

アクティブ低域フィルタと高域フィルタを用いた周波数計の設計

降矢順治 西 正明 竹内芳雄*

A Design of the Frequency Meter Composed
of an Active Low-Pass Filter and High-Pass Filter

Jnnji Furuya Masaaki Nishi Yoshio Takeuchi

キーワード：周波数計， アクティブ低域フィルタ・高域フィルタ， IC演算増幅器

1. まえがき

デジタル技術の進歩にともない、高い精度をもった種々のデジタル周波数計が市販されるようになってきているが、それらはコストの点では高価であり、教育現場で入手するのは困難である。教育現場で電気回路や電子回路を教材として取りあげ、電気信号の周波数を測定する場合には低コストの周波数計が必要となる。そのため筆者らの一人は、IC演算増幅器を用いた進相回路（進み位相回路）と抵抗およびコンデンサから成る簡易形の周波数計を取りあげ、その設計法を示した。^①

本論文では、低コストの周波数計として、アクティブ低域フィルタとアクティブ高域フィルタから成る周波数計を考案し、その周波数測定回路の理論的解析を行っている。この周波数計は、回路構成が比較的簡単であり、製作が容易であり、低コストになるという利点をもつものであり、中学校の教育現場においても十分実用に耐えうるものである。

取りあげた周波数計の測定回路を製作し、実験を行って、測定可能な周波数範囲を検討した。

2. 周波数計の測定回路

従来、アナログ周波数計としては、キャンベルブリッジ、ウィーンブリッジやヒューズブリッジのような周波数ブリッジを用いたものが多くみられるが、^{②③} 筆者らが考案したアナログ周波数計は、アクティブ低域フィルタとアクティブ高域フィルタと加算器から成るものであり、図1に示すような回路構成となる。この測定回路の基本的な考え方は、低域フィルタと高域フィルタを並列に接続し、共通の入力電圧 v_1 を加えたときに発生する低域フィルタの出力電圧 v_2 と高域フィルタの出力電圧 v_3 を加算し、加算器の出力 v_0 ($=v_2+v_3$) が最小となるように、低域フィルタと高域フィルタの通過域しゃ断周波数を等しくすることにより、周波数を測定しようとするものである。

* 山口市湯田中学校

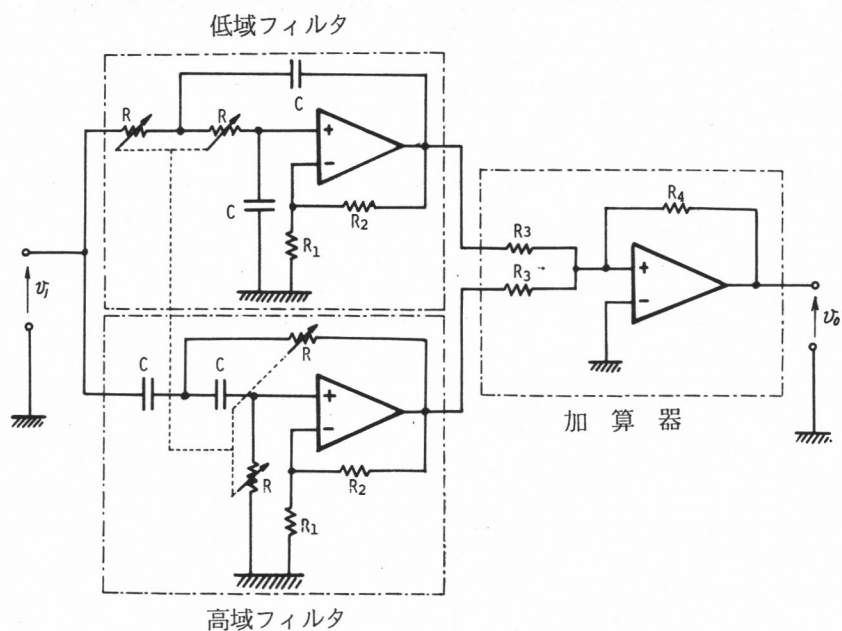


図1. 周波数測定回路

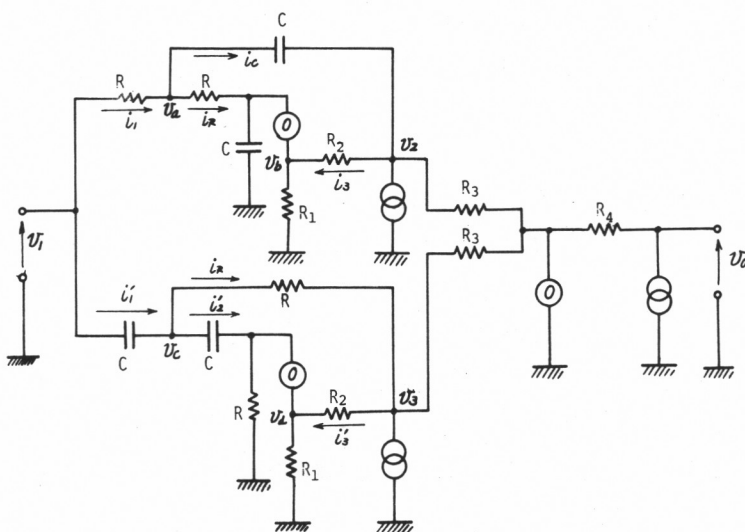


図2. 図1の等価回路

まず、この周波数測定回路の理論的解析を行うために、ナレータとノレータ⁽⁴⁾を用いて図1の測定回路の等価回路を書くと図2のようになる。図2に示した各接続点における電圧記号や各枝を流れる電流記号を用いると、低域フィルタの入力 v_1 と出力 v_2 との間には、次のような関係が成り立つ。

$$v_a = v_1 - Ri_1 \quad (1)$$

$$v_b = v_a - Ri_2 = \frac{1}{sC} \cdot i_2 \quad (2)$$

$$v_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_b = v_a - \frac{1}{sC} \cdot i_c \quad (3)$$

$$i_1 = i_2 + i_c \quad (4)$$

$R_1 = R_2$ とすると、式(1)～(4)から v_a 、 v_b を消去し、 v_2/v_1 を求めると、

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{2}{s^2 + \frac{1}{CR}s + \frac{1}{(CR)^2}} \quad (5)$$

となる。次に、高域フィルタの入力 v_1 と出力 v_3 との間には次のような関係が成り立つ。

$$v_c = v_1 - \frac{1}{sC} \cdot i_1 \quad (6)$$

$$v_b = v_c - \frac{1}{sC} \cdot i_2 = R \cdot i_2 \quad (7)$$

$$v_3 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_d = v_c - R \cdot i_R \quad (8)$$

$$i_1 = i_2 + i_R \quad (9)$$

$R_1 = R_2$ とすると、式(6)～(9)から v_c 、 v_d を消去し、 v_3/v_1 を求めると、

$$\frac{v_3}{v_1} = \frac{2s^2}{s^2 + \frac{1}{CR}s + \frac{1}{(CR)^2}} \quad (10)$$

となる。加算器の2つの入力 v_2 、 v_3 と出力 v_0 との間には、

$$v_0 = -\frac{R_4}{R_3}(v_2 + v_3) \quad (11)$$

が成り立つから、式(11)に式(5)と式(10)を代入すると、

$$v_0 = -\frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{2\left(s^2 + \frac{1}{(CR)^2}\right)}{s^2 + \frac{1}{CR}s + \frac{1}{(CR)^2}} \cdot v_1 \quad (12)$$

となる。s = jωとおき、|v_o/v_i|を求めると、

$$\left| \frac{v_o}{v_i} \right| = \frac{2R_4 \left[\frac{1}{(CR)^2} - \omega^2 \right]}{R_3 \sqrt{\left\{ \left(\frac{1}{CR} \right)^2 - \omega^2 \right\}^2 + \left(\frac{\omega}{CR} \right)^2}} \quad (13)$$

となる。式(13)から、|v_o/v_i|が零となるのは、すなわち周波数測定回路の出力が最小となるのは、分子が零のときであり、

$$\omega = \frac{1}{CR} \quad (14)$$

が成り立つときである。これから、周波数f (= ω/2π)は、

$$f = \frac{1}{2\pi CR} \quad (15)$$

となる。このことは、入力電圧(被測定電圧)v_oの周波数fを測定するために周波数測定回路の抵抗RまたはコンデンサCを変化させて出力電圧v_oを最小にすると、式(15)が成り立つことになり、式(15)から周波数計fを測定することができることを示している。従って、図1の周波数測定回路によって交流電圧v_iの周波数fを測定するには、測定回路の出力電圧v_oを入力インピーダンスの大きい交流電圧計で測定し、その電圧が最小となるように抵抗RまたはコンデンサCの値を変化させて、そのときのRとCの値から、式(15)を用いて測定電圧v_iの周波数fを求めればよいことになる。

実際には、図3に示すように切換スイッチSWを用いて、コンデンサの容量CをC₁、C₂、C₃のように段階的に変化させ、それぞれの容量Cにおいて、4個の同じ抵抗値をもつ可変抵抗器Rを連動的に変化させると、それぞれのコンデンサCにおける周波数と測定可能な周波数範囲を求めることができる。

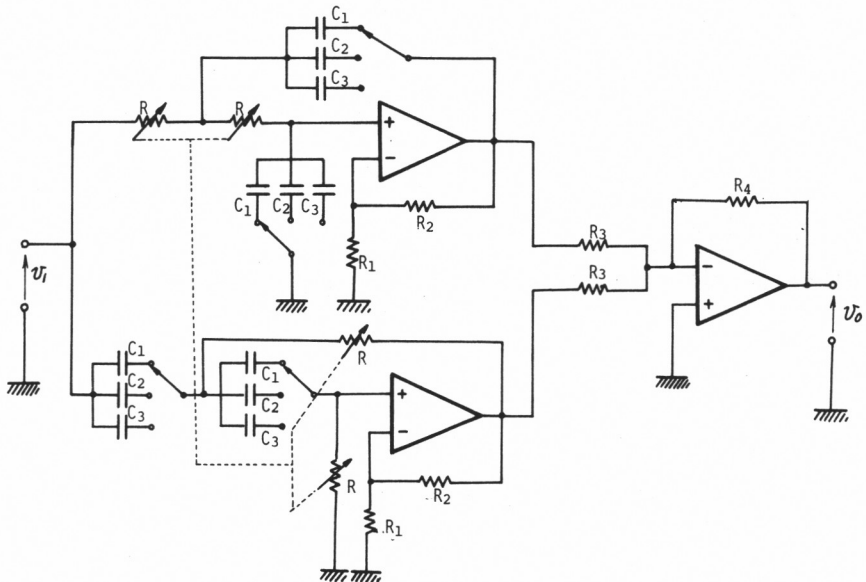


図3. 周波数測定回路

3. 周波数測定回路の実験

図3に示した周波数測定回路を製作し、測定精度と測定可能な周波数範囲を検討するに当たって、各素子値と測定機器を次のようにした。

抵抗器Rには、0.1~100000 Ω の可変抵抗器、抵抗 R_1 、 R_2 には、 $R_1 = R_2$ として、10.003K Ω のものを4個、抵抗 R_3 には10.002K Ω の値をもつものを2個、抵抗 R_4 には20.000K Ω の値をもつものを1個、コンデンサCには $C_1 = 1.08 \mu F$ 、 $C_2 = 0.1064 \mu F$ 、 $C_3 = 0.0096 \mu F$ の値をもつものを、それぞれ4個を用意し、IC演算増幅器には汎用のTA7504M、高スルーレートのLF356Nをそれぞれ3個用いた。

測定用機器には、被測定周波数信号源として交流正弦波発信器（横河 - HEWLETT・PAKARD. 3312A）を用い、出力電圧 v_o の測定には、デジタルボルトメータを用いた。また、この周波数測定回路の周波数の測定精度を確認するために周波数カウンタ（タケダ理研、TR5501）を用意した。

3.1 演算増幅器の周波数特性

図3の加算器の抵抗 R_4 の値を抵抗 R_3 の値の2倍に選んだので、式(13)の電圧増幅度は4倍となり、汎用演算増幅器TA7504Mと高スルーレート演算増幅器LF356Nを用いたときの4倍の電圧増幅度の周波数特性を測定してみると、図4(a)、(b)のようになる。

TA7504Aは40KHzまで平坦であるが、LF356Nは300KHzまで平坦であり、LF356Nの方が周波数特性がすぐれていることがわかる。

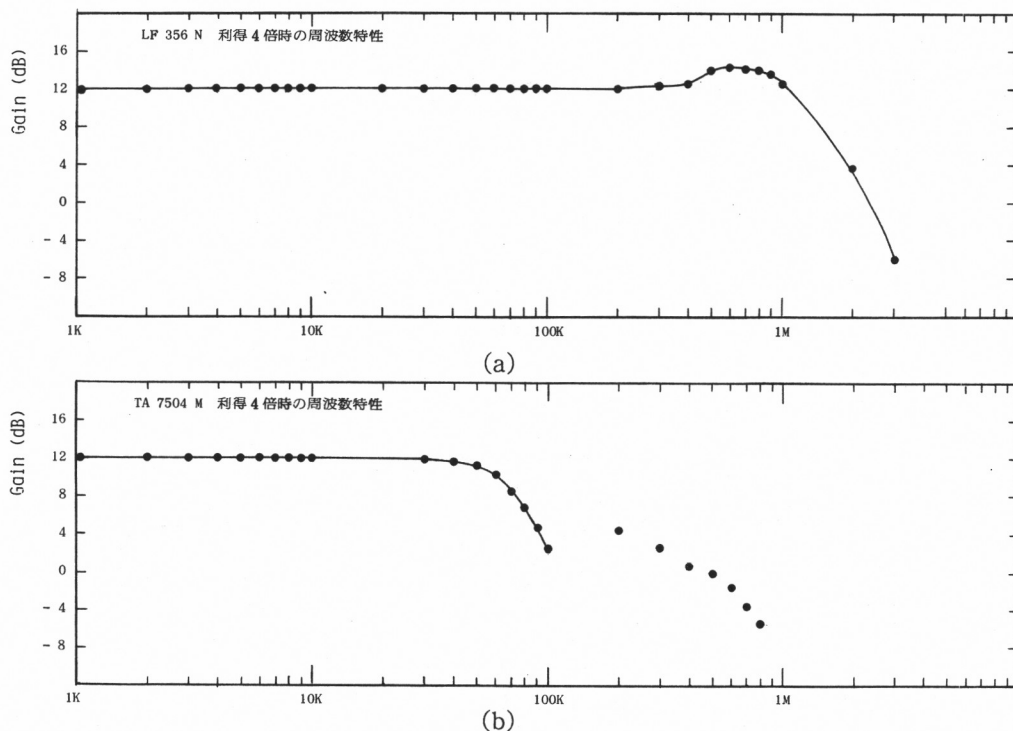


図4. IC演算増幅器の利得特性

3.2 抵抗RとコンデンサCを指定したときの周波数特性

図3に示す周波数測定回路の周波数特性において電圧利得が最小になる周波数附近でどのように変化するかを調べてみた。周波数測定回路のコンデンサCがそれぞれ $C_1 = 1.08 \mu\text{F}$ 、 $C_2 = 0.1064 \mu\text{F}$ 、 $C_3 = 0.0096 \mu\text{F}$ の場合に、電圧利得を最小にする周波数 f が 1KHz になるように式(15)から抵抗Rの値を求め、その抵抗値に抵抗Rを設定したときの周波数特性を、LF356NとTA7504Mに関して測定すると、図5～図7のようになる。いずれの場合にも周波数が 1KHz のときに電圧利得が急激に最小になることがわかる。

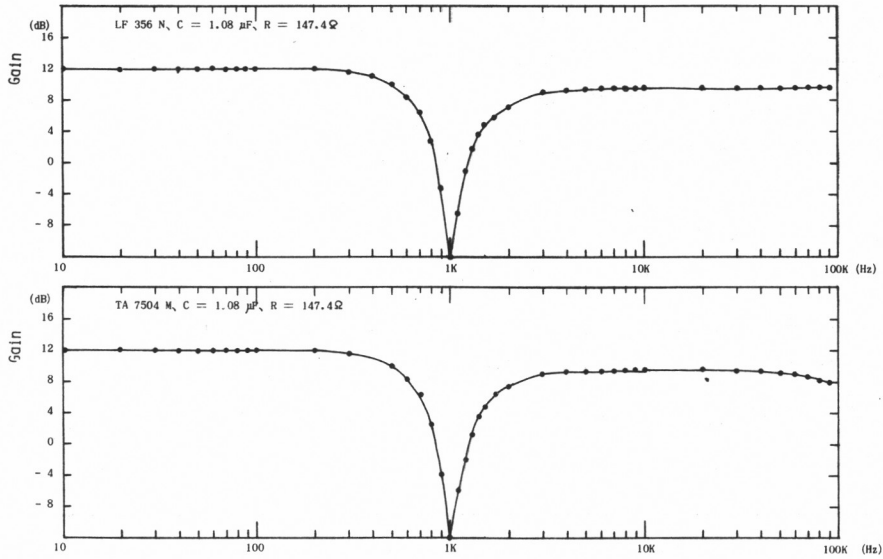


図5. 抵抗RとコンデンサCを指定したときの利得特性

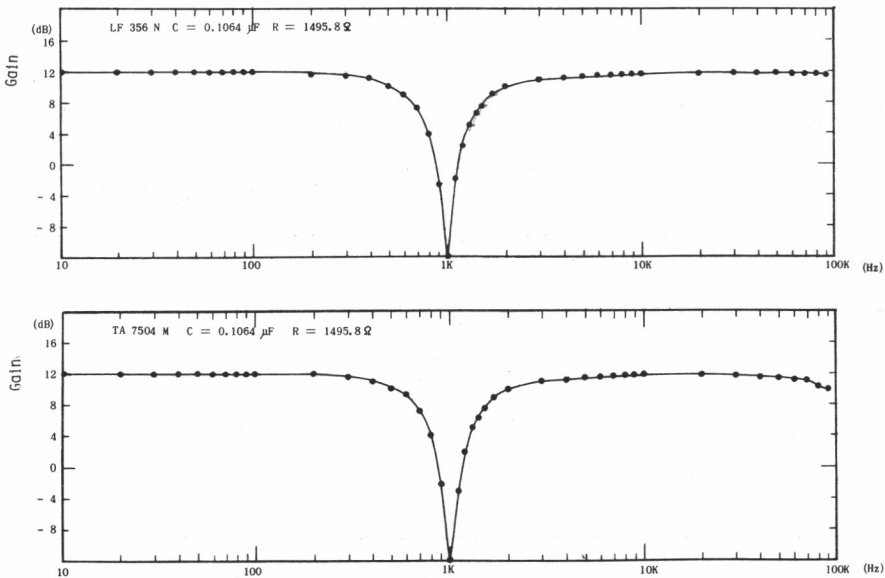


図6. 抵抗RとコンデンサCを指定したときの利得特性

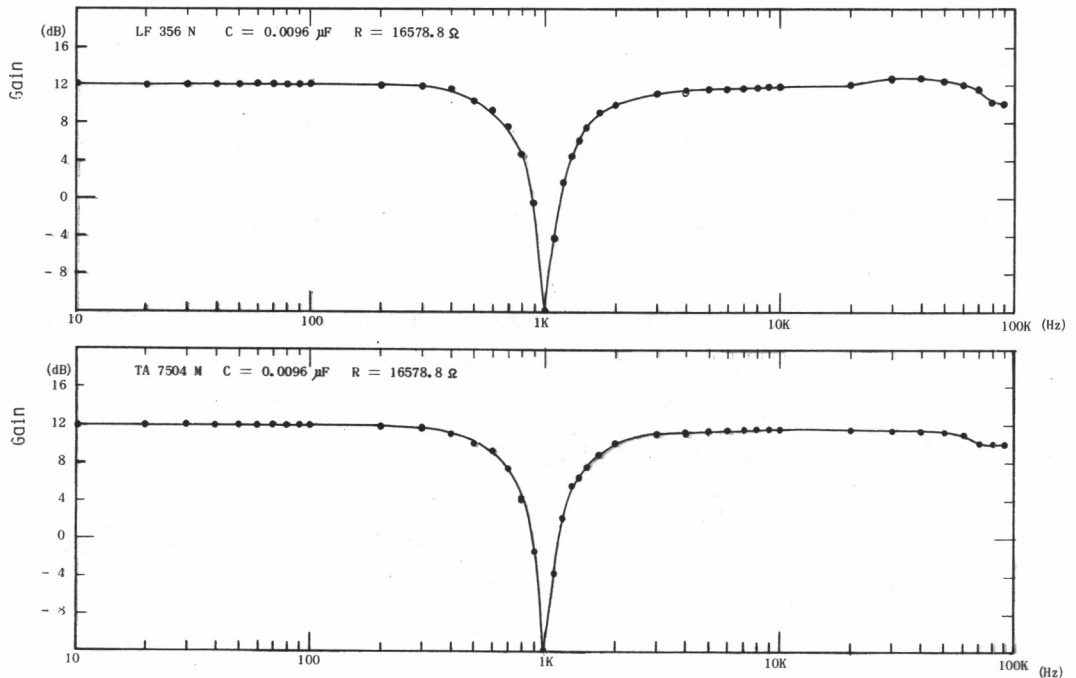


図7. 抵抗RとコンデンサCを指定したときの利得特性

3.3 周波数測定回路の精度

図3に示す周波数測定回路において、4個のコンデンサCの値がそれぞれ $C_1 = 1.08 \mu F$ 、 $C_2 = 0.1064 \mu F$ 、 $C_3 = 0.0096 \mu F$ のように3つの容量値をもつようにセットし、4個の変可抵抗器Rを同時に連続的に変化させて入力電圧の周波数を測定してみた。IC演算増幅器としてTA7504MとLF356Nを使用したときに、周波数測定回路の周波数測定精度を示すと、図8～図10のようになる。この測定精度を求めるに当たっては基準値（最確値）が必要となるので、それには前述の極めて精度のよいデジタル周波数カウンタ（TA5501）を用いることにし、このカウンタによる入力電圧の周波数の測定値を基準値とした。

この周波数カウンタの精度は、 $1\text{Hz} \sim 10\text{Hz}$ では $\pm 10\% \sim \pm 1\%$ となっており余り良くないが、 $10\text{Hz} \sim 100\text{Hz}$ で $\pm 1\% \sim \pm 0.1\%$ 、 $100\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ で $\pm 0.1\% \sim \pm 0.01\%$ となり、 100Hz 以上では極めて精度がよいので、この周波数カウンタの測定値を基準値としてもよいと考えられる。従って、周波数カウンタ（TR5501）で測定した周波数の値を f_0 とし、図3の周波数測定回路で測定した周波数の値を f_s としたときに

$$\frac{f_s - f_0}{f_0} \times 100(\%)$$

で算出される値を精度とした。図8～図10から、精度を $\pm 1(\%)$ としたときに、IC演算増幅器としてTA7504M、LF356Nを使用した場合に、コンデンサの容量値Cを $C_1 = 1.08 \mu F$ 、 $C_2 = 0.1064$

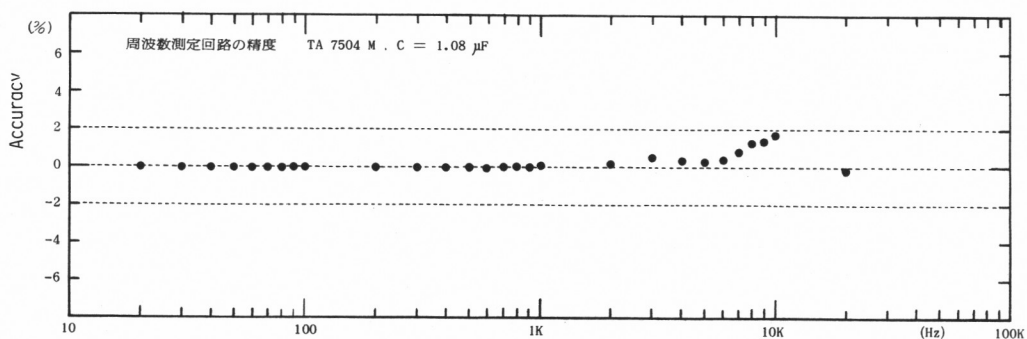
μF 、 $C_3 = 0.0096 \mu F$ にそれぞれセットし、それらの容量値における測定可能な周波数範囲をもとめると表1ようになる。また、精度を $\pm 2 (\%)$ としたときの測定可能な周波数範囲をもとめると()の中に示した値となる。

精度を $\pm 1 (\%)$ としたときに、TA7504Mを用いると測定可能な周波数範囲は $10H_z \sim 40KH_z$ であり、LF356Nを用いると、測定可能な周波数範囲は $10H_z \sim 80KH_z$ である。

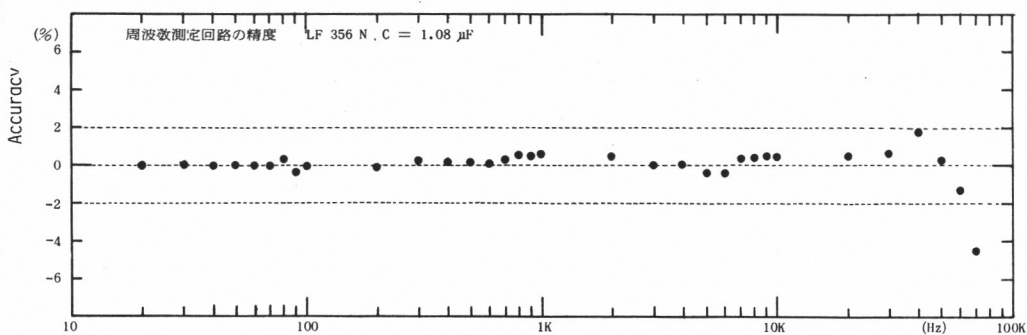
精度を $\pm 2 (\%)$ としたときに、TA7504Mを用いると測定可能な周波数範囲は $10H_z \sim 40KH_z$ であり、LF356Nを用いると、測定可能な周波数範囲は $10H_z \sim 100KH_z$ である。

前回の進相回路を用いた周波数測定回路⁽¹⁾の精度と比較してみると、今回の周波数測定回路の方が精度 $\pm 1 (\%)$ の周波数範囲が広がっている。その理由として、進相回路を用いた周波数測定回路では電圧利得の周波数特性のほかに位相の周波数特性も精度に影響したのに対して、本論文の低域フィルタと高域フィルタを用いた周波数測定回路では電圧利得の周波数特性のみが精度に影響するからであると考えられる。

コンデンサの容量値をさらに小さくしたときの問題点や同じ素子値のばらつきの問題点については、進相回路を用いた周波数測定回路の場合と同様である。



(a)



(b)

図8. 周波数測定回路の精度

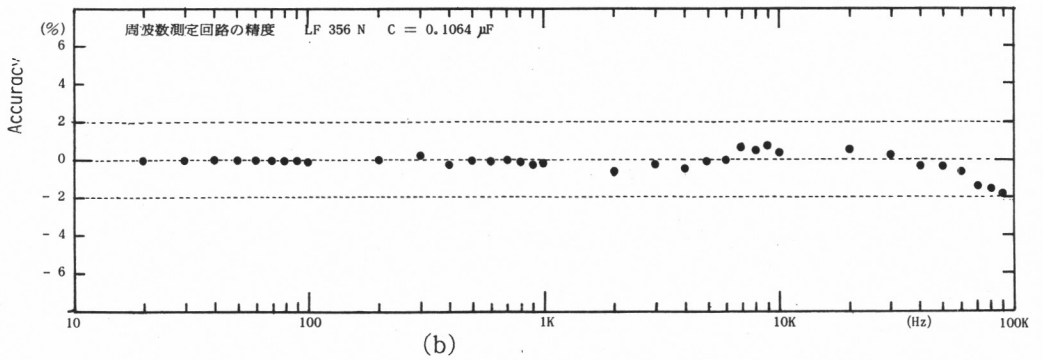
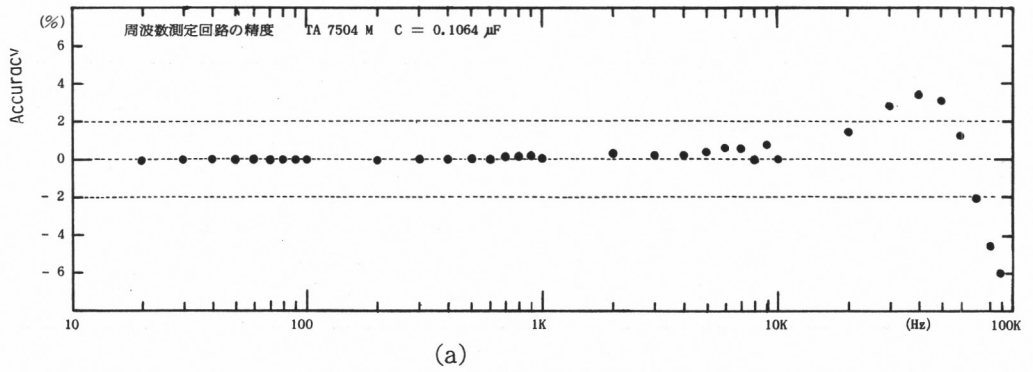


図9. 周波数測定回路の精度

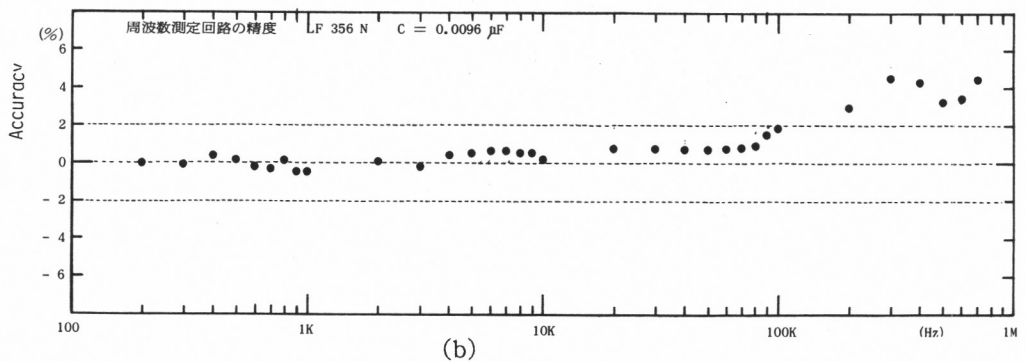
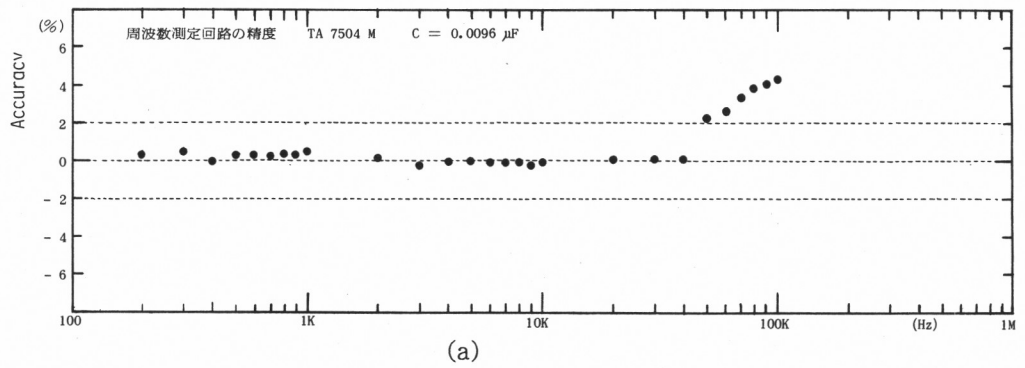


図10. 周波数測定回路の精度

表1. 精度を±1%としたときの測定周波数範囲

	$C_1 = 1.08 \mu F$	$C_2 = 0.1064 \mu F$	$C_3 = 0.0096 \mu F$
TA7504M	7KHz (20KHz)	10KHz (20KHz)	40KHz (40KHz)
LF356N	30KHz (60KHz)	60KHz (90KHz)	80KHz (100KHz)

4. むすび

本論文では、IC演算増幅器を用いたアクティブ低域フィルタとアクティブ高域フィルタから成る周波数計（周波数測定回路）を取りあげ、これによって交流電圧の周波数の測定が理論的に可能になることを明らかにした。この周波数測定回路を製作し実験を行った結果、測定精度を±1（%）にすると、測定可能な周波数範囲は、汎用演算増幅器（TA7504M）を用いた場合には10Hz～40Hzであり、高スルーレート演算増幅器（LF356N）を用いた場合には10Hz～80KHzとなることがわかった。従って、この周波数測定回路は比較的低い周波数の測定には有効である。

この周波数測定回路は簡単なアクティブ低域フィルタとアクティブ高域フィルタと加算器から構成された簡易形のものであり、そのため、低コストで製作できるものであるが、中学校などの教育実践の場では十分実用に供し得るものである。

文 献

- (1) 降矢：“演算増幅器を用いた簡易形周波数測定回路の設計”、日本産業技術教育学会誌、Vol.28、No.1、March 1986.
- (2) 堤、金古：“電気計測”、学献社（昭55）
- (3) 豊田：“電気計測学”、朝倉書店（昭50）
- (4) 藤井：“演算増幅器回路の設計”、産報（昭52）