

# トンネル内 V.H.F. 帯通信方式に関する基礎実験

佐藤利三郎\* 佐藤源貞\*\* 永井 淳\*\*\*

## Basic Experiment about V.H.F. Communication System in Tunnel

By Risaburō Satō, Gentei Satō and Jun Nagai  
Engineering Department, Tōhoku University

### Abstract

Because of a large propagation loss of V.H.F. electromagnetic field, the application of the V.H.F. wireless communication system in tunnel has been regarded very difficult, if not impossible. The writers, tackling several problems lying under this difficulty, conducted a series of fundamental experiments with the V.H.F. transmission using parallel two-wire transmission lines, and confirmed that, given a proper arrangement on a proper scheme, the V.H.F. communication inside the tunnel was quite practical. After that, the actual test carried out under the writers' direction between the mobile station (on the electric car) and the fixed station (at Moto-machi, Hanshin Electric Railroad Co., Ltd.) yielded a good success, endorsing the validity of the writers' theoretical conclusion. It was determined also in this test that the above communication is feasible for the distance of 6 km or so, when the equipment is of 10 W capacity.

### 〔I〕 緒 言

近年 V.H.F. 帯の通信が各方面で実用化され、特に固定局と移動局との間の迅速な通信に利用されている。しかし本邦は山岳が多く交通機関の連絡はしばしばトンネルの中において通信不能となる。一般にトンネル内の電磁波の伝播は非常に大きい減衰を受けるのでトンネル内の通信はもつぱら有線によつてゐる。しかし交通の発達によつて輸送量はますます増加し、固定局と列車内の移動局との通信が要望されるにつれて有線によらない方式についての研究が必要となつてきた。

今回大阪、神戸間の阪神電鉄株式会社において予備調査をする機会を得、東北大永井研究室と日立製作所戸塚工場との協同のもとに、その基礎的実験ならびに実地調査試験とを行いトンネル内通信の可能なることを確認した。

本報告においては、その基礎的実験ならびに設計にあつての理論的考察の概要を御報告し、各位の御批判をお願いする次第である。なお阪神電鉄における実地試験の詳細については別途日立製作所戸塚工場の方より報告せられることになつてゐる。

\* \*\* \*\*\* 東北大工学部

### 〔II〕 トンネル内 V.H.F. 帯通信方式

トンネル内およびトンネル外にまたがる通信方式には種々の方法が考えられる。

周波数帯からみて

- (1) 音声周波数帯による方式
- (2) 誘導無線による方式
- (3) V.H.F. 帯による方式

(1) は全線にわたつて線を架設し、電話機を取り付ける方式で、現在広く実用されているが移動する局との通信は不可能である。(2) の方法は数百キロサイクル帯を用い、全線に簡単な線を架設して、その誘導電磁界を利用して通信する方式である。(3) の方法はトンネル外は輻射電磁界によつて通信し、トンネル内では線を架設して、それよりの誘導電磁界、輻射電磁界を利用して通信する方式である。

(2), (3) の方式が実用性があるが両者それぞれ優劣を有し、今後さらに技術的検討、経済的考慮、周波数割当などの諸条件を考慮の上決定されるべきものと思われる。

本報告においては (3) の V.H.F. 帯の通信方式について、理論と実験結果を御報告する次第である。

第 1 図に示すような列車と固定局との通信において、*A*, *B* はそれぞれ固定局(指令局), 固定局兼中継局とする。トンネル内の列車と通信する際にはまず *B* で受け、さらに有線でトンネル内の *C* 局に中継し、*C* よりトンネル内に送り込まれ、列車の空中線を経て通信される。

同時送受話通信方式においては *C*, *B* 局間は第 2 図のごとく分波器, ハイブリッドを用いて行う必要がある。分波器およびハイブリッドコイルは分布定数回路<sup>(1)(2)</sup>で容易に設計可能である。なお第 2 図のように 1 回線を用いず、*B* 局, *C* 局間を 2 回線にあるいは、音声にして 1 回線を用いる方法も考えられる。

さらにトンネル内の伝送に対しては

- (1) トンネル内に空中線を装置し、電磁波を伝播させる方法
- (2) トンネル内に単線路を架設し、大地と単線路間に給電する方法
- (3) トンネル内に 2 本以上の線路を架設して金属帰路とする伝送による方法

などが考えられる。

*C* 局と移動局とにおいて、*C* 局または移動局より送られる送信電力を  $W$  db (1W を 0 db とする) とし、トンネル内の上述の伝送方式による減衰量を単位長  $\alpha_1$  db, 列車の空中線と伝送路との結合減衰量を  $\alpha_2$  db とすれば受信機に入る電力  $Q$  は

$$Q = W - \alpha_1 l - \alpha_2 \text{ db} \dots\dots\dots (1)$$

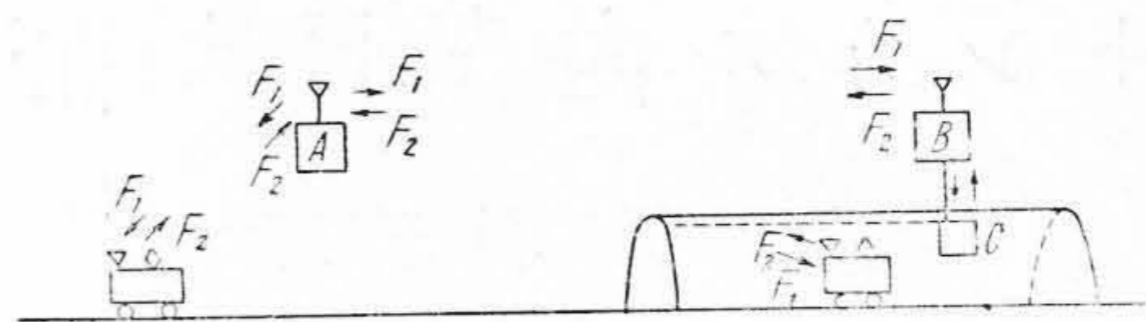
となる。

一般にトンネル内では電磁波の伝播損失は大きく、かつ列車、電車より発生する雑音は M.F., H.F 帯に多く V.H.F. 帯では少い。実験結果によると 150 Mc 帯ではトンネル内においても受信機入力 (入力インピーダンス  $75 \Omega$ )  $0.5 \mu V$  で通信可能であるから  $P = -135$  db でも通信可能となる。(1)式において  $Q = -135$  db とすれば

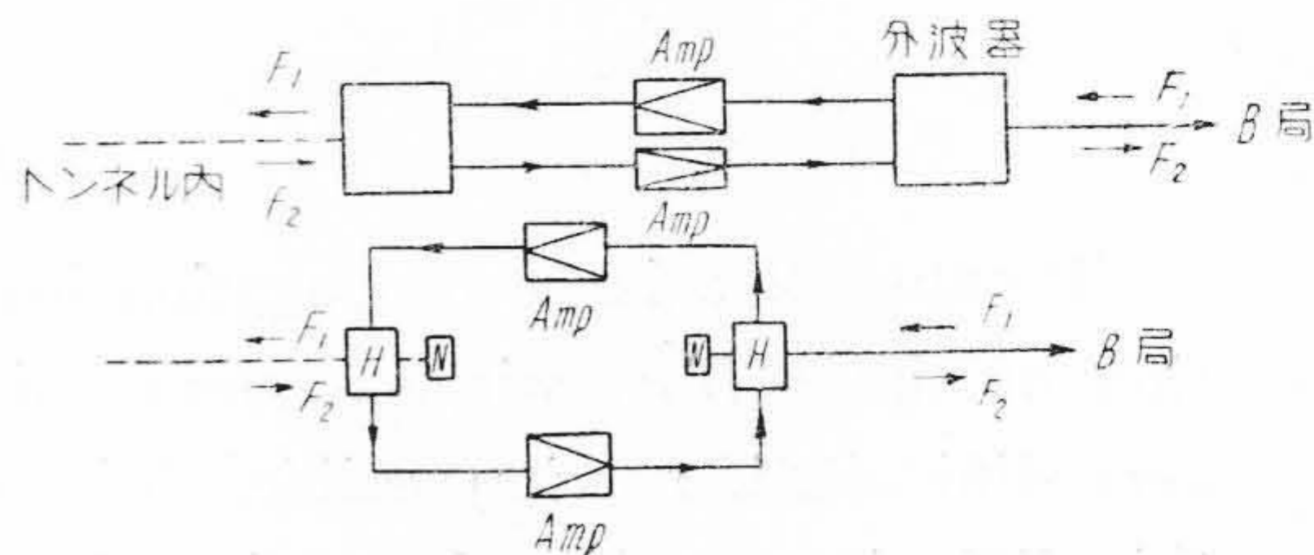
$$\alpha_1 l + \alpha_2 \leq W - P = (W + 135) \dots\dots\dots (2)$$

の関係が成立するよう  $\alpha_1, \alpha_2$  を定めねばならない。たとえば送信電力 10 W, 線路長  $l = 5$  km, 結合減衰量を 50 db と選ぶと、 $\alpha_1$  は約 20 db/km でなければならない。線路長が長いときは  $\alpha_1$  を少なくする必要がある。

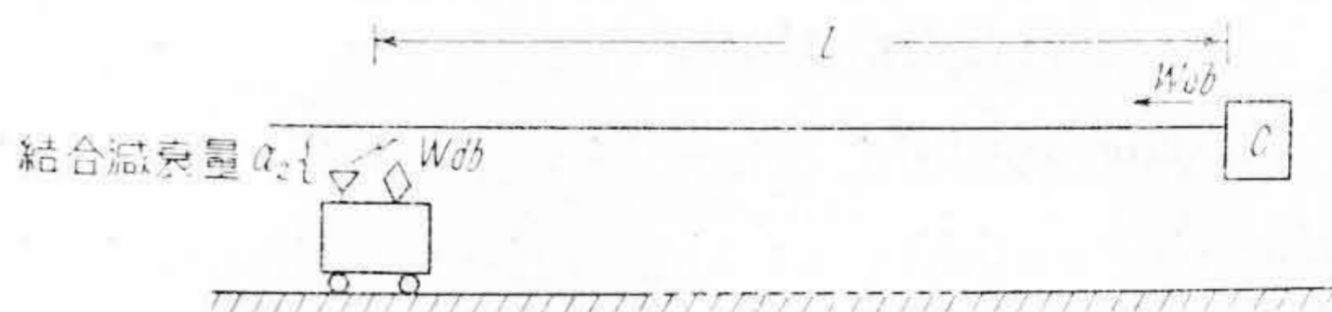
(1) のトンネル内に空中線を装置し、電磁波を伝播させる方式について簡単な実験を行つた。第 4 図に示すような高さ 260 cm, 幅 200 cm のトンネル内でダブルト空中線を用いて一定の送信を行い、受信電界が距離によつて減衰する状態を測定した。その結果を第 4 図に示す。第 4 図 (a) (b) のごとく送信空中線, 受信空中線の方向を種々かえて測定したが、減衰量は非常に大きく 1~3db/m である。ただし測定周波数は 150Mc である。ゆえに (1) 式において  $\alpha_2 \approx 0$ ,  $\alpha_1 = 1$  db/m,  $W = 10$  db



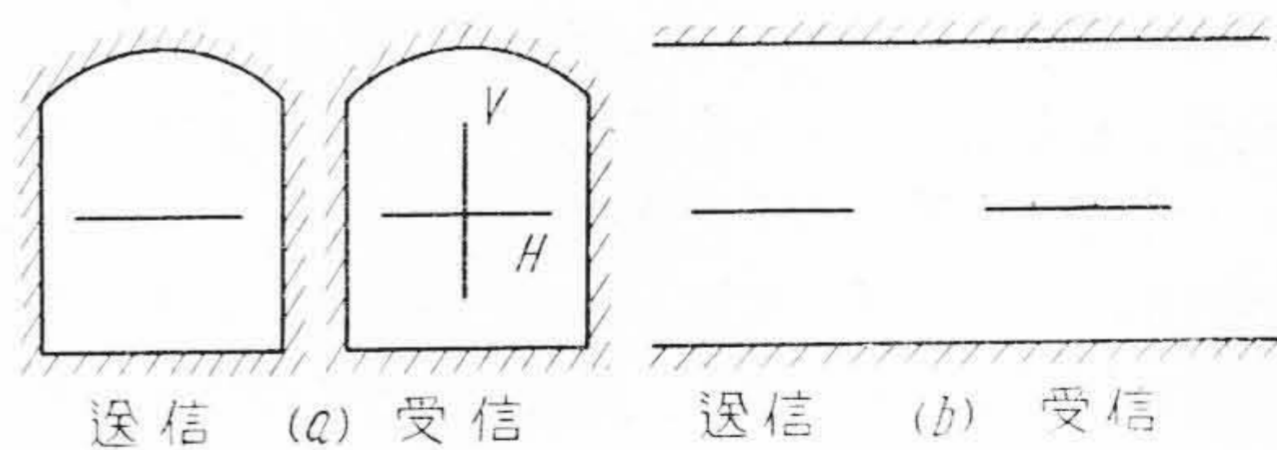
第 1 図 V.H.F. 帯トンネル内通信方式  
Fig. 1. Communication System in Tunnel Using V.H.F. Band



第 2 図 同時送受話方式  
Fig. 2. Two Way Communication System



第 3 図 平衡 2 線式伝送方式  
Fig. 3. Communication System Using Balanced Two Wire Transmission Cable



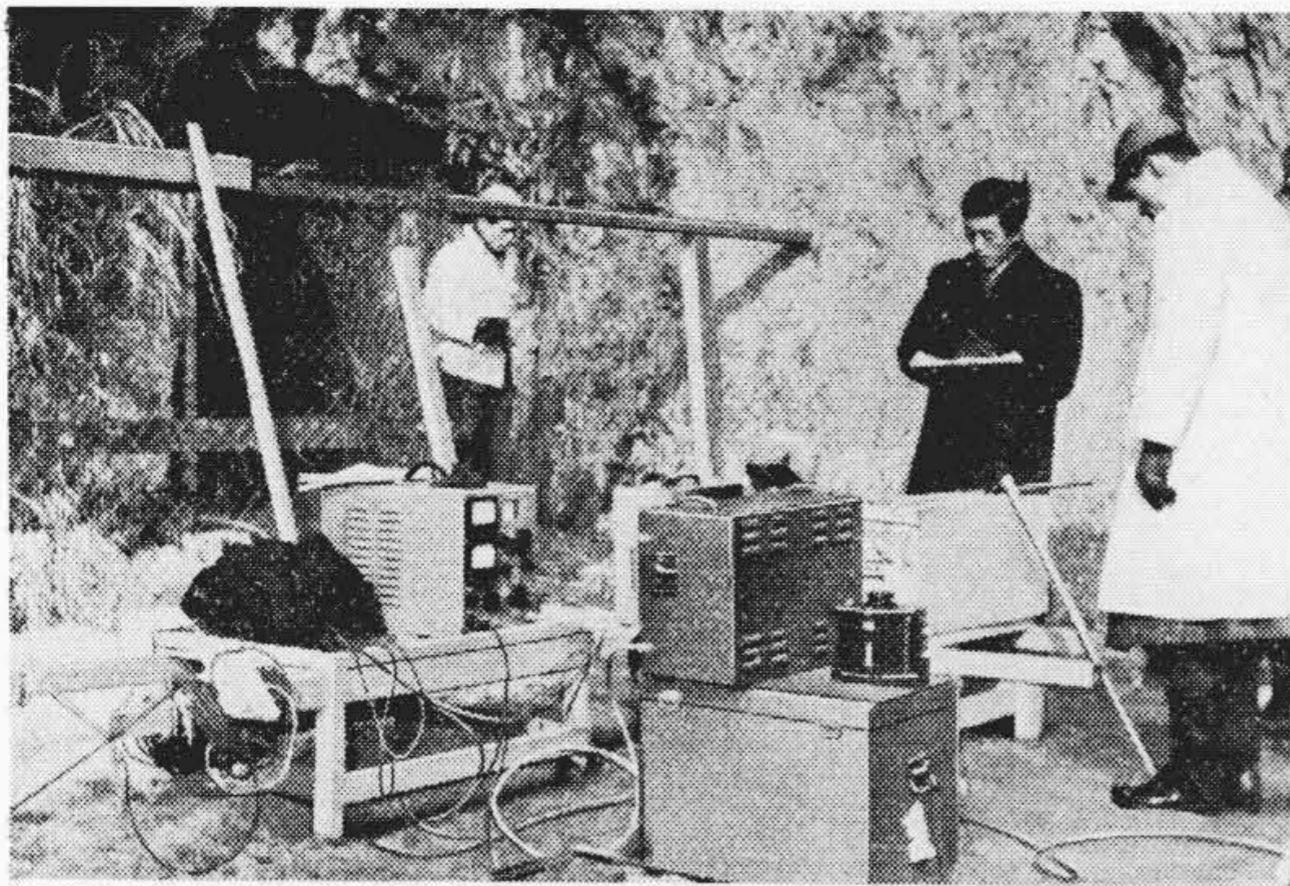
送信	受信	減衰
(a)	H	1db/m
	V	1db/m
(b)	平行	3db/m
	直交	2db/m

第 4 図 トンネル内の電磁波の伝播  
Fig. 4. Electromagnetic Wave Propagation in Tunnel

とすれば受信限界距離は 150 m 程度となる。トンネルが曲つている場合にはさらに減衰量は増すため、この方法では 100 m 程度が限度と思われる。

ゆえに 100 m 以上の長いトンネルの場合には (2) (3) の方法によらねばならない。

第 5 図に測定状況を示す。



第5図 結合損失の測定  
Fig.5. Measurement of Coupling Loss

〔III〕 単線路による伝送方式

第6図に示すようなトンネル内に単線路を架設し、大地を帰路とする伝送を行つた場合には直接電磁波を伝播させる場合に比して伝送損失は少いと思われるが、大地を帰路とするため大地の表皮作用によつて減衰を受ける。いま第6図のトンネルを簡単に円形に置換えて、単位長当りの抵抗を求めると

$$R = R_1 + R_2$$

$$R_1 = \frac{1}{2\pi a_1 \delta_1 \sigma_2} \frac{a_2^2 + C_2^2}{a_2^2 - C_2^2}$$

内部導線の抵抗 (M.K.S.)

$$R_2 = \frac{1}{2\pi a_2 \delta_2 \sigma_2} \frac{a_2^2 + C_2^2}{a_2^2 - C_2^2}$$

外被大地の抵抗 (M.K.S.)

} ..... (3)

となる。ただし  $a_2$  は等価円筒の半径、 $C_2$  は等価円筒の中心0と導線間距離、 $a_1$  は導線の半径、 $\sigma_1, \sigma_2$  は導線および大地の導電率、 $\delta_1, \delta_2$  は導線および大地の表皮の深さであり、単位は M.K.S. である。 $\delta$  は

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_1 \sigma_1}}, \quad \delta_2 = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_2 \sigma_2}}$$

で与えられ、 $\mu_1, \mu_2$  は導体および大地の導磁率である。内部導線を銅とし、大地の導電率を  $10^{-1} \sigma/m$  とすれば (3) 式は

$$R_1 = \frac{1.48}{d} \sqrt{\frac{1}{\lambda} \frac{a_2^2 + C_2^2}{a_1^2 - C_2^2}} \quad (\Omega/m)$$

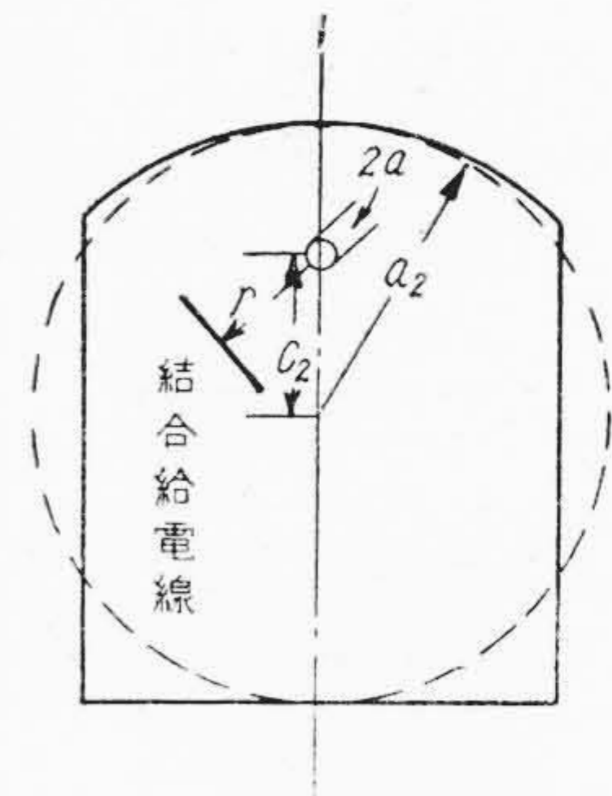
$$R_2 = \frac{17.3}{a_2} \sqrt{\frac{1}{\lambda} \frac{a_2^2 + C_2^2}{a_2^2 - C_2^2}} \quad (\Omega/m)$$

ただし  $d$  は  $2a_1$  で単位は mm とし、 $\lambda$  は波長で単位 m である。

ゆえに単位長ごとの減衰量  $\alpha_1$  は、この伝送線の特性インピーダンスを  $W$  とすれば

$$\alpha_1 = \frac{R}{2W} = \frac{1}{W} \sqrt{\frac{1}{\lambda} \frac{a_2^2 + C_2^2}{a_1^2 + C_2^2} \left( \frac{0.74}{d} + \frac{8.65}{a_2} \right)}$$

(Neper/m) ..... (4)



第6図 単線による伝送路  
Fig.6. Single Wire Transmission Cable

で与えられる。なお

$$W = 60 \sqrt{\frac{\mu_s}{\epsilon_s}} \cosh^{-1} \frac{a_1^2 + a_2^2 - C_2^2}{2a_1 a_2} \dots \dots (5)$$

である。波長 2.0 m, トンネルの構造第4図の場合で  $2a_2 = 2.6, d = 2.9 \text{ mm}, C_2 = 0.9 \text{ m}$  の場合には  $W = 368 \Omega$

$$\alpha_1 = \frac{1}{368} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1.48}{0.52} (0.255 + 6.65)$$

$$= 0.0377 \quad (\text{Neper/m})$$

ゆえに 327 db/km となる。第4図の場合のトンネルで同上の構造で実験した結果は、270~330 db/km となつて大体実験と理論とは一致する。

結合に空中線を第6図のごとく用いるとすると、結合減衰量は近似的に

$$\alpha_2 = 20 \log \left| \frac{60\lambda}{2\pi W} \frac{1}{r} \right| \text{ db}$$

である。 $\lambda$  は波長 m,  $W$  は特性インピーダンスである。 $r = 1 \sim 2 \text{ m}$  では 26~35 db 程度である。

(1) 式に  $\alpha_2 = 30 \text{ db}$  とし、 $\alpha_1 = 270 \sim 330 \text{ db/km}$ ,  $W = 10 \text{ db}$  として代入すれば受信限界距離は 500 m となる。トンネルの外被大地よりできる限り離して、結合減衰量を少くなるようにして 1 km 程度まで通達できると思われる。

〔IV〕 多線路による伝送方式

トンネルの長さが 1 km 以上になる場合には多線路によらねばならない。第7図(次頁参照)に示すような平行2本線路, 平行3本線路の単位当りの減衰量(平衡伝送に対する)は

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{1}{\lambda} \left( \frac{1.48}{d} + \frac{4.33}{h} \frac{D^2}{h^2} \right) / W}$$

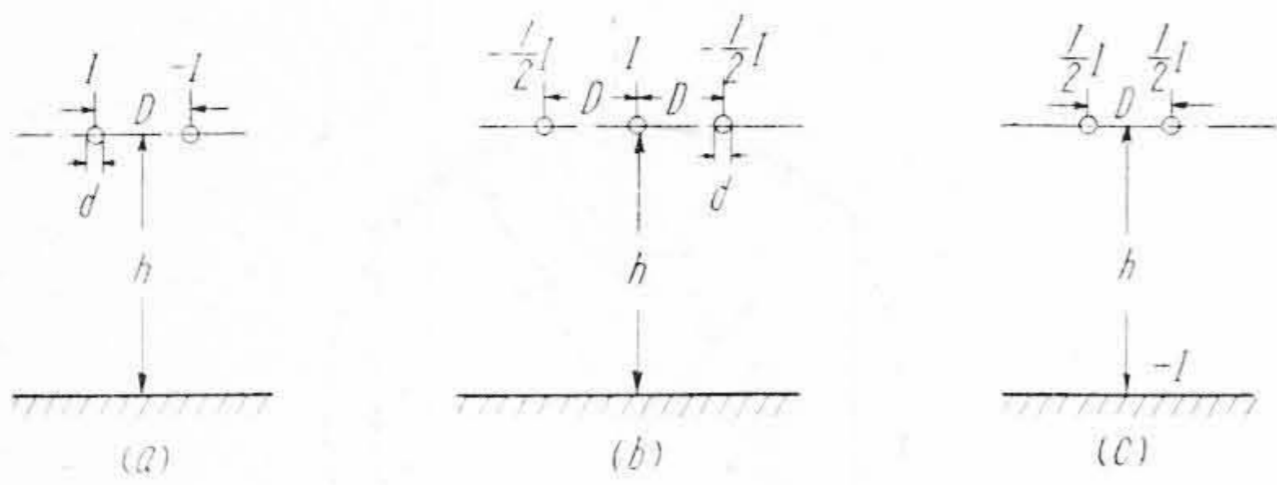
Neper/m (平行2本線路)

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{1}{\lambda} \left( \frac{3}{4} \frac{1.48}{d} + \frac{4.33}{2h} \frac{D^2}{h^2} \right) / W}$$

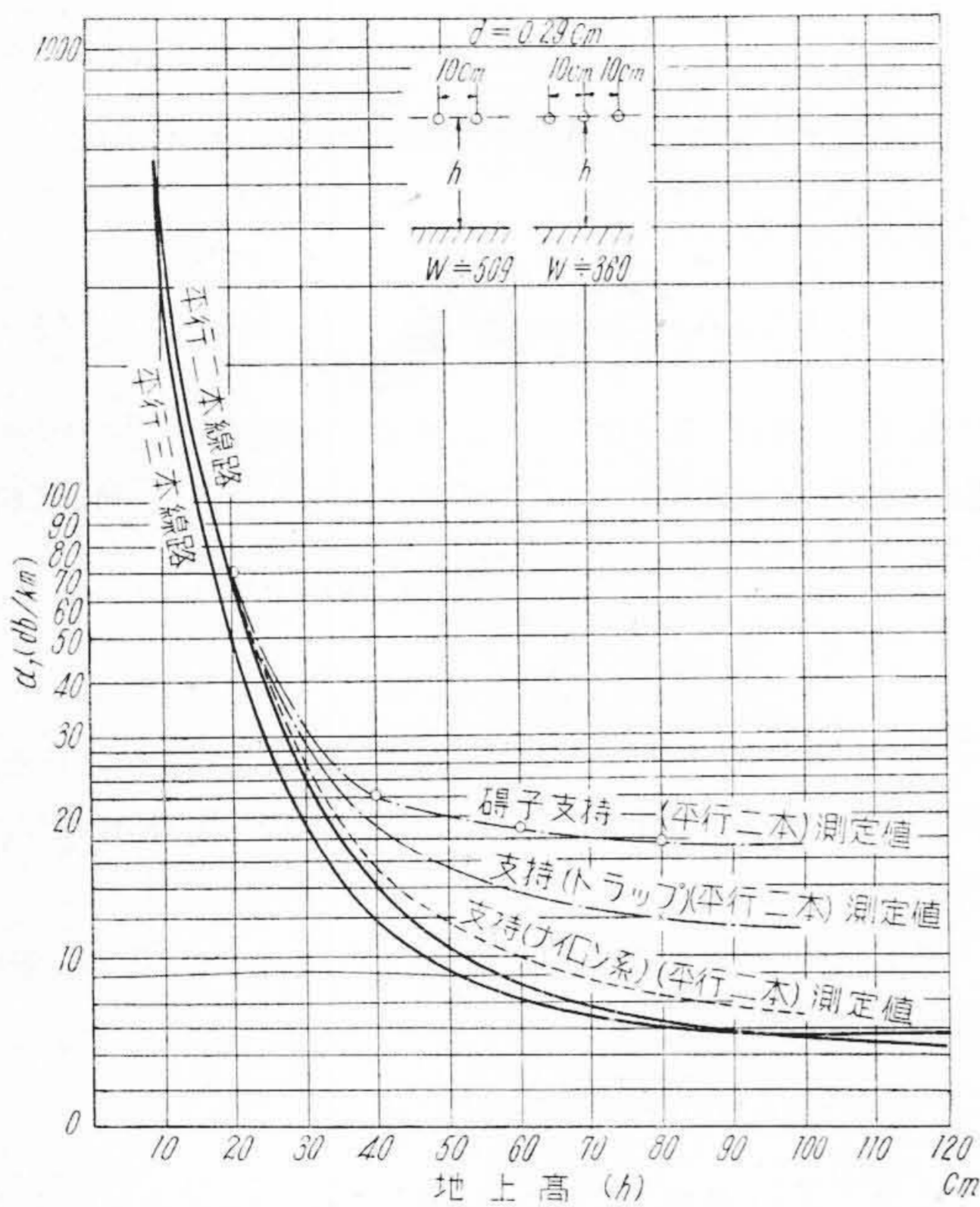
Neper/m (平行3本線路)

} (6)

で与えられる。



第 7 図 多線路伝送線路  
Fig. 7. Multi-Wire Transmission Line

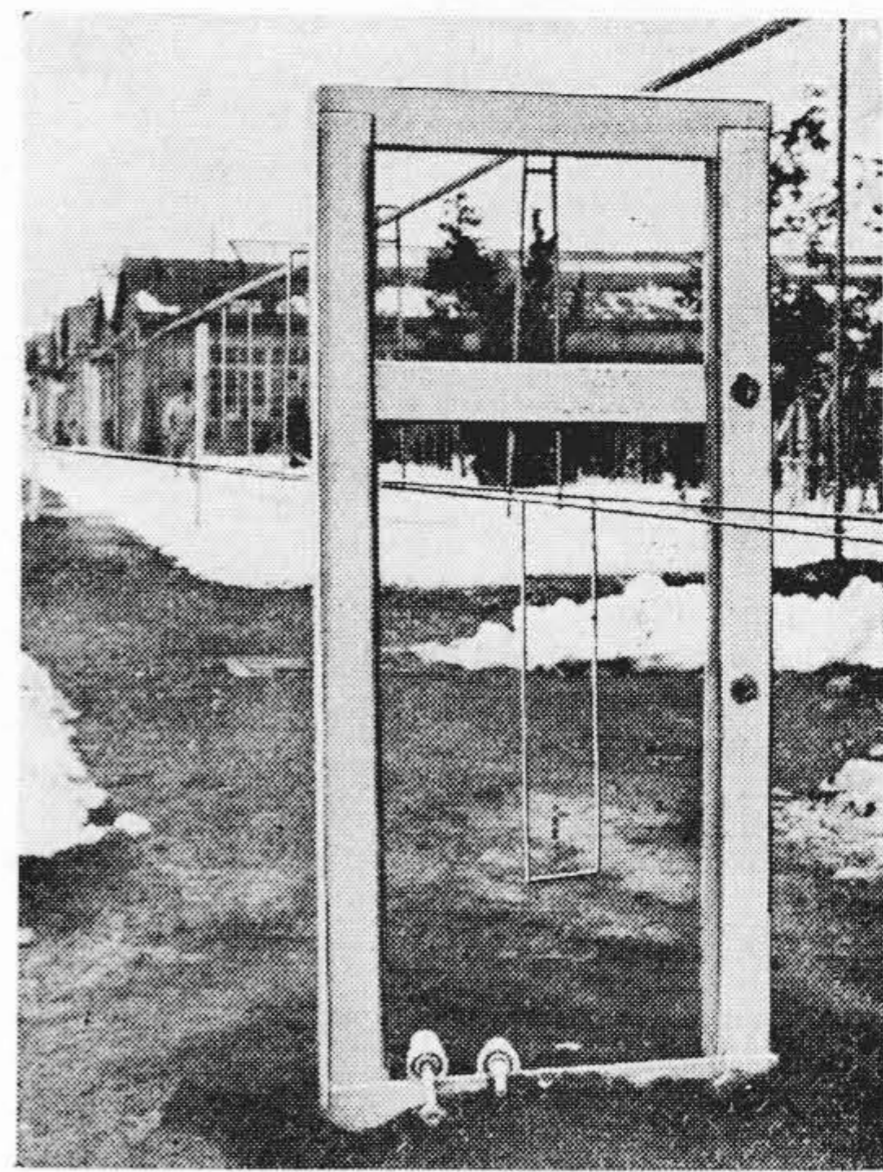


第 8 図 平行 2 本線路の地上高による減衰量  
Fig. 8. Attenuation Difference of Balanced Two-Wire Transmission Line Owing to Height above Ground

ただし、 $d$  は導線の直径 mm、 $h$  は高さ m、 $D$  は導線間隔 m、 $W$  は特性インピーダンスで

$$\left. \begin{aligned} W &= 120 l_n \frac{2D}{d} \frac{1}{\sqrt{1+(D/2h)^2}} \quad (\text{平行 2 本線路}) \\ W &= 30 \left\{ 2 l_n \frac{2D}{d} \frac{1}{1+(D/2h)^2} + l_n \frac{D}{d} \sqrt{1+(D/2h)^2} \right\} \quad (\text{平行 3 本線路}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

である。大地の導電率は  $10^{-1} \sigma/m$  とする。  
 $d=2.9 \text{ mm}$ 、 $D=10 \text{ cm}$  とした場合の高さ  $h$  に対する  $\alpha_1$  の値を第 8 図に示す。その結果  $h/D=6\sim 8$  程度になるとほとんど大地による減衰量はなくなり、導線による減衰量のみとなり、 $10 \text{ db/km}$  以内におさえることができるようになる。3 本線路は  $h$  の小さい範囲では減衰量が少ないが大地影響がなくなると 2 本線路より減衰



第 9 図 平衡 2 線式給電線  
Fig. 9. Balanced Two-Wire Transmission Line

が増加し、2 本線路の方が有利である。同図にナイロン糸で支持した場合の平行 2 本線路減衰量の測定結果<sup>(3)</sup>を示してあるが、これは理論値とよく一致しており、 $7\sim 8 \text{ db/km}$  の減衰量となる。

なお平行 2 本線路の不均衡伝送 第 7 図(c) の場合の伝送においては [III] に述べたと同様に減衰量は

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \sqrt{\frac{1}{\lambda} \left( \frac{0.74}{d} + \frac{8.65}{h} \right) 2W} \text{ Neper/m} \\ \text{で} \\ W &= 30 l_n \frac{8h^2}{dD} \end{aligned} \right\} (8)$$

となる。 $d=2.9 \text{ mm}$ 、 $D=10 \text{ cm}$ 、 $h=80 \text{ cm}$  の場合には  $W=293 \Omega$  で  $\alpha_1=127 \text{ db/km}$  となる。実測によれば  $118 \text{ db/km}$  となり、大地の導電率を  $10^{-1} \sigma/m$  とし上述のすべての実験結果とよく一致する。すなわち平行 2 本線路などを励振する場合あるいは線路の構造が非対称である場合に不均衡伝送を生じると不均衡伝送分は  $120 \text{ db/km}$  程度に減衰するから、伝送能力を低下する原因となる。ゆえに不均衡伝送に対しては十分注意する必要がある。

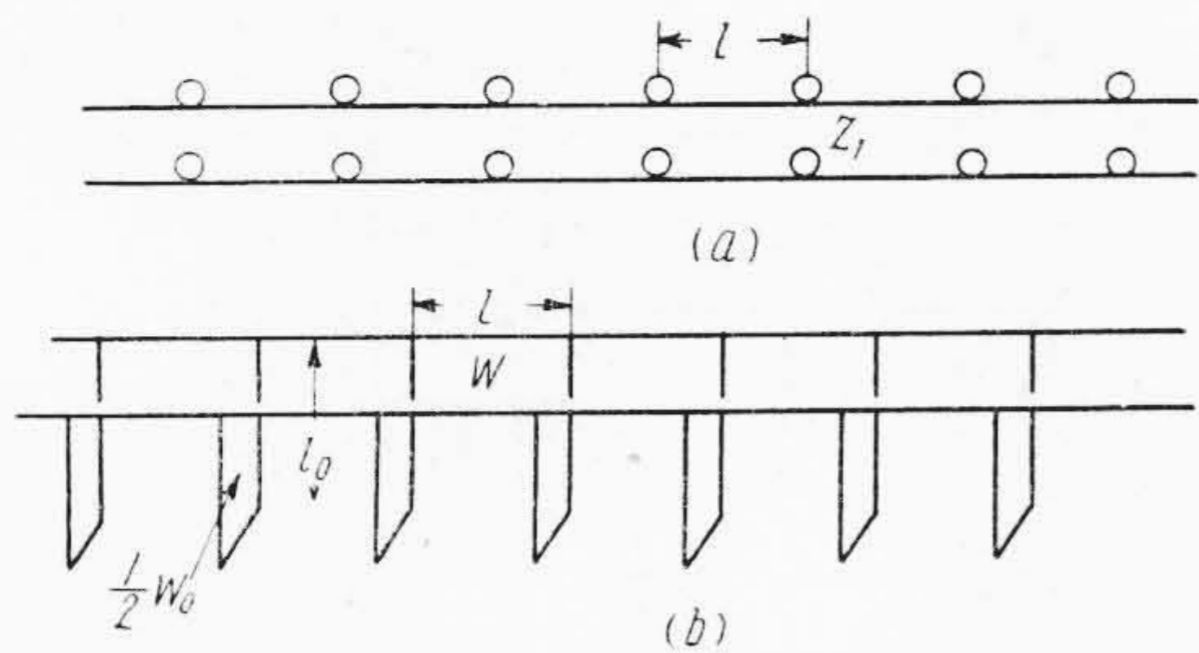
第 9 図に平行 2 線式給電線の架線状況を示す。

[V] 線路支持方法による減衰量

線路を支持する方法に 2 つの方法が考えられる。

- (1) 碓子などにより絶縁支持する方法
- (2) トラップにより支持する方法

いずれの場合においても線路と支持物とによつて濾波特性を有するようになり、減衰量の異なる周波数帯を生ずる。(1) の場合については既に報告<sup>(4)</sup>したところであるが、こゝにはその両者について簡単に述べることにする。



第10図 (a) 碍子支持の平行2本線路  
(b) トラップ支持の平行2本線路  
Fig. 10. (a) Balanced Two-Wire Transmission Line Supported by Insulators  
(b) Balanced Two Wire Transmission Line Supported by Traps

第8図に示すような平行2本線路にはほとんど等間隔に支持物によつて支持されている。このような線路の等価回路は第10図のように分布定数回路の途中に碍子または支持物のインピーダンスが等間隔に接続された回路となる。今その一つをとりII型の回路を構成すると、対称回路から二等分の定理で第11図のごとくラチス型回路で表わすことができる。

ただし

$2Z_1 =$  支持物のインピーダンスであつて

碍子の場合  $\frac{1}{Z_1} = G + j\omega C$

トラップの場合は

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= W_0 \tanh r_0 l_0 = W_0 \tanh (\alpha_0 + j\beta_0) l_0 \\ Z_2 &= W \tanh \frac{r_0 l_0}{2} = W \tanh (\alpha + j\beta) \frac{l}{2} \\ Z_3 &= W \coth \frac{r_0 l_0}{2} = W \coth (\alpha + j\beta) \frac{l}{2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

である。

第11図の四端子網の映像インピーダンス  $Z_0$  および伝播定数  $\theta$  は

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3}} \\ \cosh \theta &= \frac{Z_1^2 (Z_3 + Z_2) + 2Z_1 Z_2 Z_3}{Z_1^2 (Z_3 - Z_2)} \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

$$= \cosh (\alpha' + j\beta')$$

で与えられる。

これが  $n$  箇接続され末端が映像インピーダンスに等しい負荷で接続された場合の減衰量は  $n\alpha'$  で与えられる。

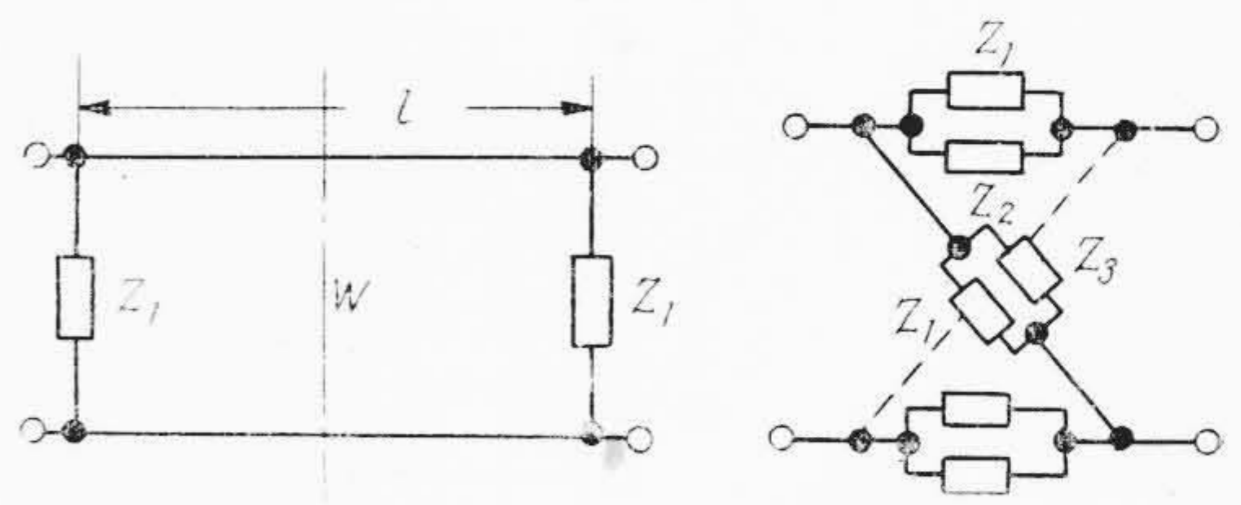
(1) 碍子支持の場合

碍子の等価アドミッタンスは 150 Mc 帯でつぎのごとくである<sup>(5)</sup>。

乾いている場合

$$2G = 1.7 \times 10^{-5} \sigma \quad 2C = 1.22 \times 10^{-12} F$$

(ステアタイト製)



第11図 等価回路  
Fig. 11. Equivalent Circuit of Transmission Line

$$2G = 3.0 \times 10^{-5} \sigma \quad 2C = 1.60 \times 10^{-12} F$$

(電力用碍子)

湿っている場合

$$2G = 1.1 \times 10^{-4} \sigma \quad 2C = 2.1 \times 10^{12} F$$

(ステアタイト製)

また (8), (9) 式より

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \frac{W}{\sqrt{\left(1 + \frac{W}{Z_1} \tanh \frac{rl}{2}\right) \left(1 + \frac{W}{Z_1} \coth \frac{rl}{2}\right)}} \\ \cosh \theta &= \cosh rl + \frac{W}{Z_1} \sinh rl \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

となり、無損失とすれば

$$\Omega = \frac{2l}{\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{f}{f_0}$$

$$k = \frac{\pi c}{l} WC \quad (C: \text{光速})$$

とすれば

$$\cosh \theta = \cosh (\alpha' + j\beta') = \cos \pi \Omega - k \Omega \sin \pi \Omega$$

$$Z_0 = \frac{W}{\sqrt{1 - k \Omega \tan \Omega \pi / 2} (1 + k \Omega \cot \pi \Omega / 2)}$$

となり、減衰域と通過域と生じ、その遮断周波数に相当する  $\Omega$  は

$$\Omega = 1, 2, \dots$$

および

$$\tan \pi / 2 \Omega = -k \Omega, \quad \cot \pi \Omega / 2 = k \Omega$$

を満足する  $\Omega$  である。

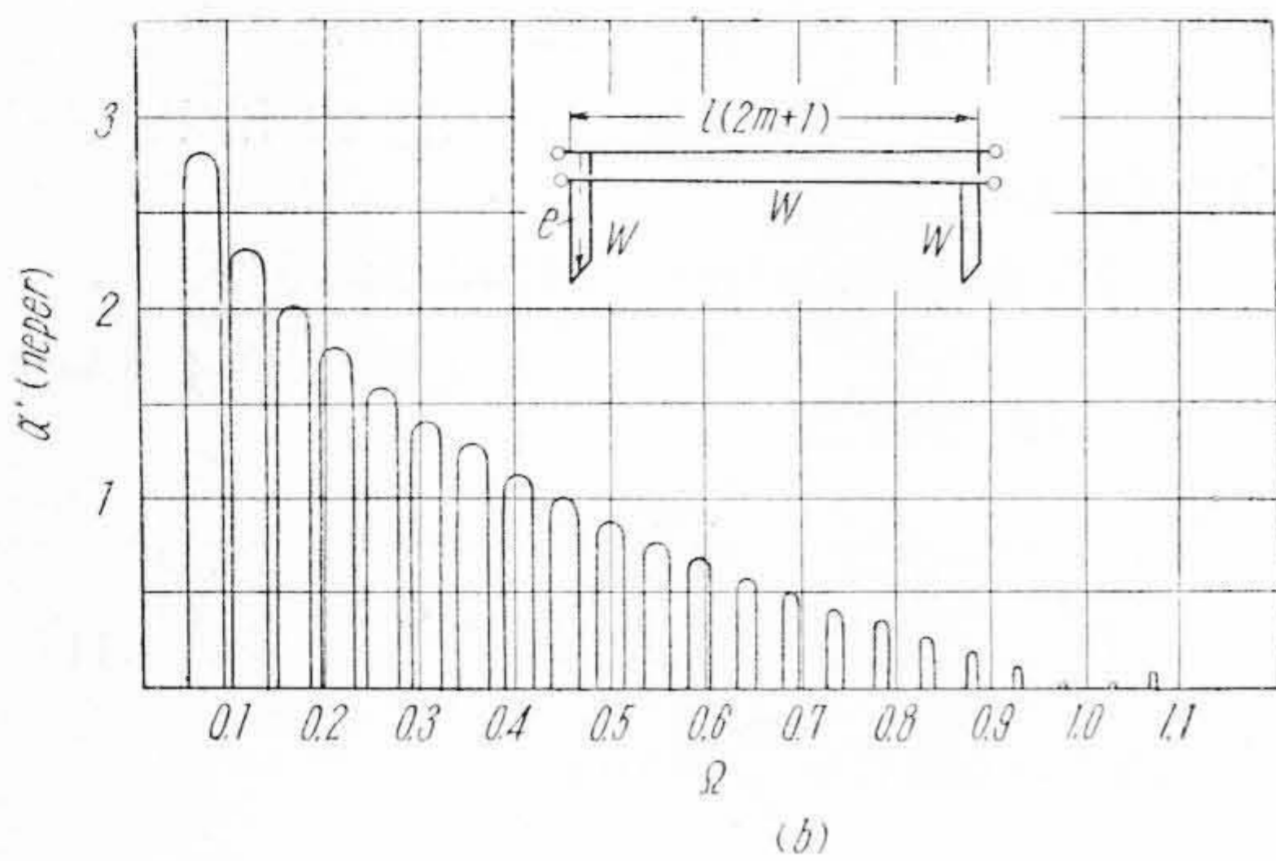
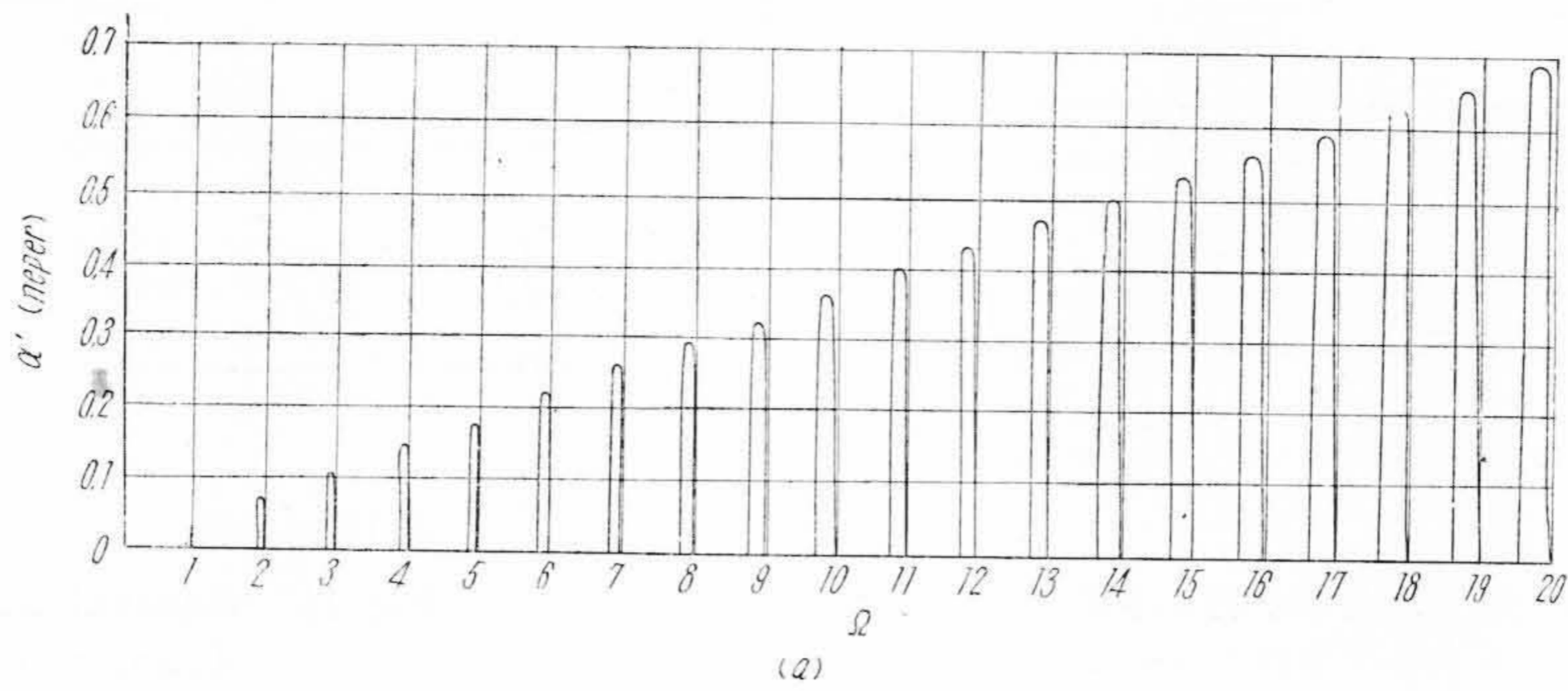
$C = 1.6 \text{ pF}$ ,  $l = 20 \text{ m}$ ,  $W = 509$  の場合  $k = 0.038$  のときの  $\alpha'$  と  $\Omega$  の関係を第12図(a) (次頁参照)に示す。図より知られるように周波数が高くなるにつれて減衰量は増加し、減衰域は広くなってくる。

一般に線路  $l$  が  $\frac{\lambda}{2} m$  に等しい周波数で減衰量は増加し、 $\frac{\lambda}{4} (2m+1)$  に等しい周波数附近が通過域となる。

線路に損失があり、かつ碍子に損失がある場合において  $\frac{\lambda}{4} (2m+1) = l$  の関係の成立する損失の少ない場合には (11) 式より近似的に

$$\alpha' \doteq \frac{\alpha l + WG}{\sqrt{1 - (\omega CW)^2}} \dots (12)$$

となる。



第 12 図 支持物による濾波特性

- (a) 碍子支持の場合
- (b) トラップ支持の場合

Fig. 12. Characteristic of Transmission Line Owing to Supporting Method  
(a) Supporting by Insulators  
(b) Supporting by Traps

たとえば

$$l=20 \text{ m}, \quad h=60 \text{ cm}, \quad \omega=2\pi \times 150 \times 10^6,$$

$$W=509 \Omega \quad (d=2.9 \text{ mm}, \quad D=10 \text{ cm})$$

とし、碍子の乾、湿の場合について  $\alpha'$  を求めると ( $\alpha$  の計算は (6) 式を用いる)

乾 (ステアタイト製)	0.0249 db
1 km に換算すると	10.8 db
乾 (電力用碍子)	0.0297 db
1 km に換算すると	12.9 db
湿 (ステアタイト製)	0.0553 db
1 km に換算すると	24.0 db

となる。

第 8 図には電力用碍子を 20.5 m ごとに置き支持した場合の実験結果を示してあるが、上記理論計算の 13 db より大きく 18.5 db 程度になっている。これは実験前日雨によつて大分椀木が湿つていたためと思われる。

以上のごとく碍子支持は周波数の高い場合は 6~10 db 程度の減衰量の増加を生じ、湿気のある場所では非常に大きい減衰量となる。

高い周波数に対しては別の支持方法が望ましい。

(2) トラップ支持の場合<sup>(6)</sup>

使用中心波長  $\lambda_0$  の  $\frac{1}{4}$  の長さのトラップで支持する場合には

$$l_0 = \frac{\lambda_0}{4}$$

かつ前項のごとくトラップで間隔  $l$  は使用中心波長の

$\frac{1}{4}(2m+1)$  に選ぶことを必要とするから

$$l = \frac{\lambda_0}{4}(2m+1)$$

とし、 $\Omega = \frac{\lambda_0}{\lambda}$  とすると、無損失の場合は (10) 式は

$$Z_0 = \frac{W}{\sqrt{\left\{1 + \frac{W \tan \pi/4(2m+1)\Omega}{W_0 \tan \pi/2\Omega}\right\} \times \left\{1 + \frac{W \cot \pi/4(2m+1)\Omega}{W_0 \tan \pi/2\Omega}\right\}}}$$

$$\cosh \theta = \cos \frac{\pi}{2}(2m+1)\Omega + \frac{W \sin \pi/2(2m+1)\Omega}{W_0 \tan \pi/2\Omega} \quad (13)$$

となる。このときも碍子支持と同様減衰、通過両域を生じ、その遮断周波数は

$$\sin \frac{\pi}{2}(2m+1)\Omega = 0$$

$$\frac{W \tan \pi/4(2m+1)\Omega}{W_0 \tan \pi/2\Omega} = -1,$$

$$\frac{W \cot \pi/4(2m+1)\Omega}{W_0 \tan \pi/2\Omega}$$

を満足する  $\Omega$  で生ずる。

例とし、 $W/W_0=1$  とし、 $m=20$  の場合  $\Omega$  と  $\alpha'$  の関係を示すと第 12 図 (b) となる。すなわち高周波になるにつれて通過域が広くなり、かつ減衰量は減少し、 $\Omega=1$  の使用周波数附近が減衰の少くなることが知られる。

トラップの使用は高い周波数で碍子支持より良い特性を示すことが知られる。

線路に損失があり、かつトラップにも損失がある場合には  $\Omega=1$  の関係の成立する通過域の損失は(11)式より近似的に

$$\alpha' = \alpha l + WG'$$

ただし  $G' = \alpha l_0 / W_0$  であり、一般に  $2 \sim 1 \times 10^{-5}$  程度に選べるから、たとえば

$$\begin{aligned} l &= 20.5 \text{ m}, & h &= 60 \text{ cm}, \\ W &= 509 \Omega \quad (d=2.9\text{mm}, D=10 \text{ cm}) \\ \lambda &= 2.0 \text{ m}, & 2G' &= 1 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

とすれば

$$\alpha' = 0.2 \sim 0.22 \text{ db}$$

1 km に換算して 10~11 db/km 程度となる。

第8図にはトラップ支持の場合の実験結果を示してあるが、12.5 db/km 程度となり、碍子支持に比し 6db 程度の改善を得ている。

トラップ支持はトンネルのごとく、摩擦、ブレーキその他により金属粉の多い場所、湿気の多い場所では碍子のごとくインピーダンスの低下が少いので、碍子支持の場合に比し安定な伝送を行いうる点有利である。

以上述べたことから平行2本線を架設することによって減衰量を 10~15 db/m の範囲にとどめうることがあきらかとなった。

### [VI] 平行2本線路と空中線の結合損

第13図に示すような平行2本線路に平行に半波長空中線がある場合には、平行2本線路と空中線とは静電的、電磁的、輻射的な結合がある。これらの間の結合損の理論計算結果<sup>(7)</sup>は次式で近似的に与えられる。

$$\alpha_2 = 20 \log \frac{120\pi}{\sqrt{WR_0}} \frac{D}{\lambda} (\sin \theta) k \text{ db}$$

$$k = \sqrt{A_{1\infty}^2 + A_{2\infty}^2}$$

$$A_{1\infty} = \int_{-\frac{\lambda}{2\rho}}^0 \frac{\cos(\beta\rho\xi)}{1+\xi^2} d\xi$$

$$A_{2\infty} = \int_{-\frac{\lambda}{2\rho}}^0 \frac{\sin(\beta\rho\xi)}{1+\xi^2} d\xi$$

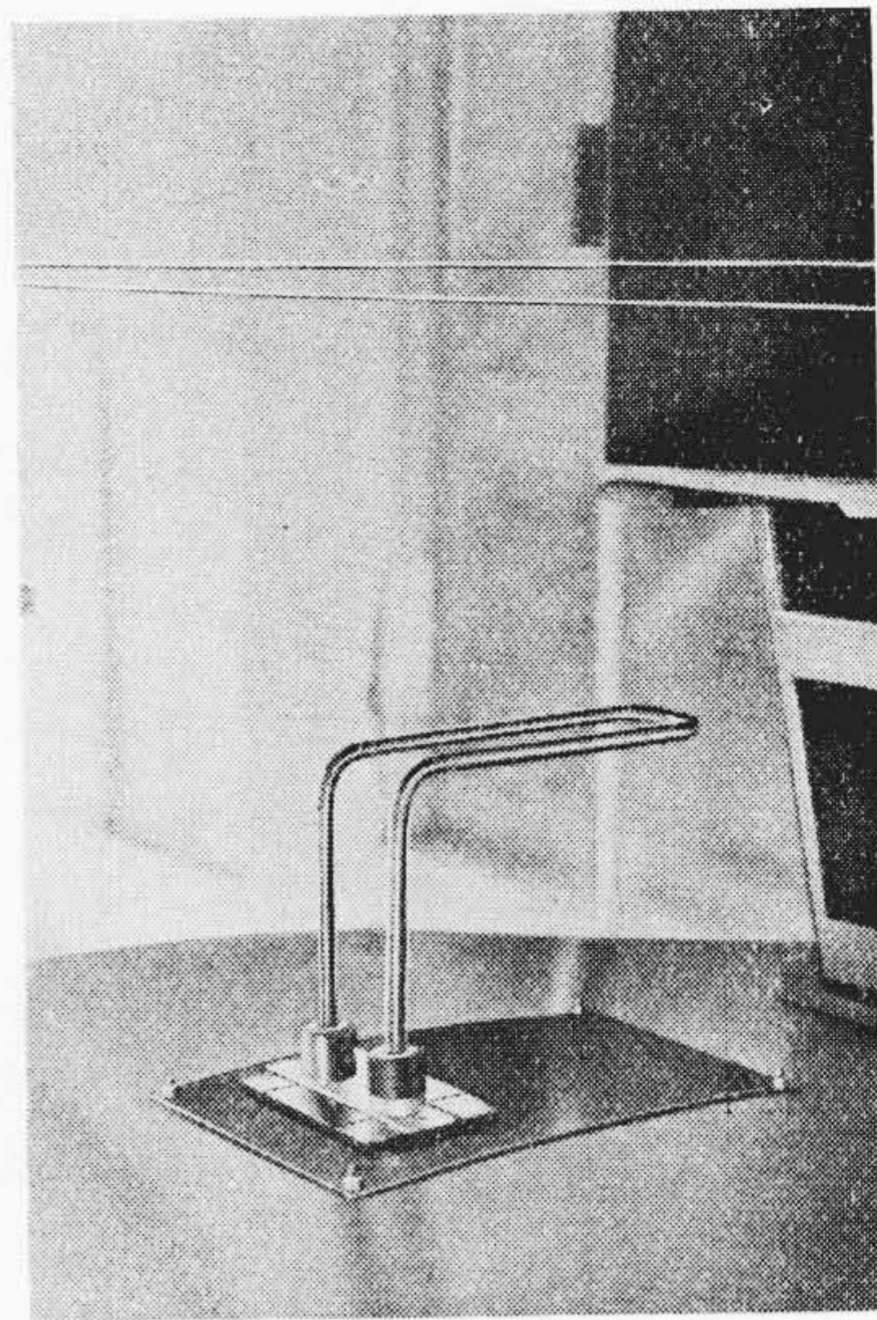
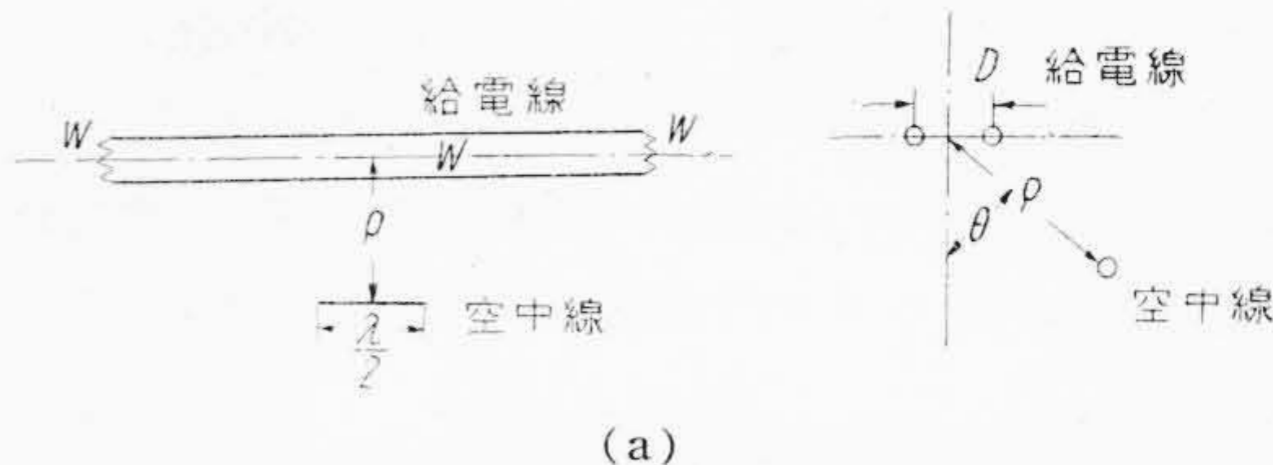
ただし  $W$ : 平行2本線路の特性インピーダンス

$\lambda$ : 波長

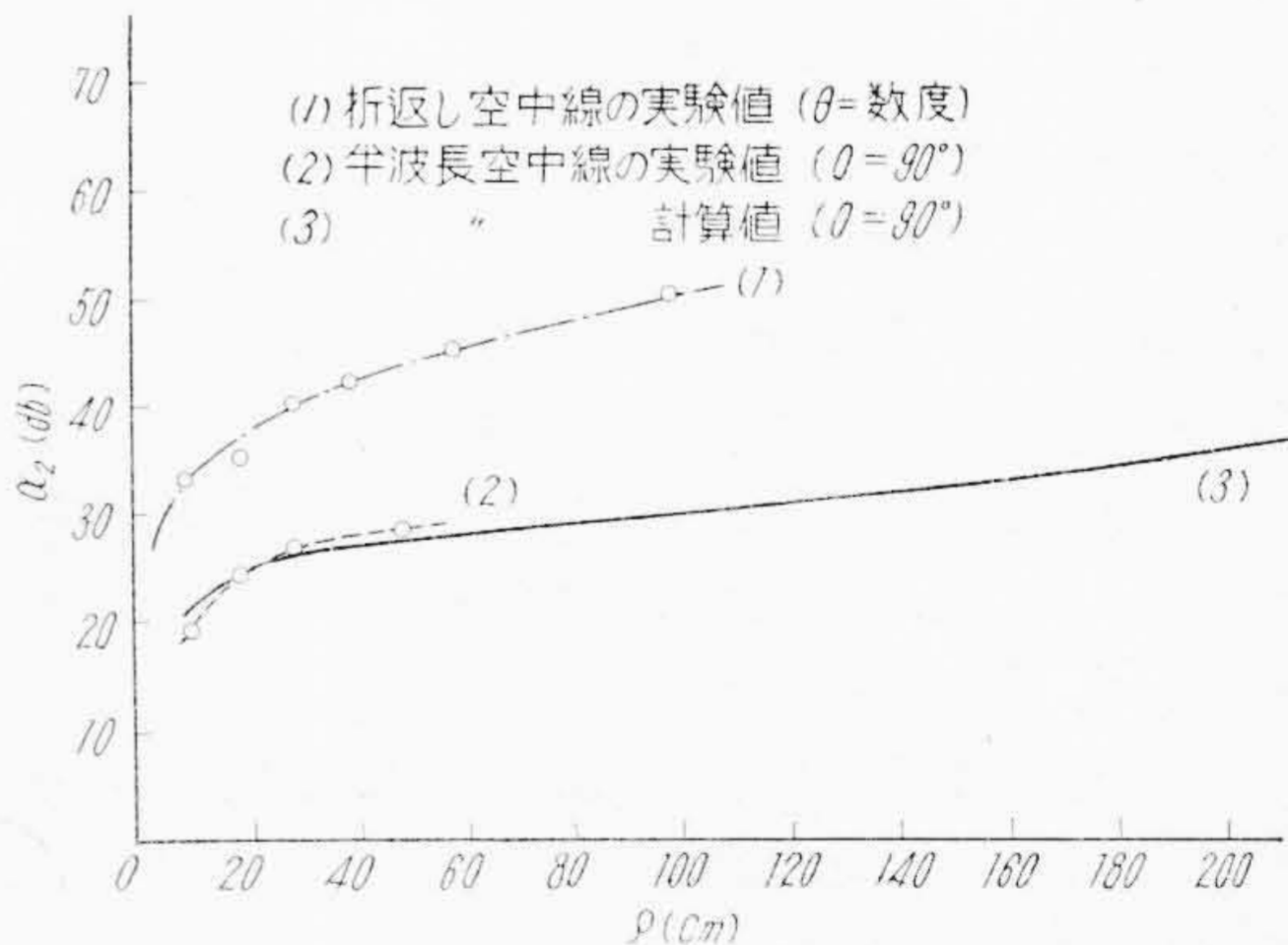
$\beta$ :  $2\pi/\lambda$

$R_0$ : 空中線の入力インピーダンス 73  $\Omega$

線路間隔 10 cm, 線路特性インピーダンス  $W=509$ , 半波長ダイポールとの距離  $\rho$  をかえたとき結合減衰量は第14図のごとく与えられる。



第13図 空中線と給電線の結合状況  
Fig. 13. Coupling Situation between Transmission Line and Antenna



第14図 空中線と給電線間の結合損  
Fig. 14. Coupling Loss between Transmission Line and Antenna

同図実験結果は半波長ダイポールおよび折返し空中線の場合であつて、理論値と傾向も良く一致している。実際にはトラップ支持、線路の曲り、トンネルの変化、碍子取付導線その他から相当輻射電界があつて減衰量は理論値より低くなる傾向にあり、大体トンネル内では 40~70 db に程度にみて十分と思われる。

平行2本線路では支持する場合には(1)式において、

$\alpha_1=15 \text{ db/km}$ ,  $\alpha_2=40$  または  $70 \text{ db}$ ,

$W=10 \text{ db}$

として  $l=7.3 \text{ km}$  または  $5.3 \text{ km}$  となる。すなわち  $5 \text{ km}$  以上のトンネル内の通信の可能性が十分あると思われる。

[VII] トンネル内通信方式の設計

以上述べた事項を要約し、設計の立場から考察してみたいと思う。

トンネル長により (1), (2) 式から平行 2 本線路の単位長ごとの減衰許容値が得られる。平行 2 本線路の構造は前節で述べた方法により、支持方法および間隔、高さなどを設計する。

なおトンネルは往路、帰路の二つがあるが、両者が空間的につながっているときには結合減衰量が  $70 \text{ db}$  以内とみて一つの線路で代用できる。しかし両者が遮断され、かつ相当長い場合には分岐の回線を作る必要がある。第 15 図にその回路を示す。分岐点に使用周波数の中心波長  $\lambda_0$  の  $1/4$  波長の変成器をとりつけ、かつ  $l_2-l_1=m\lambda_0$  ( $m: 1, 2, 3, \dots$ ) になるようにする。

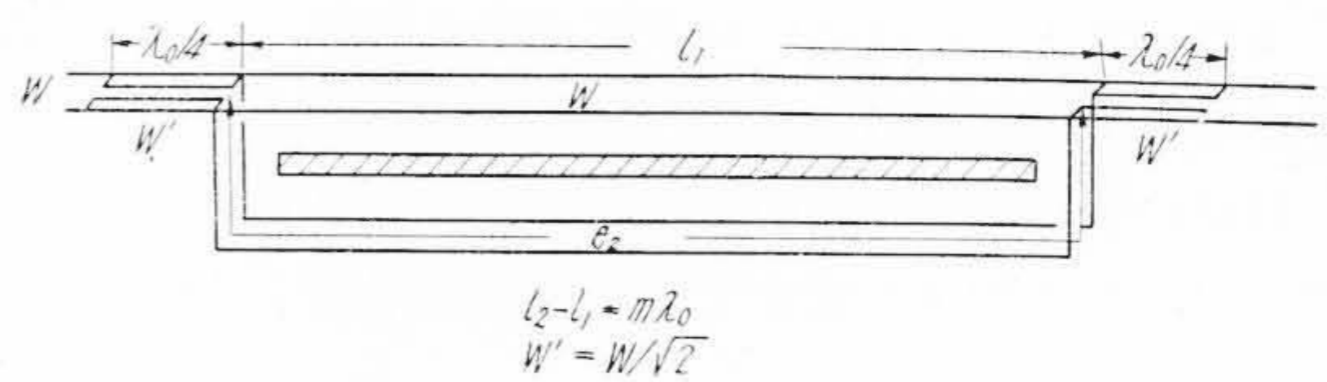
また端末の同軸線路との結合には同軸型の変換回路および変成器を兼ねた回路を挿入する。その一例を第 16 図に示す。第 15 図および第 16 図ともに  $150 \text{ Mc}$  帯で  $F_1, F_2$  の送、受信周波数差が数  $\text{Mc}$  であれば十分動作可能な回路である。その他分波器ハイブリッドなどの設計があるがここには省略する。

[VIII] 結 言

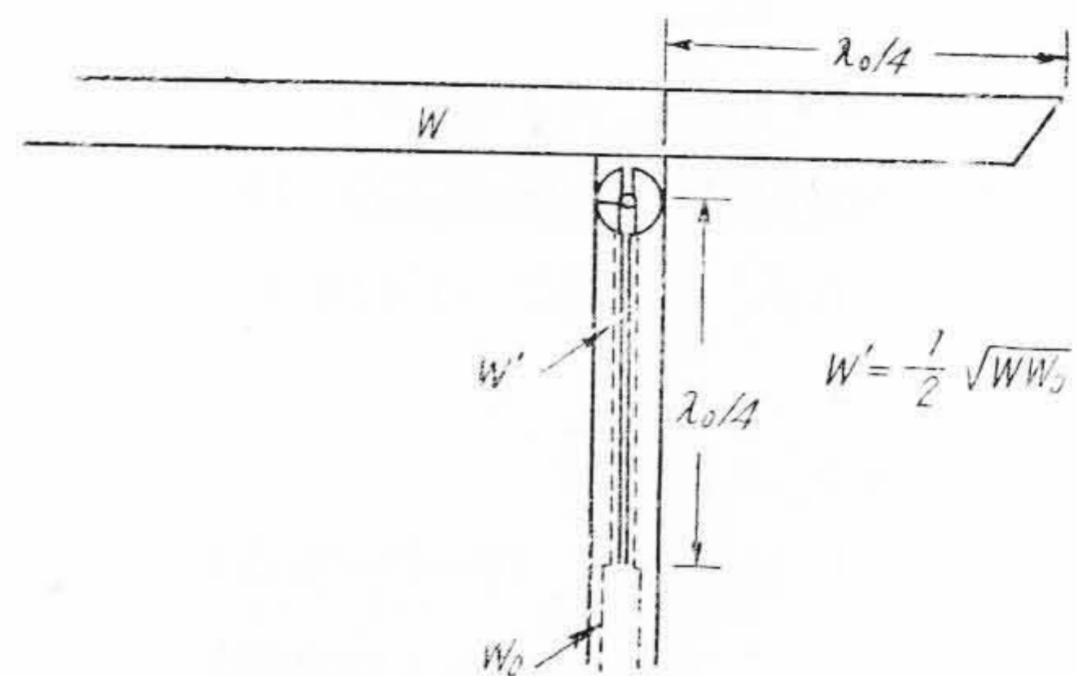
トンネル内の V.H.F. 通信は正確に設計された平行 2 本線路を用いることによつて  $7\sim 10 \text{ km}$  の範囲で可能であることを述べた。トンネル内は一般に V.H.F. 帯雑音が少く、かつ風水害その他の事故でも通信不能となる心配がなく、他の方式に比して有利である。

この方式に関する基本的実験は日立製作所戸塚工場において行い、かつ実地調査は阪神電鉄において行い、通話試験において良好な結果を得ている。

終りに臨み実験に関して御指導をいただいた東北大学



第 15 図 分 岐 回 路  
Fig. 15. Branch Circuit



第 16 図 不 平 衡 平 衡 変 換 回 路  
Fig. 16. Unbalanced-Balanced Transformation Circuit

永井教授、御協力をいただいた阪神電鉄株式会社の関係各位および実験その他にお骨折をいただき日立製作所戸塚工場東、今西、太田、白川の各氏に厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 永井, 佐藤, 斎藤: V.H.F. 分波器の設計 (未発表)
- (2) 永井, 佐藤, 斎藤: V.H.F. ハイブリッドの設計 (未発表)
- (3) 日立製作所戸塚工場において  $500 \text{ m}$  線路で実測した結果である。
- (4) 永井, 佐藤, 佐藤: 長距離給電線の伝送能率
- (5) 永井, 佐藤, 渋谷: V.H.F. における碍子の等価アドミタンスの測定
- (6) 佐藤, 永井: トラップ支持方法による V.H.F. 用伝送線路について (未発表)
- (7) 永井, 佐藤, 佐藤: 空中線と伝送線路の結合について (未発表)

