

技術情報提供支援教材

直接き電方式における通信誘導の

予測計算方法

(GWの接続のない場合)

1988年9月

国際協力事業団

国際協力総合研修所

LIBRARY

研 究
J R
88-25



マイクロ
フィルム作成

JICA LIBRARY



1074476[1]

19213

は し が き

国際協力事業団（JICA）が開発途上国に派遣する技術協力専門家は、自己の有する専門知識と専門技術をもとに、適正な技術の移転に日夜努力と工夫を重ねている。しかしながら、専門家をとり巻く途上国の現場の要求は多様化し、複雑かつ多岐にわたっており、これに対応して専門家が適切・的確な技術指導を実施するためには、より一層広く深く最新情報や関連情報を収集・調査することが必要不可欠となっている。

国際協力総合研修所（国総研）では、こうした状況を踏まえ、さらに途上国では十分な技術情報の入手がきわめて困難な点を考慮し、JICA 派遣専門家等が業務上必要とする情報を提供する技術情報提供支援活動を行っている。

本書は、その支援活動の一つとして、メキシコ国に派遣され、鉄道交流電化計画に関する技術指導を行っている福島道夫、箭本芳人両専門家より要請を受け、同国が現在進めている鉄道の直接き電方式による交流電化のために発生が予想される、鉄道沿線の各種通信設備に与える通信誘導障害に対する的確な対策を講ずるため、その誘導予測計算を行う際の参考資料として作成したものである。

本書が、今後世界の他の地域で、同様の問題が生じた際に、解決のための有用な参考書として活用されれば幸いである。

昭和 63 年 9 月

国際協力事業団

国際協力総合研修所長

加 藤 清

目 次

1. 交流電化と誘導障害.....	1
2. 調 査	3
3. 直接き電方式における誘導予測計算	5
4. 誘導予測計算に使用する数値	15
5. 予測計算例	46
6. 誘 導 対 策	53

直接き電方式における通信誘導の予測計算方法

1. 交流電化と誘導障害

鉄道の交流電化が実施されると、電化された鉄道線路に近接し、平行する通信線路には、電車線の高電圧や大電流により、静電的および電磁的な誘導作用が生ずる。すなわち電化された線路の大きな電氣的エネルギーの一部が通信系にあらわれる。

交流電化された鉄道線路（き電回路）からの誘導作用により、通信系への影響としては、人体に対する危険、通信機器の損傷や誤動作、電話に対する雑音障害等の発生が心配される。

これ等の誘導障害を軽減するためには、電化線路側（起誘導側）と、通信系側（被誘導側）の調査を行い、誘導予測計算を実施して、誘導障害の有無を求め、電化線路側および通信側に対し、技術的、経済的に適切な誘導防止対策を行う必要がある。

(1) 誘導作用の概要

交流電化の鉄道線路からの誘導作用により通信線には、静電誘導電圧と、電磁誘導電圧が発生する。

(i) 静電誘導電圧は、電車線路と通信線との静電容量（C）により発生し、電車線路と通信線の離隔距離が小さい裸通信線には、高い静電誘導電圧があらわれる。

この裸通信線の長さが大きいとき、人体がこの裸通信線にさわると、大きな静電誘導電流が流れ危険である。

しかし、電車線と通信線の離隔距離が大きくなると、静電誘導電圧は急速に小さくなり、静電誘導による影響は少なくなる。

又、接地されたしやへい層のある通信ケーブルは、静電誘導電圧はほぼ零である。

(ii) 電磁誘導電圧は、電車線路、レール等と通信線との相互インダクタンス（M）により発生し、大地の導電率の影響が大きくあらわれる。

大地導電率が大きい（例えば沖積層の平地）と、相互インダクタンスMは小さく、電磁誘導電圧は小さくなる。又、大地導電率が小さい（例えば岩盤の山地）場合には、相互インダクタンスMは大きく、電磁誘導電圧は大きくなる。

電磁誘導電圧は、前記のように、大地導電率によって大きく影響されるが、とくに電車線路と通信線の離隔距離が大きくなると、大地導電率の影響をさらに大きく受ける。

このため、電磁誘導電圧を計算するには、大地導電率の値を把握するため、実測により求める必要がある。

又、電磁誘導電圧は電車線路と通信線の離隔距離が大きくなっても、静電誘導電圧程、大きく減少しないので電磁誘導による影響範囲は、静電誘導の場合より大きい。

さらに電磁誘導電圧は、通信線の長さに比例して増加するので、長距離通信線の電磁誘導電圧は大きくなる。

(iii) 制 限 値

誘導電圧や雑音電圧の制限値は、国により若干の相違があるが、CCITT (Comite Consultatif International Télégraphique et Téléphonique) の勧告では、

電気鉄道においては

平常時車輛運転による誘導電圧	60 V	(電磁誘導)
事故時の誘導危険電圧	430 V	(電磁誘導)
誘導雑音電圧	1 mV	(電磁誘導, 静電誘導)
静電誘導電流	15 mA	(静電誘導)

となっている。

なお、誘導雑音電圧の制限値について、電気鉄道では車輛の運転時のみ誘導雑音電圧が生ずることから、通信ケーブルで2 mV、裸線で5 mVを採用している国もある。

又、事故時の誘導危険電圧の制限値を300 Vとしている国もある。

さらに静電誘導電圧の制限値として150 V、静電誘導電流の制限値として10 mAを採用している国もある。

2. 調 査

誘導予測計算を行うための調査として、

(i) 電化線路の調査

(a) 鉄道線路種別

単線，複線の別
高架，トンネル等
線路勾配

(b) き電設備

変電所，き電区分所等の位置
き電用トランスおよび電源側インピーダンス等
電車線，レール，G.W（グラウンドワイヤー）等の線種，インピーダンス等
以上により，き電回路図，き電装柱図等を作成する。

(ii) 大地導電率の調査

測定間隔 5 ～ 10km で測定する。

(iii) 通信線離隔距離調査

電化する鉄道線路の軌道中心から片側 500 m 幅内に存在する通信線（鉄道部内および他所属）の離隔距離を調査し，以下の項目を記入した離隔図を作成する。

(a) 施設方式

架空，埋設，管路等

(b) 通信線路種別

裸線条数，ケーブルの種類（しゃへい層の有無），対数，平衡度，等。

(c) 交換機の種別

自動，共電，磁石の別，平衡度，等

(d) 回線種別

電話，電信，搬送，等

(iv) 車輛の負荷電流，等価妨害電流

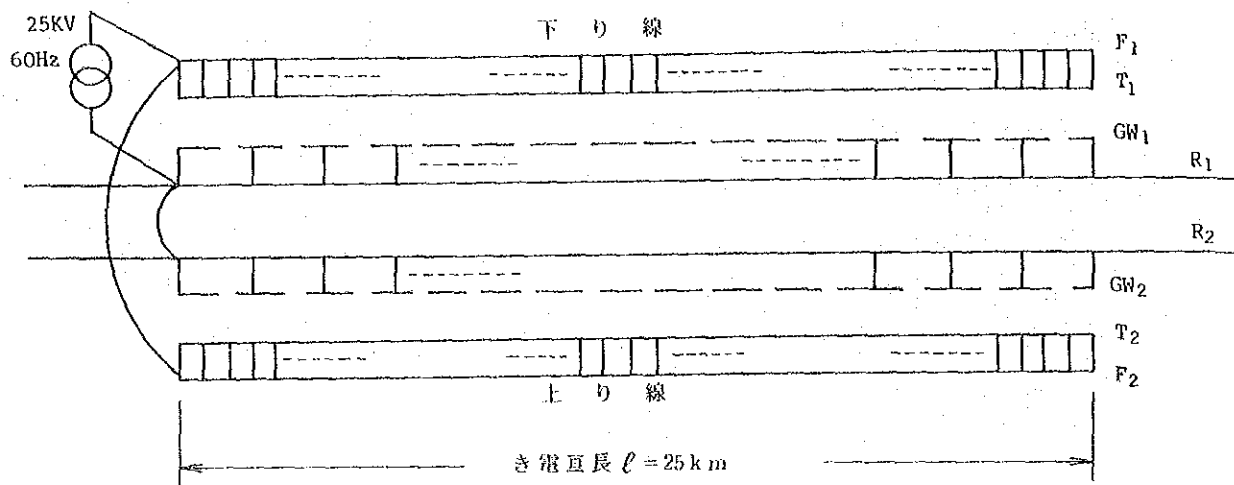
(a) 負荷電流

車輛の運転曲線等から算出する。

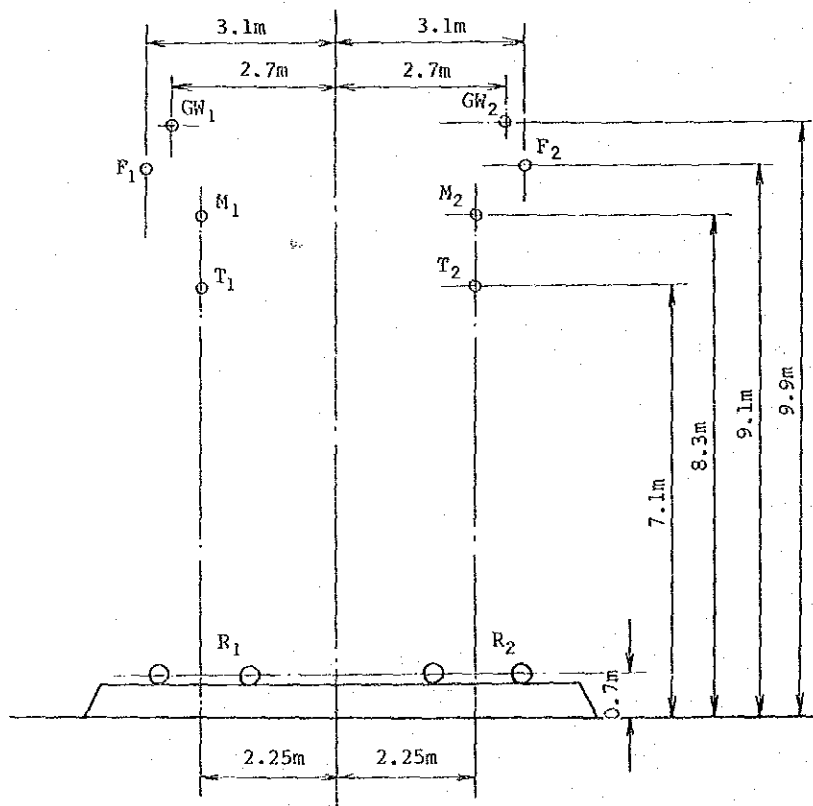
(b) 等価妨害電流

車輛の運転時の実測値又は設計値等から求める。

図 2.1 メキシコケレタロ間直接き電方式のき電回路と装柱および線種



メキシコ直接き電方式の装柱



種 別	材 質	半 径 (mm)	導 体 抵 抗 (Ω /km)	電 線 の 弛 度 (mm)
T ₁ , T ₂ トロリー線	硬銅線	6.12	0.1695	—
M ₁ , M ₂ 吊架線	同 上	5.75	0.228	900
F ₁ , F ₂ き電線	同 上	8.0	0.124	"
GW ₁ , GW ₂ 接地線	鋼アルミ線	6.25	0.457	"
R ₁ , R ₂ レール	68kg/m			

3. 直接き電方式における誘導予測計算

(1) 誘導電圧の計算

車輛の運転時に発生する常時の誘導電圧 V_m の計算は、電車線と通信線との離隔距離（通信線と軌道中心（電車線）との水平距離）が大きい（約 30 m 以上）ときは式（3.1）より求め、離隔距離が小さい（約 30 m 以下）ときは、式（3.2）および式（3.3）より求める。

(i) 離隔距離の大きい場合

誘導電圧 V_m は、

$$V_m = w M I_p (1-n) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \quad (\text{V}) \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで $w = 2 \pi f$

f : 周波数 (60 Hz)

I_p : 車輛運転時の負荷電流 (A)

$1-n$: レールおよび GW によるしゃへい係数

(表 4.2 ~ 表 4.5, 図 4.7, 図 4.8 参照)

M : 周波数 60 Hz における電車線と通信線との相互インダクタンス

($\mu\text{H}/\text{km}$) (図 4.4 参照)

l : き電回路と通信線の平行する長さ (km)

K_1 : 60 Hz における通信線のしゃへい係数 (表 4.6 参照)

K_2 : しゃへい線のしゃへい係数 (表 4.8 参照)

K_3 : 他軌道のしゃへい係数 (表 4.9, 図 4.17 ~ 図 4.20 参照)

K_4 : トンネルのしゃへい係数 (表 4.10 参照)

K_5 : 高架のしゃへい係数 (表 4.11 参照)

K_6 : レール電流の分流によるしゃへい係数 (表 4.12 参照)

(ii) 離隔距離の小さい場合

(a) 単線の場合

誘導電圧 V_m は式（3.2）で求める。

$$V_m = w I_p (\alpha_1 M_{TC} + \beta_1 M_{FC} - n_1 M_{RC} - m_1 M_{GC}) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \quad (\text{V}) \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで $\left. \begin{array}{l} \alpha_1 = I_T / I_p \quad \beta_1 = I_F / I_p \\ n_1 = I_R / I_p \quad m_1 = I_G / I_p = 0 \end{array} \right\} \text{(表 4.2 参照)}$

I_T : トロリー線電流 (A)

I_F : き電線電流 (A)

- I_R : レール電流 (A)
- I_G : G.W の電流 (A) $I_G = 0$
- I_P : 車輛の負荷電流 (A)
- M_{TC} : トロリー線と通信線との相互インダクタンス ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{FC} : き電線と通信線との相互インダクタンス ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{RC} : レールと通信線との相互インダクタンス ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{GC} : G.W と通信線との相互インダクタンス ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- l : き電回路と通信線との平行する長さ (km)
- $K_1 \sim K_6$: 前出のしやへい係数

式 (3.2) において, $K_1 \sim K_6$ を除いて, 負荷電流 $I_P = 1 \text{ A}$, 通信線の平行する長さ $l = 1 \text{ km}$ と仮定して求めた誘導電圧を図 4.9, 図 4.10 に示す。

図 4.9, 図 4.10 を用いて誘導電圧 V_m が求められる。

(b) 複線の場合

誘導電圧 V_m は式 (3.3) によって求める。

$$V_m = w I_P (\alpha M_{T1C} + \beta M_{F1C} - n_1 M_{R1C} - n_2 M_{R2C} - m_1 M_{G1C} - m_2 M_{G2C}) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \text{ (V)} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ここで	$\alpha = I_{T1} / I_P$	$\beta = I_{F1} / I_P$	}	(表 4.4 参照)
	$n_1 = I_{R1} / I_P$	$n_2 = I_{R2} / I_P$		
	$m_1 = I_{G1} / I_P$	$m_2 = I_{G2} / I_P$		
	$= 0$	$= 0$		

- I_{T1} : 車輛負荷側のトロリー線の電流 (A)
- I_{F1} : " き電線 " (A)
- I_{R1} : " レール " (A)
- I_{G1} : " G.W " (A) $I_{G1} = 0$
- I_{R2} : 車輛負荷のない側のレール電流 (A)
- I_{G2} : " G.W " (A) $I_{G2} = 0$
- I_P : 車輛の負荷電流 (A)
- M_{T1C} : 車輛負荷側トロリー線と通信線との相互インダクタンス ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{F1C} : " き電線と " " " ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{R1C} : " レールと " " " ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{G1C} : " G.W と " " " ($\mu\text{H}/\text{km}$)

- M_{R2C} : 車輛負荷のない側のレールと通信線との相互インダクタンス ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- M_{G2C} : " " G.W と " " ($\mu\text{H}/\text{km}$)
- l : き電回路と通信線との平行する長さ (km)
- $K_1 \sim K_6$: 前出のしやへい係数

式(3.3)において、 $K_1 \sim K_6$ を除き、負荷電流 $I_p = 1 \text{ A}$ 、通信線の平行する長さ $l = 1 \text{ km}$ として求めた誘導電圧を図4.13, 図4.14に示す。

図4.13, 図4.14を用いて誘導電圧 V_m が求められる。

なお、通信線の誘導電圧 V_m を計算する場合において

- (イ) 1き電区間に複数の車輛負荷が運転されるときは、1車輛負荷毎に誘導電圧を計算し、複数列車負荷それぞれによって生ずる誘導電圧を合成(算術和)する。
- (ロ) 又、上り線、下り線の車輛負荷による誘導電圧は、上り線の車輛負荷による誘導電圧と、下り線の車輛負荷による誘導電圧を合成(算術和)する。
- (ハ) 通信線が図3.1に示すように、一き電区間から隣接するき電区間にまたがる場合の誘導電圧は

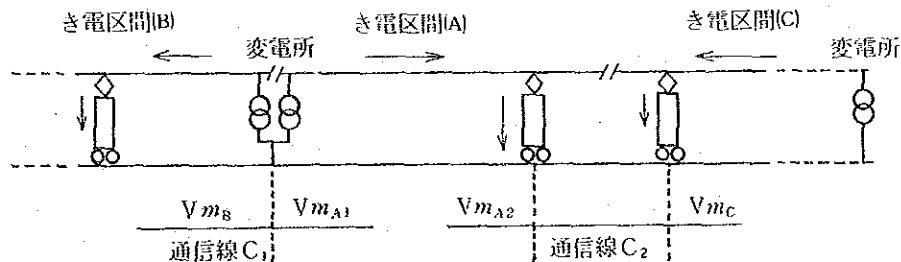


図3.1 通信線が隣接き電区間にまたがる場合

隣接き電区間のき電々圧の位相差 (120°) と車輛負荷電流の方向を考慮して求める必要がある。

図3.1に示す通信線 C_1 についての誘導電圧 V_m は、き電回路(A)による誘導電圧 V_{mA1} と、き電回路(B)による誘導電圧 V_{mB} を求め

$$V_m = V_{mA1} + V_{mB} \angle 60^\circ$$

として計算する。

又、通信線 C_2 については、き電回路(A)による誘導電圧 V_{mA2} とき電回路(C)による誘導電圧 V_{mC} を求め

$$V_m = V_{mA2} + V_{mC} \angle 60^\circ$$

として計算する。

(2) 事故時誘導危険電圧 Vf の計算

事故時の誘導危険電圧 Vf を求めるには、

き電回路と通信線との離隔距離が大きいときは式 (3.4) を用いて計算する。

又、離隔距離の小さいときは式 (3.5) および式 (3.6) によって計算する。

(i) 離隔距離の大きい場合

$$Vf = w M I_f (1-n) l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \quad (\text{V}) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここで、 I_f : 事故電流 (A) (式 (3.7), 図 4.6 参照)

l : き電回路と通信線との平行する長さ (km)

(ii) 離隔距離の小さい場合

(a) 単線の場合

$$Vf = w I_f (\alpha_1 M_{TC} + \beta_1 M_{FC} - n_1 M_{RC} - m_1 M_{GC}) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \quad (\text{V}) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

ここで I_f : 事故電流 (A)

l : き電回路と通信線との平行する長さ (km)

事故電流 1 A で、通信線の平行長が 1 km のときの誘導電圧の図 4.9, 図 4.10 を用いて、事故時の誘導危険電圧 Vf が求められる。

(b) 複線の場合

$$Vf = w I_f (\alpha M_{T1C} + \beta M_{F1C} - n_1 M_{R1C} - n_2 M_{R2C} - m_1 M_{G1C} - m_2 M_{G2C}) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \times 10^{-6} \quad (\text{V}) \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

ここで I_f : 事故電流 (A)

l : き電回路と通信線との平行の長さ (km)

複線の場合にも、事故電流が 1 A で、通信線の平行長が 1 km のときの誘導電圧の図 4.13, 図 4.14 を用いて、誘導危険電圧 Vf が求められる。

なお、GW 1, GW 2 は長さの方向に接続されないで、

$$I_{G1} = 0, \quad I_{G2} = 0 \quad \text{となる。従って}$$

$$m_1 = 0, \quad m_2 = 0 \quad \text{である。}$$

(3) 事故電流の計算

事故電流は、変電所と、き電区分所間の各地点における電車線地絡時の電流を算出する。
 事故電流を算出するには、式(3.7)によって求める。

$$I_f = \frac{E}{Z_{SS} + Z_i + Zl} \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

- ここで E : き電回路の電車線電圧 (V)
 Z_{SS} : 変電所に受電する電源側のインピーダンス (Ω)
 Z_i : 変電所のき電用トランスのインピーダンス (Ω)
 Z : き電回路のインピーダンス (Ω/km)
 l : 変電所と地絡点間の距離 (km)

また、Z_{SS}、Z_i、Zは、

$$Z_{SS} = j \frac{20 \cdot (E_{KV})^2 \cdot P_{SS}}{\text{基準 KVA}} \quad (\Omega)$$

$$Z_i = j \frac{10 \cdot (E_{KV})^2 \cdot P_i}{\text{定格 KVA}} \quad (\Omega)$$

- ここで P_{SS} : 電源側の%Z
 P_i : 変電所のき電用変圧器の%Z

複線の場合のき電回路のインピーダンスZは、

$$Z = \alpha Z_{T1} + \beta Z_{T1F1} - n_1 Z_{T1R1} - n_2 Z_{T1R2} - m_1 Z_{T1G1} - m_2 Z_{T1G2}$$

で求められる。

- ここで $\alpha = I_{T1} / I$, $\beta = I_{F1} / I$, $n_1 = I_{R1} / I$, $n_2 = I_{R2} / I$
 $m_1 = I_{G1} / I = 0$, $m_2 = I_{G2} / I = 0$

$$I = I_{T1} + I_{F1} : \text{事故電流 (A)}$$

- I_{T1} : トロリー線(事故側T₁)の電流 (A)
 I_{F1} : き電線(事故側F₁)の電流 (A)
 I_{R1} : レール(事故側R₁)の電流 (A)
 I_{R2} : レール(事故でない側R₂)の電流 (A)
 I_{G1} : G.W(事故側G₁)の電流 (A)
 I_{G2} : G.W(事故でない側G₂)の電流 (A)
 Z_{T1} : トロリー線T₁の自己インピーダンス (Ω/km)
 Z_{T1F1} : 事故側のトロリー線T₁とき電線F₁との相互インピーダンス (Ω/km)
 Z_{T1R1} : 事故側のトロリー線T₁とレールR₁との相互インピーダンス (Ω/km)
 Z_{T1G1} : 事故側のトロリー線T₁とG.W G₁との相互インピーダンス (Ω/km)

$Z_{T_1R_2}$: 事故側のトロリー線 T_1 と事故でない側のレール R_2 との相互インピーダンス
(Ω/km)

$Z_{T_1G_2}$: 事故側のトロリー線 T_1 と事故でない側の G.W, G_2 との相互インピーダンス
(Ω/km)

メキシコ-ケレタロ間のき電回路の標準装柱について Z の計算値を, 表 4.1 に示す。

又, 一例として, Z_{SS} と Z_i を与えたときの事故電流の計算値を図 4.6 に示す。

自己インピーダンスおよび相互インピーダンスは carson-pollaczek の式より計算する。

(4) 誘導雑音電圧の計算

通信回線に生ずる誘導雑音電圧 U_n の計算は, き電回路と通信線との離隔距離が大きい (約 30 m 以上) ときは, 式 (3.8) により計算する。

また, 離隔距離の小さい (約 30 m 以下) ときは, 式 (3.9) 又は式 (3.10) により計算する。

(i) 離隔距離の大きい場合

$$U_n = w_{800} \cdot M_{800} \cdot J_P (1-n) \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot \lambda \times 10^{-3} \text{ (mV)} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

ここで w_{800} : 800 Hz における電車線と通信線の離隔距離に対する相互インダクタンス
($\mu\text{H}/\text{km}$) $\dots\dots\dots$ (図 4.5 参照)

J_P : 等価妨害電流 (A)

$1-n$: 800 Hz におけるレールと G.W によるしゃへい係数
 $\dots\dots\dots$ (表 4.3, 表 4.5 参照)

l : 電車線と通信線の平行する長さ (km)

K_1 : 800 Hz における通信線のしゃへい係数 $\dots\dots\dots$ (表 4.6 参照)

K_2 : しゃへい線のしゃへい係数 $\dots\dots\dots$ (表 4.8 参照)

K_3 : 他軌道のしゃへい係数 $\dots\dots\dots$ (表 4.9 参照)

K_4 : トンネルのしゃへい係数 $\dots\dots\dots$ (表 4.10 参照)

K_5 : 高架のしゃへい係数 $\dots\dots\dots$ (表 4.11 参照)

K_6 : レール電流の分流によるしゃへい係数 $\dots\dots\dots$ (表 4.13 参照)

λ : 通信回線の平衡度 $\dots\dots\dots$ (表 4.7 参照)

(ii) 離隔距離の小さい場合

(a) 単線の場合

誘導雑音電圧 U_n は式 (3.9) で求める。

$$U_n = w_{800} \cdot J_P (\alpha_1 M_{TC} + \beta_1 M_{FC} - n_1 M_{RC} - m_1 M_{GC}) l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot \lambda \times 10^{-3} \text{ (mV)} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで } \alpha_1 &= J_{PT} / J_P, & \beta_1 &= J_{PF} / J_P \\ n_1 &= J_{PR} / J_P, & m_1 &= J_{PG} / J_P \\ & & &= 0 \end{aligned} \right\} \text{(表 4.3 参照)}$$

J_{PT} : トロリー線に流れる J_P の値 (A)

J_{PF} : き電線に流れる J_P の値 (A)

J_{PR} : レールに流れる J_P の値 (A)

J_{PG} : G.W に流れる J_P の値 (A) $J_{PG} = 0$

J_P : 車輛より流れる等価妨害電流 (A)

M_{TC} : 800 Hz におけるトロリー線と通信線との相互インダクタンス
($\mu\text{H}/\text{km}$)

M_{FC} : 800 Hz におけるき電線と通信線との相互インダクタンス
($\mu\text{H}/\text{km}$)

M_{RC} : 800 Hz におけるレールと通信線との相互インダクタンス
($\mu\text{H}/\text{km}$)

M_{GC} : 800 Hz における G.W と通信線との相互インダクタンス
($\mu\text{H}/\text{km}$)

l : き電回路と通信線の平行する長さ (km)

λ : 通信回線の平衡度 (表 4.7 参照)

式 (3.9) において、しゃへい係数 $K_1 \sim K_6$ と通信回線の平衡度 λ を除き、 $J_P = 1$ A、平行する長さ $l = 1$ km の場合の誘導雑音縦電圧 V_n を求めると、図 4.11、図 4.12 となる。

この図 4.11、図 4.12 の V_n (V) から誘導雑音電圧 U_n を求めるには、

$$U_n = V_n \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot J_P \cdot l \cdot \lambda \times 10^3 \text{ (mV)}$$

で計算出来る。

(b) 複線の場合

誘導雑音電圧 U_n の計算は式 (3.10) で求められる。

$$\begin{aligned} U_n &= w_{800} \cdot J_P (\alpha M_{T1C} + \beta M_{F1C} - n_1 M_{R1C} - n_2 M_{R2C} - m_1 M_{G1C} - m_2 M_{G2C}) \\ &\quad \cdot l \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot \lambda \times 10^{-3} \text{ (mV)} \\ &\dots\dots\dots (3.10) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで } \alpha &= J_{PT1} / J_P & \beta &= J_{PF1} / J_P \\ n_1 &= J_{PR1} / J_P & n_2 &= J_{PR2} / J_P \\ m_1 &= J_{PG1} / J_P & m_2 &= J_{PG2} / J_P \\ &= 0 & &= 0 \end{aligned} \right\} \text{(表 4.5 参照)}$$

J_{PT1}	: 車輛負荷側のトロリー線に流れる J_P 値	(A)
J_{PF1}	: " き電線 "	(A)
J_{PR1}	: " レール "	(A)
J_{PG1}	: " G.W "	(A) $J_{PG1} = 0$
J_{PR2}	: 車輛負荷のない側のレールに流れる J_P 値	(A)
J_{PG2}	: " G.W "	(A) $J_{PG2} = 0$
J_P	: 車輛負荷より流れ出る等価妨害電流	(A)
M_{TIC}	: 800 Hz における負荷側トロリー線と通信線との相互インダクタンス	($\mu H / km$)
M_{PIC}	: 800 Hz における負荷側き電線と通信線との相互インダクタンス	($\mu H / km$)
M_{RIC}	: 800 Hz における負荷側レールと通信線との相互インダクタンス	($\mu H / km$)
M_{GIC}	: 800 Hz における負荷側レールと通信線との相互インダクタンス	($\mu H / km$)
M_{R2C}	: 800 Hz における負荷のない側レールと通信線との相互インダクタンス	($\mu H / km$)
M_{G2C}	: 800 Hz における負荷のない側 G.W と通信線との相互インダクタンス	($\mu H / km$)
l	: 電車線と通信線の平行する長さ	(km)

式 (3.10) において $K_1 \sim K_6$ および平衡度 λ を除いて, $J_P = 1 A$, 平行の長さ $l = 1 km$ のときの誘導雑音電圧 V_n (V) を求めると図 4.15, 図 4.16 となる。

この図 4.15, 図 4.16 から誘導雑音電圧 U_n を求めるには,

$$U_n = V_n \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot J_P \cdot l \cdot \lambda \times 10^3 \quad (mV)$$

で計算出来る。

なお, 通信回線の誘導雑音電圧 U_n を計算する場合において,

- (イ) 1 き電区間に複数の車輛負荷が運転されるときは, 1 車輛負荷毎に誘導雑音電圧を計算し, 複数車輛負荷それぞれによって生ずる誘導雑音電圧を合成 (電力和 (自乗和の平方根)) する。
- (ロ) 又, 上り線, 下り線の車輛負荷による誘導雑音電圧は上り線の車輛負荷による誘導雑音電圧と, 下り線の車輛負荷による誘導雑音電圧を合成 (電力和) する。
- (ハ) 通信線が図 3.1 に示すように 1 き電区間から隣接するき電区間にまたがる場合の誘導雑音電圧 U_n は 1 き電区間により生ずる誘導雑音電圧と, 隣接き電区間により生ずる誘導雑音電圧を合成 (電力和) する。

(5) 静電誘導電圧及び静電誘導電流

(i) 静電誘導電圧 V_s の計算

(a) トロリー線とレールのみのもっとも簡単なき電回路から、このき電回路に平行する通信線に及ぼす静電誘導電圧 V_s は

$$V_s = \frac{1}{2 \log_e \frac{2h_T}{r_T}} \cdot \log_e \frac{b_{TC}^2 + (h_T + h_C)^2}{b_{TC}^2 + (h_T - h_C)^2} \cdot E \cdot k \quad (V) \quad \dots\dots (3.11)$$

で求められる。

ここで h_T : トロリー線 (吊架線と電車線の等価導体) の高さ (m)

r_T : トロリー線 (吊架線と電車線の等価導体) の半径 (m)

b_{TC} : トロリー線と通信線との離隔距離 (m)

h_C : 通信線の高さ (m)

E : 電車線の電圧 (V)

k : しゃへい線等によるしゃへい係数 (表 4.14 参照)

トロリー線のほかにき電線, G.W が存在する場合や, 複線の場合では, 計算式は複雑となる。

(b) 単線 (T, F, R, G.W) の場合

通信線に生ずる静電誘導電圧 V_s は式 (3.12) で求められる。

$$V_s = \frac{1}{\Delta} (\Delta_1 \cdot P_{TC} + \Delta_2 \cdot P_{FC} + \Delta_3 \cdot P_{GC}) \cdot E \cdot k \quad (V) \quad \dots\dots (3.12)$$

ここで

$$P_{ij} = \log_e \frac{b_{ij}^2 + (h_i + h_j)^2}{b_{ij}^2 + (h_i - h_j)^2}$$

b_{ij} : i 導体と j 導体の離隔距離 (m)

h_i, h_j : i 導体および j 導体の高さ (m)

$$\Delta = \begin{vmatrix} P_T & P_{TF} & P_{TG} \\ P_{FT} & P_F & P_{FG} \\ P_{GT} & P_{GF} & P_G \end{vmatrix} \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} 1 & P_{TF} & P_{TG} \\ 1 & P_F & P_{FG} \\ 0 & P_{GF} & P_G \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} P_T & 1 & P_{TG} \\ P_{FT} & 1 & P_{FG} \\ P_{GT} & 0 & P_G \end{vmatrix} \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} P_T & P_{TF} & 1 \\ P_{FT} & P_F & 1 \\ P_{GT} & P_{GF} & 0 \end{vmatrix}$$

$$P_i = 2 \log_e \frac{2h_i}{r_i}$$

h_i : i 導体の高さ (m)

r_i : i 導体の半径 (m)

E : 電車線の電圧 (V)

k : しゃへい線等のしゃへい係数 (表 4.14 参照)

式 (3.12) において、 $E = 25 \text{ kV}$ として、離隔距離に対する静電誘導電圧 V_s を計算すると、図 4.21 が得られる。

(c) 複線 ($T_1, F_1, R_1, G.W_1, T_2, F_2, R_2, G.W_2$)

静電誘導電圧 V_s の計算は単線の場合より複雑となるが計算結果を図示すると、 $E = 25 \text{ kV}$ として、図 4.22 に示す結果となる。

なお、静電誘導電圧は裸通信線やしゃへいのないケーブルの場合に発生し、しゃへい層を有するケーブルではほぼ零となる。

(ii) 静電誘導電流 I_s の計算

静電誘導電流は、静電誘導電圧が生じている通信線に人体がさわったとき、人体に流れる放電々流で、式 (3.13) によって求められる。

$$I_s = \frac{\omega V_s \cdot l}{18 \log_e \frac{2h_c}{r_c}} \times 10^{-3} \quad (\text{mA}) \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

ここで $\omega = 2\pi f$ $f = 60 \text{ Hz}$

V_s : 静電誘導電圧 (V)

l : 通信線の長さ (km)

h_c : 通信線の高さ (m)

r_c : 通信線の半径 (m)

図 4.23 に通信線の直径が 4 mm の場合と、2.9 mm の場合の静電誘導電流の計算結果を示す。

4. 誘導予測計算に使用する数値

通信線の誘導電圧、誘導雑音電圧、静電誘導電圧等の予測計算に使用する数値は、以下に示す値を採用する。

(1) 平均離隔距離

通信線と鉄道との離隔距離が一定でない場合の平均の離隔距離を求めると、

(i) 通信線と鉄道が交叉する場合

(a) 図 4.1 に示すように交叉する場合

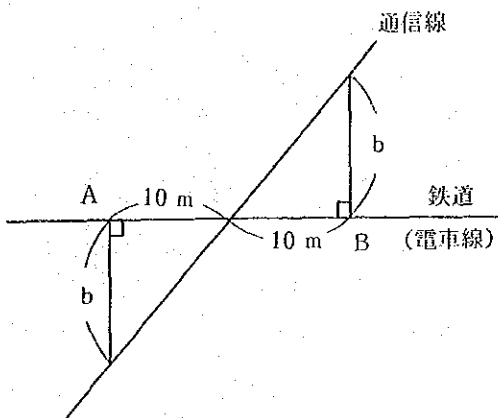


図 4.1 通信線が交叉する場合(1)

交叉点より、鉄道側に前後10mの位置をA、Bとし、A点およびB点より通信線迄の距離を b とすると、平均離隔距離 b_m は $b/2$ とし、平行する l は20mとする。

但し、 $b > 100$ mの場合は、この部分は平行長 l を0として無視する。

(b) 図 4.2 に示すように交叉する場合

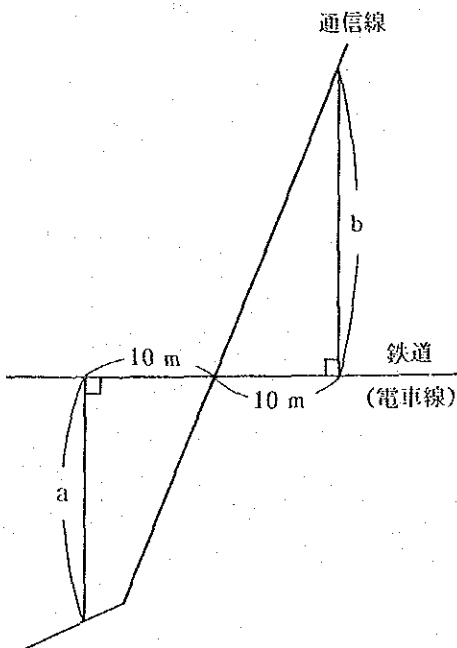


図 4.2 通信線が交叉する場合(2)

図 4.2 に示す場合で、 $a < 100$ m、 $b > 100$ mの場合は、

平均離隔距離 b_m は $a/2$ とし、平行する長さ l は10mとする。 b に対する l は無視する。

又、 $a < 100$ m、 $b < 100$ mの場合は、

a の部分の平均離隔距離 b_m は $a/2$ とし、平行する長さ l は10mとする。

b の部分の平均離隔距離 b_m は $b/2$ とし、平行する長さ l は10mとする。

(ii) 通信線と鉄道が交叉しない場合

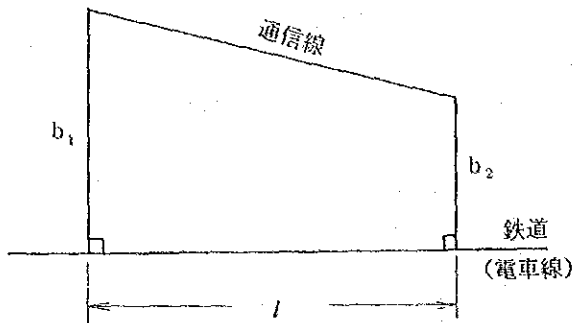


図 4.3 通信線が交叉しない場合

図 4.3 のような場合は、通信線の鉄道への投影部分の長さを l m とし、

平均離隔距離 b_m は、

$$\frac{b_1 + b_2}{2} \quad \text{とする。}$$

(2) 相互インダクタンス M

電車線と通信線間の相互インダクタンスは、carson-pollaczek の式を用いて計算し、誘導電圧、事故時誘導危険電圧等の計算には、60 Hz の相互インダクタンス M_{60} の図 4.4 を用いる。

また、誘導雑音電圧の計算には、800 Hz における相互インダクタンス M_{800} の図 4.5 を用いる。

なお、carson-pollaczek による 2 導体間の相互インダクタンス M_{12} は、

$$M_{12} = 2 \log_e \frac{2}{k\sqrt{b^2 + (h_1 - h_2)^2}} + \frac{4}{3\sqrt{2}} k (h_1 + h_2) - 0.1544 - j \left\{ \frac{\pi}{2} - \frac{4}{3\sqrt{2}} k (h_1 + h_2) \right\} \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

但し、 $k\sqrt{b^2 + (h_1 - h_2)^2} < 0.5$

$$k = 2\pi\sqrt{2\sigma f \times 10^{-7}}$$

σ : 大地導電率 (S/m)

f : 周波数 (Hz)

b : 2 導体間の離隔距離 (m)

h_1, h_2 : 2 導体の高さ (m)

$$M_{12} = \frac{4}{kb} \left[kei'(kb) - j \left\{ \frac{1}{kb} + ker'(kb) \right\} \right] \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

但し、 $kb \geq 0.5$ ($h_1 + h_2 \ll b$)

$kei'(kb), ker'(kb)$: kelvin 函数

図 4.4 60Hzにおける相互インダクタンスM60 uH/km

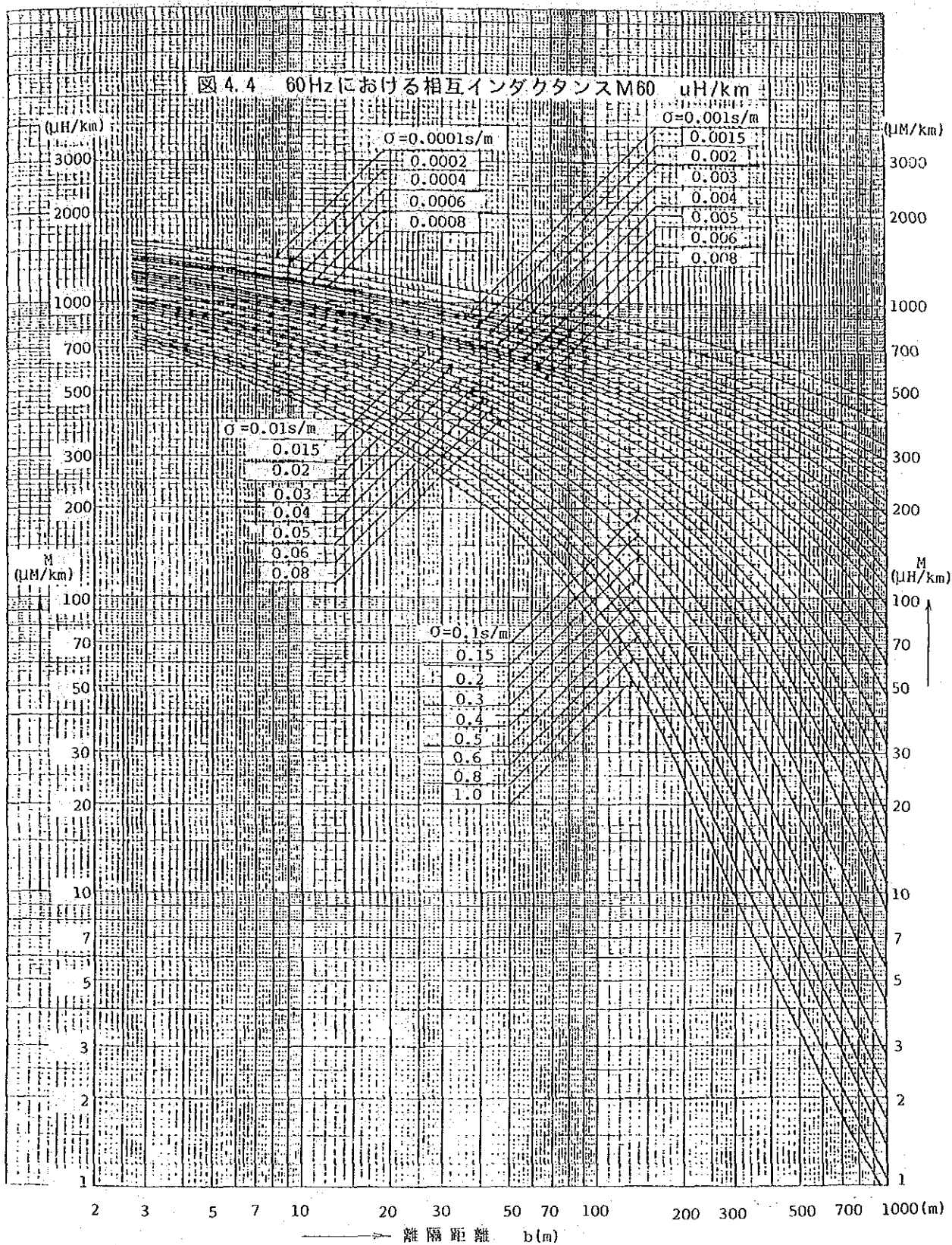
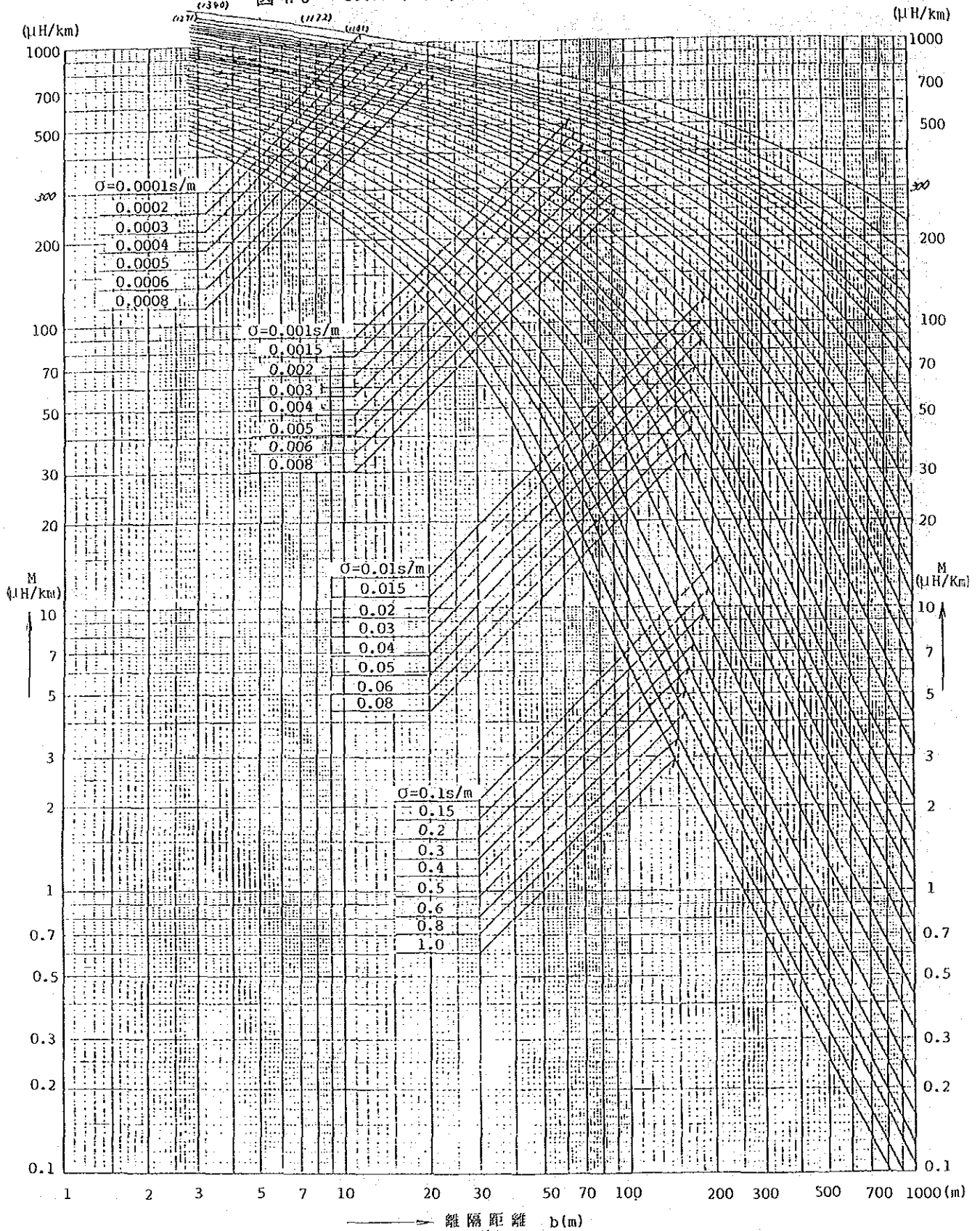


図 4.5 800Hz における相互インダクタンス M 800 $\mu\text{H}/\text{km}$



$$M_{12} = -j \frac{1}{(kb)^2} \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

但し、 $kb > 10$

で求められる。

なお、自己インダクタンス L は導体の半径を r 、高さを h とすると、

$$L = 2 \log_e \frac{2}{kr} + \frac{8}{3\sqrt{2}} kh - 0.1544 - j \left(\frac{\pi}{2} - \frac{8}{3\sqrt{2}} kh \right) \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

で求められる。

(3) 負荷電流 I_p 及び等価妨害電流 J_p

(i) 負荷電流 I_p は車輛負荷の運転曲線等より求める。

メキシコーケレタロ間では機関車 1 輛による列車編成のときの負荷電流 I_p は (200 A) とし、機関車が重連で運転するときの I_p は (400 A) とする。

(ii) 等価妨害電流 J_p は、車輛の運転時における実測値又は車輛の設計値等から求める。

メキシコーケレタロ間では機関車 1 輛による列車編成のときの等価妨害電流 J_p は (14 A) とし、機関車が重連運転のとき J_p (19.5 A) とする。

誘導雑音電圧を計算するとき使用する J_p の値は、しゃへい層のある通信ケーブルでは J_p 値そのままの値を使用し、裸通信線やしゃへい層のない通信ケーブルでは J_p 値の 0.73 倍の値を使用する。

なお、機関車がサイリスタ制御車でない場合の J_p の値は、電源周波数が 60 Hz 系のとき、車輛の負荷電流 $I_p = 100$ A 当りで

$$\text{高調波含有率 } 1/n^2 \text{ のとき } J_p = 2.3 \text{ A}$$

$$\text{高調波含有率 } 1.5/n^2 \text{ のとき } J_p = 3.45 \text{ A} \quad \text{程度である。}$$

(4) 事故電流 I_f

事故電流は、各き電区間毎に、式 (3.7) を用いて計算した値を使用する。

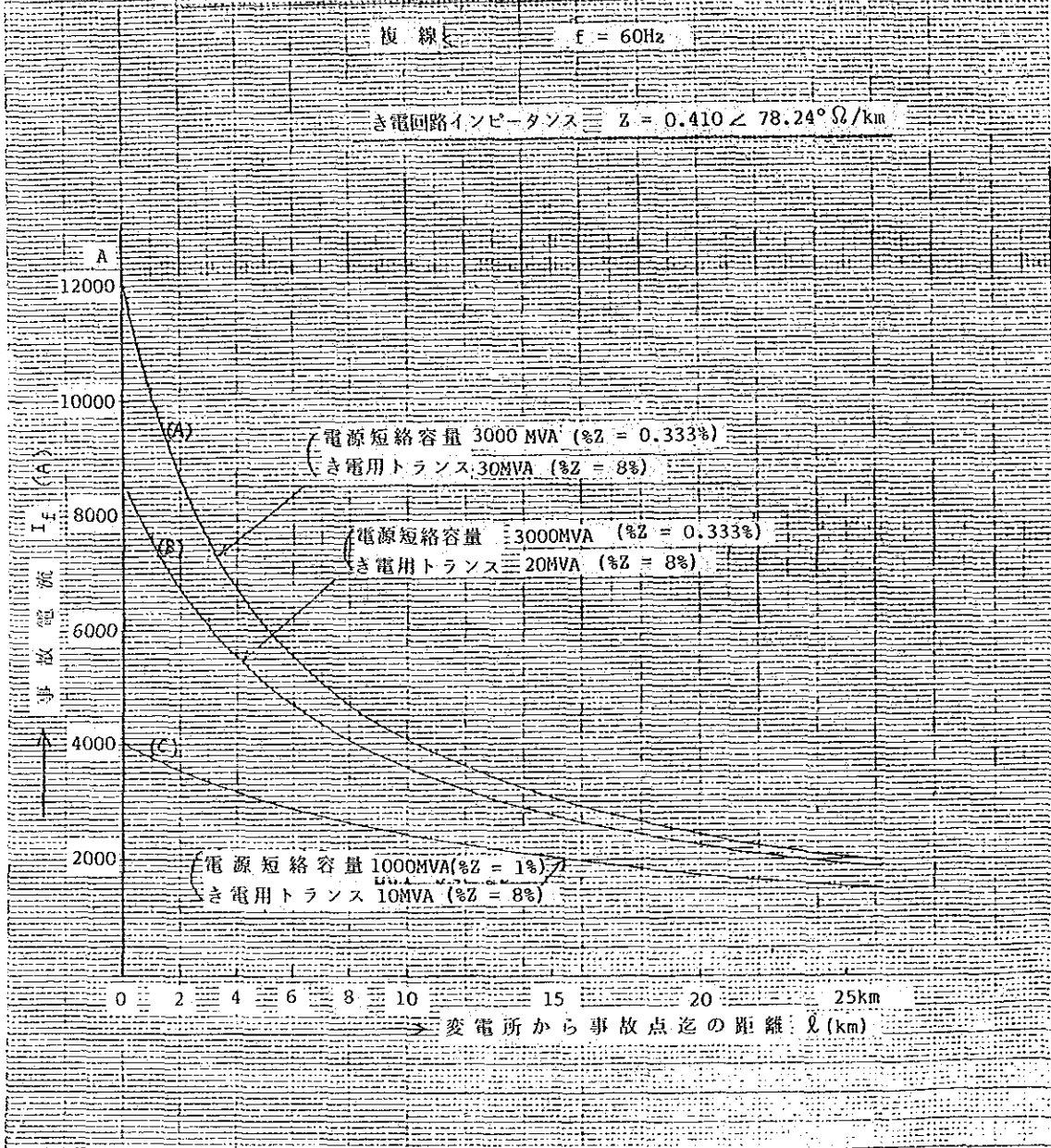
き電回路のインピーダンスは、表 4.1 によって求める。

表 4.1 き電回路のインピーダンス 60 Hz

き電回路種別	き電回路インピーダンス Z (Ω/km)	記 事
単 線	$0.453 \angle 77.79^\circ$	レール電位の影響を省略
複 線	$0.410 \angle 78.24^\circ$	同 上

なお、事故電流の 1 例として、図 4.6 に示す。

図 4.6 き電回路の事故電流 I_f



(5) レールおよびG.Wによるしゃへい係数(1-n)

単線の場合は、表4.2、表4.3および図4.7を用い、複線の場合は、表4.4、表4.5および図4.8を用いる。

表4.2 単線の1-n (f=60Hz)

大地導電率 σ (s/m)	α_1	β_1	n_1	m_1	n	1-n
0.0001	0.626	0.375	0.633	0	0.633	0.371
0.001	0.625	0.376	0.591	0	0.591	0.413
0.01	0.624	0.377	0.539	0	0.539	0.464
0.1	0.624	0.378	0.474	0	0.474	0.528
1.0	0.623	0.378	0.393	0	0.393	0.607

表4.3 単線の1-n (f=800Hz)

大地導電率 σ (s/m)	α_1	β_1	n_1	m_1	n_1	1-n
0.0001	0.633	0.367	0.661	0	0.661	0.340
0.001	0.632	0.368	0.612	0	0.612	0.390
0.01	0.631	0.369	0.549	0	0.549	0.454
0.1	0.631	0.370	0.468	0	0.467	0.537
1.0	0.630	0.370	0.369	0	0.369	0.637

$$\alpha_1 = I_r / I \quad \beta_1 = I_f / I \quad I = I_r + I_f \quad \text{車輛の負荷電流 (60 Hz)}$$

$$n_1 = I_R / I \quad m_1 = I_G / I = 0$$

$$n = \alpha_1 + \beta_1 - n_1 - m_1$$

f=800 Hzの場合は、誘導雑音電圧の計算に使用する。

表4.4 複線の1-n (f=60Hz)

σ (s/m)	α	β	n_1	n_2	m_1	m_2	n	1-n
0.0001	0.628	0.373	0.398	0.350	0	0	0.747	0.255
0.001	0.627	0.374	0.380	0.332	0	0	0.712	0.290
0.01	0.627	0.375	0.357	0.309	0	0	0.656	0.335
0.1	0.626	0.375	0.326	0.279	0	0	0.605	0.395
1.0	0.625	0.376	0.286	0.239	0	0	0.524	0.476

表 4.5 複線の $1-n$ $(f = 800 \text{ Hz})$

σ (s/m)	α	β	n_1	n_2	m_1	m_2	n	$1-n$
0.0001	0.635	0.365	0.416	0.344	0	0	0.760	0.241
0.001	0.634	0.366	0.396	0.323	0	0	0.719	0.283
0.01	0.634	0.367	0.368	0.295	0	0	0.663	0.340
0.1	0.633	0.367	0.330	0.258	0	0	0.587	0.418
1.0	0.632	0.368	0.280	0.210	0	0	0.490	0.517

$$\alpha = I_{T1} / I, \quad \beta = I_{F1} / I \quad I = I_{T1} + I_{F1} : \text{車輛の負荷電流 } 60 \text{ Hz}$$

$$n_1 = I_{R1} / I, \quad n_2 = I_{R2} / I$$

$$m_1 = I_{G1} / I = 0 \quad m_2 = I_{G2} / I = 0$$

$$n = \alpha + \beta - n_1 - n_2 - m_1 - m_2$$

$f = 800 \text{ Hz}$ の場合は、誘導雑音電圧の計算に使用する。

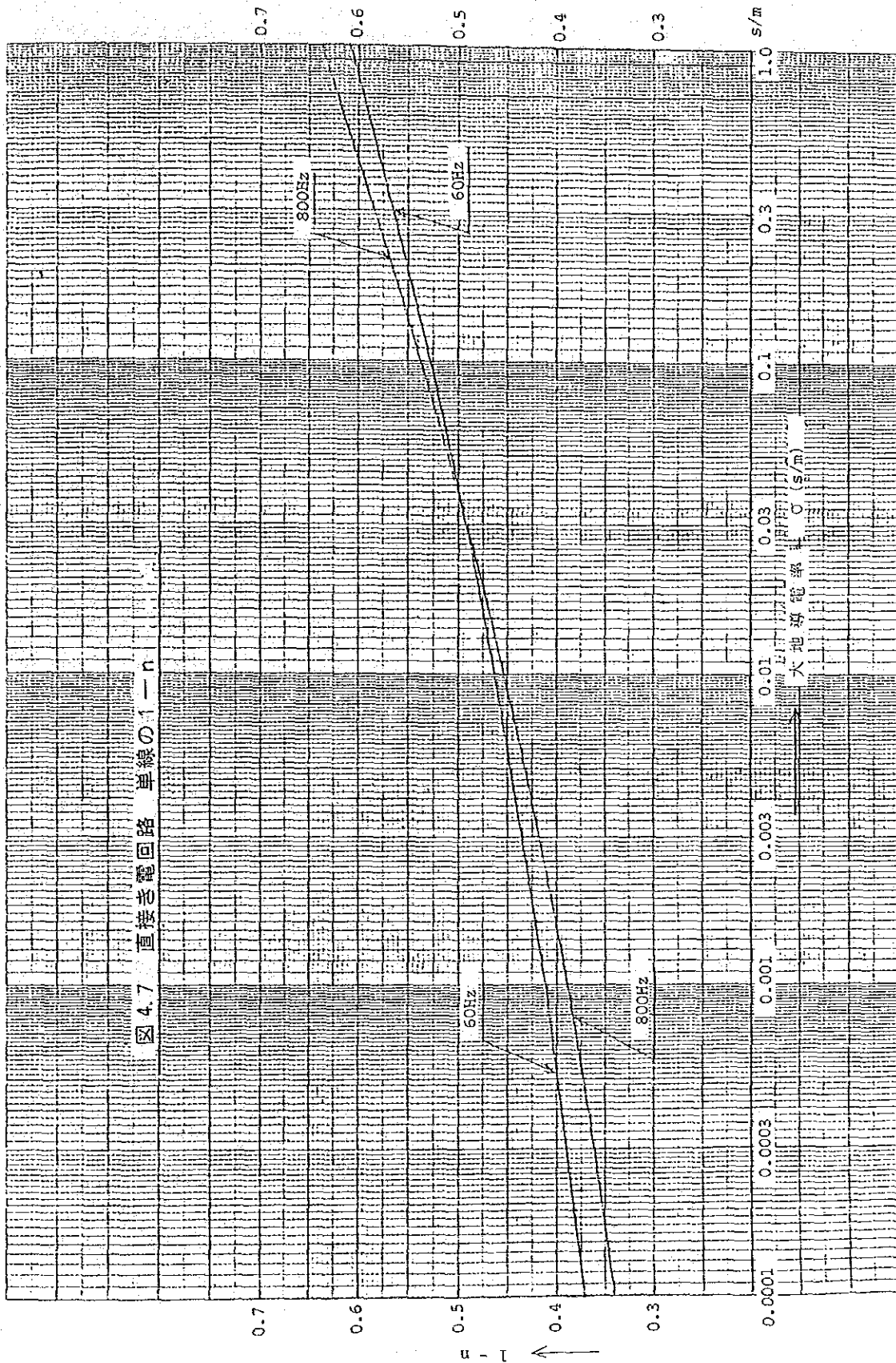


図 4.7 直接電回路 実線の 1 - α

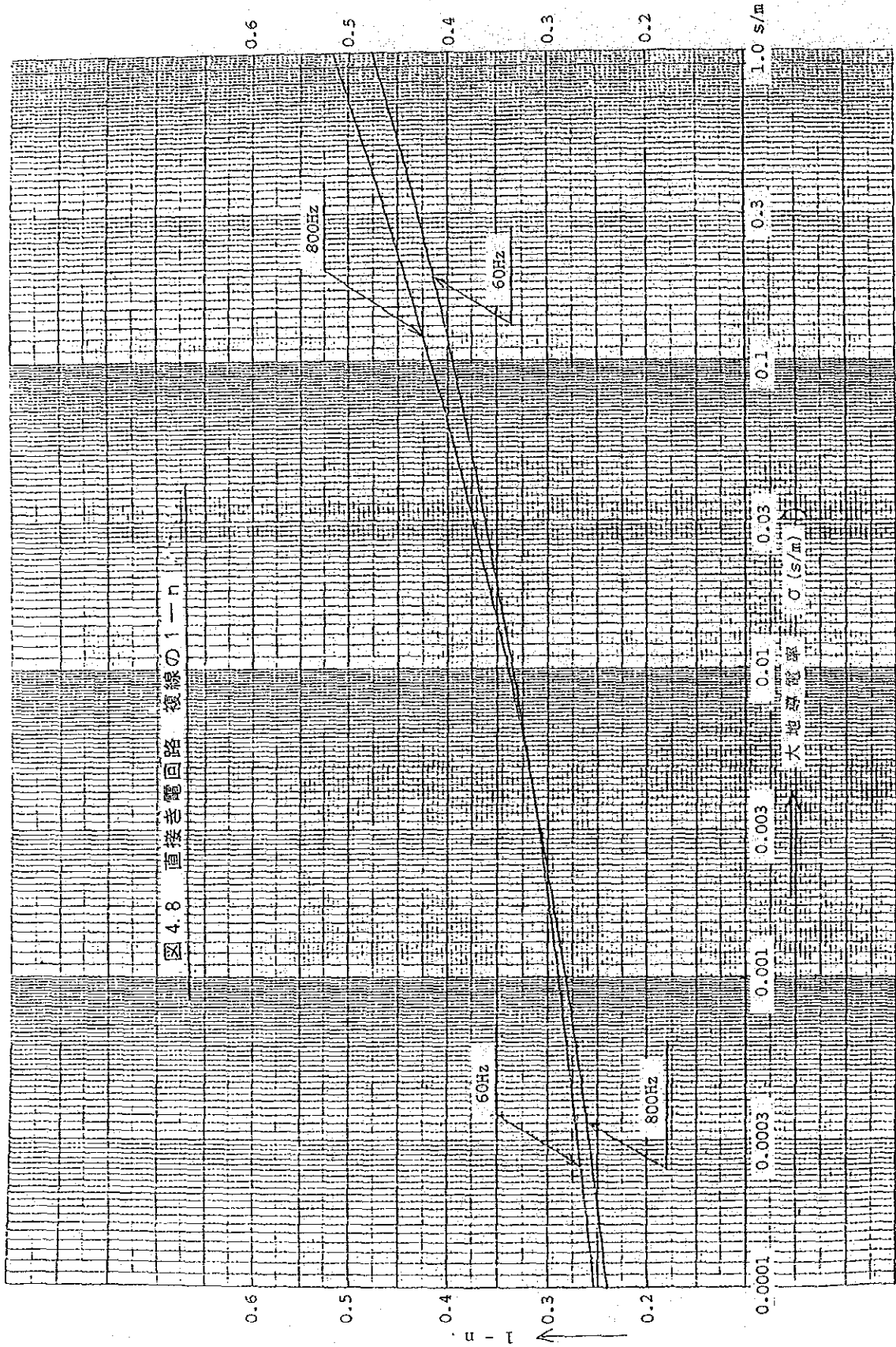


図4.8 直接電回路複線の1-n

(6) 通信線の離隔距離が小さい場合の誘導電圧 V_m と誘導雑音縦電圧 V_n

単線の場合の誘導電圧 $V_m / A \cdot km$ を図 4.9, 図 4.10 に示し, 誘導雑音縦電圧 $V_n / A \cdot km$ を図 4.11, 図 4.12 に示す。

又, 複線の場合の誘導電圧 $V_m / A \cdot km$ を図 4.13, 図 4.14 に示し 誘導雑音縦電圧 $V_n / A \cdot km$ を図 4.15, 図 4.16 に示す。

図 4.9 通信線の誘導電圧 (離隔距離の小さい場合) $V_m/A.km$

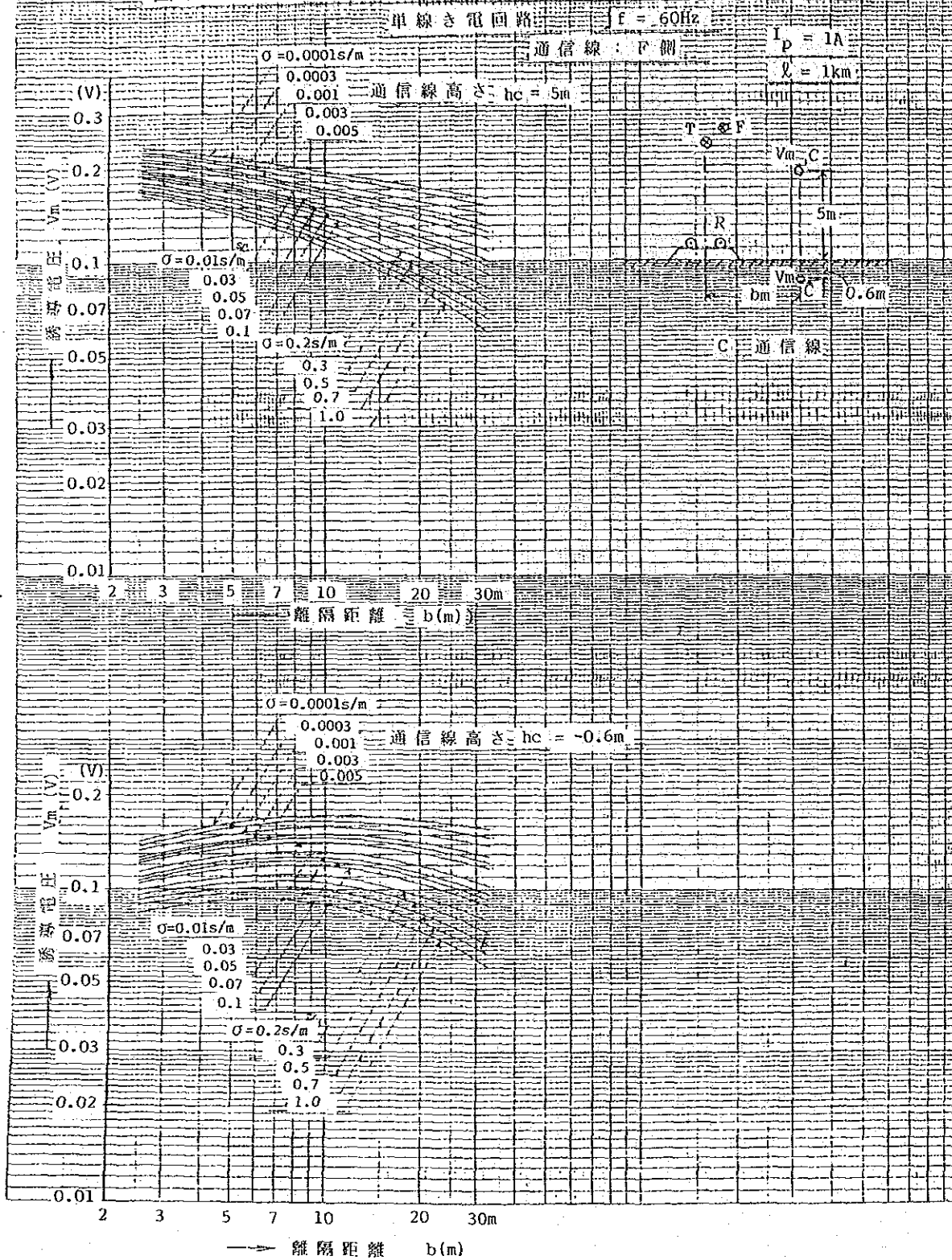


図 4.10 通信線の誘導電圧 (離隔距離の小さい場合) $V_m/A.km$

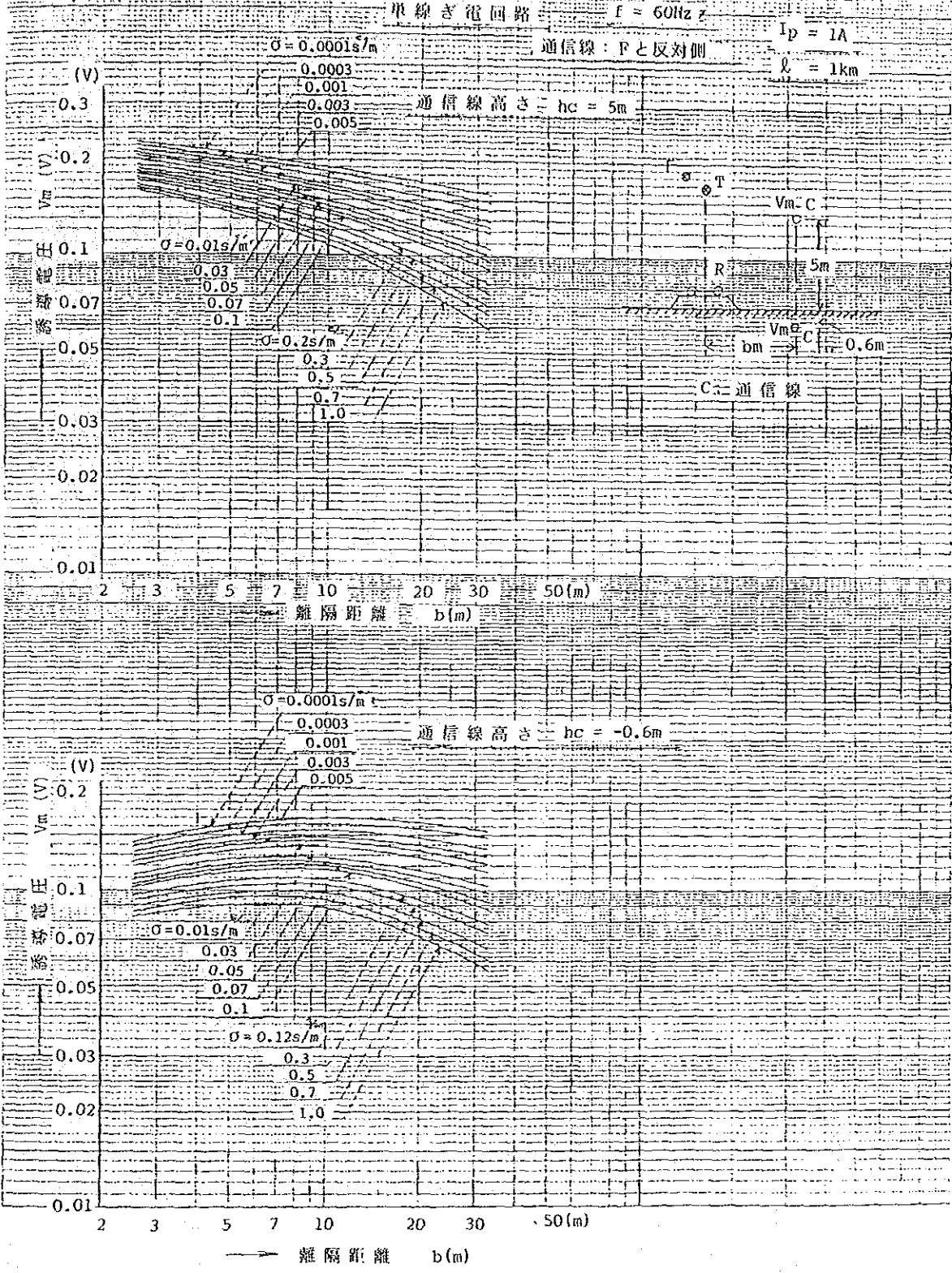


図 4.11 通信線の誘導雑音縦電圧 (離隔距離の小さい場合) $V_n/A \cdot km$

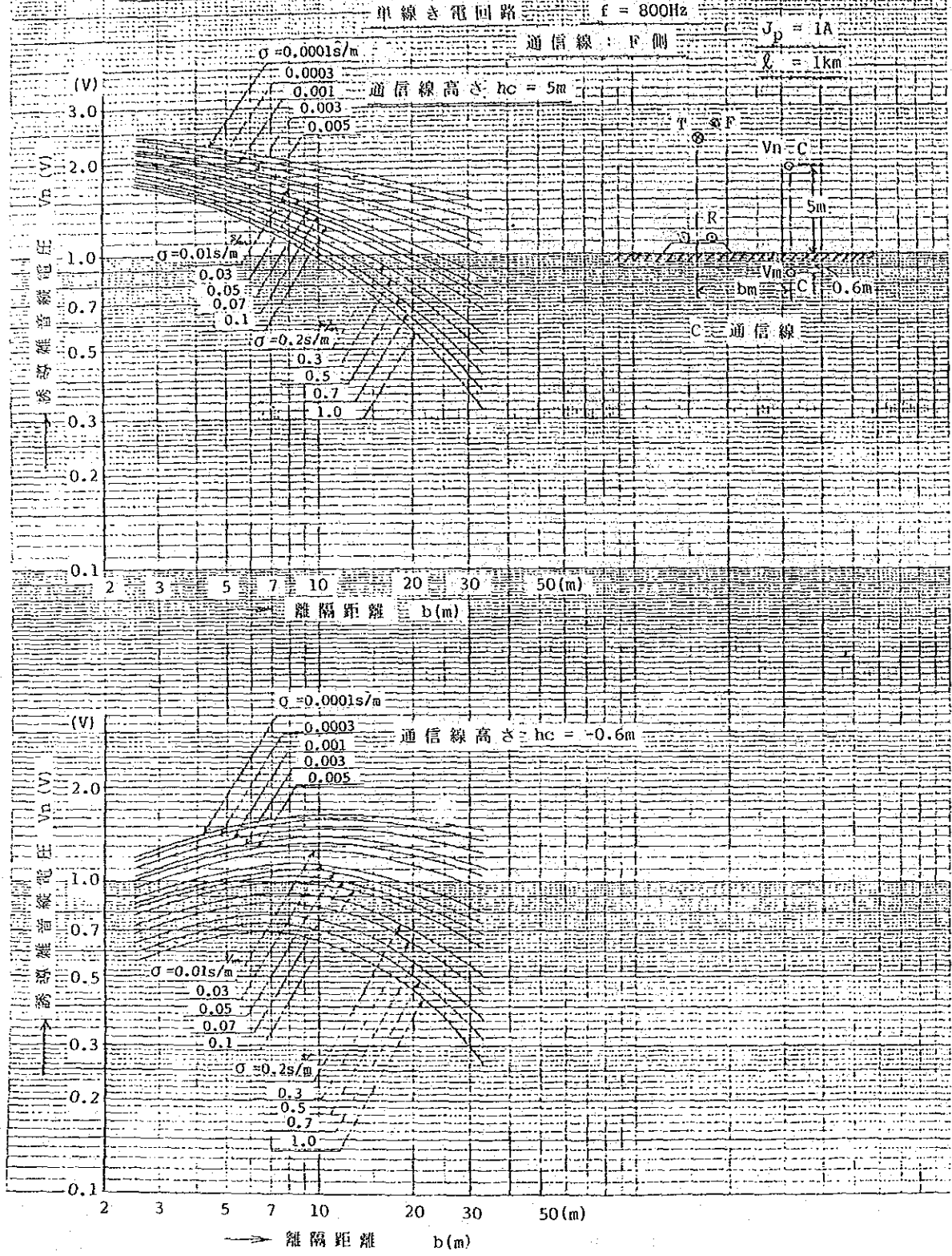


図 4.12 通信線の誘導雑音縦電圧 (離隔距離の小さい場合) $V_n/A \cdot km$

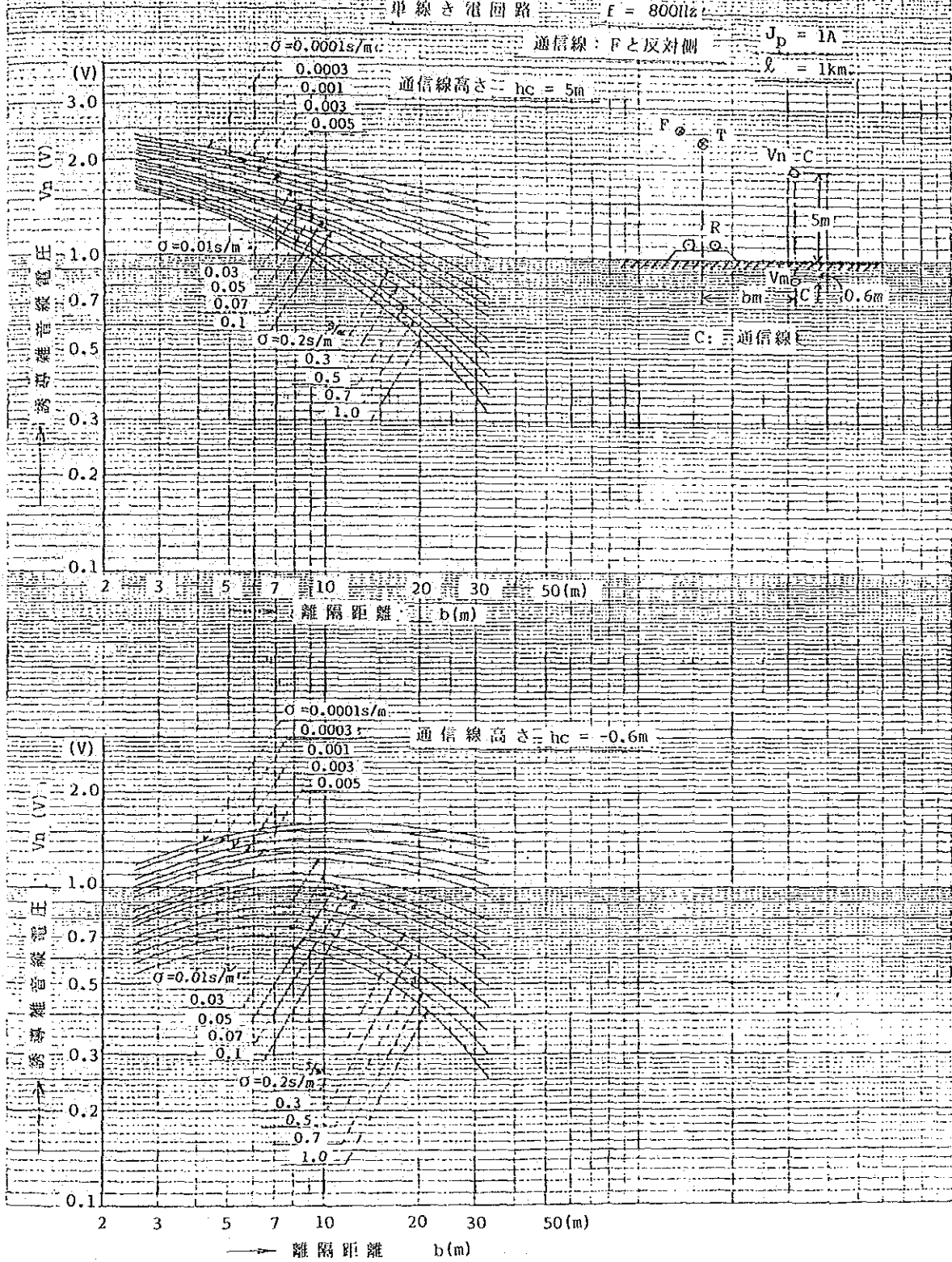


図 4.13 通信線の誘導電圧 (離隔距離の小さい場合) $V_m/A, km$

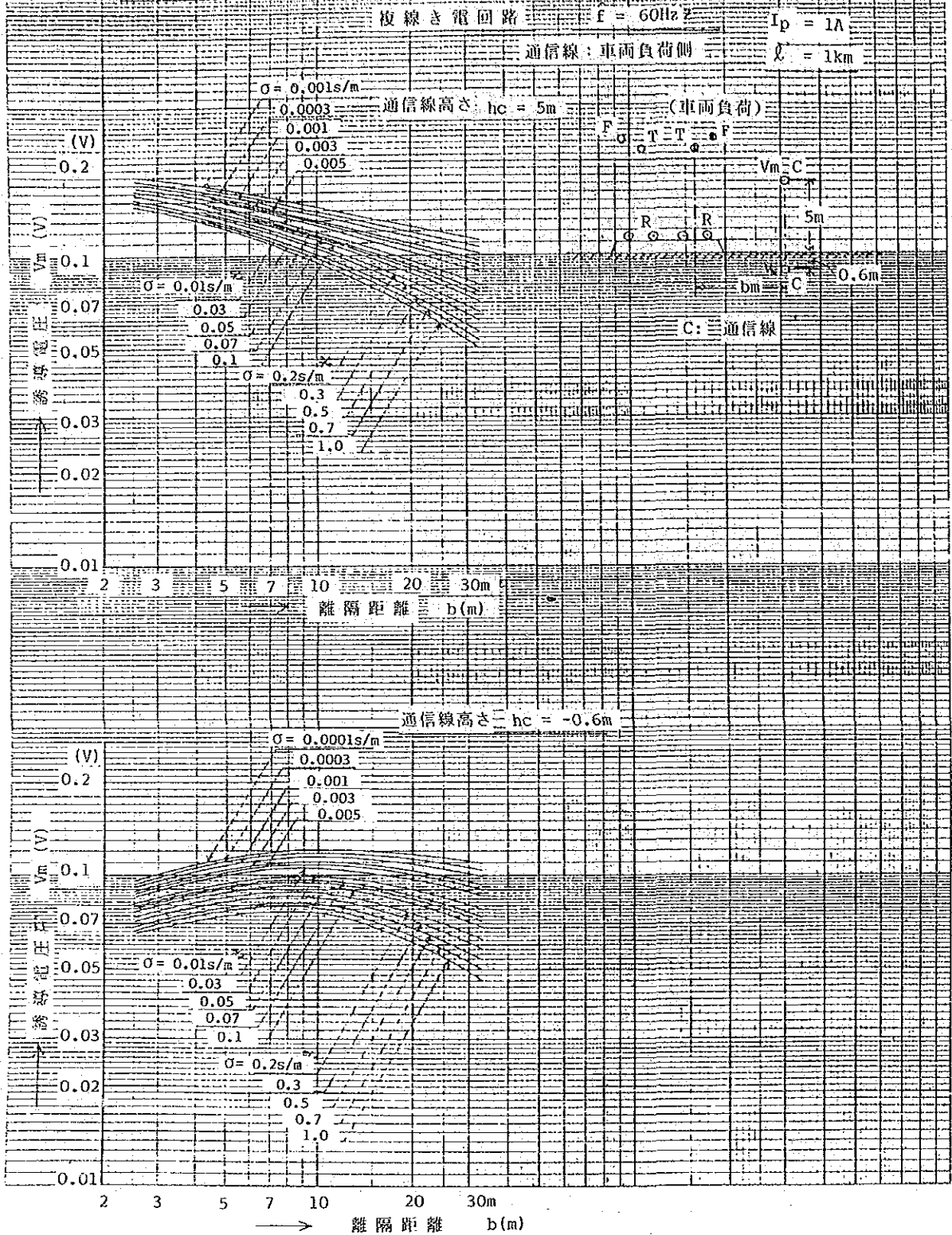


図 4.14 通信線の誘導電圧 (離隔距離の小さい場合) $V_m/A.km$

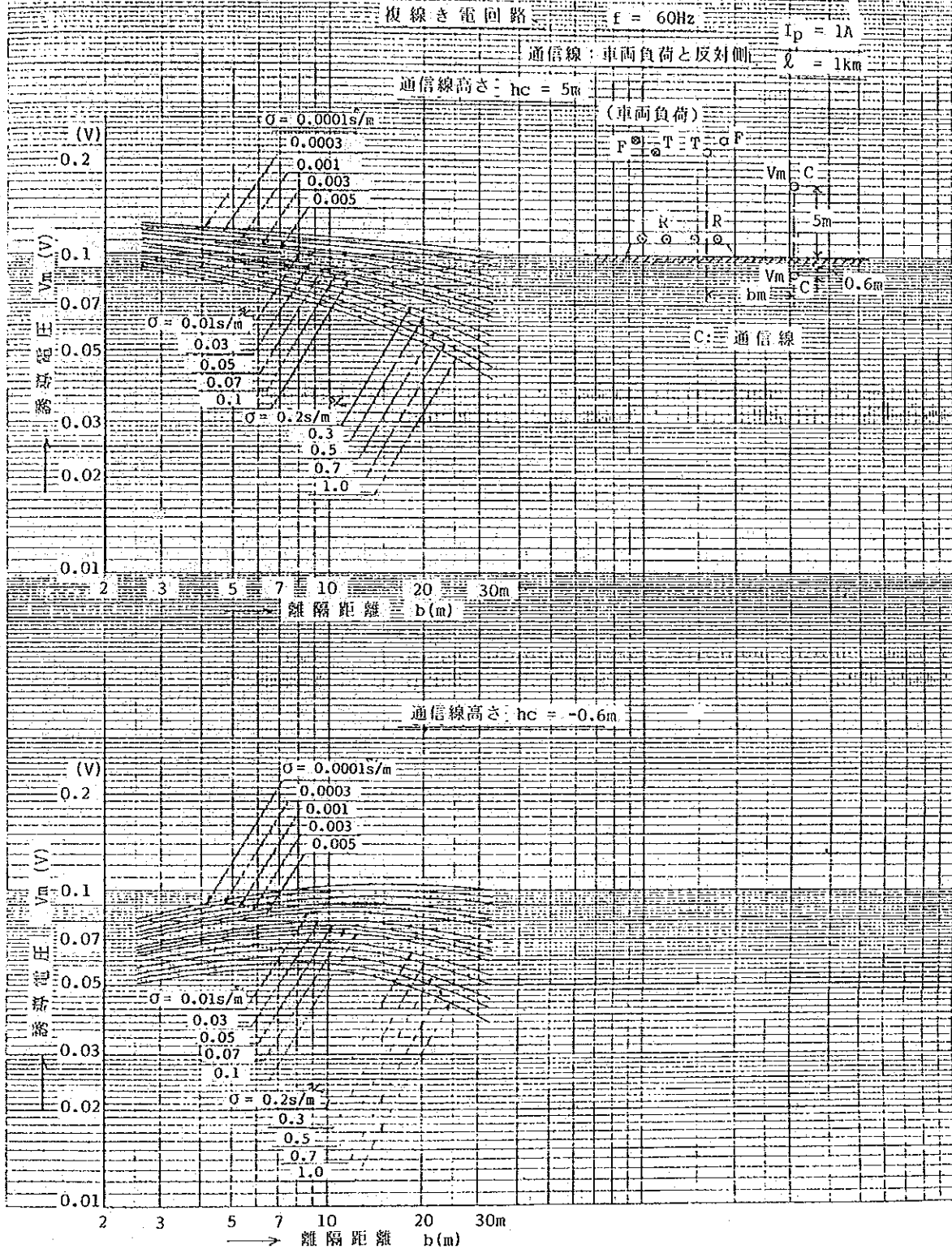


図 4.15 通信線の誘導雑音縦電圧 (離隔距離の小さい場合) $V_n/A.km$

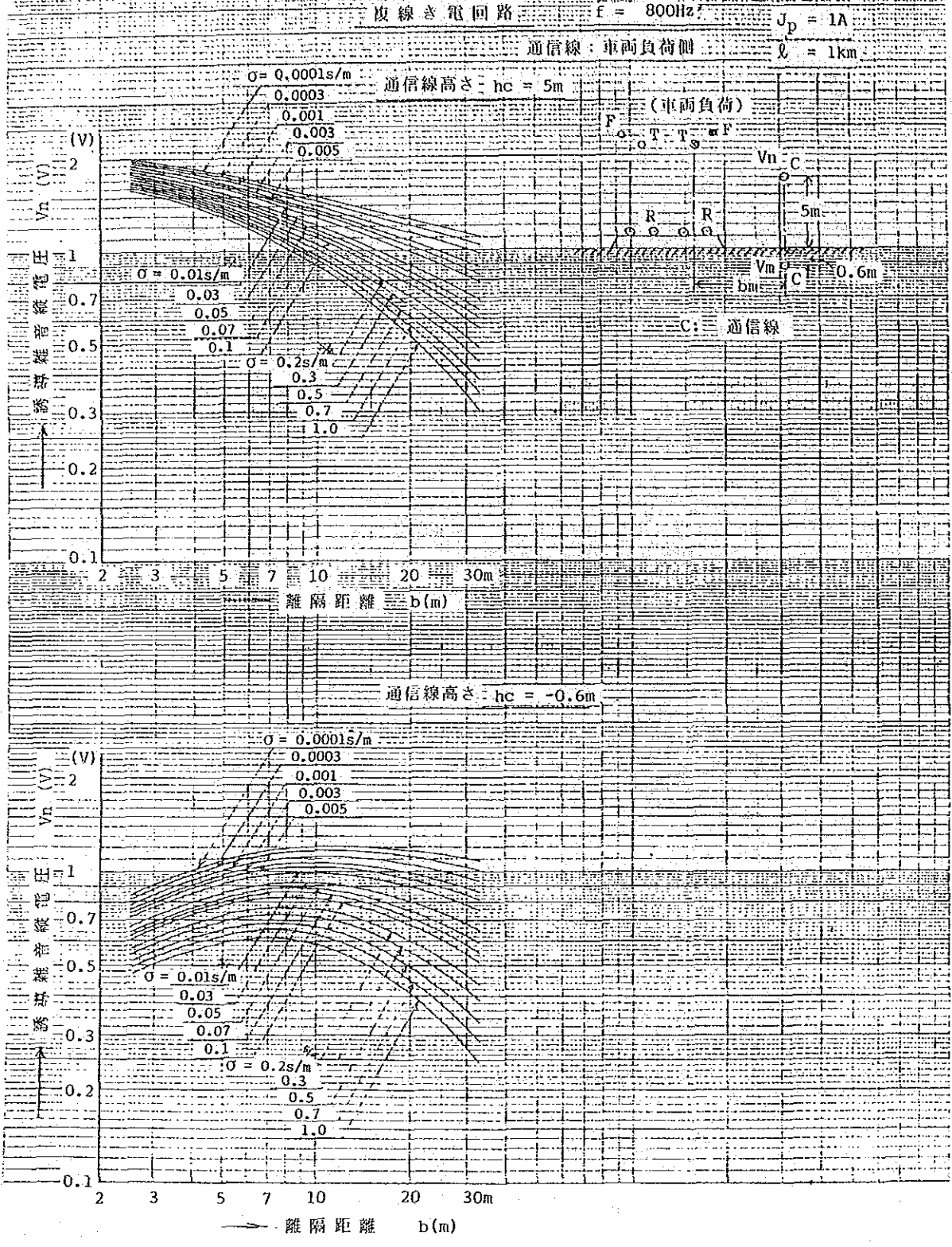
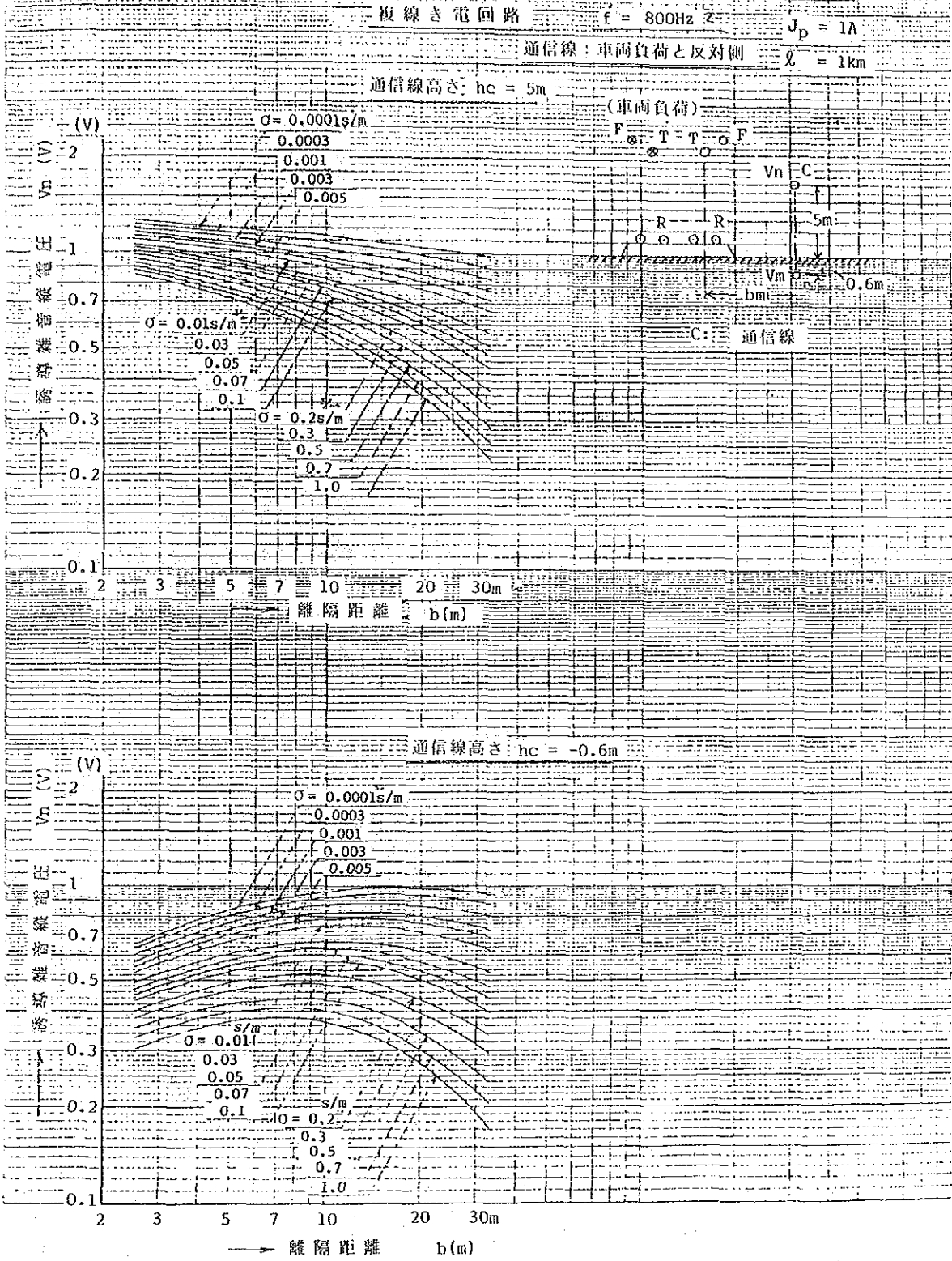


図 4.16 通信線の誘導雑音縦電圧 (離隔距離の小さい場合) $V_n/A.km$



(7) 通信線のしゃへい係数と平衡度

- (i) 通信線のしゃへい係数は、使用するしゃへい層によって異なるが、実測値又は設計値を採用する。表 4.6 にしゃへい係数 K_i の値を示す。

表 4.6 通信線のしゃへい係数 K_i

通信ケーブルの種別	しゃへい係数 K_i		記 事
	60 Hz	800 Hz	
裸線, RDワイヤ しゃへい層のないケーブル	1.0	1.0	
鉛被ケーブル しゃへい層のあるケーブル	0.95	0.15	しゃへい層が薄い場合
鋼帯付しゃへいケーブル	0.6	0.1	
鋼帯付しゃへいケーブル	0.2	0.03	高しゃへいケーブル
管 路 ケ ー ブ ル	0.2	0.03	

- (ii) 通信回線の平衡度 λ は、実測値のある場合は、実測値を使用し、実測値のない場合は表 4.7 の値とする。

表 4.7 通信回線の平衡度 λ

種 別	平衡度 λ	記 事
裸 通 信 線	$\frac{1}{200}$ (46 dB)	
通信ケーブル, RDワイヤ	$\frac{1}{1000}$ (60 dB)	(新しいケーブルでは) 70 dB程度が多い)
磁石式交換機	$\frac{1}{1000}$ (60 dB)	
自動交換機	$\frac{1}{200}$ (46 dB)	
共電交換機	$\frac{1}{200}$ (46 dB)	

(8) しゃへい線のしゃへい係数 K_2

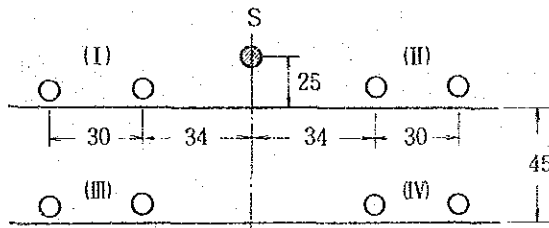
裸通信線におけるしゃへい線のしゃへい係数の例を表 4.8 に示す。

表 4.8 接地線のしゃへい係数 K_2

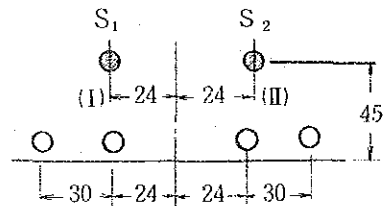
しゃへい線数	回線位置	接地抵抗 (Ω/km)					
		0		0.5		1	
		4 mm C_u	5 mm C_u	4 mm C_u	5 mm C_u	4 mm C_u	5 mm C_u
1	(I)(II)	0.867	0.776	0.913	0.872	0.940	0.915
1	(III)(IV)	0.872	0.785	0.916	0.877	0.942	0.917
2	(I)(II)	0.736	0.597	0.862	0.816	0.917	0.901

$f = 50 \text{ Hz}$ $\sigma = 0.01 \text{ s/m}$ S : しゃへい線

しゃへい線 1 条の場合



しゃへい線 2 条の場合



(9) 他軌道のしゃへい係数 K_3

き電回路に他軌道が近接している場合の、他軌道のしゃへい係数 K_3 は、表 4.9 および図 4.17~図 4.20 によって求める。

表 4.9 他軌道によるしゃへい係数 K_3

他軌道の位置	他軌道数	平行長			
		500 ~ 1000 m 未 満	1000 ~ 1500 m 未 満	1500 ~ 3000 m 未 満	3000 m 以上
通信線と き電回路の間にあ る場合	1	0.93	0.87	0.81	図 4.17
	2	0.87	0.76	0.67	図 4.19
	3	0.83	0.71	0.60	—
	4	0.80	0.65	0.54	—
通信線と き電回路の外側に ある場合	1	0.97	0.95	0.92	図 4.18
	2	0.95	0.90	0.86	図 4.20
	3	0.93	0.88	0.84	—
	4	0.92	0.86	0.82	—

図 4.17 他軌道によるしゃへい係数 K_3 (単線)

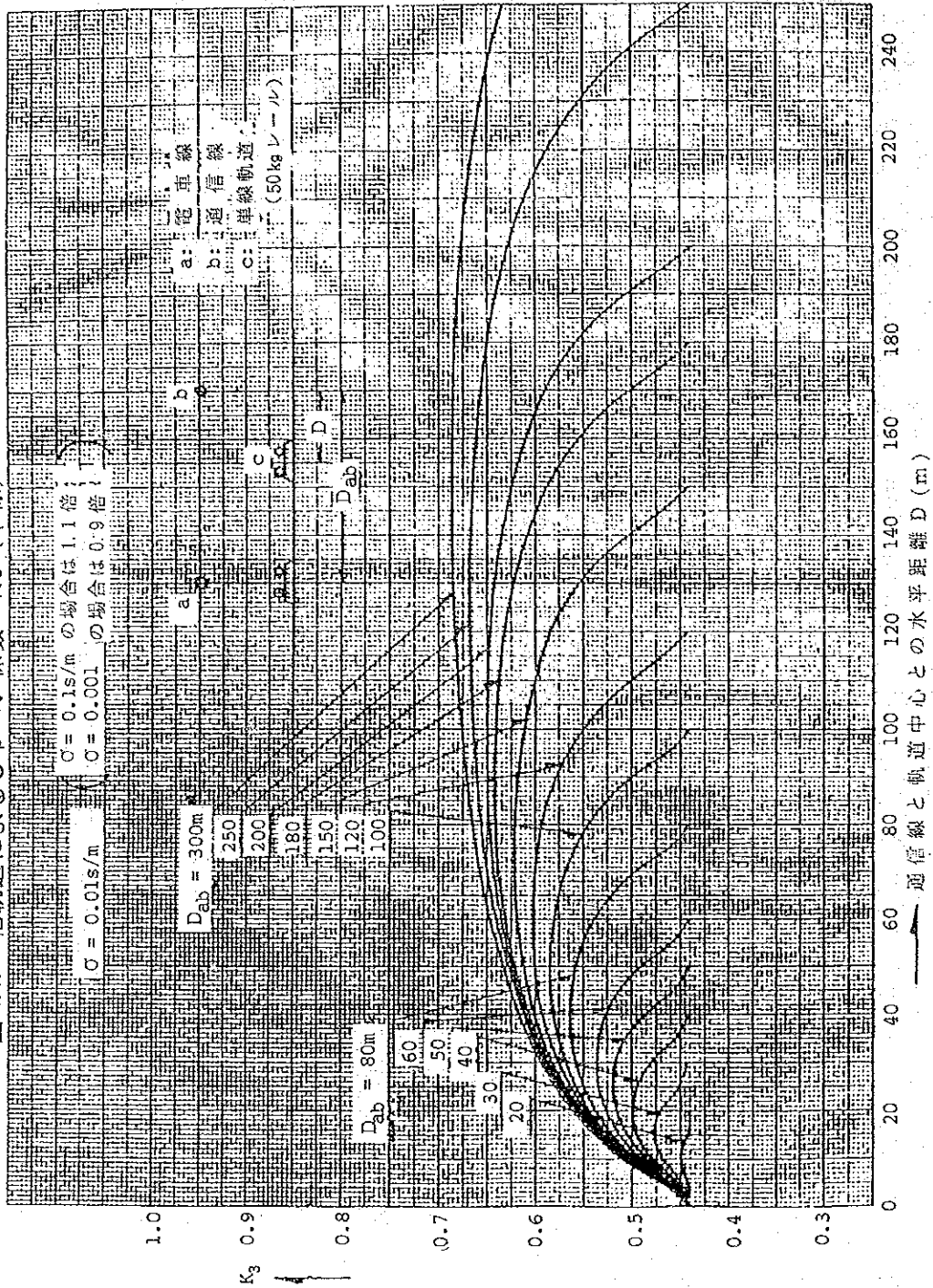


図 4.18 他軌道によるしゃへい係数 K_3 (単線)

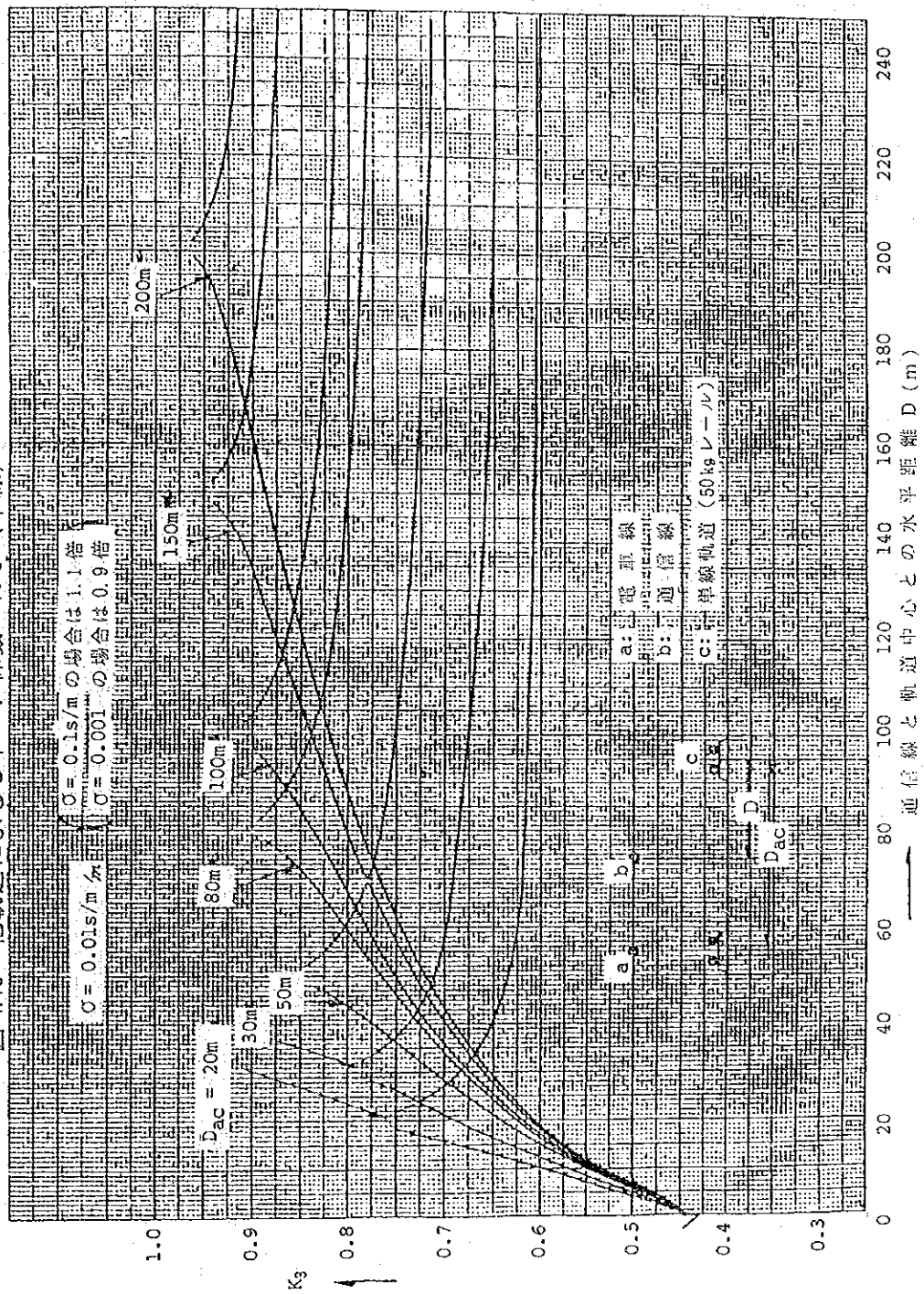


図 4.19 他軌道によるしゃへい係数 K_3 (複線)

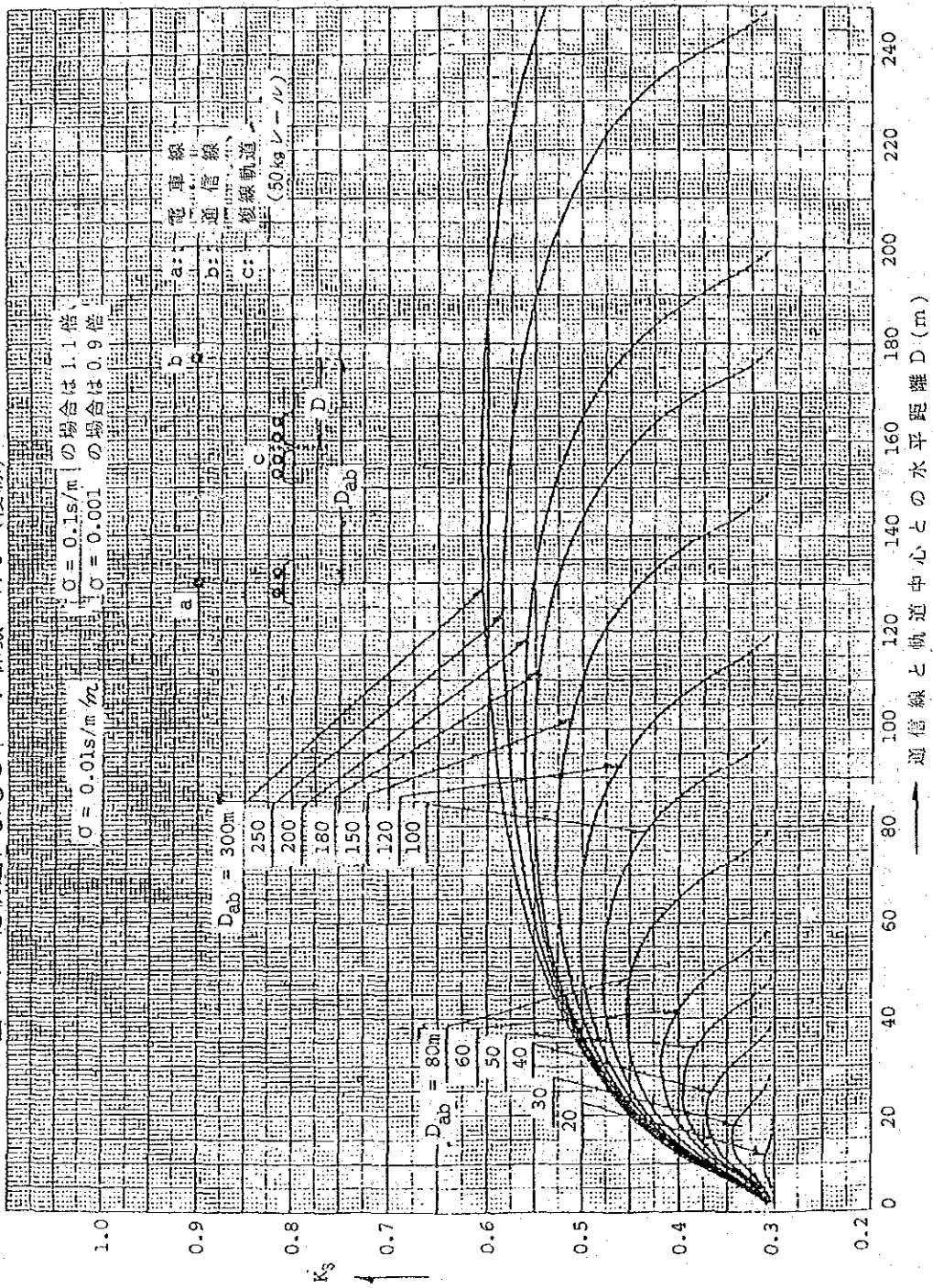


図 4.20 他軌道によるしゃへい係数 K_3 (複線)

