

## 研 究

UDC 621.391.812.63.029.5

## 40 kHz 長波標準電波の特性

北村 稔\* 中島 政雄\* 中村 幸三郎\*\*

## 1. 緒 言

短波標準電波の発射周波数は、原子周波数標準の規正により、常時 $\pm 1 \times 10^{-10}$ の偏差内に保たれているが、伝搬途上で起きるいわゆるドプラー効果のために、ときには $10^{-8} \sim 10^{-7}$ の桁にも及ぶ大きな周波数変動を免がれ得ない。

近年における科学技術の著しい進歩は、より高精度の標準周波数信号を要求し、長波帯電波による伝送が切望されていた。この電波は、短波と同様、遠達性の点で優れているほかに、その電離層伝搬波が、上層にくらべてはるかに安定な電離層の下部で反射されるために、その伝搬状況がきわめて安定で、伝搬波の周波数変動もごく少なく、標準周波数の伝送に最も適した方式として標準化され、国際間の周波数比較にも利用されている。

当研究所においては、従来 20 kHz 標準電波を実験的に送信してきたが、その輻射電力が極めて小さく、国内全域の利用にはほど遠い現状であった。以来この問題について多くの努力が続けられ、その結果、既設海岸局の送信施設を利用し、その搬送波を周波数安定化することによって、40 kHz 大電力長波標準周波数の伝送を実現し、昭和41年1月10日以降電々公社検見川送信所から送信されるようになった。

開局後一年半を経過した現在、送信系に伴う位相変動抑圧の問題は解決され受信実験の結果によると、短波標準電波にくらべて100~1000倍以上の精度で周波数比較ができることが確かめられた。一方VLF標準周波数受信回路専門委員会の関係者を始めとして国内利用者の数は漸次増加し、海外からの受信報告も寄せられるなど、この電波の特性が次第に明らかになりつつある。今後この高精度周波数の利用はもとより、電波伝搬の研究、精密な航行方式の研究および国際間の周波数精密比較など、広く利用されるものと考え、この電波の紹介をかね、特性について報告する。

## 2. 送信特性

## 2.1. 送信方法

40kHz長波標準周波数実験局(JG2AS)は、防衛庁海岸局(JJF-2)と発振原器および送信施設を共用する二重免許の無線局で、その異なる部分は通信内容である。

海岸局のモールスコードによる通信が優先して随時送信されるが、この通信時間が不規則なために、このままでは利用するのに不便なので、電波研究所から、マーク0.5秒、スペース0.5秒のくりかえし信号(モールス信号と区別するために秒信号ではない)を常時海岸局通信所へ送り、通信のあき時間には、この信号を送信して電波が長時間にわたり停波しないようにしてある。なお海岸局の通信中は、通信を阻害しないため、2分以内の停波では、1Hz信号に切替わらない。伝送局の諸元を第1表に示す。

## 2.2. 送信施設

検見川送信所に電波研究所分室を設け、原器室を設置して周波数標準装置を収容している。原器室は、2.7m(間口)×3.3m(奥行)×2.2m(高さ)の大きさで、周囲強電磁界の誘導をさけるために亜鉛鉄板を用いて二重電磁しゃへいを施し、室外からの導入線は濾波器を通すことにより70dB以上のしゃへい効果をもたせ、また空調をして室温を $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 以内に保っている。

周波数標準装置の構成は、現用系にルビジウム周波数標準器(Rb原器)を用い、この100kHz出力を位相制御装置に加え、送信電波の位相変動成分を補償したのち、40kHz10Vに分周増幅し、自動切替器を経て送信機緩衝増幅器に加えられる。

送信機の電力増幅段は強制空冷管8T20RAの並列接続で、10kWの出力をローディングコイルを通して空中線に供給する。空中線は、高さ90mの鉄塔4基を各々200mの間隔で設置し、垂直部は直径2mのかご形に6条ずつ2組にわけて張られ、水平部は120度の扇形に24条張られている。空中線定数として実効抵抗 $1.2\Omega$ 、実効容

\* 周波数標準部標準電波課

\*\* 秋田電波観測所

第1表 長波標準周波数放送局 J J F-2 / J G 2 A S の諸元

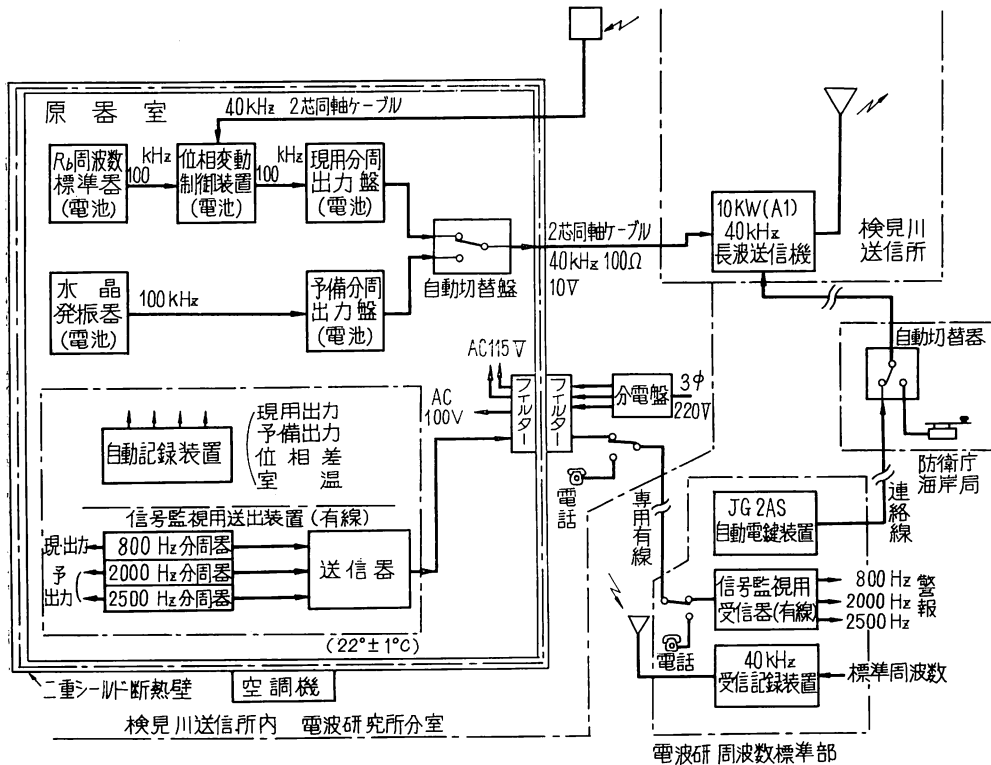
局符号および無線局の種類		J J F-2 防衛庁海岸局	J G 2 A S 標準周波数実験局	備 考
所在地	標準原器	千葉市検見川町5-2069 日本電信電話公社検見川無線送信所内 電波研究所分室 35°38'N 140°4'E		
緯 度	送信機及び空中線	千葉市検見川町5-2069 日本電信電話公社検見川無線送信所		
	経 度	通信所	小金井市緑町4-1-3 電波研究所 周波数標準部	
空中線	型 式	無 指 向 性		
	搬送波出力	10KW		輻射電力 約1kW
発 射 時 間	1週間当り日数	7	6	当分の間 J G 2 A S は日曜日を除く
	1日間当り時	24	6	J J F-2 が優先し通信のあき時間のみ J G 2 A S が送信される。 当分の間 09.00~15.00 J S T
送 信 信 号	A <sub>1</sub> (モールスコード)	A <sub>1</sub> <sup>(0.5秒間隔交互のマークおよびスペース)</sup> コールサイン: 毎時15.45分		
標準周波数	40 kHz			
周波数の精度	±5×10 <sup>-11</sup>		周波数オフセット値: -300×10 <sup>-10</sup>	
周波数の監視・制御	電波研究所が行なう。			

所の周波数標準と位相比較され、信号強度とともに記録監視されている。送信施設の系統を第1図に示す。

2.3. 標準原器

Model 304 B ルビジウム周波数標準器は、ルビジウム原子の一定不変の吸収共振周波数 6,834.68MHz を reference として、水晶発振器(自蔵)の発振周波数を精密に制御する方式で、その原理的な動作系統を第2図に示す。AFCループを形成する要素は、水晶発振器、周波数通倍器、位相変調器、optical micro-wave unit (ランプ光源、ガスセルなど)、155 Hz 増幅器、155Hz 発振器および位相検波器などである。

この標準器の特徴は、スペクトル線の幅を減少させるために、緩衝気体とよばれる適当な希ガスをルビジウムとともに混合し、また optical pumping の方法、すなわちルビジウム原子の共振波長の光



第1図 40 kHz 長波標準周波数送信施設の系統図

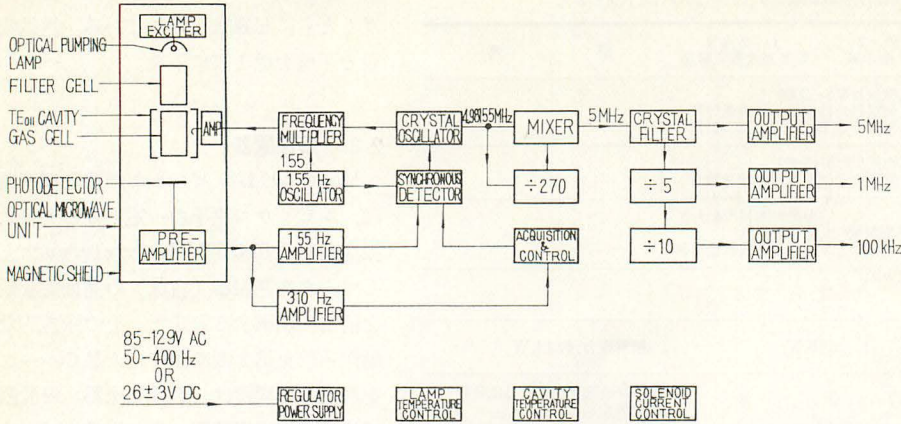
量 11000pF, 実効インダクタンス 125 μH の値が得られ、能率10%, 無指向性(水平面)である。

送信電波は、常時電波研究所周波数標準部において、当

を照射して熱平衡状態をくずし、エネルギーレベル間の原子数の割合を変えてスペクトル強度を高める方法が併用され、マイクロ波および光のダブルレゾナンスを行な

変わり、空中線定数の実効容量が変化する結果、位相変動を生じる。この容量の変化分と位相の変動量はほぼ対応する。第4図に風速と位相変動の測定結果を示す。

この位相変動を抑圧するために、原器と分周器の間に精密可変位相器を挿入し、これを電気機械的サーボ方式

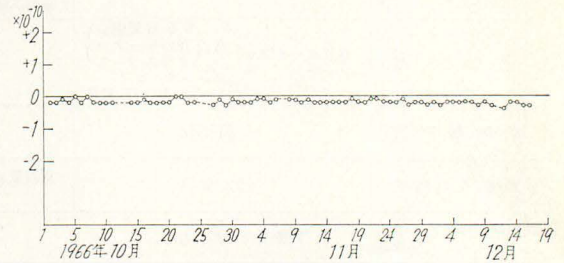


第2図 ルビジウム周波数標準器の動作系統図

い、かつ光の検出によって、マイクロ波遷移を観測する方法を用いている。

周波数の調整は、time scale selector (内蔵)により、 $7.39 \times 10^{-10}$  のステップで、 $+347.73 \sim -589.84 \times 10^{-10}$  の範囲にわたり調整でき、このステップの間は、optical pumping light beam に並行な磁界成分の強さを変えて、 $0 \sim 10 \times 10^{-10}$  の微調整ができるので、両者を併用して行なわれる。

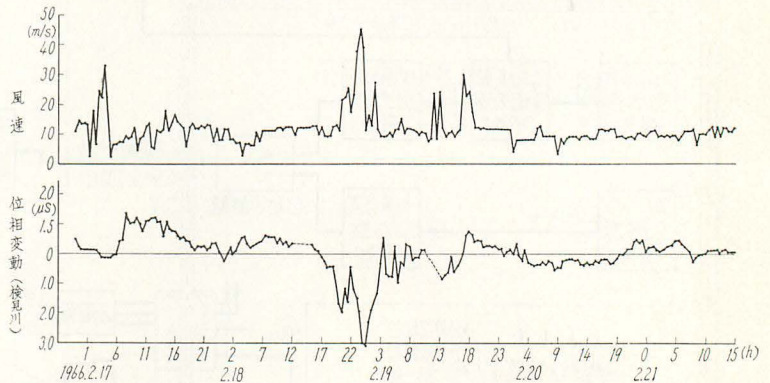
この標準器の短時間および長時間の周波数安定度は、測定の結果、標準偏差で  $2 \times 10^{-10}/\text{sec}$ 、 $1 \times 10^{-11}/\text{hour}$  およびほぼ  $5 \times 10^{-12}/\text{day}$  の値で長期連続運転 (6カ月) 後の結果では、水晶発振器の aging により誤差信号の振れが一方方向にかたより、出力周波数は初期設定値から  $2 \times 10^{-11}$  ほど低くなった。周囲の温度変化による周波数の変化率は約  $1 \times 10^{-12}/^\circ\text{C}$  である。電波を介しての長期間周波数安定度の測定結果を第3図に示す。



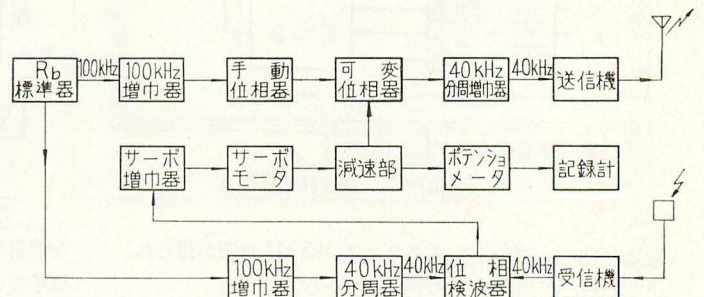
第3図 40 kHz 標準電波の長期間周波数安定度 (10.1~12.16) (周波数基準; 電波研究所周波数標準)

### 2.4. 送信系位相変動の抑圧

大電力長波標準電波を送信する場合、発射電波の位相が発振原器の位相に対して、ドリフト並びに変動を生じる現象はさげられぬものであり、その原因として、(1)風速の変化に伴う空中線素子の漂動、(2)ローディングコイルの温度変化、(3)降雨による空中線系の誘電率の変化、(4)塩害による空中線系への影響などが考えられ、筆者らの実験によると、(1)項に基づく位相変動が最も顕著である。すなわち空中線素子の主として水平部分 (24条) が、風圧によりその平均高さ、並びに大地に対する投影面積が



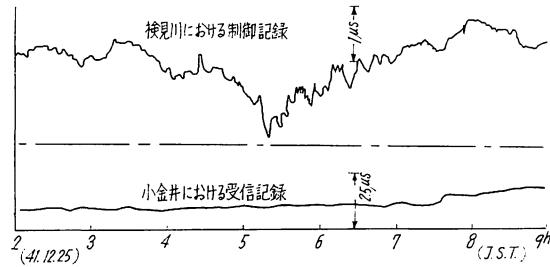
第4図 風速の変化と位相変動との対応を示す測定例



第5図 位相変動制御装置の動作系統図

により駆動して位相変動分を補償する方法を用いた。装置の構成を第5図に示す。

周囲の擾乱電磁界をさけるために屋上にループ空中線を設置し、この出力を原器室の平衡増幅器に導き、この出力と原器から分周した 40 kHz 出力との位相差を検出し、サーボモータ、レゾルバを駆動する。レゾルバの位相誤差は 0.01  $\mu$ s 以下、系全体の安定度は 0.1  $\mu$ s 以下である。サーボ系の応答特性は 1 $\mu$ s/min 以下の速さの変動に対しては 0.1  $\mu$ s 以内に制御できるが、ステップ状の変化に対してはわずかに overshoot が現われる。またさらに応答速度を上げるために、電子的方法を併用する制御機構について実験が進められている。第6図はこの装置を用いて得られた制御効果の1例を示したもので、送信系に生じた約 2  $\mu$ s の位相変化が受信地点ではほとんど現われぬほど抑圧されている。



第6図 位相変動制御効果の測定例

### 3. 受信特性

現在までに集積された記録によれば、国内における受信周波数精度は短波標準電波に比較して2~3桁向上し、受信電界も強勢でかつ安定である。次に距離別に実例を主にした受信について述べる。

#### 3.1. 近距離における受信

小金井市 (50km) 電波研究所周波数標準部の周波数標準を基準とした受信結果 (第1図参照) では、昼間における伝搬による位相変動は、測定精度 (0.1  $\mu$ s) 以下の桁である。夜間および日出没時には変動が現われ、受信空中線に、

- (1) 垂直空中線を用いた場合, 0.2  $\mu$ s (標準偏差)
- (2) 枠型空中線を用いた場合, 0.4  $\mu$ s ( )

したがって受信周波数精度  $\Delta f/f$  は1時間比較で、

昼間  $\pm 2 \times 10^{-11}$  以内

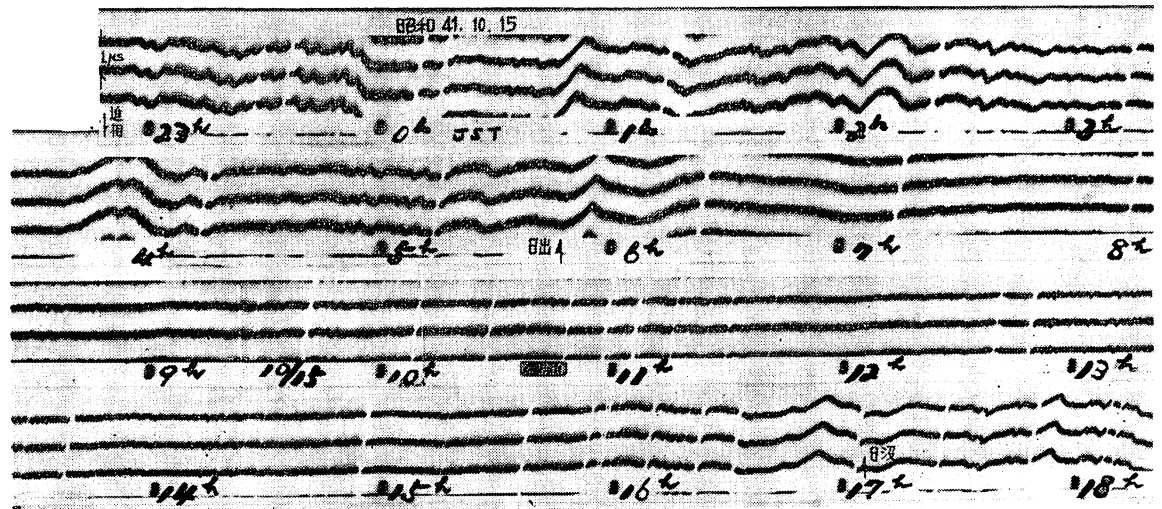
夜間 (1)で  $\pm 6 \times 10^{-11}$  以内, (2)で  $\pm 10 \times 10^{-11}$  以内

が得られ、いずれの場合でも5時間比較を行えば、 $\pm 2 \times 10^{-11}$  以内の精度で利用できる。

電界強度は平均 73dB であり、昼夜間の差は 1~2 dB にすぎない。

第7図は枠型空中線を用いた受信位相記録フィルムの一例であり、昼間と夜間の位相変動の差異が明瞭に読みとれる。

夜間および日出没時に現われる位相変動は、近距離においてもわずかではあるが空間波が影響していることを示し、受信空中線型式の違いによる変動量の差は垂直面



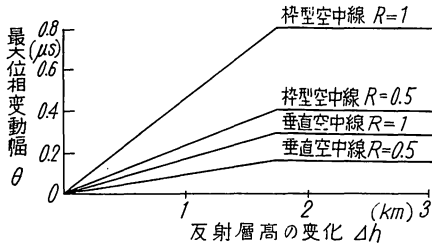
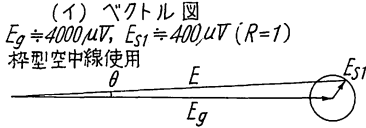
第7図 小金井における受信位相記録例 (枠型空中線)

指向特性の差に基づくものである。また昼間において位相変動が小さいことは下部電離層反射面の安定性を証明しているものと推察される。

電波の伝達を幾何光学的に取扱い、

$$E(\theta) = E_g + E_{s1}(\theta_1 \cdot R_1) \quad (1)$$

とすれば、第8図(イ)のベクトルと、電離層高の変化  $\Delta h$



(ロ) 位相変動量

第8図 50 km 地点におけるベクトル図と位相変動量

に対する最大位相変動幅(ロ)が求められる。ここで  $E$  は受信波強度を示し、 $E_g$  は地表波強度で計算式から求め、 $E_{s1}$  は送受信空中線の垂直指向性と空間波無減衰強度から求めた空間波強度であり、 $\theta_1$  は  $\Delta h$  により生ずる空間波の地表波に対する位相角で、 $R_1$  は電離層の反射係数である。

この距離で興味ある現象は、 $\Delta h$  が 1.7 km 以上変化しても、位相変動幅は波長との関係から同じ値を示すことである。例えば日没時の 10km 以上にもおよぶ  $\Delta h$  に対しても単に脈動的に変動するにすぎず、昼夜間の位相のレベル差は画然とは現われてこない。

### 3.2. 中距離における受信

400~500km 地点における  $E_{s1}$  の入射角は70度前後となるため、前項で示した受信空中線型式による差は判然としなくなる。一方、昼間と夜間の位相レベル差は比較的はっきりみられるようになる。

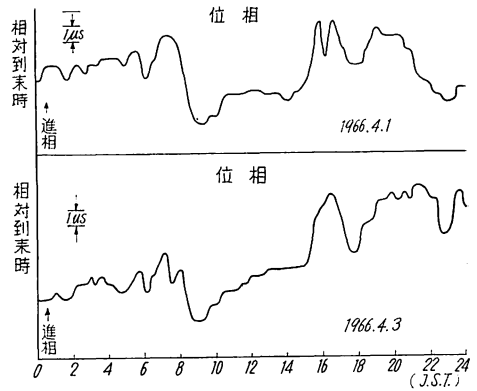
第9図および第10図は秋田市(455 km) 秋田電波観測所において受信した1例であり、

日没時の位相推移量は、平均 6  $\mu s$ ,

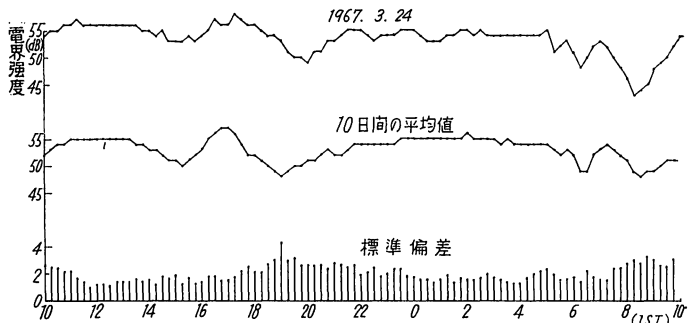
電界強度値は、平均 54 dB であり、日没時の干渉による低下量は 6 dB で昼間と夜間の強度差はみられない。

第11図に水沢市(390km) 文部省緯度観測所において受信された位相記録の1例を示す。

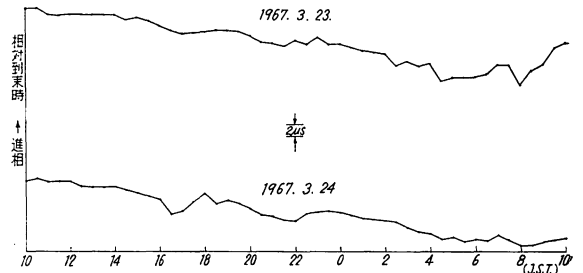
この記録において、10時から15時まで、30分ごとの位



第9図 秋田における受信位相記録例



第10図 秋田における受信電界強度記録例



第11図 水沢における受信位相記録例

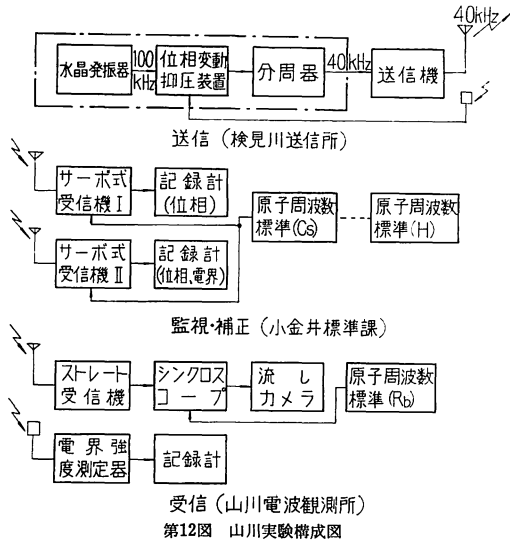
相の読みから標準偏差  $\sigma$  を求め、受信周波数精度を  $\sigma/T = \Delta f/f$  として求めた場合、5日間の平均値は、

$$\Delta f/f = \pm 3 \times 10^{-11} \text{ (資料数 5 日)}$$

が得られた。ただしこの値の中には受信用基準発振器の変動が含まれており、伝搬による変動は  $\pm 2 \times 10^{-11}$  以下と推定される。

### 3.3. 遠距離における受信

鹿児島山川町(1000km) 山川電波観測所において、第12図に示す構成により受信測定を行なった。すなわち受信用には Rb 原器を用い、送信用には間接的に Cs 原器を用い送信波の位相変動を補正するとともに、受信機器の位相安定度並びに記録の方法に検討を加え、測定精度を昼



第12図 山川実験機構成

間5時間比較で $\pm 1 \times 10^{-11}$ , 24時間比較で $\pm 0.4 \times 10^{-11}$ 以内に抑え測定を行なった。

3.3.1. 測定結果

第13図に記録の1例を, 第14図に受信位相並びに電界強度の期間中の平均と分散を示す。

電界強度は全般に地表波計算強度 (Norton) より高く, 平均45dBで, 夜間は昼間より平均4dB低く分散も大きい。日出没時は例外なく強度が低下し, ときには20dB以下に落ちこみ, 位相推移が不明になった個所も生じているが, 強度が30dB以下に低下した時間は全測定時間の3%弱にすぎない。

雑音強度は予想外に高く, 概略値で昼間35dB, 夜間42dBを示した。

受信位相は昼間は非常に安定であり, 夜間との位相のレベル差は平均18 $\mu$ sである。

3.2と同様にして, 10時から15時まで, 昼間5時間の受信周波数精度を求めると,

$$\Delta f/f = \pm 3 \times 10^{-11}$$

(資料数5日間)

が得られた。ただし第13図の3月22日は大きなSIDのため $\Delta f/f = \pm 11 \times 10^{-11}$ と精度は大幅に低下している。

第15図にSIDの際の位相変動記録と日出時において電界強度が低下したために位相推移が不明になった個所のフィルムを示す。

次に, 毎日の同時刻の位相の読みから24時間の受信周波数精度を求めると, 資料数6日間で,

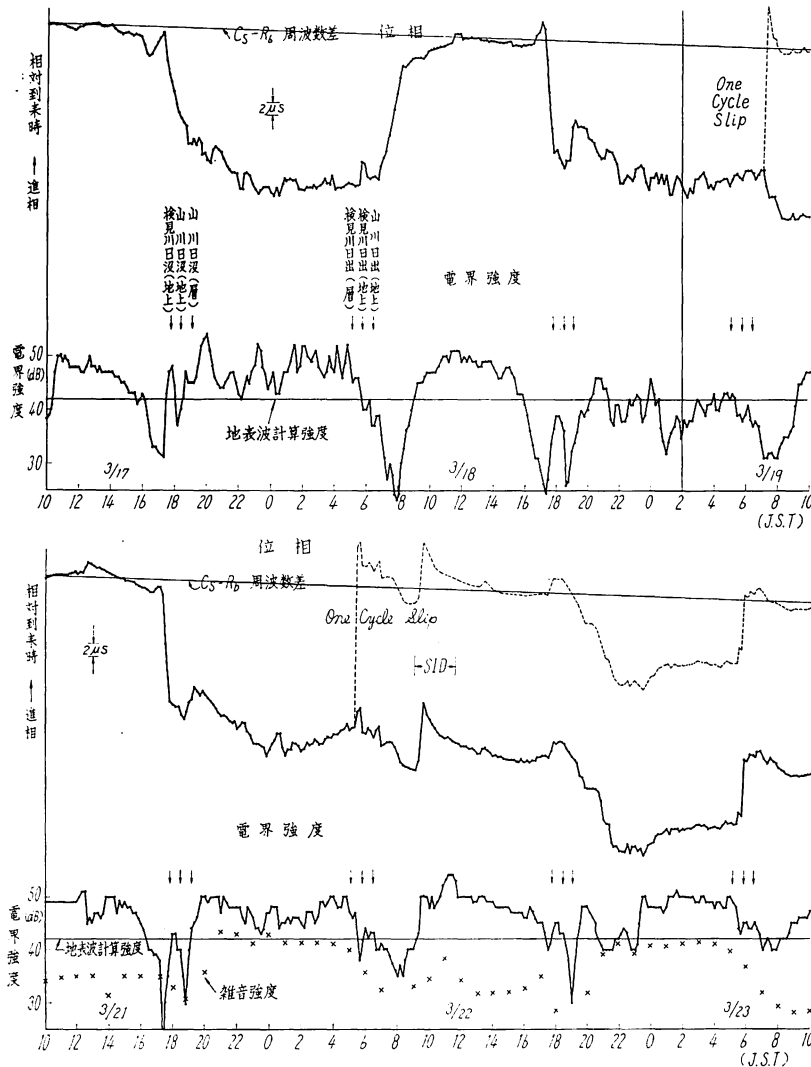
$$\text{昼間 } \Delta f/f = \pm 2 \times 10^{-11}$$

(9時~15時の平均)

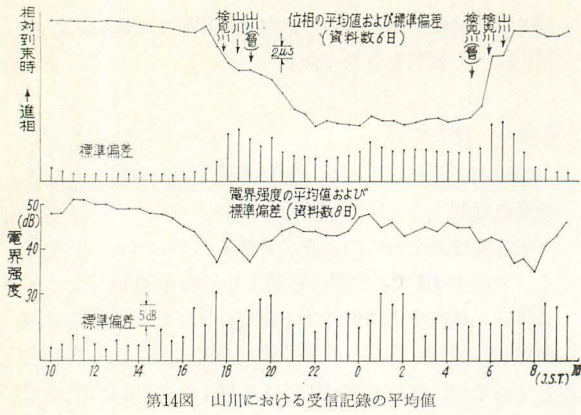
$$\text{夜間 } \Delta f/f = \pm 6 \times 10^{-11}$$

(22時~4時の平均)

が得られ精度が向上するとともに, 例えばSIDにみられるような反射層面の变化に伴



第13図(a)(b) 山川における受信記録例



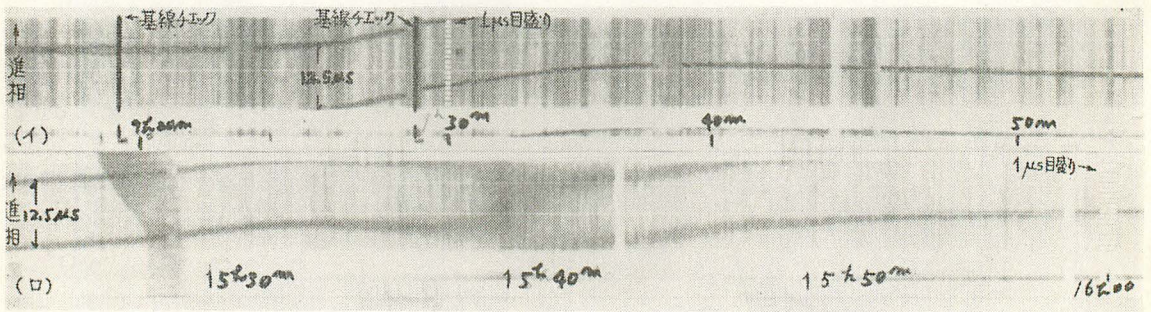
第14図 山川における受信記録の平均値

Rb 原器を基準にして受信した1例を第17図に示す。  
この図から、電界強度は夜間の方が昼間に比べて高い典型的なパターンを示し、位相も昼夜間とも安定なことが明瞭によみとれる。

4. 結 言

以上 40kHz 標準電波の送受信特性について述べたが、この電波を国内において、周波数較正のために利用する観点から結論すれば、

- (1) 送信周波数は  $\pm 5 \times 10^{-11}$  以内の精度に維持され、



第15図 山川における受信位相記録例 (イ) 3月22日, SIDによる位相変化記録 (ロ) 3月25日, 日出時の受信強度低下による位相推移不明記録

う影響も時間に比例して軽減される。ただし第13図でもみられるサイクルスリップが記録されたときはサイクル (25μs) を補正してある。

3.3.2. 山川における受信パターンについて

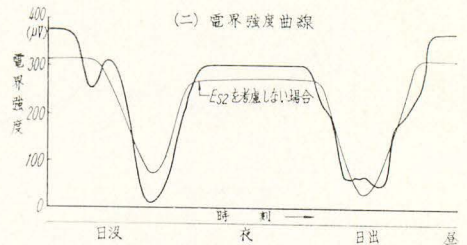
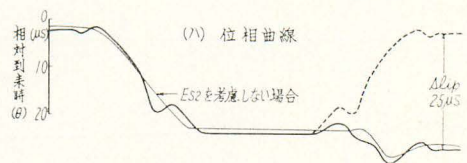
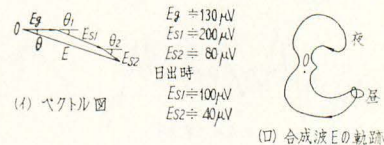
この地点では日没時における電界強度の落ちこみをみても、地表波と空間波強度がほぼ同程度と推定される。そこで(1)式と同様の方法で、2回反射波も考慮して、

$$E(\theta) = E_0 + E_{S1}(\theta_1 \cdot R_1) + E_{S2}(\theta_2 \cdot R_2) \quad (2)$$

とすれば第16図が得られる。ただし層高は昼間 72km, 夜間 86km,  $R_1 = 0.7$ ,  $R_2 = 0.3$  で日出時のみ  $R_1 = 0.35$ ,  $R_2 = 0.15$  と仮定してある。すなわち、 $E$  の軌跡が原点  $O$  を含む場合は、反射層高は前日と同じ位置にあっても、位相は  $360^\circ$  (25μs) 異なった位置に記録される。第16図(イ)は(イ)のベクトルから求めた位相の推移であり、点線は反射係数  $R$  が変化しない場合の正常の型を示している。また  $E_{S2}$  の影響による脈動も実際の記録と比較的よく合っている。

3.4. 外国における受信例

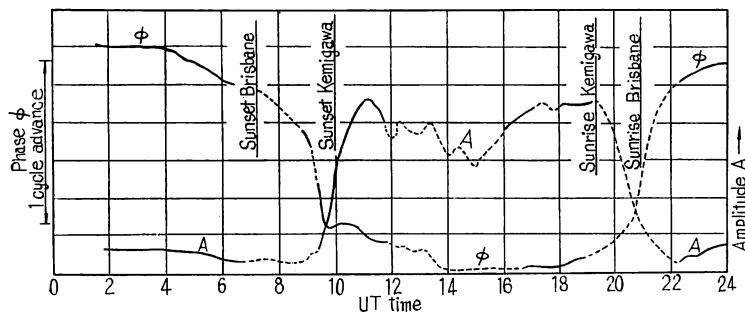
オーストラリアの Brisbane (6770 km) において、



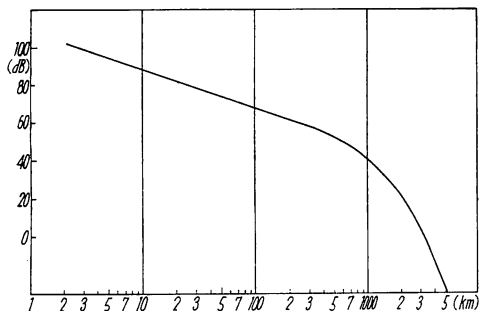
第16図 1000 km 地点のベクトル, 位相, 電界強度

1日あたりの平均周波数の差は  $\pm 1 \times 10^{-11}$  以内に保たれている。

(2) 空中線輻射電力は約 1 kW であり、水平面の指向性は無指向である。



第17図 オーストラリアにおける受信位相記録例



第18図 40 kHz 波, 地表波電界強度 (陸上伝搬)

(3) 受信電界強度の平均値は第18図に示す地表波計算強度によく合致する。

(4) 昼間の受信位相は非常に安定であり, 送信側の変動を含めても, 1時間で $\pm 1 \times 10^{-10}$ 以上の周波数比較が可能である。

(5) 比較時間を長くすれば精度はさらに向上して, 昼間相互の24時間比較では $\pm 2 \times 10^{-11}$ 以上の精度が得られる。

(6) 中・遠距離地域の日出没時前後は, 利用を避けるのが望ましい。

謝 辞

開局以前からご協力をいただいている防衛庁ならびに電々公社関係各位に, またご指導をいただいた湯原調査部長, 佐分利周波数標準部長, 村松前標準課長, 鈴木標準電波課長, ならびに実験に協力をいただいた当所秋田,

山川両電波観測所, 周波数標準部, 文部省水沢緯度観測所の各位に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 小川徹; “電波伝ぱんにおける周波数変動” 電波伝ぱん研究専門委員会資料, 昭33. 12.
- (2) 飯島ほか; “Frequency Change due to Doppler Shift in WWVH Signals as Received at Tokyo”, Tokyo Astro. Bul., No. 106, 125.
- (3) 前原ほか; “標準電波の電離層伝ぱんにおける周波数変動について”, 電波研季報, 5, No. 21, Oct., 1959.
- (4) 中村幸三郎ほか; “電離層伝ぱん波の周波数変動に関する一実験結果”, 電波研季報, 8, No. 34, January, 1962.
- (5) 佐分利義和; “周波数標準としての原子時計”, タケダ理研技術ジャーナル, 5, No. 1.
- (6) David H. Andrews; LF-VLF Frequency and Time Services of the National Bureau of Standards”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement IM-14, No. 4, December, 1965.
- (7) J. R. Wait; “The Geometrical Optics of VLF Sky Wave Propagation”, Proc. IRE., Sept. 1957.
- (8) J. A. Pierce; “International Frequency Comparison by VLF”, Proc. IRE., 45, No. 6, 794, 1957.
- (9) 東 吉夫; “VLF (NPG/NLK) 電波の位相測定結果” 電波研季報, 11, No. 56, Sept. 1965.
- (10) 下部電離層物理学特集, 電波研季報, 12, No. 63, Nov. 1966.
- (11) “長波標準電波受信装置”, 電気学会技術報告 (1部), 第80号, 昭42. 6.
- (12) 周波数標準資料第1集, 昭41. 12.

