

糧波 (10,000 Mc, 3 cm) による誘電率損失角の測定

河合 麟次郎* 佐藤 玄樹**

Measurement of Dielectric Constant and Power Factor for Micro-wave (10,000 Mc)

By Rinjirō Kawai and Genju Satō
Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract

The progress of micro-wave communications and radars has led to the popular measurement of dielectric property of insulating material in micro-wave region.

The writers in their attempt to measure dielectric constant and power factor at wave length of 3 cm, devised an apparatus based on the method of standing wave detection.

The principle of measurement by means of this device is as follows:

Electric wave from an oscillator tube is sent from one end of the wave guide which is precisely prepared for the propose of standing wave detection, and the standing wave arising in the front of reflector to which the specimen attached is measured by means of the electric potential detector. The ratio of minimum to maximum value of electric potential of the standing wave reaches maximum corresponding to each multiple of a quarter wave length. Wave length λ_2 in specimen can be obtained from the displacement of standing wave increasing the thickness of the specimen.

From λ_2 and km , the maximum value of k , dielectric constant ϵ and power factor $\tan\delta$ are computed.

The writers measured dielectric constants and power factors at both dried and moisture absorbed states with the specimens of polystyrene, polymethyl methacrylate, aniline-formaldehyde resin, phenol-formaldehyde resin, melamine formaldehyde resin, phenol and ebonite.

The results are considered satisfactory in their preciseness and also are consistent with those formerly published by other scientists.

With polymethyl-methacrylate, linear relationship was found between the rate of water vapour absorption and the increment of ϵ and $\tan\delta$.

〔I〕 緒 言

糧波通信並びにレーダー等の発達に伴い、糧波領域に於ける誘電体の測定も次第に行われるようになった⁽¹⁾。又多くの液体（水も含めて）の双極子回転による誘電分散が丁度この領域にあるので、学術的な立場から同様の

の測定が活潑に行われている⁽²⁾。筆者等の研究室でも絶縁材料の吸着水による誘電吸収の測定を行つて来たが、10 Mc 以下の周波数ではシリカゲル以外所謂誘電分散の現象は認められなかつた。210 Mc の超短波では二三の材料に就いて吸湿に伴う誘電率損失角の異常な増加が認められた程度である。液体の水が 14,000 Mc の糧波領域で誘電分散を示すので、吸着水に就いてもこの周波数

* ** 日立製作所中央研究所

領域を含めた測定を実施したいと望んでいた⁽³⁾。昭和26年の夏、一応実験装置を揃えて実験を試みたが定常波検知装置 (standing wave detection) がまづくて成功しなかった。その後定常波検定用の導波管も作りなおし、検知方法も複雑な交流増幅方法を止めて直流検流計に置きかえて再実験を行つた結果一応の成功を納めたのでこゝに報告する。

〔II〕 測定方法の理論

糧波による誘電体の測定には種々の方法があるが、こゝで取上げたのは Robert と Von Hippel⁽⁴⁾ によつて発展せられた所謂導波管法 (Hollow-pipe method) である。

第1図の如き導波管の一端を導体反射面として他方から進行電波を送れば反射波と重つて導波管内に定常波を生ずる。この定常波の出来方は反射面に附加した誘電体試料によつて異つて来る。それが試料の厚さ、誘電率及び損失角 $\tan\delta$ に関係することは容易に想像されよう。一方定常波の出来方はその強さ、即ち定常波電圧の最小値と最大値の比で表わされる。途中の計算の詳細は省略して結論を式で示せば次の如くである。

$$\frac{\tan hr_2 d}{r_2 d} = \frac{1}{j\beta_1 d} \cdot \frac{k - j\tan\beta_1 x_0}{1 - jk\tan\beta_1 x_0} \dots\dots\dots (1)$$

こゝに d は試料の厚さ、 x_0 は試料面から一番近い電圧最小位置迄の距離、 k は定常波の電圧最小値と最大値の比率、 r_2 は試料内の伝播函数 (propagation function) で

$$r_2 = \alpha_2 + j\beta_2 \dots\dots\dots (2)$$

β_1 は管内気中の伝播函数の虚数部分をあらわす。

β_1, β_2 は空气中、試料中の管内波長をそれぞれ λ_1, λ_2 とすれば

$$\beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}, \quad \beta_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。

又矩形導波管の断面の長辺の2倍を λ_c 、管外自由波長を λ_0 とすれば

$$\frac{1}{\lambda_1^2} = \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \dots\dots\dots (4)$$

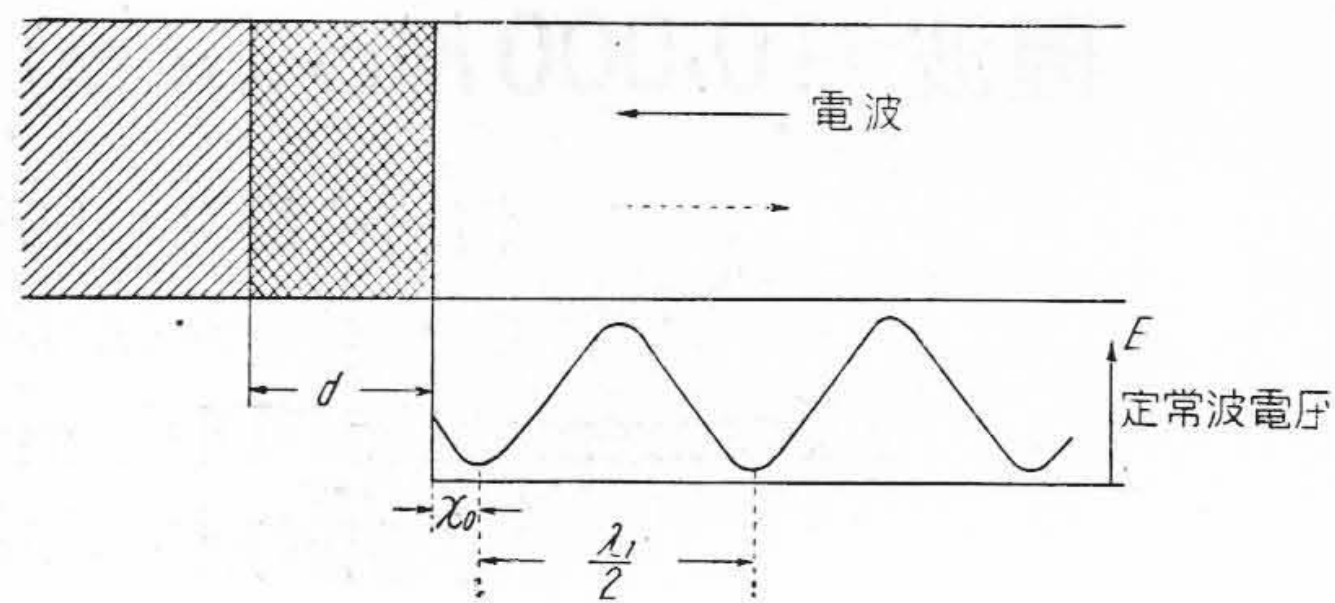
の関係がある。

試料の複素誘電率 ϵ_2 は r_2 と次の関係式で結ばれる。

$$\epsilon_2 = \epsilon_0 \frac{1 - (r_2 \lambda_c / 2\pi)^2}{1 + (\lambda_c / \lambda_1)^2} \dots\dots\dots (5)$$

ϵ_0 は空氣の誘電率で1とおいても実用上さしつかえない。

(1)式に於て β_1, d, k, x_0 等はすべて実測しうるから



第1図 導波管法原理図

Fig. 1. Diagram of Wave-Guide or Hollow-Pipe Method

これから r_2 を求め、(5)式により ϵ_2 を求めることが出来る。

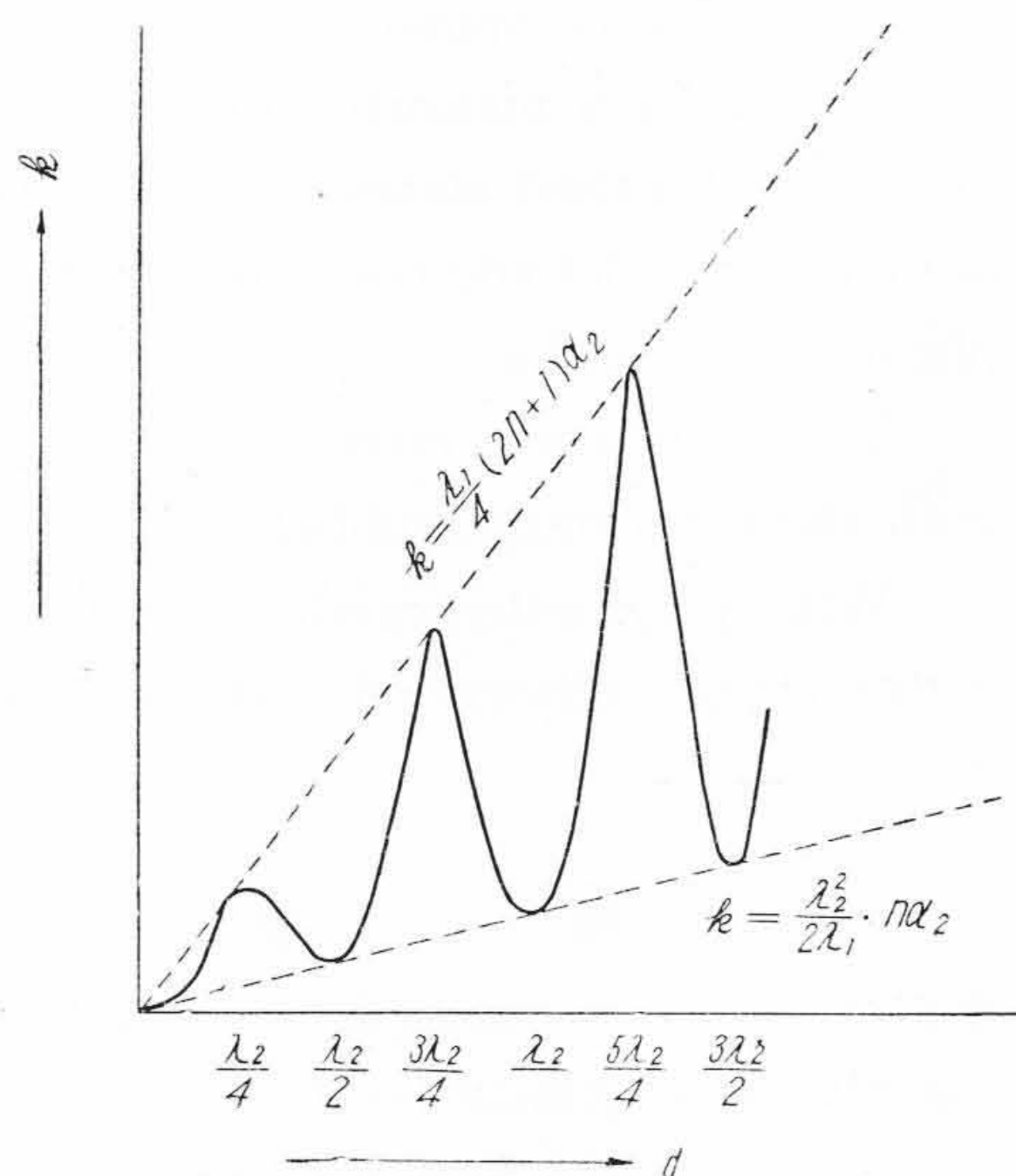
話をもつと具体化するため(1)式を実数、虚数部分に分けて見ると

$$\frac{\alpha_2 d \tanh \alpha_2 d (1 + \tan^2 \beta_2 d) + \beta_2 d \tan \beta_2 d (1 - \tanh^2 \alpha_2 d)}{(1 + \tanh^2 \alpha_2 d \tan^2 \beta_2 d)(\alpha_2^2 d^2 + \beta_2^2 d^2)} = - \frac{(1 - k^2) \tan \beta_1 x_0}{\beta_1 d (1 + k^2 \tan^2 \beta_1 x_0)} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\alpha_2 d \tan \beta_2 d (1 - \tanh^2 \alpha_2 d) - \beta_2 d \tanh \alpha_2 d (1 + \tan^2 \beta_2 d)}{(1 + \tanh^2 \alpha_2 d \tan^2 \beta_2 d)(\alpha_2^2 d^2 + \beta_2^2 d^2)} = - \frac{k(1 + \tan^2 \beta_1 x_0)}{1 + k^2 \tan^2 \beta_1 x_0} \dots\dots\dots (7)$$

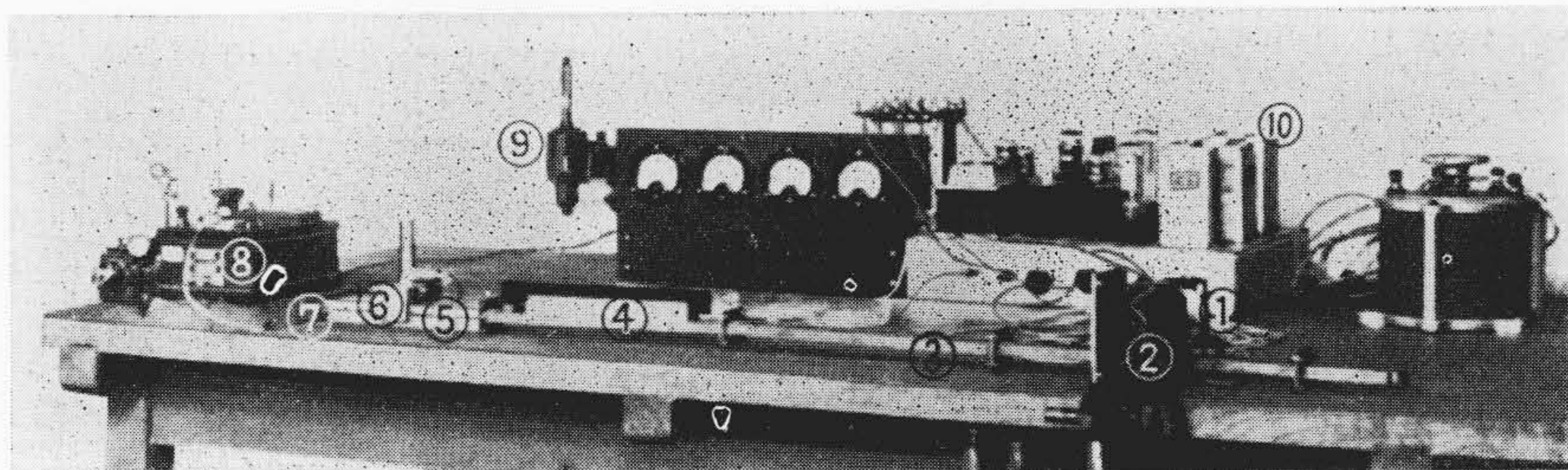
$\beta_2^2 d^2 \gg \alpha_2^2 d^2$ (絶縁材料で損失角の比較的小さい場合) とすれば

$$\frac{(\alpha_2 d)^2 \sec^2 \beta_2 d + \beta_2 d \tan \beta_2 d}{\{1 + (\alpha_2 d)^2 \tan^2 \beta_2 d\}(\beta_2 d)^2} = - \frac{1}{\beta_1 d} \cdot \frac{(1 - k^2) \tan \beta_1 x_0}{1 + k^2 \tan^2 \beta_1 x_0} \dots\dots\dots (8)$$



第2図 $k-d$ 理論図

Fig. 2. Theoretical Diagram of $k-d$.



第3図 測定装置全景

- ①発振管 2k 25 ②冷却用ファン ③導波管 ④減衰器 ⑤定常波検知用導波管
 ⑥定常波検知器 ⑦反射板 ⑧万能分流器 ⑨D-3D型反照検流計 ⑩スタビライザー

Fig. 3. General View of Measuring Equipment

- ①Oscillator Tube 2k 25 ②Cooling Fan ③Wave Guide ④Attenuator
 ⑤Standing Wave Guide ⑥Standing Wave Detector ⑦Reflector ⑧Shunt Box
 ⑨D3-D Type Galvanometer ⑩Source Stabilizer

$$\frac{\alpha_2 d \tan \beta_2 d - \beta_2 d \cdot \alpha_2 d \sec^2 \beta_2 d}{\{1 + (\alpha_2 d)^2 \tan^2 \beta_2 d\} (\beta_2 d)^2}$$

$$= -\frac{1}{\beta_1 d} \cdot \frac{k \sec^2 \beta_1 x_0}{1 + k^2 \tan^2 \beta_1 x_0} \dots\dots\dots (9)$$

(6), (7) 式又は (8), (9) 式の関係式で定常波の電圧比 k を試料の厚さ d の函数と考えれば $d=0$ で $k=0$, $d=\frac{\lambda_2}{4} \times$ 奇数で k は最大値をとり $d=\frac{\lambda_2}{2} \times$ 整数で極小値をとることが判る。即ち $d=\frac{\lambda_2}{4} (2n+1)$, $n=1, 2, 3, \dots$ 即ち $\beta_2 d = \frac{\pi}{2} (2n+1)$ に於ては

$$k = \frac{\lambda_2}{4} (2n+1) \alpha_2 \text{ (極大)} \dots\dots\dots (10)$$

又 $d = \frac{\lambda_2}{2} \cdot n$, $n=1, 2, 3, \dots$ 即ち $\beta_2 d = n\pi$ に於ては

$$k = \frac{\lambda_2^2}{2\lambda_1} \cdot n \alpha_2 \text{ (極小)} \dots\dots\dots (11)$$

となる。これを図で示せば第2図のようになる。今試料の厚さ d を変えて定常波の電圧比 k を実測すればその極大の位置、及び大きさから λ_2 , 従つて β_2 及び α_2 を求めることが出来る。

r_2 従つて β_2, α_2 を知れば試料の誘電率、損失角は (5) 式を分解した次の式によつて求められる。

$\epsilon_0=1$ として

$$\epsilon'_2 = \frac{1 + (\lambda_c/2\pi)^2 (\beta_2^2 - \alpha_2^2)}{1 + (\lambda_c/\lambda_1)^2} \dots\dots\dots (12)$$

$$\epsilon''_2 = \frac{2(\lambda_c/2\pi)^2 \alpha_2 \beta_2}{1 + (\lambda_c/\lambda_1)^2} \dots\dots\dots (13)$$

(12)式で $\beta_2^2 \gg \alpha_2^2$ とすれば

$$\epsilon'_2 \doteq \frac{1 + (\lambda_c/\lambda_2)^2}{1 + (\lambda_c/\lambda_1)^2} \dots\dots\dots (14)$$

又

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''_2}{\epsilon'_2} = \frac{4/\pi (\lambda_c/\lambda_2)^2 \lambda_2/\lambda_1 \cdot k_m/2n+1}{1 + (\lambda_c/\lambda_2)^2} \dots\dots (15)$$

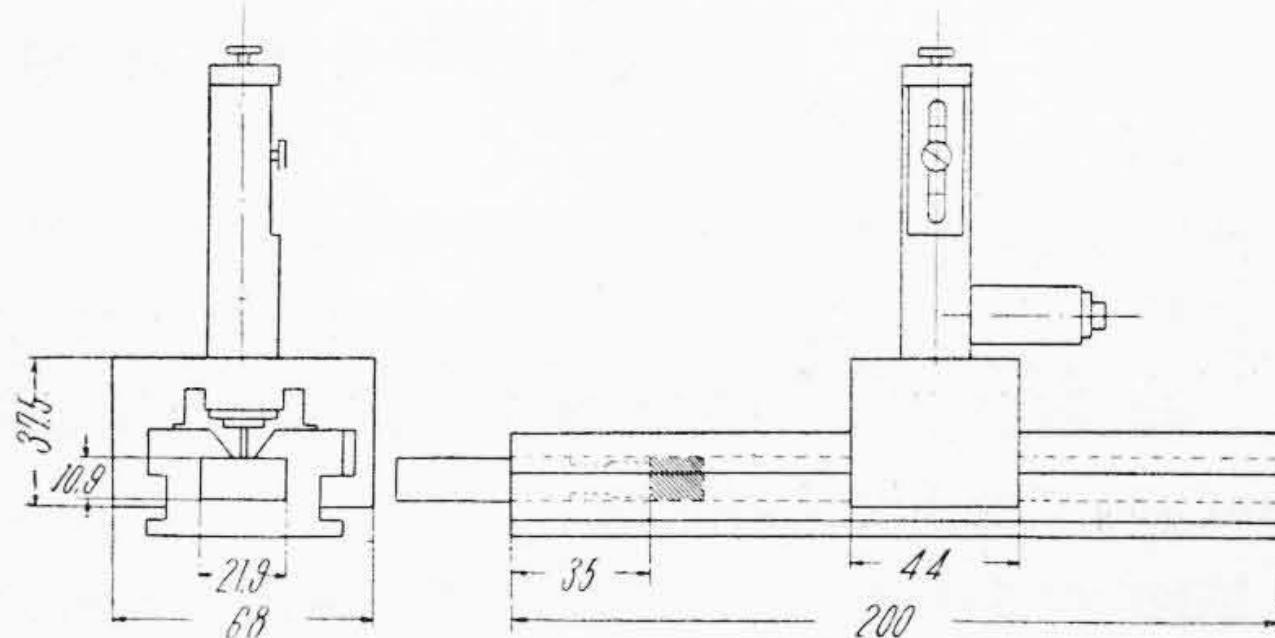
k_m は $2n+1$ 番目の k の極大値を示す。

〔III〕 測定装置及び測定方法

以上測定理論を述べたが、これを実現するための測定装置及び測定の手続きに就いて述べる。

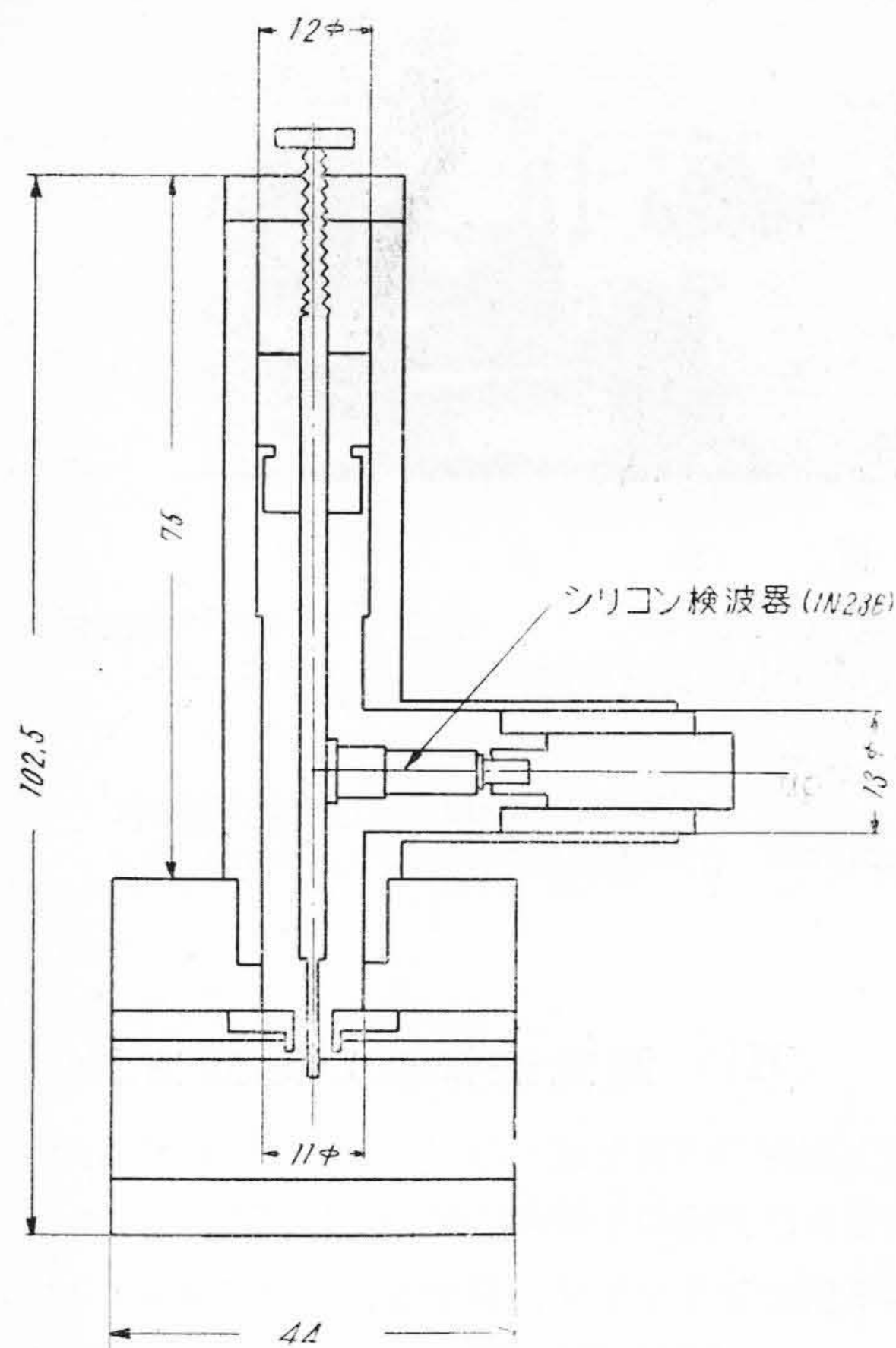
第3図に全系を示す。発振管はクライストロン 2k 25 で、ヒーター電圧 6V, 電流 0.45 A, ビーム電圧 300 V, 電流 22 mA, リペラ電圧 -160 V, 出力 25 mW で、発振自由波長は約 3 cm, 周波数は 10,000 Mc である。管の過熱を防ぐため小型の送風機でこれを冷却した。定常波検知装置は精密に工作された導波管と試料に接する反射板及び定常波の電圧検知器からなる。これらの部分を拡大して第4図及び第5図(次頁参照)に示す。導波管は削り出した二つの部分を横に接続してある。検波器にはシリコン整流器 1N23B を用い、その整流電流は横河 D 3-D 型の反照検流計 (感度 $\frac{1.3 \times 10^{-8} \text{ A}}{3.5 \times 10^{-7} \text{ V}}$) と万能分流器によつてよんだ。この検流計を用いて無試料の場合の定常波の極小電圧がやつと検出出来る程度であつた。

整流器は2乗特性をもつものとして、この検流計のよみの平方根を定常波電圧のメジャーとした。第6図(次頁参照)に定常波電圧測定の一例を示す。

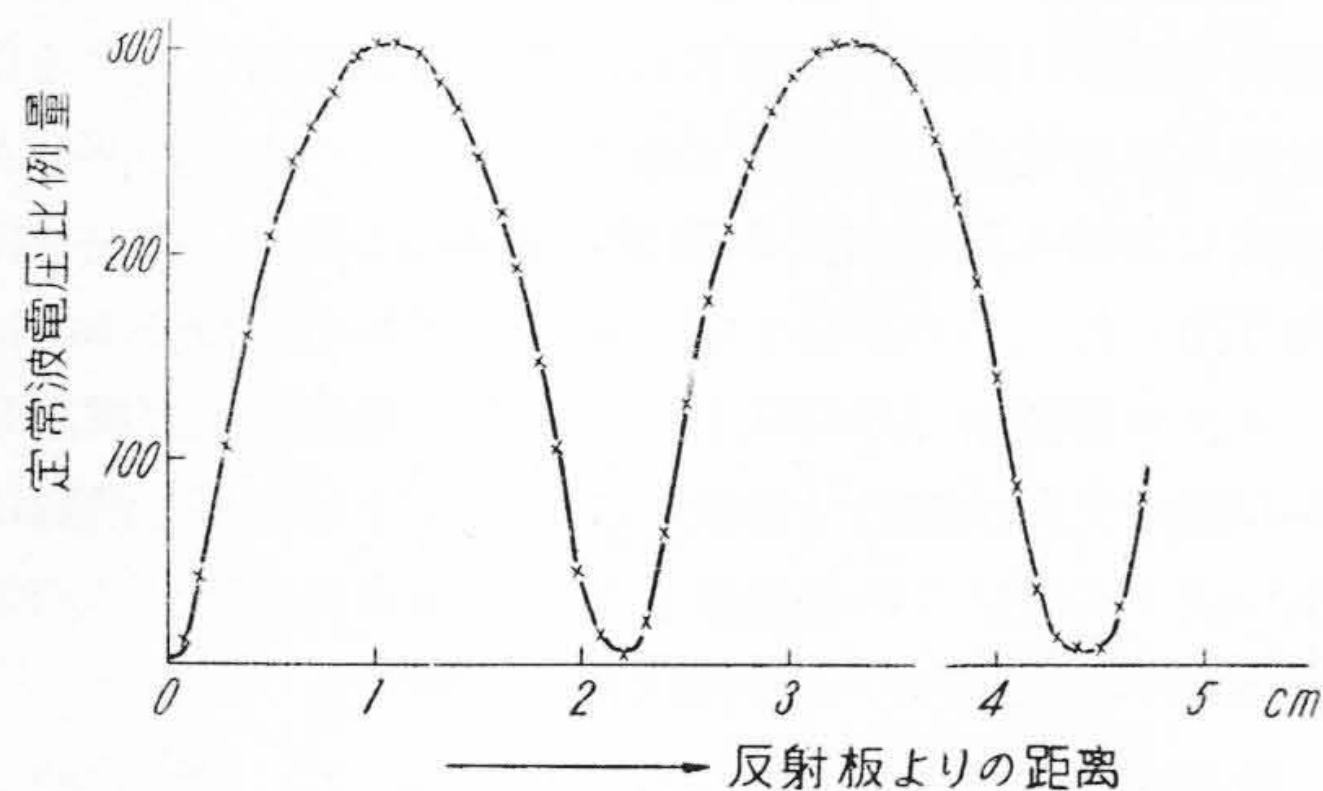


第4図 定常波検知装置

Fig. 4. Standing Wave Detector



第5図 定常波検知器断面図
Fig. 5. Section Diagram of Wave Detector



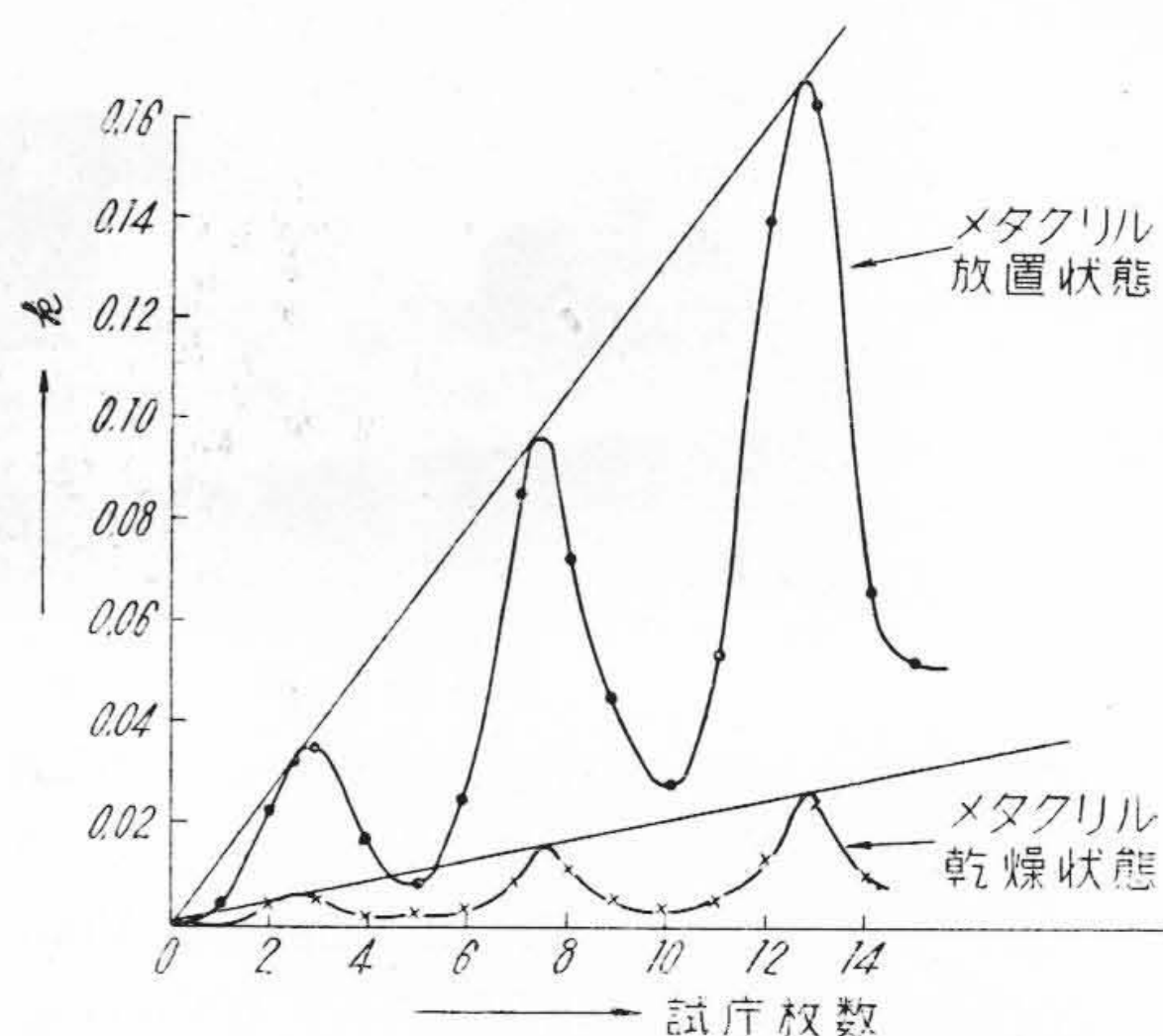
第6図 定常波測定例
Fig. 6. Diagram of Standing Wave

尚導波管の寸法より $\lambda_c = 4.38$ cm, 管内波長 $\lambda_1 = 4.20$ cm である。従つて(4)式から自由波長 $\lambda_0 = 3.03$ cm となる。

測定資料の縦、横、寸法は導波管内径に合わせて作り、特に厚さの均一度に注意した。厚さは約 2 mm であるが、定常波電圧比 k の極大を求めるため 1 mm 及び 0.5 mm のものを1枚づゝ用いた。

試料の厚さ d を変える場合、試片は反射板に密接するように次々と重ねて置いただけで特に接着することとはしなかつた。

試料の厚さ d を変えて定常波電圧比 k を実測した一例



第7図 $k-d$ 測定例
Fig. 7. Observed $k-d$ Relations

を第7図に示す。理論式で示すような k の極大値は $\frac{\lambda_2}{4}$ の奇数倍のところに起り且つ極大値は一つの直線上に乗っている。

この k の極大値の起る厚さ d 及び k の値から、(10)式により λ_2 を求め、更に(14)、(15)式から試料の ϵ'_2 , $\text{tg } \delta$ を求めるわけである。

〔IV〕 測定試料及び測定結果

測定試料としては手近にあつたポリスチレン、メタクリルレジ、フェノールレジ(紙入積層板)、メラミンレジ(パルプ入成型品)、アニリンレジ及びエポナイトをえらび、ポリスチレン以外は放置状態の外、乾燥状態 (60°C , 2 週間乾燥) 及び吸湿状態 (40°C , 90% 2 週間吸湿) に就いても測定を行つた。

第1表に測定結果を示す。

比較のため MIT (Massachusetts Institute of Technology) で測定した同種試料の測定値⁽⁵⁾を第2表に掲げて見る。

第1表 測定結果

Table 1. Results for Measurement of ϵ and $\text{tg } \delta$.

試料	放置状態		乾燥状態		吸湿状態	
	ϵ	$\text{tg } \delta \times 10^4$	ϵ	$\text{tg } \delta \times 10^4$	ϵ	$\text{tg } \delta \times 10^4$
ポリスチレン	2.57	6.2	—	—	—	—
メタクリルレジ	2.62	166	2.53	26	2.70	260
アニリンレジ	3.55	73	3.48	42	3.36	105
フェノールレジ	4.05	526	3.70	374	4.50	870
メラミンレジ	5.50	364	4.30	324	—	—
エポナイト	2.74	59	2.70	28	2.76	49

第 2 表 本測定値と MIT 測定値の比較
* 22,000 Mc の測定値

Table 2. Comparison of this Measurement to Data of MIT

試 料	MIT 測定値 (25°C, 10,000 Mc)		本 測 定 値	
	ϵ	$\text{tg}\delta \times 10^4$	ϵ	$\text{tg}\delta \times 10^4$
ポリスチレン	2.54	4.3	2.57	6.2
メタクリルレジン	2.57	49	2.53~2.70	26~260
アニリンレジン*	3.42	56	3.48~3.63	42~105
フェノールレジン	3.68	410	3.70~4.50	374~870
メラミンレジン	4.60	1,100	4.30~5.50	324~364

第 3 表 メタクリルレジンの吸湿率と ϵ , $\text{tg}\delta$

Table 3. ϵ , $\text{tg}\delta$ and Moisture Absorption for Methacrylic Resin

吸 湿 率 (%)	ϵ	$\text{tg}\delta \times 10^4$
0	2.53	26
0.63	2.60	114
1.08	2.62	166
1.52	2.70	260

MIT の測定値は試料の状態が明らかでないので、本測定値と直接比較出来ないが、大きな矛盾は見られない。

たゞメタクリルレジンの例でも判るように吸湿条件が測定値に著しく影響することは注意せねばならない。

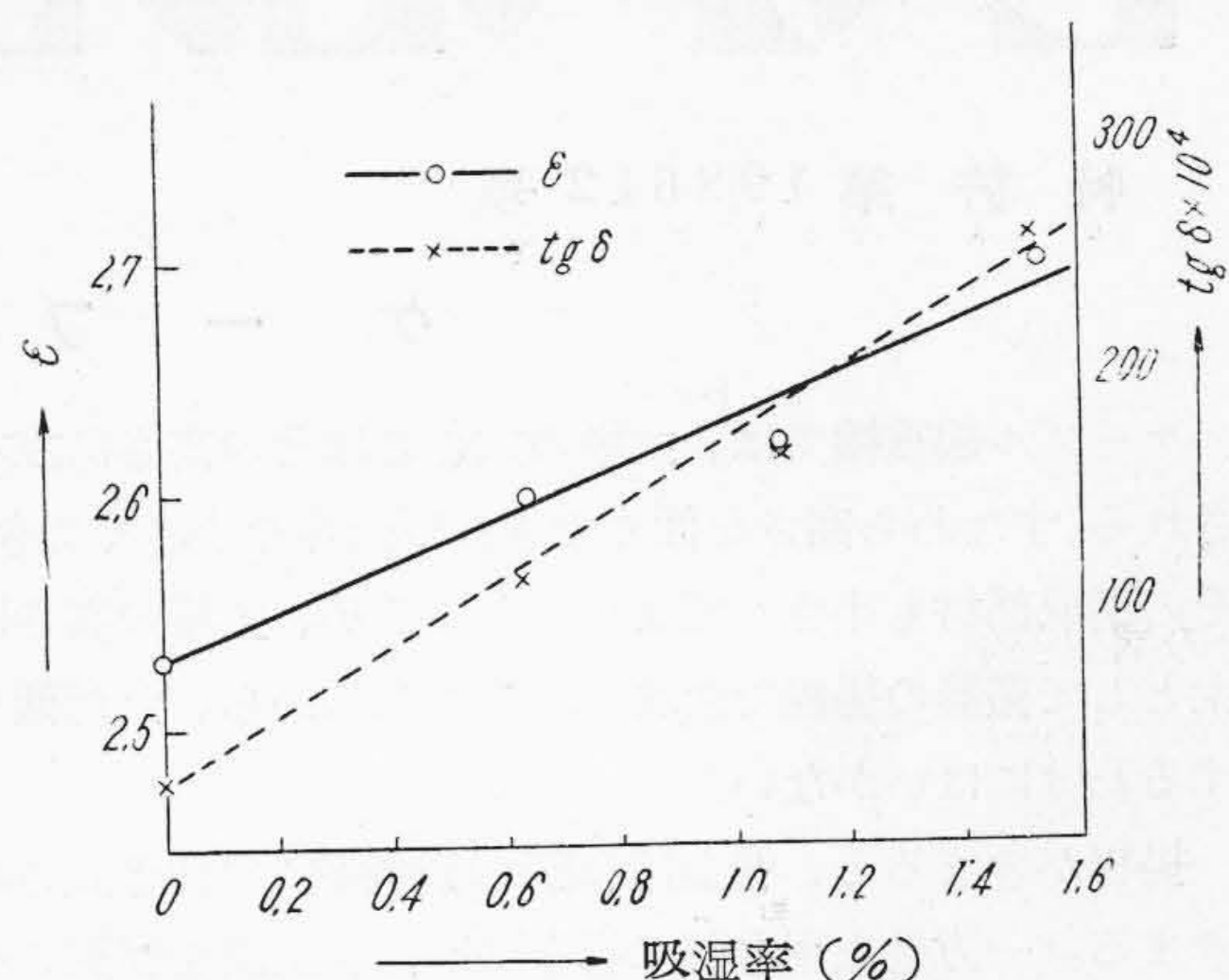
メタクリルレジンに就いて吸湿率と ϵ , $\text{tg}\delta$ の関係を求めたところ第 3 表及び第 8 図の如く略々直線的な関係が得られた。

尙収着水に関する検討は別報⁽⁶⁾にゆづり、こゝでは触れない。

〔V〕 結 言

以上導波管内の定常波検知方式による絶縁材料の誘電率、損失角の測定方法並びに測定結果について述べた。

測定精度も一応満足すべきものである。今後種々の材料及び条件に就いて測定を行う予定である。尙絶縁材料の誘電的性質の周波数スペクトルを完成する意味で今後 4,000 Mc 及び 25,000 Mc 等に就いても測定出来るようにしたいと考えている。



第 8 図 メタクリルレジンの吸湿率と ϵ , $\text{tg}\delta$ との関係

Fig. 8. Relation of ϵ , $\text{tg}\delta$ and Moisture Absorption to Methacrylic Resin

参 考 文 献

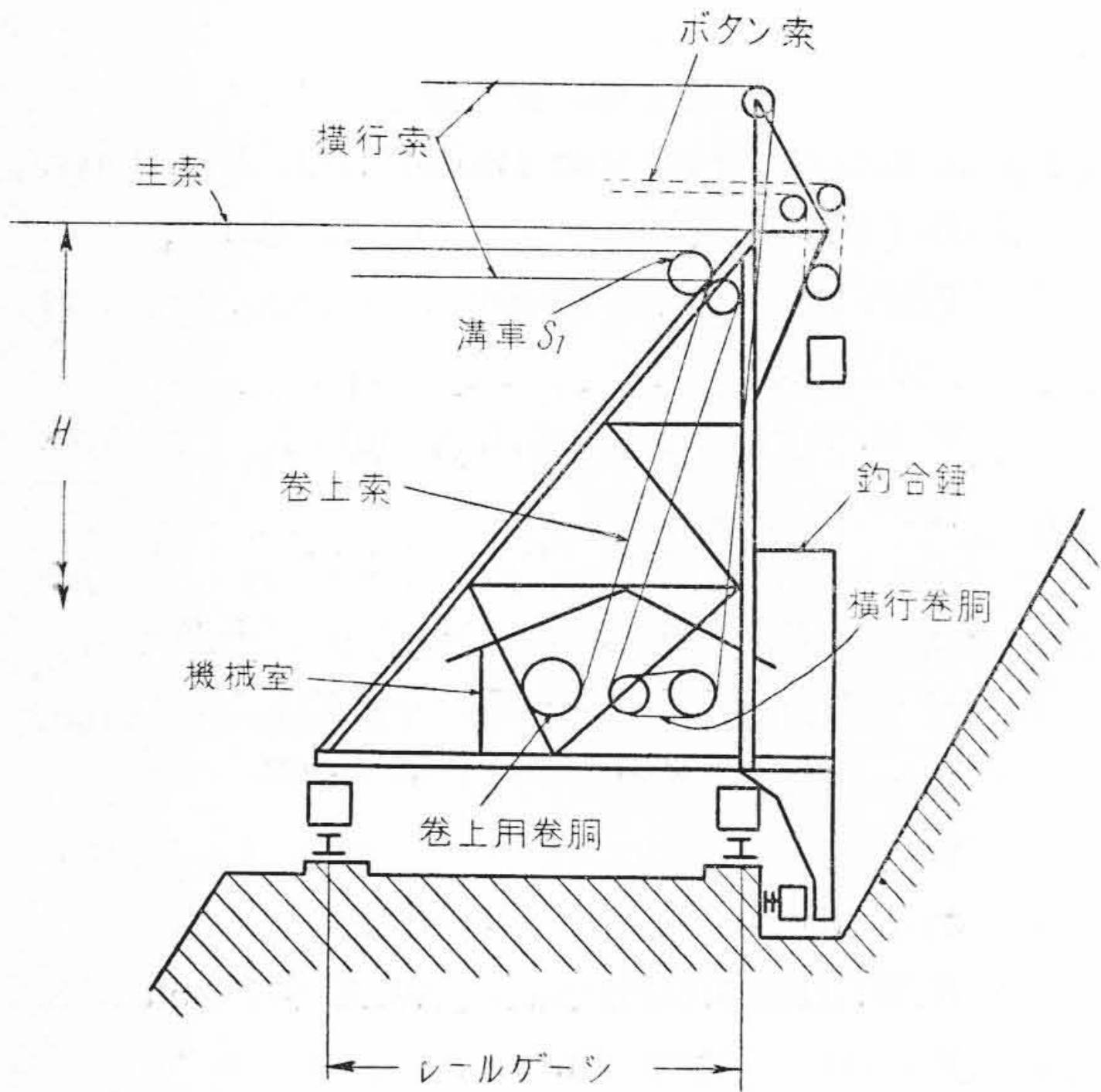
- (1) S. Roberts & A. Von Hippel*: J. App. Phys. **17** ('46) 610
T.M. Shaw & J-J Windle: J. App. Phys. **21** ('50) 956
W.H. Surber, Jr. & G.E. Grouth Jr.: J. App. Phys **19** ('48) 1130
P.P. Penrose: Tran. Farad. Soc. **42** ('46) 108
- (2) J.A. Santon: Proc. Roy. Soc. **213** ('52) 473
D. H. Whiffen & H. W. Thompson: Tran. Farad. Soc. **42** ('46) 114
W. Jackson & J.G. Powles: Tran. Farad. Soc. **42** ('46) 101
H.W. Hall I.G. Halliday, W.A. Johnson & S. Walker: Trans. Farad. Soc. **42** ('46) 136
C. H. Collie, D. M. Ritson & J. B. Hasted: Trans. Farad. Soc. **42** ('46) 129
- (3) 河合: 高分子 **1** No. 8, P. 28, No. 9, P. 17 参照
- (4) (1)の * 参照。
- (5) 高橋茂: 高分子 **1** No. 2, P. 30 参照
- (6) 河合、佐藤、原田: 電気学会誌に発表予定

安河内春雄

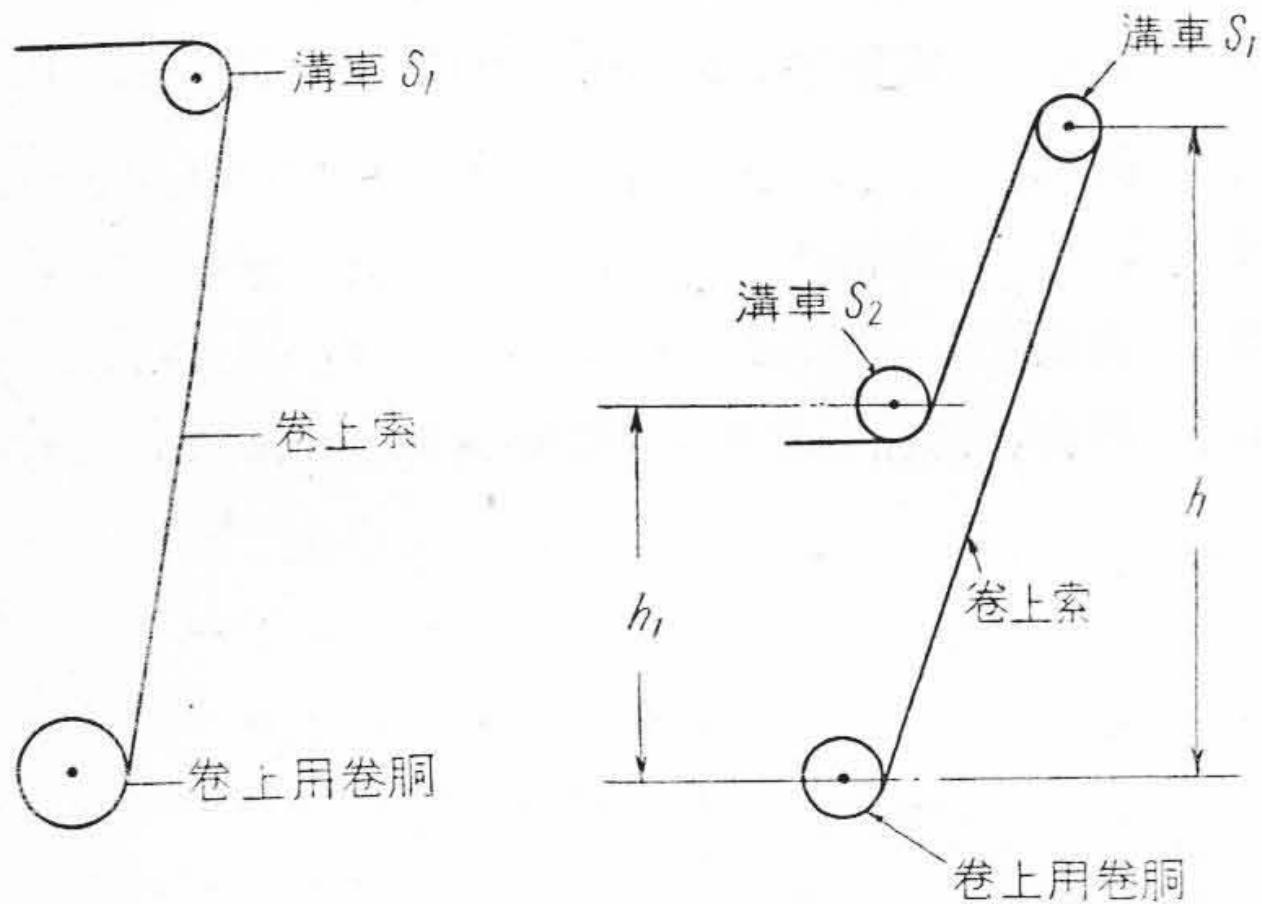
ケーブル起重機

ケーブル起重機では、主塔の大きさはその高さに左右される。すなわち高さを低くできれば全体を小さくでき、その構成部材も小さくてよい。ところが、主塔の高さは主として搬器の揚程できまるものであるから、ただ低くするわけにはいかない。

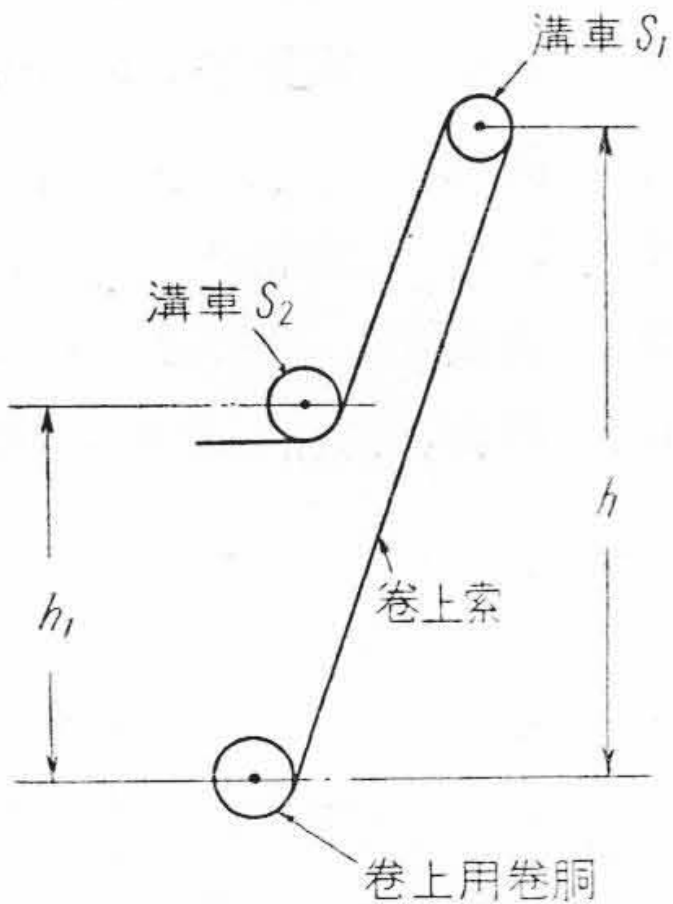
揚程がきまると、巻上用巻胴(1重巻胴)の巻き長さがきまる。一方巻上用巻胴に巻きつけた巻上索を経過させる溝車 S_1 が、巻上用巻胴の巻き長さを見込む角すなわち溝車 S_1 のフリートアングルは、設計上一定限度以下にしなければならない。従つて巻上用巻胴と溝車 S_1 と



第1図 従来のケーブル起重機



第3図 従来の巻上 索配置

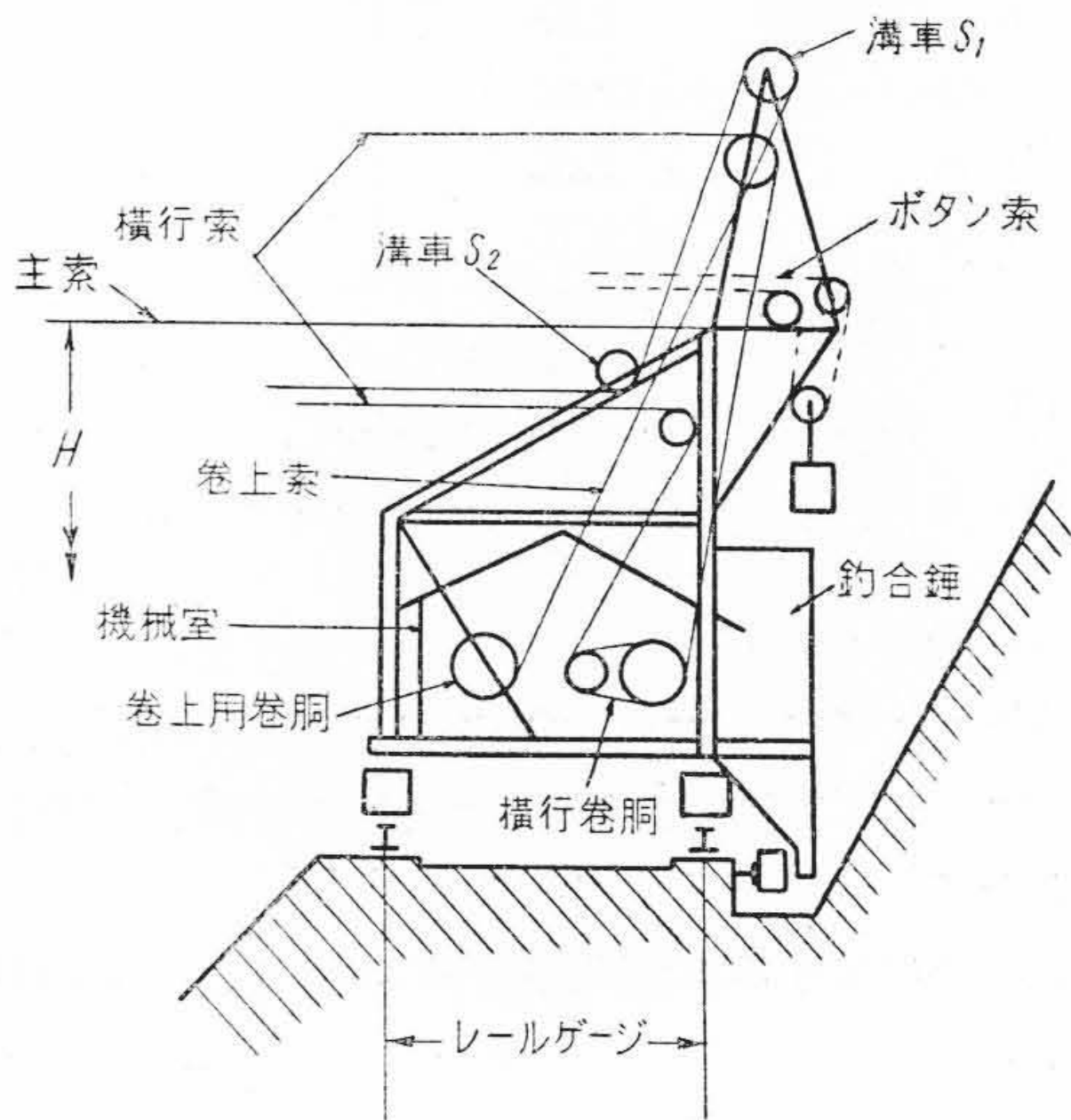


第4図 この発明による
巻上索配置

の距離 h が定まる。そのため従来のケーブル起重機では、要求される主索の高さ H に対する主塔の大きさは必要以上に大きくなる欠点があった。

この発明は、巻上索を従来のように溝車 S_1 を経て直ちにトロリに導くことなく、適当なフリートアングルを保持すべき位置に設けた溝車 S_1 を経過させてから、更に溝車 S_1 より下方の適宜位置に設けた溝車 S_2 を経過させてのちトロリに導くようにしたものである。

こうすれば、前述の距離 h に対応する溝車 S_2 の高さ h_1 は十分に小さく選ぶことができるから、主索の高さに対応する主塔の高さを低くすることができる。なお、索の張力は主索が非常に大きいのに対し巻上索は小さいか



第2図 この発明によるケーブル起重機

ら、主塔を構成する部材の大きさは主索に対する主塔の高さできまるのである。従つて、この発明によれば、巻上索を経過させる溝車 S_1 は、主塔上に小さい部材で構成した補塔に設ければよい。図中 2 本の実線であらわした部材は大きい部材、1 本の実線であらわした部材は小さい部材を示す。

上に述べたように、この発明によれば、要求される主索の高さ H に対し、主塔を従来のものにくらべて著しく低小にすることができる故、主塔の重量が軽くなり、レールゲージをせばめ、鉄塔鈎合錘を小さくし得る。そのうえ、塔の走行路の費用を切下げられ、又切取土工断面が小さくてすむから土工建設費をも軽減できる等の大きな効果がある。

(富 田)