

# トルク型の高感度マイクロ波電力計

浜 崎 襄 二

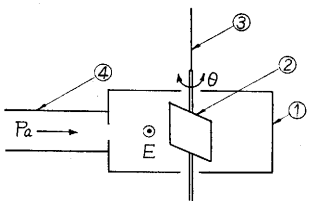
## 1. は し が き

測定器の寸法と同程度の波長の電波はマイクロ波と呼  
ばれているが、この周波数帯の電力は大別して次の3つ  
の方法で測定されている。第1は、マイクロ波をほとん  
ど完全に熱に変換し、それを測定するかあるいはそれを  
媒介にして測定しやすい低周波電力と置換する方法であ  
り、水負荷電力計、パレットあるいはサーミスタ電力計等  
の実用的電力計や、熱量計型電力計はこの種類のもの  
である。第2は電力の伝送に伴う電磁的な歪の効果を測定  
して電力を求める方法であり、この種類の電力計である  
トルク型電力計では、マイクロ波電磁界を包む金属面が  
受ける力を測定して電力を求めている。またホール効果  
を利用した電力計も試みられている。第3は既知の電力  
を発生する電源の電力と比較する方法で、受信機の感度  
の測定に広く使用されているが電力計とは呼ばれない。

トルク型電力計は、マイクロ波電力の絶対測定（長さ、  
質量、時間の測定から電力が求められる）を行なうこと  
ができ、また原理的には電力の損失を伴わないが、反面、  
電磁界による力は極めて弱く、またそれは電力の周  
波数スペクトルによって変化する性質がある。本文の電  
力計は、空胴共振器と機械的な共振系とを利用して極力  
感度の改善を試みた 24,000 Mc 帯のトルク型電力計で本  
学工学部岡村教授によって述べられた原理<sup>(1),(2)</sup>に従っ  
て試作したものであり、1mW 程度の電力を測定するこ  
とができた。すでに同じ原理に基づく 9,000 Mc 帯の電  
力計が発表されているが<sup>(3)</sup>、本文ではそれと多少異な  
った観点からこの種の電力計について検討した結果と試作  
した電力計の概要を報告しよう。

## 2. 原 理

第1図のように、空  
胴共振器の電界の強い  
位置に細い水晶系で金  
属板（ベイン）が吊る  
されると、ベインの表  
面に働く電界の張力に  
よるトルクがベインの  
回転角を変化させよう  
とする。共振器が共振  
する位置にベインがあ  
る時には、電源から入



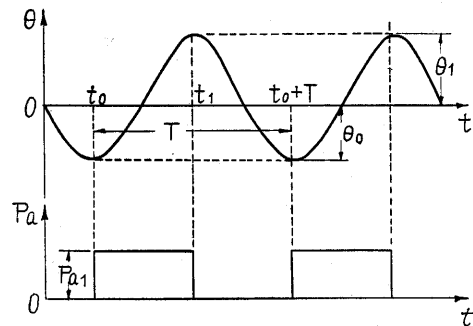
① 空胴共振器 ② ベイン  
③ 水晶系 ④ マイクロ波  
電力を供給する導波管

第1図 トルク型高感度  
電力計の原理

射するマイクロ波電力は空胴共振器に吸収され、電磁界  
によるトルクは水晶系の歪によって測定される。この状  
態は、伝送線路を終端した抵抗の両端にかかる電圧が静

電電圧計で測定されるのと類似であり、ベインは静電電  
圧計の可動電極に対応すると考えられる。感度を増大す  
るためには、空胴共振器の  $Q$  を高くしてベインに働くト  
ルクを大きくするとともに、水晶系を軸とした回転振動  
の共振を利用して回転角を拡大することが有効であり、  
特に後者によって空胴共振器の  $Q$  曲線を掃引するなら  
ば、後述のように安定に動作させることができる。これ  
らの方法によってトルク型電力計の感度を著しく改善す  
ることができるが、付属の装置が複雑となり電力損失は  
増大する。

ベインおよび空胴共振器の形状は、共振器の共振周波  
数がベインの回転角  $\theta$  の単調な函数となるように選ば  
れており、また空胴共振器の共振特性は導波管を負荷し  
ても十分急峻であると仮定しよう。マイクロ波が加えら  
れていない時のベインの自然静止位置を  $\theta=0$  とし、共振  
器の共振周波数  $f_r$  が減少する方向を  $\theta$  およびトルク  
 $M$  の正方向と定める。第2図のように持続的な回転振



$\theta$ : ベインの回転角(自然静止位置  $\theta=0$ )  $P_a$ : マイ  
クロ波電源の有効電力  $t$ : 時間

第2図 ベインの回転角とマイクロ波電力の相互関係

動が起こっている時、 $d\theta/dt=0$ 、 $d^2\theta/dt^2>0$  の瞬間を  
 $t_0$ 、次の  $d\theta/dt=0$ 、 $d^2\theta/dt^2<0$  の瞬間を  $t_1$  としよう。  
マイクロ波は、回転振動が助勢され持続するように、回  
転振動の1周期  $T$  の間で  $t_0$  から  $t_1$  までの期間に多く、  
 $t_1$  から  $t_0+T$  までの期間に少なく加えられているもの  
とする。

ベインは電界による張力と同時に、その表面の磁界に  
よる圧力も受けている。トルクを大きくするためベイン  
の寸法は比較的大きいのでその周囲の電磁界を解くこと  
は困難であるが、空胴共振器に蓄えられているエネルギー  
とトルクとの関係は次の作用法則 (Action Law) から直  
接求められ、ベインの周囲の電磁界を直接に解く必要は  
ない。作用法則は“無損失の空胴共振器に蓄えられたエ

エネルギーと共振の周期との積（作用量）は、共振器を無限にゆっくり変形しても変わらない”ことを述べるもので、空胴共振器内の光子の数の保存を意味する。この法則は A. L. Cullen<sup>(4)</sup> 以来トルク型電力計の較正原理として用いられており、空胴共振器およびペインに多少の損失があってもその影響はほとんど現れないことが判っている<sup>(5)</sup>。

周波数  $\Delta f$  の中に含まれるマイクロ波電力がペインにおよぼすトルク  $\Delta M$  と微小回転角  $\delta\theta$  との積は、空胴共振器に蓄えられているエネルギー  $\Delta E$  の微小減少分に等しい。作用法則によれば  $\Delta E$  と  $f_r$  とは比例するので次の関係が得られる。

$$\Delta M \cdot \delta\theta = -\frac{\delta f_r}{f_r} \Delta E \quad \dots\dots\dots (1)$$

電源の有効電力（available power）の  $\Delta f$  に含まれる成分を  $p_a \Delta f$  とし、空胴共振器の壁面の電力損失と蓄えられたエネルギーとの比および入力導波管から見た電力吸収係数をそれぞれ  $2\pi f_r / Q_u$  および  $g(f_r, f)$  とすると、壁面に吸収される電力は

$$\frac{2\pi f_r}{Q_u} \Delta E = g \cdot p_a \Delta f \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2) から  $\Delta E$  を消去して  $f$  について積分すればトルク  $M$  は

$$M = -\frac{1}{2\pi} \frac{1}{f_r^2} \frac{df_r}{d\theta} \int_0^\infty Q_u \cdot p_a \cdot g df \quad \dots\dots\dots (3)$$

水晶系の弾性係数を  $K$ 、ペインおよびその付属物の  $\theta$  に関する慣性率を  $I$ 、摩擦係数を  $R$  とした時の振動の方程式

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + R \frac{d\theta}{dt} + K\theta = M \quad \dots\dots\dots (4)$$

に (3) を代入し、 $\frac{d\theta}{dt}$  を乗じて  $t_0$  から  $t_1$  までおよび  $t_1$  から  $t_0+T$  まで積分して差を求めると次の関係が得られる。

$$K(\theta_1^2 - \theta_0^2) + \left\{ \int_{t_0}^{t_1} R \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 dt - \int_{t_1}^{t_0+T} R \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 dt \right\} \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{f_{r1}}^{f_{r0}} \frac{df_r}{f_r^2} \int_0^\infty Q_u (p_{a1} + p_{a0}) g df \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $p_{a1}$ 、 $p_{a0}$  はそれぞれ  $t_0$  から  $t_1$  まで、および  $t_1$  から  $t_0+T$  までの期間に送られるマイクロ波の有効電力密度であり、 $\theta_0$ 、 $\theta_1$  はそれぞれ時刻  $t_0$ 、 $t_1$  における  $\theta$  の値であり、また、 $f_{r0}$ 、 $f_{r1}$  はそれぞれ  $\theta_0$ 、 $\theta_1$  における  $f_r$  の値である。空胴共振器が  $\theta=0$  の近くで共振し、 $M$  が  $t=(t_0+t_1)/2$  に対して対称的に働く場合には左辺第2項は第1項に比較して無視できる。空胴共振器が  $Q$  の高い単純な共振特性を示し、これが並列共振となる端子から電源側を覗いた時  $g+jb$  の一定のアドミタンスであるとすれば、電力吸収係数は

$$g = \frac{4Q'_L{}^2}{Q_u Q_{ext}} \cdot \frac{g}{1 + \left\{ \frac{2Q'_L'}{f} (f_r' - f) \right\}^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $Q_{ext}$ 、 $Q_L$  はそれぞれ空胴共振器の外部  $Q$  および負荷  $Q$  であり、 $f_r'$  および  $Q'_L'$  は次の関係で定まる量である。

$$f_r' = f_r - f \frac{b}{2Q_{ext}} \quad \frac{1}{Q'_L'} = \frac{1}{Q_u} + \frac{g}{Q_{ext}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

特に、回転振動の一周期中  $t_0$  から  $t_1$  までの期間だけ単一周波数  $f$  を持つマイクロ波電力  $P_{a1}$  が送られて来る場合を考えよう。 $\theta$  の変化範囲で  $\theta$  と  $f_r$  とは直線関係にあり、 $\theta=\phi$  で  $f_r'=f$  となり空胴の半値幅を与えるペインの回転角を  $\Delta\theta$  とし、また、マイクロ波を与えない時の自由減衰振動の減衰定数を  $\alpha$  とすれば

$$p_{a1} = P_{a1} \cdot \delta(f) \quad p_{a0} = 0 \quad \delta(f) \text{ はデルタ函数} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{1}{\Delta\theta} = -\frac{2Q'_L'}{f} \frac{df_r}{d\theta}, \quad \frac{2Q'_L'}{f} (f_r' - f) = -\frac{\theta - \phi}{\Delta\theta} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\theta_0 = -\theta_1 e^{-\alpha T/2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

(5) の左辺第2項を無視し、これに (6), (8), (9), (10) を代入して積分すれば次の関係が得られる。

$$P_{a1} = A_1 \cdot A_2 \cdot \Phi \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし

$$A_1 \equiv \frac{Q_{ext}}{g Q'_L'} f \quad A_2 \equiv K \tanh \frac{\alpha T}{4} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\Phi \equiv \frac{\pi (|\theta_0| + |\theta_1|)^2}{\text{Tan}^{-1} \frac{1}{\Delta\theta} \left\{ \frac{|\theta_0| + |\theta_1|}{1 + e^{-\frac{\alpha T}{2}}} - \phi \right\}} \\ + \text{Tan}^{-1} \frac{1}{\Delta\theta} \left\{ \frac{|\theta_0| + |\theta_1|}{1 + e^{-\frac{\alpha T}{2}}} + \phi \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

(11) の  $|\theta_0| + |\theta_1|$  以外の量は別個に測定することができるので、 $|\theta_0| + |\theta_1|$  の測定からマイクロ波電力  $P_{a1}$  が求められる。この場合エネルギーの標準は必要としない。

$A_1$  は電気的な設計によって定まる係数であるが、調整を容易にし誤差を少なくするため通常  $g=1$ 、 $Q_{ext}/Q_L=2$ （共振時に整合）に選ばれる。 $A_2$  は機械的な設計によって定まる係数で、機械的な共振系による感度の改善を含んでいる。マイクロ波の周波数が高くなると  $A_1$  の  $f$  は増大するが、 $A_2$  の  $K$ 、 $\alpha T$  は小さくすることができるので電力計の感度は劣化させないで済む。 $\Phi$  は  $|\theta_0| + |\theta_1|$ 、 $\phi$ 、 $\Delta\theta$ 、 $\alpha T$  の函数であるが  $\phi/\Delta\theta$  が大きくなければ  $\alpha T$  の影響は少ない。特に  $(|\theta_0| + |\theta_1|)/\Delta\theta$  が十分大きければ  $\Phi \approx (|\theta_0| + |\theta_1|)^2$  となり、電源および共振時の空胴が整合している場合には

$$P_{a1} \approx f K \alpha T (|\theta_0| + |\theta_1|)^2 / 2$$

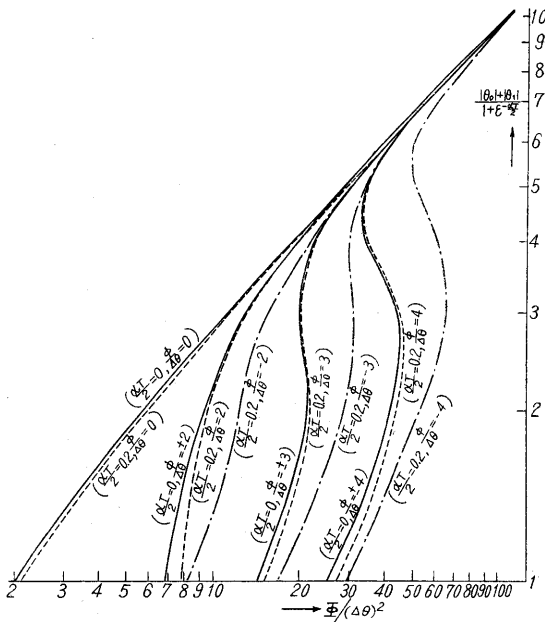
となる。したがって、 $\alpha T$  が小さく  $|\theta_0| \approx |\theta_1|$  を考慮

すれば、マイクロ波の 1 周期に空洞に送られて来る平均電力  $(P_{a1}/2)/f$  と回転振動の 1 周期に失われる平均動力  $K\alpha T|\theta_1|^2$  とは相等しい。すなわち

$$\frac{\text{送られて来るマイクロ波平均電力}}{\text{マイクロ波周波数}} = \frac{\text{回転振動で失われる平均動力}}{\text{回転振動の周波数}}$$

の関係があり、量子的な関係で周波数および電力の変換が行なわれていることが判る。マイクロ波周波数は回転振動の周波数よりも  $10^{10}$  程度も高いので、回転振動にエネルギーが移行することによる反作用は無視できる。

$\theta/(\Delta\theta)^2$  と  $(|\theta_0| + |\theta_1|)/(1 + \mathcal{E}^{-\frac{\alpha T}{2}})$  の関係は第 3 図の通りである。



第 3 図  $\theta/(\Delta\theta)^2$  と  $(|\theta_0| + |\theta_1|)/(1 + \mathcal{E}^{-\frac{\alpha T}{2}})$  の関係 (13) で  $\phi=0$  とおき、 $\Delta\theta/(|\theta_0| + |\theta_1|)$  あるいは  $(|\theta_1| + |\theta_0|)/\Delta\theta$  について展開しそれらの 3 次以上の項と  $\alpha T/2$  の 2 次以上の項を無視して (11) に代入すれば、

$(|\theta_0| + |\theta_1|)/\Delta\theta \gg 1, \phi=0$  の時

$$P_{a1} = \frac{Q_{ext}}{gQ_L} f \cdot K \frac{\alpha T}{4} \cdot (|\theta_0| + |\theta_1|)^2 \times \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \frac{\Delta\theta}{|\theta_0| + |\theta_1|} + \left( \frac{4}{\pi} \frac{\Delta\theta}{|\theta_0| + |\theta_1|} \right)^2 + \dots \right\} \dots (11')$$

$(|\theta_0| + |\theta_1|)/\Delta\theta \ll 1, \phi=0$  の時

$$P_{a1} = \frac{Q_{ext}}{gQ_L} f \cdot K \frac{\alpha T}{4} \cdot \pi (\Delta\theta) \cdot (|\theta_0| + |\theta_1|) \times \left\{ 1 - \frac{1}{12} \left( \frac{|\theta_0| + |\theta_1|}{\Delta\theta} \right)^2 + \dots \right\} \dots (11'')$$

3. 大振幅動作の時の誤差と安定性

マイクロ波電力の断続の時刻の正確さ、 $\Delta\theta$  の測定精度、共振周波数の調整等に対する要求は大振幅動作

( $(|\theta_0| + |\theta_1|)/\Delta\theta \gg 1$ ) の方が厳しくない。また、 $\Delta\theta$  を小さくして大振幅動作にした方が感度も優れている。

この節では、 $|\theta_0| + |\theta_1|$  を測定し  $\phi=0, g=1$  として (11) から  $P_{a1}$  を求めた時の誤差、安定性を、大振幅動作の場合について検討しよう。(11) において  $\phi=0, g=1$  として求められる見かけの  $P_{a1}$  の値から真値を差し引いたものを電力誤差  $\Delta P_{a1}$  とする。

(i)  $p_{a0} \neq 0$  による誤差

$$p_{a0} = P_{a0} \delta(f), P_{a0} \ll P_{a1} \text{ とすれば}$$

$$\left( \frac{\Delta P_{a1}}{P_{a1}} \right)_{p_{a0}} \approx - \frac{P_{a0}}{P_{a1}} \dots (14)$$

(ii)  $\phi \neq 0$  による誤差

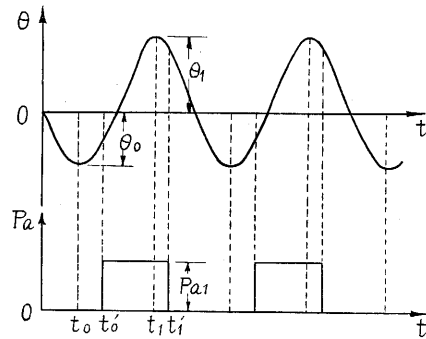
$|\phi| \ll \theta_1 \mathcal{E}^{-\frac{\alpha T}{2}}$  の時には

$$\left( \frac{\Delta P_{a1}}{P_{a1}} \right)_{\phi} \approx \frac{\Delta\theta}{\pi \theta_1} \cdot \frac{\phi}{\theta_1} (\alpha T - 2\phi) \dots (15)$$

$|\phi|$  が大きい時には、回転振動は第 3 図の  $\theta$  の様子からきまり、電力の誤差は (15) では表わされない。(11) と第 3 図を見れば、ある電力、したがって  $\theta$  の値に対応する  $|\theta_0| + |\theta_1|$  が 3 点あってそれが履歴を持った跳躍をする場合があることが判る。

(iii) マイクロ波電力の断続が  $d\theta/dt=0$  の時刻に行なわれないことによる誤差

マイクロ波電力の断続の時刻を第 4 図のように  $t_0'$  および  $t_1'$  とすると



第 4 図 マイクロ波の断続の時刻がずれた時の  $\theta$  と  $P_a$  の関係

$$\left( \frac{\Delta P_{a1}}{P_{a1}} \right)_{t'} \approx \pm \frac{\Delta\theta}{2\pi\theta_1} \cdot \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \left\{ (t_1' - t_1)^2 - (t_0' - t_0)^2 \left( 1 + \frac{\alpha T}{2} \right) \right\} \dots (16)$$

上符号  $t_1' > t_1 > t_0' > t_0$

下符号  $t_1 > t_1' > t_0 > t_0'$

$$\left( \frac{\Delta P_{a1}}{P_{a1}} \right)_{t'} \approx \mp \frac{\Delta\theta}{2\pi\theta_1} \cdot \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \left\{ (t_1' - t_1)^2 + (t_0' - t_0)^2 \left( 1 + \frac{\alpha T}{2} \right) \right\} \dots (16')$$

上符号  $t_1 > t_1' > t_0' > t_0$

下符号  $t_1' > t_1 > t_0 > t_0'$

(iv) 電源の不整合による誤差

電源側を覗いた時の電圧定在波比を (VSWR)<sub>s</sub> とすると、

$$\left| \frac{\Delta P_{a1}}{P_{a1}} \right|_g \leq \frac{2Q_L}{Q_u} \cdot \frac{1}{2} \{ (VSWR)_s - 1 \} \dots\dots (17)$$

(v) マイクロ波電力が単一周波数ではないことによる誤差

トルク型電力計は電源の周波数スペクトルによって指示が異なる。たとえば  $p_{a1}$  が周波数に無関係な一定値を持つならば  $\theta$  の値に無関係な一定の力が働き、 $p_{a1}$  は  $|\theta_0| + |\theta_1|$  の測定値から次の式によって求められる。

$$p_{a1} = 4Q_{ext} K \cdot \Delta\theta \cdot (|\theta| + |\theta_1|) \tanh \frac{\alpha T}{4} \dots (18)$$

このような場合には (11) は適用されない。

周波数スペクトルが  $f_1$  から  $f_2$  までの狭い範囲に限られて一定値を持ち

$$p_{a1}(f) = \begin{cases} \frac{P_{a1}}{f_2 - f_1} & f_1 < f < f_2 \\ 0 & f < f_1 \text{ または } f_2 < f \end{cases}$$

$$f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad \frac{f_2 - f_1}{f_0} \ll \frac{1}{Q_L}$$

であるならば、

$$\left( \frac{\Delta P_{a1}}{P_{a1}} \right)_{\Delta f} \approx \frac{4}{\pi} \cdot \frac{f_0(f_2 - f_1)}{Q_L(f_{r0} - f_{r1})^2} \left( -\frac{\alpha T}{4} + \frac{2}{3} \frac{f_2 - f_1}{f_{r0} - f_{r1}} \right) \dots\dots (19)$$

また  $f$  が  $f_r$  に引張られて直線的に変化し

$$f = f_0 + k(f_r - f_0) \quad k: \text{一定 } |k| \ll 1$$

であるならば

$$\left( \frac{\Delta P_{a1}}{P_{a1}} \right)_k \approx \frac{k}{1 - k} \dots\dots (20)$$

(vi) 摩擦係数の項による誤差

(5) の左辺第 2 項を無視したことによる誤差は、 $M$  が  $t = (t_0 + t_1)/2$  に対して非対称に働く時には大きくなる。時刻  $(t_0 + t_1)/2 + \Delta t_M$  に衝撃的にトルクが加わるとすると、

$$\left( \frac{\Delta P_{a1}}{P_{a1}} \right)_{\Delta t_M} \approx -\frac{1}{2} \left( \frac{2\pi}{T} \Delta t_M \right)^2 \dots\dots (21)$$

(vii) 機械的衝撃に対する安定性

衝撃によって  $e_n$  のエネルギーが機械的共振系に与えられたものとしよう。共振系を持つエネルギーと  $e_n$  とが同程度になれば、振動は新しい状態に移行し、制御系の同期が外れ、電力計として働かなくなる。この状態でも大振幅動作の範囲にあるならば、電力計が取り扱える電力の下限  $P_{a1 \min}$  は

$$P_{a1 \min} \sim \frac{Q_{ext}}{2Q_L} \cdot 4faT \cdot e_n \dots\dots (22)$$

機械的共振の姿態は水晶系を軸とした回転振動であるので、直接外部から与えられる  $e_n$  は極めて小さいが、振子運動等の寄生姿態によって軸が傾いた時、振動部分の非対称性を媒介とする重力の影響は大きい。たとえば振動部分の左右の重力のモーメントの差を  $\Delta(lmg)$  軸の

傾きの角を  $\varphi$  とすれば軸の周りに働くトルクは

$$|M| \sim \varphi \cdot \Delta(lmg)$$

に達することがある。寄生振動と回転振動の振動数の比が簡単な整数比の時には、この影響は著しい。

(viii) 較正誤差その他

(11) の形から  $Q_{ext}/Q_L$ ,  $f$ ,  $K$ ,  $\alpha T$  の相対誤差はそのまま、 $|\theta_0| + |\theta_1|$  の読取りの相対誤差は 2 倍になって  $P_{a1}$  の相対誤差に加わる。

$\Delta\theta$  の測定誤差は (11') から判るように  $P_{a1}$  に直接は響かない。 $\Delta\theta$  に  $\Delta(\Delta\theta)$  の誤差があった場合には

$$\left( \frac{\Delta P_{a1}}{P_{a1}} \right)_{\Delta(\Delta\theta)} \approx \frac{4}{\pi} \frac{\Delta(\Delta\theta)}{|\theta_0| + |\theta_1|} \dots\dots (23)$$

$df_r/d\theta$  が多少変化するための誤差も (23) の程度である。

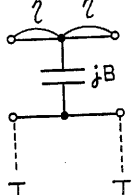
また  $Q_L$  が十分大きいとしたための誤差は

$$\left( \frac{\Delta P_{a1}}{P_{a1}} \right)_{Q_L} \leq \frac{1}{4\pi Q_L} \dots\dots (24)$$

#### 4. 電力計の各部の設計

(1) 空洞共振器 空洞共振器とペインには (i) 着目した共振姿態が他の姿態と結合や縮退を起こさないこと。(ii) 共振周波数はペインの回転角に対して直線的に変化すること。(iii) 感度を高くするため  $(Q_u/f) df_r/d\theta$  が大きいこと。(iv) 共振点では入力導波管と整合していること。(v) 電源周波数の引張りが少ないこと。

などの条件が望まれるが、(iii), (v) には妥協が必要である。標準矩形導波管を区切った構造の空洞共振器の中央にペインを吊るせば (i) は満たされる。ペインを第 5 図の等価回路で表わし、 $\theta=0$  で共振しているものとすれば次の関係が得られる。



第 5 図 ペインの等価回路

$$l = m\lambda_g + \frac{\lambda_g}{\pi} \left( \cot^{-1} \frac{B_0}{2} - \gamma_0 \right) \dots\dots (25)$$

$$\frac{1}{f} \frac{df_r}{d\theta} \quad m: \text{整数}$$

$$= - \frac{\frac{\partial B}{\partial \theta} + \left(1 + \frac{B^2}{4}\right) \frac{\partial(2\eta)}{\partial \theta}}{\left\{ \left( \frac{2\pi l}{\lambda_g} + \frac{1}{\lambda_g} \frac{\partial(2\eta)}{\partial \theta} \right) \left(1 + \frac{B^2}{4}\right) + \frac{1}{\lambda_g} \frac{\partial B}{\partial \theta} \right\} \left( \frac{\lambda_g}{\lambda} \right)^2} \dots\dots (26)$$

ここに  $l$ : 空洞共振器の長さ

$\lambda_g$ : 導波管の管内波長

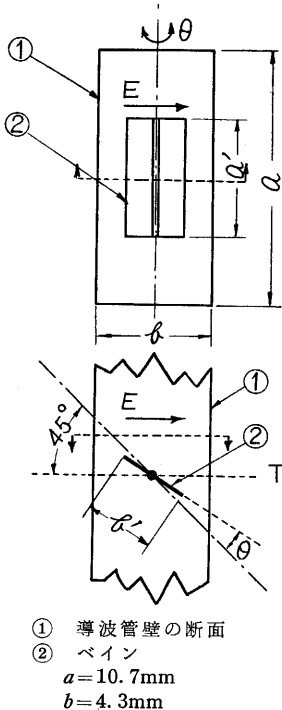
$\lambda$ : 自由空間波長

$B$ : 規格化サセプタンス  $B = B\left(\theta, \frac{1}{\lambda_g}\right)$ ,

$$B_0 = B\left(0, \frac{1}{\lambda_g}\right)$$

$\gamma$ : 弧度で測った線路長  $\gamma = \gamma\left(\theta, \frac{1}{\lambda_g}\right)$

$$\gamma_0 = \gamma\left(0, \frac{1}{\lambda_g}\right)$$



第 6 図 ベイン形

で導波管と結合し  $Q_u$  を調整して整合をとった。ベインを支持するガラス棒の挿入孔は、直径を小さく長さを長くしてあるので漏洩電力は無視できる。ベインの挿入孔は挿入の後、別の金属板で埋める。

(2) 機械的共振系 水晶系とベインおよびその付属物で構成される機械的共振系には、(i) その運動は単振動の方程式で記述されること、(ii) 感度を高くし外部からの擾乱を避けるため  $\alpha T$ ,  $K$  が小さく寄生振動と結合しないこと (iii) 定常振幅に落ち付くまでの時間が短いことが望まれる。(i), (ii) の条件を満たすため、振動部分は軸に対してできるだけ対称な構造にし、振子運動の振動数を高くする必要がある。試作電力計では振子運動の振動数は回転振動のその 7 倍以上であった。

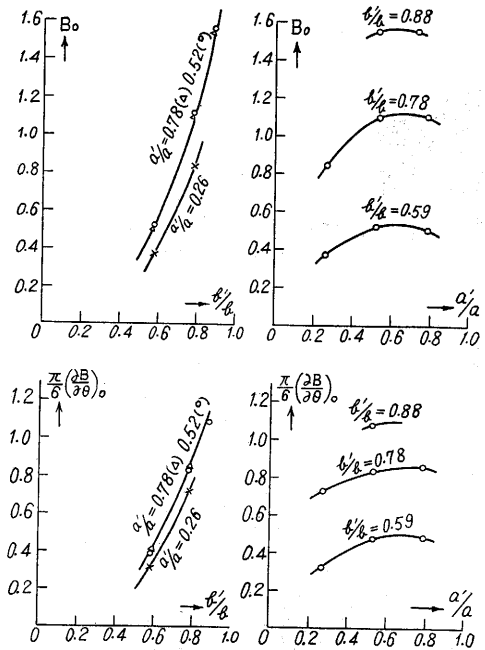
(iii) は (i), (ii) との妥協点として定まる。

(3) 制御装置 振動型電力計のマイクロ波電力制御装置が満たさねばならない条件は次の通りである。(i) 持続的な回転振動の特定の位相でマイクロ波電力の接続遮断ができ、遮断期間中の電力はできるだけ少ないこと。(ii) 機械的振動系にマイクロ波電力を経由しない反作用を及ぼさないこと。(iii) 電力計が及ぼす電源への反作用を緩和できること。

低磁界で働き順逆挿入損失比が大きい単向管は、これらの条件によく合う優れたスイッチである。試作した装置では、Faraday 回転型の単向管をスイッチとして用い、励磁電流の向きを切り換えてマイクロ波電力の接続、遮断を制御した。旋波子に加わる磁界の立上りを速くする

ベインとして第 6 図に示すような金属板を用いるならば  $\theta=0$  の近傍で  $\pm 15^\circ$  程度に亘って  $\frac{\partial B}{\partial \theta}$  は一定で、また  $\frac{\partial(2\eta)}{\partial \theta}$ ,  $\frac{\partial(2\eta)}{\partial(1/\lambda_0)}$  の項は他の項に比較して十分小さいので、 $df/d\theta$  を一定にすることができる。ベインの寸法と等価回路定数は第 7 図のようであった。また、 $(Q_u/f)df/d\theta$  を大きくするためには  $\partial B/\partial \theta$  の大きいベインを使用するとともに  $Q_u/l$  を大きく選ばなければならない。

試作電力計では  $m=1$ ,  $B_0=1$  として空洞共振器を設計し、円形窓

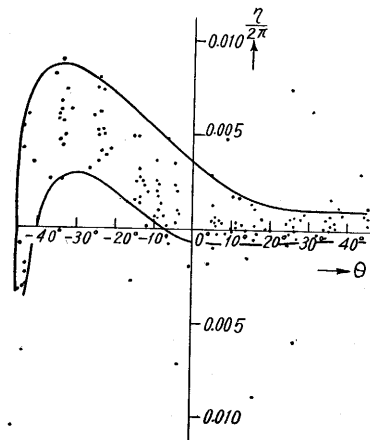


第 7 図 ベインの等価回路定数

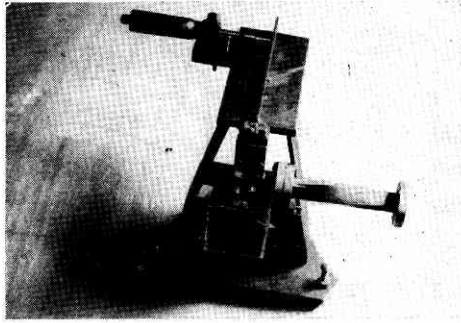
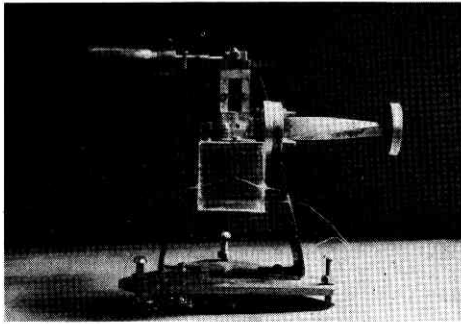
ため、導波管壁等の短絡環の抵抗とインダクタンスの比を大きくしなければならない。

回転振動の特定の位相を検出する検出系統には光の振子を用い、それとスイッチとは制御用電子回路で結んだ。回転振動を用いているので光圧の影響は無視してよい。

(4) 試作装置の概要 試作電力計の主要部の構造の概要は第 8 図の通りである。⑭が電磁界によるトルクを受ける金属板(ベイン)で、凹面鏡⑰、静電偏向用の真鍮棒⑱、クランプ装置⑲の一部とともにガラス棒⑩に固定されていて、ガラス棒は⑩の点で水晶系⑨で吊るされている。吊るされている部分(振動部分)と水晶系とで機械的共振系が作られ、微弱な周期的な力によって持続



$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = 1.232 \quad \frac{a}{\lambda} = 2.488$$

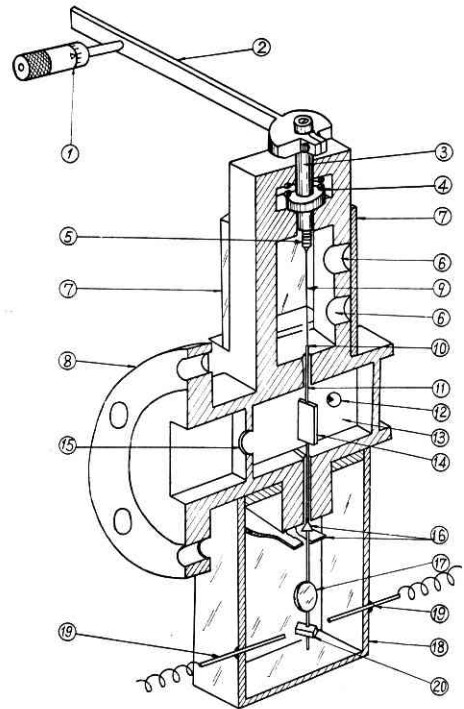


的な回転振動が起る。振動の観察と制御には凹面鏡を利用した光の挺子が用いられ、機械的共振系の起動には静電偏向電極⑭に低周波の電圧が加えられる。マイクロ波電力は結合窓⑮を通して空胴共振器⑬を励振してペインにトルクを及ぼす。ペインの自然静止位置は①, ②, ③, ⑤によって調整され、空胴共振器の整合は、 $Q_c$ 調整孔⑫に吸収される電力の加減によって調節される。空胴共振器およびペインの寸法は第9図の通りである。

第10図のブロック線図で示される電子管回路を制御用に用いた。検出系統の光源および光電管の前に細隙を置き、自然静止位置(空胴の共振位置)を通過する時刻に出るパルス列を取り出す。それらは、単安定マルチバイブレータを利用した遅延回路によって  $1/4$  周期遅延され、 $|0|$  が極大の時刻に現われるパルス列に変換される。変換されたパルス列は双安定マルチバイブレータを働かせ、矩形波が作られる。これは電力増幅されて継電器の駆動コイルを働かせ、継電器の接点はスイッチ用単向管の励磁電流の向きを切り換え、マイクロ波電力の接続、遮断を行なう。また、別の回路では遅延されたパルス列によって鋸歯状波が作られる。これはブラウン管オシロスコープの横軸に、光電管の出力が縦軸に加えられ、マイクロ波電力の接続、遮断の位相が監視される。正常な動作の時には、横軸の中央に光電管の出力が現われる。

スイッチ用単向管の性能は次の通りであった。

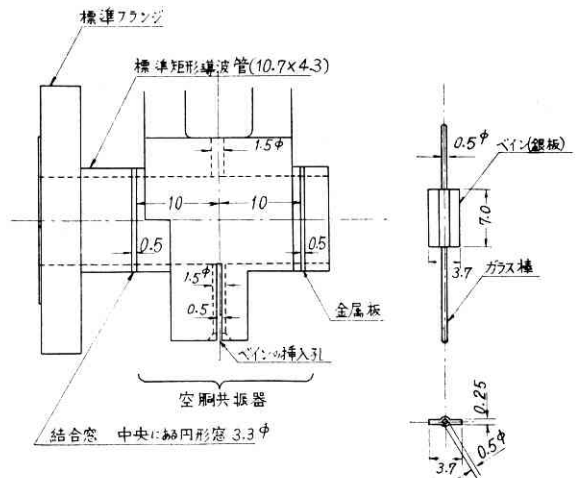
使用周波数	24,000Mc
順方向挿入損失	1.5db
逆方向挿入損失	25.5db



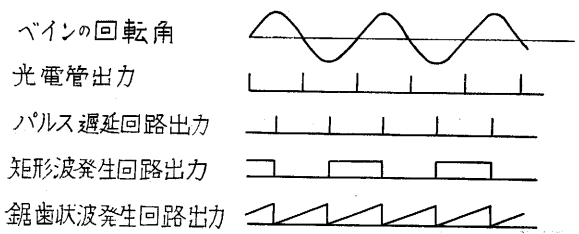
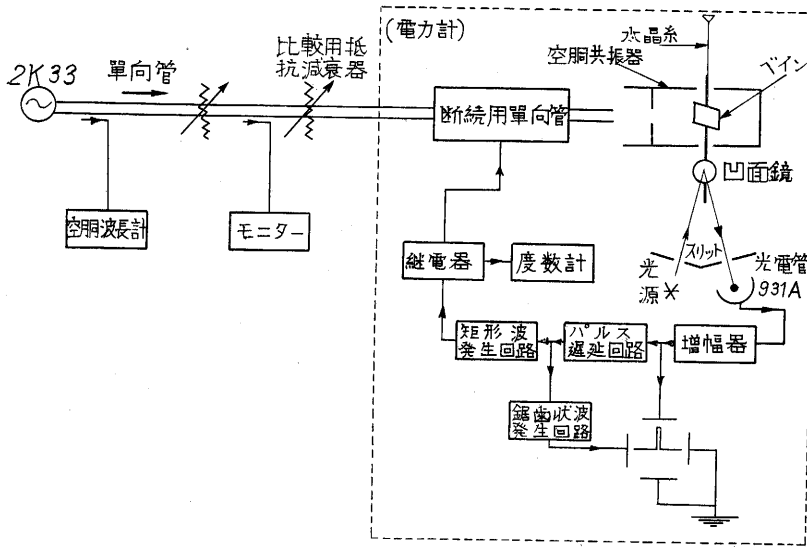
- ① マイクロメータ ② 調整用レバー ③ 自然静止位置左右調整軸 ④ パネ ⑤ 自然静止位置上下調整軸 ⑥ 彩光窓 ⑦ 風防(透明有機ガラス) ⑧ 入力導波管フランジ ⑨ 水晶糸 ⑩ 水晶糸・ガラス棒の接合点 ⑪ ガラス棒 ⑫  $Q_c$ 調整孔 ⑬ 空胴共振器(銀メッキ) ⑭ ペイン(銀メッキ) ⑮ 結合窓 ⑯ クランプ装置 ⑰ 反射鏡 ⑱ 風防箱(透明有機ガラス) ⑲ 静電偏向用電極 ⑳ 静電偏向用真鍮棒

第8図 電力計の主要部の構造

空胴共振器側 V SWR	接続時	1.13
	遮断時	1.12
電源側 V SWR	接続時	1.27
	遮断時	1.27



第9図 空胴共振器およびペインの寸法



第 10 図 試作電力計のブロック線図

振器の外部  $Q$  を求めた。

$$Q_{ext} = 1900$$

(2) 総合特性および理論値との比較 第 10 図の回路において、モニターの鉍石檢波電流およびマイクロ波の周波数 (24,000 Mc) を一定に保ち、比較用抵抗減衰器の減衰量と機械的振動の幅との関係を測定した。その結果は第 12 図の小円の通りで、電力が大きい範囲 (2 mW 以上) では回転振動は安定であるが、電力が小さくなると外部からの機械的衝撃によって振動が乱され易い。なお、定常的な振幅に落ち付くまでに必要な時間は 2~3 分であった。

この実験では、空胴共振器の自然静止位置を変化した時のアドミタンス軌跡はスミス線図の中心を囲む円であり、共振時の VSWR は 1.10 であった。したがって

$$Q_u = 2100$$

5. 試作電力計の実験結果

(1) 電力計の諸定数の測定 機械的共振系に自由減衰振動を行なわせ、自然静止位置を通過する時刻と振幅の時間的变化とを観測して周期と減衰定数を求めた。

$$T = 1.587 \pm 0.009 \text{ 秒}$$

$$\alpha T = 0.0484 \pm 0.0016 \quad (\text{危険率 } 5\%)$$

マイクロ波を加えて持続振動させた時の周期と自由減衰振動の周期とは差異が認められなかった。

ベイン、鏡等が固定されているガラス棒の下端に 3 ケの標準慣性体を取りつけ、各々の自由減衰振動の周期の測定値から水晶系の弾性係数を求めた。

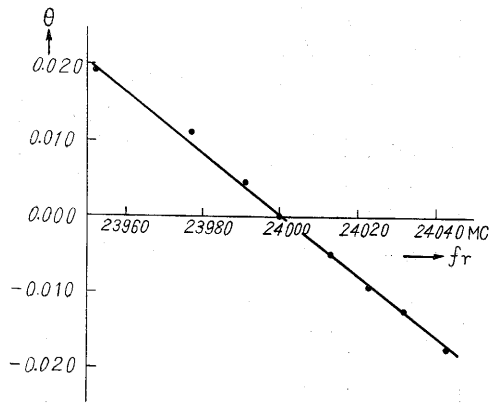
$$K = (5.47 \pm 0.13) \times 10^{-9} \text{ Newton-m/rad.}$$

(危険率 5%)

水晶系を引き伸ばさぬため、また磁界の影響を受けぬため標準慣性体にはいずれも 1 gr 以下の真鍮棒を用いた。また、ベインの回転角  $\theta$  と空胴の共振周波数  $f_r$  との関係は第 11 図の通りであり、 $\theta$  と  $f_r$  とは直線的な関係にあると見做し得る。

$$\frac{1}{f} \frac{df_r}{d\theta} = -0.11$$

ベインを一定の位置に静止させて置き、マイクロ波の周波数を変化して入力アドミタンス特性を測定して空胴共

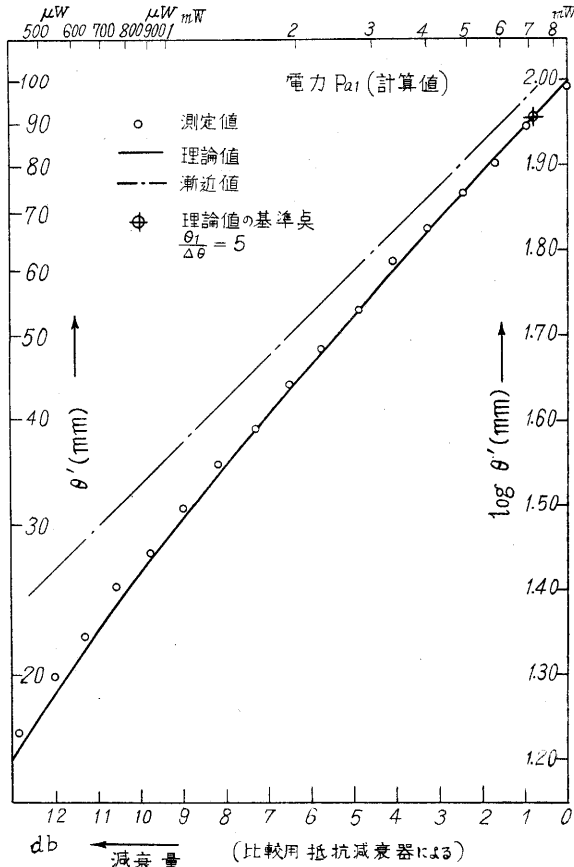


第 11 図 ベインの回転角と空胴の共振周波数との関係

$$\frac{1}{\Delta\theta} = 220$$

となり、 $P_{a1}$  を変化した時の  $|\theta_0| + |\theta_1|$  の計算値は第 12 図の実線の通りとなる。計算値は  $\theta_1/\Delta\theta = 5$  すなわち  $|\theta_0| + |\theta_1| = 45 \times 10^{-3} \text{ rad.}$  の一点で実験値と一致するように描いてある。図の上方の目盛は、空胴共振器に入射する有効電力の計算値である。図中の鎖線は (11') の第 1 項の計算値である。

(3) 誤差 電力計に入射する電力は (11) で  $\phi$



$\theta'$ (mm); 1m 離れたランプ・アンド・スケール  
上で読んだ回転振動の幅  $|\theta_0| + |\theta_1|$

第 12 図 試作電力計の特性

=0 として計算される。試作電力計によって 7mW 程度の電力を測定する場合、種々の原因による誤差の大きさを比較してみよう。

(i) 振動を妨げる方向の力を及ぼす電力による誤差  
スイッチ用単向管の順逆挿入損失比が 24db であるので、この誤差は -0.4%

(ii) ベインの自然静止位置で空胴が共振していないことによる誤差

1m 離れたランプ・アンド・スケール上で、自然静止位置が 2mm だけ共振点から外れているとする。この影響は、摩擦係数の項による誤差としても現われる。両方の和をとっても  $\pm 0.05\%$  以内

(iii) マイクロ波電力の断続の時刻が  $|\theta|$  極大の点から外れていることによる誤差

1/20 周期程度外れているとすれば  $\pm 0.6\%$  以内

(iv) 電源側の不整合による誤差

この誤差は、スイッチ用単向管の整合の程度によって左右される。整合素子を用いるならば、整合に近い状態の VSWR の測定精度の半分位まで軽減可能である。

(v) マイクロ波電力が単一周波数ではないことによる

誤差

回転振動の周波数よりも非常に高い周波数でマイクロ波周波数が動揺して、周波数スペクトルの拡がりがあるならば  $\pm 0.1\%$  以内

マイクロ波周波数の動揺の周波数が回転振動の周波数よりもはるかに低い時には (ii) で考えた所と同様である。周波数スペクトルの拡がりがあるならば  $\pm 0.05\%$  以内

回転振動と同程度の周波数でマイクロ波周波数が動揺する時には誤差が大きくなる。電力計の空胴共振器によってマイクロ波周波数が引張られる現象は、回転振動と同期して起こるため誤差も極めて大きい。スイッチ用単向管の他に、順方向 1.0db 逆方向 25db の挿入損失を持つ緩衝用単向管を用いて引張りを軽減した場合でも、発振管 2K33 のリーケ線図から予想される誤差は

$\pm 1\%$  以内

(vi) 較正による誤差

$Q_{ext}/Q_L, f, K, \alpha T$  の相対誤差は、(1) より合計  $\pm 4.5\%$  となる。空胴共振器の整合をとることによって  $Q_{ext}/Q_L$  の誤差は軽減することができる。

$\Delta\theta$  の測定誤差が  $\pm 10\%$  であるとするこのための誤差は  $\pm 1.3\%$

6. むすび

空胴共振器と機械的共振系を利用した高感度トルク型電力計の理論を進め、誤差の原因と動作の安定度を検討して大振幅動作が優れていることを明らかにした。

また、24,000Mc 帯でこの型の電力計を試作し、1mW 程度の電力を測定することができた。この電力計は電力の絶対測定が可能であるので電力標準用の測定器として用いられる。

この研究を行なうに当たり本学工学部岡村教授には終始懇切なご指導を賜わり、また岡村研究室の各位には絶大なご援助を仰いだ。実験を行なうに当たり、電波研究所超高周波研究室、通信研究所超高周波研究室、日本無線 KK 研究部、東京電気化学 KK 研究部、シチズン時計 KK 技術部、島田理化 KK 研究部、日立製作所戸塚工場、昭和電子 KK、理研電具 KK の方々に、実験装置について多大のご援助を仰いだ。以上の方々に深甚の謝意を表明する次第である。(1959. 7. 21)

文 献

- (1) 岡村 繪吾: 昭30通信学会秋期大会 101 p.101
- (2) 岡村 繪吾: 電気通信学会マイクロ波電力標準調査専門委員会資料 昭和30年10月
- (3) Cullen, A. L. & French, N. A.: P. I. E. E. 104 Pt. C pp. 456~464 Sept. 1957
- (4) Cullen, A. L.: P. I. E. E. 99 Pt. IV pp. 112~ 120, 1952
- (5) 浜崎 襄二: 学位論文 昭和33年 3 月