスを利用する見通し外通信以外にはその手段はないと考えられる。

現在この商用衛星サービスに

は、多数の小規模な人工衛星を使って主に電話サービスを提供するイリジウム衛星システムと、大規模な4つの静止衛星によってブロードバンド・サービスを提供するインマルサット衛星システムがあるが、両者ともその衛星端末機器は「携帯移動地上局(移動範囲は陸上、海上、上空)」の包括免許対象であり、上空を移動する無人航空機への搭載に電波法上の制約はない。

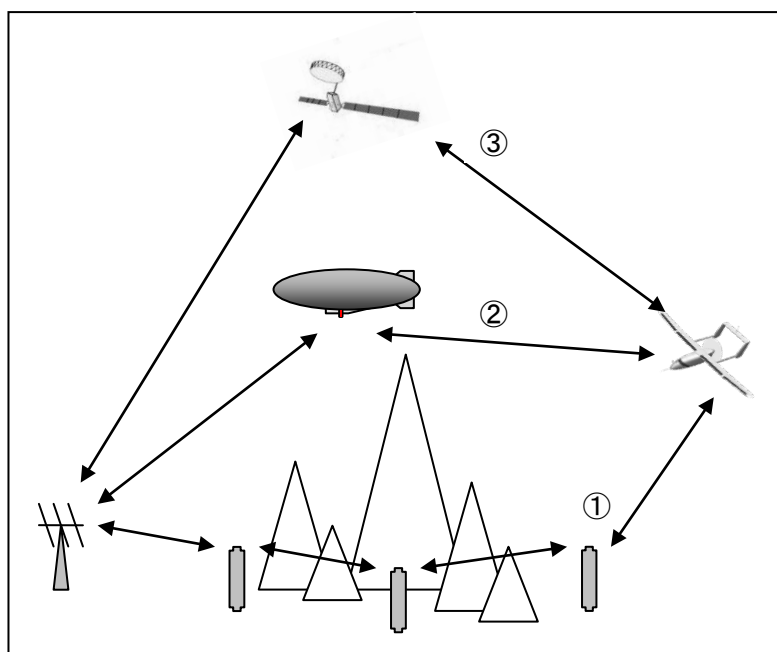


図1. 無人航空機の運用における見通し外通信の手段

## 2. 商用人工衛星サービス

### (1) イリジウム衛星サービスとその利用結果

イリジウム衛星サービスは米国の民間会社によるサービスで、高度670kmの低軌道を周回する66個の小型衛星により地上～衛星及び衛星間の通信を行い、主に音声電話を提供するサービスである。一般的な電話機程度の衛星端末では、モデムキットと称されるアダプタを取り付けて2400bpsのデータ送受信が可能とされており、衛星端末が図2に示すように小型・軽量でアンテナが無指向性であることから、無人航空機への搭載には適していると考えられる。

これよりまず2台のイリジウム衛星端末間のデータ通信を試みた。それぞれの端末は地上局用PC及び機体搭載用PCとRS232Cで接続し、アップリンク及びダウンリンク双方でのデータ通信を試みた。その結果高い建物の屋上等など、周囲に遮るものが無い場所の2地点間では比較的安定なデータ通信が可能であるが、一方を無人航空機に搭載した場合、一般的なモデム通信手法では安定した通信ができず、図3に示すようなプログラム開発を行った。その結果、以下に示すような結論を得た。

- ・ 衛星の移動により時々通信が不可能になる
- ・ データ連続送信においては一定の送出間隔を設ける必要があり、大量のデータ送信には不向きである



図2. イリジウム衛星端末

- 受信ではイリジウム衛星からの受信強度が全体的に弱く、かつ変動が大きいため一般的なモデム通信用の処理が難しいため、通信が途切れても復元可能な処理が必要である。

以上の理由により、イリジウム衛星サービスによる無人航空機へのデータ通信は可能ではあるが、非常に不安定であり、また通信量も限られることからその利用を断念した。

## (2) インマルサット衛星サービスの概要

インマルサット衛星サービスは、「国際海事衛星機構に関する条約」により設立された国際海事衛星機構 (IMSO) を母体とする国際衛星通信事業者で運営されており、現在は第四世代 (I-4) とよばれる静止衛星が、大西洋西及び東、インド洋、太平洋の4地点赤道上空 36,000km に打ち上げられている (日本では 2009 年3月からサービスを開始した太平洋衛星・POR, 経度 E143.5 を利用)。この I-4 は重量3トン、出力 9kW で、アップリンクは 1.6GHz 帯及びダウンリンクは 1.5GHz 帯を使用している (図4)。

インマルサット衛星サービスの特徴は、最大 492kbps の高速通信によるブロードバンドサービス (BGAN) が使用できる点である。これよりデータ通信はもとより静止画の伝送や、圧縮技術による動画の準リアルタイム伝送も可能となる。また衛星端末との接続は LAN で行うため、パケット通信手法によりデータ、画像等の伝送は非常に容易である。

しかしインマルサット衛星は、赤道上 36,000km と非常に高い高度にあるため通信距離が長いことと、地上局を経由するため多少の時間遅れが発生する。また BGAN 用端末は形状・重量がかなりあり、無人航空機への搭載には機体にある程度のスペースとペイロード余裕が必要である。さらにインマルサット衛星は静止衛星で

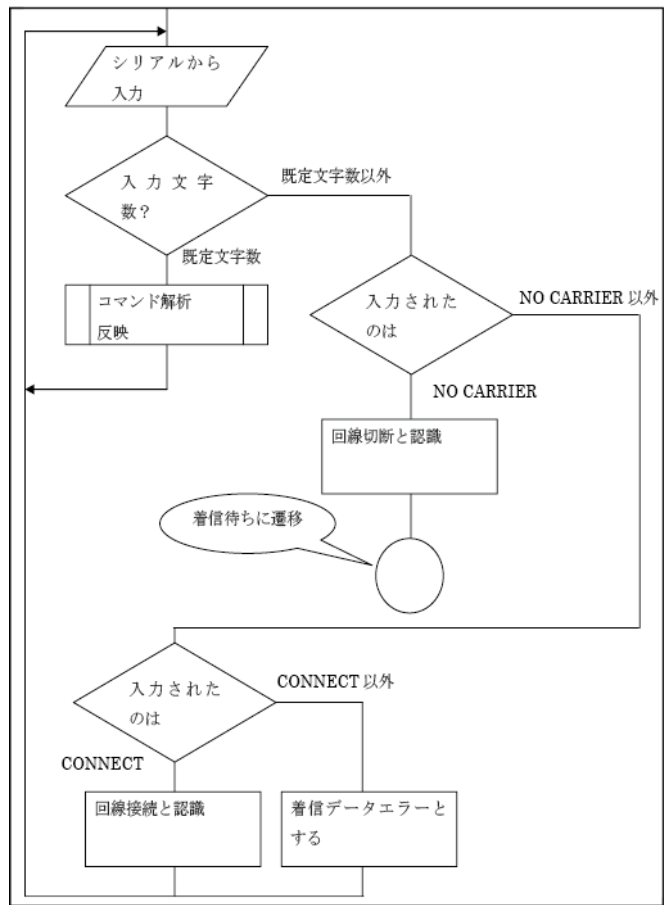


図3. イリジウム衛星端末利用上の特殊な処理

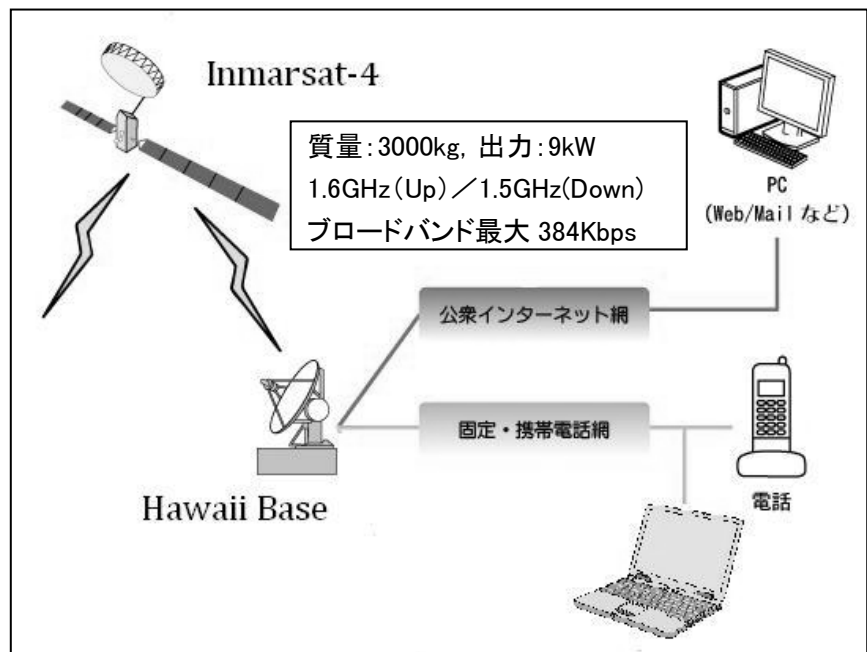


図4. インマルサット衛星と衛星通信の概要

あるため、BGAN 用端末の指向性アンテナを常に衛星に向けておく必要があり、このため無人航空機の飛行時においては、機体の旋回により変化する方位に対して、搭載した端末のアンテナを常に一定方位に維持することが必須となる。

なお有人航空機及び船舶用 BGAN サービス端末として無指向性アンテナを装備しているものもあるが、重量、形状とも想定する無人航空機(翼弦1~3m程度)には搭載は不可能である。またインマルサット衛星サービスでは、インマルサット衛星を運用する地上局を介して行うためイリジウム衛星サービスのように端末同士の直接通信はできない。

### 3. 無人航空機へのインマルサット衛星サービス利用の問題

#### (1) データ伝送時間

前項で述べたように、BGAN サービスでは衛星地上局の中継と一般回線伝送などによる時間遅れが生じる。そこで、幾つかのデータサイズに対するデータ伝送での時間遅れを計測した。計測法は DOS-PING を用いた往復時間計測である。計測時の機器構成は図5に示す BGAN 端末と地上側 PC のみである。ここで地上側 PC は NTT による FOMA データ通信サービスを利用した。

最初に FOMA による地上間での遅れを求めため、FOMA と JAXA 内 LAN とのデータ伝送時間を計測した。次に BGAN サービス

による同様なサイズのデータを送受して、データ伝送時間を計測した(ここで BGAN サービスの通信モードは「標準」であり、この場合通信速度は通信のトラフィックの量により変動する)。以上より求めたデータ往復伝送時間の結果を図6に示す。



図5. データ転送時間計測に用いた BGAN 端末

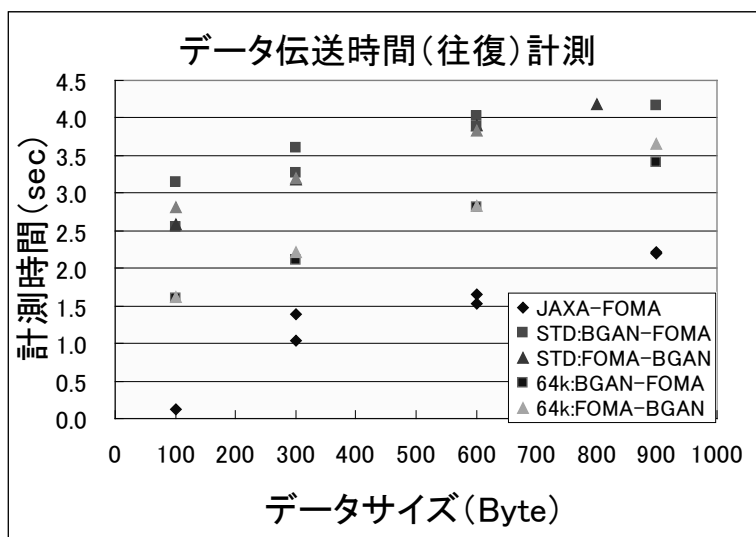


図6. BGAN 端末~PC 間のデータ伝送時間計測結果

おり、ストリーミングモード 64kbps の場合では時間遅れは約2秒(300byte)~3.4秒(900byte)であった。ただしストリーミングモードの使用料金は標準に比べかなり割高になる。

これよりまず、BGAN を使用しない FOMA と JAXA 内 LAN による地上間通信の場合(◆)では約 1 秒(300byte)~2.2 秒(900byte)となり、地上間通信でもやや遅れがあることが分かった。次に BGAN と FOMA との場合(■▲)は約 3.4 秒(300byte)~4.1 秒(900byte)となり、FOMA 通信に比べ約 2 秒程度(片道 1 秒)時間遅れがあることが分かった。なお BGAN の通信モードには、通信速度を保証するストリーミングモード(最大伝送速度 32kbps~256kbps)が用意されて

## (2) BGAN 端末の移動速度に対する通信の安定性

BGAN 衛星サービスの無人航空機への利用において、その速度に対する通信の安定性を確認するために、**図7**に示すように BGAN 端末を車輛の屋根に固定し、車輛を 40～80km/h 程度 (11m/s～22m/s) で直線走行させ、その時のデータエラーの発生頻度を求めた。ここでデータ伝送容量は 600byte、データ送出間隔は 100msec 及び連続通信時間は2分程度である。以上よりデータエラー発生



図7. 移動速度に対する通信安定性の計測

率を求めた結果の一例 (移動速度 80km/h) を**図8**に示す。ここで横軸は経過時間 (秒) を、縦軸は受信データ間隔 (秒) を示す。ここで安定に通信が行われている場合は、この受信データ間隔は 100～150ms であるが、それ以上の場合にはエラーが発生していると考えられる。

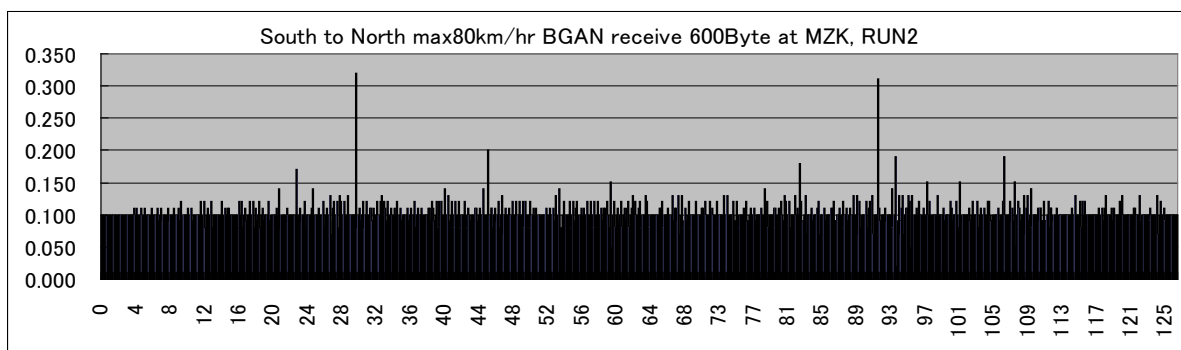


図8. 移動速度に対する通信安定性の計測結果例

以上の結果より、移動速度が 60km/h 以内ではアップリンクでのエラー発生率は 0.93%、ダウンリンクでは 1.08%であった。なお車輛が加速または減速する場合にエラーが発生する傾向であることが分かった。以上の試験結果により、この程度の移動速度では安定なデータ伝送が可能であることを確認することができた。

## (3) 通信が可能なアンテナ方位角及び迎角の許容範囲

BGAN 端末のアンテナは**図7**に示したように平面アンテナ (パッチアンテナ) であり、その中心の 90 度方向を中心としたビーム特性を持つ。これより BGAN (I-4) を日本国内で利用する場合、そのアンテナビームの中心方位を北海道～関西エリアでは約 180 度 (真南)、(西端の沖縄・石垣島では 160 度) に、また迎角を約 45 度に維持する必要がある。従って BGAN 端末を無人航空機に搭載した場合、機体のヨー変動に対するそのアンテナ方位角と、ロール変動による迎角変化に対し、自動的に一定方位と仰角に維持する可動台が必要であると思われる。

これより安定的な BGAN 通信が可能なアンテナ方位角及び仰角の範囲を求める必要があることから、**図9**に示すように端末



図9. 方位及び仰角角度可変可能な微動台上においた BGAN 端末



を微動台の上に設置し、その水平方向(方位)と仰角の角度変化に対する衛星の受信信号強度を計測した。なおBGANサービスでは、最初に衛星を補足し通信設定を行うと、衛星側がそのアンテナをBGAN端末方向に向けるため、当初より信号強度はかなり増加する。

以上の結果として図10に方位角変化に対する信号強度変化を、図11に仰角変化に対する信号強度変化を求めた例を示す。これより、方位角変化に対しては約150度～190度の範囲で安定な通信が可能であることが分かった。また仰角変化では、20度から70度程度までほとんど受信信号強度に変化が無く、広い仰角の範囲内で安定な通信が可能であることが分かった。

一方無人航空機の実際の飛行では、ヨー角は360度変化するが、ロール角はその角度が最大になるとされる周回飛行時の例より、最大で約±50度程度の変化が認められる。しかし全体では±30度程度のロール角変化に留まり、これよりBGAN端末アンテナの設置角度を45°にすれば、ほとんどの機体運動の範囲内で問題が無いと予想できる。以上より、BGAN端末アンテナの方位角を一定方位に維持することのみで安定な通信が可能であると想定した。

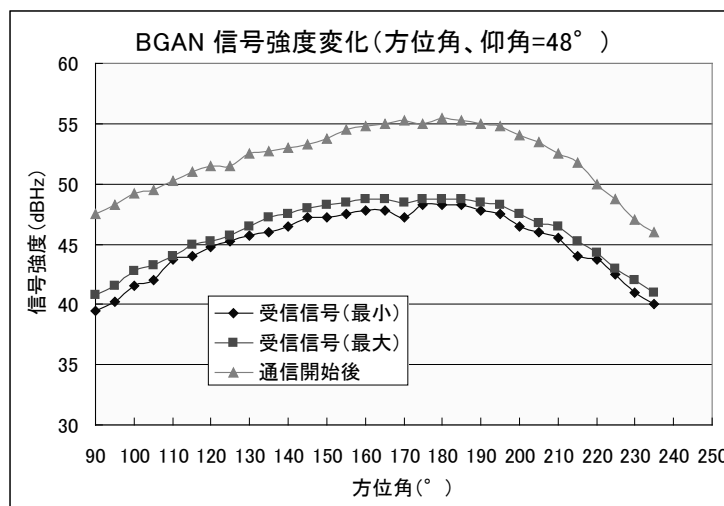


図10. アンテナ方位角変化に対する信号強度変化の計測

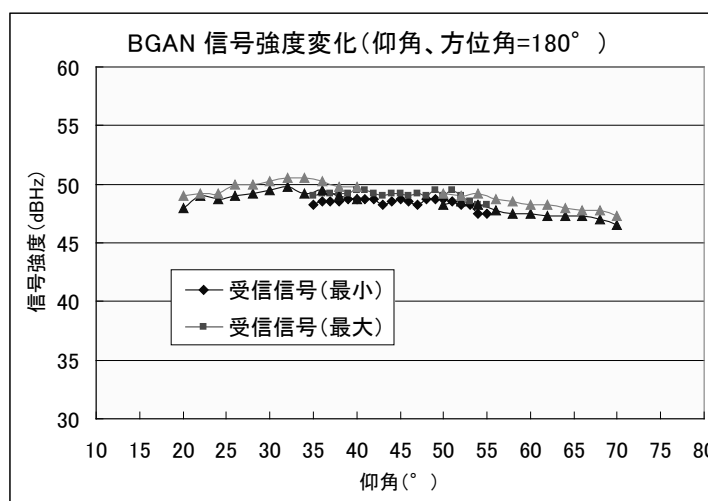


図11. アンテナ仰角変化に対する信号強度変化の計測

#### 4. 自動方位維持回転台 (Auto Direction Keep base using Gyro : ADKG) の試作

##### (1) ジャイロを使用した自動方位維持回転台の試作と動作確認

ジャイロを使用して電源投入時の方向を維持する定方向自動回転台が、RCヘリコプターなどに搭載したカメラで一定方向の地上撮影を行うために利用されているが、その機能を応用したBGANの自動方位維持回転台(ADKG)を試作した。試作したADKGの外観を図12に、BGAN端末を載せた状態を図13に示す。

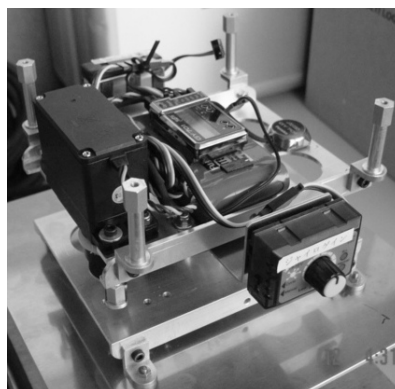


図12. 試作したADKGの外観



図13. 端末を載せた状態



図12から分かるように、ジャイロ及びサーボモータ等は全てRC模型部品で構成されており、非常に安価に製作することができた。

このADKGはジャイロで静止時からの回転角度差を検出し、その差分に対し回転台をサーボモータで回すものであるが、あまり速い回転に対する追従性は十分でない。そこで試作したADKGの追従性を調べるために、BGAN端末を載せたADKGを車両の屋根に固定し、BGAN端末に接続したLANカメラの撮影映像を記録することで、そのLANカメラの映像から方位角のズレを評価した。この計測では車両を半径70mの円周上を10~40km/hの一定速度で周回させた。その評価例として図14(1)、(2)に周回速度30km/hにおける走行前と走行後の映像を示す。

これより走行前後でその撮影映像から方位角のズレは小さいことが分かる。また図15(1)、(2)は同様に周回速度40km/hにおける映像の評価例であるが、これを見ると走行前後の映像から方位角のズレはかなり大きく追従性が十分でないことが分かる。

以上の試験より以下のような結果を得た。

#### 測定条件

- ・周回半径:70m
- ・周回速度:10~40km/h
- ・周回角速度: $22.8^{\circ}/\text{sec} \sim 91.2^{\circ}/\text{sec}$

#### 測定結果

- ・10km/h及び20km/hで最大 $15^{\circ}$ のズレを生じる
- ・30km/hで最大 $20^{\circ}$ のズレを生じる
- ・40km/hでは非常に大きなズレを生じる

以上の結果より、本ADKGは無人航空機の旋回半径が大きい場合は、その方位角変化に追従できるが、一般的な速度の旋回運動には追従できないと思われる。

#### (2)方位センサを使用した自動方位維持回転台(Auto Direction Keep base using Direction Sensor:ADKS)の開発

(1)で試作したADKGは、無人機の一般的な旋回運動による回転角度変化に対する追従性が十分で無いと思われるので、絶対方位を検出できる方位センサにより回転台の変化角度を修正する動作を持たせた自動方位維持回転台(ADKS)を開発した。

このADKSの外観を図16に示す。本ADKSの構成部品は(1)と異なり、高精度な方位センサ(図17)と電動微動回転台(図18)を用いているため、角度修正動作の信頼性は非常に高い。



図14(1). 周回速度 30km/h 走行前



図14(2). 周回速度 30km/h 走行後



図15(1). 周回速度 40km/h 走行前



図15(2). 周回速度 40km/h 走行後

開発した ADKS の仕様性能を表1に示す. ここで方位角度変化に対する修正開始の角度変化は, あまり小さい角度ではハンチングを生じる事になるため, 3. (3)の結果をもとに $\pm 5^\circ$  のヒステリシス特性を持たせてある. また同じ理由から, 目標方位に対し $\pm 15^\circ$  以内の範囲に入れば修正動作を終了するようにした.

開発した ADKS により, (1)と同様な車両による地上走行試験を行った結果, 回転角度変化に対し非常に追従性が良いことが確認できた. これより本 ADKS により BGAN 端末による衛星通信飛行実験を行うこととした.

表1. ADKS の仕様性能

項目	性能
方位設定角度	0~359°
回転ステップ角度	0.72°
修正ヒステリシス角度	設定方位の $\pm 5^\circ$
累積誤差(20回転)	$\pm 6^\circ$ (CW, CCW 共)
最高回転速度	75° / 秒
搭載物耐荷重	19.6N 以下
最大消費電力	18.3W
供給電源	DC12V
全重量	890g
形状寸法	W140×H100×170



図16. 方位センサによる自動方位維持回転台



図17. 方位センサ

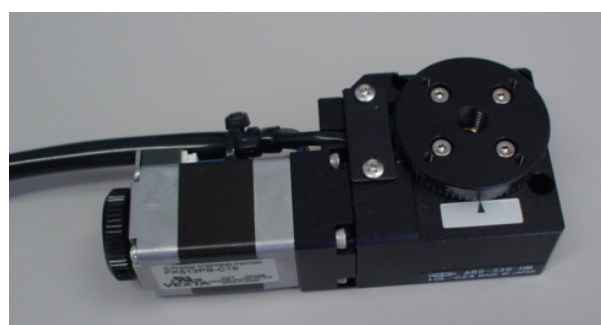


図18. 電動微動回転台

## 5. 無人航空機搭載による飛行実験

### (1) BGAN 端末の仕様と通信設定方法

ここで利用した BGAN 端末の仕様を表2に, その外観を図19に示す. また機体に搭載した機器の外観と全体のブロック・ダイアグラムを図20に示す. 図20でBGAN端末は搭載PCのローカルLAN回線にハブで接続されており, 飛行中の静止画撮影の目的で搭載するLANカメラも同じローカルLANに接続されている. また搭載PCは, 機体の3軸角度変化を検出するために搭載した姿勢センサ出力を, ダウンリンクデータとして BGAN 端末を介し送信する. なお地上側は FOMA カードを装備した PC のみである.

図20の構成で BGAN 通信を行うためには, BGAN 端末に固定 IP を設定する必要がある. BGAN 端末と各機器との接続設定は, BGAN 端末のローカルポートをカメラの該当ポートに接続する設定で



図19. 飛行実験に使用した BGAN 端末

表2. 利用した BGAN 端末の仕様

項目	仕様	
機器名	EXPLORER500	
通信速度	(標準 IP 通信・送信)	448kbps (ベストエフォート)
	(標準 IP 通信・受信)	464kbps (ベストエフォート)
	(ストリーミング IP 通信)	32/64/128kbps
電源	内蔵リチウムバッテリー	
連続通信時間	約 2 時間 15 分 (128kbps 通信時)	
連続待ち受け時間	約 36 時間	
重量・形状寸法	1,400g ・ W218×H217×52	

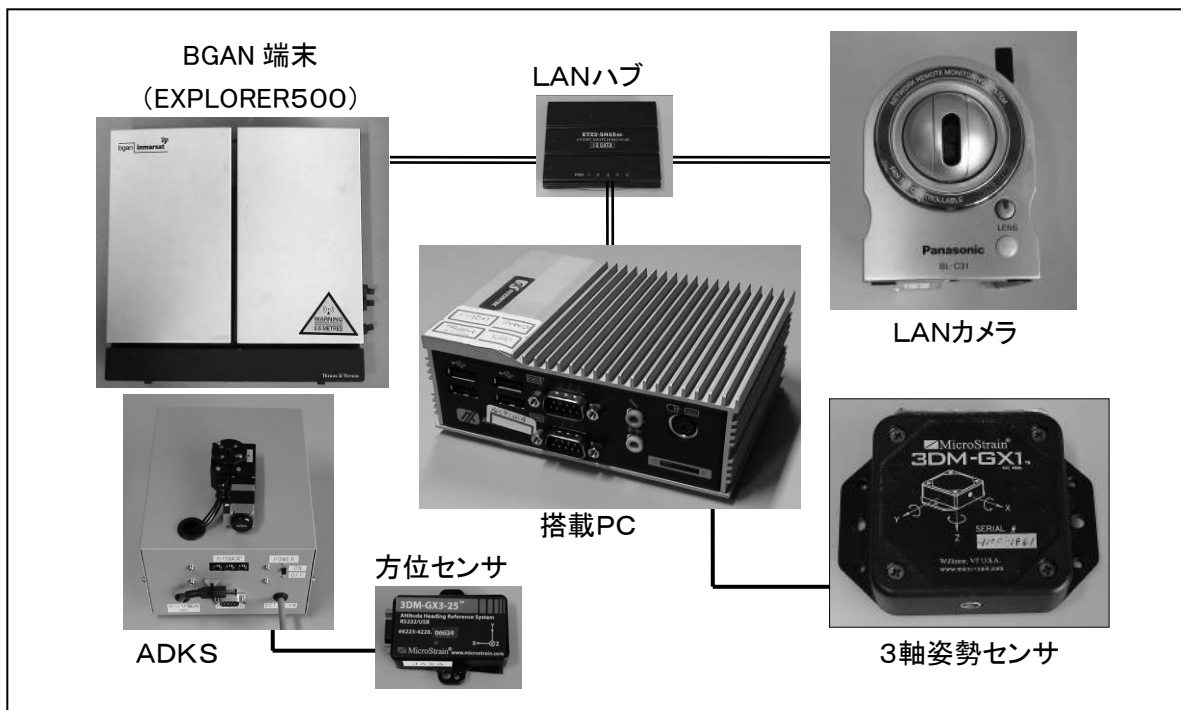


図20. 搭載機器の外観とブロック・ダイアグラム(=は LAN 接続)

ある(ポートフォワードの設定). これにより地上側(FOMA)から見た場合, BGAN 端末の固定 IP アドレスで LAN カメラの操作及び LAN カメラ撮影画像の取得が可能になる. また搭載 PC は, BGAN 端末から見てローカル LAN に接続された機器となり, 搭載 PC には計測した姿勢センサ出力のダウンリンク先として, 地上側(FOMA)の IP アドレスを設定しておく必要がある.

BGAN 端末の作動手順は, まず衛星からの受信音が最大になる方向にアンテナを向け, 次に通信開始に移ると BGAN 端末は内蔵する GPS による自分の位置を衛星に送信する. 衛星はこれを受信した後個別アンテナを BGAN 端末に向け, 通信を確立(Registration)した後ブロードバンド・サービス(一般 WAN 回線の確立)に移る.

## (2) 機体搭載方法と飛行実験

飛行実験に使用した無人航空機(フジ・インバック製 B II 型機)の外観を図21に, 仕様を表3に示す. また機体に搭載した各機器の状態を図22に示す.

ここで BGAN 端末のアンテナは、常に衛星を捉える必要があるため機体上部に突き出ることになるが、これより飛行中の空気抵抗の低減及び BGAN 端末の保護のため、図23に示すようにプラスチック製のキャノピーで機体から突き出た部分を覆うこととした。

しかしながら製作したキャノピーの材質が BGAN 用通信電波の減衰を引き起こす現象が見られたことから、まずキャノピー無しで BGAN 端末を作動させ、Registration 後にキャノピーを被せ、これを機体にテープで固定する手順で飛行実験を行った。図24にキャノピーを固定した無人航空機全体の様子を示す。

図から分かるように、胴体幅よりキャノピーが大きいいため、本来であればより大型の機体が望ましいと考えられる。飛行実験は河川敷に設けられたグラウンドの上空を高度100～150mで、周回及び8の字飛行により実施した。図25に飛行実験場所の様子を示す。



図21. 飛行実験に使用した無人航空機

表3. 飛行実験に使用した無人航空機の仕様

項目	仕様・性能
全長／翼幅／高さ	2570／3200／795 (mm)
機体重量	28kg (ペイロードを含まず)
ペイロード	6kg
巡航速度	120～130km/h
航続時間	約4時間
エンジン形式	BT-86B 2サイクル
エンジン排気量	86CC 1基



図22. 各機器の機体搭載状態(端末は未搭載)



図23. ADKS への BGAN 端末設置とキャノピー



図24. キャノピー固定後の無人航空機の外観



図25. 飛行実験場所(神栖市・利根川河川敷)

### (3) ダウンリンクデータ受信結果

ダウンリンクデータは、機体に搭載した姿勢センサの計測値データ及びLANカメラの静止画である。ここで姿勢センサ計測値の内、機体のロール角度変化から BGAN 端末アンテナの衛星に対する迎角変化が分かり、またヨー角度変化から方位角変化が分かる。機体は周回飛行を行うため、ロール角(迎角)は旋回時に大きく上下に変化し、ヨー角(方位角)は連続に変化する。

図26はダウンリンクデータの内、ロール角(実線)及びヨー角(破線)のみを表した例である。ここで横軸は経過時間(秒)である。図26でヨー角(点線)の姿勢センサ出力値は、 $-180^{\circ}$ を超えると値が  $180^{\circ}$ に戻るようになっており、図で $-180^{\circ} \rightarrow 180^{\circ}$ は連続して旋回していることを示している。これより1旋回の時間は40秒であることが分かる(50秒～90秒間)。また90秒～140秒間はヨー角が $-180^{\circ} \sim 120^{\circ} \sim -180^{\circ}$ と変化しているが、これは8の字に旋回している飛行を示し、その時間は50秒である。

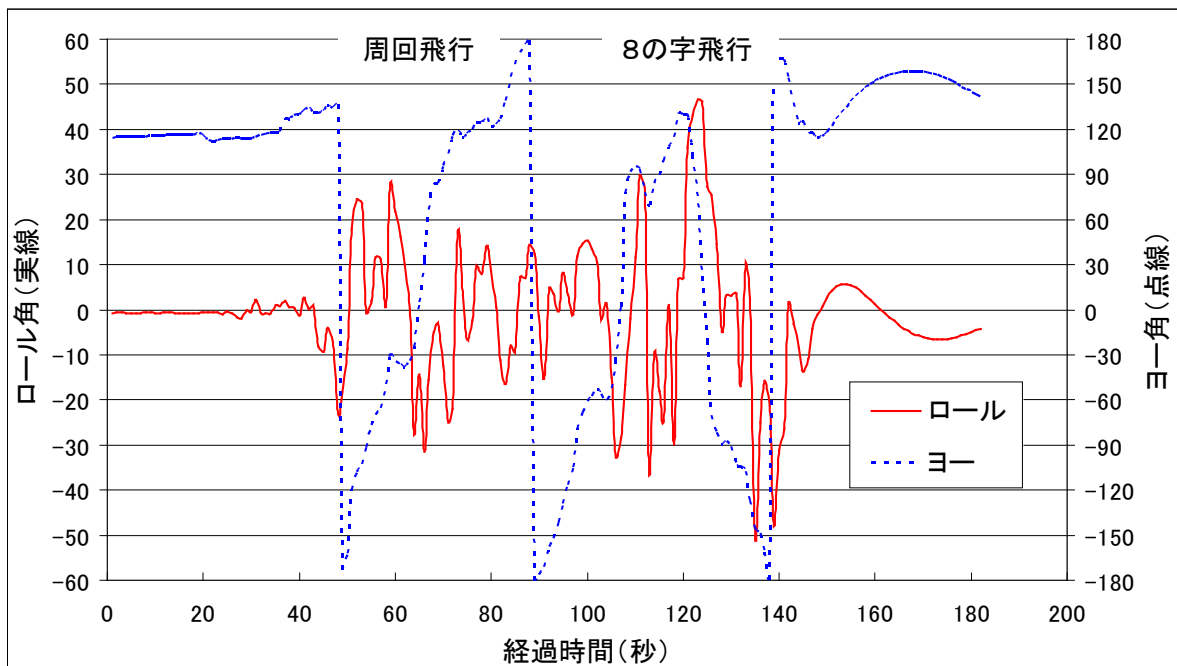


図26. ダウンリンクデータ計測例(ロール角及びヨー角のみ)

ここでロール角(実線)を見ると、各旋回飛行付近で大きく変動しているが、これは旋回時に機体が大きく傾いている(バンク)ことを示しており、この時 BGAN 端末の衛星に対する迎角が変動する。図よりこの旋回時のロール角変化は $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 程度であり、これより衛星に対する仰角は  $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の変化が生じていることになる。

以上より、BGAN 端末の水平から垂直までの迎角変化及び周速度  $360^{\circ} / 40$ 秒での方位角変化に対し、ダウンリンクデータを連続して受信可能であることを実証できた。

また図27(1)～図27(3)は、搭載したLANカメラから飛行中にダウンリンクした静止画(解像度  $640 \times 480$ , 1枚/10秒)の例を示したものである。なおアップリンク機能は、このLANカメラの操作を地上から指令することで確かめた。



図27(1). LANカメラ撮影映像例(1)





図27(2). LANカメラ撮影映像例(2)



図27(3). LANカメラ撮影映像例(3)

## 6. まとめ

一般に利用可能な商用衛星サービスである、インマルサットが運用している第4世代衛星(I-4)を利用して、無人航空機の飛行中におけるデータ伝送を行う手法を開発し、無人航空機の飛行実験によりその機能を実証した。この方法によれば、離着陸地点から遠距離に達する運用及び一般的な地上無線通信ができない見通し外での運用が可能であることを示している。

ここで利用したインマルサットによる通信サービスを利用する上での特徴及び仕様を以下に示す。

- ・ 衛星端末の免許条項は携帯移動地球局の包括免許であり、無人航空機搭載での利用で問題となる「上空」移動が許可されている
- ・ ブロードバンド通信(3G 携帯電話相当)が可能のため LAN アプリケーションが使用できる
- ・ データ通信での遅れは、衛星回線を使わない地上間通信と比較した場合 900byte で約2秒程度(アップリンク及びダウンリンクの往復)
- ・ 移動速度による影響は、速度 80km/hr に対し 600byte データ伝送で誤差は1%程度
- ・ 衛星端末は、静止衛星に対する方位角を機体の運動に対して維持する機構を必要とする

## 謝辞

末尾ながら、本飛行実験における無人航空機の提供、機体運用及び操縦の委託先であるフジ・インバック(株)田辺誠治氏、清水大補氏、大塚達実氏及び大坂生男氏に謝意を表します。

