

## 電離層擾乱観測用短波送信システムの開発

富澤 一郎<sup>1)</sup> 柴田 喬<sup>2)</sup> 奥澤 隆志<sup>3)</sup>  
有澤 豊志<sup>4)</sup> 瀬尾 洋一<sup>4)</sup> 足立 登<sup>4)</sup>

### Development of HF Transmission System Specialized for Ionospheric Disturbance Observation

Ichiro TOMIZAWA <sup>1)</sup>, Takashi F. SHIBATA <sup>2)</sup>, Takashi OKUZAWA <sup>3)</sup>,  
Toyoshi ARISAWA <sup>4)</sup>, Yoichi SEO <sup>4)</sup>, Noboru ADACHI <sup>4)</sup>

#### Abstract

Radio sounding techniques have commonly been used for observation of ionospheric disturbances because of their high sensitivities in detecting signals reflected or scattered by electrons or ions in disturbed regions. High-Frequency-band Doppler (HFD) observation technique is the most sensitive one for detecting movement of the disturbed regions since it can be applied for the spectral analyzing technique. It is therefore popular that the HFD technique has long been used for this purpose. However, we had to give up the HFD observation since the reference signal transmitted as the HF-band standard signal station JJY were reported in termination at the end of March in 2001.

Then, we started the project in 2000 for constructing a new reference transmitting station to continue the HFD observation. We had been developing an HF transmitting station specialized for the HFD observations. The new HF transmitting station with 200 W has the sufficient stability to detect as small deviation as  $10^{-8}$  within the 1,000 km range from the UEC Chofu-campus in Tokyo.

The transmission frequencies, 5.006 and 8.006 MHz, are allocated based on the research of minimum interfering frequencies close to the old-JJY transmission frequencies, 5 and 8 MHz. To minimize spurious caused by inter modulation distortion both in transmitter and in receiver, the amplitude modulation of the station ID is set in single sideband with low modulation index. The HFD station, JG2XA, started transmission on July 3, 2001, and it continues transmission for HFD observations since then.

**Keywords:** HF-band Doppler sounding, HFD, ionospheric disturbance, radio sounding, HF-band stable transmission system, JG2XA

---

1) 菅平宇宙電波観測所 Sugadaira Space Radio Observatory (e-mail: tomizawa@ee.uec.ac.jp)

2) 情報通信工学科 Department of Information and Communication Engineering

3) 名誉教授 Professor Emeritus

4) 技術部 Technical Division

### 1. はじめに

電離層中の電子密度は、太陽活動、地球磁場変動、オーロラ活動、地表付近の大気変動など様々の要因で、時間的にも空間的にも変動することが知られている[1][2]。この様な変動の中でも、時間的・空間的に定常でない変動を電離層擾乱と呼ぶ。その電離層擾乱現象の発生伝搬機構を調べるといふ地球物理的研究のため、様々な観測方法が開発運用されてきた[1][2][6]。これらの方法はその測定機器により、1) 人工電波や宇宙電波を利用した間接観測、2) ロケットや人工衛星といった飛翔体の電子密度測定器を用いた直接観測、3) 電離層中の励起イオンの発光を利用した間接観測、の3つに分類できる。

電離層擾乱は、その発生が時間的に、また空間的にも、予測できない場合が多いため、上に挙げた多様な観測手段を長期継続運用して、擾乱発生およびその様相などを的確に観測することが期待されている。また、擾乱現象は短波通信や電波測位などに大きな影響を与えることから、最近、擾乱情報をリアルタイムに取得したいとの期待も寄せられており、将来的に受信解析および配信に至るシステム構築が重要視されている。この長期的に継続可能か、また広域に容易に展開できるかという観点に基づき、各観測手法の特徴について比較する。

観測方法2)の中でロケット観測は、下部電離層から上部電離層まで広範囲の電子密度擾乱を直接調べることができるが、打ち上げ場所と時間が限定されているため、長期的に安定な擾乱観測手段とはならない。また、人工衛星観測は、直接調べる利点はある、しかも汎地球的規模での観測が可能のため多用されているが、高度300km以下の軌道を持つ人工衛星は大気摩擦により長期的観測が望めないため、下部電離層の擾乱観測手段とはならない。

観測方法3)は、ファブリーペロー型干渉フィルタを利用して電離層高度の励起原子からの発光を観測するもので、空間的な擾乱の様相を可視化できる利点があるが、光学的手段のため夜間の好天時のみ利用可能で、長期安定観測は困難である。

これに対して、観測方法1)は、電波が電離層中の電子密度またはイオン密度の擾乱によって起こる反射、散乱、屈折、回折、干渉、吸収の変動を利用して間接的に測定する。信号源が電離層下方にあるかそれとも上方にあるかによって、また、信号源が人工電波か自然電波かによって、さらに細かく分類できる。

A. 最も基本的な観測方法は、1925年以来実施されているアイオノゾンデ法である[1]。このアイオノゾンデ法は、中波帯から短波帯の送信電波の反射を観測することにより、電離層電子密度高度分布の変化から電子密度擾乱を直接捉えることができる。日本の場合は現在

の独立行政法人通信総合研究所が担当し、稚内、国分寺、山川、沖縄の4観測点で現在も継続観測され、データも公開されている。ただし、アイオノゾンデ法では、1~25MHz間の周波数掃引を行うため、時間分解能を高く取ることが困難であり、また、大電力パルス送信条件を満たす送信局設置が困難であり、空間的な擾乱の変動を調べることも難しい。また、この方法は電離層最大電子密度以下の高度の擾乱にのみ適用できる。

- B. 送信源を電離層高度より上方を飛翔する人工衛星に置いて、最大電子密度高度以上の電離層を観測するトップサイドサウンダ法は、衛星が移動するため空間的な擾乱の様相は容易に描ける特徴があるが、現在は運用中の衛星がないため利用できない。
- C. VHF/UHF帯電波の散乱を利用したインコヒーレント散乱レーダ法は、電離層擾乱を低高度から高々度まで観測できることから非常に有効な方法であるが、この観測には大電力で大規模の送受信装置が必要である。このため設置場所が限定され、空間的な変動について情報を得ることは困難である。現在、日本では滋賀県信楽町にある京大MUレーダのみが運用されている[2]。
- D. 高々度を飛翔する人工衛星電波、特に測位衛星GPSの電波の位相変化を地上受信点で観測することにより、伝搬路中の総電子数を測定し、その変化から電離層中の擾乱を観測する方法が開発されてきた。この方法は、多数のGPS衛星を利用できることから、時間空間的に連続観測が可能なのが優れているが、その擾乱の高度および大きさを決定することが困難である[6]。
- E. 図1に示す短波帯高安定送信波の電離層反射ドップラシフトを用いて電波通路上の電子密度擾乱を観測する、短波ドップラ(HFD)法が1960年頃から開発され、長期に渡って継続観測されてきた[1][4]。HFD法は、周波数安定度の高い送受信局の組み合わせで実施でき、

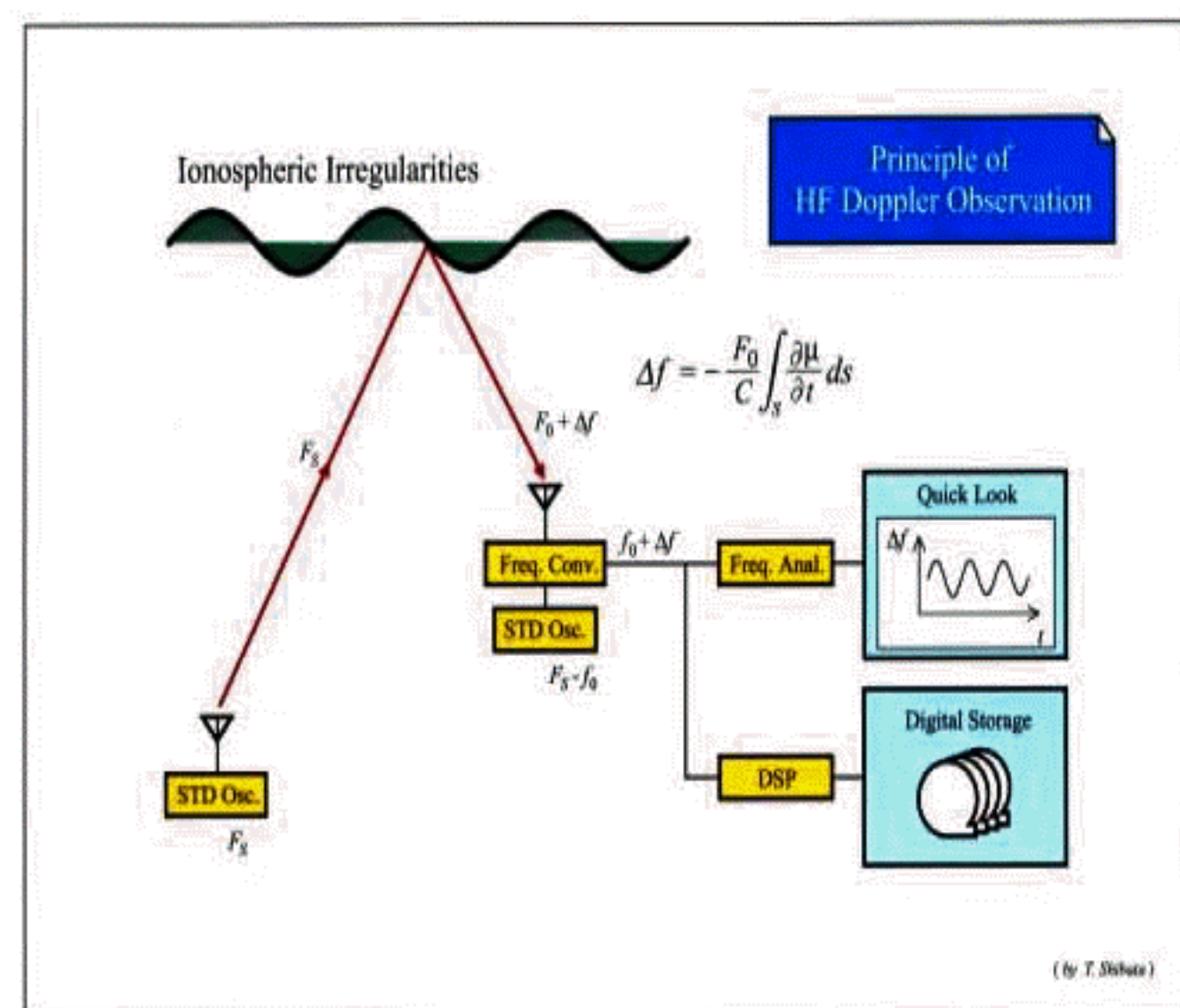


図1. HFD 観測原理図

しかも使用周波数を増やすことにより、探査高度範囲を広げることができる。ただし、連続波を使用することから、その正確な反射高度を決定することができない欠点がある。また、探査範囲もE層高度からF層の最大電子密度高度までに限定される。

以上のように、各観測手段とも電離層中の電子密度擾乱観測には、長所短所を持つため、一つの観測方法だけでは長期、広域、しかも詳細な観測を達成できない。この達成には、各観測機関が多様な観測を分担して継続的に運用することが要請されている。

本学菅平宇宙電波観測所では、この中のHFD観測を1977年以来20年以上に渡って担当してきた。従来、HFD観測には、通信総合研究所が運用していた短波帯標準電波JJY局を利用してきた。HFD法は、安定な基準周波数源を持った受信機を用意すれば、任意の場所に容易に設置できることから、国内外の研究機関で広範囲に展開されてきた[1][4]。しかし、この局が時刻精度の問題から長波に移行するため、2001年3月31日をもって、閉局することとなった[5]。この結果、観測に使用可能な国内短波標準電波が存在しなくなり、観測の基盤を失うこととなった。この根本問題を解決することが、当HFD研究グループの緊急の課題となった。本報告では、この短波ドップラ観測の基盤となる送信局構築について、従来の送信局に比べた特色とそれらを纏めた基本設計仕様、および無線局免許取得と設置運用、という二つの面から述べる。

## 2. HFD観測用送信局の特色とその基本仕様

### 2.1 JJY局使用時代の問題点

従来、HFD観測に使用してきた短波標準電波JJY局は、高安定周波数および標準時刻の供給を目的に運用されていたため、その送信周波数、周波数安定度、サービスエリア、必要送信電力、運用時間、変調方式、設置場所は、表1に示すように規定されてきた。

HFD観測には、長時間連続でしかも無変調の送信信号が最も望ましいが、従来は毎時4分間の休止があり、しかも振幅変調信号が重畳されていた。このため、休止時間のデータの補完が必要となり、大きな問題となっていた。また、変調信号除去のために特別のフィルタが必要となり、観測装置製作の問題となっていた。

観測上のもう一つの問題は、JJY局と全く同じ周波数で運用している国外標準電波局の混信であった。スペクトルの特徴と休止時間から、JJY局の信号であることはおおよそ推定できたが、夜間など国外局の信号の伝搬減衰が小さくなる場合には、判別が困難となった。

表1. 短波電離層ドップラ(HFD)観測に使用していた短波標準電波JJY局の諸元(1980年時点)

呼出し符号	JJY
送信所	NTT 名崎無線送信所(茨城)
緯度経度	N36°11' E139°51'
アンテナ形式	垂直接地型(2.5 MHz) 水平ダイポール(5, 8 MHz) 垂直ダイポール(10, 15 MHz)
空中線電力	2 kW
運用時間	常時(毎時35~39分休止)
搬送波周波数	2.5, 5, 8, 10, 15 MHz
変調調波周波数	1600 Hz(秒信号), 1 kHz(識別信号)
標準時	日本標準時(JST=UTC+9)
1 kHz信号による変調時間	0~5分, 10~15分, 20~25分 30~35分, 40~45分, 50~55分
周波数と時間間隔の正確さ	$1 \times 10^{-11}$ /day(周波数) $\pm 1 \mu\text{s}$ (時間間隔)
秒信号の形式	1600 Hzの8サイクル
電波警報	N, U, Wのモールス符号による
DUT1信号	45 ms幅の特別秒信号による

### 2.2 使用送信周波数

従来、短波標準電波JJY局の送信周波数2.5, 5, 8, 10 MHzでHFD観測を行ってきた。この送信周波数から周波数を大きくずらすと、同じ送受信局間距離であっても電離層反射高度が大きく変わり、擾乱の様相が異なってしまう。したがって、電離層反射高度をほぼ同じとするためには、できる限り短波標準電波JJY送信周波数に近い周波数での送信が必要である。しかし、国外標準電波局との混信の問題を解決するため、周波数的にはわずかに異なる必要がある。

表2. 予定しているHFD観測局位置

観測点名	緯度	経度
菅平	36°31'N	138°19'E
高知	33°34'N	133°32'E
呉	34°15'N	132°32'E
弘前	40°36'N	140°28'E
富士嶺	35°25'N	138°37'E
松本	36°15'N	137°59'E
小名浜	36°56'N	140°56'E
神戸	34°42'N	135°14'E
宇治	34°53'N	135°47'E
京都	34°48'N	135°46'E
母子里	44°22'N	142°16'E
大阪	34°36'N	135°30'E
穂高	36°22'N	137°51'E
那覇	26°20'N	125°04'E

従来の経験[3]から、観測周波数としては距離100km程度の観測では5, 8MHz, 距離500km以上の観測では8, 10MHzが適していることが分かっている。2.5MHzは、距離500km程度での冬季夜間擾乱観測が可能である。

送信局を本学調布キャンパス(35°39'N, 139°32'E)とし、当初の受信局を菅平宇宙電波観測所(36°31'N, 138°19'E)とすることから、距離が141kmとなる。これに合わせて、まず送信周波数を5MHz帯および8MHz帯とし、表2に示した予定観測局設置に合わせて、将来的には10MHz帯の増設を考慮することとした。

実際の送信周波数決定に関しては、3章で述べる。

### 2.3 周波数安定度とスペクトル純度

表3に示すように、最大ドップラ周波数変動率は電離層擾乱原因によって大きく変化する。本観測システムでは、最も変動率の小さい $10^{-8}$ 程度のE層擾乱を安定に検出可能とする。定常的にはこの1/10程度と考え、送信システム全体の周波数安定度を、これより1/100以下、つまり $10^{-10}$ /day以上の安定度としなければならない。この安定度は、通常の水素発振器では満足できない。この条件を満たす発振器としては、ルビジウム原子発振器、セシウム原子発振器、水素メーザ発振器があるが、比較的安価に入手可能で、 $5 \times 10^{-11}$ /day以上の性能を有するルビジウム原子発振器基準を採用した。当然、受信側にも同様に安定な発振器が必要である。

表3. 電離層擾乱原因とそれらの最大周波数変動率[11]

電離層擾乱原因		周波数変動率	
1	太陽現象	日出・日没	$10^{-6}$
		日食	$10^{-6}$
		太陽フレア	$10^{-5}$
2	地磁気擾乱	SC型擾乱	$10^{-7}$
		SI型擾乱・パルセーション	$10^{-7}$
		サブストーム	$10^{-6}$
		主相	$10^{-6}$
3	移動性電離層擾乱	Large Scale	$10^{-6}$
		Medium Scale	$10^{-7}$
		Small Scale	$10^{-7}$
4	地震	$10^{-6}$	
5	荒天	台風・ハリケーン	$10^{-6}$
		サイクロン	$10^{-7}$
		トルネード	$10^{-6}$
6	核爆発・火山噴火	$10^{-7}$	
7	スプレッドF・スポラディックE	$10^{-7}$	
8	E層変動	$10^{-8}$	

送信信号が長期的に上の周波数安定条件を満たしていても、観測時間内に大きく変動しては電離層擾乱のスペクトルなどを詳しく調べることができない。したがって、電離層擾乱の観測時間0.1秒から1日の広範囲において、上の条件を満足する必要がある。ルビジウム原子発振器では、この仕様を満たしている。

また、スペクトル線幅は、ドップラスペクトル分解能に大きく影響する。周波数変動を0.01Hzの分解能で観測するため、送信信号スペクトル線幅は、この1/10以下であることが必要である。

### 2.4 サービスエリア

東アジア地域では、現在も短波標準電波として中華人民共和国BPM局が運用されており、サービスエリアとしても全域を覆っていることから、研究に使用する短波送信局の担当する範囲を日本国内に限定する。図2に示すように、送信局の位置を調布とすると、最も遠い沖縄観測点でも約1,500kmとなる。また、短波標準電波JYJ局を利用してHFD観測を行っていた局に対するサービスも継続可能とする必要がある。これら観測局が日本全体に分布するため、指向性はないことが望ましい。ただし、当初は、唯一1,000kmを越える沖縄観測点を除いた他の1,000km以内の観測点での受信を想定する。沖縄観測点での観測開始時には、10MHz帯での送信を考えることとする。

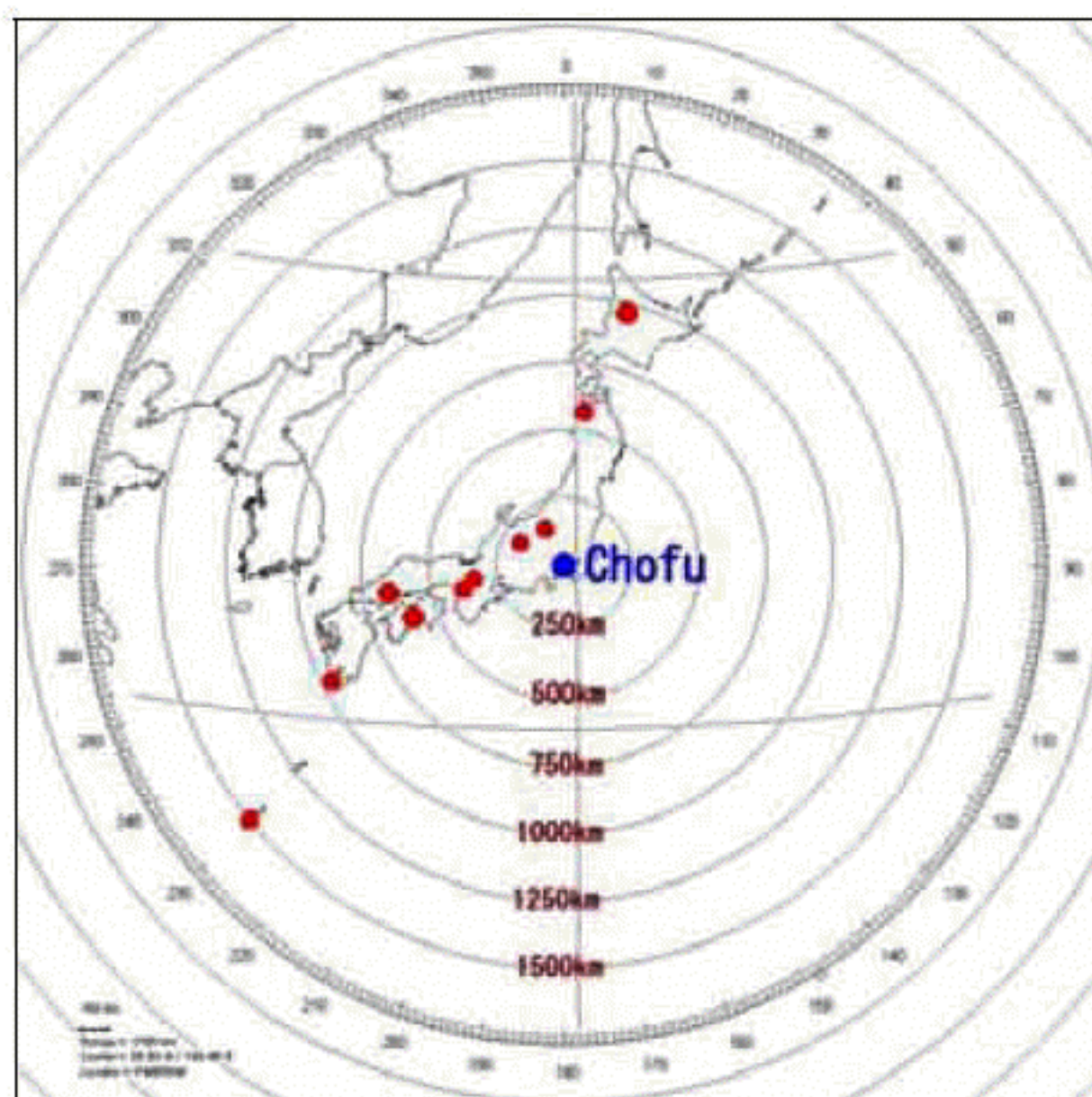


図2. 調布送信局から表2の予定観測点までの距離と方位

## 2.5 必要送信電力

送信電力は、サービスエリア、アンテナ特性、信号対雑音比 (S/N) を満足する安定受信条件、それにシステム維持という多様な面から決定することが必要である。

付録1において、サービスエリアとして 1,000km を設定し、アンテナパターンを考え、さらに S/N=10dB の安定受信条件を考慮して、必要な送信電力を考察した。

この結果、付録表5に示すように、5MHz 帯で、北東から南西方向に張った水平ダイポールアンテナを用い、これに 200W の空中線電力を供給することが、最も供給電力を小さくできることが分かった。したがって、送信システムの設計では、この 200W を採用することとする。

8MHzの送信システムでは、吸収減衰  $\Gamma_1$  が 5MHz帯より小さくなるため、送信電力としては小電力でも条件を満たすが、場合によって電離層突き抜けによる減衰が起こるので、5MHz帯と同じ電力 200Wで送信することとする。

## 2.6 変調方式

電離層反射波を観測する立場からは、搬送波との不要な混変調を防止するため無変調搬送波信号が望ましいが、電波法では送信中一定間隔で局名 (コールサイン) を送信する必要がある。したがって、観測に影響を与えず、しかも容易に局名を認識できる変調方式を選択する必要がある。電離層反射波のドップラシフト幅に比べて、十分離れた変調周波数を取ればよい。市販の受信機で容易に局名を認識可能なのは振幅変調であるので、変調周波数を約 500Hz とし、両側波帯が第3次混変調積によるスプリアスを発生さないように片側波帯のみ使用する。電波形式としては符号による片側波帯振幅変調 (H2A) とする。

## 2.7 送信機構成

短波帯用として市販されている汎用送信機は、送信信号を作成する上で、数個の独立した水晶発振器を使用している。このため、2.2節に記した周波数安定条件を満たすことができず、局部発振器の安定度改造型を前提とした。また、送信電力仕様を長期的に満たし、しかも片側波帯振幅変調波を発生するためには、十分な冷却機能や特殊変調機能を備えた送信機を必要とするため、メーカー製送信機の改造を必要とする。従来より、電通大構内で短波送信実験[6]に使用されてきた八重洲無線製トランシーバ (FT840) を目的に合わせて改造して 20W の基本送信信号を発生させ、これにバーテックススタンダード社製リニアアンプ (VL-1000 : 抑圧搬送波片側波帯 [SSB] 通信に使用するときの最大許容尖頭電力 1kW) により、200W に増幅して使用することとした。

## 2.8 設置場所と運用期間

無線従事者免許を所持した者が常駐し、しかも長期的に無線局を維持する必要があるため、電気通信大学調布キャンパス内が適当である。電離層活動の大きな変動要因である太陽活動の1サイクルである12年間を一つの区切りと考え、長期的に維持できる体制の構築を目指すこととした。

## 2.9 基本仕様

表4に、上記2.1~2.8節で検討した結果をまとめた送信局の基本仕様を示した。以下の第3章において、この基本仕様に基づいた送信局装置の構成と無線局開設に必要な周波数検討結果を述べ、さらに実際の免許手続きについてまとめる。

表4. 送信局基本仕様

項目	基本仕様	
設置場所	東京都調布市調布ヶ丘1-5-1 電気通信大学内 : 位置 (35.65N, 139.54E)	
搬送波安定度	$5 \times 10^{-11}$ /day	観測からの要求条件 ルビジウム発振器使用
送信電力	200 W	検討資料(付録1参照)
送信周波数	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 5 MHz <math>\pm \Delta f</math></li> <li>・ 8 MHz <math>\pm \Delta f</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\Delta f</math> はできるだけ小さくする</li> <li>[最終的には+6 kHz]</li> </ul>
空中線形式	水平半波長ダイポール	
ID 変調形式	振幅変調 (単側波帯) 500 Hz モールス符号変調形式 H2A	電波法施行規則第4条
ID 送出間隔	30 分間隔以内	無線局運用規則 30 条
占有周波数帯幅	1.5 kHz	

## 3. 送信局装置開発と免許

### 3.1 運用可能周波数調査

HFD 観測のため 5MHz および 8MHz の付近の周波数割り当てを希望していたが、その理由およびその周波数で混信が起こらないかを詳細に調べることを郵政省 (現総務省) より要求された。候補周波数として、5MHz 帯では 5,006kHz および 5,010 kHz, 8MHz 帯では 7,994kHz および 8,006kHz と指定され、これらの周波数での長期間スペクトル監視を行った。

#### 1) スペクトル監視システムの構築

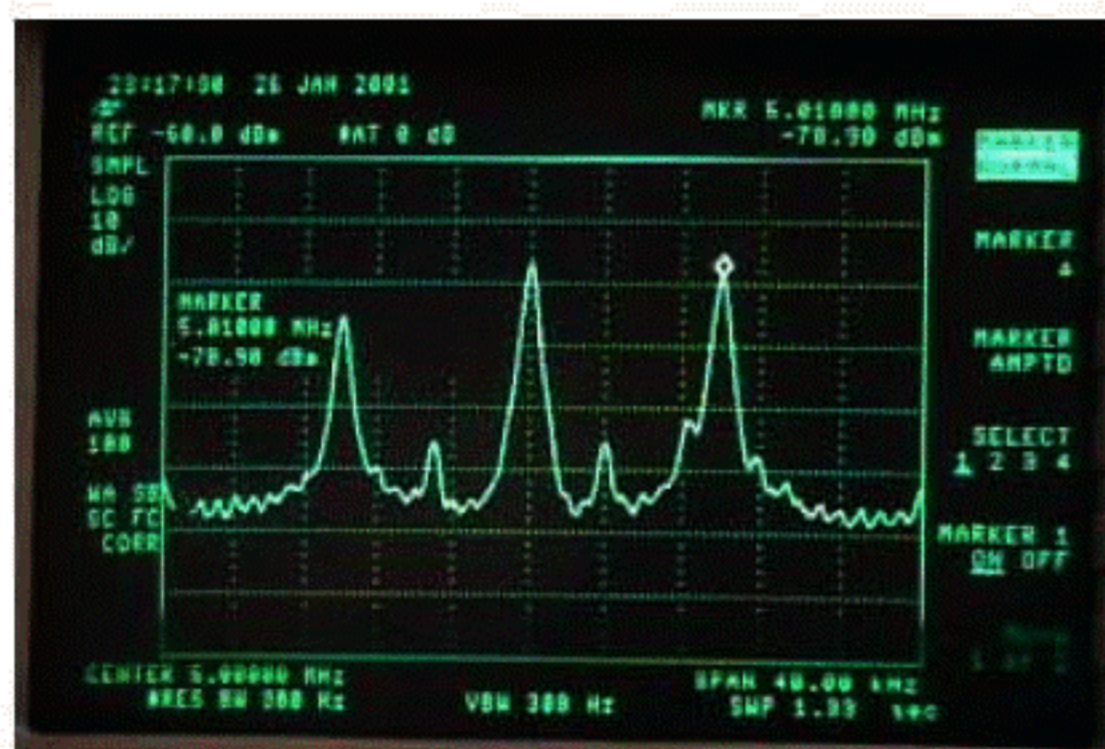
5MHz および 8MHz 付近のスペクトルを監視するため電気通信大学調布キャンパス内に、新たにスペクトル監視システムを設置した。このシステムは、地上高 30m の校舎屋上に設置したエコー通信機製標準電波 JJY 受信専

用のマルチバンドパッチカルアンテナ, 100m同軸ケーブル, アジレント社製スペクトラムアナライザ(8594E)および記録用デジタルカメラで構成した。この監視システムでの受信電力の電界強度への変換は, 理論的な値を用いた。監視システムおよび電界強度への変換方法については付録2に詳述した。

2) スペクトル監視システムの運用

本スペクトル監視システムを2001年1月25日から2月10日まで約2週間運用し, 候補周波数での電界強度変動記録及び近傍スペクトル状況の記録を行った。図3に監視システムで取得した典型的なスペクトルを示す。[a]は5,000kHzを中心に±20kHz範囲, [b]は8,000kHzを中心に±20kHz範囲のスペクトルを示している。この時点では, 短波標準電波JJY局が送信されていたため, 中央に強い信号が見える。

[a]では, 5,010kHzに送信波が存在するが, 5,006kHzはクリアであることが分かる。また, [b]では, 7,996kHzに送信波が存在し, 7,994kHzまでスペクトルが広がっているが, 8,006kHzはクリアであることが分かる。



[a] 5MHz帯候補周波数付近のスペクトル監視記録例 (5MHz±20kHz, Bw:300Hz) 2001/1/26 23:15-25JST



[b] 8MHz帯候補周波数付近のスペクトル監視記録例 (8MHz±20kHz, Bw:300Hz) 2001/1/26 23:15-25JST

図3. 候補周波数付近のスペクトル監視

自動記録システムを構築できず人間が制御して運用したため, 完全に連続記録を得ることが出来なかったが, 出来る限り地方時・曜日等が平均的となるように運用して, 長期間監視記録を得た。記録では, 1時間毎の代表値を取得した。

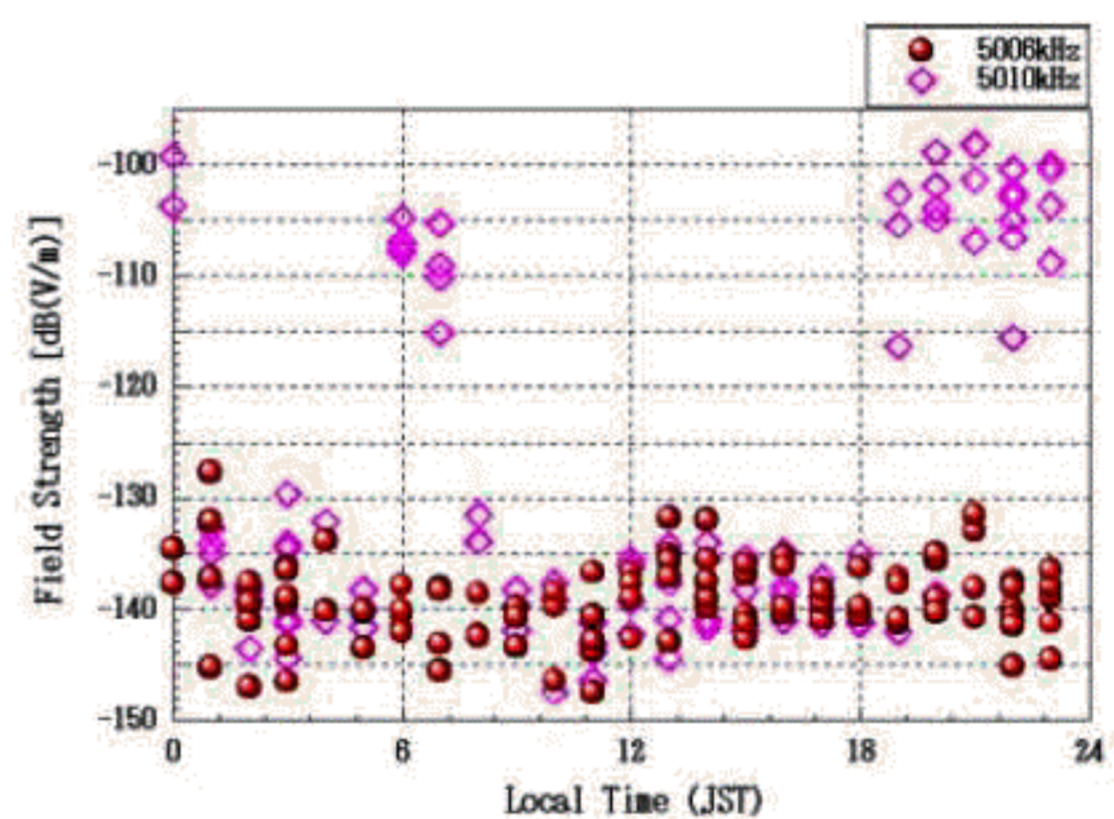
3) 候補周波数での電界強度変動監視記録

A. 5MHz帯の候補周波数での電界強度変化 (図4[a])

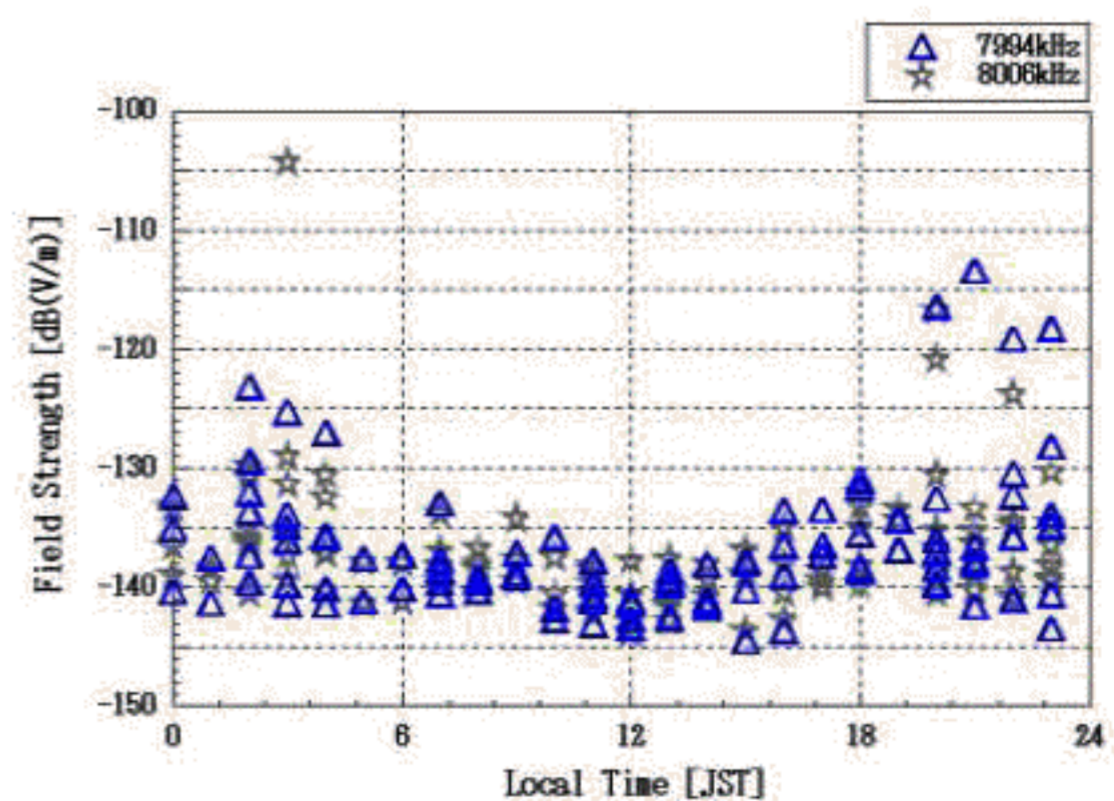
5,006kHz電界強度は, -130dB (V/m) {0.32μV/m}を越えたのは1回だけで, 定常的に背景雑音強度を示していた。

一方, 5,010kHz電界強度は, 19~24時JST (=UTC+9h) および06~07時JSTで-95~-110dB (V/m) {18~3μV/m}と, 背景雑音強度より30dB以上高くなったことから, この周波数で定常的に通信(放送)が行われていることがわかった。5,010kHzでは, 朝方に電界強度が急激に低下することから, F層反射による遠方からの伝搬であると推定できる。

以上の監視結果から, 5,006kHzの方が適当との報告を行った。



[a] 5MHz帯の2つの候補周波数での強度日変化



[b] 8MHz帯の2つの候補周波数での強度日変化

図4. HFD観測用信号送信候補周波数での電界強度変動監視記録, 2001/1/25-2001/2/11までの4つの候補周波数での電界強度モニター結果

B. 8MHz 帯の候補周波数での電界強度変化 (図4[b])  
7,994kHz 電界強度は、約2週間の監視期間で1回(1月25日~26日)だけであるが、20~23時JSTに-115~-120dB (V/m) {1.8~1 $\mu$ V/m}, 02~05時JSTに-123~-127dB (V/m) {0.7~0.4 $\mu$ V/m}上昇していた。背景雑音強度に比べると前者は約15dB, 後者は約5dBと僅かであった。

一方、8,006kHz 電界強度は、2001/2/10の03時JSTに-105dB (V/m) {6 $\mu$ V/m}まで上昇し、また、2001/1/26及び27の20, 22時JSTに-115~-125dB (V/m) {2~0.6 $\mu$ V/m}まで上昇した。背景雑音に比べると、それぞれ25dB, 約10dBの上昇に当たる。

昼間は、両周波数とも全くこの様な上昇は見られなかった。

以上の監視結果から、8,006kHzの方が適当と報告した。

### 3.2 送信システム構築と動作試験

第2章のシステム設計に基づき、図5に示す送信システムを構築した。基準発振器として安定度  $5 \times 10^{-11}$  /dayを有するEFRATOM社製ルビジウム発振器(LPRO)を使用することにより、表3の最も周波数変動率の小さい  $10^{-8}$ 程度のE層電離層擾乱を明確に検出できる安定度を確保した。

この基準発振器から100kHzを2台の八重洲無線(現パーテックススタンダード)社製トランシーバ(FT840)に供給し、FT840内の各局部発振器の発振周波数を同期した。2台の内、1台を5,006kHz送信用に、もう一台を8,006kHz送信用に固定して使用することとした。この2つの周波数信号を発生される同期発振器は、元のFT840には内蔵されていなかったため、同社に改造を依頼した。

送信電波形式として、符号による片側波帯振幅変調(H2A)を採用するため、FT840内のSSB変調器の設定をキャリア残留状態に設定した。また、送信局ID信号は、シングルトーンモールス符号信号をメモリキーヤに記録し、これを一定時間毎に再生させ、FT840でH2A信号を発生している。

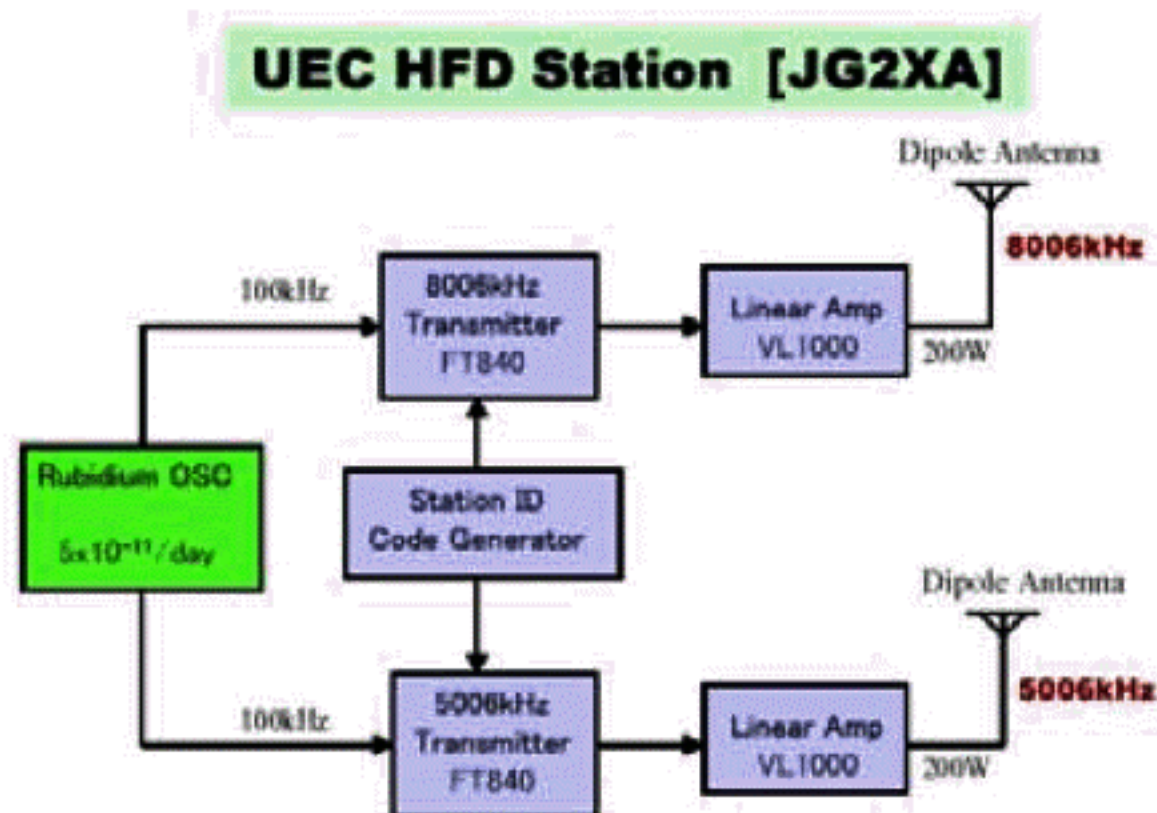


図5. HFD送信システムのブロックダイアグラム

トランシーバFT840の送信最大出力は20Wであるので、予定出力200Wには電力増幅器が必要となる。この電力増幅器には、キャリア連続送信にも耐え、かつトランシーバと協調運転性能を持つパーテックススタンダード社製リニアアンプ(VL-1000)を採用した。ただし、この電力増幅器の長期連続運転は保証されていたかったため、独自に試験を行うこととした。この試験結果は、3.2節に述べる。

図6に実際に構築した送信システムの写真を示す。写真の左から5,006kHz送信系統、8,006kHz送信系統、ルビジウム発振器である。電源にはシステムの安定度を考慮して、トランシーバ(FT840)およびEFRATOM社製ルビジウム発振器(LPRO)の100VACを、またリニアアンプ(VL-1000)には200VACを使用する。これらの送信装置は、安全と隔離のため、金網シールド室内に設置している。



図6. 送信システム外観、左から5,006kHz送信系統、8,006kHz送信系統、ルビジウム発振器

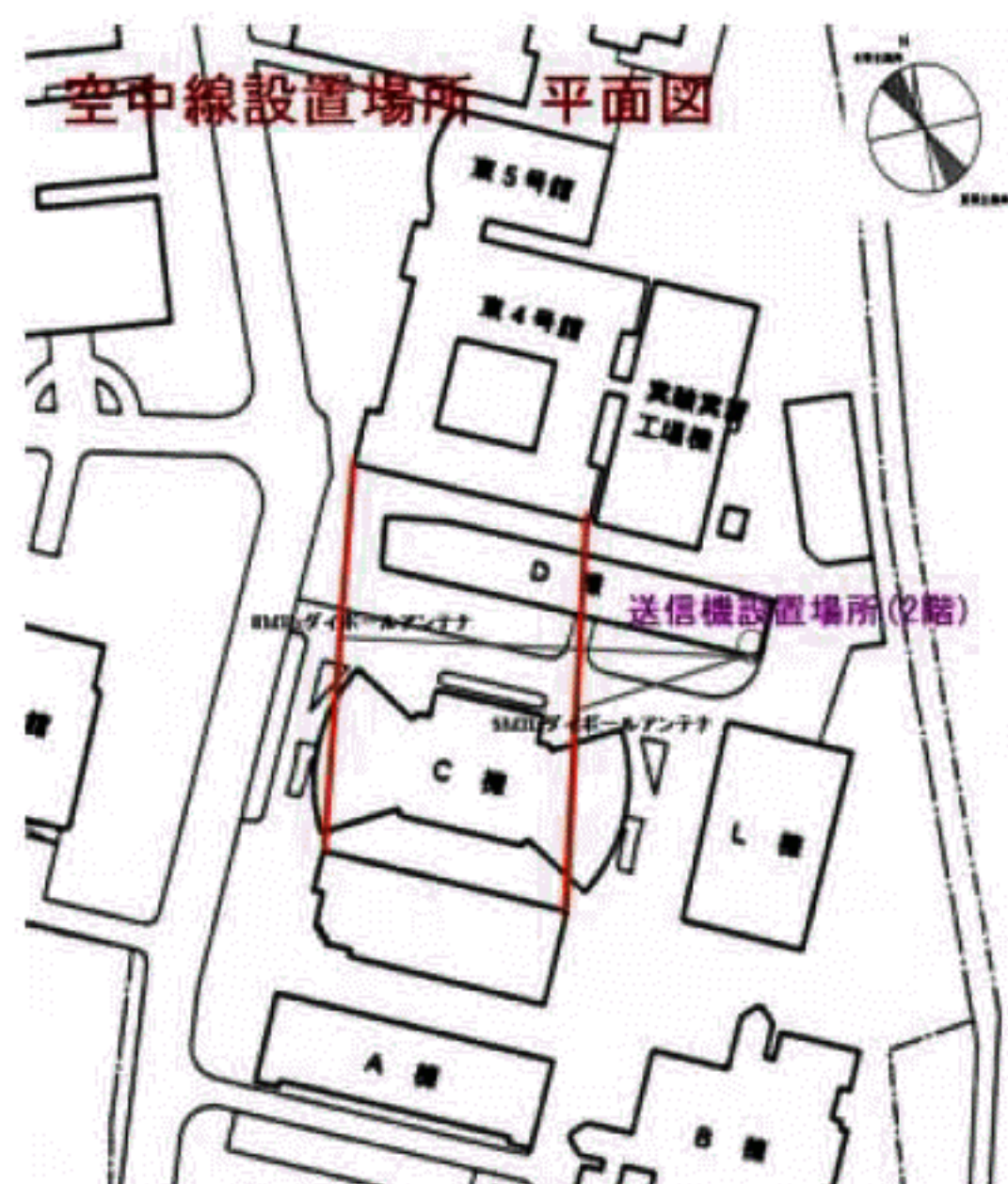


図7. HFD観測電波送信用アンテナ設置位置

付録1の送信電力見積で、送信アンテナには南東から南西方向のダイポールアンテナを想定している。しかしながら、調布キャンパス内に5,006kHzと8,006kHzの両方を同じ方向に展張できる場所を確保できなかったため、やむなく図7に示すように、ほぼ南北方向に並行して設置した。この方向の違いによる信号強度低下は、付録図1(a)から北方向1,000kmの距離において6dBに達し、高減衰時の安定受信余裕がなくなることが想定される。将来的には、当初予定方向にアンテナ設置可能な場所を確保する必要がある。

### 3.3 動作試験

#### A. 送信周波数安定度とスペクトル純度測定

2.3節で述べたように、送信信号のスペクトル線幅は、ドップラ変動分解能0.01Hzに比べて十分小さいことが必要である。この条件を満たすことを確かめるため、ルビジウム原子発振器出力に同期した八重洲無線製トランシーバ(FT840)の出力をダミーロードにつなぎ、5,006kHzを送信する。

このダミーロードからピックアップで信号を取り出し、別のルビジウム原子発振器を基準にして5HzオフセットしたHFD受信機で受信する。この出力信号のスペクトルを、アジレント社製ダイナミックシグナルアナライザ(35670A)で解析した。

送受信に別のルビジウム原子発振器を使って計測した長時間高分解スペクトルを図8に示す。このスペクトルは、中心周波数を5Hzとし、解析周波数範囲を4.953125~5.05078125Hzとしている。スペクトルの中心位置から送信信号の周波数が送受信で一致していることが分かった。また、この画面の周波数軸一目盛りは、0.01Hzに当たるので、スペクトル線幅が0.001Hz以下であることも確認できた。データ長は10,000秒であるので、スペクトル線幅が0.001Hz以下ということは、周波数安定度が $2 \times 10^{-10}$ /day以上であることも保証できる。これ以上のスペクトル純度は、測定器(35670A)内の周波数安定度の問題から、測定できなかった。



図8. 2台のルビジウム原子発振器を送信側と受信側のそれぞれを使って計測した長時間高分解スペクトル：  
4.953125-5.05078125 Hz (1目盛り0.01Hz)

#### B. 電力増幅器安定度試験

送信機出力200Wを考えた場合、その電力増幅器全体の消費電力が500W程度になる。この差電力は、熱として連続して放出されるため、送信機全体の発熱が大きなものとなる。このため、当初試験に供したリニアアンプでは、長時間運転が不可能であることが判明し、より大きな許容最大電力(SSB変調信号に対する許容尖頭電力=1kW)を有するパーテックススタンダード社製リニアアンプ(VL-1000)を採用した。しかしながら、このリニアアンプは、SSBの断続送信を目的として設計されたものであるため、長期間連続送信試験が行われていなかった。この点を確認するため、八重洲無線社製トランシーバ(FT840)の10Wの送信信号出力を200Wに増幅し、クラニシ製ダミーロード(RL-1200D)に接続した状態で、連続運転試験を行った。この試験では、ダミーロードの発熱も問題になり、冷却を施した。試験は2001年1月より開始し、3月までの2ヶ月に渡って継続し、問題が発生しないことを確認した。

### 3.4 運用免許取得と運用

送信電力200Wの実験局を申請するに当たっては、無線従事者免許を必要とする。本実験局では、有澤技官が担当した。HFD観測用送信局周波数として、3.1節で説明した候補周波数の監視結果より、当該周波数が使用されていないことを確認の上、5,006kHzおよび8,006kHz割当てを申請したが、通常の実験局業務周波数とは異なるため、郵政省(現総務省)中央の所管事項となり、その理由および電力的な根拠など多様な事項についての説明資料を提出した。さらに、これらの審査が2001年4月1日の郵政省から総務省への移行時期にあたったため、2001年3月末にJJYが停止されても、返答がない状態が続いた。ようやく予備免許が下りたのは、6月15日と3ヶ月近く遅れた。この後、試験電波を出して、菅平宇宙電波観測所で受信して、実際に送受信できることを確認した後、7月3日に落成検査を受け、実験局JG2XAの本免許を受け取った。

送信機の整備とJG2XAコールサインを定時に送信する装置を付加して、7月4日から連続運用を開始した。この信号は、各HFD受信局で受信されたとの報告があった。さらに、短波受信愛好家からの報告で、日本国内だけでなく、遠くヨーロッパやインドからも受信されたとの報告が届いた。

HFD観測用実験局JG2XAの機器は、連続運用を前提としないアマチュア無線仕様であったため、約2ヶ月で冷却ファンの故障が発生し、その修理で停波した。また、学内の極微弱な信号を測定するシステムへの干渉が発生したため、測定中の運用を休止するなど、長期的な運用上の問題がまだ残っている。



#### 4. まとめ

電離層擾乱の観測には多様な方法が用いられているが、長期連続した観測としては、電波観測が主として用いられている。これは、電波観測の安定度および感度の高いことがその理由である。しかしながら、電波観測装置が大型となる場合は、空間的、時間的擾乱の様相を全て連続的に観測できないことから、多様な観測システムを各機関で運用して、総合的に電離層擾乱を調べることが行われてきた。

電気通信大学菅平宇宙電波観測所では、永年に渡ってこの電波観測の一技法である短波ドップラ（HFD）観測を担当してきたが、その基準となる標準電波局が廃局となることが決まり、観測継続が困難になった。この点を克服し、さらに、従来にない特色を付け加えた新しい短波送信局の開発を行ってきた。この新型のHFD送信システムの周波数安定度、送信周波数割り当て、送信電力見積、電波形式について、その開発の詳細を述べた。さらに、この送信システムについて、免許申請から実運用に至るまでの経過を纏めた。

HFD 観測用送信局 JG2XA は、2001 年 7 月 3 日に本免許を受け、連続送信を開始した。現在まで継続して送信を行い、国内各機関の HFD 観測に寄与している。

HFD 受信および解析システムの開発については、稿を改めて報告する。

#### 謝辞

小川徹京都大学名誉教授には、本研究プロジェクト開始以来の多大な協力感謝する。田中正智元教授には、実験局免許申請への協力感謝する。本研究プロジェクトは、平成 13 年度電気通信大学研究教育活性化支援経費の支援を受けた。

#### 参考文献

- [1] Davies, Kenneth: *Ionospheric Radio Waves*, Blaisdel, 1969.
- [2] Kelley, Michael C., and Heelis, Rodney A.: *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, Academic Press, 1989.
- [3] 近江文好: HF ドップラ法による TID の多点観測, 電気通信大学修士論文 (昭和 51 年度), 1977.
- [4] 例えば, 短波ドップラ (HFD) プロジェクトホームページの HFD ニュース:  
[http://ssro.ee.uec.ac.jp/lab\\_tomi/HFD/HFD-reference/hfd-news.html](http://ssro.ee.uec.ac.jp/lab_tomi/HFD/HFD-reference/hfd-news.html)
- [5] 独立行政法人通信総合研究所日本標準時グループホームページ: <http://jjy.crl.go.jp/>
- [6] Davies, Kenneth: *Ionospheric Radio*, IEE, 1990.
- [7] 石島巖: 短波フェージング現象とその防止策, *電子情報通信学会論文誌*, J74-B-II, no.4, 131-143, 1991.
- [8] 前田憲一・木村磐根: *現代電磁波動論*, オーム社, 1984.
- [9] Kraus, J.D.: *Antennas*, McGraw-Hill, 1950.
- [10] Skomal, Edward N.: *Man-Made Radio Noise*, Van Nostrand Reinhold, 1978.
- [11] Ogawa, Toru: personal communication, 2000.

付録1. 安定受信条件を満たすための送信電力見積

短波電離層擾乱観測用送信局の送信電力見積を以下のように行った。

まず, (1)式を用いて地表付近設置ダイポール放射指向性係数[9]を求める。

$$E_d = [\cos\{(\pi/2) \cos \theta \cos \alpha\} / \sqrt{(1 - \cos^2 \theta \cos^2 \alpha)}] \sin(hr \sin \alpha) \quad (1)$$

ただし,  $\theta$ : 方位角[deg],  $\alpha$ : 打上角[deg],  $h$ : アンテナ高[m],  $hr = 2\pi h/\lambda$  である。このモデル計算ではアンテナ高さ  $h=10\text{m}$  として計算している。

次に, 式(2)を用いて, 電離層反射波打上角  $\alpha$  [6]を計算する。

$$\alpha = \tan^{-1}[\cot(d/2a) - a \operatorname{cosec}(d/2a) / (a+v)] \quad (2)$$

ただし,  $v$ : 電離層反射高[km],  $a$ : 地球半径 6378km である。

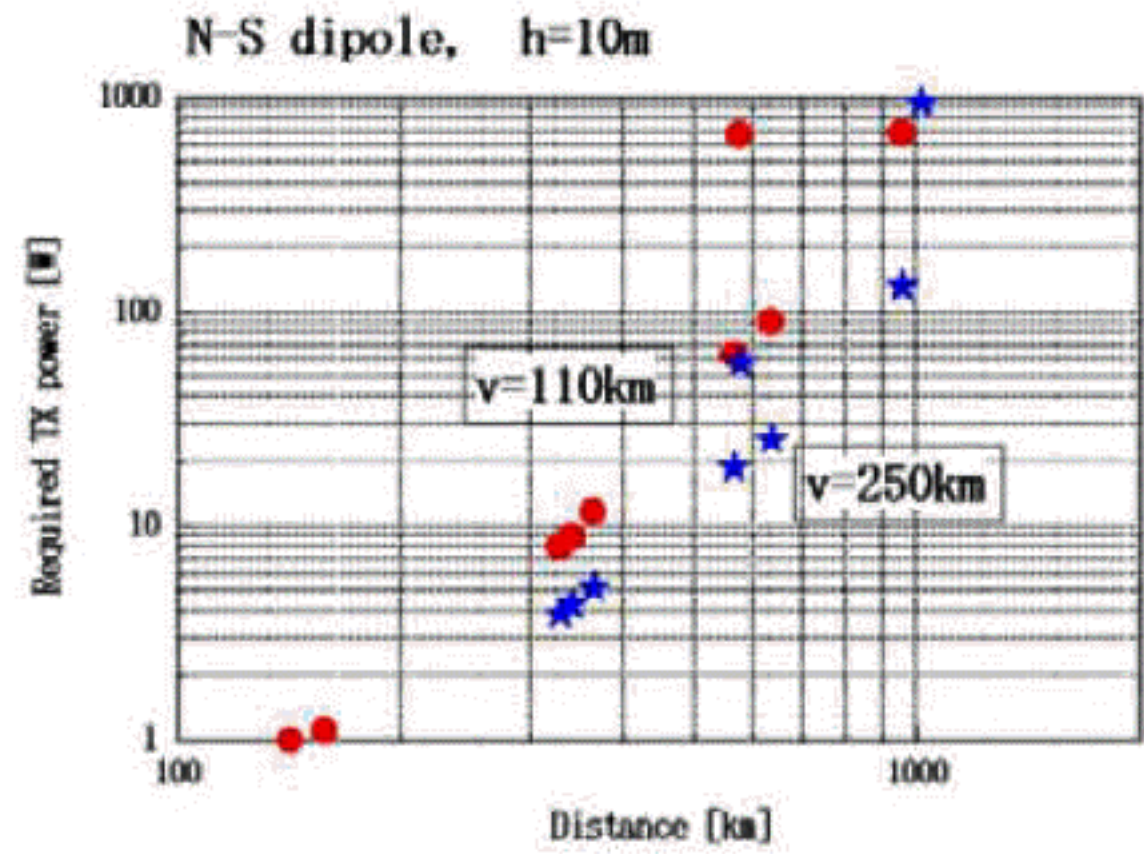
これらの値を, 式(3)に代入して, 半波長ダイポール指向方向放射電界強度[8]を計算する。

$$E(\theta, \alpha, r, hr) = 2.2 \times 10^5 (P^{1/2}/d) E_d \Gamma_1 \Gamma_2 \quad [\mu\text{V/m}] \quad (3)$$

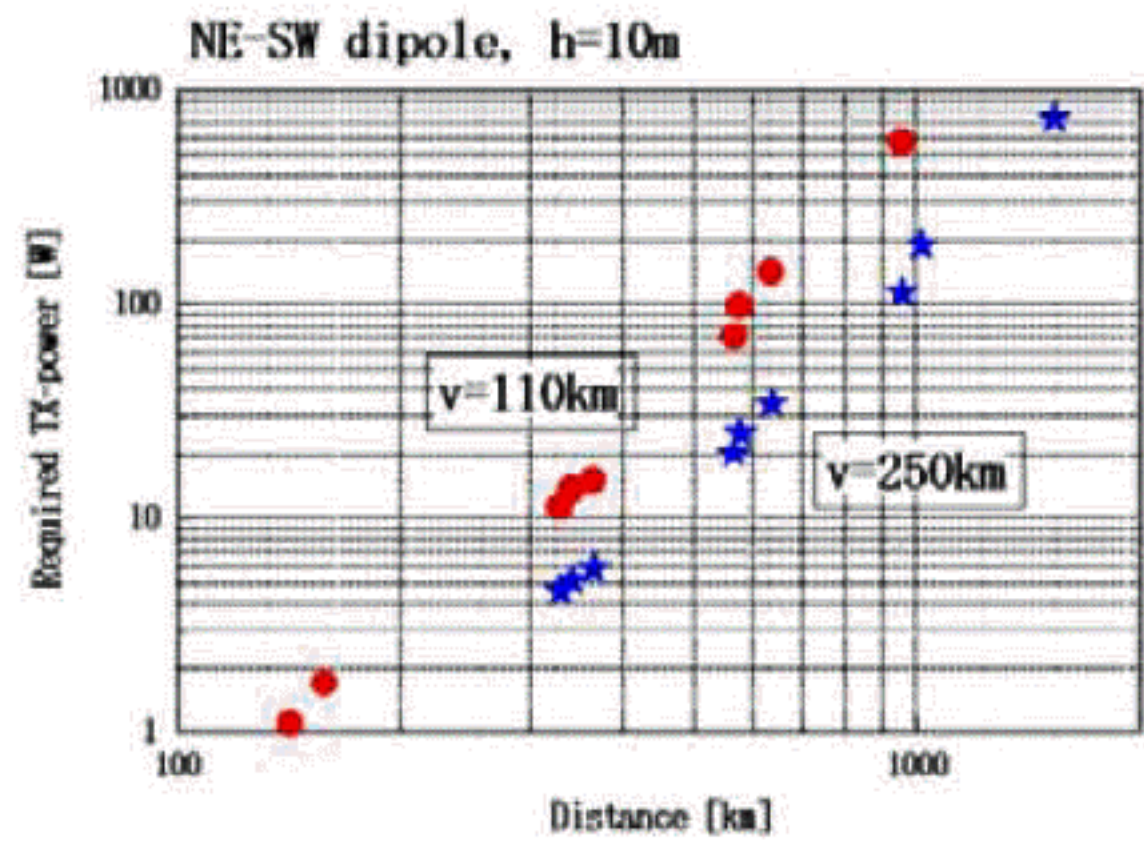
ただし,  $P$ : 送信電力[W],  $d$ : 送受信点間の距離[km] とする。また, 透過減衰率  $\Gamma_1$  は, 参考文献[8]の図 7.7 より, 反射減衰率  $\Gamma_2$  は, 参考文献[8]の図 7.8 を参照して求めた。ここで, 夏季昼間,  $f_oE = 4.2\text{MHz}$ ,  $f_oF2 = 10.3\text{MHz}$  としている。

付録表1. 安定受信 (S/N=10 dB) に必要な電界強度

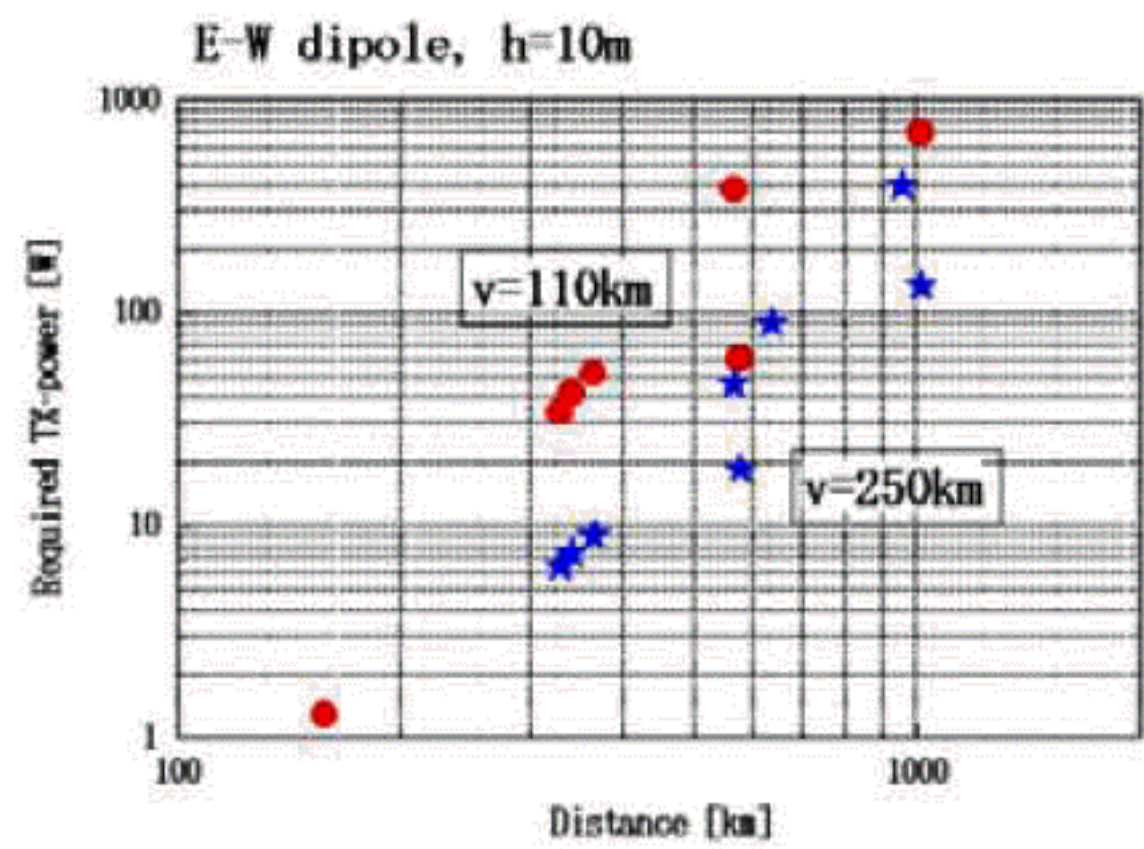
受信条件	安定受信条件	単一トレース時 (反射点が単一の場合) (モデル計算での仮定)
背景雑音強度	夏季夜間 背景雑音強度 [10]	受信機入力換算雑音電圧 $e_n = 3 \mu\text{V}$ ( $f = 5\text{MHz}$ , $B_w = 10\text{Hz}$ , 半波長ダイポール)
受信機 AGC 動作範囲	アンテナ端子 入力電圧 $1 \mu\text{V}$ 以上 [3]	S/N=10dB 時アンテナ端子 入力信号電圧 (単一トレース時) $V_{in} (S/N=10\text{dB}) = 10 \mu\text{V}$
アンテナ端子 入力電圧	$V_{in} = E_{\text{heff}} / 2$ [V] $= 9.5E$ [V] ( $\text{heff} = 60/3.14$ $= 19\text{m at } 5\text{MHz}$ )	$V_{in} = 10 \mu\text{V}$ とした場合 $\Rightarrow E = 1 \mu\text{V/m}$



[a] 南北方向



[b] 北東-南西方向



[c] 東西方向

付録図1. 受信点における電界強度を  $1 \mu\text{V/m}$  とする送信電力:  
●E層反射 (110km), ★F層反射 (250km)

付録表 2. モデル計算条件

送信局	電気通信大学調布キャンパス内
最低受信電界強度	1 $\mu$ V/m
送信周波数	5MHz
アンテナ	半波長ダイポール、屋上から 10m 高
電離層反射高度	E層反射：110km, F層反射：250km
電離層減衰 $\Gamma$	30dB

付録表 3. 受信電界強度を 1  $\mu$ V/m 以上と考えた場合の必要送信電力 (付録図 1 参照)

送信アンテナ方向	受信点における電界強度を 1 $\mu$ V/m とする ●E層反射 (110km), ★F層反射 (250km)
南-北方向	●北方向観測点での必要送信電力は 1kW 以上 ★北方向観測点での必要送信電力は 1kW
北東-南西方向	●全ての観測点での必要送信電力は 500W ★全ての観測点での必要送信電力は 200W
東-西方向	●西方向観測点での必要送信電力は 1kW 以上 ★西方向観測点での必要送信電力は 400W

付録表 4. アンテナおよび必要送信電力検討結果

検討パラメータ	結論	前提条件
送信アンテナ方向	北東-南西方向	・半波長ダイポール ・アンテナ高 10m
必要送信電力	200W	・5 MHz ・近距離 1hop-E ・遠距離 1hop-F ・1,000km 範囲観測点 ・フェーディングマージンなし

## 付録 2. HFD 観測用信号送信候補周波数付近のスペクトル監視システム

- 受信用トラップバーチカルアンテナ仕様  
エコー計測器製 5MHz, 8MHz, 10MHz  
電気通信大学西 2 号館屋上 (地上高約 30m)
- 使用同軸ケーブル  
RG-58A/U 50  $\Omega$  100m  
減衰量 2.00dB @ 5MHz, 2.58dB @ 8MHz
- スペクトルモニタ用スペクトラムアナライザ設定  
Agilent Technology 製 8594E  
Span=40kHz, BW=300Hz, Average=100
- 5MHz 帯での受信電力から電界強度への変換方法  
受信電力  $Pr$  [dB] =  $Prx$  [dB] -  $L_{feed}$  [dB]  
 $Pr$  [dB] =  $Prx$  (5MHz) [dBm] - 30 [dB] + 2.00 [dB]  
=  $Prx$  (5MHz) [dBm] - 28 [dB]

一方,  $P_{ant} = (h_e \cdot E)^2 / R_{ant}$  であるので, 測定信号強度  $P_{ant}$  [dB] を次式により電界強度  $E$  [dB(V/m)] に変換する。

$$\begin{aligned} P_{ant} [\text{dB}] &= 20 \log_{10}(h_e) - 10 \log_{10}(R_{ant}) + 20 \log_{10}(E) \\ &= 15.6 [\text{dB}] - 18.5 [\text{dB}] + 20 \log_{10}(E) [\text{dB(V/m)}] \\ &= -2.9 [\text{dB}] + 20 \log_{10}(E) [\text{dB(V/m)}] \end{aligned}$$

ただし, アンテナ実効長  $h_e = 6\text{m}(5\text{MHz}) \rightarrow 15.6\text{dB}$ , アンテナ入力インピーダンス  $R_{ant} = 52 \Omega$  とする。

$P_{ant}$  [dB] =  $Pr$  [dB] であるから, 最終的に次式を用いて受信強度  $Prx$  [dBm] を電界強度  $E$  [dB(V/m)] に変換する。

$$\begin{aligned} 20 \log_{10}(E) [\text{dB(V/m)}] - 2.9 [\text{dB}] &= Prx(5\text{MHz}) [\text{dBm}] - 28 [\text{dB}] \\ 20 \log_{10}(E) [\text{dB(V/m)}] &= Prx(5\text{MHz}) [\text{dBm}] - 25.1 \end{aligned}$$

例:  $Prx = -100\text{dBm} \Rightarrow -125.1\text{dB(V/m)} \Rightarrow 0.56 \mu\text{V/m}$

$$Prx = -80\text{dBm} \Rightarrow -105.1\text{dB(V/m)} \Rightarrow 5.6 \mu\text{V/m}$$

- 8MHz 帯での受信電力から電界強度への変換方法

$$\text{受信電力 } Pr [\text{dB}] = Prx [\text{dB}] - L_{feed} [\text{dB}]$$

$$\begin{aligned} Pr [\text{dB}] &= Prx(5\text{MHz}) [\text{dBm}] - 30 [\text{dB}] + 2.58 [\text{dB}] \\ &= Prx(5\text{MHz}) [\text{dBm}] - 27.42 [\text{dB}] \end{aligned}$$

一方,  $P_{ant} = (h_e \cdot E)^2 / R_{ant}$  であるので, 測定信号強度  $P_{ant}$  [dB] を次式により電界強度  $E$  [dB(V/m)] に変換する。

$$\begin{aligned} P_{ant} [\text{dB}] &= 20 \log_{10}(h_e) - 10 \log_{10}(R_{ant}) + 20 \log_{10}(E) \\ &= 14.0 [\text{dB}] - 18.5 [\text{dB}] + 20 \log_{10}(E) [\text{dB(V/m)}] \\ &= -4.5 [\text{dB}] + 20 \log_{10}(E) [\text{dB(V/m)}] \end{aligned}$$

ただし, アンテナ実効長  $h_e = 5\text{m}(8\text{MHz}) \rightarrow 14.0\text{dB}$ , アンテナ入力インピーダンス  $R_{ant} = 52 \Omega$  とする。

$P_{ant}$  [dB] =  $Pr$  [dB] であるから, 最終的に次式を用いて受信強度  $Prx$  [dBm] を電界強度  $E$  [dB(V/m)] に変換する。

$$\begin{aligned} 20 \log_{10}(E) [\text{dB(V/m)}] - 4.5 [\text{dB}] &= Prx(5\text{MHz}) [\text{dBm}] - 27.42 [\text{dB}] \\ 20 \log_{10}(E) [\text{dB(V/m)}] &= Prx(5\text{MHz}) [\text{dBm}] - 22.92 \end{aligned}$$

例:  $Prx = -100\text{dBm} \Rightarrow -122.92\text{dB(V/m)} \Rightarrow 0.71 \mu\text{V/m}$

$$Prx = -80\text{dBm} \Rightarrow -102.92\text{dB(V/m)} \Rightarrow 7.1 \mu\text{V/m}$$