

3. 短波標準電波 (JJY) による供給

田中 正利* 菊池 誠紀* 本間 重久*

1. ま え が き

短波標準電波 JJY は電離層伝搬による信号の遠達性を利用して、標準周波数と時刻を供給している。

経済的な受信機と受信技術の簡易さにより専門家から一般受信者までの幅広い利用者層があり、東南アジア諸国及び西太平洋海域でも広く利用されている。また、常時一定精度、一定電力及び一定形式で送信しているので、電波伝搬や地球物理の研究にも活用されている。

反面、受信精度は伝搬路の変動から、時刻で ± 1 ms、周波数で 10^{-7} ~ 10^{-8} 程度となり、これに加え、同一周波数による外国標準周波数局の送信があるため、相互干渉を生じ、利用に種々の問題点もある。

本節では、短波標準電波 JJY の開局当時から現在に至るまでの経緯と伝搬特性、受信利用精度及び相互干渉について述べる。

2. 発射スケジュールと諸元

2.1 標準電波 (JJY) の変遷

短波標準電波 (JJY) は、発射開始以来 40 余年を経過し、その発射形式は精度向上とともに幾多の変遷を経てきたが、現在までの経過を簡単に述べる。

昭和初期になって無線通信回線が増えるに従って混信が問題になり、無線局の周波数規正のため標準電波の発射が必要となり、通信省が昭和 15 年 1 月 30 日から岩槻受信所に設置された周波数標準器 (水晶発振器) を使用して、検見川送信所から発射したのが正式発射の始まりであり、アメリカ (WWV, 1933) に次いで世界で 2 番目であった。発射周波数は 4, 7, 9, 13 MHz の 4 波、周波数精度は 1×10^{-6} であった。その後施設の整備計画により、昭和 19 年 6 月から岩槻受信所の標準器を幕張に移すとともに、発射周波数を 4, 8, 12, 16 MHz に変更し、周波数精度は 3×10^{-7} となった。

標準電波による報時は、昭和 23 年 8 月から東京天文台からの有線制御によって始められた。この秒信号は 100 ミリ秒幅のパルスで、秒報時の精度は 0.03 秒であった。当時は周波数の絶対値を決めるのに天文時との比較を必要としたため、東京天文台に近い小金井に標準装置と送信所を新設し、昭和 24 年 12 月からこの施設によ

り発射した。発射周波数は 4, 8 MHz の 2 波、周波数精度は 1×10^{-7} で、このときから電波警報を乗せるようになった。次いで報時信号は標準周波数と位相を同期させるため、昭和 26 年 1 月から東京天文台の振り時計から小金井の水晶時計に切り替え、その信号形式も搬送波を切断する形に変更した。また、このときから 10 分ごとに時刻をモールス符号で乗せた。

標準電波の国際周波数として 1947 年 アトランチックシチーの国際無線通信会議で 5 MHz シリーズが割り当てられていたが、我が国でも昭和 26 年から試験発射を始め、昭和 29 年 1 月から正式に 2.5, 5, 10 MHz の 3 波を発射した。また、音声による時刻アナウンスもこのときから始め、周波数精度は 2×10^{-8} 、秒報時の精度は 0.01 秒となった。その後 4 MHz は昭和 32 年 11 月かぎりまで発射を停止し、15 MHz を昭和 32 年 1 月から追加発射して、5 MHz シリーズに移行を完了し、8 MHz は昭和 33 年 1 月から実験局 (JG2AE) として運用することにした。

続いて報時信号も CCIR で勧告された報時形式に移行する準備に入り、昭和 39 年 6 月には報時信号の形式を切断式から現在の重畳方式に変更し、周波数精度も 5×10^{-10} に向上した。

一方、原子周波数標準器の研究開発が進み、昭和 36 年 9 月から標準電波の偏差決定に原子周波数標準を採用し、また、1 ミリ秒以内の国際時刻同期に参加した。この原子周波数標準の採用に伴い、報時信号を UT 2 の変動に対応させるため標準周波数のオフセットが導入された。

しかしオフセット方式は、定義どおりの正しい周波数が発射されず、しかもその値が年ごとに変わるという不合理性が問題とされ、昭和 47 年 1 月 1 日からオフセットを廃止し、秒の定義に対応した値とし、世界時補正值の通報と、うるう秒調整を実施する新しい協定世界時 (UTC) が採用されることになった。周波数精度も Rb 原子周波数標準器の採用により 1×10^{-10} となった。その後サービス改善を図るため、昭和 50 年 6 月から 8 MHz を再び標準周波数局 (JJY) に変更した。

昭和 40 年代になって送信所周辺の宅地化が進み電波障害が問題となり、小金井での送信業務の維持は困難となったので、昭和 52 年 12 月 1 日から一部発射スケジュー

*周波数標準部 標準電波課

ールを変更し、本所からの遠隔制御により日本電信電話公社名崎無線送信所より発射することとなった。このころより Cs 原子時計が発射原器として採用され、周波数精度は 1×10^{-11} となり現在に至っている。

2.2 発射スケジュールと諸元

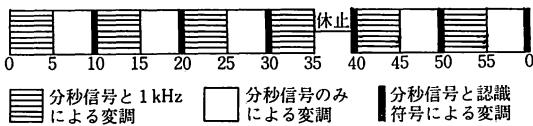
現行の発射スケジュールと諸元は、昭和52年12月に小改正されたもので、以下のとおりである。

全波24時間発射されているが、1時間中の発射スケジュールを第1図に示す。毎時0、10、20、30、40、50分から各5分間の1kHzによる連続変調と、10分ごとの時刻アナウンスにより、5分ごとの時刻判断を可能としている。毎時35分から39分までの休止時間は外国標準電波受信比較を考慮したものである。1kHz変調時及び無変調時いずれも秒信号の変調は行われている。

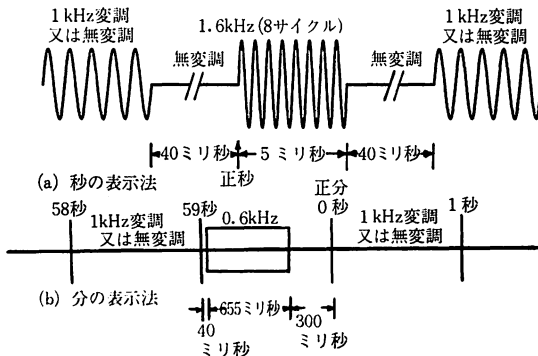
第2図(a)に秒信号の形式を示す。秒信号は1.6kHzの8サイクル、幅5ミリ秒間の変調で、変調の始まりが正秒の時刻を示している。1kHz変調時間中は秒信号の前後を40ミリ秒間だけ無変調としている。この形式は秒信号の受信を容易にし、また、国際間における報時信号の比較の際、変調波が妨害を与えないように考慮したもので、報時信号と低周波の利用者を同時に満足させるようにしたものである。

第2図(b)に分(予告)信号の形式を示す。毎分59秒から0秒の間に、0.6kHzの幅655ミリ秒間の変調で分予告をし、次の秒信号の始まりが正分の時刻を示している。秒信号の1.6kHz振幅は1kHz及び0.6kHzより2dB高くし、識別しやすくしている。

毎時9、19、29、39、49、59分から各1分間に、次



第1図 1時間中の発射スケジュール



第2図 分秒信号の形式

の順序で認識符号を通報している。

- (1) 呼出符号 (JJY)
 - 2回 モールス (1 kHz 変調) 符号により
- (2) 時刻符号 (24時刻)
 - 1回 モールス (1 kHz 変調) 符号により
- (3) 呼出符号 (JJY)
 - 2回 音声により
- (4) 日本語で示す時刻
 - 1回 音声により (24時制)
- (5) 電波警報符号
 - 5回 モールス (1 kHz 変調) 符号により

電波警報符号は電離層の状態を通報するもので、それぞれ次のように意味している。

N: 12時間以内に電波伝搬上の異常現象の発生が予想されず、現に電波の伝搬状態が安定しているとき。

U: 12時間以内に電波伝搬上の異常現象の発生が予想されるが、その確実性が少ないとき。

W: 12時間以内に電波伝搬上の異常現象の発生が予想される時。又は現に異常現象が発生しているとき。

世界時補正值信号 (DUT1) は、地球自転時 (UT1) から協定世界時 (UTC) を差し引いた値を0.1秒の単位で知らせるもので、標準電波の秒時刻にこの値を加えることにより UT1 を知ることができる。

この信号は第3図に示すように、秒信号の幅を45ミリ秒に広げたもので、挿入回数が0.1秒の倍数を表し1秒から始まる時はプラス、9秒から始まる時はマイナスを表す。UTCとUT1との差を原則として0.9秒以内にとどめるため、必要に応じて月の1日の0時 (UTC) の直前に、世界一斉に1秒のステップ調整を行うことがある。これをうるう秒調整と称している。

1秒遅らせる場合は、59秒の次に60秒が余分に挿入されこれを正のうるう秒と呼ぶ。1秒進ませる場合は、59秒が消失して58秒の次に0秒がくる。この消失した59秒を負のうるう秒と呼んでいる。

うるう秒調整は、1月及び7月が第一優先で、4月及び10月が第二優先となっている。調整する場合は約1か月前に公表される。

諸元は第1表に示すとおりである。



第3図 世界時補正值 (DUT1) の表示法

第1表 標準周波数局諸元

呼出符号	JJY
送信所	名崎無線送信所(茨城県猿島郡三和町)
送信所の位置	東経 139°51' 北緯 36°11'
計測及び制御	郵政省電波研究所(小金井市貫井北町)
運用時間	常時
休止時間	毎時35分から39分まで
電波の型式	AXW
搬送波	2.5 MHz, 5 MHz, 8 MHz, 10 MHz, 15 MHz
変調波	1 Hz, 1 kHz
空中線電力	2 kW
周波数と時間間隔の精度	1×10^{-11}
秒信号の国際同期	協定世界時(UTC)に対し0.1 ms 以内

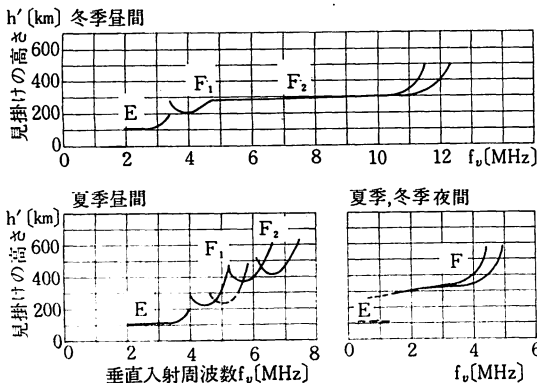
3. 伝搬特性

3.1 伝搬モードと電界強度

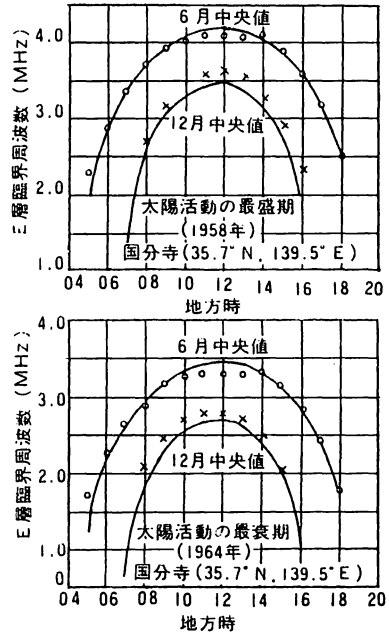
短波は送信アンテナ近傍を除けば、ほとんどの場合、電離層反射によって伝搬する。電離層には規則的な日周変化と季節変化とがあり、第4図に示した範囲で大略変化し、一般的には次のようになる。

(1) E層の臨界周波数は第5図に示されるように正午に最大となり、夏で約4 MHz、冬で約3 MHz、日没後はいずれも1 MHz 前後となる。

(2) E層の反射層高 h' は臨界周波数の近く及び日



第4図 代表的な $h'-f$ 曲線の例



第5図 E層臨界周波数の日変化

出、日没時を除いて、年間を通じ終日 100~110 kmの範囲にある。

(3) F層の変化はE層のように簡単ではなく、日出前後には反射層高 h' の低い F_1 層と高い F_2 層とに分かれる。

F_1 層の臨界周波数は増大して正午に最大となり、減少して日没前後に F_2 層と合一する。 F_1 、 F_2 層の分離は冬よりも主として夏の昼間に多く認められる。夜間の h' は昼間のそれよりも 100~200 km 高くなり、かつ不安定である。

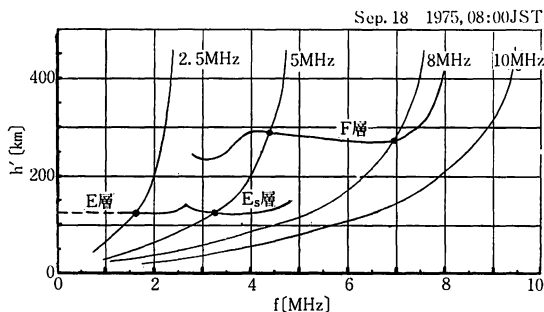
第4図は電離層へ垂直に入射する電波の周波数とそれが1回反射した見掛けの高さ h' との関係を示す代表的な例である。実際の受信電波は電離層に斜めに入射するため、これと同じ高さで反射する垂直入射周波数は受信周波数よりも低くなる。

受信周波数 f と送受信点間の大円距離 D をパラメータとして、 h' とこれに対応する垂直入射周波数 f_o との関係は次式で与えられる。

$$f_o = f / \sqrt{1 + (D/2Nh')^2} \quad \dots\dots(1)$$

N は反射回数を表し、ここでは $N=1$ とする。

(1)式は第6図に示すように、特定の距離に対する伝送曲線として表すことができる。この伝送曲線を第4図のような受信季節、時刻に対応する予想 $h'-f$ 曲線と重ね合わせると、両曲線の交点があるときの受信電波の反射層と高さを示すことになる。交点がなければ受信不能



第6図 伝送曲線 (D=300 km) の例

であり、交点が複数であれば混合モードの伝搬が予想される。

大円距離 2000 km 位までに予想される伝搬モードはE層の1回反射, F層の1回及び2回反射である。

電離層伝搬波の受信電界強度は各季節, 時刻及び太陽の活動度等が関係する。

1970年のCCIR Report 252-2⁽¹⁾によれば, 短波空間波電界強度 E_r (dB) は暫定的に次式によって求められる。

$$E_r = 107.2 + 10 \log P_t + 20 \log f_0 - L_{bf} + G_t - L_i - Y_p \quad \dots(2)$$

ここに, P_t : 送信電力 (W)

f_0 : 使用周波数 (MHz)

L_{bf} : 基本伝送損失 (dB) で使用周波数 f_0 と距離の関数

G_t : 送信アンテナの利得 (dB)

L_i : 電離層吸収損失 (dB) で季節, 時刻, 太陽黒点数, 入射角等がパラメータである。

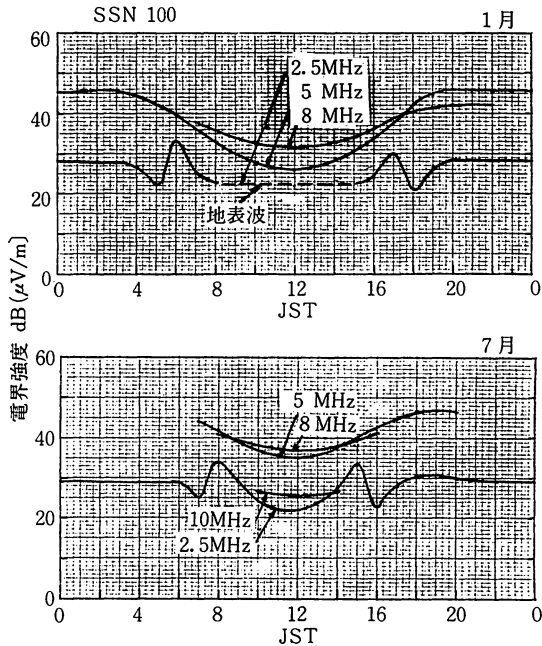
Y_p : 付加損失 (dB), 国内では約 9 dB

国内各地で短波標準電波 JJY の電界強度を測定した結果, 実測値と計算値はよく一致することが確認されている⁽²⁾。

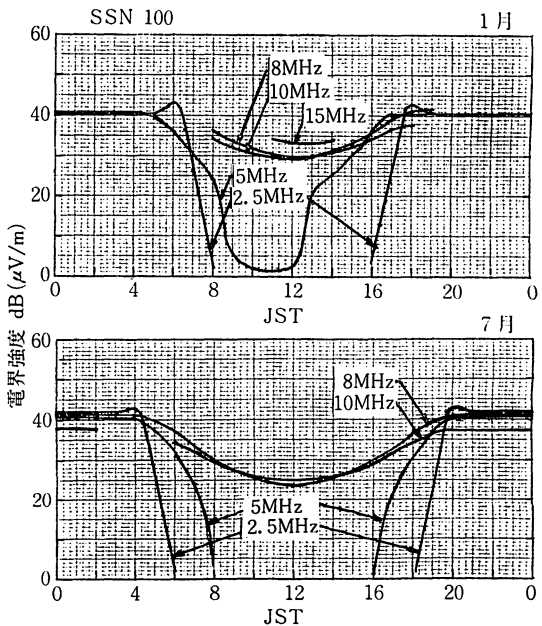
第7図及び第8図は JJY の電界強度を 100 km と 1000 km の受信点について, 上記計算により求めた例である。

太陽活動度の大きな時期であるが, 受信点が 100 km の近距離では, 昼間 8 MHz までの周波数が 20 dB 以上で年間を通じて受信でき, 1000 km の遠距離では, 昼間 8 MHz と 10 MHz が 25 dB 以上で受信できることがわかる。しかし, 夜間では後述する混信のため, 2.5 MHz 及び 8 MHz 以外は利用しにくいと思われる。

第9図は JJY 各周波数の地表波距離特性の計算値を示しており, 送信アンテナ近傍から 100 km 以内では

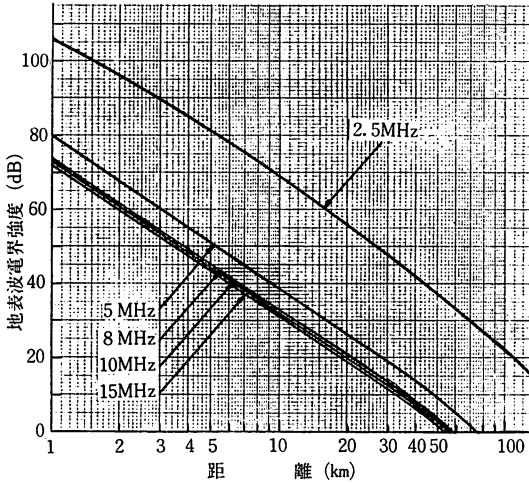


第7図 距離 100 km 地点の JJY 電界強度



第8図 距離 1000 km 地点の JJY 電界強度

2.5 MHz の地表波が 20 dB 以上で受信できることがわかる。



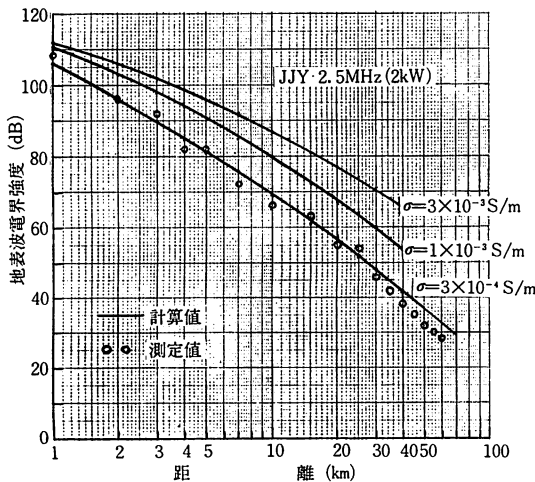
第9図 地表波伝搬特性 (計算値)

3.2 送信アンテナの指向性及び利得

JJY の送信アンテナは第2表に示すように、周波数別にサービス範囲を設定し、その目的に従って設計されて

第2表 JJY サービス範囲の設定

周波数 (MHz)	サービス範囲
2.5	夜間及び近距離
5	~ 500 km
8	200~ 800 km
10	500~1500 km
15	1000 km 以上



第10図 JJY 2.5 MHz の地表波伝搬特性

いる。指向性及び利得は計算で求めることができる⁽³⁾。
JJY 2.5 MHz 用送信アンテナ ($\lambda/4$ 垂直地形アンテナ) により地表波減衰特性を 1 km から約 60 km の距離まで実測した結果 (第10図参照), 次の大地定数を得た。

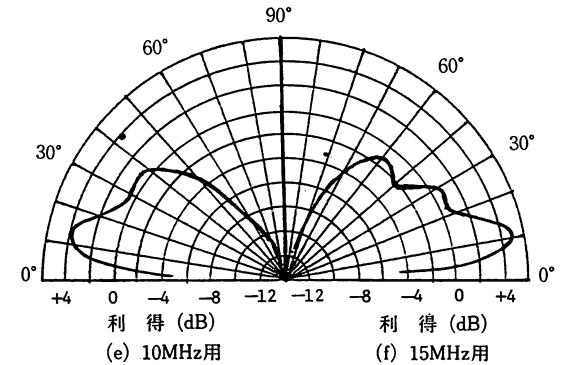
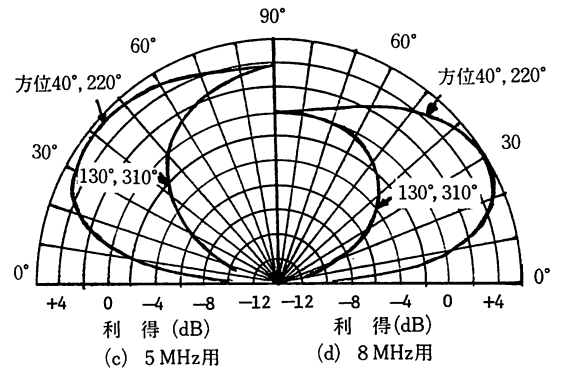
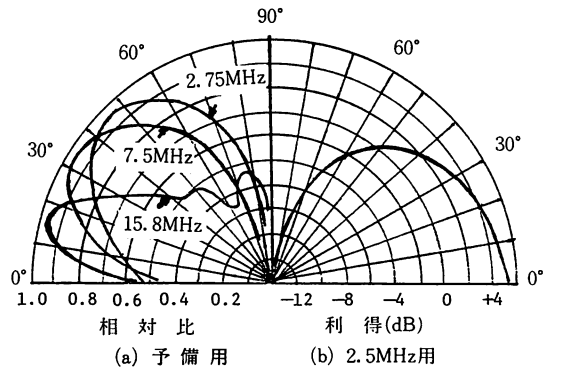
導磁率 $\mu = 1 \text{ e.m.u.}$

誘電率 $\epsilon = 4 \text{ e.m.u.}$

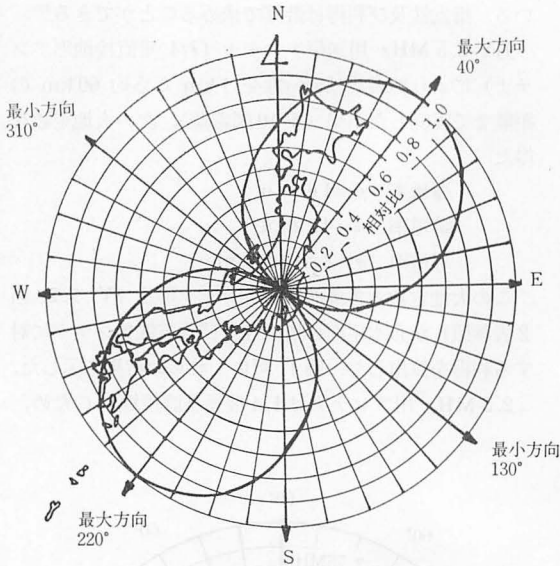
導電率 $\sigma = 3 \times 10^{-4} \text{ S/m}$

この大地定数と各周波数のアンテナ形状 (V. 2.2, 第2表参照) から水平面の指向性及び等方性アンテナに対する利得を算出した。第11図にこれらの結果を示した。

2.5 MHz 用アンテナは $1/4$ 波長垂直地形のため、



第11図 JJY 送信アンテナの垂直パターン



第12図 JJY 5 MHz 及び 8 MHz 用送信アンテナの水平パターン

水平面は無指向性となるが、垂直面は水平方向が利得の最大となり 5.2 dB である。

5 MHz 及び 8 MHz 用アンテナは半波長水平ダイポールアンテナであり、水平面指向性は第12図に示すように、8字形となる。指向性の最大方向は北から東へ40°及び220°にとってあり、日本列島にはほぼ平行している。垂直面指向性は近、中距離向けに仰角を比較的大きくしてある。受信点が数百 km の範囲内では、水平面指向性の最小方向でも、高仰角による電離層反射のため、実際の電界強度には水平面指向性の影響は現れない。

10 MHz 及び 15 MHz 用アンテナは半波長垂直ダイポールアンテナで、水平面は無指向性となる。垂直面指向性の最大方向は10 MHz 用アンテナで仰角約14°、15 MHz 用アンテナで仰角約10°とともに低角度となり、遠距離向けである。予備アンテナはラジアルアースを持つ逆円錐形アンテナで、2.3~23 MHz の広帯域で使用できるが、専用アンテナに比べてアンテナ利得が低い。

4. 標準周波数と時刻の受信精度

4.1 受信アンテナと受信機

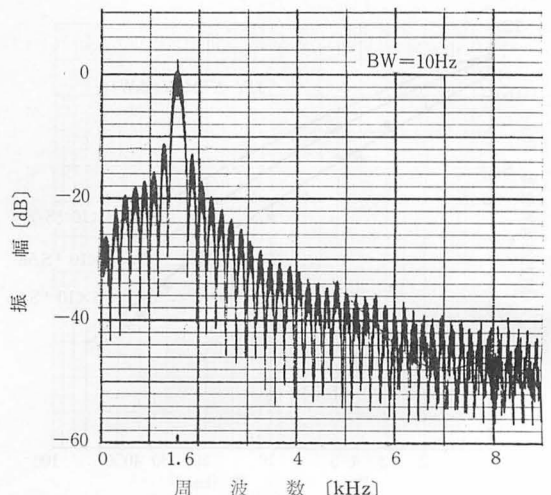
JJY 送信アンテナは、既に述べたように、周波数により垂直形あるいは水平形を使用しているため、偏波面も 2.5, 10, 15 MHz では垂直偏波、5, 8 MHz では水平偏波で送信されている。したがって、受信アンテナもこの偏波面に合った形式が望ましいが、実際には地表波

の受信できる地域以外では電離層伝搬のため、偏波面が回転しているため、水平、垂直、逆L、どのような形式のアンテナでも大差なく使用できる。簡単な逆L形又は傾斜形が実用的に広く利用されているが、人工雑音などのレベルが高い場所では、水平ダイポールなどの指向性を有するもの、あるいはインダクタンスの挿入などで共振させたものが有利である。給電用同軸ケーブルも電力線、計算機及びその端末装置等の雑音輻射源から遠ざけて引き込む配慮が必要である。

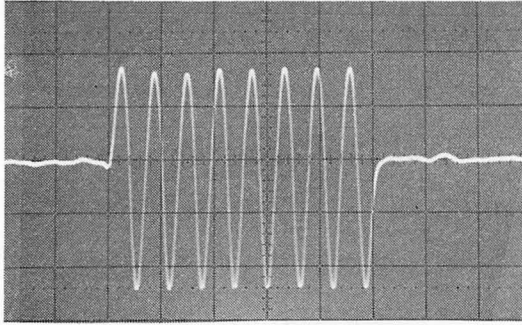
受信機としては、ロッドアンテナの附属した小形ポータブル受信機でも十分受信できる。最近では業務用あるいは JJY 専用受信機でなくとも、デジタル同調方式で、性能、機能ともに優れた受信機が市販されており、経済的に利用しやすい。

受信機を選択して特に注意を要するのは、高精度時刻比較を目的とし、秒信号の波形及び受信機内の遅延時間を問題にする場合である。JJY の秒信号は 1.6 kHz、5 ms 幅のバースト信号で、そのスペクトルは第13図に示すように分布し、両側帯波振幅変調されているので、受信機の周波数帯域幅は 6 kHz 以上あることが望ましい。

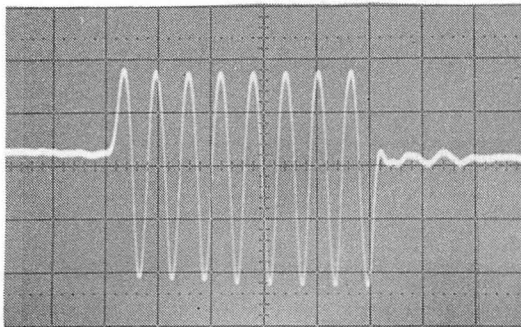
受信機内の遅延時間は中間周波数増幅器の帯域幅によってほぼ決まるが、4~8 kHz 帯域幅の市販受信機数種について実測した結果、遅延時間は150~300 μs の範囲にあった。第14図(a)及び(b)にこの検波出力波形例を示す。3 kHz 以下では、同図(c)に示すように波形ひずみ及び過渡現象が生じ、伝搬モードの判定、外国標準電波との識別等が困難となる。



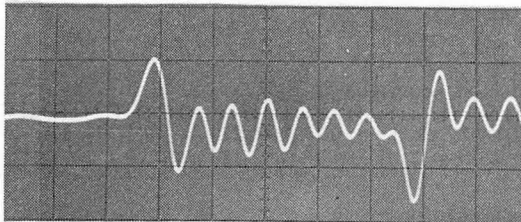
第13図 JJY 秒信号スペクトル



(a) 広帯域 (8 kHz, -6 dB) 受信機



(b) 一般帯域 (6 kHz, -6 dB) 受信機



(c) 狭帯域 (2.4~3 kHz, -6 dB) 受信機

第 14 図 受信帯域幅別 JJY 秒信号出力波形 (5 MHz, 四分秒)

4.2 比較測定法

短波標準電波 JJY の受信によって、時刻及び周波数を比較測定するには次のような方法がある。

(1) 時刻比較測定

(i) オシロスコープ直視法

第 15 図に測定装置構成の例を示す。1 pps トリガーパルスの位相を調整し、受信秒信号波形をオシロスコープ面の適当な位置に表す。受信周波数を切り替えて、到来時の異なる秒信号が受信できれば、低い受信周波数で先に到来した秒信号は受信距離により、地表波又は E 層

伝搬によるものである。F 層伝搬など後から到達する秒信号とは、あらかじめ各伝搬通路の伝搬時間を計算しておくことにより確かめることができる。単一モードでしか受信できないときは、本章 3.1 で述べた伝送曲線を利用して伝搬モードと反射高を推定する (伝搬時間の計算法は本章 4.3 を参照)。

次に、時計の秒パルスをオシロスコープ面で、先に到達した受信秒信号の立ち上がり点と一致するようにトリガーパルスの位相を調整し、このときの位相調整量 α を求めれば伝搬時間 τ 及び受信機内遅延時間 d_R から標準時刻との時刻差 ΔT は、

$$\Delta T = \tau + d_R + \alpha \quad \dots\dots(5)$$

として求められる。ここで α の符号は受信秒信号が時計秒パルスより前にあれば正、後にあれば負とする。

この方法は $\pm 100 \mu s$ 程度の測定精度が得られる。

(ii) 写真多重露出法

受信地域によって S/N 比がよくない場合、秒信号波形を写真フィルムに多重露出すると、雑音と信号の判別が容易となる。この場合、ポラロイドフィルム等を利用し、露光を十分切りつめ、5~30 秒間多重露出する。この方法で撮映した波形例を第 16 図に示す。

(2) ビート法による周波数比較測定

第 17 図に示すように受信機で標準電波を受信するとともに、比較すべき発振器の周波数を同じ周波数まで通倍するか、又は高調波を含む波形に変換し、受信アンテナと疎に結合してビートを生じさせ記録計に記録する。このとき、T 秒間に n 個のビートがあったとすれば、発振器の周波数偏差率 $\Delta f/f$ は、

$$\Delta f/f = \pm n/(f_r \times T) \quad \dots\dots(7)$$

ここに、 f_r : 受信周波数 (Hz)

で求めることができる。

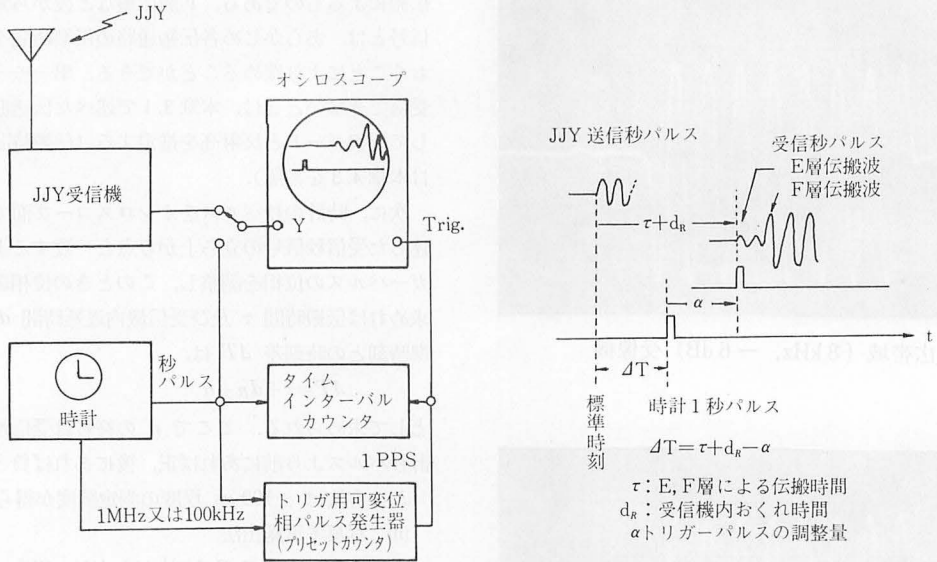
周波数の高低を知る必要のあるときは、もう一つの補助発振器を用いて、これと標準電波とで零ビートをとり、次に比較発振器との零ビートをとり、そのときの周波数変化方向から判別する。この方法は 10 分ぐらいの平均で、 10^{-7} ~ 10^{-8} 精度の較正を行うのによく用いられるが、フェージングの深いときは誤差が生じやすい。

(3) 時刻比較による周波数測定法

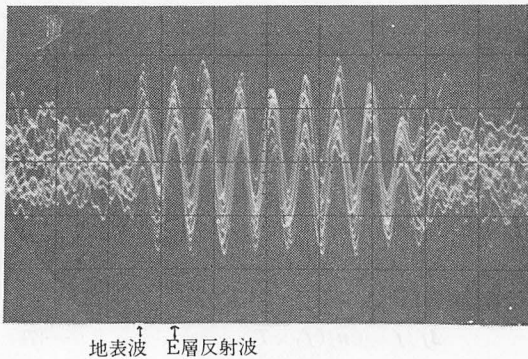
一般に高精度かつ高安定な周波数標準器や標準時計では、標準電波による毎日の測定値を最小自乗法で処理することによって、任意の時点の測定を精度よく求めることができ、また、測定の標準偏差も知ることができる。

このような長期比較では報時信号による時計歩度の測定によって周波数偏差の平均値を求める。

被測定発振器によって駆動されている時計からの秒信号を前述の時刻測定法により、進み、遅れの測定をす



第 15 図 直視法による時刻比較測定構成図



第 16 図 JJY 秒信号の多重露出撮影例 (20 秒露出, 国分寺 2.5MHz, 12h JST)

る。

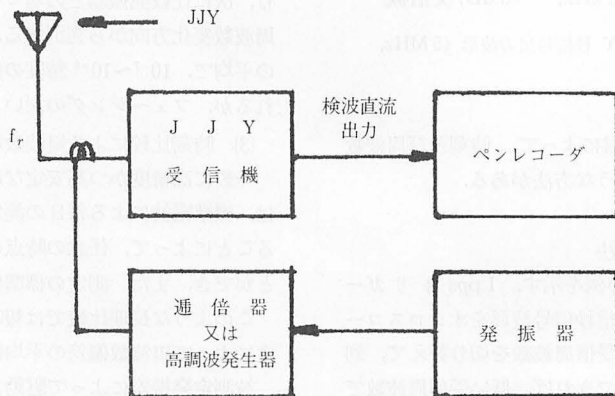
周波数測定だけが必要な場合は、伝搬時間や受信機内遅延時間を考慮する必要はないが、E層伝搬波を用いることが精度の点で望ましい。

いま時刻 t_1 における測定値を T_1 とし、 t_2 において再び測定して T_2 を得たとすれば、比較発振器の周波数偏差率 $\Delta f/f$ は、

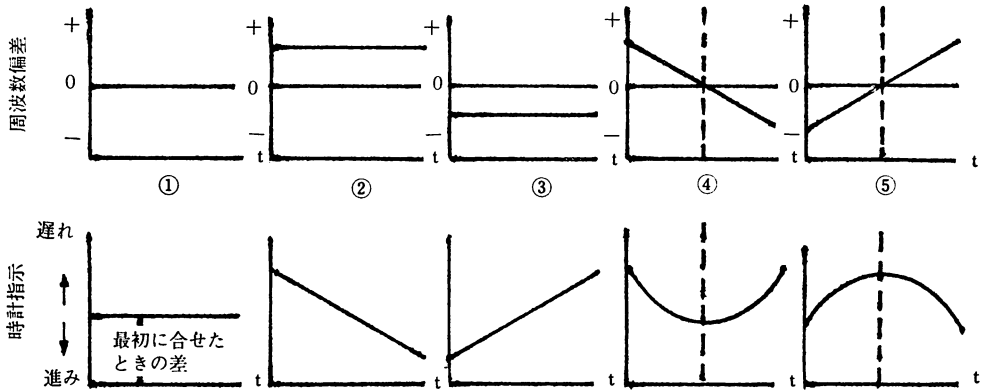
$$\Delta f/f = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad \dots\dots(8)$$

となる。ここで、 T_1, T_2 は受信パルスが比較パルスより前にあれば(+), 後にあれば(-)の符号を付ける。

これら毎日の時刻差, 周波数偏差の測定値をグラフに



第 17 図 周波数比較測定構成図



第 18 図 周波数偏差と時計誤差の動き

表すと、一般に第 18 図の①～⑤のいずれかの形になる。
①は周波数偏差が零で長期間この状態を保ってれば、時計指示は遅れも進みも生じないで、最初に合せたときの差のままである。

②, ③は、もし一定値の周波数偏差があり、その値が変化しなければ、時計指示は周波数偏差が正か負によって直線的に進むか遅れてゆく。

以上は、いずれもセシウムあるいはルビジウム原子発振器のような場合である。一般的な水晶発振器の場合は、④, ⑤のように周波数偏差は直線的に変化してゆき、時計指示は二次曲線を示しながらずれてゆく。

これらの関係を一般式で示すと、E を時計指示の誤差として、

$$E = E_0 - \frac{4f_0}{f}t - \frac{1}{2}at^2 \quad \dots\dots(9)$$

ここで、 E_0 , $4f_0/f$ は $t=0$ のときの時計指示の誤差及び周波数偏差率、 a は周波数の経年変化率 (aging rate) で第 18 図, ④, ⑤の周波数偏差の傾きを表し、通常 1 日当たりの変化率 $4f/f/86400 \text{ sec}$ を用い、 t の単位は秒である。

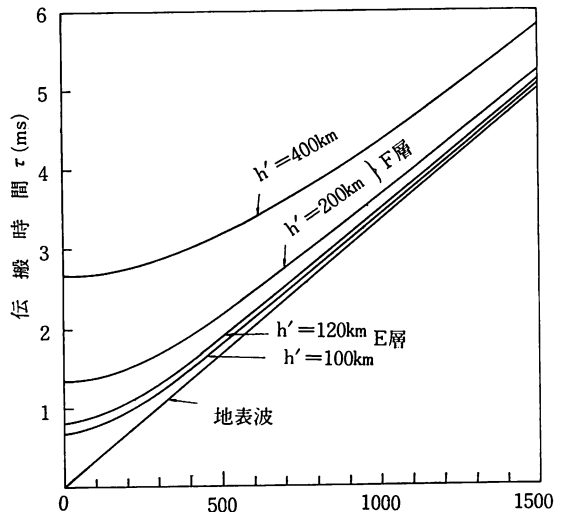
このように毎日の比較データを用いて、時計指示の動きや周波数偏差を統計的に推定して管理することができる。

4.3 時刻の受信精度⁽⁴⁾⁽⁵⁾

短波標準電波による時刻比較精度の限界を考えると、送信側では、時刻信号の送信機内遅延時間は各送信機ごとに一定値に調整してあり、その安定度は数 μs である。

一方、受信側では、受信機内遅延時間は前述のように中間周波増幅器の帯域幅や段数により、150~300 μs の範囲にあり、擬似信号による比較精度も 10 μs 程度と考えられる。

次に伝搬による遅延時間 $\tau(\text{sec})$ は送受信地間の大円



大 円 距 離 D (km)

第 19 図 電離層高と伝搬時間の関係

距離 $D(\text{km})$ と電離層の反射高 $h'(\text{km})$ から次式で求められ、第 19 図のようになる。

$$\cos A = \sin X_1 \sin X_2 + \cos X_1 \cos X_2 \cos (Y_1 - Y_2) \quad \dots\dots(10)$$

$$D = (A/180) \cdot \pi r \quad \dots\dots(11)$$

$$\tau_N = 2N \sqrt{r^2 + (r+h')^2 - 2r(r+h') \cos D} / 2Nr / c \quad \dots\dots(12)$$

ここに、 A : 送受信地間が挟む地球の中心角 (度)

X_1 : 送信地の緯度 (度)

X_2 : 受信地の緯度 (度)

Y_1 : 送信地の経度 (度)

Y_2 : 受信地の経度 (度)

r : 地球の半径 (6371 km)

N : 反射回数

c : 光速 (2.998×10^8 km/s)

国内では1回反射のみを考え、近似的に

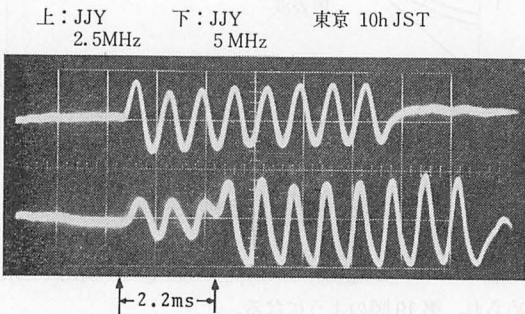
$$\tau \doteq 2\sqrt{(D/2)^2 + (h')^2} / c \quad \dots\dots(13)$$

としても、その誤差は1000 km地点で最大100 μ s (F層伝搬) 及び30 μ s (E層伝搬) 程度、300 km内では、いずれも10 μ s以下で無視できる。

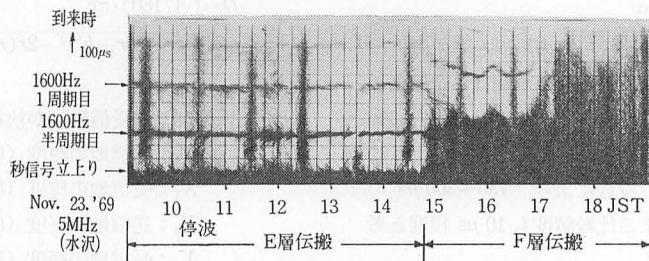
しかし、電離層の高さはE層かF層か確認できなければ、100ないし400 kmの範囲と考え、その中心値250 kmをとり、受信機内遅延時間を0.3 msとすれば、これにより生ずる誤差は近距離で1.3 ms、遠距離で0.8 msとみなければならない。受信機内の遅延を校正し、次に述べるようにE層伝搬波が確認できた場合、E層の高さ変化を ± 10 kmとみれば、近距離では100 μ s以内、中、遠距離で50 μ s及び地表波受信可能地域では30 μ s程度が比較精度の限界と考えられる。

E層伝搬による受信信号は、F層伝搬によるものに比べ1 ms前後早く到達するので、両層で反射するときには秒信号波形のサイクル数の増加と振幅の不連続から判別することができ、単一反射層の場合は受信周波数を切り替えてみると、到来時の差から区別することができる。

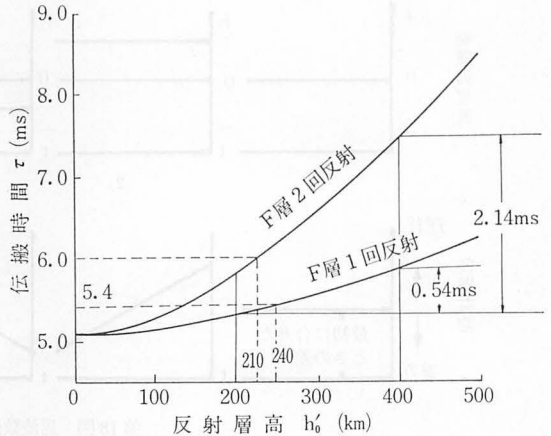
近距離における地表波と空間波についても同様であり、第20図に受信例を示した。第21図は、連続撮影で記録したE層及びF層伝搬による秒信号到来時変化の一



第20図 近距離における地表波と空間波の受信例



第21図 400 km地点のJJY秒信号連続撮影記録



第22図 距離1500 km(沖縄)における伝搬時間(計算値)

例であり、安定度の相違が表されている。

JJY送信所から国内最遠距離(約1500 km)の沖縄では、伝搬時間の測定から5 MHz及び10 MHzにF層2回反射が観測されており⁽⁶⁾、第22図に示すようなF層の1回及び2回反射を考えるならば、時刻変動はその中心に対して ± 1 msといえる。

4.4 周波数の受信精度

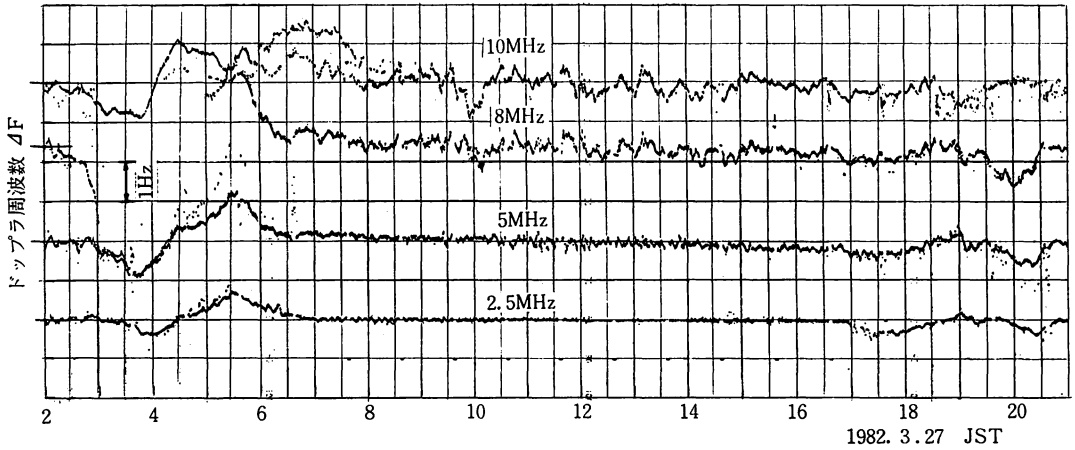
電離層伝搬波は、電離層内での反射層の高さ変化又は水平移動などによるドップラ効果により、周波数偏移(ドップラシフト)を生ずる。このため短波標準電波も1 Hz前後の周波数偏移を避けられず、その大きさは反射層高変化の場合には周波数偏差率 $\Delta F/F$ で表すと次のようになる。

$$\Delta F/F = -0.667u \cos \theta \times 10^{-8} \quad \dots\dots(14)$$

ここで、

- u : 単位時間当たりの反射層高さ変化(m/s)
- θ : 電離層入射角
- ΔF : ドップラ効果による周波数偏移 (Hz)
- F : 搬送波周波数 (Hz)

この場合、ドップラシフトは $\cos \theta$ に比例するので、受信距離が遠くなるほど、また、反射層高の低いほど同じ高さ変化に対して小さくなる。例えば、1000 km地点



第 23 図 ドップラシフトの観測例 (小金井)

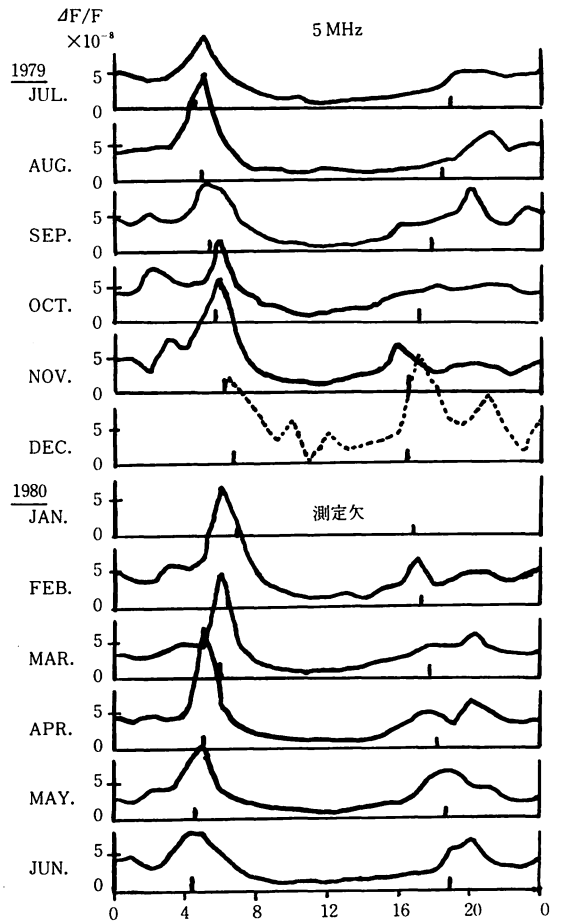
では入射角はF層反射で63°、E層反射で79°となるので、ドップラシフトは垂直反射の場合のそれぞれ1/2及び1/5になる。しかし、2回反射及び2重反射(F層とE層など)、反射層の水平移動、あるいは外国標準電波との混信を無視できない場合は必ずしもこのように単純に考えられない。

第23図は受信距離約62kmで、2.5MHz以外はF層ではほぼ垂直に反射する、当所小金井におけるドップラシフトの観測例である。測定は前述のデジタルリアルタイム処理方式によるものである。図で1Hzの変化は2.5MHz、5MHz、8MHz、10MHzに対してそれぞれ 4×10^{-7} 、 2×10^{-7} 、 1.25×10^{-7} 、 1×10^{-7} であり、上方向が正のドップラシフトになる。日中の2.5MHzは地表波又はE層反射で非常に安定している。第24図はこのような記録から5MHzについて毎正時に読み取ったドップラシフトの絶対値を各月ごとに平均した日周パターンである。

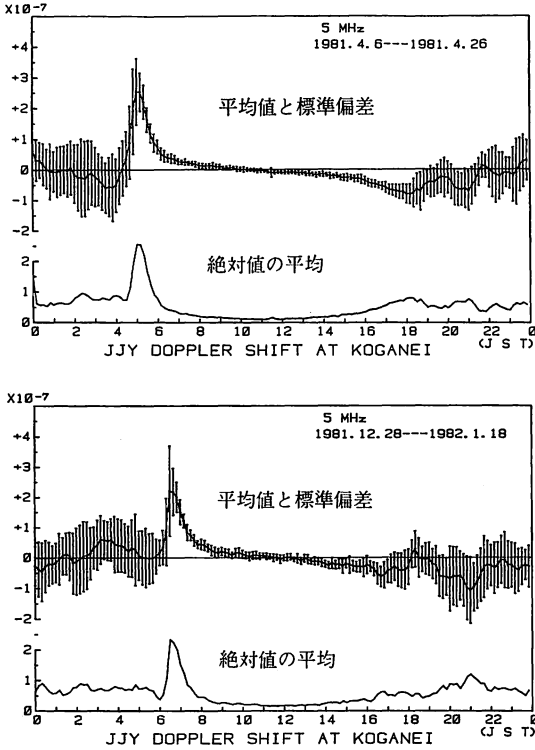
第25図及び第26図は、5MHzと8MHzのドップラシフトの季節による違いを示したもので、各時刻の10分間平均の月平均と、その標準偏差で表し、絶対値の月平均も同時に示している。

これらのデータから近距離では一般的に次のことがいえる。ドップラシフトは日変化として日出時に正の大きなピークを生じ、また、日没時には負の値になるがそれほど顕著なピークを生じない。日中は正から負の傾斜を持ち正午前後に平均値は零となり、標準偏差も最少となる。季節的には春が最も安定で、5MHzの場合、日中(9時から15時)の10分間平均値は95%が $\pm 2 \times 10^{-8}$ 以内でその標準偏差は $\pm 1 \times 10^{-8}$ である。冬は最も悪く5MHzの日中で同じく $\pm 5 \times 10^{-8}$ 、及び $\pm 2 \times 10^{-8}$ である。夜間は各季節とも日中に比べドップラシフトは大

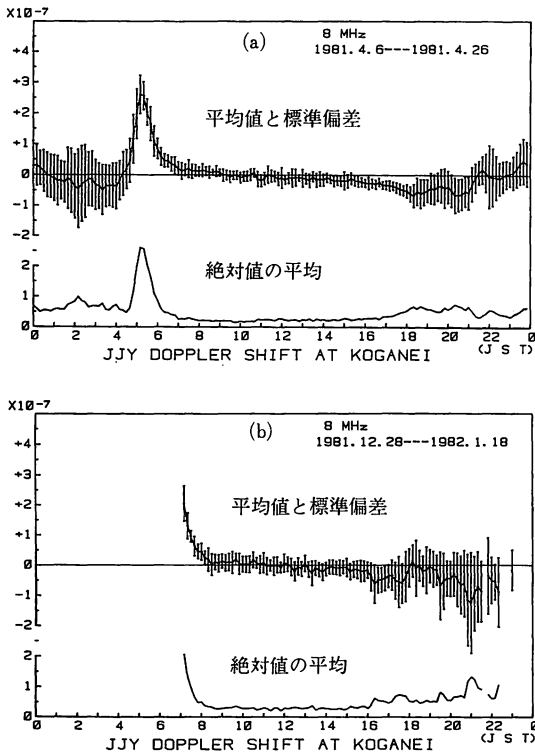
きいが 10^{-7} 台の利用はできる。周波数的には周波数が高いほどドップラシフトは大きくなり、8MHzでは5MHzよりも2~3倍大きな値を示す。



第 24 図 ドップラシフト絶対値の月平均 (小金井)

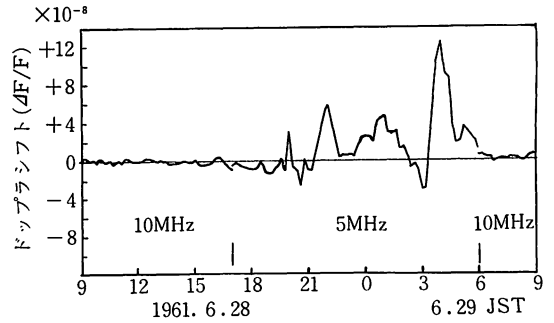


第25図 JJY 5 MHz ドップラシフト観測例 (10分平均)

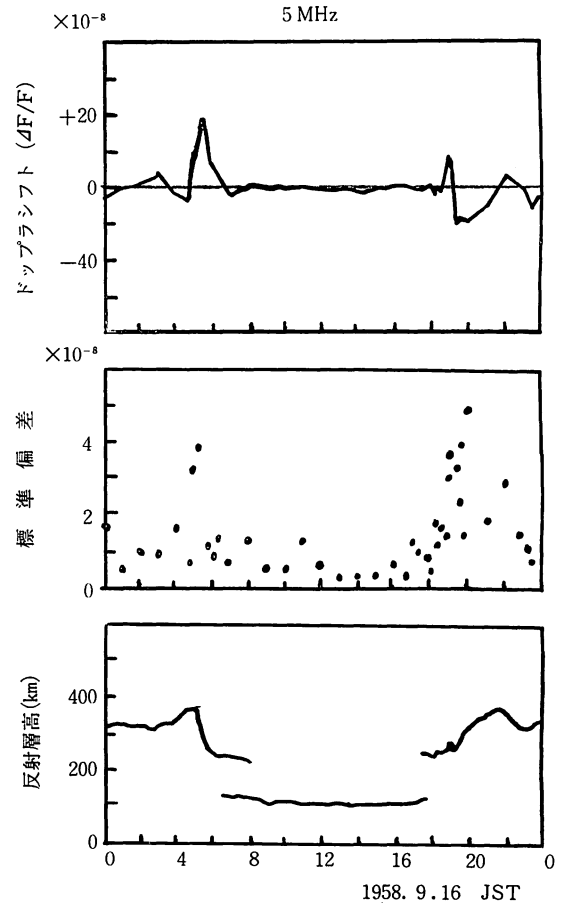


第26図 JJY 8 MHz ドップラシフト観測例 (10分平均)

第27図に北海道稚内市 (約1100km)⁽⁷⁾, 第28図に兵庫県神戸市 (約400 km)⁽⁸⁾ におけるドップラシフトの観測例を示した。この両者のデータはビート方式によるもので前記測定法とは異なるが, その結果によれば, 稚内においては日中の10 MHz は主にE層伝搬で, ドップラシフトは非常に小さく測定の95%が $\pm 1 \times 10^{-8}$ 以内であった。夜間の5 MHz は主にF層伝搬で測定



第27図 稚内におけるドップラシフトの一例



第28図 神戸におけるドップラシフトの一例

35%が $-3 \sim +7 \times 10^{-8}$ と大きく、1~2時間程度継続して $+1 \times 10^{-7}$ 以上になることもある。

神戸における5 MHz の測定では、日中は主にE層伝搬で測定の95%が $\pm 2 \times 10^{-8}$ 以内、夜間はF層伝搬になり $\pm 5.5 \times 10^{-8}$ であった。

このように、短波標準電波での周波数比較精度はできるだけ低い周波数 (E層伝搬波) を日中の9時から15時の時間帯で受信し、また、10分程度の平均をとるなどに留意すれば $1 \sim 2 \times 10^{-8}$ の精度が得られることを示している。

5. 外国の短波標準電波と国内での相互干渉

5.1 外国標準電波の発射形式と諸元

国際的に短波標準電波として割り当てられている、いわゆる5 MHz 系の周波数は広い保護バンドのもとに送信されるが、地域や時間帯によっては同一周波数に各局の信号が重畳して受信され、利用を困難にしている。

第3表及び第29図は国内で受信できる主な外国標準電波の発射形式と諸元を示しており、第30図は各局の送信位置を示している。

RID (イルクーツク, USSR) は搬送波を +4 kHz オフセットしており、国内では5.004 MHz 及び10.004 MHz が受信される。

5.2 標準電波の電界強度及び時刻信号の到来時

短波標準電波の電界強度は CCIR の電界強度暫定算出法 (2)式参照) に基づいた RRL 電子計算機プログラム (一之瀬, 山岡, 1971)⁽⁹⁾ を使用して求められる。このプログラムでは MUF (最大使用周波数) 等も考慮されている。

第31図は各局短波標準電波5 MHz 及び10 MHz の電界強度を太陽活動度が大きな時期 (SSM=100) について求めた例であり、広島における1月(冬)と7月(夏)の受信状態を示している。同図によると、5 MHz では年間を通して、昼間はJJYのみが受信でき、夜間は

JJY と外国標準電波との相互干渉が生じることがわかり、10 MHz でも年間を通して、昼間はJJYとBPM (中国) との間で相互干渉が生じることがわかる。

第32図はE層の高さを110 km 及びF層の高さを300 km としたときに、国内の都市 (鹿児島, 広島, 東京及び札幌) で受信できる標準電波各局の時刻到来時を示した例である。

BPM の時刻信号は UTC よりも10 ms 進ませて送信されているので、受信地の鹿児島及び広島では UTC に対して2 ms 進んで受信され、東京及び札幌では UTC とほぼ同時刻に受信される。

同様に、JJY の時刻信号は、近距離の東京では UTC に対して、0.8 ms (E層反射) 及び2 ms (F層反射) 遅れ、遠距離の鹿児島ではF層反射で4 ms 程度遅れて受信される。時刻(秒)信号は5 ms 幅 (第29図参照) であるため、反射層高の相違や反射回数の相違による到来時の変動 ± 1 ms 程度を考慮すると、国内では JJY と BPM の時刻信号が重畳して受信される可能性があることがわかる。

5.3 相互干渉時の受信利用

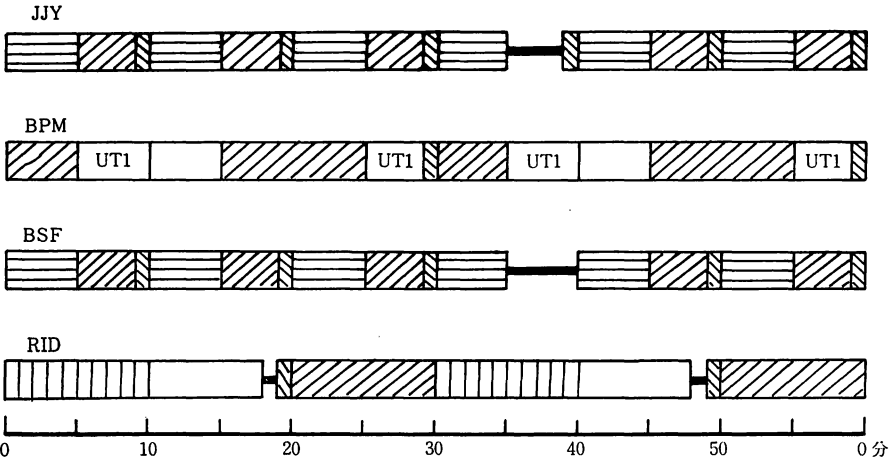
1979年の WARC (世界無線主管庁会議) では、短波標準電波として4, 8 及び16 MHz が承認され、第3地域 (アジア, 西太平洋及びオーストラリア等の地域) で使用できるようになった。この周波数での送信は、現在 JJY 8 MHz のみがあり、相互干渉もなく利用されている。

短波標準電波の相互干渉を考慮して、国内で JJY を受信利用するためには、夜間及び近距離では、2.5 MHz、昼間は干渉のない8 MHz (第7図及び第8図参照) 及び5 MHz (近・中距離) を選択することが望ましい。

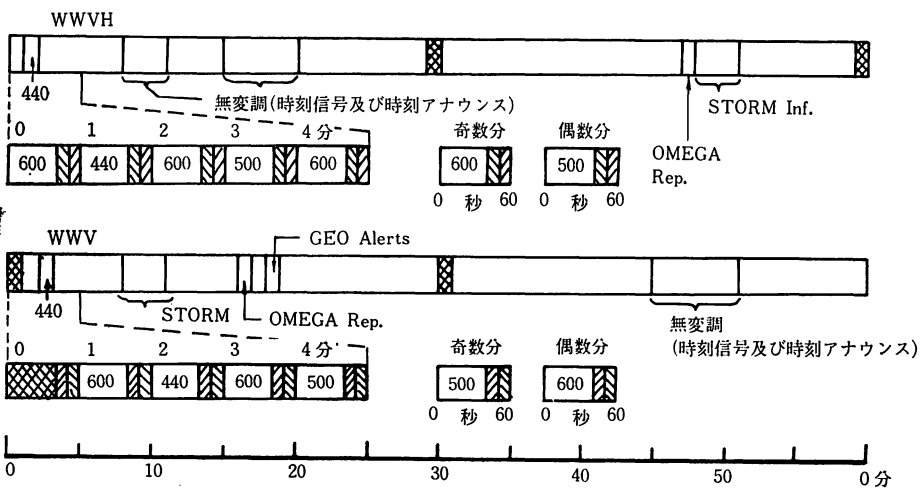
しかし、相互干渉時の状況によっては外国標準電波の利用も考えられ、各局時刻信号の発射形式や信号形式及び伝搬特性をあらかじめ把握しておくならば、到来した時刻信号は伝搬時間及び受信装置内の遅延時間等を考慮

第3表 アジア, 太平洋地域の外国標準周波数局の諸元

局名	所在地	緯度 経度	送信周波数(MHz)	送信時間	空中線電力 (kW)	アンテナ形式
BPM	陝西省浦城 (中国)	35°00' N 109°31' E	5 : 14 h ~ 00 h (UTC) 発射 10 : 24時間連続 15 : 00 h ~ 14 h (UTC) 発射		10~20	$\lambda/2$ 水平ダイポール
BSF	台湾	24°56' N 121°09' E	5/15	24時間連続	2	$\lambda/2$ 垂直ダイポール
RID	イルクーツク (USSR)	52°46' N 103°39' E	5.004 10.004 15.004	24時間連続	1	水平ダイポール
WWV	コロラド・フォートコリンズ (USA)	40°41' N 105°02' W	2.5/5/10/15/20	24時間連続	10 (2.5/20 MHz : 5)	$\lambda/2$ 垂直ダイポール
WWVH	ハワイ・カウアイ (USA)	21°59' N 159°46' W	2.5/5/10/15	24時間連続	10 (2.5 MHz : 5)	$\lambda/2$ 垂直ダイポール (アレイ)

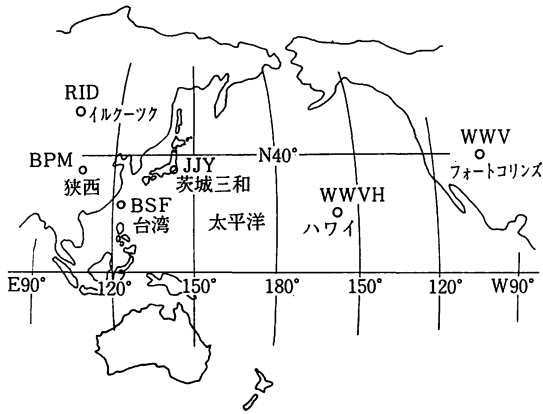


- 時刻信号 (UTC)
 - JJY : 秒信号1.6kHz 5ms幅, 分子告信号 600Hz 655ms幅
 - BPM : 秒信号1kHz 5ms幅, 分信号1kHz 300ms幅
 - BSF : 秒信号1kHz 5ms幅, 分信号1kHz 300ms幅
 - RID : 秒パルス 100ms幅 A1形式, 分パルス 500ms幅 A1形式
- UT1 時刻信号 (1kHz, 秒信号100ms幅, 分信号 300ms幅) (UT1)
- RID, 10Hz パルス (正秒40ms幅, 正分 500ms幅, UTC A1形式)
- 1000Hz 及び時刻信号(UTC)
- 搬送波のみ
- コールサイン及び時刻アナウンス (JJY, BSFのみ)
- 停波

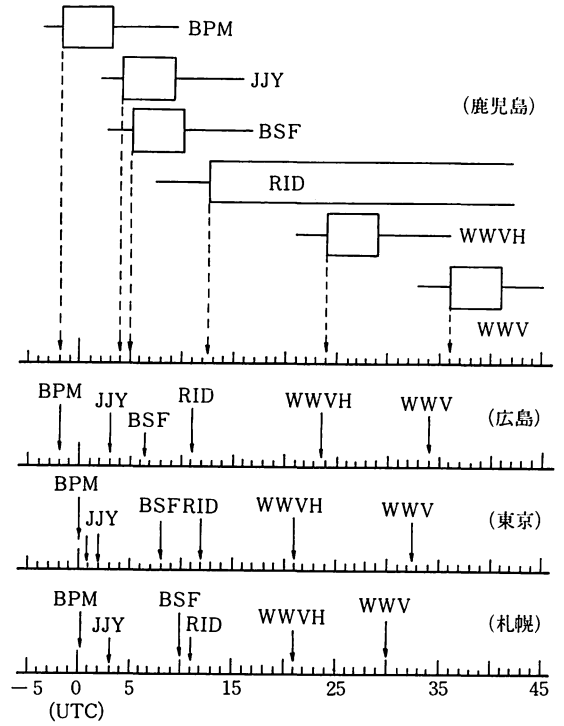


- 局符号
- 600 秒信号及び600Hzトーン
- 440 秒信号及び440Hzトーン, 1時間マーク。
- UTC時刻アナウンス
- 500 秒信号及び500Hzトーン
- 時刻信号 (UTC)
 - WWVH : 秒信号 1.2kHz 5ms幅, 分信号 1.2kHz 0.8秒幅, 時信号 1.5kHz 0.8秒幅
 - WWV : 秒信号 1kHz 5ms幅, 分信号 1kHz 0.8秒幅, 時信号 1.5kHz 0.8秒幅

第 29 図 各国標準電波の発射形式



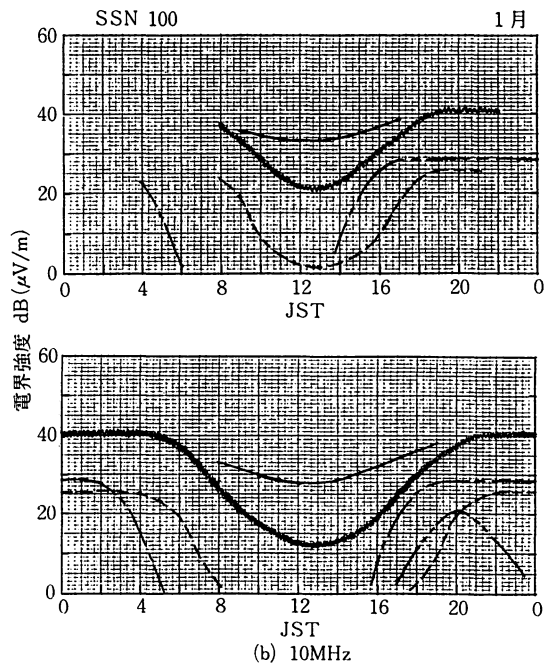
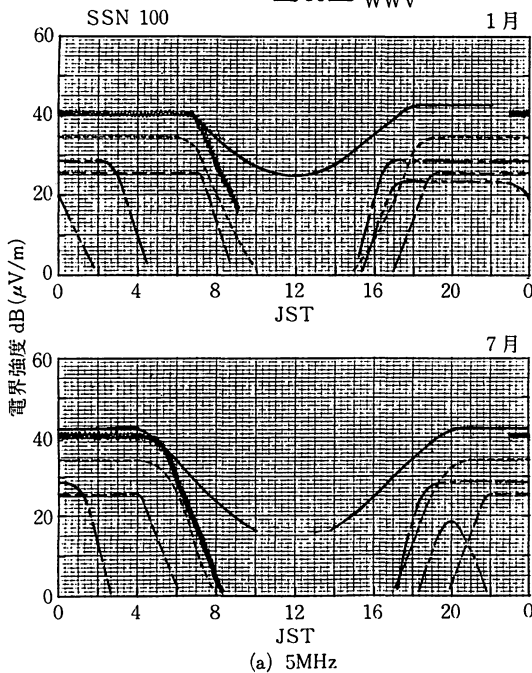
第30図 各国標準電波の送信位置 (アジア, 太平洋地域)



進み ← 時間 (ms) → 遅れ

第32図 各国標準電波時刻 (秒) 信号の到来時差

- JJY
- BPM
- - - BSF
- · · RID
- WWVH
- - - WWV



第31図 広島における各国標準電波の電界強度 (計算値)

