



ISSN 1349-1121
JAXA-RM-13-005

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

無人航空機の長距離無線データ通信方法の検討

松田 幸雄

2013年10月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

無人航空機の長距離無線データ通信方法の検討*

松田幸雄*

A Study of Long Range UAV Data Link by Full-duplex UHF Wireless Communication System*

Yukio MATSUDA*

Abstract

This paper is written about long range wireless communication system for UAV data link. In this study, not a general half-duplex wireless communication modem but a full duplex wireless communication using two different UHF frequency modem utilized. As a result, long range wireless data communication were realized in a UAV flight experiment.

Keywords: UAV, Unmanned aircraft, Long range wireless communication

概要

航空プログラムグループ・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。ここで無人航空機の運用では、無人航空機の飛行状況や機体のモニタリングと、搭載機器への制御指令や飛行中断・帰投等の指令を行う無線通信手段が不可欠である。

一般的な UHF 帯無線通信では、その電波の性質より地上局と無人航空機間の見通し距離内が通信可能距離となるが、その距離について具体的な例としては、送信電力が 1 W において海上を飛行する無人航空機と、島嶼に設置した地上局間で 30~40km 程度のデータ通信の報告があり、この程度の送信出力があれば陸上においても長距離データ通信は可能であると考えられる。しかしながら、この場合は公的な機関が所有する周波数を使った例であって、民間における無人航空機の利用を考えた場合、飛行中の機体から電波を発するには、電波法の規定により現状では送信電力が微少な特定小電力無線を用いるしか方法がなく、その通信可能距離は周波数にもよるが数 km 程度が限界であり、無人航空機の運用範囲に制限が生じる。

本報告は、一般的な通信方法（半二重通信方式・単一周波数）ではなく、異なる周波数による全二重通信方式の無線通信方法を用いることによって、電波法遵守を前提とした長距離無線データ通信が可能であることを飛行実験等で実証した結果について述べる。

* 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)

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。ここで無人航空機（以下 UAV とする）の運用では、UAV を運用する地上設備（地上局）と飛行中の UAV との間の無線通信手段が不可欠である。これは、飛行前に設定された経路を UAV が飛行している状況や、UAV の正常な機能継続を把握するために、定期的に地上局に向けた情報伝送（ダウンリンク）と、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、などの指令（アップリンク）が必要であることによる。

このような目的で一般的に用いられる UHF 帯（300MHz 超）の無線通信では、その電波の性質より地上局と UAV 間の見通し距離内（電波伝搬上の見通し距離、視認できる範囲ではない）が通信可能距離となる。具体的な例としては、海上を飛行する UAV と島嶼に設けられた地上局間において、送信電力 1 W、無指向性アンテナにより 30～40km 程度のデータ通信（海上伝搬）の報告があり、この程度の送信出力があれば陸上でも長距離のデータ通信は可能であると考えられる¹⁾。

しかしながら JAXA など公的機関が保有する周波数を使う場合を除き、民間など一般的な UAV の利用を考えた場合、空中を飛行する UAV から電波を発するには、電波法の規定より現状では送信電力が 10mW の特定小電力無線を用いるしか方法がなく、その通信可能距離は周波数にもよるが数 km 程度が限界であり、UAV の運用可能な範囲に制限が生じる。

本報告は以上のような問題に対して、従来 1 組の無線モデムで行う一般的な通信方法（半二重通信方式・単一周波数）ではなく、異なった周波数による 2 組の無線モデムによる方法（全二重通信方式）を用いることにより、電波法遵守を前提とした長距離無線データ通信が可能であることを飛行実験等で実証した結果について述べる。

1. 無人航空機と地上間の無線通信

(1) 無人航空機運用における電波法上の制約について

電波法によれば、受信を目的とするものを除き電波を発するものは無線局（無線設備及びこれを操作する者の総体）として規定される。UAV に搭載してデータ通信を行おうとするには無線局の開設が必要となるが、その場合開設する無線局の免許事項が表 1（関係部分だけを抜粋）に示す事項について適合することが求められ、特に無線局の種別が「移動局」であり、かつ無線設備の移動範囲に「上空」が許可されることが必要な条件となる。

ここで UAV に搭載が考えられる一般的な無線局（無線機器、システム）について、各免許事項に対する適合性を表 2 に示す。この中で例えば大学・研究機関等で利用されている「実験試験局」は、無線局の目的が「電波を発射すること自体が実験や研究開発」であることから、UAV データ通信への利用には不適合となり、仮に

適合であるとされた場合でも継続的な利用は難しく、一時的な試験にしか使えない。「上空用簡易無線」はスカイスポーツ用でかつ電話のみであり、電波形式の不適合でデータ通信ができない。携帯電話、簡易無線、エリア無線等は「陸上移動無線局」であり、その移動範囲は「陸上」

表 1. 無線局の免許事項(関係部分のみ)

免許事項 (抜粋)	無人航空機搭載での適合条件
無線局の種別	移動局であること
無線局の目的	一般業務であること
通信の相手方	一般利用対象者であること
無線設備の移動範囲	移動範囲に「上空」を含むこと
電波形式	データ通信可能な電波形式であること
空中線電力	1 W 以上が望ましい

に限られ上空移動での利用は不適合となる。なおアマチュア無線を使った非常時の災害通信訓練が行われているが、アマチュア無線局は移動範囲、空中線電力、電波形式、周波数等全ての点でその許可範囲が大きく、技術的には非常に有効な無線通信手段である。しかし無線局の目的及び通信の相手方の規定により平時における一般的な利用は不適合となる。

表2. 無人機に搭載が可能と思われる無線局の適合性(□は適合を示す)

各無線局 (装置)	実験局	上空用簡易無線	特小無線	携帯電話	簡易無線等
無線局種別	実験試験局	簡易無線局	特定小電力	陸上移動局	陸上移動局
無線局の目的	試験・調査	スカイスポーツ	一般	移動通信	移動通信
無線設備の上空移動範囲の可否	可能	可能	可能	不可	不可
電波形式	多種可能	電話	多種可能	電話・データ	電話・データ
空中線電力	1Wも可能	~1W	~20mW	—	~1W
無線局免許	申請(法人)	届出	不要	包括免許	届出
無線従事者	必要	不要	不要	包括免許	不要

以上より、飛行中(上空移動中)の UAV とのデータ通信を行うには、特定小電力無線(以下特小無線とする)が現在唯一電波法に適合するものとなるが、送信電力(空中線電力)が 10mW と非常に小さい(スペクトラム拡散変調では 10mW/MHz, 2012 年 9 月に新たに認可された 920MHz 帯では 20mW)。また現在 UAV での利用を前提とした 1.2GHz 帯 1 波の周波数(空中線電力 1W)が唯一認可されているが、割当ては全国で 1 スポット周波数のみであり、電波形式は映像伝送のみでデータ通信には使えない²⁾。なお総務省に対する周波数割当て提案募集に対して、産業用 UAV 画像伝送用に 700MHz 帯 3 波の割当て提案が産業界よりなされたが、現在のところ(2013 年 3 月)認可に至っていない。さらに最近の動きとして、5GHz 帯の UAV 利用割当ての議論が ICAO/WRC で進められている。

以上のように現状での UAV のデータ通信では、特小無線機器として認可された無線モデムを機体に搭載し、地上局に置かれた同じ無線モデムとの間で相互通信を行う方法が一般的になるが、前述したように送信電力が非常に小さいため、一般的にその通信可能距離は数 km に限られる。

(2) 異なる周波数による全二重無線通信方式(提案する無線通信方式)

電波法上の制約から問題とされるのは、UAV に搭載される無線装置が、その移動範囲に「上空」が許可されているかによる。従って機体に搭載し送信に用いるには、(1)で述べたように現状では出力が微小でアンテナ等機器構成を変更できない技術適合品の特小無線機器を使うしかないが、これを受信する装置については任意のものが使用できる。一方地上側から送信する場合には、空中線電力が 1W 程度、かつデータ通信が可能な電波形式が許可されている「簡易無線(陸上移動局)」を利用することができる。ただし特小無線と同様に技術適合品の機器であり、アンテナ等を任意に変更することはできない。

以上よりここで提案する無線通信方式は、図1に示すように UAV からのダウンリンク送信に特小無線モデムを使用し、地上側ではその受信にビームアンテナと高感度受信装置及び受信専用特小無線モデムを備え、また UAV に向けた地上からのアップリンク送信には高出力の簡易無線モデムを使用し、UAV 側には高感度受信装置及び受信専用モデムを搭載する。

このように送受信を別々のシステムで行う方法は全二重通信方式と言うが、この場合のように高感度な受信装置を送信モデムの近傍で使用する場合、両者は近接しない異なった周波数を使う必要がある。

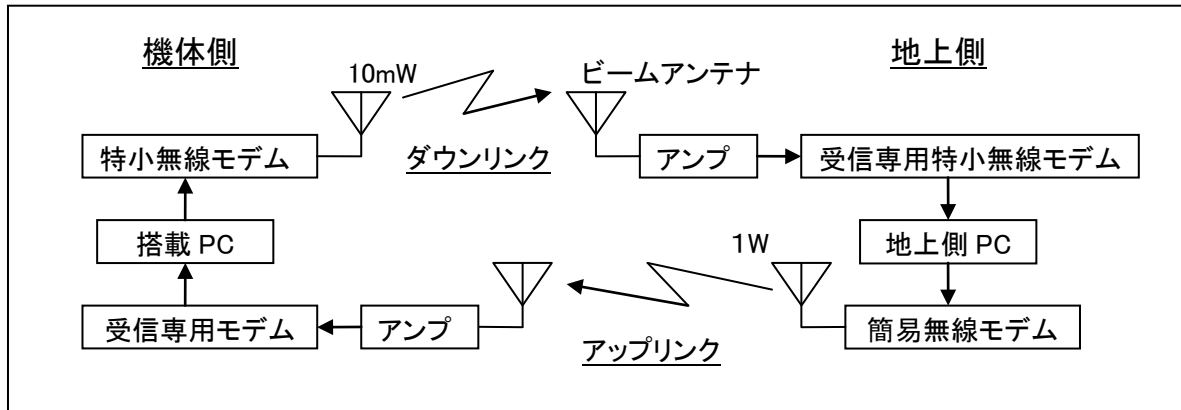


図1. 異なった周波数による全二重無線通信方式の概要

この方法は第1に通信距離的拡大を図ったものであるが、アップ/ダウンリンクが異なる周波数帯で相互に独立しているため常時相互通信が可能となり、またPCから見た各モデムへの入出力が別々であるため、1組のモデムによる場合に比べ比較的安定したデータの送受信が容易となること、及びモデム等の不具合により送受信が同時に停止することを避けられることなどもメリットになる。なお機体搭載の観点からは2つのモデムが必要となるため、その搭載スペース、重量及び消費電力が増加するが、受信専用モデムは消費電力が少なく、また重量が十数gと軽く形状も小さいため、それほど負担にはならないと思われる。

2. 通信可能距離の予測

(1) 自由空間伝搬³⁾

電波の伝搬が直線的であると考えられる極超短波帯 (UHF: 300MHz 超~3GHz) において、伝搬上での損失が無いと仮定した場合、その到達距離 D (km) は地球の半径より次式で表され、これを直接波の最長到達距離という。

$$D \doteq 3.57 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに h_1 (m)及び h_2 (m)は送信及び受信アンテナの地上高(海拔)である。(1)式は電波が光のように直進すると仮定した場合であるが、電波は対流圏を地表に沿って伝搬する性質があることから D は次式のように表される(標準大気の場合)。

$$D \doteq 4.12 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad \dots \dots \dots (2)$$

(2)式より、例えば地上局アンテナの地上高を10m、UAVの飛行高度を150mとすると最大到達距離は55~60km程度となり、この距離がここで対象とする最大見通し内範囲であると言える。

次に衛星通信や対有人航空機通信など、地上側アンテナから見た通信対象に対する仰角が概ね 10° 以上あり、かつ受信点までの間に遮蔽物がない晴天時である場合、これを自由空間伝搬という受信点における受信電力 P_r (W) は次式で表せる。

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r / (4\pi d / \lambda)^2 \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに P_t は送信電力 (W), G_t 及び G_r はそれぞれ送信及び受信アンテナの絶対ゲイン, d は送受信間の距離 (m), λ は使用する電波の波長 (m) である. (3) 式から分かるように, 受信電力は伝搬距離及び使用する電波の周波数の 2 乗に反比例するため, 受信電力を大きく取る (通信可能距離を大きくする) ためには, 送信電力及びアンテナゲインを高めるほか, 使用周波数を考慮することも必要と考えられる.

次に (3) 式において $(4\pi d / \lambda)^2$ を自由空間での伝搬損失といい, これを L とすれば以下の様に簡単に表せる.

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r / L \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで (4) 式は, 次式のように dB 表記にすることが簡単で一般的である.

$$P_r (\text{dBw}) = P_t (\text{dBw}) + G_t (\text{dBi}) + G_r (\text{dBi}) - L (\text{dB}) \quad \dots \dots \dots (5)$$

(5) 式で P_r , P_t の単位 dBw は電力を dB で表記したもので, 無線通信では $0 (\text{dBw}) = 1 (\text{W})$ と定義されている. また G_t , G_r の単位 dBi は, アンテナの絶対ゲイン (アイソトロピックアンテナに対するゲイン) である. また L は自由空間でない場合でも同様に表せ, この時 L を空間伝搬損失 (以後簡単に伝搬損失とする) という.

(5) 式において L 以外は使用する通信設備により一義的に決まるので, L を推定することで受信電力が求まり, 使用する無線モデムの受信可能電力レベルより伝搬可能距離が予測できる. なお実際の受信電力を表す場合, dBw の単位では大きすぎるので dBmw (-30dBw , dBm と書く) を使用するのが一般的である.

(2) フレネルゾーンと移動体通信

次に自由空間伝搬における電界強度 E は, 自由空間インピーダンスを $Z (=120\pi) \Omega$ とすれば, 周波数及び受信アンテナに関係しない次式のようになる.

$$E = \sqrt{(Z \cdot P_t \cdot G_t / 4\pi d^2)} \quad \dots \dots \dots (6)$$

UHF 無線通信において, 送受信点が固定の場合伝搬距離に対する電界強度 E_0 は (6) 式から次のようになる.

$$E_0 = 2 \cdot E_0 \cdot \text{Sin} \{2\pi \cdot h_1 \cdot h_2 / (\lambda \cdot d)\} \quad \dots \dots \dots (7)$$

E_0 は図 2 のように E に対し周期的に大きく変化するが, これは受信点における電界強度 E_0 が, 送信アンテナからの直接波と, 地面に反射して到達する大地反射波の位相差の影響によるものである. この現象はハイトパターンと呼ばれ距離が $4\pi \cdot h_1 \cdot h_2 / \lambda$ の範囲内でこの影響が現れ, それ以後は一様に減衰する. ただしこの特性は, 送受信間の大地が平坦でかつ障害物が無い理想的な状態であることが条件である.

次に電波は直線的ではなく周囲に広がりを持って伝搬することから, その広がりを想定したフレネルゾーンと呼ばれる回転楕円体の伝搬空間を仮定する. このフレネルゾーンは無限にあると考えられるが, その中で図 3 に示すような電波伝搬に寄与する部分を第 1 フレネルゾーン (破線) と呼ぶ. 第 1 フレネルゾーン (以下単にフレネルゾーンとする) は, 電波が受信点に最短距離で到達する経路と, 別経路で到達する場合との経路差が $\lambda/2$ 以内である経路の軌跡内に作られる回

転楕円体空間である。

これよりフレネルゾーン境界とアンテナ間を最短距離で結ぶ直線との間の距離をフレネル半径(一点鎖線)といい、この距離の60%で作られる空間の中に障害物がなければ、自由空間と同じ伝搬特性になると言われている。

例えば海上における伝搬では、フレネルゾーン内に障害物が無いと考えられるため、ほぼ自由空間と同様な伝搬特性になると思われるが、陸上伝搬では一般的に図3において示したように障害物がフレネルゾーン内にあることが多いため、受信電界強度は(6)式の値より減少することになる。

さらに移動体通信では以上の様な伝搬路がより複雑になることから、電界強度を一義的に求めることは不可能で、実際に受信アンテナを車輛等により移動させてその電界強度を測定し、その結果を経験式としてまとめることにより移動体と

の通信可能距離を予測する方法がとられている。ここではその方法として、一般的に用いられる「奥村・秦式」⁴⁾(付録)により通信可能距離の予測計算を行った。

(3) 「奥村・秦式」による伝搬損失の予測

「奥村・秦式」では(5)式における伝搬損失 L を求めることが目的となるが、そのパラメータは伝搬距離、周波数、送受信点のアンテナ地上高の他に、やや曖昧な定義となるが「大都市」、「郊外地」などの伝搬が行われる周辺状況が設定されている。この周辺状況をここでは「電波伝搬環境」、以後簡単に伝搬環境と表現することにするが、このパラメータによる伝搬損失の差は非常に大きくなるため、ここで求めた伝搬損失の値はあくまで推定値と考えられる。

「奥村・秦式」による伝搬損失の予測値を評価するために、ここでは実際にフィールドにおける特小無線モデムによる受信電力の計測試験を行い、その時の計測パラメータにより伝搬損失の計算を行って両者を比較した。なおここで用いるアンテナ地上高は、送受信アンテナ間の平均的な海拔を基準とした高さである。図4にこのフィールド計測試験の概要を、この時の計測パラメータを以下に示す。

- ・ 周波数：1216MHz
- ・ 送信電力：10mW (-20dBw)
- ・ 送信アンテナ地上高：14.5m (屋上13m+アンテナ高1.5m)
- ・ 受信アンテナ地上高：1.5m/2m
- ・ 送信/受信アンテナゲイン：2.14dBi
- ・ 受信点1：送信～受信間基準高度＝海拔19m～海拔13mから6m

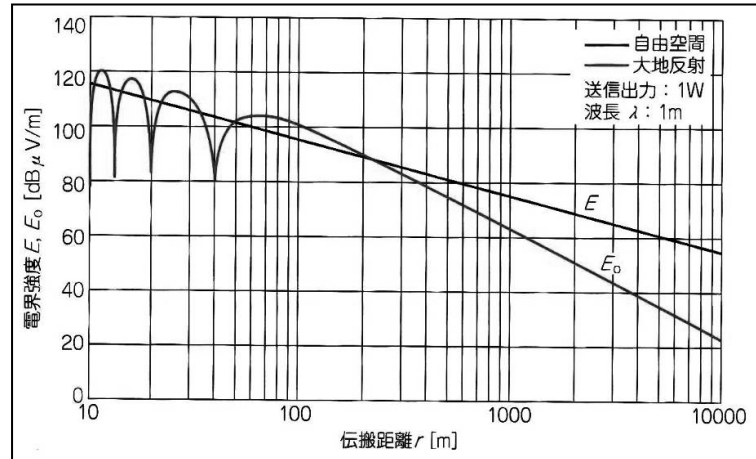


図2. 固定通信(大地反射がある場合)の電界強度変化

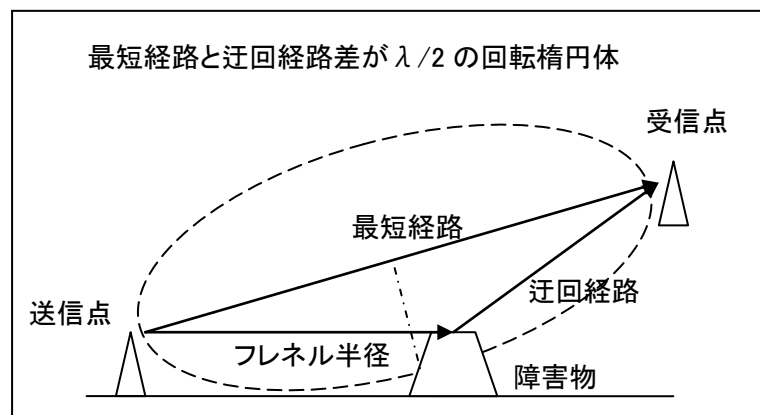


図3. フレネルゾーン

- ・ 受信点2：送信～受信間基準高度＝海拔 19m～海拔 54m から 35m

試験実施場所は北海道大樹町の大樹航空宇宙実験場周辺で、送信点は地上高約 13m の 3 階建ビルの屋上にモデム（送信アンテナ）を 1.5m 高に設置した。受信点 1 は送信点より直線で 1.2km 離れた滑走路上で、周囲は非常に開けており伝搬路の周辺に樹林帯が少しある程度である。

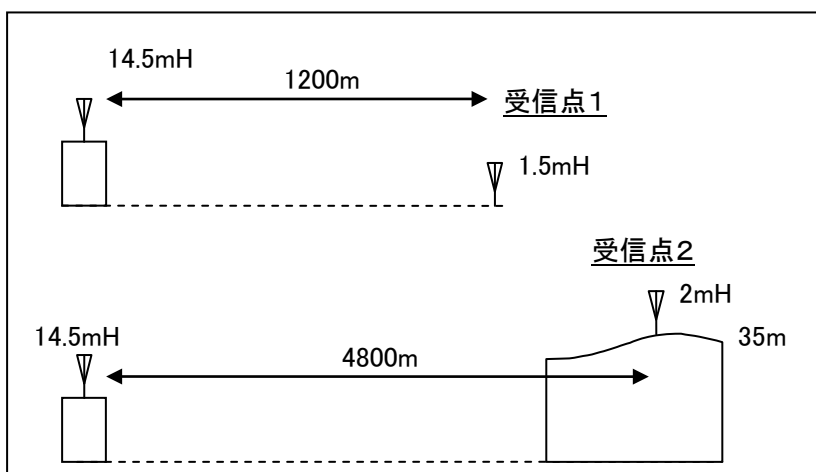


図4. 特小モデム(1.2GHz 帯)による受信電力計測試験概要

受信点 2 は送信点より直線で約 4.8km 離れた低い丘陵部の樹林帯で、図5に示すように送信点（矢印）が視認できる位置にモデム（受信アンテナ）を 2m 高に設置した。この時の伝搬路周辺は畑、草原である。



図5. 1.2GHz 帯特小モデムによる受信電力計測試験での伝搬路状況

以上の実験で得られた計測値と、その計測パラメータで計算した伝搬損失の予測値を比較した結果を表3に示す。ここで伝搬損失予測計算における「郊外地」、「開放地」とは、上述した伝搬環境パラメータであり、これ等は「市街地」の伝搬損失を基準としてそれぞれ伝搬損失の減少を与える補正項が加わる（市街地、郊外地、開放地の定義は付録を参照のこと）。表3の結果を見ると、受信点 1 及び受信点 2 とも実験計測値による伝搬損失が、伝搬環境パラメータを「郊外地」とした計算結果とほぼ同程度であることが分かる。これより UAV と地上間の伝搬損失予測では、伝搬環境を「郊外地」と仮定することにした。

表3. 1.2GHz 帯特小モデムによる受信電力計測試験結果と伝搬損失予測計算

	送受信 間距離	受信／送信 アンテナ高	実験計測値	伝搬損失予測計算値	
			受信電力／伝搬損失	開放地※	郊外地※
受信点 1	1.2km	1.5m／20.5m	-73dBm／87dB	70.2dB	89.3dB
受信点 2	4.8km	37m／14.5m	-95～-99dBm／109～113dB	87.3dB	106.4dB

（アンテナ高は送受信点間の基準高＋アンテナ高さを、※は伝搬環境を表す。）

なお実際の移動体通信では、送信点の移動に伴い様々な電界強度変化（フェージング）が生じるが、特に UAV では飛行中の機体姿勢変化により搭載アンテナの地上に対する設置角度が変動するため、これが電波の偏波面変化となる干渉性フェージングが生じる可能性が大きい。これより実際の受信電力の予測では、そのマージンを見込むことが一般的である。

（４）無人航空機～地上間における通信可能距離の推定

ここでは一般的な特小無線モデムによる半二重無線通信方式において、UAV と地上局間の伝搬距離に対する空間伝搬損失 L (dB) を試算した。この計算における条件を以下に、その結果を図6に示す。

- ・ UAV 飛行高度： 100m
- ・ 地上局アンテナ高度： 5m
- ・ 周波数： 1.2GHz

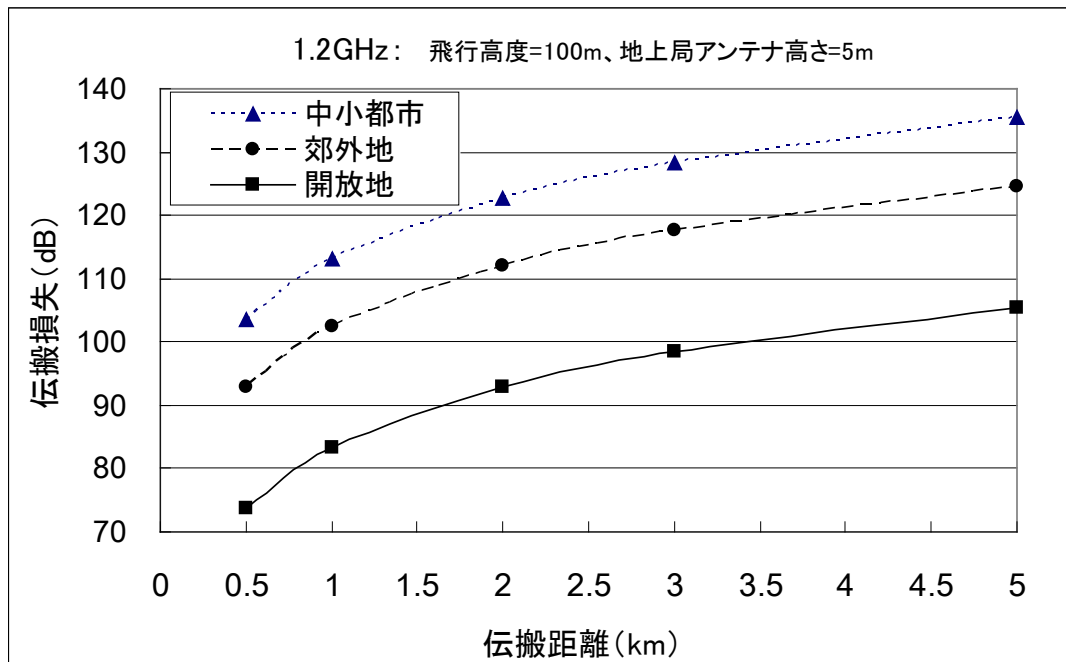


図6. 無人航空機と地上間における伝搬損失の試算(1.2GHz)

図6における計算パラメータは、「中小都市」、「郊外地」、「開放地」の伝搬環境条件であるが、各環境条件で10~20dB程度の大きな差があることが分かる。この伝搬損失を用いて、(5)式から伝搬距離に対する受信電力を求めた結果を図7に示す。ここで送信電力 P_t は10mW(-20dBW)、送信及び受信アンテナゲイン G_t , G_r はホイップアンテナより2.14dBiである。

図7で一点鎖線は、1.2GHz無線モデムの仕様特性より、安定した受信に必要とされる推奨レベル(-82dBm)である。また受信限界はパケットエラー率が0.1%のレベル、1.2GHzでは-102dBm程度とされている。

これより送受信点のアンテナ高さがこの程度の場合、データ伝送が可能な伝搬距離（受信可能距離）は、「郊外地」で2km程度、「中小都市」では1km程度となる。

また無線モデムの周波数に対する「郊外地」の受信電力試算結果を図8に示す。これは比較的よく利用される2.4GHz及び簡易無線の1つである350MHzと1.2GHzを比較したもので、図8から分かるように2.4GHzでは1.2GHzに対し約5dB低くなり受信可能距離は短くなる。一方350MHzでは約20dBの増加となり、受信可能距離は1.2GHzに比べ大きく延びる。なおモデムの安定受信レベルは2.4GHzではこれより高く、また350MHzでは逆に低くなるため受信可能距離はさらに大きくなる。

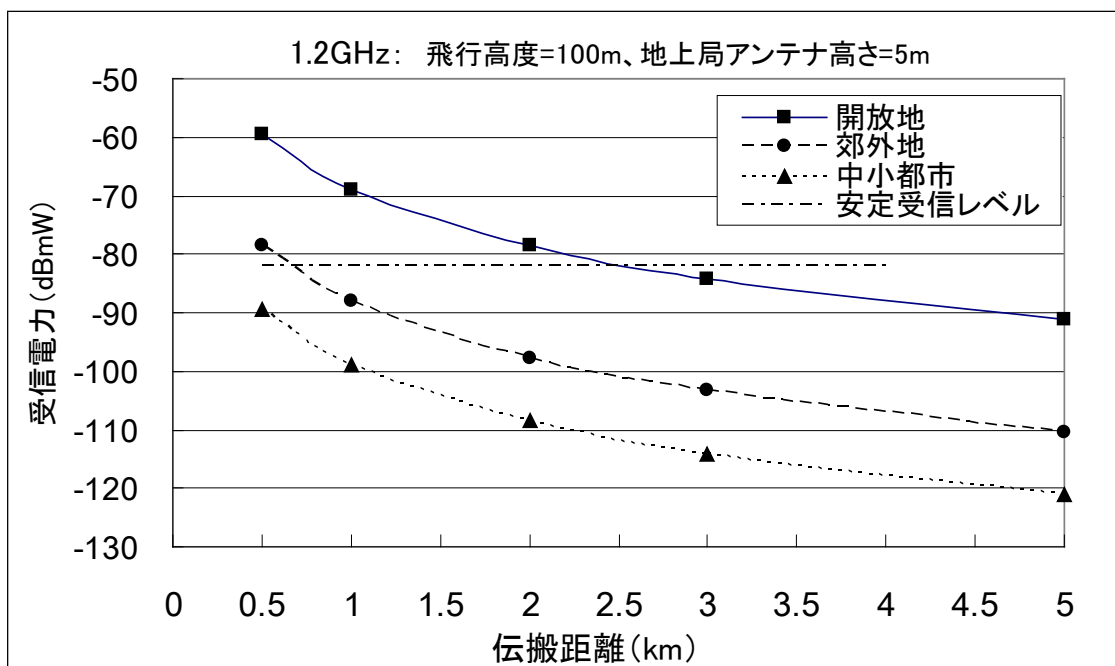


図7. 無人航空機と地上間における受信電力の試算と安定受信レベル(1.2GHz)

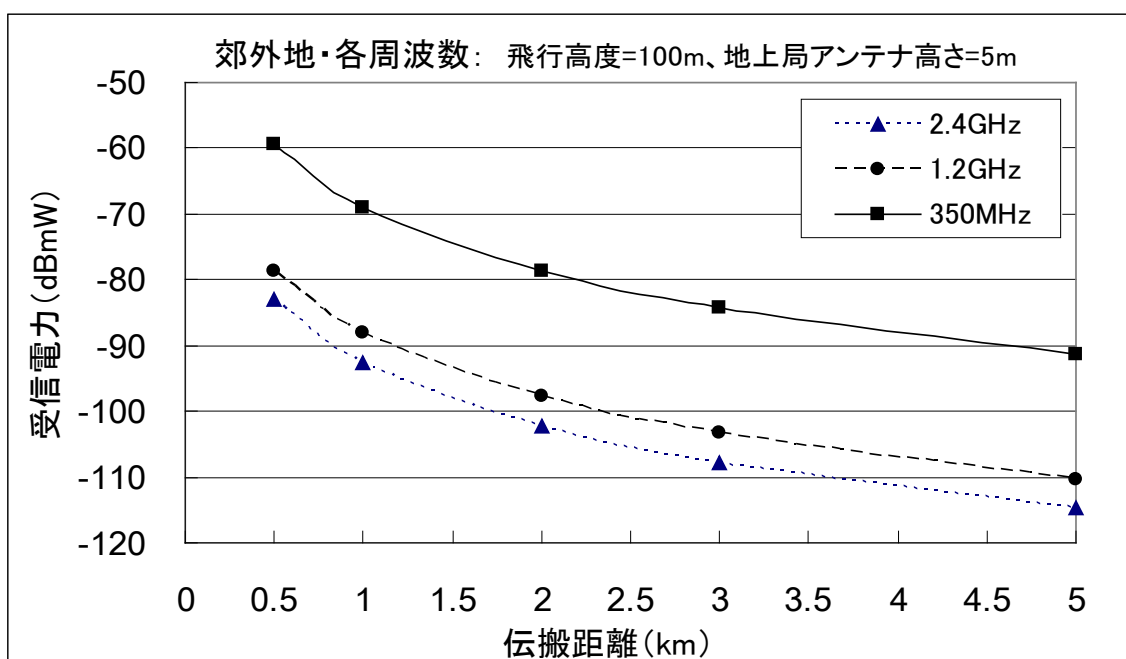


図8. 周波数による受信電力の差(郊外地)

3. 飛行実験による通信可能距離の計測

(1) 提案する通信方式での受信可能距離の推定

前項で示した様に、受信可能距離を延ばすためには(5)式における送信側の電力(P_t)及びアンテナゲイン(G_t)と、受信側のアンテナゲイン(G_r)を増加する必要があるが、ダウンリンクでは P_t は特小無線のため小さく、また G_t は市販モデムが技術適合品であることから仕様変更ができないため、 G_r を増加するしか方法がない。一方アップリンクでは地上設置(地上移動局)により送信電力が大きいものを選択できる。ただし G_t は同様に変えることができない。

以上より 1. (2) に述べた無線通信方式について、実際に使用するアンテナ、無線モデム等の仕様より各機器のゲイン構成を示したものを図9に示す。一般的にダウンリンク及びアップリンクとも特小無線機器を使用した場合には送受信路とも-16dBw であるが、図9のゲイン構成ではこれに比べ約 35dB のゲイン増加を図っている。

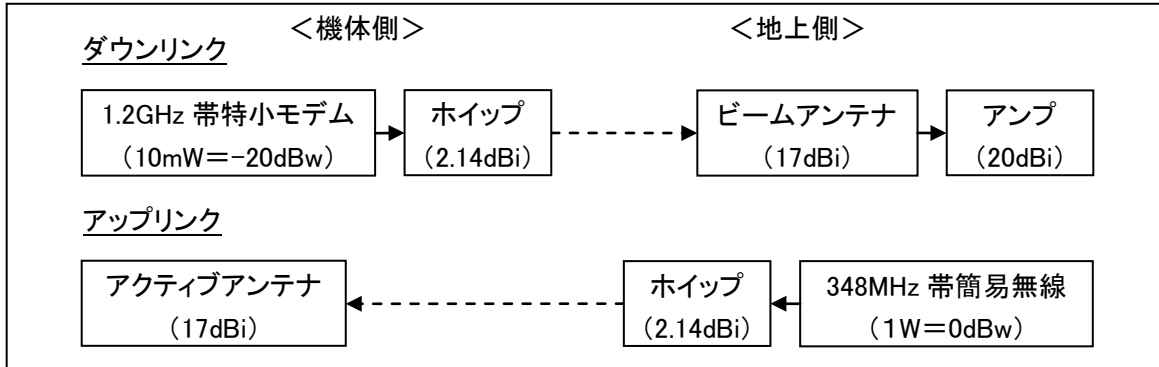


図9. 周波数の異なる全二重無線通信方式におけるゲイン構成

次に計算パラメータとして選択する電波伝搬環境は、(3) の受信電力計試験の結果より「郊外地」が妥当であると思われることから、その伝搬環境における UAV と地上間における伝搬損失を、図9に示した各機器のゲイン及び周波数を表4に示す条件として求めた。これより伝搬距離に対する受信電力を試算した結果を図10に示す。

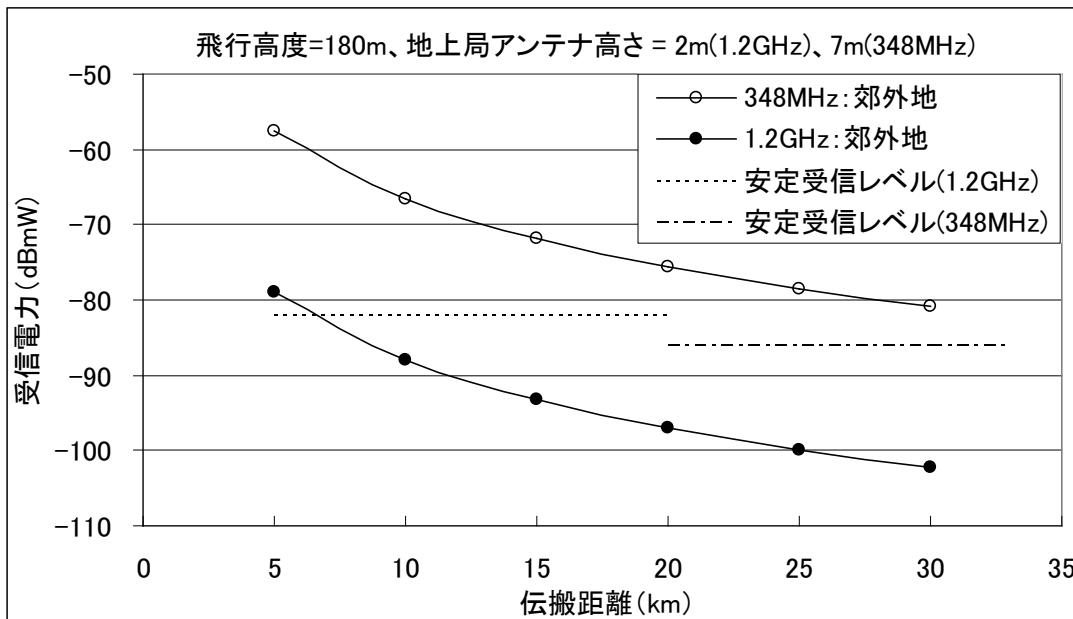


図10. ゲイン設計を反映した伝搬距離に対する受信電力の試算

表4. 図10の試算パラメータ (伝搬環境:「郊外地」)

	送信出力	アンテナゲイン (含アンプ)	アンテナ高度
ダウンリンク送信	Pt = 10mW	Gt = 2.14dBi (1.2GHz 特小モデム)	180m (飛行高度)
ダウンリンク受信		Gr = 37dBi	2m (地上局)
アップリンク送信	Pt = 1W	Gt = 2.14dBi (350MHz 簡易無線モデム)	7m (地上局)
アップリンク受信		Gr = 17dBi	180m (飛行高度)

図10において、点線はここで用いた 1.2GHz 帯無線モデムの安定受信レベル (-82dBm)、一点鎖線は同様に 350MHz 帯無線モデムの安定受信レベル (-86dBm) を示す。図10の結果を見ると、ダウンリンクはフェージングによる変動を考慮しない場合 15~20km 程度が受信可能距離、またアップリンクは伝搬距離 30km でも安定受信レベル以上と推定できる。

(2) 飛行実験における機器構成及びソフトウェア

飛行実験における機体搭載及び地上局の機器構成を図11に、各機器の仕様等を表5に示す。ここでダウンリンクは機体に搭載した図12に示す 1.216GHz 特小無線モデムで送信され、地上局の図13に示す直径 90cm のパラボラアンテナで受信する。

パラボラアンテナの出力コネクタには、図14に示す様にアンプを介して受信専用モデムを直接接続しているが、これは 1.2GHz のように非常に高い周波数で顕著になる同軸ケーブル損失を排除する工夫である。なおここで用いた受信アンプは、ガリウムヒ素 FET による NF が 2dB 以下のローノイズアンプで、受信ゲインは一般的な UHF 帯における S/N レベルの観点から 20dB 程度に留め、その帯域は-3dB において±140MHz である。

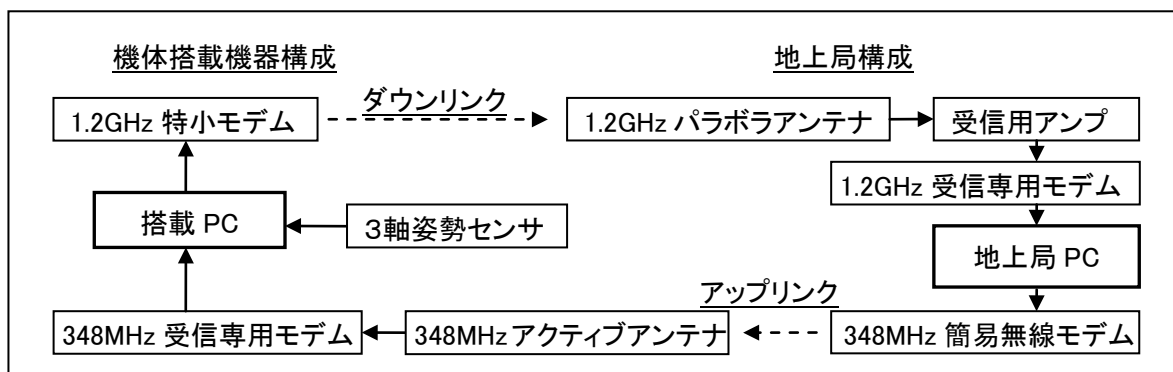


図11. 飛行実験での搭載機器及び地上局構成



図12. ダウンリンク送信用モデム

表5. 飛行実験に使用した各機器の仕様

機器名	仕様等	
機体搭載	搭載 PC	WindowsXP, SSD, 1110g, 5V, 1500mA
	受信モデム	348MHz, 246g, 13.2V, 100mA
	送信モデム	1216MHz, 143g, USB 接続
	アクティブアンテナ	短縮ホイップ+17dB, 96g, 13.2V, 50mA
	3軸姿勢センサ	精度±2°, 16bit, 77g, 6.6V, 65mA
地上局	受信モデム	1216MHz, 受信専用
	受信アンテナ	パラボラアンテナ, 直径 90cm, 17dBi
	受信アンプ	1.2GHz, 20dB
	送信モデム	348MHz, 1W

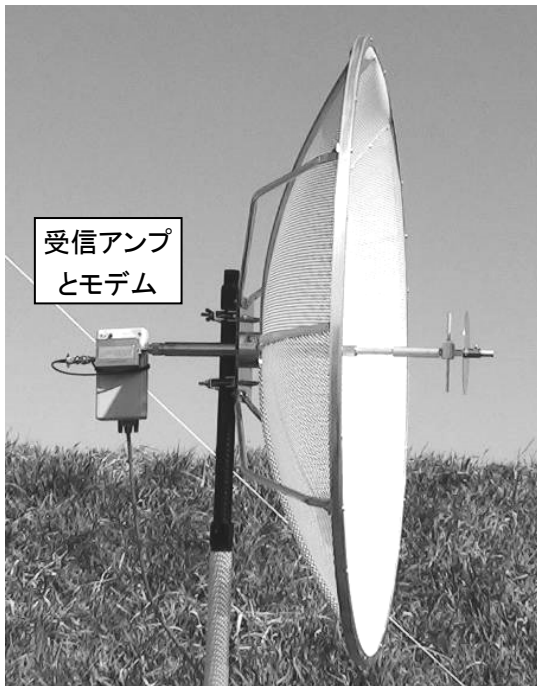


図13. ダウンリンク受信用パラボラアンテナ

アップリンクは図15に示すアップリンク送信用の 348MHz 1W 簡易無線モデムで送信し、機体に搭載した図16に示すアクティブアンテナを直接接続した受信専用モデムで受信する。ここでアクティブアンテナとは、受信周波数を中心にアンプでゲインを持たせたアンテナを指し、ここでは全長 18cm の短縮型ホイップアンテナにゲイン 15dB のローノイズアンプを組み合わせて一体化したものを製作して用いた。

機体搭載及び地上局 PC の送受信ソフトウェアは、一般的な RS232C 制御ルーチンを中心に構成されている。

地上局 PC で生成されるアップリンクデータは、送受信で認識する一定の文字列に、表6に示す機体搭載 PC に対する指令を示す文字列を加え、最初の一定文字列の解釈により指令を有効とする。

従ってこの一定文字列が解釈されなければ、第三者による機体へのアクセスは不可能であり、また必要に応じて暗号化することも可能である。なお機体搭載 PC はアップリンクデータを受信時間と共に記録する。

ダウンリンクデータは、アップリンクと同様な一定の文字列に図17に示す機体に搭載された 3 軸姿勢センサ検出角度及び送信時間を組み合わせた文字列である。これ等のダウンリンクデータ

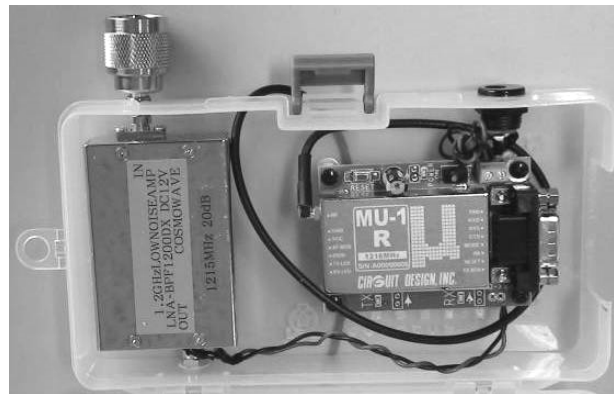


図14. ダウンリンク受信専用アンプとモデム

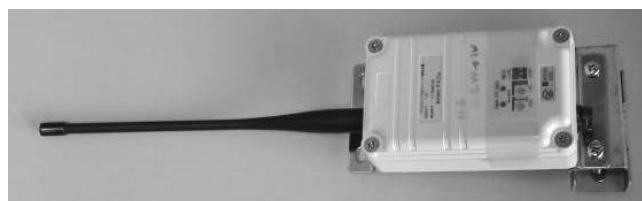


図15. アップリンク送信用モデム

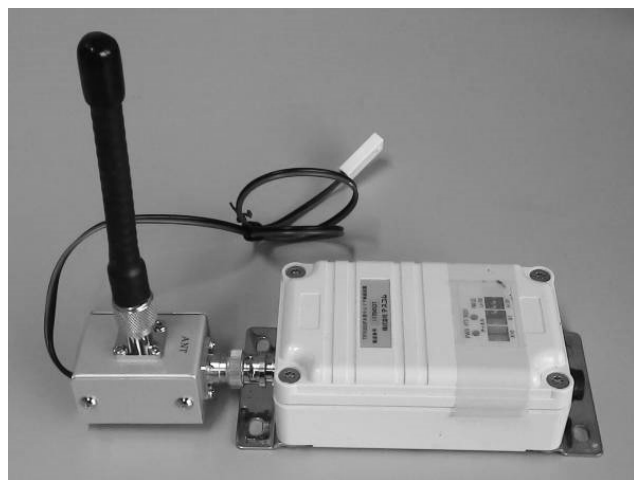


図16. アップリンク受信モデムとアクティブアンテナ

表6. アップリンク指令コマンド

ダウンリンク開始／終了
時刻設定
アップリンク受信記録データ作成
プログラム停止

の生成、アップリンクデータの記録及び送受信モデム制御を行う搭載 PC を図18に示す。この搭載 PC は WindowsXP を OS とする SSD 仕様で、一般的なものに比べ堅牢でかつ小型・軽量である。



図17. 3軸姿勢センサ



図18. 機体搭載 PC

ここで3軸姿勢センサ及びアップリンク受信モデムは RS232C 接続、ダウンリンク送信モデムは USB 接続である。なお地上局では、受信時に 1.2GHz 帯受信専用モデムが出力する受信電力レベルをこのダウンリンクデータに加え、図19に示すように地上局 PC 画面に表示して受信レベル、飛行時の姿勢、飛行経過時間等をモニタすると共に記録する。

以上の機器構成によるプログラムの動作手順は、まず飛行中の機体に対し1秒間隔でアップリンクの指令を送信し、機体側でこれを受信するとダウンリンクの送信を行う。

従って地上局におけるダウンリンクの受信により、その時の飛行直線距離が通信可能距離として確認できることになる。

なお以上の地上局及び機体搭載 PC のソフトウェアは、マイクロソフト Visual Basic Ver.6 / Windows XP により筆者が独自に開発したものである。

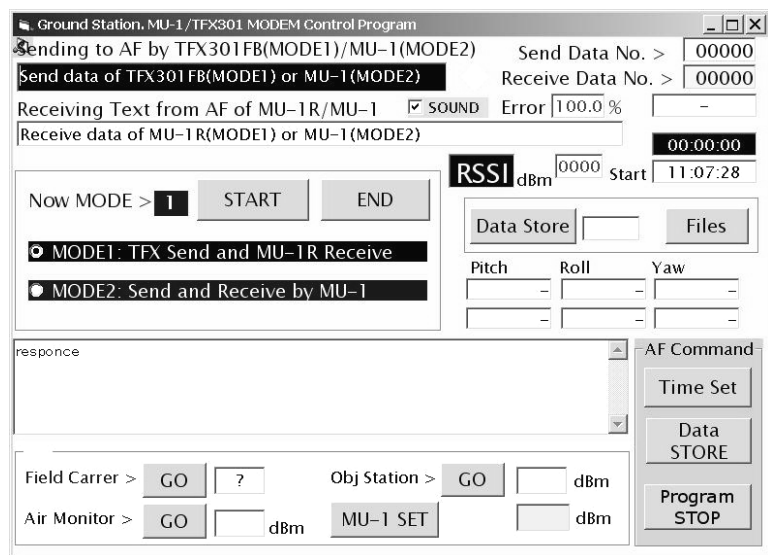


図19. 地上局 PC のデータ表示・操作画面 (Visual Basic Ver.6)

(3) 飛行実験概要

(2) で求めた受信可能距離の推定値をもとに UAV を使用した飛行実験を行い、飛行中における受信電力値の計測を行った。図20にダウンリンク送信用 (1216MHz モデム) アンテナを、図21にアップリンク受信用 (348MHz モデム) アクティブアンテナの設置の様子を示す。



図20. 1.2GHz モデムアンテナ(ダウンリンク送信)



図21. 348MHz アクティブアンテナ

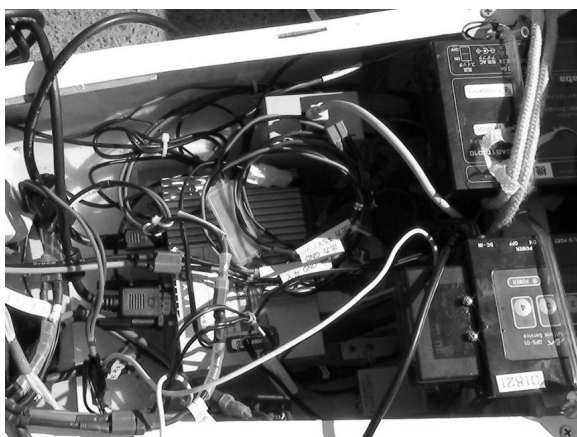


図22. 搭載機器の機体胴体内配置状況



図23. 地上局アンテナ設置の様子(当初設置)

また図22に機体内への各搭載機器の配置状況を示す。なお図20で左右の2本のアンテナは飛行制御用機器（FCC）用の2.4GHz モデムアンテナである。

地上局におけるダウンリンク受信用パラボラアンテナは地上高約 2m に、またアップリンク送信用モデムは地上高約 7m にポールで上げ、図23に示すように実験に用いる UAV の離発着地点に設置した(当初設置場所)。

使用した UAV は本飛行試験の委託先であるフジ・インバック（株）製の機体で、その外観を図24に、仕様を表7に示す。この機体は FCC によりあらかじめ設定した地点（ウェイポイント）を飛行する機能を有している。



図24. 飛行実験に使用した無人航空機

飛行実験における飛行ルートは 20km 程度の直線距離が安全にとれることを考慮して、本試験の委託先より千葉県香取市から銚子市までの利根川上空が選択された。

図 25 に飛行場所周辺の地図と飛行ルートを実線の矢印で示す。

表 7. 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／最大ペイロード	28kg (ペイロードを含まず)／6kg
巡航速度／航続時間	120～130km/h / 約4時間
エンジン	BT-86B 2サイクル 86CC 1基

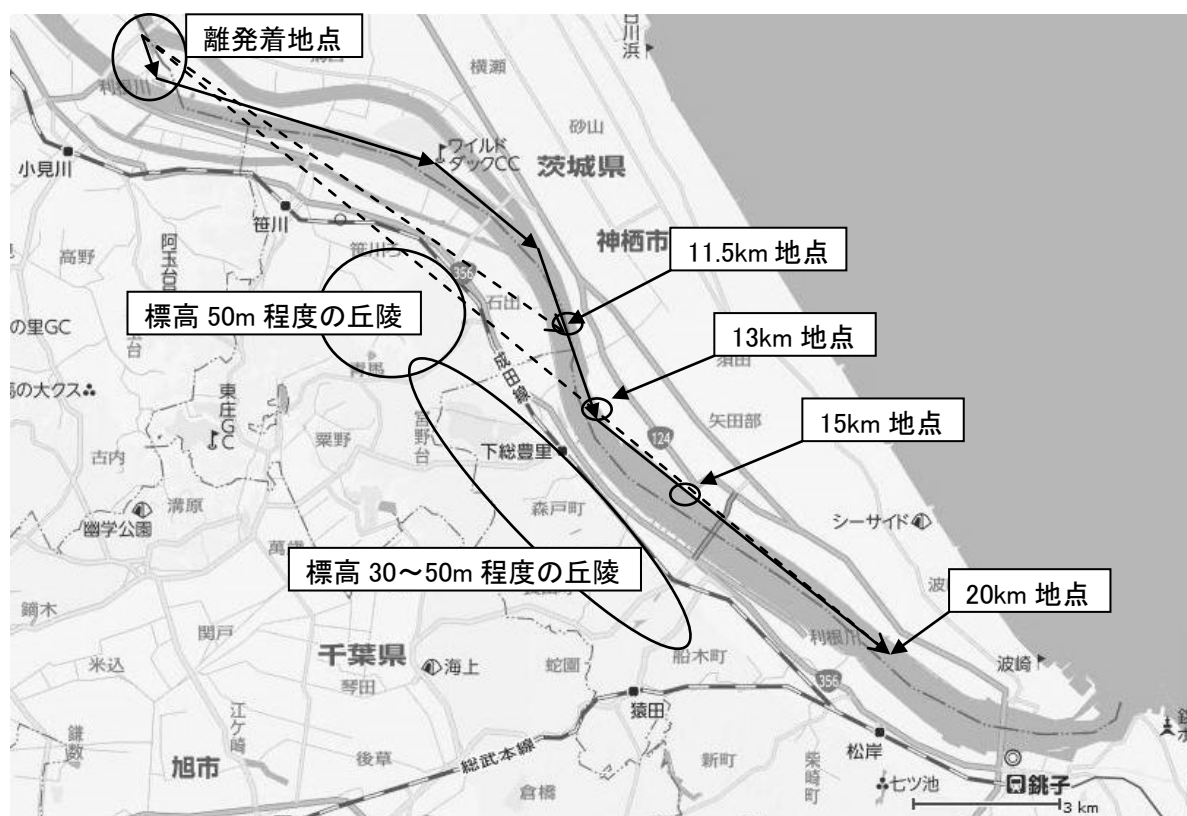


図 25. 飛行実験ルート(千葉県香取市～銚子市利根川上空)と離発着地点位置

また離発着地点は、利根川河口から直線距離で約 25km 地点にある利根川河川敷に設けられた小見川グランド(図 26)である。図 25 において、地上局アンテナ位置から直線的に飛行ルートを見ると、約 7~8km 地点に図 27 に示すような標高 50m 程度の丘陵があり、さらに丘陵上に 3~40m 程度と思われる送電線鉄塔がある。飛行ルートである利根川はこの丘陵を巻くように流れていることから、UAV は直線距離 12km 付近からこの丘陵の背後に回り込む経路になる。



図 26. 離発着地点(千葉県香取市小見川・利根川河川敷)

また地上局アンテナから直線上に UAV を見た場合の仰角は、飛行高度が 180m より図28のようになる。

ここで 7km 地点にある丘陵は、その仰角が 0.4° になることに対し、UAV は 20km 地点で 0.5° となり見通し範囲内を飛行していることになるが、13~15km 付近からその仰角差は 0.4° 以下と小さくなる。さらに丘陵上の送電線を考慮すれば、ほぼ 13km 地点から仰角差は無いことになる。

ここで図3に示したフレネルゾーンをこの伝搬路に適用すると、図29に鎖線で示したように直線距離 11km 付近までは、河川または標高が数mである地形の上空を飛行するため障害は少ないと考えられるが、12km 付近から図29において二点鎖線で示す様に丘陵がフレネルゾーン内に入り、またその延長として利根川に沿った丘陵地があるため、これ等の影響を受けて伝搬損失は増加するものと思われる。

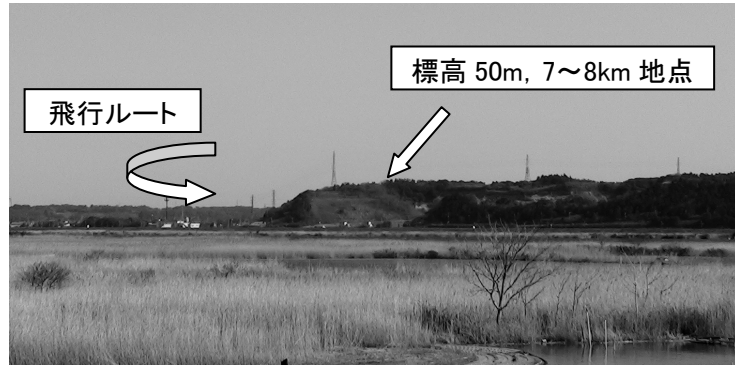


図27. 飛行ルート内にある丘陵(標高50m)

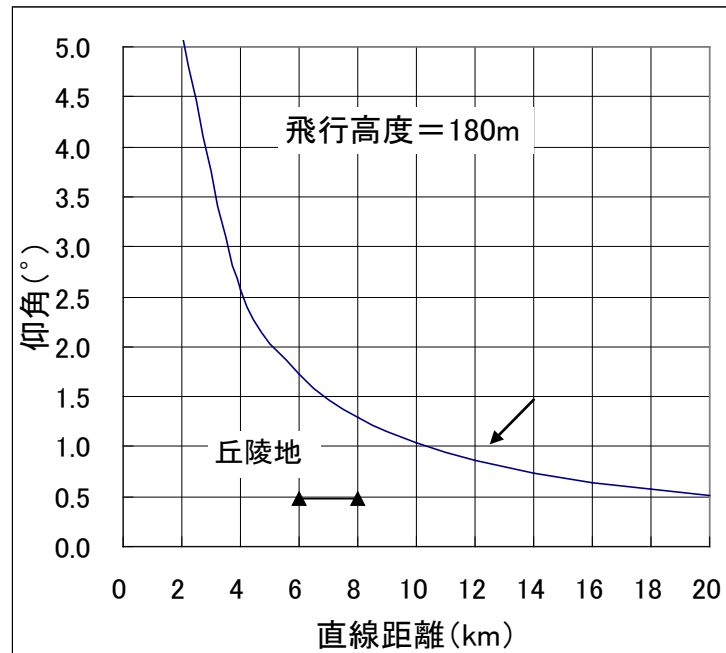


図28. 地上局から見た飛行中の無人航空機の仰角

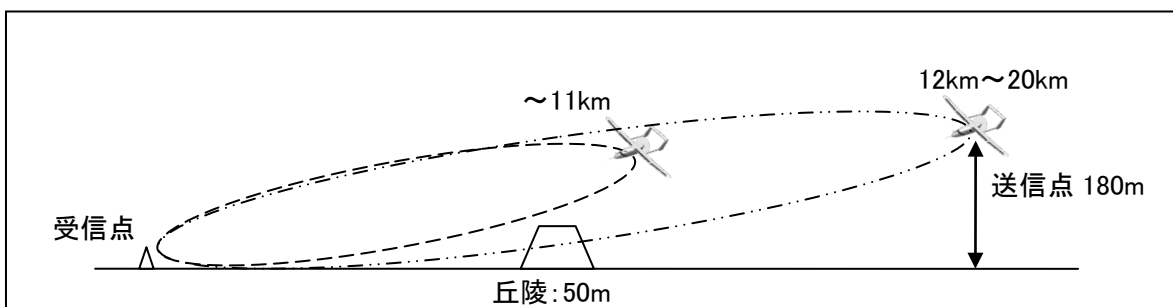


図29. 機体と地上局間のフレネルゾーンと丘陵の関係(概念図)

(4) 飛行実験結果

飛行ルートとしてまず前項の考察を元に、図27に示す丘陵の影響が少ないと考えられる地点付近までの伝搬状況を知るために、直線距離 12~13km 地点で回頭し帰還する飛行実験を行った。この時飛行高度及び飛行速度の設定値は 180m 及び 105km/h である。

当初地上局アンテナを図23に示したように離発着場に設置して飛行実験を行ったが、この場合受信電力値が11.5km地点で急激に低下し受信不可能となった。

その地点を図25で調べたところ、利根川を横断する送電線（約3～40m高）上を通過した時点と一致することが分かったが、送電線の影響であるかどうかは断定できない。そこで地上局の位置を、図30に示したような元の地点より90mほど離れた堤防上（当初設置位置より3m高）に移した。

この位置は、飛行ルート方面の眺望を図31に示すように広く開けている。その結果送電線上を通過した時点でも受信は可能となった。

図32は往復の飛行におけるモデム受信電力の計測値（点線）と、機体姿勢の水平面角度（進行方向）を示すヨー角度（実線）を飛行時間に対して示したものである。図32でヨー角度を見ると、飛行時間が最初の5～7分の間で急変化が見られる。これはヨー角度が $\pm 180^\circ$ を超えるとその計測値の符号が変わるようになっているため、実際にはヨー角度が一方に連続して変化している（機体が旋回している）ことを示している。

離発着場上空の旋回終了後ヨー角度は $80^\circ \sim 0^\circ$ と緩やかに変化しているが、これは利根川に沿って巡航していることを示し、飛行時間が13～14分の時点でヨー角度がマイナス側に変わっているのは、この地点で機体が回頭しそのまま帰還に移っていることを示している。

なおこの飛行では、上空の風向が利根川上流から下流に向かう追い風の状態であったため、往路の飛行速度は約2km/分で回頭地点までの飛行時間は6分30秒、復路は約1.44km/分で飛行時間は8分30秒と差が見られる。

ここで受信電力計測値（点線）を見ると旋回時に大きく変化しているが、旋回により受信アンテナのビーム方向に入る状態では、モデムの仕様上飽和値である -50dBm に達し、背後では -70dBm と大きく低下する。

回頭地点である12～13km付近では $-75 \sim -83\text{dBm}$ と最低値を示しているが、この値はモデムの仕様から安定受信レベル程度（ -82dBm ）であるといえる。なお回頭時の受信はできなかった。

また往路と復路の受信電力の推移を見ると、距離の変化に対し一応に減少するのではなく、往路において旋回から巡航に移った時点で受信電力値が -77dBm 程度に低下し、その後一旦 -63dBm に上昇しているが、この受信電力値の変化はヨー角度、すなわち受信点から見た機体の進行方向の角度と相関がある。さらに回頭後はそのまま上昇し、復路は -65dBm 程度と大きくなっていることが分かる。なおこの計測時でビームアンテナの方向は一定のままである。



図30. 地上局の移設(3m高の堤防上)



図31. 飛行ルート方向の眺望

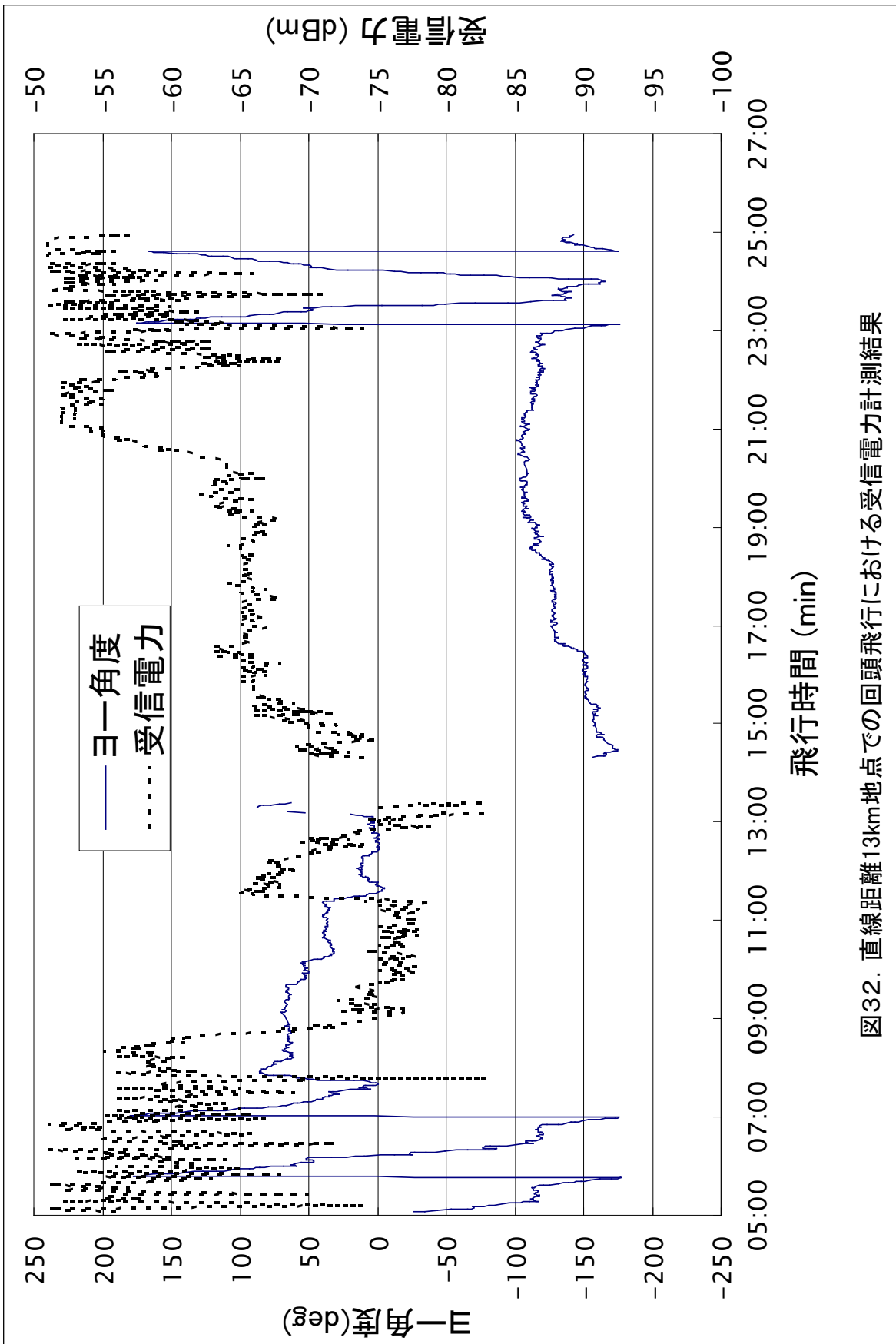


図32. 直線距離13km地点での回頭飛行における受信電力計測結果

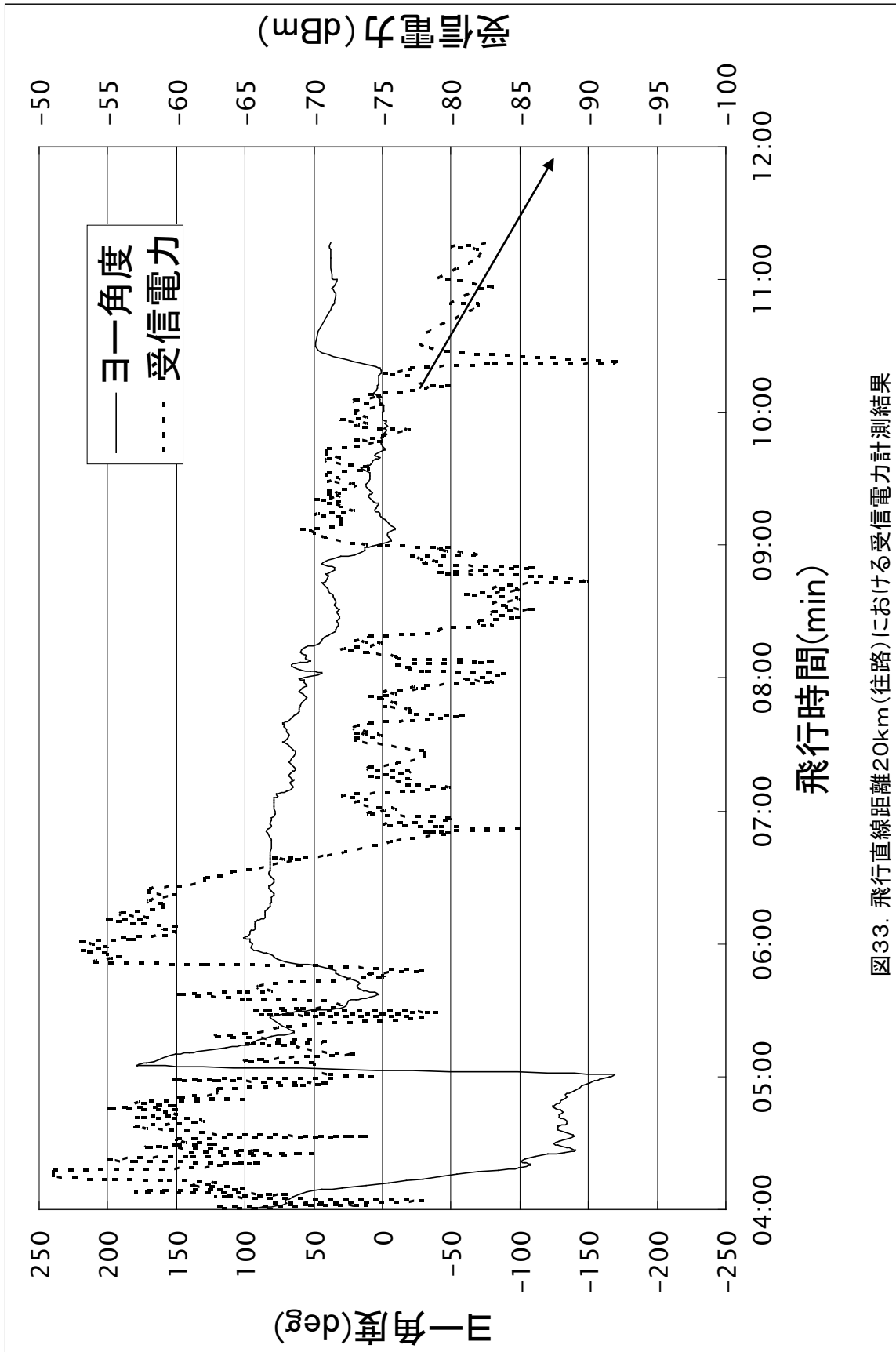


図33. 飛行直線距離20km(往路)における受信電力計測結果

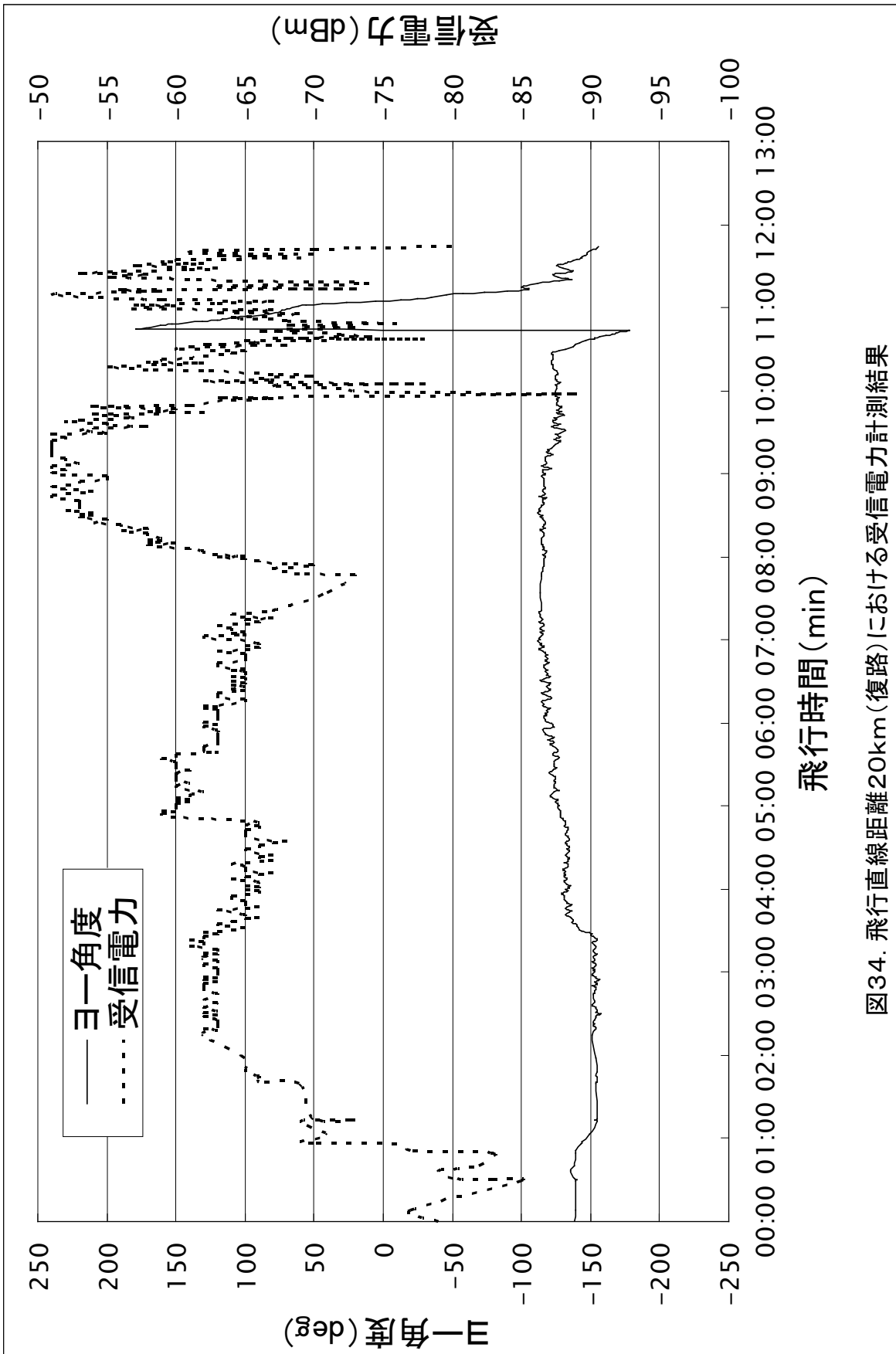


図34. 飛行直線距離20km(復路)における受信電力計測結果

次に図27の丘陵の影響を調べるため 20km 地点までの飛行を行った。この飛行では地上風速が 10~15m/s とかなり大きい気象条件であった。そのため往路の飛行速度は 2.5km/分、復路の飛行速度は 1.32km/分となったため、往復の時間差は往路に対し復路はその約 2 倍弱になった。図 33 (往路) 及び図 34 (復路) はこの飛行時の受信電力を計測した結果である。

図33を見ると飛行時間 11 分 30 秒付近で受信信号が途切れ、この地点以降は送受信が満足にできなかったことを示しているが、この地点での受信電力の値は -80dBm 程度で、このレベルは数 km での値と同様であるにもかかわらず、受信不能状態が突然生じている。なおこの地点は図 3 2 との比較及びヨー角度の変化から 15km 付近であると推定できる。

また図34を見ると、復路で受信が可能になった地点は図33と同様であり、その受信レベルは図32と同様に往路より 10~15dB も高い値を示す。

以上より 15km 付近よりアップ/ダウンリンクが不可能となるが、その原因は 3) で述べた丘陵地の影響による伝搬損失の増加が、この地点付近から急激に大きくなることによるのではないかと考えられる。なおこのような影響が無く、急激な減衰が生じないで直線的に受信電力が減少した場合は、図33右側の矢印で示したように約 17km 程度は受信が可能ではないかと思われる。

以上の受信電力計測値と比較するために、機体の FCC 用データリンクの 2.4GHz モデム受信データを図35 (往路) 及び図36 (復路) に示す。この受信データには GPS による位置情報が含まれているため、地上局と機体間の距離 (伝搬距離) を知ることができ、これを図35で下側に示す点線で示す。

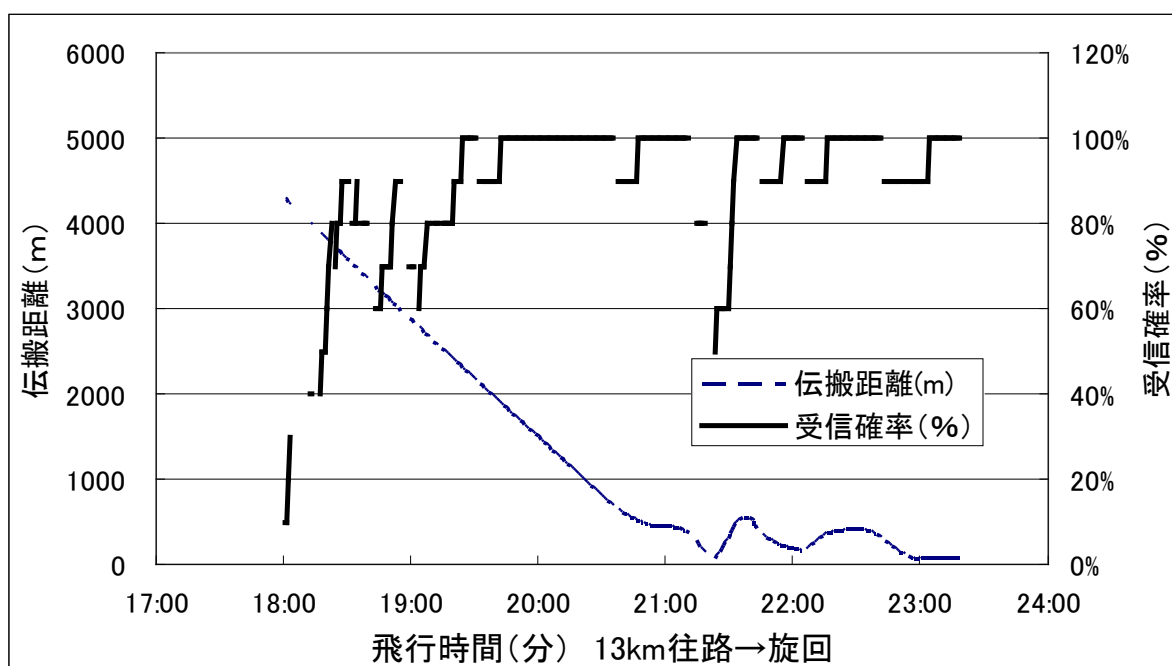


図35. FCC 用 2.4GHz モデムの受信データ(往路)

これを見ると離陸後の巡回に対して伝搬距離は周期的な軌跡になり、ここでは4回の巡回後、飛行時間5分過ぎに巡航に移っている。なおこの飛行時間は FCC の経過時間で図 32~34 の飛行時間とは一致しない。図35で上側の実線は 2.4GHz モデム受信データの受信確率を示したものである。これを見ると伝搬距離が小さい時にその確率が落ちる傾向にあるが、これはアンテナ直上を機体が通過する場合、受信に使用した八木ビームアンテナの背後に機体が位置することで受信エラーが生じやすくなることによる。

図36は同様に復路の受信確率を示したものであるが、図35及び図36を見ると、受信確率を

80%とした受信可能距離は往路で約 2.5km, 復路で約 3.8km 程度, また確実な受信が得られる距離は両者とも約 2km 程度であり, ここで提案する方法に比べ 1/4 程度にとどまる. さらにアップリンクでは (技術適合仕様で) ビームアンテナが使えないため, 上空旋回時程度しか伝搬距離は得られない.

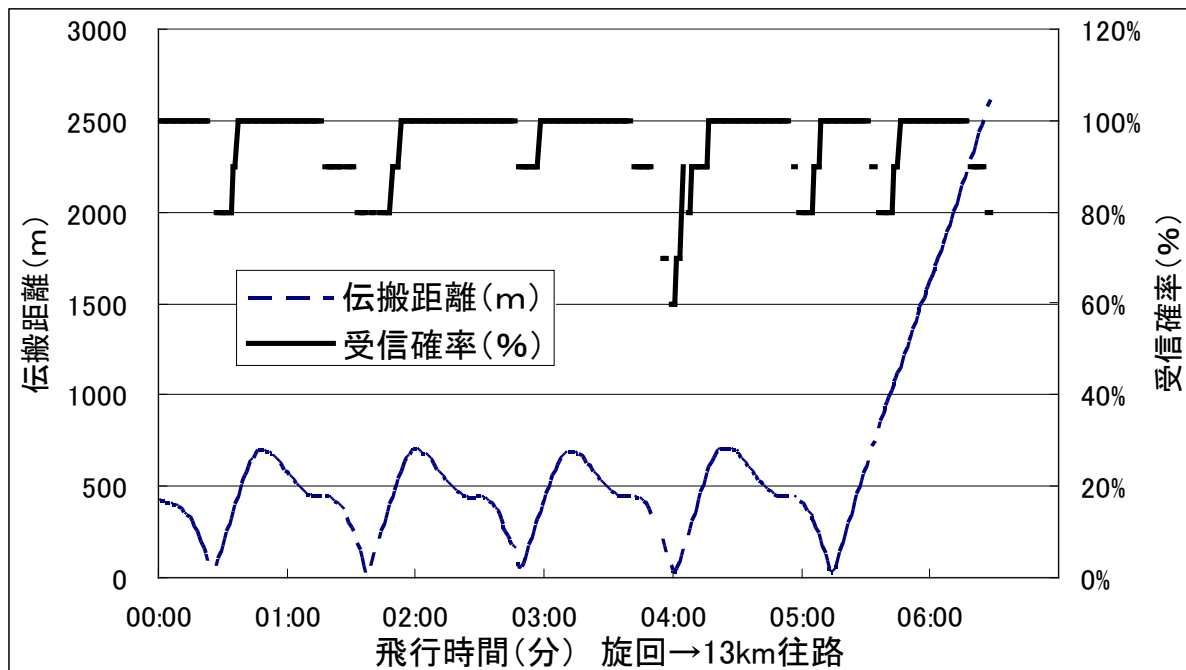


図36. FCC 用 2.4GHz モデムの受信データ(復路)

次にこの受信信号の伝搬距離を見ると往復でその値が異なり, 復路の方がより長い, これは図32~34で往復の受信電力値が異なる結果と同様である. これは飛行ルートが往復で同一経路であることと, 図24に示すように本機体がエンジンが後部にあるプッシャータイプであることを考えると, 地上局から見た機体の送信アンテナ位置が, エンジンを挟んでいるか否かであることがその原因ではないかと考えられる.

以上より機体に搭載するモデムのアンテナ位置が, 受信電力値にかなり影響することが明らかになった. これに対して, 例えば主翼や尾翼の端にこれを移すことでエンジンの影響を避け, 通信可能距離を延ばすことができるものと思われる.

(5) ダウンリンクモデムの不具合事象

前項に述べた飛行実験の補足として, 同様な飛行実験を試みた. この飛行実験では前項の場合と同じ搭載機器を使用しているが, 機体が今までのプッシャー用エンジンに加え, 機首に別のエンジンが装備されたタンデム式の機体 (図37)に変更された. そのため機体搭載上の重量バランスの関係から, 搭載機器の配置場所が図38に示すように変更されたことにより, ダウンリンクモデム及び搭載 PC の動作に以下のような不具合が見られた.



図37. 飛行実験(補足)に使用した機体(タンデム機)

- ・ ダウンリンクモデムの送信機能が、後部エンジンの回転数を上昇させると停止する
- ・ 停止後回転数を下げると復帰するが、この不具合の再現性は高い
- ・ この送信停止状態が継続すると、搭載 PC の OS による動作によりプログラムが停止してしまう

なお図22に示す前項の飛行実験でも同じ機器を使用していたが、この様な不具合は見られなかった。

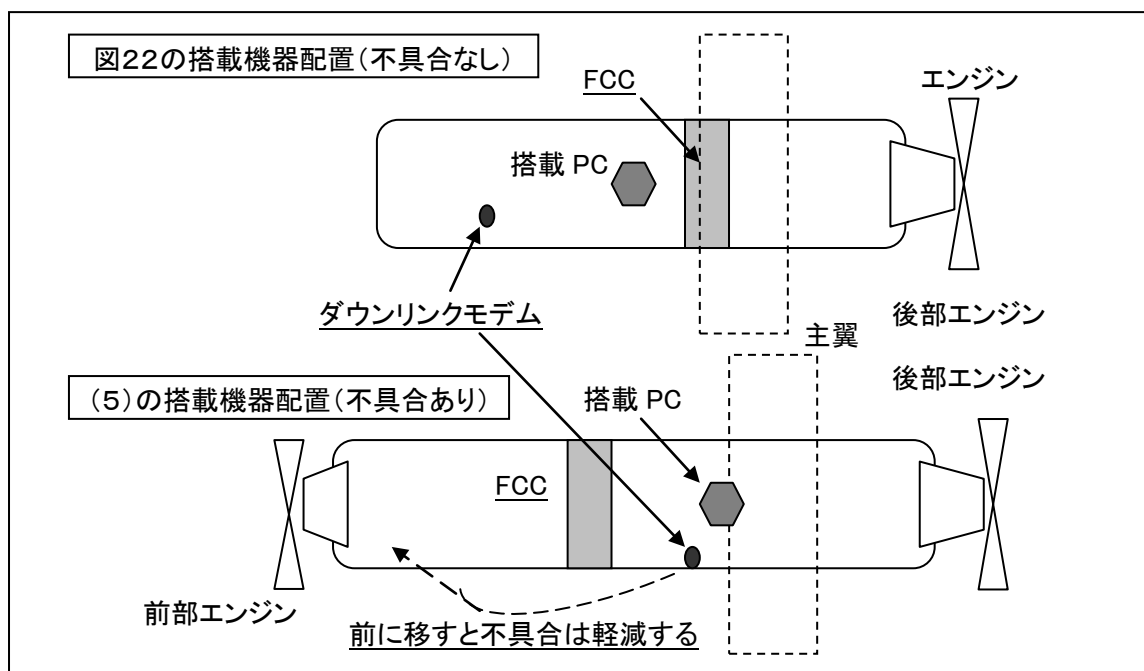


図38. ダウンリンクモデムの不具合と搭載機器配置状況

この不具合の原因を明らかにするために、表8に示すようなトラブルシュートを行った。その結果より不具合の原因は以下のように考えられる。

表8. ダウンリンクモデムの不具合に対するトラブルシュート

試行内容	不具合状況
モデムを前部エンジンに近接して回転数を上げる	不具合は見られない
モデムを後部エンジンから離していく	離す距離に比例して不具合状況が軽減
モデムの USB ケーブル長を変える	不具合状況に変化無し
モデムの USB ケーブルに金属泊テープを巻く	
モデム回路基板を金属泊テープで覆う	

- ・ 後部エンジンだけに装備されているのは発電機であることから、発電機から生じるノイズによるものと断定できる
- ・ ノイズは PC～モデム間のケーブルではなく、直接モデム回路基板に影響している
- ・ 図 22 に示す前項の飛行実験では、後部エンジンと搭載機器の間に FCC があり、これがエンジン・発電機ノイズからの遮蔽に寄与していたものと思われる
- ・ このモデムは、図 12 に示すように回路基板をプラスチック製の筐体内に入れてあるので、電磁的には何ら遮蔽されている状態ではなかった

次にこの不具合を起こしたモデムは USB 接続仕様であるが、モデム製造会社に問い合わせたところ、以下のようなコメントを得ることができた。

- ・ USB 接続仕様はその接続ドライバーIC から発するノイズレベルが大きい
- ・ これに外部からのノイズが加わると、モデムが受信する最低ノイズレベル（ノイズフロア）が上昇する
(ただし外部ノイズが単純にモデム内ノイズに重畳するかどうかは不明)
- ・ ノイズフロアがモデムのキャリアセンスレベルより上昇すると、モデム機能により他者がこの周波数・チャンネルを使用していると判断し、発信機能を停止する

一方この現象が継続しても、PC の OS による動作によりプログラムが停止することは無いということであったが、搭載 PC は以下のような動作を起こす。

- ・ モデムが送信停止状態でもプログラムはモデムに対し送信要求を継続するが、これに対し搭載 PC の OS (Windows XP) は、USB 機器が切り離されたと判断している
- ・ さらに異なる USB コネクタにモデムが再接続されたと判断し、新たな USB ドライバソフトのインストールを要求する

これについて明確な原因は不明であるが、当該モデムへの送信要求をプログラム上で遮断するとプログラムの停止は起きないことから、この搭載 PC の動作はこのモデムの不具合に連動していることは明らかである。

以上よりエンジン近傍に機器類を搭載する場合には、なるべくエンジンから離すか電磁的に遮蔽することは当然であるが、特にモデムを USB 接続仕様ではなく RS232C 接続仕様に変更することが有効ではないかと思われる。これは、RS232C が USB に比べ内部のノイズレベルが低く、かつ信号レベルが高いことから S/N が良好であり、また例えば物理的にその接続を切り離してもこのようなプログラムの停止が生じないことがその理由である。

5. まとめ

UAV の一般的な利用における地上～機体間の無線データ通信において、電波法の規定に反しないことを条件に、周波数の異なる全二重通信方式によって長距離の通信が可能であることを飛行実験により実証した。これはアップ/ダウンリンク周波数を別々にすることにより、双方とも高感度の受信装置を利用することができ、またアップリンクに高出力の簡易無線用モデムを利用することで可能となる。

移動体通信での通信距離に対する受信電力値の推定は、固定通信のように一義的には決まらないことから、一般的に携帯電話の通話可能エリア推定等に用いられる奥村・秦式の計算式を用いた受信電力の予測計算を行い、またその評価のため 1.2GHz モデムによる固定間通信実験を実施した。その結果、この計算式のパラメータである電波伝搬環境の仮定により、ある程度の受信電力値の予測が可能であることが分かった。

以上の移動体通信での受信電力値の予測結果をもとに、UAV と地上局間のゲイン設計を行い、飛行実験によりアップ/ダウンリンク通信可能距離を検討した。その結果 13～15km 程度の距離でこれが可能であることを実証することができた。これは UAV に飛行制御用として搭載されている 2.4GHz モデムのダウンリンクの伝搬距離が 2km 程度（アップリンクは 1km 未満）であった事と比べ、5 倍以上の長距離通信が可能であることを示している。

今回の飛行実験では、UAV 運用委託先の選定により河川上空の飛行ルートとなったが、そのルート上に無線通信に障害となる丘陵等があり、当初予測した 20km 程度の通信可能距離を確認す

ることはできなかった。これについては地上局の位置及びアンテナの地上高に改善の余地があると思われる。

また飛行実験の結果より、機体搭載モデムのアンテナ位置が受信電力値に大きく関係することが分かった。一般にこの程度の機体規模では、搭載機器類の設置場所を任意に選べない場合が多いが、モデムアンテナの位置を適切に選択することが非常に重要であると思われる。さらに、エンジンノイズに対する幾つかの有益な知見が本飛行実験の過程で得られたことも、実際の UAV 運用の観点から大変有意義であった。

謝辞

末尾ながら、本飛行実験における UAV の運用及び操縦の委託先であるフジ・インバック(株)清水大補氏、大塚達実氏、大坂生男氏及び田辺誠治氏と、飛行実験時の協力及びプログラム開発での助言をいただいた都甲章己氏((株)SCC)に謝意を表します。

参考文献

- 1) 多目的小型無人機チーム；「多目的小型無人機の開発と気象観測実験」, JAXA-RR-06-023, 2007年3月
- 2) 奥山, 松田；「無人機の飛行試験における映像伝送試験と無線リンク」, 飛行機シンポジウム前刷, 2008-1D2
- 3) 和多田；「電波伝搬ハンドブック」, CQ 出版
- 4) 奥村ほか；「陸上移動無線における伝搬特性の実験的研究」, 電電公社研究開発本部実用化研究報告, VoL.16,No.9

付録：奥村・秦式の伝搬損失計算式

移動体通信における受信電力の推定方法の中で、携帯電話等の伝搬予測を目的として求められた「奥村・秦式の計算式」では、空間伝搬損失を次の様な近似値で表している。

まず「市街地」における空間伝搬損失 $L_p(\text{dB})$ は、周波数を f (MHz)、距離 $d(\text{km})$ とすると、

$$L_p = 69.55 + 26.16\text{Log}(f) - 13.82\text{Log}(hb) - a\{hm\} + (44.9 - 6.55\text{Log}(hb)) \cdot \text{Log}(d) \quad (\text{付1})$$

ここで $\text{Log}()$ は常用対数を、 hb , hm はそれぞれ基地局のアンテナ高及び移動局のアンテナ高 (m) を、 d は両局間の距離 (km) を表す。なおアンテナ高は、両局の伝搬距離内の平均的な地表高さを基準とした値である。

式 (付1) で $a\{hm\}(\text{dB})$ は、「大都市」及び「中小都市」で異なる補正項で、「中小都市」では以下のように表される (大都市の場合は省略)。

$$a\{hm\} = (1.1\text{Log}(f) - 0.7)hm - (1.56\text{Log}(f) - 0.8) \quad \dots\dots\dots (\text{付2})$$

以上より求める最終的な伝搬損失 L (dB) は、移動通信の伝搬環境が「中小都市」、「郊外地」、「開放地」でそれぞれ以下のように表されている。ここで「郊外地」とは樹木、家屋等の散在する田園地帯、郊外の街道筋など、移動体の近傍に妨害物が密集していない地域と定義されている。また「開放地」とは電波到来方向に高い樹木や建物などの妨害物が無い地域で、目安として前方 300~400m 以内が開けているような畑、田地、野原などと定義されている。

$$\text{中小都市} : L = L_p \quad \dots\dots\dots (\text{付3})$$

$$\text{郊外地} : L = L_p - 2(\text{Log}(f/28))^2 - 5.4 \quad \dots\dots\dots (\text{付4})$$

$$\text{開放地} : L = L_p - 4.78(\text{Log}(f))^2 + 18.33\text{Log}(f) - 40.94 \quad \dots\dots\dots (\text{付5})$$

