

耗波試験装置

mm Wave Test Equipment

南野幸雄*
Yukio Minamino

荷口康一郎**
Koichiro Niguchi

石井宗典**
Sosuke Ishii

内容梗概

耗波帯の立体回路試験装置は原理的に糧波におけるそれと特に異なるところはないが、波長がきわめて短くなるにしたがつて起ってくる種々の困難な問題を克服しなければならない。その第一は工作上的問題であつて波長の短縮によつて導波管は次第に小さくなり従来の加工方法は困難になりそのために回路の構成を変えるか、特殊な加工方法を採用する必要がでてくる。本文は現在製作している代表的な測定器の設計の概要とその特性を、測定結果を示しながら紹介してある。

1. 緒言

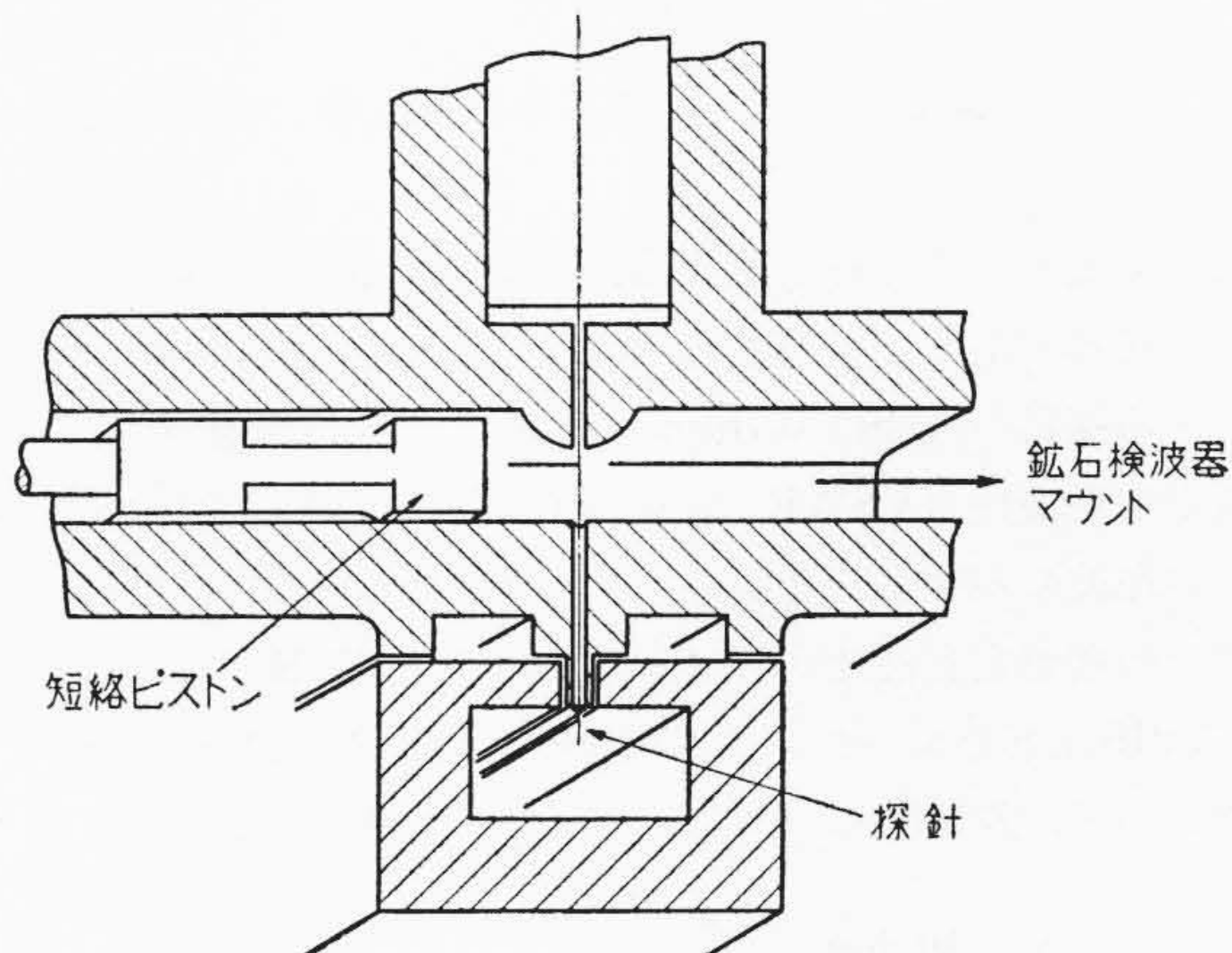
マイクロ波技術の進歩に伴い、周波数の領域も次第に高くなり、最近においては波長1cm以下のいわゆる耗波帯の研究が盛んに行われるようになった。耗波帯の応用としては超多重通信、高分解能レーダなどのほかに物理、化学方面にも新しい応用があつてその成果は大いに期待されている。測定器の個々のものについては原理的に糧波におけるものと特に異なるところはなく、一般には下記のものを使用される。すなわちインピーダンスの測定には導波管内に生ずる定在波のパターンを求める定在波測定器が使用され、周波数測定には空洞共振器を利用した空洞型周波数計が使用される。またこれら測定器に用いる耗波の検波器にはシリコンダイオードが適しており、電力測定にはボロメータとこれと組合せる電力計用ブリッジが用いられる。また減衰器、方向性結合器などが併用されて電力測定の範囲を拡張できるのも糧波の場合と同様である。

そのほか糧波におけると同様、各種の測定用回路素子を使用される。

これら耗波帯の測定器については種々試作^{(1)~(3)}されて、研究用測定に供されているが、日立製作所においてはかねてより耗波帯の試験装置を製作し斯界の需要に応じてきた。製作に当つて第一に問題になるのは波長がきわめて短くなるために導波管が小形になり、機械工作上いろいろな困難がでてくることである。そのために回路の構成を変えとか、特殊な加工方法を採用する必要がでてくる。また第二には導波管内面の仕上と表面処理の問題であつて、その浸透厚 (Skin depth) がきわめて小さいので伝導度の低下については十分考慮しなければならない。ここに代表的な測定器の概要と、その特性を、測定結果を示しながら紹介することにする。

* 日立製作所本社

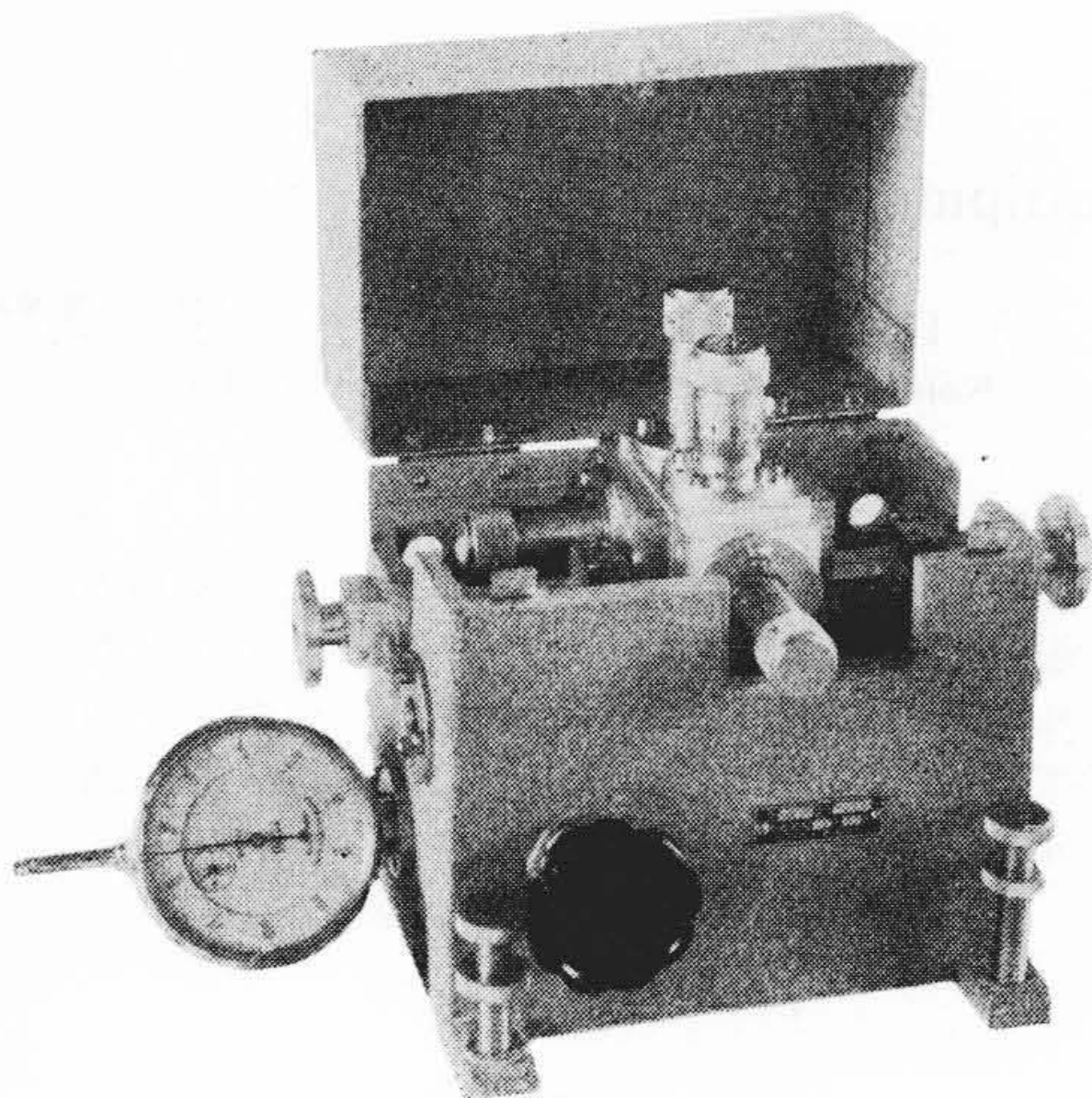
** 昭和電子株式会社



第1図 定在波測定器探針部構造図

2. 定在波測定器

インピーダンスの測定は糧波の領域におけると同様に、導波管内の定在波を測定することによつて行われる。波長がきわめて短くなるために機械的精度を十分にあげる必要がある一方、工作上的困難さをできるかぎりさけるような設計にしなければならない。検波回路は糧波におけるように同軸型を採用すると、高次の伝送状態の発生をさけるためにきわめて小さくなり工作上に困難があり、感度の面あるいは取り扱いの面からも不適當であるので、第1図に示すように主導波管より探針によつて Pick up した電界を二次導波管に変換伝送し、後述する鉍石検波器マウントによつて検波する方式をとる。主導波管に設けるスリットは導波管の特性インピーダンスを変えず、またスリット末端での不連続に基く反射波の発生を少なくするために導波管の寸法に比較し十分小さくしなければならない。このために挿入する探針もきわめて細くなるが、このような考慮によつて検出回路の感度が悪化しないような設計を行うとともに、特殊な工作



第2図 34GC 帯定在波測定器

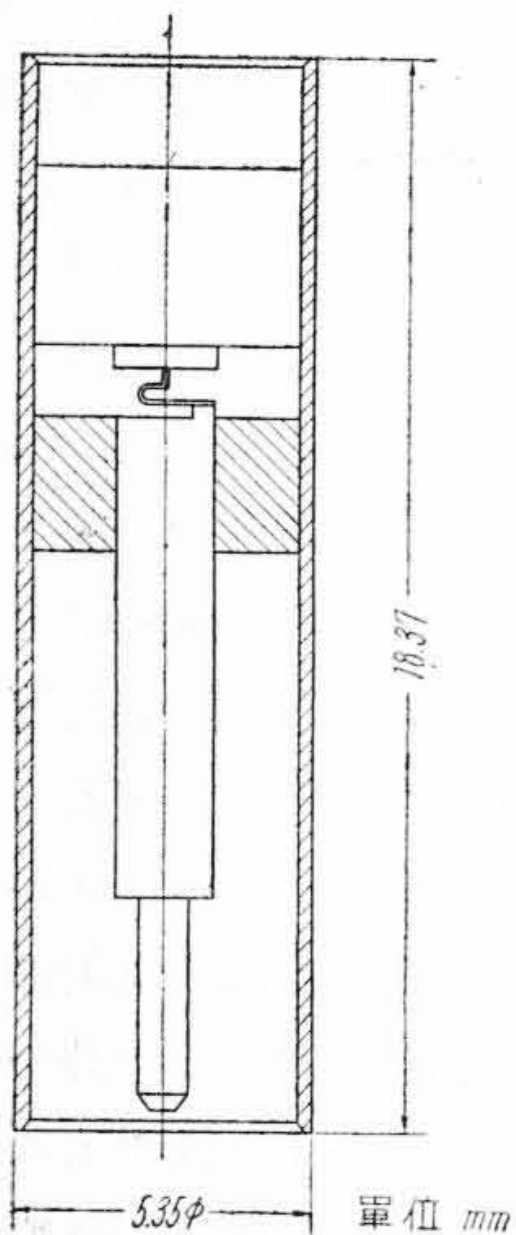
法を必要としてくる。第2図は34GC (kMC) 帯の定在波測定器である。主導波管のスリットの幅は0.4mm, 挿入する探針の直径は0.1mmである。これに負荷として電圧定在波比 (VSWR) が約1.06の無反射終端を接続し定在波のパターンを測定しこれより電氣的平行度 (見掛上の残留定在波比) を求めた結果, VSWR で表わして1.015以下であつた。この場合探針の挿入長は0.5mmであつて, 感度Sは(1)式で表わして-48dbであつた。

$$S = 10 \log_{10} \frac{P_D}{P_{\mu}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに P_D : 鉍石検波器の負荷に消費される電力

P_{μ} : 主導波管の通過電力

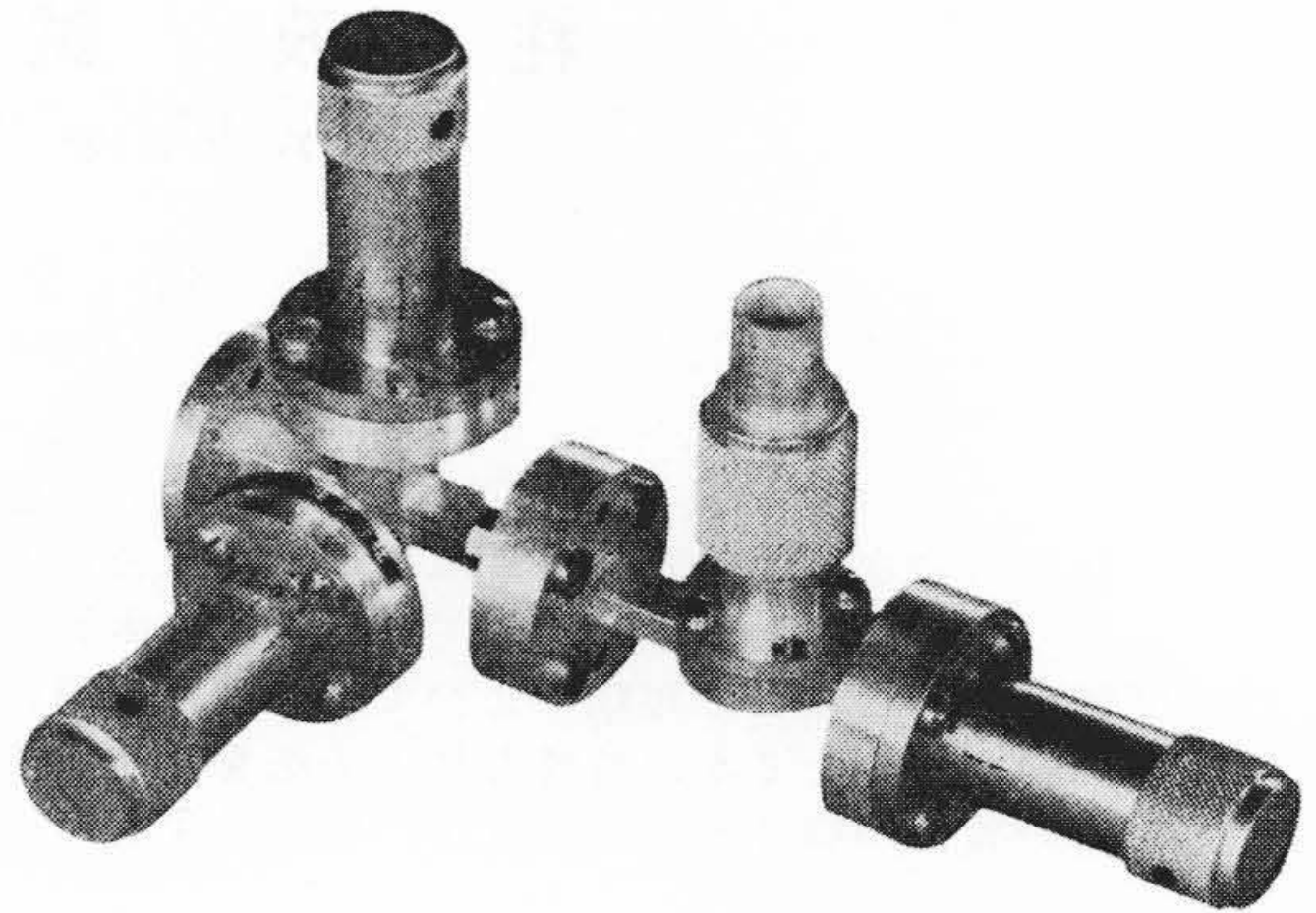
この値は極波帯における感度と同等のものである。また使用周波数帯にわたつて Slot wave などによる不安定現象は認められておらず満足すべき特性が得られている。



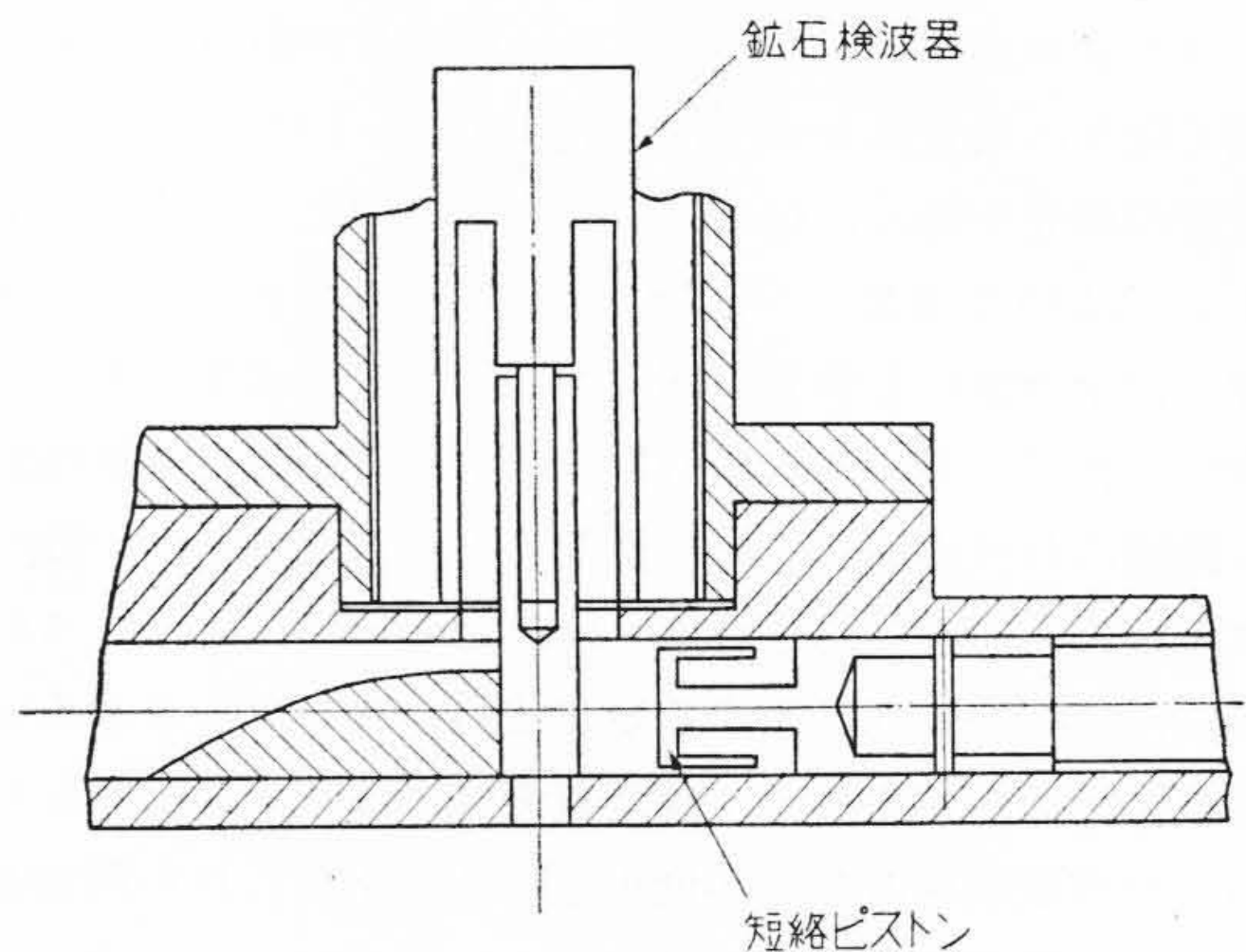
第3図 1N26構造図

3. 鉍石検波器マウント

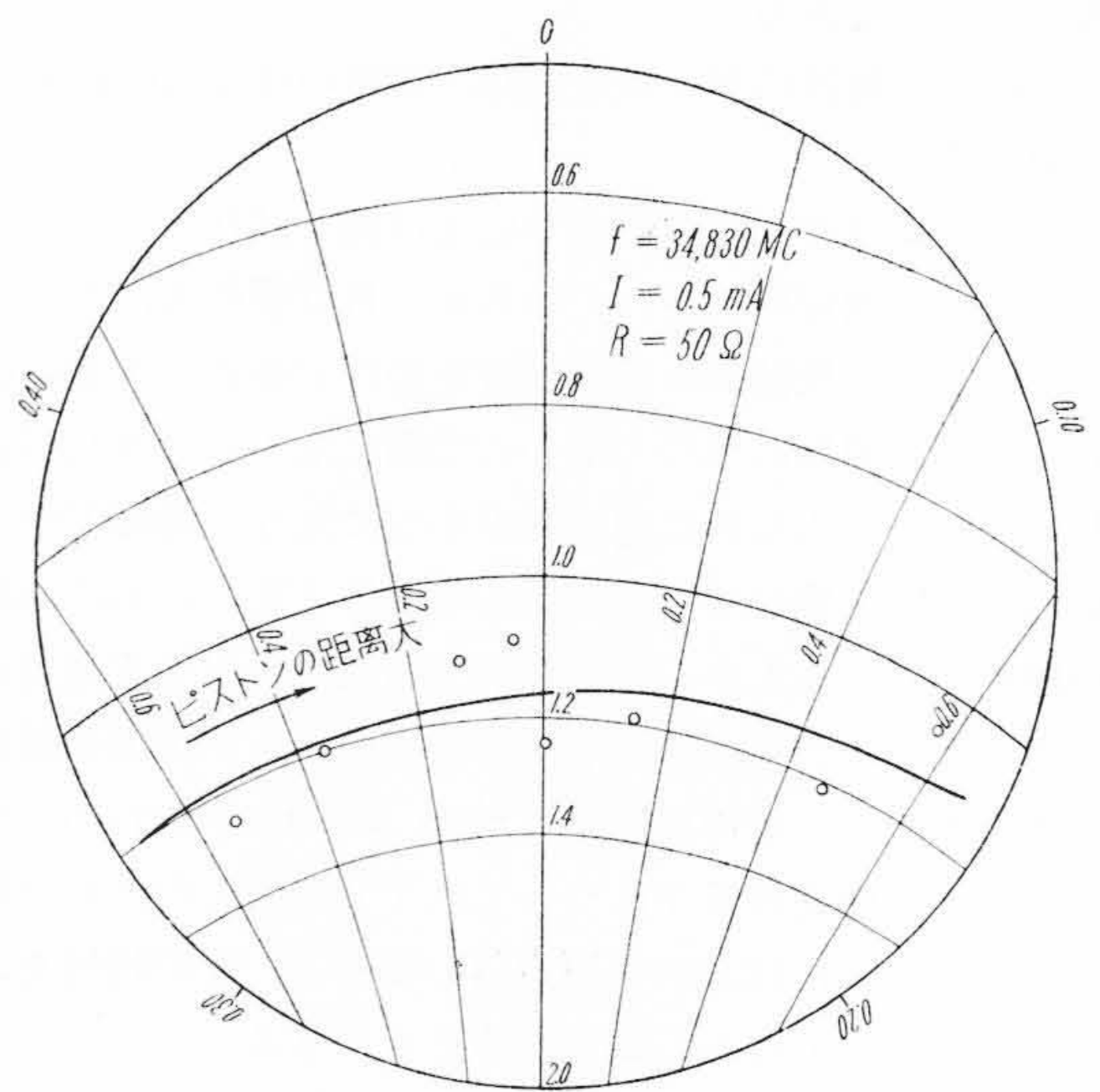
耗波の検波器としては一般にシリコンダイオードの1N26あるいは1N53などが使用される。これは第3図のように同軸型にマウントされたものである。この鉍石検波器を導波管に取り付ける鉍石検波器マウントには鉍石終端器として耗波の検出に使用するものと, 混合器として使用するものとがある。第4図は34GC帯用のものであつて検波器マウントの部分と整合器



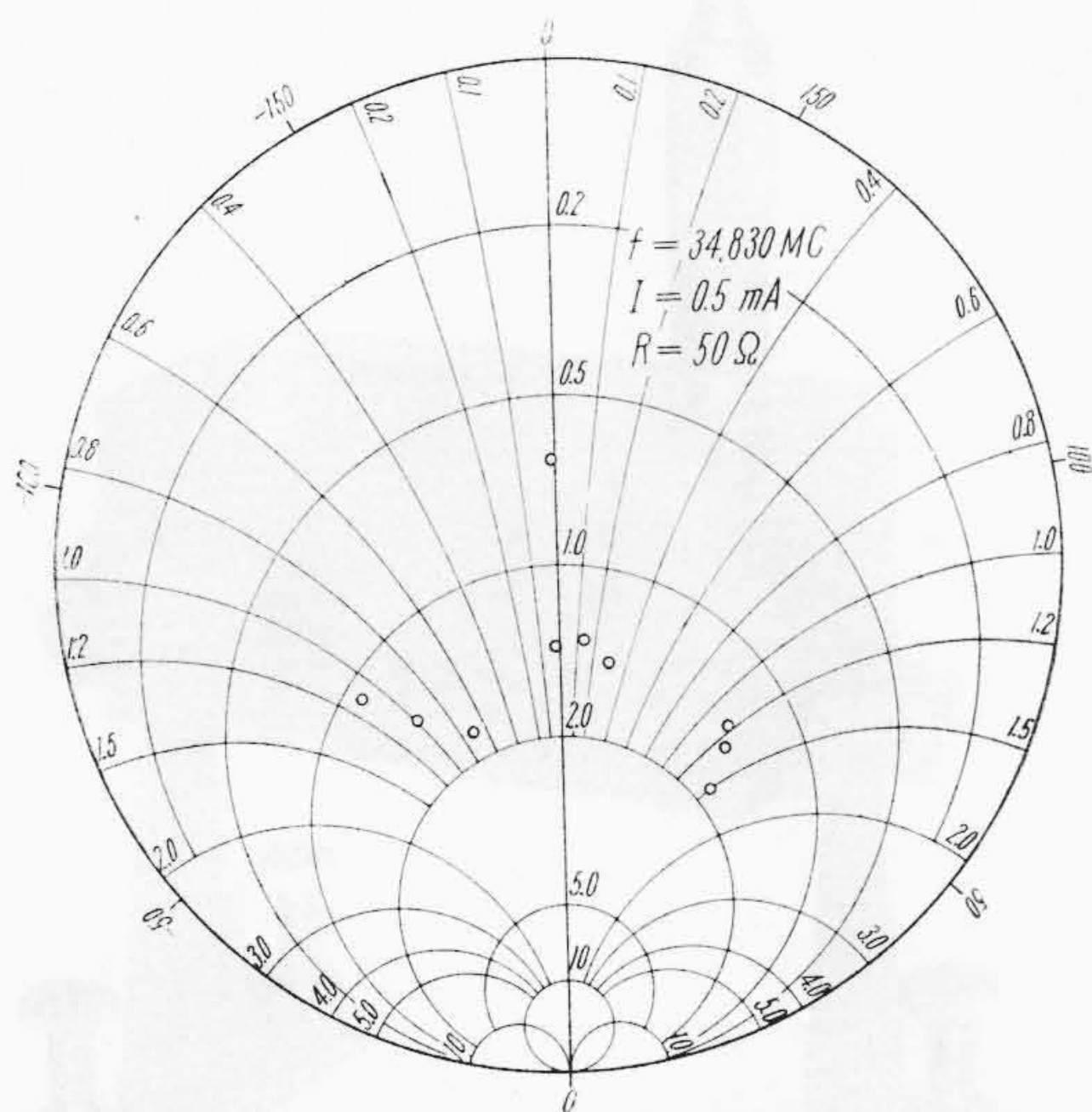
第4図 34GC 帯鉍石検波器マウント



第5図 鉍石検波器マウント構造図



第6図 ピストンの位置によるアドミッタンスの変化



第7図 鉱石検波器によるアドミッタンスの変化

(EH 整合器) とから成っている。マウントとしては変換損失が少なく、かつ広帯域にわたって整合がとれ、また鉱石を交換した場合特性の変化の少ないものが望ましい。第5図は検波用のマウントの構造を示す。導波管と鉱石検波器のインピーダンスを整合するためにリッジによつてインピーダンスの変換を行つている⁽⁴⁾。このマウントにおいて、EH 整合器を使用せず、後方の短終ピストンのみを変化したときの入力アドミッタンスの変化を測定した結果は第6図のようである。またピストンを約 1/4 管内波長の位置に固定したときの鉱石検波器によるアドミッタンスの分布は第7図のようであるが、第6図からもわかるようにピストンを変化することによつてサッセプタンス分を変化せしめて整合の状態に近づけることができる。また付属の EH 整合器によつて容易に完全な整合をとることができる。34,850 MC において整合をとつたときの周波数特性は VSWR が 2 になる範囲は 700 WC であつた。

4. 周 波 数 計

糧波帯においては一般に空洞共振器が周波数の測定に利用されているが、耗波帯においても同様であつて、多くは H_{01} 共振状態が用いられる。これは構造上 Q を低下せしめずに共振周波数を変えることができるためである。一方周知のように Skin depth δ は (2) 式で与えられる⁽⁵⁾。

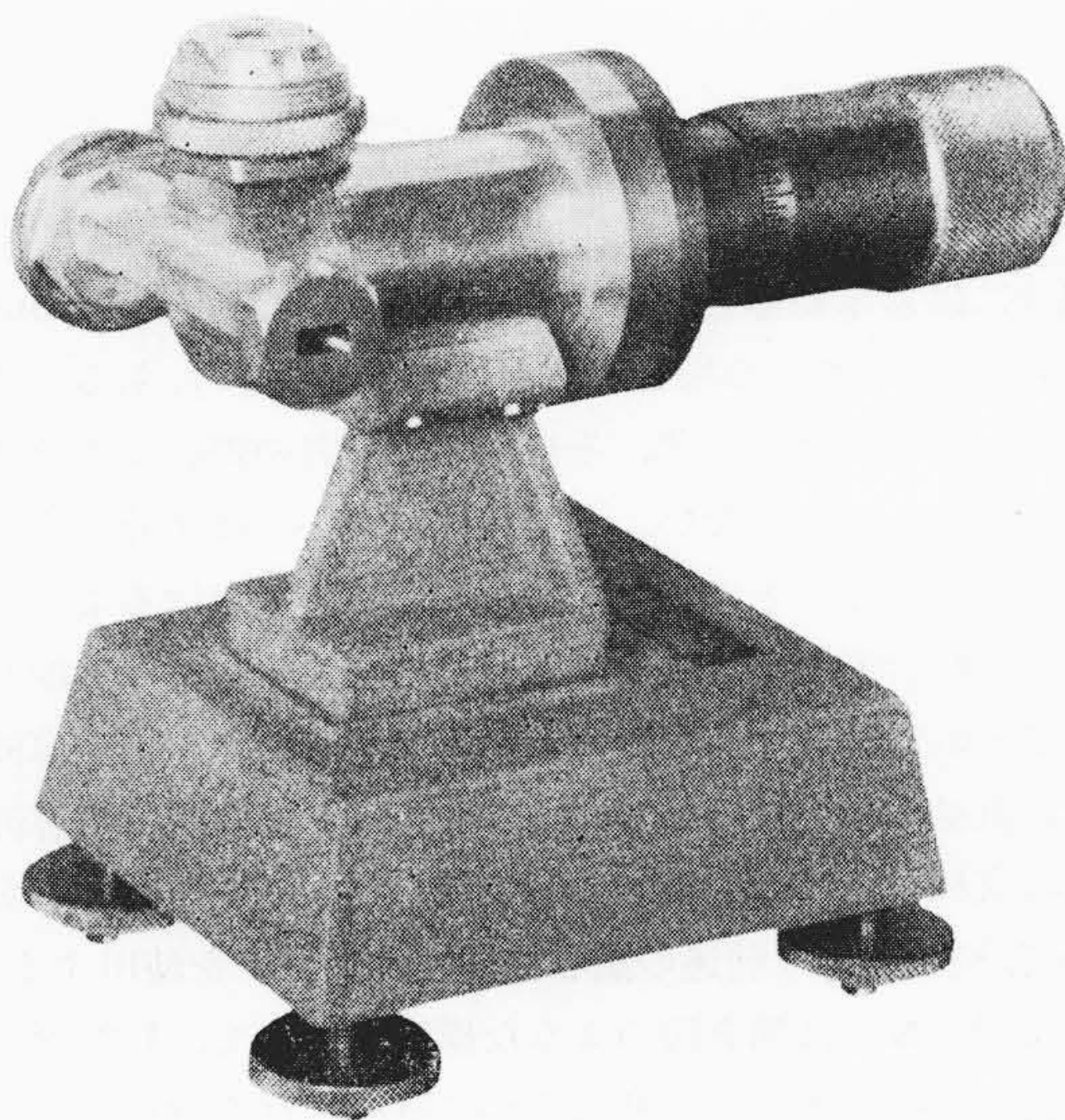
$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \rho}{120\pi^2 \mu}} \quad (\text{cm}) \quad (2)$$

ここに λ ; 波長 (cm)

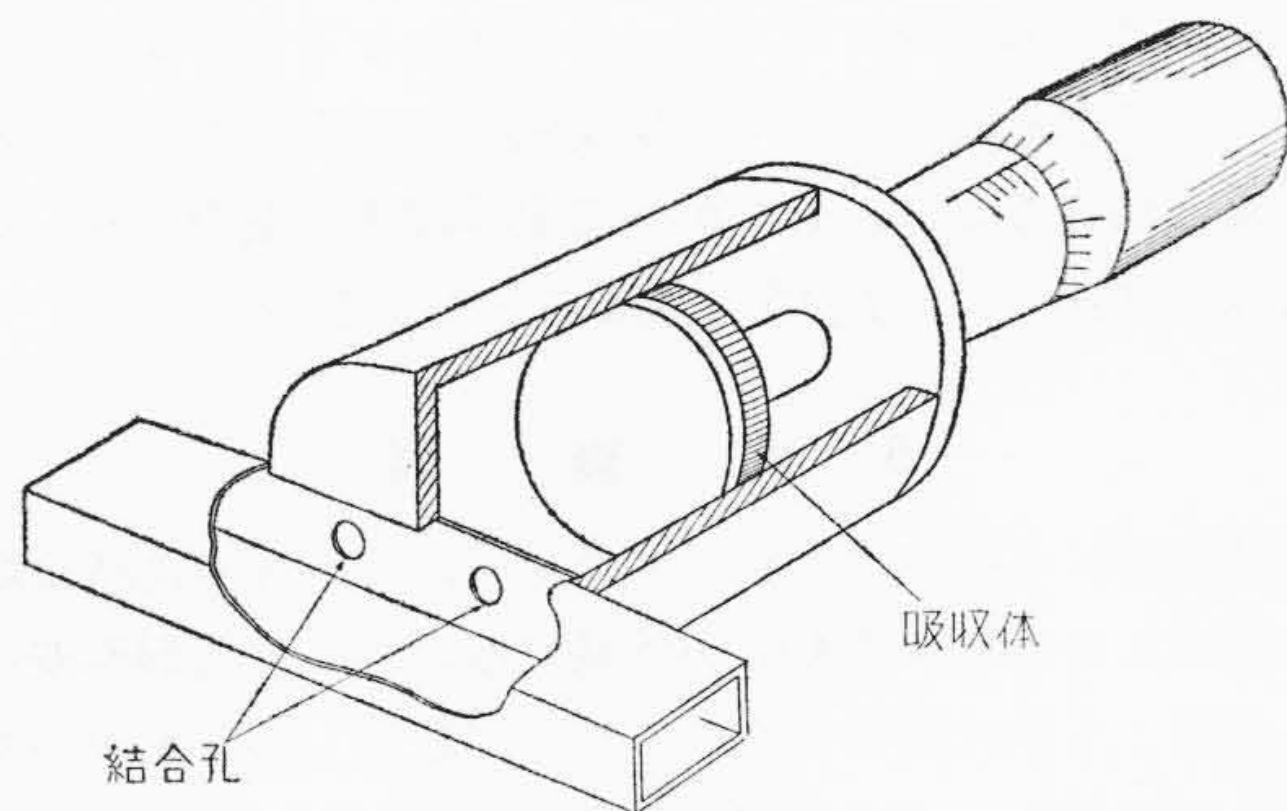
ρ ; 内壁金属の固有抵抗 (Ωcm)

第1表 Skin depth の比較

周波数 (GC)	波 長 (mm)	Skin depth(mm)
3.0	100.0	0.00121
6.0	50.0	0.00085
9.0	33.3	0.00069
34.0	8.8	0.00036
50.0	6.0	0.00030
100.0	3.0	0.00021



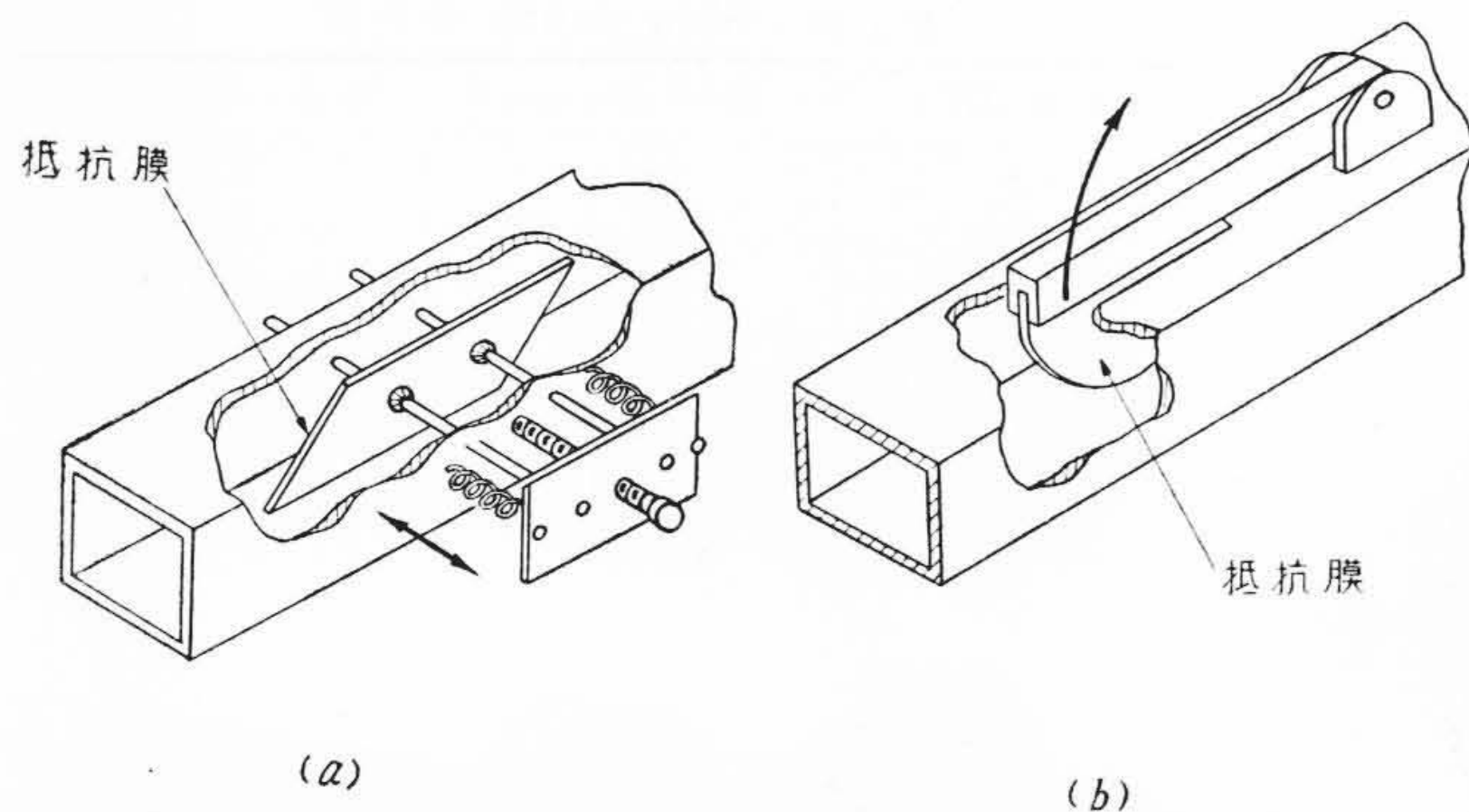
第8図 34GC 帯空洞型周波数計



第9図 空洞型周波数計構造図

μ ; 内壁金属の比透磁率

糧波帯と耗波帯について δ の銅の場合の計算値の比較を第1表に示す。これをみて明らかなるように、耗波になるにしたがつて空洞内壁の電流の Skin depth がきわめて小さくなるので空洞内壁の仕上と表面処理が問題になってくる。このために種々の工作の方法がとられているが、いずれにせよ損失の増大に伴う Q の低下はさげられないので共振器の Q を高くするためには高次の共振状態を使用する必要がでてくる。高次の共振状態を使用する

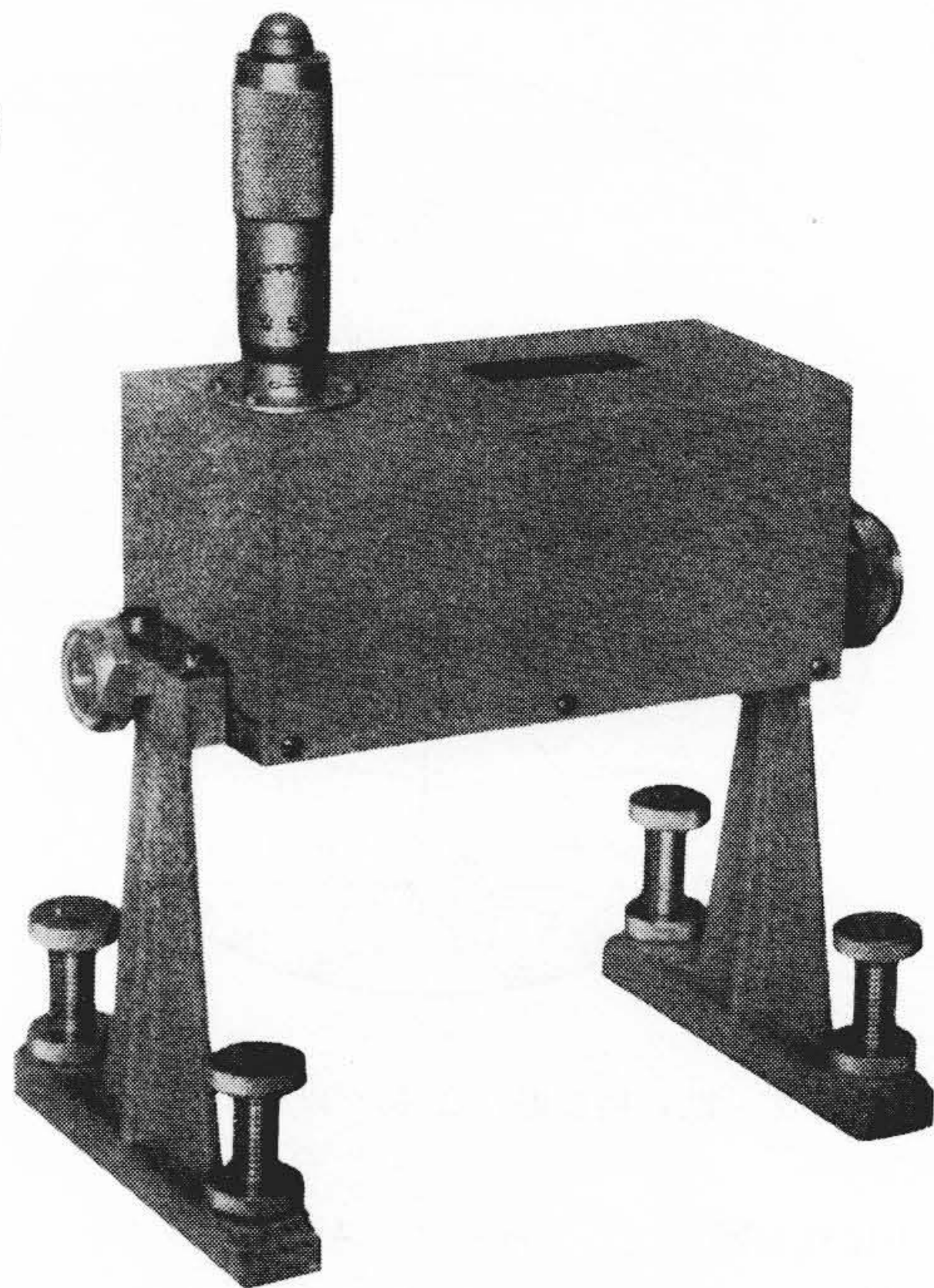


第 10 図 抵抗減衰器の構造

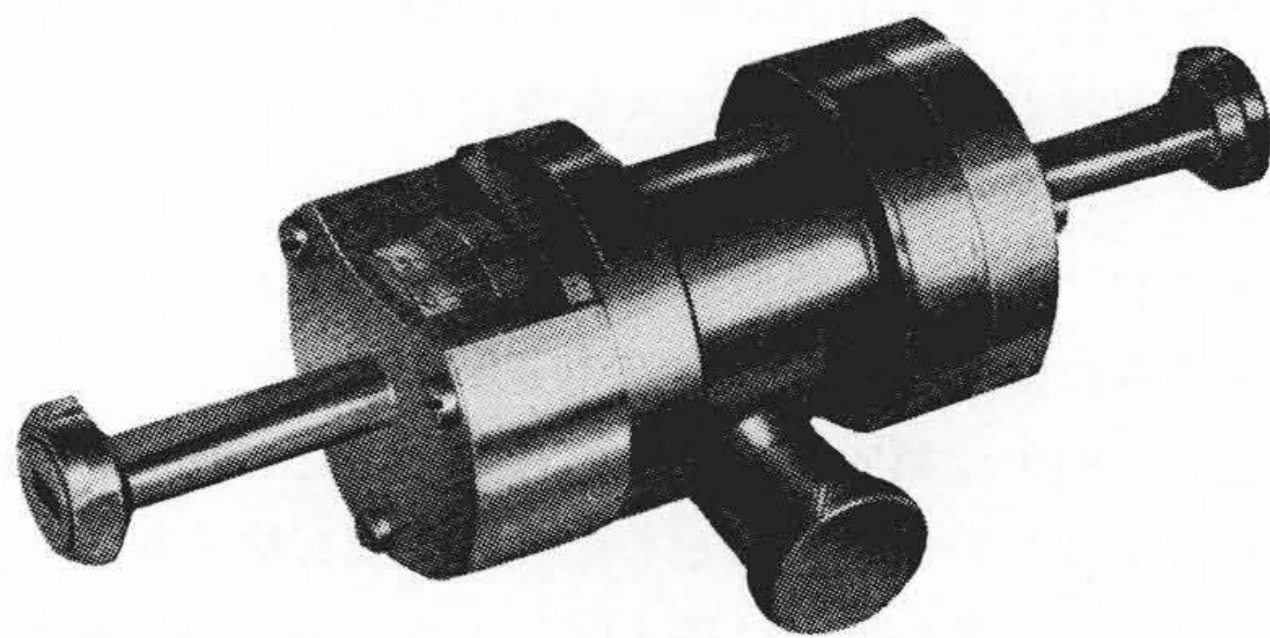
場合には基本姿態と共存するほかの共振姿態 (Spurious mode) がでてくる場合があるのでこれをさけ、あるいは抑圧しなければならず、そのために設計の際には十分考慮しなければならない。また耗波においては十分なる信号を期待することはできないので、糧波におけるように方向性結合器を用いて主導波管と結合する方式は感度およびそれに関連する Q の点からみて不利であつて主導波管に直結する方式が有利になつてくる。第 8 図は主導波管に直結した 34GC 帯の H_{01} 姿態の空洞型周波数計であつて、検波器には前述の鉱石検波器マウントを使用する。この周波数計は第 9 図のような構造であつて、 $1/2$ 管内波長間隔の 2 個の結合孔によつて励振される位相は、共振器の H_{01n} 姿態に対しては重なり H_{11n} 姿態に対しては逆相になり打消し合うようになつている。この励振方式であれば主導波管の電力レベルの高いところに挿入することができるため、所定の検波感度を得るためには十分疎なる結合でよく、したがつて主導波管の電力に対する吸収 (Dip) は十分少なくすることができる。

5. 減 衰 器

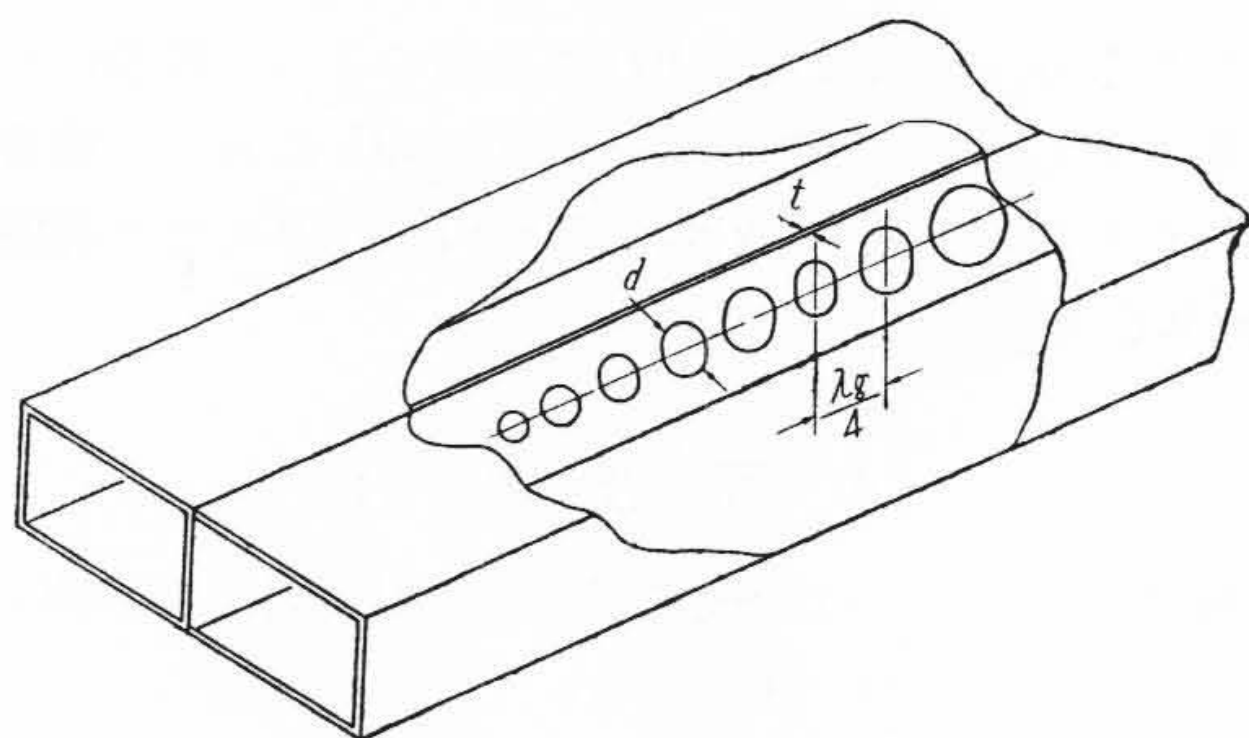
減衰器には抵抗膜を利用したもの、導波管の遮断領域を利用したいわゆる Cut off 減衰器、および円形導波管に変換して抵抗膜を挿入しこれを回転せしめるものがある。耗波においては導波管の寸法がきわめて小さくなるので、第 10 図 (a) のようにいわゆるベイン型と称する型は構造上難点があるので一般には第 10 図 (b) のようなフラップ型が用いられる。使用する抵抗膜も十分薄くなければならないので、マイカの薄い板に金属を蒸着して抵抗値をもたせたいわゆる Metalized mica などが使用される。第 11 図は 34GC 帯のフラップ型の抵抗減衰器である。回転型は矩形導波管の H_{10} 姿態を円形の H_{11} 伝送姿態に変換し、この円形の部分に抵抗膜を入れこれを回転することによつて減衰を与えるものである。波長 3 cm 帯などでは以前より使用されているが矩形から円形導波管への変換部分にある程度の長さが必要なた



第 11 図 34GC フラップ型減衰器



第 12 図 34GC 帯回転型減衰器



第 13 図 方向性結合器の結合孔

めに、大形になる不便さがある。この点この型の減衰器は耗波帯に適した形といふことができる。第 12 図は 34 GC 帯の回転型減衰器である。

6. 方向性結合器

糧波帯におけると同様に、耗波帯においても直交型と



(a) 7 db (b) 11 db
第 14 図 34GC 帯方向性結合器

平行型があつて特に新しい構想のものはないが、工作法は従来の方法では困難であつて特殊な工作法をとる必要がでてくる。耗波の場合には大きさに実用上の制限がさほどないことと、工作上の問題から直交型よりは分布結合による平行型が有利になつてくる。第 13 図のような方向性結合器において、結合孔を円形としたときの結合度 C は (3) 式で与えられる。

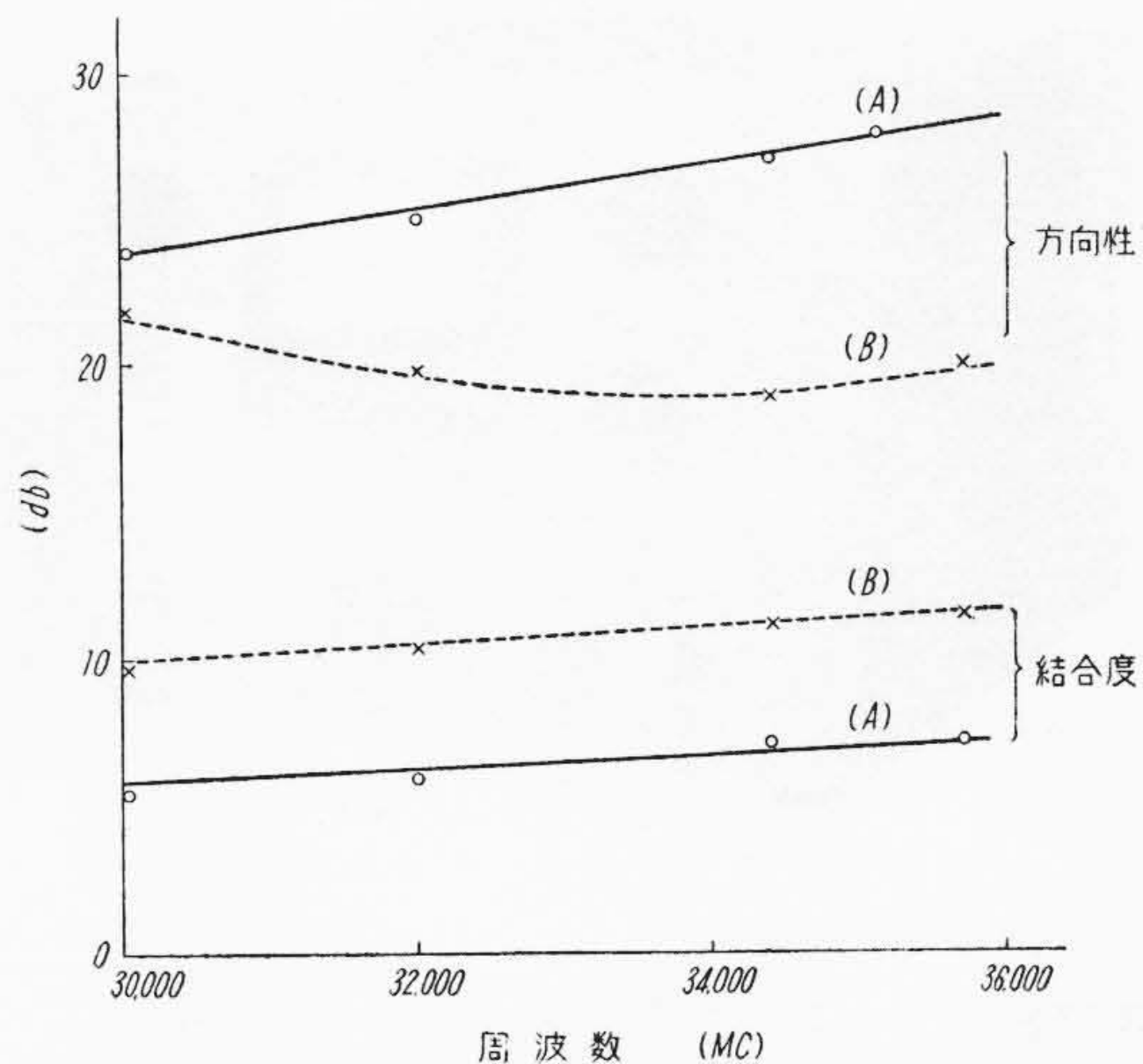
$$C = -20 \log \left\{ \sum_d \left[\frac{\pi \lambda_g d^3}{12 a^3 b} e^{-2\pi t \sqrt{\left(\frac{1}{1.71d}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda^2}\right)}} \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに d ; 結合孔の直径
 a ; 導波管の横寸法
 b ; 導波管の縦寸法
 t ; 結合部分の板厚
 λ_g ; 管内波長
 λ ; 自由空間波長

結合の比較的密なものをも設計する場合には結合の孔の数を増して所定の結合度を得る方が、大きい孔によつて結合するよりも周波数特性が改善される。また孔によつて結合される電圧が二項定理にしたがうように、中央で最大になるように次第に変化するような分布にすれば方向性の周波数特性は改善される。しかし工作上の問題から作りうる孔の径には制限があつて完全な二項定理にしたがうことは困難であつて近似的な孔の配列を行わざるを得なくなる。今一例として $n+1=12$ の場合を取り結合度は最大の結合度の孔を偶数個配列することによつて合わせるものとする各孔の結合係数は

1	11	55	165	330	462
(462 偶数個)			462	330	
165	55	11	1		

となる。第 14 図はこのような設計に従つた 34GC 帯の E 面分布結合の結合度 7db および 11db の方向性結合器

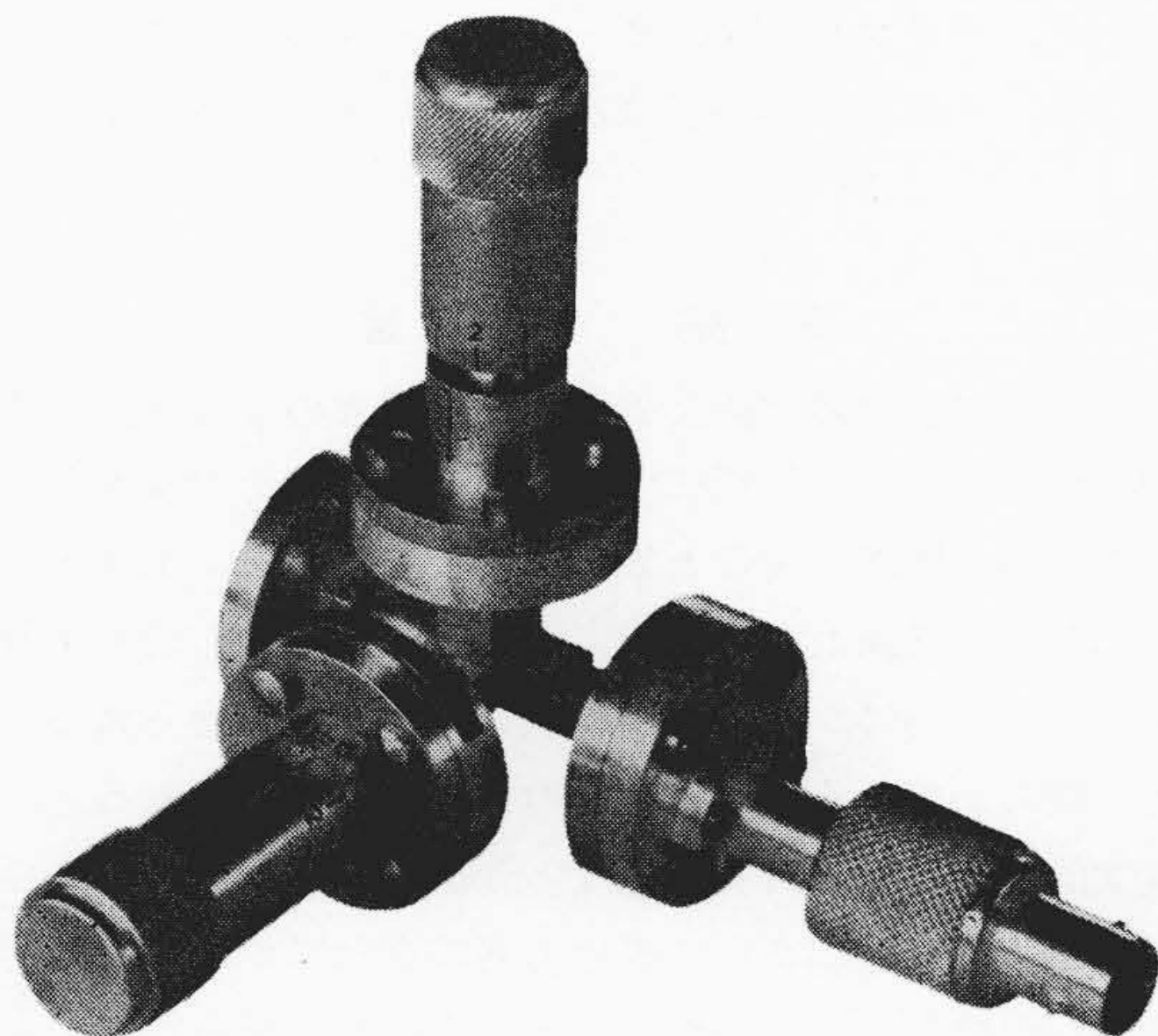


第 15 図 34GC 帯方向性結合器の特性

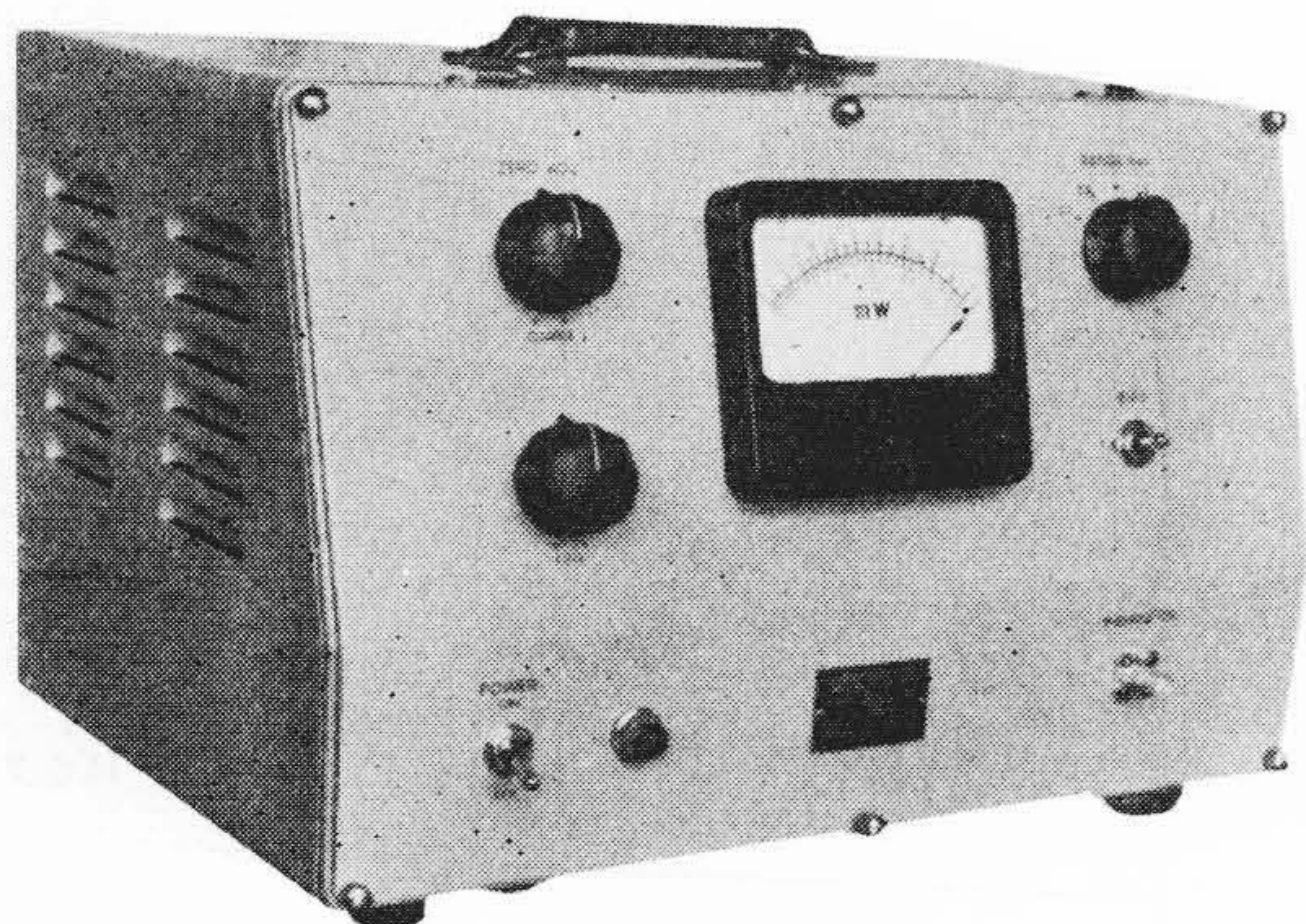
である。第 15 図はその測定結果であつて、結合度は計算値ときわめてよく一致する。

7. 電 力 計

耗波帯における電力測定もボロメータ、サーミスタなどによつて低周波あるいは直流電力と置換して測定することができる。波長が短いために、素子上の高周波の電流分布が不均一になる可能性があるのもその形状、材質などにおいて特別な考慮を払わねばならなくなる。第 16 図は 50GC 帯のサーミスタマウントであつて、これはきわめて小型なサーミスタをマイカの基板に取り付け、入力導波管と 1/4 管内波長の長さを有する短絡導波管の間にはさんだものであつて⁽⁶⁾、付属の E・H 整合器によつて完全に整合を取ることができる。電力測定の場合には



第 16 図 50GC 帯サーミスタマウント



第17図 電力計用サーミスタブリッジ

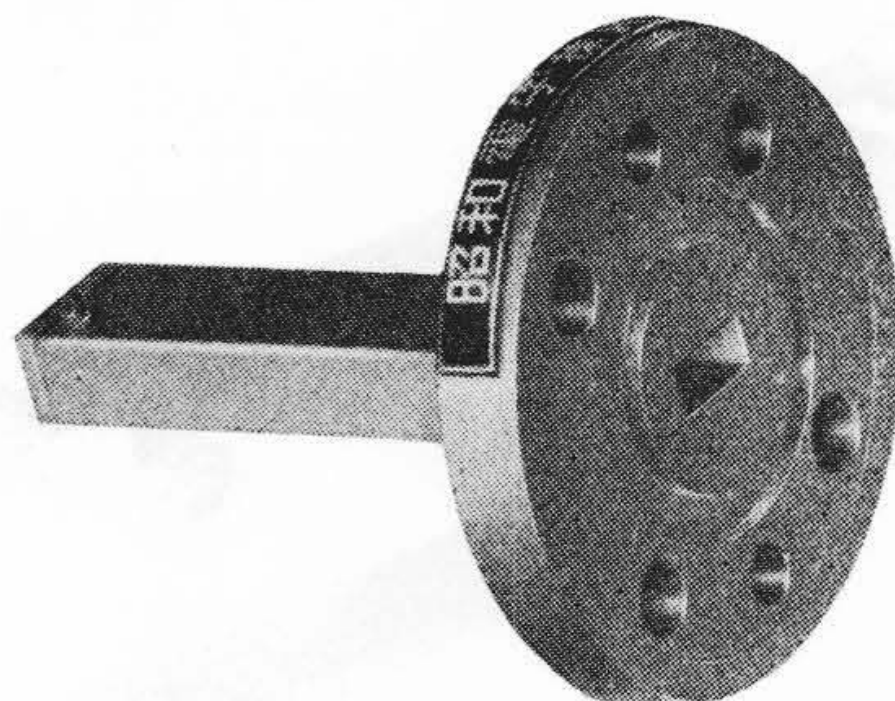
第17図のサーミスタブリッジと組合せて使用する。これは自動平衡型のブリッジであつて測定電力を指示計器上に直読することができる。測定電力範囲は0.1乃至10 mWである。

8. その他

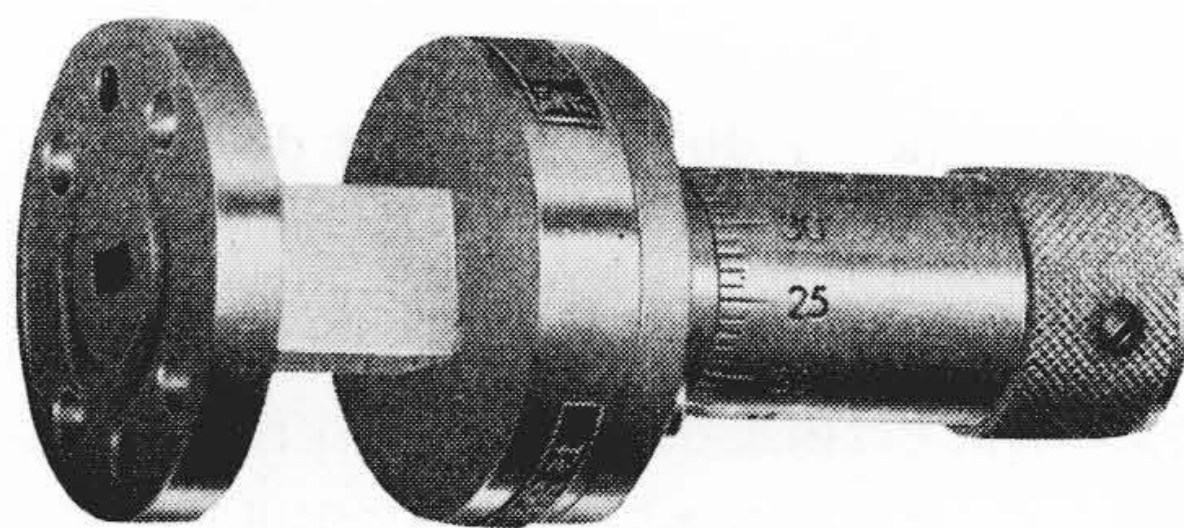
上述の測定器のほかに無反射終端、可動短絡端、マジックT、ベンド、撚り導波管、整合器などがあるが、これらの構造は極波におけるそれとほとんど異なるところはない。ただ導波管が小型になるため従来の工作方法では工作が困難になるために、多くは黄銅などの素材から削り出して、電流を切らない面で接合させるか、あるいは電鋳などの方法によつて製作している。第18図は50 GC 帯の無反射終端である。吸収体として抵抗減衰器に使用している Metalized mica を用いており、34GC 帯用のものについて30GC から36GC にわたつて測定した結果 VSWR は1.05 以下であつた。第19図は50GC 帯の可動短絡器、第20図は34GC 帯のベンドおよび撚り導波管である。このほかフェライトを使用した回路素子として、アイソレータ、サーキュレータなどを試作中であつて、それらについては次の機会に報告する予定である。

9. 結 言

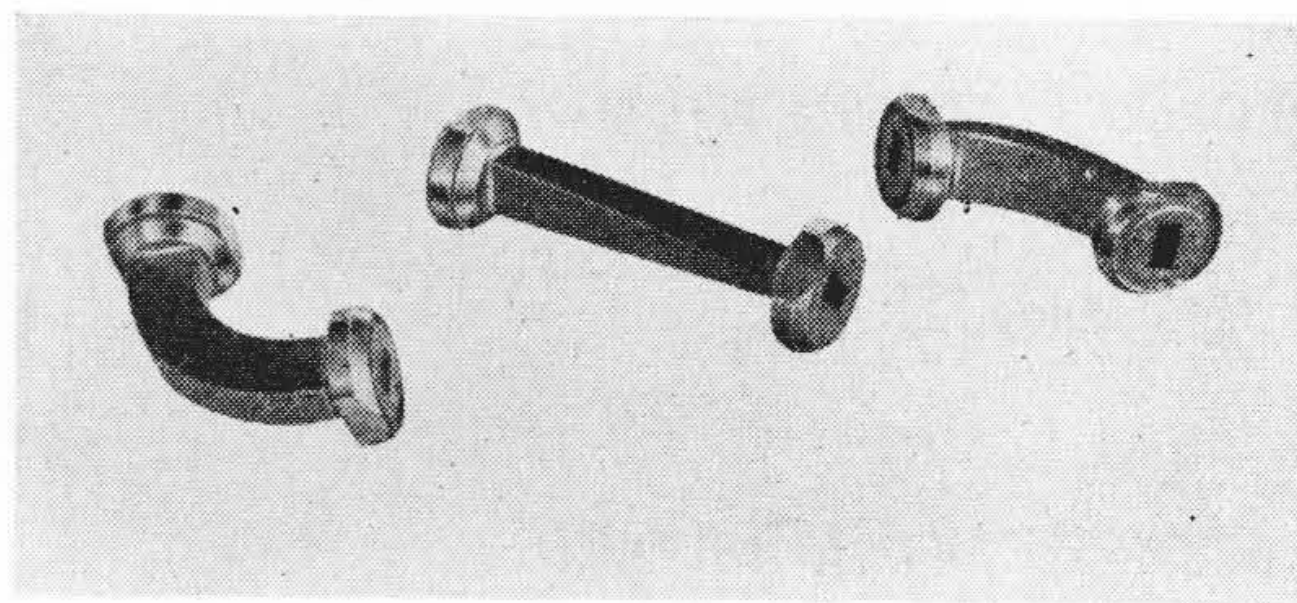
耗波帯における試験装置として、種々の立体回路の測定器の構造および特性について述べたが、その基本となる考え方は極波の場合と異なるところはなく、工作上的問題などを考慮して設計し、工作法などについても十分注意するならば、十分実用に供されるものが得られることが明らかであろう。ただその精度において、あるいは電氣的、機械的設計の問題など今後が開発されるべき点が多く、周波数がさらに高い方向に進むにつれて、測定原理から検討しないかぎり十分なる精度の得られないものもでてくるものと思われる。



第18図 50 GC 帯无反射終端



第19図 50 GC 帯可動短絡器



第20図 34GC 帯ベンドおよび撚り導波器

終りに終始御指導をいただいている東京大学工学部岡村教授、および御便宜を計つて下さつた電波研究所超高周波研究室の方々、ならびに日頃御指導をいただく日立製作所中央研究所および戸塚工場のマイクロ波関係の方々に対し感謝の意を表わす次第である。

参 考 文 献

- (1) 斎藤、黒川： 耗波試作測定器の概要、電通学会マイクロ波伝送専委資料 3月 1956
- (2) 宇田ほか： ミリメータ波測定器、信学誌、昭30-5
- (3) ミリ波特集： 電子工業 Vol. 6 No 3. 1957
- (4) (1) 参照
- (5) Montgomery: Technique of Microwave Measurements Radiation Labo. Series Vol. 11. P296 MC Graw-Hill
- (6) 小口、田中： 耗波帯における電力測定、昭31連大 No. 3