一般社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
IEICE Technical Report

ドローンを用いた長距離伝搬波の受信電力 3 次元測定法

浅村 彩† 水田 栄一† 川邊 泉† 杉薗 光太朗† 川畑 広文† 瀬在 俊浩† 砂見 幸之†
福島 幹雄‡ 笹生 拓児‡

†宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
‡株式会社ドルフィンシステム 〒171-0014 東京都豊島区 2-45-1 アークシティ池袋 601
E-mail: †asamura.aya@jaxa.jp

あらまし 産業用ドローンに、広角の小型パラボラアンテナ、超小型の受信機、高精度測位受信機を搭載して飛行させることで長距離伝搬波の受信電力を 3 次元的に測定把握する方法を確立したためその結果を報告する。従来のハイトパターン計測では把握できなかった連続的、立体的な電力の分布を把握できることが分かった。

キーワード ハイトパターン、ソフトウェア無線機、ドローン、小型パラボラアンテナ、ロケット

3D Measurement Method by Using a Drone for RSSI with a Long-Range Propagation

Aya ASAMURA† Eiichi MIZUTA† Izumi KAWABE† Kohtaroh SUGIZONO† Hirofumi KAWABATA† Toshihiro SEZAI† Koji SUNAMI† Mikio FUKUSHIMA‡ and Takuji SASOH‡

†JAXA 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8505 Japan
‡Dolphin System Co.,Ltd. 601, 2-45-1, Ikebukuro Toshima-ku, Tokyo, 171-0014 Japan
E-mail: †asamura.aya@jaxa.jp

Abstract This paper reports the 3D measurement method we developed to evaluate RSSI by long-range propagation using a drone with a small, parabolic broad beam antenna, a micromini receiver, and a highly accurate GNSS receiver. Our method measures RSSI distributions continuously and in three dimensions, something that has not been possible until now.

Keywords Height Pattern, Software Radio Device, Drone, Small Parabola Antenna, Launch Vehicle

1 はじめに

ロケットの無線システム開発では、通信試験を繰り返して設計調整を行うことが難しい。電波伝搬路の状態を正確に把握したうえで確実な設計を行う技術が重要となる。筆者らはドローンを用いて 3 次元の受信電力分布を測定する方法を新しく開発した。イプシロン S ロケット（以下、イプシロン S）の通信システム設計のために、打上げ射点がある鹿児島県大隅半島の内之浦宇宙空間観測所（以下、内之浦）と種子島の地上局間の電波伝搬の状況を測定したのでその方法と結果を報告する。

内之浦射点と種子島間の電波伝搬路を図 1-1 に、断面図の標高データを図 1-2 に示す。70 ㎞の長距離伝搬であり、うち約 11 ㎞は山岳森林地帯、残りは大隅海峡越しの海上伝搬となる。

電波伝搬状況を把握するために、受信アンテナ高を変化させ受信電力強度の分布（=ハイトパターン）を取得評価する方法が知られている。

今回は、産業用ドローンに、広角の小型パラボラアンテナ、超小型の受信機、高精度測位受信機を搭載し、高度 150m まで飛行させてハイトパターンを可視化した。2 項にその測定方法を述べる。3 項に測定結果と電波伝搬モデル（山岳回折、海上伝搬）に基づく計算結果との比較評価を示す。4 項に測定結果の考察を示す。

This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.
Copyright ©20●● by IEICE

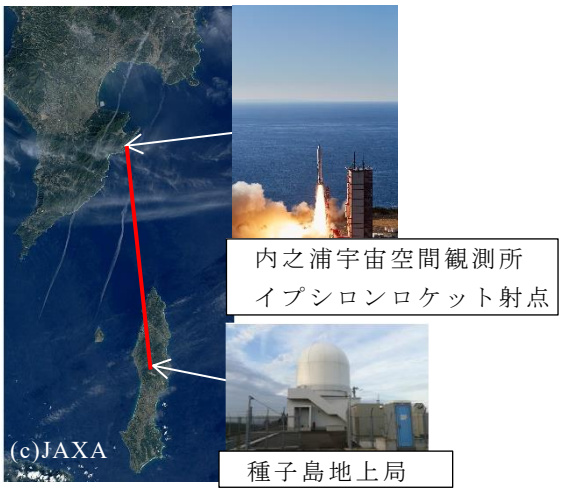


図 1-1 内之浦射点と種子島地上局間の電波伝搬路

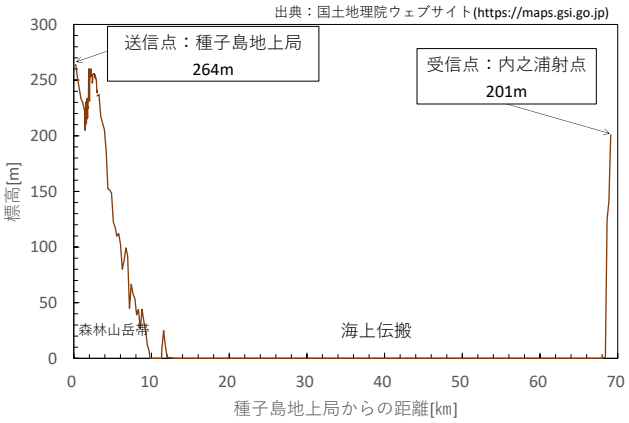


図 1-2 内之浦射点と種子島地上局間の電波伝搬路（断面図）

2 ドローンを用いた受信電力３次元測定法

2.1 試験計画

送信には、現在打上げ運用に用いている種子島の牧川局のアップリンク用の試験電波を使用した。周波数は S-band（約 2.1GHz)、出力は 10W である。受信は、内之浦のイプシロンロケット射点付近でドローンを飛行させて行った。

種子島-内之浦間の通信経路では主に夏季に海上ダクト由来と考えられる受信レベル変動を経験している [1]。季節変動のない山岳回折、反射波の状況を把握するため、気温が低い時期を選んで 2021 年 1 月 25 日～28 日に試験を実施した。

2.2 測定機器

ドローンに搭載した測定機器の系統図を図 2-1 に示す。搭載機器の軽量化が最重要である。軽くするほどドローンの飛行時間を延ばすことができ 1 回の飛行でより多くのデータを獲得できる。飛行制御の安定性、突風時の安全面にも軽量化が寄与する。

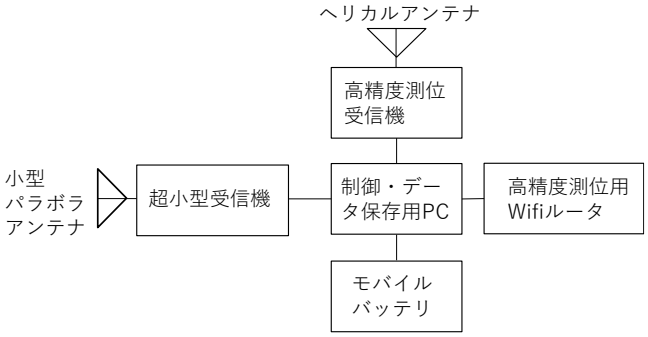


図 2-1 測定機器系統図

一方、実用的な受信電力強度測定のためには、受信機のダイナミックレンジと帯域幅を確保する必要がある。また、受信アンテナはドローンが揺れて指向方向が多少変化しても影響を受けないよう、ヌルのない一様で広角なアンテナビームが求められる。測位受信機は、精度約 1m 以内でドローンの位置を把握する必要がある。本試験ではこれらの要求を満足するドローンと機器を選定した。特徴的なものを下記に示す。

2.2.1 超小型受信機

受信電力強度(RSSI)の測定にはソフトウェア無線機 USRP B200mini(National Instruments 社)を用いて、IQ データを取得し RSSI をマイコンに記録した。受信条件を表 2-1 に示す。B200mini は 24g と軽量小型であり USB3.0 を用いてデータを伝送できる点が優れている。本試験では測定精度を確保するために、校正済のシグナルジェネレータ、スペクトラムアナライザにて毎回読み取り値の校正を行った上で試験に供した。

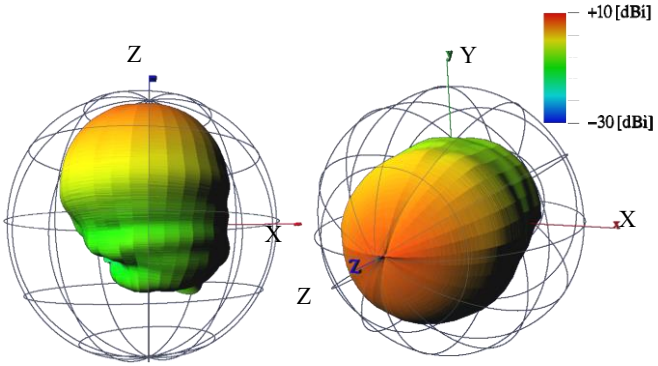
表 2-1 USRP B200mini 受信条件(校正後)

項目	条件	備考
中心周波数[MHz]	約 2.1GHz	無変調（CW）
IQ レート [kHz]	250	帯域幅=200kHz
ゲイン[dB]	30	USRP 内部の ADC 入力に至るゲインの設定値

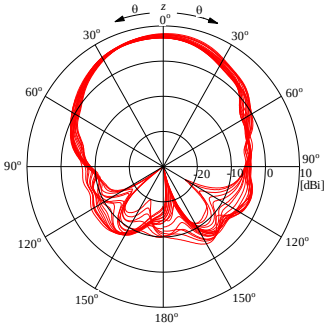
2.2.2 小型パラボラアンテナ

受信用アンテナには、JAXA で独自に開発した小型パラボラアンテナ XDSP（X-Dipole feeding Small Parabola）を適用した。波長に対して開口径を小さくすることでメインローブがアンテナの半球以上に広がりヌルのない一様なパターンを得られる特徴がある。[2] 総重量 400g という軽量化を行いながら、正面利得は 7dBi 以上を達成している。小型パラボラアンテナのパターンの実測結果を図 2-2 に示す。また、アンテナの性能を表 2-2 に示す。ヌルが無い一様なパターンにより飛行

中の揺動による変動影響を抑止できる。



(1) φ=0~350deg の 10deg 間隔の
カット面パターン 3D 描画



(2) φ=0~350deg の 10deg 間隔の
カット面パターンを同一図中に表示

図 2-2 小型パラボラアンテナパターン（実測結果）

表 2-2 小型パラボラアンテナの性能

項目	結果
中心周波数	2.28GHz
波長 λ	131.6 ㎜
偏波	右旋
開口径	97 ㎜(0.74 λ)
正面利得（右旋偏波）	7.82dBi（実測）
3dB ビーム幅 (φ=0,180deg)	64.0deg（実測）
VSWR(2.28GHz)	1.19（実測）
帯域(VSWR≦1.5) 比帯域	300MHz（実測） 13.1%

2.2.3 高精度測位受信機

高精度測位受信機には、u-blox 社の GNSS チップ ZED-F9P を搭載した GNSS モジュールを選定した。しかし GNSS モジュールのスペックでは測位精度 2m(水平)となっており、周辺に構造物などがあればマルチパス波によってさらに精度が悪化する。今回、高精度測位のため RTK（リアルタイムキネマティック）と呼ばれる測位手法を導入した。地上に設置した基準局の衛星信号の搬送波位相情報をサーバ経由で取得することで受信機の誤差を除去する。リアルタイムで測位を行うために、ドローンに Wi-Fi ルータを搭載してサーバと通信させることで実現した。これにより 60g の小型測位受信機でも数センチメートルオーダーの高精度測位を可能とした。

2.2.4 産業用ドローン

ドローンには災害救助に用いられる産業用ドローン D-HOPEI(HARWAR 社)を用いた。測定機器を搭載した状態の写真を図 2-3 に、D-HOPE I の諸元を表 2-3 に示す。測定機器は、D-HOPEI の専用アタッチメント救命胴衣投下モジュールを株式会社センチュリー殿に改造して頂き搭載した。また、小型パラボラアンテナは救命胴衣投下モジュールの前面に取り付けた。

図 2-3 測定システム外観図

表 2-3 産業用ドローン D-HOPEI の諸元

名称	D-HOPE I
寸法	840mm×990mm×580mm
ペイロード重量	6kg
飛行時間	最大 1 時間
耐風性能	14.8m/s
製造会社	Shenzhen Harwar International Aviation Technology Co., Ltd.
輸入代理店	株式会社センチュリー 田中電気株式会社

2.3 対象の電波伝搬モデル

種子島地上局と内之浦間の電波伝搬の経路を図 2-4 に示す。左側が送信点（種子島）、右側が受信点（内之浦）である。電波経路は大気の屈折率分布によって曲がることを考慮して地球の実半径 a=6370 ㎞より大きい等価地球半径 Ka=8472km（等価地球半径係数 K=1.33）を用いて電波経路を直線で表した。茶色線は地形および海面の標高を示す。種子島地上局から近傍約 2 ㎞の山岳回折点までの電波経路の拡大図を図 2-5 に示す。

電波伝搬経路は下記の３つが存在すると考えた。

① 直接波（図 2-4　赤色線）
受信点が地上局から直視される視線の経路

② 山岳回折波（図 2-4、図 2-5　青色線）
受信点と地上局の間に山岳が入るときに山岳での回折を経た経路

③ 海面反射波（図 2-4　緑色線）
海面で一度反射して受信点に至る経路

また、種子島地上局から内之浦射点方向（方位角 8.5 度）には仰角 0.8 度付近に森林帯によるスカイライン（稜線）があることを実測確認されている。ただしこの森林稜線の高さは国土地理院の地形データには表れない。

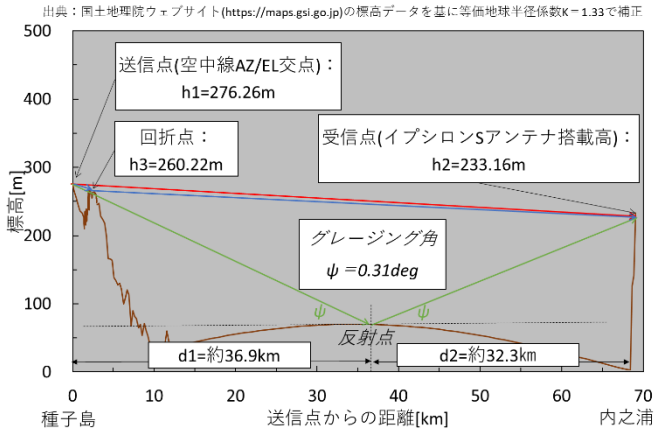


図 2-4 種子島-内之浦間の地形及び電波伝搬(1)

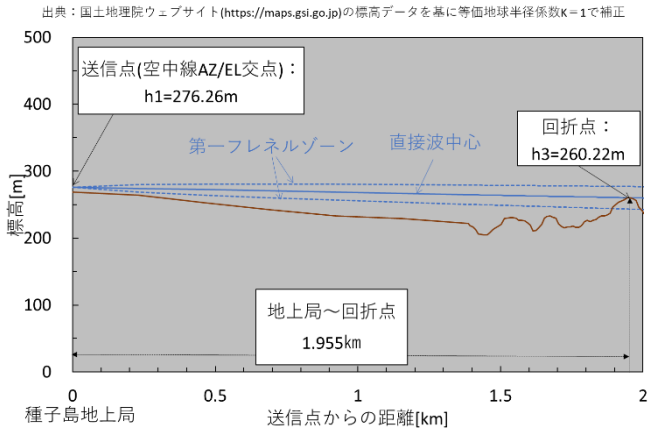


図 2-5 種子島-内之浦間の地形及び電波伝搬(2)

3　測定結果

送信アンテナ仰角を−0.48 度から 0.8 度の間 5 段階で振って 3 次元電力分布の測定を実施した。結果一覧を表 3-1 に示す。各仰角における直接波と森林帯・山岳回折点・内之浦射点との関係概要図を図 3-1 に示す。

表 3-1 測定結果一覧

日時	NO.	試験時刻	送信		備考
			局名	EL[deg]	
2021/1/25	1回目	15:30:00～	内之浦局	−1.0	受信機の校正
	2回目	16:13:50～	種子島局	−0.48	山岳回折点を直視
2021/1/27	1回目	9:50:00～	種子島局	0.0	中間点
	2回目	10:18:00～		0.3	3dB半幅
	3回目	10:45:00～10:52:07		0.8	スカイラインを直視
	4回目	13:25:00～13:30:000		0.8	スカイラインを直視
	5回目	13:51:00～		0.3	3dB半幅
	6回目	14:05:00		0	中間点
	7回目	14:31:00～14:35:45		−0.48	山岳回折点
2021/1/28	1回目	10:5:00～10:58:00	種子島局	0.8	スカイラインを直視
	2回目	13:02:08～13:05:31		0.3	3dB半幅
	3回目	13:09:30～13:13:00		0.0	中間点
	4回目	13:14:00～13:17:08		−0.35	射点直視
	5回目	13:24:10～	送信停止		バックグランド計測
	6回目	13:28:30～	送信停止		バックグランド計測
	7回目	15:37:20～15:38:20	種子島局	0.8	RTKオフ時の精度確認

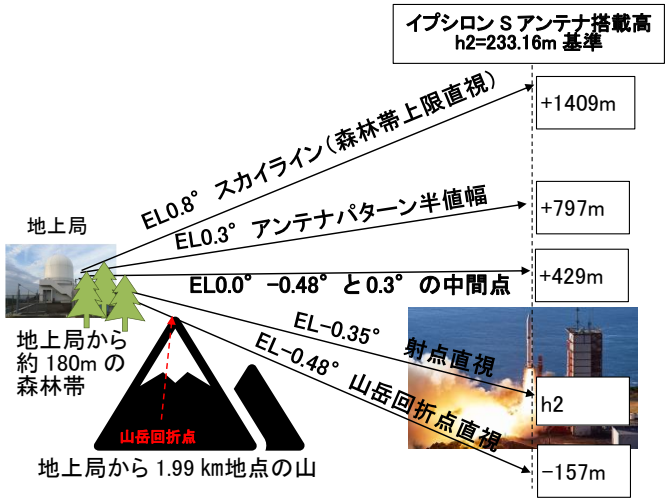


図 3-1 仰角ごとの直接波と森林帯・山岳回折点・内之浦射点の関係概要図

代表例として仰角−0.48 度（1 月 27 日 7 回目）の実測結果を図 3-2 に示す。飛行位置に応じて受信電力強度 RSSI(dBm)変化が取得できた。高度 30m おきに同一水平面内を飛行させたところ変動幅は 1dB 以内で顕著な変化は見られなかった。一方、高度方向（垂直方向）については周期変動が確認された。同様に−0.48 度から 0.8 度までの全ケースの 3 次元電力分布の測定結果を確認したところ同じ特徴が得られた。

高度方向（垂直方向）に対して受信電力強度をプロットした代表例として仰角 0.8 度の結果を図 3-3 に示す。図 3-2 同様、高度変化に伴い周期的な変化が見られた。地上局から直視視線上の到来波（以下、単に直接波という）と海面反射して到来する波の 2 波干渉によるものと考える。そこで 2 波干渉モデルを用いて合成波の振幅の山の高さと谷の深さから直接波の到達電力を推定値した（図 3-3 赤直線）[3]。この図 3-3 に回線計算値を追記して視線上の到来波の到達電力推定値と比較した結果を図 3-4 に示す。回線計算値は、地上局の諸元及び図 2-4 の電波伝搬モデルに基づき自由空間

損失と山岳回折損失を考慮した、また送信側のパラボラアンテナの指向性ビームの中心からドローン位置が外れることによる送信アンテナゲイン減衰分も考慮に入れた。図 3-4 の通り、地上高 31.1m（ロケット搭載アンテナ高さ相当）と地上高 150m の 2 箇所で評価した結果、回線計算値よりも到達電力推定値は 20.1dB 以上低いことがわかった。他の仰角−0.48 度～0.3 度についても直接波の到達電力推定値と回線計算値を比較した結果を図 3-5 に示す。地上高 31.1m と地上高 150mの 2 か所で回線計算値よりも 20.1dB(アンテナ高 31.1m、仰角 0.8 度）～35.0dB（アンテナ高 31.1m、仰角-0.48 度）低いことがわかった。

乖離の原因は、山岳回折によるものではないと判断する。その理由は、仰角−0.1 度以下で回折点が第一フレネルゾーンを侵犯するはずが、試験結果から仰角−0.1 度以上の仰角 0 度、0.3 度、0.8 度でも乖離度が約 20dB 以上発生していたことである。仰角によらず減衰を生じる要因として、山岳回折よりも手前の送信点直近の森林帯が直接波を減衰させたと考えた。

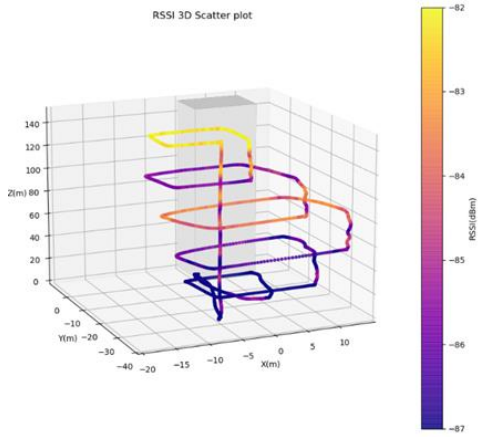


図 3-2 仰角−0.48 度の RSSI3 次元分布実測結果（1 月 27 日 7 回目）

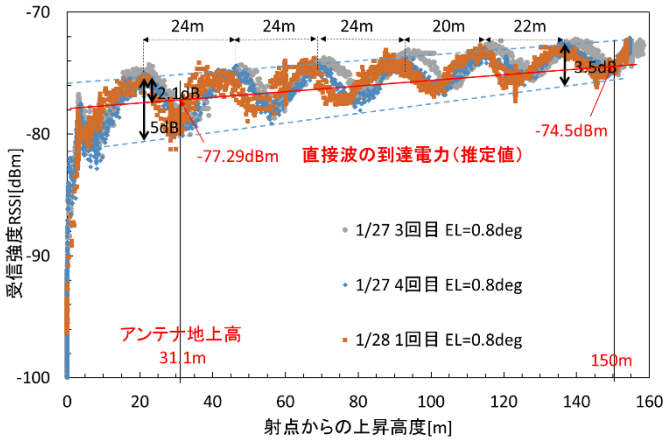


図 3-3 RSSI 実測結果と直接波の到達電力推定値（仰角 0.8 度）

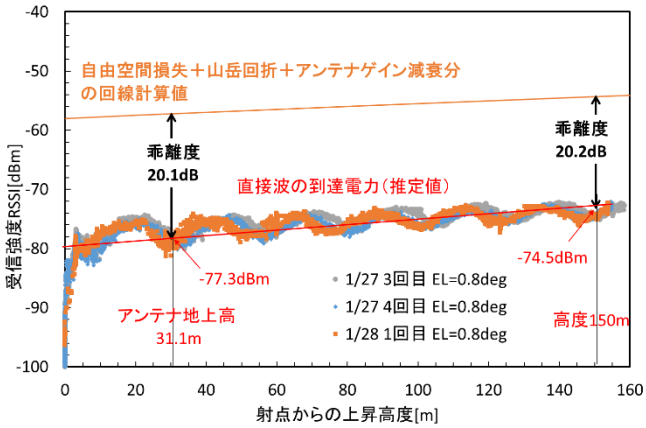


図 3-4 直接波の到達電力推定値と回線計算値の比較（仰角 0.8 度）

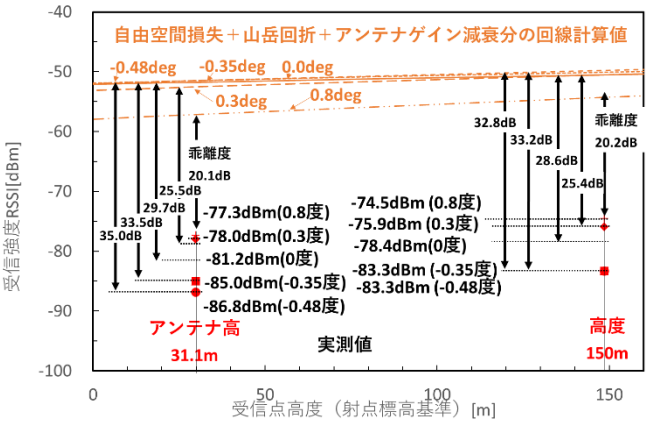


図 3-5 直接波の到達電力推定値と回線計算値の比較（仰角−0.48 度～0.8 度）

4 考察

周期的に変化するパターン形状から、2.3 章の①直接波、③海面反射波が支配的で、いずれも送信点近傍の森林帯で減衰した後に、①直線の伝搬路および②海面反射の伝搬路から受信点に到達して合成されている状況が推測される。長距離伝搬の 2 波干渉モデルの受信強度 E は式(1)で示される [4]。E_0 は直接波の受信強度、ρ は大地の反射係数、Δφ は反射後の位相遅れ角を表す。

$$E = |E_0\{1 + \rho \exp(-j\Delta\varphi)\}| \quad (1)$$

また、反射係数 ρ は反射係数 R に球面大地拡散率 D(0<D ≤1)、粗面大地散乱率 S(0<S ≤1)を考慮した係数であり式(2)に示す。[5]

$$\rho = RDS \quad (2)$$

③海面反射波のグレージング角（接地角）が 0.31 度

と 1 度以下であることから反射係数 R は−1 と近似できる。よって受信電界強度 E は式(3)で示され、D、S を変化させて受信強度解析値 E と合成波の実測値を比較することで、DS の推定を試みた。

$$E = |E0\{1 - DS\exp(-j\Delta\varphi)\}| \quad (3)$$

もう一つハイトパターンから推定できる情報として等価地球半径係数 K がある。受信点のハイトパターン周期 pr はピッチと呼び、式(4)で示される [6]。λ は波長、h2 は送信アンテナ高、d2 は反射点から受信点の距離、a は地球の実半径である。K を変化させてピッチ解析値 pr とピッチの実測値を比較することで K の推定を試みた。

$$pr = \frac{\lambda d}{2\left(h_2 - \frac{d_2^{\,2}}{2Ka}\right)} \quad (4)$$

仰角 0.3 度、0.8 度の実測結果を用いて DS および K を推定して得られた結果を図 4-1、図 4-2 に示す。ピッチ解析値の山谷の位置は高度 40m 付近の実測値の山と比較できるよう高度方向を補正して検討した。結果、仰角 0.3 度、0.8 度のいずれも K=1.33、DS=0.6 の解析値が実測値と最も一致することがわかった。このことからは今回測定時の等価地球半径係数は K=1.33 の状態での伝搬に合うと考える。また球面大地拡散率 D、粗面大地散乱率 S は 0.6 と直接波の 40%程度は拡散、散乱し、残り 60%程度が反射波となって受信点に到達していることが示唆される。今回はサンプルが少ないが、今後ドローンに気圧計、温度計、湿度計を搭載して修正屈折指数 M とともに繰り返し測定し、M の測定結果から等価地球半径係数 K を算出し突合することで手法の妥当性を検証することを展望している。

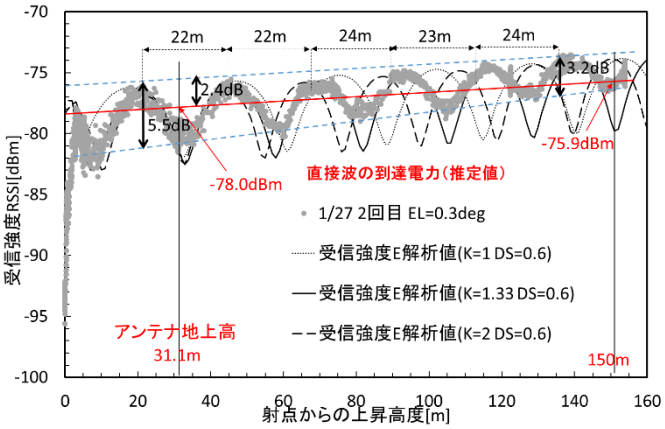


図 4-1 仰角 0.3 度実測値と K=1~2 DS=0.6 解析値との比較

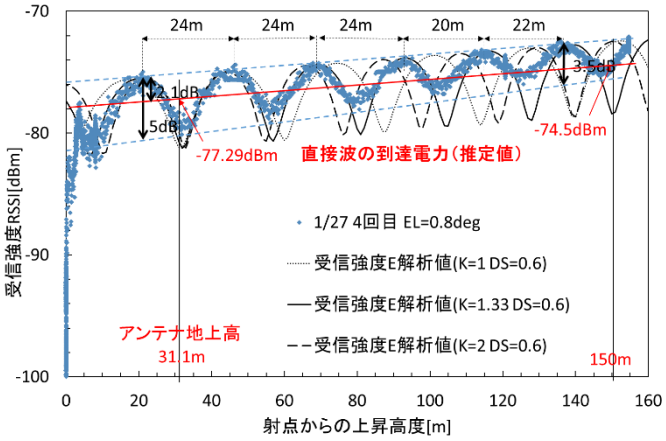


図 4-2 仰角 0.8 度実測値と K=1~2 DS=0.6 解析値との比較

5 まとめ

長距離伝搬波の受信電力強度の 3 次元分布を測定把握する手法を確立した。種子島地上局と内之浦射点間の長距離電波伝搬の状況を調査し送信点近隣の森林帯の遮蔽によって実測値が回線計算値よりも 20.1dB～35.0dB 低いことを把握した。把握した電力分布に 2 波モデルを用いてフィッティングし反射点の状況や観測時の等価地球半径係数を推定する手法を提案した。

謝 辞

本研究の実施にあたり、ドローンの運用、操縦、安全管理に多大なご支援、ご協力頂きました株式会社センチュリーの皆様、田中電気株式会社の皆様には心より感謝申し上げます。

文 献

[1] 杉薗，勝山，砂坂，松本，“ロケット追尾データ伝送用 PTP 無線通信システムの海上フェージング対策”,第 63 回宇宙科学技術連合講演会講演集，no.1E15，Nov.2019.

[2] 瀬在，杉薗，寺岡，砂見，藤井，鈴木，“小型パラボラアンテナのパターン実測結果－小型パラボラによるブロードビームアンテナの実現－”，信学技報 2020，no.A・P2020-62，Sep.2020.

[3] 渋谷茂一，マイクロウェーブ伝搬解説，pp.353-354，（株）コロナ社，東京，1961.

[4] 細矢良雄，電波伝搬ハンドブック，(編)「電波伝搬ハンドブック」編集委員会，pp.125，リアライズ社，東京，1999.

[5] 渋谷茂一，マイクロウェーブ伝搬解説，pp.49-56，（株）コロナ社，東京，1961.

[6] 渋谷茂一，マイクロウェーブ伝搬解説，pp.339-352，（株）コロナ社，東京，1961.