

4. 長波標準電波 (JG2AS/JJF-2) による供給

本間 重久* 斎藤 義信**

1. ま え が き

長波帯における電波伝搬は、波長が長いので地表波の減衰が少なく、空間波も、最も安定している最下部電離層 (D層) で反射するため周波数、強度ともに安定である。

受信波による周波数比較精度は、短波標準電波の場合電離層の変動に起因するドップラ効果により $10^{-7} \sim 10^{-8}$ であるのに対し、長波標準電波は数千 km の遠距離でも 24 時間比較で 10^{-11} と高精度比較が得られる⁽¹⁾。これらの理由から標準周波数の安定な供給源としてのみならず、国際間の周波数相互比較等にも利用されている。時刻信号は送受信系とも周波数帯域が狭いため、高精度な時刻比較は望めないが数 ms の時刻比較精度が常時得られる。

当所においては、昭和 41 年 1 月から長波標準電波の実験局 (JG2AS) として、千葉県千葉市の電電公社検見川送信所より 40 kHz の送信 (ふく射電力、約 1 kW) を開始した。実験局は海岸局 (JJF-2) と発振器及び送信施設を共用する二重免許の局で、海岸局通信の空き時間に運用され、いずれも標準周波数で送信された。実験局の送信形式は 500 ms 断続の 1 Hz 信号である。また、アンテナなど送信系の変動に起因する送信位相の変動は、サーボ式位相制御装置により補償され、常に安定した標準周波数を供給した^{(2) (3)}。

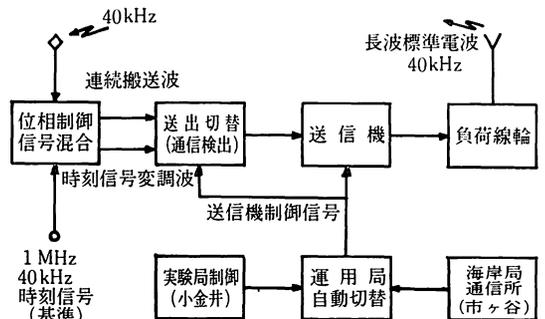
発振器に当初ルビジウム周波数標準器を用いたが、昭和 45 年 11 月よりセシウム周波数標準器を採用し、常時 1×10^{-11} の周波数精度が得られるようになった。また、同時に 500 ms マークの立ち上がりが UTC(RRL) に同期した時刻信号の送信も開始した。送信時間は当所 9 時から 15 時 (日曜日を除く) であったが、昭和 48 年 1 月より 8 時 30 分から 17 時に延長された。

検見川送信所からの送信は 11 年間継続されたが、昭和 52 年 11 月送信所の移転に伴い、茨城県猿島郡三和町の電電公社名崎送信所から短波標準電波 JJY 局とともに送信されるようになった。新送信所においては送信アンテナ系に自動同調装置が導入され、位相とともにふく射電力の安定化も図られ、また、24 時間連続送信となり夜間利用も可能になった。

2. 送信スケジュールと諸元

長波標準電波の実験局は海岸局と送信施設を共用し、海岸局通信が 2 分間以上休止したときに切り替わり運用される。本文では以降両者を含め長波標準周波数局及び長波標準電波として取り扱う。

第 1 図に長波標準電波送信系統図、第 1 表に長波標準



第 1 図 長波標準電波送信系統図

第 1 表 長波標準周波数局の諸元

呼出符号及び無線局の種類	JJF-2	JG2AS
	海岸局	実験局
送信所	茨城県三和町 電電公社名崎無線送信所	
緯度・経度	北緯 36°11'・東経 139°51'	
空中線の形式	逆 L 型、無指向性	
ふく射電力	約 1 kW (推定値)	
電波の型式	A1 モールスコード	A1 1 Hz ※1
運用時間	常時	常時 ※2
標準周波数	40 kHz	
周波数と時間間隔の精度	1×10^{-11}	
計測・制御		東京・小金井 郵政省電波研究所

※1 500 ms 幅マーク、スペースの時刻信号でマークの立ち上がりを正秒とする。
※2 海岸局通信を優先し、その空き時間に運用される。

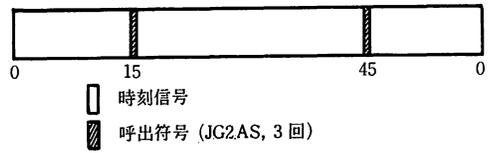
*周波数標準部 標準電波課 **企画部 第二課

周波数局の諸元を示した。送信アンテナは高さ 90 m の鉄塔 6 基に展張した、水平部 200 m (エレメント 16 条) の逆 L 形で無指向性である。第 2 図にアンテナの平面図及び側面図を示した。アンテナの実効容量及び実効インダクタンス (計算値) は、それぞれ 10400 pF, 160 μH でこれを送信周波数の 40 kHz に共振させるために約 1.3 mH の負荷線輪が用いられている。送信機出力は 10 kW であるが、負荷線輪の導体抵抗及びアンテナ接地抵抗等の損失により、ふく射電力は約 1 kW である。

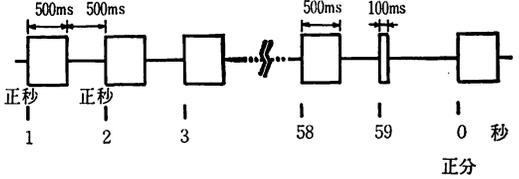
送信される電波は風雨などの気象条件によるアンテナの対地間容量の変化、送信機の調整などにより送信位相及びふく射電力が変動する。位相に対しては、セシウム周波数標準器の示す位相を基準にして送信位相の変動を検出し、比例及び積分型を併用した位相制御装置により、その変動を最大でも ±0.1 μs 以内に抑えている⁽³⁾。一方、ふく射電力の変動に対しては、アンテナに給電する電流と電圧の位相差を検出して上記負荷線輪のインダクタンスを可変し、常に 40 kHz に共振させる自動同調装置により変動を約 1 dB 以内に保っている。

実験局の送信スケジュールと分秒時刻表示法を第 3 図に示した。実験局時刻信号は第 3 図(b)のように 500 ms 幅のマーク、スペースにより、そのマークの立ち上がりが UTC(RRL) に同期している。また、分予告は 59 秒の秒信号を 100 ms 幅にして表示し、次にくる秒信号の

(a) 1 時間中の送信スケジュール



(b) 秒及び分の表示



第 3 図 送信スケジュールと時刻表示法

立ち上がりが正分を示す。

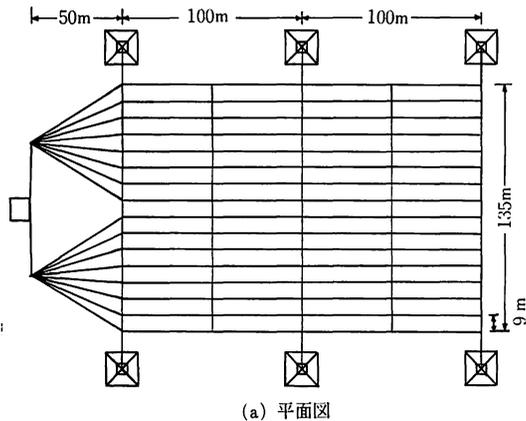
3. 受信利用法と比較精度

3.1 受信アンテナ

長波帯における空中雑音は短波帯に比べ大きいので、受信アンテナを大形にして受信感度の増大を図ってもこれに比例して雑音出力も増加するため効果が少なく、一般的には数 m から十数 m の垂直アンテナ、あるいは、実効高数 mm から数 cm のループアンテナが用いられる⁽⁴⁾。

3.1.1 垂直アンテナ

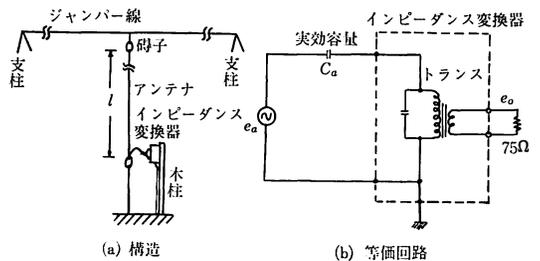
垂直アンテナは比較的大きな実効高が得られるが、アンテナの一端は接地を必要とし、また、アンテナ高を大きくする場合は木柱、鉄塔などの建設が必要となる。第 4 図に垂直アンテナの一例とその等価回路を示した。等価回路にはこのほかに抵抗及びインダクタンスが含まれるが、実効容量に比べそのインピーダンスが非常に小さいので省略した。垂直アンテナの一種に、垂直部の上部に水平部を持つ逆 L 形アンテナ及び T 形アンテナ、あるいは、単に斜めに張った傾斜形アンテナなどがある。アンテナの実効高は第 4 図のような垂直アンテナと傾斜形アンテナではその高さの 1/2、逆 L 形アンテナ及び T 形アンテナでは水平部を十分長くすれば、ほぼ垂直部の高さと同じになる。アンテナエレメント長 l (m) に対す



(a) 平面図

(b) 側面図

第 2 図 送信アンテナの構成図



(a) 構造

(b) 等価回路

第 4 図 垂直アンテナ

る実効容量 C_a の概算値及びアンテナに誘起される信号電圧 e_a は次式で求められる。

$$C_a \approx 6l \quad (\text{pF}) \quad \dots\dots(1)$$

$$e_a = H_a E \quad (\mu\text{V}) \quad \dots\dots(2)$$

H_a : アンテナの実効高 (m)

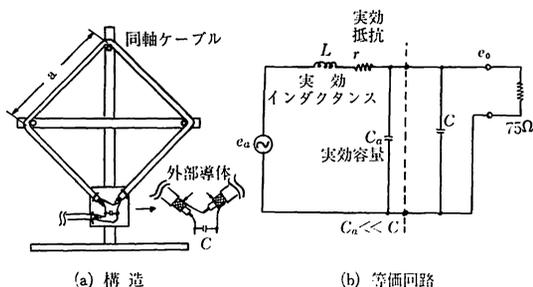
E : 受信電界強度 ($\mu\text{V}/\text{m}$)

アンテナエレメント長 l とは垂直部と水平部を合計したものである。垂直アンテナはインピーダンスが高いため、給電線 (同軸ケーブル) のインピーダンスに変換して受信機に接続される。このインピーダンス変換にオペレーショナルアンプ又はトランジスタアンプ等を用いると e_a と同じ信号電圧を得ることができるが、設置場所が屋外の場合が多いので外気温変動の影響、回路の電源供給などの問題があり、一般的には第4図に示すような整合トランスによるインピーダンス変換が行われる。この場合 C_a による電圧降下と整合トランスの巻線比により出力電圧 e_0 が $e_0 = K e_a$ となったとすると、実効高 H_a も出力側から見ると $H_0 = K H_a$ となり、垂直アンテナの実効高はこの給電線インピーダンスに対する H_0 で表すことが多い。

例えば、高さ 10 m の垂直アンテナの場合、実効容量 C_a は(1)式から 60 pF となり、このインピーダンスは 40 kHz で約 66 k Ω となる。これを整合トランスで出力インピーダンス 75 Ω に変換すると $K \approx 0.02$ 、 $H_0 \approx 10$ cm となり、したがって、受信電界強度 60 dB のときのアンテナ出力 e_0 は約 100 μV 、また、水平部 20 m、垂直部 10 m の逆し形アンテナでは $H_0 \approx 40$ cm、 $e_0 \approx 400$ μV になる。

3.1.2 ループアンテナ

ループアンテナの実効高は垂直アンテナに比べて大きくとることは難しいが指向性を持つので、設置場所周辺からの人工雑音の影響を軽減することができ、アンテナインピーダンスも低くとれる。また、アンテナ接地の必要がなく設置場所も比較的自由となる。第5図にループアンテナの一例とその等価回路を示した。一辺が a (m) の方形ループアンテナの実効インダクタンス L 、



第5図 ループアンテナ

実効高 H は次式のように表される。

$$L = k a^2 N^2 \quad (\mu\text{H}) \quad \dots\dots(3)$$

$$H = 2\pi a^2 N / \lambda \quad (\text{m}) \quad \dots\dots(4)$$

N : 巻数 λ : 波長 (m)

k はアンテナの形状で決まる定数で一辺の長さに比べ巻線の断面寸法が十分小さいときは 3~5 の値である。40 kHz の場合波長は 7500 m であるから (4) 式は $H = 0.84 a^2 N / (\text{mm})$ になる。なお、アンテナに誘起する信号電圧 e_a は、(2)式と同様 $e_a = H E$ として求められる。

アンテナインピーダンスはほぼ、巻数の二乗に比例して増大するので、実効高を大きくするには面積 (a^2) を大きくする方が得策である。ループアンテナは一般にコンデンサ C を並列に接続して、同調をとって用いられるが、この場合インピーダンス及び実効高は等価的に Q 倍となる⁽⁴⁾。しかし、この同調回路の良さを表す Q をあまり大きくすると位相安定度が悪くなるので、実効インダクタンスの大きさを制限して Q は 10 以下にとることが望ましい。

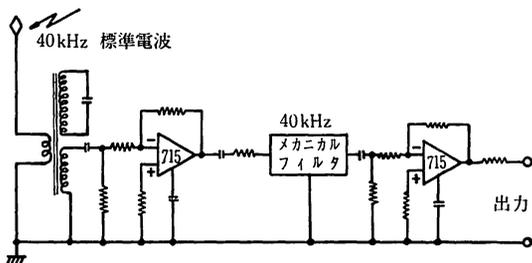
第5図(a)に示した例は同軸ケーブル (3C2V) を用いた2回巻方形ループアンテナで、一辺が 1 m のときの実効インダクタンス及び実効高は(3)、(4)式からそれぞれ 20 μH ($k=5$)、1.7 mm になる。これにコンデンサ C (0.7 μF) を接続して 40 kHz に同調をとり 75 Ω 負荷を接続すると実効 Q は実測で約 4 になり、等価実効高は 6.8 mm になる。なお、このときのアンテナインピーダンスは約 25 Ω であった。40 kHz の波長は 7500 m と長いので、それほど正確なインピーダンス整合の必要はなく、そのまま同軸ケーブル (75 Ω 又は 50 Ω) に接続できる。

3.2 受信機の種類と選択

周波数比較用受信機は大別すると、標準電波の受信アンテナ出力を増幅し、そのまま利用するストレート (直接) 式のもの、サーボループを形成して位相比較を行うサーボ式とがある。

3.2.1 ストレート式受信機

ストレート式受信機は第6図に示すようにフィルタと増幅器だけの簡単な構成で自作も容易である。受信アン



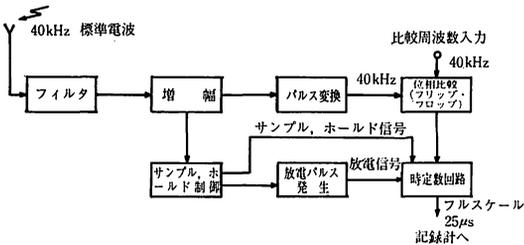
第6図 ストレート式受信機の回路例

テナの 40 kHz 出力をそのまま増幅するもので、帯域フィルタ (100 Hz ~ 1000 Hz) 及び利得 100 dB 前後の低雑音増幅器が用いられる。この受信機の狭帯域形は 10^{-8} ~ 10^{-10} 程度の周波数較正に、また、広帯域形は時刻比較に適している。

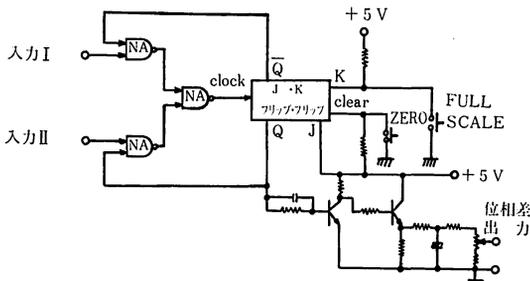
3.2.2 フリップ・フロップ式位相比較受信機⁽⁵⁾

フリップ・フロップ式位相比較受信機はストレート式受信機とフリップ・フロップ式位相計を組み合わせたもので、第7図に受信機の構成を示した。第8図にフリップ・フロップ式位相計の回路例を示す。位相比較出力は時定数回路で送信内容 (秒信号とモールス信号) による誤差が補正され、ローカル標準周波数との位相差に比例した直流電圧で記録される。記録のフルスケールは 40 kHz の 1 周期、25 μ s である。この誤差の補正方法は、キャリアのスペース時に同期して時定数回路の出力電圧をサンプルホールドするとともに、マークの立ち上がり時に時定数回路のコンデンサをいったん放電させるなどの工夫がなされている。

フリップ・フロップ式位相比較受信機は雑音レベルの増加に伴って同相付近での分解能の低下を生ずる欠点があるので、遠距離受信には適さないが、送受信距離約 450 km での受信実験において、24 時間の位相比較で $\pm 2 \times 10^{-11}$ の周波数比較精度が得られている。



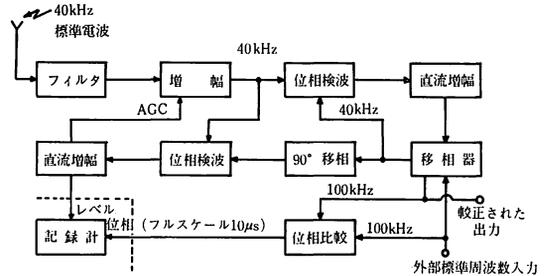
第7図 フリップ・フロップ式位相比較受信機の構成



第8図 フリップ・フロップ式位相計の一例

3.2.3 位相追尾式受信機 (サーボ式)

位相追尾式受信機は第9図に示すように、受信した標準電波の位相とローカル標準周波数の位相を比較し、両者の位相が常に一致するように移相器でローカル標準周



第9図 位相追尾式受信機の構成

波数の位相を制御する。位相制御される前後の 100 kHz の位相が第8図のようなデジタル式位相比較器で比較されその結果が記録される。したがって、記録計のフルスケールは 10 μ s となる。

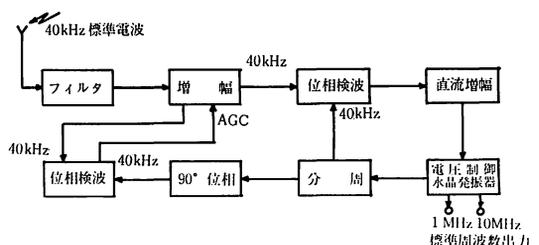
この受信機は他の方式に比べ高価であるが雑音に強く、標準電波のレベルが雑音レベル以下になっても高精度な周波数比較ができるので、高安定度の水晶発振器及び原子周波数標準器等の遠距離での周波数比較、あるいは、高精度を必要とする業務用に適している。

3.2.4 位相引込 (PLL) 式受信機 (サーボ式)

位相引込 (PLL) 式受信機は第10図に示すように内蔵水晶発振器の発振周波数を、受信した標準電波の周波数と位相同期させるもので、発振周波数の制御方法に定立式と無定立式とがある。

定立式は位相差に相当した直流誤差電圧を可変容量ダイオードに印加し、発振周波数を制御するもので、電波が中断すると発振器の位相ロックがはずれ自走してしまうが、回路が比較的簡単で安価にできる。

これに対し無定立式は、この直流誤差電圧でサーボモータなどを用いて周波数調整用コンデンサの容量を変化させ、発振周波数を制御するもので、電波が中断してもそのときの発振周波数を維持し、定立式よりも安定した標準周波数が得られる。しかし、いずれにしても位相引込式は内蔵発振器の安定度からサーボ系の時定数をそれほど大きくとることができないので、雑音レベルが増加すると周波数安定度が劣化する。しかし、ローカル標準発振器を持たなくとも、較正された標準周波数が直接得られるので、周波数カウンタの較正などに適している。



第10図 位相引込式受信機の構成

3.3 比較測定法

3.3.1 直接位相比較法

ストレート式受信機の出力をオシロスコープの垂直入力端子へ、また、比較発振器の周波数を 40 kHz の整数分の 1 まで分周し、その出力を外部トリガ端子へ入力する。受信波形の 1 サイクルあるいは 1/2 サイクル分を管面上に表示させて観測し、その位相シフト量と経過時間から周波数偏差を求める方法である。なお、管面上の波形のゼロクロス部分を連続撮影して、その軌跡から長時間平均で周波数偏差を求める方法もあり⁽⁴⁾、比較的高精度な周波数比較ができるが、特殊な撮影装置を必要とし処理が煩雑なことが欠点である。

比較発振器の周波数偏差 $\Delta F/F$ は次式のようにして求められる。

$$\Delta F/F = (\phi_{t2} - \phi_{t1}) / (t2 - t1) \quad \dots\dots(5)$$

$\phi_{t2} - \phi_{t1}$; 波形の移相量 (S)

$t2 - t1$; 経過時間 (S)

例えば、40 kHz の波形が 1 分間に 5 μ s 左方向に移動したとき、比較発振器の周波数偏差は $\Delta F/F = -5 \times 10^{-6} / 60 = -8.3 \times 10^{-8}$ と求められる。

周波数比較精度は受信波形の位相読取精度と平均化(観測)時間によって決まり、日中で位相読取精度を 1 μ s とすれば、平均化時間 100 秒で 10^{-8} 、3 時間(約 10⁴ 秒)では 10^{-9} が得られる。

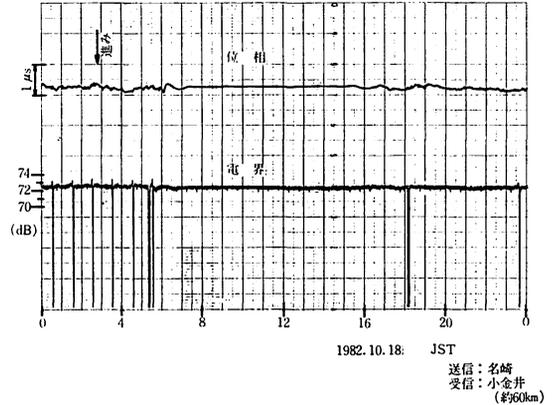
3.3.2 位相記録による比較法

位相追尾式受信機あるいはフリップ・フロップ式位相比較受信機の位相記録データから前項と同じように、その位相シフト量と経過時間から周波数偏差を求める方法である。記録データからは、伝搬上の日周位相変動や、急始電離層擾乱(SID)を原因とするような突発的な位相変動を判別し取り除くことができるので、測定結果に信頼性も得られ、高精度比較にはほとんどこの方法が用いられる。

3.4 受信実験例

40 kHz 標準電波は地表波と、電離層(D層)で反射して伝搬する空間波との合成波として受信される。200 km 以内の近距離では、電離層反射係数が小さいので空間波は減衰し、ほとんどが地表波として受信される。800 km 付近で地表波と空間波の強度がほぼ同じになり、数千 km 以上になると空間波のみが受信される。受信実験はこれまで約 1000 km までの数地点で行われ、その結果を近距離(200 km 以内)、中距離(200~700 km)、遠距離(700 km 以上)に分けて述べる。なお、受信例における周波数比較精度は測定データの標準偏差で表している。

3.4.1 近距離受信例

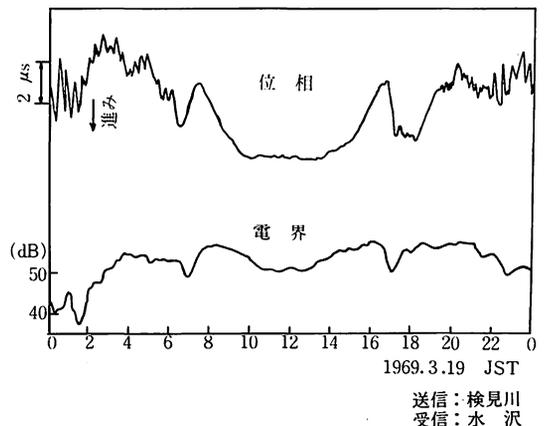


第 11 図 近距離受信例

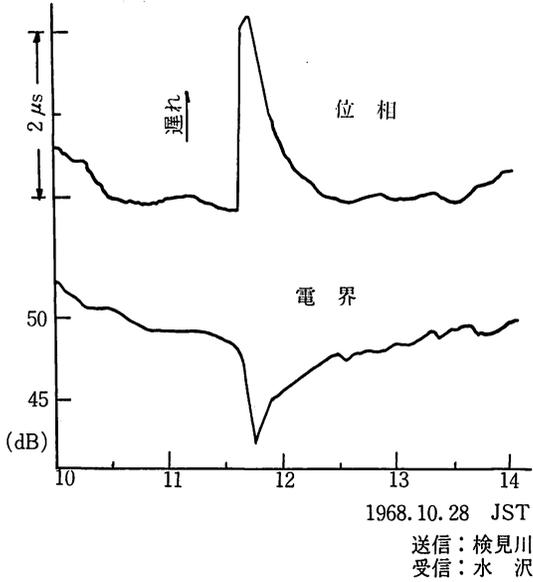
当所、小金井(約 60 km)における受信例を第 11 図に示した。この地点では電離層入射角が小さいので、日中は電離層での減衰が大きく、空間波強度は地表波よりおよそ 35 dB 低い。それゆえ、電界強度、位相ともに非常に安定している。夜間は空間波強度が増加し、電界強度及び位相に変動がみられるが、受信位相の変動幅は最大でも $\pm 0.4 \mu$ s 程度である。周波数比較精度は昼間の 2 時間比較で $\pm 1.5 \times 10^{-11}$ 、24 時間比較で $\pm 1.5 \times 10^{-12}$ であり、夜間はそれぞれ $\pm 3 \times 10^{-11}$ 、 $\pm 3 \times 10^{-12}$ である。

3.4.2 中距離受信例⁽⁶⁾

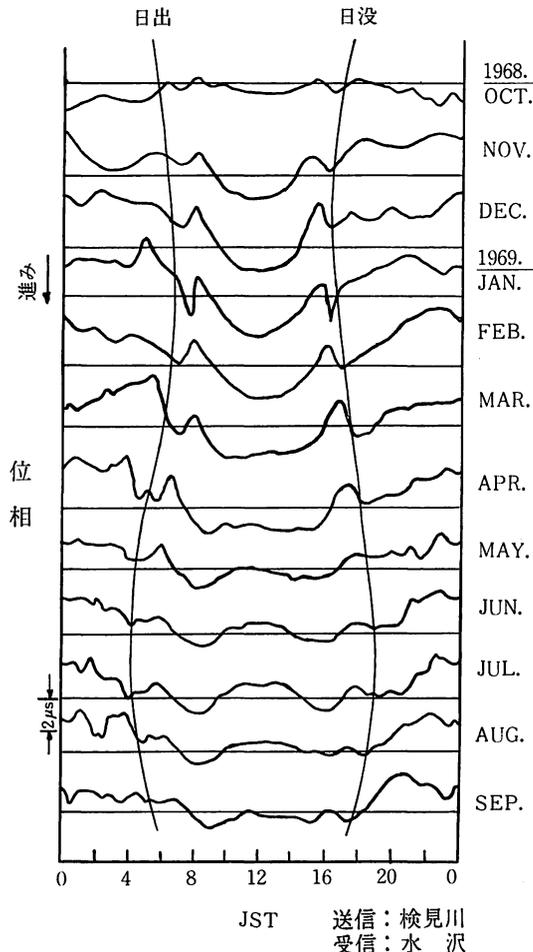
第 12 図に岩手県水沢市(約 400 km)における受信例を示した。この地点における電界強度は地表波が約 55 dB、空間波は 47 dB 前後である。受信位相は、日中はゆっくりとした変化で比較的安定しているのに対し、夜間は 10 分ぐらいの周期で 1~2 μ s 絶えず変化している。また、急始電離層擾乱(SID)が起これると、第 13 図に示すように大きな変動を生ずることもある。



第 12 図 中距離受信例



第13図 急始電離層擾乱の一例



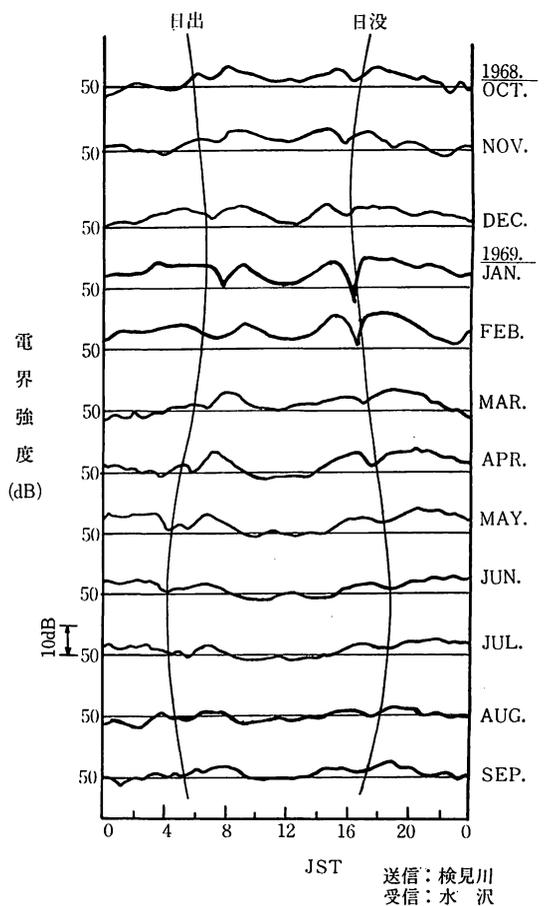
第14図 位相の月別日周パターン

第14, 15図に水沢における受信位相と受信電界強度の各月別の平均日周パターンを示した。日中の位相変動幅は冬が一番大きく約 $6 \mu s$ 、秋は小さく約 $2 \mu s$ である。電界強度は、冬は 55 dB 前後と高くなるが、変動幅は約 10 dB と大きい。夏は 50 dB 前後と低下するが変動幅は約 5 dB と少なくなる。

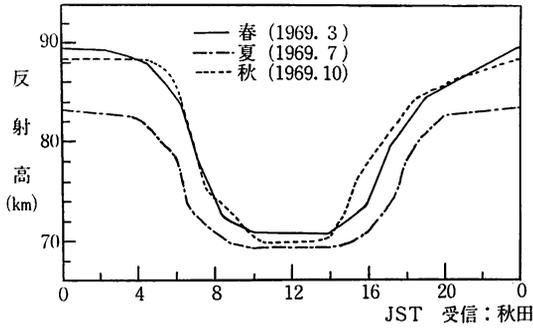
第16図は反射層高の日周変化を受信位相より求めたもので⁷⁾、昼夜間の層高変化は夏は少なく約 13 km 、ほかの季節は約 20 km である。

中距離地域における位相及び電界強度の日周パターンは、空間波と地表波の伝搬通路差による相対位相関係で距離によって著しく違ってくる。第17図は水沢と、地表波に対する空間波の位相関係がほぼ逆になる秋田市内(約 450 km)における電界強度測定例である⁷⁾。遠距離になるとこのような条件を生ずる2地点間の距離が 400 km 以上にもなり、また、近距離では空間波レベルが低いので、中距離地域以外ではこのような日周パターンの違いは顕著に現れない。

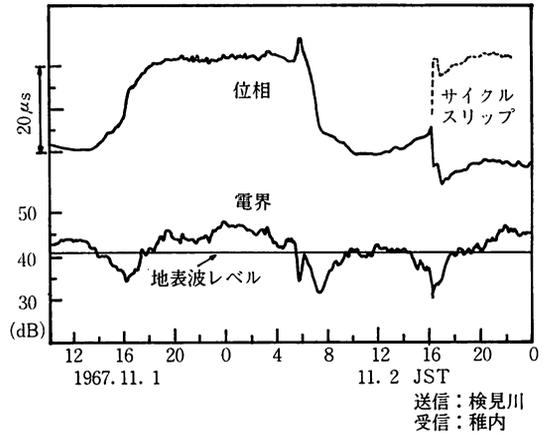
第18図に水沢における24時間平均の周波数比較精度



第15図 電界強度の月別日周パターン



第16図 推定等価反射高の日周パターン

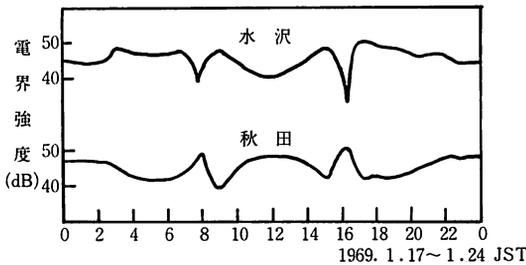


第19図 遠距離受信例

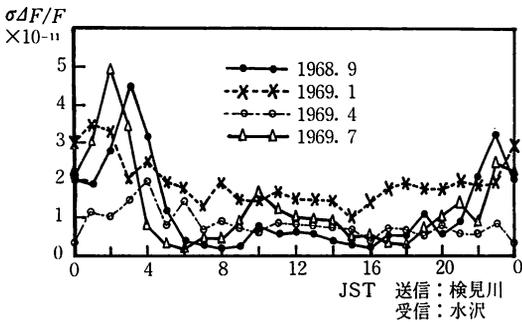
のシフトが現れない。後者の現象をサイクルスリップといい、1000 km 前後の地域では比較的頻繁に起こるので、周波数比較の際は注意する必要がある。

周波数比較精度は昼間の3時間比較で $\pm 1 \times 10^{-10}$ 、24時間比較で $\pm 2 \times 10^{-11}$ 、また、夜間は $\pm 3 \times 10^{-10}$ 及び $\pm 3 \times 10^{-11}$ が得られている。これらは季節的に比較的安定な春及び秋における受信結果なので、冬季はこれよりも多少悪くなると思われる。

第20図は新送信所(名崎)からの受信距離に対する陸上伝搬の地表波強度を示したもので、受信電界強度はこれに第2表で示した空間波が合成されたものとなる。同表の空間波の位相変動幅は昼夜間での電離層反射高の



第17図 水沢, 秋田の電界強度の日周パターン

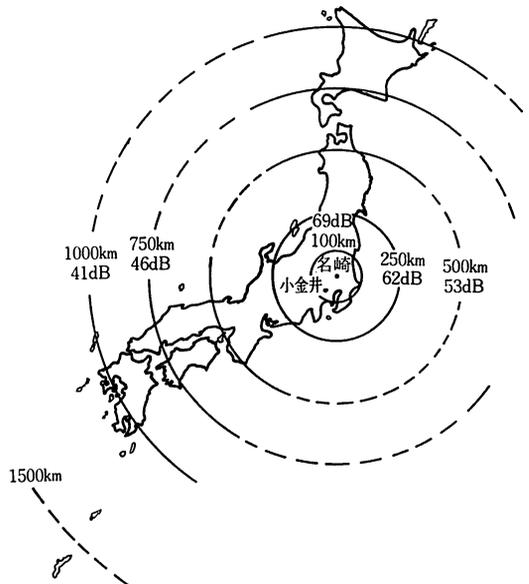


第18図 中距離における24時間周波数比較精度

の季節による違いを示した。季節別にみると春、秋が比較的良く、昼間の24時間比較で $\pm 0.6 \sim 1 \times 10^{-11}$ を示しており、冬は $\pm 1.3 \sim 1.7 \times 10^{-11}$ に低下する。夜間は悪いが $\pm 5 \times 10^{-11}$ 以内の比較精度は得られている。

3.4.4 遠距離受信例⁽⁹⁾

第19図に北海道稚内市(約1100 km)における受信例を示した。地表強度は計算値で41 dB に対し、空間波強度は44 dB 前後となり、地表波強度より大きくなり始める距離である。空間波の昼夜間の伝搬通路差が約一波长7.5 km あるので、日出、日没時に空間波の位相は地表波を基準にして約360度回転する。その際、空間波強度が地表波よりも強いときは、第19図の上左側にみられるように約25 μsの位相シフトを生ずるが、空間波強度が地表波よりも弱くと右側のように昼夜間で位相



第20図 新送信所(名崎)からの受信距離と地表波強度

第2表 40 kHz 地表波及び空間波の距離特性

受信距離	地表波強度 計算値 ($\sigma = 3 \times 10^{-3}$)	空間波強度 (概算値)	空間波の位 相変動幅
100 km	69 dB	36 dB	113 μ s
250	62	42	73
500	53	47	43
750	46	45	31
1000	41	44	26
1500	32	42	22

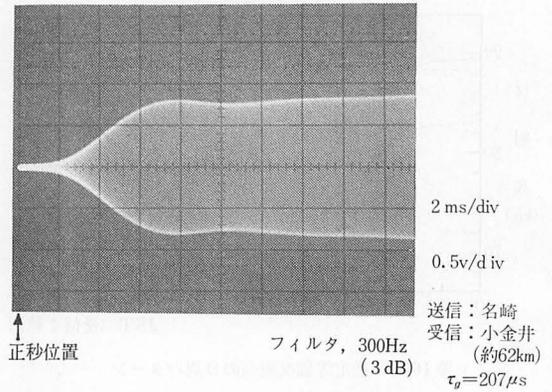
(空間波は1回反射)

差を 20 km として算出した。

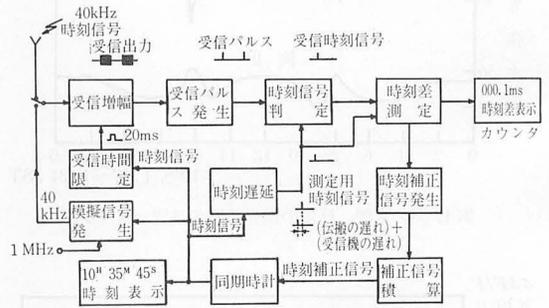
3.5 自動同期時計の試作⁽⁹⁾

40 kHz 標準電波の時刻信号は、送信系が狭帯域なため、波形は第21図に示すように立ち上がりに約 2.5 ms を要している。一方、受信側においても出力信号の C/N 比を良くするために狭帯域のフィルタを用いるので、その立ち上がり時間は更に増加する。第22図は 3 dB 帯域約 300 Hz のフィルタを用いた受信機の出力波形で、立ち上がり時間は約 3.5 ms となっている。この時刻信号による時刻比較精度は、受信した時刻信号の立ち上がり波形をオシロスコープで観測する方法で 1 ~ 3 ms が得られる。

第23図は当所で試作した 40 kHz 標準電波による自動同期時計装置の構成図である。受信した信号には時刻信号のほか、モールス符号のときもあり雑音も含まれている。この中から時刻信号を識別する方法として、受信信号の立ち上がり点と装置内時計の時刻信号(秒信号)とが続けて 5 秒以上 ± 100 ms 以内で一致し、かつ、マーク時間が 500 ms であることを比較測定して時刻信号

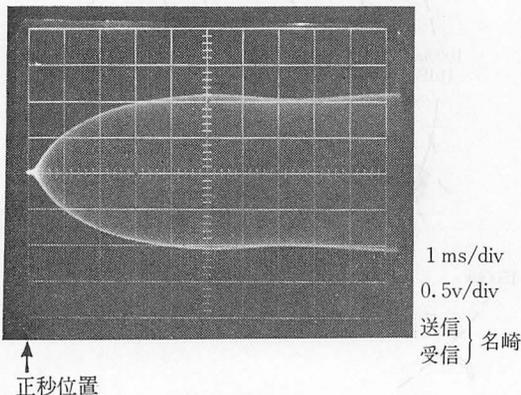


第22図 受信波形の一例

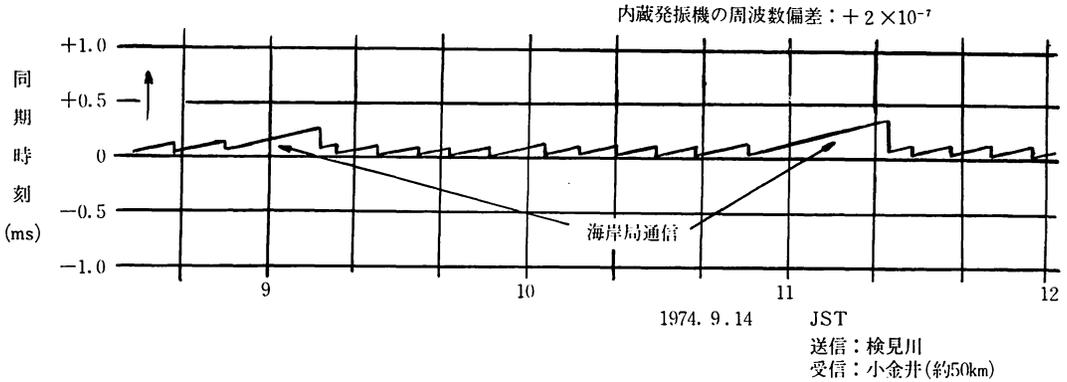


第23図 自動同期時計装置の構成

と判定している。このようにして識別された時刻信号と、装置内時計の秒信号との時刻差を測定し、この時刻差が ± 0.1 ms 以上であると、極性表示信号と時刻補正信号を発生する。この補正信号で直接時刻補正を行うと秒位相が不安定となるので、補正信号を極性別に積算し、その積算数が 20 秒間で 11 回以上 (過半数) になったとき、装置内時計の時刻を 0.1 ms 補正するよう平均化し、常に標準電波の時刻信号に同期させている。時刻同期精度は周囲雑音とフィルタの帯域幅でほぼ決定する。本装置では受信点の状況に対応してフィルタの 3 dB 帯域幅を 300 Hz, 170 Hz, 及び 85 Hz に切り替え、時刻精度を向上できるように配慮している。第24図は近距離において行った同期受信実験例で、出力信号の C/N 比は 30 dB 以上あるため安定した時刻補正が行われている。なお、時計内蔵の発振器は時刻補正動作を確認するために周波数を約 2×10^{-7} オフセットしているが、通常は周波数偏差を $\pm 2 \times 10^{-8}$ 以内としているので海岸局通信等による時刻信号停止中のずれはこれよりも少ない。本装置の時刻同期精度は近距離 (100 km) で ± 0.3 ms, 中距離 (500 km) で ± 0.6 ms, 遠距離 (1000 km) では ± 1 ms であった。



第21図 送信波形



第24図 近距離における時刻同期例

4. 外国の長波標準電波

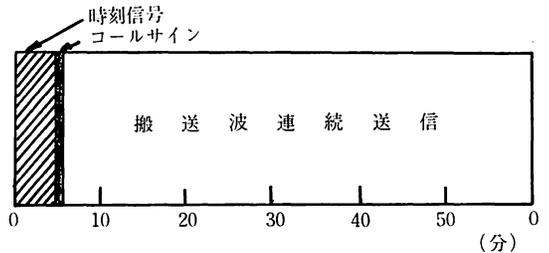
4.1 送信局と送信スケジュール

長波帯による高精度周波数比較手段として国内では JG2AS (40 kHz) が利用されているが、国際間の周波数や時刻の比較、電波伝搬の研究などを目的として、外国の長波標準電波も受信利用されている。

外国の 100 kHz 以下の長波標準周波数局は、現在北半球で 8 か国が 16 の局で運用している⁽¹⁰⁾。その主な送信局を第3表にまとめた。

代表的な長波標準周波数局である米国 NBS (国立標準局) の WWVB 局 (60 kHz) は、コロラド州フォートコリンズの送信所から送信された標準電波を、約 50 km 離れたボルダーの NBS で受信し、主原器のセシウム原子周波数標準器と位相比较している。その位相誤差信号は送信所へ VHF 回線で返送され、送信位相を連続的に制御している。

これら長波標準周波数局の多くは常時運用され、周波数、時刻のいずれも利用できる。しかし、国内で外国標準電波を受信できるのはごく限られた局だけである。そ



第25図 RTZ局(50 kHz, ソ連)の時間送信スケジュール

の内 RTZ (50 kHz, ソ連) の送信スケジュールを第25図に示した。このスケジュールの長所は、毎時6分から54分間は、搬送波が切断されないで、位相比較や電界強度測定に有利なことである。

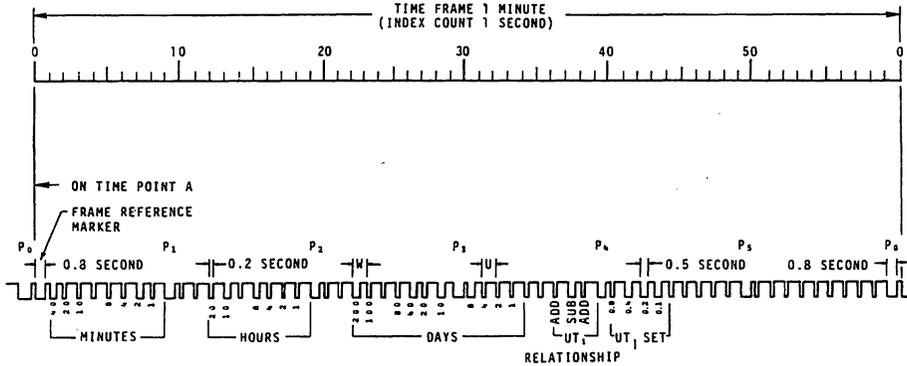
4.2 時刻及び周波数の供給例

短波標準電波の時刻信号形式は、国際無線通信諮問委員会 (CCIR) の勧告による方式が採用されている。長波標準電波については、局の特殊性と送信目的によりそれぞれ独自の方式で周波数及び時刻符号の供給が行われている。

第26図は WWVB 局の時刻符号形式を示したもの

第3表 主要外国長波標準電波の諸元

送信局			アンテナ		運用時間		周波数		時刻信号 (分)	周波数確度 ($\times 10^{-12}$)
局符号	位置	緯度経度	タイプ	搬送波電力 (kW)	日/週	時間/1日	搬送波 (kHz)	変調波 (Hz)		
DCF 77	Mainflinger F.R. of Germany	50°01'N 09°00'E	無指向性	20	7	24	77.5	1	連続	± 0.5
MSF	Rugby United Kingdom	52°22'N 01°11'W	"	25	7	24	60.0	1	"	± 2
HBG	Prangins Switzerland	46°24'N 06°15'E	"	20	7	24	75.0	1	"	± 1
WWVB	Fort Collins Colorado U.S.A.	40°40'N 105°03'W	"	13	7	24	60.0	1	"	± 10
RTZ	Irkutsk U.S.S.R.	52°18'N 104°18'N	"	10	7	23	50.0	1 : 10	毎時 6分間	± 10



第 26 図 WWVB 局 (60 kHz, 米国) の時刻符号形式

で、時、分、秒のほかには日付及び世界時 (UT 1) 補正値を含んでいる⁽¹¹⁾。

また、特殊な例として、DCF 77 (77.5 kHz 西独) では、夏時間の実施を表示した時刻供給方式を採用している。その方式は、17 秒目と 18 秒目のパルス幅を変えることで、協定世界時 (UTC) の時刻に対して 1 時間又は 2 時間差の夏時間が実施されていることを表示するものである。

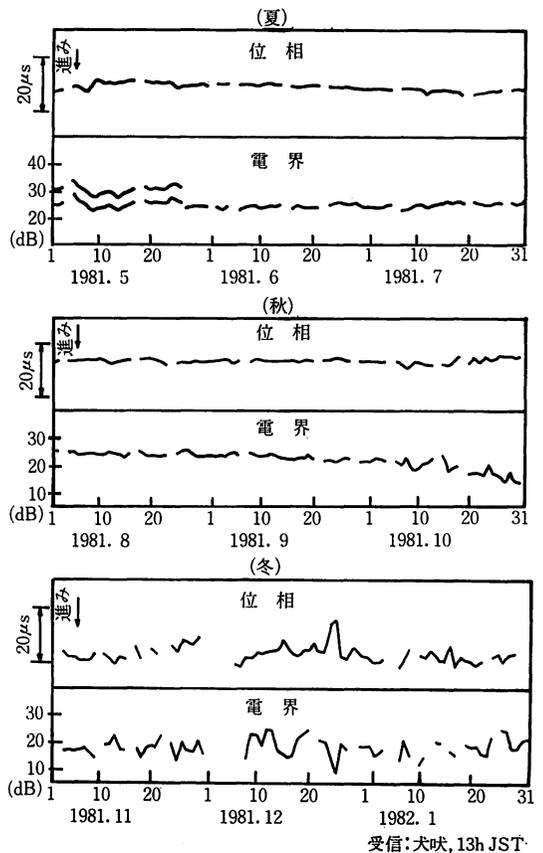
当所犬吠電波観測所における RTZ (50 kHz, ソ連、送受信距離 3400 km) の受信データを第 27 図に示す。このデータは 13 時 JST の受信位相と受信電界強度を季節別にまとめている。約 1 年間の受信データによると、夏季は位相、強度とも変動が少ないが、冬季は変動が大きく高次伝搬モードの影響が顕著に見られる。

5. ま と め

40 kHz 標準電波 (JG2AS/JJF-2) は昭和 41 年 1 月検見川送信所より送信を開始し、以降、送信位相の安定化、セシウム周波数標準器の採用、名崎送信所へ移転、24 時間送信、ふく射電力の安定化など施設の整備が行われてきた。現在標準時刻信号とともに 1×10^{-11} の周波数精度で送信されている。

国内における受信特性を要約すると下記のようなになる。

- (1) 近距離ではほぼ地表波のみが安定に受信される。周波数比較精度は 24 時間比較で昼間は $\pm 3 \times 10^{-12}$ 、夜間は $\pm 5 \times 10^{-12}$ である。
- (2) 中距離では空間波の影響が現れてくるが、地表波強度以下なのでそれほど大きな位相変動を生じない。周波数比較精度は 24 時間比較で昼間 $\pm 1 \sim 2 \times 10^{-11}$ 、夜間 $\pm 3 \sim 5 \times 10^{-11}$ である。
- (3) 遠距離は空間波強度が地表波とほぼ同レベルとなり、しばしばサイクルスリップ等の位相異状シフト



第 27 図 外国標準電波の受信例 (RTZ 局: 50 kHz, ソ連)

を生ずる。周波数比較精度は 24 時間比較で昼間 $\pm 2 \sim 3 \times 10^{-11}$ 、夜間 $\pm 3 \sim 5 \times 10^{-11}$ である。

(4) 季節的には位相、電界ともに春、秋が比較的安定しており、冬はやや変動が大きくなる。

時刻信号は 1 ~ 3 ms の精度で終日時刻比較に利用できる。また、当所で試作した自動同期時計では、近距離 ± 0.3 ms、遠距離でも ± 1 ms の同期精度が得られた。

参 考 文 献

- (1) 中島一二, 鈴木孝之助, 東吉夫, 赤塚耕輔, 中村幸三郎; “VLF による国際周波数比較装置と東京—ハワイ間の位相変動の測定結果”, 電波研季報, **9**, 42, pp. 104—114, May 1963.
- (2) 北村稔, 中島政雄, 中村幸三郎; “40 kHz 長波標準電波の特性”, 電波研季報, **13**, 67/68, pp. 130—137, July/Sept. 1967.
- (3) 加藤清治, 本間重久, 斎藤義信; “長波標準電波送信位相の安定化”, 電波研季報, **20**, 107, pp. 109—119, March 1974.
- (4) VLF 標準周波数受信回路専門委員会; “長波標準電波受信装置”, 電気学会技術報告, I 部, 第 80 号, 昭和 42 年 6 月.
- (5) 斎藤義信, 加藤清治; “40 kHz 標準電波用簡易型位相比較受信機”, 電波研季報, **23**, 122, pp. 9—19, March 1977.
- (6) 佐分利義和, 中島政雄, 北村稔, 本間重久, 原忠徳; “40 kHz 標準電波の送受信特性(Ⅲ)”, 昭和 45 年度, 電気四学連合大会, 2486, pp. 2881—2882.
- (7) 越前谷喜松, 竹内鉄雄, 中村幸三郎, 森哲造; “長波 (40 kHz) の中距離伝搬特性(1)”, 電波研季報, **18**, 95, pp. 257—261, March 1972.
- (8) 中島政雄, 北村稔, 小林三郎, 本間重久; “稚内における 40 kHz 標準電波の受信結果”, 電波研季報, **14**, 72, pp. 378—384, May 1968.
- (9) 本間重久, 加藤清治; “40 kHz 標準電波による自動同期時計装置”, 電波研季報, **21**, 114, pp. 165—176, May 1975.
- (10) “REC. and REP. of the CCIR 1982”, Vol. VII, REPORT 267—4, STANDARD FREQUENCIES AND TIME SIGNALS.
- (11) “NBS Technical Note 695”, National Bureau of Standard, pp. 105—118, May 1977.

