

ミリ波広帯域高能率サーミスタ電力計

Broad Band and High Efficiency Thermistor Mounts for Millimeter Wave Frequencies

青 木 俊 男* 東 生 造* 石 井 宗 典**
Toshio Aoki Seizô Azuma Sôsuke Ishii

内 容 梗 概

ミリ波帯精密電力測定を検知素子にサーミスタビードを使用し、周波数 34~100 Gc 帯にわたって実効能率の高い実用電力計を実現することができた。

能率の改善はサーミスタビードの組成、形状およびビードを取り付ける電力計の構造に関係する。これらを改善の結果、34 Gc 帯で 95%、100 Gc 帯で 60% の能率を得た。

一方インピーダンス特性の広帯域化には新方式を採用し、34 Gc 帯で導波管使用帯域の 100%、50 Gc 帯で 70% にわたり電圧定在波比 2 以下に、また 100 Gc 帯は使用帯域の 35% を VSWR 3 以下にすることができた。ここではこれらの改善の経過を結果とともに示した。

1. 緒 言

マイクロ波、ミリ波の電力測定でもっとも広く用いられているのは、ボロメータ法である。ボロメータにはサーミスタまたはバレットが使用され、ともにブリッジ法を用いて入射電力による温度上昇を抵抗変化に置換して測定するものである。この両者にはそれぞれ特長があり、低周波との置換効率に関しては後者が、機械的強度、耐電力性に関しては前者がすぐれている。この傾向は被測定電力の周波数が高くなるに従って、すべてが小形になり一層著しくなってくる。特にバレットはエッチングした白金線の部分がきわめて細くなるため、耐震性、耐電力性において非常にもろいものとなってしまう、数 mW で溶断してしまう。一方サーミスタは使用波長に比較して十分小さなビードを作るには技術的に解決すべき問題がある。しかし機械的、電気的衝撃に対しては十分強い特長があり、能率の向上を可能にすれば、実用装置としては最良のものにすることができる。

そこでミリ波領域で実用的なサーミスタ電力計を開発するため、能率とインピーダンス特性の向上を図り、サーミスタビードと電力計の構造の二つに区別して改良を行なった。

2. サーミスタ電力計の設計

2.1 サーミスタ電力計に関する考察

サーミスタは Mn, Co, Ni, Fe および Cu のうちの 2~4 成分系材料を使用目的に応じて組み合わせて作る半導体の小さな粒子である⁽¹⁾。第 1 図はサーミスタビードの構造を示したものである。従来の小形ビードは 300~400 μ の大きな半導体を 25 $\mu\phi$ 程度のごく細い白金ロジウム線 2 本でささえている。

サーミスタ電力計の実効能率を(1)式に示す定義で与える。

$$\eta = \frac{P_m}{P_0} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

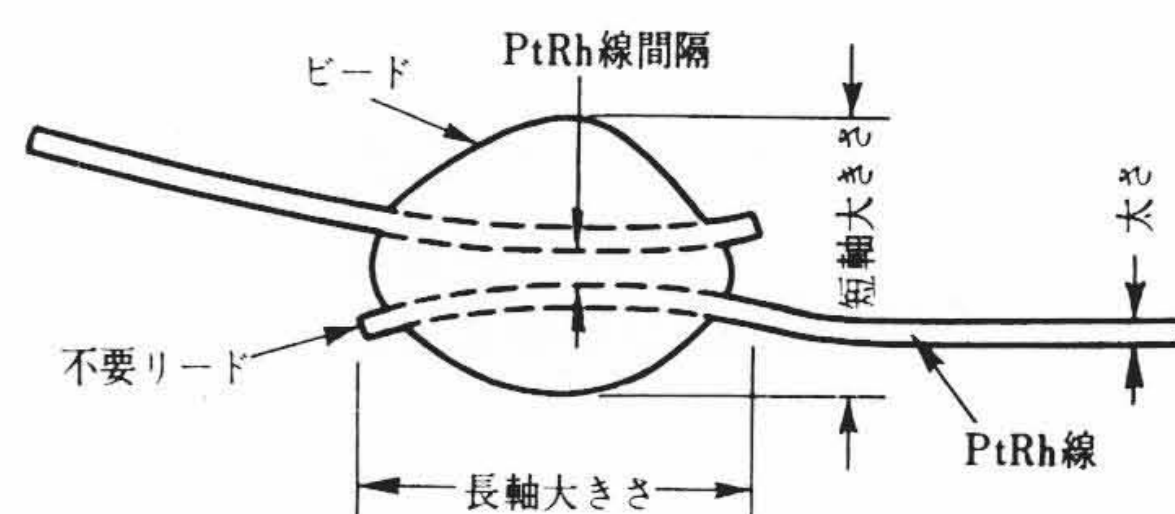
ここで、 η : 電力計の実効能率

P_m : サーミスタ電力計が指示する電力値

P_0 : 電力計に入射される全電力 (一般にはカロリメータ法⁽²⁾で較正)

η は被測定電力の周波数が高くなるとともに低下していく。その原因は、大略次のように区別できる。

(i) ミリ波電力によるビード加熱分布の不均一さ (ミリ波電力



第 1 図 サーミスタビードの構造図

と直流もしくは低周波電力との置換誤差)

(ii) サーミスタビードの並列容量による短絡の効果

(iii) サーミスタ電力計の管壁伝送損失の増加

(iv) サーミスタ電力計の反射損失

(i) はバレットの解析⁽³⁾でミリ波と低周波電力とではバレット上の加熱分布が異なっていることが明らかにされている。この解析はサーミスタビードの場合にも定性的にはいえることで、仮に定在波がビードに沿って存在するとすれば、加熱によって生ずる温度分布は低周波もしくは直流加熱状態とは異なってくる。すなわちミリ波電力と直流電力では同一電力を印加した場合でも抵抗変化量は異なっており指示される。この誤差はビードの大きさが波長に比較して重視できなくなるにつれて大きくなる。

(ii) はサーミスタが本質的にミリ波領域では不利であると考えられる最大原因である。しかしながらこの容量が実際にどの程度存在するか正確な報告はない。

(iii) はサーミスタ電力計として、導波管内の表面仕上げの向上で、(iv) は周波数特性の広帯域化によって解決できる。

2.2 サーミスタビード

サーミスタの能率を改善するために、下記の項目に従って能率との関係を調査した。

(i) サーミスタビードの初期抵抗値との関係

(ii) 白金ロジウム線 (以後 PtRh 線と呼ぶ) の太さとの関係

(iii) PtRh 線の電力計への取付時の長さに対する関係

(iv) ビードの外形寸法に対する関係

(v) ビードの表面状態

(vi) ビードより突出している不要 PtRh 線との関係

(vii) PtRh 線のビード内における間隔

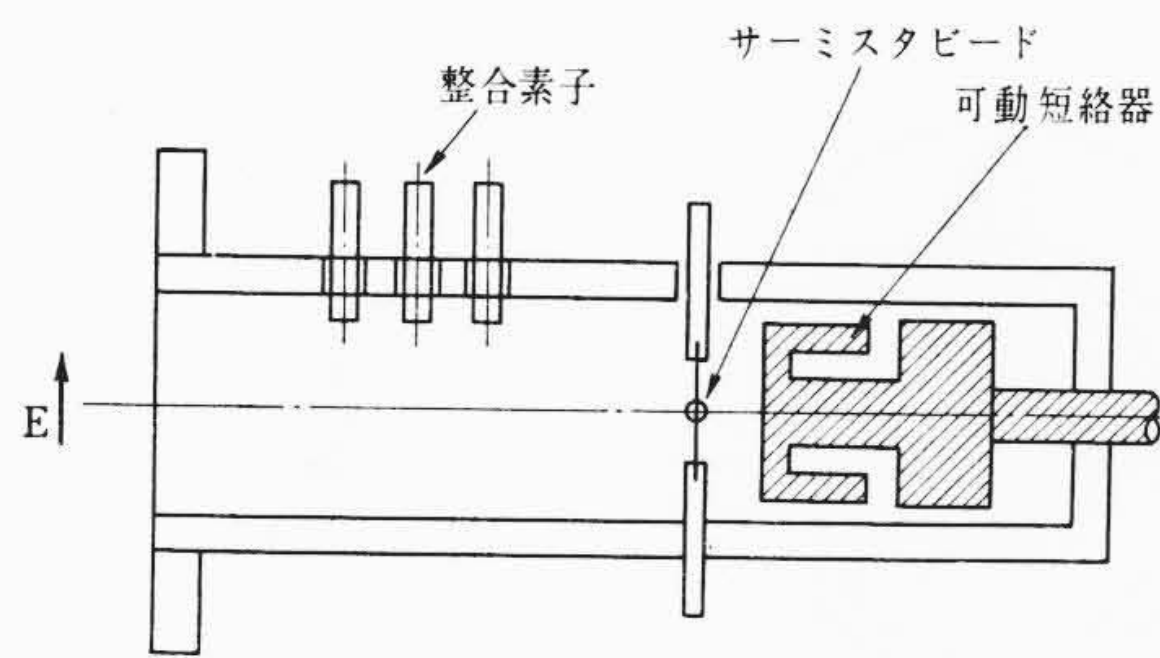
(viii) ビード取付用マイカ板による損失

(ix) ビード材質の変更—たとえば銅含有量の増加による能率変化

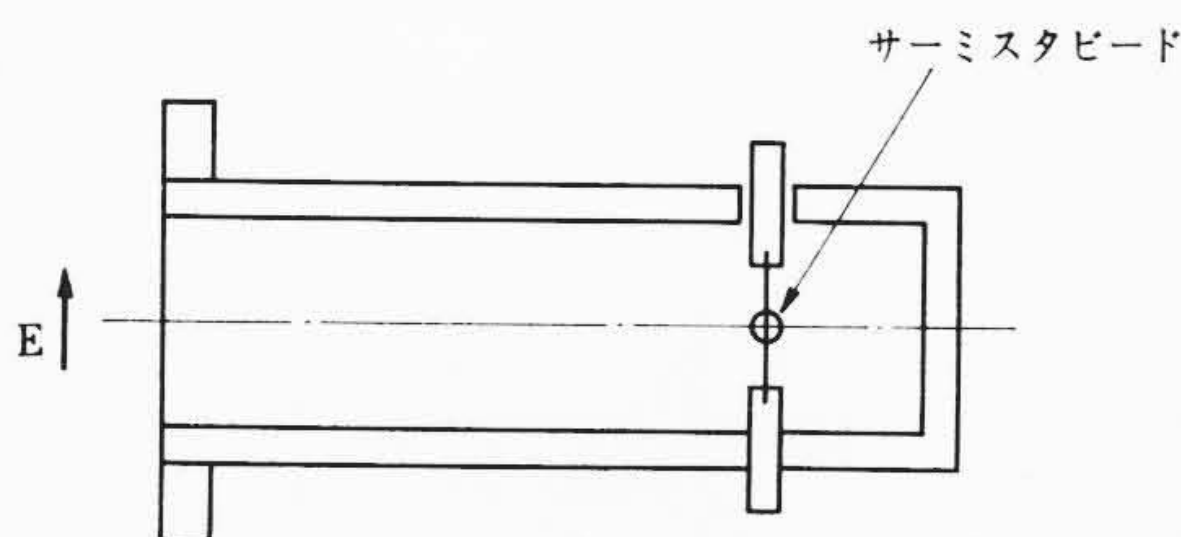
(x) サーミスタをガラス巻きにする効果

* 日立電子株式会社

** 日立電子株式会社 工博



第2図 整合器付サーミスタ電力計概略図



第3図 固定形サーミスタ電力計概略図

2.3 サーミスタマウントの設計

サーミスタ電力計の主要特性として、サーミスタビードの能率、安定度および入力インピーダンス整合度の三点をあげることができる。この三点はそれぞれ独立したものでなく常に関連した形で観測されるから、別個に考察することには若干問題があるが、問題の性質上分離して実験することにした。すなわちビードの能率向上は、これをビード自身で解決し、入力電力の反射係数を広い周波数範囲にわたって小さくすることは、これをサーミスタマウントの導波管回路で解決することにした。

マウントの構造には、第2図に示すインピーダンス整合素子や可動短絡器を設けた調整形と、第3図のような固定形とがある。前者は広帯域にわたってインピーダンス整合をとるために整合器を必要とする構造であり、後者は特定の周波数帯域内で整合のとれているものである。

電力計の能率向上の観点から考えると整合器を設けることはそれだけ回路が複雑になり、また導波管壁の熱損失が大きくなるので不利である。したがって電力計は固定形でかつ広帯域特性であることが必要である。

本試作研究では周波数範囲を導波管帯域の25%として設計試作を行なうことにした。

サーミスタビードおよび電力計にした場合の等価回路⁽⁴⁾を第4、5図に示した。第4図においてLはPtRh線のインダクタンス、 R_1 は自己加熱によって生ずる抵抗、 c は並列容量である。第5図の等価回路は c 、 c_0 を無視すると第6図(a)に書替えることができる。第6図(b)と第6図(c)の関係は(2)式と(3)式の変換で行なわれる。

$$R' = R \left\{ 1 + \left(\frac{X}{R} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$X' = X \left\{ 1 + \left(\frac{X}{R} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

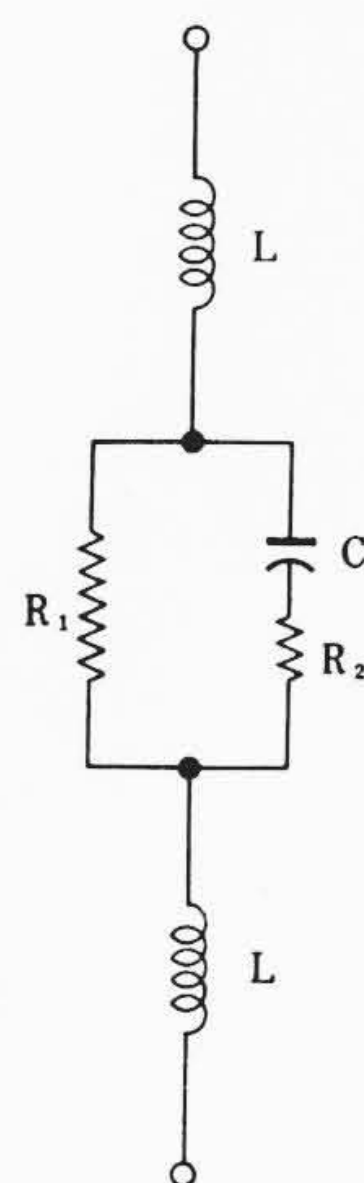
ただし $R' > R$ の領域である。

整合するためには、(2)、(3)式を満足するよう R' 、 X' を選べばよい。

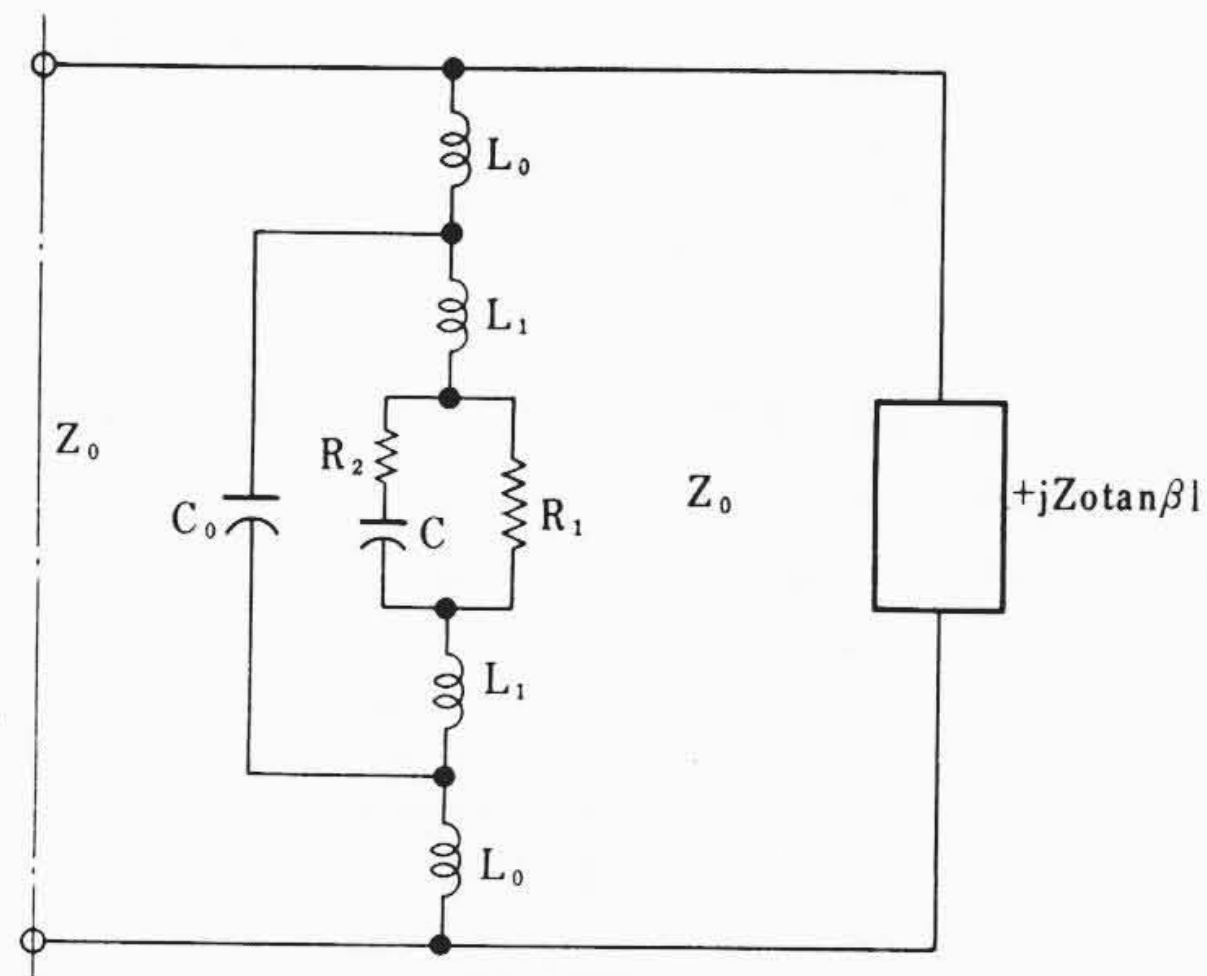
$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{R} \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{X}{R} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{1}{X'} = \frac{1}{Z_0} \tan \beta l = \frac{1}{X} \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{X}{R} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

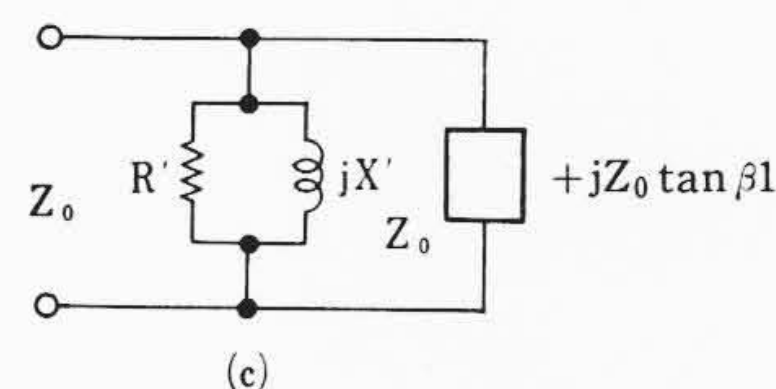
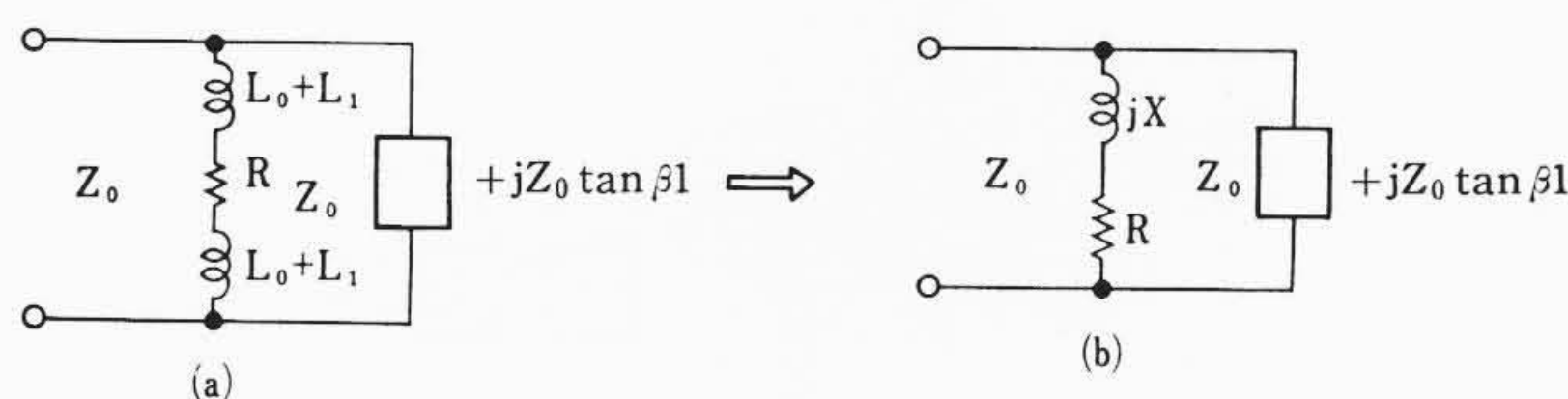
(4)、(5)式からわかるように電力計の終端が可動であるときは



第4図 サーミスタビードの等価回路



第5図 サーミスタ電力計の等価回路

第6図 サーミスタビードの等価回路
ただし $X = 2(L_0 + L_1)$

必ず(5)式は成立するから VSWR は(4)式によって決まる。終端が固定(l が一定)の場合は X と R の組み合わせで X' の周波数による変化を極力小さくし、かつ $R' \approx Z_0$ (導波管の特性インピーダンス)を満足するようにしなければならない。

広帯化するには導波管インピーダンスを低くすれば、コンダクタンス、サセプタンスの変化についてもきわめて有効であることが(4)、(5)式からわかる。導波管インピーダンスは電力と電圧で定義したものを使用すれば(6)式で与えられる。

$$Z_0 = 2 \cdot \xi \cdot \frac{\lambda_g}{\lambda} \cdot \frac{b}{a} \quad (\Omega) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ξ : 自由空間インピーダンス (377 Ω)

λ_g : 管内波長

λ : 自由空間波長

a : 導波管広辺の長さ

b : 導波管狭辺の長さ

Z_0 を小さくするには (R は一般に 200 Ω 動作) 三種類の方法がある。

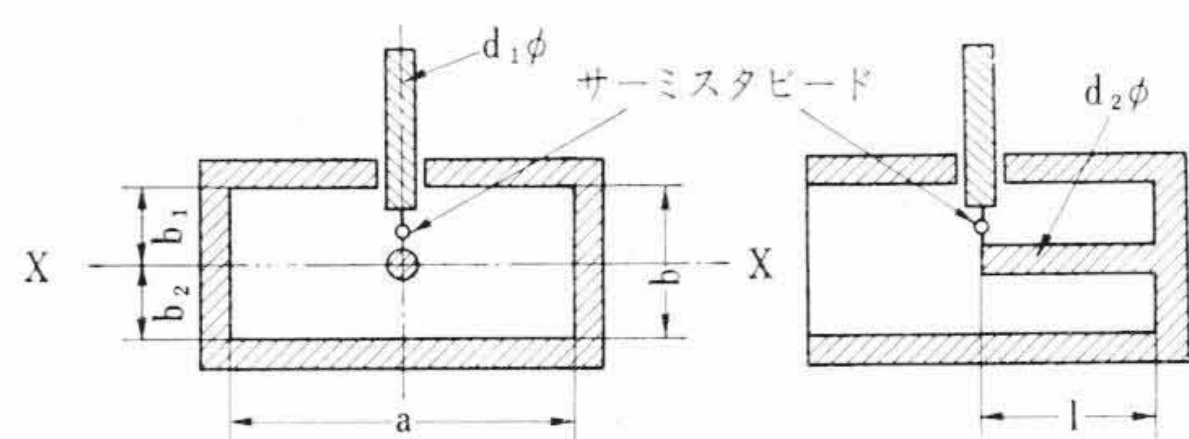
(i) a を大きくする

(ii) b を小さくする

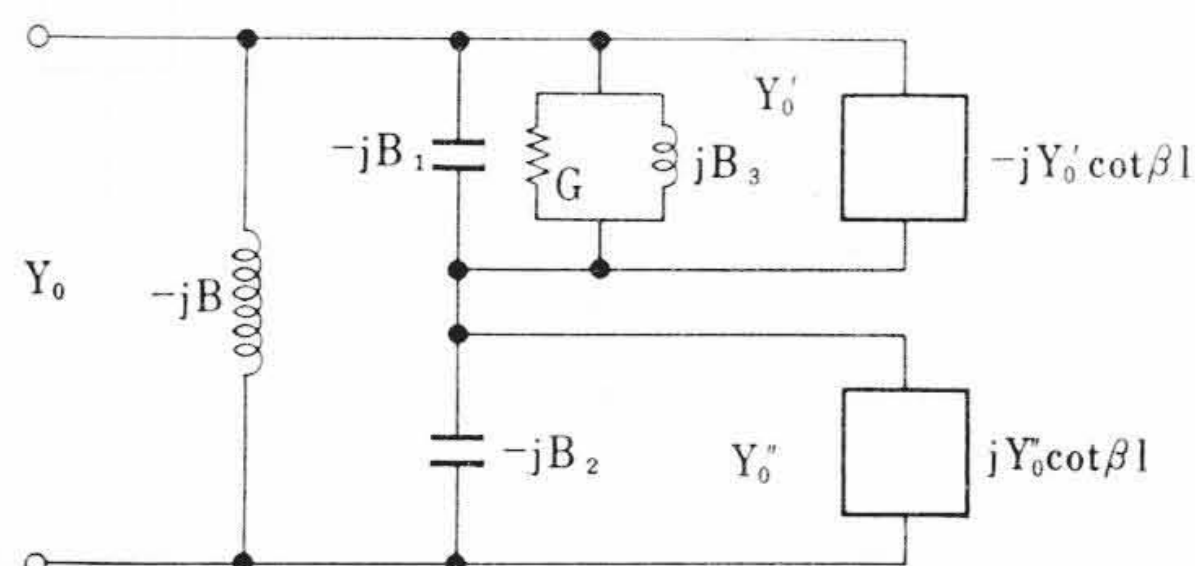
(iii) λ_g を a の寸法変更以外の手段で小さくする

(i) は高次姿態の発生を生ずる恐れがありあまり a を大きくできない。

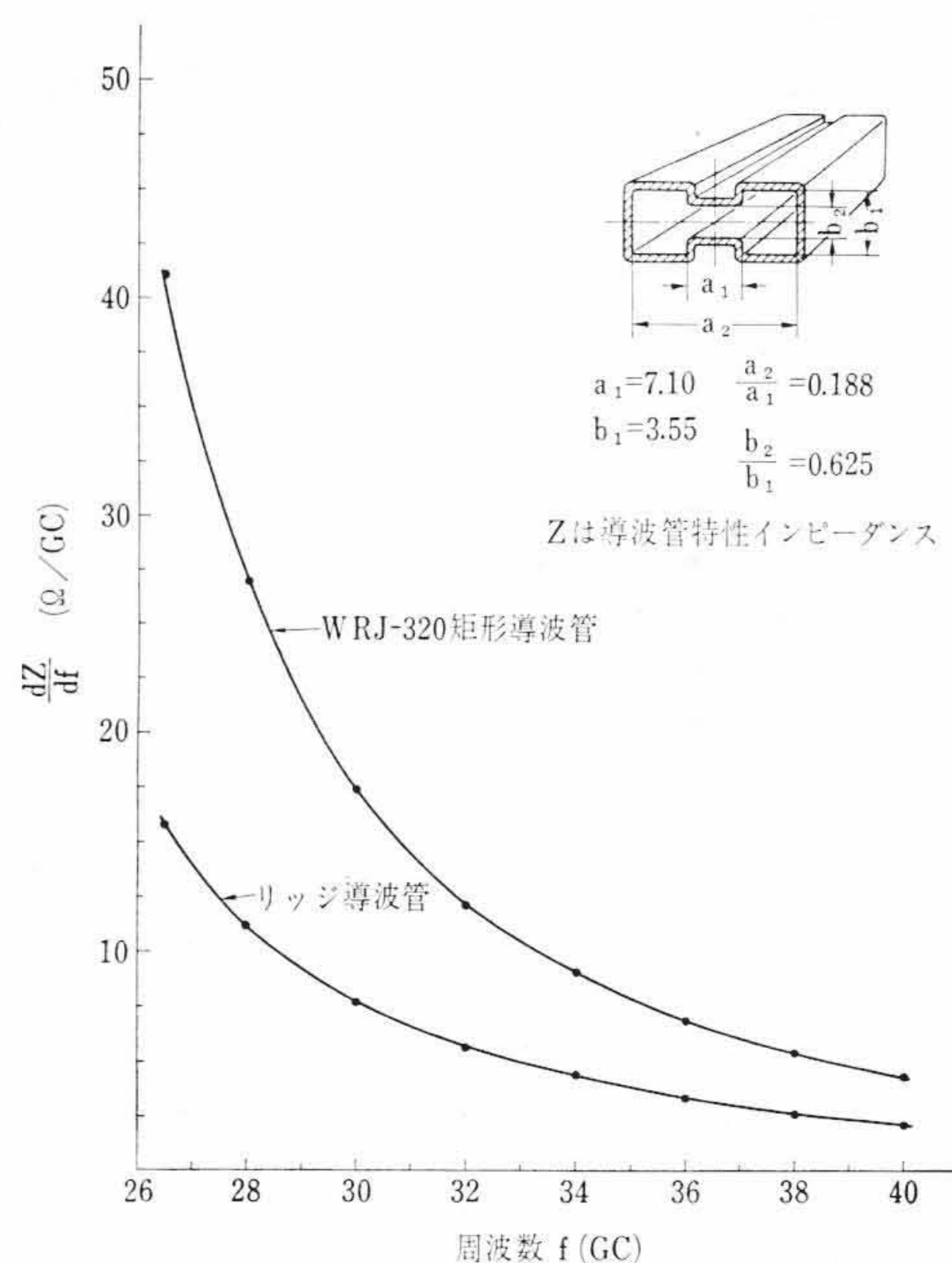
(ii) はサーミスタビードが長軸方向に 300~400 μ の大きさがあるため、小さくするのに限度がある。また周波数が高くなって、たとえば 100 Gc になると $b = 1.27$ mm となり、 b をつめるとサーミスタ



第7図 新形サーミスタ電力計の構造概略図



第8図 新形サーミスタ電力計の等価回路



第9図 34 Gc 帯引抜導波管とリッジ導波管特性インピーダンスの周波数に対する変化率

タの取付けを不可能にしてしまう。

(i), (ii)の方法は本質的に限界があるため、実効的に λ_g を小さくすることを考えるのが一番よい方法といえる。この考えに基づくものに階段式リッジ導波管やテーパ式リッジ導波管が提案されているが、いずれもミリ波になると工作精度が厳格になると、サーミスタを取り付けるのが大変むずかしくなる。そこでわれわれは第7図に示した構造のサーミスタ電力計を考案した。

第8図は等価回路⁽⁵⁾を示したものである。

ここで、 Y_0' , Y_0'' : 電磁波の伝送方向に金属体が突出している部分の狭辺が b_1 , b_2 の導波管アドミッタンス

jB_1 : Y_0' と Y_0 との不連続部分の容量

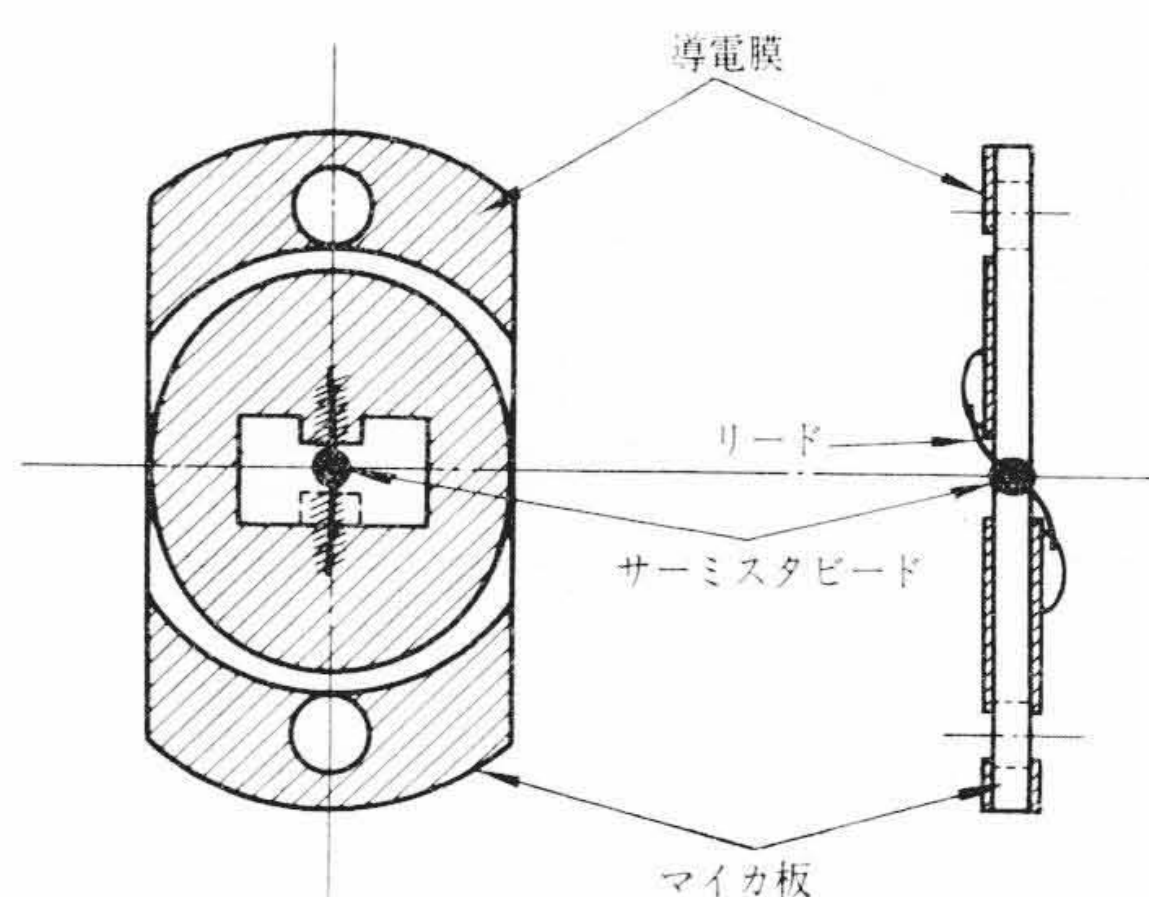
jB_2 : Y_0'' と Y_0 との不連続部分の容量

jB_3 : 電極棒およびPtRh線からなるサセプタンス

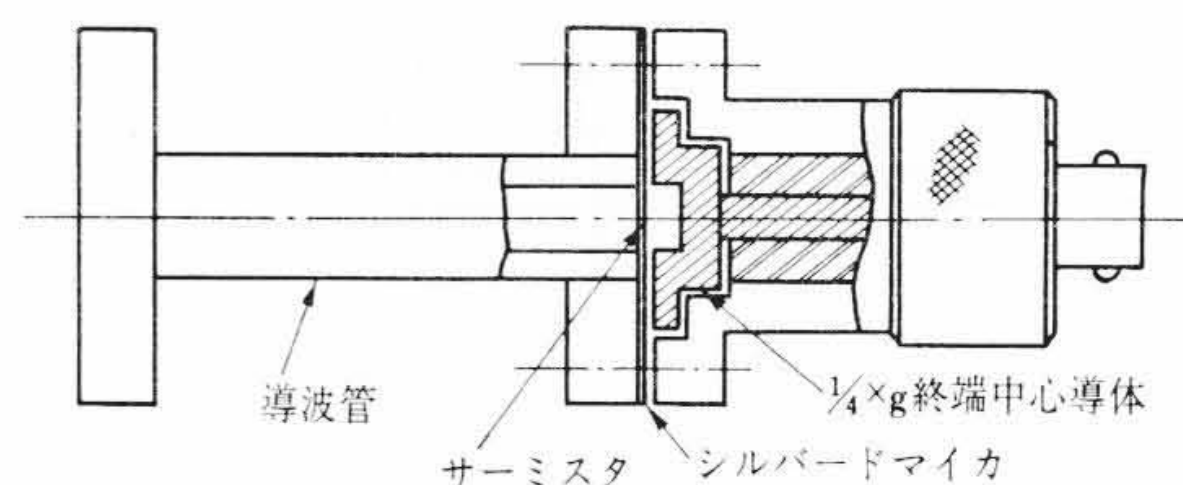
G : 電極棒, PtRh線およびサーミスタ抵抗からなるコンダクタンス

jB : 不連続部分にはいる並列サセプタンス

この導波管は $X-X'$ 面で分割して考えると、ちょうどシングルリッジ導波管⁽⁶⁾を逆にして組み合わせた形に似ている。



第10図 サーミスタビードのシルバードマイカ板取付図



第11図 シルバードマイカ形サーミスタ電力計取付構造断面図

リッジ導波管は同じ寸法の方角導波管に比べて遮断波長が長くなり、特性インピーダンスが低くなる特長がある。またリッジの比を適当にとれば高次姿態 TE_{20} , TE_{30} に対して一般の導波管より遮断波長を短くとることができるので、広帯域伝送に適する性質をもっている。したがってサーミスタ電力計にリッジ導波管を使用すれば広帯域性をうることが期待できる。一例として34 Gc帯のリッジ導波管のインピーダンス特性を第9図に示した。

この新形電力計の特長は、

- (i) 終端インピーダンスが低いこと。
- (ii) 終端導波管の管内波長および特性インピーダンスの周波数特性が小さいこと。
- (iii) サーミスタの取付けが容易なこと。
- (iv) 導波管の狭辺 b を小さくして導波管インピーダンスを低下させるのではないから100 Gc帯のように導波管が小さくなくてもサーミスタビードの取付けが可能である。

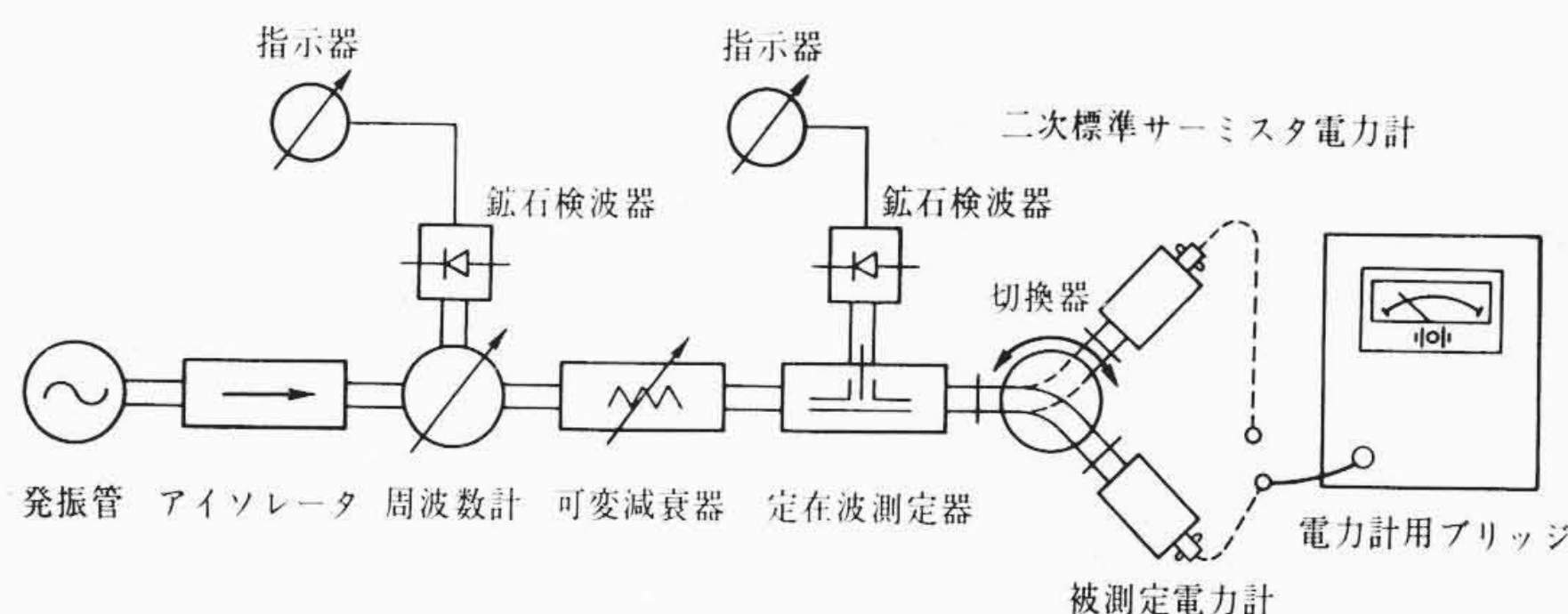
3. サーミスタビードの検討

2.2項で述べた実験項目の中には純然たるサーミスタ特性の検討以外のものがはいていた。これは能率に関して、サーミスタを単体で静的に測定した場合と、動的にマイクロ波を印加して測定した場合との関連を明らかにするため、ほかの部分の損失程度を明確にする必要があったからである。

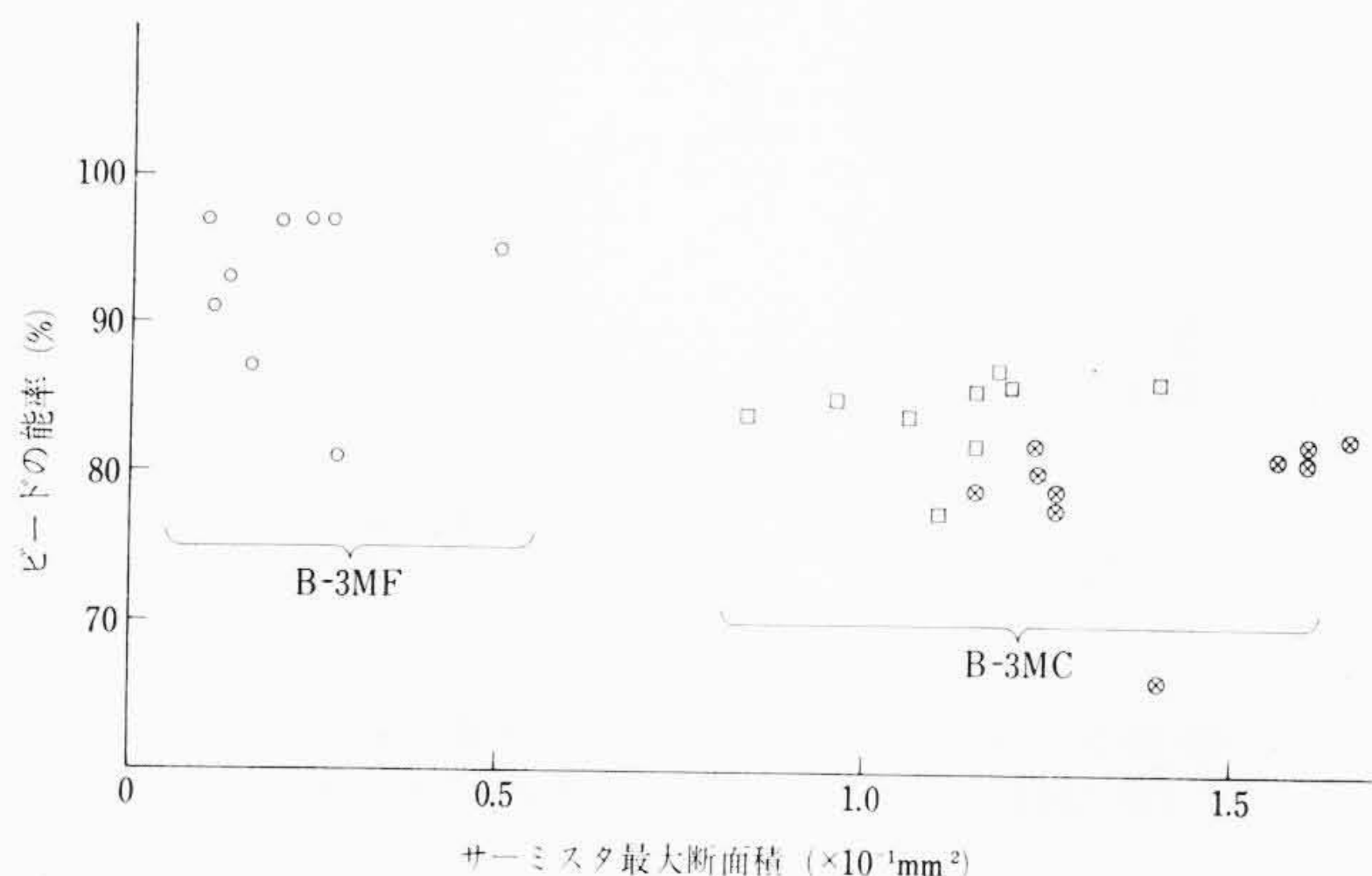
3.1 電力測定用試験回路

ビードの取付けは第10図に示したシルバードマイカ基板を用いて行なわれる。シルバードマイカ板は薄い天然マイカの両面に銀とガラスの粉末溶液を薄く塗り、530°Cで焼付けたものである。図に示したようにマイカの中央孔の部分にビードを設置し、リードを両側の電極にそれぞれ導電性塗料で取り付ける。マイカ基板に取り付けたビードは第11図のサーミスタ電力計に取り付けてブリッジ回路の一辺とする。

ミリ波測定回路のブロック図は第12図に示すとおりである。ここでミリ波電力はカロリメータ法で較正された二次標準サーミスタ電力計と被測定サーミスタ電力計とを切換器を通して比較較正される。この切換器は手動で、その切換偏差は0.25%以下である。



第12図 ビードの能率測定用回路図



第13図 サーマスタビードの大きさによる能率特性

3.2 サーマスタビードと初期抵抗

能率とビードの初期抵抗値との関連性が見出せれば静特性の状態ではビードの良否を判定できる利点がある。この観点で初期抵抗値のバラツキと能率のバラツキを調べたが関連性はなかった。

3.3 サーマスタビードの大きさによる効果

ビードの大きさが能率に最も深い関係があることは検討時に予想されていたので、従来 70% (34 Gc 帯) 程度の能率であったビード B-3M を材質を変えずに大きさのみ約 1/2 ($400\mu \times 200\mu$) に小形化した。このビード (B-3M' と呼称する) の能率は試験結果から従来の B-3M より約 15% 向上した。

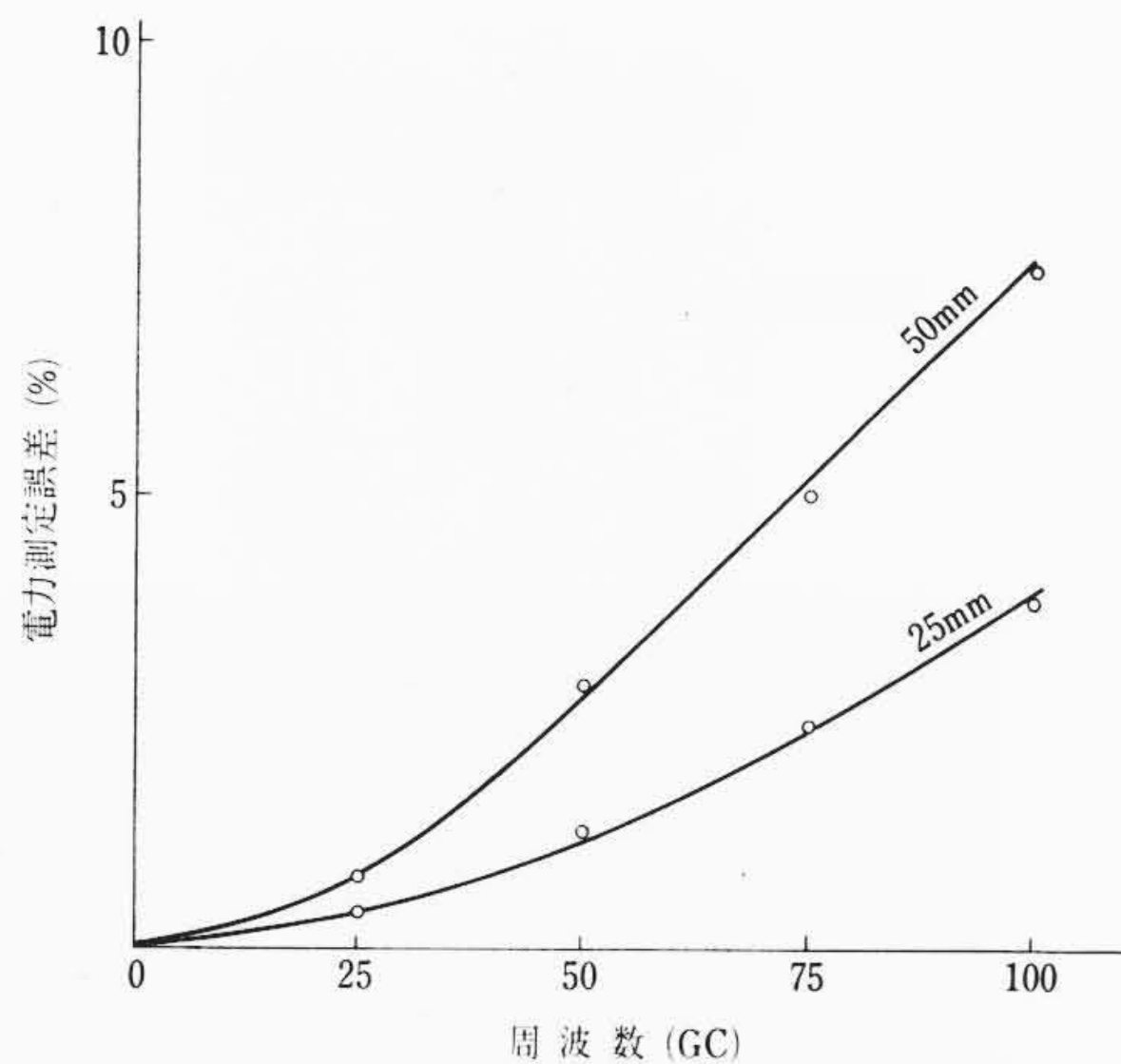
しかし B-3M' は同一材料をそのまま小形にしたため初期抵抗値が若干高くなり、市販の電力計用ブリッジで動作させることが困難になったので、組成を変え初期抵抗値を下げたところ B-3M' に比べてやや能率が低下した。測定結果のバラツキは第13図に示すとおりである。なおこのサーミスタを B-3MC と呼称した。

B-3M と B-3M' の実験結果の類推から B-3MC の材質でビードをさらに小さくして、B-3MF と称するビードを試作した。この能率特性は第13図に示すとおりである。

B-3M', B-3MC, B-3MF の実験結果からビードを次第に小さくすることによって能率 80% 以上の歩留りとなることがわかった。なおビードの製作時に PtRh 線の不要リードを極力短くし、直流電力とミリ波電力加熱の差が小さくなるようにした。また B-3MF の製作に際してはビードを小さくするため PtRh 線を $23\mu\phi$ から $15\mu\phi$ にしている。

3.4 ビードの PtRh 線太さによる影響

PtRh 線を太くすれば放熱係数が大きくなることによって、ミリ波と直流電力の置換誤差が大きくなることが予測されるが、実際には PtRh 線が太いとビードの大きさが自動的に大きくなってしまいうため独立してリードの太さによる影響を調べることはできなかった。しかしながらリード線は機械的な強度上許せる範囲で細いほうがビードも小さくなり、かつ伝導による周囲温度の影響も受けにくいなどの利点があるため、B-3MF には $15\mu\phi$ PtRh 線を用いた。



第14図 導波管伝送損失による電力測定誤差

3.5 PtRh 線のビード内における間隔

この実験項目は実際にはビードの外形を一定にして、PtRh 線の間隔を意識的に変えることがきわめてむずかしいため、具体的にはビードが小形化されたときに同時にこの条件が満足されていると考えた。

この間隔の大小による能率効果はミリ波と直流電力との置換誤差の大小に関連している。すなわち外形が一定のビードにおいては PtRh 線の間隔はできるだけ広いほうが置換誤差が小さくなる。これは次の定性的な説明で理解できる。ビードの加熱形態がミリ波ではビードの外側から行なわれるのに対して、直流もしくは低周波電力は PtRh 線を経て内部より加熱される。この両者の加熱状態を極力相似な形にすることによって能率を向上させることができる。なお B-3M' と B-3MC の場合のように、同一形状にして Cu の混入量を増加し、ビードの初期抵抗を下げると一様に能率が 3~5% 劣化するがこの原因はよくわかっていない。

3.6 ビードをガラス巻きにする効果

B-3MC 材の実験を行なった際に、材質とビード外形を B-3MC と同じにしたガラス被覆のビードを試作した。実験結果はガラス被覆を施すことによって約 5% 能率低下が認められた。

以上各実験項目の結果を個別的に記述したが、実験は既述したように、それぞれについて実施したのではなく、多くの関連した実験の中から可能な範囲で区別したものである。したがって能率の測定結果についてもビード自身の改良のほかにビードを取り付ける技術の進歩による改善度が若干加わっているものと考えなければならない。しかしながら、それでも一般的傾向として、ビードは小形にしたほうが能率、インピーダンス特性の両方に有利であることが判明した。

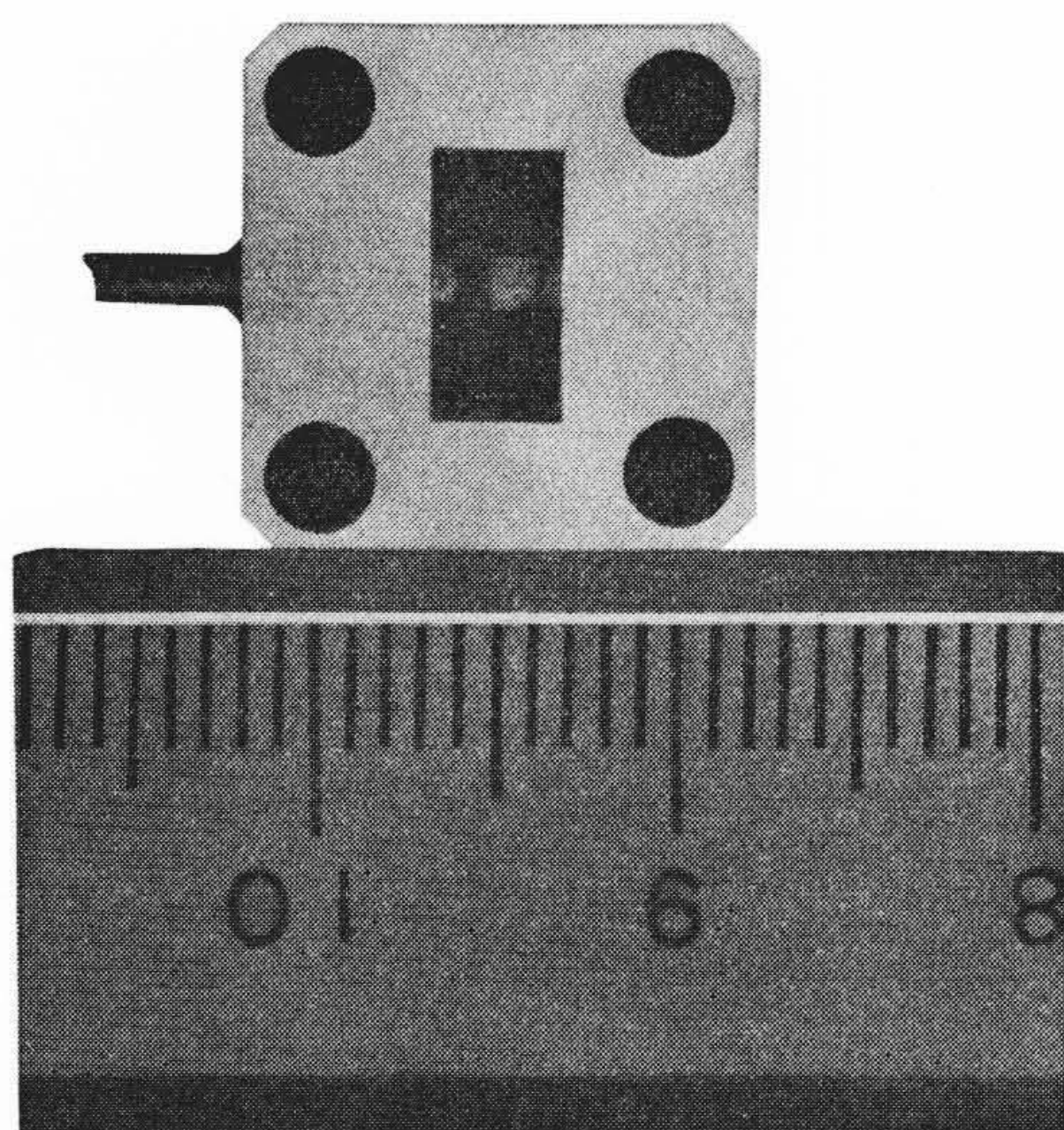
4. 新形サーミスタ電力計の特性

4.1 サーマスタ電力計の問題点

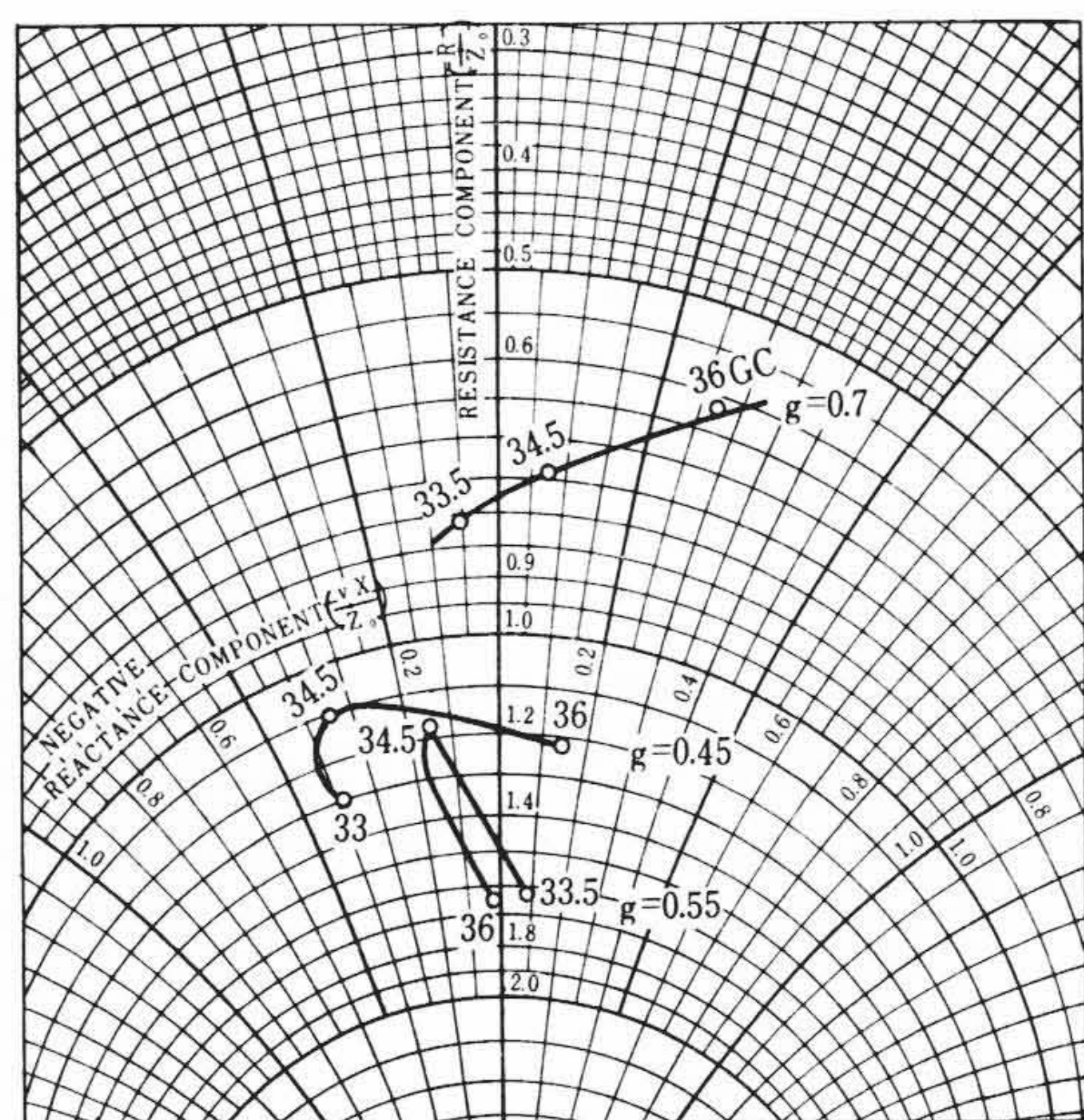
従来のサーミスタ電力計は第10図に示すようにシルバードマイカ基板にビードを銀塗料で取り付け、第11図に示した電力計に装着する構造となっている。

一方サーミスタ電力計における能率は実際にはビードの能率以外に導波管内の損失分が含まれる。この損失分として、導波管管壁電流損失とビードを取り付けるマイカ基板の銀塗料の抵抗損失およびマイカ自身の誘電体損失が考えられる。導波管伝送損失は導波管回路を単純にし、かつ入力端よりビードまでの距離を短くすることで改善することができる。第14図はミリ波帯各導波管の 25, 50 mm 当たりの伝送損失による能率低下分を示したものである⁽⁹⁾。

マイカ基板の損失は測定結果から、34 Gc 帯で平均 0.05 dB であっ



第 15 図 新形サーミスタ電力計のビード取付状態図



第 16 図 新形 34 GC 帯サーミスタ電力計特性
(使用ビード B-3MF)

た。このほかビードをマイカに取り付ける際に銀塗料を用いるため、 μW 程度の微小電力を測定する場合、銀粉とガラス粒子の接触不良によるわずかなバラツキが生じ、最小測定電力レベルの限界を狭くする原因となっている。

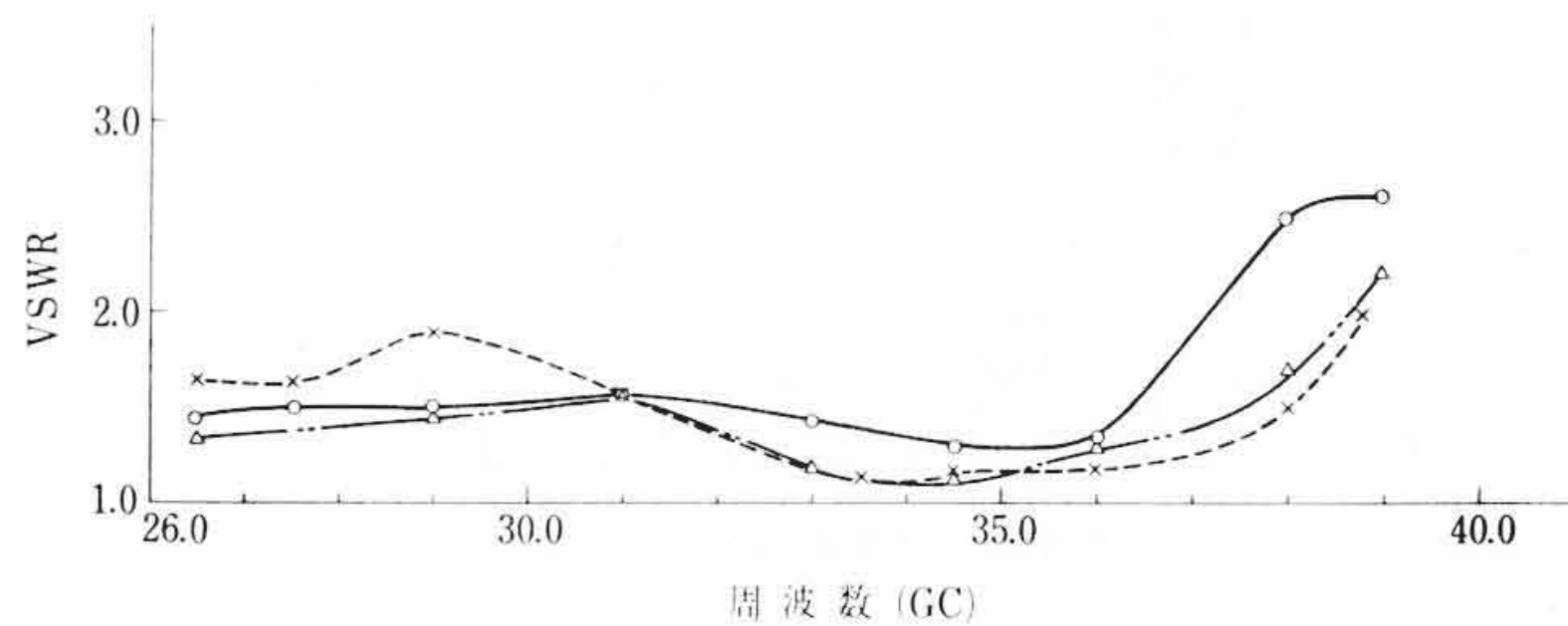
以上従来のサーミスタ電力計の問題点について述べてきたが、これらの欠点を改善するため、シルバードマイカ基板を廃止し、ビードを導波管内に直接はんだ付または電気溶接する構造にした。その結果、能率および接触不良の問題が一緒に解決することができた。

電力計の構造は理論的に十分解析されていない部分があったため、34 GC 帯で実験を行ない、各部の寸法を決定した。この結果を用いて、50, 75, 100 GC 帯サーミスタ電力計を試作実験したので、これらについて述べる。

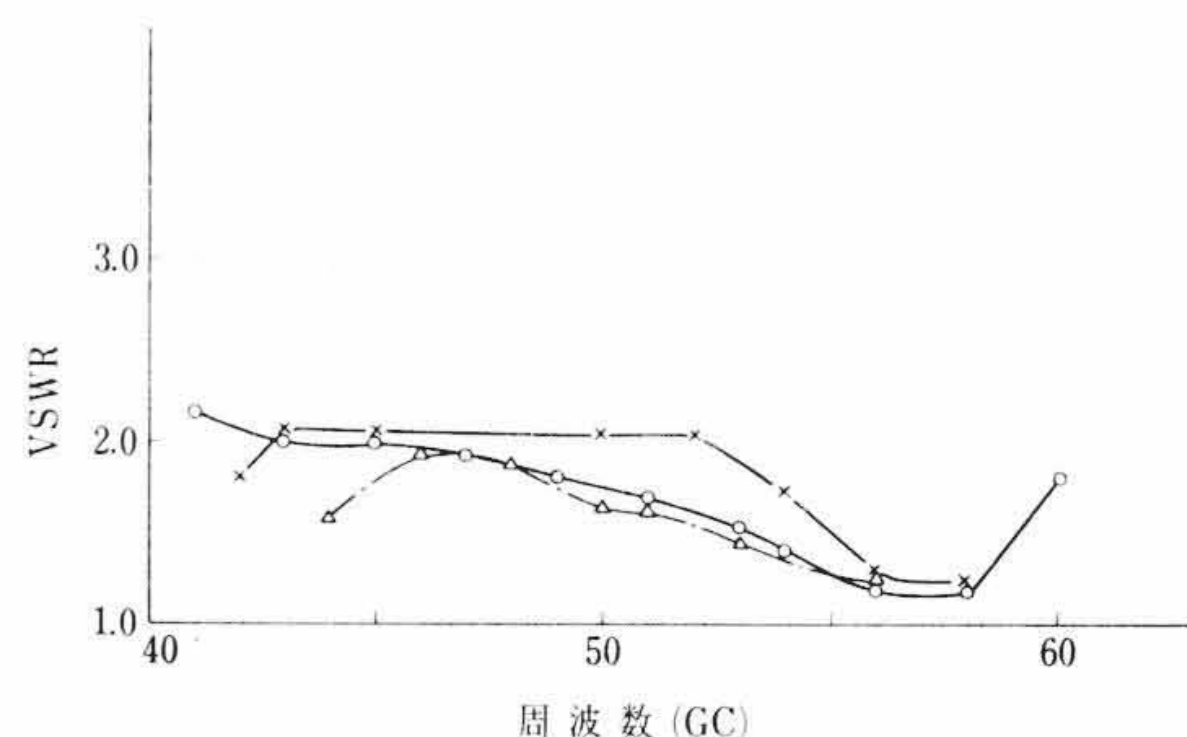
4.2 34 GC 帯サーミスタ電力計

第 15 図は新しく考案されたサーミスタ電力計の入力側よりみた構造図である。この電力計は市販のものに比べてインピーダンス特性が良好であった。第 16 図は 2 個の電極の間げき g を変化させて測定した結果である。

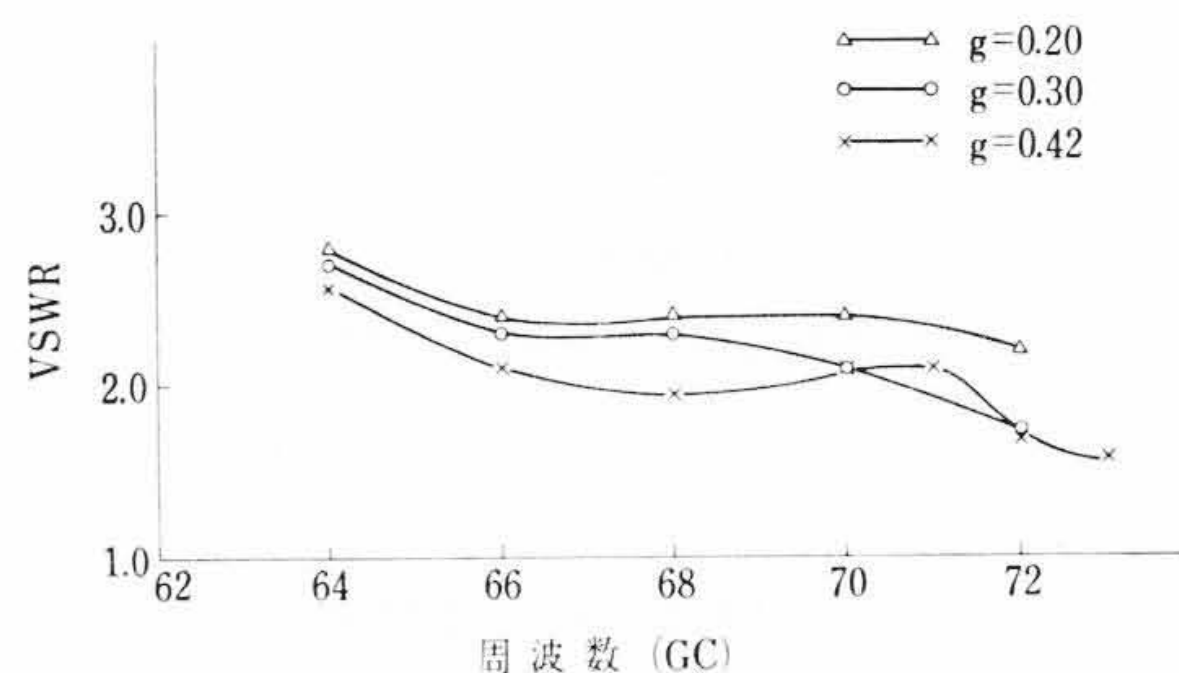
実験によって偏心の量には最適値があることがわかった。第 17 図はこの結果に基づいた電力計のサーミスタによる VSWR 特性のバラツキの一例である。ビードによる特性のバラツキが小さいことは注目すべきことである。WRJ-320 導波管の使用全帯域 26.5~40 GC にわたって VSWR が 2 以下であり、また 34.5 GC における実効



第 17 図 新形 34 GC サーミスタ電力計特性のビード
(B-3MF) による VSWR 特性のバラツキ



第 18 図 新形 50 GC 帯サーミスタ電力計のビード
(B-3MF) による VSWR 特性のバラツキ



第 19 図 75 GC 帯サーミスタ電力計の電極間げき g を
パラメータにしたアドミタンス特性
(使用ビードは B-3MF)

能率は 95% であった。

4.3 50 GC 帯サーミスタ電力計

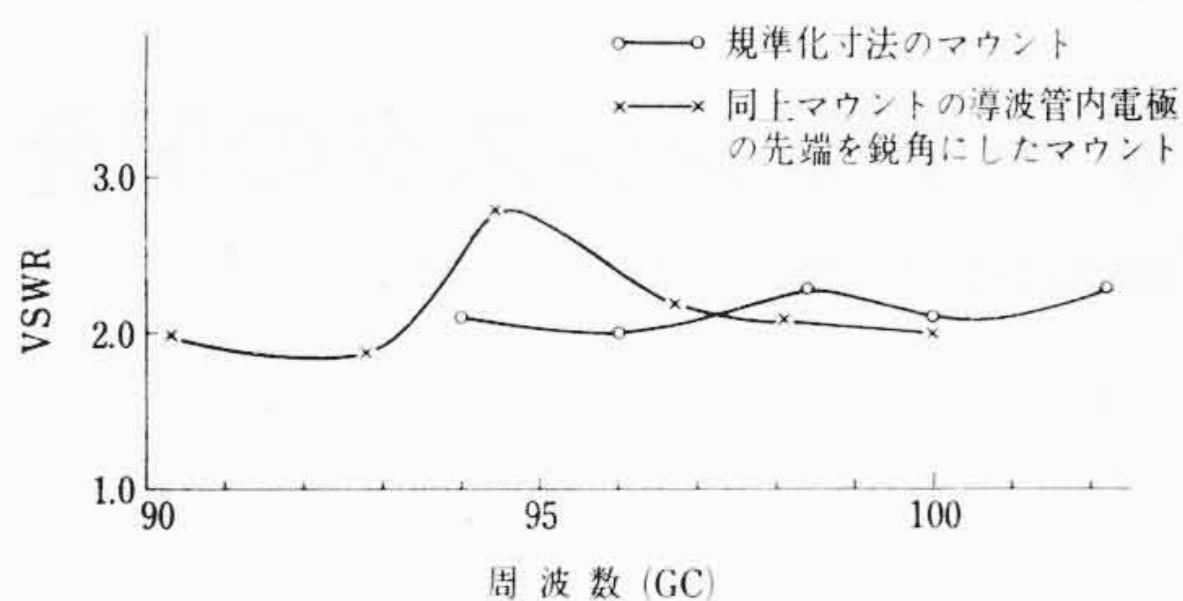
34 GC 帯の結果に基づき、50 GC 帯を設計した。各部寸法は 34 GC 帯の寸法を導波管口径の長辺 a で規準化した数値を係数に用いた。第 18 図は新形サーミスタ電力計のビード(B-3MF)による VSWR 特性のバラツキである。WRJ-500 導波管の使用帯域 40~60 GC のうち 44~58 GC にわたって VSWR が 2 以下、実効能率が 90.7% であった。

4.4 75 GC 帯サーミスタ電力計

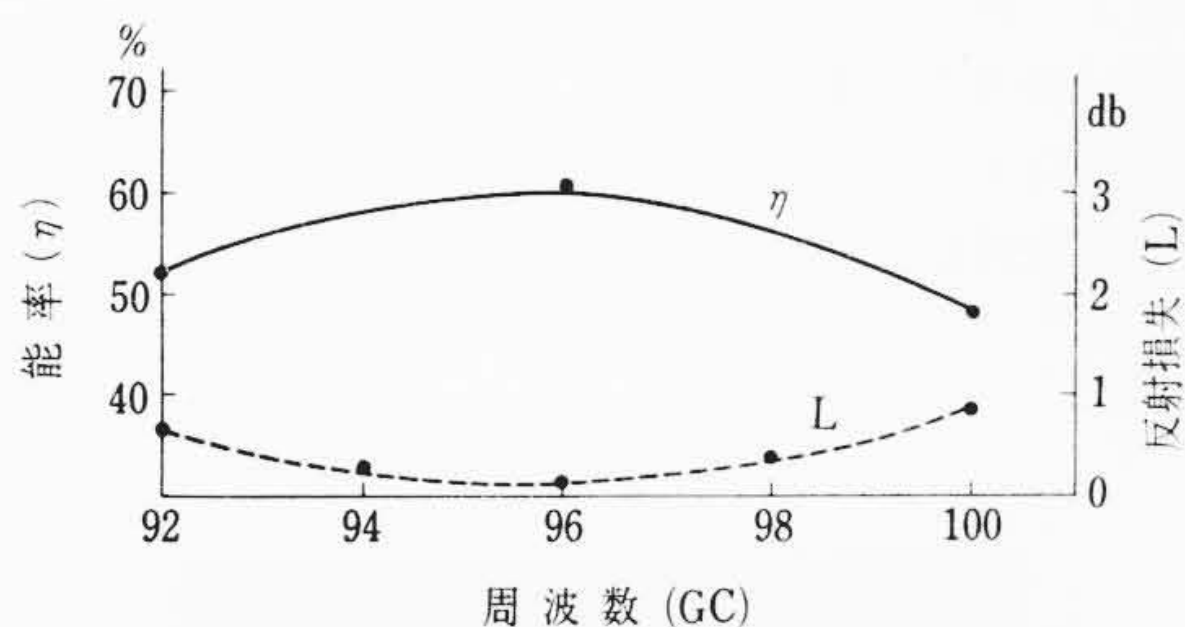
75 GC 帯電力計は 35 GC 帯によって規準化した寸法で試作したが、ビードの大きさが電極間の間隔に対して無視できないことから規準化の寸法を若干変えて測定した。第 19 図はその結果である。この結果によれば 75 GC 帯では 34 GC 帯の場合ほど g の値による変化は大きくなかった。WRJ-740 の使用帯域 60~90 GC に対して 66.8~72 GC にわたって VSWR が 2 以下、周波数 68 GC で実効能率 80% であった。

4.5 100 GC 帯サーミスタ電力計

第 20 図は規準化寸法での測定結果とそのマウントの X 軸先端を鋭角にした場合の特性である。第 21 図は実効能率測定結果である。WRJ-900 の使用帯域 75~110 GC のうち 88~100 GC にわたって VSWR が 3 以下であり、96 GC で実効能率 60%、反射係数を補償し能率に換算すると 70% になった。



第20図 100 Gc 帯サーミスタ電力計の VSWR 特性
(使用ビードは B-3MF)



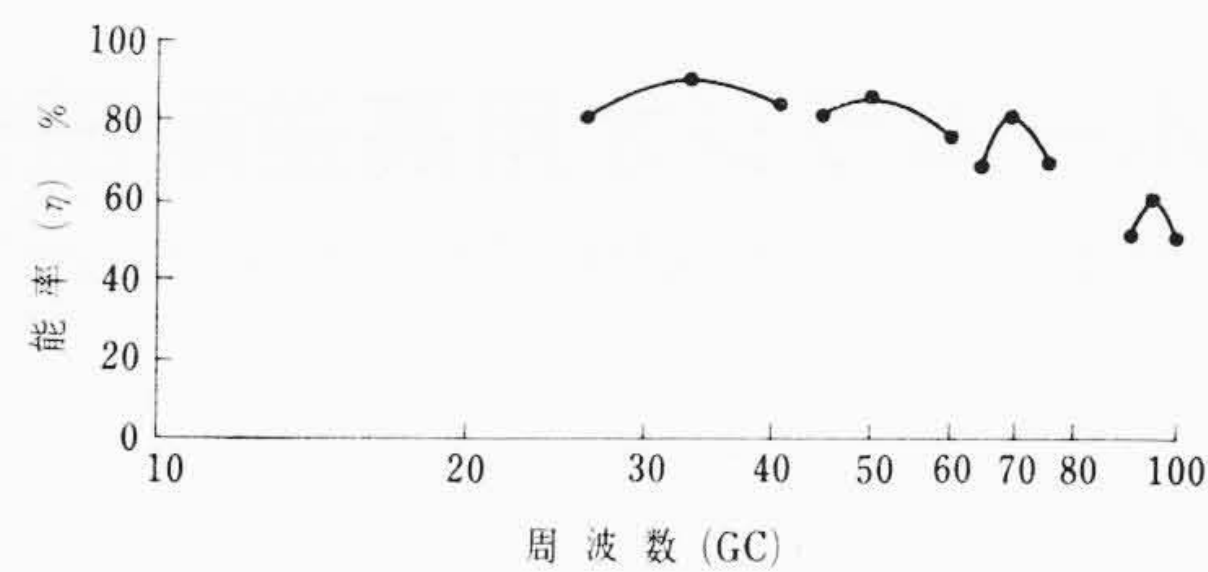
第21図 100 Gc 帯サーミスタ電力計の実効能率測定結果

5. 結 言

35~100 Gc 帯に使用したビードは B-3MF でその大きさは $150 \times 70 \mu$, PtRh 線 $15 \mu\phi$ であったが、このビードを用いた 75, 100 Gc 電力計の特性はちょうど B-3MC, 大きさ $350 \times 200 \mu$, PtRh 線 $25 \mu\phi$ を用いた 35 Gc 帯電力計の特性に非常によく似ている。このことは導波管の寸法あるいは波長に対するビードの大きさが関係していると考えられる。

実験の結果としてはビードは極力小さく、かつ形状は丸味を帯びたほうが能率も、インピーダンス特性も良いことがわかった。この理由については定量的な究明は行っていない。定性的には既述したように放熱係数や直流電力置換誤差の点から考えるとビードが小さいことは有利である。またインピーダンスについては波長に比べて十分小さいとビードの形状によって生ずるサセプタンスを非常に小さくすることができるから周波数特性について有利である。

本試作によって得られた 35~100 Gc 帯電力計の実効能率特性は第22図に示したとおりである。この特性は 60 Gc 帯では公知⁽³⁾のものより約 10% よく、75, 100 Gc 帯については国内外とも公表⁽⁷⁾⁽⁸⁾



第22図 ミリ波サーミスタ電力計の能率周波数特性

されたものは日立製作所のものしかないが、この数値に対して約 8~10% 向上している。

実効能率をさらに向上させ、周波数も高くし 150, 200 Gc 帯用サーミスタ電力計を得るためには (i) ビードをさらに小形にする、(ii) 使用導波管に拡大寸法のものを用いることなどが必要である。拡大導波管を使用する場合は高次姿態が発生しない形状にするか、発生しても無関係な構造にする必要がある。

本研究は昭和 38 年度通産省鉱工業技術試験研究補助金を得て行なったものの一部である。

終わりに終始ご指導をいただいた東京大学工学部岡村教授、通産省電気試験所桜井研究室長、ならびにサーミスタの試作に特別にご配慮をいただいた日立製作所武蔵工場はじめ社内関係各位に対し感謝の意を表わす次第である。

参 考 文 献

- (1) 二木久夫：サーミスタ材料の研究 日立評論別冊論文集 30 (昭 37-9)
- (2) 大井国夫ほか：ミリ波簡易形カロリメータ 昭 35 電四連合大
- (3) H. C. Nelson: Millimeter Wave PRD Report 4, No. 3, 1955-10
- (4) 根本俊雄：サーミスタマウント整合法 昭 38 電四学東海支連大
- (5) N. Marcuvitz: Waveguide Hand Book p. 273, 353, McGraw-Hill
- (6) G. C. Southworth: Principle and Application of Waveguide Transmisson p. 134, D. van Nostrand Co.
- (7, 9) 石井宗典：ミリ波測定器について 日立評論 45, 37 (昭 38-2)
- (8) Robert, W. Beatty: Radio Standard and Measurment, Microwaves, A Progress Review from Sept. 1960 to June 1963 年 URSI 東京大会講演より