

# カラーサブキャリアによる水晶発振器の周波数制御

松田 勲\*, 松本勝明\*, 蠟山正夫\*

## Color-Subcarrier Controlled Crystal Oscillator

Isao MATSUDA\* Katsuaki MATSUMOTO\* Masao ROHYAMA\*

The frequency offset and aging characteristics of the laboratory frequency standard (5 MHz crystal oscillator) was measured. The measurement was performed by phase comparison of the two signals of 56.81 kHz. One of the signals is the divided output of the tested crystal oscillator and the other is that of the color-subcarrier in a home color TV receiver.

In free running the frequency offset of the tested oscillator was determined with the frequency resolution of  $1 \times 10^{-11}$ .

In phase locking to the color-subcarrier which is referenced to the atomic frequency standard, the tested crystal oscillator can be used as the frequency standard having the frequency accuracy of within  $5 \times 10^{-11}$ .

### 1. 序 論

我々の生活の中でテレビジョンは情報源および娯楽としてなくてはならないものになっている。そのテレビ電波の中の映像信号には色についての情報を送るためにカラーサブキャリア (3.57954 MHz) という信号が含まれている。カラーテレビ受像機ではこのカラーサブキャリアに位相同期させて基準サブキャリアなる信号を作り出し、色信号の復調を行っている<sup>1)</sup>。

NHK においては昭和 47 年に行われた札幌冬期オリンピックの際、多元中継時の多元同期による色ずれを防止するため、カラーサブキャリアの発生源としてルビジウム原子周波数標準を使用し、以来今日に至っている。原子周波数標準はそれ自身非常に安定であり、郵政省電波研究所では所内の周波数標準器を用いて NHK 総合テレビおよ

びテレビ朝日のカラーサブキャリアの周波数偏差の測定を行い、その結果を毎月公表している<sup>2)</sup>。

したがって NHK (総合)あるいはテレビ朝日を受信中のカラーテレビ受像機により発生する基準サブキャリアは  $1 \times 10^{-10}$  以上の精度と確度を持った周波数標準として利用できる<sup>3), 4), 5)</sup>。これを利用して今回高安定 5 MHz 水晶発振器の周波数偏差の測定を行い、それに基づいて周波数の校正を行った。さらにこれに位相制御を行った。

まずオシロスコープを使用して基準サブキャリアの波形を 5 MHz 水晶発振器の出力を分周したもので掃引させ、波形移動時間から発振周波数のずれを求める方法を探った。しかしこの測定においては人間の視覚等による誤差の影響がある。これを少なくするため基準サブキャリア 3.57954 MHz を 88 分周した 56.81 MHz と 5.0000 MHz を 63 分周した 56.81 KHz とのデジタル位相比較を行い、電氣的に 5 MHz 水晶発振器の周波数偏差を求め位相差を記録させることとした。さ

\* 電子工学科

昭和 58 年 9 月 26 日受理

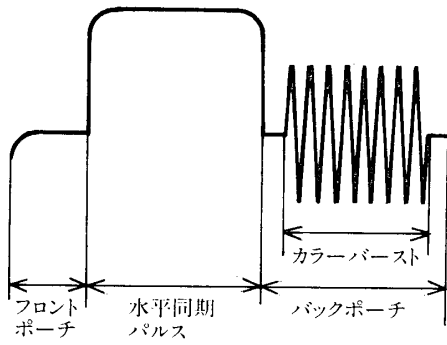


図1 水平同期パルスの帰線消去ペデスタル

らにこの位相比較器の出力を用いて水晶発振器を位相制御することによって、基準サブキャリアがルビウム周波数標準器によって発生されているときには  $5 \times 10^{-11}$  以上の精度と確度をもつ周波数標準として水晶発振器を利用できることがわかった。

## 2. 基準サブキャリア

### 2.1 基準サブキャリア<sup>1)</sup>

カラー映像信号のうち色に関する情報は搬送色信号によって伝送される。しかしこの中にはカラーサブキャリア (3.57954 MHz) そのものは伝送されない、したがって受信側で色信号の復調を行うためには、3.57954 MHz のカラーサブキャリアを作る必要がある。受信側で作るカラーサブキャリアは送信側のカラーサブキャリアと全く同じ位相を保たなければ、正しい色相の再現ができない。送信側ではカラー映像信号のうちの水平同期

パルスの帰線消去ペデスタルのバックポーチ部にカラーバースト (送信側のカラーサブキャリアの 8~12 サイクル) を挿入して送信している (図1)。カラーテレビ受像機では、このカラーバーストに周波数および位相を一致させた基準サブキャリアを作りそれにより色信号の復調を行っている。つまり送信側でのカラーサブキャリアとカラーテレビ受像機で作られる基準サブキャリアとは、周波数および位相の上では同一と考えてよい。よって NHK テレビあるいはテレビ朝日を受信中のカラーテレビ受像機が作る基準サブキャリアは  $10^{-10}$  以上の精度をもっていると考えられる。

基準サブキャリアを作り出す方法として代表的なものを示す次の4方式がある。

1. 水晶フィルター方式 (リング方式)
2. バースト注入ロック方式
3. APC 方式 (Automatic Phase Control)
4. PLL 方式 (Phase Lock Loop)

このいずれの方式も周波数の安定した基準サブキャリアを発生させるために、水晶発振器を用いている。

### 2.2 基準サブキャリアの取り出し

使用したカラー TV 受像機の基準サブキャリア発生回路は図2のようになっており局部発振器の出力部分にテストポイント TP-44 があるので、これを利用して基準サブキャリアの信号源とし

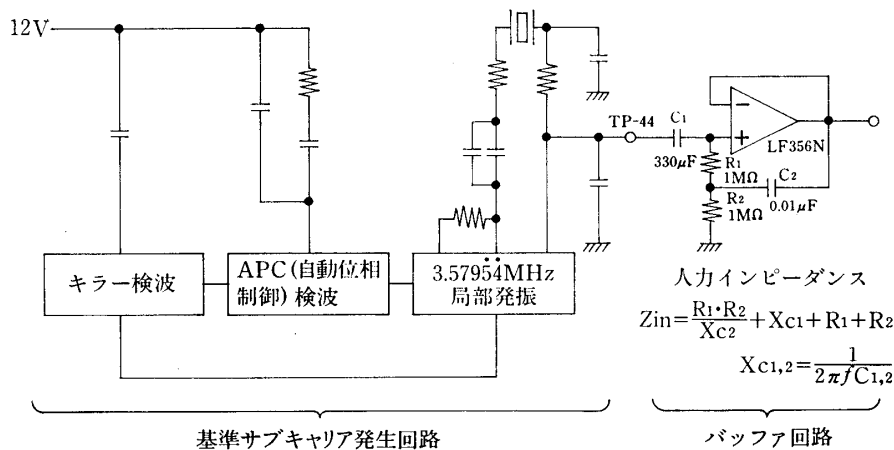


図2 基準サブキャリアの取り出し回路

た. TP-44 に同軸ケーブル 3 D-2 V (120 pF) を接続したところ TV 画面が多少色ずれを起こしたので, TP-44 にオペアンプを使用したバッファを銅のシールドケースに納めて直接接続した. なおこのときのバッファの入力インピーダンスは  $229 \times 10^9 \Omega$  である<sup>6)</sup>. この結果オシロスコープによる位相比較の際に観測される波形のふらつきがなくなり また デジタル 位相比較器の 出力電圧が, バッファ回路をつけないときには多少階段状に変化したものが直線的に変化ようになった. これらは基準サブキャリアの不安定な発振状態が安定なものに変わったことにより外来ノイズ等の影響が少なくなったためと思われる.

### 3. 波形観測による周波数偏差の測定

#### 3.1 測定方法

ここで扱う周波数偏差は非常にわずかで 1 Hz にとうてい及ばない量であるため位相比較によって偏差の測定を行う. 測定方法を図 3 に示す.

NHK あるいはテレビ朝日を受信中のカラーテレビ受像機から基準サブキャリアを取り出し, オシロスコープの入力端子に入力する. (その際色同期回路を安定動作させるためにカラーテレビ受像機は 1 時間以上電源を入れた状態で放置しておく必要がある) 次に 5 MHz 水晶発振器の出力を 1/88 分周器を通してオシロスコープの外部トリガ入力 (TRIG. IN) に入力して波形観測を行う. (この際トリガ入力選択スイッチは EXT にする.) トリガ入力選択スイッチを EXT にすると観測波に無関係に外部トリガ入力 (TRIG. IN) に入力された信号に同期した掃引信号が作られる<sup>7)</sup>. この場合, 観測波と掃引信号の周波数が整数関係にあれば静止波形として観測できるがそうでないとき

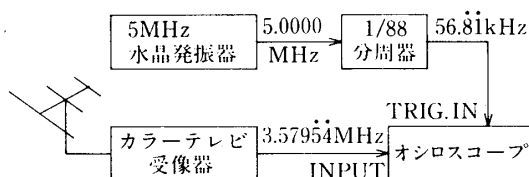


図 3 波形観測方法

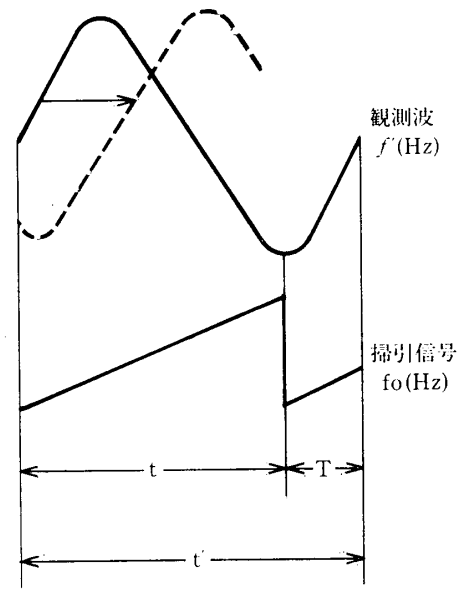


図 4 オシロスコープによる観測波形のずれ

は図 4 に示すように掃引開始位置が各掃引ごとにはずれるので画面上波形が時間軸方向に流れてしまう. いま整数関係が成立していない場合の掃引 1 回について考える. 図 4 において掃引信号の周期を  $t(s)$ , 周波数を  $f(\text{Hz})$ , 観測波の周期を  $t'(s)$ , 周波数を  $f'(\text{Hz})$  とすると掃引 1 回の所要時間  $t(s)$  に波形は時間軸上を  $T(s)$  流れることになる. 波形が流れる速度は  $V = T/t$  で求めることができ, これをさらに変形すると

$$\begin{aligned} V &= (t' - t)/t \\ &= (1/f' - 1/f)/(1/f) \\ &= f/f' - 1 \end{aligned}$$

となる.  $f$  と  $f'$  の差を  $4f$  とすると

$$\begin{aligned} V &= (f - f')/f' \\ &= 4f/f' \end{aligned}$$

となり観測波と掃引信号の周波数  $4f$  差は次式により求めることができる.

$$4f = \frac{T}{t} \times f' (\text{Hz})$$

以上のことは掃引回数を増しても成立する. また波形の流れる方向と  $4f$  の関係は次のとおりで,

波形が右へ流れる	$4f > 0$
波形が静止している	$4f = 0$
波形が左へ流れる	$4f < 0$

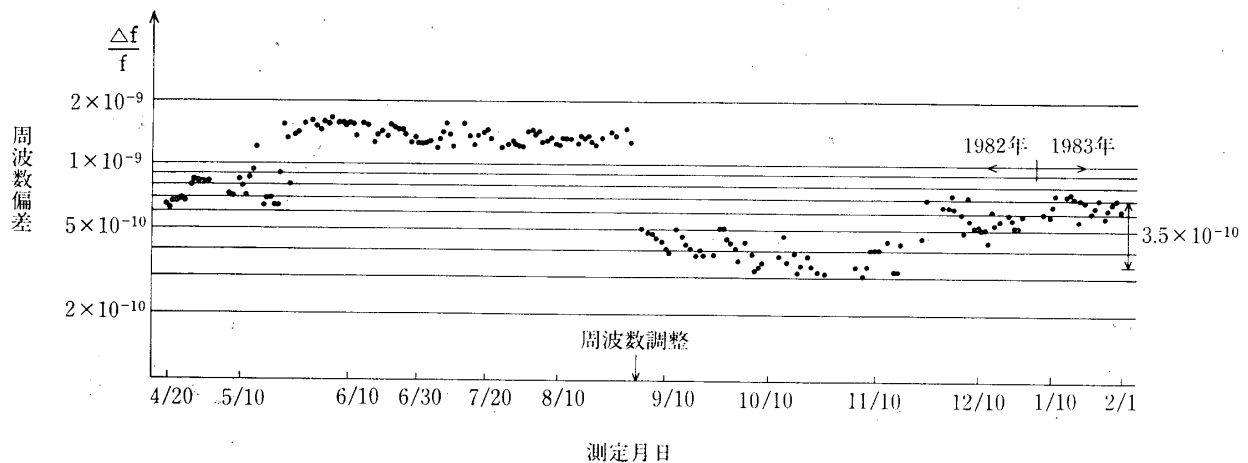


図 5 研究室標準用水晶発振器の経時変化

周波数差が大きい場合は移動速度も速くなる。

### 3.2 測定結果

オシロスコープを用いた位相比較の方法にしたがって研究室標準用 5 MHz 水晶発振器の校正を行い、また発振周波数の経時変化を測定した。校正例を表 1 に示す。

表 1 校正例

年 月 日	$t(s)$	$T/t$	$4f(Hz)$
昭和56年 9月18日	146.7	$1.36 \times 10^{-10}$	$6.81 \times 10^{-4}$
56年10月12日	105.5	$1.89 \times 10^{-10}$	$9.48 \times 10^{-3}$
56年12月 2日	187.9	$1.06 \times 10^{-10}$	$5.32 \times 10^{-4}$
57年 1月 8日	253.5	$7.89 \times 10^{-11}$	$3.94 \times 10^{-4}$

上に示すように周波数校正の精度としては  $1 \times 10^{-10}$  が得られた。またこの方法により昭和 57 年 4 月から昭和 58 年 2 月までにわたって測定した経時変化を図 5 に示す。

## 4. 位相差記録による周波数偏差の測定

### 4.1 デジタル位相比較

この方法は発振器の周波数偏差の測定の一方法であることはいうまでもなく、5 MHz 水晶発振器を位相制御する PLL (Phase Lock Loop) を構成するものでもある<sup>8)</sup>。図 6 にブロック図を示す。オシロスコープによる校正と同様に NHK あるい

はテレビ朝日を受信中のカラーテレビ受像機から基準サブキャリアを取り出し、1/63 分周器を通して位相比較器の入力 A に入力する。また 5 MHz 水晶発振器の出力は 1/88 分周器を通して位相比較器の入力 B に入力する。入力 A と入力 B の位相等しければ位相比較器の出力は 0 (V) であるが、位相がずれている場合、そのずれの大きさに比例した直流電圧が発生し、図 7 に示すように入力の位相差が  $2\pi$  になるまで電圧が増加し、位相差が  $2\pi$  になった瞬間にもとにもどるような鋸歯状の出力波形を得る。図 7 において波形のくり返し周期

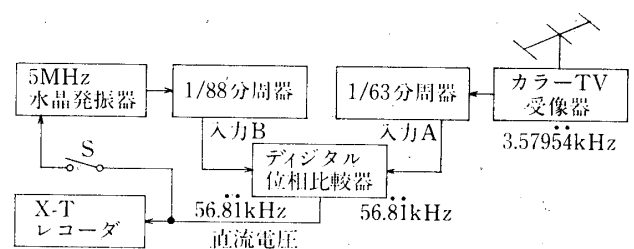


図 6 デジタル位相比較の方法

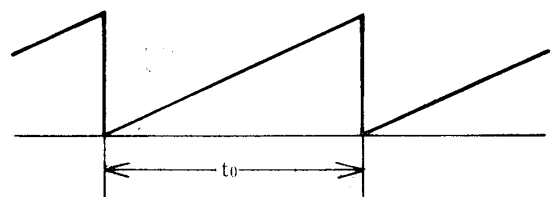


図 7 位相比較器出力

を  $t_0$  とし、位相比較器の入力波形の周期を  $T_0$  とすると、5 MHz 水晶発振器の発振周波数の偏差は次式によって求められる。

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{T_0}{t_0} = V$$

$$\text{ただし } T_0 = 1/59.81 \times 10^3 = 17.6 \mu\text{s}$$

したがって発振周波数の差  $\Delta f$  は次のようになる。

$$\Delta f = V \times 5 \times 10^6 \text{ Hz}$$

デジタル位相比較の特徴は入力パルスのパルスエッジ（立下り）によって位相および周波数を比較するため、入力パルスのデューティサイクルは問題にならない。また TTL であるため消費電力が小さくデジタル処理であるため入力信号の電圧振幅の変動には影響を受けない。

実際に製作した位相比較器の出力波形は図 8 のようになっており入力パルスの位相差が  $+2\pi$  のときの出力電圧は  $0.768 \text{ V}$  であり、 $-2\pi$  のときは  $1.792 \text{ V}$ 、0 のときは  $1.28 \text{ V}$  となっている。したがって位相差  $1 \text{ rad}$  に対して約  $0.0815 \text{ V}$  の出力変化が得られる。

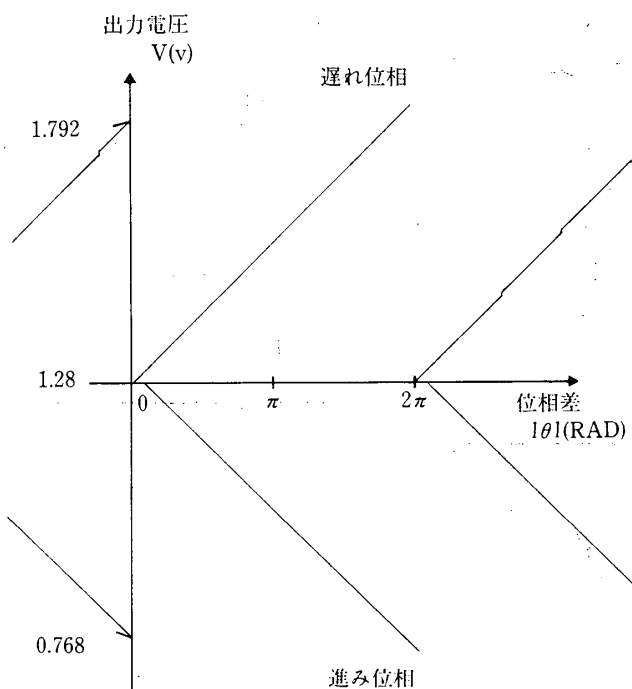


図 8 位相比較器の位相差に対する出力電圧

#### 4.2 位相比較による周波数偏差の測定結果

図 9 はフジテレビの番組を受信中の結果であるがかなり直線的な出力が得られた。図 9 より 5 MHz 水晶発振器の発振周波数の偏差は  $\Delta f/f = 3.12 \times 10^{-10}$ 、また周波数の差として  $\Delta f = 1.56 \times 10^{-3} \text{ Hz}$  が得られた。なお出力電圧のステップ状の部分には他の場所で電気器具のスイッチを入れたとき等で、図中 No. 1 は白黒 TV、No. 2 は冷蔵庫、No. 3 はスタンド、No. 4 は蒸着装置のスイッチを入れたときである。これらの点においては瞬間的に位相シフトがあるだけで直線の傾きが変わっていないことから周波数の変化はないということがいえる。なおこれらのステップ状変化はその後電源の改良等によりほとんどなくなっている。

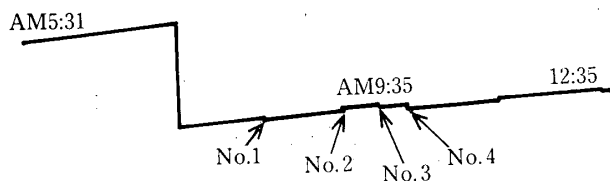


図 9 位相比較器出力の記録例（昭和 58 年 2 月 18 日フジテレビ）

表 2 に昭和 58 年 2 月 19 日午後 0 時 40 分から 5 時 30 分頃の各チャンネルにおける周波数偏差と周波数差を示す。ただし数値は水晶発振器の周波数が高い場合は正、低い場合は負となっている。

表 2 各チャンネルの周波数偏差と周波数差

測定時刻	局 名	周波数偏差 $T^0/t^0$	周波数差 $\Delta f (\text{Hz})$
17:00	NHK テレビ (総合)	$2.76 \times 10^{-10}$	$1.38 \times 10^{-3}$
12:40	NHK 教育テレビ	$3.41 \times 10^{-10}$	$1.71 \times 10^{-3}$
15:20	日本テレビ	$-6.61 \times 10^{-8}$	$-330 \times 10^{-3}$
14:30	TBS テレビ	$-6.67 \times 10^{-7}$	$-3330 \times 10^{-3}$
13:35	フジテレビ	$3.35 \times 10^{-10}$	$1.67 \times 10^{-3}$
16:35	テレビ朝日	$2.64 \times 10^{-10}$	$1.32 \times 10^{-3}$
14:55	テレビ東京	$4.89 \times 10^{-9}$	$24.4 \times 10^{-3}$

### 5. 水晶発振器の位相制御

図6においてスイッチSを閉じた場合にはデジタル位相比較器の出力電圧が5 MHz 水晶発振器の周波数微調用端子に加えられ、基準サブキャリアにより水晶発振器の位相制御が行われる。図10はNHKの番組を受信中に5 MHz 水晶発振器に位相同期をかけた場合の位相比較器出力の電圧変化である。この同期出力に変動がないことから水晶発振器はカラーサブキャリアに十分位相制御され、位相変動もないことがわかる。また図9に示したような外来ノイズに対しては殆んど影響を受けないが、番組が変わると位相変化を起こすことがある。放送終了時から24時間の測定例を図11に示す。番組が放送されていないときはカラーテレビ内のサブキャリア発生用のVCXO (Voltage Controlled X'tal Oscillator) は free runing の状態であるので位相変動の大きい部分がみられる。放送開始からカラーサブキャリアに位相同期がかかった状態となり安定している状態（例えば13時から17時の間）ではその周波数偏差は  $4f/f = 5 \times 10^{-11}$  となっている。

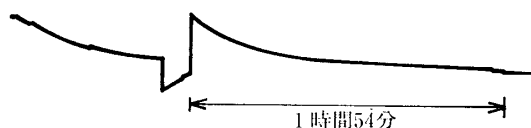
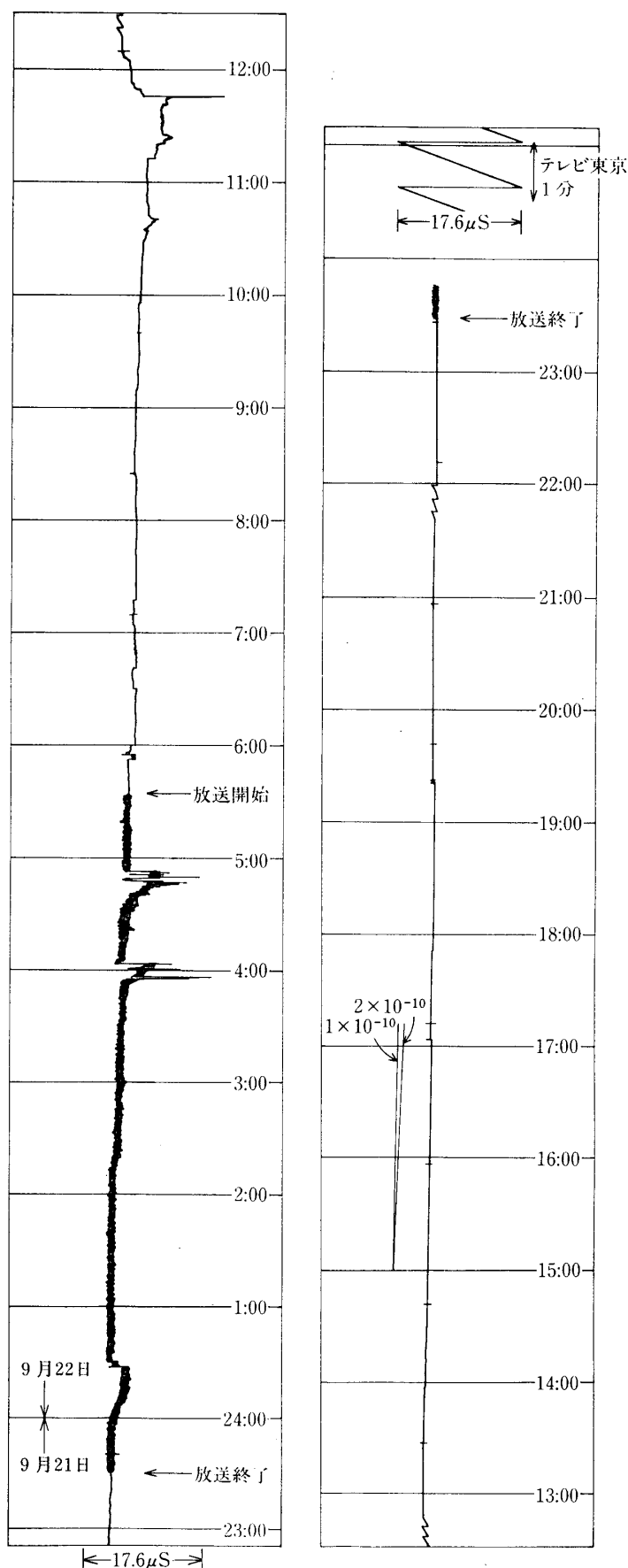


図10 位相同期をかけた場合の位相比較器出力電圧（昭和58年2月24日、午前6時5分頃 NHK 教育）

図11 カラーサブキャリアに位相制御された水晶発振器の位相比較出力の記録例（昭和58年9月21～22日 NHK 総合）番組が変わるとカラーサブキャリアの位相あるいは周波数が変わることがある。特に11時から13時頃が著しい。



## 6. 考 察

オシロスコープ画面上での波形観測による位相比較において、5 MHz 水晶発振器の周波数偏差の測定および校正の精度として  $1 \times 10^{-10}$  の桁が得られた。オシロスコープ上で正弦波波形の移動を観察しながらストップウォッチで移動速度を測定するという人間の視覚と反射神経に依存する測定法にもかかわらずカラーサブキャリアの信頼度に近い桁で測定が可能であることがわかった。またこの方法の場合測定者による個人差が出るものが考えられたので6人で各測定曜日を受け持って約10か月間測定を行ったが有為な差は現われなかった。図5において5月20日頃から周波数が  $7 \times 10^{-10}$  程度シフトしているが原因はよくわからない。それ以後8月30日まで約3か月間は周波数の変動幅は  $3 \times 10^{-10}$  の範囲内におさまっている。9月2日に周波数調整を行って以来約5か月間は全体的に徐々に周波数が高くなっている。この間の周波数変化は  $3.5 \times 10^{-10}$  であり1月当りに換算して  $7 \times 10^{-11}$ /月、1日当たり  $2.3 \times 10^{-12}$ /日という値になる。これは市販の高安定水晶発振器の  $10^{-8} \sim 10^{-9}$ /日にくらべて格段に良い値となっている。

NHK 総合テレビとテレビ朝日のカラーサブキャリアは郵政省電波研究所でセシウム周波数標準器によって校正され、周波数のずれが  $1 \times 10^{-10}$  を超えないように維持されている。また測定された周波数偏差の値は毎月公表されている。それによれば昭和58年2月22日のNHK総合テレビのカラーサブキャリアは  $-0.25 \times 10^{-10}$  となっている<sup>9)</sup>。したがって表2より研究室標準用の水晶発振器は電波研究所の周波数標準器(国家標準)よりも  $4f/f = 2.51 \times 10^{-10}$  だけ周波数が高いことになる。本研究では位相比較を 56.81 KHz で行ったが、もっと高い周波数、例えば 3.57954 MHz で位相比較を行えば 1/63 の測定時間で同じ周波数偏差の測定ができる。

位相比較器出力によって水晶発振器に同期をか

けた場合、 $\pi$  ラジアン位の位相差に対して同期が完全にとれるまでに約2時間かかる。もっと少ない時間で同期をとりたい場合は同期をかけ始めるポイントを位相差の小さい所へもっていけばよい。さらにループゲインをもっと大きくすることが必要であろう。

ところで被校正水晶発振器はいわゆる高安定水晶発振器として市販されているものであるため、本来周波数変化が極めて少ない。そのため外部印加電圧によって周波数調整ができるようになってはいるが、その周波数調整範囲は非常に狭く、外部印加電圧 0~7 V に対して電圧一周波数変換感度は  $(4f/f)V = 2.1 \times 10^{-8}$  となっておりこれは一般の電圧制御水晶発振器 (VCXO) の感度に比較して約1桁程度小さい値である。したがってカラーサブキャリア信号に位相制御して使用するためには電圧一周波数変換感度の大きい VCXO を用いる方が有利であろう。そうすれば図11でもみられるように周波数偏差が  $1 \times 10^{-10}$  以内の周波数精度をもつ周波数基準として用いることが可能である。カラーサブキャリアに位相制御をして利用する場合の一つの欠点は図11にもみられるように番組が変わるとカラーサブキャリアの位相あるいは周波数の変化することがあることである。またもう一つ重大な欠点は放送終了後には基準とするカラーサブキャリアが存在しないことである。したがって放送終了後も測定に供するような研究用周波数基準としては高安定水晶発振器を位相比較によって周波数校正して用いるのがよく、その周波数偏差を  $1 \times 10^{-10}$  以上の信頼度で計測標準として用いることができる。

## 7. 結 論

テレビ電波に含まれるカラーサブキャリアを周波数の基準として、研究用の周波数基準として用いる 5 MHz 水晶発振器の周波数偏差の測定と校正を行った。さらに水晶発振器をカラーサブキャリアに位相制御した。

波形観測による方法では周波数校正精度とし

て  $1 \times 10^{-10}$  を得た。またほぼ 10 か月間にわたる連続測定の結果研究室標準用の水晶発振器が  $7 \times 10^{-11}$ /日の経時変化をしていることがわかった。

ディジタル位相比較器を用いる方法によって  $1 \times 10^{-11}$  の精度で周波数偏差の測定が可能となった。またこの出力を利用して水晶発振器を位相制御することにより精度・確度とも  $1 \times 10^{-10}$  以上の性能をもつ研究室用標準が実現できた。

今後試作原子発振器の周波数安定度や経時変化等、高い周波数確度が要求される計測の標準として応用していく予定である。

#### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、郵政省電波研究所周波数標準部佐藤得男氏には所内の時刻比較および周波数偏差の測定装置の見学に合わせて多くの有益な資料および助言を頂きました。また東京工業大学精密工学研究所大浦宣徳助教授、倉持内武博士には折りにふれ適切な助言と検討を頂きました。ここに深く感謝致します。水晶発振器の経時

変化の測定には情報工学研究室の昭和 57 年度卒業研究生の諸君に御協力を頂きました。感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 1) NHK カラーテレビ教科書(上), 日本放送協会, p.37, 昭和 52 年.
- 2) 例えば電子通信学会誌.
- 3) 佐分利, 安田, 小林, 佐藤, 「TV 信号を利用した時刻と周波数の精密比較」電波研究所季報 Vol. 18, No. 99, p. 433, 1972.
- 4) P. Kartaschoff, "Frequency and Time", Academic Press, p. 210, 1978.
- 5) B. E. Blair, "Time and Frequency: Theory and Fundamentals", NBS monograph 140, p. 263, 1974.
- 6) 岡村勉夫「改訂 OP のアンプ回路の設計」CQ 出版, p. 105, 昭和 48 年.
- 7) 塩沢政美「わかりやすいシンクロスコープ測定法」産報出版, p. 9, 1965.
- 8) 「PLL 活用ガイド」誠文堂新光社.
- 9) 「TV 同期パルスとカラーサブキャリアの測定値」電子通信学会誌, 第 66 巻, 第 4 号, p. 432, 1983.