

# パラメータ励振作用による分周器を用いた水晶時計

丹 野 頼 元 \*

(昭和 36 年12月25日受理)

## 1. 序 言

電気回路の非線形インダクタンスあるいはキャパシタンスをある周波数で変化すると、それによって構成される同調回路にその半分の周波数の発振電圧を生ずる。このいわゆるパラメータ励振現象は、パラメトロンと呼ばれてその発振電圧の位相関係が利用されているが、本来励振周波数と発振周波数の関係が  $1/2$  のとき最も安定であるという性質をもっている。この性質を利用すれば、分周比  $1/2$  の分周器となるのでこれを  $n$  段接続して、 $1/2^n$  の分周器を得ることができる。このパラメータ励振作用による分周器の一応用として、これを水晶時計の分周回路に用いてみた。

水晶時計はその歴史が比較的長く、1928年に米国の W. A. Marrison<sup>(1)</sup>によって発表され、ついで独逸の A. Scheibe および U. Adelsberger により研究された。当時のものは精度が悪く、振子時計に比較もおよばなかった。その後の研究と水晶振動子の零温度係数振動子の発達により、その精度を高め現在では振子時計を全く凌駕し時間の副標準として広く使用されている。

この水晶時計は、非常に安定度の高い水晶振動子による発振周波数を分周回路によって周波数通降し電力増幅後フォニックモータを回転して時計を動かしている<sup>(2)</sup>。したがって時計の精度は、水晶振動子の精度と同じになり、水晶振動子が  $\pm 5 \times 10^{-9}$  の精度ならばこの時計の精度も  $\pm 5 \times 10^{-9}$  になる。水晶振動子は通常水晶の GT cut の零温度係数振動子を恒温槽内に入れ、さらに地下室に保管して発振周波数の安定をはかっている。

分周回路としては

- (1) マルチバイブレータによる方法、
- (2) LC発振器等の強制分周器による方法、
- (3) 帰還分周器を利用する方法、

などがある。これ等はいずれも真空管やトランジスタを用いるものであって、その消耗、電力の消費、調整の困難さ等の欠点があり、時計のような長時間運転のものに対しては充分考慮を払わなければならない。

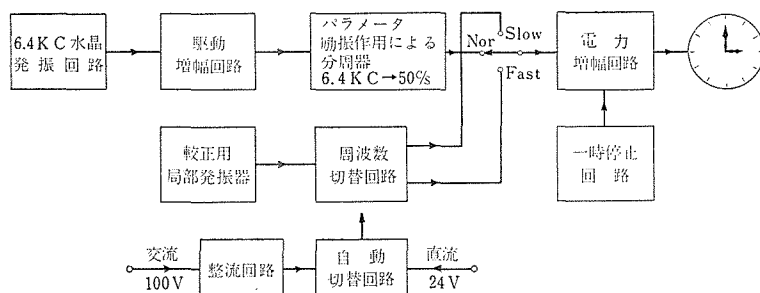
この点パラメータ励振作用による分周器は、インダクタンスとコンデンサーのみで構成されるので消費電力の少ない半永久的なものであり、簡単な調整で非常に安定な同期を得ることができる。したがってこれは時計のような長時間連続運転のものに対しては、

\* 通信工学教室、講師

最も適しておる．そこで水晶振動子による発振周波数を，この分周器で周波数通降して同期モータを回転して水晶時計を試作してみた．時計の精度は，現在時間の副標準として用いられている水晶時計のように高い値は望まず，大体  $10^{-5}$  程度すなわち 24 時間に 1 秒以内程度を目標とした．発振回路，増幅回路にはトランジスタを使用して非常に小さな低電力のものが得られた．本論文はこの時間の副標準として試作した簡易水晶時計の概要とその特性について述べるものである．

## 2. 回路構成

この構成は第 1 図に示すとおりである．時計としての心臓部である水晶振動子は，6400 c/s の NT cut 振動子を用いておる．これは同期モータが 50 c/s で分周器の分周比が  $1/2^n$  であるので，水晶振動子の周波数として  $50 \times 2^n$  c/s のうち，精度の許す範囲で最も低い周波数として 6400 c/s を選んだものである．この程度の周波数では，水晶振動子は NT cut の屈曲振動が用いられる．



第 1 図 パラメータ励振作用による分周器を用いた水晶時計の回路構成

この発振周波数を 7 段のパラメータ励振作用による分周器で 50 c/s まで通降し，出力 2 W の電力増幅回路を経て 50 c/s の同期モータを回転させる．時計較正用として局部発振器（発振周波数は 100 c/s と 30 c/s の切替え）があり，電鍵の操作により時計を早く廻しあるいは遅く廻すことができる．また一時停止回路により容易に時計を一時停止できる．

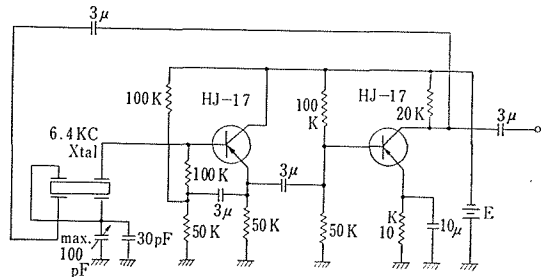
電源は常時交流 100 V で動作し，停電時は自動的に蓄電池に切替えられる．

周波数決定素子として水晶振動子の代りに音片振動子を用いてもよい．音片振動子は  $50 \times 2^3$  c/s すなわち 400 c/s で性能の充分良いものを製作できるので，この場合 400 c/s 音片振動子を使用するのがよい．すると分周器は分周比  $1/8$  で済み，したがって 3 段の分周器で良いことになる．他の回路は大体水晶振動子の場合と同様である．

### 3. 発振回路

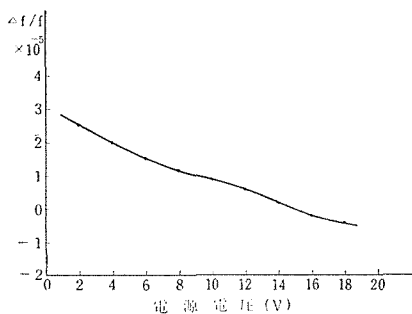
周波数決定素子として 6400 c/s の NT cut 水晶振動子を使用する回路は、第 2 図に示すとおりである。<sup>(3)</sup> トランジスタを 2 石使用して、初段をコレクタ接地回路にまた次段をエミッタ接地回路に接続してある。

この発振回路の増幅部の入力インピーダンスは、なるべく大きいことが望ましいのでコレクタ接地回路を初段にしたものである。しかしながら通常のコレクタ接地回路の入力インピーダンスは、数十 KΩ であるので、この回路では図に示すようにさらに負帰還をかけて大きくし数百 KΩ にしておく。

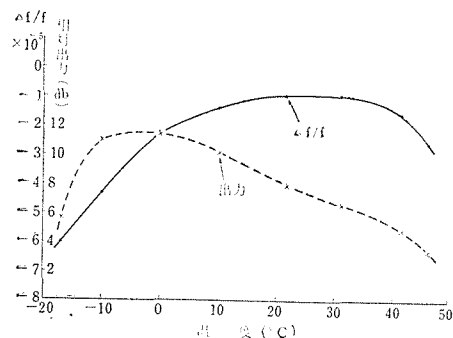


第 2 図 6400 c/s 水晶発振回路

この発振回路の電源電圧特性および温度特性を示すと、第 3 図および第 4 図のようになる。すなわち電源電圧が 8 V ± 25 % 変化した場合に発振周波数の変化  $\Delta f/f$  は、大体  $\pm 1 \times 10^{-6}$  となる。また温度が、 $-10^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$  変化した場合に発振周波数の変化  $\Delta f/f$  は  $2.7 \times 10^{-5}$  程度である。この値がそのまま時計の精度になるので、時計の精度をさらに上げたい場合には、水晶振動子を恒温槽に入れ電源に定電圧回路を用いるなどの必要を生じてくる。

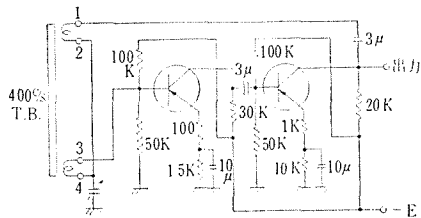


第 3 図 水晶発振回路の電源電圧特性

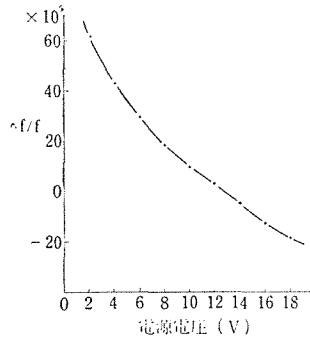


第 4 図 水晶発振回路の温度特性

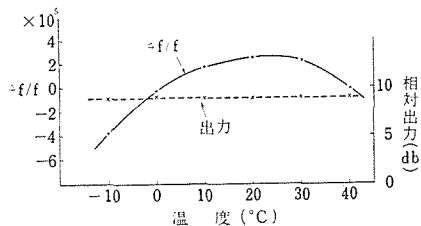
つぎに音片振動子を用いる場合の回路を第 5 図に示す。<sup>(4)</sup> 400 c/s 音片振動子をエミッタ接地のトランジスタ回路を 2 段使用して発振させておく。この発振回路の電源電圧特性および温度特性は、第 6 図および第 7 図に示すとおりである。図より明らかのように電源電圧が、 $12\text{ V} \pm 10\%$  変化した場合に発振周波数変化  $\Delta f/f$  は  $\pm 4.5 \times 10^{-5}$  となり、また  $20^{\circ}\text{C}$  附近における温度係数は  $+0.3 \times 10^{-6}$  である。



第5図 400 c/s 音片発振回路



第6図 音片発振回路の電源電圧特性



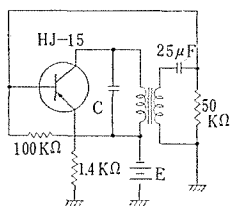
第7図 音片発振回路の温度特性

この場合も音片振動子の特性が、さらに良いものを使用しまた恒温槽あるいは定電圧回路を使用することにより、さらに精度の高い時計とすることができる。

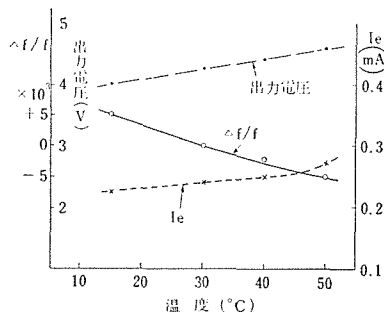
時計を校正するための局部発振器は、たんに時計を進めあるいは遅らせるだけのものであるから、その発振周波数

の安定度はあまり問題でない。発振周波数は、時計を進める場合には 100 c/s、遅らせる場合には 30 c/s にしたので発振器としては CR 素子を使用する方が望ましい。最初移相型 CR 回路を考えた。しかしトランジスタ 1 石では電源電圧が高い場合には温度特性も歪率も非常に良い発振器が得られたが、電源電圧が低い場合に特性が悪くなり、また 100 c/s と 30 c/s の発振周波数の切替えにも素子の数がふえ面倒となる。

ここでは第8図に示すようなコレクタ同調形 LC 発振器を用いておる。発振周波数の切替えは、コレクタ回路の同調コンデンサーを切替えることによって行なう。この回路の温度特性は、第9図に示すようになり実用上充分な特性である。



第8図 コレクタ同調形 LC 発振器



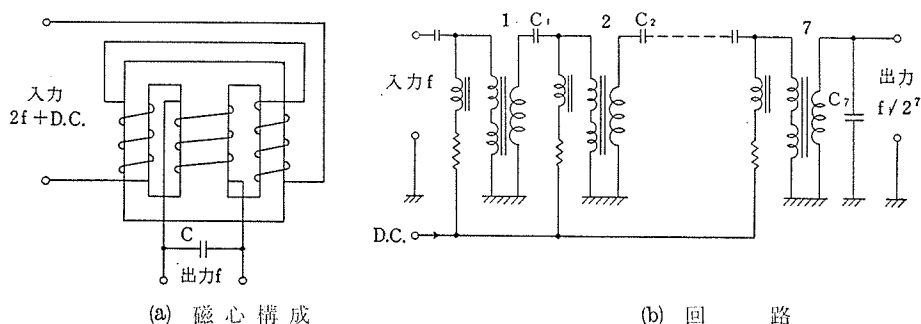
第9図 コレクタ同調形 LC 発振器の温度特性

### 4. パラメータ励振作用による分周器

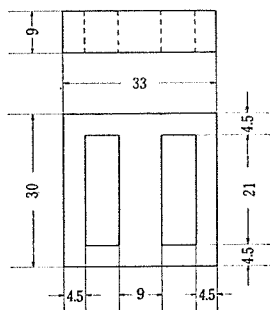
パラメータ励振を行なう磁心としては大きい非直線特性を有し、Qの大きい材料が望ましいが、同期の安定性と言う点を考えると温度等により磁心の特性が変化しないことが必要である。通常高周波においてはフェライトが使用される。フェライトは、渦流損が非常に小さくてQを大きくとれるが、しかし温度係数が比較的大きくまた枯化現象等の欠点を有している。

低周波の場合にはフェライトを使用する必要はなく、ニッカロイあるいは珪素鋼のカットコアを使用できるので、安定度を高くとりたい時にはこのような金属材料を使用した方がよい。ここでは低周波用のフェライトを使用したもので、後述するように温度特性にフェライトの温度特性がそのままあらわれてきておる。

第10図に示すのが本装置に用いたパラメータ励振作用による分周器の構造および回路図である。同図(a)のような構造の分周器を同図(b)に示すように7個接続して2分の1すなわち1/128の分周器とする。そして入力に6400 c/sを加え、出力に50 c/sを得るのである。



第10図 パラメータ励振作用による7段分周器



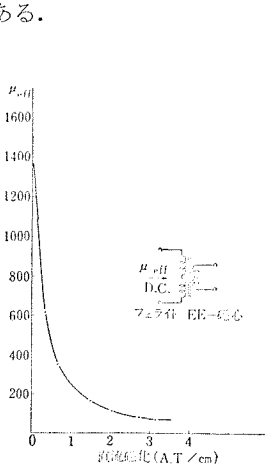
第11図 磁心寸法

第1表 フェライトの特性

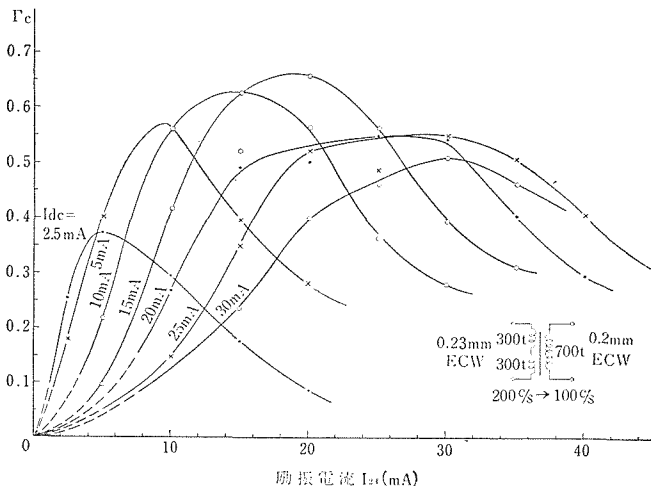
初透磁率 at 20°C	2000
飽和磁束密度 at 20°C, H=10Oe	2700 Gauss
残留磁束密度 at 20°C	600 Gauss
抗磁力	0.2エルステッド
キューリー点	85°C
温度係数	$4 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$
比抵抗 at 20°C	20オーム
比重	4.9

磁心寸法は第11図に示す大きさのもので、その特性は第1表のとおりである。

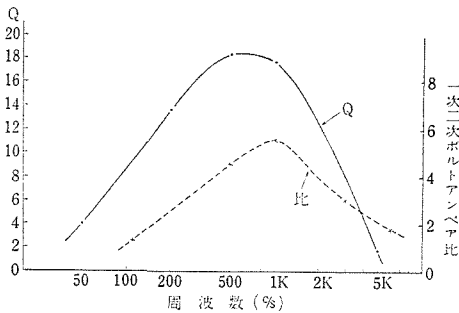
この磁心の透磁率は直流電流によって第12図のように変化するので、これによって作られたインダクタンスも同じように変化する。このインダクタンス変化率の最も大きいところに動作点をおくのが望ましい。インダクタンス変化率に相当する  $\Gamma_c$  の値を、発振限界法により求めて図示すると第13図のようになる。<sup>(6)</sup> また  $Q$  の値は使用周波数範囲では第14図のようになる。この値は直流電流を流さないときの微少交流に対する  $Q$  の値であって、使用状態とは異なるものである。しかし周波数による  $Q$  の状態を一応知ることができる。図において  $Q$  は 800 c/s 前後に最大値を示し、その周波数はこの寸法の磁心に窓枠一杯に線輪を巻く限り変化しないものである。分周器のように入力側と出力側で周波数が異なる場合には、各段における磁心はその周波数で  $Q$  最大を与える寸法、種類であるのが望ましい。それはこの分周器の1段あたりの励振入力と発振出力の比が周波数にたいして第14図のようにまったく  $Q$  の周波数特性と同じであるためである。



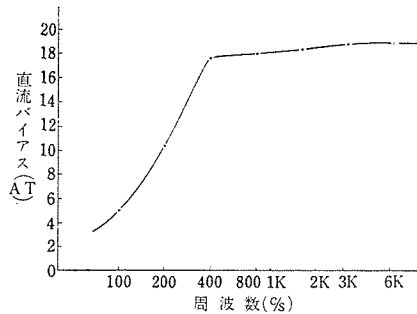
第12図 直流磁化による  
実効透磁率の変化



第13図  $\Gamma_c$  の特性



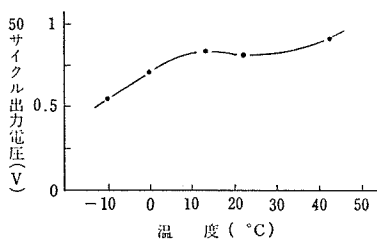
第14図 分周器の特性



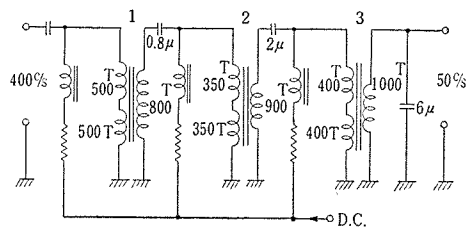
第15図 7段分周器の直流バイアス値

ここでは上述のような特性のまったく同一の磁心を7個使用して、第10図(b)の分周比1/128の分周器とした。このときの各段の直流バイアス電流は第15図に示すように、分周されるにしたがい小さくとらねばならなかった。これは各段同一の磁心を使用したので、分周されるにしたがい発振出力すなわち次段の励振入力が増減し、それに伴うところの直流バイアス電流最適値が小さいためである。第10図(b)の回路では、この直流バイアス電流を供給するのに各段にそれぞれ寒流線輪および抵抗を用意しているが、これは磁心にバイアス用の巻線を巻きそれを全部直列接続して供給してもよい。このときは各磁心の巻数を変えてそのアンペア・ターンが第15図の値になるようにする。このようにすれば寒流線輪および抵抗は、一個ずつで済むことになる。

この分周回路の温度特性は第16図のようになる。 $-10^{\circ}\text{C} \sim +42^{\circ}\text{C}$ の範囲で充分安定に動作している。さらに安定度を望むときには、途中400 c/sのところ増幅器を一段入れるのが良い。



第16図 7段分周器の温度特性

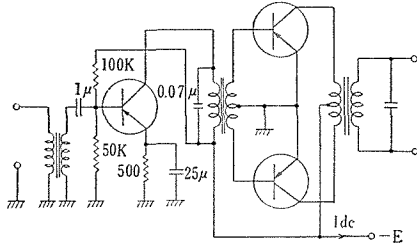


第17図 3段分周器

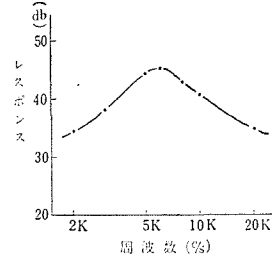
第17図に示す3段分周器は、発振回路に音片振動子を使用した場合の分周回路である。音片振動子による発振周波数が400 c/sであるので、分周比が $2^3$ 分の1すなわち1/8であれば、出力に50 c/sを得ることができる。したがって段数は3段となり図に示すような回路となる。

## 5. 増幅回路

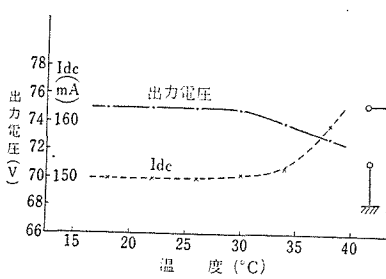
水晶発振回路の出力は約0.4 mWであるので、このままでは分周器を励振するのに不足である。そこで増幅回路により約500 mWまで増幅してやる必要があり、第1図の駆動増幅回路<sup>(7)</sup>がそれである。増幅する周波数は、水晶振動子を用いた場合には6400 c/s、音片振動子を用いた場合には400 c/sのみである。実際の回路は第18図に示すように、バッファとしてトランジスタを一石おき、出力段は中出力用トランジスタのB級プッシュプルとしたものである。6400 c/s用増幅回路の周波数特性は、第19図に示すように6400 c/sにピークをもってきておる。また温度にたいする変化は、第20図のとおりである。温度上昇により出力電圧は、若干低下するので出力500 mWに余裕をとってある。



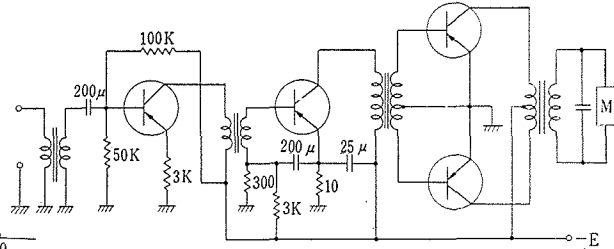
第 18 図 駆動増幅回路



第 19 図 駆動増幅回路の周波数特性

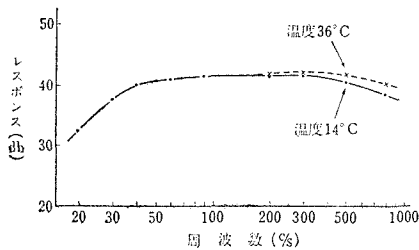


第 20 図 駆動増幅回路の温度特性



第 21 図 電力増幅回路

つぎに分周器の出力は約 1 V であるので、これを第 1 図の電力増幅回路で増幅する。そして 100 V、2 W の同期モータを駆動するのである。そこでこの回路の出力は 100 V、2 W で、周波数帯域は 30 c/s から 100 c/s までなければならない。これは水晶発振回路でも音片発振回路でも、まったく同じである。本装置の電力増幅回路は、第 21 図のとおりである。初段の入力トランスは、エミッタ接地トランジスタ増幅回路の入力インピーダンスが低く、また分周器に並列に接続されるインピーダンスが高くなければならぬので、この点を考慮しなければならない。増幅回路は、エミッタ接地トランジスタ回路を 3 段使用し、出力段は B 級プッシュプルとしたものである。トランジスタ回路の温度



第 22 図 電力増幅回路の周波数特性

特性あるいは高周波特性を考えた場合には、ベース接地回路の方が良いが、増幅度を大きくとる関係でエミッタ接地回路を用いた。周波数特性は、最高 100 c/s であるので問題なく、また温度特性も使用上問題なかった。この回路の周波数特性および温度の影響を第 22 図に示す。図より明らかなように、温度が上昇してもほとんど問題ない。低周波特性はトラン

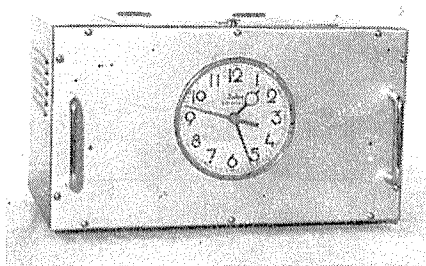


ジスタについては問題ないが、電解コンデンサの容量が温度低下とともに減少するので注意しなければならない。

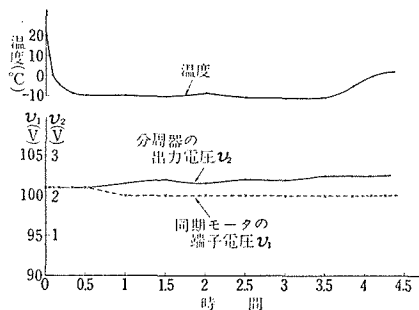
### 6. 時計運行特性

ここに述べる水晶時計は、以上の回路を第1図のように接続して時計としたものである。その概観は第23図に示すとおりであって、電源は常時交流100Vで動作し停電時はただちに電池に切替えられる。その消費電力は、水晶時計では約10VAであり、音片時計ではその半分程度である。また電源電圧の変動は時計の精度に関係するわけであるが、時計の動作としては交流65V程度まで低下しても十分に動作している。

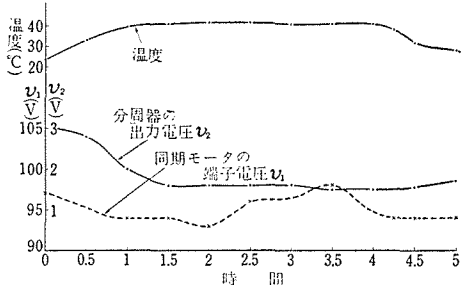
水晶時計の温度特性を測定すると、低温の場合は第24図のように、また高温の場合は第25図のようになる。第24図は装置全体を温度 $-10^{\circ}\text{C}$ にして3時間動作させたものである。第25図は温度 $40^{\circ}\text{C}$ にして3時間動作させたもので、いずれの場合も動作に問題がない。ただ水晶振動子の温度特性によって、時計が進みあるいは遅れるだけである。



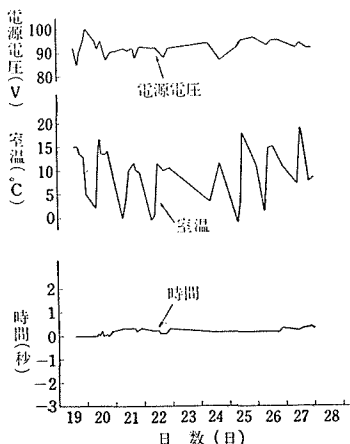
第23図 試作水晶時計の概観



第24図 水晶時計の低温特性



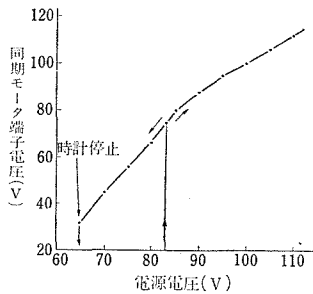
第25図 水晶時計の高温特性



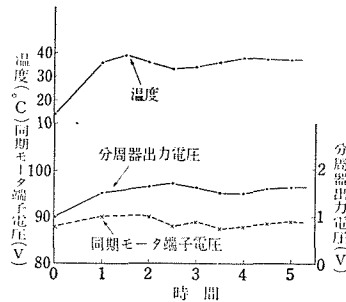
第26図 水晶時計の運行特性

第26図にこの水晶時計の運行特性の一例を示す。時間の測定は、NHKのラジオ時報と比較して測定したものである。これは12月頃の特性であるので、一日のうちで室温の変化がかなり大きく、また電源電圧も大分変動しておる。しかしながら時計の精度は、かなり良く所期の目的を充分満足しておる。

水晶振動子の代りに音片振動子を用いた場合には、発振周波数が400 c/sであるので分周回路は3段の分周器でよい。したがって回路も簡単になり、電源消費電力も少なくて済み約5 VAである。この音片時計の電源電圧に対する特性は、第27図のようになる。分周回路の発振特性にヒステリシス現象があるので、この図にもそれがあらわれておる。すなわち電源電圧が85 V以上で時計の運転は開始され、逆に電源電圧を下げた場合は65 V程度まで動いておる。この場合に音片発振周波数が電源電圧であまり影響されなければ、時計として充分役立つわけである。また高温中の運行による出力電圧の変動を第28図に示す。



第27図 音片時計の電源電圧特性



第28図 音片時計の高温特性

試作した音片時計では、その精度が水晶時計より劣っていた。これは水晶発振回路と音片発振回路の特性を比較すれば明らかなように、水晶発振回路の精度の方が良いためである。音片振動子も性能の良いものを使用すれば、もちろん水晶時計あるいはそれ以上の精度の時計が得られるはずである。

## 7. 結 言

以上にパラメータ励振作用による分周器の一応用として、これを用いた水晶時計について述べた。主としてこの分周器を水晶時計および音片時計に、いかに応用するかについて述べた。そして時計の精度を決定する発振回路あるいはトランジスタ増幅回路に関しては、数多くの文献が発表されているので、ここではそれらによって試作した回路の特性を述べたに過ぎない。

時計のように長時間連続使用する装置については、あらゆる面から検討を加えてもなお充分と言うことはできないが、試作した時計については主として温度特性、電源電圧特性を測定した。温度特性は、我々が日常生活を行なう場合に経験する範囲の温度

( $-10^{\circ}\text{C}$ ~ $40^{\circ}\text{C}$ )について測定した。これらの測定から明らかのように充分実用になる時計が得られた。そしてこの時計はつぎの特長を有するものである。

- (1) 水晶振動子あるいは音片振動子を使用するので非常に精度が高い。
- (2) 分周回路はインダクタンスとコンデンサーのみで行なうので同期が非常に安定である。
- (3) 同期はずれのさいは、出力が零になるので時計の誤動作がない。
- (4) 小形軽量である。
- (5) 消費電力が少ない。
- (6) 寿命が半永久的である。

## 8. 文 献

- (1) 山口：時計，昭和31年8月発行。
- (2) 飯島：電気通信学会雑誌 第38巻 第1号 p. 69 (昭和30年1月)。
- (3) 喜安他訳：トランジスタ回路，昭和31年11月発行。
- (4) 青木，東条：昭和31年電気関係学会東北支部連合大会講演論文集 30A 5。
- (5) 丹野：信大工学部紀要 第10号。
- (6) 電気通信学会：パラメトロンとその応用，昭和35年2月発行。
- (7) 柳沢：トランジスタとその回路，昭和30年12月発行。
- (8) R. P. Turner : Radio & Television News p. 53 (1956-4)。

### Summary

#### The Crystal-Controlled Clock with a Frequency Divider which Utilizes Parametric Oscillation

Yorimoto T<sub>ANNO</sub>

(Department of Communication Engineering, Faculty of Engineering)

When a nonlinear inductance is excited by a current of a certain frequency, a subharmonic of half the frequency of the current oscillates a tank circuit comprising the nonlinear inductance and a capacitance. The divided ratio of a frequency divider connected with a multistage is the product of the divided ratio of the individual stages. The input frequency is divided by  $2^n$ . This divider is very stable and of long life since it comprise inductances and condensers.

In this paper, an application of the frequency divider which utilizes parametric oscillation is described. It can make use of a frequency divider of a crystal-controlled clock. The divider is excited by the current of the frequency 6400 c/s which is the output of the quartz crystal oscillator. The divided ratio of the frequency divider is  $1/128$ , consequently, the output of the divider is 50 c/s. This is amplified with a transistor amplifier. The synchronous motor is rotated by the output 2 watts.

The principle of the clock and its characteristics are also treated.