

150 Mc-FM 無線機によるトンネル内 通信実験について

今西久彌* 太田栄一**

Field Test of Radio Communications in Tunnel by 150 Mc-FM Radio Equipment

By Hisaya Imanishi and Eiichi Ōta
Totsuka Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

Due to its sizable attenuating effects on the electric field strength, the tunnel has been regarded as an insuperable barrier for the application of mobile communication system utilizing VHF band. However, continued efforts in the basic engineering research which had been conducted at the Totsuka Works, Hitachi, Ltd., with the co-operation of the Tōhoku University has ended in bringing a successful result in their experiment on 150 Mc-FM communication scheme carried out using 700 m subway railroad between Motomachi and San-no-miya Stations, Hanshin Electric Railways.

Since the basic research on this subject at the Totsuka Works was reported by Mr. Satō of the same university chiefly in terms of purely theoretical discussion, the writer intends here to present experimental data he obtained from the the above-mentioned field test. The writer believes that the test results provide valuable data which promise a high rate of practicability of the inside-tunnel service for the communications system in the analogous category.

〔I〕 緒 言

超短波帯 (30~300 Mc) を使用する周波数変調方式の移動無線の利用が進むにつれて、トンネルを含んだ通信系にこの方式を利用する試みが行われたがトンネル内における超短波の減衰は非常に大きく実用には至らなかった。150 Mc のトンネル内の減衰を測定すると、1 km 当り 1,000~3,000 db で、出力 25 W の 150 Mc 帯 FM 無線機を使用しても、トンネル内の自由伝播を利用するのでは約 100 m が限度である。したがってさらに長いトンネル内の無線通信を行うためには、上記の伝播損失を減少させる必要がある。このため以下にのべるごととき平衡饋電線を使用すると、減衰を 10~20 db/km 程度に減少させることができ、トンネル内通信の可能性がきらかになり、この方式を応用することにより将来超短波帯の周波数変調方式移動無線がトンネルを含む通信系

のさらに広い分野にその特長を生かして行くことが可能となつてきた。

〔II〕 通信計画の概要

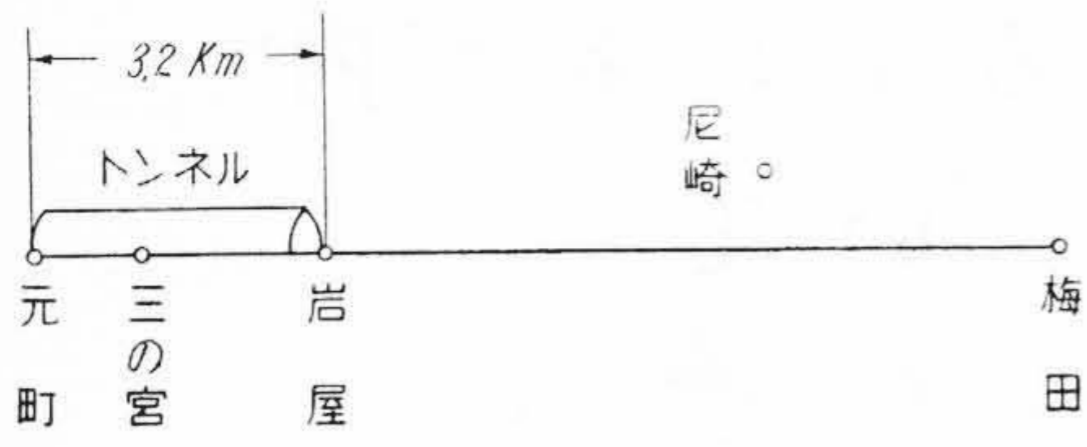
阪神電鉄株式会社において計画された 150 Mc-FM 無線通信計画は第 1 図(次頁参照)に示すように、尼ヶ崎駅を固定局とし、元町駅との固定通信および元町駅—梅田駅間を移動する電車との間の移動通信の二つであるが、後者においては、元町駅—岩屋駅間に約 3.2 km にわたるトンネルがあり、VHF を使用する場合は電波の自由空間伝播を利用することは不可能である。

そこで文献 (1) に解析されている平衡饋電線を利用する方式について計画立案するとともに現地において通信実験を行い、その可能性を確認した。

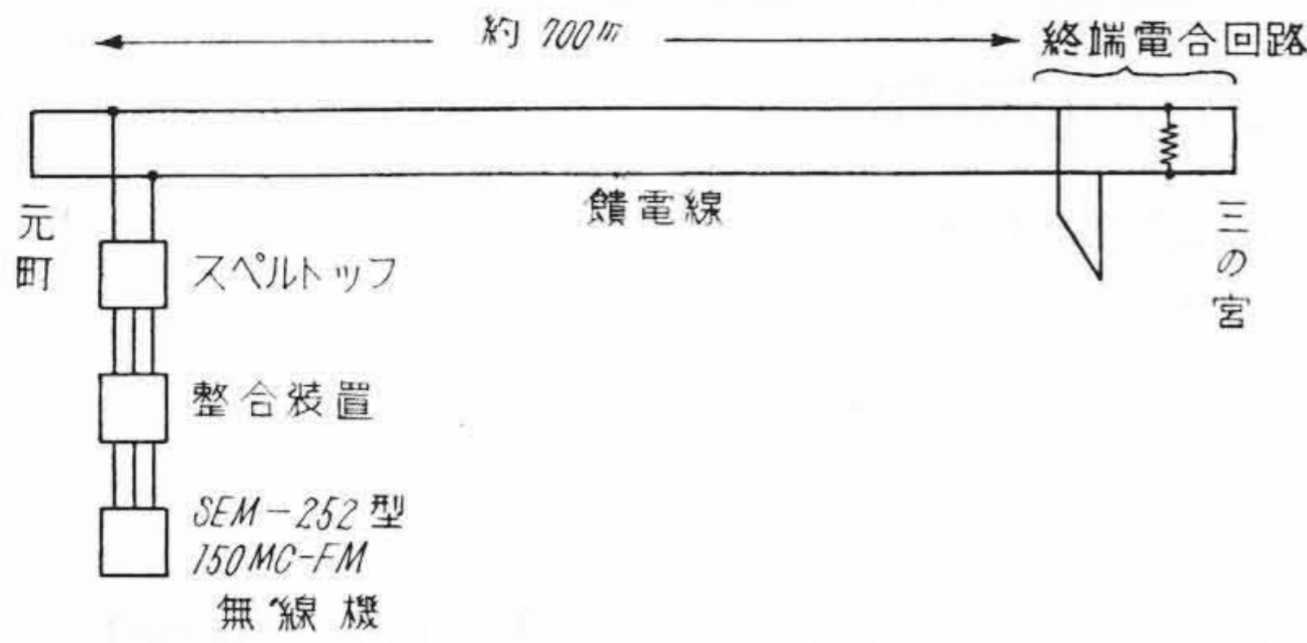
以下、元町駅—三の宮駅間で行われた現地実験の方法および使用機器について説明を加える。

元町駅(地下)に固定局を設置し、元町駅—三の宮駅間

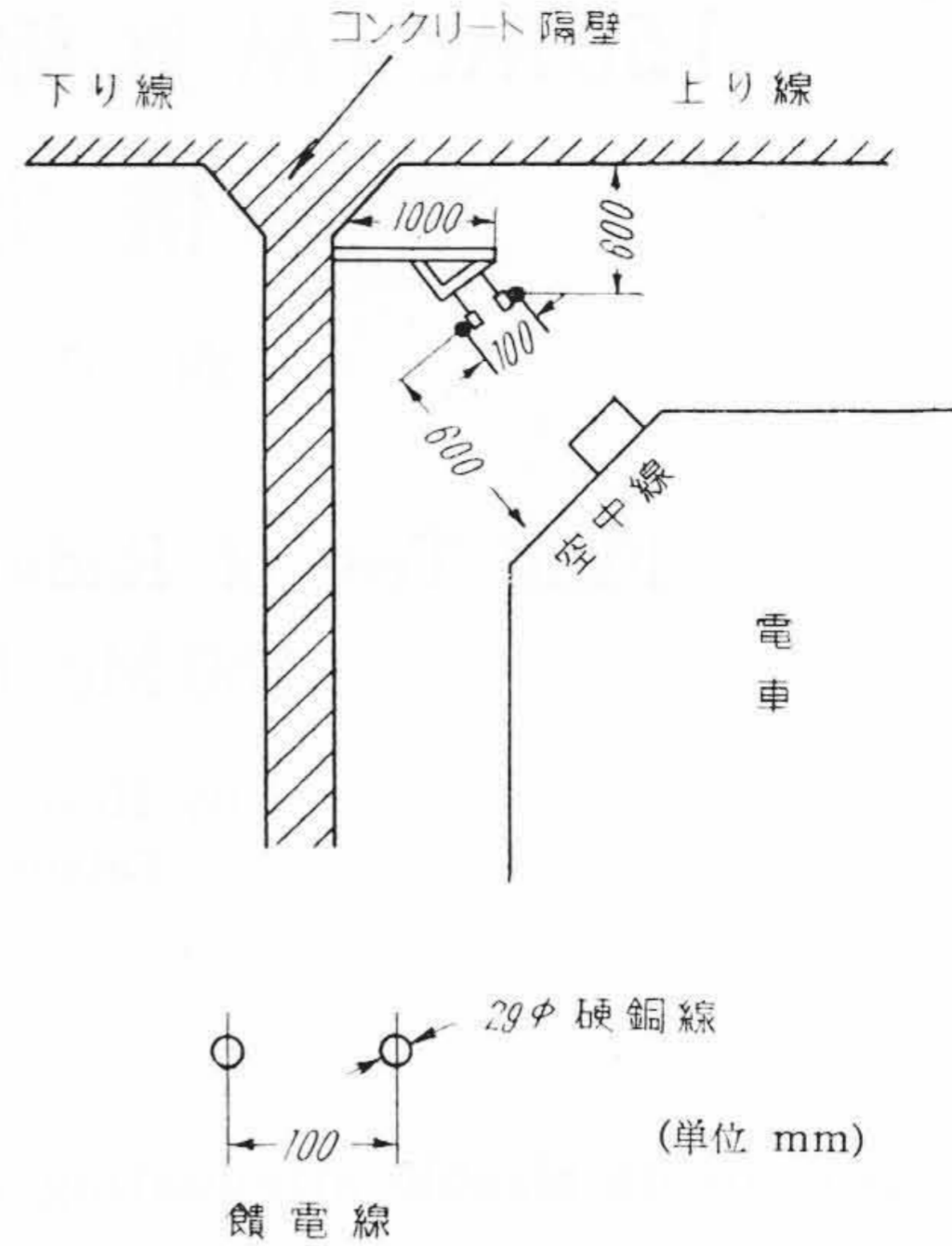
* ** 日立製作所戸塚工場



第1図 阪神電鉄における通信計画
Fig.1. Schedule Planning of Communication



第2図 実験系統図
Fig.2. Schematic Diagram Used for Experiment



第3図 平衡2線式饋電線
Fig.3. Balanced Two Wires Feeder

を移動する電車に移動局を搭載して、両局の空中結をトンネル内に張られた平衡2線式饋電線に結合する。この場合、送信出力、受信入力、饋電線損失、饋電線と空中線間の結合損失、その他の損失の間には次式が成立する。

$$Q = W - (\alpha_1 l + \alpha_2 + \alpha_3) \dots \dots \dots (1)$$

- ここに Q: 受信入力
- α_1 : 饋電線損失/単位長
- α_2 : 饋電線と空中線間の結合損失
- α_3 : 上記以外の不整合などによる損失
- l: 饋電線の長さ
- W: 送信出力

今 $Q = -130 \text{ db}$, $\alpha_1 = 20 \text{ db/km}$, $\alpha_2 = 60 \text{ db}$, $\alpha_3 = 3 \text{ db}$
 $l = 0.7 \text{ km}$ として所要送信出力を求めると (以上 $0 \text{ db} = 1 \text{ mW}$) $W = -53 \text{ db}$ となり、非常に少い電力でよいことがわかる。

第2図に実験に使用した通信系を示す。SEM-252型150 Mc-FM 無線機の出力は (同軸ケーブルを使用しているため不平衡である)、整合装置、スペルトップを経て平衡饋電線に供給される。スペルトップで不平衡電力を平衡電力に変換し、整合装置で平衡饋電線特性インピーダンス 500Ω と送信機出力インピーダンス 75Ω の整合を行う。饋電線の終端では終端整合回路によつて電力の反射を防ぐ。

〔III〕 実験に使用した機器

(1) 平衡饋電線⁽¹⁾

第3図はフィールドテストに使用した平衡饋電線を示す。特性インピーダンスは約 500Ω である。

大地の上に張られた平衡2線式饋電線損失は次式で示される。

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

- ただし λ : 波長 (m)
- d: 導線の直径 (m)
- h: 饋電線の地上高 (m)
- D: 饋電線の間隔 (m)
- W: 饋電線特性インピーダンス (Ω)

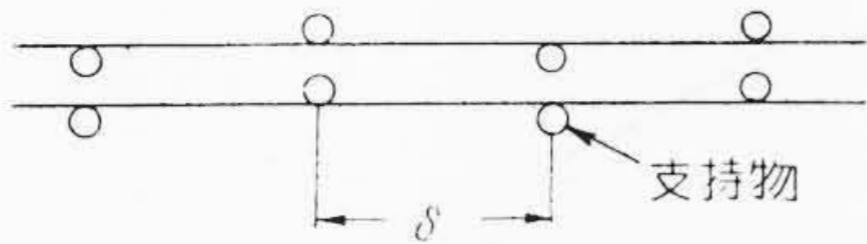
第1項は表皮効果による損失、第2項は大地の影響による損失を表している。平衡2線式の特性インピーダンスは

$$W = 120 \ln \frac{2D}{d \sqrt{1 + (D/2h)^2}} \dots \dots \dots (3)$$

で与えられる。(2)式からわかるように大地からの高さを減少して行くと急激に損失が増加してくる。饋電線の設計には下記の点を考慮する必要がある。

- (1) 饋電線による損失
- (2) 饋電線と受信空中線間の結合損失
- (3) 通信すべきトンネル内の架線許容範囲

これらの条件は互に関連しており、たとえば結合損失を減少させるために線間隔を増加すると(2)式により饋電線損失が増加し、饋電線損失を増加させないで結合損失を減少させるために、線間隔を増加、饋電線高を増加すればよいが、当然(3)の条件に制約される。実験に使用した饋電線は $d = 2.9 \text{ mm}$ (硬銅線), $D = 10 \text{ cm}$ で $D/h = 6 \sim 8$ にとるとほとんどによる損失は無視できる程度になり、 α_1 の計算値は 8 db/km になる。



第4図 饋電線支持間隔
Fig.4. Distance of Supporter

以上は饋電線のみを考えた場合であるが、長い饋電線を架設するためには当然支持方法が問題になつてくる。数百キロサイクル程度では大して影響ないが、波長が短くなると饋電線の支持方法が適当でないと、支持による損失が激増することがある⁽¹⁾。ナイロン紐のように損失の少ないもので吊る場合には問題ないが、電力線用の碍子のように損失の大きなもので支持する場合には、支持間隔 S は次式の関係を満足するようにならなければならない。

$$S = \frac{\lambda}{4}(2n+1) \dots\dots\dots(4)$$

ただし λ : 波長

n : 0, 1, 2, 3,

実験には $n=18\sim 22$ にとり、電力用碍子を使用して 20 m 前後の間隔で支持し、饋電線損失は理論値 8 db/km に対して、実測値約 20 db/km になつている。

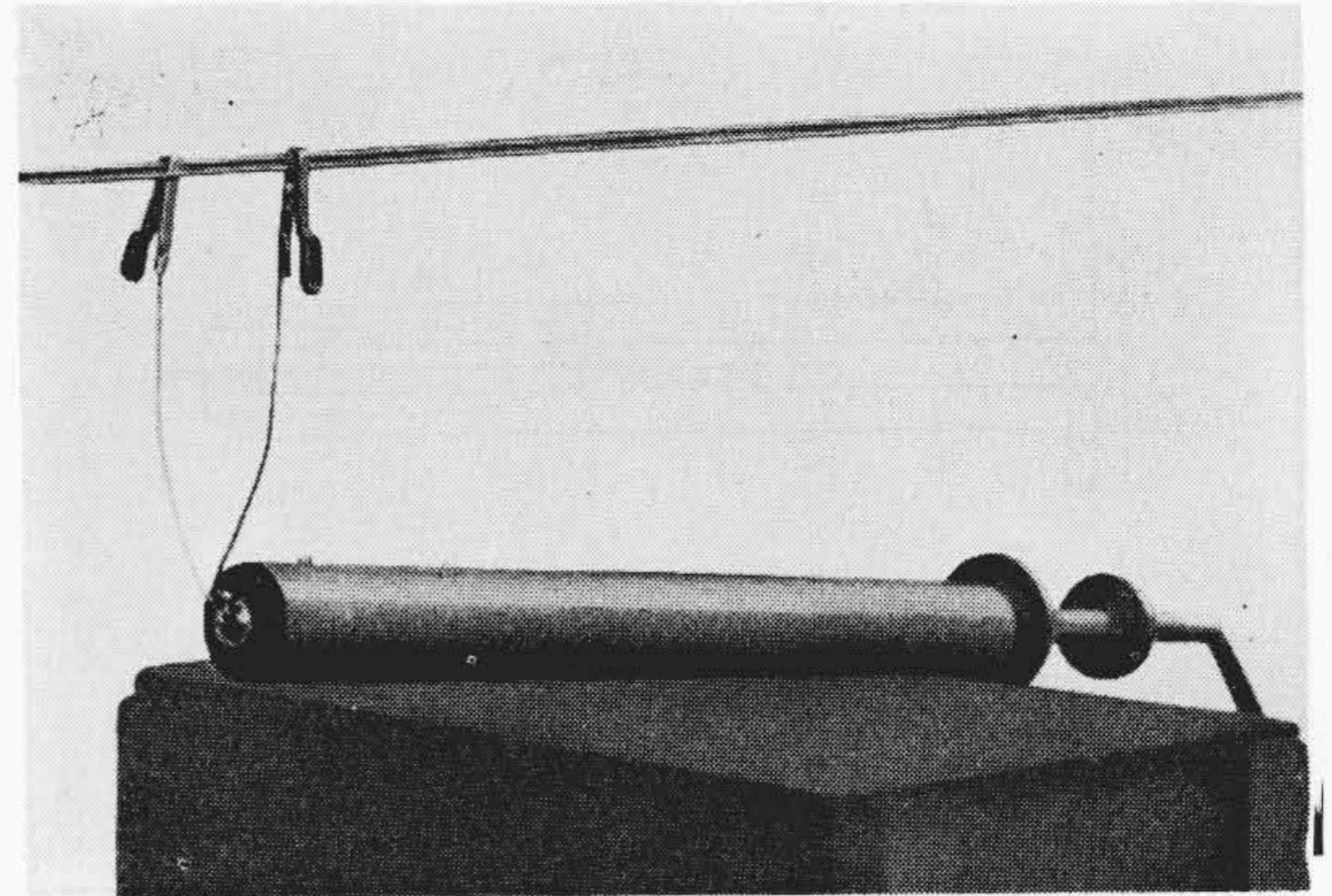
(2) スペルトッフ⁽²⁾⁽³⁾

一般に VHF 帯の無線機の送信出力の回路は同軸ケーブルを利用しているので、不平衡電力である。実験に使用した SEM-252 型 150 Mc-FM 無線機も同軸ケーブルを使用しているので、平衡饋電線に送信出力を供給するためには不平衡電力を平衡電力に変換する必要がある。平衡、不平衡変換には種々の変換回路が使用されているが大別するとつぎのようになる。

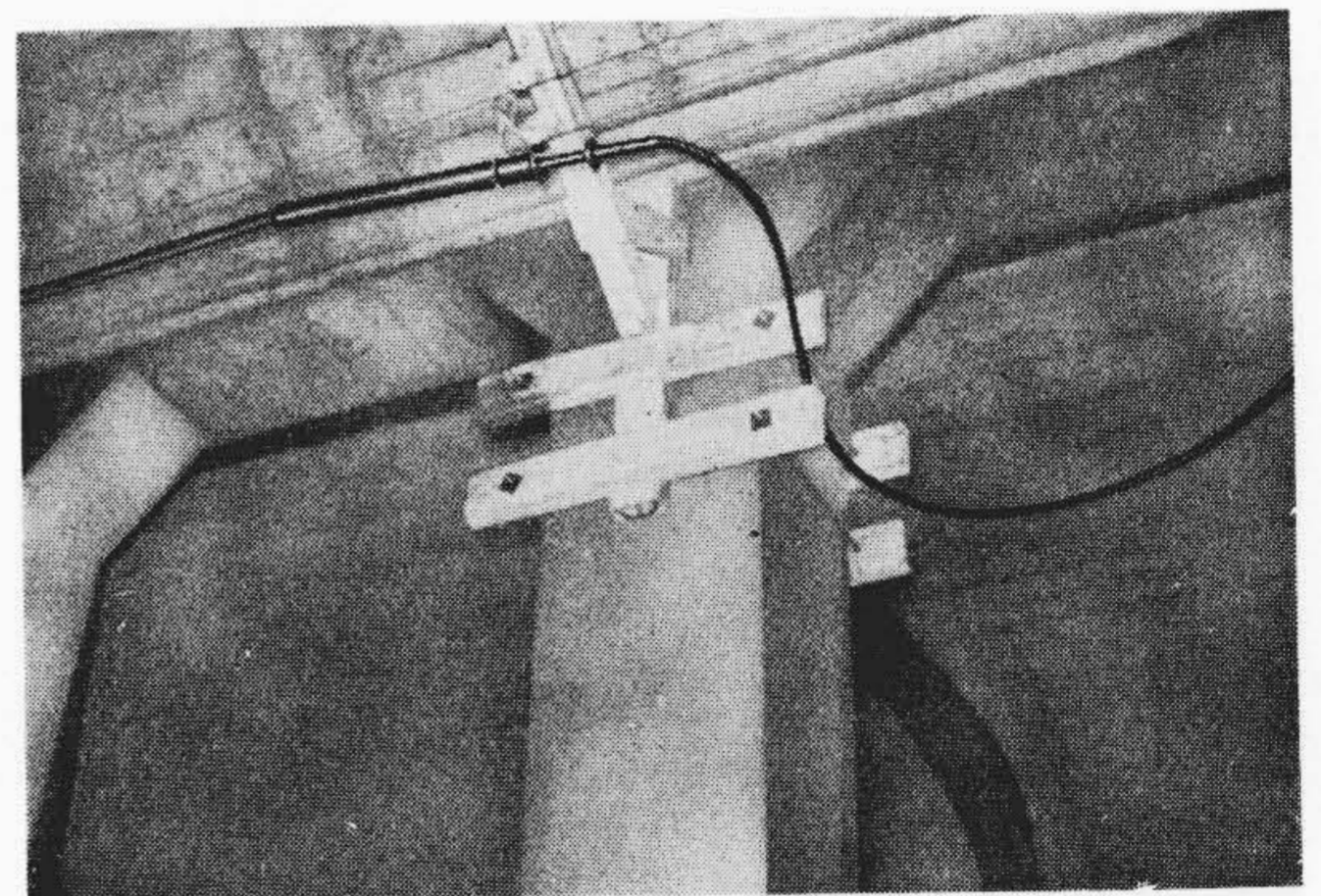
- (1) 梯子型変換回路
- (2) 格子型変換回路
- (3) 位相反転型変換回路

実験に使用した単一套管は (3) の位相反転型に属するものである。

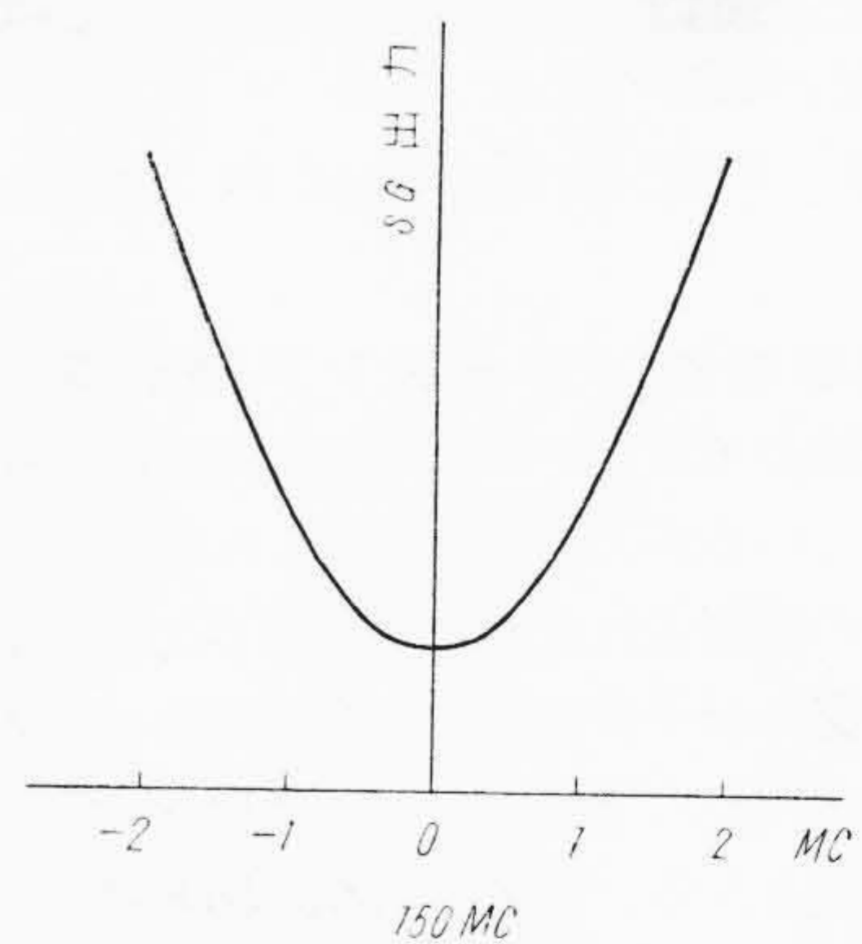
第5図において同軸線路の外導体の内側を流れてくる電流 I_1 はその接続点において図に示すように i_1, i_2 の二つに分流し、 I_1 の中的一部分 i_2 は外導体の外側に向つて漏洩する。内導体はその接続点において電流の分流する路がないのでそのまま平衡饋電線の一方に流入する。この場合スペルトッフの外套は電流 i_2 に対して無限大のインピーダンスとして働き、したがつて $I_1=i_1$ となる。使用したスペルトッフは、外套の直径 40 mm ϕ 、内套の直径 15 mm ϕ のもので、その特性を実測すると第7図のようになる。この特性曲線のうち、頭の部分のみが平衡、不平衡変換器として働くのであるが図からわかるように周波数偏移 ± 15 kc 程度の周波数変調波を通すの



第5図 スペルトッフ
Fig.5. Spertopf

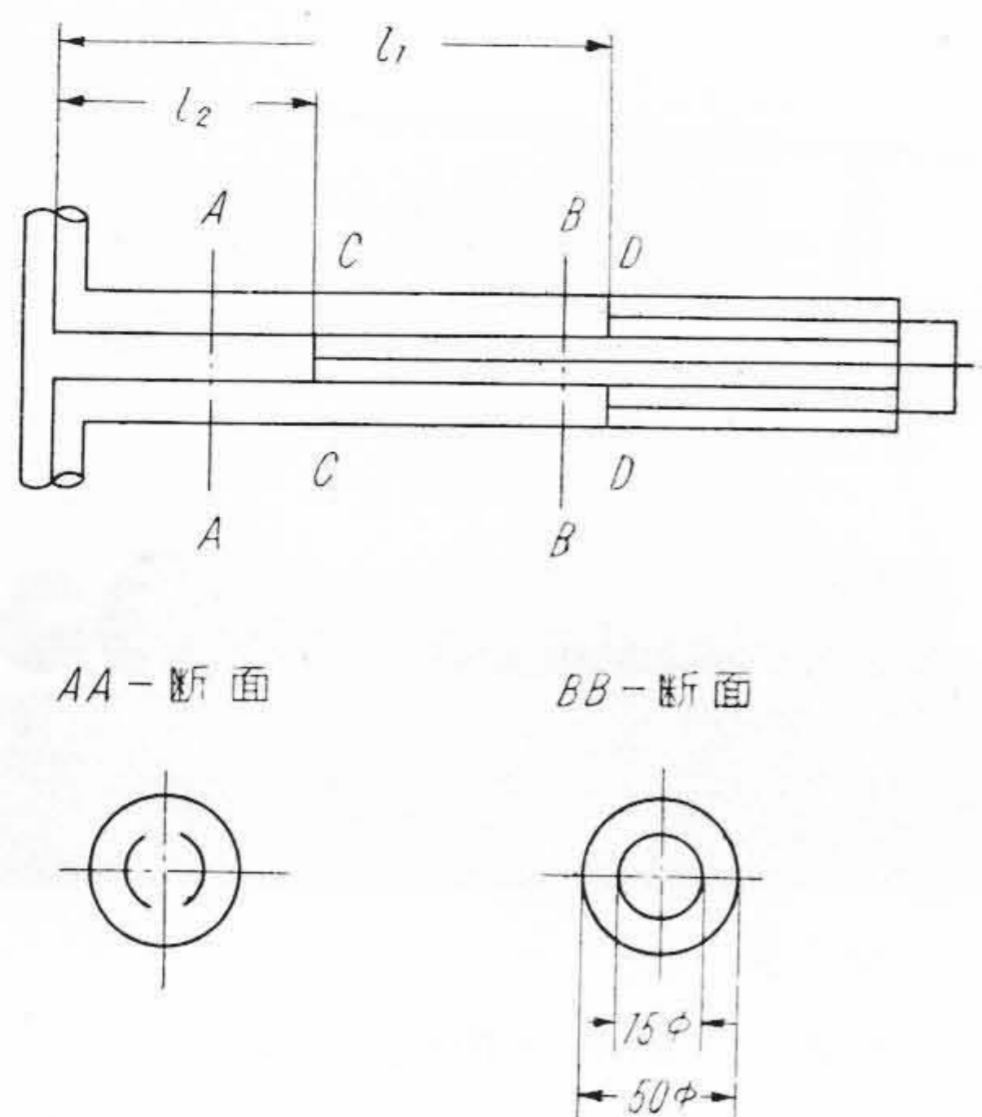


第6図 スペルトッフ設置状況
Fig.6. Spertopf as Installed



第7図 スペルトッフ特性
Fig.7. Character of Spertopf

には十分な帯域幅を持つている。この実験では都合によつて平衡、不平衡変換器と整合装置を別々に使用したが Balun⁽⁴⁾ を使用すれば平衡、不平衡の変換と同時にインピーダンスの変換を行うことができる。第6図には、阪神電鉄、元町駅に設置されたスペルトッフの状況を示してある。



第8図 VHF用トランスの構造(断面図)
Fig.8. Structure of VHF Transformer (Section)

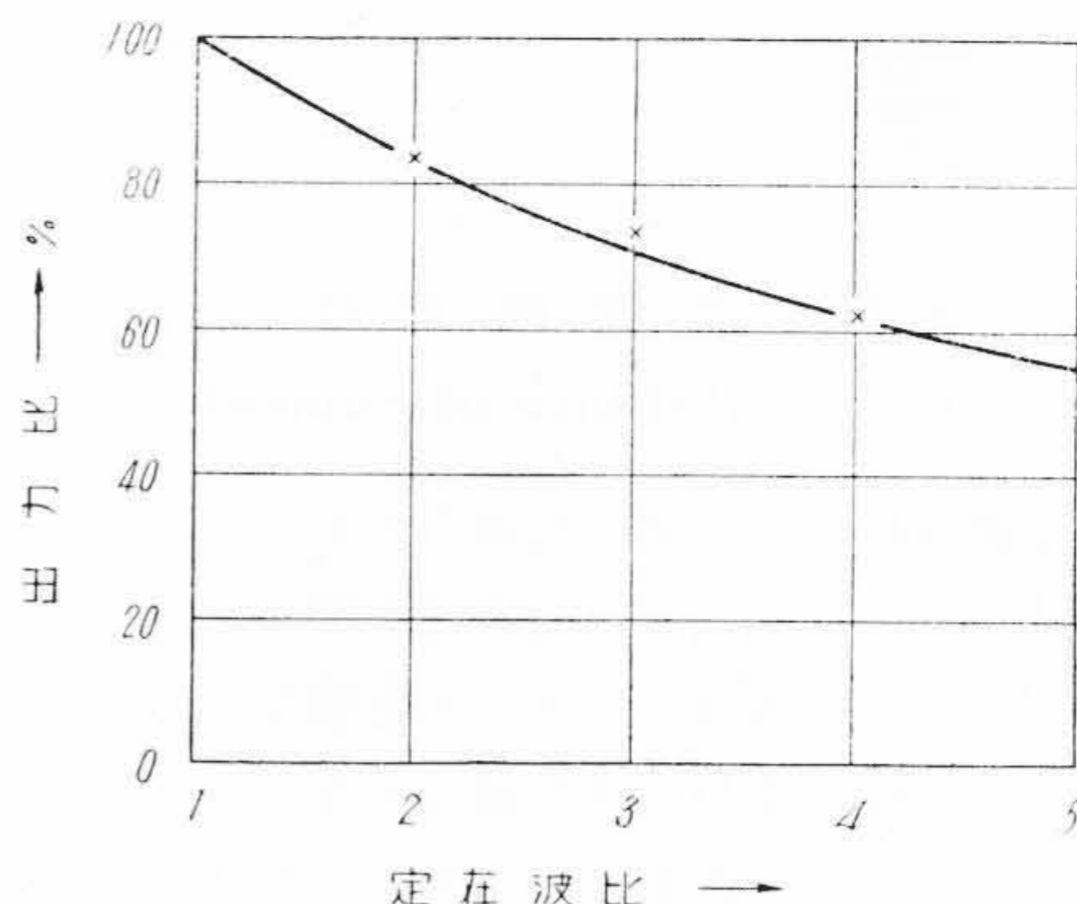


第9図 VHF用トランス使用状況
Fig.9. VHF Transformer in Service

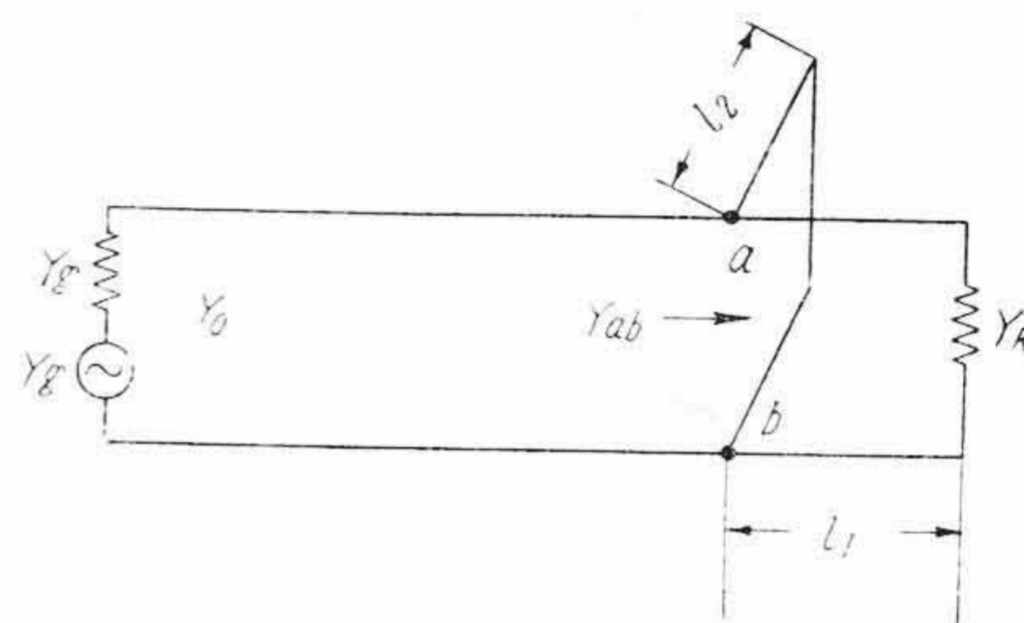
(3) 超短波インピーダンス整合装置⁽⁵⁾

同軸饋電線のインピーダンス変換回路にも種々のものが考案されているが、ここで使用した整合装置は東北大学内田教授の発案されたもので文献(5)に詳細な説明がある。第8図に示すように、2重の同軸パイプと短絡片AA, BBよりなり、整合すべき同軸ケーブルはCDにそれぞれ接続される。短絡片CC, DDによつて l_1, l_2 を変化して整合を行う。CC, DDの移動範囲は $l_1 \leq \lambda/2, l_2 \leq \lambda/2$ である。この整合装置の整合範囲は非常に広くて、実用上いかなる場合も整合可能である。第9図にその使用状況を示す。

以上述べたようにこの整合装置は便利なものであるが150 Mc帯で使用すると、約4mの長さになり取扱いに不便であるから、実際の通信設備に使用する場合には、 $\lambda/4$ の同軸を使用する通常の方法によつた方が機器が小型にできる。



第10図 定在波比と饋電線損失の関係
Fig.10. Feeder Loss vs. Standing Wave Ratio



第11図 終端整合回路
Fig.11. Matching Circuit of Feeder Termination

(4) 終端整合回路⁽⁶⁾⁽⁷⁾

一般に饋電線で高周波電力を送る場合、饋電線の終端でインピーダンス整合がとれていないと電力の反射が起り定在波を生じて、饋電線による損失の増加をきたす。第10図に200 Mcで測定された定在波による出力の減少を示す⁽⁸⁾。この実験では下記の方法によつて定在波比を1.6程度に押えてある。

平衡2線式の終端整合方式として

- (1) 単一スタップによるインピーダンス整合
- (2) 二重スタップによるインピーダンス整合
- (3) 三重スタップによるインピーダンス整合

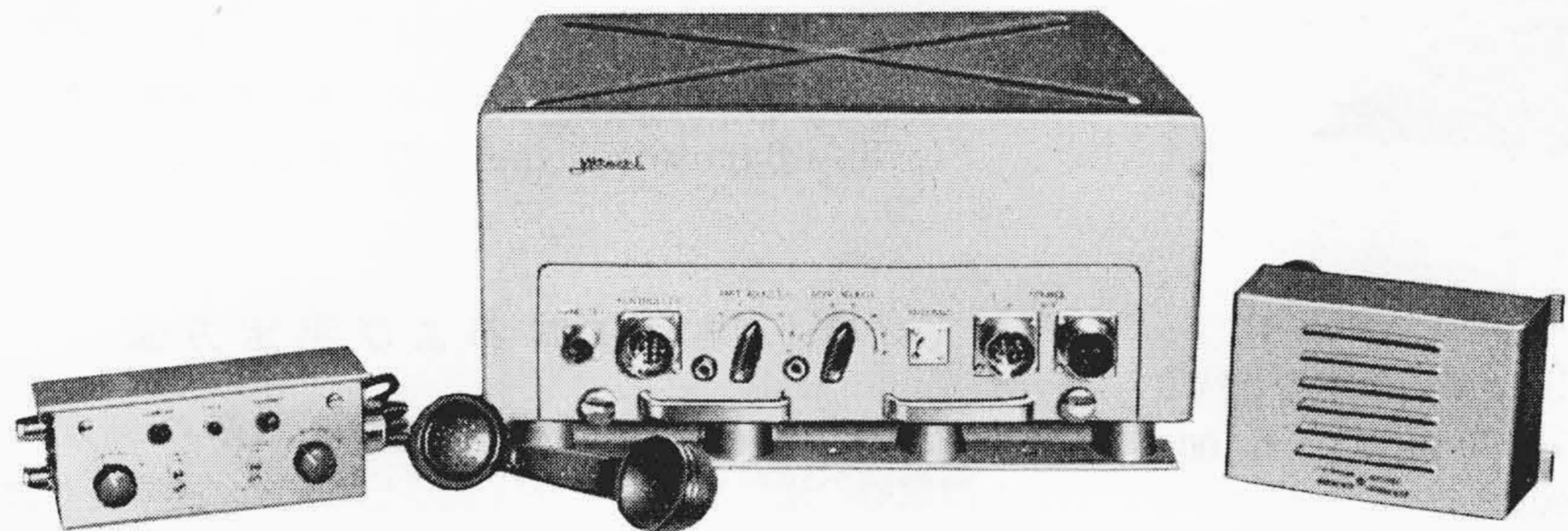
などの方法があり、(1)(2)(3)の順序で整合度は向上する。

フィールドテストには最も簡単な(1)の方法を使用して整合を行つた。第11図においてab点から負荷を見たアドミッタンス Y_{ab} を饋電線の特性アドミッタンスに等しくするために、負荷からスタップまでの間隔 l_1 およびスタップの長さ l_2 を可変にしておき l_1 によつて負荷アドミッタンス Y_R の実数部を饋電線アドミッタンス Y_0 に等しくし、 l_2 を変化して Y_R の虚数部を打消せばよい。 l_1, l_2 を実験的に決定するには、まずスタップを取外して定在波の最大電圧と最少電圧の値および負荷から最初の最大電圧点までの距離を求める。これらの測定値から計算によつて l_1, l_2 が求められる⁽⁷⁾。



第12図
SEM-252 型 150 Mc-FM
無線機外観図

Fig. 12.
Front View of Type
SEM-252 150 Mc-FM
Radio Equipment



第13図
SEM-251 型 150 Mc-FM
無線機外観図

Fig. 13.
Front View of Type
SEM-251 150 Mc-FM
Radio Equipment

(5) 固定局および移動局無線装置

実験に使用した無線機は日立製 SEM-252 型および SEM-251 型 150 Mc-FM 無線機と同等品で、前者は A.C. 100V を使用する可搬局用、後者は D.C. 6V を使用する移動局用であり、送受信機は同じものである。

第12図および第13図にその外観を示す。

大略の電氣的仕様は下記の通りである⁽¹⁰⁾。

送 信 機

通信方式.....プレトーク方式電話
周波数帯.....148~157 Mc
送信出力.....25 W 以上
変調方式.....リアクタンス管による等価周波数変調

最大周波数偏移..... ±15 kc
変調周波数..... 0.3~3 kc
通 倍 数..... 24 通倍
出力インピーダンス.....75Ω 同軸ケーブルに対して S.W.R. 2 以下で整合可能

不正輻射.....搬送波に対して -60db 以下
定 格

固定用.....連続
移動用.....10 秒動作 10 秒停止 1 時間

受 信 機

周波数帯.....148~157 Mc
受信方式.....水晶制御2重スーパーヘテロダイン方式

第1中間周波数..... 7.5 Mc

第2中間周波数.....455 kc
受信帯域幅.....6 db 低下で ±20 kc 以上
選 択 度....40 kc 離調で -80 db 以上
受 信 感 度.....

入力電圧 0.5μV で S/N 20 db 以上
スプリアス感度.....-80 db 以下
スケルチ動作範囲....入力電圧 0.5μV 以下から
5μV まで調整可能

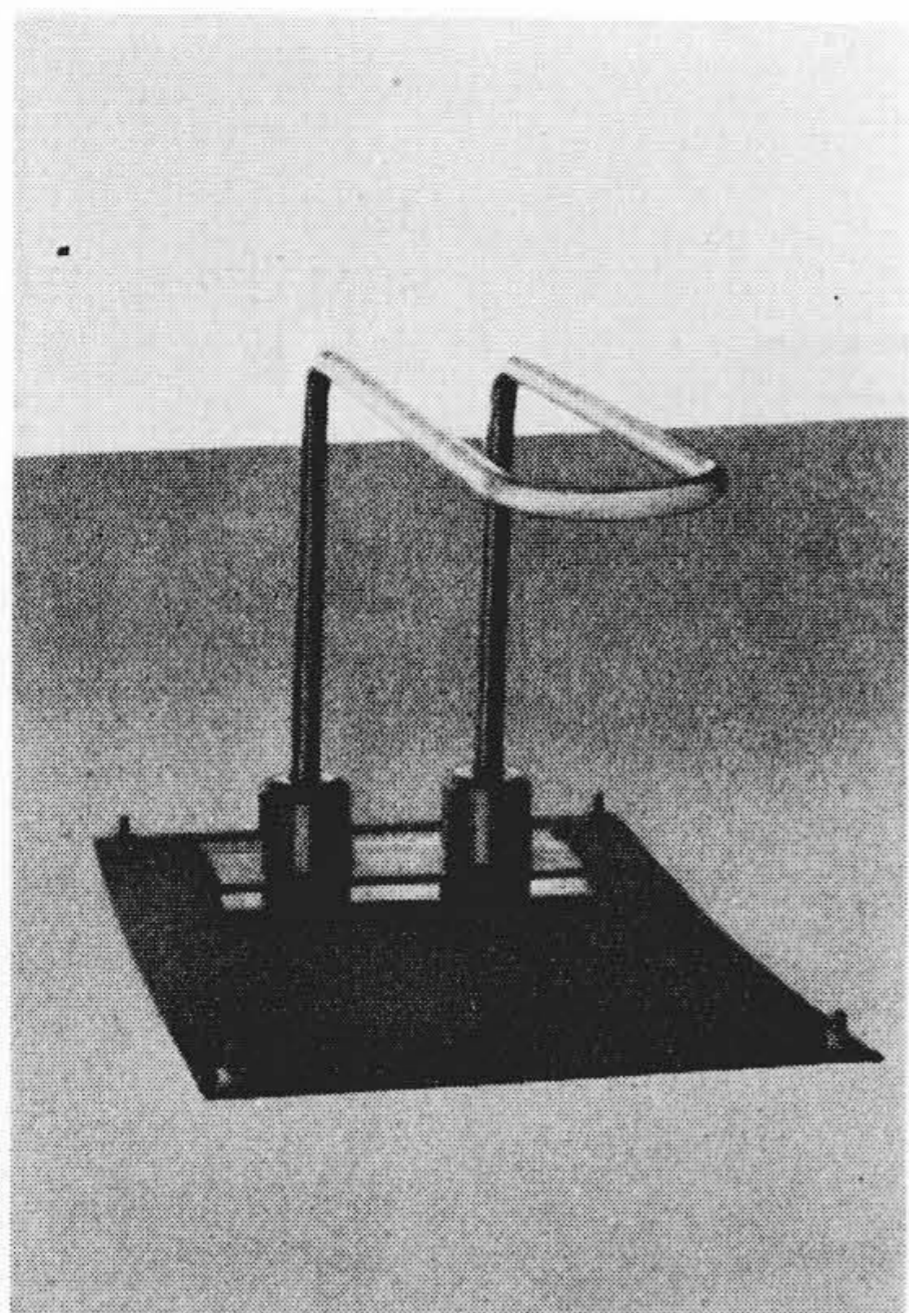
最大無歪出力....歪率 10% 以下で 1.5 W 以上
入力インピーダンス.....75Ω
定 格.....連続

(6) 移動局用空中線

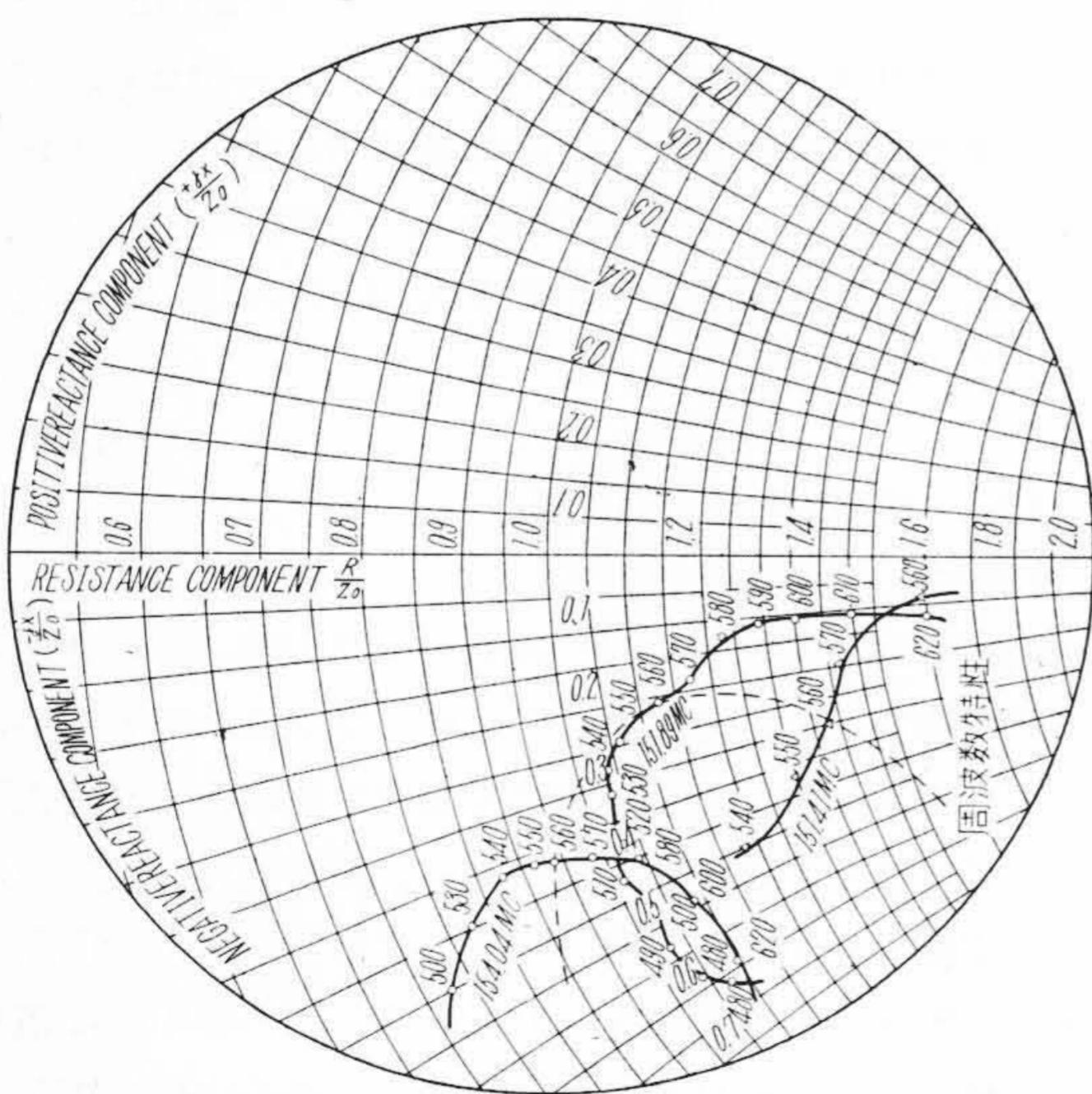
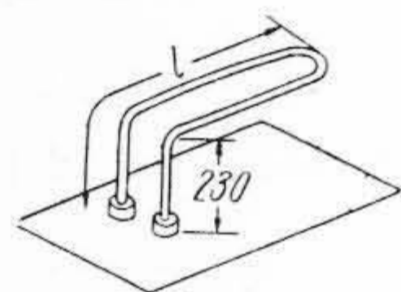
150 Mc 帯が使用されている空中線としてはホイップ空中線、ブラウン空中線、スリーブ空中線、その他指向性空中線として多くの種類のものが使用されているが、いずれもトンネル内を移動する電車で使用するには大型過ぎてほとんど使用不可能に近い。第14図(次頁参照)にこの実験に使用した VW-1-1006 型車載用無指向性空中線と饋電線の結合状態を示してある。この空中線は電車の車輻限界内に取付可能なもので、この空中線の電氣的性質は大略つぎの通りである。

(a) 空中線入力インピーダンス.....約75Ω
(b) 指 向 性.....無指向性
(c) 利 得.....0 db(ビーム空中線に対して)

高さは約 200 mm 以下である。第15図(次頁参照)に VW-1-1006 型空中線の水平部の長さを変化した場合の入力インピーダンスの変化を示す。点線は長さを 560 mm にした場合の入力インピーダンスの周波数特性を示

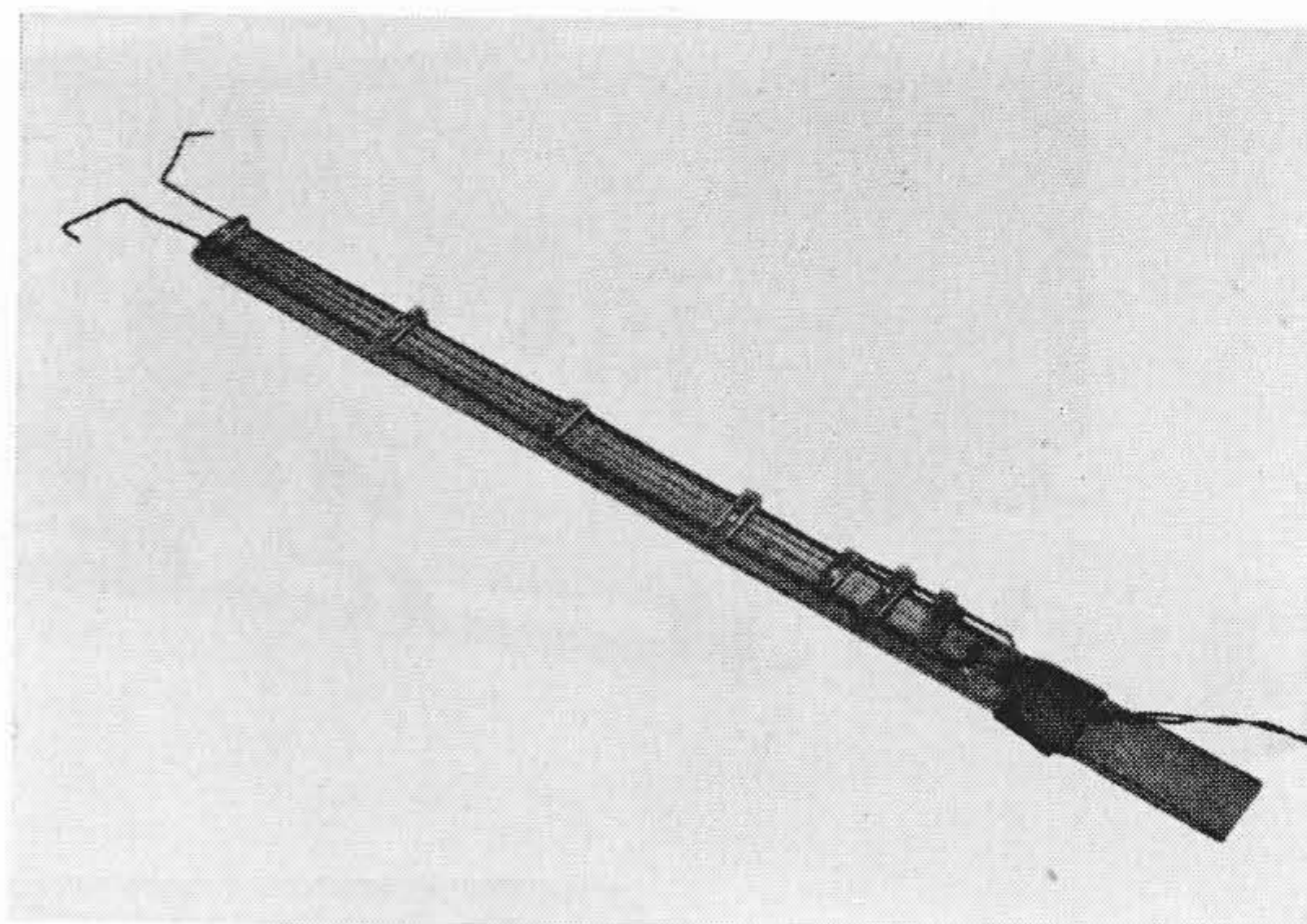


第14図 VW-1-1006型空中線と饋電線の結合状態
Fig.14. Coupling Status of Type VW-1-1006 Antenna and Feeder



第15図 車載用 VW-1-1006型 空中線のインピーダンス軌跡
Fig.15. Impedance Locus of Type VW-1-1006 Antenna

す。この実験では 151.89 Mc を使用したから空中線入力インピーダンスは $(88-j15)\Omega$ で働いていることになる。



第16図 平衡型 VHF 用電圧計 (長さ約 500 mm)
Fig.16. Balanced Type VHF Voltmeter

〔IV〕 測定項目および測定方法

(1) 平衡2線式饋電線の伝送能率の測定
饋電線の送信端附近と受信端附近において定常波の電圧または電流の最大値と最少値を測定すると次式からその点を通る電力が計算できる。

$$P = V_{max} \cdot V_{min} / Z_0 \dots\dots\dots (5)$$

$$P = Z_0 \cdot I_{max} \cdot I_{min} \dots\dots\dots (6)$$

ただし Z_0 : 饋電線の特徴インピーダンス

この実験では第16図に示す高周波電圧計を使用して第(6)式によつて饋電線の伝送能率の測定を行つた。

(2) 信号対雑音比の測定

送信出力を 1,000~ で変調し、受信機出力が 24db になるように受信出力を調整しておき、変調を切つて搬送波のみを受信したとき受信機出力に出る雑音をレベルメータで測定し、両者の比から S/N を求める。

(3) 通話の明瞭度の判定

QRK による。

〔V〕 測定結果

(1) 伝送能率 約 21 db/km

(2) 信号対雑音比

固定局、移動局ともに送信出力 25 W で饋電線の両端において測定した。

固定局→移動局

S : 24 db N : -16 db S/N : 40 db

移動局→固定局

S : 24 db N : -20 db S/N : 44 db

通話の明瞭度はいずれも 5 で非常に良好である。

(3) 上り線、下り線の位置による受信入力之差
饋電線はトンネル内の上り線に沿つて設置されたので下り線に電車が在る場合には当然受信入力が増加する。

上り線	受信入力	65 db
下り線	受信入力	52 db

上記の受信入力 は 700 m の饋電線に沿って移動する場合固定局からの距離が増加するにしたがつて多少、小さくなるのが認められるがほとんど一定である。

〔VI〕 実験結果の検討

(1) 饋線電の伝送能率

この項に関しては文献(1)に詳細に述べられている通り理論計算および工場内で等価実験を行い種々の状態における伝送損失が求められているが、本実験においても同一の値がえられている。

饋電線の伝送能率に対してはトンネル内の塵埃、湿度、などによる劣化を防止する必要がある。トンネル内はレールと電車の車輪の摩擦によつて生ずる鉄粉が多く、碍子によつて支持された饋電線では碍子の汚染による伝送能率の劣化が予想される。

これの防止には $\lambda/4$ の長さのトラップを碍子の代りに使用すればよい。 $\lambda/4$ トラップを使用すると碍子を使用する場合に比して伝送能率の劣化を減少できるほかに、伝送損失自身を減少し、かつ饋電線の建設が容易になる利点がある。

(2) 信号対雑音比について

固定局、移動局ともに 40~50 db の S/N がえられているが、この値は受信機測定室(シールドルーム)のうちで信号発生器を使用して測定される値とほとんど同じでこのことは結局雑音入力の少いことを示しており、電車による電氣的雑音のうちには 150 Mc 帯の雑音はきわめて少いことを示している。

(3) 通話実験

前項(3)の結果を見ると、上り線、下り線ともに饋電線の送信端においても受信端においてもほとんど同一の受信入力のあることを示している。20 db/km の饋電線を使用しているので送端と受端では $20 \times 0.7 = 14$ db の電界強度の差がでてくるものと考えられるが、この差がでてこないのは受信入力の測定誤差、饋電線からの輻射電界がトンネルによつて制限されることによる輻射電界の変形などが重なつて現われたものと思われる。結果的には、見掛け上、饋電線の伝送能率が向上したように見られるが、さらに理論的または実験的に検討してみたいと思う。

上り線、下り線の受信入力の差は 13 db あるが、この方式によれば饋電線からの輻射電界は相当強くでていることを示しており、上り線、下り線を一つの饋電線で通信することが可能である。

〔VII〕 結 言

(1) 送信出力と通信可能距離

本実験に使用した平衡2線式饋電線を使用した場合の送信出力と通信可能距離を上記の実験結果に基づいて計算すると下表の通りになる。

ただし、受信入力には本実験に使用した SEM-251 型 150 Mc-FM 無線機の所要最低受信入力の 10 倍にとり饋電線能率は 20 db/km とする。

送信出力	通信可能距離
10 W	約 5.0 km
25 W	約 5.2 km
50 W	約 5.4 km

したがつて元町一岩屋間約 3.2 km のトンネル内の通信に必要な送信出力は 10 W で十分である。

なお上に示した通信可能距離は饋電線能率を 20 db/km にとつてあり、 $\lambda/4$ トラップを使用すると 15 db/km 程度に減少できるからさらに通信可能距離は増加して行く。

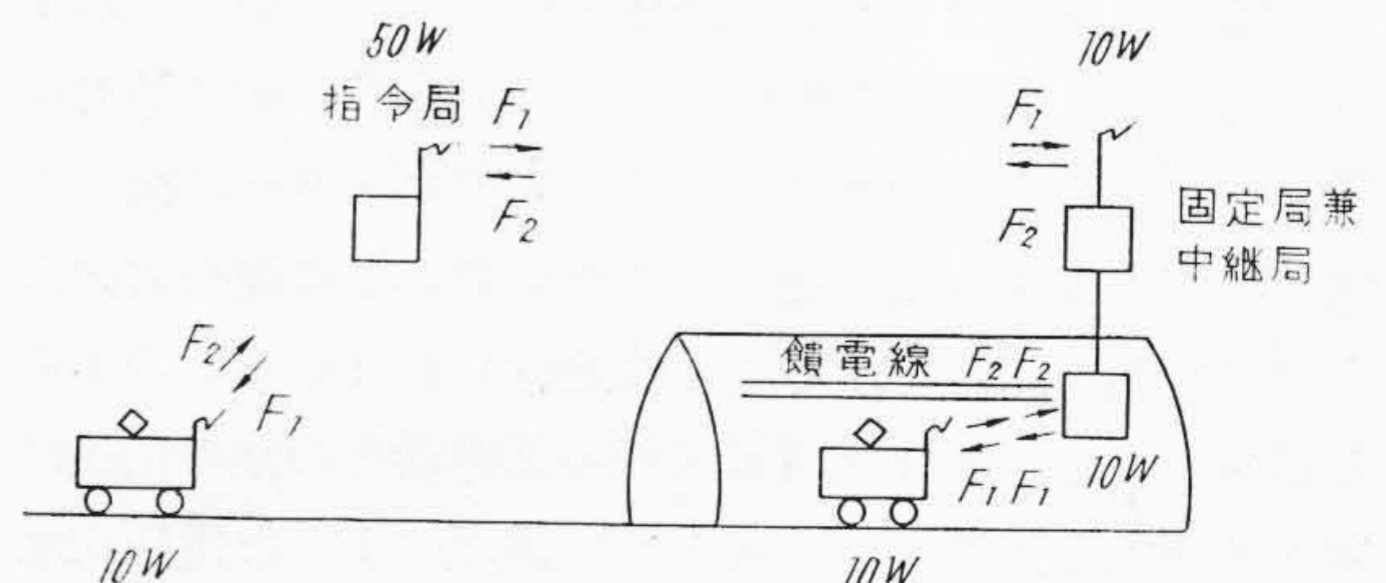
(2) 平衡2線式饋電線について

前記の通達可能距離は饋電線と移動局空中線を第3図のように結合させた場合で、上り線、下り線2組の饋電線を使用することにしてあるが、結合を少し疎にして結合損失を 60~70 db 程度まで許して使用すれば上り線、下り線に1組の饋電線を使用して通信できる。この結合損失の増加は、饋電線の支持に $\lambda/4$ スタップを使用することによる饋電線伝送損失の減少で補うことができる。

また、上り線、下り線がコンクリートの壁などでシールドされている場合にはその部分だけは別々の饋電線を使用する必要があるので電力分配の問題がでてくるがこれは容易に実現可能である⁽³⁾。

(3) 通信系の一案

〔II〕に述べたように、一つの固定局を中心としてトンネルを全走線路を移動中の電車との間の通信を同時送受話方式で行うための通信系の一例としては第17図のようなものが考えられる。



第17図 通信系の一案
Fig. 17. One Example of Communication System

これは指令局から全部の電車と通信するものとし、トンネル末端に固定局兼中継局を設けつぎのような動作を行わせるものである。

- (a) 指令局よりトンネル外を移動中の電車に対しては直接通信する。
- (b) トンネル内移動中の電車に対しては、指令局→固定局兼中継局を経て通信する。
- (c) 固定局兼中継局と指令局間の固定通信を行う。

以上要するに今回の実験によつて、トンネルを含んだ通信系に 150 Mc-FM 無線電話を実施して有効に実用しうる見透しがたてられたが、この 150 Mc-FM 無線電話方式を利用することによつて

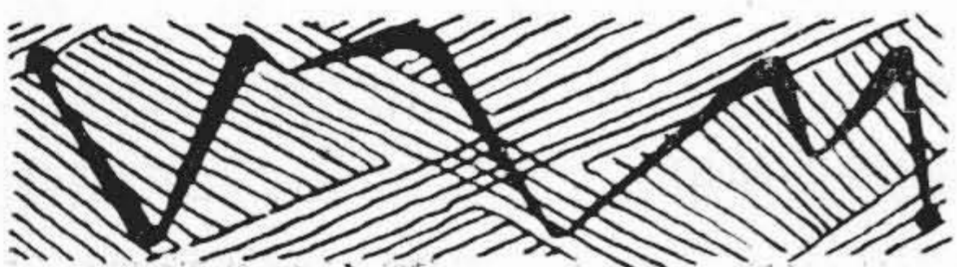
- (a) 超短波 FM 無線の大きな特長である電車のパングラフ、トロリー間のスパークによる雑音およびその他電気機械から発生する雑音による妨害を受けることがきわめて少ないことによつて、明瞭な通信ができる。
 - (b) トンネル内以外では通常の無線通信を行うことができるから風水害その他の事故で架線が断線したような災害時にも常に通信できる利点がある。
 - (c) 通信系全体を VHF 1本で構成できる。
- など列車無線として非常に特色のある通信系を構成する

ことができる。今後さらに種々の実用実験を進めて行くことにより、将来この特色ある通信系の実用化を計りたいと考えている。

本実験の実施に当り終始御指導をいただいた東北大学永井教授佐藤助教授、佐藤氏、永井氏、阪神電鉄株式会社野田技師長、那須部長、山本課長を始め通信課の方々、日立製作所戸塚工場幹部の方々、また直接実験に御協力いただいた検査課白川氏に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- (1) 佐藤, 佐藤, 永井: 日立評論 36 1527 (昭 29-10)
- (2) 内田: 通信学会誌 (昭 21年9月)
- (3) 内田: 通信学会誌 (昭 22年10月)
- (4) McGlaw Hill: Radio Research Laboratory Staff, Very High Freq Techniques, Vol. I p. 86
- (5) 内田: 通信学会論文集 第1輯 (昭 23年3月)
- (6) 岡村: 通信学会誌 (昭 24年11月)
- (7) A.B. ブロンウェル R.E. ビーム 極超短波工学 無線従事者教育協会
- (8) 同 (4) Vol. I p. 230~237
- (9) 長浜, 佐々木: 日立評論 35 1319 (昭 28-9)



特許の紹介

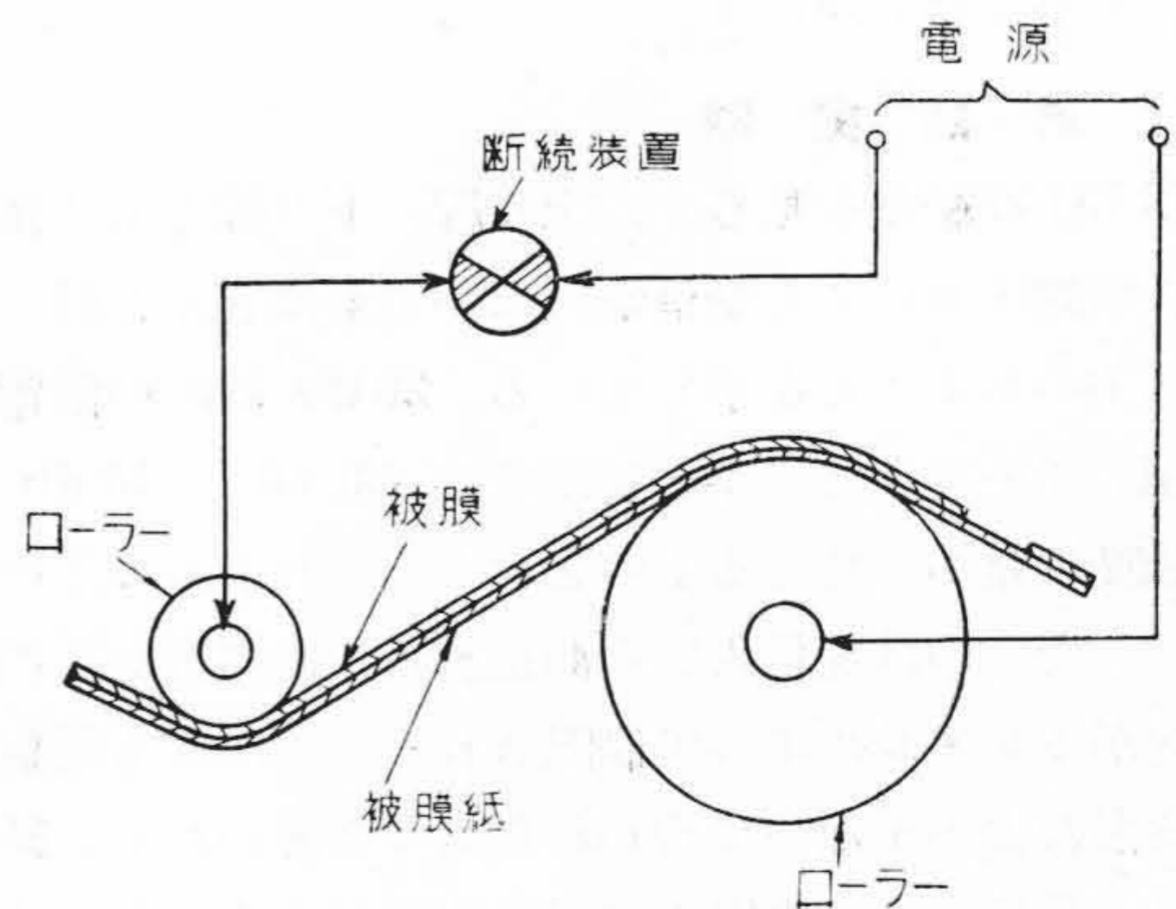


特許第193059号

山辺知定

金属被膜紙処理方法

蓄電器紙その他の絶縁紙に、亜鉛その他の金属蒸気を被着させたいわゆる金属被膜紙の被膜構成後、その耐電圧を向上させるため図に示すように金属被膜紙を張架するローラーと被膜との間に適当な電圧を印加して、金属被膜紙の絶縁紙部分中の低耐電圧点を通じて、瞬間的絶縁破壊を起させこの放電電流により破壊点の周囲の金属被膜を蒸発逸散させることにより、金属被膜紙からこの低耐電圧点を除去することは従来周知であるが、このような方法による実際の操作に当つて金属被膜紙は弾力を受けつゝ進行する過程において、帯電ローラーに接して電氣的引力により吸着せられるため被膜紙に進行方向に直角の方向の皺が生ずることは避けられない。このような皺を生ずることは金属被膜紙の蓄電器その他の用途に対する重大な障害をなすとともに前記のような電圧印加処理過程において、金属被膜紙とローラーとの間に間隙を生ずるため皺の部分の被膜紙の厚み自体に加わる電圧は著しく軽減せられる結果となり、低耐電圧点の検出を



第1図

きわめて不正確なものとするを免れない。本発明はこのような欠点を解決するために金属被膜紙の耐電圧の低い点の金属被膜を除去するため、金属被膜紙を通してその厚み方向に印加せられる電圧を断続することを特長とするものである。

(高木)