

# 通信ケーブルの鋼管による電磁誘導遮へい

## Electromagnetic Shielding of Communication Cable by Steel Pipe

岡 本 邦 彦\* 森 田 昌 康\*  
Kunihiko Okamoto Masayasu Morita

永 野 宏 郎\* 花 岡 利 男\*  
Hiroo Nagano Toshio Hanaoka

### 内 容 梗 概

通信ケーブルの外部からの誘導を防ぐためには、通常電磁遮へいケーブルが用いられている<sup>(1)~(4)</sup>。しかしさらに外部誘導が大きい場合にはこれだけでは十分でないので、通信ケーブルを鋼管中に布設する<sup>(2)</sup>ことを検討した。鋼管は継目がなく鉄量が大きいので遮へいのための逆電圧発生には有利であるが、それと同時に鉄量を有効に生かす接地方式を検討する必要がある。本文においては鋼管およびケーブルのアルミシースの接地の各種組み合わせについて遮へい係数を測定し、特に接地抵抗と接地方式の関係について考察を行なった。

### 1. 緒 言

電磁遮へいケーブルの遮へい係数を良好にするためには通常二つの方法がある。まずケーブルシースの導電層の抵抗を小さくすることで、これは、最近アルミシースの押出技術が確立したので解決したと考えられる。

次に誘導電圧の大きな区間においては、鉄遮へい層を多量にケーブルに巻く必要があるが、ケーブルのたわみ性、その他の面で限界が出てくる。

本報告は、このような区間を対象として、鋼管を布設しこの中にプラスチック保護層を有するアルミシース通信ケーブルを引き込んだ場合の遮へい特性を検討したものである。

鋼管にケーブルをそう入布設する場合、通常の鋼帯を巻いた重遮へいケーブルと比較して特に注意しなければならない点は、次の諸点と考えられる。すなわち鋼管は継目が無いので大きなインダクタンスを得られること、鋼管の直流抵抗が小さいので鋼管中に多量の電流が流れること、および鋼管とアルミシースの接地をそれぞれ独立に考えられることなどである。これらの点に注目して検討した結果鋼管およびアルミシースの接地の各種組み合わせにより遮へい係数に大きな差異が見られることが判明した。

### 2. 鋼管遮へいの遮へい係数の計算

#### 2.1 複合層の遮へい係数

半径  $R_0$ 、肉厚  $b$  の鋼管の中に肉厚  $a$  の導電シースを引き込んだ場合の遮へい係数は、接地抵抗を考えに入れずに次のとおり計算される。

$$\rho_2 \frac{di_2(r)}{dr} = j\omega \frac{\mu_0 \mu}{2\pi R_0} \left( i_1 a + \int_0^r i_2 dr \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\mu_0, \mu_0 \mu$ ：導電層および鉄遮へい層の透磁率

$\rho_1, \rho_2$ ：導電層および鉄遮へい層の単位厚さ当たりの抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )

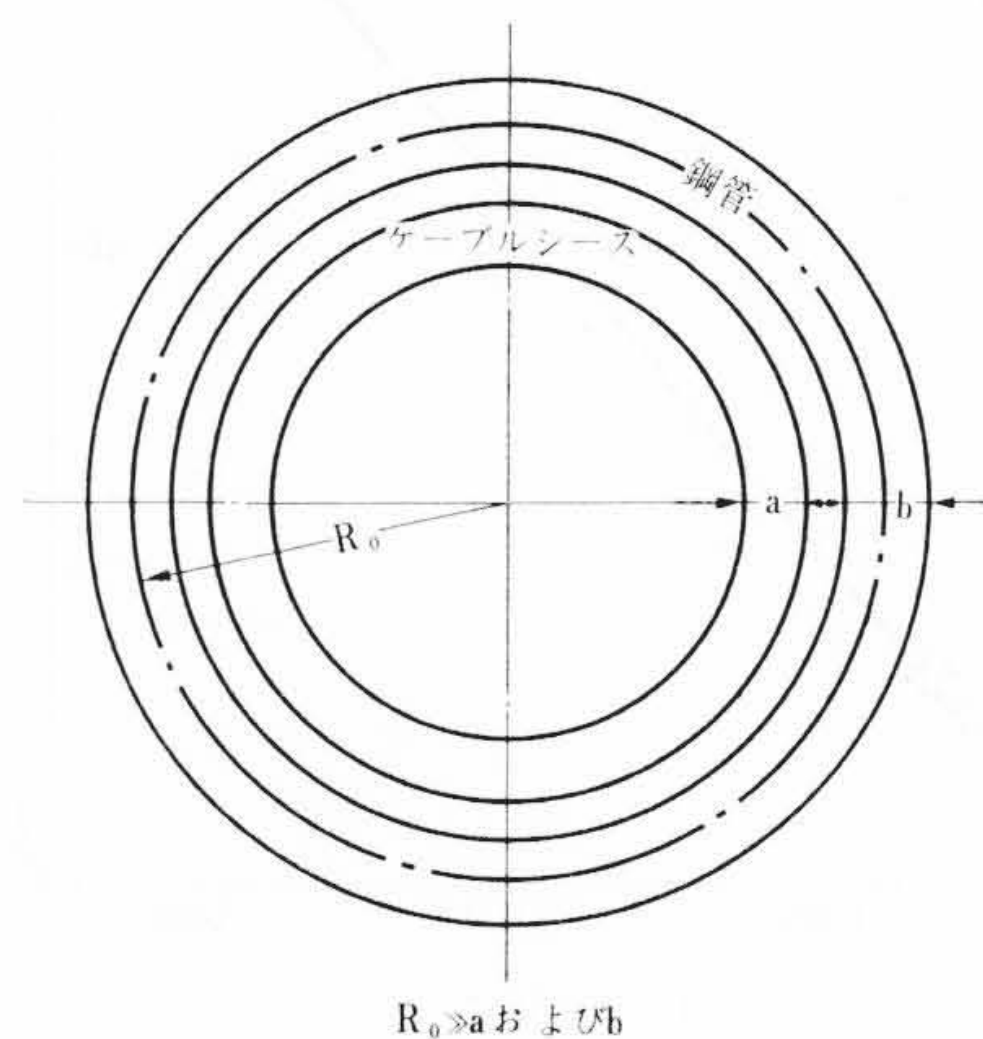
$i_1, i_2$ ：導電層および鉄遮へい層の単位厚さ当たりの電流 (A/m)

(導電層中で表皮効果を無視できると考えて、 $i_1 = \text{const}$ )。 $r$  は鉄遮へい層の内側からの距離である。

$a, b$  は  $R_0$  に対して十分小さいと考える。

遮へい係数は (1) 式より鉄遮へい層中の電流分布を計算し、複合層の内外表面の電流分布の比により求められる。すなわち

\* 日立電線株式会社日高工場



第1図 鉄パイプ中にそう入したアルミ被ケーブル

$$\frac{d^2 i_2(r)}{dr^2} = j \frac{\omega \mu_0 \mu}{2\pi R_0 \rho_2} i_2 = k^2 i_2 \dots \dots \dots (2)$$

(1) 式、(2) 式および境界面の連続条件から次式が得られる。

$$i_2(r) = \frac{\rho_1}{\rho_2} i_1 \cosh kr + k i_1 a \sinh kr \dots \dots \dots (3)$$

遮へい係数は

$$\eta = \frac{\rho_1 i_1}{\rho_2 i_2(b)} = \frac{1}{\cosh kb + \frac{j\omega L + r_0}{\rho_1/a} \cdot \frac{\sinh kb}{kb}} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\mu'$ 、 $\mu''$  および  $\rho_1$  と  $\omega L$ 、 $r_0$  および  $\rho_1/a$  の関係を次のように考えている。

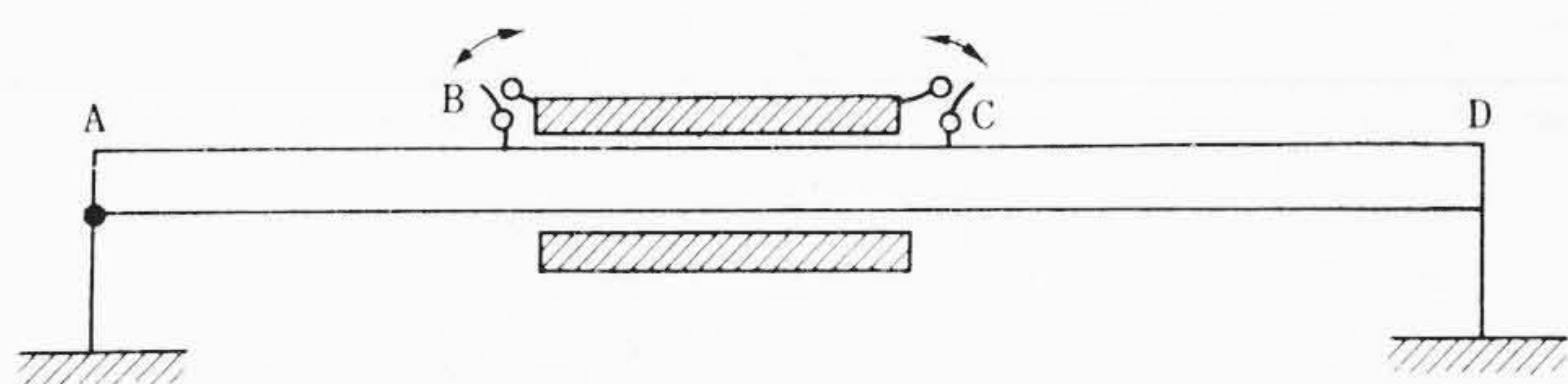
$$kb = (1+j) \frac{b}{\delta} = \sqrt{\frac{j\omega \mu_0 \mu}{2\pi R_0 \rho_2}} \cdot b \\ = \sqrt{\frac{j\omega \mu_0 (\mu' + j\mu'')}{2\pi R_0}} \cdot b / \sqrt{\frac{\rho_2}{b}} = \sqrt{\frac{j\omega L + r_0}{\rho_2/b}}$$

ただし、 $\rho_1/a, \rho_2/b$ ：導電層および鉄遮へい層の直流抵抗 ( $\Omega$ )

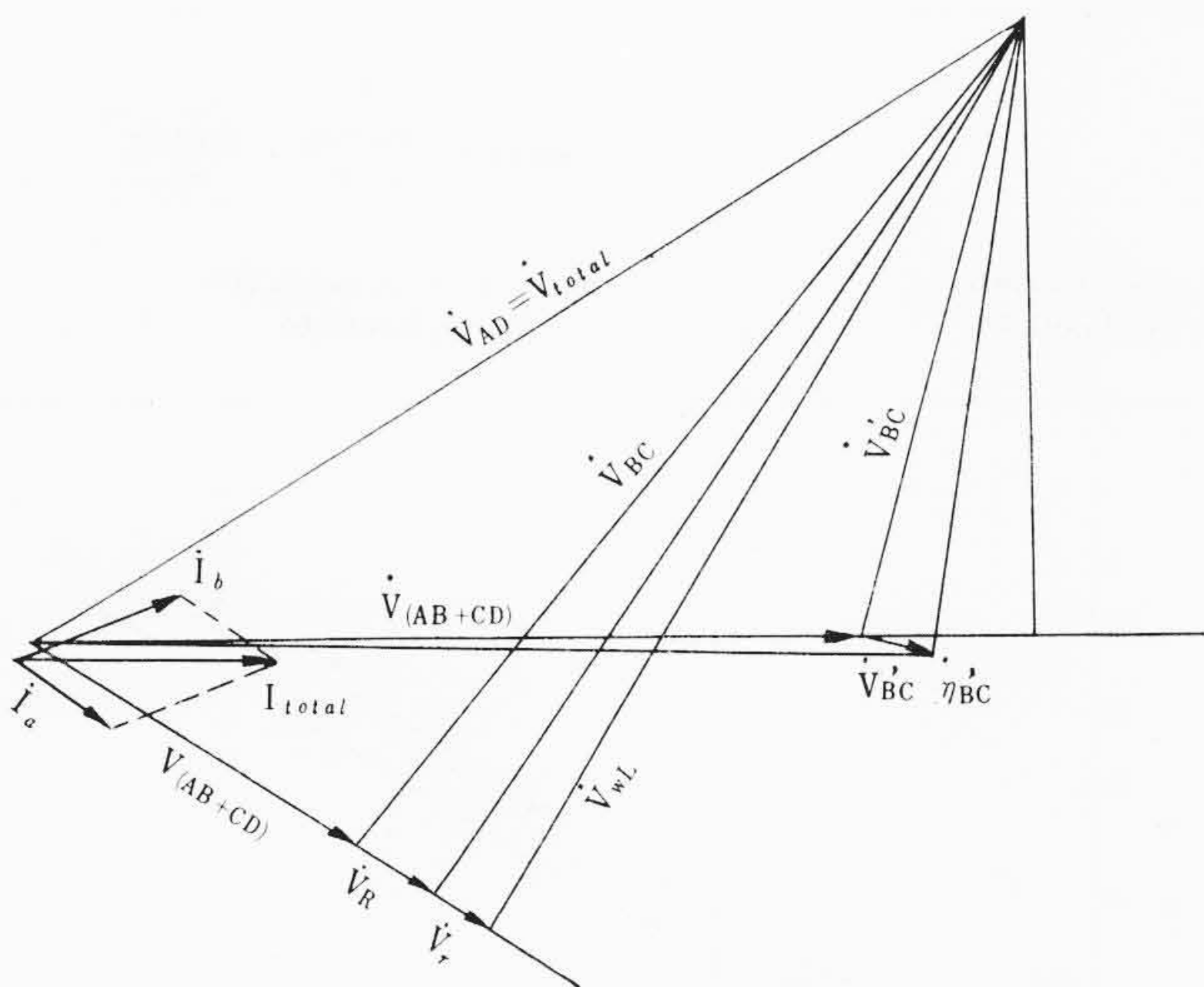
$\omega L, r_0$ ：鉄遮へい層のインダクタンスおよび鉄損 ( $\Omega$ )

$\delta$ ：鉄遮へい層の表皮厚 (m)

(4) 式は一般式で、遮へい層と導電層をボンドした場合の遮へい係数が各層の直流抵抗とボンドしない場合の鉄層のリアクタンスから計算できることを示した。鉄層だけの遮へい係数は (4) 式分母の第1項だけで決まり、 $kb$  すなわち鉄層の肉厚と表皮厚の比が大きいほど良好な遮へい係数が得られる。鉄層をボンドしないで導電層だけを接地したときの遮へい係数は  $kb=0$  として次式の周知の式と



第2図 ケーブルの一部区間に鋼管をそう入した場合  
(ケーブル全長AD区間, 鋼管BC区間)



第3図 BC区間鉄層ボンド, 非ボンドの場合の  
遮へいベクトル線図

なる。

$$\eta_0 = \frac{\rho_1/a}{\frac{\rho_1}{a} + (j\omega L + r_0)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

すなわち接地抵抗が0の場合には、 $|\eta| < |\eta_0|$ のことは明らかで、鉄層をボンドしたほうが遮へい係数は良好である。

## 2.2 接地抵抗の影響

複合層の両端における遮へい係数は上述のように鉄層をボンドした場合のほうが良好であるが、ケーブルの一部区間に鋼管をそう入した場合または、接地抵抗がある値以上になると、鉄層ボンドの場合のほうが全体としての遮へい係数が悪くなることが認められた。この状況を第2図および第3図を用いて説明する。

第2図においてケーブルの接地一区間AD中の一部分BCに鋼管をそう入した場合の遮へい係数を考える。B点、C点においてケーブルのアルミシースを鋼管にボンドした場合およびボンドしない場合の電圧電流のベクトル線図を第3図に示した。ボンドしない場合には、アルミシースには、 $i_a$ なる電流が流れ、ABおよびCD区間シース抵抗の電圧降下は $\dot{V}_{(AB+CD)}$ となる。BC区間での遮へい係数は(5)式の $\eta_0$ で、全区間の総合遮へい係数は

$$\dot{\eta}_{total} = \frac{\dot{V}_{(AB+CD)} + \dot{V}_R}{\dot{V}_{AD}} = \frac{R_{(AB+CD)} + R_{BC}}{R_{(AB+CD)} + R_{BC} + r_0 + j\omega L_{BC}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ボンドした場合には鉄層中に電流 $i_b$ が流れ、全電流は $i = i_a + i_b$ と増加するので、(AB+CD)区間の抵抗降下が増加する。すなわちBC区間にかかる電圧 $V'_{BC}$ が減少するので、この区間での遮へい係数はボンドしない場合よりも小さいにもかかわらず、全区間としての遮へい係数は逆に増加する。すなわち、

$$\begin{aligned} \dot{\eta}'_{total} &= \frac{\dot{V}_{(AB+CD)} + \dot{V}'_{BC} \cdot \dot{\eta}'_{BC}}{\dot{V}_{AD}} \\ &\doteq \frac{R_{(AB+CD)} + |\rho_2 k \coth kb| \cdot |\dot{\eta}'_{BC}|}{R_{(AB+CD)} + \rho_2 k \coth kb} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここに $\eta'_{BC}$ は(4)式で得られる遮へい係数である。また $\dot{V}'_{BC} \cdot \eta'_{BC}$ と $\dot{V}'_{(AB+CD)}$ はほぼ平行と考えている。

$$\frac{\dot{V}'_{BC}}{\dot{I}} = \frac{\rho_2 i_2(b)}{i_1 a + \int_0^b i_2 dr} \doteq \rho_2 k \coth kb$$

第2図は、ケーブルの区間の一部に鋼管をそう入した場合について考えたが、AB区間およびCD区間のケーブルシースの抵抗を接地抵抗 $R_e$ として、全区間を鋼管にそう入した場合の遮へい係数も、非ボンドの場合についてそれぞれ(6)、(7)式が成立する。この場合は、 $R_{(AB+CD)}$ を $R_e$ と書き変えて得られる。 $R_e$ は接地抵抗( $\Omega$ )である。

## 3. 実際の測定結果

### 3.1 2インチ鋼管による測定

実際の測定は、5 mの2インチ鋼管中にアルミシースケーブルを引き込み、第4図の測定回路を用いて測定した。鋼管にはJISに規定された2インチの市販のものをを用い、内径53.5 mm $\phi$ 、肉厚3.5 mmのものである。アルミシースケーブルは直径約40 mm $\phi$ 、直流抵抗0.1584  $\Omega$ /kmでアルミシース上に防食層を有するものである。第4図の測定回路で、遮へい係数は次式によって求められる。

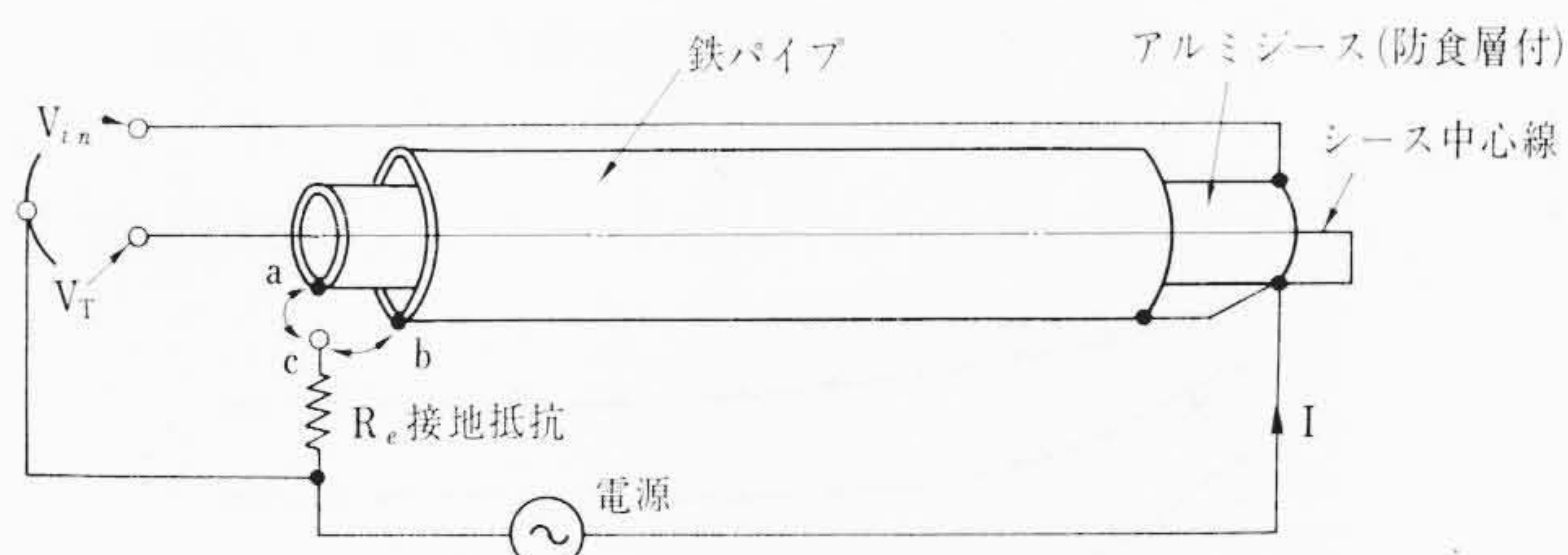
$$|\eta| = \frac{V_T}{\dot{V}_{in}} = \frac{I(R_e + Z_T)}{I(R_e + Z_{in})} = \frac{R_e + Z_T}{R_e + Z_{in}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $Z_T$ : 複合遮へい層の結合インピーダンス

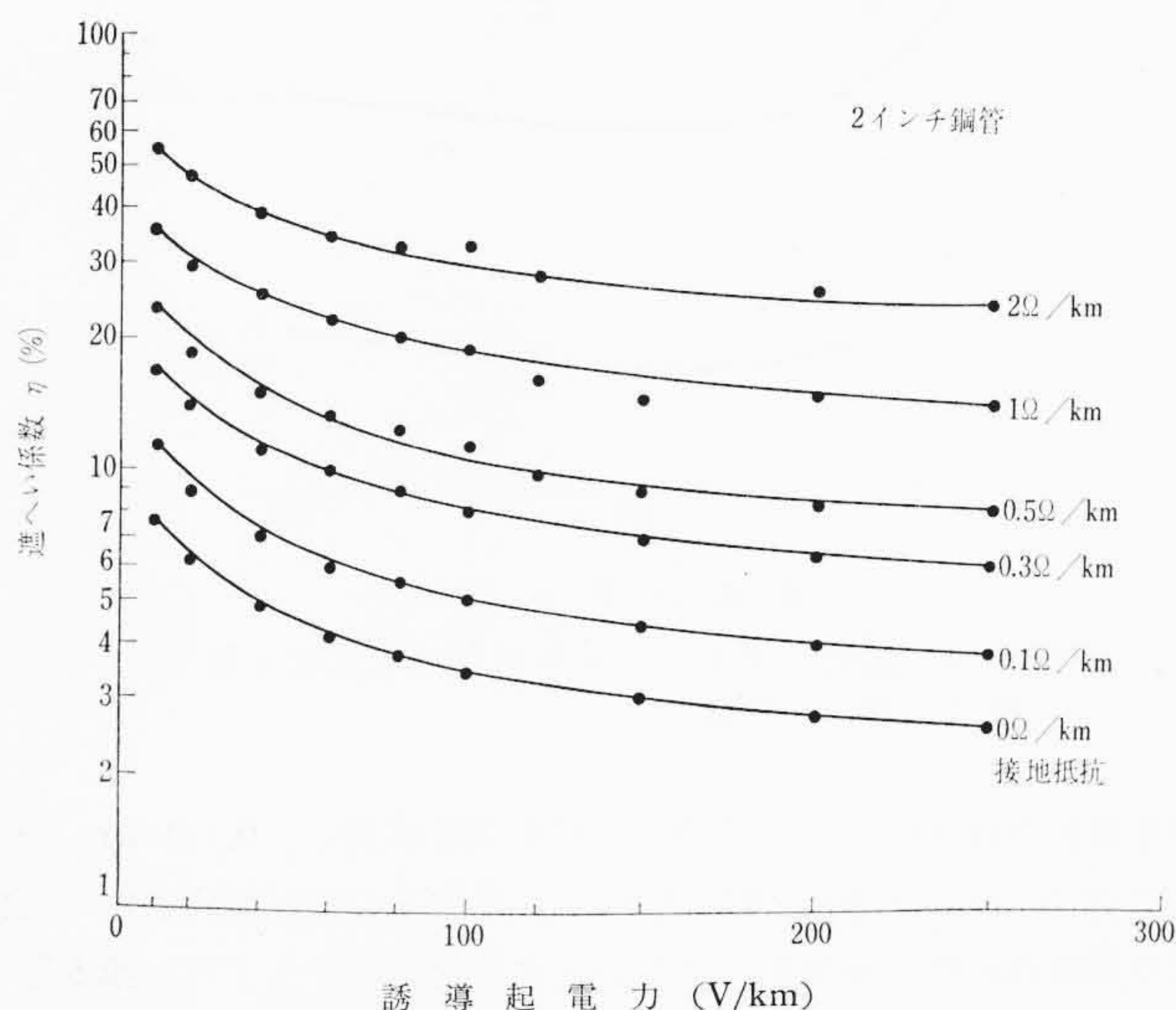
$Z_{in}$ : 複合遮へい層の入力インピーダンス

鋼管とアルミシースの接地、非接地の組み合わせ3通りについて接地抵抗を変えた場合の遮へい係数がそれぞれ測定され、これを第5～7図に示した。この三つの場合の遮へい係数は(6)、(7)式より計算できるもので、これを第1表に示す。

第6図と第7図を見ると、(II)と(III)は接地抵抗0の場合を除きほとんど等しい曲線となっている。接地抵抗の影響はともに大きく、



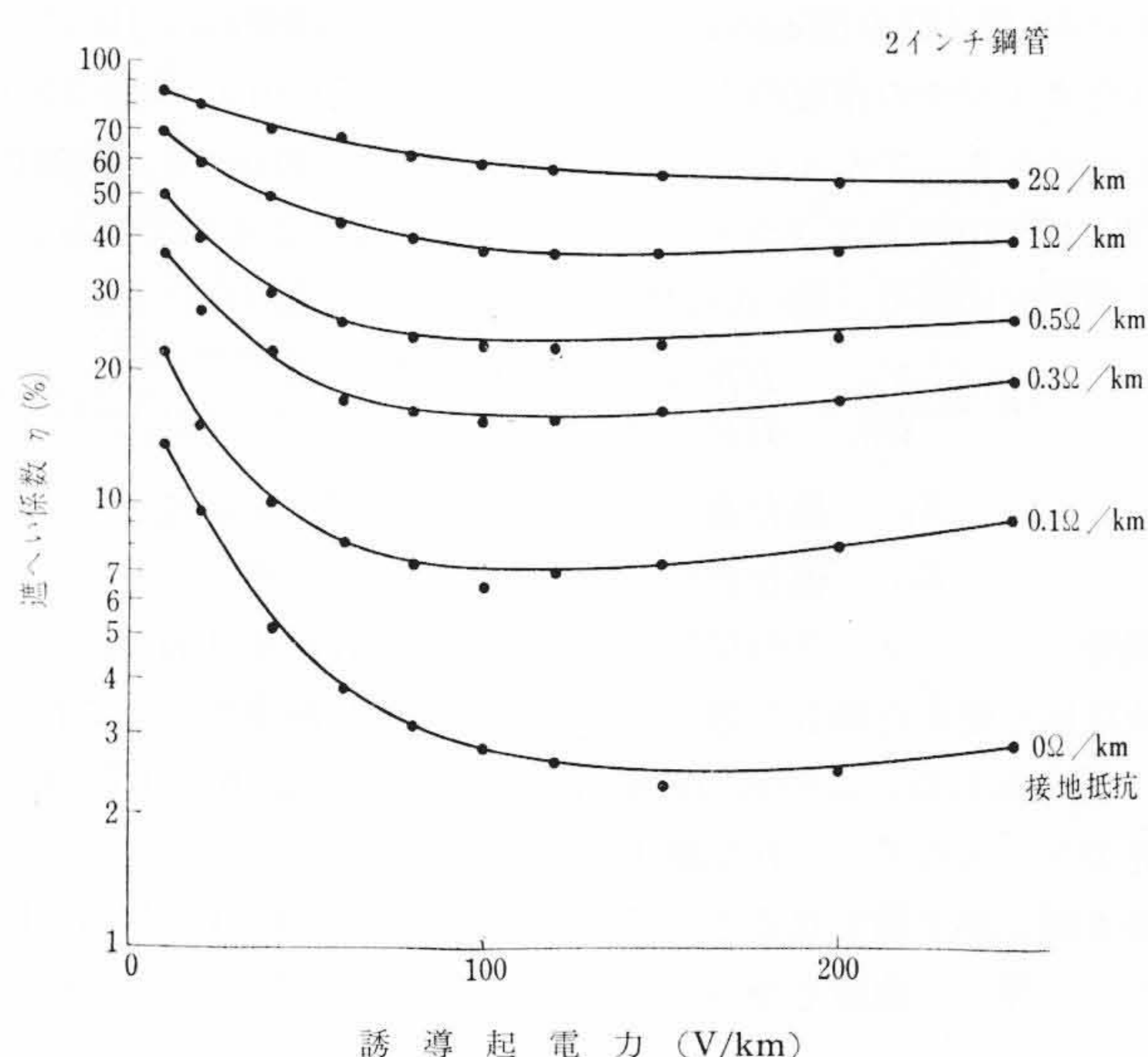
第4図 遮へい係数の測定回路



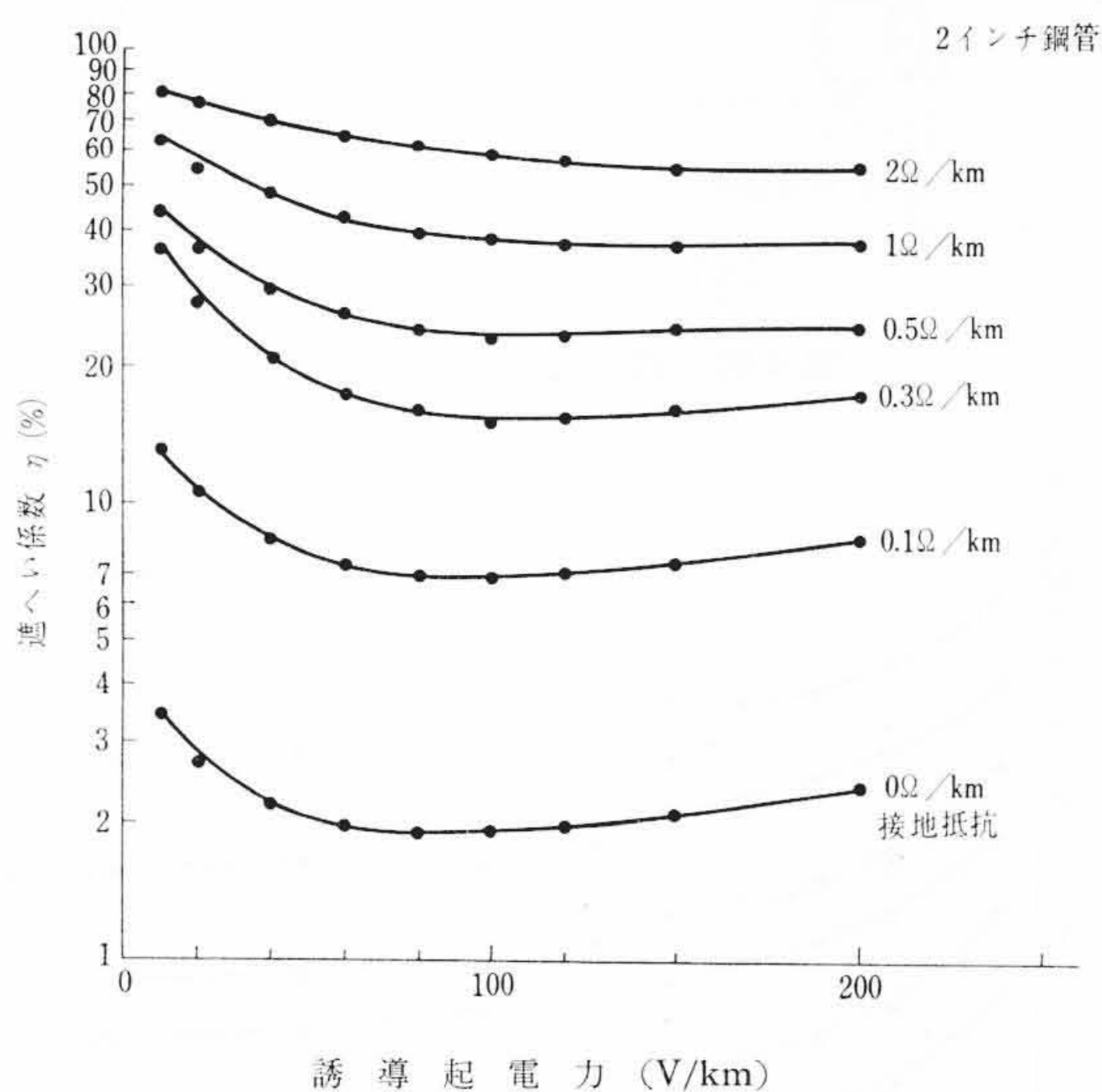
第5図 アルミシースだけに電流を流した場合  
の遮へい係数

第1表 遮へい層の接地条件による遮へい係数

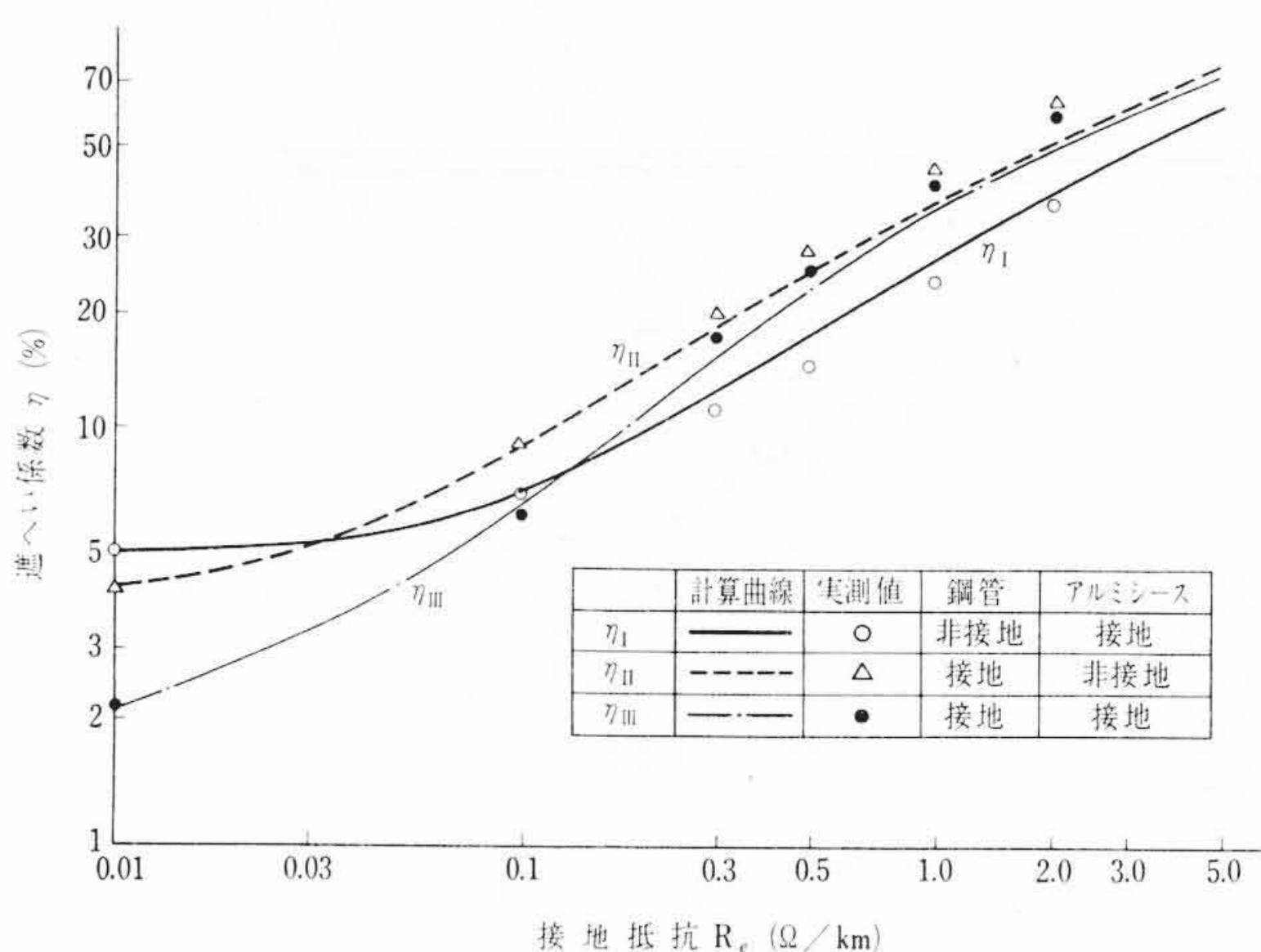
| 図番号                    | (I) 第5図                                                                   | (II) 第6図                                                               | (III) 第7図                                                                                         |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 鋼管<br>アルミシース           | 非接地<br>接地                                                                 | 接地<br>非接地                                                              | 接地<br>接地                                                                                          |
| $\dot{Z}_T$            | $\frac{\rho_1}{a}$                                                        | $\frac{k\rho_2}{\sinh kb}$                                             | $\frac{\rho_2 k \coth kb}{\coth kb + \frac{j\omega L + r_0}{\rho_1/a} \cdot \frac{\sinh kb}{kb}}$ |
| $\dot{Z}_{in}$         | $\frac{\rho_1}{a} + j\omega L + r_0$                                      | $\rho_2 k \coth kb$                                                    | $\rho_2 k \coth kb$                                                                               |
| $ \dot{\eta} $         | $\frac{\frac{\rho_1}{a}}{\frac{\rho_1}{a} + j\omega L + r_0}$             | $\frac{1}{\cosh kb}$                                                   | $\frac{1}{\cosh kb + \frac{j\omega L + r_0}{\rho_1/a} \cdot \frac{\sinh kb}{kb}}$                 |
| $ \dot{\eta}_{total} $ | $\frac{\frac{\rho_1}{a} + R_e}{\frac{\rho_1}{a} + R_e + j\omega L + r_0}$ | $\frac{R_e +  \eta  \cdot \rho_2 k \coth kb}{R_e + \rho_2 k \coth kb}$ | $\frac{R_e +  \eta  \cdot \rho_2 k \coth kb}{R_e + \rho_2 k \coth kb}$                            |



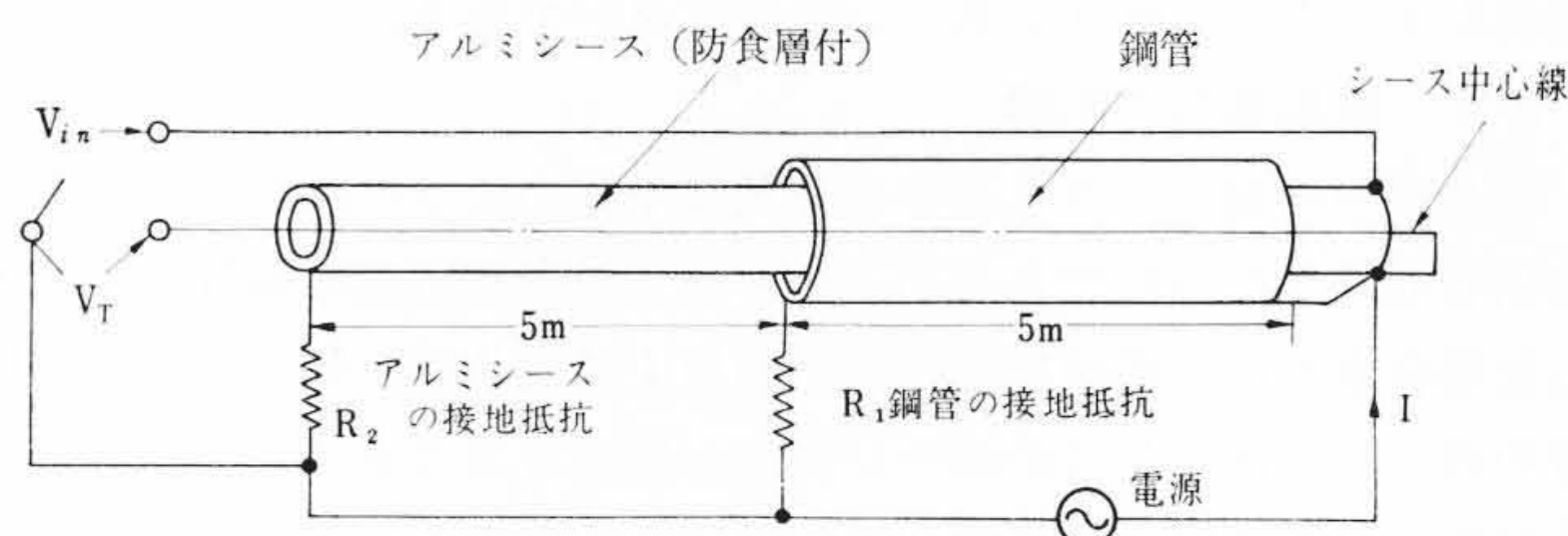
第6図 鋼管だけに電流を流した場合の遮へい係数



第7図 鋼管とアルミシースの両方に電流を流した場合の遮へい係数



第8図 接地抵抗と遮へい係数の関係



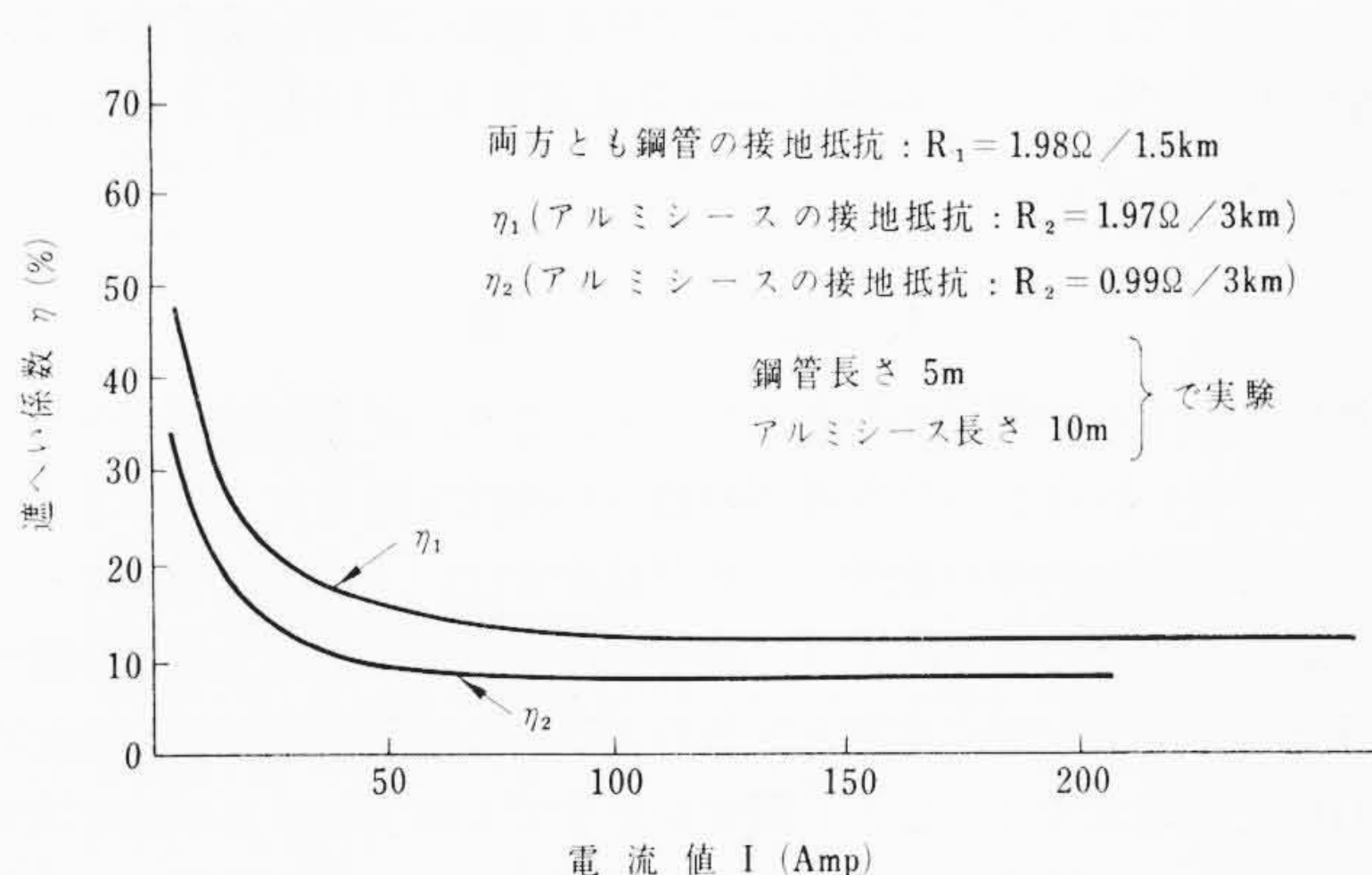
第9図 2重接地の測定模擬回路

場合には、第7図の曲線よりも良好となっている。この状況を計算値からも確認するため、第1表に従って接地抵抗と遮へい係数の計算を行ない第8図に示した。第5～7図の実測値との比較は図中の点線で示される。誘導起電力50 V/kmの場合、分岐点は接地抵抗の0.1～0.2 Ω/kmにあり、これ以上の接地抵抗ではアルミシースの接地点で鋼管を接地すると遮へい係数は悪化することがわかる。

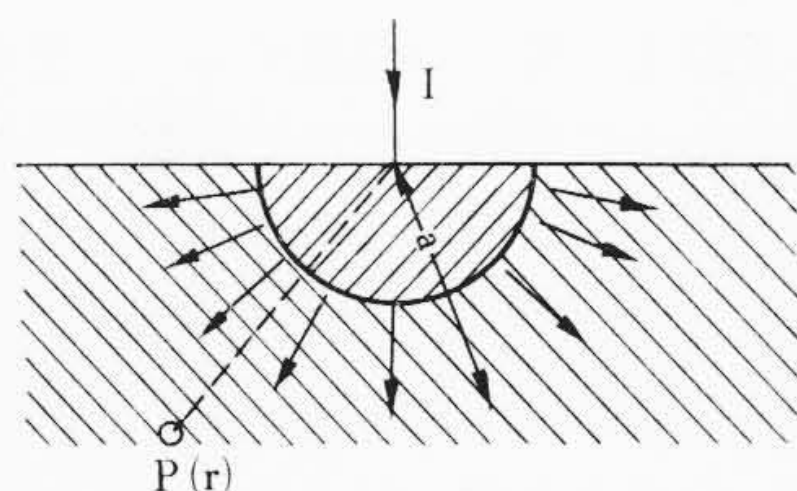
### 3.2 2重接地の模擬実験

鋼管をアルミシースにボンドしたほうが遮へい係数が悪くなる理由は鋼管のインピーダンスが低いため、シースよりも多量の電流が流れ接地点の地表面の地底に対する電位が上昇するためである。それゆえアルミシースケーブルの接地区間を十分長くして、鋼管の接地場所から離して第9図のように2重に接地する方法を検討した。すなわち、この方法では鋼管接地区間で遮へいされた残りの電圧がさらにアルミシースの接地区間で遮へいされることになり、低い遮へい係数が得られるはずである。第10図にアルミシースの接地区間を3 km、鋼管の接地区間を1.5 kmとし、接地抵抗を変えた場合の模擬回路による遮へい係数の実測値を示した。第5～7図に比較

接地抵抗0 Ω/kmのときの遮へい係数2%に対し、0.1 Ω/km (5×10<sup>-4</sup> Ω/5 m)のときに10%近くに上昇するので、測定回路の接続点の接触抵抗に十分気をつけないと大きな誤差を生ずる。第5図の曲線は、接地抵抗の小さい場合、第7図の曲線よりも大きな遮へい係数を示すが、接地抵抗の影響が比較的少なく、接地抵抗の大きい



第10図 2重接地の遮へい係数



第11図 接地抵抗の導体球モデル

して最も小さい遮へい係数が得られている。

それゆえ鋼管の接地場所とアルミシースの接地場所を十分離して接地することはよい方法と考えられるが、問題はどの程度離せばよいからである。これはそれぞれの接地点の地表面の地底に対する電位が独立で互いに影響を及ぼさぬことが必要である。この距離の日安を得るため、鉄塔の地絡点における大地表面の電位上昇を計算する式を応用してみる。すなわちこれは接地抵抗および大地の導電率に関係するもので、接地抵抗を大地表面に埋められた導体半球で置き換える。

$$R_e = \frac{1}{2\pi\sigma a} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $R_e$ : 接地抵抗 ( $\Omega$ )

$\sigma$ : 大地導電率 ( $\text{U/m}$ )

$a$ : 導体半球の半径 (m)

これは第11図に示すとおりで、たとえば接地抵抗  $R_e = 10 \Omega$ 、大地導電率  $\sigma = 10^{-2} (\text{U/m})$  とすれば、 $a = 1.6 \text{ m}$  となる。

今半径  $a$  なる半球を土地の表面に埋められた電極とし、他の電極を無限遠球とすれば、球の中心から  $r$  なる距離にある点の電流密度の強さはそれぞれ、 $i_r = I/2\pi r^2$ 、 $E_r = i_r/\sigma = I/2\pi\sigma r^2$  で与えられる。ここに  $I$  は電極に流れた全電流で、したがって導体球の無限遠球に対する電位差は、

$$V_a = \int_a^\infty E_r dr = \int_a^\infty \frac{I}{2\pi\sigma r^2} dr = \frac{1}{2\pi\sigma} \cdot \frac{I}{a} \quad \dots\dots\dots (10)$$

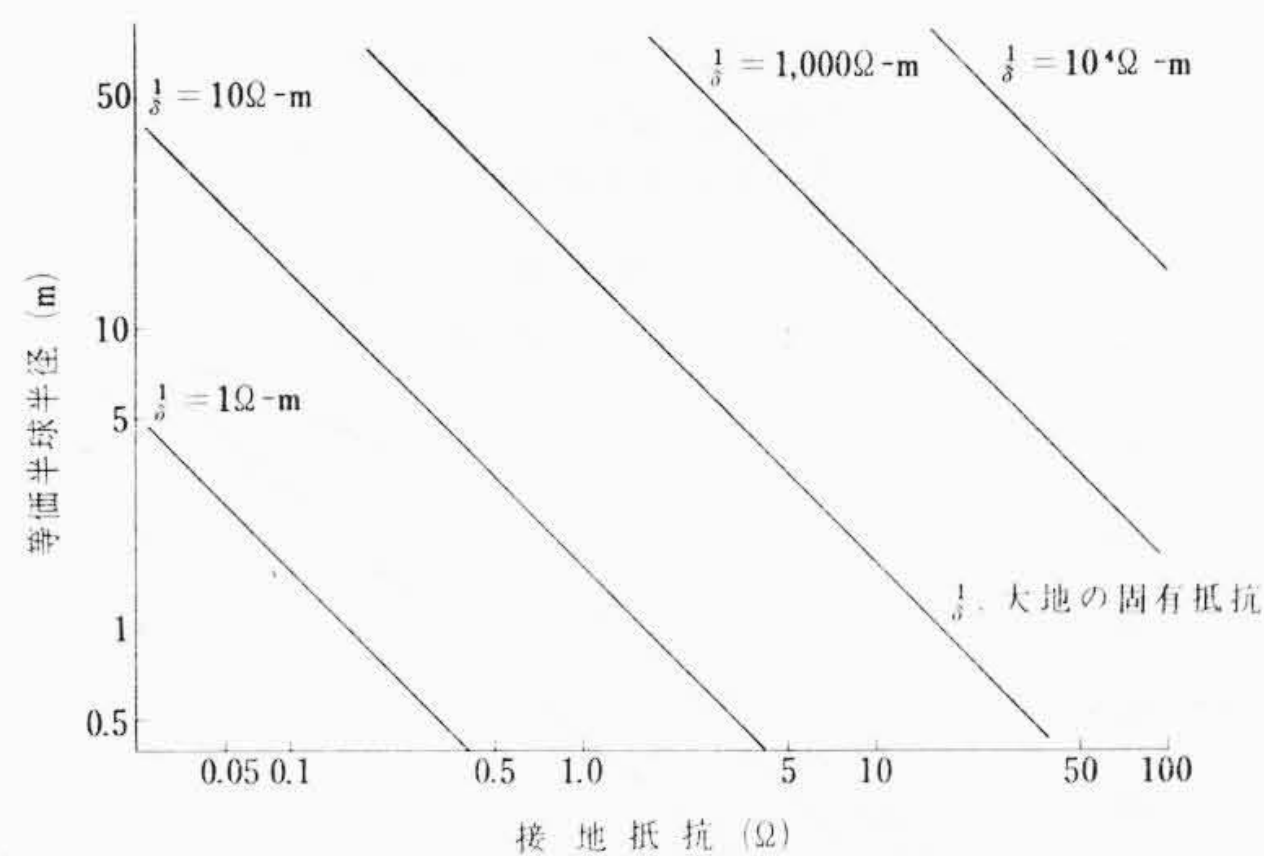
となり(9)式の正しいことがわかる。それゆえ  $a$  を接地抵抗  $R_e$  の等価半径と呼ぶ。また球の中心より  $r$  の距離にある  $P$  点の無限遠球すなわち地底に対する電位は、

$$\begin{aligned} V_r &= V_a - \int_a^r E_r dr = \frac{1}{2\pi\sigma} \cdot \frac{I}{a} - \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{r} \right) \frac{I}{2\pi\sigma} \\ &= \frac{I}{2\pi\sigma} \cdot \frac{1}{r} \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

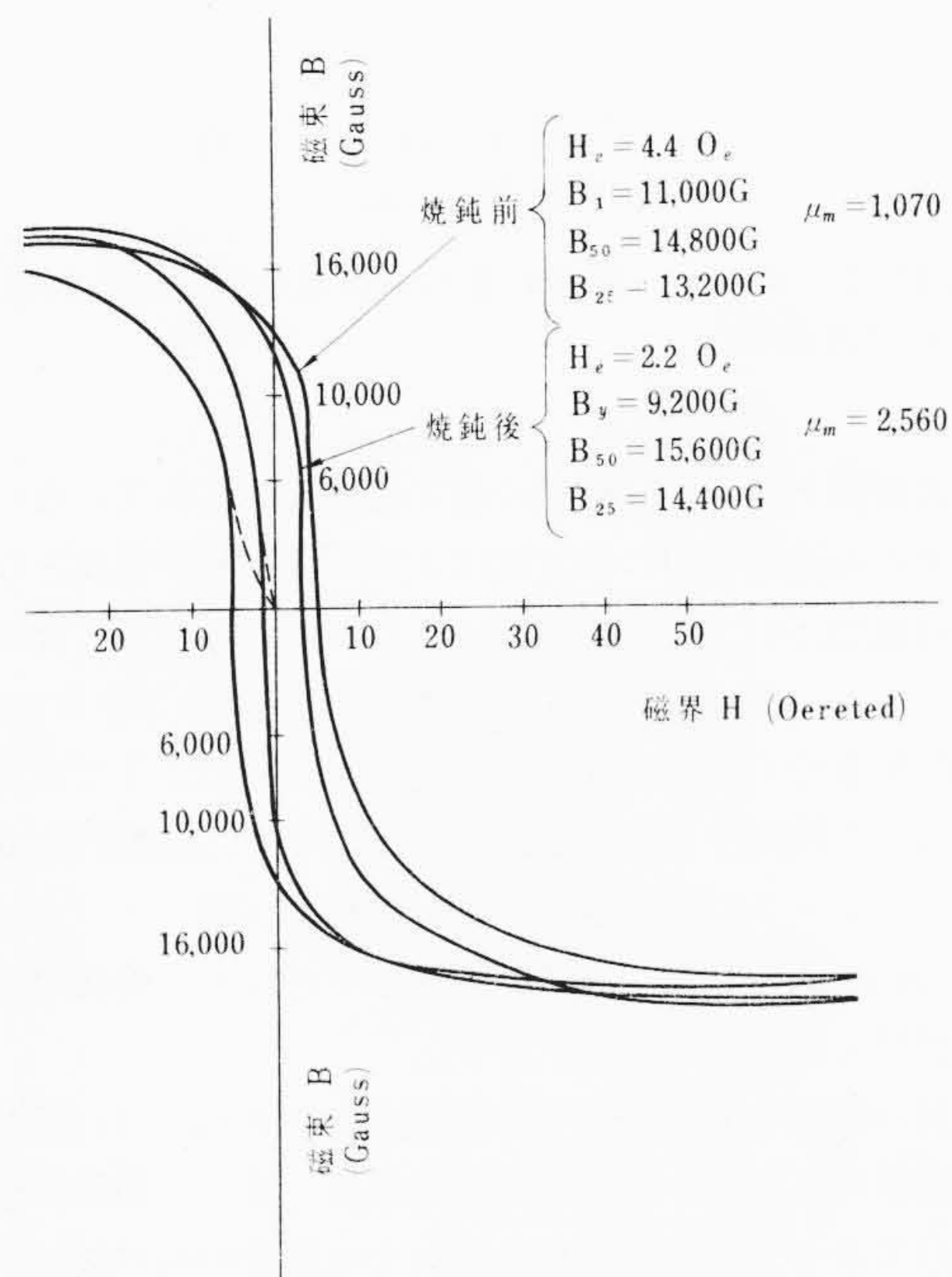
それゆえ(10)、(11)式より、

$$\frac{V_r}{V_a} = \frac{a}{r} \quad \dots\dots\dots (12)$$

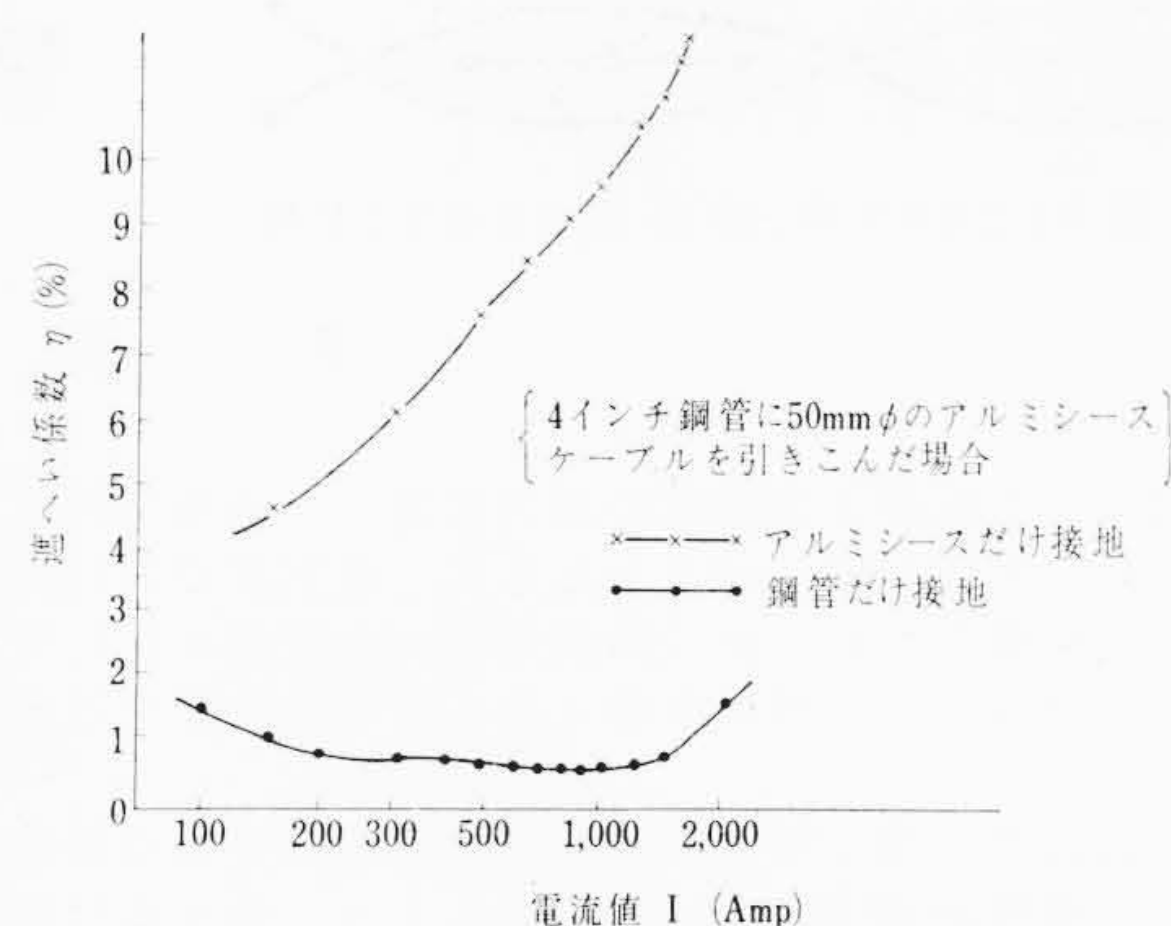
接地点より  $r$  なる距離だけ離れた場合、接地点の電位の影響をど



第12図 接地抵抗と等価半球半径



第13図 鋼管の B-H 静特性

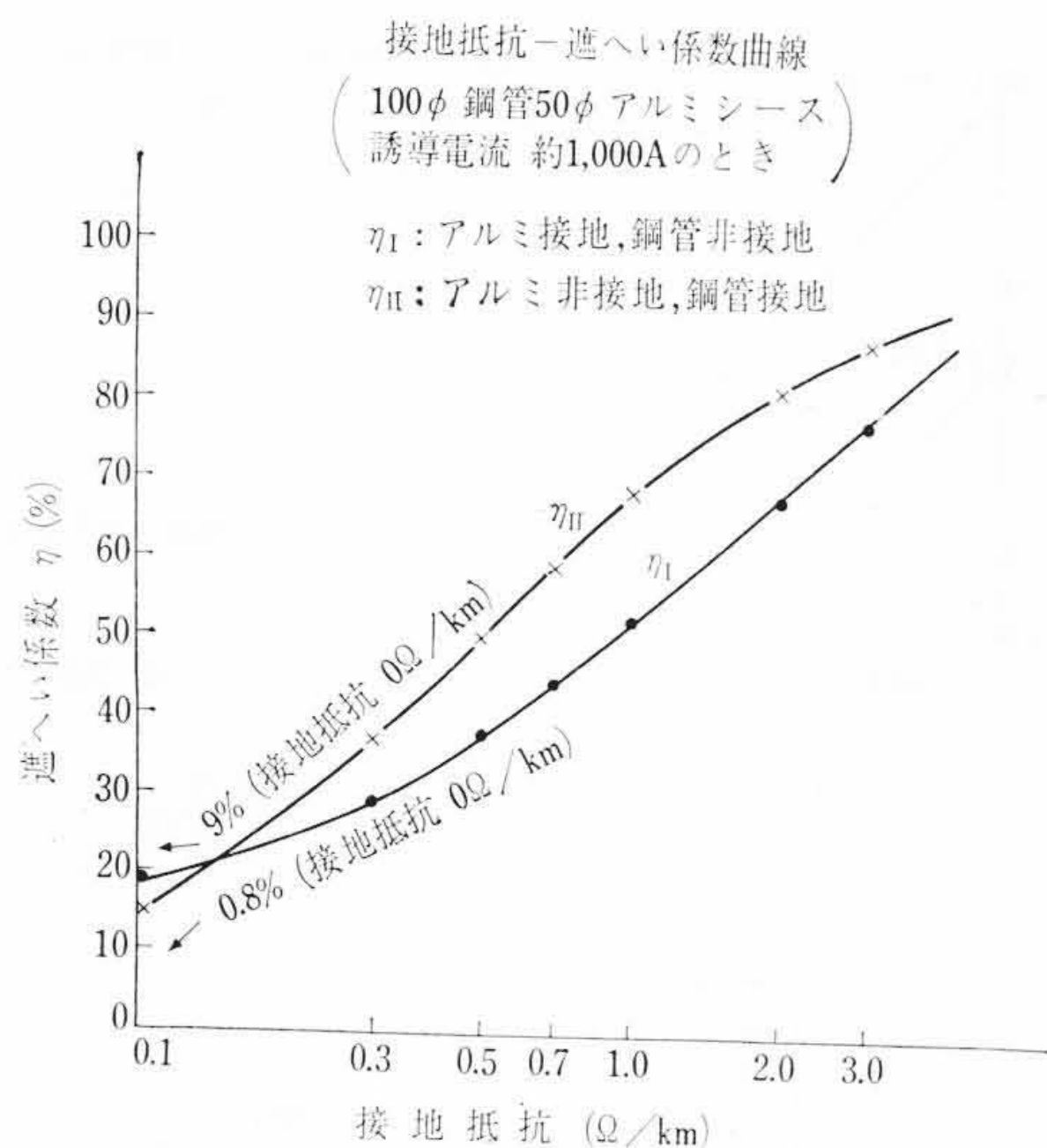


第14図 4インチ鋼管の遮へい係数の測定値(接地抵抗 0 Ω/km)

れだけ受けるかが(12)式から得られる。すなわち接地点の等価半径の5~10倍の距離の点で他の接地を行なえば、相互に1/5~1/10程度の電位上昇の影響で問題ないことになる。第12図に接地抵抗と大地導電率がわかった場合の等価半径を知るグラフを示した。

### 3.3 大電流を流した場合の遮へい係数

上述の実験は2インチ鋼管を用い、電流値は200~300A程度までの特性であった。さらに大きな外部誘導電圧に対する遮へい係数を測定することにした。まず2インチ鋼管の逆起電力の限界を見るため、パイプ断面について B-H カーブ静特性を測定し第13図に示した。特性を改善するため焼鈍したものはヒステリシスが小さく



第15図 4インチ鋼管の遮へい係数—接地抵抗特性の計算曲線

急速に最大磁束となるが、磁束の最大値は改善されていない。鋼管断面の磁束から逆起電力の最大値は1,700 Volt/km程度となるが、これは静特性で、50 c/s 交流について、これよりも小さくなるものと考えられる。ここでは改めて4インチ鋼管(内径約100 mm)により電流2,000 Aまでの遮へい係数を測定した。このような大電流になると接地抵抗を模擬することが困難になるので、接地抵抗0 Ω/kmとしてアルミシースだけ接地した場合、および鋼パイプだけ接地した場合について測定した。第14図に示すとおり、前者のほうが飽和の影響が早く現われている。

接地抵抗の影響を前述のように計算により求め、これを第15図に示す。電流値約1,000 Aにおける接地抵抗—遮へい係数特性は第8図に類似しており、接地抵抗0 Ω/kmでは鋼管のみの接地が著しく

遮へい良好であるが、この方法では接地抵抗の影響を受けやすく、鋼管接地かアルミシース接地かの分岐点は0.15 Ω/kmとなっていることがわかる。

#### 4. 結 言

通信ケーブルを鋼管に引き込むことにより、従来の電磁遮へいケーブルで得られなかった広範囲の遮へい特性を得ることができる。すなわち適当な肉厚の鋼管と直流抵抗の少ないアルミシースケーブルを組み合わせることにより、誘導電圧の大きな地域で任意の遮へい係数を得ることが、可能となるので安全な通信回線の設計のための自由度が増大する。しかし鋼管を使用する場合には全系統を有効に生かすため、接地方式に注意する必要がある、特に鋼管中に流れる電流の大きくなることを考え、アルミシースと鋼管の接地とを接続しないことが、接地施工上で重要な点と考えられる。鋼管遮へい方式にはこのほか実際上の種々の問題があり、現地施工の場合には実情に合った考慮のもとに実験を行なう必要がある。

終わりにこの問題について種々ご指導賜わった京三製作所宮下部長(元日本国有鉄道、技術研究所、通信研究室長)、東京電力株式会社通信課西本氏および日立電線株式会社乗松、堀口両課長および研究にご協力いただいた東北大学、村田氏に厚くお礼申し上げる。

#### 参 考 文 献

- (1) Josef Esser: Reduktionsfaktoren von Fernmelde und Starkstromkabeln: ETZ-A. Bd. 83. H 21/22 (8-10, 1962)
- (2) 交流電化区間用通信ケーブルに関する研究報告書: 鉄道通信協会 (昭 35-6)
- (3) 小原, 戸塚, 野呂, 田中: 東海道新幹線建設に伴う誘導問題, 施設 Vol. 13, No. 10, p. 55  
Vol. 14, No. 4, p. 71
- (4) L. Collet: Protection des cables de Telecommunication contre l'induction: Cable et Transmission 16, No. L. 1962



特許第412409号(特公昭38-6333号)

#### 特 許 の 紹 介

#### 多 翼 型 送 風 機

この発明は、心板および側板の周辺部間に、適当な円周方向間隔を保って複数の羽根を取付けるとともに、各羽根の入口角を、心板側に比して側板側を小に、かつ出口角を、心板側に比して側板側を大なるように構成した羽根車を備えたことを特徴とする多翼型送風機に関する。

従来の円弧状の様な断面形状を有する羽根をもつ羽根車では、羽根まわりの循環が羽根の長さ方向によって異なるため渦流が生じ、送風機内の気流の流れを損ない、送風能率を低下せしめている。また羽根入口における気流速度の半径方向成分が、心板側で大きく、側板側で小となるような分布をしているため、気流の入口角は、心板側で大きく、側板側で小となるのに対し、一様な円弧状断面の羽根であるから、気流は心板側で羽根の背面に当たり、側板側では羽根の前面に当たりながら流入することとなり、この点からも送風能率の低下を招いている。

この発明においてはさきに述べ図にも示すように、羽根入口における気流速度の半径方向成分の変化にもとづく気流の入口角の変化に対応して、羽根の入口角を心板側で大きく、側板側で小さくしてあるので、気流は羽根の全域にわたり羽根面に沿って無衝突的に流入することとなり、かつまた羽根の出口角を、心板側で小さく、側板側で大きくしてあるので、羽根出口における気流の絶対速度の円周方向成分は羽根の全域にわたって常に等しく保たれ、羽根まわりの循環は一定となって、渦流を生じることなく流出するので、送風能率を著しく高めうる。

(松島)



永島敏雄・桜井照男

