

電気鉄道より通信線への誘導障害の
特性とその防止方法

昭和36年9月

宮 下 一 雄

DOC
1961
26
電気系

内 容 概 要

本研究は電気鉄道より通信線に及ぼす誘導障害の性質とその防止法について現象の理論的解析および実験的実証を行ったものである。

第1章においては研究の目標と経緯を述べ、従来の考え方を展覧整理して本研究の工学的出発点を明らかにすると共にさらに誘導作用により生ずる危険電圧と雑音電圧の許容値についてその内容を検討し、誘導調整の合理的実施に対する基礎知識を与えた。

第2章においては電気鉄道回路を電車線路と軌道とに分け、それぞれを大地帰路回路として扱いその上の電圧、電流の分布について解析し、特に軌道上の電流に関して進行波理論を応用することにより、現象の把握および回路の解析に格段の便宜を得られることを明らかにし、さらに軌道のインピーダンス、軽減係数および電車線回路のインピーダンス計算式を導出した。また電化工事の際して各所で行った実験結果について述べ上記理論の妥当性を実証している。

第3章においては電気鉄道回路の代表的な線条配置に対して通信線へ与える電磁誘導電圧、静電誘導電圧および雑音電圧の計算式を与え、さらにこれらに及ぼす3線条の影響について理論的に考察し、特に国鉄横浜線において行った3000V加圧実験の結果について述べ、これらの理論を適用して実験値の解明を行うことのできることを示した。

第4章においては誘導により通信線に生ずる雑音と通信回線の平衡度との関係およびこれに与える通信回線の線路定数不平衡、交叉などの影響について理論的、実験的に究明し、誘導雑音の予測を可能とするため多くの通信回線について平衡度の実情を調査した結果について述べ、またこれを改善する方法について実験的検討を加えている。

第5章においては交流電気運転における吸上変圧器の動作特性について回路解析を行い、その結果より吸上変圧器の誘導軽減係数を定めその特性を明らかにすると共に、さらに仙山線交流電化試験区間においてこれを実施し、回路のインピーダンス特性、電流、電圧の分布状況および誘導軽減係数の測定を行った結果について述べ理論と実験との比較を行っている。

第6章においては交流電化による誘導調整に關して第1章ないし第5章に得られた知識を整理適用して、誘導障害予測計算の方法および誘導防止対策の選定指針を与え、

さらに北陸線交流電化における実施例を示し、また欧州における実情調査の結果について述べている。

オ7章においては直流電化による誘導調整に関してオ1章ないしオ4章の知識を整理適用して誘導雑音予測計算の方法および誘導防止対策選定指針を与え、さらに高崎線、東海道線などの直流電化における実施例を示している。

オ8章においては誘導予測計算に必要な大地導電率の調査方法として特に自己誘導係数法およびサーチコイル法の開発を行い、これによる各地の調査結果を示した。また誘導電圧および雑音電圧の測定方法について述べている。

附録には本文中に記載された諸式の中、その演算過程を省略したものについて、それらの導出法を示している。

電気鉄道より通信線への誘導障害の 特性とその防止方法

内容概要

目 次

第 1 章	緒 論	1
1.1	研究の目的	1
1.2	研究の経過	1
1.3	誘導調整に関する従采の考え方	3
1.3.1	C.C.I.T.T.の考え方	3
1.3.2	電気工作物規程の考え方	7
1.4	危険電圧とその許容値	8
1.5	雑音電圧とその許容値	12
第 2 章	電気鉄道回路の特性	18
2.1	緒 言	18
2.2	軌道上の電圧および電流の分布	18
2.3	軌道のインピーダンスおよび軽減係数	26
2.3.1	レールのインピーダンス	26
2.3.2	軌道のインピーダンスおよび伝播定数	29
2.3.3	軌道の軽減係数	36
2.4	軌道上の電圧、電流分布の実測例	37
2.5	電車線路のインピーダンス	42
2.5.1	電車線路の対地静電容量	42
2.5.2	電車線回路のインピーダンス	44
2.5.3	実測値と計算値の比較	47
第 3 章	電気鉄道における誘導作用	50
3.1	電気鉄道における電磁誘導作用	50
3.1.1	電車線の場合	50
3.1.2	正き電線を有する場合	53
3.1.3	負き電線を有する場合	57

3.2	電気鉄道における静電誘導作用	60
3.3	静電誘導電圧と電磁誘導電圧の重ねの理論	65
3.3.1	被誘導線が短い場合	65
3.3.2	被誘導線が長い場合	69
3.4	雑音電圧の計算	73
3.4.1	交流電気鉄道における雑音電圧計算式	73
3.4.2	直流電気鉄道における雑音電圧	78
3.5	第3線条の影響	80
3.5.1	静電誘導における多線条効果	80
3.5.2	電磁誘導に対する多線条効果	83
第4章	通信回線の平衡度と雑音	87
4.1	平衡度の意義	87
4.1.1	結 言	87
4.1.2	平衡度の種別	87
4.1.3	平衡度の測定法	88
4.2	回線平衡度と不平衡量との関係	89
4.3	雑音平衡度と不平衡量との関係	98
4.3.1	静電誘導の関係する場合	98
4.3.2	電磁誘導の関係する場合	99
4.4	平衡度の周波数特性および交叉の影響	101
4.4.1	回線平衡度の周波数特性と終端条件および交叉の影響	102
4.4.2	雑音平衡度と交叉の関係	106
4.4.3	ケーブル通信線の回線平衡度周波数特性	110
4.5	誘導交叉実施例	112
4.6	平衡度の実状調査	114
4.6.1	通信回線の平衡度分布	114
4.6.2	平衡度の時間的変動についての実測	119
4.7	結 論	122
第5章	交流電気運転における ^{改正} 変圧器の効果	124
5.1	緒 言	124

5.2	吸上変圧器を有するき電回路のレール中の電圧電流	125
5.2.1	吸上変圧器を直接電車線とレール間に挿入した場合	126
5.2.2	吸上変圧器と負き電線を有する場合	131
5.3	吸上変圧器の誘導軽減作用	137
5.4	吸上変圧器を使用したき電回路のインピーダンス	139
5.4.1	インピーダンス計算式	139
5.4.2	吸上変圧器の電氣的特性	141
5.5	仙山線における実測例	149
5.5.1	電車線路インピーダンスの測定	149
5.5.2	電圧、電流分布の実測	153
5.5.3	誘導電圧及び誘導軽減係数の測定	155
第 6 章	交流電化における誘導調整	159
6.1	緒 言	159
6.2	誘導電圧の予測計算	159
6.2.1	静電誘導電圧および電流の計算	159
6.2.2	電磁誘導電圧の計算	163
6.2.3	雑音電圧の予測計算	172
6.3	誘導防止対策	177
6.3.1	き電方式の選定	177
6.3.2	危険電圧の防止	180
6.3.3	雑音電圧の防止	181
6.3.4	音響衝撃その他	182
6.4	北陸線における実施例	183
6.4.1	田村・敦賀間の誘導対策	183
6.4.2	北陸線トンネル内誘導対策	186
6.5	欧州3ヶ国における誘導防止対策	188
第 7 章	直流電化における誘導調整	190
7.1	緒 言	190
7.2	雑音電圧の予測計算	191
7.2.1	計算方法	191

7.2.2	平均離隔距離の算出	192
7.2.3	雑音電圧の計算例	194
7.3	防止対策とその実施例	196
7.3.1	防止対策と原則	196
7.3.2	誘導対策実施例	197
第 8 章	調査および試験	204
8.1	大地導電率の測定	204
8.1.1	自己誘導係数法による大地導電率の測定	204
8.1.2	比抵抗法による大地導電率の測定	209
8.1.3	サーチコイル傾斜法による大地導電率の測定	210
8.2	誘導電圧の測定	214
8.2.1	静電誘導電圧の測定	214
8.2.2	電磁誘導電圧の測定	216
8.2.3	雑音電圧の測定	222
総 括		227
謝 辞		230
参 考 文 献		231
附 録		

電気鉄道より通信線への誘導障害の 特性とその防止方法

第 1 章 緒 論

1.1 研究の目標

本文の目標は電気鉄道とその近傍通信線との間の誘導障害の現象について研究し、これを防止する適切な対策を見出すことにある。

誘導障害の種類は種々あるが本文では特に交流電化において生ずる誘導危険電圧に関する項目と交流電化および直流電化の何れの場合にも屢々問題を惹起する音声電話回線への雑音障害に関する項目の二点を主とし、さらにこれに関連する諸項目について考察を進める。

1.2 研究の経過

電気鉄道と誘導障害に関する研究は 1920 年スエーデン国鉄が $16\frac{2}{3}\%$ による鉄道電化を行った当時危険電圧および雑音電圧双方に関する誘導障害を憂慮してかなり綿密な実験を実施したことに始まる。その後直流電化において直流変電所に水銀整流器を使用したことより急に雑音障害が甚だしくなり欧米各国にても種々調査が行われた。我が国でも昭和初年国鉄大井町変電所及び豊川変電所に水銀整流器を使用したことが問題の始めであり、昭和 7 年には電気学会誘導防止委員会に才 3 小委員会が設けられ直流電気鉄道と誘導障害の問題が取り扱われた。この結果水銀整流器の直流側に脈動軽減用フィルタを附加することによりほぼ問題は解決し、昭和 13 年にこれに関する最終報告があつて委員会は終了した。しかしその後各所の電化は伸長し、その影響範囲が広がるにつれ委員会の推奨するフィルタを具備するにも拘らず問題を惹起する場合も生じ、フィルタの効果に疑問を持たれたが才二次世界戦争による困乱のため充分なる調査は行われなかった。

このような状態で終戦を迎え、国鉄は経済復興の先駆を目差して鉄道電化の大々的推進を期し昭和 21 年には上越線約 150 km の直流 1500V による電化に着手した。こゝに国鉄では誘導障害の発生増大を恐れこれに関する調査研究を行うこととし、

昭和21年南武線に試験用線条を仮設し、筆者らが中心となって実測調査を開始した。続いて同年末には上越線の電化工事が進捗し、これを試験台として種々基礎的な資料を収集した。その後高崎線、東海道線などの電化工事が行われたが、これを機会に特に、軌条に沿う帰線電流の分布、電車線回路のインピーダンス、水銀整流器フィルタの特性などを調査し、また通信回線の平衡度と誘導による雑音の性質などについて従来にはない実験データを得ることができた。続いて超高压送電および商用周波数による鉄道の電化が行われるようになって、昭和25年頃より再び内外共に誘導障害に関する研究が活発となり、わが国では昭和24年電気学会に誘導調整委員会が設けられ、第1小委員会は送電線に関し、第2小委員会は電鉄に関し調査研究を行うこととなった。しかし誘導調整 (inductive co-ordination) の名の示す通りこの委員会の発足の主目標は電力側と通信側との誘導調整の方法にあった。つまり従来は誘導防止という名の下に主として電力側で実施する誘導防止対策および誘導予測の方法を見出すことに主眼があつたが、この当時よりは電力と通信との協力の下に双方において最も合理的な、最も経済的な誘導障害の防止策を講ずる必要が痛感され“誘導調整”の方向に主題が進んだわけである。

このように戦前と戦後とにおいて研究態度が進歩し、通信側の協力により現象の究明が更に進歩し、また防止対策の中が大きくなったことなどで多くの有益な結論が得られるようになった。

筆者は国内におけるこれらの委員会に関係する一方、国鉄が昭和29年に鉄道の交流電化を採用したため、商用周波数による電気鉄道と誘導障害との関係を究明するため同年横浜線、仙山線でこれに関する実験を行い、また昭和30年には交流電化の先進国であるスエーデン、ドイツ、フランスの実情を調査するため国鉄交流電化調査団の一員として渡欧した。また鉄道電化協会および鉄道通信協会は国鉄の委嘱を受け鉄道の交流電化に関係する各種の問題を解決するため多くの委員会を設けて調査を始めた。このような経過の後、昭和32年仙山線北仙台・作並間、北陸線田村・敦賀間が交流電化により開通、昭和34年東北線黒磯・白河間続いて白河・福島間も交流電化により開通し、昭和36年8月現在では仙山線(仙台—作並 28.7 km)、北陸線(田村—敦賀 41.1 km)、東北線(黒磯—仙台 188.9 km)、常磐線(取手—勝田 83.7 km)、鹿児島線(門司港—久留米 115.4 km)など約458 kmが交流電化により開通した。

以上の経過の後、鉄道の電化により生ずる通信線への誘導障害の中、誘導危険電圧

の問題および誘導雑音障害の問題はほぼ究明し盡され、これを解決するための道が開かれたと見られるに至ったので、これらの基本的事項をまとめ、各種の事象を理論的、実験的に実証するとともに、今後の応用面を拓らくこととした。

1.3 誘導調整に関する従来の方考え方

1.3.1 C.C.I.T.T.の方考え方

C.C.I.T.T. (国際電信電話諮問委員会) はその指示書¹⁾ (Directive) オ9章及びオ10章において電気鉄道と電話線との接近に関する問題を扱っている。いまこの中よりその要点を摘記する。

(1) 交流電気鉄道と通信線の接近

a. 危険電圧 平常運転状態における静電誘導および電磁誘導により通信線に生ずる電圧および電車線の短絡事故時における電磁誘導に起因して通信線に生ずる電圧は、人間の耳に音響衝撃の危険を与え、また場合によっては直接生命に関する危険および通信線路機器へ与える絶縁破壊などの危険を生ずる。音響衝撃は架空裸線の場合には静電誘導によって生ずる場合が多く、避雷器が誘導電圧によって放電する際に電話器を通る電流のエネルギーが0.01ジュール以上になると危険である。ここで、C.C.I.T.T.は避雷器の放電電圧をDC 300Vと考えているので従って静電誘導電圧の制限値は特別明記してはいないが、AC実効値210Vと考えてほぼ良いであろう。

電磁誘導に基づく危険電圧に関しては、架空裸線に対して短絡事故時、実効値430V、平常運転時60Vが許容される。また地下ケーブルに対してはその両端末に適当な絶縁耐力を持った変成器を挿入した場合で特に心線と大地間に避雷器を使用していない時には、ケーブル心線とシース間は試験電圧の60%を超えないこと、およびケーブル附属品の大地に対する試験電圧を超えないことが必要とされる。またケーブルの場合、平常時誘導の危険電圧は次の条件の満たされる場合150Vまで許容される。

条件1:— 適当な絶縁耐力を持った変成器で、誘導を受ける区間とその他の区間とを絶縁すること。

条件2:— 誘導区間でケーブル心線の作業を行う人に特別の注意を与えること。

b. 通信障害 電話線の許容される雑音起電力は架空裸回線で5mV、ケーブル回線で2mVとする。なお雑音起電力は次のように定義される。

雑音起電力とは電話回線の両端末において、終端側は特性インピーダンスで成端し、

測定端では整合用トランスを通して600Ω純抵抗で成端し、600Ω端で別に規定する特性を持った雑音電圧測定器により測定し、その2倍の値を取ってその回線の雑音電圧と電力とする。

電信回線についてはリレーに流れる誘導電流が通信電流の5%以上になると障害の恐れを生ずる。

C. 判別式 以上のような各障害の有無を判別するためにC.C.I.T.Tは次の諸式を用いている。(左の式の形は筆者が若干変形したものもある)

1) 架空裸電話線で生ずる音響衝撃

式(1.1)に示される f の値が50を超してはならない。

$$f = \frac{lv^2}{z+2} < 50 \quad (1.1)$$

$$\text{ここに } v = \frac{E}{400} \frac{bc}{a^2+b^2+c^2} pqr \quad (1.2)$$

2) 電磁誘導電圧計算式

$$e = 2\pi f \eta k M l J_c \quad (V) \quad (1.3)$$

3) 静電誘導により架空裸線への雑音障害

$$d \geq 1.6 \sqrt{K E l'} \quad (m) \quad (1.4)$$

4) 電磁誘導により生ずる雑音電圧計算式

$$e_p = e_{p1} + e_{p2} \quad (1.5)$$

$$e_{p1} = 5000 \eta k B M l J_p \quad (V) \quad (1.6)$$

$$e_{p2} = 5000 M a l' J_p \quad (V) \quad (1.7)$$

5) 静電誘導によりアース帰路の架空電話線へ流れる電流

$$i = \frac{1.8}{z+2} 2\pi f l v \times 10^{-6} \quad (A) \quad (1.8)$$

記号の説明：— 上記諸式中の記号は次の通りとす。

l = 電気鉄道と通信線との平行距離

z = 同一柱に添架される通信線の線条数

E = 電車線電圧

a = 通信線と電車線との平均間隔

b, c = 電車線、通信線の地上高さ

p, q, r = 接地線、樹木、負饋電線などによる遮蔽係数。

e = 電磁誘導電圧

η = ケーブルの遮蔽係数

η_r = レールの遮蔽係数

M = 電車線と通信線との間の相互誘導係数 (Carson-Pollaczek の式²⁾による。)

J_c = 電車線電流。常時負荷の場合はセクションの片端に2本の機関車が同時に入る時の電流、複線又は複々線では単線の場合の1.5倍の電流、故障時は短絡電流の交流分初期値。

K = 電話波形率。実測なき場合 0.02 とする。

KE = 等価妨害電圧。

$$V = \frac{1}{S_{800}} \sqrt{\sum \left(\frac{f}{800} S_f V_f \right)^2} \quad (1.9)$$

S_{800} = 800%における雑音評価係数 = 1000

S_f = f % における雑音評価係数。

V_f = き電電圧中に含まれる高調波 f の電圧。

l' = 交叉により補償されない長さの総和

E_p = 雑音起電力 (V)

E_{p1} = 縦方向誘起電力と通信線の不平衡とにより生ずる雑音起電力

E_{p2} = 通信線の交叉の不充分に基く雑音起電力。

ケーブルの場合及び架空裸線では200 m以上離れており、且交叉により補償されない部分が1 km以下の時は $E_{p2} = 0$ としてもよい。

B = 通信回線の800%における平衡度。

J_p = 等価妨害電流。実測なきときは J_c の1%をとる。

$$= \frac{1}{P_{800}} \sqrt{\sum (h_f P_f I_f)^2} \quad (1.10)$$

$$h_f = \frac{f}{800} : \text{裸線の場合}$$

$$= 1.0 : \text{ケーブルの場合}$$

I_f = J_c 中に含まれる高調波分

M_d = レール帰路と架空二線式通信線回路間の800%における相互誘導係数

(参考)

平常時電流 J_c 中の高調波含有率を次数 n に対して $\frac{1}{n^2}$ と仮定して等価妨害電流 J_p を求める。

即ち $I_f = \frac{1}{n^2} I_1$

ただし $f = 50n$ 又は $60n$ (n は奇数)

I_1 = 基本波 50% 又は 60% 電流。

とし $I_1 = 100A$ 当りの J_p は表 1.1 の通りとなる。

I_1 に対し電車線電流 J_c は事実上高調波分だけ大きくなるので、上記数値は J_c 100A 当りに換算するときは約 1% 程小さくなる。また高調波含有率が $\frac{3}{n^2}$ のときは上表数値は 3 倍となり、さらに J_c 100A 当りに換算すると約 3% ほど小さくなる。

表 1.1 交流電気鉄道における等価妨害電流 J_p

ケーブルに対する J_p		裸線に対する J_p	
50%系	60%系	50%系	60%系
1.73 A	2.33 A	1.27 A	1.68 A

ただし 基本波電流 100A

高調波含有率 $\frac{1}{n^2}$, n = 高調波次数

(2) 直流電気鉄道と通信線との接近

直流電気鉄道の場合は通信障害のみを考慮すればよい。この場合発車または故障時に生ずる電流の突然の変化による過渡時障害については資料不十分という理由で取扱っていない。即ち平常とき電中にその電圧、電流に含まれる交流成分に基づき誘導のみを扱うことにしている。

a 静電誘導による障害

3線軌条式に対しては静電誘導は無視できる。

架空単線式電気鉄道に対しては式 (1.4) と同じに扱ってよい。等価妨害電圧 KE の値について実測のない時は表 1.2 と同じ K の値を用いる。

b 電磁誘導による障害

電車線が1つの変電所から給電される場合、負荷は最端末に想定しこの時に流れる等価妨害電流は式 (1.11) の通りとなる。

$$\text{等価妨害電流 } J_p = \frac{KE}{2\pi fL} \quad (1.11)$$

ただし

$$L = \begin{cases} \text{架空単線式} & 1.5 \text{ mH/km} \\ \text{*3軌条式} & 0.1 \text{ mH/km} \end{cases}$$

Lは回路全体のインダクタンスであるが、機関車および電源についてのインピーダンスは無視して線路のみの値をとっている。

Kの値は架空電話線に対して、 $k_f = 1.0$ 、ケーブルに対して、 $k_f = \frac{800}{f}$ として求める。

高調波成分の実測のないときは表 1.2 に与えた値をとる。

この結果、電磁誘導による雑音起電力 e_p の計算式は式 (1.12) となる。

表 1.2 直流電気鉄道における等価妨害電圧の係数 K

変換機名	K
3相整流器 (gridなし)	0.06
6相 " (")	0.03
12相 " (")	0.015
回転変流機	0.005
電動発電機	0.0025

$$e_p = e_{p1} + e_{p2} \quad (1.12)$$

ただし $e_{p1} = \frac{KE}{L} k_f l M \cdot B \quad (1.13)$

$$e_{p2} = \frac{KE}{L} l' M d \quad (1.14)$$

C 雑音電圧の制限値は交流電化の場合と同じである。

変電所2カ所から並列き電を行う場合は、夫々の交流成分の位相が異なるのが普通であるので、可聴周波電流が変電所間を還流し、等価妨害電流は双方の等価妨害電圧の和を、その間のインピーダンスで割ったものに等しくなる。

d 電信線への障害については未だ充分な資料がないので勧告できない。

1.3.2 電気工作物規程の考え方

(1) 直流電気鉄道の場合 (*195条の2および*59条)

電気鉄道用架空電線路と架空弱電流電線路とが並行する場合は電線相互間の距離は、

直流複線式給電線では2m以上、直流単線式給電線および架空絶縁帰線では4m以上
離隔する必要がある。ただし架空弱電流電線に通信ケーブルを使用する場合、または
架空弱電流電線路管理者の承諾を得た場合はこの限りでない。

以上の規定に基づくなお障害を及ぼすおそれのある場合は必要に応じて次の施設を
しなければならない。

- a. 強弱両電線路間の離隔距離を増大すること。
- b. 直流電源の高圧波形が平滑になるようにすること。
- c. 帰線の不絶縁部分および大地に通ずる電流を減少させること。
- d. 弱電流電線路の接地極と帰線との距離を増加すること。

(2) 交流電気鉄道の場合(オ221条)

交流き電線路、交流電車線路、交流電車線路相互間または、架空交流絶縁帰線は、
既設の架空弱電流電線路に対して誘導障害を及ぼさないようそれから充分に離すが、
帰線の不絶縁部分および大地に通ずる電流を制限するか、またはその他の適当な方法
で施設しなければならない。

なお上記(1)(2)両項に関連して誘導障害の有無を検討する方法については電気工
作物規程では何ら触れていない。従って現状はC.C.I.T.T.の指示書を参考にするより
他にない。

1.4 危険電圧とその許容値

通信線に生ずる危険電圧は、雷により発生するものと送配電線の地絡事故または、
交流電気鉄道における運転中および電車線地絡故障時などの電磁誘導作用によるもの、
および強電流線と通信線との直接混触の原因するものなどがある。このような電圧の
発生により通信機器の絶縁破壊又は焼損および人体に及ぼす衝撃又は感電死等の危険
を伴う。危険電圧の制限値はこのような面から考慮されている。しかし人体に対する
危険は何ものよりもまして重視されねばならないので、自然危険電圧の許容限度は先
ず人体に対する影響を考慮して定められるべきであり、通信機器その他はこうして決
定された危険電圧に充分耐えるだけの絶縁耐力を持つように設計せらるべきである。

さて人体に対する危険の判定には電圧を以って表現することが慣例であるが実際は
1000Vでも安全な場合もあるし、100Vでも危険な場合がある。要するに電圧が

問題でなく、人体を通過する電気エネルギー、特に心臓または脳中枢部などを通過するものが死を決定するようである。つまり危険であるかどうかは、実は電圧ではなく人体を通過する電流の大きさと、その継続時間及びその通過する経路に関係するということができる。多くの人々の動物実験その他³⁾の結果を要約すると次のようである。

表 1.3 人体に対する危険電流

種 別	電流の大きさ (mA)	備 考
最小感知電流	D.C. 5.2 ~ 12.6 A.C. 1.1 ~ 1.9 (60%) パルス 40 ~ 90	No.8 銅線を握った場合
不 随 電 流	A.C. 10 ~ 30 (10 ~ 1000%)	No.6 銅線を握った場合
危 険 電 流	A.C. 20 ~ 50 呼吸困難 数 mA 神経麻痺 心臓通過 0.4 ~ 1.4 (60%) 心室細動	心臓を通過する電流の 全電流に対する % 手 → 手 3.3 手 → 足 6.7 足 → 足 0.4

表 1.3 は人体に対する電流の影響を示すものである。この中心臓に心室細動を起すと例外なく死に到るといわれているので、表 1.3 より心臓通過電流 1mA 前後が極めて危険な電流となる。また人体を通過する全電流の中何%が心臓を通過するかが表 1.3 備考欄に記載されている。さらに表 1.4 に人体各部の電気抵抗が与えられ

表 1.4 人体各部の固有抵抗

人体部分名	固有抵抗 (Ωm)
血 液	1.85
内 部 組 織	0.80
皮 膚	200 ~ 1000
脳	20
肝 臓	9
筋 肉	15
骨	9000

るが、これらより危険電流に対応する電圧値がおおよそ推定できるはずである。実際はその時の電流通路に当る電気抵抗なるものが極めて未知数であるため、1000Vが安全であったり、100Vが危険であったりするわけである。それ故やむを得ず1000Vの電圧に0.1秒間感電すると何%の危険性があるというふうな表現になるわけである。Dalziel氏⁴⁾は多くの動物実験を行って0.5%の確率で心室細動を起す電流I(mA)は動物の体重W(kg)と通電時間中(s)とに關係し、次の式(1.15)で与えられると述べている。

$$I = \frac{2.18W + 12.8}{\sqrt{t}} \quad (\text{mA}) \quad (1.15)$$

また Freiburger氏⁵⁾は人体抵抗の存在範囲として図1.1のような結果を与えている。

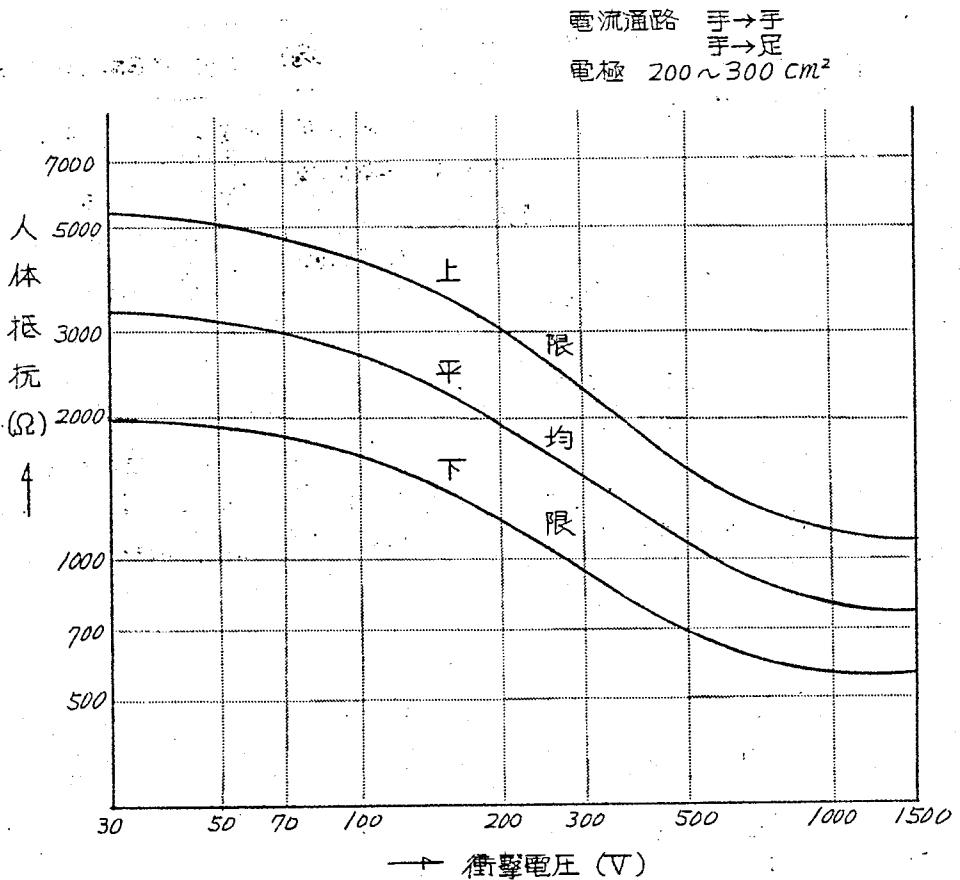


図1.1 衝撃電圧と人体抵抗 (Freiburger氏)

そこで岡氏の結果を組合せ人間に対する危険電圧と継続時間との関係を求めると、
 図 1.2 のようになる。

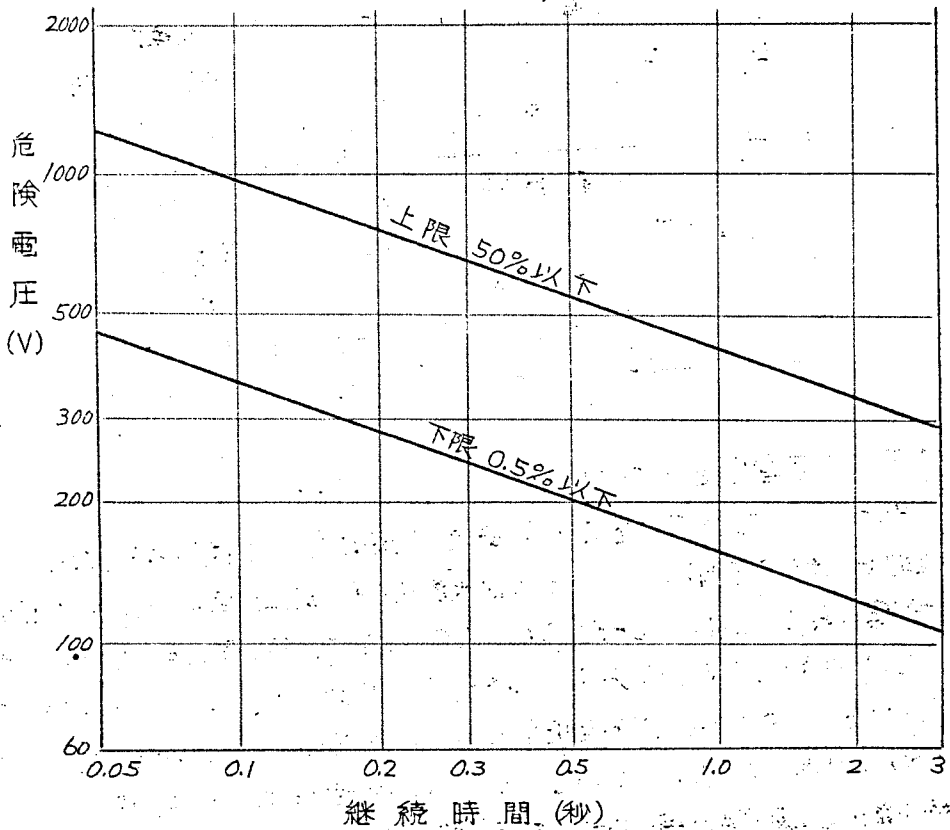


図 1.2 危険電圧と継続時間

これは体重 50 kg に対する 1 例で、50%以下というのは 2 人に 1 人は死ぬという線である。現在我が国での一般の規定では、300V をもって危険電圧としているが、この図 1.2 から見ると、300V に 2 秒間感電すると 50% の死亡率があるということになる。勿論この図は絶縁台に乗るとか、ゴム手袋をはめるとか、そういう安全作業によらないときの % を示したものである。

さらに低い電圧でもこれが長時間継続する時は危険性を増すことは図 1.2 から推定されるであろう。そのため数秒ないじ数分間以上連続的に発生する電圧については、さらにずっと小さい電圧も危険電圧と考えねばならぬ。

以上の結果より危険電圧の許容限度は、表 1.5 のようになる。ただし平常時誘導電

圧とは少くも数秒以上継続する誘導電圧である。もし適当な防護手段をとれば、この値は 150V 迄は差支えないことになっている。

表 1.5 危険電圧許容限度

	条 件	許 容 値 (V)	記 事
日 本	異 常 時	300	一般電力線
	〃	430	超高压送電線
	平 常 時	60	条件なし
CCITT	異 常 時	430	一般電力線
	〃	650	高安定度送電線
	平 常 時	60	条件なし
	〃	150	条件つき

1.5 雑音電圧とその許容値

電話回線に流れる通話電流以外の電流は雑音電流として通話障害となる。このような電流の流れる原因によって、その周波数成分も広範囲に亘り、それらの通話に及ぼす影響も異なる。これらを評価するため CCITT では耳や受話器の周波数特性を考慮して 800% を基準とした雑音評価係数 S_f を定め、それぞれの周波数の電流または電圧に S_f を乗じたものを雑音電流または雑音電圧と称しこの数値の大小で雑音障害の大小を比較することとしている。またこれを測定するため特別に定められた特性を持つ雑音電圧測定器が用いられ、普通両端を成端された回線の一方の 600Ω 端子で測定した値を雑音電圧、その 2 倍の値を雑音起電力と称している。国際長距離通信線およびこれに類する通信線に対して雑音起電力の許容限度は架空裸通信回線で 5mV 以下、ケーブル通信回線で 2mV 以下とされている。表 1.6 に各周波数に対応する雑音評価係数 S_f を与える。

さて通話品質を左右するものは送受話器特性、伝送路特性およびこれに加うるに雑音量であるが、これらによる通話の伝送品質を決めるために明瞭度を尺度として基準通話系の減衰量で表わす明瞭度等価減衰量 (AEN) が用いられる。CCITT は国際通話品質の標準として伝送系の AEN 従量を 49dB としている。このとき音節明

表 1.6 雑音評価係数 Sf

周波数 %s	Sf	周波数 %s	Sf	周波数 %s	Sf
50	0.71	1150	1035	2450	625
150	35.5	1250	977	2550	607
250	17.8	1350	928	2650	590
350	37.6	1450	881	2750	571
450	58.2	1550	842	2850	553
550	73.3	1650	807	2950	534
650	85.1	1750	775	3000	525
750	95.5	1850	745	3500	376
800	1000	1950	720	4000	198
850	1035	2050	698	4500	56.2
950	1109	2150	679	5000	15.9
1000	1122	2250	661	>5000	<15.9
1050	1109	2350	643		

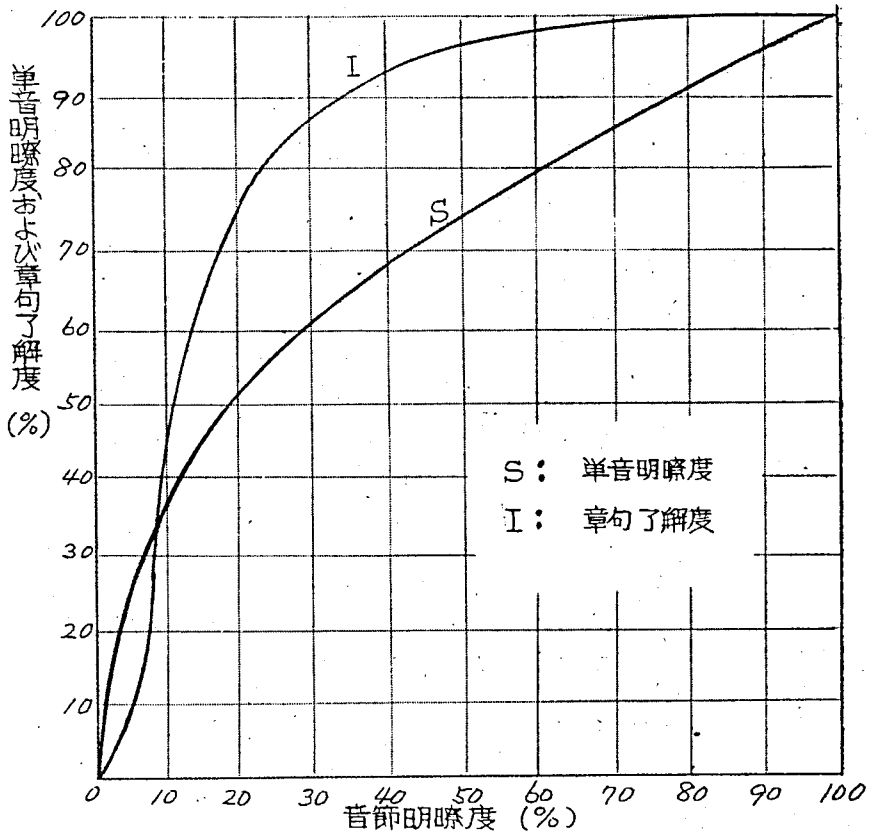


図 1.3 音節明瞭度と単音明瞭度および章句了解度の関係

瞭度 64% (単音明瞭度 80%) が得られ、章句了解度 95% 以上が満足されるものとされている。図 1.3 に単音明瞭度、章句了解度と音節明瞭度の関係を示す。雑音電圧を AEN に換算するため電々公社通信研究所の標準通話系 (ARAEN) で実験した結果によると図 1.4 の通りとなる。曲線 a は伝送帯域巾 300 ~ 3000 % 通話系に対するホワイトノイズの影響、曲線 b および c はそれぞれ伝送帯域巾 300 ~ 3500 %, 300 ~ 2500 % 通話系に対するスペクトルノイズ (ここでは 300 % およびその倍調波のみを含むノイズ) の影響を示す。これにより雑音電圧が大きくなるに従いその AEN は大となるので、総量 49 dB を保持するためには通話系の一部において AEN をそれだけ減少せしめねばならない。標準通話系として標準の通話品質を保つために市外回線および市内回線の減衰量と雑音電圧 AEN の配分の一例は表 1.7 に示される。従って例えば伝送路中に雑音電圧 8 mV を含む場合に標準の通話品質を得るためには、雑音電圧に相当する AEN は図 1.4 より周波数帯域 300 ~ 2500 % の場合約 16 dB である。また表 1.7 より伝送路総 AEN は約 30 dB であるので伝送路中に残された減衰量は $30 - 16 = 14$ dB となる。従って伝送系の減衰量が 14 dB

表 1.7 標準通話系における AEN の配分例
 (電々公社の場合)

通話系各部の割当	AEN (dB)
電 話 器	10.1
局内雑音(0.5mV)による 室内騒音(60 phon)の増量	0.5
市外雑音(1mV)による増量	2.9
電話器感度}の変動による 回線レベル}劣化量	4.6
電流供給損	1.0
伝送回路損	29.9
総 計	49.0

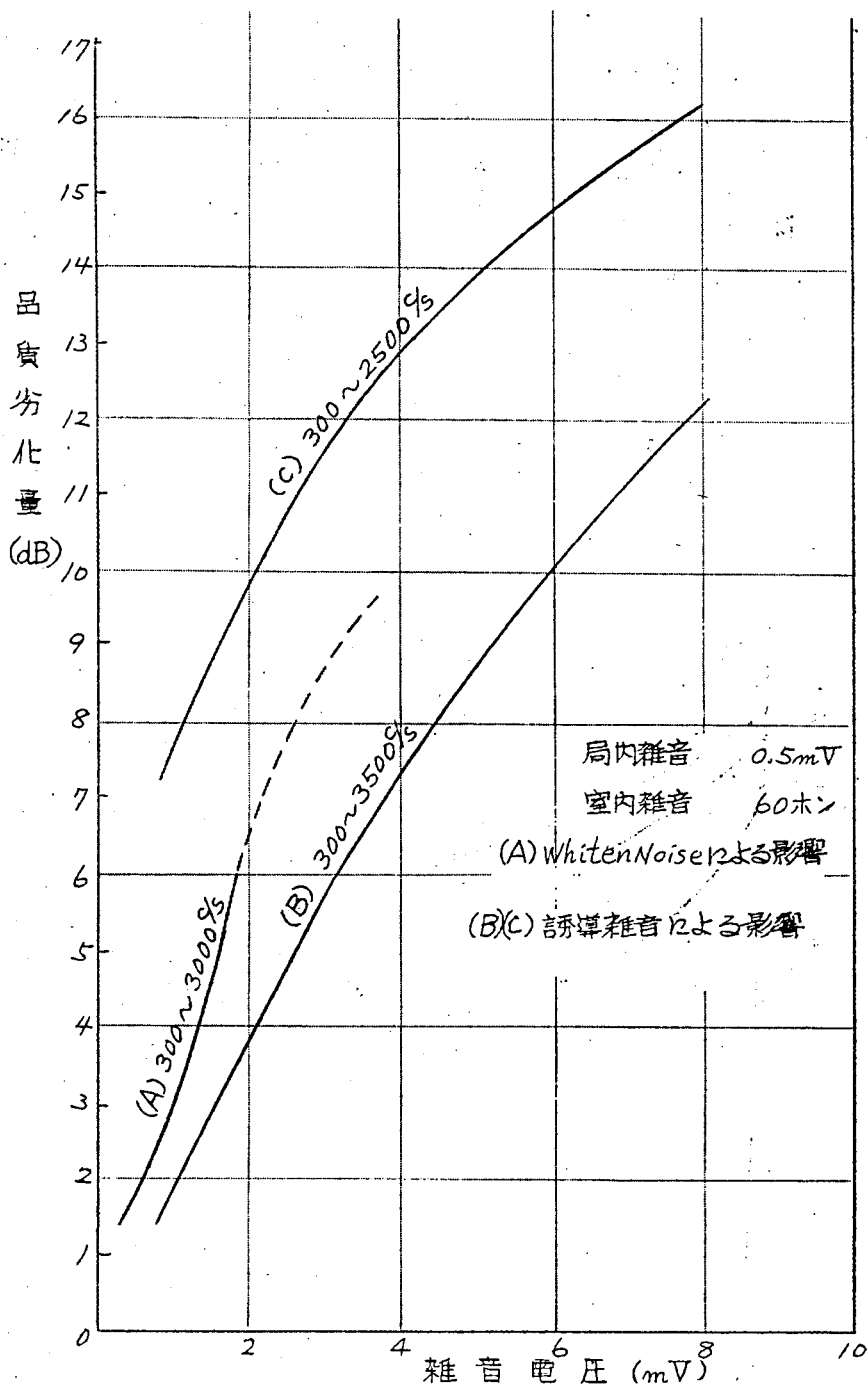


図 1.4 雑音電圧と通話品質劣化量

の場合は、雑音電圧は 8mV まで許容されるわけである。このようにして伝送路損失とそれに許容される雑音電圧との関係を求めると図 1.5 のようになる。このようにして通話系が与えられた場合は、これに許容される雑音電圧と通話系統 AEN との和が 49dB 以下であるときは、常に標準の通話品質が保たれる。従ってどの回線についても一律に雑音電圧を制限することは余り意味のないことである。参考のため通信回線の線路損失を示すと、表 1.8 の通りである。

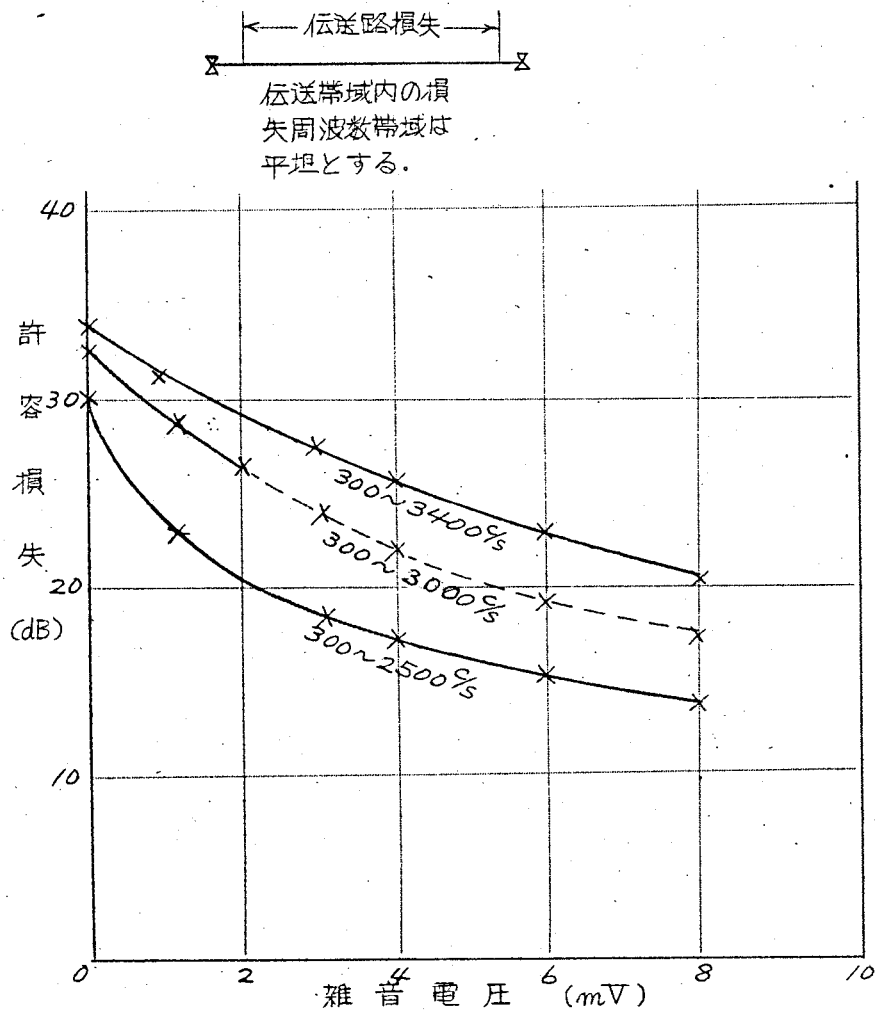


図 1.5 雑音電圧と許容損失

表 1.8 通信回線の線路損失 (1000%)

ケーブル通信回線			裸線通信回線		
種別	線径(mm)	損失(dB/km)	種別	線径(mm)	損失(dB/km)
市内	0.4	1.90	硬銅	1.6S	0.0929
	0.5	1.40		2.0S	0.0662
	0.9	0.78		2.9S	0.0364
市外 (無装荷) (装荷)	0.9S	0.67	硬銅	2.9P	0.0297
	0.9P	0.78		3.5S	0.0266
	1.2S	0.48		3.5P	0.0214
	1.2P	0.56		鉄	1.4S
	0.9S	0.19	2.9S		0.0781
	0.9P	0.18	3.5S		0.0573
	1.2S	0.29	搬送		3.2S
	1.2P	0.29		4.0S	0.0836
	1.2S	0.44		4.5S	0.0675
	1.2P	0.51			

S: 実回線

P: 幻影回線

第2章 電気鉄道回路の特性

2.1 緒言

電気鉄道は国鉄を始めとして大部分は架空単線方式で、帰回路として軌条を利用してゐる。そして帰電流の中何%かが大地へ漏洩する。従つて電気鉄道からの誘導障害を知るためには、先ず電車線、キ電線および軌条を一環とする所謂電鉄回路の電気的性質を明らかにし、夫々の線上の電圧、電流分布および大地中の電圧電流分布を求めなければならない。然しこれを最密に取扱ふことは問題を非常に複雑とするので、ここでは電車線および正又は負極キ電線およびレールを往路とし大地を帰路とする回路の組合せと考え、大地上に置かれた長い線路上の電波伝播の問題としてこれを解くこととする。この結果は高崎線、東海道線、横浜線、仙山線などの実測結果に適用してかなり良く合致することが実証された。

2.2 軌道上の電圧および電流の分布

軌道レールに帰路電流の流出入する際の長さの方向のレール電位および電流の分布について考える。図2.1は最も一般的な回路である。

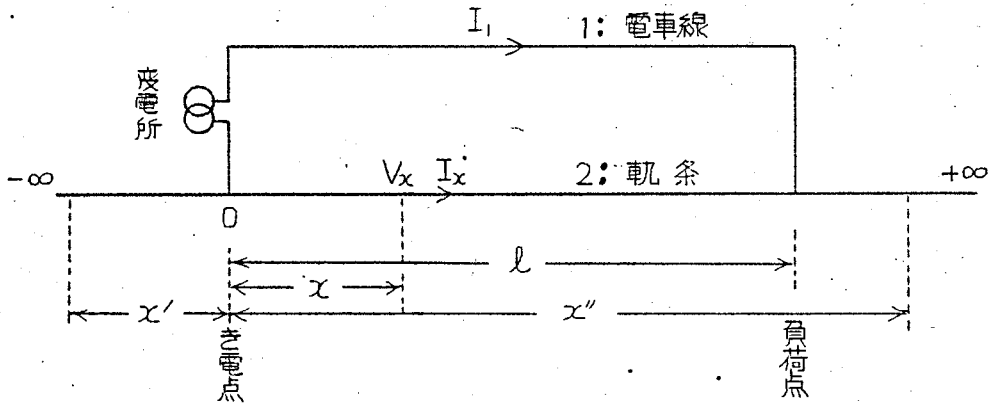


図2.1 電車線回路 (単線, 電車線のみ)

変電所キ電点 0 より x の距離におけるレール上の大地に対する電圧、電流を、 V_x 、 I_x とすれば、電車線を流れる電流 I_1 との間次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dV_x}{dx} &= Z_{22} I_x + Z_{12} I_1 \\ -\frac{dI_x}{dx} &= G V_x \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Z_{22} = レールの大地を帰路とする直列インピーダンス

G = レールと大地間の漏洩コンダクタンス

Z_{12} = 電車線とレール間の大地帰路相互インピーダンス

この式の解は次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} V_x &= Ae^{-\Gamma_2 x} + Be^{+\Gamma_2 x} \\ I_x &= \frac{A}{S_2} e^{-\Gamma_2 x} - \frac{B}{S_2} e^{+\Gamma_2 x} - n_0 I_1 \end{aligned} \right\} (2.2)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_2 &= \sqrt{Z_{22} G} \\ S_2 &= \sqrt{Z_{22}/G} \end{aligned} \right\} (2.3)$$

$$n_0 = Z_{12}/Z_{22} \quad (2.4)$$

A, B = 積分定数

Γ_2, S_2 はレール上の伝播波に対する所謂伝播定数および特性インピーダンスである。定数 A および B はレールの端末条件によって決まる。代表的な2例について求めた V_x および I_x を式 (2.5) ~ (2.8) に示す。

(1) レールが無限に長い場合

区間 OP の間の電圧, 電流について

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \frac{1}{2}(1-n_0)I_1 S_2 \left\{ e^{-\Gamma_2(l-x)} - e^{-\Gamma_2 x} \right\} \\ I_x &= -I_1 \left\{ n_0 + \frac{1}{2}(1-n_0)(e^{-\Gamma_2(l-x)} + e^{-\Gamma_2 x}) \right\} \end{aligned} \right\} (2.5)$$

$-\infty, 0$ 間の電圧, 電流について

$$\left. \begin{aligned} V_{x'} &= \frac{1}{2}(1-n_0)I_1 S_2 \left\{ e^{-\Gamma_2 l - 1} \right\} e^{+\Gamma_2 x'} \\ I_{x'} &= +\frac{1}{2}(1+n_0)I_1 \left\{ e^{-\Gamma_2 l - 1} \right\} e^{+\Gamma_2 x'} \end{aligned} \right\} (2.6)$$

P, ∞ 間の電圧, 電流について

$$\left. \begin{aligned} V_{x''} &= \frac{1}{2}(1-n_0)I_1 S_2 (1 - e^{-\Gamma_2 l}) e^{+\Gamma_2(l-x'')} \\ I_{x''} &= \frac{1}{2}(1-n_0)I_1 (1 - e^{-\Gamma_2 l}) e^{+\Gamma_2(l-x'')} \end{aligned} \right\} (2.7)$$

(2) レールが両端末 P, Q で切れている場合

$$\left. \begin{aligned} V_x &= (n_0 - 1) I_1 S_2 \frac{\cosh \Gamma_2(l-x) - \cosh \Gamma_2 x}{\sinh \Gamma_2 l} \\ I_x &= (n_0 - 1) I_1 \frac{\sinh \Gamma_2(l-x) + \sinh \Gamma_2 x}{\sinh \Gamma_2 l} - n_0 I_1 \end{aligned} \right\} (2.8)$$

以上の結果を見ると、レール中の電流は区間 OP において流れる一定電流 $(-n_0 I_1)$ と自然対数的に減衰する電流 $(e^{\pm \Gamma_2 x})$ とからなることが了解される。これを図 2.1 の場合について図解すると図 2.2 の通りである。图中矢印は電流の方向を、鎖線は合成電流を示している。

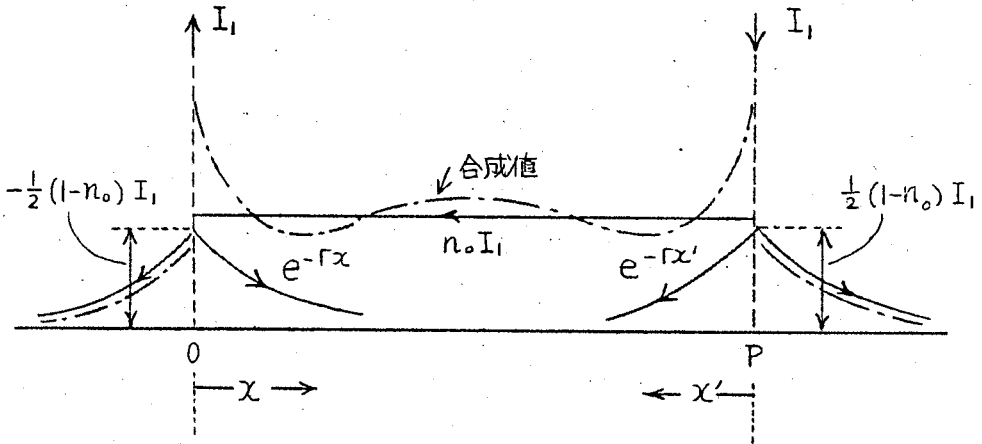


図 2.2 レール中の電流分布

さらに図 2.2 について説明を加えると、負荷点 P においてレールに流入した電流は一定電流 $n_0 I_1$ と進行波電流 $(1-n_0) I_1$ とに分れ、 $n_0 I_1$ は 0 点に向って一定の値を保ちながら流れ、 $(1-n_0) I_1$ は左右両方向へ 2 分されて進行し、その大きさは x' 進むにつれ $\frac{1}{2}(1-n_0) e^{-\Gamma_2 x'}$ のように減衰していく。また 0 点はレールから発電所へ電流の流出する点で、P 点と電流の符号を逆にすれば全く同じことがいえる。

このようにしてレール中の電流を分解表示しておくこと今後の考察を進める上に非常に便利である。例えばレールが両端で切れている場合を分解表示の方法で解いてみると次の通りである。

図 2.3 (a) において、負荷点 P において電車線よりレールに流入した電流 I_1 は

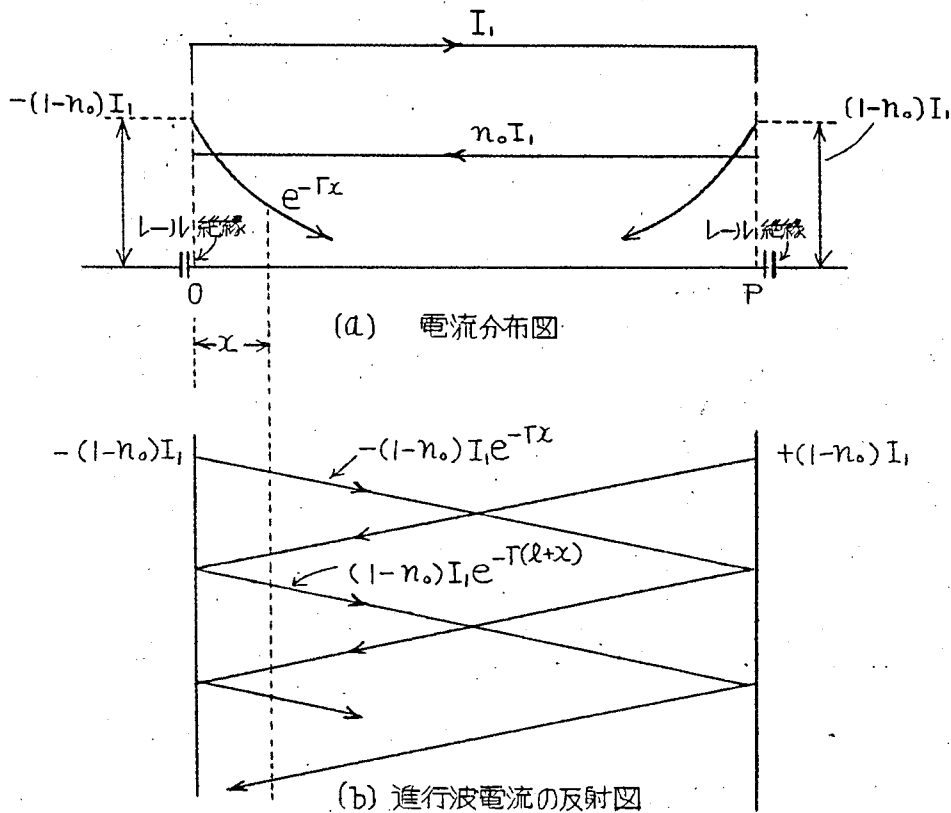


図 2.3 レール電流分布の分解表示

左方へ流れる一定電流 $n_0 I_1$ と進行波電流 $(1-n_0) I_1$ とに分解できる。この場合進行波電流はレール絶縁のため右方へ分流することはない、全電流は左方に向うわけである。この進行波電流は $e^{-\Gamma x}$ の減衰をしながら、レール絶縁に衝突すると全反射をし、その点で絶対値は変わらずその方向だけを逆転する。この模様は一般の進行波電流の場合と全く同じである。同様に 0 点からは $-(1-n_0) I_1$ なる進行波が右方に出発すると考え、これが又だけ進んだ点では $-(1-n_0) I_1 e^{-\Gamma x}$ となり、また P 点に達するとレール絶縁のため全反射をして 0 点へ向うようになる。この模様を図示すれば図 2.3 (b) のようになる。かくして 0 点から x の距離にある電流の総和は次のようになる。

$$\begin{aligned}
I_x &= -(1-n_0)I_1 e^{-\Gamma_2 x} + (1-n_0)I_1 e^{-\Gamma_2(2l-x)} - (1-n_0)I_1 e^{-\Gamma_2(2l+x)} + \dots \\
&\quad - (1-n_0)I_1 e^{-\Gamma_2(l-x)} + (1-n_0)I_1 e^{-\Gamma_2(l+x)} - (1-n_0)I_1 e^{-\Gamma_2(3l-x)} + \dots \\
&\quad - n_0 I_1 \\
&= (n_0-1)I_1 \frac{e^{\Gamma_2 l} - 1}{e^{\Gamma_2 l} - e^{-\Gamma_2 l}} e^{-\Gamma_2 x} + (n_0-1)I_1 \frac{1 - e^{-\Gamma_2 l}}{e^{\Gamma_2 l} - e^{-\Gamma_2 l}} e^{+\Gamma_2 x} - n_0 I_1
\end{aligned} \tag{2.9}$$

この結果は式(2.8)の I_x と全く同じ表式に書き改めることができる。なおP点およびO点から有限の距離にレール絶縁のある場合例えば図2.4について基本式(1.1)を解くと式(2.10)に示すような結果となる。

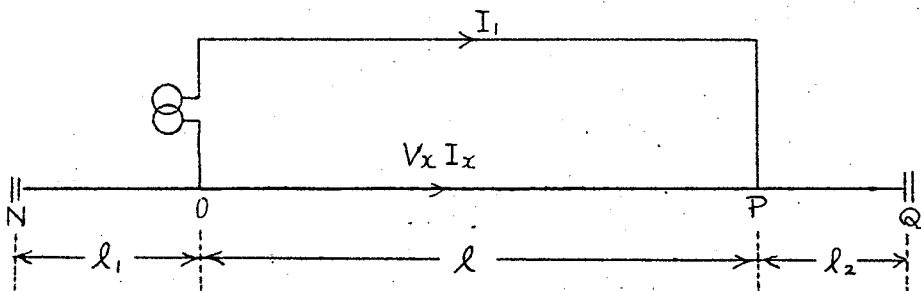


図2.4 キ電回路 (レール長さが有限の場合)

O P 間

$$\begin{aligned}
I_x &= (n-1)I_1 \left\{ \sinh \Gamma_2(l-x) + \sinh \Gamma_2 x + \cosh \Gamma_2 l \right. \\
&\quad \times \left. \tanh \Gamma_2 l_1 + \cosh \Gamma_2(l-x) \tanh \Gamma_2 l_2 \right\} / \mathcal{Q} \\
&= n I_1 \tag{2.10}
\end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned}
\mathcal{Q} &= \sinh \Gamma_2 l \left\{ 1 + \tanh \Gamma_2 l_1 \tanh \Gamma_2 l_2 \right\} + \cosh \Gamma_2 l \\
&\quad \times \left\{ \tanh \Gamma_2 l_1 + \tanh \Gamma_2 l_2 \right\}
\end{aligned}$$

この結果は非常に複雑な算式であるが上記の如き分解表示の方法で扱えば、レール中の減衰が通常は非常に大きいので反射波を才2項乃至才3項まで考慮するのみで近似計算を行うことができる。この場合進行波はO点またはP点において電車線中へ分流することはなく、無関係にNまたはQの方向へ進む。即ちOまたはP点は進行波に対して反射の原因となる異常点ではない。ただ軌条の種類が異なる点などの理由でサ-

インピーダンスが S_3 になるような点では勿論 $m = S_3 - S_2 / S_3 + S_2$ なる反射係数によって決まる反射を行う。つまりレール中の進行波電流 $(1-n)I_1$ に対しては、一般の進行波の理論がそのまま適用できる。またレールの進行波電圧 V'_x は進行波電流 I'_x と常に次の関係が成立つ。

$$V'_x = I'_x S_2 \quad (2.11)$$

この結果図2.3について全く同じような手順に従い合成電圧 V_x を求めると式(2.12)のようになる。

$$V_x = (n_0 - 1) I_1 S_2 \frac{(e^{\Gamma_2 l} - 1) e^{-\Gamma_2 x} - (1 - e^{-\Gamma_2 l}) e^{\Gamma_2 x}}{e^{\Gamma_2 x} - e^{-\Gamma_2 x}} \quad (2.12)$$

この結果は当然ながら式(2.8)の V_x と全く同じ表式に書き改めることが出来る。いま電圧分布の様様を図2.1および図2.3の場合について描くと図2.5の通りとなる。

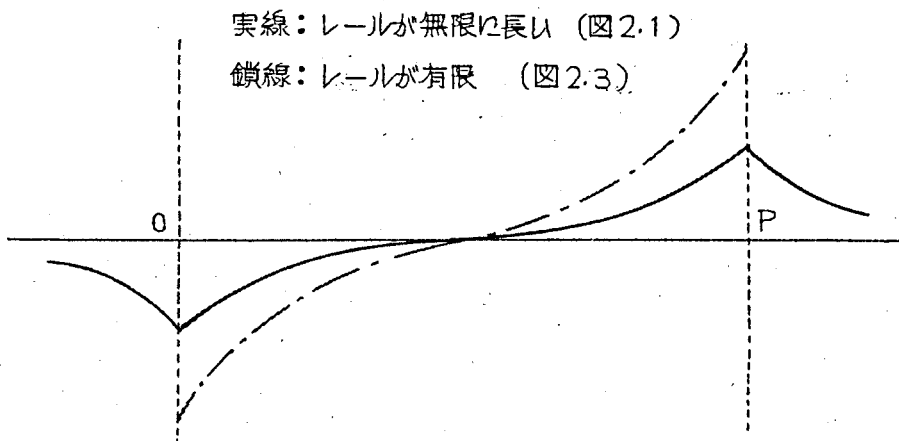


図2.5 レールの電圧分布

図2.5に見る通りレール中へ電流の流入する点Pは正電位となり、流出する点0は負電位となる。また重要なことは、別に存在するレール中の一定電流 $(-n_0 I_1)$ はレール電位には関与しないことである。

ここで改めて $-n_0 I_1$ の意味を考えると、式(2.4)に示される係数 n_0 よりこの電流は電車線電流 I_1 により、これに平行する軌道への電磁誘導定電力 $Z_{12} I_1$ を軌道のインピーダンス Z_{22} で割った値である。即ち軌道中に生ずる誘導電流と考えるこ

とができる。なお誘導電流は図2.1の場合は区間OPだけと考えないでその左右の区間にも $-\frac{1}{2}n_0 I_1 e^{-T_2 x}$ の形で流れている。即ち式(2.5)に示される I_x をこの観点から分解すると、式(2.13)の通りとなる。

$$I_x = -\frac{I_1}{2} \left\{ e^{-T_2 x} + e^{-T_2(l-x)} \right\} - \frac{n_0}{2} I_1 \left\{ 2 - e^{-T_2 x} - e^{-T_2(l-x)} \right\} \quad (2.13)$$

式(2.13)において第1項を導電電流、第2項を誘導電流と呼ぶことにする。その理由は電車線電流が非常に遠方にあるとすると $n_0 \rightarrow 0$ となり式(2.13)は第1項のみとなる。即ちこれは電車線とレールのP点またはO点を接続することにより流れるレール電流である。これに対し、第2項は電車線が軌道に接近することにより n_0 の値が大きくなってこれによりレール中に流れる電流を現わしている。即ちレール中に電車線電流よりの誘導起電力を生ずることによって流れる電流を第2項は示している。従ってこれらは夫々導電電流および誘導電流と名づけるに誠にふさわしいものである。さてこのように分解したものを図示すると図2.6(a)および図2.6(b)のようになり夫々の合成電流は鎖線で示すようになる。このようにして区間OP以外に

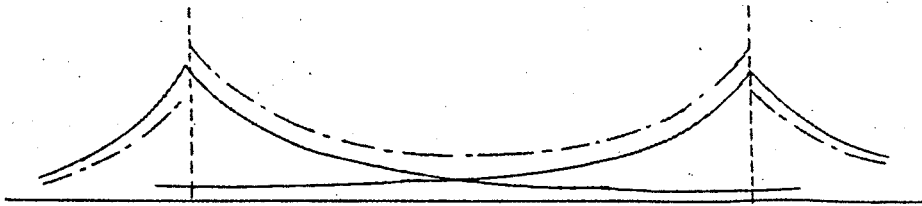


図2.6(a) 導電電流

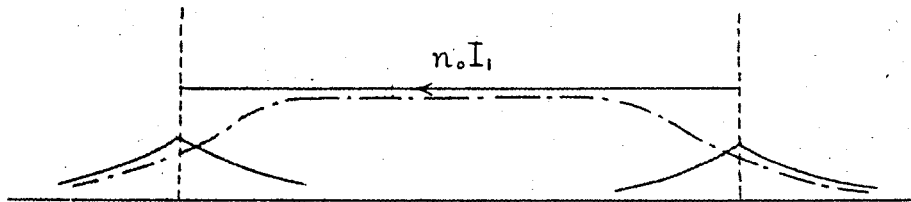


図2.6(b) 誘導電流

も誘導電流は流れるのが事実である。しかしこの誘導電流をさらに分解すると図 2.6 (b) に見る通り、一定電流 $n_0 I_1$ と 0 点および P 点より出発する進行波電流 $\frac{1}{2} n_0 I_1$ とよりなり、この進行波は一般の進行波と同じ性質を持つようになる。このことは既に証明された。それ故誘導電流中に含まれるこの進行波電流分を図 2.6 (a) の導電電流に加えて考えた方が便利であり、その結果が図 2.2 となった次第である。

レールの大地に対する電位の最高点は、図 2.5 に見る通り負荷の接続点 P であり、最低点は変電所のき電点 O である。もし P 点と O 点の軌道状態が同一ならばその絶対値は等しい。これは式 (2.5) ~ (2.8) において $x=0$ または l と置いて求められる。即ちレールの最高電位は式 (2.14) (2.15) のようになる。

レールが無限に長い場合

P 点において

$$V_{\max} = \frac{1}{2} k I_1 S_2 (1 - e^{-T_2 l}) \quad (2.14)$$

レールが有限長 l の場合

P 点において

$$V_{\max} = k I_1 S_2 \tanh \frac{T_2 l}{2} \quad (2.15)$$

ただし $k = (1 - n_0)$

k の大きさは、レールの種類、レールに流れる電流値、大地の導電率などによって若干相異なる。 k を軌道の軽減係数と呼ぶことにする。命名の由来は後節において明らかとなる。

一般に 30 kg レールの時は 50 kg レールに比して列車単位も小さく従ってまた変電所容量も小さいので、レールに流れる電流は平常時においても異常時においても常に 50 kg レールの場合よりも遙かに小さい。これに対して軌道のサーヰインピーダンス S_2 および軽減係数 k は後に示される表 2.6、表 2.8 に見る通り 30 kg と 50 kg とで大きな差はない。つまりレール電位の大きさは 50 kg レールの方が 30 kg の場合よりも大きくなるのが常である。またレールに絶縁のある場合は式 (2.14)、

(2.15) を比較して判る通り絶縁のない場合のほぼ 2 倍の電圧になる。

以上の結果より類推して、大地に対するレール電位の最高となる点は 50 kg レールの場合で、且つレールの最末端へ負荷の入る場合である。式 (2.14) および (2.15) に表 (2.2)、(2.3) の数値を適用してレール電位の概数を求めるとほぼ次の式 (2.16)

に示す範囲内となる。

レール端末

$$V_{max} = (0.2 \sim 0.8) I$$

レール中間

$$V_{max} = (0.1 \sim 0.4) I$$

(2.16)

なお式 (2.16) は周波数 50% における数値より導いたが、60% においても S_2 の積は殆んど 50% の場合と差異はないので式 (2.16) は 60% の場合にも適用できると見てよい。

2.3 軌道のインピーダンス および 軽減係数

2.3.1 レールのインピーダンス

レールは鉄で構成されるため商用周波数の範囲で既に強い表皮作用を受け、レール内電流はその周辺に集まる。このため丁度レール外周とほぼ等しい円周を持つ鉄円棒と等しいインピーダンスを持つと考えられる。これをレールの等価円棒導体という。即ちレールの内部インピーダンスを Z_i とすると、近似的に式 (2.17) が成立する。

$$Z_i = R_i + j\omega L_i$$

$$R_i = \omega L_i = \sqrt{\frac{\mu_0}{4\pi}} \frac{\sqrt{\mu f s}}{r} \quad (2.17)$$

我が国で使用されている現用レールについてその諸定数を与えると表 2.1 の通りである。ただし μ の値⁷⁾ は重畳される電流値により異なる外、同一大きさのレールについても試料によって若干異なるようである。Trueblood⁸⁾ 氏は低周波大電流における実測を行い、これを図 2.7 の如くに纏めた。この図を我が国のレールに換算すると表

表 2.1 レールの定数

レール重さ (kg)	周長 (cm)	等価半径 (cm)	透磁率 μ	固有抵抗 ($\mu\Omega$ cm)	断面積 (cm^2)
30	49.0	7.80	160 (50%)	19.1	38.26
37	52.5	8.36	120 (100%)	19.4	47.28
50	59.0	9.39	70 (50%)	20.3	64.33

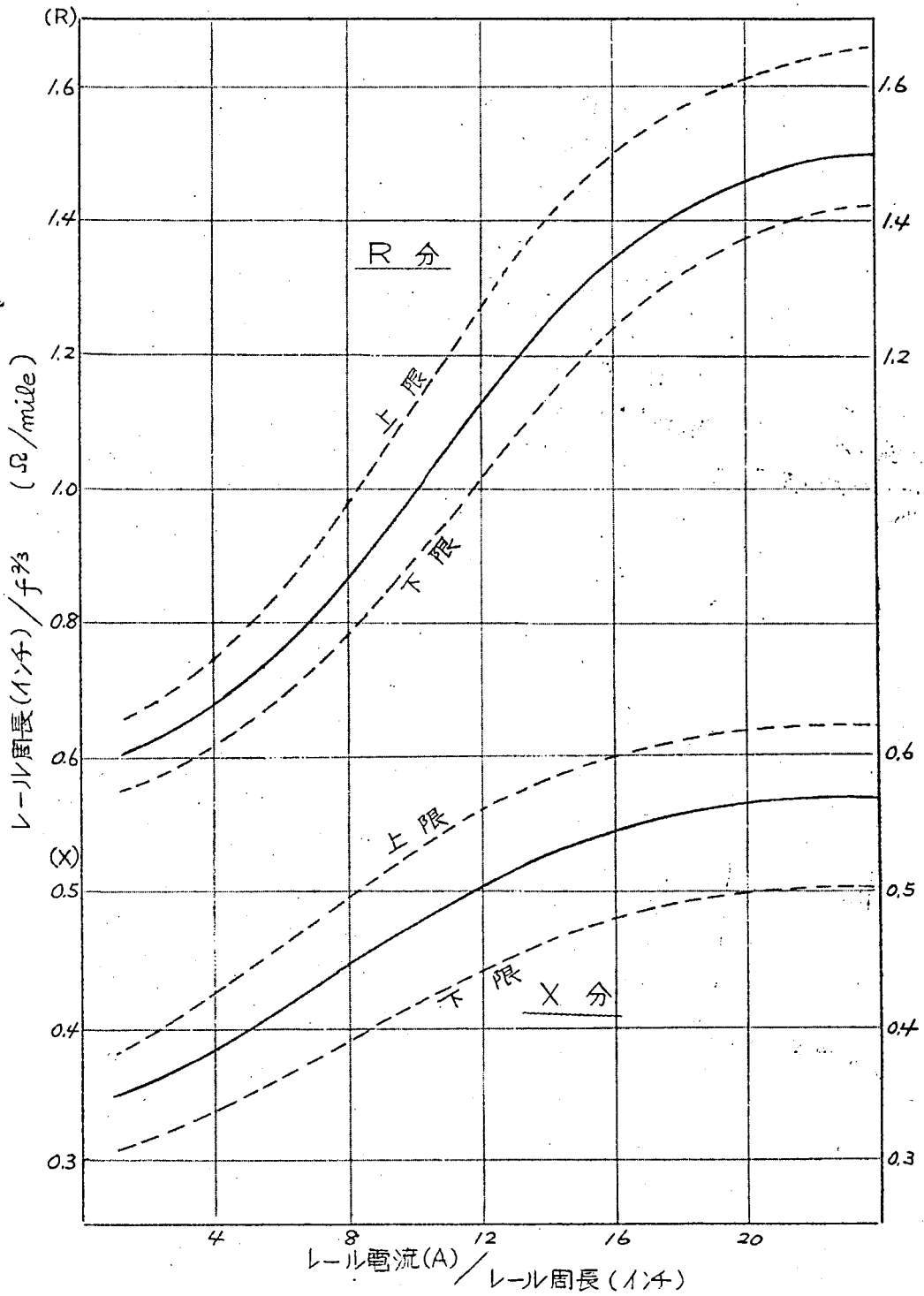


図2.7 レールの内部インピーダンス

2.2のようになる。

この結果によるとレール1本に流れる電流が500A以上でインピーダンスはほぼ一定となる。またインピーダンスの温度係数は0.48%/°C at 20°C 角度は温度上昇10°Cにつき+0.5°増加の程度である⁹⁾。

また商用周波数近傍で抵抗分は $f^{\frac{1}{2}}$, リアクタンス分は $f^{\frac{2}{3}}$ に比例して大となる。例へば60%では50%に比して抵抗分が1.1倍, リアクタンス分は1.13倍となる。しかしさらに高い周波数では近似的に式(2.17)が成立するようになる。

次にレールの外部インピーダンス Z_e については、レールの等価円筒導体が大地上に置かれたと考えると、線状導体の外部インピーダンスに関する Carson-Pollaczek 氏の公式を適用して次の形で表わすことができる。

$$Z_e = \omega \left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\sqrt{2}x}{3} \right) + j\omega \left(2 \ln \frac{2h}{r} + 2 \ln \frac{z}{x} + \frac{2\sqrt{2}x}{3} - 0.1544 \right) \times 10^{-4} \Omega / \text{km} \quad (2.18)$$

表2.2 レール1本の内部インピーダンス

レール重さ (kg)	レール電流 (A)	インピーダンス (50%)		インピーダンス (60%)	
		R分 (Ω/km)	X分 (Ω/km)	R分 (Ω/km)	X分 (Ω/km)
30 ^{kg}	50	0.147	0.160	0.162	0.181
	100	0.157	0.177	0.176	0.192
	200	0.236	0.210	0.242	0.238
	500	0.346	0.249	0.385	0.272
37 ^{kg}	50	0.135	0.149	0.148	0.168
	100	0.155	0.164	0.165	0.181
	200	0.205	0.193	0.220	0.215
	500	0.320	0.233	0.352	0.260
50 ^{kg}	50	0.117	0.131	0.129	0.148
	100	0.134	0.141	0.143	0.158
	200	0.169	0.165	0.176	0.192
	500	0.277	0.204	0.308	0.226

ただし $\chi = 2h\sqrt{4\pi\sigma\omega} = 2h\alpha, \quad \alpha = \sqrt{4\pi\sigma\omega}$

$h =$ レールの地上高さ (cm)

$\sigma =$ 大地導電率 (C.G.S.E.M.U.)

$r =$ 等価導体半径

レールの場合 χ が小さいので

$$Z_e \simeq \pi^2 f + j\omega (1.2319 - 2 \ln r \alpha) \quad (2.19)$$

2.3.2 軌道のインピーダンスおよび伝播定数

さて以上はレール1本についてのインピーダンス算式を与えたが、いまレールが2本平行に置かれた単線軌道についてその大地帰路インピーダンスを Z_{22} とすると (附録1, 参照)

$$Z_{22} = \frac{1}{2} Z_i + \pi^2 f + j\omega (1.2319 - \ln r D \alpha^2) \times 10^{-4} \frac{\Omega}{\text{perm}} \quad (2.20)$$

ただし $D =$ レール中心間距離

標準ゲージの場合 151 cm

狭軌の場合 113 cm

式 (2.20) によって電鉄帰路回路としての軌道のインピーダンスを求めることができる。計算の結果を表2.3 (50%), 表2.4 (60%) 及び表2.5 (800%) に示す。

次に軌道の大地を帰路とする回路のサージインピーダンス S_2 および伝播定数 T_2 は式 (2.3) に与えられたがこれに軌条漏洩 G の定測範囲 ($0.2 \sim 2.0 \frac{\text{V}}{\text{perm}}^{10}$) および表2.3 の値を代入し、 S_2 および T_2 を求めると表2.6 および表2.7の通りとなる。この結果に見る通り軌道のサージインピーダンスおよび伝播定数は、レールの種別および大地導電率にはそれ程大きく影響されないが、軌道の漏洩抵抗によって、 $S_2 = 0.5 \sim 1.9 \Omega$, $T_2 = 0.33 \sim 1.2$ の範囲内に変動する。なお参考のためレール電流の中、減衰電流の大きさ、 $\frac{1}{2}(1-n)e^{-T_2 \chi}$ の絶対値を A , その角度を φ とし、50kg レールについて伝播距離 χ (km) と A および φ との関係を求めると図2.8 および図2.9 の通りとなる。

表 2.3 単線軌道 (狭軌 50%) の大地帰路インピーダンス Z_{22}

大地帰電率 レール条件 6		0.1 (ν/m)			0.01 (ν/m)			0.001 (ν/m)		
レール種別	レール電流(A)	インピーダンス(ν/km)			インピーダンス(ν/km)			インピーダンス(ν/km)		
		R	X	Z ₂₂	R	X	Z ₂₂	R	X	Z ₂₂
30 kg	100	0.123	0.514	0.528	0.123	0.586	0.599	0.123	0.658	0.699
	200	0.129	0.519	0.535	0.129	0.591	0.605	0.129	0.663	0.696
	400	0.164	0.539	0.565	0.164	0.611	0.633	0.164	0.683	0.702
	1000	0.224	0.554	0.597	0.224	0.626	0.665	0.224	0.698	0.733
37 kg	100	0.117	0.507	0.520	0.117	0.579	0.591	0.117	0.651	0.662
	200	0.124	0.513	0.528	0.124	0.584	0.597	0.124	0.656	0.667
	400	0.149	0.528	0.548	0.149	0.599	0.617	0.149	0.671	0.687
	1000	0.209	0.548	0.587	0.209	0.619	0.652	0.209	0.691	0.722
50 kg	100	0.108	0.494	0.505	0.108	0.566	0.577	0.108	0.638	0.647
	200	0.114	0.497	0.510	0.114	0.570	0.581	0.114	0.642	0.652
	400	0.129	0.512	0.528	0.129	0.585	0.599	0.129	0.657	0.670
	1000	0.189	0.527	0.560	0.189	0.600	0.629	0.189	0.672	0.698

表 2.4 単線軌道 (狭軌 60%) の大地帰路インピーダンス Z_{22}

大地帰電率 レール条件 6		0.1 (ν/m)			0.01 (ν/m)			0.001 (ν/m)		
レール種別	レール電流(A)	インピーダンス(ν/km)			インピーダンス(ν/km)			インピーダンス(ν/km)		
		R	X	Z ₂₂	R	X	Z ₂₂	R	X	Z ₂₂
30 kg	100	0.140	0.604	0.620	0.140	0.691	0.712	0.140	0.778	0.790
	200	0.150	0.614	0.632	0.150	0.700	0.716	0.150	0.787	0.801
	400	0.188	0.632	0.659	0.188	0.719	0.743	0.188	0.805	0.826
	1000	0.248	0.655	0.700	0.248	0.741	0.782	0.248	0.828	0.864
37 kg	100	0.134	0.595	0.610	0.134	0.682	0.695	0.134	0.768	0.780
	200	0.144	0.602	0.619	0.144	0.689	0.704	0.144	0.776	0.789
	400	0.171	0.619	0.641	0.171	0.706	0.726	0.171	0.793	0.811
	1000	0.234	0.643	0.684	0.234	0.729	0.766	0.234	0.816	0.849
50 kg	100	0.124	0.580	0.593	0.124	0.666	0.677	0.124	0.754	0.764
	200	0.132	0.586	0.601	0.132	0.672	0.684	0.132	0.759	0.770
	400	0.152	0.600	0.619	0.153	0.687	0.704	0.153	0.773	0.788
	1000	0.212	0.623	0.658	0.213	0.709	0.741	0.213	0.796	0.824

表2.5

単線軌道 (狭軌 800%) の大地帰路インピーダンス

大地帰路半 L-ル 種別	$\sigma = +0.1^{-12} \%$	$\sigma = +0.01^{-13} \%$	$\sigma = +0.001^{-14} \%$
30 kg-rail	$1.0942 + j5.8750$ $5.976 \angle 79^\circ 27'$	$1.1030 + j7.0443$ $5.871 \angle 79^\circ 51'$	$1.1058 + j8.1782$ $5.721 \angle 80^\circ 23'$
37 kg-rail	$1.10346 + j5.7796$ $7.130 \angle 81^\circ 06'$	$1.0436 + j6.9280$ $7.006 \angle 81^\circ 26'$	$1.0464 + j8.0827$ $6.857 \angle 81^\circ 55'$
50 kg-rail	$0.9559 + j5.6407$ $8.253 \angle 82^\circ 18'$	$0.9650 + j6.7890$ $8.150 \angle 82^\circ 37'$	$0.9678 + j7.7436$ $8.002 \angle 83^\circ 03'$

表2.6 軌道のサージインピーダンス S_2 (50%狭軌単線)

電流 (A)	重さ (kg)	軌道漏洩 $G(\frac{V}{km})$	$S_2 (\Omega)$		
			$\sigma = 0.1$	$\sigma = 0.01$	$\sigma = 0.001(\frac{V}{m})$
1000	30	2	0.546L33°59'	0.576L35°10'	0.605L36°06'
		1	0.772 "	0.816 "	0.856 "
		0.2	1.723 "	1.823 "	1.915 "
	37	2	0.541L34°33'	0.572L35°40'	0.598L36°35'
		1	0.766 "	0.808 "	0.845 "
		0.2	1.711 "	1.806 "	1.889 "
	50	2	0.529L35°08'	0.560L36°16'	0.591L37°09'
		1	0.748 "	0.793 "	0.836 "
		0.2	1.672 "	1.772 "	1.868 "
200	30	2	0.517L38°01'	0.550L38°50'	0.582L39°29'
		1	0.719 "	0.742 "	0.764 "
		0.2	1.635 "	1.740 "	1.840 "
	37	2	0.514L38°13'	0.546L39°01'	0.577L39°39'
		1	0.717 "	0.739 "	0.760 "
		0.2	1.625 "	1.726 "	1.824 "
	50	2	0.505L38°32'	0.539L39°21'	0.571L39°58'
		1	0.711 "	0.734 "	0.756 "
		0.2	1.596 "	1.704 "	1.805 "
40	30	2	0.512L38°26'	0.545L39°14'	0.577L39°51'
		1	0.724 "	0.772 "	0.815 "
		0.2	1.620 "	1.722 "	1.824 "
	37	2	0.508L38°41'	0.542L39°27'	0.569L40°04'
		1	0.719 "	0.766 "	0.805 "
		0.2	1.608 "	1.713 "	1.800 "
	50	2	0.500L38°57'	0.530L39°42'	0.563L40°18'
		1	0.707 "	0.750 "	0.796 "
		0.2	1.581 "	1.689 "	1.792 "

表 2.7 軌道の伝播定数 Γ_2 (50% 狭軌単線)

電流 (A)	重さ (kg)	軌道漏洩 Γ (1/km)	Γ_2		
			$\sigma = 0.1$	$\sigma = 0.01$	$\sigma = 0.001$ (1/m)
1000	30	2	1.093L33°59'	1.153L35°10'	1.210L36°06'
		1	0.772 "	0.816 "	0.856 "
		0.2	0.345 "	0.365 "	0.383 "
	37	2	1.083L34°33'	1.142L35°40'	1.195L36°35'
		1	0.766 "	0.808 "	0.845 "
		0.2	0.342 "	0.361 "	0.378 "
	50	2	1.056L35°08'	1.120L36°16'	1.181L37°09'
		1	0.748 "	0.793 "	0.836 "
		0.2	0.334 "	0.354 "	0.373 "
200	30	2	1.016L19°01'	1.048L19°25'	1.079L19°45'
		1	0.848 "	0.861 "	0.874 "
		0.2	0.572 "	0.590 "	0.607 "
	37	2	1.013L19°07'	1.045L19°31'	1.074L19°50'
		1	0.847 "	0.860 "	0.872 "
		0.2	0.570 "	0.588 "	0.604 "
	50	2	1.005L19°16'	1.037L19°41'	1.069L19°59'
		1	0.843 "	0.857 "	0.869 "
		0.2	0.565 "	0.584 "	0.601 "
40	30	2	1.012L19°13'	1.043L19°37'	1.074L19°56'
		1	0.851 "	0.878 "	0.903 "
		0.2	0.569 "	0.587 "	0.604 "
	37	2	1.007L19°21'	1.041L19°44'	1.066L20°02'
		1	0.848 "	0.875 "	0.897 "
		0.2	0.567 "	0.585 "	0.600 "
	50	2	1.000L19°29'	1.029L19°51'	1.061L20°09'
		1	0.841 "	0.866 "	0.992 "
		0.2	0.562 "	0.581 "	0.599 "

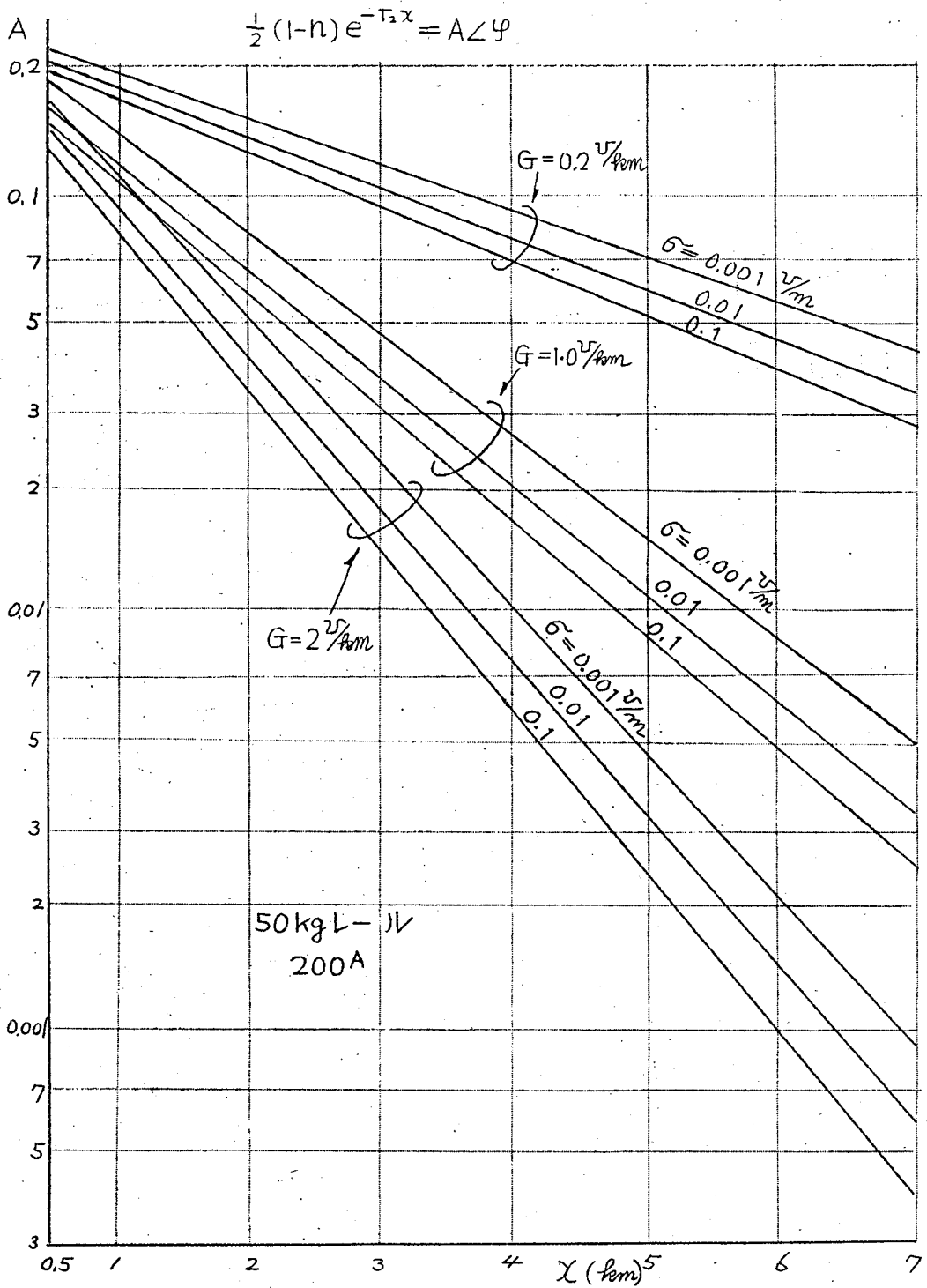


図2.8 減衰電流の大きさ

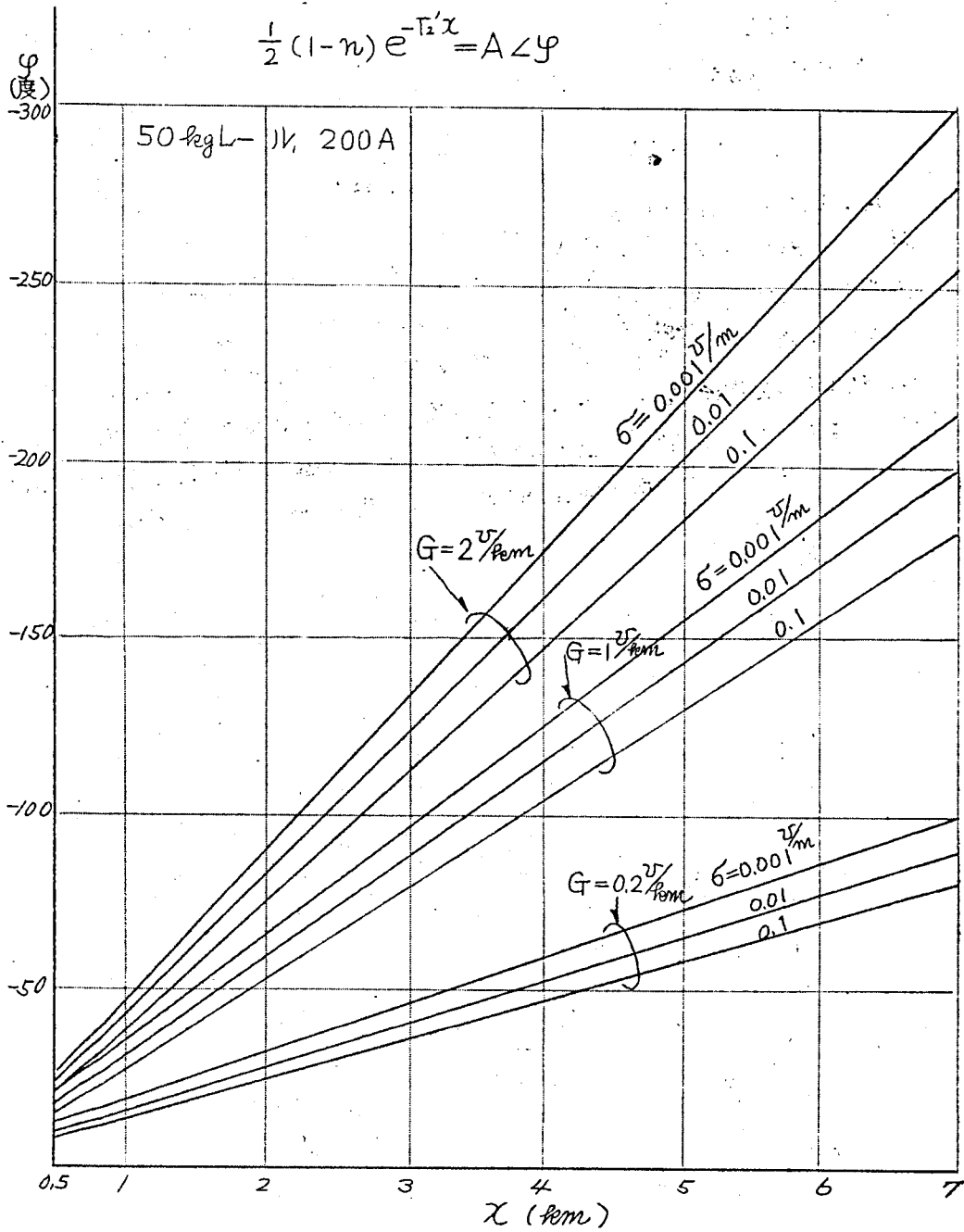


図 2.9 減衰電流の位相角

2.3.3 軌道の軽減係数

軌道の軽減係数 k は式 (2.21) の通り定義される。

$$k = (1 - n_0) = (1 - Z_{12} / Z_{22}) \quad (2.21)$$

k は既に式 (2.14) および (2.15) に見え通り、レール電圧に関係し、 k が小さい程レール電位の上昇を小さくする作用を持つが、さらに後節に説明するように、電磁誘導電圧に対する遮蔽係数と同じ作用を持つようになる。このような重要な意味を持つので、各種レールの単線軌道について k の大きさを求めると図 2.10 の通りとなる。軽減係数は電流 100 A までは殆んど一定であるが、それより電流が増すと従い徐々に大きくなり、1000 A 以上では再びほぼ一定となる。これは図 2.7 に示されたレールのインピーダンスの電流特性の結果である。即ち k はレールインピーダンスの

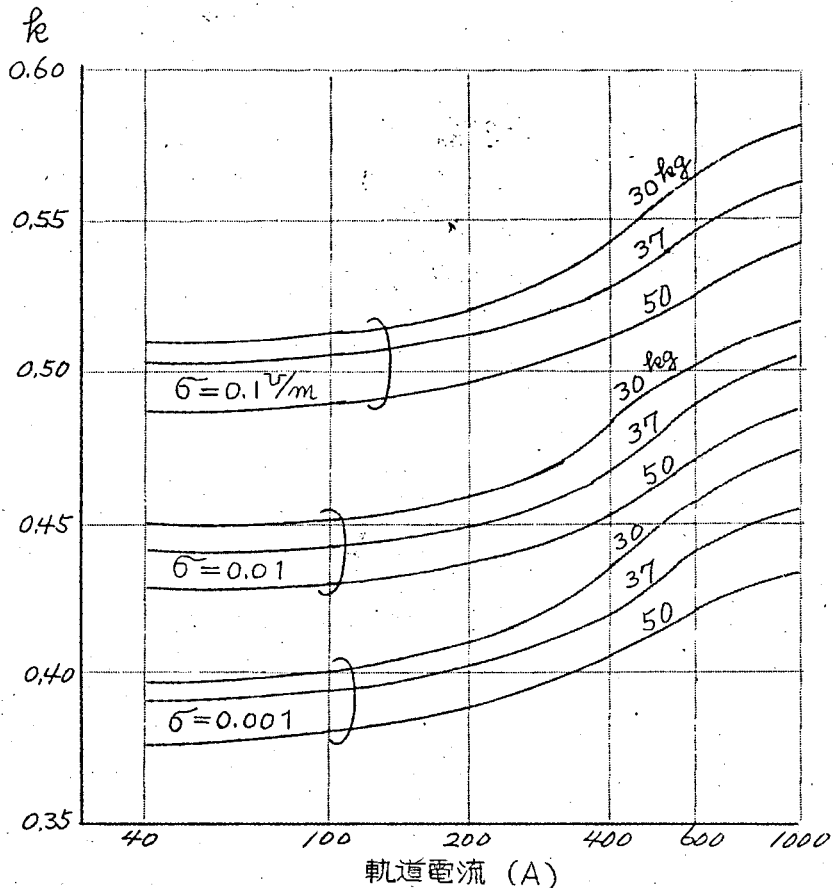


図 2.10 軌道の軽減係数 (50%)

小なる程小さく、大なる程大となる。また大地導電率 σ によって差異のあるのは、電車線とレール間の相互インピーダンスの差異による。

次に軽減係数 k の周波数特性を調べる。

$\sigma = 0.0408 \text{ } \mu\text{/m}$, $\mu_r = 120$ の場合の計算の結果は表 2.8 のようである。¹¹⁾
即ち周波数が高くなると k は僅かに大となる性質がある。

表 2.8 周波数による k の変化 ($\sigma = 40.8^{-3}$, $\mu_r = 120$)

f (%)	n_0	k
300	$-0.6172 + j 0.0198$	0.383
600	$-0.6028 + j 0.0339$	0.397
1200	$-0.5888 + j 0.0444$	0.412
1800	$-0.5792 + j 0.0499$	0.422

2.4 軌道上の電圧、電流分布の実測例

レール中の電流分布について高崎線桶川-吹上間¹²⁾、東海道線豊橋-藤津間¹³⁾の他各所で測定を行った。得られた結果は何れも以上の理論を裏付けるに充分であつたが、ここでは仙山線落合-白沢間 8 km の試験通電による結果について説明する。

先ず商用サイクルの分布を調査するため、仙台起点 10.2 km の地点より 18.2 km の地点までを通電区間として、この区間の両端にレール絶縁を挿入し、18.2 km に変圧器および電流調整用大抵抗器を置き、送電点とし、10.2 km は電車線とレールをその中性点で短絡した。軌道は単線にして、レールは 37 kg、極く一部分に 50 kg レールが含まれた。レール電流はピックアップコイル型の軌条電流計 (日信製) を使用して測定した。レール電圧は整流型電圧計 (桑野電製) を使用した。測定点は 10.2, 10.7, 11.2, 12.2, 14.2, 16.2, 17.2, 17.7, 18.2 の 9 点で各所同時測定を行った。

測定結果の代表として 100A および 200A を通電した場合で両端のレール絶縁のある場合と 200A 通電で両端レール絶縁のない場合の 3 例を一括して送端電流を 100% として図示すると図 2.11 の通りとなる。

また両端レール絶縁のない場合について、大地導電率を $0.1 \text{ } \mu\text{m}$ (実測値が8章参照)とし、軌道の漏洩コンダクタンス $G=2.0 \text{ } \mu\text{km}$ および $0.2 \text{ } \mu\text{km}$ とした場合の電流分布計算の結果を同図に記入すると点線に示される通りとなる。

実測値はこの計算曲線2本の中、送端 18.2 km 付近では $G=0.2$ 、受端 10.2 km 付近では $G=2.0$ に近い結果となっている。即ち電流分布は軌道床の漏洩抵抗によって左右されるが、これを知ることができればほぼ計算によって求めることができることが認められる。

なおこの場合のレール電圧は送電区間の両端において表2.9に示される通りとなった。且つこの場合の中間の電圧分布はほぼ直線的となった。またレールの電位の零点は $13.3 \sim 13.5 \text{ km}$ にあり、中央より約 1 km ずれたが、この原因はやはり両端部分の漏洩抵抗の相異にある。

表 2.9 レール電圧実測例

測定日	電 流	レール電圧 (V)	
		10.2 km	18.2 km
2月12日	200 ^A	120 ^V	165 ^V
	300 ^A	210 ^V	270 ^V
2月13日	100 ^A	64 ^V	83 ^V
	200 ^A	118 ^V	160 ^V
	300 ^A	183 ^V	260 ^V
2月26日	200 ^A	121 ^V	175 ^V
	200 ^A	55 ^V	88 ^V
	絶縁なし		

次に高調波電流の分布を調査するため、同じ区間で送電端に真空管発振器および電力増巾器を置き、周波数 400, 600, 1000, 1400, 2000, 3000 % の電流を $0.7 \sim 2.0 \text{ A}$ 流し、前記9地点で各電流を測定した。電流の測定はピックアップコイル型高周波線電流計 (安藤電業) を使用した。いま1例として両端にレール絶縁のある場合について測定の結果を図2.12に示す。

この結果を見ると周波数の低い方では商用サイクルの分布と似た結果が得られるが、周波数が高くなるに従って両端附近の減衰が大となり中間部の電流は次第に減少する

ようになる。これは漏洩抵抗が周波数に無関係に殆んど一定であるに対し、レールインピーダンスが周波数にほぼ比例して大となるので、伝播定数がそれにつれて大となるからである。また受端において周波数が大となるに従って電流の大きさが100%より大となるが、これは回路の共振現象 (Ferranti-effect) の現われである。

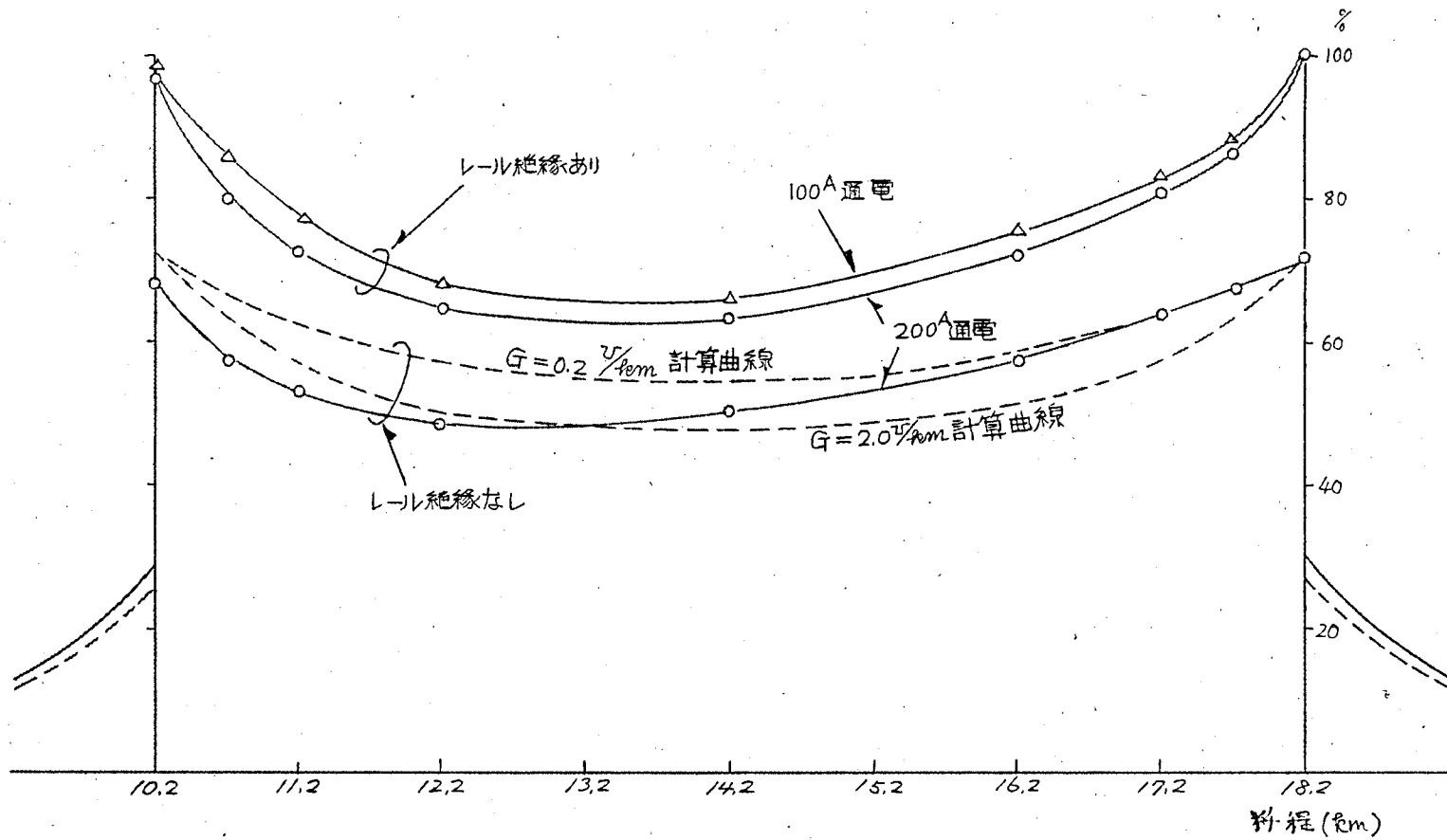


図2.11 レール電流の分布 (50% 実測例).

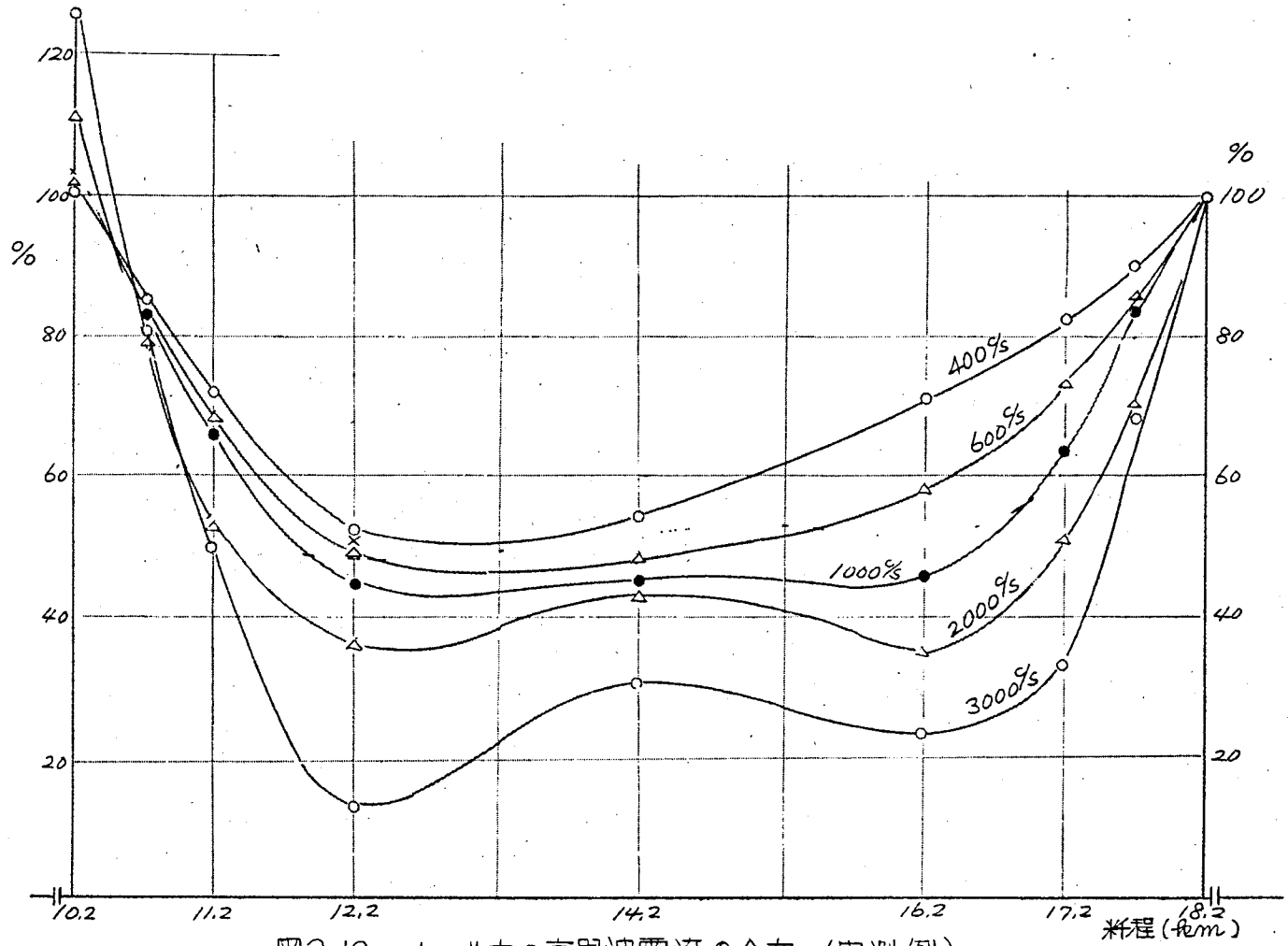


図2.12 レール中の高周波電流の分布 (実測例)

2.5 電車線路のインピーダンス

2.5.1 電車線路の対地静電容量

変電所より電気車に給電するために軌道の上に吊架された架空線条で、電気車上のパンタグラフと直接接触する部分（電車線）と、これを吊架する線条（吊架線）とにより構成されるものを一体として電車線路と呼ぶことにする。電車線はレール面上に水平に張られた溝付硬銅線で、吊架線は普通の鋳鉄線又は Cd-Cu 線が用いられ、支持柱の間隔によって、また列車の速度その他の要求により種々な吊架方式が採用せられる。従って吊架線の地上平均の高さは吊架方式によって若干異なるものである。いま電車線 T、吊架線 M の地上高を夫々 h_1, h_2 とし、その半径を r_1, r_2 とすると、この両者により構成される電車線路の対地静電容量 C は次の式 (2.22) によって与えられる。(附録2. 参照)

$$C = \frac{P_{11} + P_{22} - 2P_{12}}{P_{11}P_{22} - P_{12}^2} \times \frac{1}{q} \times 10^{-6} \text{ F/len} \quad (2.22)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} P_{11} &= 2 \ln \frac{2h_1}{r_1} \\ P_{22} &= 2 \ln \frac{2h_2}{r_2} \\ P_{12} &= 2 \ln \frac{h_1 + h_2}{h_1 - h_2} \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

電車線と吊架線の場合のように複導体の静電容量の計算に等価導体の考え方がよく用いられる。

いま地表上にある2本の線条導体の^{対地}静電容量については式 (2.24) のようにおく。

$$C = \frac{1}{P_{11}} \times \frac{1}{q} \times 10^{-6} \text{ F/len} \quad (2.24)$$

ここに

$$P_{11} = 2 \ln \frac{2h}{r} \quad (2.25)$$

$$h = \sqrt{\sqrt{h_1 h_2} \cdot \frac{d'}{2}}, \quad r = \sqrt{\sqrt{r_1 r_2} \cdot d} \quad (2.26)$$

とおくならば、式 (2.24) は式 (2.22) と等しくなる。即ち複導体を1本の等価導体で置換する場合、等価導体の半径およびその高さは式 (2.26) のように与えられる。(附録3. 参照)

電車線と吊架線のよりなる電車線路の計算結果を表 2.10 に示す。

表 2.10 電車線路の静電容量 ($\mu\text{F}/\text{km}$)

電車線高さ	吊架線 電車線	$d=30\text{cm}$		40cm		60cm	
		110mm^2	85mm^2	110mm^2	85mm^2	110mm^2	85mm^2
520	55mm^2	0.00995	0.00990	0.010230	0.010160	0.010560	0.010490
	60"	991	987	10180	10130	10510	10450
450	55"	0.010200	0.010150	0.010460	0.010410	0.010850	0.010780
	60"	0.010170	10120	10420	10370	10790	10730
570	55"	0.00980	0.00975	0.01004	0.00999	0.01038	0.01033
	60"	976	972	999	995	1034	1028

ただし d = 電車線と吊架線の平均距離

直流電気鉄道の場合は電車線路に正極き電線の附加されることが多い。例へば図 2.13 の場合は正極き電線について等価導体の電位係数を P_{22} 、電車線路について同じく P_{11} とすると、正極導体を 1 体とした対地静電容量は式 (2.24) において P_{11} を式 (2.27) の通り置くことにより求められる。

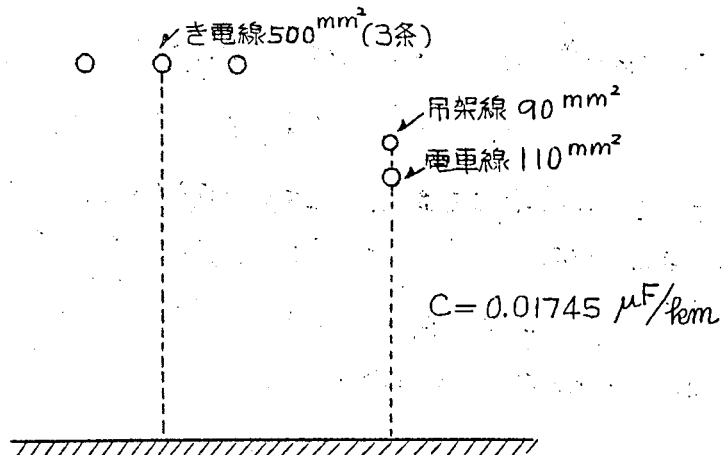


図 2.13 電車線配置

$$P_{11} = \frac{P_{11}' P_{22}' - P_{12}'^2}{P_{11}' + P_{22}' - 2P_{12}'} \quad (2.27)$$

ここに

$$P_{11}' = \frac{P_{11} P_{22} - P_{12}^2}{P_{11} + P_{22} - 2P_{12}}$$

$$P_{22}' = \frac{1}{3} (P_{33} + 2\overline{P}_{34})$$

ただし

$$\overline{P}_{34} = \frac{1}{3} (P_{34} + P_{35} + P_{45})$$

一例としてき電線に 500mm^2 , 吊架線に 90mm^2 , 電車線 110mm^2 よりなる図 2.13 の配置よりなる導体群を一体とした対地静電容量を計算すると $0.01745 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$ となる。

2.5.2 電車線回路のインピーダンス

電車線路を往路とし軌道 (オ3軌条または帰路き電線の場合もある) を帰路とする回路を電車線回路と呼ぶこととする。その代表的なものは図 2.12 見た通りである。いま図 2.12 について変電所から見た回路全体の電圧降下を求めると、次のようになる。

$$\text{電車線中の電圧降下 } V_1 = I_1 Z_1 l + \int_0^l I_x Z_{12} dx$$

ただし
 Z_1 = 電車線の直列インピーダンス
 Z_{12} = 電車線とレール間の相互インピーダンス

I_x に既に求めた式 (2.5) を代入して積分すると

$$V_1 = (Z_1 - n_0 Z_{12}) I_1 l + k n_0 I_1 S_2 e^{-\Gamma_2 l}$$

さらにレール中の電圧降下は既に求めた通り P 点において式 (2.14) の通りである。また、き電端 0 点では P 点と符号が反対で絶対値は等しい筈である。

即ち

$$\text{軌道中の電圧降下 } V_2 = k I_1 S_2 (1 - e^{-\Gamma_2 l})$$

それ故全電圧降下を V とすると

$$V = (Z_1 - n_0 Z_{12}) I_1 l + k I_1 S_2 (1 - k e^{-\Gamma_2 l}) \quad (2.28)$$

オ1項はき電距離 l に比例して大きくなり、オ2項はき電距離が短い時は 0 に近づき、長い時は $-k I_1 S_2$ (一定値) に近づく性質を持ち、一般にオ1項に比較して小さいのが普通である。従ってオ1項のみ取り、これに與与するインピーダンスと考

える。従って次の通りとなる。

$$\text{電車線回路インピーダンス } Z_a = Z_1 - n_0 Z_{12} \text{ (}\Omega/\text{km)} \quad (2.29)$$

$$\text{附加的インピーダンス } Z_d = k_e S_2 (1 - k_e e^{-\Gamma_2 l}) \text{ (}\Omega) \quad (2.30)$$

これらの式中の各インピーダンス S_2, Z_{12} および n_0, k_e などは、既に前節までに求めた通りであり、ここにはさらに Z_1, Z_a などについて計算した一例を表示する。

表 2.11 電車線路インピーダンス (Ω/km at 50%)

(1) 電車線の内部インピーダンス

線種	等価半径	導体抵抗 Ω/km	内部インダクタンス mH/km
170 mm^2	7.74	0.1040	0.05
110	6.17	0.1592	0.05
85	5.50	0.2030	0.05

(2) 電車線の外部インピーダンス

大地電率 線種	$\sigma = 10^{-12} \text{ } \Omega/\text{m}$		$\sigma = 10^{-13} \text{ } \Omega/\text{m}$		$\sigma = 10^{-14} \text{ } \Omega/\text{m}$	
	R Ω/km	L mH/km	R Ω/km	L mH/km	R Ω/km	L mH/km
170 mm^2	0.0472	2.116	0.0487	2.341	0.0494	2.570
110	"	2.151	"	2.376	"	2.605
85	"	2.206	"	2.431	"	2.660

但し外部インピーダンスの計算は式(2.18)による。

(3) 電車線のインピーダンス Z_1

大地電率 線種	$\sigma = 10^{-12} \text{ } \Omega/\text{m}$	$\sigma = 10^{-13} \text{ } \Omega/\text{m}$	$\sigma = 10^{-14} \text{ } \Omega/\text{m}$
170 mm^2	$0.1512 + j0.680$ $0.696 \angle 77^\circ 20'$	$0.1527 + j0.752$ $0.767 \angle 78^\circ 31'$	$0.1534 + j0.823$ $0.837 \angle 79^\circ 26'$
110	$0.2064 + j0.691$ $0.721 \angle 73^\circ 23'$	$0.2079 + j0.762$ $0.790 \angle 74^\circ 46'$	$0.2089 + j0.834$ $0.860 \angle 75^\circ 56'$
85	$0.2502 + j0.708$ $0.751 \angle 70^\circ 32'$	$0.2517 + j0.779$ $0.818 \angle 72^\circ 08'$	$0.2524 + j0.851$ $0.888 \angle 73^\circ 28'$

(4) 電車線と軌条間の相互インピーダンス Z_{12}

$\sigma = 10^{-12} \text{ } \Omega/\text{m}$	$\sigma = 10^{-13} \text{ } \Omega/\text{m}$	$\sigma = 10^{-14} \text{ } \Omega/\text{m}$
$0.0482 + j0.255$ $0.260 \angle 79^\circ 18'$	$0.0490 + j0.326$ $0.330 \angle 81^\circ 27'$	$0.0493 + j0.398$ $0.401 \angle 82^\circ 56'$

表2.11の(5) 単線軌道と電車線1条の回路インピーダンス Z_a

電車線種別	軌条重量	$\sigma = 0.1 \text{ } \mu\text{m}$	$\sigma = 0.01 \text{ } \mu\text{m}$	$\sigma = 0.001 \text{ } \mu\text{m}$
110 mm ²	30	0.208+j0.578 0.6142∠70°13'	0.215+j0.600 0.6375∠70°17'	0.223+j0.615 0.6541∠70°04'
	37	0.205+j0.576 0.6118∠70°25'	0.213+j0.597 0.6339∠70°22'	0.219+j0.609 0.647∠70°11'
	50	0.203+j0.570 0.6405∠70°24'	0.209+j0.591 0.6265∠70°29'	0.251+j0.604 0.654∠67°26'
85 mm ²	30	0.251+j0.595 0.646∠67°08'	0.259+j0.615 0.667∠67°10'	0.266+j0.632 0.686∠67°10'
	37	0.249+j0.593 0.643∠67°13'	0.256+j0.612 0.6635∠67°18'	0.263+j0.626 0.6785∠67°13'
	50	0.246+j0.587 0.636∠67°15'	0.253+j0.606 0.656∠67°20'	0.259+j0.621 0.6725∠67°22'
170 mm ²	30	0.152+j0.567 0.587∠74°58'	0.160+j0.588 0.6095∠74°47'	0.167+j0.604 0.6265∠74°34'
	37	0.150+j0.565 0.584∠75°08'	0.157+j0.585 0.606∠74°59'	0.164+j0.598 0.6205∠74°40'
	50	0.148+j0.559 0.578∠75°10'	0.154+j0.579 0.599∠75°06'	0.160+j0.593 0.6145∠74°54'

表2.12 電車線回路インピーダンス (Ω/km at 60%)

(1) 電車線のインピーダンス Z_1 (Ω/km)

線種	高さ (cm)	直流抵抗 (Ω/km)	インピーダンス	
			$\sigma = 0.01 \text{ } \mu\text{m}$	$\sigma = 0.001 \text{ } \mu\text{m}$
110 mm ² Cu	570	0.1592	0.2175+j0.917	0.2181+j1.003
60 " Cd	610	0.338	0.396+j0.938	0.397+j1.024
110Cu+60CdCu			0.174+j0.772	0.177+j0.852

(2) 電車線路インピーダンス Z_a (Ω/km)

線種	インピーダンス	
	$\sigma = 0.01$	$\sigma = 0.001$
110Cu+60CdCu 50kgL-JL	0.147+j0.593 0.611∠76°04'	0.147+j0.613 0.630∠76°31'
110Cu 50kgL-JL	0.215+j0.708 0.740∠73°06'	0.221+j0.725 0.758∠73°02'

表2.11 および表2.12 に見る通り電車線回路インピーダンスは、大地導電率が悪くなると、大となる傾向にあり、また周波数にほぼ比例して大きくなることが認められる。Cd-Cu電車線は、吊架線のFeのみにCd-Cu線を使用してインピーダンス低下に役立たせようとしたものであるが、表2.12(2)を見て判る通り、インピーダンス低下の程度は約1割である。現在国鉄の殆どどの交流電化区間にこれが用いられている。

2.5.3 実測値と計算値の比較

以上の理論計算と実測結果とを比較するため、横浜線中山、原町田間および仙山線落合、白沢間などで実測を行った。^{(13) (14)} 表2.13は50%電流を通電し、電磁オンロググラフまたは電圧電流および電力計を使用して測定した結果であるが、割合いによく計算結果と一致した。

表2.13 電車線回路のインピーダンス
(実測値と計算値の比較) (50%)

場 所	実 測 結 果	計 算 結 果	通 電 電 流
国鉄横浜線	0.314 \angle 78°00'	0.312 \angle 79°21'	114 ^A
国鉄仙山線	0.639 \angle 63°23'	0.646 \angle 67°08'	100 ^A
	0.659 \angle 60°54'		200 ^A

次にインピーダンスの周波数特性を調査するため、通信用の直読インピーダンスブリッチを使用して回路の終端を短絡した場合および開放した場合のインピーダンス Z_{sk} および Z_{op} を測定し、これより回路の直列インピーダンス Z 、並列アドミタンス Y 、および伝播定数 Γ 、サージインピーダンス S を計算上より求めた。測定場所は電流分布を求めたと同じく仙山線落合、白沢間である。測定の結果を図2.14に示した。実線は実測値であり、点線は計算値である。図に見る通り各量は周波数に比例して直線的に大きくなる。またサージインピーダンスは一定で310~350 Ω である。

実測値と計算値で1割程度の差異があるが、実測は微弱電流によるものであり、計算は200^Aにおけるレール定数を用いたからである。この点を考慮すれば計算値と実測値とは割合いによく一致する。特に Z は電圧降下に関係する Z 、そのものを与える

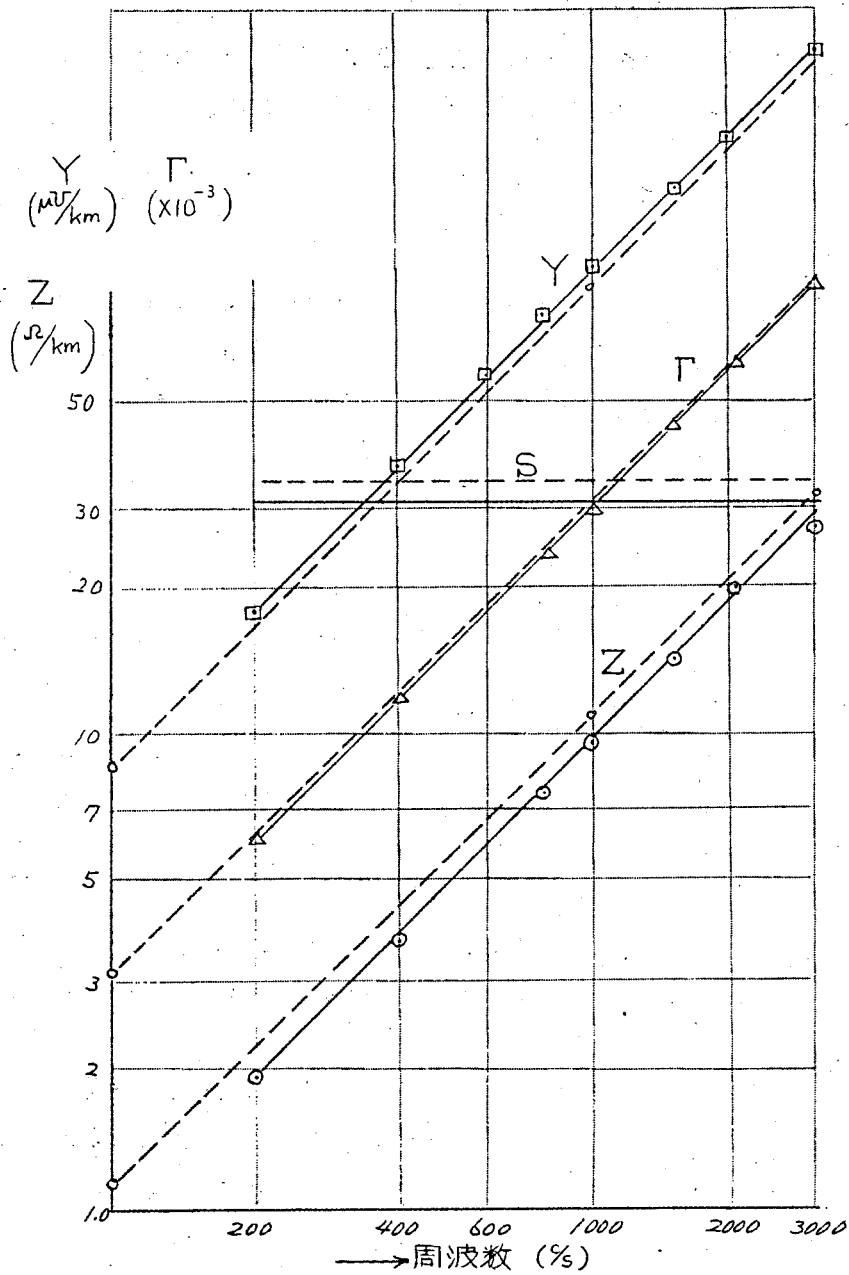


図2.14 電車線回路インピーダンス周波数特性

もので電化運転上実測値が希望されるが、このデータから見ると微弱電流によるブリッジ法で測定し、約15%ほど大きく見積れば大電流における Z_a が得られることが分る。大電流通電における測定は簡単でないので、最近専らこの弱電流測定によつて Z_a を推定している。

第3章 電気鉄道における誘導作用

3.1 電気鉄道における電磁誘導作用

3.1.1 電車線の場合

電車線①およびレール②を流れる電流をそれぞれ I_1, I_2 とし、通信線④と大地間に誘起される単位長当り電磁誘導起電力を E とする。

線条①、②および④は大地上に平行して置かれた導線と考えられ、これらの間の電磁的相互誘導作用は Carson-Pollaczek の大地上に置かれた平行二線条間の理論に基づき相互インピーダンス Z_{1q}, Z_{2q} によって求められる。即ち

$$E = Z_{1q} I_1 + Z_{2q} I_2 \quad (3.1)$$

然るにレール中の電流 I_2 は2.2節に説明されたように導電電流と誘導電流とに分解される。即ち、図2.2の通りである。

ここで平行する通信線④が区間ABの両側へ非常に長く延長されている場合を扱うならば、減衰電流の誘導作用は、互にほぼ打ち消す方向にあるので、 I_2 については $-n_0 I_1$ のみを考えればよろしい。これは非常に重要な都合のよい理論である。それ故式(3.1)は式(3.2)の通りとなる。

$$E = (Z_{1q} - n_0 Z_{2q}) I_1 \quad (3.2)$$

もし線条④が遠方にあつて、 $Z_{1q} \approx Z_{2q}$ ならば、

$$E = k Z_{1q} I_1 \quad (3.3)$$

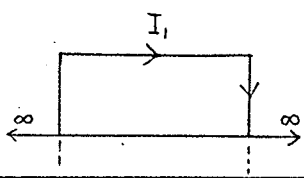
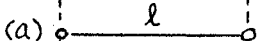

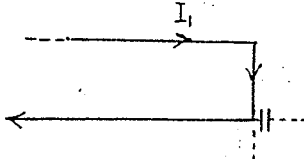
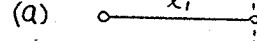
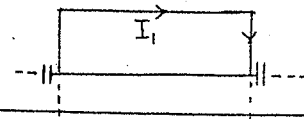
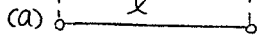
^{2.3.3節}
 k は^{2.3.3節}述べた通り軌道の存在による誘導軽減係数である。 k はレール種別、大地導電率などの函数であり、数値例を2.3.3節に示した。

しかし部分的に平行する通信線条に対しては各部の電流分布を考慮に入れるべきは当然である。このような場合は減衰電流 $k I_1 e^{-\Gamma_2 z}$ による電磁誘導起電力を式(3.3)に加えればよい。追加分を δ で現わすと短い通信線への単位長当り電磁誘導起電力は式(3.4)の通りとなる。

$$E = k Z_{1q} I_1 + \delta \quad (3.4)$$

代表的な線路配置について減衰電流による追加分 δ を与えると表3.1 の通りである。

表3.1 短い通信線への電磁誘導起電力

線路配置		電磁誘導起電力 (単位長当り) $E = k Z_{12} I_1 + \delta$
き電側		(a) $\delta = -\frac{k Z_{22}}{\Gamma_2 l} I_1 e^{-\Gamma_2 l}$
	(a) 	(b) $\delta = -\frac{k Z_{22}}{2 \Gamma_2 l} \{ 1 - e^{-\Gamma_2 l} - e^{-\Gamma_2 l} + e^{-\Gamma_2 (l-l_1)} \} I_1$
	(b) 	(c) $\delta = -\frac{k Z_{22}}{2 \Gamma_2 l} \{ e^{-\Gamma_2 l_0} - e^{-\Gamma_2 (l-l_0)} - e^{-\Gamma_2 (l+l_0)} + e^{-\Gamma_2 (l-l_1-l_0)} \} I_1$
き電側		(a) $\delta = -\frac{k Z_{22}}{\Gamma_2 l_1} (1 - e^{-\Gamma_2 l_1}) I_1$
	(a) 	(b) $\delta = -\frac{k Z_{22}}{\Gamma_2 l_1} (1 - e^{-\Gamma_2 l_1}) \times e^{-\Gamma_2 l_0} I_1$
き電側		(a) $\delta = -\frac{2k}{\Gamma_2 l} \coth \Gamma_2 l \cdot I_1$
	(a) 	

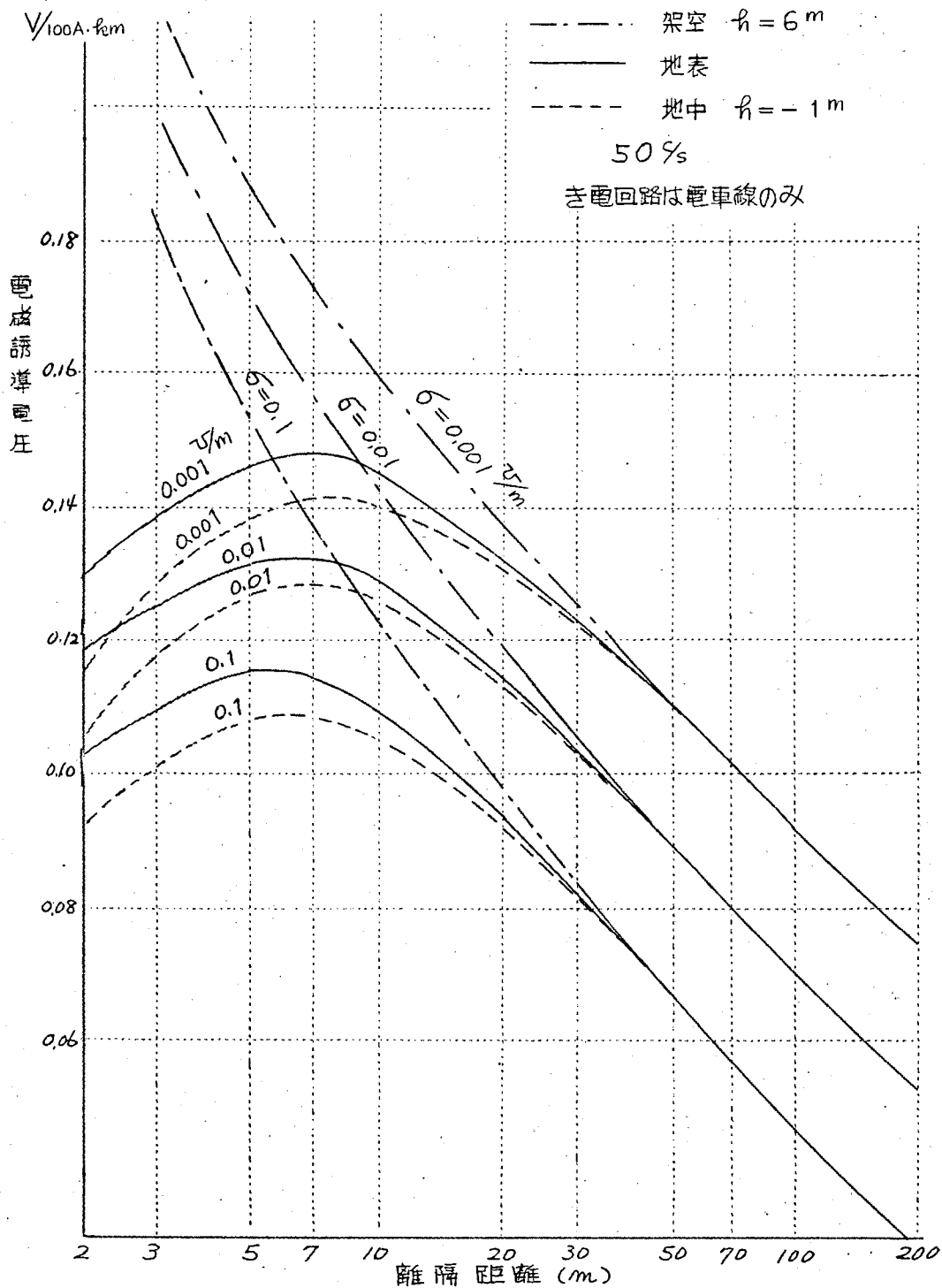


図3.1 電磁誘導電圧と離隔距離

交流電気鉄道の場合は直流に比較して電車電流が少ないので、正き電線を有しないのが普通である。従つてこゝに与えた諸式は、交流電気鉄道による電磁誘導電圧の計算にそのまま適用できる。いま参考のため一例を計算図示しよう。

図3.1は50%単線交流電化区間の平行する通信線への $I_1 l = 100 \text{ A} \cdot \text{km}$ 当りの電磁誘導起電力である。鎖線は高さ6mの架空裸線への誘導、実線は地表電線、点線は地下1mの埋設電線に対する誘導を与える。大地導電率 σ を媒変数として Carson-Pollaczek の相互誘導係数を適用して計算した結果である。なお、この場合は電車線のみでレールは両端に無限に延長された最も簡単な代表的場合で且つき電区間の中央部分における誘導電圧である。また相互誘導係数は Carson-Pollaczek 式より求めることが最も信頼されている。⁵⁾ 我々も仙山線試験区間で実測した結果、従来⁶⁾の深尾式に比較してC-P式による方が非常に良く一致することを認めた。

3.1.2 正き電線を有する場合

電車線①、レール②、にさらに正き電線③があり①と③とが並列に使用される場合である。

それぞれの線路上の電流を I_1, I_2, I_3 とし、線路④への電磁誘導起電力を E とすると

$$E = Z_{19} I_1 + Z_{29} I_2 + Z_{39} I_3$$

またレールについては、き電区間の中間部分で電流が一定、電位が0である部分について考えると、

$$0 = I_1 Z_{12} + I_2 Z_{22} + I_3 Z_{23}$$

さらに正き電線と電車線の並列回路について見ると

$$I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12} + I_3 Z_{13} = I_1 Z_{13} + I_2 Z_{23} + I_3 Z_{33}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{且つ } I_1 + I_3 &= I \text{ (全電流)} \\ I_1 &= aI, \quad I_3 = bI \end{aligned} \right\} \text{とおき}$$

これらの連立式を解くと、

$$E = \left\{ (Z_{19} - n_a Z_{29}) a + (Z_{39} - n_b Z_{29}) b \right\} I \quad (3.5)$$

$$\text{ただし } n_a = \frac{Z_{12}}{Z_{22}}, \quad n_b = \frac{Z_{23}}{Z_{22}}$$

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{Z'_{33} - Z'_{13}}{Z'_{11} + Z'_{33} - 2Z'_{13}} \\ b &= \frac{Z'_{11} - Z'_{13}}{Z'_{11} + Z'_{33} - 2Z'_{13}} \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

ただし

$$\begin{aligned} Z'_{11} &= Z_{11} - n_a Z_{12} \\ Z'_{33} &= Z_{33} - n_b Z_{23} \\ Z'_{13} &= Z_{13} - (Z_{12} Z_{23} / Z_{22}) \end{aligned}$$

もし線路 ④ が遠方にあり、 $Z_{19} \approx Z_{29} \approx Z_{39}$ ならば

$$E = \left\{ (1-n_a)a + (1-n_b)b \right\} Z_{19} I \quad (3.7)$$

さらにもし $n_a \approx n_b$ ならば式 (3.7) は式 (3.3) に一致する。

さて変電所より電車線に加える電圧を V とすると電車線回路に流れる全電流 I は、式 (3.8) となる。

$$I = \frac{V}{Z_a \ell + Z_L} \quad (3.8)$$

ただし Z_a = 電車線回路のインピーダンス

Z_L = (負荷インピーダンス) + (変電所インピーダンス)

ℓ = 変電所と負荷までの距離。

正極き電線を有する場合は直流電気鉄道の場合であり、 V, I は直流波形中に含まれる高調波電圧および電流である。これを式 (2.36) に代入して電磁誘起電力 E を求めることができる。

$$E = k_m V \quad (3.9)$$

$$k_m = \frac{a(Z_{19} - n_a Z_{29}) + b(Z_{39} - n_b Z_{29})}{Z_a + Z_L / \ell} \quad (3.10)$$

こゝに示される係数 k_m を電磁結合係数と呼ぶことにする。

もし $Z_{19} \approx Z_{29} \approx Z_{39}$ ならば

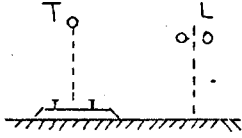
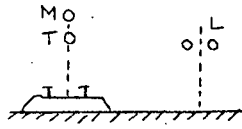
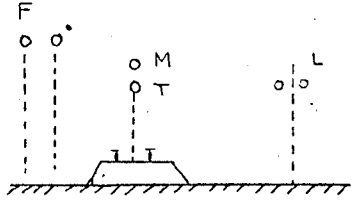
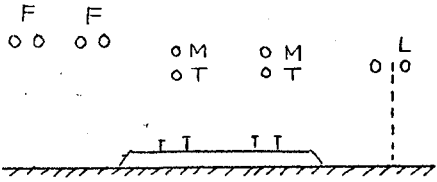
$$k_m = \frac{a(1-n_a) + b(1-n_b)}{Z_a + \frac{Z_L}{\ell}} Z_{19} \quad (3.11)$$

なおこの場合の電車線路のインピーダンスは次のように書き表わすことができる。

(附録4参照)

$$Z_a = aZ'_{11} + bZ'_{13} \quad (3.12)$$

次に図3.2に示すような電車線と通信線との代表的な4つの配置について f_{em} を求める。

き電回路条件	線 条 配 置
①	
②	
③ ③' (③の場合のLがF側)	
④ ④' (④の場合のLがF側)	

M: 吊架線
T: 電車線

F: 正極き電線
L: 通信線

図3.2 電車線と通信線との配置

図3.3は大地導電率 $\sigma=0.01 \text{ } \Omega^{-1}/\text{m}$ 、周波数 $f=900\text{ } \text{s}^{-1}$ とした場合の k_{em} の計算結果を図示したものである。通信線の離隔 10m における k_{em} を k_{em0} とし、縦軸に k_{em}/k_{em0} を取って示した。また k_{em0} の値は表3.2に与えた。図中①、②、③、④はそれぞれ図2.16に対応するNo.であり、③'および④'はそれぞれ③及び④において通信線Lがき電線Fの側にある場合である。

直流電気鉄道の場合、電磁誘起電力 E は式(3.9)に与えられるように、直流波形中に含まれる高調波電圧に比例する。式(3.9)の導出は変電所送りに電の場

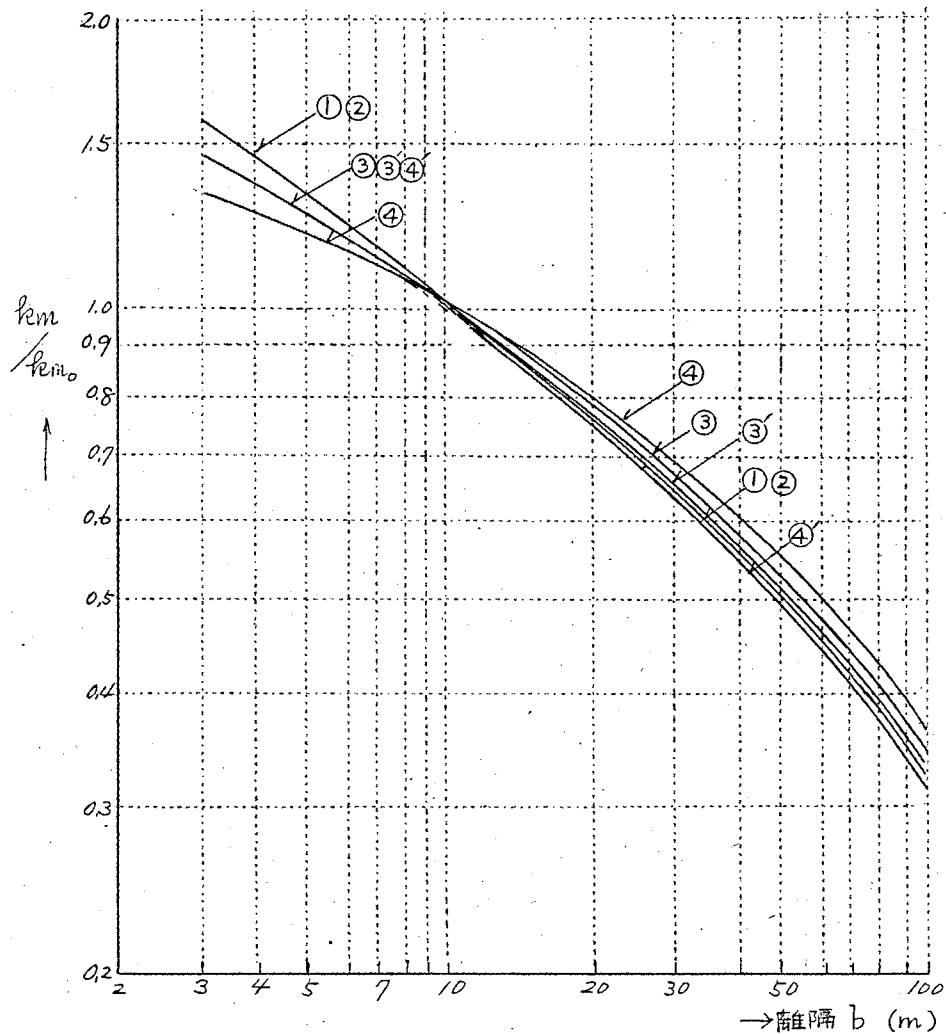


図3.3 電気鉄道と電磁結合係数

$$f = 900 \text{ } \text{s}^{-1}, \quad \sigma = 0.01 \text{ } \Omega^{-1}/\text{m}$$

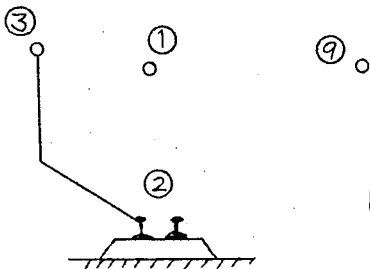
合であつたが、直流電気鉄道では両側より並列き電を行う場合が多い。しかしこの場合も、後出式(3.38)に算かれるように電磁誘起電力は高調波電圧に比例する。このことは整流器が直流側回路に與してほぼ定電圧電源となつていることに原因する。

表3.2 電磁結合係数 k_{emo}

き電側条件	k_{emo}
図3.2 ①	0.173
” ②	0.173
” ③	0.296
” ③'	0.331
” ④	0.313
” ④'	0.397

ただし $k_{emo} = \frac{\text{距離} 10m \text{ における}}{\text{結合係数}}$

3.1.3 負き電線を有する場合



電車線① およびレール②の外にレールに接続された、負き電線③のある場合、これらに流れる電流によつて④に誘起される電磁誘起電力を E とすると

$$\left. \begin{aligned} E &= Z_{1q} I_1 + Z_{2q} I_2 + Z_{3q} I_3 \\ 0 &= Z_{12} I_1 + Z_{22} I_2 + Z_{23} I_3 \\ 0 &= Z_{13} I_1 + Z_{23} I_2 + Z_{33} I_3 \end{aligned} \right\}$$

ただし、き電区向の中間部分を考え、レールの減衰電流は非常に小さく、且つレールおよび負き電線はバラスト道床を通して全線アースされ、その各点電位は0と仮定する。これを解くと、

$$E = (Z_{1q} - n Z_{2q} - m Z_{3q}) I_1 \quad (3.13)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし} \quad n &= -\frac{I_2}{I_1} = \frac{Z_{12} Z_{33} - Z_{13} Z_{23}}{Z_{22} Z_{33} - Z_{23}^2} \\ m &= -\frac{I_3}{I_1} = \frac{Z_{13} Z_{22} - Z_{12} Z_{23}}{Z_{22} Z_{33} - Z_{23}^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

もし、被誘導線④が遠方にある、 $Z_{1q} \simeq Z_{2q} \simeq Z_{3q}$ ならば

$$E = (1 - n - m) Z_{1q} I_1 \quad (3.15)$$

またもし、 $Z_{13} \simeq Z_{23}$ (例えば③が①および②より遠く離れる場合) ならば

$$E \simeq k_1 k_2 Z_{1q} I_1 \quad (3.16)$$

ただし $k_1 =$ レール②の軽減係数

$k_2 =$ 接地線又は負き電線の軽減係数

$$= 1 - \frac{Z_{13}}{Z_{33}} \quad (3.17)$$

負き電線電流の影響を見るため $m = 1 \sim 0$ に変化し得ると想定してその間地表上集体に対する電磁誘導起電力の変化を式(2.42)の計算によって求めると図3.4の通りとなる。

このようにして負き電線の附加によって、さらにその電流を調節することによって電磁誘導電圧を非常に小さくすることが可能である。この役目を果たすべく設けられたものが5章に述べる吸上変圧器である。なお吸上変圧器を用いず負き電線のみの場合、 m の値は $\sigma = 0.1$ のとき 0.293、 $\sigma = 0.001$ のとき 0.395 となるので、負き電線のない場合に比較して、図3.4より電磁誘導電圧は $\frac{1}{1.5} \sim \frac{1}{1.7}$ に減少する。

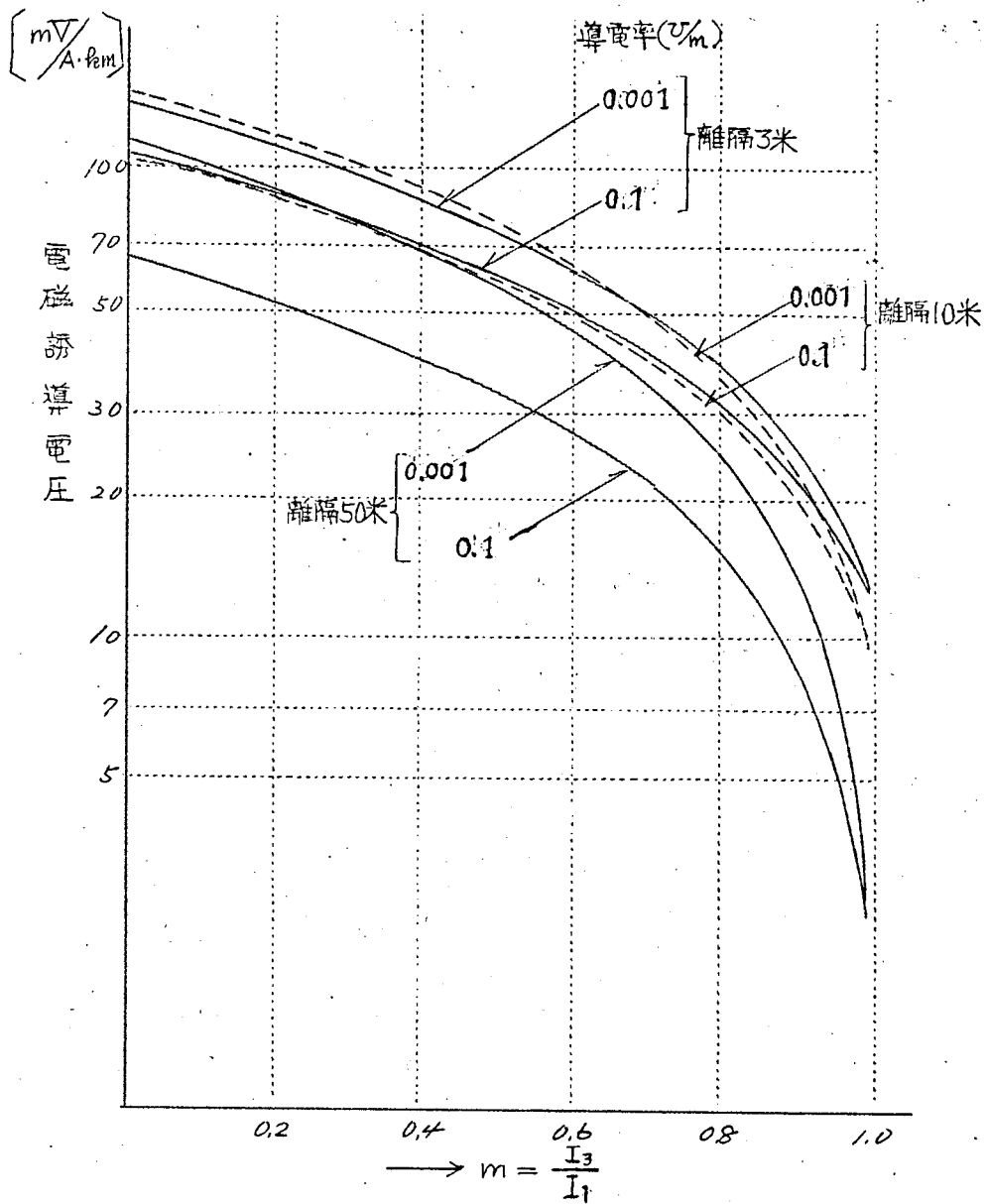


図3.4 負き電線電流と電磁誘導電圧
(地表上導体への誘導)

3.2 電気鉄道における静電誘導作用

静電誘導電圧は一般にき電圧 V_p に比例する。比例常数を k_s とおくと、

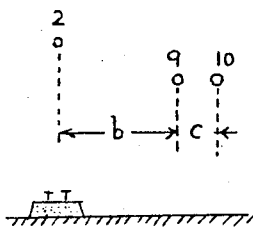
$$\text{静電誘導電圧 } V_s = k_s V_p \quad (3.18)$$

k_s = 静電結合係数

k_s の値は強弱両線路の配置, 線路条数などにより定まる。

いま最も基本的なものとして両者が大地上に平行している場合についてき電側の代表的線路配置図 3.2 に対する k_s の値を求める。(附録 5)

(1) 電車線一本の場合



②を電車線, ⑨⑩を通信線とする。

$$k_s = \frac{P_{29}}{P_{22}} \quad (3.19)$$

$$k'_s = \frac{P_{29} - P_{20}}{P_{22}} \quad (3.20)$$

但し k_s = 線条 9 と大地間の誘導電圧について、

k'_s = 線条 9, 10 間の誘導電圧について、

$$P_{29} = \text{線条 } 2, 9 \text{ 間の電位係数} = \log \frac{b^2 + (h_2 + h_9)^2}{b^2 + (h_2 - h_9)^2}$$

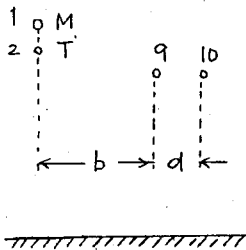
$$P_{22} = \text{線条 } 2 \text{ の自己電位係数} = 2 \log \frac{2h_2}{r_2}$$

h_2, h_3 = 各線条の地上からの高さ

r_2 = 線条 2 の半径

b = 強弱両線間の平行間隔。

(2) 吊架線と電車線よりなる場合

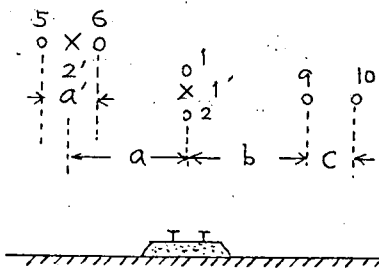


吊架線を①, 電車線を②, 通信線を⑨及び⑩とする。

$$k_s = P_{19} \frac{P_{22} - P_{12}}{P_{11}P_{22} - P_{12}^2} + P_{29} \frac{P_{11} - P_{12}}{P_{11}P_{22} - P_{12}^2} \quad (3.21)$$

$$k'_s = (P_{19} - P_{10}) \frac{P_{22} - P_{12}}{P_{11}P_{22} - P_{12}^2} + (P_{29} - P_{20}) \frac{P_{11} - P_{12}}{P_{11}P_{22} - P_{12}^2} \quad (3.22)$$

(3) き電線と吊架線と電車線よりなる場合



吊架線と電車線1,2の等価導体を1', き電線5,6(二条)の等価導体を2'とすると、

$$1' \text{の半径} = \sqrt{(h_1 - h_2) \sqrt{r_1 r_2}}$$

$$1' \text{の高さ} = \frac{1}{2} (h_1 + h_2)$$

$$2' \text{の半径} = \sqrt{a r_5}$$

$$2' \text{の高さ} = h_5$$

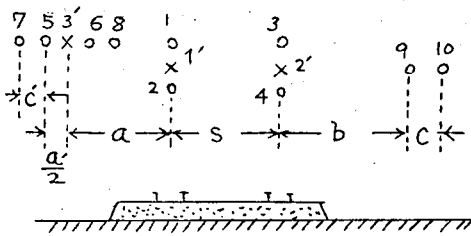
となり、

$$k_s = P'_{19} \frac{P'_{22} - P'_{12}}{P'_{11} P'_{22} - P'^2_{12}} + P'_{29} \frac{P'_{11} - P'_{12}}{P'_{11} P'_{22} - P'^2_{12}} \quad (3.23)$$

$$k'_s = (P'_{19} - P'_{10}) \frac{P'_{22} - P'_{12}}{P'_{11} P'_{22} - P'^2_{12}} + (P'_{29} - P'_{20}) \frac{P'_{11} - P'_{12}}{P'_{11} P'_{22} - P'^2_{12}} \quad (3.24)$$

ただし、 P'_{19} ---- は等価導体1'と9の間の電位係数
 P'_{11} ---- は等価導体1'の自己電位係数

(4) 複線の場合



- ①, ② は電車線の等価導体
- ③ はき電線の等価導体
- ⑨ ⑩ は通信線とする。

$$k_s = \frac{P'_{19}}{P'_{11}} + \frac{P'_{29}}{P'_{22}} + \frac{P'_{39}}{P'_{33}} \quad (3.25)$$

$$k'_s = \frac{P'_{19} - P'_{110}}{P'_{11}} + \frac{P'_{29} - P'_{210}}{P'_{22}} + \frac{P'_{39} - P'_{310}}{P'_{33}} \quad (3.26)$$

ただし $\Delta = P_{11}(P_{22}P_{33} - P_{23}^2) - P_{12}(P_{12}P_{33} - P_{13}P_{23}) + P_{13}(P_{12}P_{23} - P_{13}P_{22})$

$$\Delta_1 = (P_{22}P_{33} - P_{23}^2) - (P_{12}P_{33} - P_{13}P_{23}) + (P_{12}P_{23} - P_{13}P_{22})$$

$$\Delta_2 = -(P_{12}P_{33} - P_{13}P_{23}) + (P_{11}P_{33} - P_{13}^2) - (P_{11}P_{23} - P_{12}P_{13})$$

$$\Delta_3 = (P_{12}P_{23} - P_{13}P_{22}) - (P_{11}P_{23} - P_{12}P_{13}) + (P_{11}P_{22} - P_{12}^2)$$

P_{11}, P_{22}, P_{33} = 各等価導体の自己電位係数

P_{rs} etc = 導体rと導体sとの相互電位係数

$$P'_{11} = \frac{\Delta}{\Delta_1}, P'_{22} = \frac{\Delta}{\Delta_2}, P'_{33} = \frac{\Delta}{\Delta_3}$$

(一) 数値計算例

電車線 110mm^2 ($r_2 = 6.15\text{mm}$), 吊架線 90mm^2 ($r_1 = 6.0\text{mm}$) および
 き電線 500mm^2 Al ($r_5 = 14.5\text{mm}$) の場合について計算の結果を示す。ただし

$$L_1 = a = 2.5\text{m}, a' = 1.0\text{m}, S = 3.6\text{m}, C = 0.3\text{m}, C' = 0.5\text{m},$$

$$h_1 = h_3 = h_9 = 6.0\text{m}, h_2 = 5.6\text{m}, h_5 = h_6 = h_7 = h_8 = 7.0\text{m} \text{ とす。}$$

$$k_s = 0.1533 d_{29} \quad \text{①の場合} \quad (3.27)$$

$$k_s = 0.1042 d_{19} + 0.1066 d_{29} \quad \text{②の場合} \quad (3.28)$$

$$k_s = 0.1607 d'_{19} + 0.1769 d'_{29} \quad \text{③の場合} \quad (3.29)$$

$$k_s = 0.1510 d'_{19} + 0.2317 d'_{29} + 0.1115 d'_{39} \quad \text{④の場合} \quad (3.30)$$

ただし d_{19} , d'_{19} etc. は P_{19} , P'_{19} etc. における対数の底を 10 とした値で
 である。例えば

$$d_{29} = \log_{10} \frac{b^2 + (h_2 + h_9)^2}{b^2 + (h_2 - h_9)^2}$$

とする。又

$$k'_s = 0.1533 (d_{29} - d_{20}) \quad \text{①の場合} \quad (3.31)$$

e.t.c.

いま強弱両線路の向隔 b を種々に変えて上の諸式を計算し、これを $\log\text{-}\log$ 目盛
 上に曲線に現わすと図 3.5 および図 3.6 が得られる。図において横軸は向隔 b を
 とし縦軸は 10m における k_s 即ち k_{s0} を単位としてとっている。

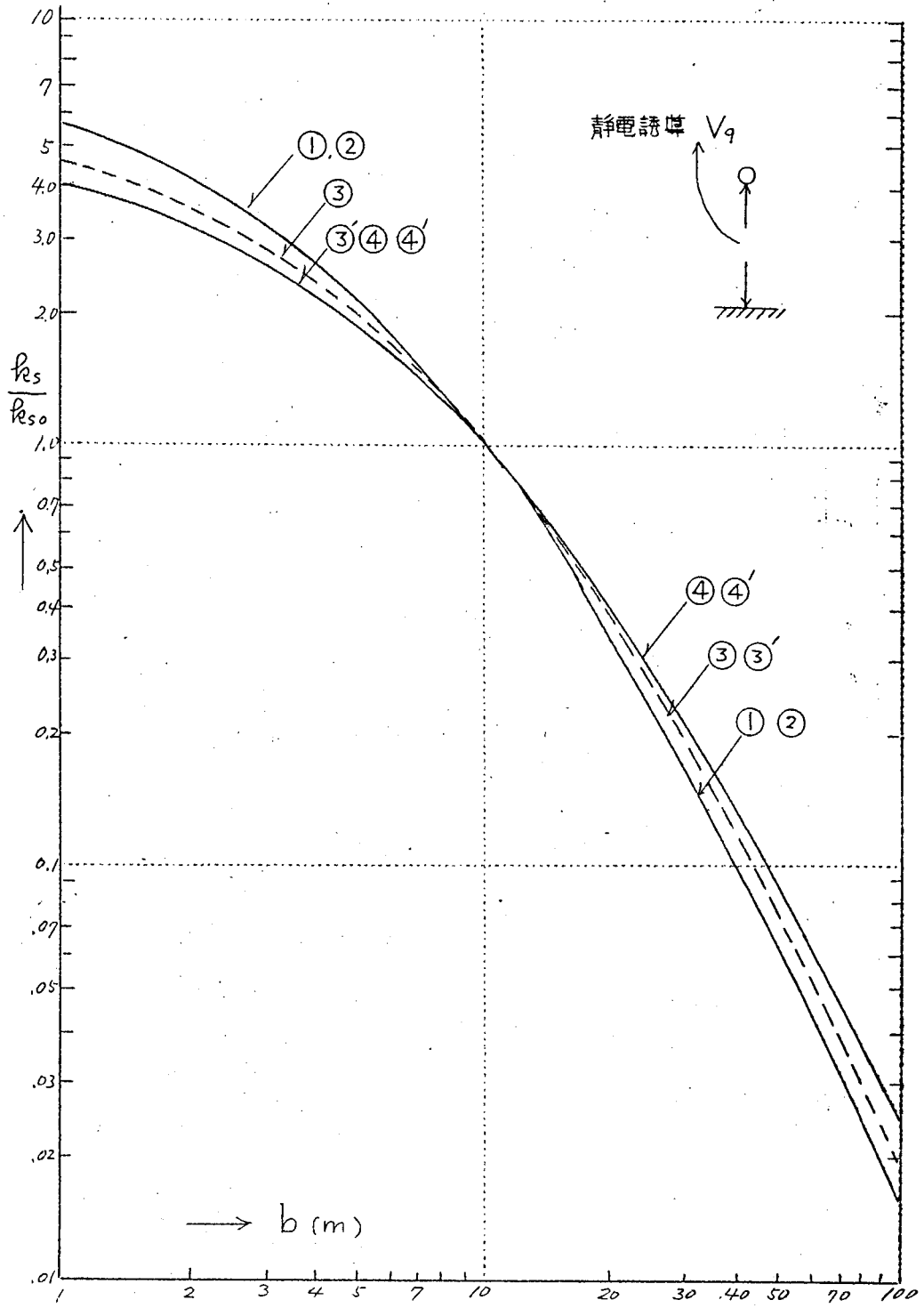


図3.5 電気鉄道と通信線との静電結合係数

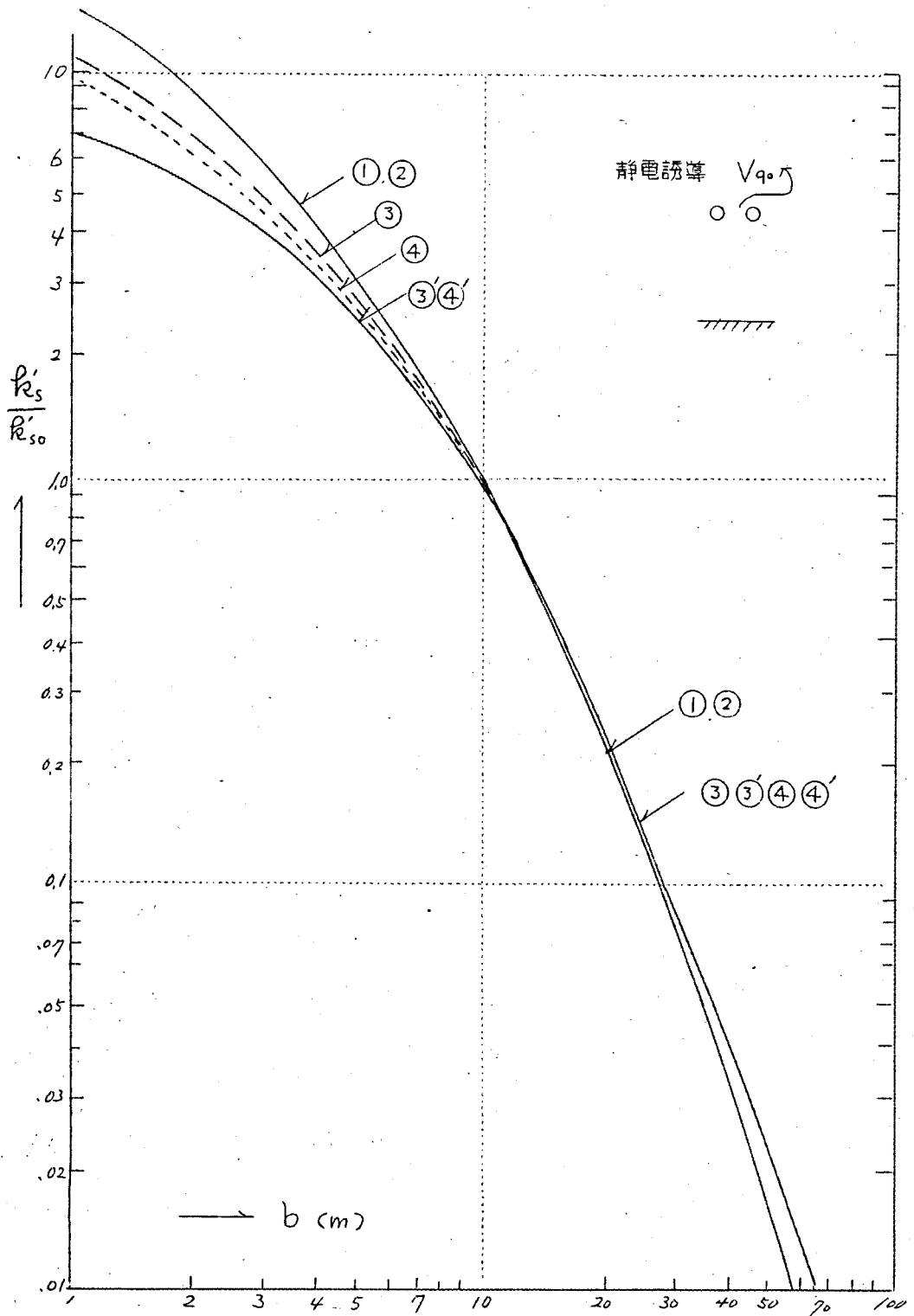


図 3.6 電気鉄道と通信線 2 条間の静電誘導

図において単位にとつた k_{so} の値を各場合について示すと表3.3の通りである。

表3.3 静電結合係数 k_{so} , k'_{so}

き電条件	k_{so}	k'_{so}
図3.2 ①	0.05665	0.002224
" ②	0.07975	0.003107
" ③	0.1166	0.004217
" ③'	0.112	0.00400
" ④	0.1321	0.004556
" ④'	0.138	0.00465

図2.19および図2.20の結果より $b = 10^m$ 以上では曲線は殆んど重なってくる。これはき電側を一本の等価導体で置きかえられることを示唆している。殊に①と②とでは $b = 1.0^m$ より両曲線は一致する。即ち②の場合は容易に等価導体に置きかえられ、これは既に③の場合の計算に応用された。

3.3 静電誘導電圧と電磁誘導電圧の重ねの理論

3.3.1 被誘導線が短い場合

被誘導線の長さが比較的短い場合は誘導電圧の計算に対し被誘導線を集中帯数に置きかえて簡単にすることができる。次にき電側の条件をいろいろ変えた場合の計算式を求めぬ。

(1) 片送りき電

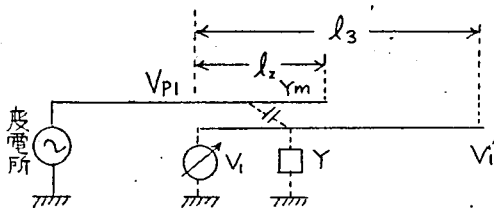


図3.7 片送りき電 (負荷なし)

(1.1) 無負荷

送電所より片送りき電を行い、通信線の一部分 l_2 がこのき電区間に平行しているものとする。 l_2 の区間において負荷はなく、その長さも短いものでき電側に電流はないものと見られる。それ故、この場合は静電

誘導だけを計算すればよい。この結果通信線に現われる誘導電圧を V_i とすると静電誘導の公式を利用し、次のようになる。

$$V_i = \frac{Y_m l_2}{Y_m l_2 + Y l_3} V_{p1} \quad (3.32)$$

ただし $Y_m =$ 両線間相互アドミッタンス $\frac{V}{kV}$
 $Y =$ 通信線の対地アドミッタンス $\frac{V}{kV}$
 $V_{p1} =$ き電側の妨害電圧

長さ l_3 は比較的短いので

$$V_i \doteq V_i$$

(1.2) 負荷 L_r のある場合

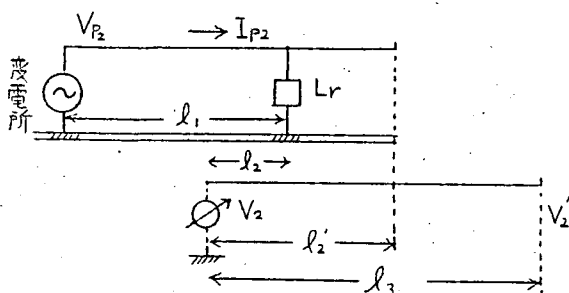


図3.8 片送りき電 (負荷 L_r)

片送りき電を行い、その途中で負荷 L_r がある場合、変電所より負荷までの区間 l_1 には、妨害電圧 V_{p2} に基づき妨害電圧 I_{p2} が流れる。従つてこの電流による電磁誘導電圧が新しく追加される。この場合の電磁誘導起電力は、

$$V_m = j\omega M l_2 I_{p2} = \frac{k_1 M l_2}{L l_1 + L_r} V_{p2}$$

ただし電車線回路のインピーダンスとしては、抵抗分を無視し $j\omega L l_1$ と置いた。 $M l_2$ は区間 l_2 間の相互誘導係数で、 k_1 は軌条の軽減係数である。この誘起電力は線路長 l_3 が短いので両端においてほぼ二分されて現われ左端が $+\frac{1}{2}$ 、右端が $-\frac{1}{2}$ の電圧となる。それ故全誘導電圧は

$$V_2 \text{ 又は } V_2' = \frac{Y_m l_2'}{Y l_3 + Y_m l_2} V_{p2}' \quad (\text{Static 分}) \\ + \frac{1}{2} \frac{k_1 M l_2}{L l_1 + L_r} V_{p2} \quad (\text{magnetic 分}) \quad (3.33)$$

ただし \pm 符号は V_2 に対し $+$ 、 V_2' に対し $-$ をとる。 V_{p2}' は l_2' 区間におけるき電側妨害電圧の平均値をとる。

(2) 突合せき電の場合

一き電区間に対し、両端に変電所がありそれ等から並列に同時き電されている場合

を取扱う。

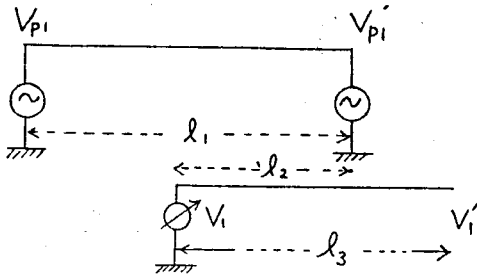


図3.9 突合せき電 (負荷なし)

(2.1) 無負荷

き電区間の中間に負荷はなく、両端の変電所から送出される妨害電圧をそれぞれ V_{P1} , V_{P1}' とする。この場合の計算は重ねの理論を応用して求めることができる。従って強弱両線の平行する区間を l_2 とすれば被誘導線の両端の電圧 V_i , V_i' は、

$$V_i \text{ 又は } V_i' = \frac{Y_m l_2}{Y l_3 + Y_m l_2} \cdot \frac{1}{2} (V_{P1} + V_{P1}') \quad (\text{Static分})$$

$$\pm \frac{\rho_{e1} M l_2}{2 L l_1} (V_{P1} - V_{P1}') \quad (\text{magnetic分}) \quad (3.34)$$

ただし複号は V_i に対し+, V_i' に対し-をとる。

この場合無負荷ではあるが静電誘導分と電磁誘導分が現われる。 V_{P1} と V_{P1}' とが全く同位相とすれば電磁誘導分が0となる。一般に若干の位相差があるとすれば電磁誘導分が残るが、これは静電分に比較して小さい。なお静電分と電磁分とのベクトル関係は、 V_{P1} と V_{P1}' の大きさがほぼ等しいものとすれば、式(3.34)よりほぼ直交の位相差を持つことが分る。それ故 V_i , V_i' の絶対値は等しく次のようになる。

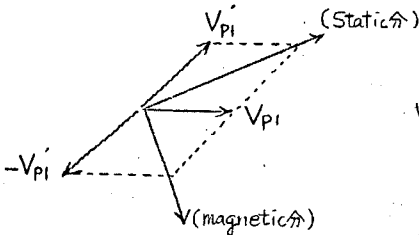


図3.10 誘導電圧のベクトル図

$$V_i = V_i' = \sqrt{(\text{Static分})^2 + (\text{magnetic分})^2} \quad (3.35)$$

ただし近似的にはこの場合は電磁誘導分は小さいのでこれを省略し式(3.32)と同じになる。

(2.2) 負荷 L_r のある場合

き電区間の中間に負荷 L_r のある場合、一例として全区間平行する被誘導線の両端に現われる誘導電圧を求める。両変電所より送出される妨害電圧を V_{P2} , V_{P2}' とし、計算にはやはり重ねの理論を応用するのが便利である。

先ず V_{P2} による誘導を求める。これによる l_1 区間の電流を I_{P2} , 負荷へ流れぬ電流

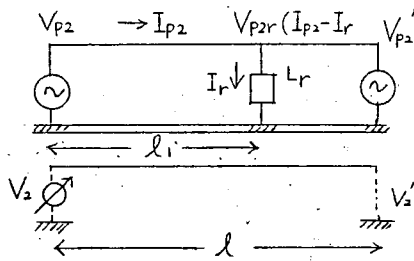


図3.11 突合せき電 (負荷 L_r)

を I_r 、右方変電所側へ流れ込む電流を $(I_{p2} - I_r)$ とする。負荷点の電車線電圧を V_{p2r} とする。これらの関係は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} I_{p2} &= \frac{V_{p2}}{j\omega L l_1} \cdot \frac{L_r + L(l-l_1)}{L(l-l_1) + L_r \frac{l}{l_1}} \\ I_r &= \frac{V_{p2}}{j\omega L l_1} \cdot \frac{L(l-l_1)}{L(l-l_1) + L_r \frac{l}{l_1}} \\ V_{p2r} &= V_{p2} \frac{L_r}{L l_1} \cdot \frac{L(l-l_1)}{L(l-l_1) + L_r \frac{l}{l_1}} \end{aligned} \right\} (3.36)$$

そこで先ず静電誘導電圧を求めると、

$$l_1 \text{ 区間の静電誘導} = V_{s1} = \frac{Y_m}{Y_m + Y} \cdot \frac{1}{2} (V_{p2} + V_{p2r})$$

$$(l-l_1) \text{ 区間の静電誘導} = V_{s2} = \frac{Y_m}{Y_m + Y} \cdot \frac{1}{2} V_{p2r}$$

ただし相互アドミタンス Y_m および被誘導線の対地アドミタンス Y は全線一様とする。

被誘導線上には上記の平均電圧が現われるので

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{V_{s1} l_1 + V_{s2} (l-l_1)}{l} \\ &= \frac{Y_m}{Y_m + Y} \cdot \frac{V_{p2} l_1 + V_{p2r} l}{2l} \end{aligned} \quad (3.37)$$

次に電磁誘導電圧を計算すると、

$$\begin{aligned} V_m &= j\omega M l_1 I_{p2} + j\omega M (l-l_1) (I_{p2} - I_r) \\ &= j\omega M \{ I_{p2} l - I_r (l-l_1) \} \end{aligned}$$

ただし相互誘導係数 M は全線一様とする。

これに式 (3.36) を代入し、さらに軌条の軽減係数 k_1 を考えて

$$V_m = k_1 \frac{M}{L} V_{p2} \equiv k_{em} V_{p2} \quad (3.38)$$

この結果は電磁誘導電圧は負荷 L_r の大きさ、その位置に無関係な極めて簡単な公

式が得られた。ただし実際は V_{p2} が L_r の大きさおよびその位置によって変るので V_m も V_{p2} に比例して負荷 L_r の影響をうけるわけである。

以上は左端の変電所より出る妨害電圧 V_{p2} に起因する静電誘導および電磁誘導であるが、右端の変電所より出る妨害電圧 V'_{p2} によっても全く同様のものが現われる筈である。従ってこれらを総合して被誘導線の左端および右端の電圧 V_2 および V'_2 は次の通りになる。

$$\left. \begin{aligned} V_2 \text{ 又は } V'_2 &= \frac{1}{2} k_{e5} \cdot (V_{p2} k_{e2} + V'_{p2} k'_{e2}) \quad (\text{static分}) \\ &\pm \frac{1}{2} k_{em} (V_{p2} - V'_{p2}) \quad (\text{magnetic分}) \end{aligned} \right\} (3.39)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし} \quad k_{e2} &= \frac{l_1}{l} + \frac{L_r}{l_1 L + \frac{l}{l_1} L_r} \\ k'_{e2} &= \frac{l-l_1}{l} + \frac{L_r}{(l-l_1)L + \frac{l}{l_1} L_r} \end{aligned} \right\} (3.40)$$

複号は V_2 に対して +, V'_2 に対して - をとる。

ここで k_{e2} および k'_{e2} は負荷 L_r の大きさおよびその位置 l_1 によって異なるが通常の負荷配置によりこれを求めると、1.0 ~ 0.8 の値をとるので近似的には $k_{e2} = k'_{e2} = 1.0$ として計算することができる。又電磁誘導分は V_{p2} と V'_{p2} が同位相であれば 0 となる。一般的には式 (3.35) で述べたと同様に V_2 および V'_2 の絶対値は式 (3.39) の (static分)² + (magnetic分)² の平方根で求められる。

3.3.2 被誘導線が長い場合

誘導区間の長さが電圧、電流の波長の数分の1以上に長い場合は、この区間内で起誘導線側の電圧、電流も被誘導線側の電圧、電流も、両線を分布常数回路として解析する必要がある。今図3.12の場合について解いてみる。簡単のため区間内において各分布常数は一樣であるとする。起誘導線側の電圧、電流を v, i' とし被誘導線側について v, i とするとこれらの間には次の微分方程式が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} -pv &= Zi + Zmi' \\ -pi &= (Y + Y_m)v - Y_m v' \\ -pv' &= Z'i' + Zm i \\ -pi' &= (Y' + Y_m)v' - Y_m v \end{aligned} \right\} (3.41)$$

たゞし $Z, Y =$ 被誘導線の自己インピーダンスおよび自己アドミッタ
ンス。

$Z', Y' =$ 起誘導線の自己インピーダンスおよび自己アドミッタ
ンス。

$Z_m, Y_m =$ 両線間の相互インピーダンスおよび相互アドミッタ
ンス。

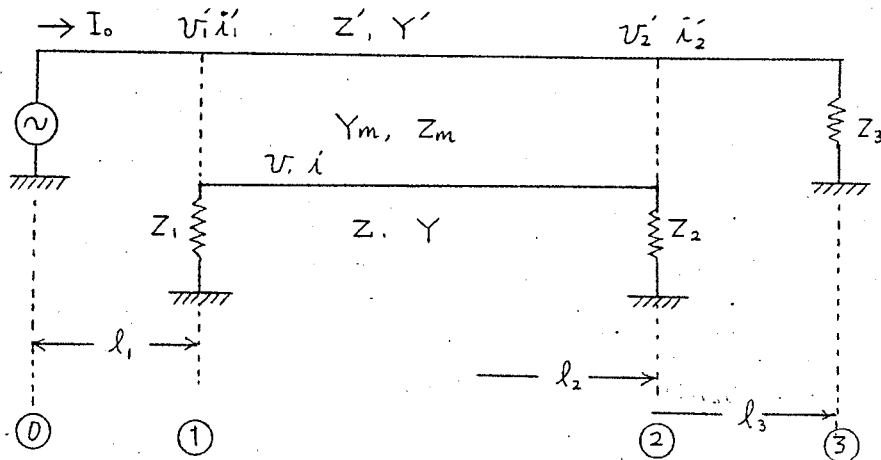


図3.12 長い平行二線条間の誘導配置

さて式(3.41)を解くと複雑になるので、今被誘導線から起誘導線への誘導を無視し、式の中オ3式の $Z_m i$ およびオ4式の $Y_m (v' - v)$ の項を夫々 $Z' i'$ および $Y v'$ に比較して省略すると、先ず起誘導側についての電圧、電流 v', i' が次のように決定される。

$$\left. \begin{aligned} v' &= A' \sinh \gamma' x + B' \cosh \gamma' x \\ i' &= -\frac{1}{Z_0'} (B' \sinh \gamma' x + A' \cosh \gamma' x) \end{aligned} \right\} \quad (3.42)$$

たゞし $\gamma' = \sqrt{Z' Y'}$, $Z_0' = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}}$

式(3.42)を用いてさらに v および i について式(3.4.1)を解くと、

$$\left. \begin{aligned} v &= A \sinh \gamma x + B \cosh \gamma x - f v' \\ i &= -\frac{1}{Z_0} (B \sinh \gamma x + A \cosh \gamma x) - g i' \end{aligned} \right\} \quad (3.43)$$

たゞし $\gamma = \sqrt{Z(Y + Y_m)}$, $Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y + Y_m}}$

$$\left. \begin{aligned} g &= \frac{Z_m(Y+Y_m) - Y_m Z'}{Z(Y+Y_m) - Y'Z'} \\ f &= \frac{Z_m Y' - Y_m Z}{Z(Y+Y_m) - Y'Z'} \end{aligned} \right\} \quad (3.44)$$

こゝで A, B, A', B' は夫々両線条の両端条件によつて決定される常数である。

(1) 図 3.12 のように送端電流 I_0 が与えられ、その先端に負荷 Z_3 が接続されている場合、

この場合は式 (3.42) において送電端の条件を入れ A', B' の定数を v', i' を決定すると、

$$\left. \begin{aligned} v' &= -I_0 Z_0' \sinh \gamma' x + I_0 Z_3' \cosh \gamma' x \\ i' &= I_0 \cosh \gamma' x - I_0 \frac{Z_3'}{Z_0'} \sinh \gamma' x \end{aligned} \right\} \quad (3.45)$$

$$\text{たゞし } Z_3' = \frac{Z_0' \sinh \gamma' l_3 + Z_3 \cosh \gamma' l_3}{Z_0' \cosh \gamma' l_3 + Z_3 \sinh \gamma' l_3} Z_0' \quad (3.46)$$

このとき送端の電圧を V_0 とすると、

$$V_0 = I_0 Z_3' \quad (3.47)$$

次に被誘導線の両端 1 及び 2 における条件を式 (3.43) に代入して A 及び B を決定すると、

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{-(fv_1' + gZ_1 i_1')(\cosh \gamma l_2 + \frac{Z_2}{Z_0'} \sinh \gamma l_2) + (fv_2' - gZ_2 i_2')(\cosh \gamma l_1 - \frac{Z_1}{Z_0'} \sinh \gamma l_1)}{\Delta} \\ B &= \frac{+(fv_1' + gZ_1 i_1')(\sinh \gamma l_2 + \frac{Z_2}{Z_0'} \cosh \gamma l_2) - (fv_2' - gZ_2 i_2')(\sinh \gamma l_1 - \frac{Z_1}{Z_0'} \cosh \gamma l_1)}{\Delta} \end{aligned} \right\} \quad (3.48)$$

$$\text{たゞし } \Delta = \left(1 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_0^2} \sinh \gamma l\right) + \frac{Z_1 + Z_2}{Z_0} \cosh \gamma l$$

$$l = l_2 - l_1$$

こゝに v_1', i_1' 及び v_2', i_2' は 1 及び 2 の点における起誘導線上の電圧、電流にして、式 (3.45) より求められる。

$$\left. \begin{aligned} V_1' &= V_0 \cosh \gamma l_1 - I_0 Z_0' \sinh \gamma l_1 \\ i_1' &= I_0 \cosh \gamma l_1 - \frac{V_0}{Z_0'} \sinh \gamma l_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.49)$$

$V_2', i_2' = V_1', i_1'$ において $l_1 \rightarrow l_2$ とす。

次に式 (3.45) と (3.48) とより被誘導線上の電圧 V_1, V_2 を求めると。

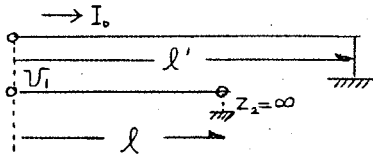
$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{\Delta} (f v_1' + g Z_1 i_1') (\sinh \gamma l + \frac{Z_2}{Z_0'} \cosh \gamma l) + \frac{Z_1}{Z_0' \Delta} (f v_2' - g Z_2 i_2') - f v_1' \\ V_2 &= \frac{1}{\Delta} (f v_2' - g Z_2 i_2') (\sinh \gamma l + \frac{Z_1}{Z_0'} \cosh \gamma l) + \frac{Z_2}{Z_0' \Delta} (f v_1' + g Z_1 i_1') - f v_2' \end{aligned} \right\} \quad (3.50)$$

$$\left. \begin{aligned} g &= \frac{Z_m}{Z_a} - \frac{Y_m}{Y_b} \\ f &= \frac{Z_m}{Z_b} - \frac{Y_m}{Y_a} \end{aligned} \right\} \text{但し} \quad \left. \begin{aligned} Z_a &= \frac{Y}{\delta} & Z_b &= \frac{Y'}{\delta} \\ Y_a &= \frac{Z}{\delta} & Y_b &= \frac{Z'}{\delta} \end{aligned} \right\} \quad (3.51)$$

$\delta = \gamma^2 - \gamma'^2 \quad \gamma = \sqrt{ZY}, \quad \gamma' = \sqrt{Z'Y'}$

次に屢々遭遇する特定の回路条件において V_1, V_2 の計算式を求めておく。

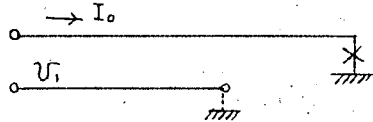
図 3.13



$$\frac{V_1}{I_0} = Z_m \frac{Z_0}{Z_a} \alpha_1 - Y_m \frac{Z_0}{Y_b} \alpha_1 \quad (3.52)$$

$$\alpha_1 = \frac{\cosh \gamma l - \cosh \gamma' l + \sinh \gamma' l \tanh \gamma l'}{\sinh \gamma l}$$

図 3.14



$$\frac{V_1}{I_0} = Z_m \frac{Z_0}{Z_a} \alpha_2 - Y_m \frac{Z_0}{Y_b} \alpha_2 \quad (3.53)$$

$$\alpha_2 = \frac{\cosh \gamma l - \cosh \gamma' l + \sinh \gamma' l \coth \gamma l'}{\sinh \gamma l}$$

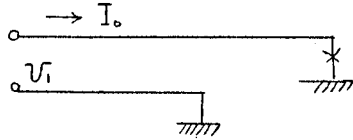
図 3.15



$$\frac{V_1}{I_0} = Z_m \left(\frac{Z_0}{Z_a} \tanh \gamma l + \frac{Z_0'}{Z_b} \beta_1 \right) - Y_m \left(\frac{Z_0}{Y_b} \tanh \gamma l + \frac{Z_0'}{Y_a} \beta_1 \right) \quad (3.54)$$

$$\beta_1 = \frac{\tanh \gamma' l' \cosh \gamma l - \sinh \gamma l}{\cosh \gamma l}$$

図3.16



$$\frac{U_1}{I_0} = Z_m \left(\frac{Z_0}{Z_a} \tanh \gamma l + \frac{Z_0'}{Z_b} \beta_2 \right) - Y_m \left(\frac{Z_0}{Y_b} \tanh \gamma l + \frac{Z_0'}{Y_a} \beta_2 \right) \quad (3.55)$$

$$\beta_2 = \frac{\coth \gamma l' \cosh \gamma l - \sinh \gamma l}{\cosh \gamma l}$$

3.4 雑音電圧の計算

前節に述べた方法により通信線路に生ずる誘導電圧を計算することができる。しかしさらに進んで雑音電圧を計算しようとするには、多くの周波数の重畳となるため簡単ではなくなる。略算法として各周波数毎に雑音電圧を計算しそれぞれの2乗総和の平方根をとる方法が用いられる。即ち式(3.56)である。

$$\text{雑音電圧} = \frac{1}{S_{800}} \sqrt{\sum (S_f V_f)^2} \quad (3.56)$$

$$\text{ただし} \begin{cases} S_{800} = 800\% \text{ に対する雑音評価係数} \\ S_f = \text{周波数 } f \text{ に対する雑音評価係数 (表1.6)} \\ V_f = \text{周波数 } f \text{ における誘導電圧} \end{cases}$$

ここで誘導電圧として通信線と対大地間電圧 L, E (前節までの計算式による) を採用し、実際の電話器端子間雑音電圧 L_1, L_2 との間に式(3.57)の関係を設定する。

$$(L_1, L_2 \text{ 雑音電圧} = B \times (L, E \text{ 雑音電圧}) \quad (3.57)$$

ただし $B = \text{通信線の雑音平衡度}$

平衡度 B に関しては4章で詳細に検討するが、要するにこの結果、平衡度 B を知ることができれば、前節までの計算式および式(3.56), 式(3.57) を利用して電話器端子間に発生する雑音電圧を推定することができる。

3.4.1 交流電気鉄道における雑音電圧計算式

通常機関車の整流器型式が使用されるので交流側電車線に多くの高調波電流が流れる。これらはあたかも定電流電源より送出されるが如く⁷⁾ 機関車の位置に関係なく、電車線路側インピーダンスに関係なく、基本波電流に対する高調波含有率はほぼ一定である。このような条件を考慮に入れて電磁誘導により生ずる雑音電圧の計算式を求

める。

この場合一般に V_f は次式 (3.58) の通りに表わすことができる。

$$V_f = \omega_n M_n I_n \ell k_n K_n \quad (3.58)$$

ただし $I_n =$ 機関車電流中に含まれる高調波電流
 $= p_n I_1$ $\left\{ \begin{array}{l} p_n = \text{高調波含有率} \\ I_1 = \text{機関車電流} \end{array} \right.$

$\omega_n =$ n 高調波に対する角周波数 $= 2\pi f_n$

$f_0 =$ 電源周波数 50 又は 60%

$M_n =$ n 高調波に対する相互インダクタンス

$k_n =$ n 高調波に対する軌道の軽減係数

$K_n =$ 接地物、ケーブル等の n 高調波に対する遮蔽係数

$\ell =$ 強弱両線間の平行部分の長さ。

従って電話器端子間に現われる雑音電圧を e とすると

$$e = \frac{A}{S_{800}} \sqrt{\sum_n (B_n S_n \omega_n M_n p_n k_n)^2} \quad (3.59)$$

ただし

$B_n =$ n 高調波に対する平衡度

$S_n =$ n 高調波に対する雑音評価係数

$k_n = k_2 =$ 基本波における軌道の軽減係数 (表 2.13 参照)

$A = k I_1 \ell =$ き電側のアンペア秒

さらに各定数の周波数特性を考慮に入れて、この式 (3.59) を簡単化しよう。

(i) $B_n \omega_n M_n K_n = \text{const.}$ の場合

$$e = \text{const.} \frac{A}{S_{800}} \sqrt{\sum_n (S_n p_n)^2} \quad (3.60)$$

(ii) $B_n M_n K_n = \text{const.}$ の場合

$$e = \text{const.} \frac{A}{S_{800}} \sqrt{\sum_n (S_n \omega_n p_n)^2} \quad (3.61)$$

(iii) $K_n = 1.0$ $M = \text{const.}$ 且つ $B_n = B_{800} \frac{f_n}{800}$ のとき

$$e = B_{800} M \frac{2\pi A}{800 S_{800}} \sqrt{\sum_n (f_n^2 S_n p_n)^2} \quad (3.62)$$

通信線が架空裸線の場合は速放するものもなく ($K_n = 1.0$)、また $B_n M_n = \text{const.}$ (周波数に無関係) と考えられる場合に式 (3.61) が成立し

$$e = BM \frac{A}{S_{800}} \sqrt{\sum_n (S_n \omega_n p_n)^2}$$

$$= 2\pi \times 800 \times B_{800} M_{800} \times \frac{A}{S_{800}} \times \sqrt{\sum_n \left(\frac{f_n}{800} S_n p_n\right)^2} \quad (3.63)$$

この結果は CCITT 指示書¹⁾ に示された計算式に一致する。しかし、これが成立するには $B_n M_n = \text{const.}$ の条件を必要とし、これはかなり遠方の架空裸線について成立しそうな条件である。例えば B の周波数特性はオ4章の実測例に見るように架空裸線の場合も、ケーブルの場合も $B \propto f$ の場合が多い。また相互インダクタンス M の周波数特性は図 3.17 に計算例が与えられているように、接近距離の近い場合は周波数に殆んど無関係であるが接近距離の遠い場合は次に f^{-1} に比例するようになる。従って $BM = \text{const.}$ ないし $BM \propto f$ と考えられる。従って $BM \propto f$ の性質に近い近距離接近の裸通信線では (iii) 式 (3.62) の場合が成立つ。故に、

$$e = \frac{2\pi}{800} B_{800} M_{800} \frac{A}{S_{800}} \sqrt{\sum_n (f_n^2 S_n p_n)^2} \quad (3.64)$$

$$\text{ただし } M_{800} \simeq M_{50}, \quad B_n = B_{800} \frac{f_n}{800}$$

$$= 2\pi f^2 B_{1000} M_{1000} \frac{A}{S_{800}} \sqrt{\sum_n (n S_n p_n)^2} \times 10^{-3} \quad (3.65)$$

通信線がケーブルの場合は、 $\omega_n K_n = \text{const.}$ と考えられる場合が多く、さらに $BM = \text{const.}$ のときは明らかに式 (3.60) が成立つので

$$e = 2\pi \times 800 \times K_{800} \times B_{800} M_{800} \frac{A}{S_{800}} \sqrt{\sum_n (S_n p_n)^2} \quad (3.66)$$

この結果は CCITT 指示書の計算式に一致する。しかし、前記同様 $B_n M_n = \text{const.}$ の条件を必要とするので近距離接近で $M_n \simeq \text{const.}$ (周波数に無関係) の場合は成立しない。このときはむしろ (ii) 式 (3.61) の場合となる。即ちケーブルでは、

$$B_n = B_{800} \frac{f_n}{800}, \quad K_n = K_{50} \frac{50}{f_n}$$

が成立するので $B_n K_n = B_{800} K_{50} \frac{50}{800}$ (f_n には無関係) となり $B_n K_n M_n = \text{const.}$ の条件が成立つ。

実線 $\sigma = 10^{-13}$ (const.)

点線 $\sigma = 0.466 \times f^{-0.23} \times 10^{-13}$

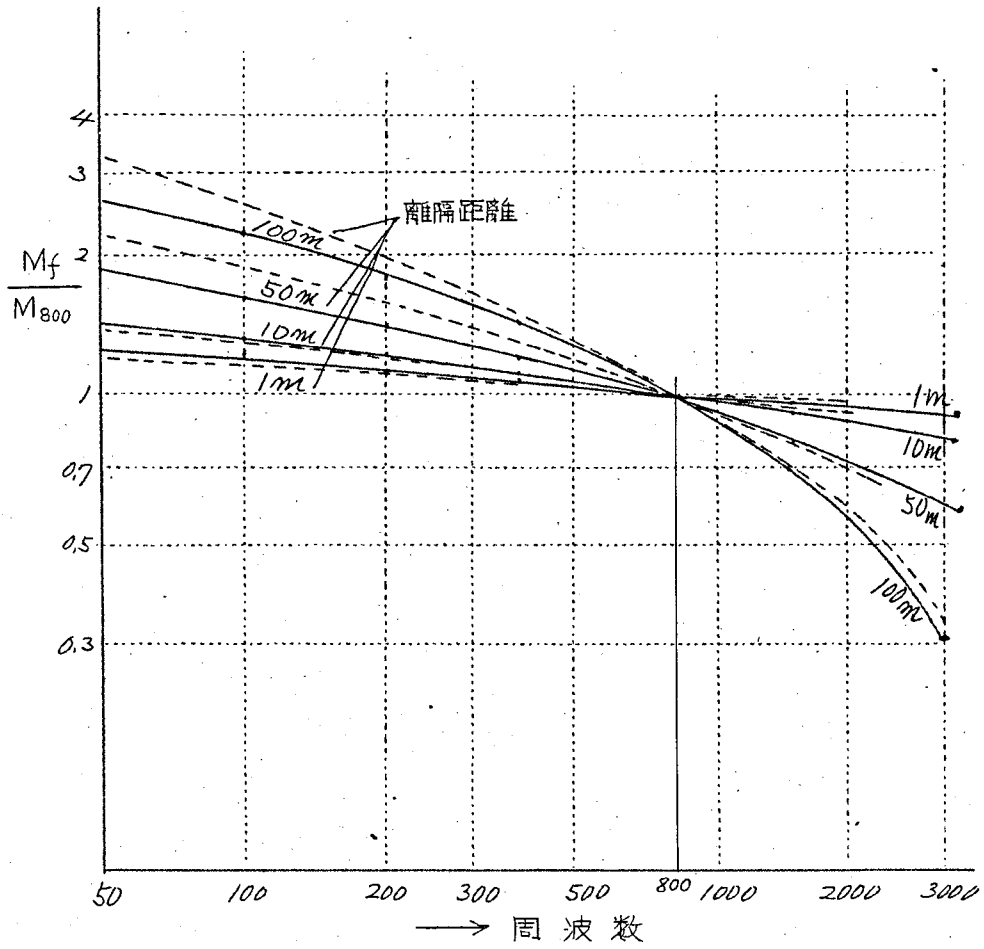


図3.17 相互インダクタンスの周波数特性.

$$\begin{aligned} \therefore e &= B_n K_n M_n \frac{1}{S_{800}} A \cdot \sqrt{\sum_n (S_n \omega_n p_n)^2} \\ &= B_{800} K_{50} M_{800} \frac{A}{S_{800}} \cdot \frac{100\pi}{800} \sqrt{\sum (S_n f_n p_n)^2} \quad (3.67) \end{aligned}$$

又は

$$= B_{1000} K_{50} M_{1000} \frac{A}{S_{800}} 100\pi f \sqrt{\sum (S_n n p_n)^2} \times 10^{-3} \quad (3.68)$$

以上の結果をまとめると次の通りとなる。

(1) 近距離接近の場合 (接近距離約 50m まで)

$$\left. \begin{aligned} \text{架空裸線に對し } T &= \frac{2\pi}{S_{800}} f^2 \sqrt{\sum (n^2 S_n p_n)^2} \times 10^{-3} \\ \text{ケーブルに對し } &= \frac{0.1}{S_{800}} \pi f \sqrt{\sum (n S_n p_n)^2} \\ \text{ただし } T &= \text{電話妨害率} \end{aligned} \right\} \quad (3.69)$$

とおくときは雑音電圧 e の計算は式 (3.70) のように簡単な表示となる。

$$e = B_{1000} K_{50} M_{1000} A \cdot T \quad (3.70)$$

T の値は高調波含有率 $1/n^2$ なる機関車に對して計算の結果表 3.4 の通りである。

表 3.4 T の概数値 (ただし $p_n = 1/n^2$)

	ケーブルに對し	裸線に對し
50 % 系	4.0	83
60 % 系	5.2	108

(2) 遠距離接近の場合 (接近距離約 50m 以上)

$$\left. \begin{aligned} \text{架空裸線に對し } J &= \frac{1}{S_{800}} \sqrt{\sum_n \left(\frac{f_n}{800} S_n p_n\right)^2} \\ \text{ケーブルに對し } J &= \frac{1}{S_{800}} \sqrt{\sum_n (S_n p_n)^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.71)$$

J = 等価妨害電流 (基本波電流 1 A 当り)

とおくときは雑音電圧 e の計算式 (3.72) の通り簡単な表示となる。

$$e = 5000 B_{800} M_{800} K_{800} J A \quad (3.72)$$

等価妨害電流 J の値を高調波含有率 $1/n^2$ なる場合について計算した結果を表 3.5 に示す。

表3.5 Jの概数値 (ただし $k_n = 1/n^2$)
基本波電流 100A 当り

	ケーブルに対し	裸線に対し
50%系	1.73 ^A	1.28 ^A
60%系	2.30 ^A	1.68 ^A

なお、近距離接近の場合に式(3.72)を使用したとすると、式(3.70)に比較して、ケーブルの場合、約35%^(大々)、裸線の場合約30%小さい値が計算される。

次に静電誘導による雑音電圧の発生は、交流電気鉄道の場合には問題になる機会はないのでこゝに記述することを省略する。

3.4.2 直流電気鉄道における雑音電圧

直流電気鉄道では(3.1.2)節に示されたように、静電誘導電圧も電磁誘導電圧も共に電車線側の高調波電圧に比例する、これは整流器が直流側回路高調波成分に關して定電圧電源と考えられることにより解析を行った結果である。即ちき電側直流電圧に含まれる高調波電圧 V_{pf} により誘導される電圧 V_f は、

$$V_f = k_s V_{pf} \quad \text{又は} \quad k_m V_{pf}$$

こゝで k_s 及び k_m は既に図表で与えられた通り静電結合係数及び電磁結合係数である。これを(3.56)および(3.57)に適用して雑音電圧 e を求めると、

$$\text{雑音電圧 } e = \frac{1}{S_{800}} \sqrt{\sum (S_f B_f \alpha K_n V_{pf})^2} \quad (3.73)$$

$$\text{ただし } \alpha = k_s \text{ 又は } k_m$$

その他の記号は前節と同じとする。

架空裸線の場合 $k_m = 0$ \therefore もし B_f および α が周波数に關係なく一定であれば式(3.73)は式(3.74)の通りとなる。

$$e = \alpha B_{800} V_e \quad (3.74)$$

$$\begin{aligned} \text{こゝに } V_e &= \frac{1}{S_{800}} \sqrt{\sum (S_f V_{pf})^2} \\ &= \text{等価妨害電圧。} \end{aligned} \quad (3.75)$$

式(3.75)はC.C.I.T.T指示書に示された式と一致する。しかしこの式の成立する

のは $B_f \alpha K_n = \text{const.}$ の場合である。

(i) 約 50m 以上離れて平行する裸通信線

この場合が 4 章に示されるように $B_f \propto f$ また $\alpha = k_m \propto \frac{1}{f}$, $K_n = 1.0$

$\therefore B_f \alpha = \text{const.}$ となり式 (3.75) が成立つ。

(ii) 約 50m 以下の範囲で平行するケーブル通信線

この場合は $\alpha \approx \text{const.}$, $B_f \propto f$, $K_n \propto \frac{1}{f}$, $\therefore B_f \alpha K_n = \text{const.}$

$$\therefore e = \alpha B_{800} K_n V_e \quad (3.76)$$

(iii) 50m 以下の範囲で平行する裸通信線

この場合は $\alpha = \text{const.}$, $K_n = 1.0$ 且つ $B_f = \frac{f}{800} B_{800}$ の条件に合う場合が多い。

$$\therefore e = \alpha B_{800} V_e' \quad (3.77)$$

ただし

$$V_e' = \frac{1}{800 S_{800}} \sqrt{\sum (S_f f V_{Pf})^2}$$

水銀整流器変電所について 平均妨害電圧 V_e 及び V_e' の数値例を表 3.6 に示す。

表 3.6 V_e 及び V_e' の概数値
(水銀整流器の場合)

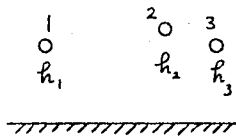
	V_e (V)	V_e' (V)
50%	48	55
系	53	76
60%	54	76
系	71	85

上位数値は変電所受電波形良好な場合、
下位数値は変電所受電波形最悪な場合。

3.5 第3線条の影響

一般に通信線路には多数線条が架設せられ、それらが異つた目的で異つた回路形式で利用されている。即ちあるものは接地され、あるものは遠方まで延びている等である。このため通信線相互の間で複雑な誘導作用を行い実際の誘導電圧は、単一線条としての簡単な計算結果とは非常に異ってくる。これは同一ルートを多くの線条が走っているということに原因する。これらの影響を一括し、多線条効果と呼ぶことにする。

3.5.1 静電誘導における多線条効果



①を起誘導線、②を被誘導線、③を第3導体とする。 V_1 は第3導体のある場合の誘導電圧、 V_2 は第3導体のない場合の誘導電圧とし、これらの比を入とおく、従つて入は第3導体の遮蔽係数と考えてよい。

この場合の各線条の電位を決める基本式は

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= P_{11} Q_1 + P_{12} Q_2 + P_{13} Q_3 \\ V_2 &= P_{12} Q_1 + P_{22} Q_2 + P_{23} Q_3 \\ V_3 &= P_{13} Q_1 + P_{23} Q_2 + P_{33} Q_3 \end{aligned} \right\} \quad (3.78)$$

ここで Q_1, Q_2, Q_3 は各導体上の電荷、 P_{11}, P_{12}, \dots は自己電位係数及び相互電位係数である。次に第3導体の各種の条件についてこの式を解き入を求めておこう。

(1) 第3導体が接地されている場合、

基本式において $V_3 = 0$ とおき第3式より Q_3 を求めこれを第1、第2式に代入すると、

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= P_{11} Q_1 + P_{12} Q_2 \\ V_2 &= P_{12} Q_1 + P_{22} Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.79)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし} \quad P_{11} &= P_{11} - \frac{P_{13}^2}{P_{33}} \\ P_{22} &= P_{22} - \frac{P_{23}^2}{P_{33}} \\ P_{12} &= P_{12} - \frac{P_{13} P_{23}}{P_{33}} \end{aligned} \right\} \quad (3.80)$$

また第3導体のない場合は

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= P_{11} Q_1 + P_{12} Q_2 \\ V_2 &= P_{12} Q_1 + P_{22} Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.81)$$

従つて

$$\lambda = \frac{V_2'}{V_2} = \frac{P_{11}}{P_{12}} \cdot \frac{P_{12}}{P_{11}}$$

$$\doteq 1 - \frac{P_{13}P_{23}}{P_{12}P_{33}} \quad (3.82)$$

(2) 誘導線区間外にあるオ3導体を接続する場合

この場合は例えば誘導区間にある裸線をケーブルに接続して3本とも様な場合、ケーブルがオ3導体に相当する。今被誘導線の長さを l 、区間外にあるオ3導体の長さを l_3 とし、夫々の線条の単位長当りの電荷を q_1, q_2, q_3 とすると基本式(3.78)より

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= P_{11}q_1l + P_{12}q_2l \\ V_2 &= P_{12}q_1l + P_{22}q_2l \\ V_3 &= P_{33}q_3l_3 \end{aligned} \right\} \quad (3.83)$$

V_2 と V_3 とを接続したときの電位を V_2' とすると

$$V_2 = V_3 = V_2'$$

次に被誘導線及びオ3導体は絶縁されているため

$$q_2l + q_3l_3 = 0$$

これらの条件を式(3.83)に代入して V_2' を求めると、

$$V_2' = \frac{P_{12}}{P_{11}} \lambda V_1$$

$$\text{よつて } \lambda = \frac{P_{33}}{P_{33} + (P_{22} - \frac{P_{12}^2}{P_{11}}) \frac{l_3}{l}} \quad (3.84)$$

(3) 被誘導線が区間外に延長されている場合

被誘導線の中、電力線と平行する部分の長さを l 、区間外の長さを l_3 とすると、式(3.84)において $P_{33} = P_{22}$ とおくことにより、この場合の λ を求めることができる。即ち

$$\lambda = \frac{l}{l + (1 - \frac{P_{12}^2}{P_{11}P_{22}})l_3} \doteq \frac{l}{l + l_3} \quad (3.85)$$

(4) オ3導体が区間外に延長されている場合、

オ3導体が絶縁されている場合は通常 $\lambda = 1.0$ で被誘導線への影響はないが、これが誘導区間外に延びている場合は、あるインピーダンスを以て接地されたと同様の効

果を持ち、従つて被誘導線へ影響を及ぼすに至る。

いまオ4導体の中、誘導区間外の部分をオ4導体とみなし、その長さを l_3 とする。 $V_4 = P_{44} q_4 l_3$ 且つ $V_3 = V_4 = V_3'$ となり、これらが絶縁されているため、 $q_3 l + q_4 l_3 = 0$ とおくことができる。このような条件を基本式に入れて V_2 を求めると、

$$\lambda = \frac{V_2'}{V_2} = 1 - \frac{P_{13} P_{23}}{P_{12} P_{33}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{P_{44}}{P_{33}} \frac{l}{l_3}} \quad (3.86)$$

こゝでオ4導体とオ3導体とが同じものとする、 $P_{33} = P_{44}$ となる故

$$\lambda = 1 - \frac{P_{13} P_{23}}{P_{12} P_{33}} \cdot \frac{l}{l_3 + l} \quad (3.87)$$

(5) オ3導体が多数線条ある場合。

通信線の場合は問題となる被誘導線の外に、多数線条が同一柱上に添架されている場合が常である。このような場合はその他線条 n 本を一括して一本の等価導体におきかえ、然る後以上の諸公式を適用するのが便である。 n 本導体について等価導体を考え、その自己電位係数を p_{cc} とすると、

$$p_{cc} = \frac{1}{n} (P_{33} + \frac{1}{n} \sum P_{rs}) \quad (3.88)$$

但し $r = 1 \sim n, s = 1 \sim n, r \neq s$

又起誘導線 a 、被誘導線 b とし、その間の相互電位係数を p_{ca}, p_{cb} とすると、

$$\left. \begin{aligned} p_{ca} &= \frac{1}{n} \sum P_{ar}, & r &= 1 \sim n \\ p_{cb} &= \frac{1}{n} \sum P_{br}, & r &= 1 \sim n \end{aligned} \right\} \quad (3.89)$$

これらの値を用いて式 (3.82) ~ (3.87) 中の $P_{13} \rightarrow p_{ca}, P_{23} \rightarrow p_{cb}, P_{33} \rightarrow p_{cc}$ と置きかえればよい。

(6) 横浜線における多線条効果の実測。

横浜線、原町田、中山間 8.1 km の電車線に交流 60 Hz, 3000 V を加え、国鉄通信線への誘導電圧を実測した時の静電誘導電圧は、オ1日目 95 V, オ2日目 105 V が記録された。通信線と電車線との間隔は約 10 米であるので、これによる静電誘導の計算値は 452 V となる。実測値との間にかなりの距りがあるが、これは次のように解釈される。

(a) 誘導区間 8.1 km に対し、通信線の長さは 9.2 km あつた。これによる軽減係数を λ_1 とすると(3.85)より

$$\lambda_1 = \frac{8.1}{9.2} = 0.88$$

(b) 通信線は被測定線の外に27線条が架設されており、これらは区向外に横決、八王子まで延長され、その長さは 44.3 km あつた。これによる遮蔽係数 λ_2 は式(3.86)を適用し

$$\lambda_2 = 0.401$$

(c) 被測定線の下方に鉛被ケーブル(外径 23 mm 、吊架線 9.6 mm Fe)が吊架されている。これによる静電遮蔽は式(3.82)を適用し

$$\lambda_3 = 0.794$$

(d) 軌条の静電遮蔽を λ_4 とすると式(3.82)より

$$\lambda_4 = 0.992$$

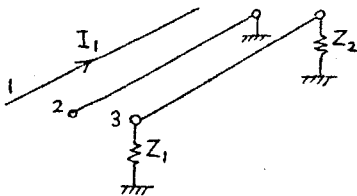
以上4つの効果が重畳されると、

$$\pi \cdot \lambda = 0.88 \times 0.401 \times 0.794 \times 0.992 = 0.278$$

$$\therefore \text{誘導電圧} = 452 \times 0.278 = 125.6 \text{ V}$$

この結果は、まだ実測値より2割程大きいが、これは饋電線の上方に配電線4条があり、これによる誘導電圧が約 20 V あること、地形の凹凸、樹木等の影響があること等に原因すると思われる。

3.5.2 電磁誘導に対する多線条効果



被誘導線2の近くにオ3導体があり、誘導区間 l の両端において Z_1, Z_2 でアースされている。簡単のため誘導周波数に対して、誘導区間の長さは短かく、集中定数として扱えるものとする。

(1) オ3導体の両端接地、両端の接地インピーダンスを Z_1, Z_2 とする。

$$\lambda = \frac{V_2'}{V_2} = 1 - \frac{Z_{13} Z_{23}}{Z_{12} \left\{ Z_{33} + \frac{Z_1 + Z_2}{2} \right\}} \quad (3.90)$$

但し Z_{rs} = 導体 r と s との間の相互インピーダンス

Z_{rr} = 導体 r の自己インピーダンス

オ3導体が被誘導線側に接近しているときは $Z_{12} = Z_{13}$ 被誘導側に接近してい

るときは $Z_{13} = Z_{23}$ とおくことができる。

(2) 3本導体が n 本線条よりなる場合の自己インピーダンス及び特性インピーダンス

n 本線条の太さは等しく、 r 番目と s 番目の線条間の距離を d_{rs} 、--- 夫々の高さを h_r, h_s --- とする。

n 本導体を一括した場合の自己インピーダンスを Z_n とすると⁽⁹⁾

$$Z_n = \frac{1}{n} Z_{rr} + \frac{n-1}{n} Z_{rs} \quad (3.91)$$

但し Z_{rr} は n 本中平均の高さにある導体一本の自己インピーダンス、 Z_{rs} は n 本中平均の高さと平均の間隔 $\overline{d_{rs}}$ にある二本の間の相互インピーダンスである。

$$\text{平均の高さ } \bar{h} = \frac{1}{n} \sum h_n$$

$$\text{平均の間隔 } \log \overline{d_{rs}} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{\substack{r=1 \sim n \\ s=1 \sim n \\ r \neq s}} \log d_{rs}$$

次に n 本導体を一括した場合の対地アドミタンスを Y_n とすると

$$Y_n = \sum_n Y_{rr}$$

それ故 n 本導体の特性インピーダンス Z_{0n} 、伝播定数 γ_n は

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &= \sqrt{Z_n Y_n} \\ Z_{0n} &= \sqrt{Z_n / Y_n} \end{aligned} \right\} \quad (3.93)$$

(3) 計算例

(a) 接地線の電磁遮蔽

被誘導線と接地線の間隔を 30 cm 、線条の太さ 2.9 cm なる Cu 線、高さは 6.00 米、 $\sigma = 0.01 \%$ 、 $R_1 + R_2 / l = 2.0 \ \Omega / \text{km}$ 、として、計算結果を表 3.7 に示す。

表 3.7

周波数 f_s	λ	
300	0.742	$19^\circ 50'$
600	0.587	$18^\circ 47'$
900	0.528	$14^\circ 56'$
1200	0.504	$11^\circ 30'$
1500	0.493	$9^\circ 05'$

(b) 多線条の電磁遮蔽

例を前記横浜線にとり、線条数 27 本の電磁遮蔽効果を求める。27 線条が誘導区向の両側へ無限に延びていると想定し、比較的電磁遮蔽の大きくなるようにする。この場合、式(3.90)において $Z_1 = Z_2 = Z_0 = 27$ 線条の特性インピーダンスとおけばよい。但し Z_0 は以下に計算されるように 27 線条の自己インピーダンスより遙かに大きいので一般に入は次のように表わされる。

$$\lambda \doteq 1 - \frac{Z_{23}l}{2Z_0} \quad (3.95)$$

但し $Z_0 =$ 多線条を一括した特性インピーダンス

$Z_{23} =$ 被誘導線と多線条との相互インピーダンス

$l =$ 誘導区向の長さ

以下 27 線条について特性インピーダンス Z_{027} 、伝播定数 γ_{27} 、及び $l = 10 \text{ km}$ とする時の入の計算結果を表 3.8 に示す。

表 3.8

周波数 %	$Z_{027} (\Omega)$	γ_{27}	λ
300	309.5 $\angle 1^\circ 47'$	0.00769 $\angle 68^\circ 53'$	0.988 $\sqrt{2^\circ 00'}$
600	300.5 $\angle 12^\circ 11'$	0.01494 $\angle 69^\circ 17'$	0.978 $\sqrt{3^\circ 52'}$
900	295.2 $\angle 2^\circ 18'$	0.02200 $\angle 69^\circ 24'$	0.968 $\sqrt{5^\circ 51'}$
1200	291.5 $\angle 12^\circ 21'$	0.02897 $\angle 69^\circ 27'$	0.960 $\sqrt{7^\circ 15'}$
1500	289.6 $\angle 12^\circ 23'$	0.03586 $\angle 69^\circ 29'$	0.954 $\sqrt{9^\circ 37'}$

以上に見る如く多線条の電磁遮蔽効果は周波数 300 % ~ 1500 % において、1.2% ~ 4.6% となり非常に少い。これを前記一本の接地線と比較して意外の感にうたれるがこの理由は、多線条と被誘導線との平均間隔が約 100 cm であること、及び Z_{027} が約 300 Ω であるため接地抵抗 $2^\circ/\text{km}$ とは比較にならぬこと等に原因する。これを要するに多線条の電磁遮蔽効果は数% 以下であり、電磁誘導電圧に重要な影響をもたらさない。

86 項欠

第4章 通信回線の平衡度と雑音

4.1 平衡度の意義

4.1.1 緒言

電力、通信、両線路が近接平行する場合に通信線への誘導障害の中、通信線と大地間に生じる誘導危険電圧に関してはほぼ正確に予測できることが仙山線において行なわれた交流電化に関する試験の結果確かめられたが、通話障害となる通信回線への高調波誘導に関しては、まだ適確に予測することは困難な状態にある。しかし、ここで通信回線の雑音の発生原因を分析して考えると、① 通信回線の両線条と電力線との間の静電的、電磁的な不平衡結合により線条間に誘起するもの、② 通信線と大地との間に誘導された電圧により通信線の両線条の大地に対するアドミッタンス不平衡と直列インピーダンス不平衡が関係して線条間に発生するもの、③ 通信線相互の漏話不平衡に依るもの等に分けられる。従つて起誘導側の高調波量とこれら不平衡量とが分れば、ある程度発生する雑音量の予測が可能になるはずである。これ等雑音発生の原因である不平衡量の程度を一括表示するための尺度として平衡度が一般に用いられているが、これら平衡度の性質を知ることは通信回線の雑音量を予測する上、甚だ重要となる。本節では平衡度と雑音の関係について種々行った調査研究の結果を述べる。

4.1.2 平衡度の種別

平衡度の定義は通信回線を構成する両線条間に表われる誘導電圧と両線条対大地間に誘導される電圧の比で示され、その対数の20倍をとつてdBで表わすこともある。又CCITTはこれを通信回線の感度係数と呼んでいる。回線の誘導による雑音電圧は、前にも述べた様に① 通信回線の二つの線条よりなるループ回路における電磁的、静電的不平衡に依り誘導するもの、② 通信線と大地間に誘導した電圧が回線を構成する両線条の大地に対するアドミッタンス不平衡と直列インピーダンス不平衡のため両線条間に現われるもの、③ 回線相互間の漏話不平衡により線条間に現われるもの等の合成と考えられるが、平衡度の定義において線間誘導電圧として、①②③項の合成値を用いた場合これを雑音平衡度と呼び、②項だけを用いた場合、これを回線平衡度と呼ぶことにする。又回線平衡度は測定の場合上通信線と大地間電圧として1000%の高調波電圧を使用する場合が多く、これを特に1000%平衡度と呼ぶことにする。雑音平衡度は前記のように通信回線の大地に対する不平衡と起誘導回路

と通信回線との間の総合的な不平衡接近間隔および通信回線の交叉などの非対称性又は起誘導回線の電圧電流分布の不均一性などを含むものである。これに対し回線平衡度は通信回線自体の大地に対する不平衡（絶縁抵抗不平衡；対地容量不平衡）および直列インピーダンス不平衡のみについて総合的に表わしている。従つて回線平衡度は通信回線自身の雑音に対する良否を判定する尺度となり、雑音平衡度は、さらにそれに加ふるに通信線と起誘導線との間の不平衡または起誘導側条件などの良否を判定する尺度となる。

4.1.3 平衡度の測定法

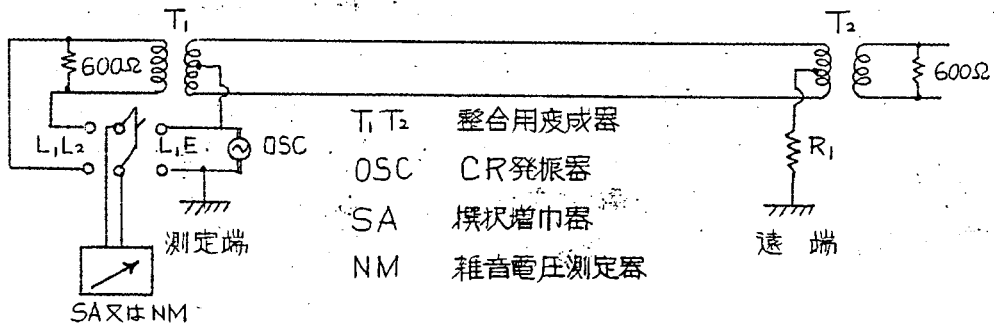


図4.1 回線平衡度の測定回路

図4.1は回線平衡度の測定結線図である。図において測定端に発振器を置く場合を近端回線平衡度と呼び、遠端に発振器を置く場合を遠端回線平衡度と呼ぶが、測定は一般に近端回線平衡度の測定回路で発振器の周波数を1000 γ sとL₁E間電圧VとL₁L₂間電圧vを測定し $20 \log_{10} \frac{V}{v}$ dB として求める。又遠端におけるL₁E間成端抵抗(R₁)を0 Ω 600 Ω 開放にして測定を行う場合もある。

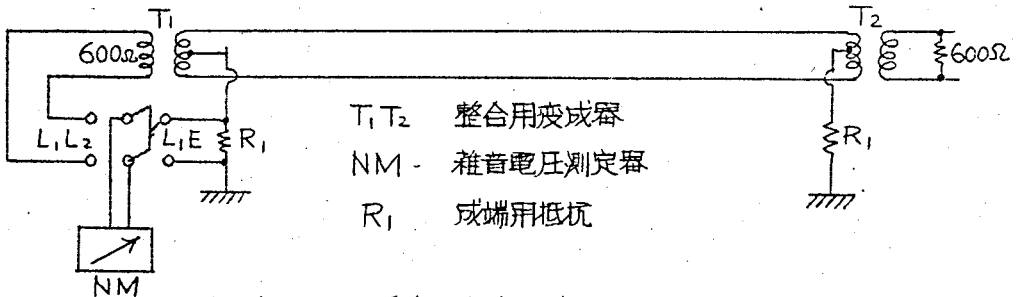


図4.2 雑音平衡度測定回路

図4.2は雑音平衡度の測定回路である。測定はL₁E間の雑音電圧V_nとL₁L₂間

の雑音電圧 V_n を測定し $20 \log_{10} V_n/v_n$ dB として求める。

この雑音平衡度は起誘導側の影響を受けて相当大巾に変動するのが常であるから或る程度の時間帯、継続して測定する。

4.2 回線平衡度と不平衡量との関係

通信回線の平衡度を実測する方法として、回線の中性点とアースとの間に 1000 Ω 電流を通电して行う方法がある。この場合の平衡度と、線路の不平衡量（特に絶縁抵抗不平衡と導体抵抗不平衡）との関係について考察する。

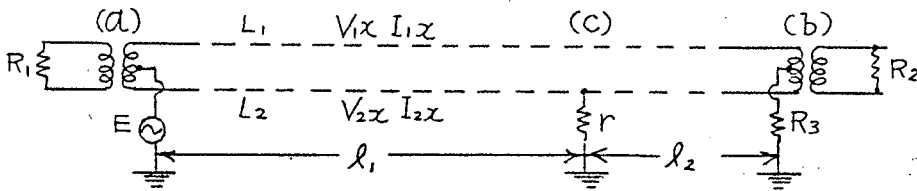


図4.3 回線平衡度測定回路の電圧、電流

図4.3に表示される通信回線を構成する両線条 L_1, L_2 上の電圧、電流について式 (4.1), (4.2) が成立する。

$$\left. \begin{aligned} - \frac{dV_{1x}}{dx} &= I_{1x}Z_1 + I_{2x}Z_m \\ - \frac{dI_{1x}}{dx} &= V_{1x}Y_1 + (V_{1x} - V_{2x})Y_m \end{aligned} \right\} (4.1)$$

$$\left. \begin{aligned} - \frac{dV_{2x}}{dx} &= I_{2x}Z_1 + I_{1x}Z_m \\ - \frac{dI_{2x}}{dx} &= V_{2x}Y_1 + (V_{2x} - V_{1x})Y_m \end{aligned} \right\} (4.2)$$

但し Z_1, Y_1 は線条1本の大地を帰路とする回路の直列インピーダンスおよび並列アドミタンスであり、 Z_m, Y_m は線条 L_1, L_2 間の相互インピーダンスおよび相互アドミタンスである。

今これを解くために、次の変換を行う。

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \frac{1}{2}(V_{1x} + V_{2x}) \\ I_x &= I_{1x} + I_{2x} \end{aligned} \right\} (4.3)$$

$$\left. \begin{aligned} Z &= \frac{1}{2}(Z_1 + Z_m) \\ Y &= 2Y_1 \end{aligned} \right\} (4.4)$$

$$\left. \begin{aligned} U_x &= V_{1x} - V_{2x} \\ i_x &= \frac{1}{2}(I_{1x} - I_{2x}) \end{aligned} \right\} (4.5)$$

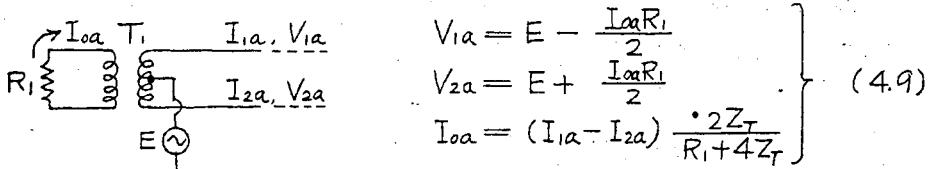
$$\left. \begin{aligned} z &= 2(Z_1 - Z_m) \\ y &= \frac{Y_1}{2} + Y_m \end{aligned} \right\} (4.6)$$

然るときは (4.1) および (4.2) は

$$\left. \begin{aligned} - \frac{dV_x}{dx} &= I_x Z \\ - \frac{dI_x}{dx} &= V_x Y \end{aligned} \right\} (4.7)$$

$$\left. \begin{aligned} - \frac{dU_x}{dx} &= i_x z \\ - \frac{di_x}{dx} &= U_x y \end{aligned} \right\} (4.8)$$

次に近端 (a点) における電圧, 電流の間には次の関係が成立する。



$$\left. \begin{aligned} V_{1a} &= E - \frac{I_{0a}R_1}{2} \\ V_{2a} &= E + \frac{I_{0a}R_1}{2} \\ I_{0a} &= (I_{1a} - I_{2a}) \frac{\cdot 2Z_T}{R_1 + 4Z_T} \end{aligned} \right\} (4.9)$$

図4.4 a点の電圧,電流

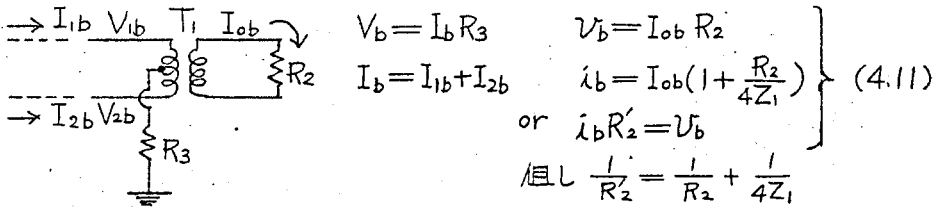
但し中継線翰 T_1 は, 変成比 1:1 の理想変圧器とし, その一次線翰の中性点までのインピーダンスを Z_T とする。

従ってa点においては

$$\left. \begin{aligned} V_a &= E & U_a &= -I_{0a} R_1 \\ I_a &= I_{1a} + I_{2a} & i_a &= I_{0a} \left(1 + \frac{R_1}{4Z_T}\right) \\ & & \text{or } i_a R_1' &= -U_a \end{aligned} \right\} (4.10)$$

但し $\frac{1}{R_1'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{4Z_T}$

次に遠端b点においては, 同様にして (4.11) が成立する。

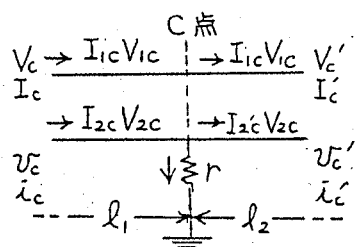


$$\left. \begin{aligned} V_b &= I_b R_3 & U_b &= I_{0b} R_2 \\ I_b &= I_{1b} + I_{2b} & i_b &= I_{0b} \left(1 + \frac{R_2}{4Z_T}\right) \\ & & \text{or } i_b R_2' &= U_b \end{aligned} \right\} (4.11)$$

但し $\frac{1}{R_2'} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{4Z_T}$

図4.5 b点の電圧,電流

(A) C点の絶縁不平衡 r のある場合



C点における電圧, 電流の分布を図4.6の如くとする。但し V_c, I_c, U_c, i_c は l_1 区間より見たC点の変換された, 電圧, 電流, V_c', I_c', U_c', i_c' は同じく l_2 区間より見たC点の電圧, 電流である。

図4.6 C点の電圧,電流 (絶縁不平衡 r の場合)

然るときは,

$$\left. \begin{aligned} V_c &= V_c', & U_c &= U_c' \\ I_c - I_c' &= 2i_c' - 2i_c = \frac{1}{r} \left(V_c - \frac{U_c'}{2} \right) \end{aligned} \right\} (4.12)$$

次に (4.7) および (4.8) を l_1 区間および l_2 区間について解き, これに (4.9) ~ (4.12) の条件を代入すると,

$$\left. \begin{aligned} V_a \cosh \delta l_1 - I_a Z_0 \sinh \delta l_1 &= V_b \cosh \delta l_2 + I_b Z_0 \sinh \delta l_2 \\ \bar{V}_a \cosh \delta l_1 - i a z_0 \sinh \delta l_1 &= \bar{V}_b \cosh \delta l_2 + i b z_0 \sinh \delta l_2 \\ I_a \cosh \delta l_1 - \frac{V_a}{Z_0} \sinh \delta l_1 - \left\{ I_b \cosh \delta l_2 + \frac{V_b}{Z_0} \sinh \delta l_2 \right\} \\ &= -2 \left(i a \cosh \delta l_1 - \frac{\bar{V}_a}{z_0} \sinh \delta l_1 \right) + 2 \left(i b \cosh \delta l_2 + \frac{\bar{V}_b}{z_0} \sinh \delta l_2 \right) \end{aligned} \right\} (4.13)$$

および

$$= \frac{1}{r} (V_b \cosh \delta l_2 + I_b Z_0 \sinh \delta l_2 - \frac{1}{2} \bar{V}_b \cosh \delta l_2 - \frac{1}{2} i b z_0 \sinh \delta l_2)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{Z_1 + Z_m}{4Y_1}} \quad ; \quad z_0 = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{4(Z_1 - Z_m)}{Y_1 + 2Y_m}} \\ r &= \sqrt{ZY} = \sqrt{(Z_1 + Z_m)Y} \quad ; \quad \delta a = \sqrt{zy} = \sqrt{(Z_1 - Z_m)Y_1 + 2Y_m} \end{aligned} \right\} (4.14)$$

(B) C点に導体不平衡 ρ のある場合

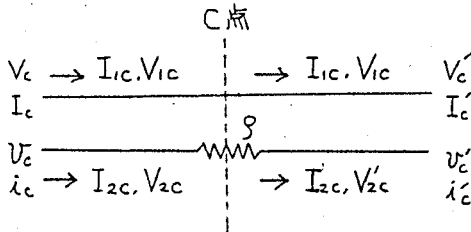


図4.7 C点の電圧、電流
(導体不平衡 ρ の場合)

C点において、変換された電圧、電流
に対して次の関係が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} I_c &= I_c', \quad i_c = i_c' \\ V_c - V_c' &= \frac{1}{4} I_c \rho - \frac{1}{2} i_c \rho \\ V_c - V_c' &= -\frac{1}{2} I_c \rho + i_c \rho \end{aligned} \right\} (4.15)$$

従つて (4.13) と同様に

$$\left. \begin{aligned} I_a Z_0 \cosh \delta l_1 - V_a \sinh \delta l_1 &= I_b Z_0 \cosh \delta l_2 + V_b \sinh \delta l_2 \\ i a z_0 \cosh \delta l_1 - \bar{V}_a \sinh \delta l_1 &= i b z_0 \cosh \delta l_2 + \bar{V}_b \sinh \delta l_2 \\ (V_a \cosh \delta l_1 - I_a Z_0 \sinh \delta l_1) - (V_b \cosh \delta l_2 + I_b Z_0 \sinh \delta l_2) \\ &= \frac{\rho}{4 Z_0} (I_a Z_0 \cosh \delta l_1 - V_a \sinh \delta l_1) - \frac{\rho}{2 z_0} (i a z_0 \cosh \delta l_1 - \bar{V}_a \sinh \delta l_1) \\ (\bar{V}_a \cosh \delta l_1 - i a z_0 \sinh \delta l_1) - (\bar{V}_b \cosh \delta l_2 + i b z_0 \sinh \delta l_2) \\ &= -\frac{\rho}{2 Z_0} (I_a Z_0 \cosh \delta l_1 - V_a \sinh \delta l_1) + \frac{\rho}{z_0} (i a z_0 \cosh \delta l_1 - \bar{V}_a \sinh \delta l_1) \end{aligned} \right\} (4.16)$$

さて、平衡度の定義により、

$$\text{近端平衡度} \quad B_n = 20 \log_{10} \frac{E}{I_{0a} R_1} = 20 \log_{10} \frac{V_a}{U_a} \quad (4.17)$$

$$\text{遠端平衡度} \quad B_f = 20 \log_{10} \frac{(I_{12} + I_{22}) R_3}{I_{0b} R_2} = 20 \log_{10} \frac{V_b}{U_b} \quad (4.18)$$

$\frac{V_a}{U_a}$ および $\frac{V_b}{U_b}$ は、絶縁不平衡に対しては (4.13)、導体不平衡に対しては (4.16)

を解くことにより求めることができる。ここでは供試線の両端成端状態 $R_1 = R_2 = Z_0$ の最も普通の場合について解く。

$R_1 = R_2 = Z_0$ の場合 (4.13) を解いて

$$\frac{V_a}{U_a} \doteq \left(\frac{4r}{Z_0} + \frac{1}{2} \right) e^{\gamma a l_1} \frac{R_3 \cosh \gamma l + Z_0 \sinh \gamma l}{R_3 \cosh \gamma l_2 + Z_0 \sinh \gamma l_2} \quad (4.19)$$

$$\frac{V_b}{U_b} \doteq \frac{4r}{Z_0} \frac{1 + \frac{1}{2} \gamma a l_1}{\cosh \gamma l_2 + \frac{Z_0}{R_3} \sinh \gamma l_2} \quad (4.20)$$

同じく (4.16) を解いた結果は

$$-\frac{V_a}{U_a} \doteq \left(\frac{4Z_0}{\rho} + 2 \right) (\cosh \gamma l + \frac{Z_0}{R_3} \sinh \gamma l) \frac{\cosh \gamma a l_1 + \sinh \gamma a l_1}{\sinh \gamma l_2 + \frac{Z_0}{R_3} \cosh \gamma l_2} \quad (4.21)$$

$$\frac{V_b}{U_b} = \left(\frac{4Z_0}{\rho} + 2 \right) \frac{\cosh \gamma a l_2 + \sinh \gamma a l_2}{\sinh \gamma l_2 + \frac{Z_0}{R_3} \cosh \gamma l_2} \quad (4.22)$$

更に、特に $R_3 = Z_0$ とするとき

$$(4.19) \text{ は } \frac{V_a}{U_a} \doteq \frac{4r}{Z_0} e^{\gamma a l_1} e^{\gamma l_1} \quad (4.19)'$$

$$(4.20) \text{ は } \frac{V_b}{U_b} \doteq \frac{4r}{Z_0} e^{-\gamma l_2} \left(1 + \frac{1}{2} \gamma a l_1 \right) \quad (4.20)'$$

$$(4.21) \text{ は } -\frac{V_a}{U_a} \doteq \frac{4Z_0}{\rho} e^{\gamma l_1} e^{\gamma a l_1} \quad (4.21)'$$

$$(4.22) \text{ は } \frac{V_b}{U_b} \doteq \frac{4Z_0}{\rho} e^{-\gamma l_2} e^{\gamma a l_2} \quad (4.22)'$$

結局、線路の成端条件を $R_1 = R_2 = Z_0$ 、 $R_3 = Z_0$ とするときには平衡度 B_n 又は B_f と不平衡量 γ 又は ρ との間に次の関係が成立する。

(i) 絶縁不平衡 γ と近端平衡度 B_n 、遠端平衡度 B_f

$$B_n = 20 \log_{10} \frac{4r}{Z_0} + 8.7 (\beta + \beta a) l_1 \quad (4.23)$$

$$B_f = 20 \log_{10} \frac{4r}{Z_0} - 8.7 \beta l_2 + 4.35 \beta a l_1 \quad (4.24)$$

(ii) 導体不平衡 ρ と近端平衡度 B_n 、遠端平衡度 B_f

$$B_n = 20 \log_{10} \frac{4Z_0}{\rho} + 8.7 (\beta + \beta d) l_1 \quad (4.25)$$

$$B_f = 20 \log_{10} \frac{4Z_0}{\rho} + 8.7 (\beta d - \beta) l_2 \quad (4.26)$$

但し、 β および βd はそれぞれ γ 、及び γa の実数部分、即ち減衰定数である。普通の場合ならば、減衰量は小さいから平衡度はほぼ $\frac{4r}{Z_0}$ および $\frac{4Z_0}{\rho}$ によつ

てきまる。図4.8, 図4.9にはこれらを横軸にとり、 Z_0 および Z_0 を減衰数にして平衡度を与えた。図4.8, 図4.9中に高崎線桶川、瀧の架空架空裸通信線(8 km)における実測値と、富山、糸魚川間通信線(約79 km)における実測値を記入した。

このとき

絶縁不平衡の場合の実測値は $Z_0 = 420 \sim 700 \Omega$ の範囲で一致し

導体不平衡の場合の実測値は $Z_0 = \text{約 } 630 \Omega$ で計算値と一致する。

次に一般的には r の代りに対地アドミタンス不平衡 ΔY を置き、 q の代りに直列インピーダンス不平衡 ΔZ を置くことができる。従って、対地容量不平衡またはインダクタンス不平衡と平衡度との関係は(4.23) および(4.25)に対応して次式の通りとなる。

$$(iii) \quad B_n = 20 \log_{10} \frac{4}{Z_0 \omega \Delta C} + 8.7 (\beta + \beta_a) l_1 \quad (4.27)$$

$$(iv) \quad B_n = 20 \log_{10} \frac{4 Z_0}{\omega \Delta L} + 8.7 (\beta + \beta_a) l_1 \quad (4.28)$$

対地容量不平衡 ΔC および直列インダクタンス不平衡 ΔL と平衡度と周波数の関係を示す式(4.27) および式(4.28)の中、減衰量の項を除いて(通常小さいので)、図示すると、夫々図4.10, 図4.11の通りとなる。

これらの結果より、例へば架空裸通信回線の平衡度を50dB以上に保つために許容される不平衡量を求めると、絶縁抵抗不平衡は55% (たゞし $Z_0 = 700 \Omega$)、導体抵抗不平衡は5% (たゞし $Z_0 = 400 \Omega$) である。後に述べるように、普通の架空裸回線では、この条件を満足するものは非常に多い。

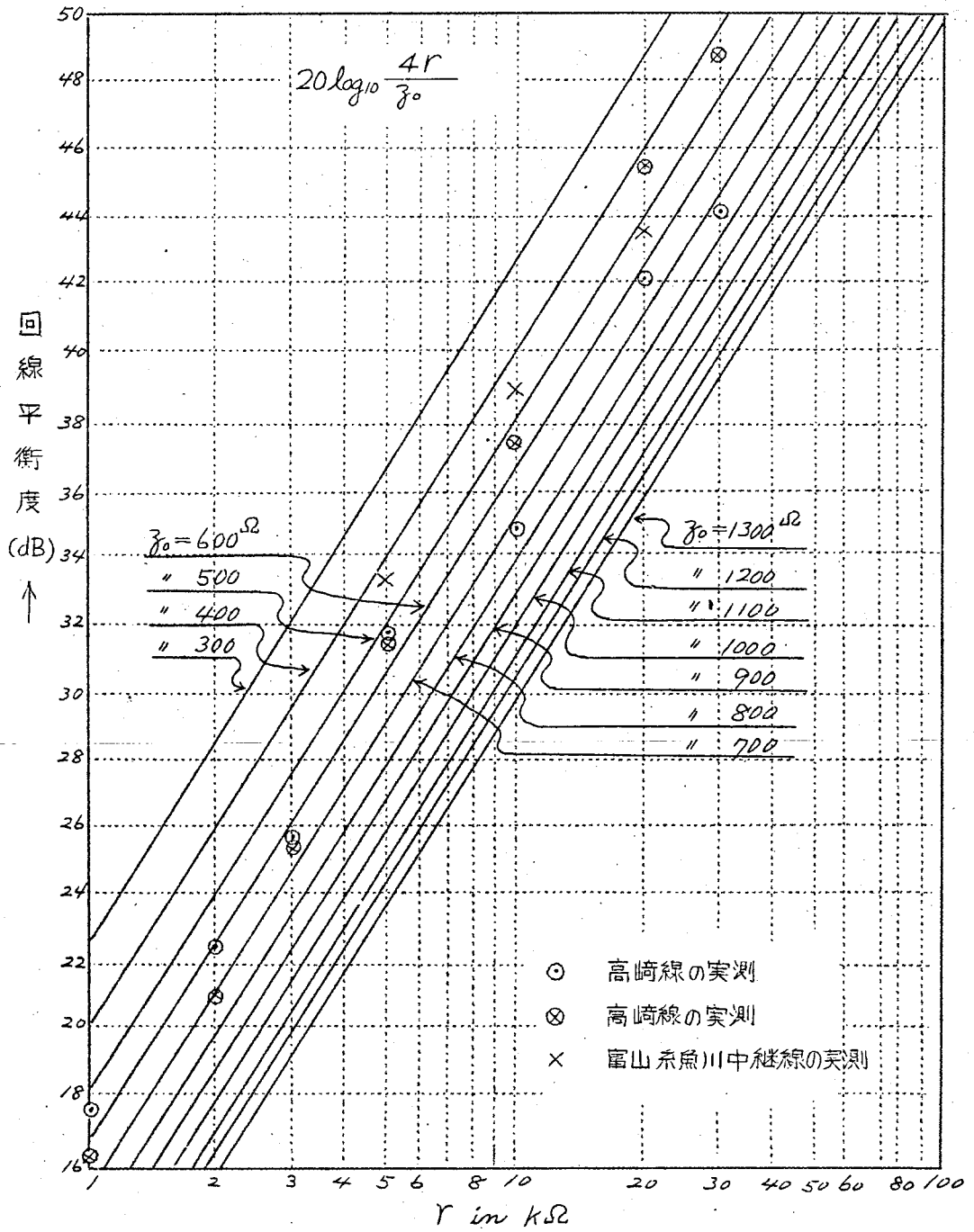


図4.8 絶縁不平衡と平衡度

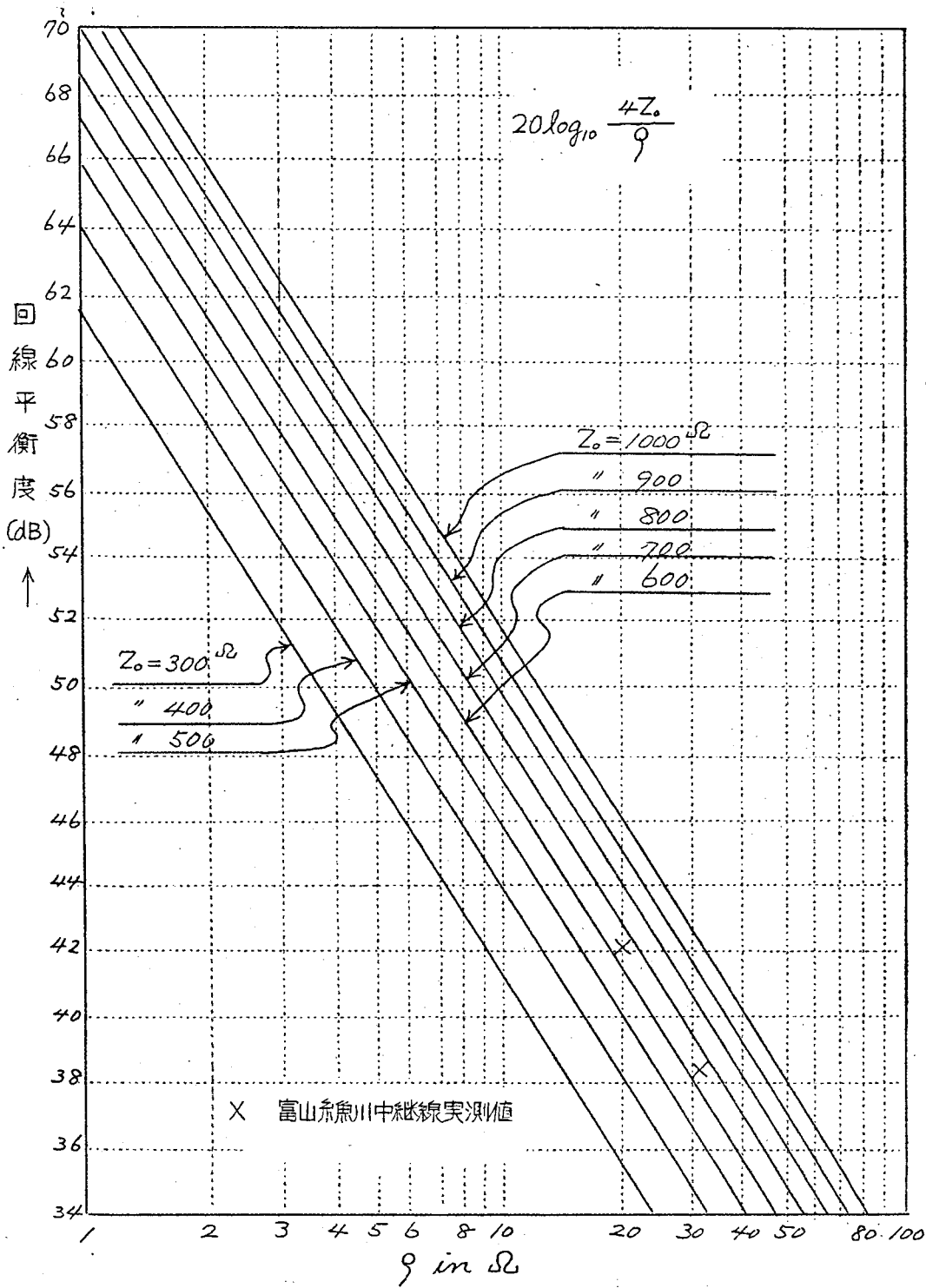


図4.9 導体不平衡と平衡度

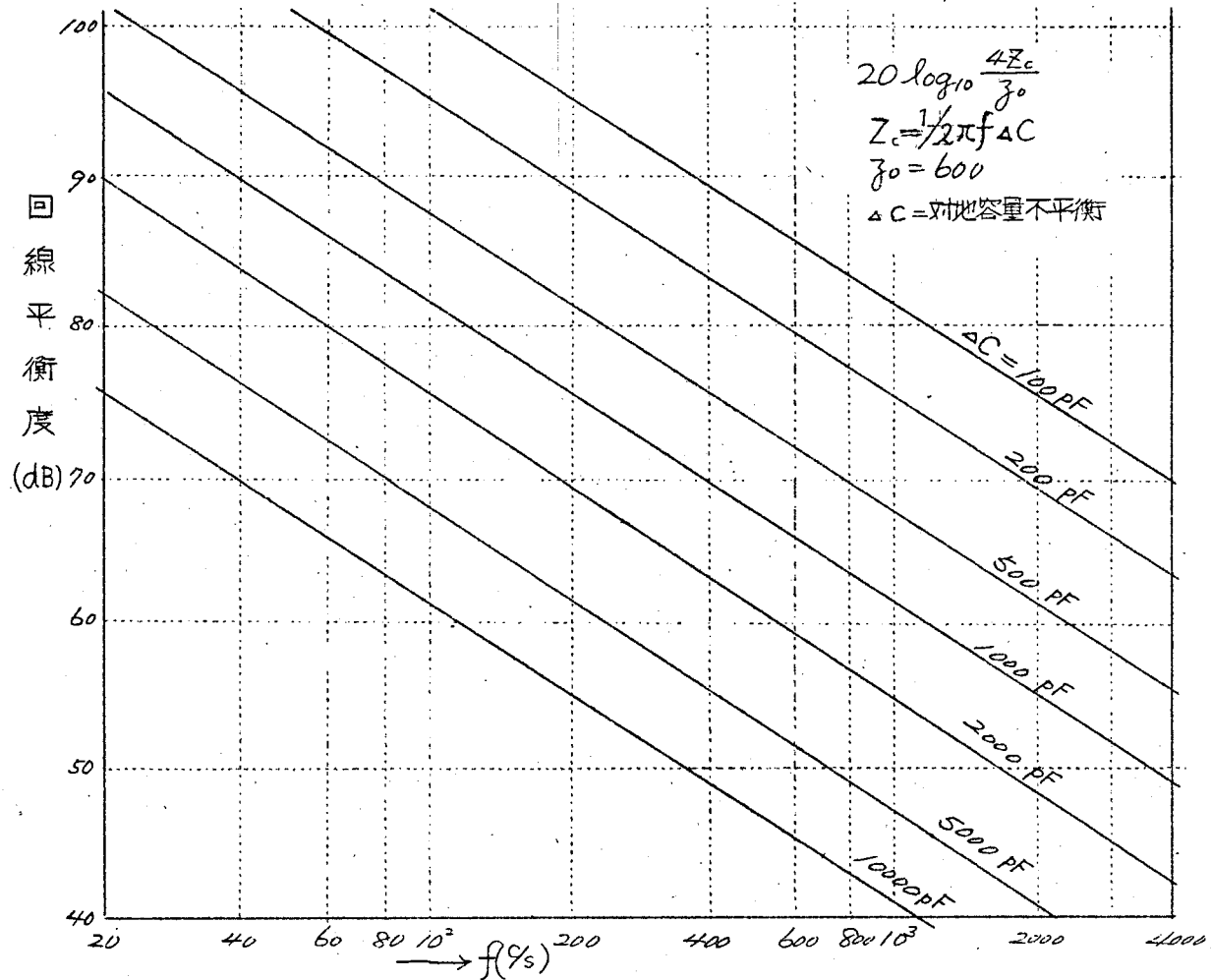


図4.10 回線平衡度と対地容量 不平衡との関係

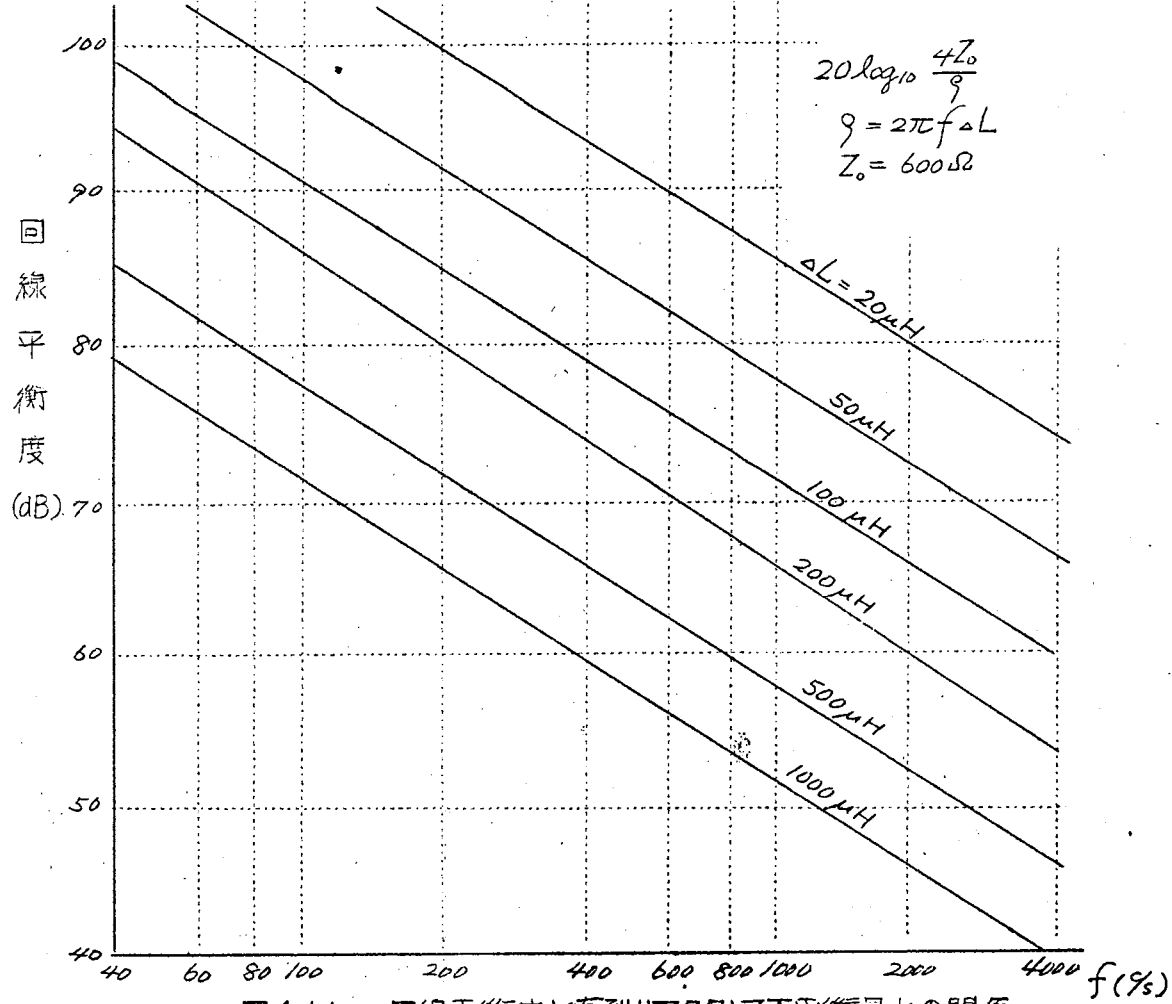


図4.11 回線平衡度と直列リアクタンス不平衡量との関係

4.3 雑音平衡度と不平衡量との関係

電話器に流れる誘導電流は種々な原因に基づくものであるが、其中最も重要な原因の一つである通信線の絶縁抵抗不平衡と誘導電流との関係について考究する。

本題に関する研究は既に渡沢博士²¹⁾が静電誘導電流に關して、また茂木博士²²⁾が電磁誘導電流に關して報告されたが、ここでは両氏の結果がある特例にあてはまることを示し、さらにその他の場合にも使用し得る一般式を導き、これを應用して二、三の結論を導いた。

4.3.1 静電誘導の關係する場合

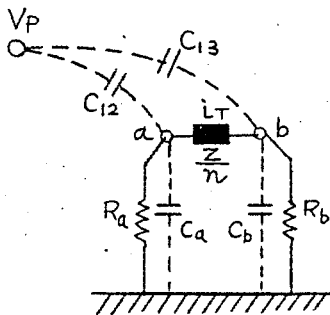


図4.12 通信線と電力線との静電結合

$$G = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} \quad \text{V/km}$$

$$C = \frac{1}{2}(C_a + C_b) \quad \text{MF/km}$$

$$C_m = \frac{1}{2}(C_{12} + C_{13}) \quad \text{MF/km}$$

$$\Delta G = \frac{1}{R_b} - \frac{1}{R_a} \quad \text{V/km}$$

$$\Delta C = \frac{1}{2}(C_a - C_b) \quad \text{MF/km}$$

$$\Delta C' = \frac{1}{2}(C_{12} - C_{13}) \quad \text{MF/km}$$

n = 電話器の個数
 Z = 電話器のインピーダンス
 V_p = 起誘導電圧

図4.12において静電誘導により電話器に流れる電流 i_T を求めると(附録参照)

$$i_T = i_{T0} + i_{TC} + i_{TC} \quad (4.29)$$

ただし

i_{T0} は絶縁抵抗不平衡 ΔG に基因するもの

i_{TC} は静電結合不平衡 $\Delta C'$ に基因するもの

i_{TC} は対地静電容量不平衡に基因するもの

$$i_{T0} = j\omega C_m V_p \Delta G l / mD \quad (4.30)$$

$$i_{TC} = j\omega C_m V_p (G + j2\omega C / C_m) \Delta C' l / mD \quad (4.31)$$

$$\doteq j\omega \Delta C' l V_p / m$$

$$i_{TC} = j\omega C_m V_p j\omega 2\Delta C l / mD \quad (4.32)$$

$$\doteq -\omega C_m V_p 2\omega \Delta C l / \{G + j\omega 2(C + C_m)\}$$

ただし

$$D = G + \frac{1}{n} Z l \left\{ \frac{1}{R_a R_b} - \omega^2 (C + C_m)^2 \right\} + j\omega (C + C_m) (2 + \frac{1}{n} G Z l)$$

(i) 絶縁抵抗の良好な場合は $G \ll \omega(C + C_m)$

$$i_{T0} = \frac{1}{2n} V_p \Delta G l \cdot C_m / (C + C_m) \quad (4.33)$$

$$i_{TC} = j\omega C_m V_p \Delta C l / 2(C + C_m) \quad (4.34)$$

(ii) 絶縁抵抗の悪い場合は $G \gg \omega(C + C_m)$

$$i_{T0} = j\omega C_m V_p (R_b - R_a) l / m(R_a + R_b) + Z l \quad (4.35)$$

$$i_{TC} = -\omega C_m V_p 2\omega \Delta C l / G \quad (4.36)$$

(iii) G が $\omega(C + C_m)$ と同程度の大きさのとき

$$i_{T0} = \frac{1}{n} \frac{C_m}{C + C_m} \frac{V_p \Delta G l}{2 + G / j\omega(C + C_m)} \quad (4.37)$$

なお式(4.37)は静電誘導用放電圧を $C_m V_p / C + C_m$ とおくことにより、波次氏の公式と全く一致する。

以上計算の結果は電話器に流れる誘導電流は電力側の高調波電圧 V_p に比例するとともに不平衡量 ΔG , ΔC 又は $\Delta C'$ にそれぞれ比例して増大し、又周波数 ω にほぼ比例して大きくなること分る。従って雑音平衡度は不平衡量および周波数に比例して悪くなること分る。 ΔC および $\Delta C'$ は通信線を交叉することによって非常に小さくすることができるが、 ΔG は導子の不良などに原因する 경우가多く、交叉によつては改善しがたい。よつて通常は ΔG が問題になる場合が多い。

4.3.2 電磁誘導の関係する場合

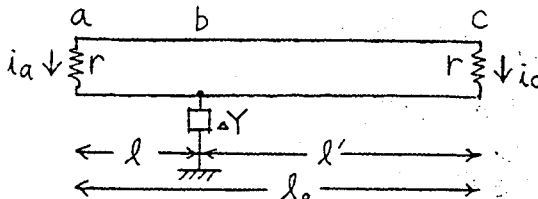


図4.13 アドミタンス不平衡と誘導電流

図4.13において通信線の途中b点に對地アドミタンス不平衡 ΔY が存在する場合、両端電話器に流れる電磁誘導電流 i_a 又は i_c は計算の結果次のようになる。(附録参照)

$$i_a = r(l'^2 - l^2)E / \left\{ 4Z_0 + r l_0 \left(r + \frac{r}{\Delta Y} \right) \right\} \quad (4.38)$$

もし ΔY が小さくて $Z_0 \ll 2rl_0/\Delta Y$ 又は $\Delta Y \ll 2Y$ のときは、

$$i_a = \frac{1}{8} E (l' - l) \Delta Y \quad (4.39)$$

又 ΔY が非常に大きいときは(半地気の場合の如く)

$$i_a = \frac{rE}{4Z_0} (l'^2 - l^2) \quad (4.40)$$

ただし、 E = 単位長さ当り電磁誘導電圧

さて普通は(4.39)で現わされる条件の適合するが多く、従つて半地気のような異常状態でない限り次のように表現される。

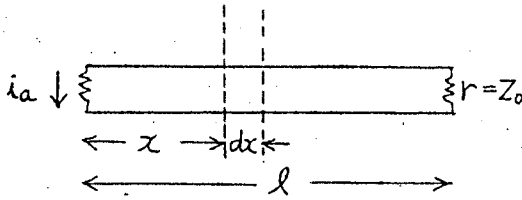
「電磁誘導により一端の受話器に流れる電流は、不平衡のない場合、その点に誘導される電圧 $V_x = (l' - l)E/2$ と不平衡量の $1/4$ との積、即 $V_x \times \frac{1}{4} \Delta Y$ で与えられる」。

なおこの結論は茂木氏の演算に利用された理論と一致する。

この結果は、雑音平衡度はやはり ΔY に比例して悪くなり、従つて周波数に比例して、また平衡度が悪くなること分る。

次に通信線の往復二線条と電力線との間に、電磁結合不平衡 ΔM のある場合、 ΔM

が平行する区間で全線一様に分布するものとする。



又簡単のため電話器のインピーダンス
 Z は特性インピーダンスに等しいもの
 とする。

図4.14 ΔM と誘導電流

$$i_a = \int_0^l j\omega \frac{\Delta M}{x} dx \cdot I_p \cdot e^{-\gamma x} / 2Z_0$$

$$= \frac{j\omega \Delta M I_p}{2Zl} (1 - e^{-\gamma l}) \quad (4.41)$$

ただし

I_p = 電力側の起誘導電流

Z = 通信回線の直列インピーダンス

またこの場合の対地誘導電圧 (L, E) は、 $\frac{1}{2} j\omega M I_p$ であるので

$$\text{平衡度} = 20 \log_{10} \frac{\frac{1}{2} j\omega M I_p 2Zl}{j\omega \Delta M I_p (1 - e^{-\gamma l}) Z}$$

$$= 20 \log_{10} \frac{M \gamma l}{\Delta M (1 - e^{-\gamma l})}$$

$$\doteq 20 \log_{10} \frac{M}{\Delta M} \quad (4.42)$$

従ってこの場合、雑音平衡度は ΔM に比例して悪くなり、周波数には殆んど無関係となる。

4.3.3 インピーダンス不平衡が関係する場合

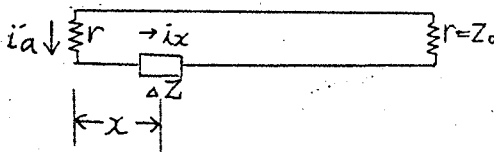


図4.15 インピーダンス不平衡と誘導電流

通信回線の一部にインピーダンス不平衡 ΔZ がある場合、この場合は、
 4.3.1又は4.3.2の原因によって、この部分に流れる電流を i_x とすると、この部分に新しく $i_x \Delta Z$ なる雑音起電力が発生すると考えられる。従って、これによって新しく電話器に流

れる電流 i_a は

$$i_a = \frac{i_x \cdot \Delta Z}{2Z_0} \cdot e^{-\gamma x} \doteq i_x \frac{\Delta Z}{2Z_0} \quad (4.43)$$

この場合、平衡度は ΔZ に比例して悪くなる。従つて導体不平衡 ρ のみの場合には周波数には関係なく、インダクタンス不平衡 ΔL のある場合には周波数に比例して雑音平衡度は悪くなる。

4.4 平衡度の周波数特性および交叉の影響

高崎線桶川-鴻巣間 8.13 km の試験用裸線について平衡度の性質を知るため、
 1. 回線平衡度の周波数特性 2. 雑音平衡度と交叉の関係 3. 回線定数の不平衡と平衡度との関係などについて実測を行った。

供試線は試験用裸通信線 2.9mm Cu 2回線で特に試験用として建植されたもので軌条外側より 10m の距離に高さ 600cm 線条間隔 30cm、で2回線4線条が架渉されている。又回線の交叉は図4.16に示した通りである。

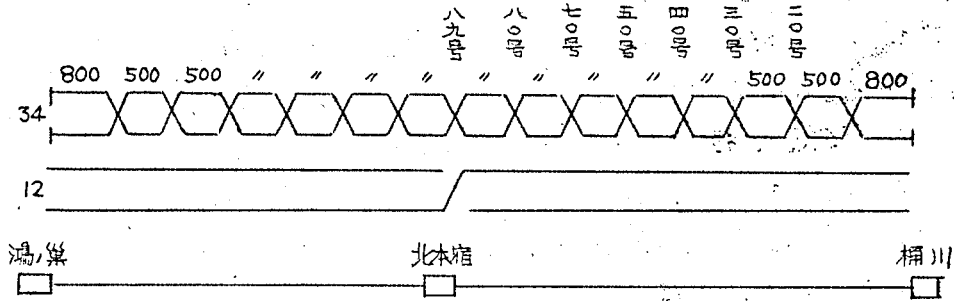


図4.16 試験回線の交叉図

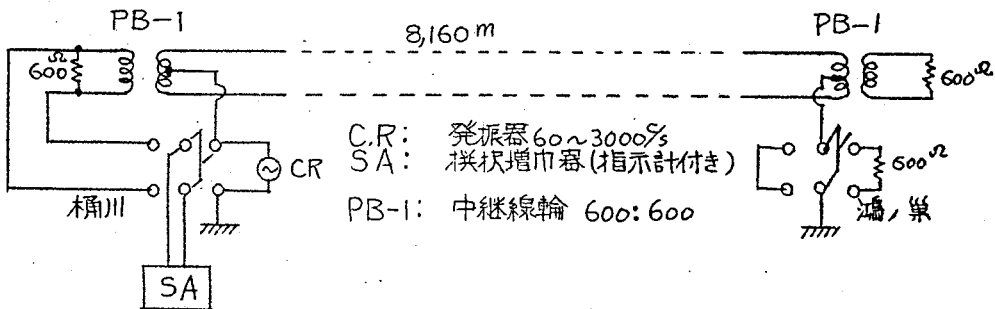


図4.17 周波数特性測定回路

4.4.1 回線平衡度の周波数特性と終端条件および交叉の影響

測定方法は図4.17に示した回路により、CR発振器の周波数を60~3000%の間変化しその印加電圧とそのときのPB-1の二次側電圧を測定し平衡度を求めた。先端の条件は回線向600Ωで対地向はスイッチにより600Ω、短絡および開放と変化して測定した。

測定結果を示すと図4.18~図4.19のようになる。

図4.18は500m交叉の回線について終端条件と周波数特性との関係を示したもので図より分るような回線平衡度の周波数特性は終端条件による変化は非常にすくない。このことは本回線の平衡度に関する不平衡量としては直列インピーダンス不平衡がすくないことを示しているものと思われる。又平衡度の周波数変化はほぼ f^{-1} に比例した変化を示しているがこれは前に示したように対地容量不平衡に起因するものと推定される。また交叉を2000mに変更すると、周波数特性は殆んど変わらず、一様に平衡度が約5dB悪くなった。

図4.19終端条件は600Ω一定とし交叉間隔と周波数特性の関係を示したもので、図より分るような周波数特性は交叉間隔にはあまり関係なく、ほぼ f^{-1} に比例しており交叉間隔の短い程、交叉数の多い程良い平衡度を示した。

また図4.20は1000%平衡度について交叉間隔と平衡度との関係を示したもので交叉間隔500mと2000mを比較すると、前者がほぼ4~6dBよく、又交叉間隔500mと4000mとではほぼ6~10dB前者が良い。これに対する終端抵抗の影響はあまり現われていない。

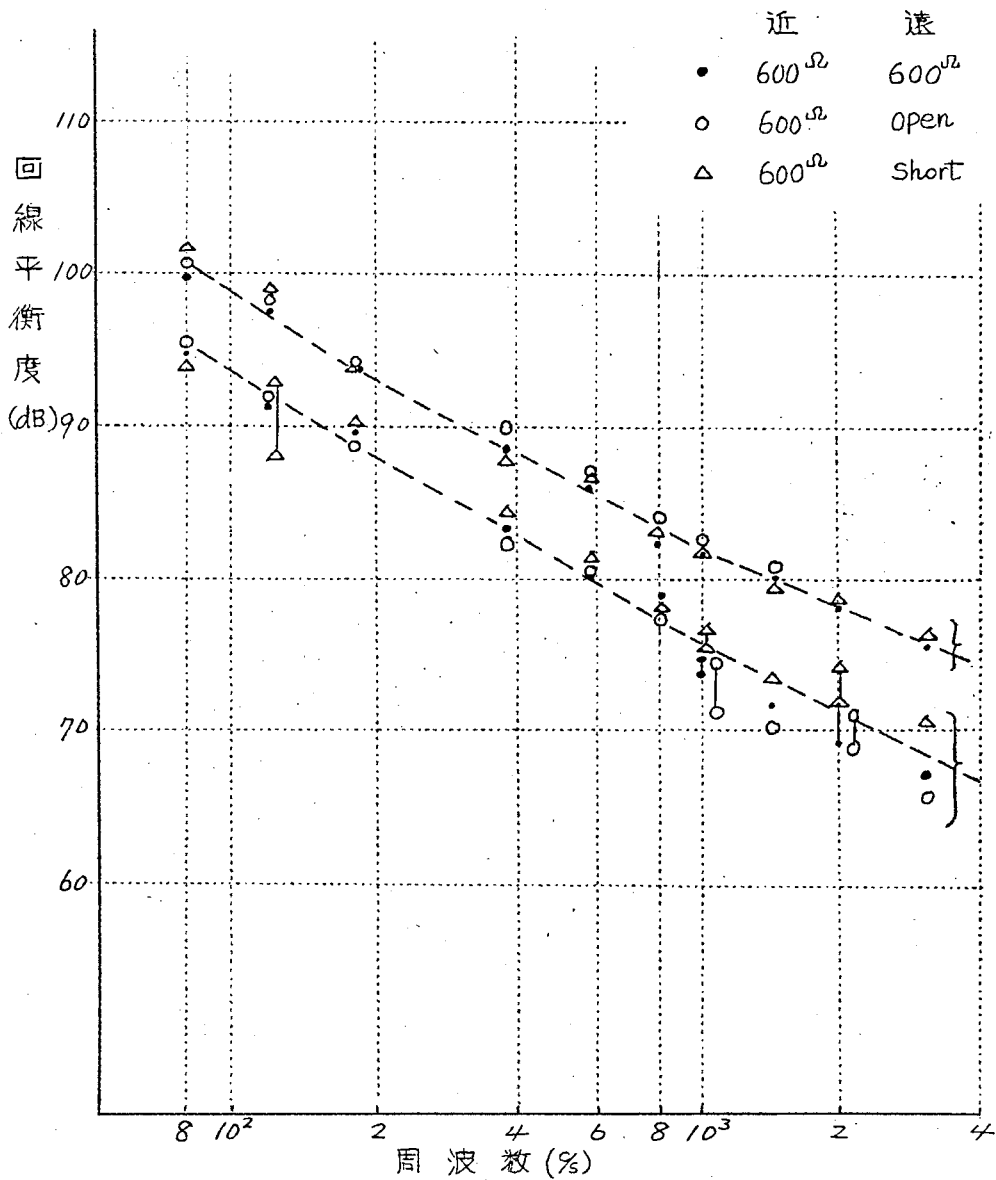


図4.18 回線平衡度の周波数特性と終端条件による影響

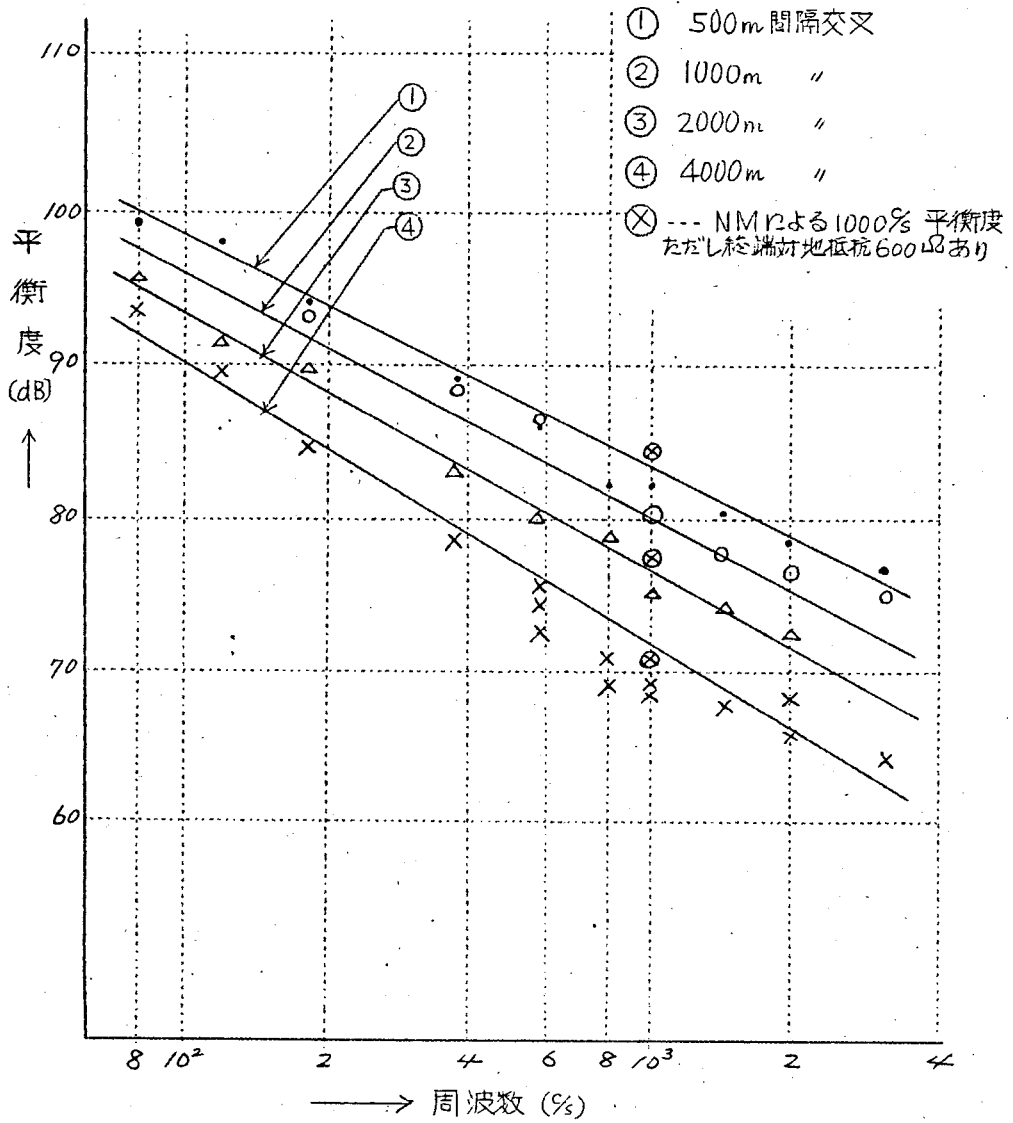


図4.19 回線平衡度の周波数特性と交叉による影響

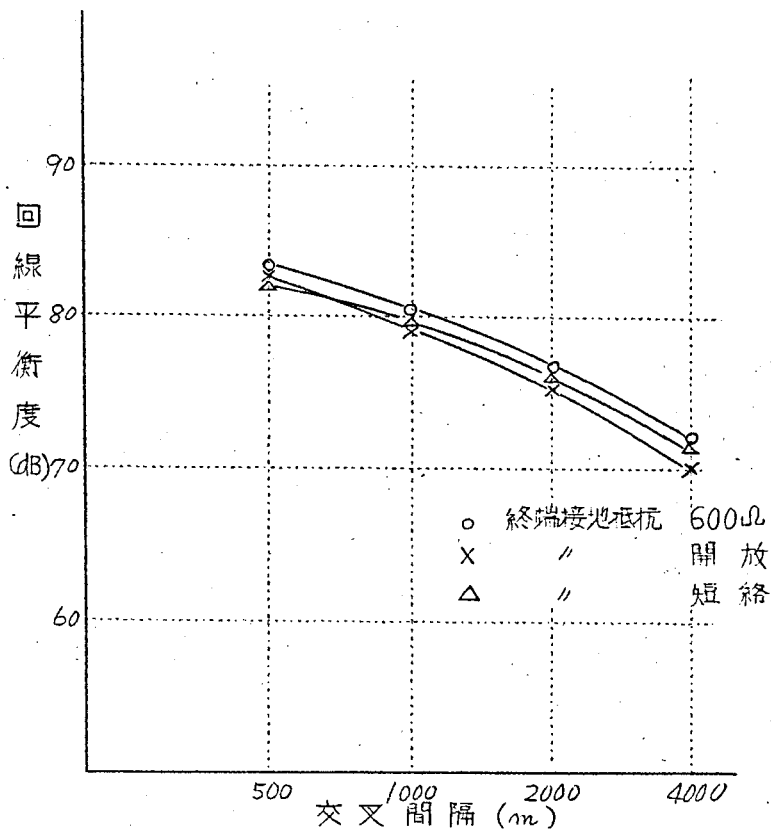


図4.20 回線平衡度と交叉間隔の影響

4.4.2 雑音平衡度と交叉の関係

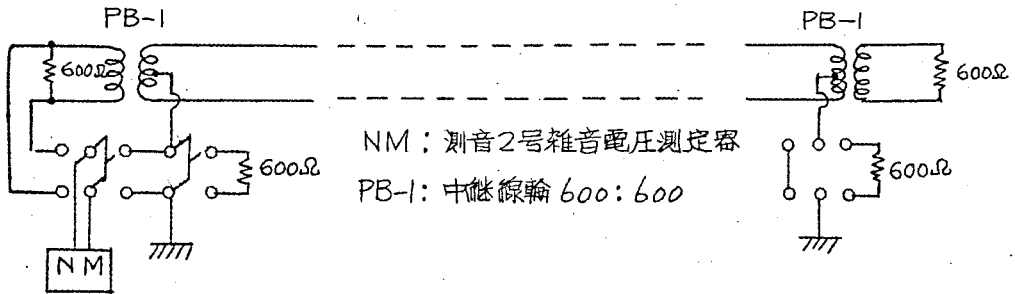


図4.21 雑音平衡度の測定回路

測定の方法は図4.21に示した回路構成で、雑音計(NM)により、各測定条件に従ってL₁, L₂ 間, L₁E 向雑音を測定した。一般に雑音は大巾に変化するので今回の測定では各条件共、約15分乃至30分程度連続測定を行った。測定の条件は交叉間隔を500m, 1000m, 2000m, 4500mと変えた場合近端側を開放して先端のL₁E向成端を600Ω, Short, openとした場合、近端側を600Ωとして先端のL₁E間成端を600Ω, short, openとした場合とについてL₁, L₂ 間及びL₁E向雑音電圧を測定した。測定結果を示すと、図4.22, 図4.23のようになる。図4.22は、交叉間隔(等間隔)と雑音平衡度との関係を示したものである。図より分かるように交叉の雑音平衡度に対する効果は非常に大きく、この場合には4000m交叉から500m交叉に変更することによって17.5dB程度改善することが実測された。又L₁E向成端条件によって雑音平衡度の大巾に変わったのは成端条件により大巾にL₁E向雑音電圧が変化するためである。又それについてL₁, L₂ 間雑音電圧が変化しなかったのは、回線平衡度が良好なためである。

図4.23は交叉間隔と誘導雑音量との関係を実測したもので、L₁, L₂ 間雑音電圧は交叉間隔の粗密により大いに変化することが分る。

即ち、L₁, L₂ 間雑音は4000m交叉で1.6~3.5mVが2000m交叉で、0.35~1.1mVとなり1.000m交叉では0.28~0.57mV 更に500m交叉では0.21~0.48mVと減少した。又500m交叉と4000m交叉の比較では500m交叉は、4000m交叉の場合の約1/8程度の雑音となった。

L₁E向雑音電圧は、交叉には無関係に100~700mV程度であったが成端条件により大巾に変化した。雑音電圧の大きさから順位をつけると 1. 近端 open 先端 short (400~700~850mV) 2. 両端 open (400~700mV)

3. 近端 open 先端 600Ω ($300\sim 600\text{mV}$) 4. 近端 600Ω 先端 short ($250\sim 350\text{mV}$) 5. 両端 600Ω ($150\sim 280\text{mV}$) 6. 近端 600Ω 先端 open ($100\sim 200\text{mV}$) となった。

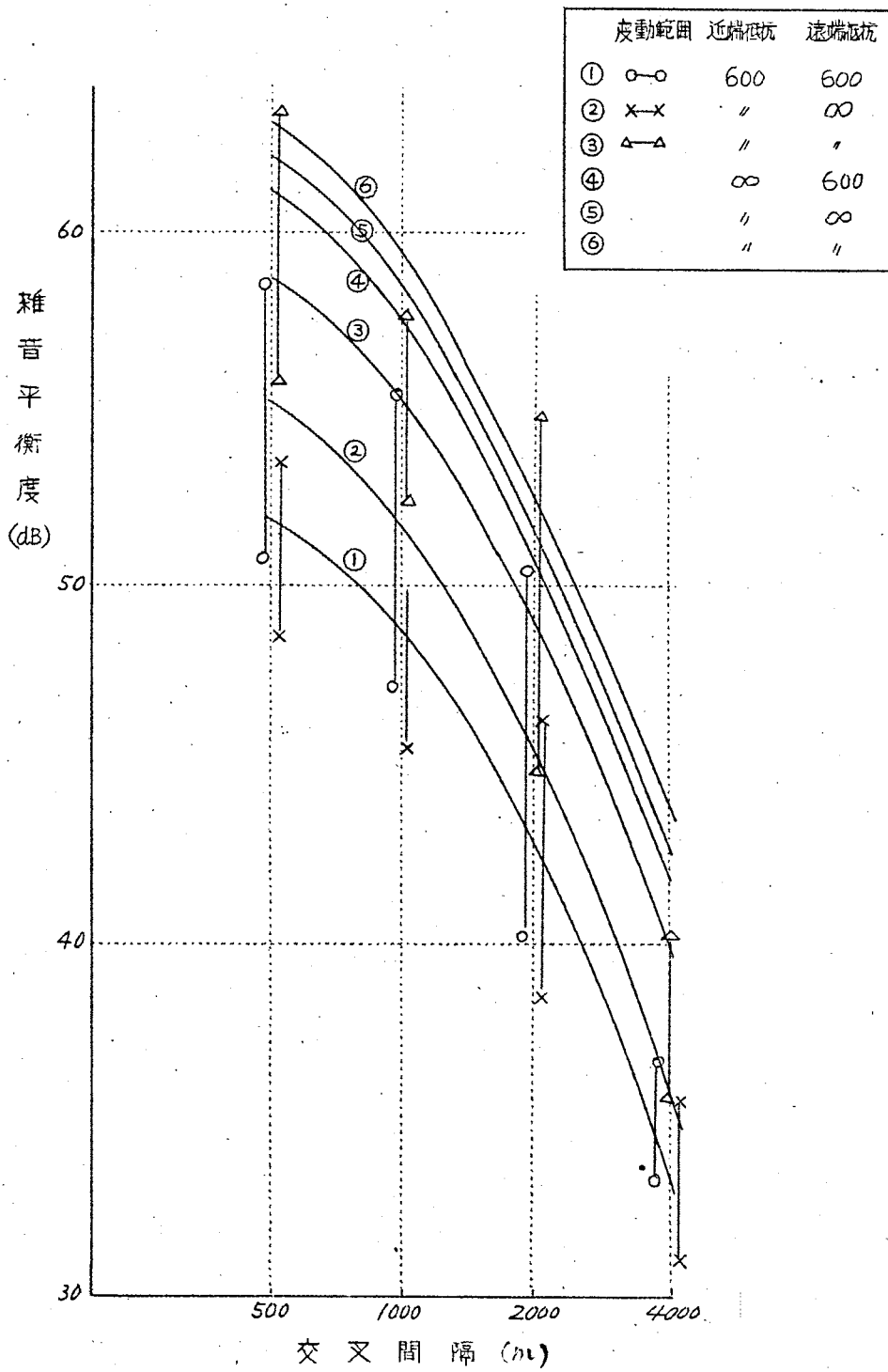


図4.22 雑音平衡度と交叉間隔

皮動範圍	近端抵抗	遠端抵抗
○—○	600	600
×—×	600	∞
△—△	600	0
○—○	∞	600
⊗—⊗	∞	∞
△—△	∞	0

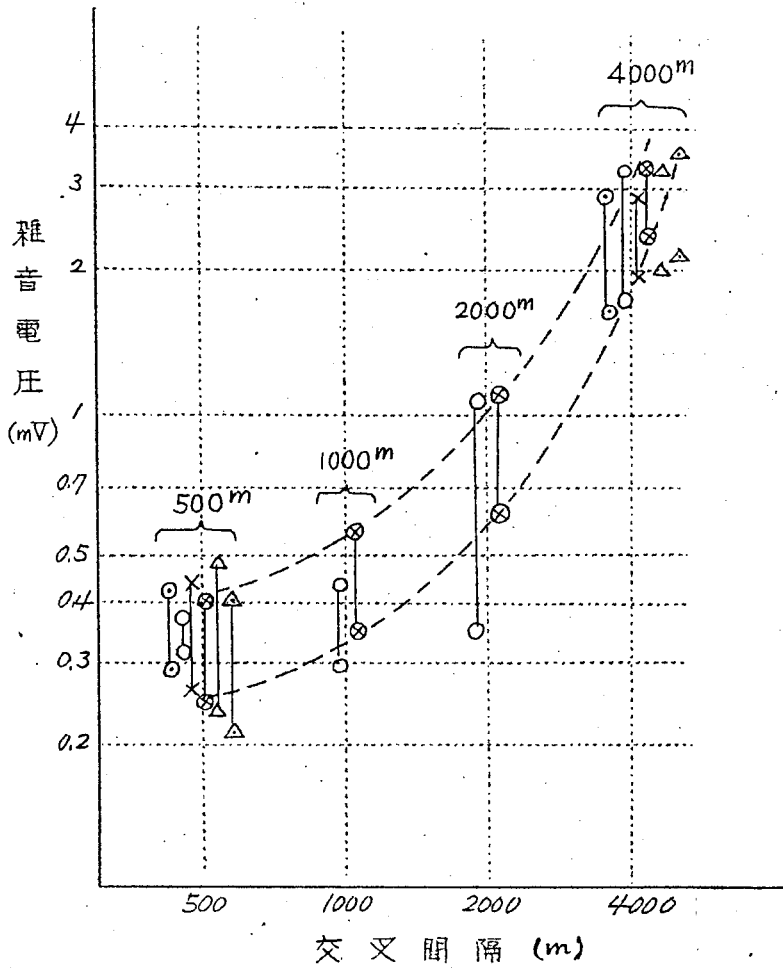


図4.23 交叉間隔と雑音量

4.4.3 ケーブル通信線の回線平衡度周波数特性

供試回線は北仙台一作並向 23.3 km のケーブル線を使用し、図 4.1 の回路構成を行ない発振器の周波数を 60 ~ 4000 %s の間変化し其の都度印加電圧 V と L_1, L_2 向電圧 v を測定し $20 \log_{10} V/v$ として平衡度を求めた。測定器は常時誘導と印加電圧とを区別するため主として挿入増巾器を用いた。

次に測定結果を示すと図 4.24 のようになる。なお比較のため測定値の大要を挙げると裸線では 60 %s で 61.5 dB, 1020 %s では 38 dB, 3000 %s では 29 dB とほぼ直線的に低下するに對しケーブル線においては 260 %s では 90.7 dB, 620 %s では 80.4 dB, 1020 %s では 69.5 dB, 3000 %s では 58.6 dB となり裸線より遙かに良く周波数特性は裸線ではほぼ f^{-1} に比例し、ケーブル線では f^{-1} より若干急な傾斜として実測された。

また回線平衡度の印加電圧 1000 %s について 30 分 ~ 1 時間の連続測定した結果を裸線では 32.5 dB 程度ケーブル線では 63.5 dB 程度で共に変動すくなく ± 0.5 dB 程度の変動が最大であつた。

このことは回線平衡度に関係する不平衡量において裸線における樹木の接触を除けばケーブル線、裸線共回線の対地容量不平衡、絶縁抵抗不平衡、導体抵抗不平衡等は雨天その他気象状況の変化のない限りほとんど変化がすくないためである。

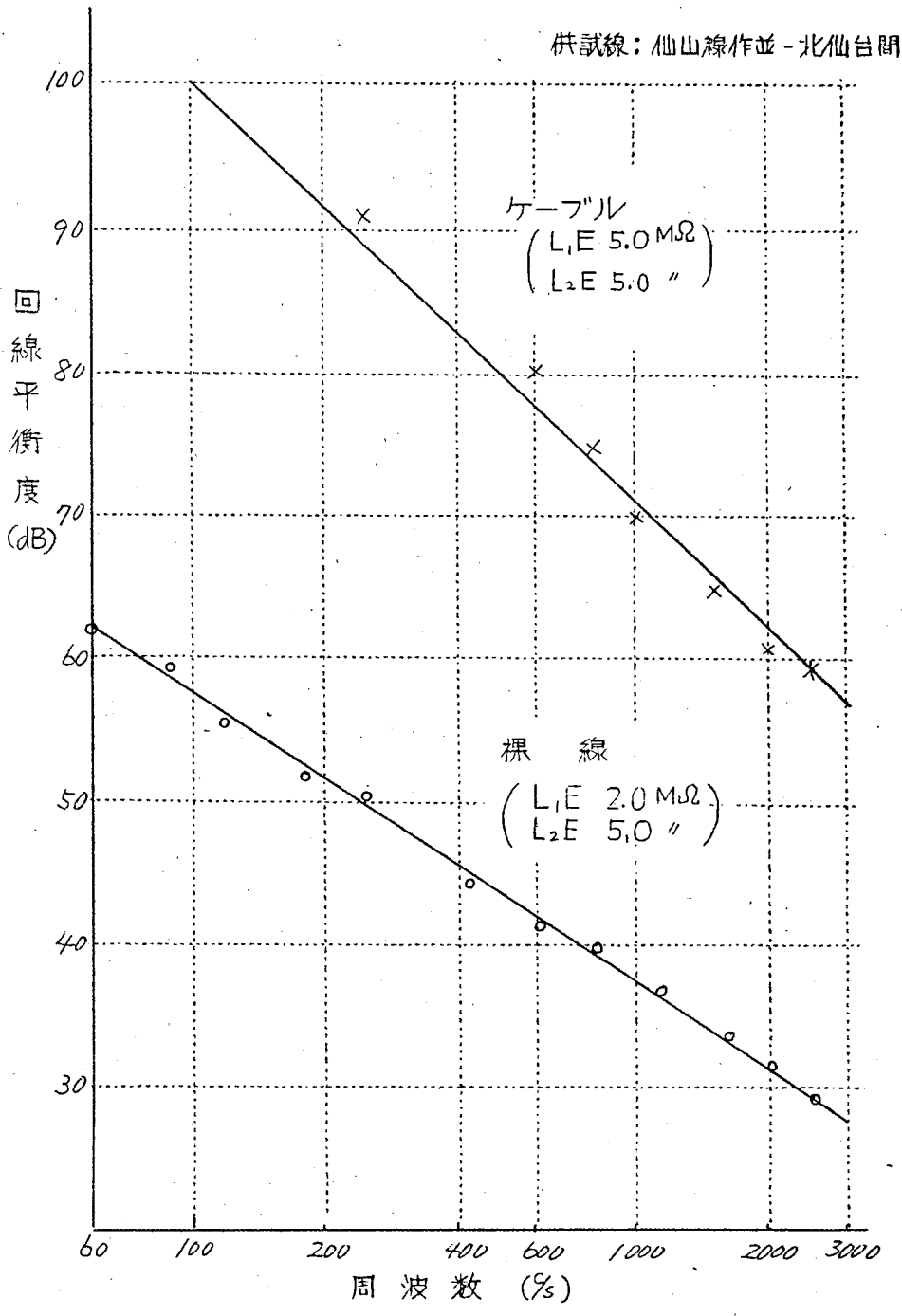


図4.24 回線平衡度の周波数特性

4.5 誘導交叉実施例

電力側高調波の誘導作用による通信側への雑音障害を少なくする方法の一つに通信回線を構成する線条の位置を適当な距離毎に交叉させる (Transposition) ことが非常に有効であることを4.4節で示した。このような目的を持つ交叉を特に誘導交叉と名付ける。国鉄では長距離中継線として架空裸線による搬送方式を利用している部分が非常に多い。この回線は原則として実回線のみを使用し回線長さも100km以上となる場合が多い。一方ローカル回線としては音声周波数帯による実回線重畳を行うことは出来るが、このような搬送中継線には重信交叉を実施していないので、幻影回線構成をした場合、その回線としては無交叉となるため非常に雑音が多くなる。これを改善するため特別の誘導交叉を実施した。その一例を次に示す。

広島、岩国向裸通信線は宮島電鉄からの誘導が多く通話困難を来していたので、オオノ脱木幻影回線2つに誘導交叉を実施試験した。この結果は表4.1に見るように約30dBの平衡度改善となり、雑音は約 $\frac{1}{30}$ に減少した。同じような試験を八王子、横浜向、金沢、富山向などで実施し何れも雑音量を²⁴⁾激減することができたので、これらの結果を整理して搬送交叉回線に実施する誘導交叉型式として図4.25に示すものを決定した。ここでは側回線相互間の搬送周波数帯漏話の増加することをおそれ、幻影回線の交叉を最大約2.7kmとしたが、これは図4.22または図4.23に見れば判る通りなるべく短い方が雑音量に有利となるので音声回線のみの場合は(漏話の心配も少ないので)、交叉最大長を1.0~1.5km程度に短かく設計した方が良い。

表4.1 誘導交叉による平衡度および雑音量改善

回線名	誘導交叉	1000%平衡度 (dB)	雑音平衡度 (dB)	雑音量 (mV)
#1,2	交叉前	27.3	28.7	61
	交叉後	60.6	49.5	2.9
#3,4	交叉前	29.0	34.5	32
	交叉後	60.7	43.5	2.5

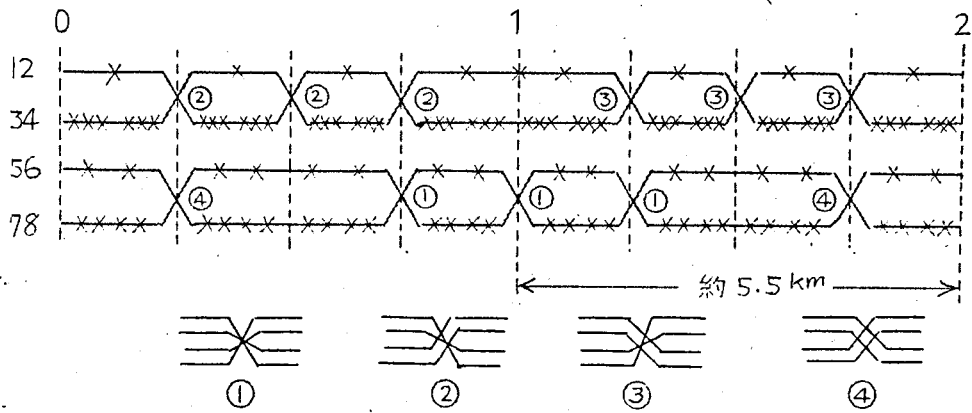


図4.25 国鉄搬送交叉回線用誘導交叉

4.6 平衡度の実状調査

4.6.1 通信回線の平衡度分布

東海道線沼津—静岡間、静岡—浜松間、高崎線、福米線、福島—米沢間等電化の際行なわれた通信回線の平衡度試験の結果を百分率分布にとりまとめると図4.26になる。

百分率分布の求め方は20dBより5dB間隔のきざみその間隔内の数を総数で割って求めた。

図より分かるように雑音平衡度の分布は、65dB以上が2.27%、60dB以上が13.6%、55dB以上が36.3%、50dB以上65.8%である。又50dBに達しない回線は35%程度であった。

次に1000%平衡度の分布は、65dB以上が7.8%、60dB以上が22.1%、55dB以上45%、50dB以上76%である。又50dBに達しない回線は26%程度であった。

次に図4.26の値を累積100百分率曲線で示すと図4.27のようになる。図より分かるように1000%平衡度が45dB以上のものおよび雑音平衡度が35dB以上のものは測定回線数のほぼ90%程度をしめて居る。

雑音平衡度と1000%平衡度の比較では、平衡度60dB以上の回線は1000%平衡度が約9%多く、50dB以上の回線でも9%程度多い。即ち同一曲線の雑音平衡度と1000%平衡度とは相違が見られその相違は約5~10dB程度であった。

次に非電化区間における実測の一例として常磐線および東北線レートの通信回線について平衡度分布を示すと図4.28の通りである。また非電化区間を一括した累積百分率曲線を求めると図4.29の通りとなる。

以上の結果より分かるように電化区間の実測では1000%平衡度と雑音平衡度の値が近く(大約5~10dBの差)非電化区間では両者の差が大きい(大約20dB程度の差)また電化区間と非電化区間の1000%平衡度の比較はほぼ同程度で目立った差異はない。雑音平衡度は明らかに電化区間がほぼ10~15dB程度非電化区間よりよい結果が得られている。これは非電化区間ではL₁E向雑音が低いため、L₁L₂向には平衡度に関係のない準漏話などによる雑音が混入し、見掛け上誘導雑音が増えた結果による。従って非電化区間では必ず1000%平衡度を求めておく必要がある。

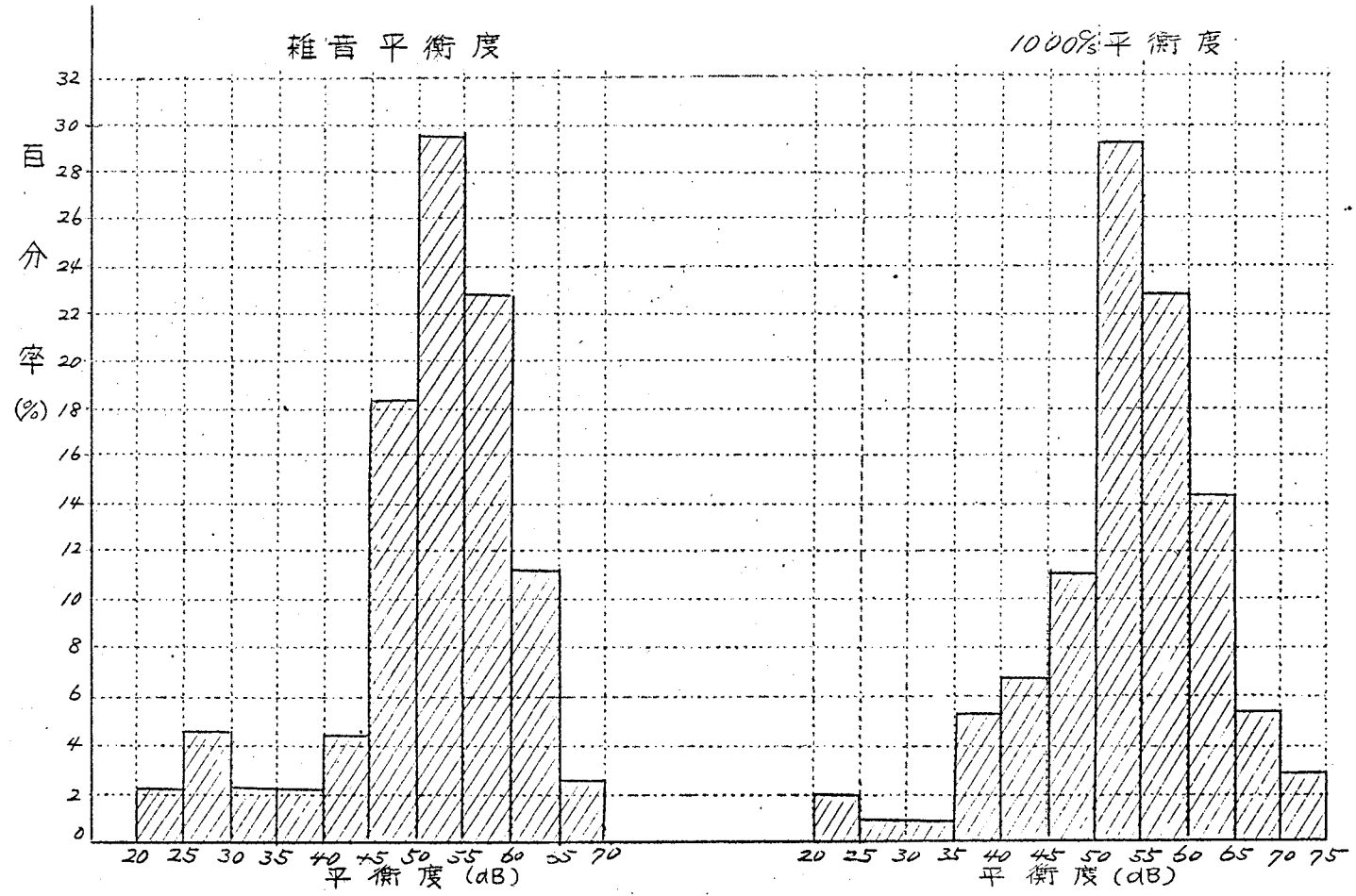


図4.26 通信回線の平衡度分布

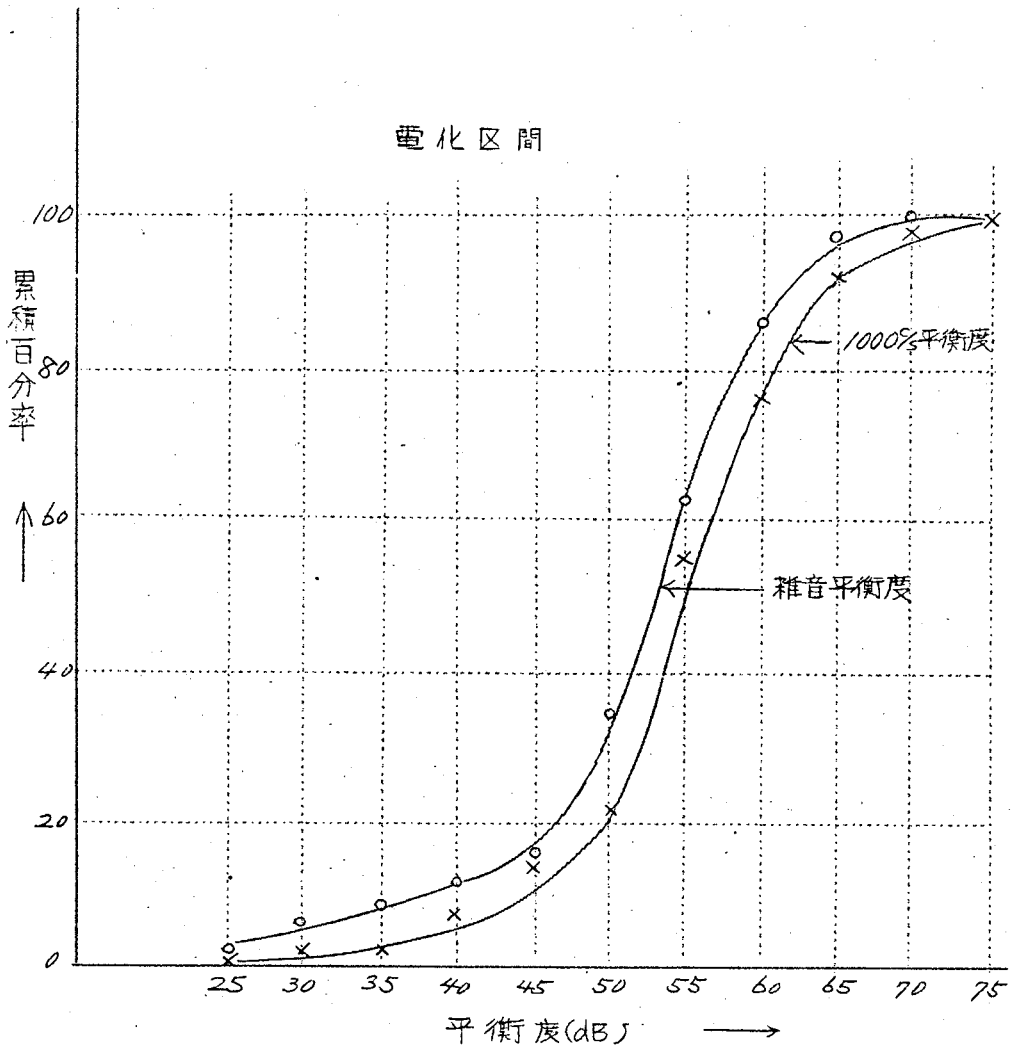


図4.27 平衡度の累積百分率

常磐，東北線

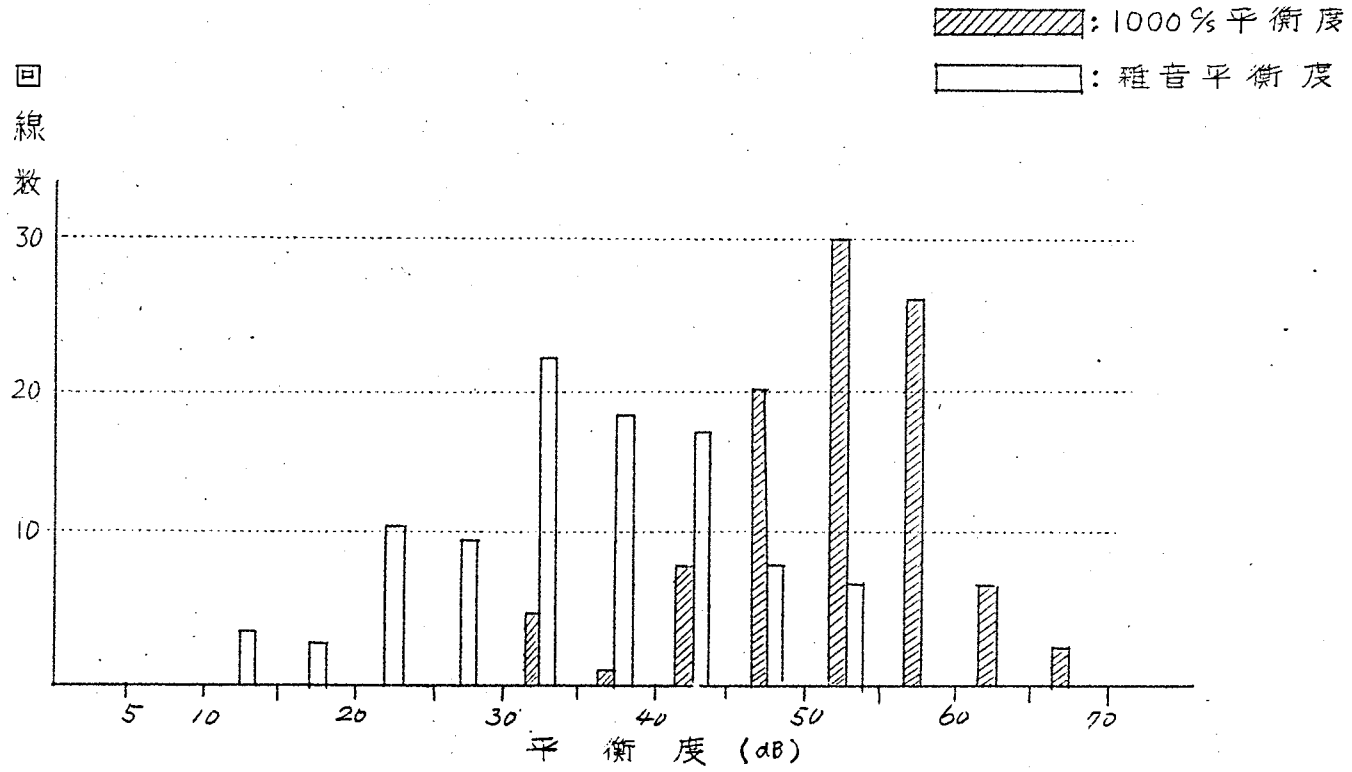


図4.28 平衡度頻度

非電化区間 (山陰, 北陸, 羽越, 信越, 常磐, 東北, 奥羽, 各線)

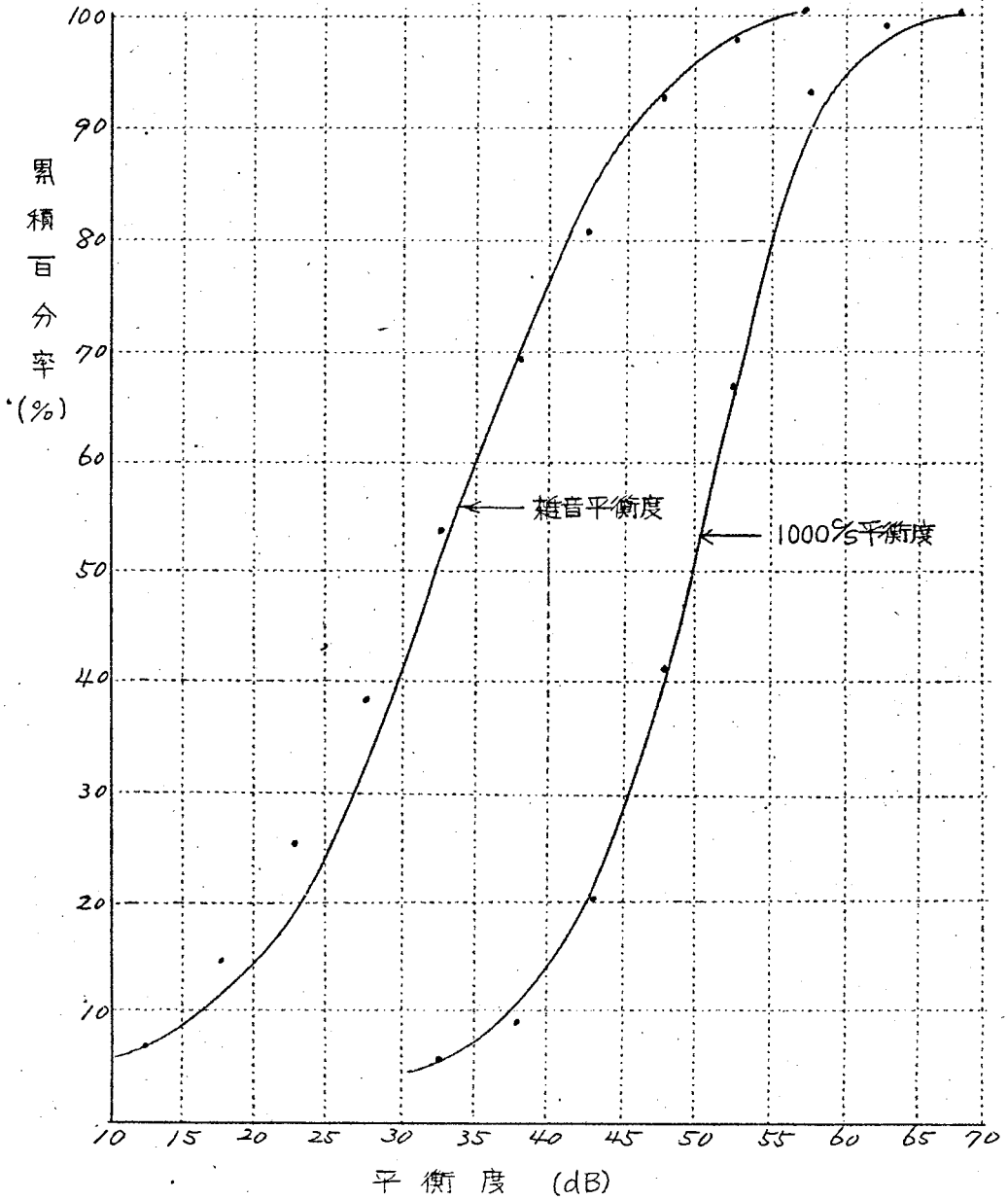


図4.29 平衡度の累積百分率

4.6.2 平衡度の時間的変動についての実測

富山、糸魚川間通信線において平衡度の連続記録測定を行い、其の間の平衡度の变化状況を見よ。

供試回線および測定回路を図4.30に示す。

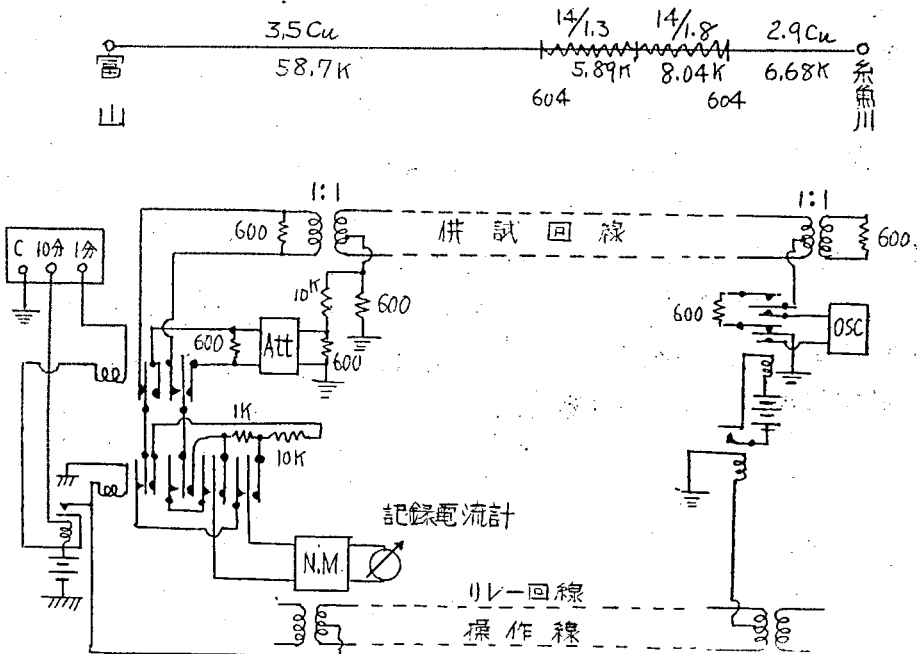


図4.30 平衡度変動の測定回路

即ち糸魚川に共振器 (O.S.C) をおき、1000%電流を10分おき、回線の中性点とアース間に加える。従つて10分おきに1000%平衡度および雑音平衡度を記録することになる。記録は富山側において、L,E電圧とL₁L₂電圧とを1分おきに切換えて、雑音電圧計 (N.M) に導き、記録電流計により自動記録した。この時の指針の振れを適当ならしめるため、L₁L₂ は600Ω端子より直接に、L,Eは600Ω端子を10kΩと600Ωに分圧し、更に抵抗減衰器 (Att) を適当に使用した。又1000% feedの場合はL₁L₂ いずれのレベルも大になるので、その上更に1kΩと100kΩで分圧した。

このような記録測定の結果より5分間毎に平衡度の平均値を求め、時間的の变化状況を示したものが図4.31である。

これから推論しうることは、

1° 1日における平衡度の変化範囲は1000%法50~60dB、雑音法40~50dBである。

2° 1000%平衡度は深夜に良く、昼間悪い。

3° 雑音平衡度は深夜に悪く、昼間良い。

4° 1000%平衡度の深夜における変化範囲が狭い。(55~60dB)

以上1°~4°の結果に対する原因を考察するに、

畠山・糸魚川間において、供試線路は、富山電鉄と約10kmの間近接、平行している部分がある。このため昼間は雑音電圧が高く、夜間終電後は雑音は特に少くなる。従って深夜には通信線相互間の漏話および誘導が無視できなくなり、雑音平衡度は悪くなる。1000%平衡度が雑音平衡度より、常に高いのは、前者はほぼ線路のみの大地に対する平衡を測るのに対し、後者は線路と起誘導線の平衡も関係するからである。又深夜、1000%平衡度が割合に安定なのは、気象条件が昼間より安定するためであろう。なお1000%平衡度を測定する場合は、1000%印加電圧を高くし、雑音および漏話の影響のないように注意した。

供試線 富山 - 直江津中継線 (富山 - 糸魚川間約79 km)

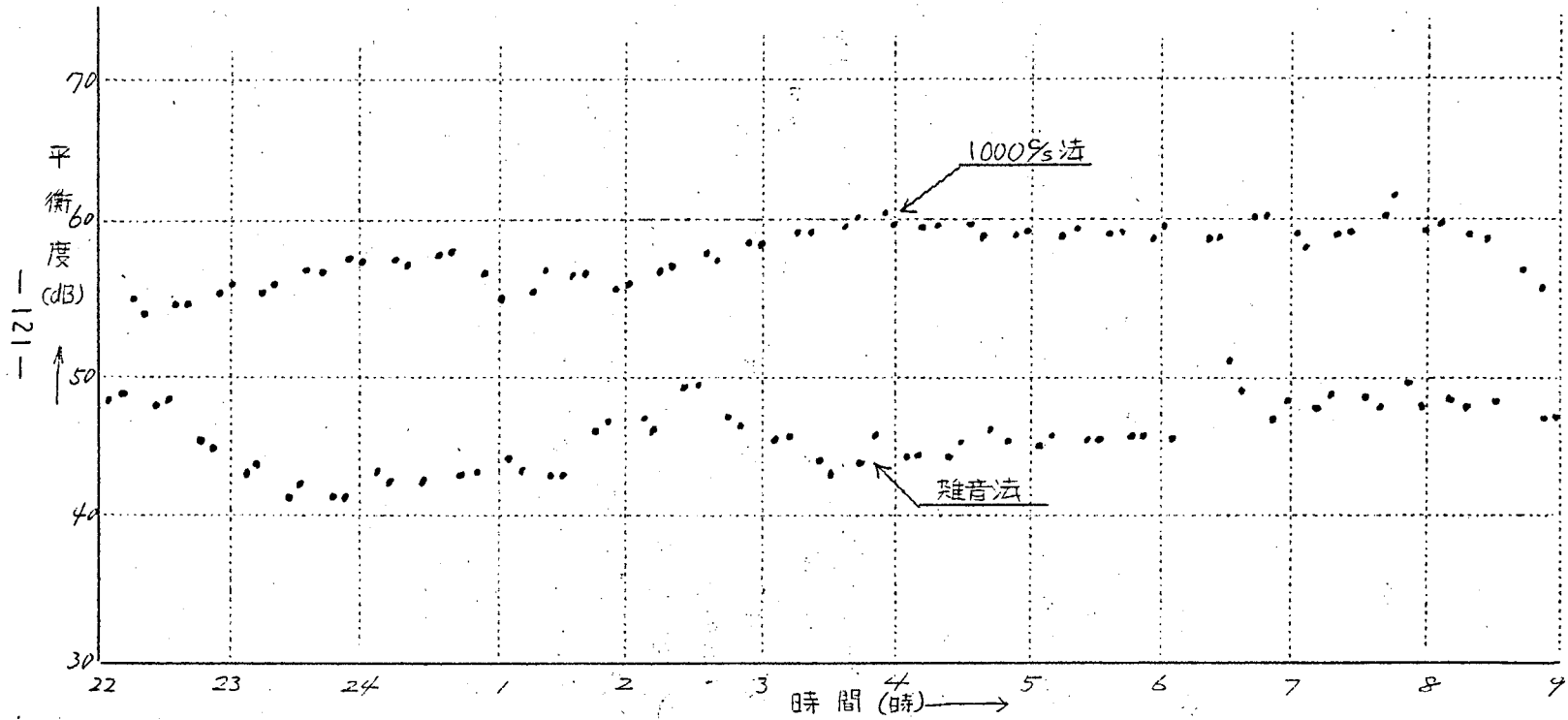


図4.31 遠端平衡度および雑音平衡度の変化 (天候曇時々小雨)

4.7 結 論

以上各種の計算および実測により得られた結論を列挙すると次のようになる。

1. 回線平衡度において不平衡量による影響を計算した結果は大地間不平衡に対して、 $20 \log_{10} 4r/30$ 、直列回路不平衡に対して、 $20 \log_{10} 4Z_0/g$ が得られ r に対地容量不平衡を g に直列リアクタンス不平衡を挿入した場合の周波数特性はそれぞれ f^{-1} に比例する曲線となった。仙山線、高崎線等の実測結果もほぼ f^{-1} に比例した。
2. 通常通信線の導体抵抗不平衡は小さいので回線平衡度の測定法における L、E 間の成端条件による相違はほとんど小さくいずれの成端条件によるも大差なく平衡度が求められる。
3. 回線平衡度は、樹木の接触、天候の変化（雨等）のない限り変動巾は小さい。
4. 回線平衡度と交叉間隔との関係は交叉間隔が小さい程良い結果が得られる。実測の結果では 500m 交叉より 1000m 交叉で 2.5~3 dB、2000m で 5~6 dB、4000m で 8~10 dB 夫々悪くなりほぼ交叉間隔が 2 倍になると、2.5~3 dB 悪くなる。
5. 通常の通信回線における雑音平衡度の周波数特性は計算の結果（静電結合における計算）は、ほぼ f^{-1} に比例することが分った。実測の結果では L、E 間の成端を開放した場合に計算と同様な f^{-1} に比例する結果が得られた。又成端条件が両端 600 Ω の場合には周波数の低い所で頭打ちとなった。
6. 雑音平衡度は L、E 間の成端条件で測定端 600 Ω にした場合先端の条件により大巾に変化するので雑音平衡度を測定する回路は一定にする方が良い。然し測定端を開放した測定回路では先端の条件に依る変化はすくなく 1~2 dB 程度の差であった。
7. 雑音平衡度の変動巾は起誘導側の変化に依り大巾に変動し約 10 dB 内外である。
8. 雑音の交叉に依る効果は交叉間隔が小さい程よく、雑音平衡度として交叉間隔 500m より 1000m 約 3~4 dB、1000m より 2000m で 5 dB、2000m より 4000m で 10 dB それぞれ悪くなった。
9. 従つて交叉の効果は回線平衡度より雑音平衡度に対する効果が非常に大きい即ち 4000m 交叉と 500m 交叉を比較すると後者は回線平衡度では 8~11 dB 雑音平衡度では約 18 dB 程度それぞれ改善された。
10. 国鉄電化区間の通信回線において 1000% 平衡度が 45 dB 以上のものおよび雑

音平衡度が35dB以上のものは測定回線数のほぼ90%程度をしめている。同一回線において雑音平衡度と1000%平衡度の相違は5~10dBで一般に1000%平衡度の方が良い。

11. 国鉄非電化区間（一部電鉄の影響を受けた区間）の1000%平衡度は雑音平衡度より20^{dB}程度よい。また電化区間と非電化区間の1000%平衡度の比較はほぼ同程度であるが雑音平衡度に対しては前者がほぼ10~15dB程度よい。従って非電化区間では1000%平衡度を実測しておくことがより重要で、これは将来の電化に際して雑音予測に役立つようになる。

第 5 章 交流電気運転における^{吸上}変圧器の効果

5.1 緒 言

日本国鉄が商用周波数による交流電化を計画した際、まずオ1の通信線に対する誘導障害が心配された。即ち日本は山岳多く、しかも人口稠密で、多くの通信線が鉄道沿線に併行しているからである。いま鉄道から10~300mの範囲内に近接する通信線に与える電磁誘導電圧を計算すると表5.1の通りである。

表 5.1 交流電化による電磁誘導電圧
(2×10^4 A.km 当り, BTなし)

大地導電率 (ν/m)	通信線離隔	
	10 m	300 m
0.001	2800 V	1400 V
0.01	2400	800
0.1	2000	300

たゞし、電車線地絡時に電車線回路に流れる電流を 2×10^4 A.km と予想した。表 5.1 に見るように電磁誘導電圧は大地の導電率によって大きな差があり、普通平地では $0.1 \nu/m$ 、山岳地帯は $0.001 \nu/m$ の程度と云われているので日本では殆んどどの地方で多数の通信線に誘導による危険 (電圧制限値 300 V) を与える結果となる。これに対する防護対策としては通信線をケーブル化することがまず考えられるが、この場合その遮蔽係数は $0.1 \sim 0.2$ の高遮蔽係数が要求される。高遮蔽の通信ケーブルは技術的には不可能ではないにしても非常に多数の通信線が近接する日本の現状では、電力側で処置する方が一層有利である。この目的に対しスエーデン国鉄で使用している吸上変圧器 (Boosting Transformer 以下 BT と省略) およびアメリカで実施している単巻変圧器は極めて効果的であるがこれらは何れも $25 \sim 16\frac{2}{3} \%$ の周波数による交流電化で実施したもので商用周波数による交流電化の場合のこれらの誘導軽減効果は未知であった。それ故両者を机上で比較検討した結果、われわれの要求に最も適するものとして BT の方がより小容量より小経費で実施できるという見通しを得たので 1955 年交流電化の試験線区である仙山線において始めて 200 A 用 78 kVA BT を設置し、その効果について試験を行うことにした。この結果その有効性を確認したのでこれに若干の改良を加えて以後の各交流電化区間に使用するようになった。

なお当初は基本波電流により生ずる誘導電圧を軽減することをオ1目的として BT

を設置したが、これは平常運転中に生ずる高調波成分による通信雑音障害に対しても非常に有効に働くこととなった。

BTを使用するとき電回路の代表的なものは図5.1に見る2通りがある。その1は、

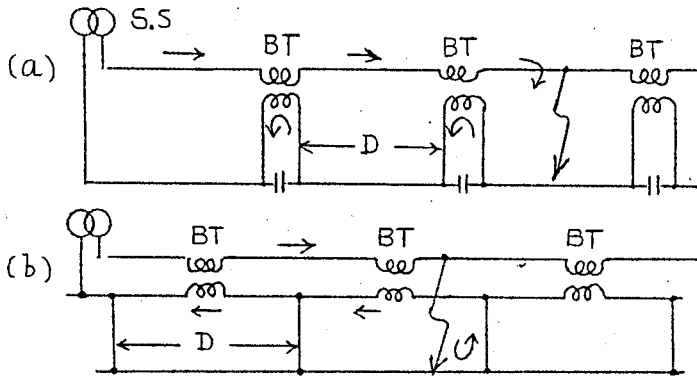


図5.1 吸上度圧器 (BT) のあるき電回路

BTの一次側巻線を電車線に接続し、二次側巻線は直接レール中性点にボンドする方式 (a) で他は二次側巻線を別に設けた負き電線に接続する方式 (b) である。この場合の負き電線はBTとBTとの中間の唯一点でレール中性点に接続される。BT設置間隔は関係する通信線と運転条件が与えられる場合その最適値が理論的に決められるが日本国鉄では標準設置として (b) 方式、間隔 $D = 4 \text{ km}$ を採用している。(a) 方式は (b) 方式に比較して後述するようになりに誘導軽減効果があるため現在までは使用されていないが今後計画される簡易電化その他運転条件によっては使用される可能性がある。

5.2 吸上度圧器を有するき電回路のレール中の電圧電流

電気鉄道において外部誘導電界を弱めるためには、帰電流が大地へ漏洩する部分となるべく少くするか、出来得べくんば帰電流は電車線に近く設けられた第2の導体を通るようにすることである。BTは正にこのような役目を果たすべく設計せられたもので、その巻線比を1:1とし、二次巻線電流が一次巻線電流になるべく等しくなることを目標としている。

次にこのようなBTを図5.1のように接続した場合のレール中の電圧電流の分布を求め、これが第2章に述べた場合に比較してどのように変化するかを調べよう。

5.2.1 吸上変圧器を直接電車線とレール間に挿入した場合 [図5.1 (a) 方式]

吸上変圧器の間隔をDとし、各区間の電車線電流 I_1 は等しいものと仮定する。レール中の電流は各区間で異なるのでこれについて考える。

i) 送電端区間について (図5.2)

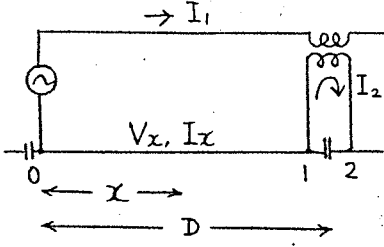


図5.2 (a)方式送電端

レール中の電圧および電流について式(2.2)と同様に次の式(5.1)(5.2)が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} V_x &= (Ae^{-\Gamma_2 x} + Be^{+\Gamma_2 x}) S_2 \\ I_x &= Ae^{-\Gamma_2 x} - Be^{+\Gamma_2 x} - n_0 I_1 \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

このにおいて

$$\left. \begin{aligned} A &= \left\{ (n_0 - 1) I_1 e^{+\Gamma_2 D} - (I_2 + n_0 I_1) \right\} / \left\{ e^{\Gamma_2 D} - e^{-\Gamma_2 D} \right\} \\ B &= \left\{ (n_0 - 1) I_1 e^{-\Gamma_2 D} - (I_2 + n_0 I_1) \right\} / \left\{ e^{\Gamma_2 D} - e^{-\Gamma_2 D} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

この区間のレール中を流れる平均電流は

$$I_{blm} = \frac{1}{D} \int_0^D I_x dx = \left\{ (2n_0 - 1) I_1 + I_2 \right\} \frac{1}{\Gamma_2 D} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2} - n_0 I_1 \quad (5.3)$$

ii) 中央区間について (図5.3)

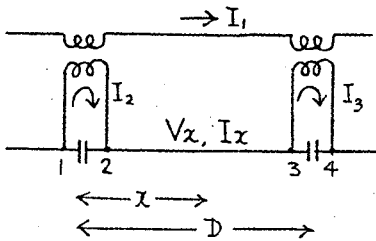


図5.3 (a)方式中央部分

この区間のレール中の電流および電圧についての解は式(5.1)と全く同形となる。しかしこの場合の積分定数A、Bは次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{(I_2 + n_0 I_1) e^{\Gamma_2 D} - (I_3 + n_0 I_1)}{e^{\Gamma_2 D} - e^{-\Gamma_2 D}} \\ B &= \frac{(I_2 + n_0 I_1) e^{-\Gamma_2 D} - (I_3 + n_0 I_1)}{e^{\Gamma_2 D} - e^{-\Gamma_2 D}} \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

この区間のレール中を流れる平均電流は

$$I_{b2m} = (2n_0 I_1 + I_2 + I_3) \frac{1}{\Gamma_2 D} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2} - n_0 I_1 \quad (5.5)$$

$I_2 = I_3$ ならば (実際のこのような場合が多い)

$$\left. \begin{aligned} A &= (I_2 + n_0 I_1) \frac{e^{\Gamma_2 D} - 1}{e^{\Gamma_2 D} - e^{-\Gamma_2 D}} \\ B &= (I_2 + n_0 I_1) \frac{e^{-\Gamma_2 D} - 1}{e^{\Gamma_2 D} - e^{-\Gamma_2 D}} \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

$$I_{b2m} = (I_2 + n_0 I_1) \frac{2}{\Gamma_2 D} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2} - n_0 I_1 \quad (5.7)$$

iii) 負荷区間について (図5.4)

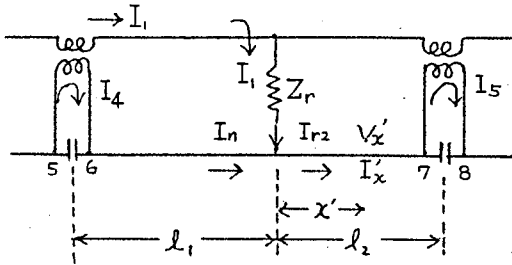


図5.4 (a) 方式負荷区間

負荷点 r を境としてこの区間を二分し、その左方 l_1 の長さの区間と、右方 l_2 の長さの区間とに分けて考える。

l_1 区間については、式 (5.4) および (5.5) において $I_2 \rightarrow I_4$, $I_3 \rightarrow I_{r1}$, $D \rightarrow l_1$ と置くことにより積分定数 A, B が求められる。また

l_2 区間については積分定数 A', B' を決めるための条件は r 点において $I_x = I_{r2}$, $I_5 = 0$ である。

$$\left. \begin{aligned} \therefore A' &= I_{r2} \frac{e^{\Gamma_2 l_2}}{e^{\Gamma_2 l_2} - e^{-\Gamma_2 l_2}} \\ B' &= I_{r2} \frac{e^{-\Gamma_2 l_2}}{e^{\Gamma_2 l_2} - e^{-\Gamma_2 l_2}} \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

また

$$I_{b4m} = I_{r2} \frac{1}{\Gamma_2 l_2} \frac{\cosh \Gamma_2 l_2 - 1}{\sinh \Gamma_2 l_2} = \frac{I_{r2}}{\Gamma_2 l_2} \tanh \frac{\Gamma_2 l_2}{2} \quad (5.9)$$

なお r 点において次の関係は成立する。

$$I_1 + I_{r1} = I_{r2}, \quad V_{br} = V'_{br}$$

ただし V_{br} は l_1 区間で見たり点のレール電位, V'_{br} は l_2 区間で見たり点のレール電位とす。

以上の結果を整理してレール各部の電圧を表示すると表5.2となる。

表5.2 BTのある (a) き電方式のレール電圧

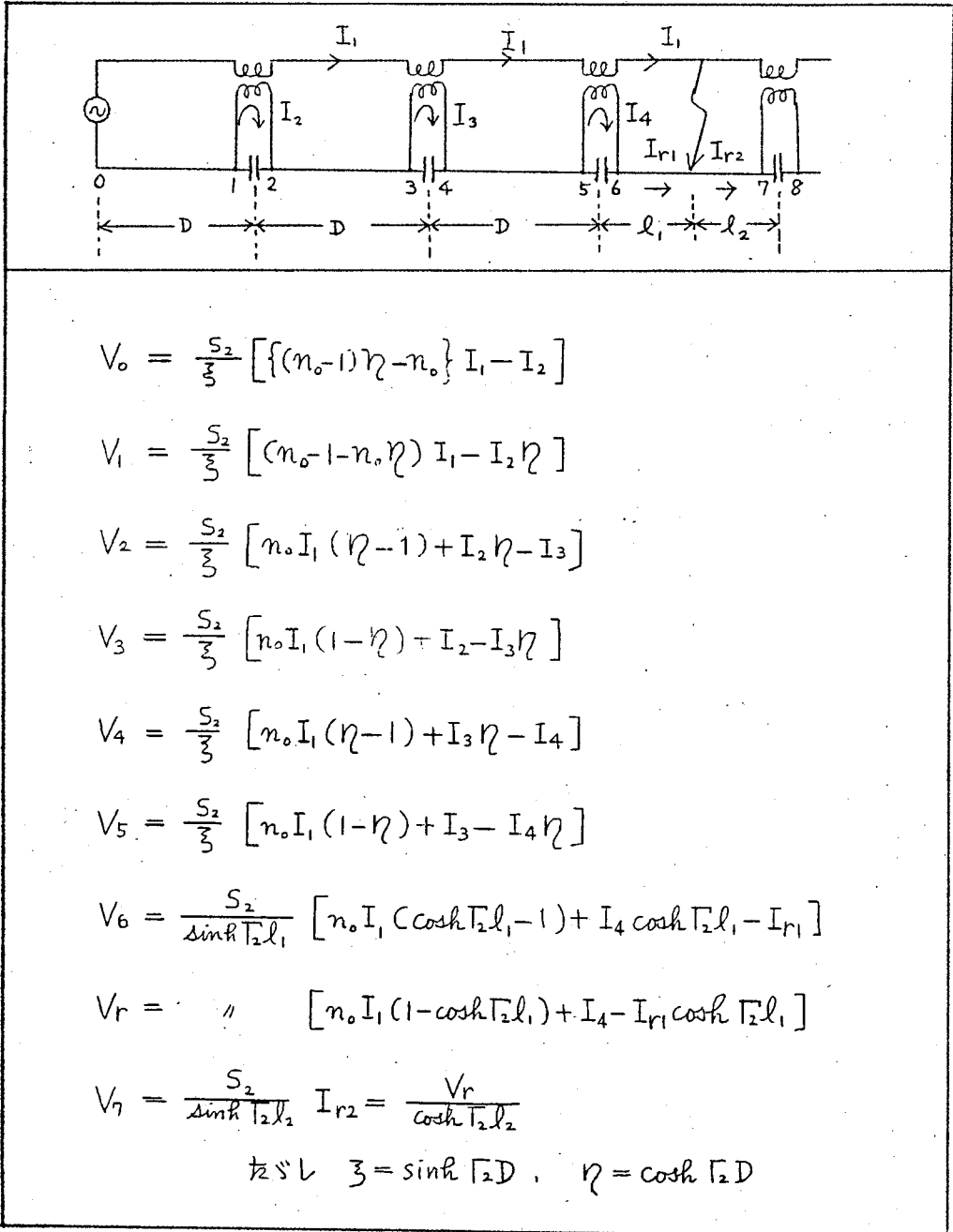


表5.3 BTのある(a)き電方式のレール電圧及び電流

送 端 区 間	$I_x = \frac{1}{3} \left\{ (n_0 - 1) I_1 \sinh \Gamma_2 (D - x) + (n_0 I_1 + I_2) \sinh \Gamma_2 x \right\} - n_0 I_1$ $V_x = \frac{S_2}{3} \left\{ (n_0 - 1) I_1 \cosh \Gamma_2 (D - x) - (I_2 + n_0 I_1) \cosh \Gamma_2 x \right\}$ $I_{bm} = \left\{ (2n_0 - 1) I_1 + I_2 \right\} \frac{1}{\Gamma_2 D} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2} - n_0 I_1$
中 間 区 間	$I_x = \frac{1}{3} \left\{ (I_2 + n_0 I_1) \sinh \Gamma_2 (D - x) + (n_0 I_1 + I_3) \sinh \Gamma_2 x \right\} - n_0 I_1$ $V_x = \frac{S_2}{3} \left\{ (I_2 + n_0 I_1) \cosh \Gamma_2 (D - x) - (I_3 + n_0 I_1) \cosh \Gamma_2 x \right\}$ $I_{bm} = (2n_0 I_1 + I_2 + I_3) \frac{1}{\Gamma_2 D} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2} - n_0 I_1$
l ₁ 区 間	$I_x = \frac{1}{3} \left\{ (I_4 + n_0 I_1) \sinh \Gamma_2 (l_1 - x) + (n_0 I_1 + I_{r1}) \sinh \Gamma_2 x \right\} - n_0 I_1$ $V_x = \frac{S_2}{3} \left\{ (I_4 + n_0 I_1) \cosh \Gamma_2 (l_1 - x) - (n_0 I_1 + I_{r1}) \cosh \Gamma_2 x \right\}$
l ₂ 区 間	$I'_x = \frac{I_{r2}}{\sinh \Gamma_2 l_2} \sinh \Gamma_2 (l_2 - x')$ $V'_x = \frac{I_{r2} S_2}{\sinh \Gamma_2 l_2} \cosh \Gamma_2 (l_2 - x')$ $I'_{bm} = \frac{I_{r2}}{\Gamma_2 l_2} \frac{\cosh \Gamma_2 l_2 - 1}{\sinh \Gamma_2 l_2}$
	$I_{r1} = I_4 + I_1 \left\{ n_0 - n_0 \cosh \Gamma_2 l_1 - \sinh \Gamma_2 l_1 \coth \Gamma_2 l_2 \right\} / \mathcal{D}$ $I_{r2} = I_4 + I_1 \left\{ n_0 + \cosh \Gamma_2 l_1 (1 - n_0) \right\} / \mathcal{D}$ $\mathcal{D} = \sinh \Gamma_2 l_1 \coth \Gamma_2 l_2 + \cosh \Gamma_2 l_1$

次にBTの二次側電流について次の式が成立つ (附録9)

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_m}{Z_2} + \frac{V_1 - V_2}{Z_2} \quad (5.10)$$

$$I_3 = -I_1 \frac{Z_m}{Z_2} + \frac{V_3 - V_4}{Z_2} \quad (5.11)$$

$$I_4 = -I_1 \frac{Z_m}{Z_2} + \frac{V_5 - V_6}{Z_2} \quad (5.12)$$

また、

$$I_1 = I_{r2} - I_{r1}, \quad I_{r2} = \frac{V_r}{S_2} \tanh \Gamma_2 l_2,$$

$$\therefore I_{r1} = \frac{V_r}{S_2} \tanh \Gamma_2 l_2 - I_1 \quad (5.13)$$

以上の結果より I_2, I_3, I_4 について次の連立式 (5.14) が成立つ。これを解いて I_2, I_3, I_4 を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_2 + \frac{S_2}{Z_2 \sinh \Gamma_2 l} [I_1 (2n_0 - 1 - 2n_0 \cosh \Gamma_2 l) - I_2 2 \cosh \Gamma_2 l + I_3] \\ I_1 &= I_3 + \frac{S_2}{Z_2 \sinh \Gamma_2 l} [I_1 2n_0 (1 - \cosh \Gamma_2 l) + I_2 - 2I_3 \cosh \Gamma_2 l + I_4] \\ I_1 &= I_4 + \frac{S_2}{Z_2 \sinh \Gamma_2 l} [I_1 (n_0 - n_0 \cosh \Gamma_2 l - a_1) + I_3 - I_4 (a_2 + \cosh \Gamma_2 l)] \end{aligned} \right\} (5.14)$$

ただし

$$a_1 = \frac{\sinh \Gamma_2 D}{\sinh \Gamma_2 l_1} \left\{ n_0 (\cosh \Gamma_2 l_1 - 1) + \frac{\coth \Gamma_2 l_2 + n_0 \tanh \frac{\Gamma_2 l_1}{2}}{\coth \Gamma_2 l_2 + \coth \Gamma_2 l_1} \right\}$$

$$a_2 = \frac{\sinh \Gamma_2 D}{\sinh \Gamma_2 l_1} \left\{ \cosh \Gamma_2 l_1 - \frac{1}{\coth \Gamma_2 l_2 + \coth \Gamma_2 l_1} \right\}$$

BT多数が縦続に接続せられる場合は、その中間区間における各BTの二次側電流 I_r ($r=2 \sim (r-1)$) についてほぼ成立するが) は何れもほぼ等しくなる。この条件を考慮に入れると、中間区間の I_r について次の式 (5.15) が得られる。

$$I_r = -I_1 \frac{1 + 2n_0 \frac{S_2}{Z_2} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2}}{1 + 2 \frac{S_2}{Z_2} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2}} \quad (5.15)$$

Z_2 が充分大になると $I_r \rightarrow I_1$ となる。

5.2.2 吸上変圧器と負き電線を有する場合 (図5.1 (b)方式)

図5.5にこの場合の各部電流分布を示す。電車線電流は各部とも等しくこの場合 I_a とする。負き電線電流は各部分において順次 $I_{c1}, I_{c2}, I_{c3} \dots$ とおき k 番目区間に電車負荷があるものとする。然らばこの場合次の諸式が成立する。(附録7)

$$\left. \begin{aligned} I_{c1} &= \frac{V_0 - V_1}{Z} - m I_1 \\ I_{c2} &= \frac{V_1 - V_2}{Z} - m I_1 \\ \vdots \\ I_{c(k-1)} &= \frac{V_{k-2} - V_{k-1}}{Z} - m I_1 \\ I_{cK} &= \frac{V_{k-1} - V_k}{Z} - m' I_1 \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{Z'_{13} - n_0 Z_{23}}{Z'_{33} - m_0 Z_{23}} \\ m' &= \frac{Z'_{13} - n_0 Z_{23}}{Z'_{33} - m_0 Z_{23}} \frac{l_1}{D} \\ n_0 &= \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \\ m_0 &= \frac{Z_{23}}{Z_{22}} \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

$$\left. \begin{aligned} Z &= \frac{1}{1 - m_0} (Z'_{33} - m_0 Z_{23}) D \\ Z'_{13} &= Z_{13} + Z_2 / D \\ Z'_{33} &= Z_{33} + Z_2 / D \end{aligned} \right\} \quad (5.18)$$

ただし Z_{12}, Z_{33} はレール, 負き電線の自己インピーダンス $Z_{13} \dots$ は①と③との相互インピーダンスとす。

$V_0, V_1, V_2 \dots$ はレール上の各点 0, 1, 2, \dots における電位として次の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} V_0 &\doteq \frac{1}{2} (m_0 - 1) I_{c1} Z_2 + \frac{1}{2} (n_0 - 1) I_1 Z_2 \\ V_1 &\doteq \frac{1}{2} (1 - m_0) (I_{c1} - I_{c2}) Z_2 \\ \vdots \end{aligned} \right\} \quad (5.19)$$

図5.5 吸上変圧器および負き電線を有する
き電回路の電流分布

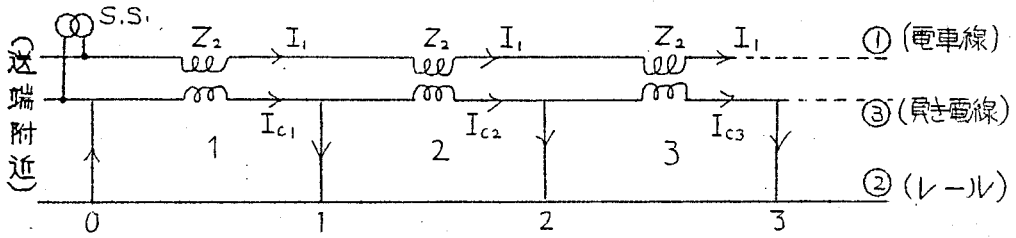


図5.5-1 電車線および
負き電線中の電
流分布

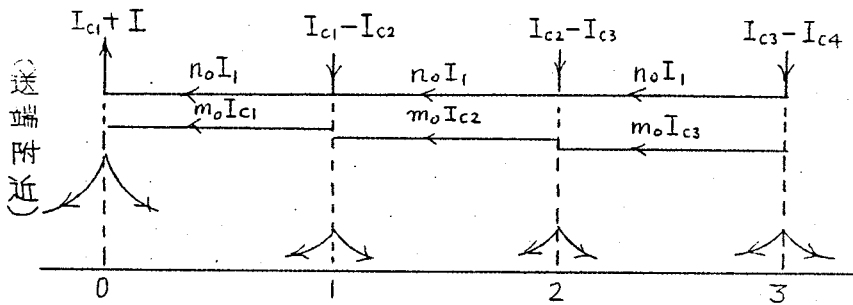
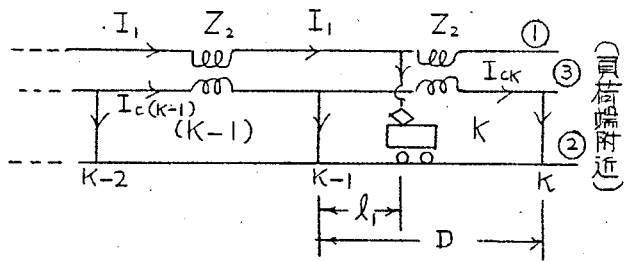
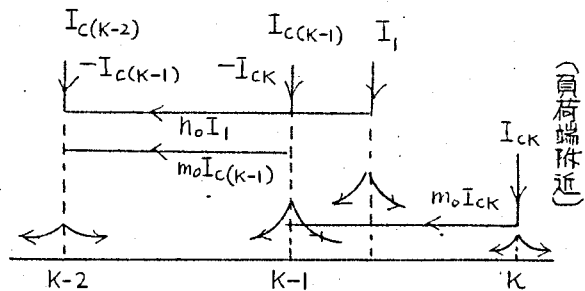


図5.5-2 レール中の
電流分布



$$V_{k-1} \doteq \frac{1}{2}(1-m_0)(I_{c(k-1)} - I_{ck})Z_2 + \frac{1}{2}(1-n_0)I_1 Z_2 e^{-\Gamma l_1} + \frac{1}{2}(1-m_0)I_k Z_2 e^{-\Gamma D}$$

$$V_k \doteq \frac{1}{2}(1-m_0)I_k Z_2 + \frac{1}{2}(1-n_0)I_1 Z_2 e^{-\Gamma(D-l_1)} + \frac{1}{2}(1-m_0)(I_{c(k-1)} - I_{ck})Z_2 e^{-\Gamma D}$$

以上の結果より I_{c1} を求めると

$$I_{c1} \doteq - \frac{m + (1-n_0) \frac{Z_2}{2Z}}{1 + (1-m_0) \frac{Z_2}{2Z}} I_a \quad (5.20)$$

また同様に $I_{c2}, I_{c3} \dots$ を求めることができるが、ここでは省略する。

ただし負荷端の電流分布は今後重要であるので、これを示すと次の通り。

$$\left. \begin{aligned} I_{c(k-1)} &= \frac{m(1-2d) + md + \beta \left\{ (1+d)e^{-\Gamma l_1} + d e^{-\Gamma(D-l_1)} \right\}}{1 + 3d + d^2} I_1 \\ I_{ck} &= - \frac{md + m'(1+d) + \beta \left\{ (1+d)e^{-\Gamma(D-l_1)} - e^{-\Gamma l_1} \right\}}{1 + 3d + d^2} I_1 \end{aligned} \right\} (5.21)$$

$$\text{ただし } d = \frac{Z_2}{2Z} (1-m_0)$$

$$\beta = \frac{Z_2}{2Z} (1-n_0)$$

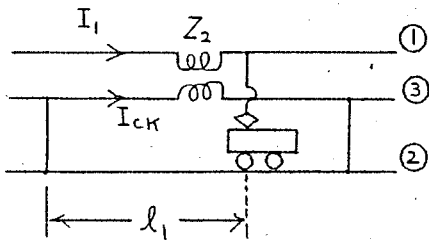


図5.6 負荷区間

次に負荷が Z_2 の右側に示る時は m' とし、

$$m' = \frac{Z_{13}'' - n Z_{23}}{Z_{33}'' - m Z_{23}} \cdot \frac{l_1}{D} \quad (5.22)$$

ただし $Z_{13}'' = Z_{13} + \frac{Z_2}{l_1}$ の値を取ればよい。

以上の結果は、レールの電位上昇を考慮して解いたものであるが、実用上あまり簡単ではないので、若干誤差の大なることを認めれば次のように扱えば便利である。

$$\left. \begin{aligned} I_{c1} &\doteq \frac{V_0}{Z} - m I_1 \\ I_{c2} &\doteq I_{c3} \doteq \dots \doteq I_{c(k-2)} \doteq -m I_1 \\ I_{c(k-1)} &\doteq - \frac{V_{k-1}}{Z} - m I_1 \\ I_{ck} &\doteq \frac{V_{k-1} - V_k}{Z} - m' I_1 \end{aligned} \right\} (5.23)$$

さらにレール中の電流分布は次のようになる。

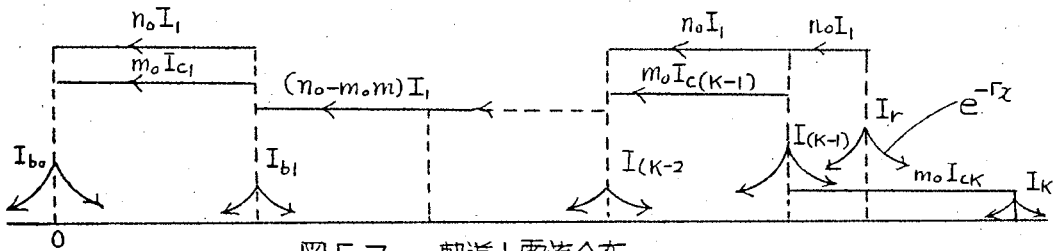


図 5.7 軌道上電流分布

$$\left. \begin{aligned}
 I_{b0} &= \frac{1}{2} (m_0 - 1) I_{c1} + \frac{1}{2} (n_0 - 1) I_1 \\
 I_{b1} &= \frac{1}{2} (1 - m_0) (I_{c1} + m I_1) \\
 I_{K-2} &= \frac{1}{2} (1 - m_0) (-m I_1 - I_{c(K-1)}) \\
 I_{K-1} &= \frac{1}{2} (1 - m_0) (I_{c(K-1)} - I_{cK}) \\
 I_r &= \frac{1}{2} (1 - n_0) I_1 \\
 I_K &= \frac{1}{2} (1 - m_0) I_{cK}
 \end{aligned} \right\} (5.24)$$

ここで $n_0 I_1$, $m_0 I_{c1}$, ... は夫々 I_1, I_{c1} , ... に基づく誘導電流であり、各区間のレールに一定に流れる。 $I_{b0}, I_{b1}, \dots, I_K, I_r$ は軌道上の各点 $0, 1, \dots, r$ においてレールに流れる減衰電流で、軌道上では \exp に分布する。即ち I_r について言えば、 r 点より x だけ離れた点では、この電流は $I_r e^{-\Gamma x}$ となる。

なお以上の電流の流れる方向を図中矢印で示してある。

さらに軌条電位の影響を無視すると、 0 点より $(K-1)$ 点までの区間のレールおよび負き電線の電流は、近似的に一定で次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned}
 \text{レール電流} \quad I_b &= n I_1 \\
 \text{負き電線電流} \quad I_c &= m I_1
 \end{aligned} \right\} (5.25)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \text{ただし} \quad n &= \frac{n_0 Z'_{33} - m_0 Z'_{13}}{Z'_{33} - m_0 Z'_{23}} \\
 m &= \frac{Z'_{13} - n_0 Z_{23}}{Z'_{33} - m_0 Z_{23}}
 \end{aligned} \right\} (5.26)$$

m, n の計算の一例を図 5.8 に示す。図は吸上変圧器の励磁インピーダンス Z_2 を変数として計算をし、これを横軸として示したものであるが、この結果より推定できることは m および n は大地の導電率にはあまり関係はなく、吸上変圧器の励磁インピーダンス Z_2 によつて大きく変化する。通常 Z_2 はあるインピーダンス角度を持つが、 90° と 70° の場合を比較すると表 5.4 に示されるように殆んど m, n に相異はない。5.4.2 節に述べる通り Z_2 のインピーダンス角度は約 80° at 60% であるのでこの付近では m および n はまたインピーダンス角度に殆んど無関係である。

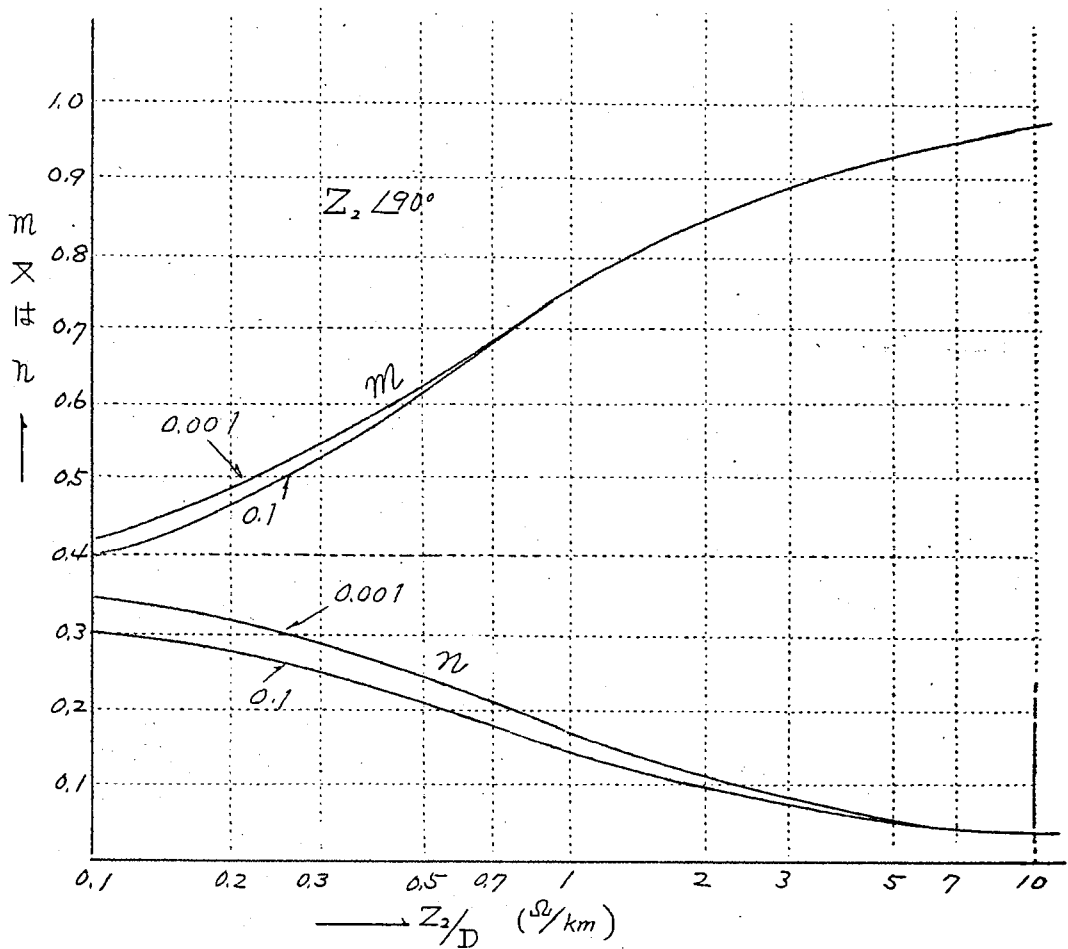


図 5.8 吸上変圧器の励磁インピーダンスと m, n の関係

表5.4 吸上圧圧器のインピーダンスと m 及び n の関係

(1) Z_2 の角度 $\angle 90^\circ$ の場合

Z_2/D	$\bar{\sigma} = 0.1 \text{ } \psi/m$		$\bar{\sigma} = 0.001 \text{ } \psi/m$	
	m	n	m	n
∞	1.00	0.0212 $\angle 17^\circ 00'$	1.00	0.0170 $\angle 13^\circ 00'$
10	0.964 $\angle 0^\circ 53'$	0.0385 $\angle 1^\circ 14'$	0.957 $\angle 0^\circ 55'$	0.0385 $\angle 3^\circ 18'$
5	0.927 $\angle 1^\circ 54'$	0.0546 $\angle 3^\circ 30'$	0.929 $\angle 1^\circ 38'$	0.0590 $\angle 6^\circ 43'$
2	0.842 $\angle 3^\circ 35'$	0.0958 $\angle 6^\circ 47'$	0.841 $\angle 3^\circ 25'$	0.109 $\angle 8^\circ 11'$
1	0.741 $\angle 5^\circ 42'$	0.144 $\angle 6^\circ 26'$	0.742 $\angle 5^\circ 19'$	0.166 $\angle 6^\circ 43'$
0.5	0.616 $\angle 7^\circ 53'$	0.200 $\angle 4^\circ 27'$	0.626 $\angle 5^\circ 48'$	0.233 $\angle 4^\circ 18'$
0.2	0.470 $\angle 9^\circ 31'$	0.268 $\angle 1^\circ 26'$	0.491 $\angle 4^\circ 46'$	0.310 $\angle 1^\circ 02'$
0.1	0.392 $\angle 9^\circ 39'$	0.300 $\angle 0^\circ 15'$	0.416 $\angle 4^\circ 54'$	0.346 $\angle 0^\circ 44'$
0	0.293 $\angle 8^\circ 33'$	0.343 $\angle 2^\circ 41'$	0.328 $\angle 6^\circ 25'$	0.395 $\angle 3^\circ 04'$

(2) Z_2 の角度 $\angle 70^\circ$ の場合

Z_2/D	$\bar{\sigma} = 0.1 \text{ } \psi/m$		$\bar{\sigma} = 0.001 \text{ } \psi/m$	
	m	n	m	n
∞	1.00	0.0212	1.00	0.0170 $\angle 13^\circ 00'$
10	0.970 $\angle 0^\circ 00'$	0.0397 $\angle 8^\circ 99'$	0.965 $\angle 0^\circ 03'$	0.0397 $\angle 7^\circ 35'$
5	0.915 $\angle 0^\circ 23'$	0.0560 $\angle 6^\circ 64'$	0.920 $\angle 0^\circ 05'$	0.0600 $\angle 6^\circ 08'$
2	0.832 $\angle 0^\circ 66'$	0.0968 $\angle 4^\circ 47'$	0.831 $\angle 0^\circ 27'$	0.109 $\angle 4^\circ 53'$
1	0.728 $\angle 1^\circ 20'$	0.144 $\angle 3^\circ 53'$	0.736 $\angle 0^\circ 31'$	0.165 $\angle 4^\circ 14'$
0.5	0.608 $\angle 2^\circ 09'$	0.199 $\angle 3^\circ 06'$	0.619 $\angle 1^\circ 35'$	0.229 $\angle 3^\circ 43'$
0.2	0.464 $\angle 3^\circ 90'$	0.263 $\angle 2^\circ 80'$	0.488 $\angle 3^\circ 02'$	0.305 $\angle 3^\circ 24'$
0.1	0.380 $\angle 5^\circ 30'$	0.299 $\angle 2^\circ 73'$	0.420 $\angle 4^\circ 09'$	0.343 $\angle 3^\circ 15'$
0	0.293 $\angle 8^\circ 33'$	0.343 $\angle 2^\circ 41'$	0.328 $\angle 6^\circ 25'$	0.395 $\angle 3^\circ 04'$

5.3 吸上変圧器の誘導軽減作用

吸上変圧器の機能の良否は運転中の二次巻線電流と一次巻線電流との比により表わされる。いまこれを吸上効率と定義する。図 5.1 (a) および (b) き電回路について、5.2 節の結果より吸上効率を求めると (5.28) および (5.29) のようになる。

$$\text{吸上変圧器の吸上効率 } m = \frac{\text{二次巻線電流 } I_2}{\text{一次巻線電流 } I_1} \quad (5.27)$$

$$\text{図 5.1 (a) の場合} \quad m = \frac{Z_2 + 2n_0 S_2 \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2}}{Z_2 + 2S_2 \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2}} \quad (5.28)$$

$$\text{図 5.1 (b) の場合} \quad m = \frac{Z_{13} + \frac{Z_2}{D} - n_0 Z_{23}}{Z_{33} + \frac{Z_2}{D} - m_0 Z_{23}} \quad (5.29)$$

- ただし、
 Z_2 = 吸上変圧器の励磁インピーダンス
 S_2 = レールの対地帰路キャパシタンス
 Γ_2 = レールの対地帰路伝播定数
 $n_0 = Z_{12} / \Gamma_2 S_2$
 $m_0 = Z_{23} / \Gamma_2 S_2$
 Z_{12} = 電車線とレール間の相互インピーダンス
 Z_{23} = レールとNF間の相互インピーダンス
 Z_{13} = 電車線とNF間の相互インピーダンス
 Z_{33} = NFの対地帰路直列インピーダンス
 D = 吸上変圧器の設置間隔

$$\text{吸上変圧器の誘導軽減係数 } k' = \frac{\text{吸上変圧器のあるき電回路の } A k_{em}}{\text{吸上変圧器のないき電回路の } A k_{em}} \quad (5.30)$$

次に吸上変圧器の誘導軽減係数 k' は、吸上変圧器を使用した場合電磁誘導電圧がどれだけ減少するかを示す係数で、式 (5.30) のように定義する。ただし $A k_{em}$ は起誘導回路の起誘導電流の大きさ (A) とその流れる区間の長さ (k_{em}) の積である。起誘導回路に近接する通信線への電磁誘導電圧は $A k_{em}$ にほぼ比例することが知られている。従って k' の値を検討することによって吸上変圧器の誘導軽減効果を知ることが出来る。すなわち定義より明らかのように k' の値を小さくする程吸上変圧器の誘導軽減効果は大となる。いま k' の各定数の関係を理論的計算により求めると式 (5.31)

の通りである。(附録8)

$$\text{図5.1(a)の場合 } k' = 1 - \frac{m-n_0}{1-n_0} \cdot \frac{2}{\Gamma_2 D} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2} \quad (5.31)$$

$$\text{図5.1(b)の場合 } k' = \frac{1-m-n}{1-n_0} \quad (5.32)$$

ただし、 m, n は式 (5.26) (5.28) で既に与えられている。

理想的に設計された吸上変圧器では $Z_2 \rightarrow \infty$ であるので $m \rightarrow 1.0$ となる。

それ故、

$$\left. \begin{array}{l} \text{(a)の場合 } k' \rightarrow 1 - \frac{2}{\Gamma_2 D} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2} \\ \text{(b)の場合 } k' \rightarrow m_0 - n_0 / 1 - n_0 \end{array} \right\} \quad (5.33)$$

となり k' は非常に小さくなる。 m および k' を Z_2 の関数として計算した1例を図5.9に与えた。計算の結果によると前出の如く m_0, n_0 および Γ_2 は大地導電率 σ には大して影響されないのでこの図5.9 ($\sigma = 0.01 \text{ } \mu\text{m}$ の計算) は σ のいずれの場合にもほぼ適用できる。

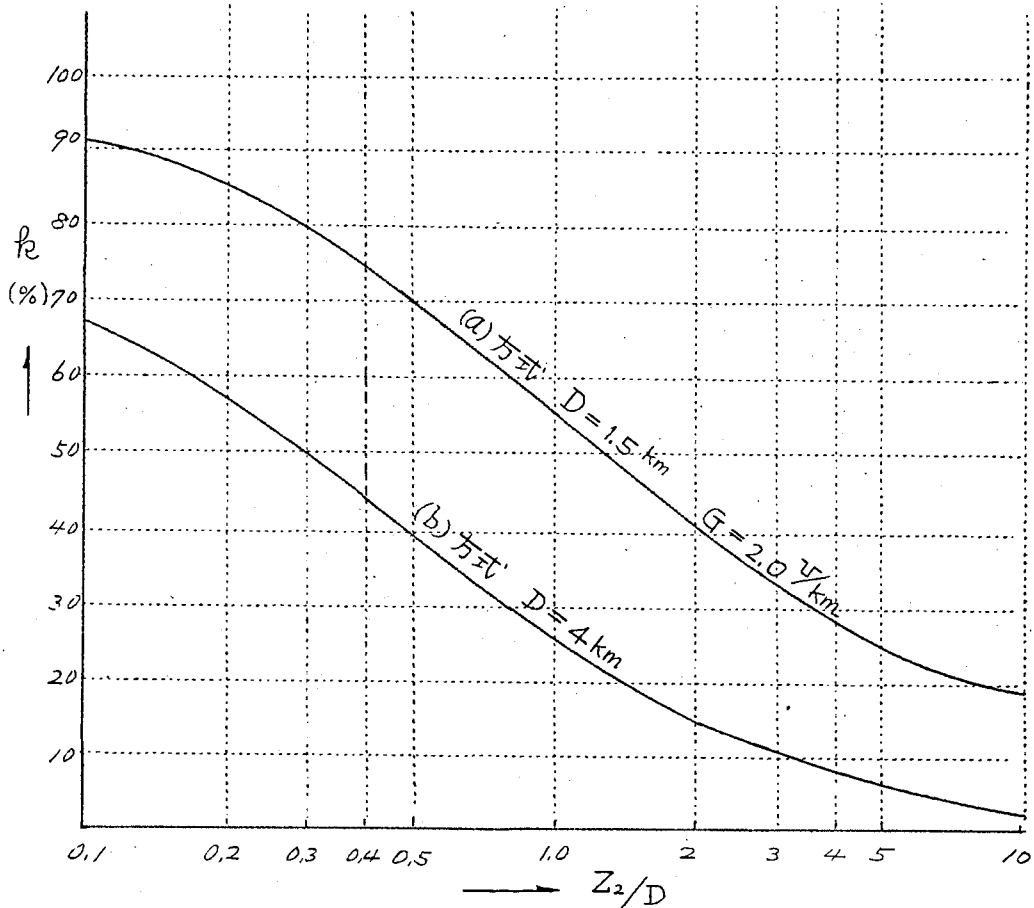


図 5.9 吸上変圧器の軽減係数 k'

5.4 吸上変圧器を使用したき電回路のインピーダンス

5.4.1 インピーダンス計算式

吸上変圧器を使用したき電回路では、普通のき電回路と比較してインピーダンスは増加し従って電圧降下は大きくなるものである。図 5.1 (a) および (b) の場合について中間吸上変圧器 1 台を含む l km 当りのインピーダンス Z を求めると式 (5.35) の通りとなる。(附録 9)

図 5.1 (a) の場合

$$Z = Z_{11} - n_0 Z_{12} - (m - n_0) Z_{12} \frac{2}{\Gamma_2 D} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2} + \frac{Z'_l}{D} \quad (5.34)$$

$$Z'_l = \frac{R Z_2}{R + Z_2} + Z_l \frac{Z_2}{R + Z_2} \quad (5.35)$$

$Z_l =$ 吸上変圧器の漏洩インピーダンス

$$R = \frac{2(1 - n_0) Z_2 S_2 \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2}}{Z_2 + 2n_0 S_2 \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2}} \quad (5.36)$$

m, n_0 その他は式(5.28)参照

m は一般に1より小さいが、 m が次第に1となるに従い Z'_l は次第に $(1-m)Z_2/D$ の値に近づく。例えば電車線地絡時などで吸上変圧器の一次巻線電流が異常に大きくなる時は、 Z_2 が正規の値より非常に小さくなりこのような場合は式(5.35)の代りにつぎの式

$$Z'_l = (1-m)Z_2 \quad (5.37)$$

を使用することができる。また正規運転中で吸上変圧器を理想変圧器に近いと考えられる時は式(5.35)より Z'_l は式(5.38)のようになることが判る。

$$Z'_l = (R + Z_l) \quad (5.38)$$

図5.1(b)の場合

$$Z = Z_{11} - m Z_{13} - n Z_{12} + Z'_l \frac{1}{D} \quad (5.39)$$

ただし

$$Z'_l = \frac{R Z_2}{R + Z_2} + Z_l \frac{Z_2}{R + Z_2}$$

$$R = (Z_{33} - \frac{1}{m} Z_{13} + \frac{n}{nl} Z_{23}) D \quad (5.40)$$

もし理想変圧器の場合のように、 Z_2 が非常に大きいときは Z'_l は式(5.38)に等しくなる。またこのとき $m \rightarrow 1.0, n \rightarrow 0$ となるので R は式(5.40)より、

$$R = (Z_{33} - Z_{13}) D \quad (5.41)$$

となる。従って式(5.39)は、

$$Z = Z_{11} + Z_{33} - 2 Z_{13} + \frac{Z_l}{D} \quad (5.42)$$

この結果は丁度電流が電車線と負き電線をループとして流れる場合のインピーダンスに等しく、この場合BTは漏洩インピーダンスのみを考えればよい。定格運転の状態では励磁インピーダンスは通常100Ω以上あり、負荷インピーダンス1〜3Ωに比較して理想変圧器に近い状態となる。従ってこの場合式(5.42)が成立する。し

かし故障時などで大電流が流れる場合はBTの励磁インピーダンスは鉄心飽和のため小となるので式(5.39)によらねばならない。この場合一般に定常運転の場合よりインピーダンスは小さくなる。

5.4.2 吸上変圧器の電氣的特性

日本国鉄で現在使用しているBTについて測定した励磁インピーダンスおよび漏れインピーダンスの特性を次に示す。

(1) 励磁インピーダンスの電流特性

BTの二次巻線端子を開放し、一次巻線に電流 I_1 (励磁電流) を流して一次巻線端子の電圧を測定する。この場合、電圧、電流に高調波を含むことがあるので、周波数分析器を使用して、その基本波成分のみを測定する。この結果を I_1 を横軸に $V/I_1 = Z_2$ (励磁インピーダンス) を縦軸として示すと図5.10の通りである。

図中に示したBT容量は、定格一次電流 I_1 について次のように定義される

$$\text{BT容量 KVA} = I_1^2 (Z_{33} - Z_{13}) D \quad (5.43)$$

ただし I_1 = BTの一次巻線電流定格値

この図を見ると励磁電流 1A以上では励磁インピーダンスは急激に下降する特性を持つことが判る。これは明らかに鉄心の磁気飽和に原因するもので、71.8 KVA 及び 16 KVA は最初に仙山線の試験区間に使用したもので定格時磁束密度的、10000 ガウス、64 KVA および 36 KVA はその後北陸線電化用に設計したもので定格時磁束密度はそれぞれ 5700 ガウス及び 4300 ガウスである。励磁インピーダンスは、直接 BT の誘導軽減効果 k' に関係があり、従って磁束密度の選定は過電流 (事故時) に対する k' に非常に重要である。

なお図5.10は使用状態における一次巻線電流と励磁インピーダンスとの関係曲線に書き改めたと非常に便利である。1例として図5.1(b)の接続で64 KVAのBTについてこれを求めると図5.11の通りとなる。この図は次の操作によって作図したものである。

BTの二次側に負荷インピーダンス ($Z_{33} - Z_{13}) D$ を接続した場合、その一次巻線電流 I_1 と励磁電流 I_0 との向には、巻数比 1:1 であるので簡単な変圧器等価回路を想定して近似的に次の式(5.44)の関係が求められる。

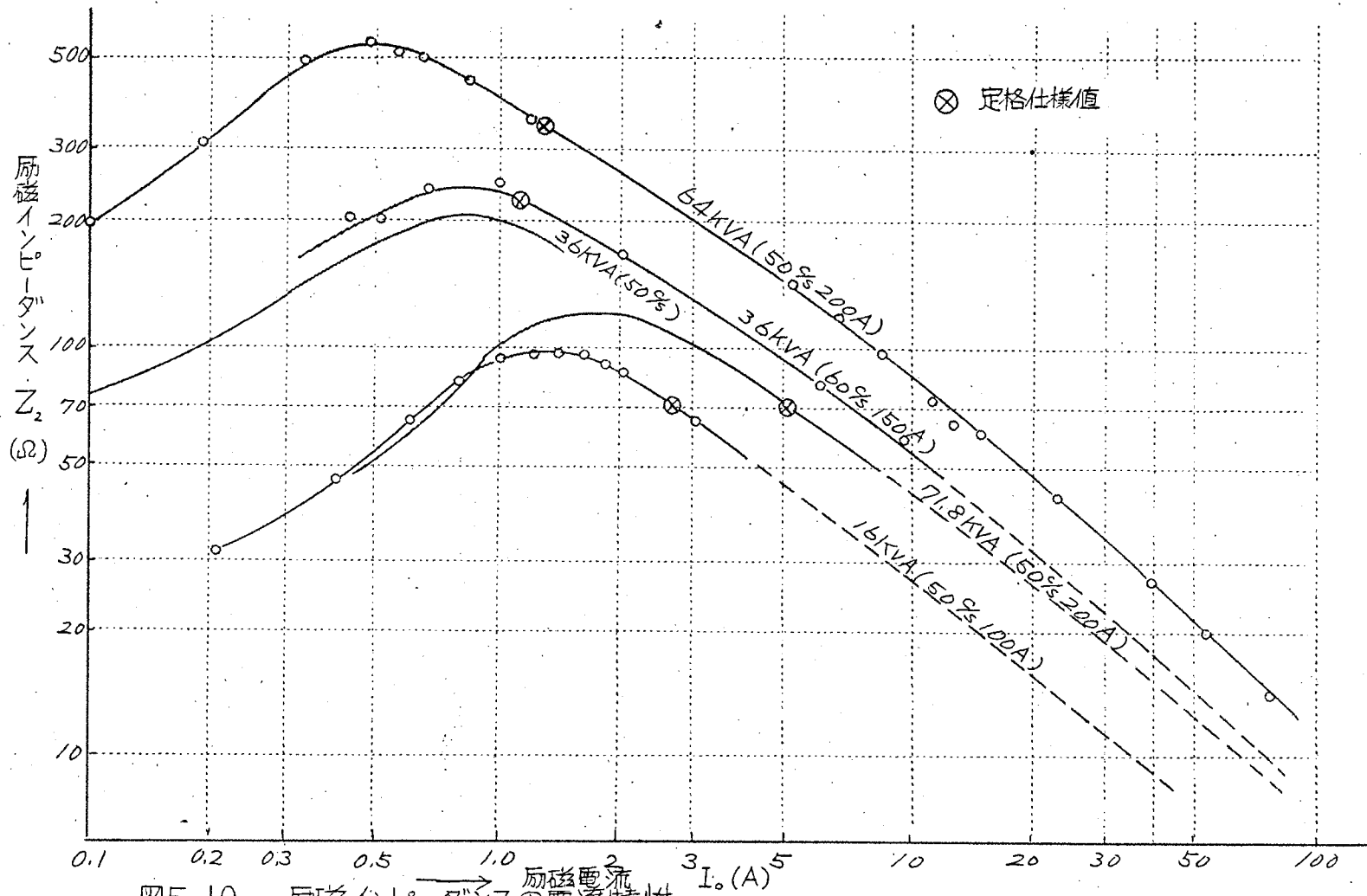


図5.10 励磁インピーダンスの電流特性

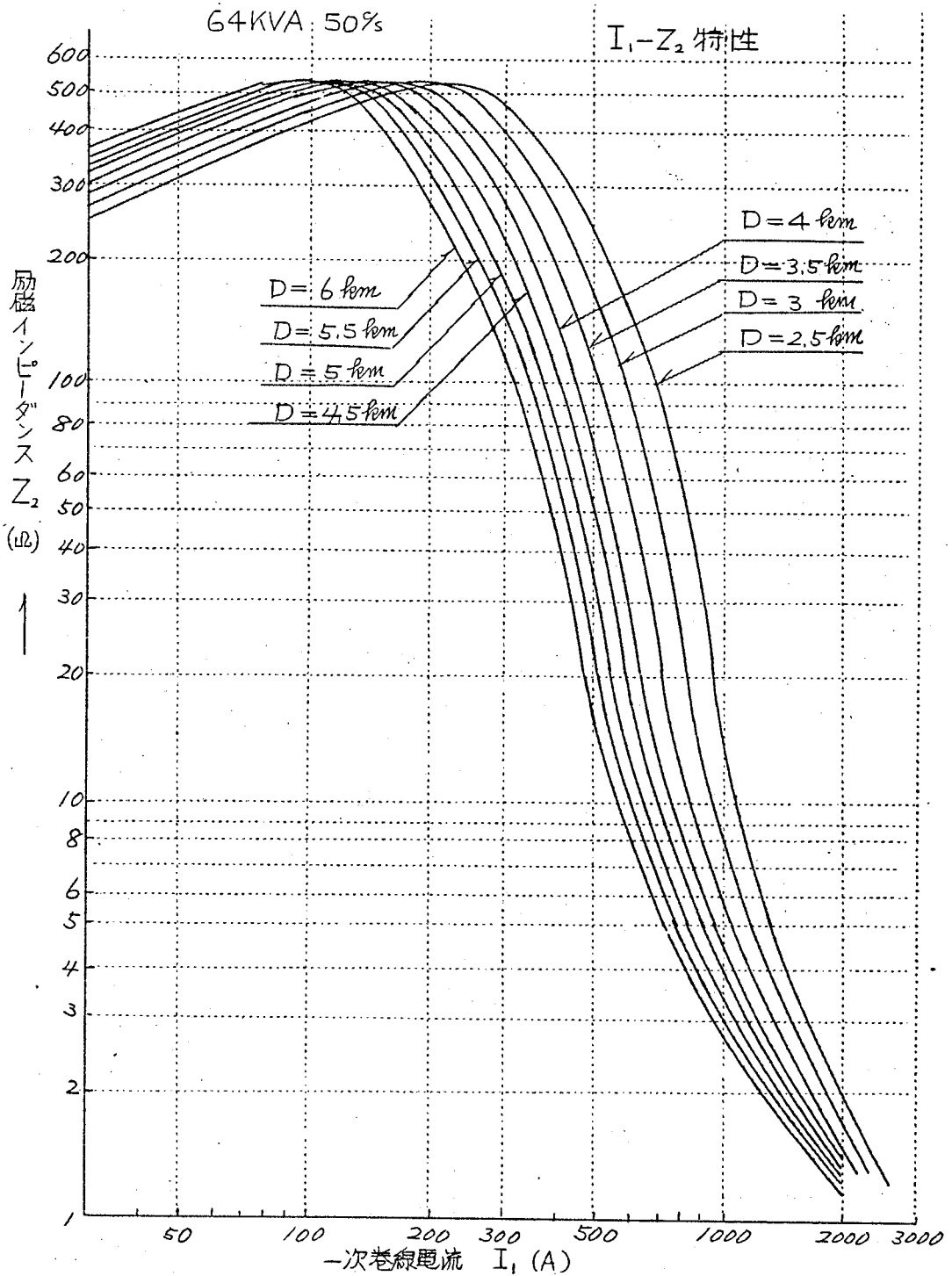


図5.11 一次巻線電流と励磁インピーダンス

$$I_1 = I_0 \left\{ 1 + \frac{Z_2}{R + Z_2} \right\}, R = (Z_{11} - Z_{12})D \quad (5.44)$$

この式により、 $I_0 - Z_2$ 曲線を D を媒変数として $I_1 - Z_2$ 曲線に書き改めることは容易である。即ち図5.10、 $I_0 - Z_2$ 曲線上の一点より I_0 、 Z_2 を定め、さらに別にとえられた変圧器間隔 D に対応する R を式 (5.40) または (5.41) より求め、またBTの漏洩インピーダンス Z_2 は次節に述べる方法により測定し、 0.135Ω とし、式 (5.44) にこれらの数値を代入して I_1 を求めることができる。このようにして順次 $I_0 - Z_2$ 曲線上の各点に対応する I_1 を求めて、これを $I_1 - Z_2$ 曲線として描くことにより図5.11が得られる。

(2) 励磁インピーダンスの周波数特性

電流特性を測定の場合と同じ方法で、唯電源に真空管発振器および電力増巾器を

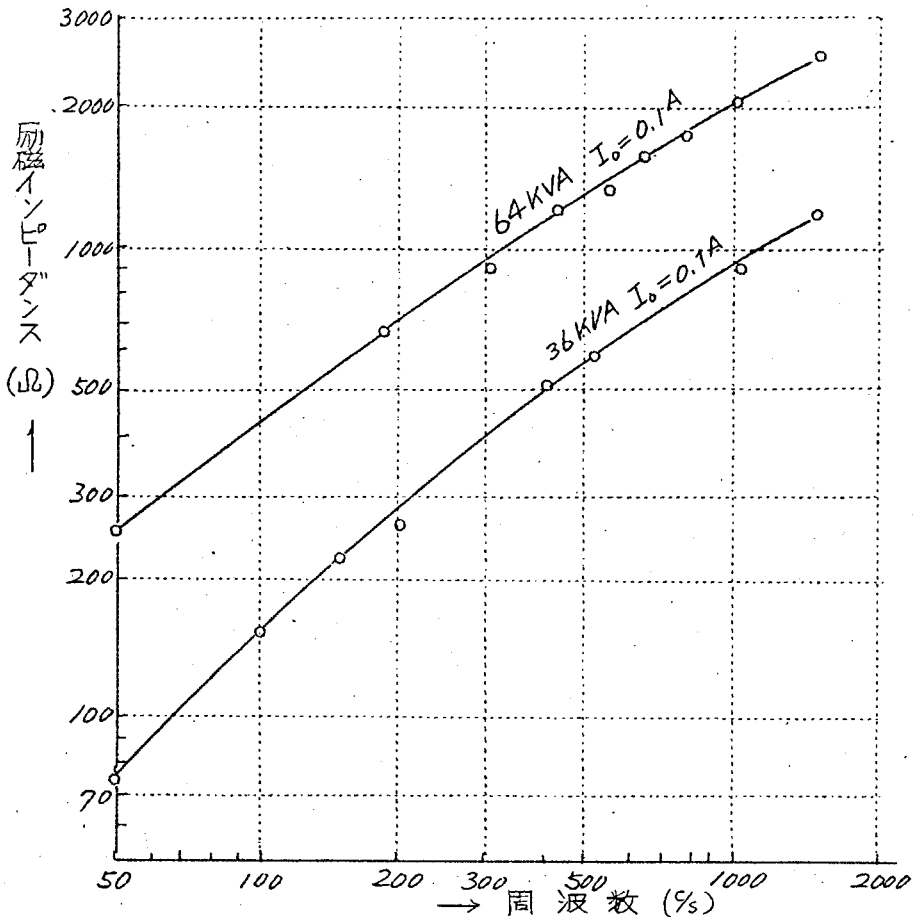


図5.12 励磁インピーダンスの周波数特性

使用して 50% ~ 2000% の電流を常に 0.1 A, 1 次巻線に流して測定した結果、
 図 5.12 が得られた。これにより判る事は、励磁インピーダンスはほぼ周波数の ω
 乗に比例し ω は 1 より小さいことである。また 16 KVA BT について電流特性、
 周波数特性およびインピーダンス位相角を示すと図 5.13 および図 5.14 の通りで
 ある。周波数の高い程、インピーダンスは比例直線より次第に下降し、また位相角
 は小さくなった。これらの原因は鉄心における高周波損失が周波数が高くなる
 と共に次第に大きくなるためであろう。BT が音声周波数帯において十分な吸上効果
 を挙げるためには、この点で高周波損失のあまり大とならぬよう注意すべきである。

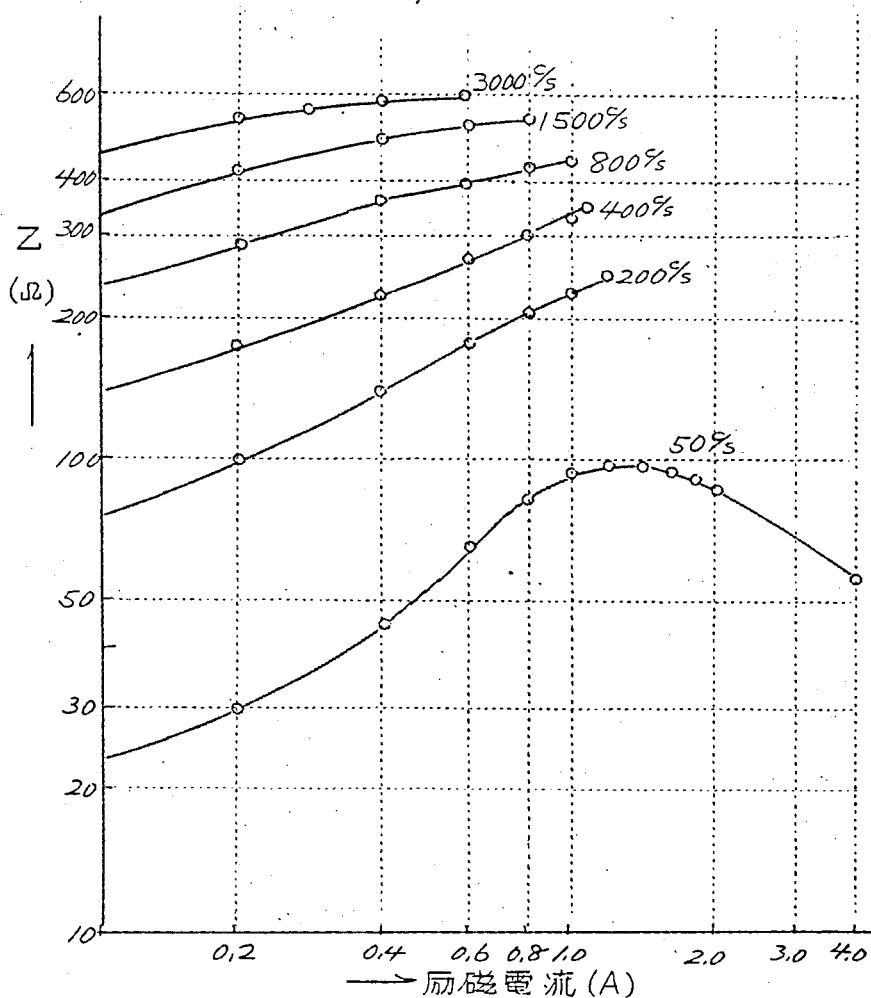


図 5.13 16 KVA BT の励磁インピーダンス電流及び周波数特性

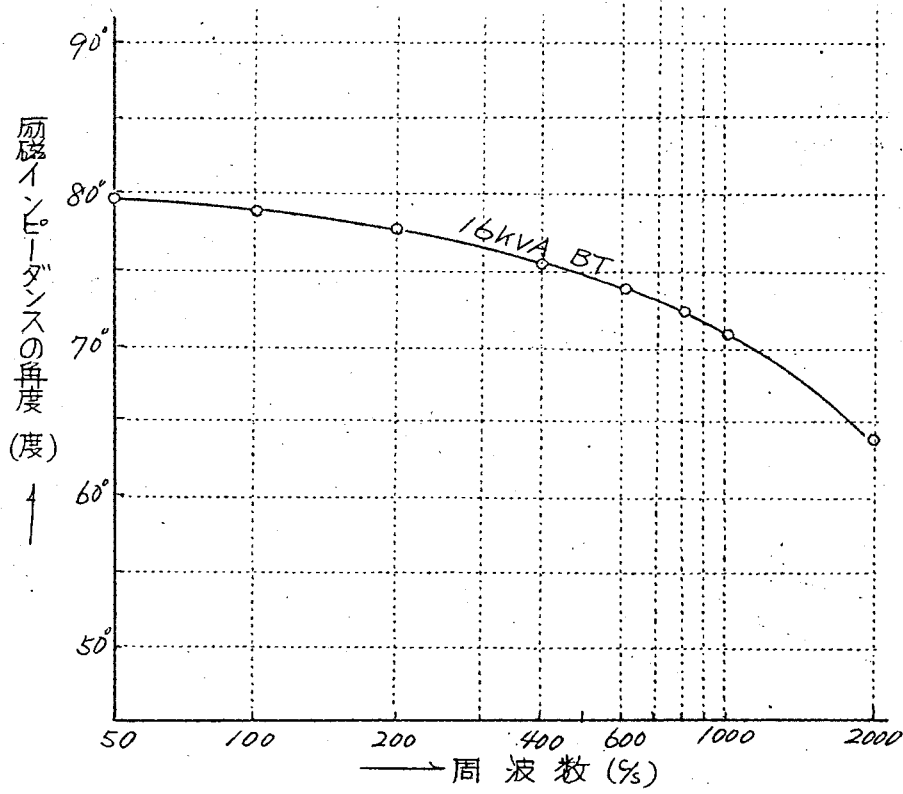


図5.14 励磁インピーダンス角度，周波数特性.

(3) 漏洩インピーダンスの電流特性及び周波数特性

BTの二次巻線端子を短絡し、一次巻線に電流を流して一次巻線端子間の電圧を測定する。この結果より漏洩インピーダンス $Z_l = V/I$ として求め各電流について図示すると図5.15の通りとなる。また電流を一定とし、周波数を50~2000%の範囲に変えて測定すると図5.16に示す特性が得られる。これにより、判ることは漏洩インピーダンスは電流の無関係に一定であること。および周波数に対しては、ほぼ周波数の1乗に比例して漏洩インピーダンスは大となる。ということである。これは漏洩インピーダンスが主として1次巻線と2次巻線間の間隙における漏洩磁束によって決定づけられているためと推定される。何れにしても商用周波数では、 $Z_l = 0.1 \sim 0.2 \Omega$ であり、変圧器容量が大きいく程、インピーダンスは大となっている。

漏洩インピーダンスは前述の通り電車線電圧降下に関係するので、なるべく小さくなるよう設計することが望ましい。

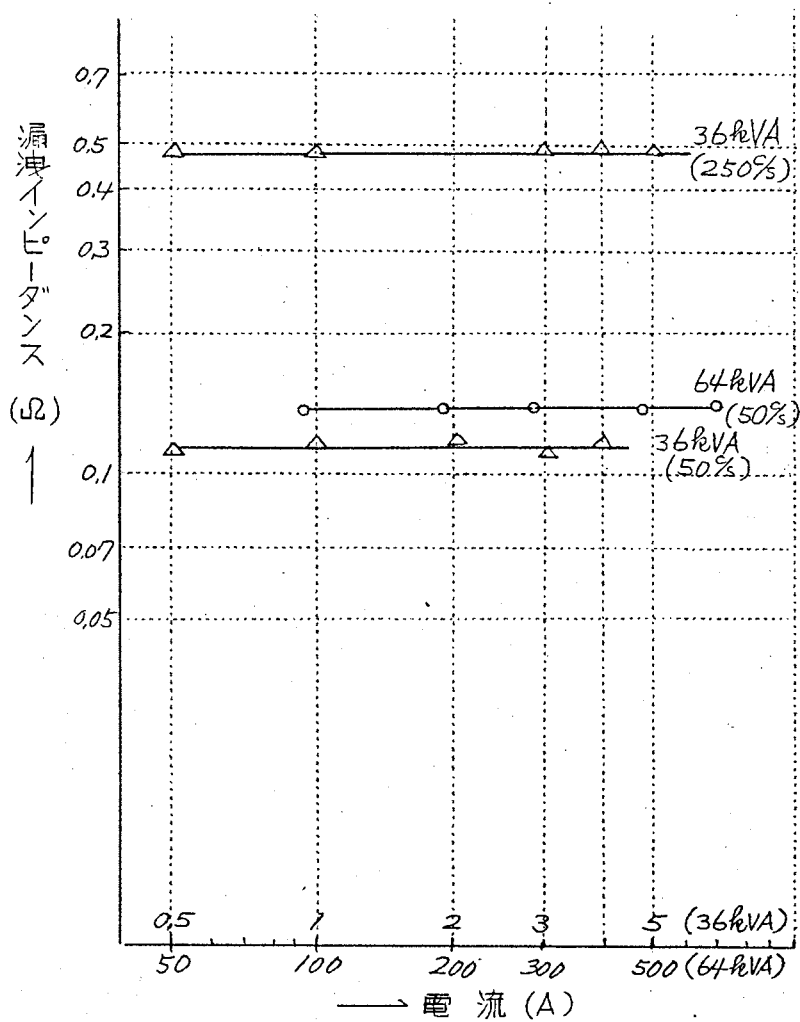


図5.15 漏洩インピーダンスの電流特性

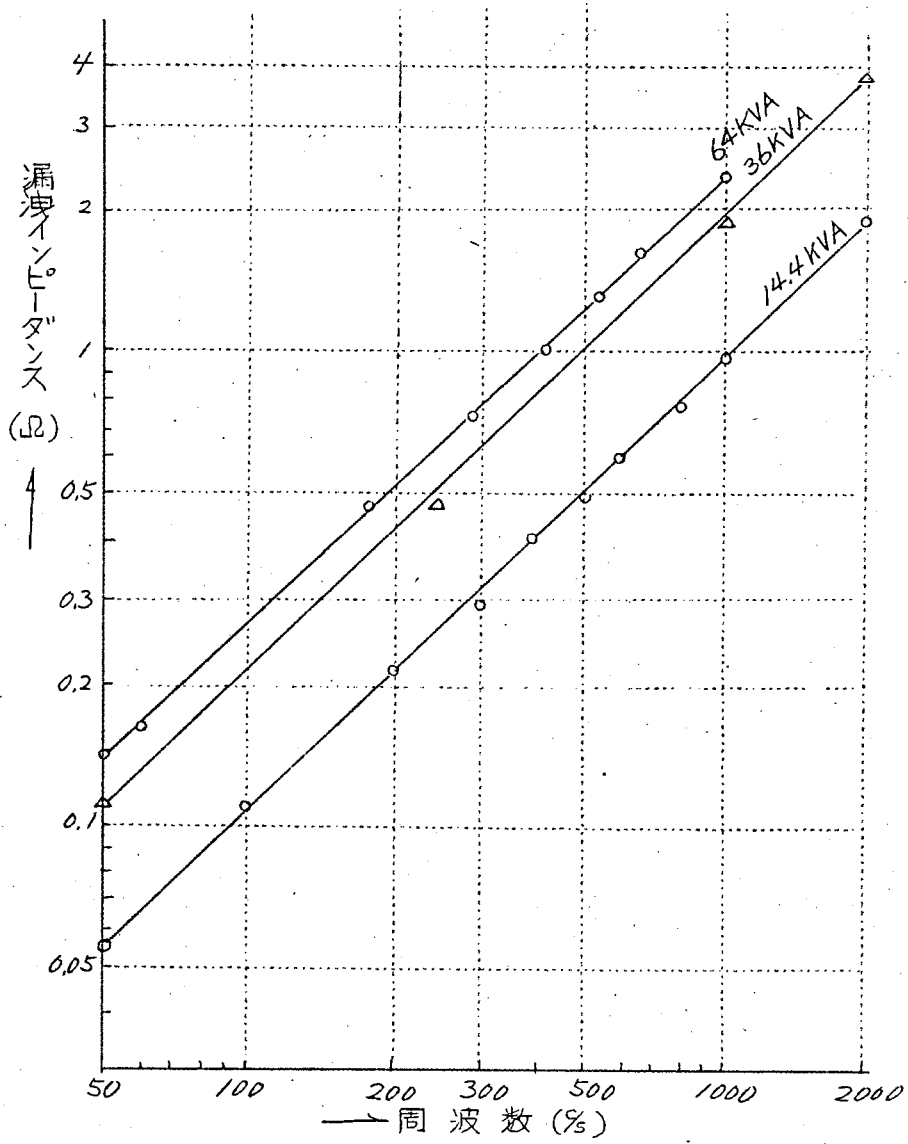


図5.16 漏洩インピーダンスの周波数特性

5.5 仙山線における実測例

5.5.1 電車線路インピーダンスの測定

仙山線北仙台・作並間に試験区間を設け、この間に4 km毎にBTを置き図5.17に示す電車線路回路について、北仙台側よりインピーダンス測定を行った。測定には通信直流インピーダンスブリッジを使用し、作並側で電車線とレールを短絡又は開放し、その時のインピーダンス Z_{sh} 又は Z_{op} を測定し、これより線路の4定数 Z, Y, Γ, S を計算上より求めた。図5.17(a)はBT, NFのある場合、(b)はBT, NFのない場合の等価回路である。

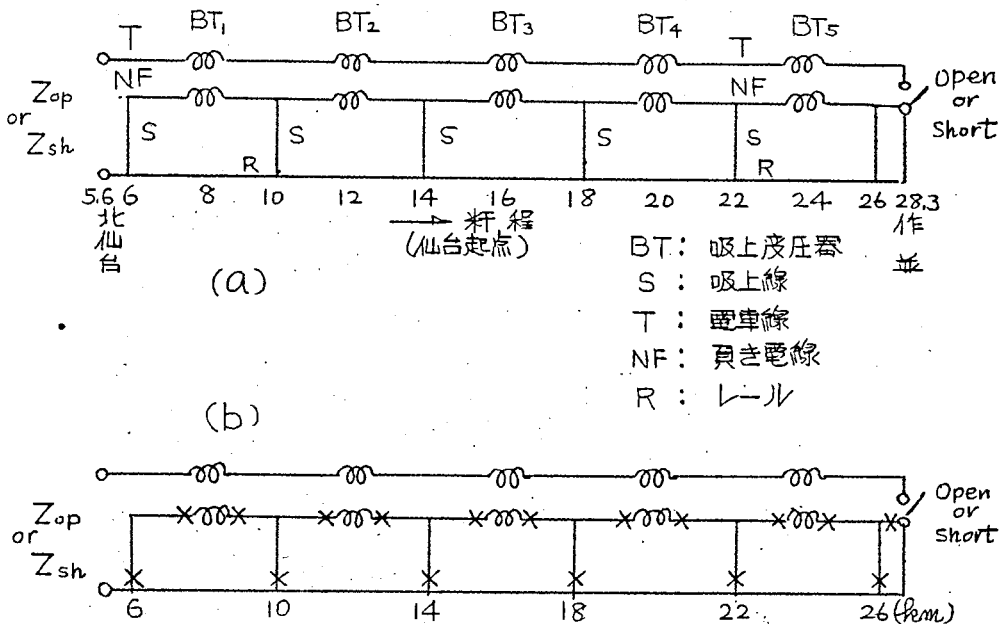


図5.17 北仙台・作並間電車線回路

これらについて測定および計算の結果、それぞれ表5.5(a)および表5.5(b)が得られた。またこの結果を横軸に周波数をとつて示すと図5.18の通りである。この図より(a)および(b)のいずれの場合も明らかに Z, Y, Γ はほとんど周波数の1乗に比例して大となることが判る。またサーゲインピーダンスはほとんど周波数に無関係に一定でBT, NFありの場合、約350Ω、BT, NFなしの場合約310Ωとなつた。また(a)回路と(b)回路との直列インピーダンス Z の差はBT, NFを接続し

表5.5 (a) 電車線路(BT. NFあり)インピーダンス特性

仙山線北仙台、作並向22.7km (BT.5ヶを含む)

周波数%	Z_{op}		Z_{sh}		Z		Y		Γ		S	
	Ω	$^{\circ}$	Ω	$^{\circ}$	Ω	$^{\circ}$	$-6V$	$^{\circ}$	-3	$^{\circ}$	Ω	$^{\circ}$
200	2380	-88.3	56	+79.3	2.45	77.6	18.6	88.0	6.75	83.8	363	-4.5
400	1080	-88.6	119	+82.9	5.06	83.4	39.2	88.6	14.1	86.0	359	-2.6
800	472	-88.1	271	+83.6	10.15	84.7	79.0	89.3	28.4	87.6	358	-2.3
1500	134	-81.6	975	+77.4	19.3	85.1	148.0	89.3	53.5	87.2	361	-2.1
3000	490	+71.3	375	-81.1	39.3	82.3	291.0	92.1	107.	87.2	368	-4.9

表5.5 (b) 電車線路 (BT. NFなし) インピーダンス特性

仙山線北仙台、作並向22.7km (BT. NFなし)

周波数%	Z_{op}		Z_{sh}		Z		Y		Γ		S	
	Ω	$^{\circ}$	Ω	$^{\circ}$	Ω	$^{\circ}$	$-6V$	$^{\circ}$	-3	$^{\circ}$	Ω	$^{\circ}$
200	2350	-88.0	42.0	77.7	1.85	79.7	18.8	90.0	5.88	84.9	314	-5.2
400	1096	-88.0	87.2	81.0	3.68	81.0	38.3	88.0	11.9	84.5	310	-3.5
800	497	-87.9	186.8	81.1	6.97	82.1	74.9	88.9	22.9	85.5	305	-3.4
1500	187	-84.9	520	78.6	14.1	85.9	144.5	88.9	45.1	88.6	312	-2.7
3000	141	+70.0	652	-74.2	29.7	84.5	280.	88.7	88.0	86.6	304	-2.9

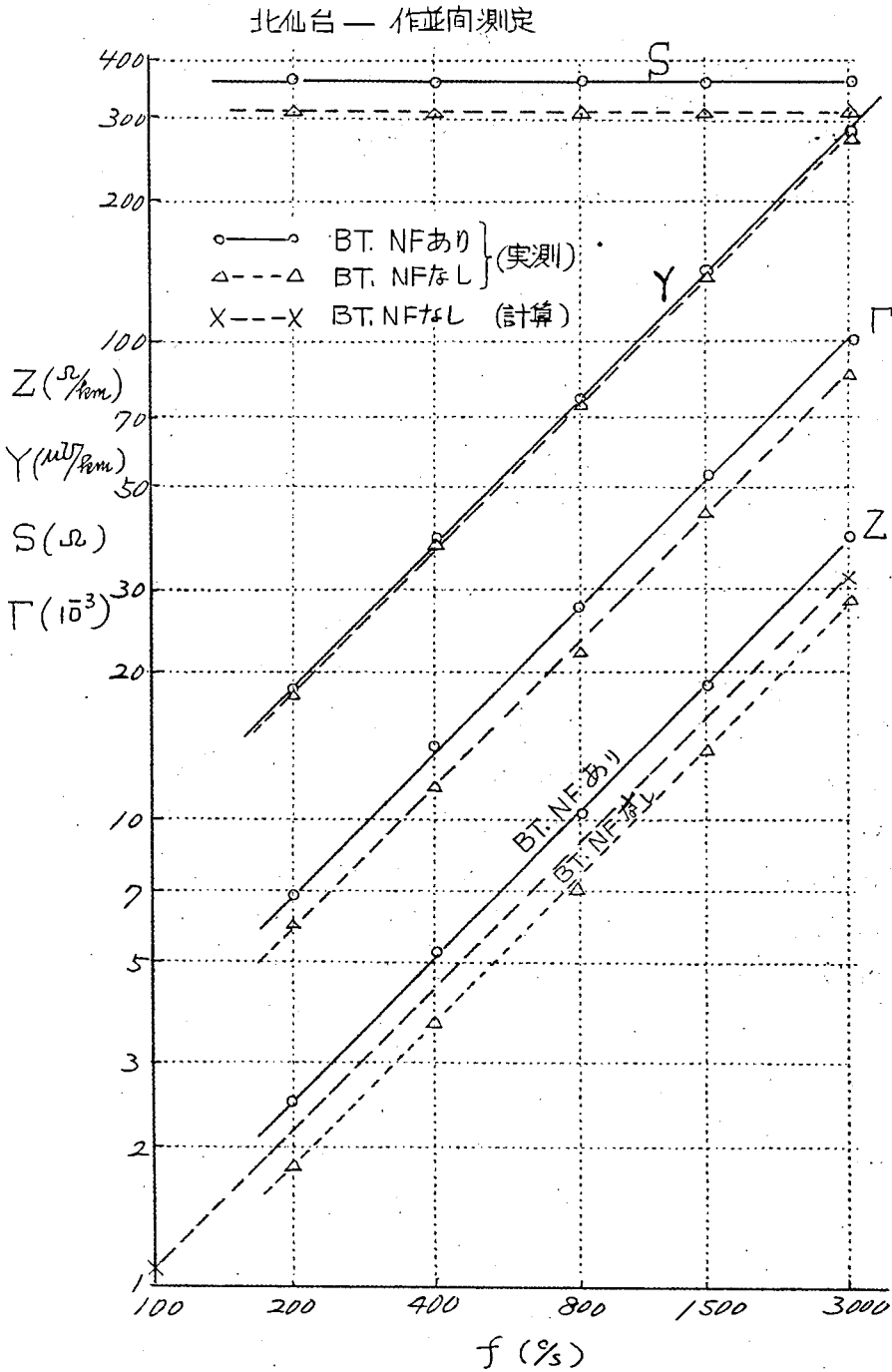


図5.18 電線線の4定数, 周波数特性 (実測値)

たためのインピーダンスの増加分にして、これは50%において約 $0.15 \Omega/km$ であり周波数との関係はほぼ周波数の1乗に比例して大となることが判る。

この関係を実験式にすると式(5.45)のようになる。

$$Z_d = \text{const.} \cdot f \quad (\Omega) \quad (5.45)$$

ただし $Z_d = \text{BT} \cdot \text{NF}$ を附加することによる直列インピーダンス増加分
 $f =$ 周波数(%)

$$\text{Const.} = 3.3 \times 10^{-3} \text{ (仙山線実測)}$$

次に計算式との比較のためBT, NFなしの場合の計算結果を図5.18 X印に示したが、実測値△印より大きい結果となつた。これは計算に使用したレール定数が、200A電流に相当し、実測値は微弱電流による測定であつたためと思われる。別に50% 200Aにおける測定を行つた結果 $Z = 0.570 \angle 66^\circ 10'$ となり、図5.18のX印を結ぶ直線を延長して50%における値を求めると $Z = 0.54 \Omega$ となる。この差は約5%である。なお、前節の計算式(5.42)より増加分 Z_d を求めると式(5.45)の $\text{const.} = 4.0 \times 10^{-3}$ となる。

次に北陸線長浜・木の本間(14.7 km BT, NFあり)は吊架線にCd-Cuを用いたが、ここにおけるインピーダンス測定では表5.6に示す通りの結果が得られ、図5.18と同様の特性となつた。即ち周波数特性はほぼその1乗に比例して増大し、BT, NFありの場合、サーガイインピーダンス S は約330Ωで一定、直列インピーダンスの増加分 Z_d はやはり式(5.45)で表わされ、この場合の $\text{const.} = 4.0 \times 10^{-3}$ 、計算結果の $\text{const.} = 4.8 \times 10^{-3}$ となつた。

表5.6 Cd-Cu電車線路の直列インピーダンス
 北陸線木の本・長浜間14.7 kmで測定

周波数%	BT, NF あり		BT, NF なし	
200	2.45Ω	$+81^\circ 30'$	1.45Ω	$+83^\circ 12'$
500	6.51	$+85^\circ 42'$	3.87	$+85^\circ 06'$
1000	12.6	$+86^\circ 50'$	7.72	$+86^\circ 26'$
2500	29.5	$+89^\circ 00'$	17.4	$+87^\circ 45'$
50	0.679	$+77^\circ 02'$	0.475	$+82^\circ 55'$

以上の結果によりインピーダンスに肉して実測値と計算値を比較すると、BT, NFのある場合およびBT, NFのない場合とも約1割程度計算値の方が大となつたが、これは測定を微弱電流で行つたために生じた誤差と考えられ、前節までに述べたインピーダンス計算の理論式及び回路中の電流、電圧分布の理論を正当づけるに充分であると思ふ。

5.5.2 電圧、電流分布の実測

仙山線き電回路図 5.17 (a) において 24 km 地点に擬似負荷抵抗 320 Ω を接続し、電車線とレール間に 75%, 420%, 1040% および 2000% 各電流を 250 mA 通電した場合について、レール各点 (21 km, 22 km 及上線上部, 下部, 24 km 負荷点上部, 下部および 25 km) の電流を音声周波用軌条電流計で測定した。その結果を図示すると図 5.19 のようになる。軌条電流計はピックアップコイル型

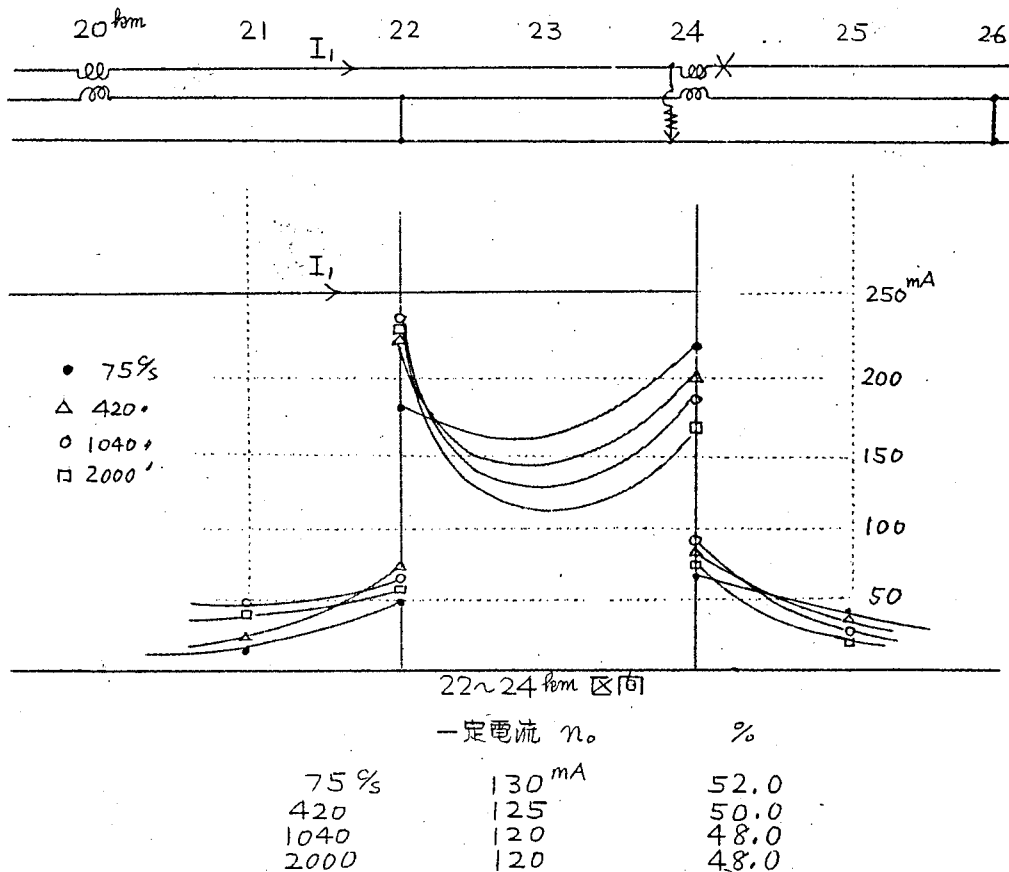


図 5.19 BT, NF のある電車線路のレール電流分布の測定

の直接測定であり、また通電電流が小さかったので、測定誤差はかなり大であつたが、5.2節に述べた理論的説明と傾向が非常に良く一致し、この向に減衰電流と一定の誘導電流の流れることを実証した。また送端より22km地点までの向は、BTの電流吸上げ効果により、21~22km附近を除いては殆んどレール中の電流は流れなかつた。(約10%以下) さらに22~24km区間の電流分布より減衰電流を除いて、この向に流れる一定電流(誘導電流)を推定すると、周波数が高くなる程僅かに小さくなる傾向にあるが、電車線電流の約50%に相当する125mAが得られる。これは大地導電率を $\sigma = 0.1 \mu\text{m}$ とした場合の計算値にほぼ等しい。

次に50% 300A電流を10.2~18.2km区間に限つて通電した1例を図5.20に示す。この場合14km吸上線を特に15kmに移動したので、12km BTは負担区間が約5kmとなり、吸上効率は268A(約90%)に下つた。しかしレール

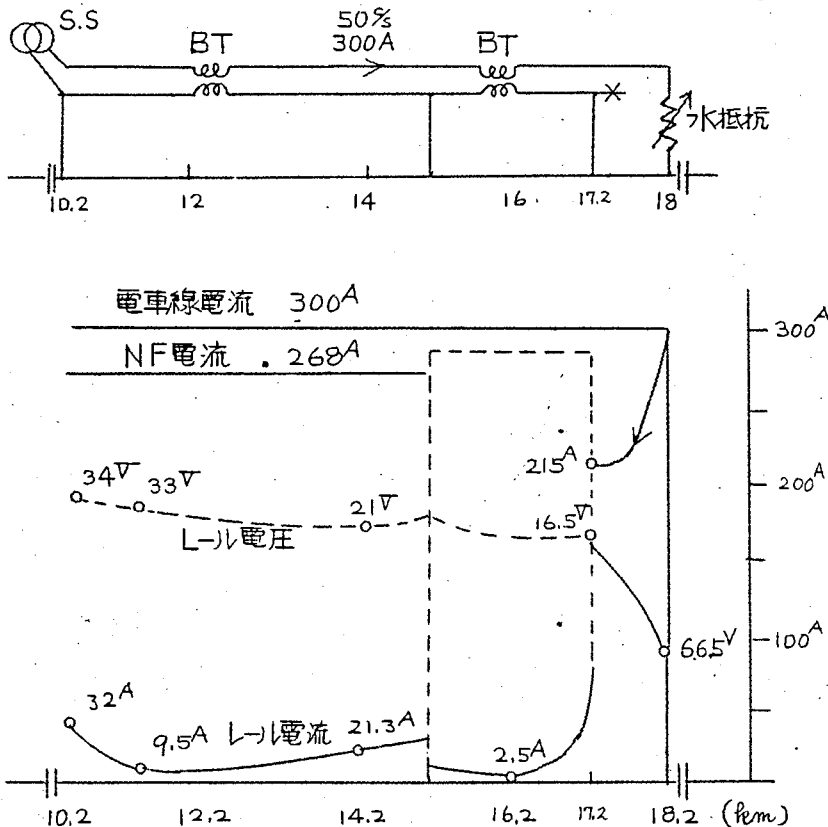


図5.20 BT, NFのある電車線路のレール電圧、電流分布

電流はBTのため17.2〜18.2に殆んどが流れ、その他の区間では大部分がNFを流れたことが判る。またレール電圧も300Aに対し、端末で66.5V、送端で34Vで普通の場合より非断2少しい。これは明らかにBTの作用によりレール電流をNFに吸上げた結果であると言える。

5.5.3 誘導電圧及び誘導軽減係数の測定

仙山線陸前落合駅を試運転列車が出発し、作並方面に進行する間に、この区間に平行する架空裸通信線（鉄道との離隔、落合・愛子間約10m、愛子・白沢間約7.5m）および埋設ケーブル（軌道中心より3m、地下60cm埋設）に誘起する電磁誘導電圧を連続記録すると図5.21が得られた。列車電流はこの区間において50〜70Aにして、誘起電圧の最高値は裸線で約10V、ケーブルで約8Vであつた。図に見る通り、列車の進行位置がBT付近で電圧の極大値、S（吸上線）付近で極小値を記録するが、これはBTおよびNFを有する回路の特徴であつて、その理由は図5.19に示されるレール電流の分布を見れば了解される。即ちレール中の電流は負荷点とその隣

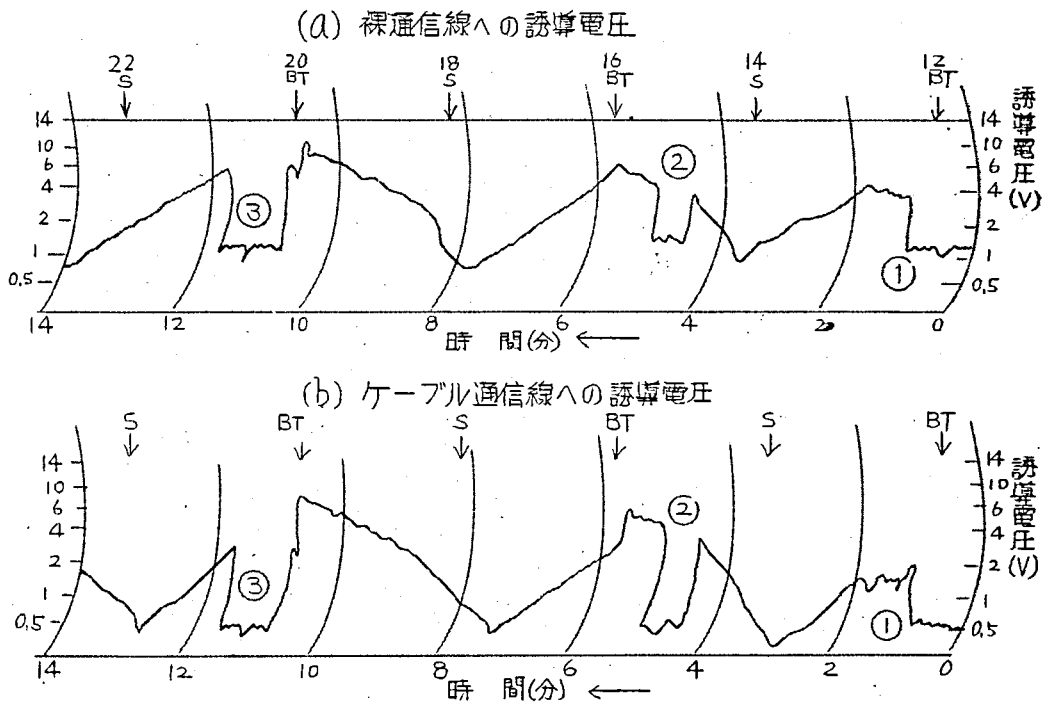


図5.21 試運転列車運行中の誘導電圧（仙山線）

接取上線向に殆んど制限され、この区間で大きい誘導電圧を発生するが、その他区間ではBTの作用により大部分の電流がNFを帰るからである。従つて誘導曝露区間のアンペア率は、ほぼBTとSとの距離(こゝでは2km)に制限され、これ以上大となることはない。このために図5.21に示されるような電圧記録図が得られる。なお①は着合駅を列車がスタート、②は愛子駅停車、③は白沢駅停車のために出来た断層である。なおまたBT通過の瞬間にレールを流れる電流方向が逆転し、誘導電圧も位相角 180° 変化する、この点が図中に明瞭に認められる。また極小値がS通過の時刻と若干ずれているが、これはレール電流がNF側へ帰って送電線に至るまでの間の残留軌道電流に基づく誘導電圧が作用するためである。この区間の誘導電圧はすべてBTの誘導軽減係数によつて決まり、この場合は後出図5.23に見るように、ケーブルに対し0.14、裸線に対し0.115であるので、この区間が長くなると無視できなくなる。

このようにしてBTおよびNFのある電車線回路では、き電距離が長くなつても、誘導電圧は距離に比例して次第に大きくなるということはなく、取上線とBTとの間隔によつて制限される値以上に大となることはあまりない。

次に10.2km~18.2km区間で各種き電回路を構成して比較測定した誘導電圧を図5.22に示す。この場合き電回路条件I-1とIV-1とでは誘導電圧は $\frac{1}{8}$ ~ $\frac{1}{7}$ に減少した。これはIV-1の場合にレール電流が17km處でNFに帰るので丁度誘導曝露が8kmから1kmに減少したためと見られる。III-1の場合に $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{2.6}$ に減少することも同じように説明できる。なおBTがなくNFのみのII-1の場合、誘導電圧比は $\frac{1}{1.5}$ ~ $\frac{1}{1.6}$ であるが、1km部分を除いて、10.2~17km間でNFのみの効果を求めると約 $\frac{1}{1.8}$ となる。また通電区間西端のレール絶縁を除いた場合(IV-2, I-2, II-2, III-4)の誘導電圧は夫々絶縁のある場合の2~2.5倍に増加した。これは2.2節で論じたように $\frac{1}{2}(1-n)I$ の電流が区間の外方に進行するためである。

次に図5.17における(a)及び(b)の回路に50~2000%の電流を流し、先に述べたケーブル通信線及び裸通信線への誘導電圧を測定し、この結果よりこの区間のBTの誘導軽減係数を求めると、図5.23の通りとなる。周波数1000%程度までは誘導軽減係数 k' は0.1~0.2が得られている。

き電回路
条件

通電電流 (A) 誘導電圧 (V) 誘導電圧比

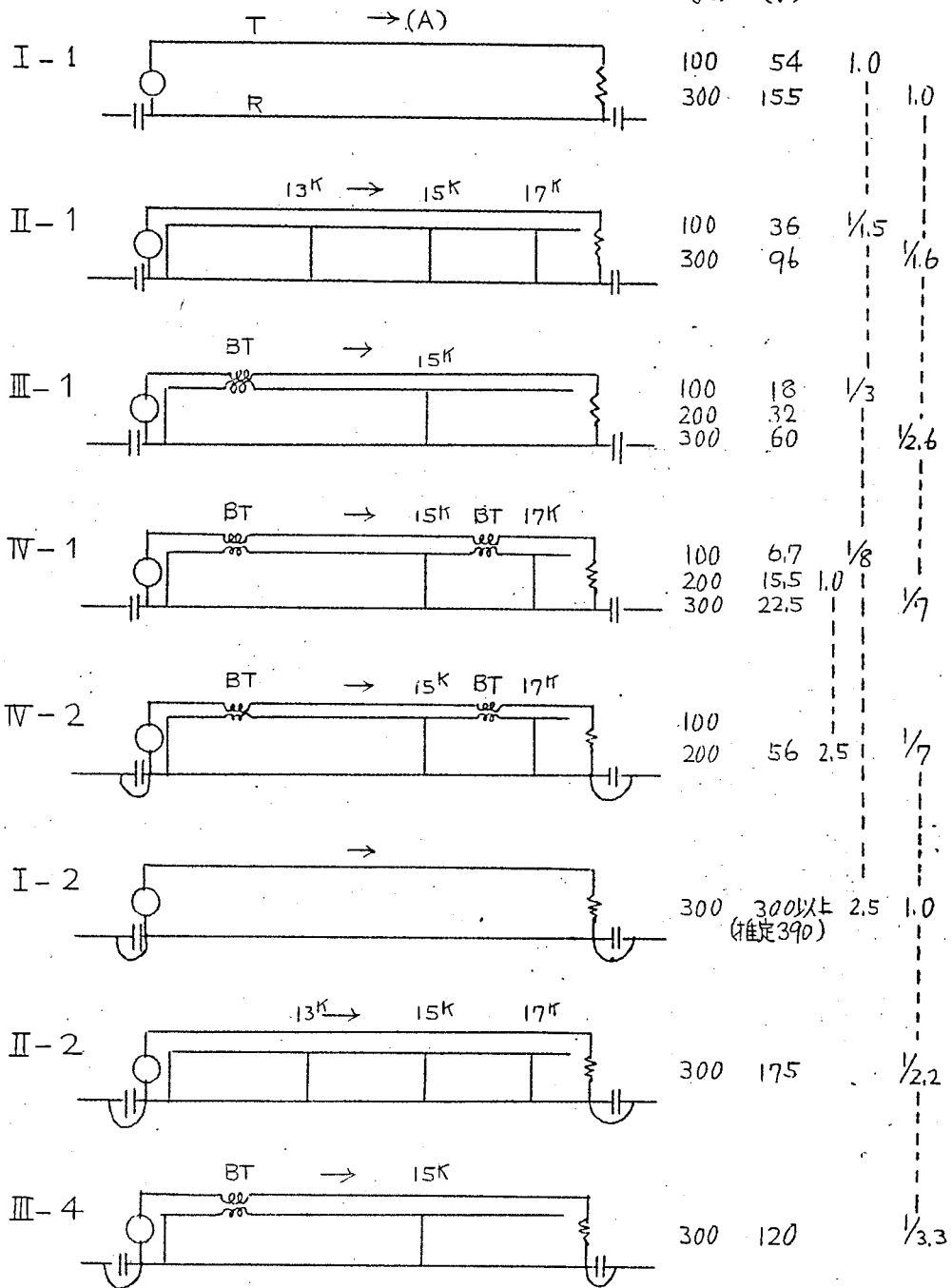


図5.22 各種き電回路とBT効果

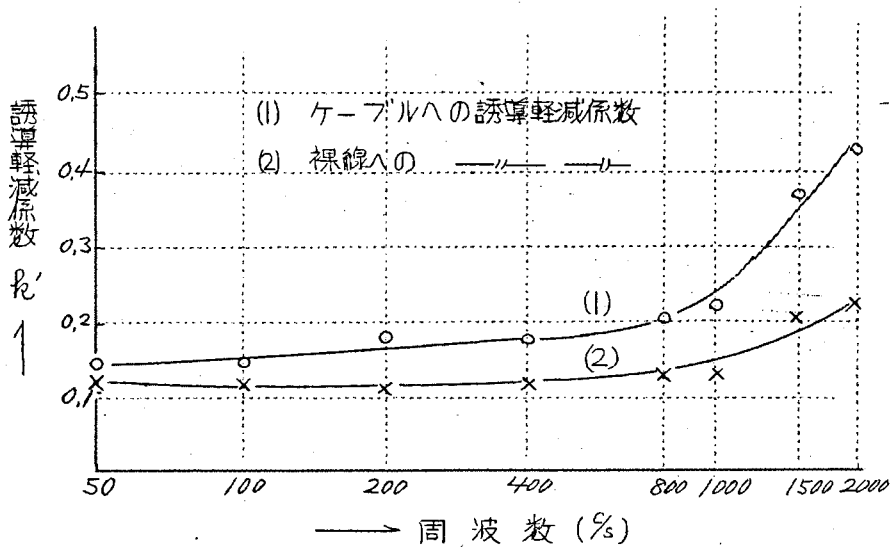


図5.23 吸上変圧器の誘導軽減係数実測

これはBTが十分に動作する場合の k' に比較して幾分悪い値であるが、その原因は、主電回路が26~28.3 kmの区間でNFのみおよび5.6~6.0 km区間が、BT、NFなしであったことが関係していると思われる。いまNFのみの区間を図5.22を参照して $k' = 0.5$ と仮定し、両端の変則区間を除いてBT、NFのある部分のみの k' を求めると、裸線に対して約0.05、ケーブルに対して約0.07となる。裸線およびケーブルが非常に鉄道に近いためここでは k' が異なった値となったが、さらに遠方の通信線に対しては5.3節に与えた理論値の次々に近づくことが想像される。また高周波1000%以上では k' が次第に大となったが、これは電車線回路が長さ22.7 km先端短絡であるため、周波数の高上と共に次第に共振現象を起す(共振周波数約2.6c)ことが影響しているものであろう。

第6章 交流電化における誘導調整

6.1 緒言

交流50%による鉄道の電化は、ドイツ国鉄ハレンター線において1936年試験的に実施されたが、その後フランス国鉄において1951年サボア線で試験を行い1955年には北東幹線の一部電化に成功した。以来各国の注目を浴び、わが国においても1953年より国鉄部内で調査が始められ、54年8月横浜線で先ずAC3000V加圧による人工故障試験を行い、さらに同年末、仙山線落合駅を中心として仮設備を設け、20kV加圧による諸試験を開始、ついで55年8月には国産による水銀整流器形式および直接電動機形式両様の電気機関車が仙山線落合、熊ヶ根向を試運転に成功した。

この成功により今後の多数線区の電化が交流方式で行われる方針となり、現在までに北陸線田村、敦賀向、東北線黒磯、仙台南、鹿児島線門司港、久留米向、常磐線取手、勝田向などが開通した。現在では海外においてもフランスを始め英、ソ、東南ア、その他多数の各国が商用周波数による鉄道の電化を急務に進めつつある。

さてこの場合に最も危懼された問題の一つは通信線に与える誘導障害がある。日本国鉄においても当初よりこれを重視して学会その他多数の権威者の協力を求め、委員会を組織して誘導障害に関する調査研究を行って来た²⁵⁾。

またI.R.C.A. (国際鉄道会議)でもこの点を憂慮して昨年34ヶ国に質問状を送りその解答要点を最近公開するに至った。²⁶⁾ 本章においては既往の知識及び前章まで述べた結果を利用、整理して、交流電化の場合に行うべき誘導調整の方法及びその実施例について述べる。なお誘導調整の考え方は第1章に述べたのでここでは重複を避け省略する。

6.2 誘導電圧の予測計算

交流電化区間に発生する誘導障害を検討するための必要な諸計算式を次に記す。

6.2.1 静電誘導電圧および電流の計算

交流電車線に平行する架空線条に発生する静電誘導電圧 V_s およびこれを接地するときの流れる放電電流 I_s は次の式(6.1)および(6.2)によって与えられる。(附録10)

$$V_s = \frac{q}{4.8} E \log_{10} \frac{b^2 + (h+c)^2}{b^2 + (h-c)^2} \quad (6.1)$$

$$I_s = \frac{\omega l V_s}{41.4 \log_{10} (4\epsilon/d)} \quad \mu A \quad (6.2)$$

b = 電車線と架空裸線との水平間隔,

h = 電車線の高さ,

c = 架空裸線の高さ,

d = 架空裸線の半径,

l = 架空裸線の長さ (km)

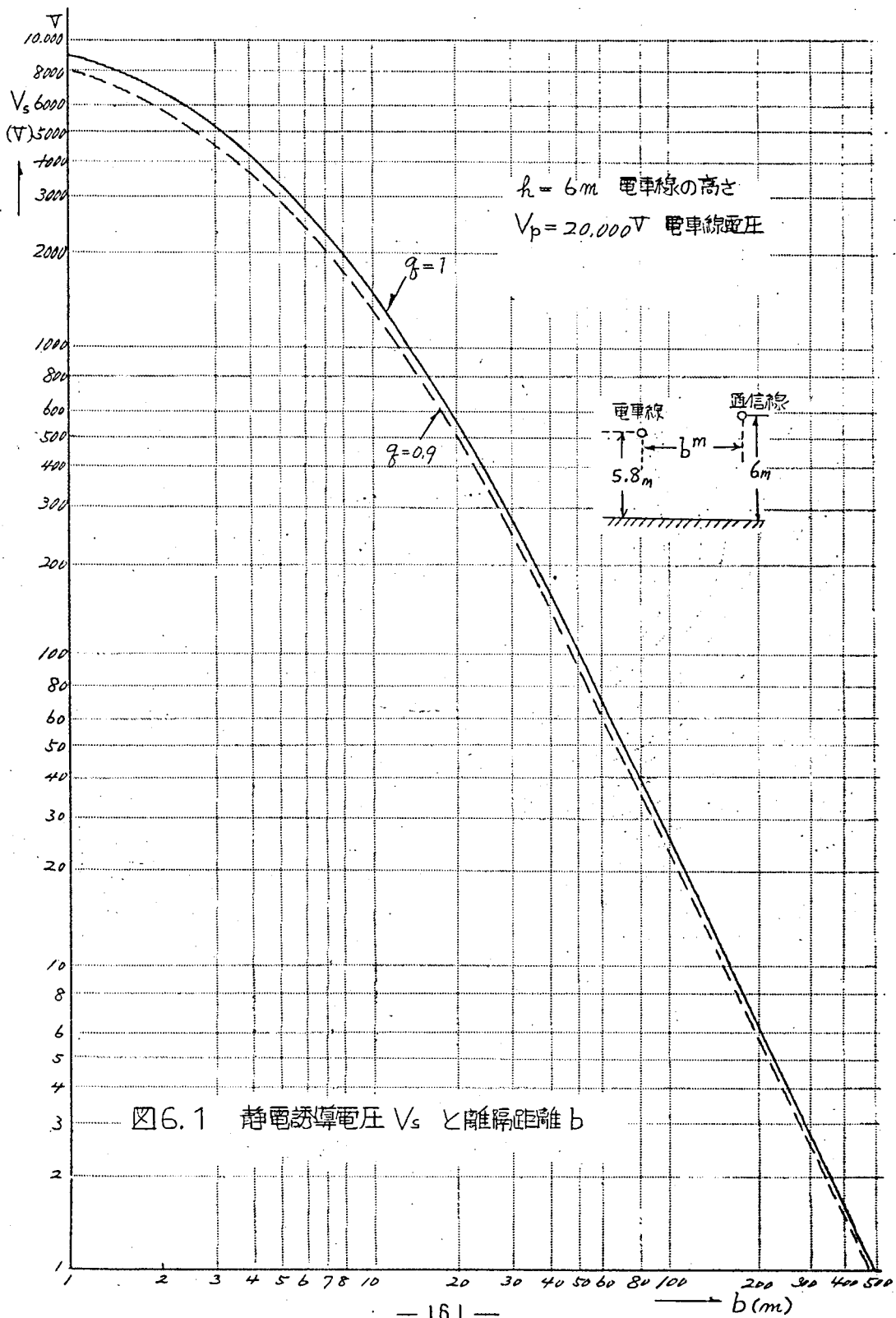
$\omega = 2\pi f$, f = 周波数

E = 電車線電圧

q = 電車線または架空裸線の近くに接地物その他のある場合の遮蔽係数。遮蔽物の沢山ある場合はそれぞれの遮蔽係数の乗積をとる。

q の値¹⁾は電車線または架空裸線に3m以内に接近平行して樹木のあるときは0.7、電車線直上の接地線のあるときは0.75、レールに接続された負き電線のあるときは0.9の値をとる。

静電誘算電圧計算例として $h = 5.8m$, $c = 6.0m$ の場合、 b と V_s との関係を図6.1に示した。また電車線近傍の静電界の等電位線を図6.2に示した。絶縁された架空線には、その電車線との関係位置に応じて、これらの結果に示された電圧が生ずる筈であるが、実際は近傍の接地物その他の遮蔽、線条の対地絶縁抵抗の不良などによって、例外なくこの数値より小さくなるのが普通である。



6.2.2 電磁誘導電圧の計算

交流電車線の平行する線系導体と大地との間に発生する電磁誘導起電力 e は次の式(6.3)で計算される。

$$e = 2\pi f \eta M A \quad (6.3)$$

ただし $M =$ 通信線と電車線の向の相互誘導係数

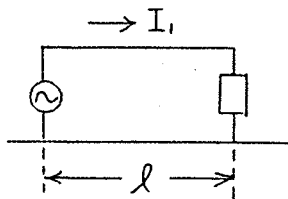
$A =$ 両線が平行する部分の電車線回路上のアンペア料

$\eta =$ ケーブルの遮蔽係数、架空線通信線の場合は1.0

各区間において MA の値が異なるのが普通であるが、この場合の全誘導起電力は夫々の区間の起電力のベクトル和となる。

MA を各き電回路の各部について求めると、次の通りである。ただし通信線は各部分の長さ l に比し遙かに長い場合である。 l にほぼ等しいか l より小さい場合はレール中のアンペア料は第2章で述べた I_x を積分して求める必要がある。

(1) 吸上変圧器のないき電区間



$$MA = I_1 l (M_1 - n_0 M_2) \quad (6.4)$$

$I_1 =$ 電車線電流

$M_1 =$ 電車線と通信線との向の相互誘導係数

$M_2 =$ レールと通信線との向の相互誘導係数

$n_0 = 1 - k$ (k は表 6.1)

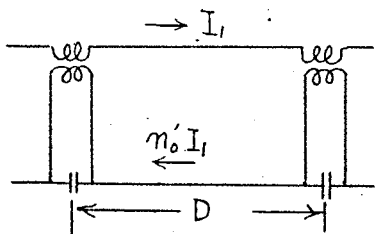
遠方通信線に対しては $M_1 \approx M_2 = M$ と考えられるので

$$MA = I_1 l k M \quad (6.5)$$

$k =$ 軌道の誘導軽減係数 (表 6.1)

(2) 吸上変圧器のみ (NFなし) のき電区間

(2.1) 負荷のない部分 (送端と負荷との中間)



$$MA = I_1 D (M_1 - n'_0 M_2) \quad (6.6)$$

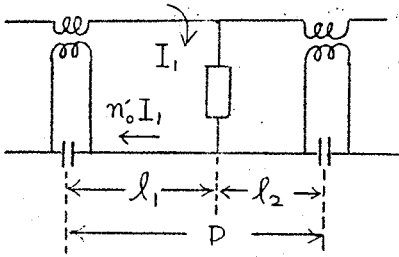
ただし

$$n'_0 = n_0 + \frac{2}{\pi D} (m - n_0) \tanh \frac{GD}{2} \quad (6.7)$$

その他記号は (6.4) と同じ

$$m = \frac{\text{BT 2次巻線電流}}{\text{BT 1次巻線電流}} = \frac{Z_2 + 2n_0 S_2 \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2}}{Z_2 + 2 S_2 \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2}}$$

(2.2) 負荷のある部分



$$MA = I_1 l_1 (M_1 - n_0' M_2) \quad (6.8)$$

ただし

$$n_0' = (1-m)n_0 + \frac{m(1-n_0)}{2} \left[\frac{2}{\Gamma_2 l_1} \tanh \frac{\Gamma_2 l_1}{2} - \frac{\tanh \frac{\Gamma_2 l_2}{2}}{\Gamma_2 l_2} \right] \quad (6.9)$$

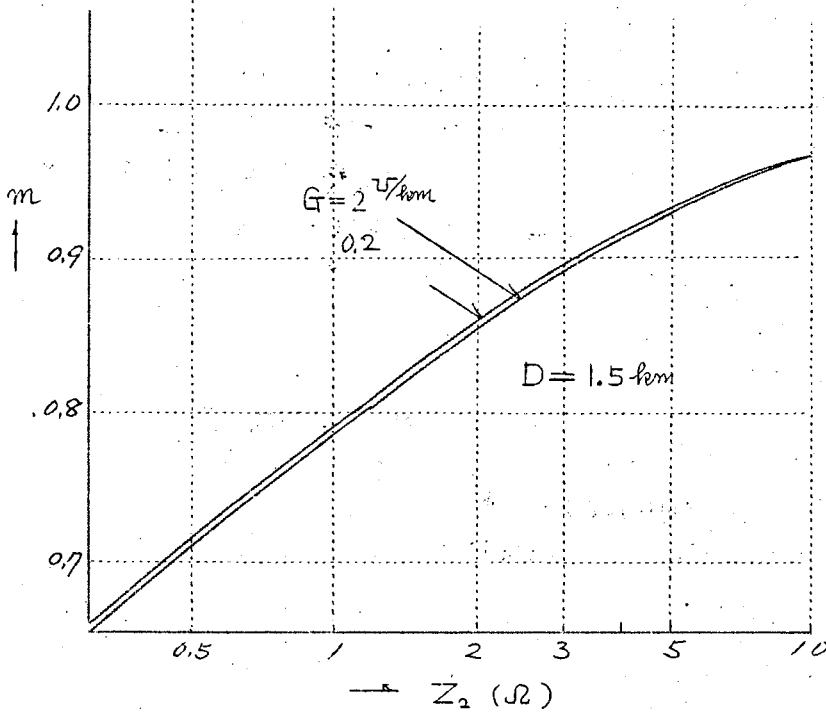
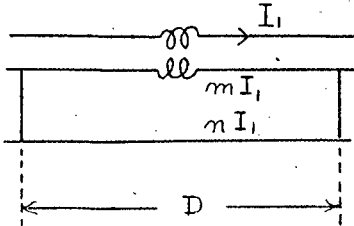


図6.3 吸上度圧器 (NFなし) のあるき電回路 L-ル平均電流

(3) 吸上変圧器と負き電線のあるき電区向

(3.1) 中間区向 (負荷と変電所の向)



$$MA = I_1 D (M_1 - nM_2 - mM_3) \quad (6.10)$$

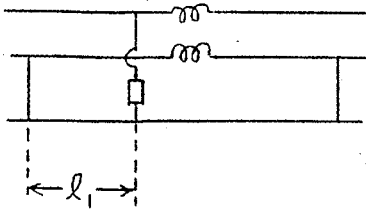
ただし

$M_3 =$ 負き電線と通信線との向の相互透導係数

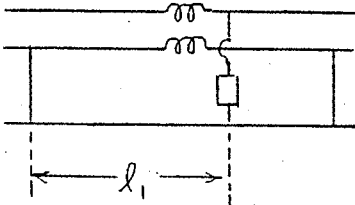
その他の記号は式(6.4)と同じ

m および n は図5.8参照

(3.2) 負荷のある区向



$$MA = I_1 l_1 (M_1 - n_0 M_2) \quad (6.11)$$



$$MA = I_1 l_1 (M_1 - nM_2 - mM_3) - mI_1 (D - l_1) (M_3 - n_0 M_2) \quad (6.12)$$

$l_1 = \frac{D}{2}$ の場合は

$$\approx -mI_1 \frac{D}{2} (M_3 - n_0 M_2) \quad (6.13)$$

遠方通信線に対しては、 $M_1 \approx M_2 \approx M_3 = M$ とおくことができるので式(6.6)~式(6.13)はすべて次の形に書くことができる。

$$MA = I_1 l k k' M \quad (6.14)$$

ただし $k' =$ BTの誘導軽減係数

$$\left. \begin{aligned} (6.6) \text{ の場合 } k' &= 1 - \frac{m - n_0}{1 - n_0} \frac{2}{\Gamma_2 D} \tanh k \frac{\Gamma_2 D}{2} \\ (6.10) \text{ の場合 } k' &= \frac{1 - n - m}{1 - n_0} \end{aligned} \right\} \quad (6.15)$$

式(6.15)の計算例を図6.4および図6.5に示した。

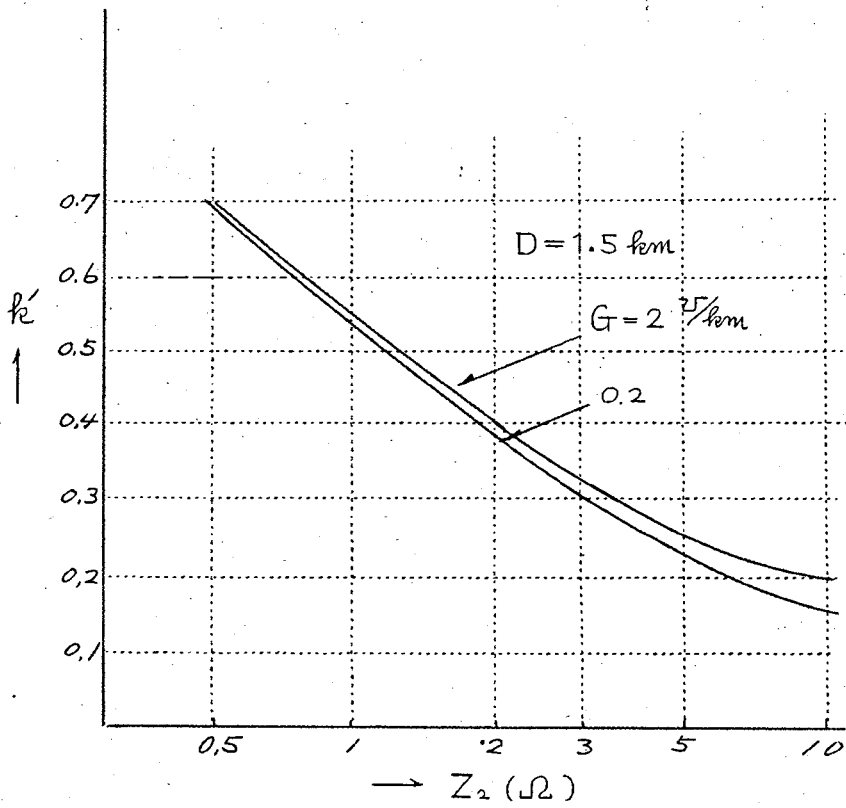


図6.4 吸上度圧容 (NFなし) の誘導軽減係数 k'

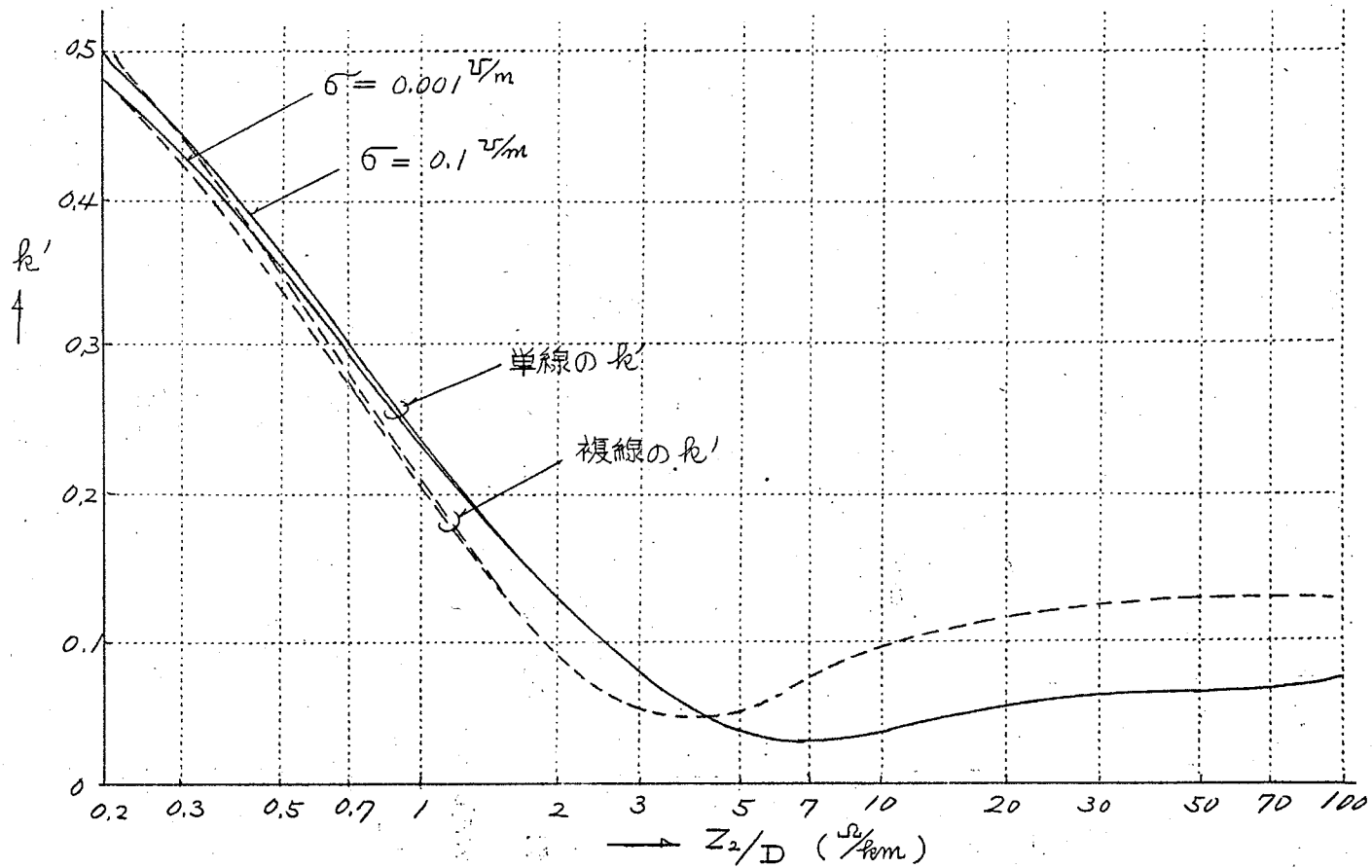


図 6.5 吸上圧器の誘導軽減係数 k' (NFのある場合)

電車線と被誘導線との間の相互誘導係数 M は Carson Pollaczek の公式として知られるものが実験値と最もよく合うものとして信頼されている。仙山線で実施した結果は図 6.6 に示すように、従来慣用されていた深尾公式によるよりも、非常によく一致することをわれわれも確認した。

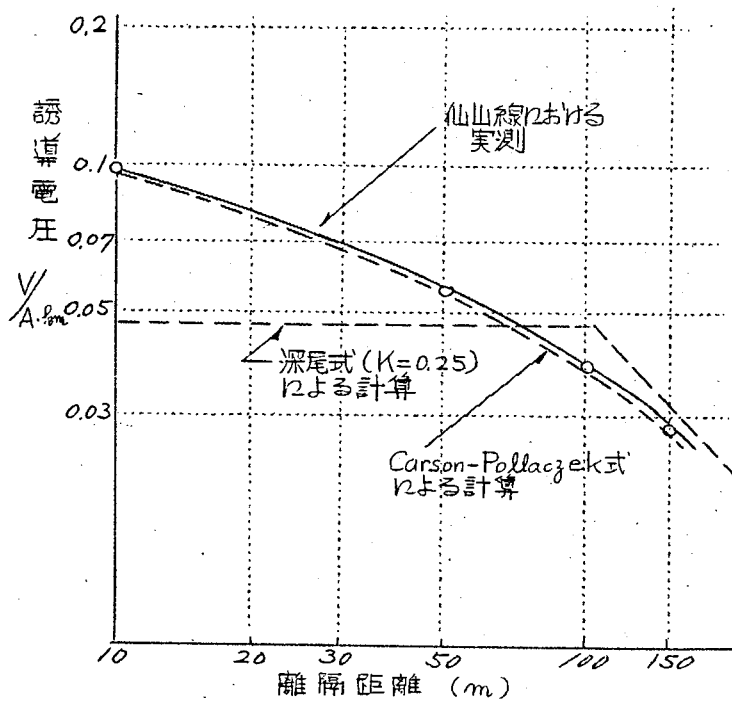


図 6.6 電磁誘導電圧の実測と計算との比較

C-P 公式は次の通りである。

$\alpha d_{12} < 0.5$ のとき

$$M = 1.232 + 0.943\alpha(h+c) - 2 \log_e \alpha d_{12} - j \left\{ \frac{\pi}{2} - 0.943\alpha(h+c) \right\} \quad (6.16)$$

$\alpha b \geq 0.5$ のとき

$$M = 4 \frac{kei' \alpha b}{\alpha b} - 4j \left\{ \frac{kei' \alpha b}{\alpha b} + \frac{1}{(\alpha b)^2} \right\} \quad (6.17)$$

$\alpha b > 10$ のとき

$$M = -j \frac{4}{(\alpha b)^2} \quad (6.18)$$

ここで

$$\alpha = 2\pi \sqrt{2\sigma f}, \quad \sigma = \text{大地導電率 (cgsemu)}$$

$$d_{12} = \sqrt{b^2 + (h+c)^2} \quad (\text{二線間の直距離})$$

もし各量の単位に C. G. S 単位を用いれば、得られた M の単位は 10^{-4} H/km となる。

軌道の誘導軽減係数 k は單線、複線の別または大地導電率によって異なり表 6.1 の通りとなる。なお單線軌道の k の算出法は既に 2, 3 節で述べたが、複線軌道の k の算出については (附録 14) を参照せられたい。

表 6.1 L-ルルの軽減係数 k

大地導電率 σ (μm)	單線			複線		
	50%	60%	800%	50%	60%	800%
0.001	0.405	0.403	0.377	0.280	0.279	0.267
0.01	0.455	0.453	0.437	0.335	0.319	0.319
0.1	0.516	0.514	0.515	0.392	0.370	0.391

k は吸上変圧器がある場合、既に図 6.5 に示された通り、平常運転中で BT の動作が充分の場合は 0.1 前後であるのでこれを無視し、BT の動作しない区間のみについて式 (6.11) または式 (6.12) により計算を行う。また異常時は電車線に大きい故障電流が流れるので、これに対応する BT の励磁インピーダンスを図 5.11 より求め、

k' と Z_2/D との関係曲線、図 6.4 または図 6.5 より k' を求める。また電車線地絡地点までの距離 l と地絡電流との関係は式 (6.19) により与えられる。

$$I_s = \frac{E_t}{Z_0 + Z_t + Z_l} \quad (6.19)$$

ただし

I_s = 地絡電流 (A)

E_t = 事故点における短絡前の電車線電圧 (V)

Z_0 = 変電所高圧側から見た電源系統のインピーダンスを低圧側に換算した値 (Ω)

Z_t = 受電変圧器の漏れインピーダンスを低圧側に換算した値 (Ω)

Z_l = 変電所から事故点までの電車線回路インピーダンス (Ω)

Z_0 , Z_t は変電所の容量および受電系統によって変わるのでその都度調査を要するが、いま目安として $Z_0 + Z_t$ の大きさを、変電所容量 2,000 KVA; 4,000 KVA; 6,000 KVA; 8,000 KVA に対し、それぞれ 36.6 Ω , 19.7 Ω , 14.1 Ω , 11.7 Ω と推定し、また Z_l は BT, NF ありの場合に 0.8 l (l = 事故点までの距離) と仮定し、 l と I_0 との関係曲線を描くと、図 6.7 の通りとなる。従ってもしこれらの数値の詳細の不明の場合は、この図を用いて凡その推定を行うとよい。

また平常時列車運転電流は表 6.2 に示される通りである。

表 6.2 運 転 電 流 (標準値)

牽引トン数	平坦地	10%勾配	20%勾配
500t (旅客)	60 A	85 A	130 A
1000t (貨物)	120 A	170 A	260 A

次にケーブルの遮蔽係数 η は式 (6.20)²⁷⁾ 及び式 (6.21)²⁸⁾ で計算される。

$$\begin{aligned} \text{遮蔽係数 } \eta &= \frac{\text{ケーブル心線と大地間の誘導電圧}}{\text{同じ位置で遮蔽のないときの誘導電圧}} \\ &= \frac{R + R_e}{\sqrt{(R + R_e)^2 + (\omega L)^2}} \quad (6.20) \end{aligned}$$

又は

$$= \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} + \frac{1}{\delta l} \quad (6.21)$$

ただし

R = ケーブルシースの抵抗

L = ケーブルシースの大地帰路インダクタンス

R_e = ケーブルシース両端の接地抵抗の和 / 長さ (Ω/km)

$\delta = \sqrt{G \cdot (R + j\omega L)}$, G = シースの対地リーカンス

間隔 D 毎に多数接地を行い、 $D < 1 \text{ km}$ の時、 $G = 1/R_e D$ とす。

式 (6.20) は、シースの両端のみを接地する場合で、国鉄通信ケーブルでは各駅毎で、 $R_e = 1 \Omega/\text{km}$ 以下の接地を行うので、この式が適用される。また式 (6.21) は

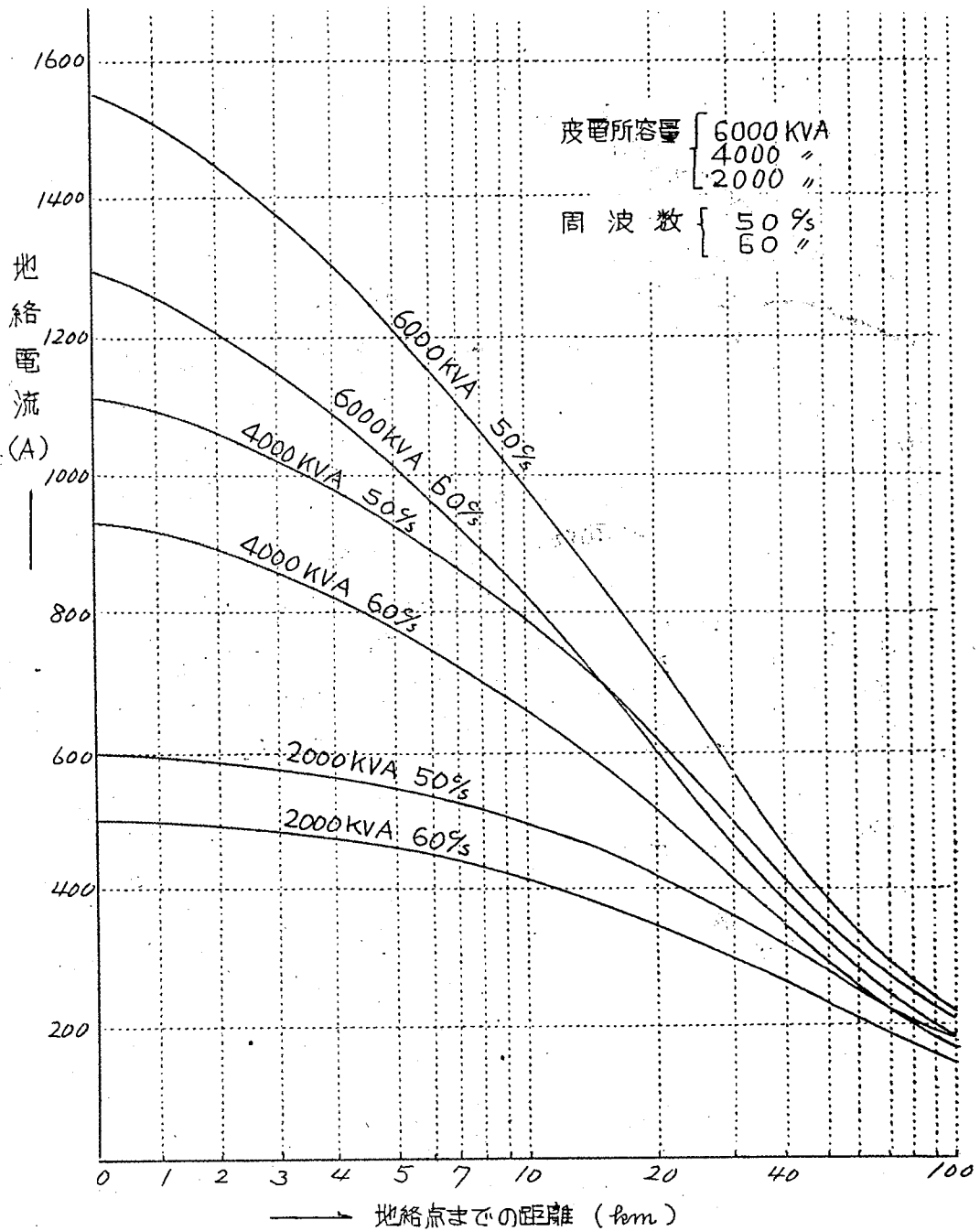


図6.7 交流電単線 (20kV) 地絡電流

シースを分布接地したときで、1ギリスでは1000Yd毎に4品の接地を取る方式で、この式が適用される。 η は商用周波数において鋼帯外装地下ケーブルに対し約0.6、架空ケーブルに対し約0.9の値を持つ。

6.2.3 雑音電圧の予測計算

静電誘導により架空線通信線に生ずる雑音障害を避けるため、C.C.I.T.T.では次の判別式(6.22)を示した。

$$a \geq 1.6 \sqrt{E_p l'} \quad (6.22)$$

ただし $E_p =$ 等価妨害電圧

$$= \frac{1}{S_{800}} \sqrt{\sum (S_f V_f)^2} \quad (6.23)$$

$l' =$ 通信線の交叉の不充分なとき交叉によって補償されない長さの総和 (km)

$V_f =$ き電圧中に含まれる周波数 f なる高調波

$S_f =$ 周波数 f に対する雑音評価係数

$S_{800} =$ 800%に対する雑音評価係数 (表1.6)

次に電磁誘導により通信回線へ与える雑音電圧には、通信線と大地間に誘導される縦方向電圧の原因するもの (e_{p1}) と、通信回線の両線条間へ直接誘導されるもの (e_{p2}) とがあるが、(1.5節参照) 通常 e_{p2} は小さいので特別の場合 (無交叉など) を除いてこれを無視することが出来る。C.C.I.T.T.は e_{p1} の式(4.6)を与えたが、これは第3.4節で説明した通り比較的遠距離接近に適用できる式である。

(1) 遠距離接近の場合

$$e_{p1} = 5000 J_p B h_f h' \eta M l \quad (6.24)$$

ただし

$$J_p = \frac{I_1}{S_{800}} \sqrt{\sum (h_f S_f P_n)^2} \quad (6.25)$$

$=$ 等価妨害電流

$B =$ 通信回線の電磁誘導に対する平衡度

$h_f =$ 架空線回線に対して $f/800$

ケーブル回線に対して 1.0

$P_n =$ 電線電流中に含まれる n 次高調波含有率

$$f = \text{※}n\text{次高調波の周波数} = (50 \text{ 又は } 60) \times n$$

たゞし式(6.24)における各量は、すべて800%における値をとるものとする。

E_p および J_p は実測によって求めるのがよいが、もし実測のないときは $E_p=50$, J_p は電車線電流 100A 当り 1.0A とする。(C.C.I.T.T.)

平衡度Bの値は通信線路およびこれに接続される通信機器などの対地不平衡に依存し、わが国の実測では、標準値として裸線実回線に対し $1/200$ 、ケーブル実回線では $1/1000$ が得られている。²⁹⁾ 幻影回線や自動交換機ではこの値はもっと悪いので、一般に関係する通信線路および機器についてなるべく実測を行い、その実状を把握しておくことが必要である。

次に 10m 内外の至近距離に接近する場合には次に示す式(6.26)のようになる。

(2) 近距離接近の場合

$$e_{p1} = B k k' \eta M l I T \quad (6.26)$$

たゞし

架空裸線の場合

$$T = \frac{2\pi f^2}{S_{800}} \sqrt{\sum (m^2 S_n P_n)^2}$$

ケーブルの場合

$$T = \frac{100\pi f}{S_{800}} \sqrt{\sum (n S_n P_n)^2}$$

(6.27)

たゞし

$$f = \text{※}n\text{次高調波の周波数} \\ = (50 \text{ 又は } 60) \times n$$

整流子電動機または誘導電動機などにより交流機関車を直接運転する場合は交流電圧電流の殆んど高調波を発生しないので雑音障害の問題はないが、水銀整流器を搭載し直流直巻電動機を以て動かす水銀整流器機関車では単相全波整流を行うためその交流側波形には多くの奇数倍高調波を含むようになる。現在までの実測例を示せば、図6.8 に示す通りにして、高調波次数を n (奇数) とすれば、電流中に含まれる高調波の含有率 p_n は概ね次の式(6.28)に示す範囲内にある。

$$p_n = \frac{1}{n^2} \sim \frac{3}{n^2} \quad (6.28)$$

この高調波に原因して通信側へかなり大きい雑音障害を与える。いま仙山線におけ

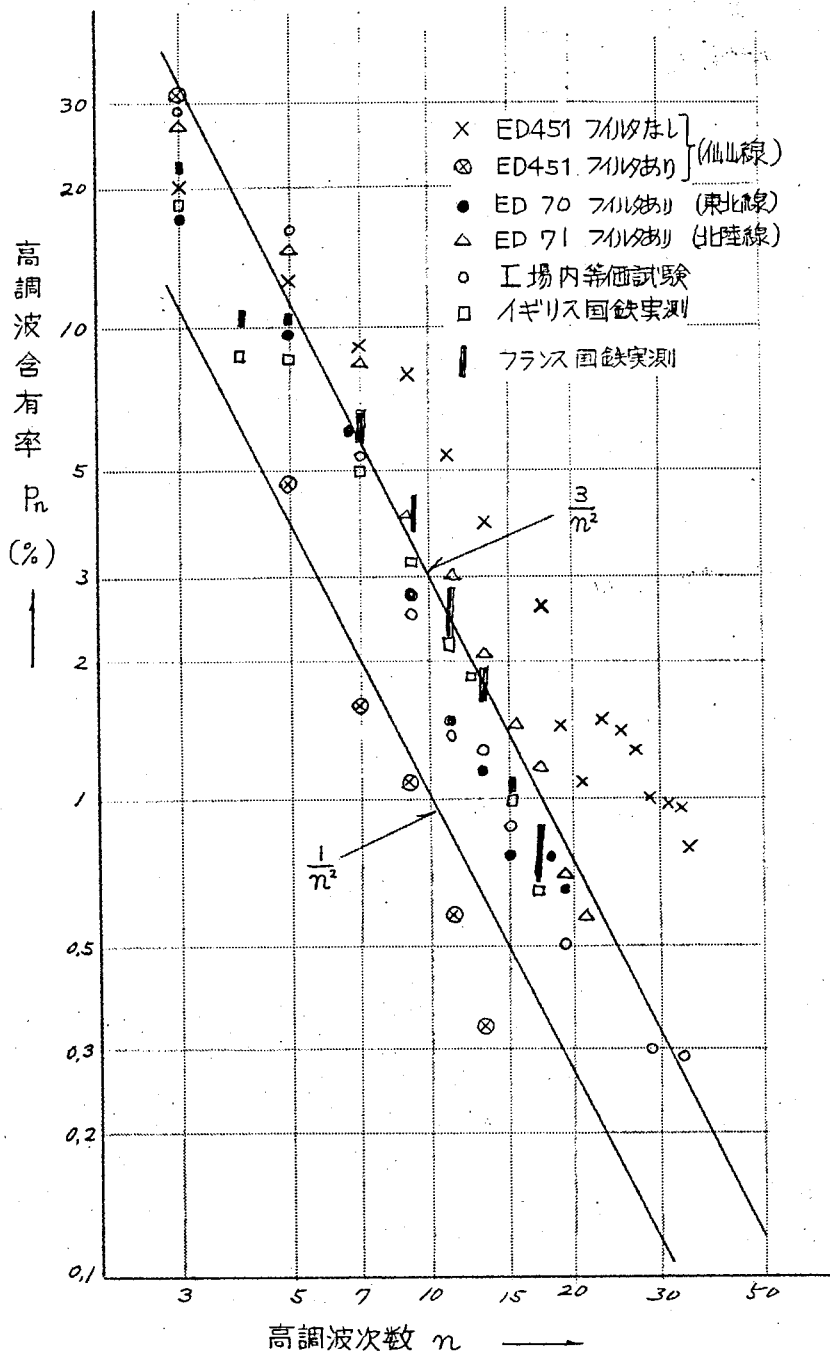


図6.8 水銀整流器機関車電流の高調波含有率 (%)

る通信線雑音の実測例を示すと表6.3の通りとなる。

表6.3 誘導雑音電圧実測例 (仙山線測定)

単位: mV

所属別	回線別	直接電動 機関車	水銀整流器機関車	
			フィルタあり	フィルタなし
電気公社	ケーブル	0.16*	0.06	0.38
	裸線	0.6	0.8	2.6
国鉄	ケーブル	0.1	0.2	0.8
	裸線	15*	30	70

注 (1) *印には機関車以外の原因による雑音を含む。

(2) フィルタについては(6.3.3)節

また東北線黒磯白河間の国鉄通信ケーブルにおける実測例を示すと図6.9のようになる。

これらの記録より誘導雑音電圧の性質を見ると、誘導雑音電圧は機関車の負荷に比例して変化し、 L_1E 雑音電圧と L_1L_2 雑音電圧の比はほぼ $1:1/2000$ 、また50%誘導電圧と雑音電圧との比は約20:1であることが推定される。ただし L_1E は通信線と大地間、 L_1L_2 は通信線の二線間を意味する。

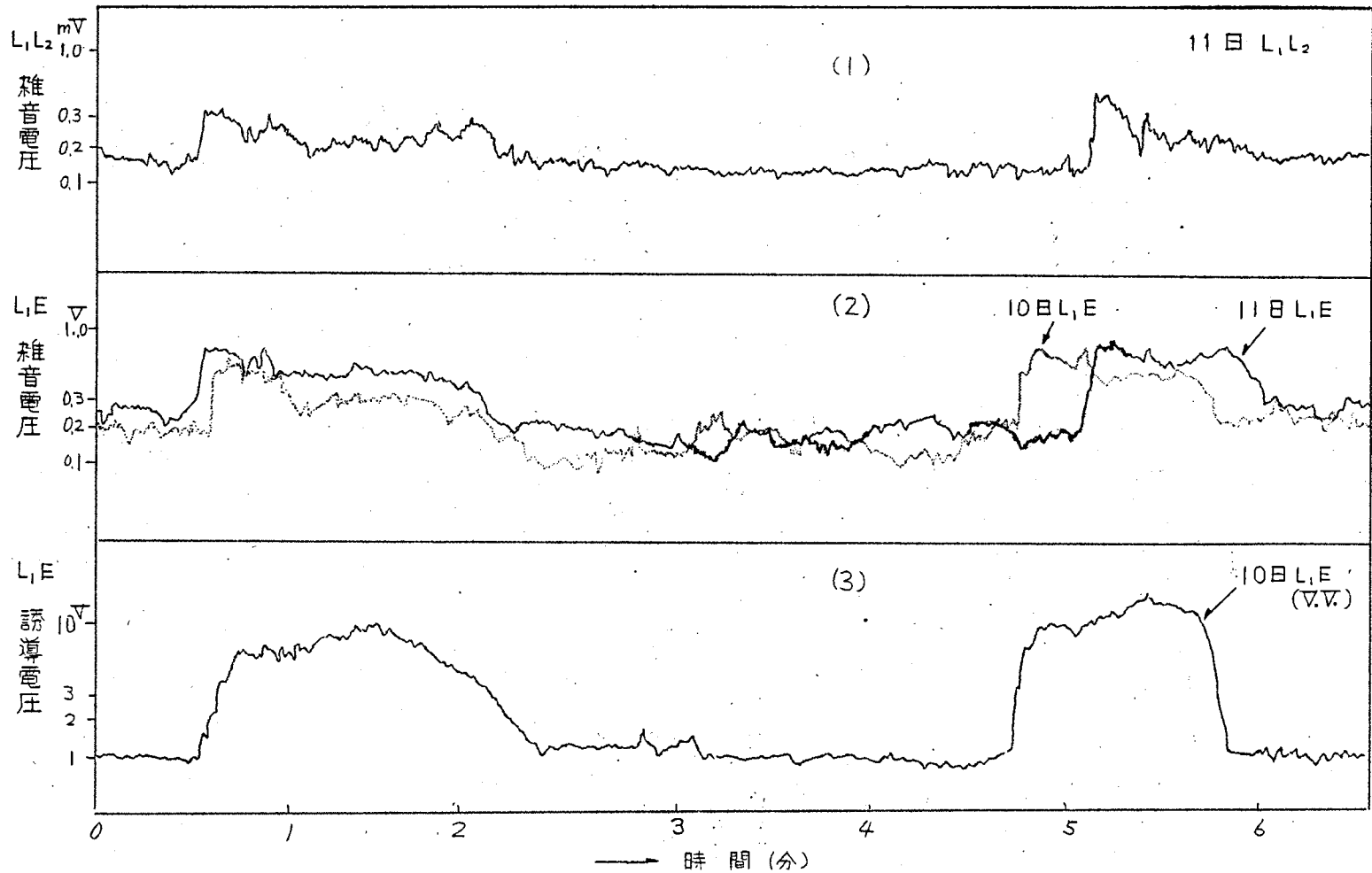


図6.9 東北線黒磯-白河間国鉄通信ケ-フル誘導雑音および誘導電圧記録

6.3 誘導防止対策

6.3.1 き電方式の選定

交流電化において実施されているき電回路には図6.10に示される4通りがある。この中(a)は最も簡単な普通のき電方式で、その他はすべて電磁誘導電圧を軽減する目的で考案されたものである。

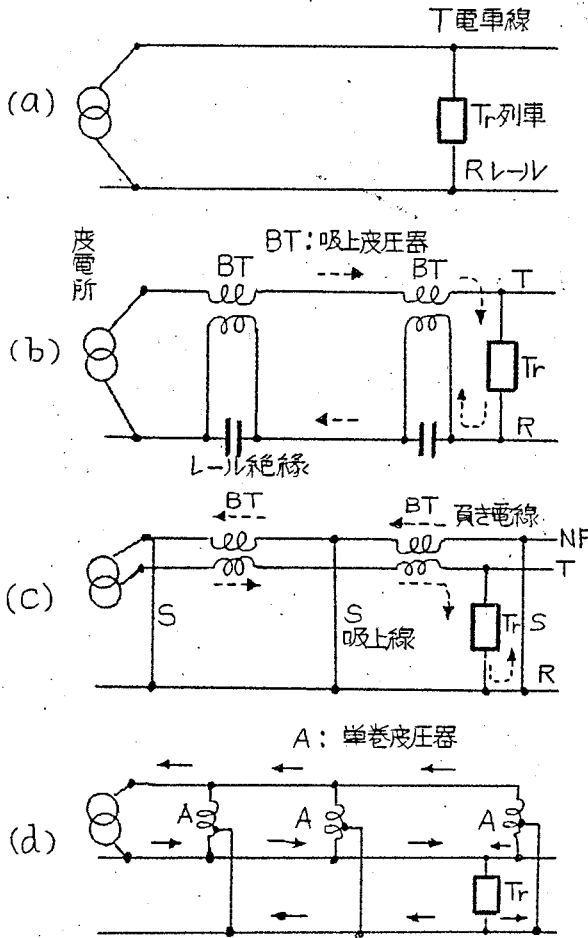


図6.10 き電方式の種類

いま前項各計算式に従って誘導電圧を求めると、図6.10(a)の場合には平常運転時の誘導電圧の制限値を満足することが先ず必要となり、(b)または(c)の場合には異常時の誘導電圧が問題となることが判る。その理由を考えると平常時と異常時の誘導電圧制限値の比は

1:5 なるに對し、(a)方式の場合、事故電流が平常時運転電流の5倍になることは殆んどない。また(b)、(c)の場合、BTが平常時は充分な働きをするが、事故時には鉄心飽和のため、ひどくその機能を低下するからである。なお(d)はアメリカで実施されている方式であるが、誘導問題のみの理由でこの方式を採用することは(b)又は(c)と比較して、経済的に不利であるので、以下の考察は

加えないこととする。なお(d)の誘導軽減効果は(c)と大差ないものといわれている²⁴⁾ので国鉄では専ら(c)方式を採用している。

いまこれらの各き電方式と架空線區信線との許容離隔距離を求めるため(a)の場

合は平常時誘導電圧 60V を超えないこと。(b) 方式の場合は異常時誘導電圧が 300V を超えないことを条件とする。計算の結果を図 6.11 および図 6.12 に示した。

例えば (a) の場合平常時最大負荷 200A にし、周波数 60%, 大地導電率 $0.1 \mu/m$ の場合、許容量は平行距離 5 km に対し離隔距離 57 m なることを要する。

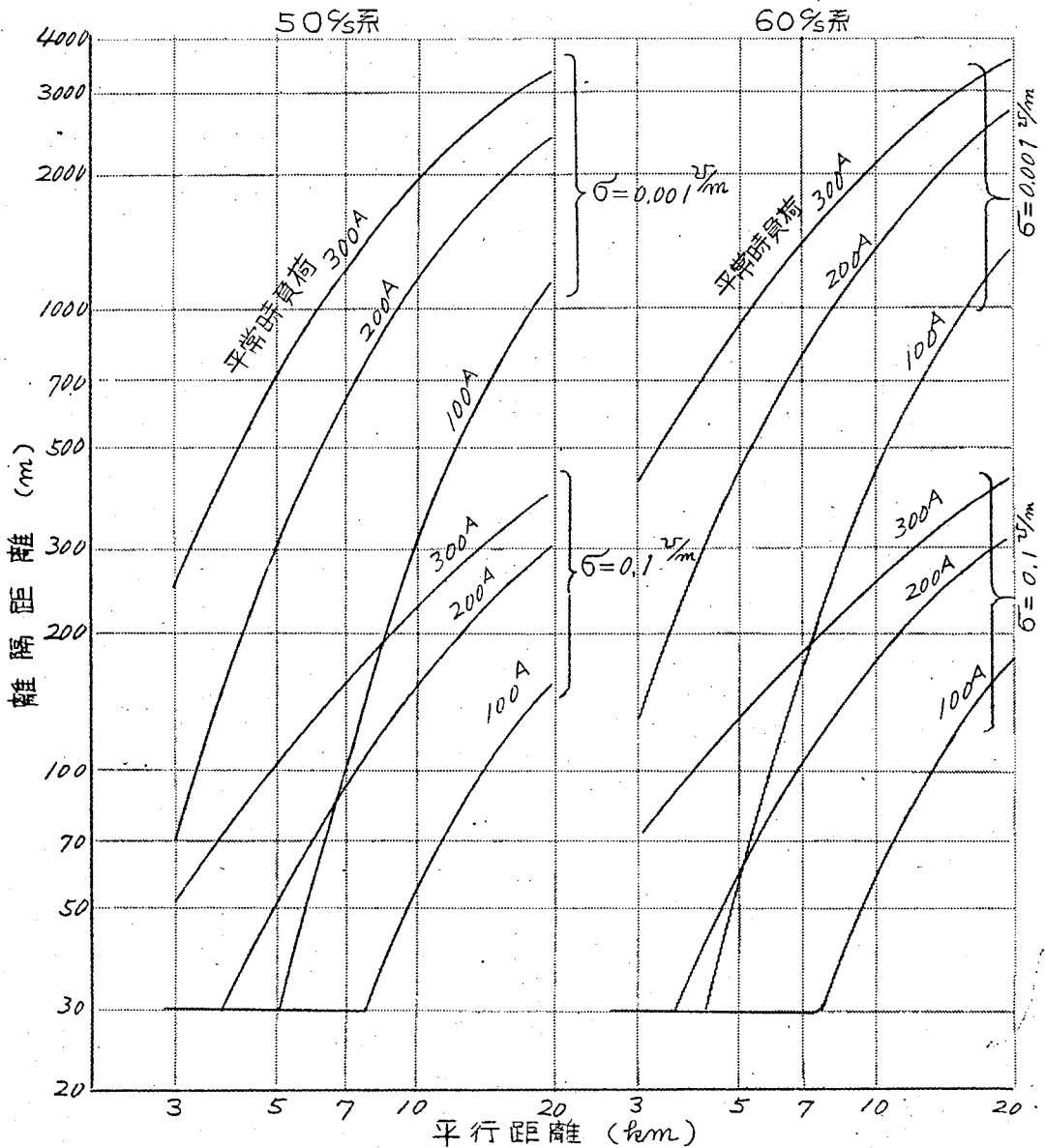


図 6.11 電単線のための交流き電方式において平常時制限値 60V を満たすべき架空線通信線の平行距離と離隔距離

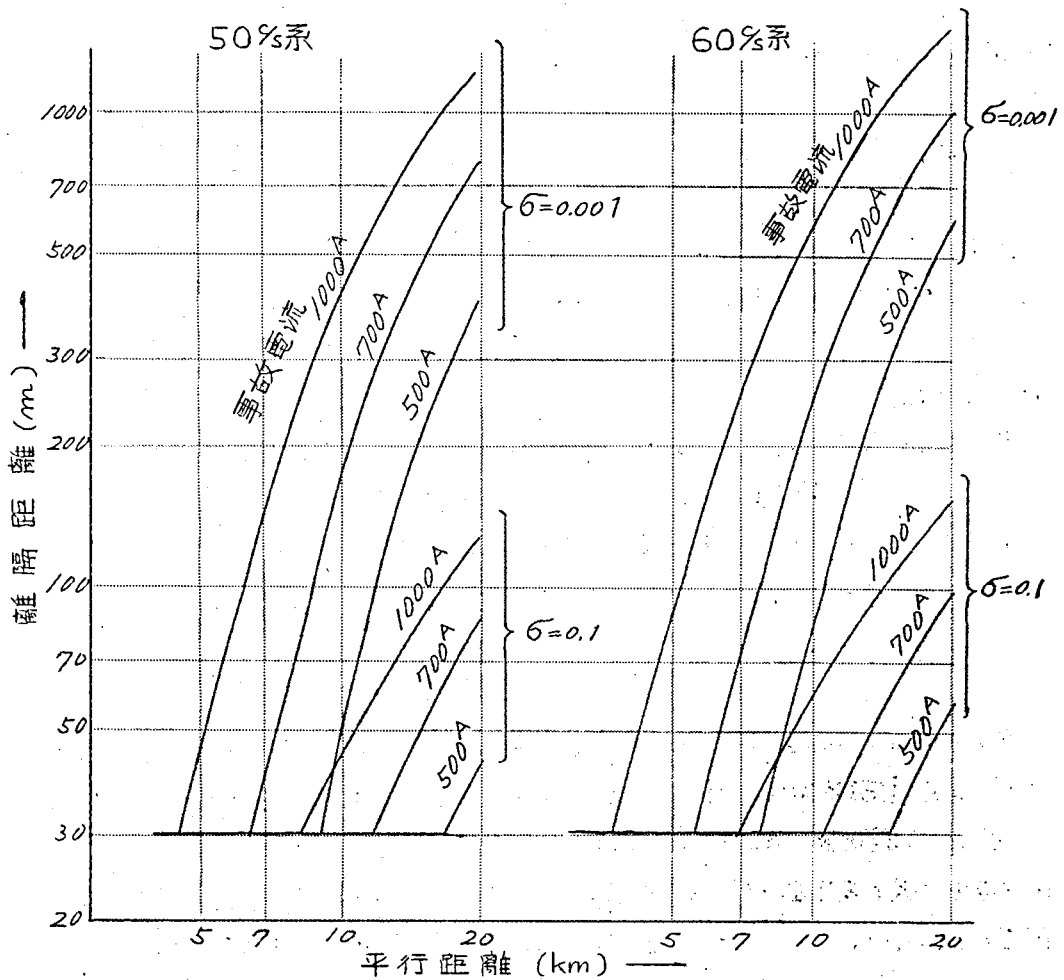


図6.12 電単線とBTを有する交流電方式において異常時制限値300Vを満たすべき架空線路信線の平行距離と離隔距離

また例えば (b) の場合地絡時故障電流 500A として周波数 60% 大地導電率 $0.1 \mu/m$ の場合、平行距離 10 km に対して離隔距離 30m なることを要する。ただし 30m は静電誘導電圧の面より制限される距離にして、静電誘導電圧のない時は図の曲線を延長して離隔距離 10m が許容されることが推定できる。従つてもし離隔距離と平行距離との関係が図 6.11 または図 6.12 の範囲を超えるときは、き電回路を (c) とするか、または通信側に後で述べるような対策を施すこととなる。その何れを選択するかは勿論経済的比較を行った上で決定されなければならない。

なおケーブルの場合は、その遮蔽係数により誘導電圧は小さくなるので、図6.11
および図6.12の横目盛を遮蔽係数で除した分だけ平行巨長を長くとることができる。

6.3.2 危険電圧の防止

(1) き電側対策

静電誘導により生ずる誘導危険電圧を避けるため、電車線（通信線側でもよい）に
接近して接地線を設けることは有効である。そのしゃへい係数は接地線1本について、
せいせい0.7とみられるので、さらに必要に応じてその本数を増す。またフランス国
鉄ではき電側に逆電圧線を設ける実験をした。³⁰⁾これによると電車線に平行して設けた
線条に電車線電圧と逆位相の電圧を加えた結果、8mの距離に接近して平行する架空
線に対し、静電誘導電圧1,500Vが100~150Vに減少した。次に電磁誘導によ
る危険電圧の発生を防ぐため、吸上変圧器または単巻変圧器の使用されることは前述
したとおりである。これによると電磁誘導電圧を常時 $1/10$ 以下、異常時 $1/3$ 以下に
することができる。

(2) 通信側対策

絶縁中継コイルは通信側に適用され、誘導危険電圧の屋外線路から屋内への侵入を
防ぎ、また通信線路中間に使用して縦方向誘導電圧の加算累増を防ぐことができる。
この意味で通信線路の両端および中間10~20 kmごと使用される。日本では通
常き電側に吸上変圧器を設け誘導電圧を小さくしているの、国鉄通信線以外では使
用されていない。フランスでは吸上変圧器はなく誘導電圧が大きいため、特に耐圧の
よい絶縁中継コイルを使用し、誘導電圧はケーブルで地絡時1,200Vを許容してい
る。なおこのようなコイルでは従来の指令電話または個別呼出電話などの呼出待号や
直流ダイヤル待号の伝送が困難になるので、ろ波排流コイルを設計し、³¹⁾誘導電圧の軽
減を図った。これは従来の排流コイルの考え方にろ波回路を付加し、排流による回線
雑音の増大を防ぐ役割を持たせている。

架空線路を誘導電圧から防護する装置として、前記2コイルのほかは中和変圧器、
しゃへいコイル、排流コイル、チョークコイルなどがあるが、これらは通信の伝送電
圧を下げ、かつ保守を複雑にするという理由で一般的にはあまり使用されていない。
これに代わり異常時に発生する高圧により継電器を動作させ、架空線路を一度に接地
させる方式（継電器プロテクタ）がアメリカで実施されている。この方式では異常状
態の継続する間は全通信は杜絶または中断される。

架空線を廃してケーブル化することは誘導防止の目的を達するばかりでなく、通信の品質を向上し、線路の保守をも簡単化するという理由で、現在、日本をはじめ各国国鉄が自己の通信線の改善を兼ねて交流電化区間で実施している方法である。この場合、重要なことはケーブルしゃへい層の構成とその接地方式である。これを適切に設計することにより、誘導防止の経費をかなり節減することができる。

日本国鉄ではケーブルの電磁誘導に対するしゃへい係数を誘導電界 50 V/km 、周波数 50% において 60% とし、そのしゃへい層の接地は各駅 (約 4 km) ごとに $1 \Omega/\text{km}$ の接地抵抗で行うこととしている。また、イギリス国鉄では、 $1,000 \text{ yd}$ (約 1 km) ごとに 4Ω の接地を行っている。²⁸⁾

6.3.3 雑音電圧の防止

(1) き電側対策

整流器機関車より発生する高調波を減らす目的で日本では図 6.13 に示すような CR の組合せよりなるフィルタが用いられている。CR の大きさはその積が $400 \sim 500 \mu\text{F}\Omega$ を最適とし、これによる高調波の減少程度は 45 形機関車で約 $1/3 \sim 1/4$ 、70 形機関車で約 $1/2$ である。なお吸上変圧器は雑音防止にも勿論有効で、商用周波数におけると同程度の効果を持っていることは既に述べた。

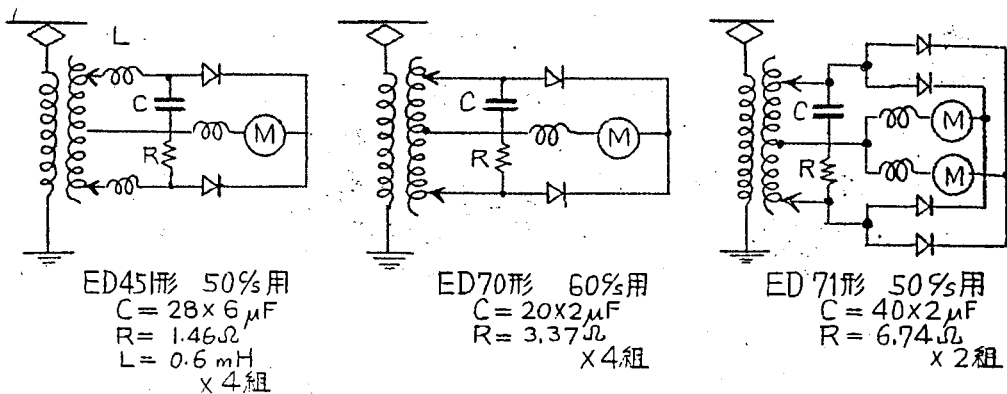


図 6.13

水銀整流器機関車フィルタ

また変電所における受電波形の歪が電車線に波及して通信雑音を生ずる場合があり、これを防ぐため変電所においてき電線対大地向にコンデンサ (約 $2 \mu\text{F}$) を挿入することがドイツ、ソ連などで行われている。²⁶⁾

(2) 通信側対策

架空裸線では通帯漏話を防ぐため交叉が実施せられる。しかし電力線に平行する部分では誘導雑音を防ぐための特別な交叉が実施せられることは既にオ4章で述べた。交叉の間隔は最小200~500mとしなるべく誘導雑音起電力を互に打消すような交叉形式を考える。これによって雑音電圧を $1/3$ 以下にすることは可能である。また回線の平衡度を良くする目的で線系と機器との接続点または線系途中の分岐点または誘導区間の両端などに中継線輪または中和線輪を挿入することは非常に有効である。この方法により平衡度を10dB以上改善することは可能である。また通信回線が大地に対して平衡を保つよう諸機器の接続に注意を拂うことも大切である。例えば回線を構成する両線系に片方にのみレーの挿入される場合は他方にもそれに等価な素子の挿入を行わねばならない。既にオ4章に詳説した通り線路定数の不平衡をなくすることが雑音軽減に最も重要な点である。

次にケーブルに収納せられた通信回線では心線が十分に細かく撚り合わされているので、架空裸通信線よりは平衡度は約10dB以上も良いのが普通で、また誘導遮蔽ケーブルの場合はさらにその遮蔽係数が雑音周波数において約0.1以上を期待できるので、誘導雑音の大きさは架空裸線の場合の $1/30$ 以下となし得ることが出来る。

6.3.4 音響衝撃その他

音響衝撃のおそれあるときは、音響衝撃吸収器を受話器端子にそう入するが、いままでの実績ではその必要はなかつた。これは架空裸線では危険電圧または雑音電圧発生を避けるため、あらかじめ措置されるからである。また誘導妨害とは本質的に異なるが、交流電化に際して軌条電位の上昇による人畜への危害及びパンタグラフまたは不良碍子などに生ずる火花によるラゲオ雑音障害³²⁾などの向題が調査された。日本および諸外国ともに現状ではこのような障害事故は非常に稀のようである。

6.4 北陸線における実施例

6.4.1 田村・敦賀間の誘導対策

北陸線田村・敦賀間電化に伴う誘導妨害を防ぐため国鉄および電々公社通信線に対し次の対策を実施した。

(1) き電側対策： き電回路はBT、NFつきものとしBT、36KVAを約4km置きにこの間約42.3kmに対して合計10ヶ設備しまたNFとしては複合アルミ 215mm^2 を使用した。

(2) 通信側対策：

(2.1) 電々公社通信線については田村・長浜・虎姫間でケーブル線路が最も鉄道に接近し間隔は約30~110m(平均約40m)また裸通信線が高月・木の本・旧線分岐までの間約24~50m(平均約25m)に接近する状況であった。

これに対する異常時誘導危険電圧を計算の結果は表6.4の通りとなり、BT

表6.4 異常時誘導危険電圧計算値

	条件	事故点	事故電流 (A) 計算値	誘導電圧 (V)			
				裸線	ケーブル		
					$R_e=0$	$R_e=2$	$R_e=4$
米原 き電	BT なし	虎姫	1100	10.5	266	359	365
		木の本	800	468	337	444	456
敦 賀 電	BT NF あり	虎姫	1100	2.5	63.8	86.2	87.6
		木の本	800	70.2	50.6	66.6	68.4
敦 賀 電	BT NF あり	木の本	830	60.8	—	—	—
		首掛	1100	130.	—	—	—

なしのき電回路では300Vを超過することが判った。しかしBT、NFを設備することにより何れの場合も300Vより遙かに小さい電圧となり通信側に対策を施すことなく充分安全であることが確かめられた。このように異常時誘導電圧を検討するには通信線の平行する全線について誘導電圧を積算し、これが300Vを超過しないことを確かめる必要がある。

次に常時運転中に発生する誘導電圧の中、電車線電流100Aに対する電磁誘導電圧計算結果を表6.5に示した。さらに最悪運転ダイヤを想定し、田村、塩津

向425A、背掛340A、足田220Aと仮定すると図6.14に図示した関係区向において裸線A'で最高47.5V B区向ケ-ブル $R_e=4\Omega$ の場合49.7Vでありその他はすべてこれより小さく、すべて許容値内である。このように平常時誘導電圧を検討するには、BTの各区向毎に計算を行い夫々が判別限度60Vを超過するかどうかを確かめればよい。

表6.5 吸上変圧器区間誘導電圧 (100A当り)

区間別	裸線(V)	ケ-ブル(V)		
		$R_e=0$	$R_e=2$	$R_e=4$
A	0.3	5.8	8.6	9.0
B	0.1	9.2	10.9	11.7
C	0.1	3.0	3.8	4.2
D	7.2	0.6	0.8	0.9
E	18.1	3.2	3.3	3.4
A'	21.6	—	—	—
B'	2.1	—	—	—

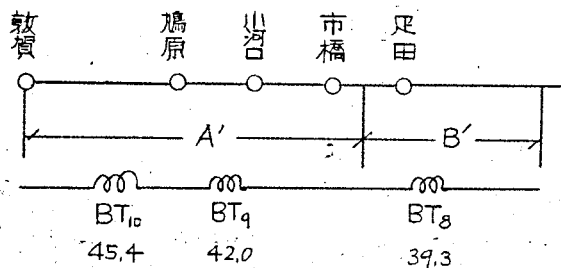
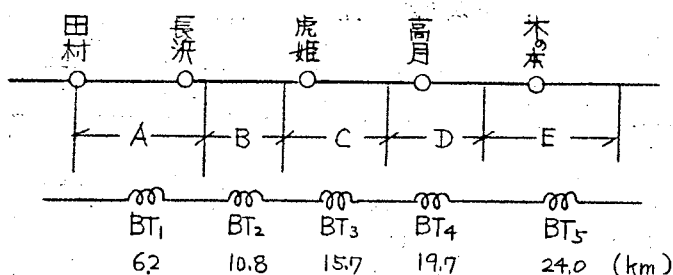


図6.14 電気公社通信線区間別表示

次に静電誘導に対しては、図6.1より高月・木の本間裸線では約350Vと推定されるが、周囲の樹木、接地物および多線系効果などによつて、かなりこの数値は小さくなる筈である。従つて静電誘導による障害は殆んどないものと見なされる。

(2.2) 国鉄通信線は鉄道との接近距離が10m内外であるので現在のまゝでは図6.1より明らかなように、静電誘導電圧が1000V以上も現われるため、これを全部鋼帯被装ケーブルとし、これを軌道中心より3~5m離れた位置に深さ約1mに直埋設する。しかしこれだけではやはり事故時の電磁誘導電圧が大きくなること予想されるので、ケーブル心線に絶縁線輪を使用して縦方向電圧の重畳を防ぐこととした。

いま誘導危険電圧の計算結果を示すと表6.6の通り、敷設電線事故時において制限値300Vを超過する。また、平常時誘導電圧は最悪運転ダイヤを想定して計算すると、木の木・敷設間で約70Vを生ずる恐れがある。

以上事故時、平常時双方を考慮して図6.15の通り絶縁中継線輪を用いて通信線を区分する。

表6.6 事故時国鉄通信線への誘導電圧計算

米原き電

事故点	事故電流	$Z_2 (\Omega)$	m	$\sqrt{A \cdot km}$	誘導電圧
虎姫短絡	110 A	3.6	0.72	0.04	216 V
木の木短絡	800 A	7.0	0.83	0.028	239 V

ただし $\sigma = 0.04 \text{ V/m}$,

ケーブル遮蔽係数0.6とす。

敷設き電

事故点	事故電流	$Z_2 (\Omega)$	m	$\sqrt{A \cdot km}$	誘導電圧
木の木短絡	830 A	6.5	0.81	0.034	360 V
沓掛短絡	1100 A	3.6	0.72	0.044	338 V

ただし $\sigma = 0.004 \text{ V/m}$,

ケーブル遮蔽係数0.6とす。

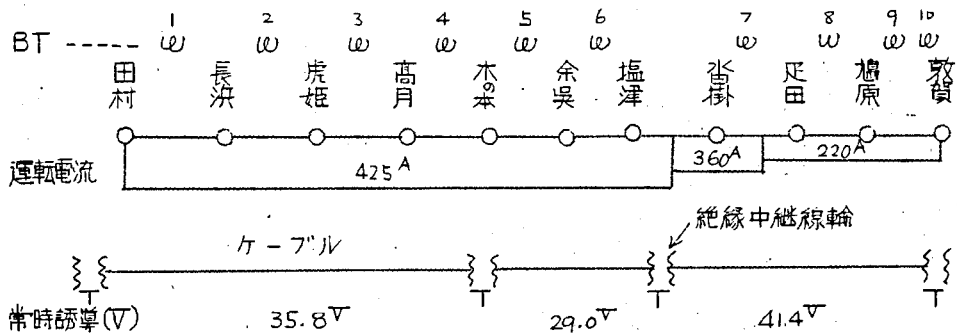


図6.15 国鉄通信ケーブルへの絶縁中継線輪の適用

6.4.2 北陸線トンネル内誘導対策³³⁾

北陸線敦賀・今庄向に延長13.8kmの北陸トンネルを工事中であるが、これを交流電氣(運転)するに際して、従来通りBTを設備するにはトンネル内であるため設備容量、場所、今後の保守などの困難性から不利であるので、トンネル内区間はBT、NFなしとし、通信側で誘導対策を特別に考慮することとした。その結果、高遮蔽のアルミケーブル(表6.7)を使用し、そのアルミ層接地は、トンネルの両端出口で5Ω以下の接地を行うことによりほぼ目的を達することができる。

表6.7 高遮蔽アルミケーブル(1.2×28対)

ケーブル種別	A	B
アルミ被厚さ (mm)	1.5	0.5
外径 (mm)	25	24
鋼帯(厚さ×枚数)	0.6×2	0.8×2
遮蔽層抵抗 (Ω/km)	0.26	0.68
遮蔽係数 ($100\%/\text{km}^{1/2}$)	5%	13.5%

この場合、ケーブルの遮蔽層接地はトンネルの両端のみであり、13.8kmの中間は全く無接地の方法であるので、特に中間で地絡事故の生じた場合のケーブル心線内縦方向の誘起電圧分布を調べておく必要がある。いま両端接地をそれぞれ5Ωとした時の種々な事故点に対応する心線誘起電圧の分布を示すと図6.16の通りとなる。

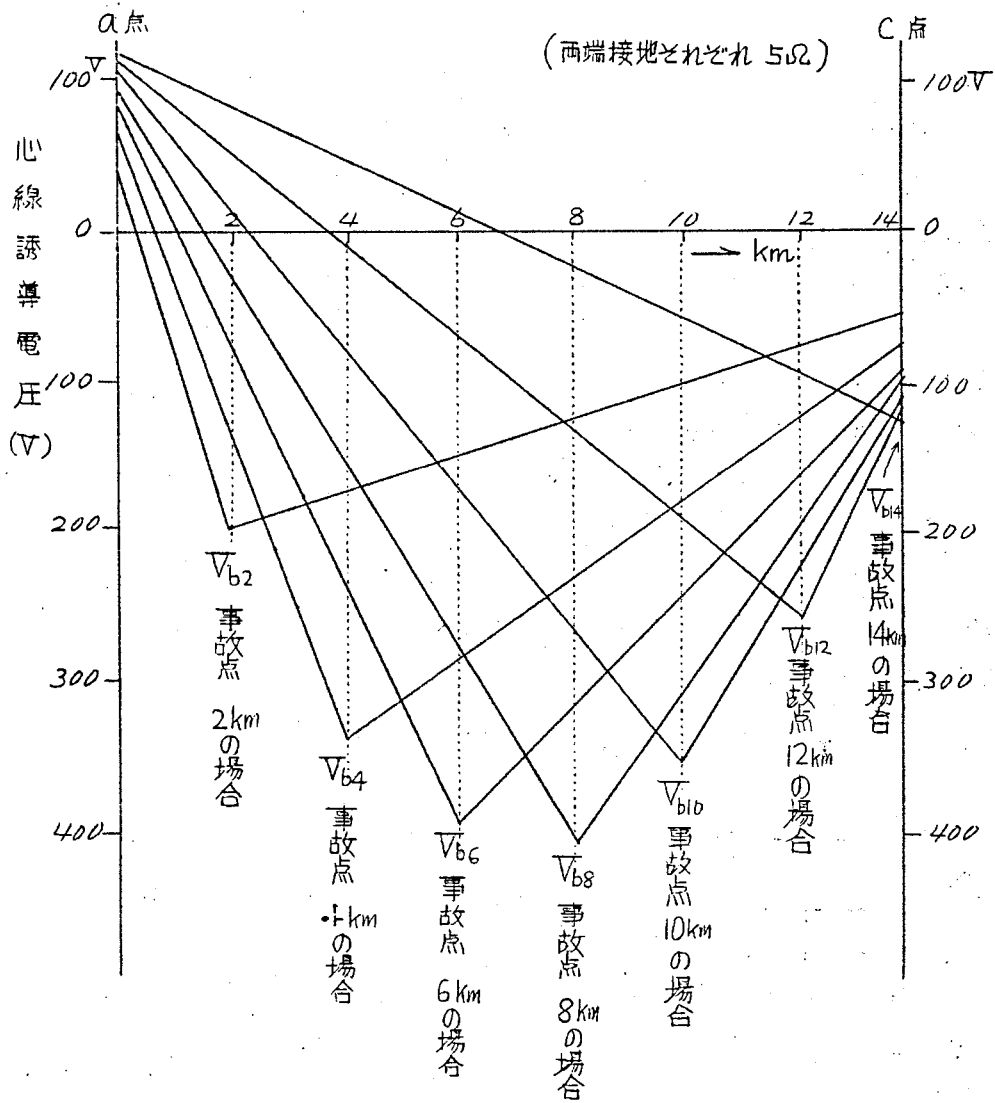


図6.16 地絡時ケーブルA (表6.7) の心線誘導電圧の分布

6.5 欧州3ヶ国における誘導防止対策

筆者は昭和30年5月3日より7月13日までの約70日向国鉄交流電化調査団の一員として、フランス、ドイツ、およびスウェーデン3ヶ国の交流電化の状況を視察する機会に恵まれた。

いま参考までに当時実施されていた3ヶ国の誘導防止に対する考え方および現状を一括表示すると表6.8 のようである。ここに共通して見られる点はスウェーデンの一部裸通信線を除いて通信線はケーブル化され、地中埋設されていること、ケーブルの耐圧は一般の場合より高く取られていること、危険電圧の許容値を特別の場合にケーブル耐圧の60%または80%まで認めていること、アレスター、フューズ等の通信用保安器は使用していないこと、およびケーブルのシース接地を多数点で必ず実施していることなどである。なお特別の場合とは、ケーブル作業保身者に対して危険防止のための特別の準備を与えることをいうている。事実上は各国ともこのような特別の場合が慣例になっているようである。

表6.8 欧州3ヶ国の交流電化誘導防止

	フランス	スウェーデン	ド イ ツ	
1. 電化方式	AC 50% 25kV	AC 16% 15kV	AC 16% 15kV	AC 50% 20kV
2. 通信用ケーブル	鋼帯外装	全左	全左	全左
鋼帯厚さ	約1mm	〃	〃	〃
鉛被厚さ	2.6mm	2.5mm	1.4~1.9mm	1.4~1.9mm
施設方法	地下管路(コンクリート製) 又は直接埋設	直接埋設	全左	全左
ケーブルの位置	中心より3m; 地下80cm	中心より1.9m; 地下70cm	なるべく遠く	全左
接地抵抗	10 ² Ω/km 以下	2 ² Ω/km 以下	1 ² Ω/km 以下	全左
3. 裸線	ケーブル化	長距離はケーブル化 短いものは電柱を 100m以上とす。	ケーブル化	全左
4. 危険電圧 許容値	CCITT	全左	全左	全左
特別の場合	ケーブル耐圧の60%	全左	ケーブル耐圧の 60又は80%	全左

	フランス	スエーデン	ドイツ	
5. 雑音電圧許容値	CCITT	全左	全左	全左
6. 危険電圧防止				
1. 吸上変圧器	なし	5.6km毎に柱上の 据置 200A定格約1.8t 300A " 2.4t	なし	なし
2. 絶縁線輪	最大15kmおきの設置	なし	必要により	なし
3. アレスター	なし	なし	なし	なし
4. ケーブル耐圧	心線/鉛被 2000V 心線/心線 700V	全左 "	全左 "	全左 "
7. 地絡				
事故統計	なし	なし	1回/年	"
通信障害	なし	なし	なし	なし
8. 誘導電圧の現状				
危険電圧	0.1~0.12 V/A·km	0.02 V/A·km		
雑音電圧	ケーブル 2mV ただし2mV以上の 恐れあり	ケーブル 1mV以下 裸線 1~3mV	ケーブル 1mV以下	ケーブル 5~10mV

第 7 章 直流電化における誘導調整

7.1 緒 言

我国においては昭和初年鉄道電化に水銀整流器を使用し始めてより誘導障害が問題となり、まずその直流側リップル波形を平滑にする必要上フィルタを設置することが研究された。当時は回転変流機が専ら使用されており、この場合には誘導障害の発生が少なかったため当初のフィルタ設計の目標は水銀整流器の出す妨害電圧を回転変流機と同程度とする矣におもわれていた。しかし第二次大戦終了後は急速な電化工事の進展により通信網に及ぼす誘導障害は従来を遙かに超えることが予想され、かくして先ず上越線電化に際して誘導問題に関する基礎的な調査が行われた。その結果、交流側至電流の送電網への分布状況とこれが通信線に及ぼす影響が明らかになり³⁵⁾、さらに直流側波形よりの妨害が平行する通信系に甚だしく雑音障害を与えていることが分かった。且つその原因はまずフィルタの性能不³⁶⁾充分によることの外に、戦時中放置された通信線路の保守不良³⁷⁾に基づくものであることが確認された。この貴重な経験に基づいてフィルタの新しい仕様書が作製され、これに基づいて静岡、浜松間の電化に際し新型フィルタ³⁸⁾(T型)が設置され、続いて大宮、高崎間にもほぼ同じものが使用された。しかし衆知のようにフィルタは同調特性を持っているので電源周波数の変動の甚だしい所ではしばしば離調のため効果を甚だしく悪くした。このため新仕様書では3サイクル中の電源変動に対して必要な低減率を保つことを規定したのであるがこのため装置は非常に大きい直列リアクトルと、多くの蓄電器を必要とし、価格と床面積の関係上設計の小型化が要望されるようになった。そこで続いては周波数自動同調方式³⁹⁾が考えられ浜松・名古屋間電化においてはこれによる新方式が採用された。その後周波数の変動は少なくなり、コイルのQを高上せしめて小型化をはかる方向に匝みS型フィルタが使用せられる様になった。

次に通信線路の保守については当初国鉄においては裸線路があまりにも多く将来とも急速にこれをケーブル化する計画もないので専らその平衡度を良好にすることに努力を盡した。このにおいて平衡度改善の目標が問題となり高崎線その他で基本的な実験を行つた。これについてはフィルタの低減率と強弱両線路間の間隔とが重要な関係をもつてくるので、これら三つの中いづれが一つ又は二つをなぞり⁴⁰⁾にしては目的を達することは非常に困難となる。従つて先ず現在における鉄道通信線路と鉄道との関係位置を調査し、なるべく線路移転の少ないことを目標に又多数回線の平衡度を調査し、

保身に特別な困難を伴わないことを条件とし、強弱両線路間の平均間隔は7米以上であること及び回線の平衡度は46dB以上であることを決定した。この結果フィルタに必要な低減率としてはその出力妨害電圧が2 Volt⁴⁰⁾以上にならないように自動的に決定されてくる。このようにして夫々強電側及び弱電側における改造の目標が決定された。⁴⁰⁾ 現在はこの基本原則に沿って誘導調整が行われており、最近までの電化において良好な結果が得られた。なお対策実施の中水銀整流器フィルタの詳細については最近筆者と協同研究を行った塩見氏より詳細な報告⁴¹⁾があったのでここに省略する。

7.2 雑音電圧の予測計算

7.2.1 計算方法

直流電気鉄道より通信線へ及ぼす雑音障害を予測計算するには第3章に述べた直流電線のある回路よりの誘導作用に関する諸式を適用すればよい。いまここにこれを要約すると次の通りである。

- (1) 静電結合係数 k_s と通信線の線条と大地間に誘導する静電誘導電圧 V_s との間は、次の関係が成立つ。

$$V_s = k_s V_p \quad (7.1)$$

電磁結合係数 k_m と通信線の線条と大地間に誘導する電磁誘導電圧 V_m との間は、次の関係が成立つ。

$$V_m = k_m V_p \quad (7.2)$$

ここに k_s 及び k_m の値は図3.5 及び図3.3に与えられている。

- (2) 通信回線に誘導される雑音電圧 N を計算する場合には、上記諸式中、 V_p に直流変電所の出力側妨害電圧値(表7.1)を代入し、以下の方法による

$$N = \eta B \sqrt{\sum (V_s^2 + V_m^2)} \quad (7.3)$$

ただし $B =$ 通信回線平衡度

$\eta =$ ケーブルの遮蔽係数(800%における値)

平衡度 B は第4章に述べた方法で実測するのがよいが、実測のない場合は次の数値を使用する。

$$B = \left. \begin{array}{l} 1/200 : \text{架空標高信線 (実回線)} \\ 1/30 : \text{--- (幻影回線)} \\ 1/1000 : \text{ケーブル通信回線} \end{array} \right\} (7.4)$$

表 7.1 調波電圧および妨害電圧⁴¹⁾

機 器	条 件 高調波 次数 m	受電波形の良好なとき 過負荷の少いとき		受電波形の歪んでいるとき 過負荷のあるとき	
		調波電圧	妨害電圧	調波電圧	妨害電圧
		(実効値)	50%系, 60%系	(実効値)	50%系, 60%系
水 銀 整 流 器	1	80 ^V	25 30	100 ^V	30 36
	2	30	20 25	45	30 37
	3	25	31 36	30	37 43
	4	15	17 14	20	23 19
	5	12	8 7	15	10 8
	6	10	6 5	12	7 6
妨害電圧			50 60		60 70
回転度流機の妨害電圧			2~10		10~20

またケーブル通信線については静電誘導は常に0とおくことができる。次に R_m および V_p を決定する方法について以下に述べる。

7.2.2 平均離隔距離の算出 (KMの方法)

一般に通信線路は鉄道線路とジグザグに平行するので、静電結合係数及び相互誘導係数の計算に際しては平均間隔を求める必要がある。離隔距離20m以上の部分については従来の算術平均による簡単な方法で充分であるが、20m以内に近接する部分については次に述べるKMの方法によるのが正確、便利である。

平均間隔を求めんとする区間に存在する各電柱1本1本について電線中心からの離隔距離を測定し、表7.2分類欄に相当する本数を集計し、記入する。次に表中に記載された各欄固有の電柱重価 W を夫々の本数に乘じ、平均の重価 W_m を求める。

$$W_m = \frac{\sum W_n}{\sum n} \quad (7.5)$$

W_m と平均離隔 b_m との関係は図7.1に示されるので、この結果より b_m が求められる。この方法は国鉄電化単線区間の標準き電回路について1変電所区間に生ずる誘

表7.2 平均離隔計算表

離隔 b (m)	重価 W	電柱数 n	$W \times n$
3	284	5	1425
4	253	7	1771
5	227	12	2724
6	206	10	2060
8	175	1	
10	152	1	
12	136	1	
14	123	1	
16	115	1	
18	107	1	
20以上	104	1	
	計		

平均重価 $W_m = \frac{\sum W \times n}{\sum n} =$

註： 電柱離隔値が表の中間値のときは低い方に含める。

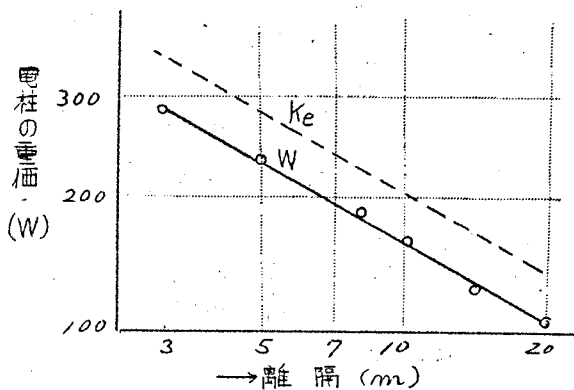


図7.1 電柱の離隔と重価の関係

導電率と離隔距離の計算を行い、その数値を重値 W として各相当する電柱に与えたものである。従つてこの数値は、単位 (mV/km) を附与すれば実際に通信線に生ずる誘導雑音電圧 (L, E) が得られる。図 7.1 中 K_e は次節 7.2.2 の計算により得られる係数を 10^3 倍したものであるが、これは全く W と同じ物理的意味を持つ量でありその傾向は全く同じになるのは当然である。従つて W の代りに K_e の数値を使用して差支えない。

7.2.3 雑音電圧の計算例

直流の電気鉄道に關して雑音の問題になるのは架空線通信線である。ケーブルの場合は回線平衡度および遮蔽係数の良いためあまり問題になることはない。架空線の場合は静電誘導によるものおよび電磁誘導によるもの双方を考え入れねばならない。例えば式 (3.39) の場合架空線線を対照として二つの変電所より並列き電をし、その中向に電車負荷があつて通信線はこの二変電所向の距離 l の向において全線平行する場合を考える。即ちこの場合の誘導電圧 V_n は式 (3.39) より

$$V_n = \frac{1}{2} k_s (V_{p2} k_2 + V_{p2}' k_2') \pm \frac{1}{2} k_m (V_{p2} - V_{p2}') \quad (7.6)$$

こゝで k_s, k_m はそれぞれ静電結合係数、電磁結合係数、にして既に各図表で与えられた。そこで k_2, k_2' を知る必要がある。これは式 (3.40) に与えられるが、これを求めるため電鉄回路は図 3.2 ④ に示される複線軌道とする。また $l = 15 \text{ km}$ として式 (3.40) 中の k_2 および k_2' を計算すると図 7.2 の通りになる。 L_r は主として電鉄用モーターのインダクタンスで決まるもので、直並列の組合せにより $5 \sim 30 \text{ mH}$ の範囲に変わるものと推定される。¹⁸⁾ 従つて k_2 又は k_2' は普通 $0.7 \sim 1.0$ の向にある。従つていまとも最大値をとり $k_2 = k_2' = 1.0$ とすると

$$\begin{aligned} V_n &= \frac{1}{2} k_s (V_{p2} + V_{p2}') \pm \frac{1}{2} k_m (V_{p2} - V_{p2}') \\ \text{又は} \\ &= \frac{1}{2} (k_s \pm k_m) V_{p2} + \frac{1}{2} (k_s \mp k_m) V_{p2}' \end{aligned} \quad (7.7)$$

さらに一般には、両変電所の高調波電圧 V_{p2}, V_{p2}' は大きさおよび位相角 φ に差異があるものであるが、共に高調波電圧が最大値の状態にあるとし、その絶対値が等しい場合は V_n の絶対値は

$$|V_n| = \frac{|V_{p2}|}{2} \sqrt{2(k_2^2 + k_2'^2) - 2 \cos \varphi (k_2'^2 - k_2^2)} \equiv K_e |V_{p2}| \quad (7.8)$$

いま φ を 0° より 180° にかえて、 K_e の値を計算すると図 7.3 の通りになる。
 K_e の値は近距離接近の裸通信線に対して、殆んど周波数に無関係である。従って
 $|V_{p2}|$ は総合妨害電圧をとると、 $|V_n|$ は通信線条と対大地間誘導雑音電圧になる。
 いま総合妨害電圧に対しては K_e はその平均値をとるものと考え、線間雑音 $L_1, L_2 = 2.5\text{mV}$ になるため必要な V_p を各平衡度に対して求めると表 7.3 のようになる。

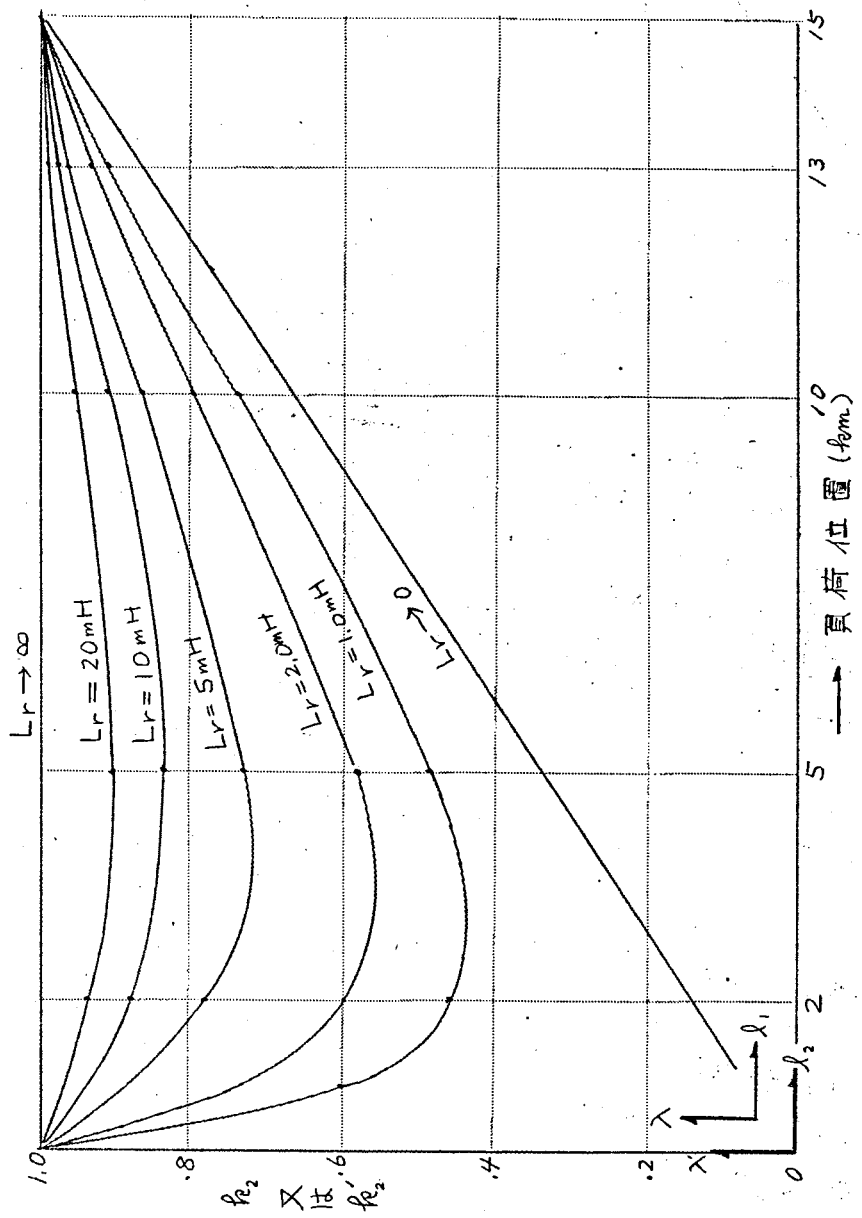


図 7.2 K_e 及び K_e' の値 (変電所向隔 15 km)

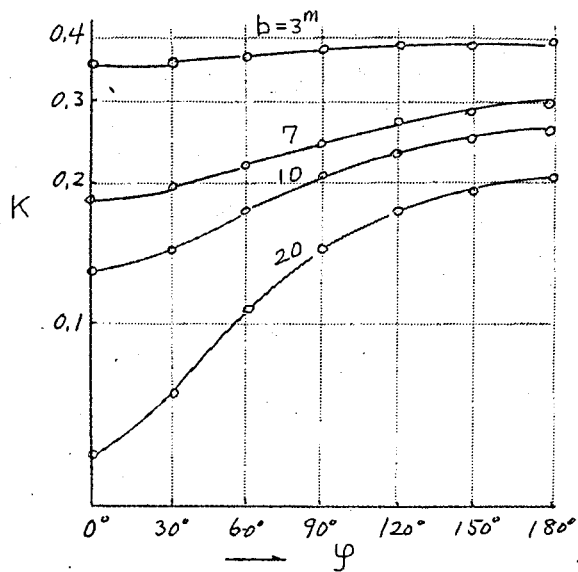


図7.3 誘導雑音係数 K_e

表7.3 離隔距離と妨害電圧の許容値

b (m)	3	7	10	20	平衡度
V_p (Volt)	0.67	1.05	1.28	1.98	40 dB
	1.34	2.1	2.56	3.96	46 dB
	2.0	3.2	3.8	5.9	50 dB
K_e (平均値)	0.373	0.239	0.196	0.126	

7.3 防止対策とその実施例

7.3.1 防止対策と原則

表7.3の結果により、通信線の間隔 b と平衡度と妨害電圧 V_p との三者の間に、雑音電圧を 2.5mV に保つために必要な関係のあることが推定される。これは国鉄通信線と、国鉄直流電化の場合の計算例であるが、この結果において、国鉄通信線は殆んどが平均7m以上の丘陵状況であるため、また平衡度は多数測定の結果標準46dB(オ4章)であるので、総合妨害電圧 V_p を 2.1V とすれば通信側に特別の

対策を施すことなく誘導雑音を許容量 2.5 mV 以下に保つことができることが判る。従って国鉄では直流電化の誘導防止を行うための3つの原則的目標を次の通り決定した。

(1) 変電所より送出される高調波リップルを少なくする。このため妨害電圧の目標値を 2.0 V とし、これに必要なフィルタを直流変電所に設備する。水銀整流器及び回転変流機について各所における実測による最高値は表7.1の通りであるのでフィルタとしては総合低減率20以上のものが望まれる。回転変流機の場合は妨害電圧は小さいので特別にフィルタを設けず、向題のある場合通信側で処置するものとする。

(2) 通信線の離隔距離を大きくするKM法による平均離隔算出の結果、 7 m 以下の場合には重層的に電柱移転を行い平均 7 m 以上になるように処置する。

通信線路の離隔は図7.11に見るように接近距離の小さいもの程重層 W が大であるので、これを参考として重点的に行えば経済的な移転を行うことができる。

(3) 通信線路の平衡度を良くする。平衡度の標準値はオ4章に述べた実測資料によると架空裸線で 46 dB であるので、この値より低いものには通信側でこれを改良する処置をとる。また標準値 46 dB を保つために通信線の伝送基準として導体抵抗不平衡 6% 以下、絶縁抵抗不平衡 50% 以上となることを規定している。このようにすればオ4章 (図4.8 および 図4.9) より回線平衡度は常に 46 dB 以上に保ち得ることが判る。

通常の線路では 10000 平衡度は $50\sim 60\text{ dB}$ 、雑音平衡度は $40\sim 50\text{ dB}$ である。しかし幻影回線では 30 dB 以下になることもある。このような 46 dB 以下の線路又は特殊な線路で障害を生じた場合は通信側で別途に対策を実施する必要がある。

以上は現段階において最も合理的と思われる誘導調整の三つの基準値を示したのでこの条件を揃って満足できないやむを得ない場合は特殊な手段が講ぜられる。例えば通信線の燃架⁴²⁾、交叉、電話濾波器⁴³⁾の適用などである。

7.3.2 誘導対策実施例

(1) 高崎線実施例

高崎線大宮、高崎間の電化は昭和27年4月開通を見たが、これに先立ち2月～3月の間各種の誘導問題に関連する諸試験を実施し¹²⁾ 誘導対策としては直流変電所3

ヶ所に新しい仕様のT型フィルタを設備，通信線は平衡度40dBを基準として鉄道との距離距離を平均10mに調整した。

この対策により通信線への影響を調査した結果について以下に述べる。

表7.4 国鉄通信線における試験結果

種別		フィルタの 共振分路	$L_1 E$ (mV)	$L_1 L_2$ (mV)
裸回線	電化前		380 ~ 700	0.9 ~ 2.8
	電化後	開放 投入	2100 ~ 8500 500 ~ 950	5.3 ~ 2.4 2.7 ~ 7.5
ケーブル	電化前			
	電化後	開放 投入	1200 ~ 3800 50 ~ 880	3.0 ~ 4.0 0.08 ~ 1.1
構内加入 ケーブル	電化前		33 ~ 180	0.07 ~ 2.8
	電化後	開放 投入	350 ~ 2900 72 ~ 830	0.9 ~ 4.3 0.23 ~ 7.5

註： $L_1 L_2$ の値は先端交換機，測定端は測定器の高インピーダンスで終端したときの値とする。

高崎線各変電所の水銀整流器に設置されたフィルタの効果を見るために、便宜上その共振分路だけを開放又は投入して雑音の变化状況を見た。この結果を表7.4に示す。共振分路開放の場合にはなお直列リアクトルがき電回路に挿入された状態にあるが、ほぼフィルタなしの状態である。さらにこの結果では列車負荷であるため負荷条件の変動が激しく充分な結果を得られないので、桶川及び吹上変電所尚で水抵抗負荷により一定電流を流し試験をした。結果を示すと表7.5および表7.6が得られる。

この結果では負荷が500 Amp のとき水銀整流器側の妨害電圧は最も大きく、これに伴って通信側の誘導雑音電圧も最も大きい。ここでフィルタの有効度を現わすのに低減率と、実効有効度の二つの定義が使われているが、前者は妨害電圧の減り方を後者は雑音電圧の減り方を示すもので、次のように定義される。

$$\text{フィルタの低減率} = \frac{\text{直列リアクトルの整流器側妨害電圧}}{\text{直列リアクトルの軌条側妨害電圧}} \quad (7.9)$$

表 7.5 国鉄通信線における試験結果

水抵抗荷 (A)	共振 分路	妨害電圧(V)		フィルタ 低減率	誘導 雑音電圧 L ₁ E (mV)	フィルタ 実効 有効度
		整流器側	軌条側			
0	開放	25.5 8.9	24.5 1.8~2.06	約 1.0 " 4.8	450	
500	開放	35.7 25.0	30.6 1.3	" 1.2 " 19.2	5500 400	約 13.5
1000	開放	28.6~35.7 30.6	26.5~32.7 1.5	" 1.1 " 20.4	3800~4300 670	約 6.0

表 7.6 電々公社通信線における試験結果

水抵抗荷 (A)	共振 分路	先端接地 誘導電圧 L ₁ E (mV)	フィルタ 実効 有効度	先端開放 誘導電圧 L ₁ E (mV)	フィルタ 実効 有効度
0	開放	490 100	4.9	450 90	5
500	開放	7150 600	11.9	5690 580	9.9
1000	開放	5140 825	6.22	3670 800	4.58

$$\text{フィルタの実効有効度} = \frac{\text{共振分路開放時の誘導雑音}}{\text{共振分路投入時の誘導雑音}} \quad (7.10)$$

(2) 浜松、名古屋間実施例

浜松、名古屋間電化は昭和 28 年 7 月開通したが、この場合には前節に述べた基本原則 3 項目に合致するようにそれぞれの対策を実施した。また特に変電所フィルタには電源周波数の変動に即応するため、周波数応動型のものを各所に設置した。

これら対策による効果を調査するため電化開通の前後に各種の試験を実施したので、その結果について述べる。

まず新設したフィルタの効果を知らるため岡崎、刈谷、豊橋、高塚各変電所より隣接変電所の水抵抗へ電流 0~1000A を流した時に生ずる誘導電圧測定の結果を表 7.7 に示す。

表 7.7

妨害電圧及び雑音電圧の実測 (浜松-名古屋電化)

変電所	負荷 (A)	共振分路	妨害電圧 (V)	雑音電圧 L_1E (mV)	低減率	実効有効度
岡崎 ↓ 豊橋	0	なし あり	37.8 1.8	7500~10500 1000~1500	14.6	7.5~7.0
	500	なし あり	36.0 1.05	8000~9000 850~1100	27.0	9.4~8.2
	1000	なし あり	45.0 1.29	8000~11000 1000~1300	23.2	8.0~8.5
刈谷 ↓ 岡崎	0	なし あり	46.5 4.2	800~1700	12.9	
	500	なし あり	39.0 2.49	6500~7000 1200~1500	16.3	5.4~4.7
	1000	なし あり	51.0 2.42	8500 1000~1200	19.7	7.7
豊橋 ↓ 岡崎	0	なし あり	30.0 2.1	3100 600	8.6	5.2
	500	なし あり	42.0 2.7	4500 550	12.2	8.2
	1000	なし あり	60. 3.0	6500 500~750	16.0	10.4
高塚 ↓ 豊橋	0	なし あり	69.0 0.93	1000	24.0	
	500	なし あり	45.5 1.5	8500 800	29.0	10.6
	1000	なし あり	54.0 1.29	10000 750	36.0	13.3

出力妨害電圧は、ここに見る通り各所ともフィルタ^によりほぼ2ボルトに低減することが出来た。試験時の電源サイクルは50.7乃至60.2の比較的安定していたが(刈谷の場合一時約57サイクルに低下)各変電所ともフィルタは54~61サイクルの周波数変動を見積って設計されているので(岡崎以外はこのため特に周波数変動型を採用)、表7.7の数値よりも甚だしく悪くなる心配はない。また表に示されている実効有効度が総合低減率より小さいのは飯田線其の他伊勢岡外の電鉄より影響のためであり、従って実効有効度をさらに良くするためにはこれらの方面に改善を加える必

要がある。

次に通信回線の平衡度を試験した結果は豊橋試験室における豊橋、浜松間及び豊橋、名古屋各中継線について表7.8, 表7.9が得られた。

表7.8 豊橋、名古屋間中継線の平衡度

回線名	絶縁抵抗 MΩ			導体抵抗 Ω		平衡度 dB	
	L ₁ L ₂	L ₁ E	L ₂ E	L ₁	L ₂	1000 ^{Hz}	雑音
豊岡 1	40	30	30	84.5	84.9	65.3	43.1
" 2	50	30	40	85.0	83.7	66.5	47.0
" 3(幻)						73.3	41.9
豊名 1	5	0.6	2.0	243.5	245.1	62.9	53.6
2	1	9	10	341.7	340.3	66.9	54.1
3	40	15	10	313.5	310.5	68.7	53.2
4	30	15	10	312.5	312.7	78.1	56.5
5(幻)						51.3	23.2

表7.9 豊橋、浜松間中継線の平衡度

回線名	絶縁抵抗 MΩ			導体抵抗 Ω		平衡度 dB	
	L ₁ L ₂	L ₁ E	L ₂ E	L ₁	L ₂	1000 ^{Hz}	雑音
静豊 1	3	5	5	148.8	148.6	62.0	58.1
" 2	1.6	4	4	151.3	151.0	54.0	56.8
" 3	6	0.15	5	123.3	125.0	58.9	60.7
" 4	1.8	2	3	123.3		58.0	52.5
" 5(幻)						34.4	24.9
浜豊 1	0.9	0.6	0.9	136.1	133.7	56.5	54.2
2	0.05	0.1	0.1	136.1	133.8	67.2	59.1
3	10	6	9	176.7	175.9	61.5	52.2

表7.8, 表7.9にある通り平衡度は実回線では目標値46dB以上あり、幻影回線(静豊5, 豊名5)は特に雑音平衡度が悪い、これは搬送交叉回線であるため幻影交叉数が不十分であることによる。このまゝでは雑音が多く通話は困難になるであろう。

次に電化開通後の各通信線雑音の測定結果を、電化前と比較すると図7.4が得られる。この結果は電化後において雑音の増加は殆んど認められない。これは充分フィル

夕が効果を發揮したためといつてよい。但し高崎線電化の場合に比較して全般的に雑音が多いことが認められるがこれは主として飯田線及び名古屋鉄道などの影響が入るためと推定される。また線間雑音 50 mV以上を示すものがあるが、これは搬送電話回線の幻影線で無交叉であるためである。

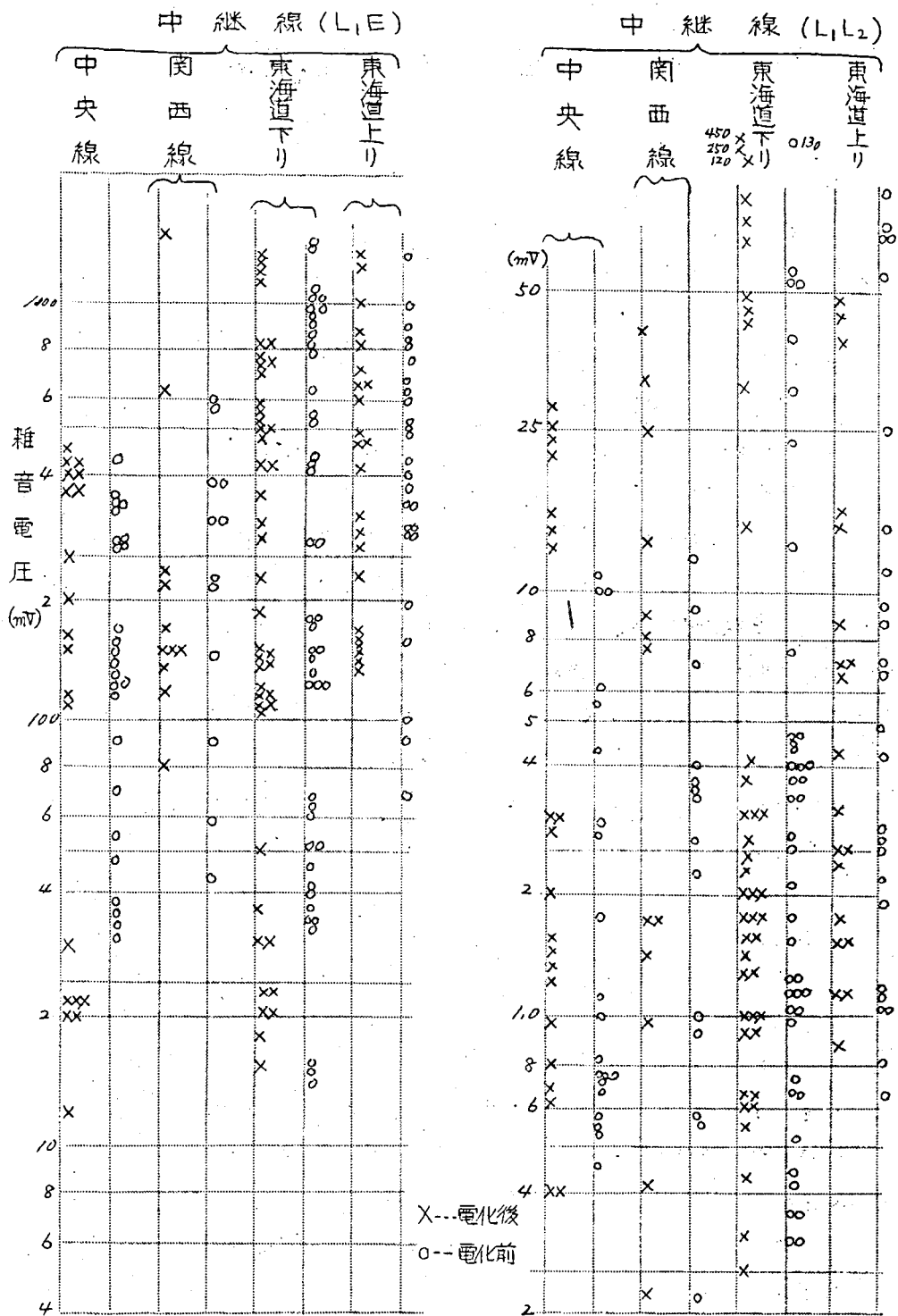


図 7.4 名古屋交換における電化前後の雑音比較

第 8 章 調査および試験

8.1 大地導電率の測定

電磁誘導電圧の予測、算定において Carson-Pollaczek 両氏の理論式は、正確なる大地導電率を計算基礎とする場合、一般によく実測値と一致することが各地で確認されている。この計算基礎となる大地導電率は、地質図その他よりある程度推定し得る場合もあるが、やはり実測を行った上で、なるべく正当な値を知っておく必要がある。測定の方法には一般に使用されているものに数種ありそれぞれ得失を持つものである。その 1 は即ち相互誘導係数法にして、古くから使用されている方法であるが、通常広い地域と精密級の測定器を必要とし、従って測定精度は誠によいが労力、時間、経費は他に比すべくもない。そこで筆者は仙山線において昭和 29 年始めて自己誘導係数法と比抵抗法を相互誘導係数法に併せて実施し、これらの結果がお互いに近い値が得られることを確かめ、昭和 30 年春の学会にこれを報告した。その後さらに局地的に多数の地質の導電率を知る必要に迫られ、サーチコイル⁴⁴⁾を^{45), 46)}検討し、この中特にコイル傾斜法の開発を行いこの方法により北陸線、東海道線、東北線などの沿線的 200 ヶ所において測定を行った。これら多数の経験より自己誘導係数法、比抵抗法、およびサーチコイル傾斜法の 3 つの方法は充分実用的に正しい値が得られることを確信するに至ったので、ここではこれらの方法についてその測定原理および測定上の注意点などについて述べる。

8.1.1 自己誘導係数法による大地導電率の測定

問題となる通信線について、その先端をアースし、大地帰路回路としての直列インピーダンスを測定し、(1) に示す測定原理に従って該線の経過地域全般の平均導電率を求める方法である。従ってこの方法は最も簡単に直接関係する大地の平均導電率を求められ非常に便利であるが、反面起誘導線が非常に離れた地質を走り、明らかに地質構造が被誘導線と異なると思われる場合は問題である。また被測定線に接近平行して接地導体例えばボンドされたレール(電化区間など)、接地のある架空ケーブルのある場合は測定値に補正は可能であるが誤差が非常に大となる欠点がある。

(1) 測定原理

架空線条を往路とし大地を帰路とする回路の直列インピーダンス Z_1 と大地導電率 σ との間には Carson-Pollaczek によつて次の関係式の成立つことが論証せられ

といる。

$$Z_1 = R_i + w \left\{ \frac{\pi}{2} - \frac{4\sqrt{2}}{3} h \right\} \times 10^{-4} + jw \left\{ 4.6 \log_{10} \frac{z}{\alpha a} + \frac{4\sqrt{2}}{3} \alpha h + 0.3456 \right\} \times 10^{-4} \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (8.1)$$

ただし $\alpha = \sqrt{4\pi\sigma w}$

$\sigma =$ 大地導電率 (C.G.S. e.m.u.)

$w = 2\pi f$, $f =$ 周波数

$a =$ 線条の半径 (cm)

$h =$ " の高さ (cm)

$R_i =$ " の内部抵抗 $\frac{\Omega}{\text{km}}$

従つて式(8.1)のインダクタンス分を L_1 とおくと

$$L_1 = 0.46 \log_{10} \frac{z}{\alpha a} + \frac{4\sqrt{2}}{30} \alpha h + 0.03456 \quad \text{mH/km} \quad (8.2)$$

同様に同じ高さにある2本の並行線条を1括して、これを往路とし、大地を帰路とする回路のインダクタンス分を L_2 とすると

$$L_2 = 0.46 \log_{10} \frac{z}{\alpha d} + \frac{4\sqrt{2}}{30} \alpha h + 0.00956 \quad \text{mH/km} \quad (8.3)$$

ただし $\alpha =$ 二線条間の距離 (cm)

その他の記号は式(8.1)と同じ定義による。

いま $a = 0.145 \text{ cm}$ (2.9 Cu に対し), $h = 600 \text{ cm}$, $d = 30 \text{ cm}$ として L_1 および L_2 を求めこれを示せば図 8.1 および図 8.2 となる。

これらの図表を用いて、 L_1 又は L_2 を測定することにより大地導電率 σ を求めることができる。

(2) 測定上の注意

- (i) L_1 又は L_2 の測定は、架空線条として通信線を利用し、(その長さは 15025 km が適当) これと大地間のインピーダンスを適当なブリッジを使用して測定することにより求められる。ただし周波数 200% 程度以下における測定では、通信線の先端を1線又は2線1括として大地へ接地した状態で測定した大地帰路インピーダンス Z_{sh} より L_1 又は L_2 を求めればよいが、音声周波数範囲がさらにそれ以上に高い周波数における測定では、通信線の先端を大地に対して開放絶縁の状態としたインピーダンス Z_{op} を測定し、次の計算により L_1 又は L_2 を求める必要がある。

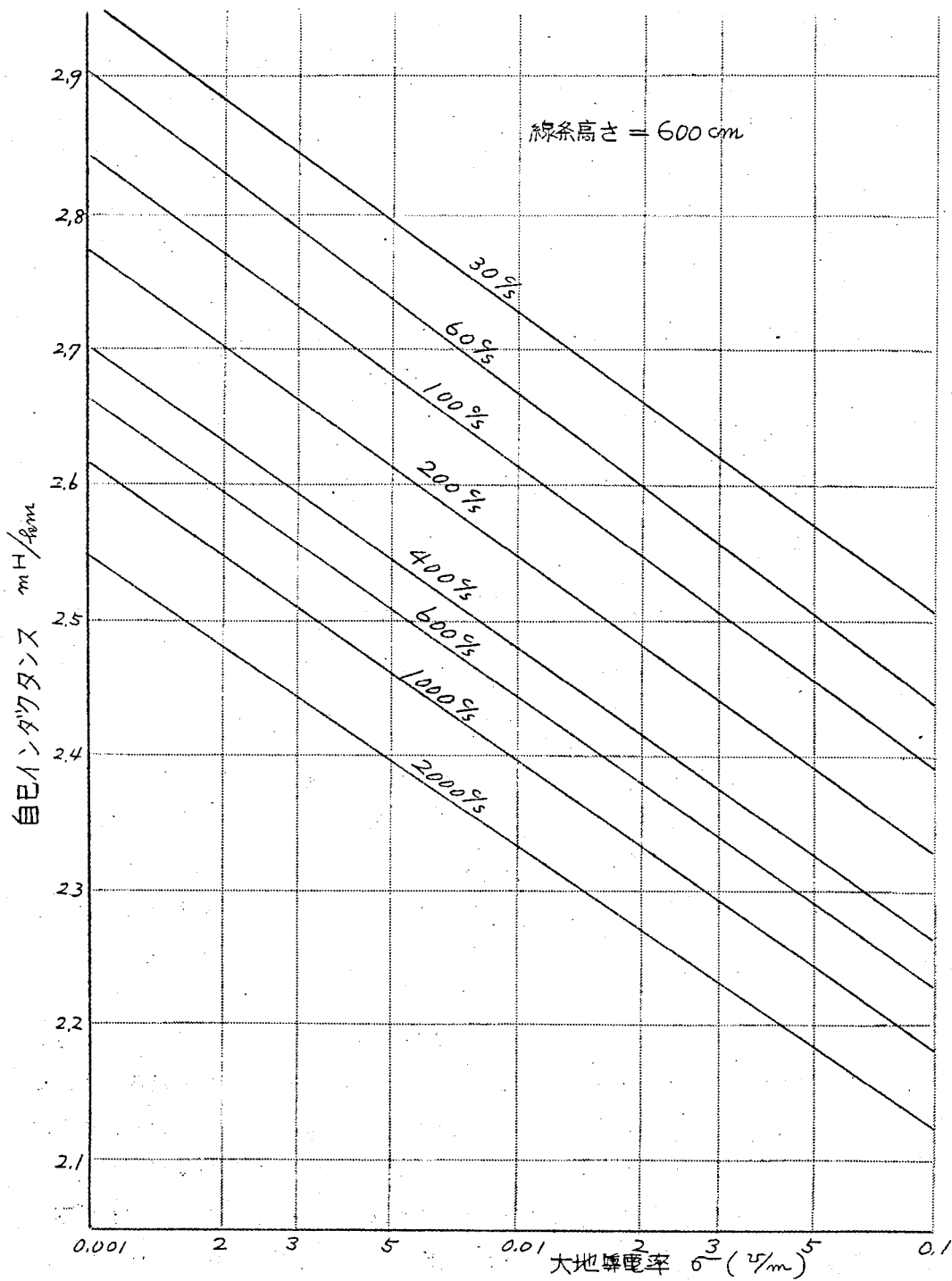


図8.1 通信線(2.9Cu)1条と大地帰路回路の自己インダクタンス

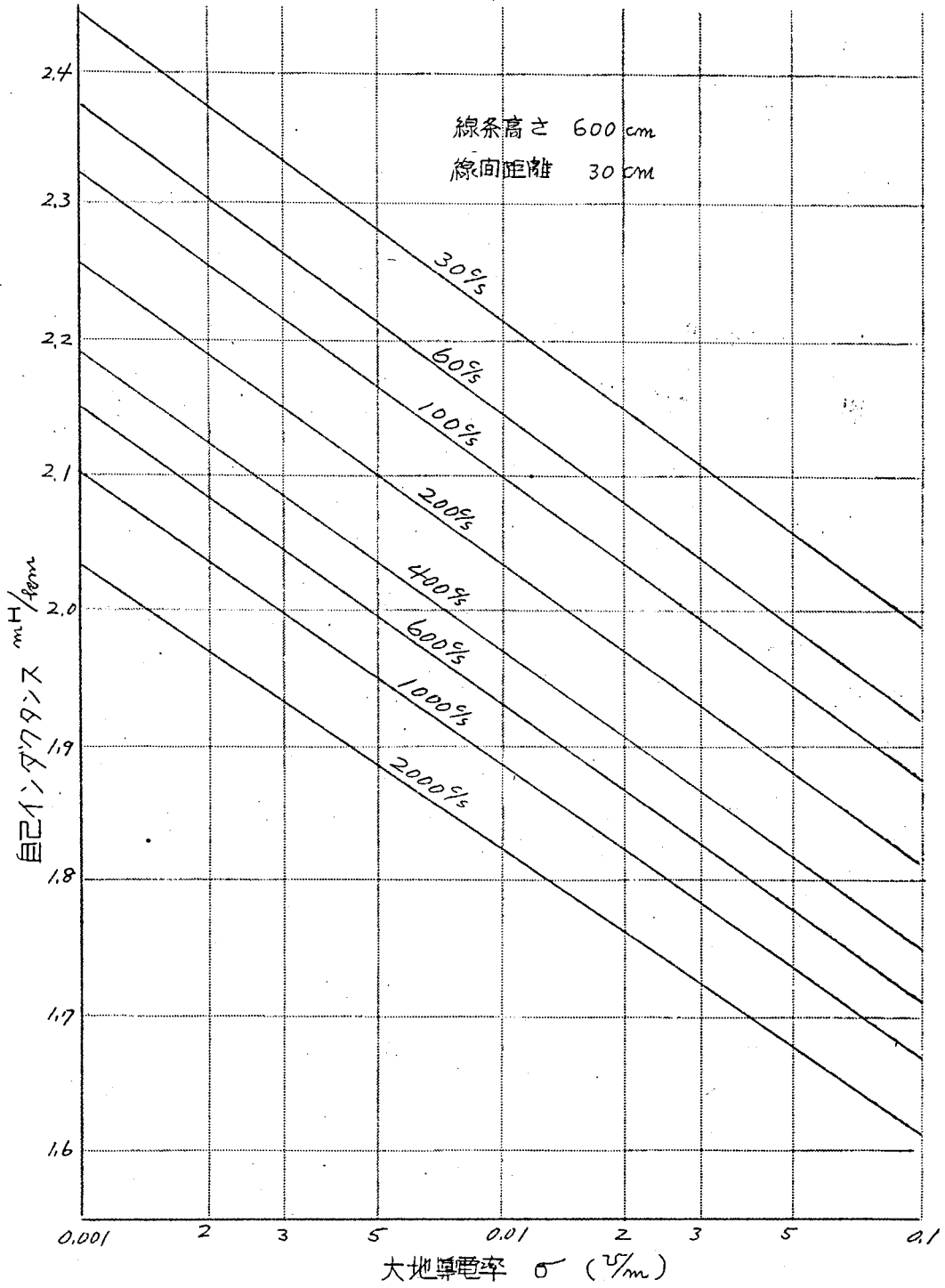


図 8.2 通信線 (2.9 Cu) 2 条 1 栝 大地帰路回路の自己インダクタンス

$$Z_1 \text{ 又は } Z_2 = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{Z_{sh} \cdot Z_{op} \cdot \tan R^{-1}} \sqrt{Z_{sh} / Z_{op}} \right\} \quad (8.4)$$

$$L_1 \text{ 又は } L_2 = \frac{1}{\omega} \text{ [上式の虚数分]} \quad (8.5)$$

ii) 軌条又は架空地線の存在による影響の補正

測定線の近くに軌条又は架空地線があるときはその遮蔽作用によって測定値 Z が一般に小さく測定される傾向になる。このため補正值として Z_{cb}^2 / Z_{bb} だけのインピーダンスを測定値 Z に加算する必要がある。この Z_{bb} は軌条又は架空地線の大地帰路インピーダンスとして、 Z_{cb} は測定線と軌条又は架空地線との間の相互インピーダンスである。ただし軌条にボンドを施していない区間、或いは架空地線でも一處接地のもの、等のように大地帰路を通して縦方向電流の非常に流れにくい状態にある場合は、これらによる影響を無視することができる。

iii) 使用する両端接地抵抗はなるべく小さく $0.5 \Omega/\text{km}$ 以下なることが望ましい。測定周波数は 30% 程度の低周波より 3000% 程度までの範囲で測定の実施されることが望ましい。

(3) 自己誘導係数法と相互誘導係数法の比較

自己誘導係数法 (L法) を始めて実施するに当り、仙山線愛子附近で相互誘導係数法 (M法) により精密測定を行い、これと比較した。結果を図 8.3 に示す通り、算

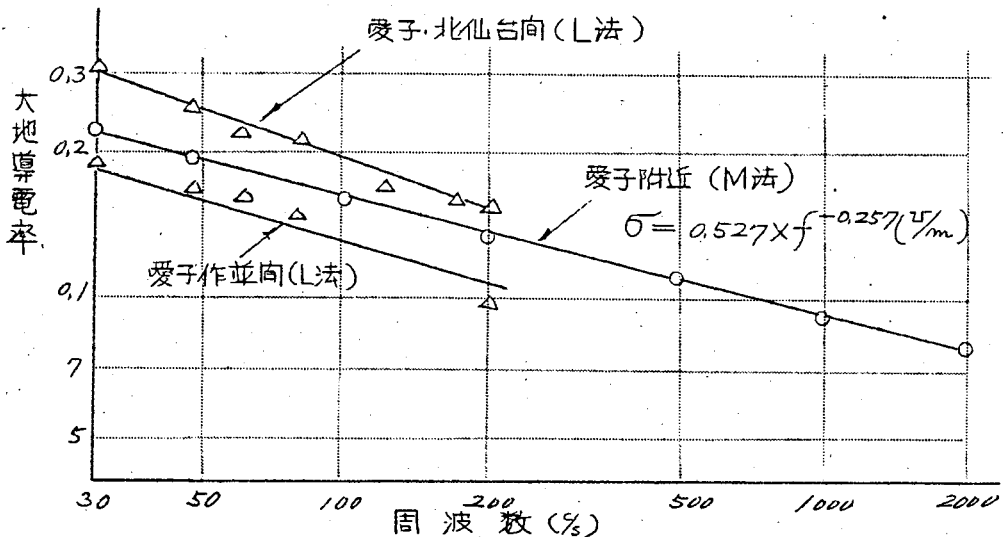


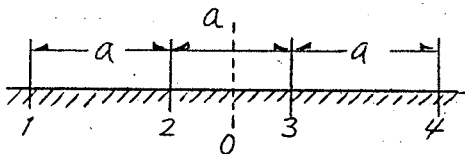
図 8.3 仙山線における導電率測定、L法とM法の比較

電率の大きさおよび周波数に対する傾向は非常によくM法に一致した。この場合愛子を中心として、愛子・北仙台間(約10km)、愛子作並間(約15km)に分けて国鉄樺太通信線の大地帰路インピーダンスを測定した。通信線は鉄道に10m内外の距離で接近平行するため、レールの影響を心配したが、幸レールポンドはなく、また特に途中レールに絶縁ファイバーを挿入してその影響を確かめながら、レールの影響は殆んど入っていないことを確認した。

8.1.2 比抵抗法による大地導電率の測定

この方法は局地的導電率を測定するに便利なもので、Wennerの4電極大地比抵抗測定法を製備化したL-10型比抵抗計が通常用いられ、測定点を中心として直線上に約200m程度の電線を延長して、これと大地間に数10%の電流を流して測定を行うもので、測定用具は極めて簡単であるが測定精度において非常に劣る欠点がある。特に地下100m程度までの平均導電率を知ることが重要な我々の場合は、特別の場合を除いてなるべく(3)項に述べるサーチコイル傾斜法によった方がより確かである。

(1) 測定原理



測定せんとする地質 ρ を中心とし、一直線上に等間隔 a を以て左図の如く4本の電極を配置し、両端の電極1と4を直して大地へ電流を流す。電極1より大地へ流れ入る電流を I とすると、電極4より流れ出

る電流は $-I$ となる、これによる電極2, 3間の電位差を V とすると、

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) - \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right)$$

$$= \frac{I\rho}{2\pi a}$$

$$\therefore \rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (8.6)$$

となる。以上は大地が一様な場合の結果であるが、実際は地表面は比抵抗の異なる質のものが幾層にも重なり合った状態にあるので、4本の電極の間隔 a を大にしていくと地層に応じて ρ_a として変わった値が得られるようになる。即ち ρ_a は地表で得られた見掛けの比抵抗であつ、これは深部地質構造の函数となる。そしてこの ρ_a に対

しては間隔 a を大きくする程深部地質の影響が大きくなり現われてくる。従つて ρ_a と a との関係曲線を求めることによつて地下地質の構造を推定することができる。⁴⁷⁾

(2) 測定上の注意

上記原理に基づき測定器として L-10 型比抵抗計 (横河電機) がある。これでは V_I が R 目盛で直読されるのでこれを $2\pi a$ 倍すれば式 (8.6) より ρ_a が求められる。

i) 測定地点はなるべく平地にして、直線距離 500m 程度まで延線し傍る地質を送定し、電極間隔 a が 10m までの小範囲ではなるべく電極打込み深さを浅くし打込み測定誤差を少なくする (深さは間隔の 1 割以下)

間隔 a が大なるに従い測定等の感度が悪くなるので、大きい電極を深く打込みその打込み場所も測線より直垂方向に数 m、はずれてもよいから接地抵抗をなるべく小さくし測定精度を高めるようにする。

ii) 電圧測定電極 2 および 3 の近くに局部的な異質のもの (例へば大きい石又は構造物) のあるときはその異質物の測定を避け少くともその異質物の大きさの数倍はなれた地質で測定を行う。

iii) 測定結果は両対数目盛の方眼紙に、横軸に a をとり縦軸に ρ_a をとり、曲線を描き、これと T.O. 標準曲線と重ね合せ比較して各層比抵抗 ρ_i 、およびその厚さ d を決定する。この場合、重ね合わせる部分は曲線の変極点部分がなるべく多く重なるようにする。このようにして実測された曲線を幾つかの標準曲線の集りに分解し、各地層の厚さおよび比抵抗が推定せられる。

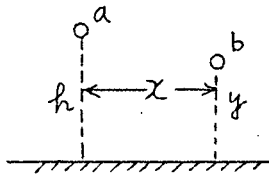
以上の結果より地層構成と各層比抵抗値を求められるので、次に二層構造の場合に等価な大地導電率を与える Radly Josephs 曲線を利用し、順次上層部より 2 層の等価導電率を求め、なるべく下層までを含めるよう繰返して行う。

8.1.3 サーチコイル傾斜法による大地導電率の測定⁴⁸⁾

大地上に布設された直線導線を流れる電流が形成する外部磁界によつて地表面上におかれたサーチコイル内に誘起する電圧はやはり大地導電率の函数となる。しかし電圧を測定することは既存磁界の影響も受け易く、また電流調整増巾器の利得調整なども正確に行う必要がある。どうしても誤差の入り込む機会が多い。従つて別な方法としてコイルを傾斜して誘起電圧の最小になるときの傾斜角を測定し、これが大地

導電率の函数となることに着目する。この方法に従えば布設線系の長さも比較的短く(約1km長)、測定は他に比して簡単で比較的測定精度も高くなるなどの利点がある。

(1) 測定原理



無限長平行導線向の大地帰路相互誘導係数を M とすると、C-P公式により。

$$M = \frac{\pi}{2} - \frac{2\sqrt{2}}{3} \alpha (h+y) + \frac{\alpha^2}{4} \left[\{(h+y)^2 + x^2\} \left\{ 0.6728 + \log \frac{2}{\alpha r} \right\} + 2x(h+y) \theta \right] + j \left[2 \log \frac{2}{\alpha \rho} - 0.1544 + \frac{2\sqrt{2}}{3} \alpha (h+y) \right] \quad (8.7)$$

ただし $\theta = \tan^{-1} \frac{x}{h+y}$

$$r = \sqrt{x^2 + (h+y)^2}$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + (h+y)^2}$$

$$\alpha x < 0.5$$

サーチコイル法では、被誘導側は線条ではなく、小さい円形のコイルである。且つ起誘導線、コイルとも地表面上に置くので、式中 $h=y=0$ とおくことができる。従つていまコイル面を垂直面に対して φ なる角度だけ傾斜した場合の、コイル内誘起電圧を V_φ とすれば

$$V_\varphi \propto M_\varphi = \left[\frac{dM}{dx} \right]_0 \sin \varphi + \left[\frac{dM}{dy} \right]_0 \cos \varphi = -\frac{2\sqrt{2}}{3} \alpha \cos \varphi + j \left(\frac{2\sqrt{2}}{3} \alpha \cos \varphi - \frac{2}{x} \sin \varphi \right) \quad (8.8)$$

従つて V_φ を最小にするときの角度 φ は、上式を φ について微分し、求めると

$$\varphi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2\sqrt{2}}{3} \alpha x \right\} \quad (8.9)$$

ただし、この式の成立範囲は、式(8.7)の成立条件において $\alpha x < 0.5$ なる故。式(8.9)より $\varphi < 12^\circ 35'$ となる。従つてなるべくこのような範囲内での測定を行うべきである。しかし $\alpha x = 1.0$ の附近で式(8.7)の微分数を計算すると、その誤差は +20% 以下である。これは σ に換算して約 -20% の誤差と推定される。

従つて場合によつてはこの程度の測定誤差を許すことにより、 $\alpha X = 1.0$ まで即ち $\varphi < 25^\circ$ 程度まで測定範囲をなめることができる。

式(8.9)より φ と σ との関係曲線を求めると図8.4の通りである。またこの方法により東海道沿線で測定した数例を示すと、図8.5の通りである。いずれの場合

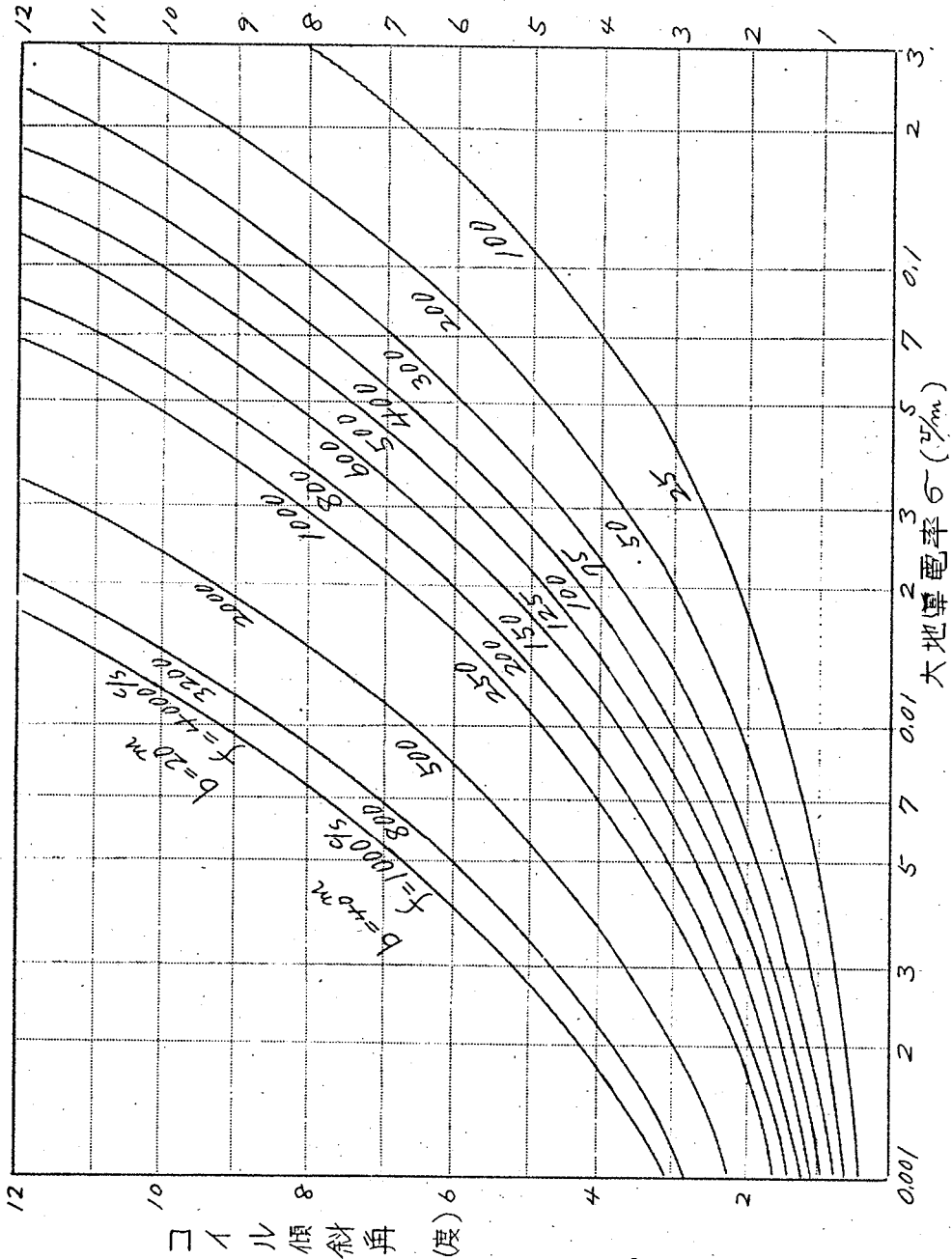


図8.4 コイル傾斜角と大地導電率

合も σ は f^{-n} に比例する傾向がある。 n の値は 0.2 ~ 0.4 が多い。

(2) 測定上の注意

鉄道技術研究所構内平地 (東京都下国分寺町、元畑地) で本方法による測定上の問題点を検討した結果により、次の結論を得た。

- i) 測定線はなるべく直線状とし、長さ 800m に おいて充分正確な測定値が得られた。なお本地区の導電率は 50% に おいて $0.07 \text{ } \mu\text{/m}$ 、500% で $0.037 \text{ } \mu\text{/m}$

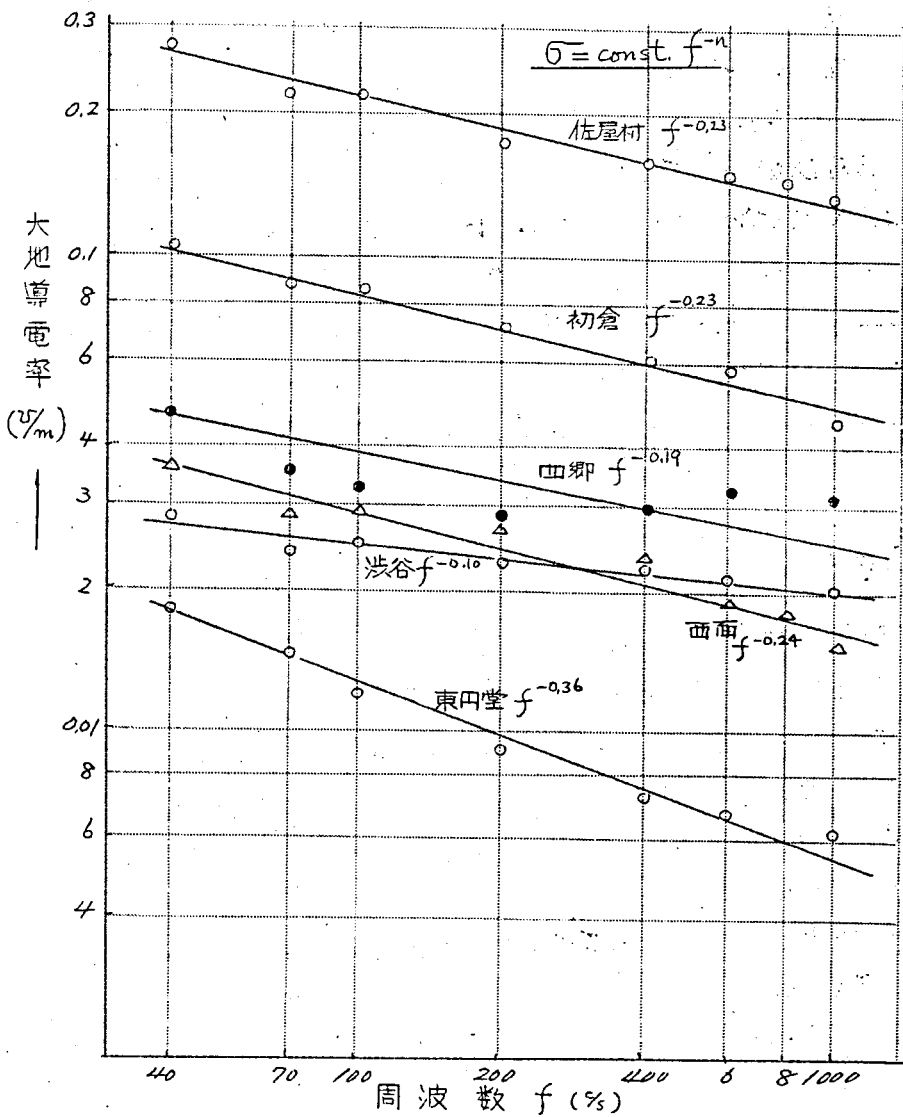


図 8.5 大地導電率の周波数特性

である。

- ii) コイル位置は測定線の中央部が良いこと勿論であるが、中央部より300m 端末(即ち端末から100m地裏)へ移転しても誤差は-10%程度であった。従って測定地裏の都合で中央部より測線に沿い±200m程度はコイル位置を移動しても良い。
- iii) コイル位置は測線と直交方向に20~50mの範囲内に置くことを推奨する。また別に神奈川県高座渋谷附近の畑地で測定を行い、次の結果を得た。
- iv) 測定線長さは1kmとし、これを1直線に布設した場合と、両端末で200mを角度45°まで曲げて布設した場合とにおいて、中央部における測定データに変化は生じなかった。
- v) コイル面は測定線に平行して置くこと勿論であるが、約10°まで傾斜しても測定データに変化はなかった。
なお、高座渋谷地区の埋電率は60%において $0.036 \mu/m$ が測定された。
なおまた各地における測定の結果、次のような場合は、測定不能または測定誤差が大であった。
- vi) 高圧送電線または通信ケーブルが200m内に接近して平行している場合、この場合、コイル位置または測定線の変更して実施することができた。
- vii) コイル位置は測定線と同じ高さに置くことが重要である。

8.2. 誘導電圧の測定

8.2.1 静電誘導電圧の測定

架空線系に現われる静電誘導電圧は従来 static voltmeter により測定された。これは通常の電圧計では内部インピーダンスが小さいため、微かな静電気による電位の測定には極めて誤差が大となるからである。然し近年は入力インピーダンスの極めて高い真空管電圧計(V.V.)が各種の測定に使用され、非常に入手が容易となったので、静電誘導電圧の測定にも、これを使用するのが便利である。筆者は各所の測定において、静電誘導電圧に限らず電磁誘導電圧の測定にもV.V.を使用した。

一般に静電誘導電圧は、起誘導線に電圧を印加した状態で(電流は流さない)次の式(8.10)によって与えられる。

$$V_s = \frac{Y_m}{Y + Y_m} V_p \quad (8.10)$$

ただし $V_p =$ 起誘導線電圧

$Y =$ 被誘導線のアドミタンス (単位長当り)

$Y_m =$ 強弱両線間の相互アドミタンス (単位長当り)

いま、被誘導線に V, V (そのアドミタンスを Y' とする) を挿入するとき、 V_s は V_s' に変じたときとすると、

$$V_s' = \frac{Y_m l}{(Y + Y_m) l + Y'} V_p \quad (8.11)$$

ただし $l =$ 被誘導線の長さ、

(8.10), (8.11) 両式より

$$V_s = V_s' \left\{ 1 + \frac{Y'}{(Y + Y_m) l} \right\} \quad (8.12)$$

即ち真の静電位 V_s は測定値 V_s' と式 (8.12) の関係にある。

1例として高さ 10^4 m, 半径 1^{mm} , 長さ 100^{m} の架空線条について $V_s' = 200^{\text{V}}$ が測定されたとする。線条及び測定器 V, V の対地絶縁は完全なりとし、絶縁抵抗による誤差は入らぬものとする。また $V_p = 20^{\text{kV}}$ が電力線条件より既知であり、 V, V の入力アドミタンスは容量性で 10^{pF} とする。オ1近似として (8.10) に V_p, V_s' を代入し、

$$\frac{Y_m}{Y + Y_m} = \frac{200}{20000} = 10^{-2}$$

となる故 Y_m は Y に対して無視してもよい程度であることがわかる。

また架空線条の静電容量 C は

$$C = \frac{1}{18 \log_e} \frac{2R}{r} \quad (\mu\text{F}/\text{km}) \quad (8.13)$$

$$\therefore Yl = 618^{\text{pF}}$$

\therefore (8.12) より

$$\begin{aligned} V_s &\doteq V_s' \left\{ 1 + \frac{Y'}{Yl} \right\} \\ &= V_s' \left(1 + \frac{10}{618} \right) = 1.016 V_s' \end{aligned} \quad (8.14)$$

従つてこの場合、真値は測定値より 1.6% だけ大きい。なお、被誘導電圧が高く、 V, V の測定範囲を超える場合は、コンデンサ分圧を用い上と同じ方法で真値を見出すことができる。

なお絶縁抵抗の低下する場合は式(8.12)に相当して

$$V_s = V_s' \left\{ 1 + \frac{j\omega C_m}{G} \right\} \quad (8.15)$$

従って一般に雨天時測定は、晴天時測定値より値が低くなるので注意を要する。もし必要ならば、式(8.15)により補正することは可能である。

いま北九州地区交流電化に際し行った静電誘導電圧測定例を表8.1に示す。

表 8. 1 交流電化区間静電誘導電圧測定

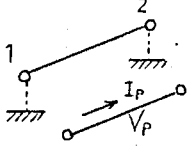
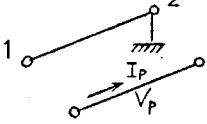
対象物	長さ (m)	電車線から の距離 (m)	測定電圧 (V)	静電圧 (V)	放電電流 (mA)
アンテナ	20	4.1	680		0.05
駅舎の樋	12	3.0	230	258	0.72
"	14.7	4.4	162	190	0.10
"	30	3.7	95	97	0.53
"	16.6	3.5	360	579	0.27
鉄線 鋸	480	5.5	44	45.7	1.20
裸通信線	約 8 km	10.0	205		19.7

8. 2. 2 電磁誘導電圧の測定

一般に強弱両線路が平行する場合の誘導電圧は静電誘導、電磁誘導両者が重なり合つて、線路端末条件によって種々な形となって現われる。⁴⁹⁾しかし問題をあまり複雑とせず、かりに静電誘導は起誘導側の電圧 V_p により、電磁誘導は起誘導側の電流 I_p によるものとし両者を分離して考えることがよく行われる。

いま簡単のため V_p 、 I_p は起誘導線上において一定と見なし、被誘導線への電圧を求めると表8.2のようになる。従つて被誘導線の先端をアースして他端において電圧測定を行えば、電磁誘導起電力 E を求めることができる。この場合の電圧計は線路の Z が普通は小さいので普通級のものでよく、勿論 V, V, \dots なら一層可である。たゞし線路長さが長く $\frac{1}{\gamma l} \tanh \gamma l$ (γ は線路の伝播定数) が 1 より大となる場合、表8.2より判る通り電圧は線路定数の影響を受けるのでその補正を必要とするようになる。商用周波数の測定では特にその必要はないが、音声周波帯またはそれより高い周波数では特にこの点に注意する必要がある。

表 8.2 誘導電圧公式

線路条件	静電誘導電圧	電磁誘導電圧
	$V_1 = \frac{Y_m}{Y+Y_m} V_p$ $V_2 = \text{全上}$	$V_1 = \frac{E}{Z} \tanh \frac{rl}{2}$ $V_2 = -\frac{E}{Z} \tanh \frac{rl}{2}$
	$V_1 = \frac{Y_m}{Y+Y_m} V_p \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh r'l} \right\}$ $V_2 = 0$ $i_2 = Y_m V_p \frac{1}{Z} \tanh r'l$	$V_1 = \frac{E}{Z} \tanh r'l$ $V_2 = 0$ $i_2 = \frac{-E}{Z} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh r'l} \right\}$

ただし Y, Z は被誘導線 1-2 の対地アドミタンス, 直列インピーダンス
 $r = \sqrt{ZY}$, $r' = \sqrt{Z(Y+Y_m)}$, $E = Z_m I_p$

次に仙山線における誘導電圧測定例を示す。

試験区間は仙台、作並向 28.7 km において、その中間 10.2 km ~ 18.2 km の 8 km 区間に電車線とレール向に 300 A を通電し、この時の通信線への誘導電圧を、仙台、作並の両端と 11.06 km, 16.54 km の中間 2 地点で V.V. により測定した。通信線は No. 1 は裸線-ケーブル-裸線の混合回線, No. 2 は裸線のみで構成され、いずれも同一柱に添架されている。関係図を図 8.6 に、測定結果を表 8.3 に示す。

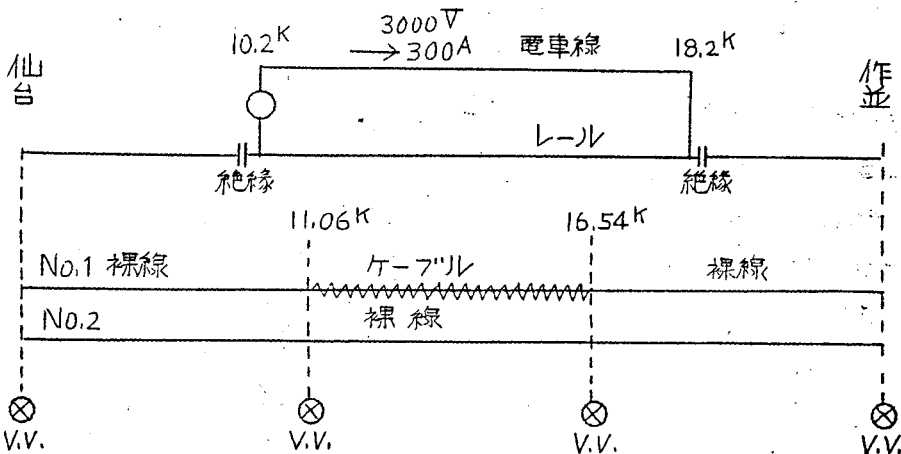


図 8.6 仙山線誘導電圧測定関係図

通信線と鉄道との平均間隔は、10.2^k~12^k向、平均約7m、12^k~12.6^k向平均約20m、12.6~15.5^k向平均約10.5m、15.5^k~18.2^k向平均約7.5mである。

表8.3 仙台・作並向誘導電圧測定記録

試番	時刻	電流 (A)	仙台測定 (V)		11.06 ^k 測定 (V)		16.54 ^k 測定 (V)		作並測定 (V)		通信線にアースの有無
			No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	
1	1°03'	300	40.0	57.3	40	50	72	72.5	92	98	アースなし
2	1°23'	"	135	152	130	143	24	25.7	0	0	作並アース
3	1°28'	"	112	123	98	117	0	0	26.5	29.5	16.54 ^k アース
4	1°32'	"	10.8	11.9	0	0	100	111	122	135	11.06 ^k アース
5	1°37'	"	0	0	8	10.5	110	122	132	147	仙台アース
6	1°42'	"	137	65	132	45	23.8	60.0	0	-	作並 No.1アース
7	1°52'	"	11.8	98	0	57.5	136	93.5	210	82	11.06 ^k No.1アース
8	2°04'	"	0	94.5	40	54	171	112	250	181	仙台 No.1アース
9	2°22'	"	0	95	40	53	173	115	250	181	同上
10	2°34'	"	40.5	57	31	38	67.9	71	92	98	アースなし
11	2°37'	"	0	51	10	42	110	76	133	101	仙台 No.1アース
12	静電誘導 3000V 0A		8.5	23.7	-	-	8.5	23.5	8	25	
13	常時誘導 0V 0A		0.72	0.72	-	-	-	-	-	-	

表8.3の試番1~5を図示し、仙台・作並向の電圧分布図にして表わすと図8.7の通りとなる。この結果より次のことが知れる。

- (i) 電圧分布曲線は、通信線のアース点を0電位とし、各線は直線状の折線となる。また各場合で折線は単に上下に平行移動するだけである。
- (ii) 通電区間に生ずる電磁誘起電力は、アース点を変えても殆んど変わらない。
- (iii) アースなしの場合には、裸線では静電誘導電圧が加わるため、通電区間内で電圧分布の傾向は非常に異ってくる。図8.7には比較のため便宜上記入し左が電位傾度曲線と0電位線とは支わらない。即ち常に静電誘導と電磁誘導とはある位相角を持ち、その合成値は0にならないからである。
- (iv) 電位傾度が、ケーブル (No.1) と裸線 (No.2) とで異っていることが判

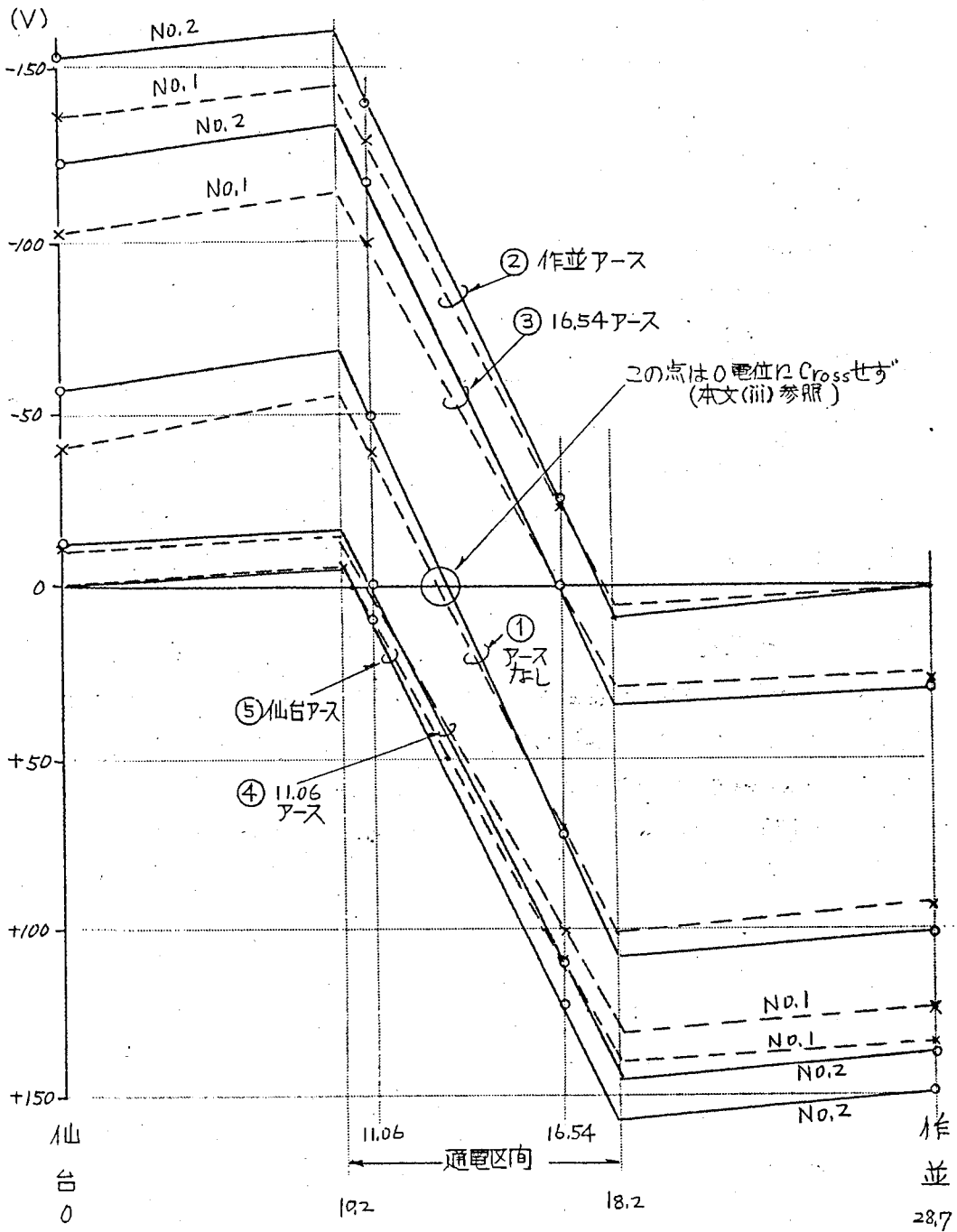


図8.7 仙台・作並間誘導電圧分布

るが、これはケーブルの遮蔽作用による。即ちアースのある4つの場合を平均して誘起電圧はケーブルの場合 18.5 V/km 、裸線の場合 20.8 V/km となる。従ってこのケーブルの遮蔽率は 88.9% となる。ただし裸線もこのケーブルにより若干の遮蔽作用を受けているので、 88.9% よりはもう少し良い筈である。このケーブルは鉛被ケーブルであり、両端の接地抵抗の和は約 7Ω である。

(v) 誘導区外では、起電力はないので、両側へ電圧は次第に減衰している。

(vi) 静電誘導電圧は裸線のみの No. 2 は $23.5 \sim 25 \text{ V}$ 、ケーブルを含む No. 1 では $8 \sim 8.5 \text{ V}$ である。

次に試番 1、裸線 (No. 2) のデータと別に得られた裸線に対する静電誘導 24 V 、電磁誘導 20.8 V/km とより、各電圧のベクトル図を描くと図 8.8 の通りとなる。

一般に静電誘導電圧は電力線の電圧 V_p のみを加え、電流は流さない状態で、通信側をアースなしとし誘導電圧を通信線上の任意点について測定すれば得られる。また電磁誘導電圧は電力側の電流 I_p を通し、通信線の端末をアースし、他端において電圧測定を行えば得られる。

また電力側で電流を通じた状態で、通信側はアースなしで誘導電圧測定を行えば、静電誘導と電磁誘導との双方が重畳される。この場合、通信線の中央点は電磁誘導は 0 であるので、この点の測定値は静電誘導電圧のみとなる。この場合の電位分布を求めるには両端及び中央における電圧測定値と、別に得られた電磁誘導起電力とより、図 8.8 の作図を行い、中央点 O' より距離 x だけ離れた点の電位 V_x を図上より決定すればよい。

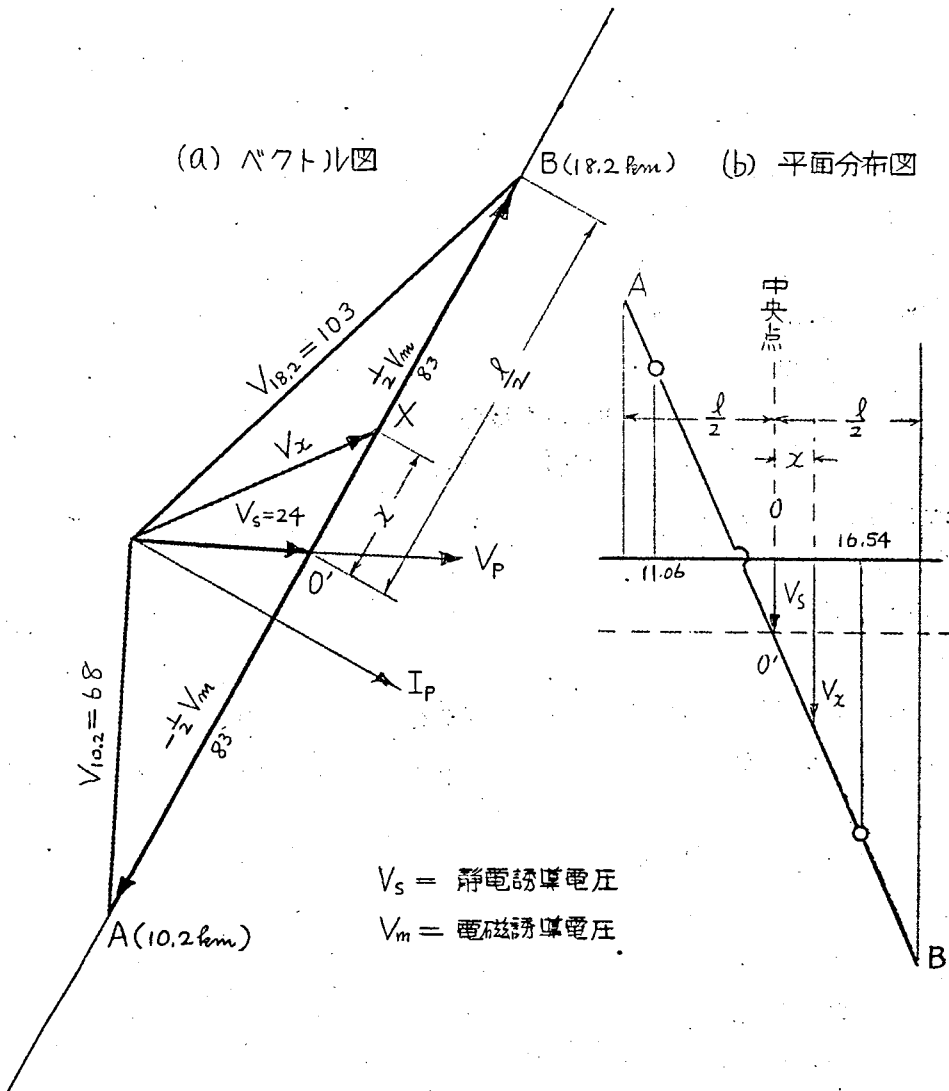


図 8.8 電磁誘導電圧と静電誘導電圧の重ね

8.2.3 雑音電圧の測定

雑音電圧の測定はC, C, I, T, Tで規定した雑音評価係数と等しい周波数特性を持つ所謂雑音電圧測定器を使用して行う。この場合通信回線は先端を特性インピーダンスで成端し、測定端では整合用トランスを通して600Ωで成端し、600Ω端子の電圧を測定して、その値を雑音電圧値、その2倍の値を雑音起電力とする。

市販の雑音電圧測定器入力端子インピーダンスは600Ωと高抵抗(10kΩ以上)との切換え、および線向雑音(a-b)と線条、大地向雑音(a-E, 又はb-E)の切換えスイッチが設けられているが、この操作により、各場合の雑音電圧値を読み取ることにより種々な雑音の性格を推定することができる。本文中においてL₁, L₂雑音電圧と記号したものは線向雑音を入力600Ωとして測定した値、L₁, E雑音電圧は、線条、大地向雑音を入力高抵抗で測定した値である。この両者の比率が1:100<の場合は概ね電化区向または電力線よりの誘導作用によつて生じた雑音であることが多く、通信線条はまた概ね平衡度良好な場合である。これに反して、両者の比率が1:100>の場合は電力線よりの誘導作用は余りなく、通信回線相互間の漏話または準漏話に基づき雑音か、または通信回線の平衡度不良の場合である。この方面の調査が必要となる。次に入力インピーダンス600Ωと高抵抗との双方の測定では、通常両者の雑音電圧比は1:n (n=1.5~2)となり終端インピーダンスに殆んど関係なくなるが通信線の長さが1km以下のときはn=5~10となりこの比率は大きく変化するので必ず両端を規定通り成端して測定を行うべきである。なお概して静電誘導は低インピーダンスで小さくなり、電磁誘導は600Ωと10kΩ以上の差異は少い。

次に雑音電圧の周波数成分を知るために、自動記録式周波数分析器または直視式周波数分析器を使用した。これらは何れも指示部分が異なるだけで、本体はヘテロダイン式により、未知周波数と標準周波数との差周波数を標準の固定フィルタを通して検出する方式のものである。この結果により周波数スペクトルが判明すると凡そその雑音誘導源を推定することができる。例えば偶数倍調波が連続的に検出されるときは、整流器の直流側給電線よりの影響を強く受けており、奇数倍調波が連続的に検出されるときは整流器の交流側送配電線よりの影響によるものである。

図8.9は高崎線桶川、鴻の線向試験用通信線に生じた誘導雑音と、直流電車線にかけられた電圧1,500V中の高雑波電圧とを、同時に分析測定した結果である。既述の3章で述べた通り、この場合(直流電化)の誘導電圧は各高調波とも起誘導電圧

に比例し、その比例係数は約 0.1 となっている。なお通信線電柱と軌道外側との間隔は 10 m、通信線長さは 8 km である。

次に雑音電圧波形の一例として直流電化区間において、ブラウン管オシロスコープ面上に現われた波形撮影の結果を図 8.10 に示した。直流変電所にフィルタのある場合とない場合との相異が明瞭に認められる。

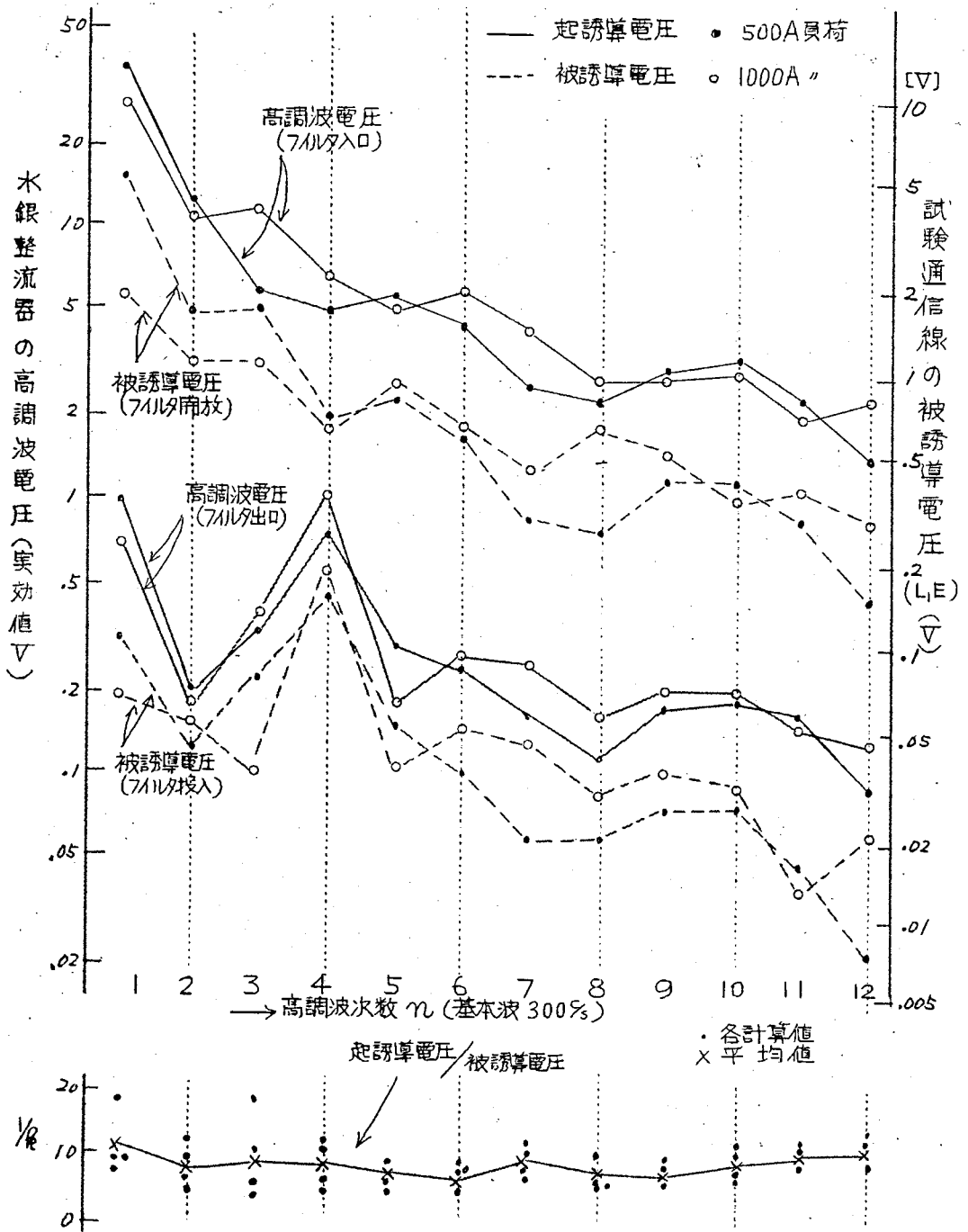
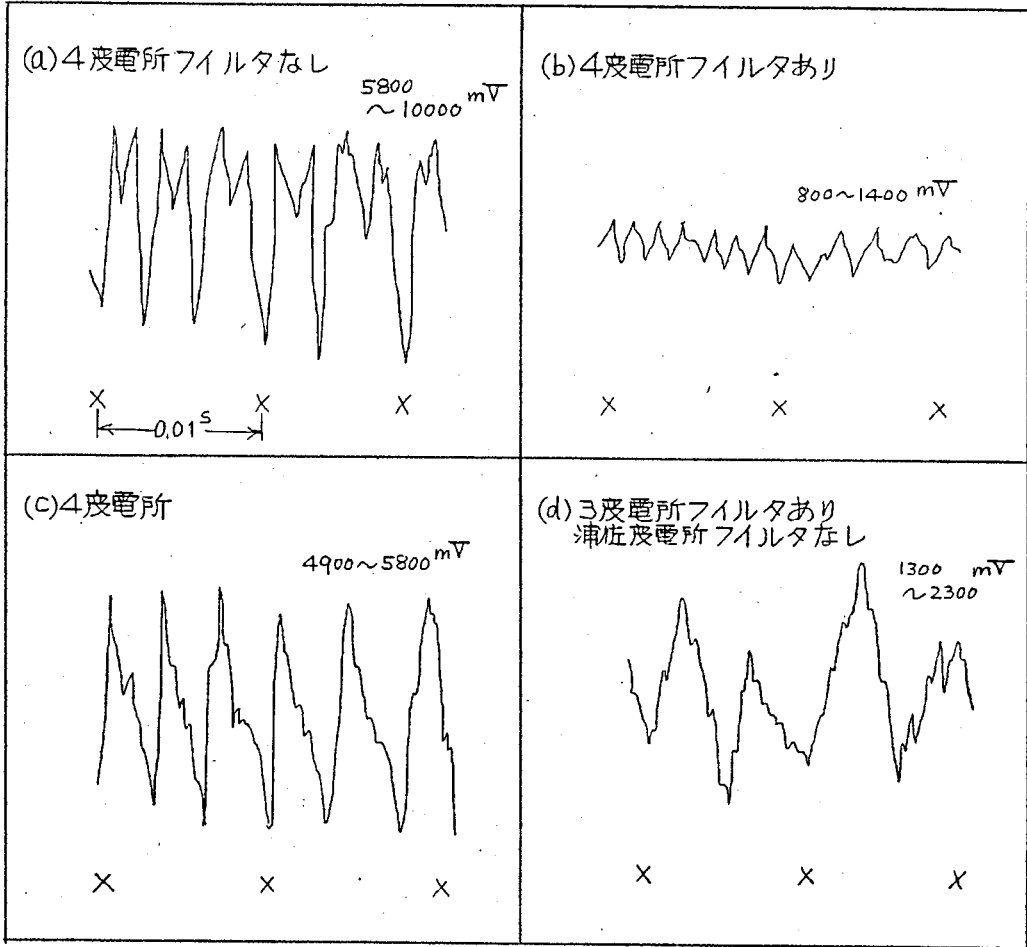


図8.9 妨害電圧及び雑音電圧の周波数分析



関係度電所名 宮内, 川口, 塩沢および浦佐度電所.
被誘導線は国鉄標區信線.

図 8.10 直流電化区間における誘導雑音波形の一例 (L,E雑音)

昭和 22 年 12 月 7 日 上越線長岡駅交換室

226 項欠

総 括

本文を終るに当り、以上才1章乃至才8章において筆者の行った研究ならびにその成果を以下に概括しておく。

才1章 緒 論

才2章 電気鉄道回路の電気特性

- (1) 軌道を大地帰路回路と考え、その上の電圧、電流分布の解析を行った。この結果より、軌道中の電流を一定電流と進行波減衰電流に分解して考えることのできることを立証し、以後の理論展開を容易にした。
- (2) 軌道の軽減係数を定義し、これが誘導電圧、レール電圧、インピーダンスにどのような影響を持つかを実証した。
- (3) 軌道及び電車線回路のインピーダンス計算式を求め、各地の実験データにより本式の実用性、誤差の程度などを実証した。また特に音声周波数帯でこれら定数がどのような特性を持つかを実験的に明らかとした。

才3章 電気鉄道における誘導作用

- (4) 電気鉄道の各種き電回路に対応して通信線への誘導電圧を計算する諸式を導いた。特に交流電化の場合には運転電流による電磁誘導、直流電化の場合にはき電電圧の持つ妨害電圧が非常に大きい役割を持つことを実証した。
- (5) 一般には静電誘導電圧と電磁誘導電圧とが共存する場合が多く、この場合に適用する簡易計算式を導いた。
- (6) CCITTの推奨する雑音電圧計算式に検討を加え、その適用範囲を明らかとした。さらにこれが適用できない場合について新しい計算式を導いた。本式は特に鉄道に近接する場合に適用するもので日本における鉄道と通信線との関係位置においては特に重要な意味を持つものである。
- (7) 誘導電圧の及ぼす才3導体の影響（多線条効果）について理論的な解析を行い、横浜線3000V加圧試験データに適用して理論の妥当なことを確認した。

才4章 通信回線の平衡度と雑音

- (8) 通信回線の平衡度が誘導雑音に大きい影響を持つことを示し、回線平衡度と雑音平衡度の意義およびその測定方法を与えた。
- (9) 回線平衡度を良好にするため、線条の持つインピーダンス不平衡およびアドミタンス不平衡と平衡度との関係を理論的に究明し、また高崎線北陸線などの試験

線によつて実験的にこれらの結果の妥当なことを確かめた。

- (10) 雑音平衡度と不平衡との関係を理論的に究明し一般式を与えた。この結果により従来の遊沢氏らにより与えられた計算式が特別の場合に適用されることが明らかとなった。
- (11) 平衡度の周波数特性を各所で測定した結果、裸線およびケーブルの場合も共に平衡度は多くの場合 f^{-1} に比例することが判明した。
- (12) 通信回線を構成する線条を交叉することが平衡度の改善に如何に重要であるかを実験的に立証し、適当な交叉の曝露長を定め、北陸線、山陽線などに実施した。
- (13) 国鉄の多数の通信回線について平衡度の実状を調査し、裸線の場合大多数(約80%)が46dBを超えることを示した。なおケーブルの場合はデータが少ないが概ね60dB以上である。

オ 5 章 交流電気運転における吸上変圧器の効果

- (14) 吸上変圧器を有する電車線回路(BTのみの場合、BTとNFのある場合)について各部の電流、電圧の分布を与える理論式を導き、これを仙山線における実験によつて立証した。
- (15) 上記結果を利用して吸上変圧器の誘導軽減係数および吸上変圧器のある電車線回路のインピーダンス計算式および誘導電圧計算式などを導いた。さらにこれらは仙山線、北陸線などの実験によつて妥当なことを確かめた。また吸上変圧器を附加することによる電車線回路インピーダンスの増加は周波数に比例し、その比例定数は $3.3 \sim 4.0 \times 10^{-3}$ であることを示した。
- (16) 吸上変圧器の励磁インピーダンス及び漏洩インピーダンスの電流特性、周波数特性などを測定し、設計上の重要点を明らかとした。

オ 6 章 交流電化における誘導調査

- (17) 交流電化の場合の誘導電圧、雑音電圧の予測計算式を与え、さらに誘導防止対策選定の指針および対策実施例を与えて参考とした。この結果は本文に記載した北陸線を始め、鹿児島本線、東北線、常磐線などの交流電化に適用し良い結果が得られた。
- (18) 北陸トンネルは長さ約14kmの長大トンネルであるため他区間と異なりBTを使用せず通信ケーブルに高速蔽ケーブルを使用する方法をとり、その検討を行った。

オ 7 章 直流電化における誘導調整

- (19) 直流電化の場合の雑音電圧の予測計算に必要な静電結合係数および電磁結合係数はオ 3 章で求めたが、これを利用して国鉄通信線に対する代表例の計算を実施し、誘導防止に必要な 3 つの基本的原則を決めた。
- (20) 東海道線、高崎線における直流電化区間誘導対策実施例を示し上記 3 つの原則による対策の妥当なことを実証した。

オ 8 章 調査及び試験

- (21) 大地導電率の測定方法の中、自己誘導係数法、比抵抗法およびサーチコイル傾斜法の検討を行い、それぞれ実施上の注意事項を示した。この結果全国約 200 ヶ所の導電率の調査を短期間に実施して大きな誤りのない結果が得られた。その中東海道沿線、仙山線の 1 部データを記載したが、大地導電率は f^{-n} に比例する場合が非常に多く、 $n = 0.1 \sim 0.4$ の範囲内にあつた。
- (22) 真空管電圧計を使用する誘導電圧測定法について検討した。特に仙山線における実験において 4 ヶ所で誘導電圧の同時測定を行い、電磁誘導電圧及び静電誘導電圧の分布を求める方法を示した。
- (23) 雑音電圧測定方法について検討し、測定の結果より誘導雑音源を判断し、また通信側良否の判定を下すための指針を与えた。

謝 辞

本論文は、京都大学林重寛教授の御懇篤なる御指導と御鞭撻により漸くにして纏め上げることができた。ここに記して衷心より感謝の意を捧げるものである。

また本研究の遂行上、電気学会誘導調整委員会、委員長大山松次郎博士、電力小委員会主査東京大学福田節雄教授、電鉄小委員会主査東京大学山田直平教授および交流電化通信関係諸委員会の委員長東京大学阪本捷房教授、委員東京都立大学酒井洋助教授には種々御助言を載せ、また同委員電気試験所竹内五一博士、電々公社横山一夫氏には特に多くの御援助を仰いだ。また数多くの実験に参加され協力された方々、特に国鉄関係塩見幸三、伊藤充江、京増隆ひ、君島芳郎、舟橋鉄夫、鈴木潔、武田文男の諸氏、これらの方々に厚く感謝の意を捧げる。

なお直接筆者と終始行動を共にし、研究実験の労を拂われた審次一郎、浜崎正一郎、松橋登喜雄、清水巖、島村一男の諸氏に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) CCITT: "誘導防止に関する指示書" (1961)
- 2) Carson : B.S.T.J: p539 (Oct. 1926)
Pollaczek: E.N.T s339 (Sept 1926)
- 3) 鶴見: 電学誌 73-773 (昭28)
- 4) Dalziel: T.A.I.E.E (Oct. 1953)
- 5) Freiburger 著: 人体抵抗, (1934, Berlin).
- 6) 電学会: 誘導調整電鉄小委員会報告 p151 (昭33-4)
- 7) 宮下他: 鉄研報 (昭19-4)
- 8) Trueblood: E. E. 52 p904 (1933)
- 9) 河辺他: 鉄業資 9-16 (昭27)
- 10) 電学会: 電蝕ハンドブック p95 (昭27-4)
- 11) 電学会: 誘導調整電鉄小委員会報告 p44 (昭33-4)
- 12) 宮下: 電気鉄道 (昭27-8)
- 13) 日本国鉄: 横浜線交流加圧試験 (昭29-9)
- 14) 日本国鉄: 仙山線交流電化通信誘導試験 (昭30-4)
- 15) Klewe 著: 電力線と通信線との間の障害 p40 (1958) London, Arnold.
- 16) 未: 電通学誌 p10 (昭34-1)
- 17) 草野: 電試調報 No140 (昭26-12)
- 18) 電学誌: 誘導防止研究委員会才5回報告 (昭9-9)
- 19) Bewly 著: 送電系における進行波 p101
- 20) 宮下他: 鉄技研中報 8-59 (昭32-5)
- 21) 濫沢: 電学誌 33 p1021 (大2)
- 22) 茂木: 電試調 118 p39 (昭15-2)
- 23) 宮下: 鉄業誌 8-5 p21 (昭24-3)
- 24) 竹内・山口: 電学誌 77, 1440 (昭32)
- 25) 日本国鉄: 交流電化調査委員会報告 才3編 (昭31-3)
- 26) Suensson, 他: Bulletin I.R.C.A 338 (1960-4;5)
- 27) 鉄通協: 交流電化通信ケ-フルに関する研究 (昭35-6)
- 28) Earley 他: Brit. Comm. & Elect. 606 (1958-8)

- 29) 電学会： 誘導調整電鉄小委員会報告 p180(昭33-4)
- 30) Trogneux : E.T. on R. 9-11. 583 (1958-11)
- 31) 宮下他： 電学会東京支部大会 59(昭32)
- 32) 雨宮他： 電学誌 77, 548 (昭32-5)
- 33) 宮下他： 鉄研速報 60-57 (昭35-3)
- 34) Collard : Elect. Comm. (1933-6)
- 35) 電気協同研究： 4-3(昭23-8)
- 36) 電化協会： 脈動軽減委報告 (昭23-10)
- 37) 宮下・塩見： 鉄研中報 No.62 (昭26-12)
- 38) 宮下・決野： 電気鉄道 (昭24-11)
- 39) 宮川： 電気評論 (昭24-5)
- 40) 北村： 三学会聯大 (昭27)
森・加藤： 三学会聯大 (昭28 p311)
- 41) 塩見： 鉄研報告 No.156 (昭35-9)
- 42) 誘導防止基準の解説 p95 (コロナ社, 昭26-9)
- 43) 宮下： 交通技術 (昭23-11)
- 44) 宮下他： 電気3学会大会 (昭30-3)
- 45) Collard : J.I.E.E. 78 (1936)
- 46) 竹内： 電力 44-3 p600
- 47) 服部. 宮下. 藤田： 鉄研報 No.3-9 (昭19-9)
- 48) 宮下他： 鉄研速報 60-65 (昭35-4)
- 49) 金谷： 電試研報 231 (昭3-6)
- 50) 宮下： 電学誌 81, 868 (昭36-1)
- 51) 宮下： 電学誌 68, 122 (昭23-12)

附 錄

附 録

諸 式 の 証 明

1. 軌道の対地帰路インピーダンス, 式(2.20)の導出

軌道中の帰電流は2本のレールを並列にして、同じ方向に流れる。それ故、それぞれ1本のレールの大地帰路インピーダンスを Z_2 とし、平行する2本のレール間相互インピーダンスを Z_m とすれば、これら2本のレールより構成される軌道の大地帰路インピーダンス Z_{22} は

$$Z_{22} = \frac{1}{2}(Z_2 + Z_m) \quad 1-(1)$$

然るに $Z_2 = Z_i + Z_e \quad 1-(2)$

ただし Z_i = レールの内部インピーダンス (Ω/km)

Z_e = 外部インピーダンス

また、外部インピーダンス Z_e 及び相互インピーダンス Z_m については既に本文中に記述した通り Carson-Pollaczek 式により次のように与えられる。

$$Z_e = \left\{ \pi^2 f + j\omega (1.2319 - 2 \log_e r \alpha) \right\} \times 10^{-4} (\Omega/\text{km}) \quad 1-(3)$$

$$Z_m = \left\{ \pi^2 f + j\omega (1.2319 - 2 \log_e \alpha D) \right\} \times 10^{-4} (\Omega/\text{km}) \quad 1-(4)$$

ただし r = レールの等価半径 (cm)

D = レール間の距離 (cm)

$$\alpha = \sqrt{4\pi\sigma\omega}$$

σ = 大地導電率 (C.G.S., e. m. u.)

式(3), (4)を(1), (2)に代入し Z_{22} を求めると、式(5)の通りとなる。

$$Z_{22} = \frac{1}{2} Z_i + \left\{ \pi^2 f + j\omega (1.2319 - \log_e \alpha^2 r D) \right\} \times 10^{-4} (\Omega/\text{km}) \quad 1-(5)$$

2. 電車線路の静電容量, 式(2.22)の導出

地表上に平行して置かれた二本の線条導体について、これに加える電圧を V_1 , V_2 とし、導体上の電荷を Q_1 , Q_2 とするとき、これら諸量間には次の関係式が成

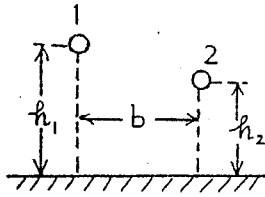


図 1- (1)

立する。

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= p_{11} Q_1 + p_{12} Q_2 \\ V_2 &= p_{12} Q_1 + p_{22} Q_2 \end{aligned} \right\} \quad 2-(1)$$

ただし p_{11} , p_{22} は夫々導体1および2の自己電位係数、 p_{12} は導体1と2の間の相互電位係数で、次の値を持つ。

$$\left. \begin{aligned} p_{11} &= 2 \ln \frac{2h_1}{r_1} \\ p_{22} &= 2 \ln \frac{2h_2}{r_2} \\ p_{12} &= \ln \frac{b^2 + (h_1 + h_2)^2}{b^2 + (h_1 - h_2)^2} \end{aligned} \right\} \quad 2-(2)$$

次に導体1, 2およびアース間に静電容量を反想して図1-(2)を考えると各部分静電容量と電圧および電荷との間に次の式が成立すべきである。

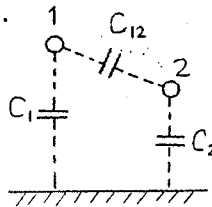


図 1- (2)

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= C_1 V_1 + C_{12} (V_1 - V_2) \\ Q_2 &= C_2 V_2 + C_{12} (V_2 - V_1) \end{aligned} \right\} \quad 2-(3)$$

また式 2-(1)より Q_1, Q_2 を求めると

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \frac{P_{22} V_1 - P_{12} V_2}{P_{11} P_{22} - P_{12}^2} \\ Q_2 &= \frac{P_{11} V_2 - P_{12} V_1}{P_{11} P_{22} - P_{12}^2} \end{aligned} \right\} \quad 2-(4)$$

式 2-(3)と 2-(4) が常に合同であるためには V_1 および V_2 の係数が等しいと置いて次の関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} C_1 + C_{12} &= \frac{P_{22}}{P_{11} P_{22} - P_{12}^2} \\ C_{12} &= \frac{P_{12}}{P_{11} P_{22} - P_{12}^2} \\ C_2 + C_{12} &= \frac{P_{11}}{P_{11} P_{22} - P_{12}^2} \end{aligned} \right\} \quad 2-(5)$$

従って C_1, C_2 は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{P_{22} - P_{12}}{P_{11}P_{22} - P_{12}^2} \\ C_2 &= \frac{P_{11} - P_{12}}{P_{11}P_{22} - P_{12}^2} \end{aligned} \right\} \quad 2-(6)$$

さて導体1および2を導線より接続し、並列に使用する場合にはこれらを1体とした複導体の対地静電容量 C は明らかに C_1 と C_2 との和に等しい。即ち次の通りである。

$$C = C_1 + C_2 = \frac{P_{11} + P_{22} - 2P_{12}}{P_{11}P_{22} - P_{12}^2} \quad 2-(7)$$

電車線路の場合には $b = 0$ であるので式 (2.22) の通りとなる。

3. 静電容量等価導体式 (2.26) の導出

電車線と吊架線の場合のように複導体の静電容量その他の計算に等価導体の考え方が良く用いられる。

いま地表上にある2本の線条導体の静電容量について

$$C = \frac{l}{P_{11}} \times \frac{1}{q} \times 10^{-6} \quad \text{F}/\text{km} \quad 3-(1)$$

$$\therefore P_{11} = 2 \ln \frac{2h}{r} \quad 3-(2)$$

= 等価導体の自己電位係数

h = 等価導体の地上高さ

r = 等価導体の半径

式 3-(1) が式 2-(7) と近似的に等しくなるような \bar{Y} 及び \bar{h} を決定する。

$$\text{いま} \quad \frac{1}{2} (P_{11} + P_{22}) \simeq \sqrt{P_{11}P_{22}} \equiv \bar{P}_{11} \quad 3-(3)$$

とおくことができるとする。然るとき式 2-(7) は

$$C = \frac{2}{\bar{P}_{11} + P_{12}} \times \frac{1}{q} \times 10^{-6} \quad \text{F}/\text{km}$$

これと式 3-(1) とより

$$\therefore \bar{P}_{11} = \frac{1}{2} (\bar{P}_{11} + P_{12}) \quad 3-(4)$$

ここで

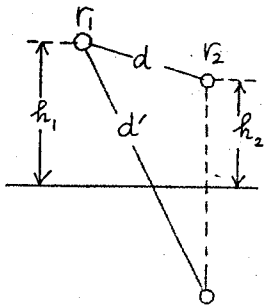
$$\bar{P}_{11} = 2 \ln \frac{2\bar{h}}{r}$$

3-(5)

とおくと

$$\begin{aligned} \bar{P}_{11} &= \frac{1}{2} \left(2 \ln \frac{2\bar{h}}{r} + 2 \ln \frac{d'}{d} \right) = 2 \ln \frac{\sqrt{2\bar{h}d'}}{\sqrt{r}d} \\ &\equiv 2 \ln \frac{2\bar{h}}{r} \end{aligned}$$

ただし



d = 複導体の相互間距離

d' = 複導体の1つと他方の大地に対する影像までの距離

$$\left. \begin{aligned} \therefore h &= \sqrt{\bar{h} \cdot \frac{d'}{2}} \\ r &= \sqrt{\bar{r} \cdot d} \end{aligned} \right\} \quad 3-(6)$$

図 3-(1)

ただし

$$\left. \begin{aligned} \bar{r} &= \sqrt{r_1 r_2} \\ \bar{h} &= \sqrt{h_1 h_2} \\ d' &= \sqrt{d^2 + 4h_1 h_2} \end{aligned} \right\} \quad 3-(7)$$

即ち等価導体として式 3-(6) に与えられる半径 r 、高さ h を仮想すれば、2-(7) と 3-(1) は近似的に等しくなる。よって式 3-(3) が成立する場合は、等価導体の半径及び高さは式 (2.26) の通りとなる。

一般に使用されている電車線および吊架線の太さ、配置について、等価半径、等価高さを求めると下表の通りとなる。

表 3-(1) 電車線路等価導体

	公称断面積 (mm ²)	外径 (cm)	半径 (cm)	直流抵抗 ($\frac{\Omega}{km}$)
電車線	70	0.99	0.495	0.1592
	85	1.10	0.55	
	110	1.234	0.617	
吊架線	55 (St)	0.96	0.48	0.338
	60 (Cd-Cu)	0.874	0.437	
	90 (St)	1.23	0.615	

表3-(2) 等価半径

等価半径 (cm)

	電線線種別	70	80	110 [●]
	吊架線			
d = 40 cm	55	4.42	4.53	4.67
	60	4.31	4.43	4.55
	90	4.67	4.82	4.96
d = 60 cm	55	5.41	5.55	5.72
	60	5.28	5.42	5.57
d = 30 cm	55	3.83	3.92	4.04
	60	3.73	3.84	3.94

表3-(3) 等価高さ

h_1	d = 40	d = 60	d = 30
450 ^{cm}	470 ^{cm}	479.5 (480) ^{cm}	465 ^{cm}
500	520	529.5 (530)	515
520	540	549.5 (550)	535

註: () 内数値は算術平均

4. 正極き電線を有する回路のインピーダンス式(3.12)の導出

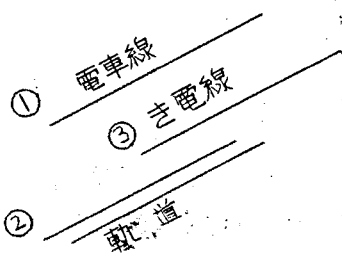


図4-(1)

き電回路のインピーダンスを求める場合、き電線および負荷線に生ずる附加的電圧降下は本文2.5.2節で述べた通りの理由により、これを考察外におく。

またレール部分の電流は、き電区間の中間部分を考えれば減衰電流は非常に小さく、またレール電位はほぼ0と考えられる。

このような仮定のもとに各部線電流を I_1, I_2, I_3 とし、それぞれについて単位長さ当りの電圧降下を求めると、

$$V_1 = I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12} + I_3 Z_{23}$$

$$\left. \begin{aligned} V_3 &= I_1 Z_{13} + I_2 Z_{23} + I_3 Z_{33} \\ 0 &= I_1 Z_{12} + I_2 Z_{22} + I_3 Z_{23} \end{aligned} \right\} \quad 4-(1)$$

さらに③は正極き電線として①と並列に使用されるので

$$V_1 = V_3$$

$$\text{また } I_1 + I_3 = I, \quad I_1 = aI, \quad I_3 = bI$$

とおき 上記連立式4-(1)を解くと、 Z_a は式4-(2)のように求められる。

$$Z_a = \frac{V_1}{I} = aZ'_{11} + bZ'_{13} \quad 4-(2)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし } Z'_{11} &= Z_{11} - n_a Z_{12} \\ Z'_{13} &= Z_{13} - (Z_{12} Z_{23} / Z_{22}) \\ n_a &= Z_{12} / Z_{22} \end{aligned}$$

5. 静電結合係数 k_s の導き方.

大地上に n 本の線条が平行して配置され、それぞれの電圧および電荷を V_1, V_2, \dots, V_n ; Q_1, Q_2, \dots, Q_n とすると、これらの間に式5-(1)が成立する。

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \dots & \dots & P_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{pmatrix} \quad 5-(1)$$

ただし P_{ii}, P_{ij} は電位係数である。

いま導体 n を被誘導線とし、 $1, 2, \dots, (n-1)$ を電力線とする。また n は絶縁されているとすれば、 $Q_n = 0$ とおくことができる。さらに電力線 $1, 2, \dots, (n-1)$ はすべて同じ電圧が加えられるとする。

$$\left. \begin{aligned} \text{即ち } V_1 &= V_2 = \dots = V_{n-1} = V \\ Q_n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad 5-(2)$$

この仮定5-(2)を式5-(1)に代入して、 V_n を求めると、式5-(3)が得られる。

$$V_n = k_s V \quad 5-(3)$$

さて係数 k_s を代表的な数種の場合について求めると、本文式(3.19)ないし(3.26)の通りとなる。例えば最も簡単な $n=2$ の場合について、基本式5-(1)は

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= P_{11} Q_1 + P_{12} Q_2 \\ V_2 &= P_{21} Q_1 + P_{22} Q_2 \end{aligned} \right\} \quad 5-(4)$$

ここで $Q_2 = 0$ とおき、才1式より $Q = \frac{V_1}{P_{11}}$

$$\therefore V_2 = \frac{P_{21}}{P_{11}} V_1 \equiv k_s V_1 \quad 5-(5)$$

なお $P_{21} = P_{12}$ は常に成立するので $k_s = \frac{P_{12}}{P_{11}}$ となる。

6. アドミタンス不平衡による電磁誘導電流、式(4.38)の導出。

本文式(4.7), (4.8)と同様に、通信線上に外部より単位長当り電磁誘導起電力 E が存在するときは、次の式6-(1)および6-(2)が成立する。

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dV_x}{dx} &= I_x Z - E \\ -\frac{dI_x}{dx} &= V_x Y \end{aligned} \right\} \quad 6-(1) \quad \left. \begin{aligned} -\frac{dv_x}{dx} &= jx\zeta \\ -\frac{di_x}{dx} &= v_x\eta \end{aligned} \right\} \quad 6-(2)$$

いま E が全長に亘って一定と仮定し、本式を解くと

$$\left. \begin{aligned} I_x &= \frac{1}{Z_0} (-C e^{rx} + D e^{-rx}) + \frac{E}{2Z} \\ V_x &= C e^{rx} + D e^{-rx} \end{aligned} \right\} \quad 6-(3)$$

$$\left. \begin{aligned} i_x &= \frac{1}{\zeta} (-C_a e^{r_a x} + D_a e^{-r_a x}) \\ v_x &= C_a e^{r_a x} + D_a e^{-r_a x} \end{aligned} \right\} \quad 6-(4)$$

ここで Z_0, ζ, r, r_a は式(4.14)で与えられた通り、また定数 C, D, C_a, D_a は積分定数であり、この場合と式(4.12)と同じ条件を6-(3), 6-(4)に代入して決定する。その結果さらに通信線が比較的短かく、 $rl, r'l'$ などが0に近いと仮定して得られた式を整理すると式6-(5)の通りとなる。

$$i_a = \frac{r(\ell'^2 - \ell^2) E}{4Z_0 + r\ell_0 \left(Y + \frac{8}{2Y} \right)} \quad 6-(5)$$

7. 吸上変圧器二次巻線電流，式(5.16)および(5.17)の導出

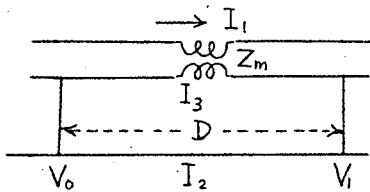


図 7-(1)

吸上変圧器および負き電線を有する区間の中間区間について電流分布を考えると、レール中の減衰電流は無視し得る程に小さく、従つてレール電位 V_0, V_2 は 0 であり、レールには誘導電流のみが流れるので、レール電流 I_2 および負き電線電流 I_3 に関して次の式 7-(1) が成立する。

$$\left. \begin{aligned} I_2 Z_{22} + I_1 Z_{12} + I_3 Z_{23} &= 0 \\ (I_3 Z_{33} + I_2 Z_{23} + I_1 Z_{13}) D + I_1 Z_m + I_3 Z_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad 7-(1)$$

ただし Z_m, Z_2 は吸上変圧器の一次、二次巻線間相互インピーダンスおよび二次巻線の励磁インピーダンスとす。

いま

$$m = -\frac{I_3}{I_1}, \quad n = -\frac{I_2}{I_1} \quad 7-(2)$$

とおき式 7-(1) を m, n について整理すると、

$$\left. \begin{aligned} n Z_{22} + m Z_{23} &= Z_{12} \\ n Z_{23} + m Z_{33}' &= Z_{13}' \end{aligned} \right\} \quad 7-(3)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし } Z_{33}' &= Z_{33} + Z_2/D \\ Z_{13}' &= Z_{13} + Z_m/D \end{aligned}$$

また吸上変圧器は巻数比 1:1 であり、漏洩インピーダンスは小さいので

$$Z_2 = Z_m \quad 7-(4)$$

とおくことができる。

式 7-(3) を m, n について解けば次の式 7-(5) を得られる。

$$m = \frac{Z_{22} Z_{13}' - Z_{12} Z_{23}}{Z_{22} Z_{33}' - Z_{23}^2} = \frac{Z_{13}' - n_0 Z_{23}}{Z_{33}' - m_0 Z_{23}} \quad 7-(5)$$

$$n = \frac{Z_{23}Z'_{13} - Z_{12}Z'_{33}}{Z_{22}Z'_{33} - Z_{23}^2} = \frac{m_o Z'_{13} - n_o Z'_{33}}{Z'_{33} - m_o Z_{23}} \quad 7-(6)$$

たゞし

$$n_o = \frac{Z_{12}}{Z_{22}}, \quad m_o = \frac{Z_{23}}{Z_{22}}$$

次にレール電位 V_o および V_1 の無視できない場合は、レール電位差 $V_o - V_1$ により、BTの二次側回路に流れる電流を求める。

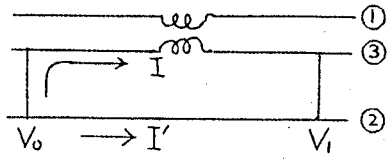


図 7-(2)

図7-(2)において

$$\left. \begin{aligned} V_o - V_1 &= (I Z'_{33} + I' Z_{23}) D \\ V_o - V_1 &= (I' Z_{22} + I Z_{23}) D \end{aligned} \right\} 7-(7)$$

この式を I について解くと

$$I = \frac{V_o - V_1}{Z} \quad 7-(8)$$

$$\text{たゞし } Z = \frac{1}{1 - m_o} (Z'_{33} - m_o Z_{23}) D$$

式7-(8)を式7-(2)に加え、 I_3 を求めると式7-(9)となる。

$$I_3 = \frac{V_o - V_1}{Z} - m I_1 \quad 7-(9)$$

8. 吸上変圧器の誘導軽減係数 k' , 式(5.31)および式(5.32)の導出.

吸上変圧器の誘導軽減係数 k' は式(5.30)により定義される。然るに3-1節に述べたところにより式8-(1)が成立つ。

$$\text{吸上変圧器のない饋電回路の } A \cdot \text{km} = (1 - n_o) I_1 D \quad 8-(1)$$

たゞし D は平行距離とする。また図5.1(a)の場合の中間区間を見るに、レールの平均電流は式(5.7)で与えられている。それ故中間区間の全 $A \cdot \text{km}$ は式8-(2)の通りとなる。

$$(I_1 + I_{b2m}) D = (1 - n_o) I_1 D + (I_2 + n_o I_1) \frac{2}{l_2} \tanh \frac{l_2 D}{2} \quad 8-(2)$$

故に図5.1(a)の場合、式8-(1)と8-(2)の比をとり k' は8-(3)のようになる。

$$k' = 1 - \frac{m-n_0}{1-n_0} \frac{2}{\Gamma_2 D} \tan \beta \frac{\Gamma_2 D}{2} \quad 8-(3)$$

次に吸上変圧器と負き電線のある場合の中間区間における A. f. m. は、式(5.25)より容易に

$$(1-m-n) I_1 D \quad 8-(4)$$

式8-(4)と8-(1)との比より式8-(5)となる。

$$k' = \frac{1-m-n}{1-n_0} \quad 8-(5)$$

9. 吸上変圧器を含む饋電回路のインピーダンス式の導出。

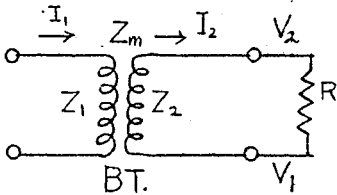


図 6-(1)

BTの1次巻線、2次巻線の励磁インピーダンスを Z_1, Z_2 とし、その間の相互インピーダンスを Z_m とすれば、2次側ループ回路について、

$$I_1 Z_m + I_2 Z_2 = (V_1 - V_2)$$

ただし V_1, V_2 は2次側に負荷 R を接続したときの2次側端子の電圧。

$$\therefore I_2 = -I_1 \frac{Z_m}{Z_2} + \frac{V_1 - V_2}{Z_2} \quad 6-(1)$$

また $V_1 - V_2 = I_2 R$ なる故

$$I_2 = -\frac{Z_m}{R + Z_2} I_1 \quad 6-(2)$$

次に1次側から見たインピーダンスを Z'_2 とすると

$$\begin{aligned} Z'_2 &= Z_1 - \frac{Z_m^2}{R + Z_2} \\ &= \frac{RZ_1}{R + Z_2} + \frac{Z_1 Z_2 - Z_m^2}{R + Z_2} \end{aligned} \quad 6-(3)$$

いま

$$\left. \begin{aligned} Z_m &= k \sqrt{Z_1 Z_2} \\ k &= \text{漏洩係数} \end{aligned} \right\} \text{とおくと}$$

$$\begin{aligned} Z'_2 &= \frac{RZ_1}{R + Z_2} + (1 - k^2) \frac{Z_1 Z_2}{R + Z_2} \\ &= \frac{RZ_1}{R + Z_2} + Z'_d \end{aligned} \quad 6-(4)$$

ただし $Z'_d = (1-k^2) \frac{Z_1 Z_2}{R+Z_2}$ 6-(5)

2次側端子を短絡したときのインピーダンスを Z_{sh} とおくと式6-(4)において $R=0$ とおき

$$Z_{sh} = (1-k^2) Z_1 \quad 6-(6)$$

従つて $Z'_d = Z_{sh} \frac{Z_2}{R+Z_2}$ 6-(7)

また2次側端子を開放したときのインピーダンスを Z_{op} とおくと、式6-(4)において $R=\infty$ とおき

$$Z_{op} = Z_1 \quad 6-(8)$$

一般に Z_{sh} は漏洩インピーダンス Z_l , Z_{op} は励磁インピーダンス Z_{ie} に等しい。

即ち $Z_{ie} = Z_{op} = Z_1$
 $Z_l = Z_{sh} = (1-k^2) Z_1$ } 6-(9)

$$\therefore k = \sqrt{1 - \frac{Z_{sh}}{Z_{op}}} \quad 6-(10)$$

故に式6-(4)は次式6-(11) のようになる。

$$Z'_l = \frac{R Z_{ie}}{R+Z_{ie}} + Z_l \frac{Z_{ie}}{R+Z_{ie}} \quad 6-(11)$$

式6-(11)を等価回路に表わすと図6-(2)の通りとなる。

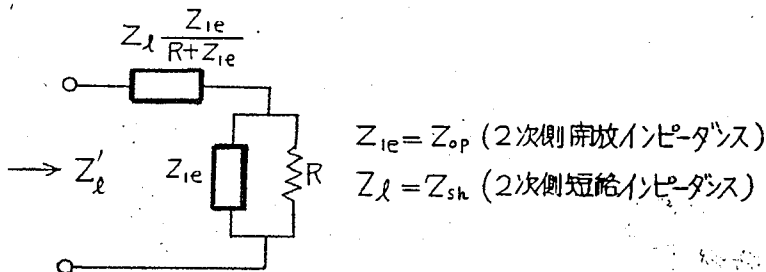


図6-(2) BTの1次側より見たインピーダンス等価回路

次に電回路のBTを接続した場合を考えると、図5.1(a)の場合、BT1区間の電車線中の電圧降下 V は

$$\begin{aligned} V &= I_1 Z_{11} D + \int_0^D I_{2x} Z_{12} dx \\ &= I_1 Z_{11} D + \overset{0}{Z}_{12} \cdot D \cdot I_{2m} \end{aligned} \quad 6-(12)$$

I_{2m} は式(5.7)を代入し、

$$V = I_1 Z_{11} D + Z_{12} D \left\{ (-m+n_0) I_1 \frac{2}{\Gamma_2 D} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2} - n_0 I_1 \right\}$$

故に電車線部分のインピーダンス Z は

$$Z_a = \frac{V}{I_1} = Z_{11} D - Z_{12} D \left\{ (m-n_0) \frac{2}{\Gamma_2 D} \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2} + n_0 \right\} \quad 6-(13)$$

次にBT部分の1次巻線端子より見たインピーダンスは式6-(4)となる。

図5.1(a)の場合、 R は2次側端子の接続されるレール電位差を I_2 で除したものに等しくなるから

$$R = 2(A+B) S_2 / I_2 \quad 6-(14)$$

これに式(5.6)を代入し、式6-(15)の通りとなる。

$$R = \frac{2(1-n_0) Z_2 S_2 \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2}}{Z_2 + 2n_0 S_2 \tanh \frac{\Gamma_2 D}{2}} \quad 6-(15)$$

式6-(13)に式6-(4) [式中 R に6-(15)を代入し] を加えると、式(5.34)が得られる。

次に図5.1(b)の場合は、BT 1区間内の電車線中の電圧降下 V は

$$V = I_1 Z_{11} D + I_2 Z_{12} D + I_3 Z_{13} D = I_1 D (Z_{11} - n Z_{12} - m Z_{13})$$

$$\therefore Z_a = \frac{V}{I_1} = (Z_{11} - n Z_{12} - m Z_{13}) D \quad 6-(16)$$

またBT部分のインピーダンスは、やはり式6-(4)を適用し、式中の R は次式6-(17)の通りとすれば Z_a と式6-(4)で与えられる Z を加えることにより式(5.39)が得られる。ただし

$$\begin{aligned} R &= (\text{BTの二次側端子の電位差}) / I_3 \\ &= I_1 Z_{13} D + I_2 Z_{23} D + I_3 Z_{33} D / I_3 \\ &= (Z_{33} - \frac{1}{m} Z_{13} + \frac{n}{m} Z_{23}) D \end{aligned} \quad 6-(17)$$

式6-(17)は即ち式(5.40)である。

10. 交流電気鉄道における静電誘導電圧および電流計算式の導出

交流電気鉄道においては、正極側は吊架線および電車線のみよりなる。

この二本導体の等価導体について、自己電位係数を P_{11} とおくと、附録式 5-(5) より、平行する架空絶縁線条への誘導電圧 V_2 は

$$V_2 = \frac{P_{12}}{P_{11}} V_1 \quad 10-(1)$$

ここで $P_{11} = 2 \ln \frac{2h_1}{r_1}$

$$P_{12} = \ln \frac{b^2 + (h_1 + h_2)^2}{b^2 + (h_1 - h_2)^2}$$

ただし $r_1, h_1 =$ 電車線路の等価導体の半径及び高さ。

r_1, h_1 に附録表 3-(2) および表 3-(3) の数値を代入すると、

$$V_2 = \frac{V_1}{4.8} \log_{10} \frac{b^2 + (h_1 + h_2)^2}{b^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad 10-(2)$$

次に架空線路 ② を接地する場合は、 $V_2 = 0$ となるので附録式 5-(4) より Q_2 を求めると、

$$\therefore Q_2 = \frac{I}{P_{12} - P_{11} \frac{P_{22}}{P_{21}}} V_1 \quad 10-(3)$$

しかるに接地しない場合の線条 ② の電位は式 10-(1) で与えられる。

$$\begin{aligned} \therefore Q_2 &= \frac{I}{P_{12} - P_{11} \frac{P_{22}}{P_{21}}} \cdot \frac{P_{11}}{P_{12}} V_2 \\ &= -C_2 \cdot \frac{P_{11}}{P_{11} - P_{12}} V_2 \end{aligned}$$

ただし C_2 は附録式 2-(6) で与えられている。然るに P_{12} は P_{11} に比して一般に非常に小さいので $P_{11}/P_{11} - P_{12}$ は殆んど 1 に近い値となる。

$$\therefore Q_2 = -C_2 V_2$$

さて接地したときの電流を I_2 とおくと

$$I_2 = -\frac{dQ_2}{dt} = \omega C_2 V_2 \quad 10-(4)$$

従つて線条 ② の長さ l についての静電容量 C_2 を求め、式 10-(4) に代入すると、式 (7.2) の通りとなる。

11. 複線軌道の軽減係数 k の導出

き電回路は電車線のみの最も簡単な複線軌道において、一方の電車線（例えば上り線）に電流 I_1 が流れ、他方の電車線（例えば下り線）には電流はないものとする。また軌道は上り線を b_1 、下り線を b_2 の添字を附すものとし、中間区間で減衰電流の項が無視できるところでは、レール電位は 0 と考えてよいので、次の式 11-(1) が成立する。

$$\left. \begin{aligned} I_1 Z_{12} + I_{b1} Z_{22} + I_{b2} Z_{23} &= 0 \\ I_1 Z_{13} + I_{b1} Z_{23} + I_{b2} Z_{22} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad 11-(1)$$

両式を加えると $I_1 (Z_{12} + Z_{13}) + (Z_{22} + Z_{23}) (I_{b1} + I_{b2}) = 0$

$$\therefore I_b = (I_{b1} + I_{b2}) = -I_1 \frac{Z_{12} + Z_{13}}{Z_{22} + Z_{23}} \quad 11-(2)$$

然るに $k = (1 + \frac{I_b}{I_1})$ で定義されるから

$$k = 1 - \frac{Z_{12} + Z_{13}}{Z_{22} + Z_{23}} \quad 11-(3)$$

単線の場合は $k = 1 - n_0$

$$\therefore \text{複線の場合は } n_0 = \frac{Z_{12} + Z_{13}}{Z_{22} + Z_{23}} \quad 11-(4)$$

となる。

— 終 —