U. D. C. 621.315.212 : 621.396.931.029.62 : 656.342

VHF 列車無線用漏えい同軸ケーブル

Leaky Coaxial Cable for Train Communication

吉安龍夫* Tatsuo Yoshiyasu　岡田茂生** Shigeo Okada
八田達*** Tôru Hatta　花岡利男**** Toshio Hanaoka

要　旨

大阪市の地下鉄で列車との通信を行なうために，新しく開発された絶縁体外径 15 mm の漏えい同軸ケーブルが採用された。トンネルは全長約 8 km の複線で，中央には天井を支持する構築物がある。その形状は種々さまざまで，両線の見通しのきくところでは原則として漏えい同軸ケーブルは1条，見通しのきかないところでは2条架線されている。そのために分岐および合成を行なう付属品が必要になり，同軸コードを用いたハイブリッド回路を開発した。工事完成後に電界強度測定を行なったところ，通信に必要なレベルがじゅうぶん確保されており，現在実用に供されている。

1. 緒　　言

近年，大量輸送機関としての高速鉄道は激増する旅客を輸送するために，運転保安の確保と，高密度，高速度の列車運転が要求されている。

このような状況に対処するために，列車と運転指令所の間に直通無線回線を設け，

（1） 運転保安設備の故障，軌道障害などの通報の迅速化を図り，事故の発生を防止する。

（2） 指令業務の円滑化を図り能率的な列車管理を行なう。

（3） 事故，災害時の連絡を確保し，迅速かつ適切な処置を講じて事故の拡大を防止するとともに，列車運転上の混乱を防止する。

（4） 旅客の安全など旅客に関する通報を行ない，サービスの向上を図る。

など軌道事業に課せられた使命を果たすことが必要である。このため従来より誘導式通信設備が設置されていたが，今回，大阪市高速鉄道6号線において，初めて超短波（150 MHz 帯）FM 無線電話装置が採用された。

高速鉄道6号線（堺筋線）は全長 7.6 km の大阪市営の高速鉄道として，最初の私鉄（京阪神急行電鉄）との相互直通運転路線で，1号線（御堂筋線）の混雑を緩和し，郊外ベッドタウンと都心ビジネス地域を乗り換えなしで結ぶ目的で建設された。さらに万国博開催時には市内中心部から 30 分程度で会場へ結ぶ“あし”として活躍した。

相互乗り入れを実施するため，集電方式には従来の第3軌条方式と異なる架空電車線方式が採用された。

ところで地下式構造物内の列車無線としては，従来は空間波を利用するものより誘導を利用したものが多い。しかしこの方式を地上路線まで押し進めると，パンタグラフ離線時の対策，電力線搬送電話および無線標識との相互干渉の問題が提起される。逆に空間波方式を地下式構造内で使用するためにはトンネル対策の検討が必要である。

地上，地下の全路線を対象とした通信設備として，二重設備を避けていずれの方式を採用すべきか，技術的経済的見地から慎重な検討が加えられた。その結果，いずれの方式とするか甲乙つけがたいが，新技術開発の目的で空間波を採用することとし，問題点を追求解決することにした。

以下，本文において6号線通信系統の概略，漏えい同軸ケーブルおよび付属機器の特性，トンネル内電界強度を主体として述べる。

*　大阪市交通局 工学博士
**　日立電線株式会社研究所
***　日立電線株式会社研究所 工学博士
****　日立電線株式会社日高工場

2. トンネル内における漏えい同軸ケーブル通信方式

2.1 ほかの方式との比較

従来，トンネル内での列車との通信には誘導無線および平行2線が多く使用されており，アンテナを用いた空間波方式も検討されている[1]。しかるに今回漏えい同軸ケーブルが採用された理由として次のことがあげられる。

（1） 大阪市の地下鉄内誘導無線方式は列車からの送信出力を集電靴より第3軌条へ給電し，第3軌条とトンネル内に架線された誘導線に結合させる。また運転指令所からの送信出力を誘導線に給電し，これと列車の空中線との誘導結合により通信を行なう。ところが6号線は架空電車線方式であり，誘導無線方式にするとパンタ折りたたみ時の技術的問題がある[2]。

（2） 平行2線方式は VHF 帯で使用可能であるが，汚損に弱く，また電界変動（fluctuation）が大きい。

（3） アンテナ方式はトンネル内で電波の減衰が激しく，ダイナミックレンジが広くなる。またアンテナの間隔を狭くすると隣接するアンテナからの電波が干渉を起こすおそれがある。

（4） 漏えい同軸ケーブルは構造的に汚損に強いばかりでなく，種類を変えることによってふく射量の調整ができ，サービスエリア全線にわたり電界強度を比較的一様にすることができる。

（5） 以上の点を考慮し，全システムに対する投資効果を加味すると，VHF 帯漏えい同軸ケーブル方式が有利である。

2.2 通信系統の概要

（1） 市交（大阪市交通局）と阪急（京阪神急行）の通信領域：天六駅を境に乗務員の交替が行なわれ，北側は阪急，南側は市交の指令系統となる。ただし天六駅北部引き込み線は市交通信系統に含まれる（図1）。

（2） 通信方式：市交　複信式（同時通話）
阪急　半複信式（プレストーク）

（3） 周波数：市交基地局　147.94 MHz

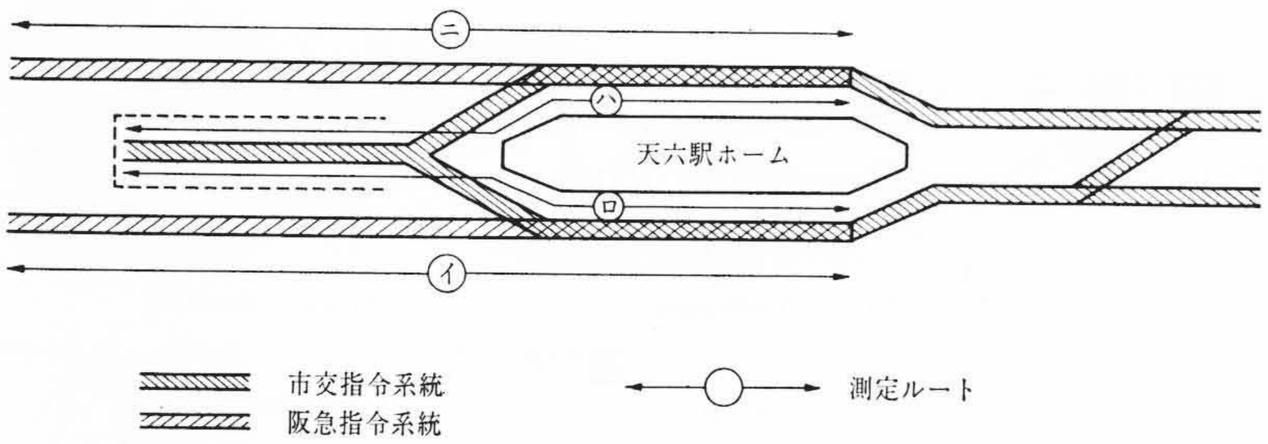

図1　天六駅周辺の指令系統および実車測定ルート

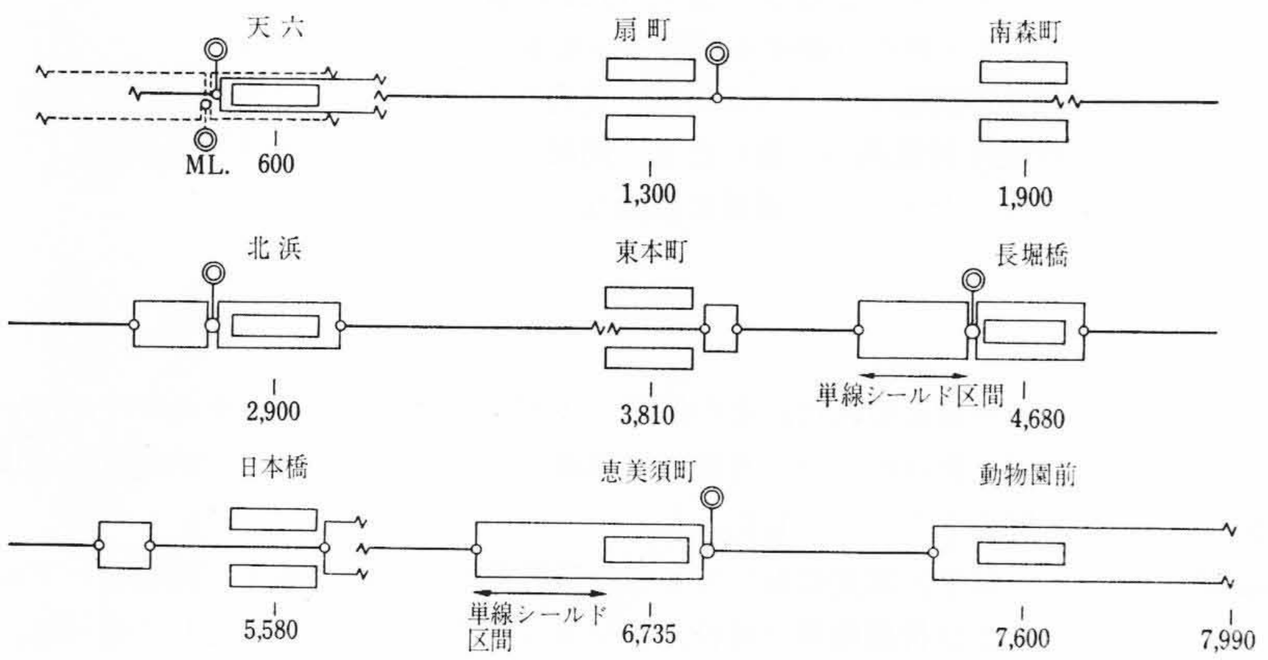

図4　漏えい同軸ケーブル系統図

市交移動局　143.94 MHz
阪　　急　147.92 MHz

（4）無線機出力：市交基地局　5 W
市交移動局　10 W

（5）列車空中線：逆L形空中線

2.3　トンネル構造および問題点

複線軌道のためにトンネルは二つに分かれており，天六駅へ向かう線を北行線，動物園へ向かう線を南行線と呼ぶ。トンネルの中央には天井をささえるための構築物があるが，その種類は多く変化に富んでいる。それを大きく分類すると次の4種類になる。

（1）支　　柱：柱状のもの（図2（a），図3）
（2）隔　　壁：比較的短い壁（図2（b））
（3）長　　壁：比較的長い壁
（4）シ ー ル ド：南北線が完全に分離

またプラットホームも2種類あり互いに向かいあっているものを対向形ホーム，中央にあるものを島形ホームと呼ぶ。このような複雑なトンネル形状に対し，電界強度をできるだけ均一にするために原則的に支柱，隔壁，対向形ホームの区間は中央の柱の北行側に漏えい同軸ケーブルを1条架線し，ほかの区間は両側に2条架線した。天六駅周辺では市交と阪急の漏えい同軸ケーブルが平行して架線されているが，それぞれの基地局送信周波数が20 kHzしか違わないので混信を起こすことが考えられる。この対策としてはセットを含めたシステムまたは運用上の取り決めにより解決せざるをえない。6号線漏えい同軸ケーブルの系統は図4に示すとおりである。

3.　15C バロン形漏えい同軸ケーブル

6号線に用いられた漏えい同軸ケーブルは，15C バロン形同軸ケーブルの外部導体に漏えい孔を設けたものであり図5の構造をしている。特性インピーダンスは75Ωであり，50Ωのケーブルに比べて伝送損失，経済性の点ですぐれている。

TEM 波を伝送する同軸ケーブルの外部導体に軸方向に一様なスロットを設けても，ふく射素子として用いることはできない。このようなスロットを励振するために円周方向のスロットと組み合わせ

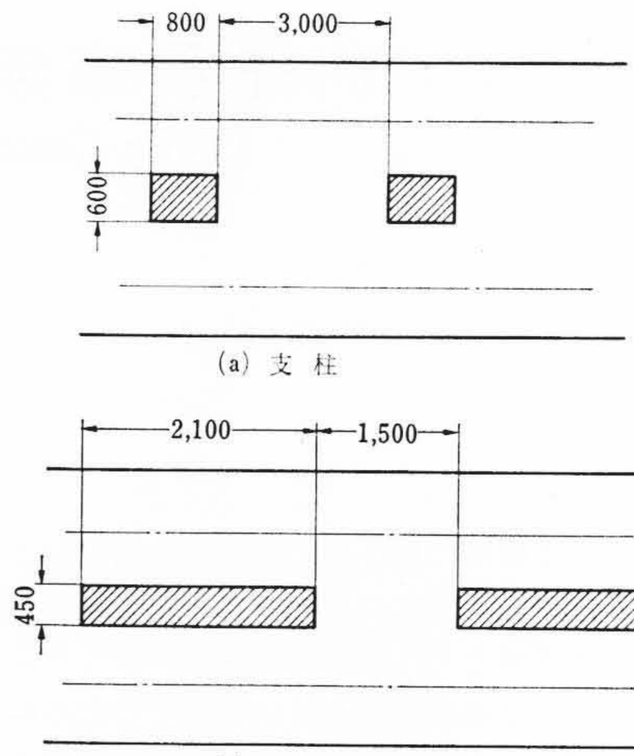

図2　支柱および隔壁

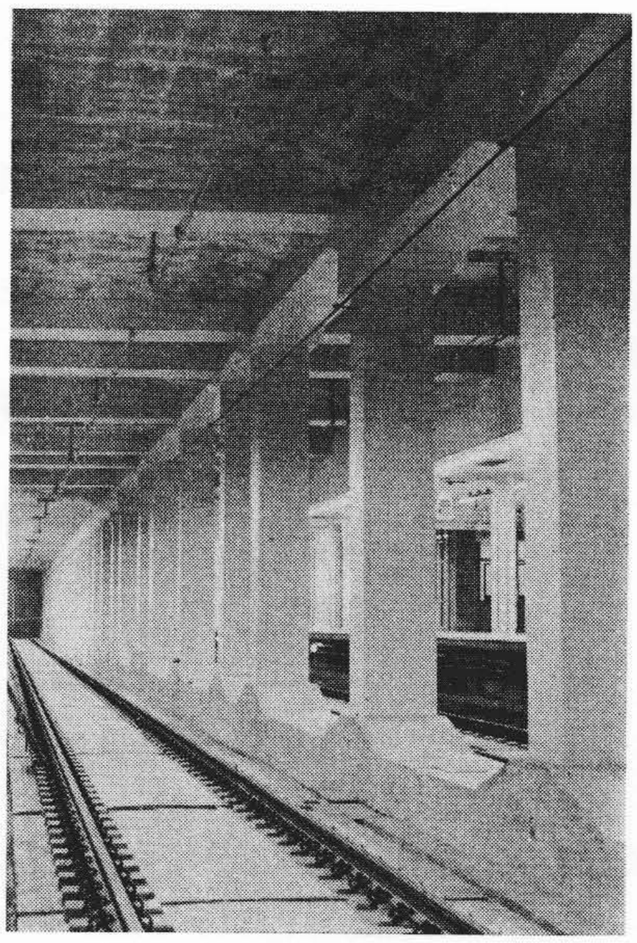

図3　支柱区間における漏えい同軸ケーブルの架線状況

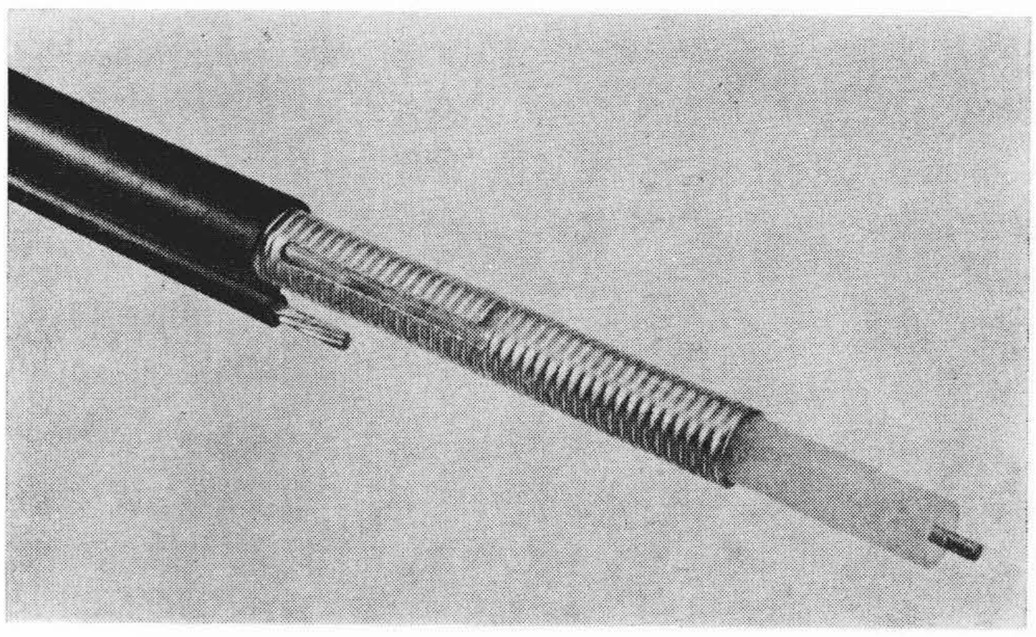

図5　15C バロン形漏えい同軸ケーブル

図6　漏えい同軸ケーブルのスロット構造

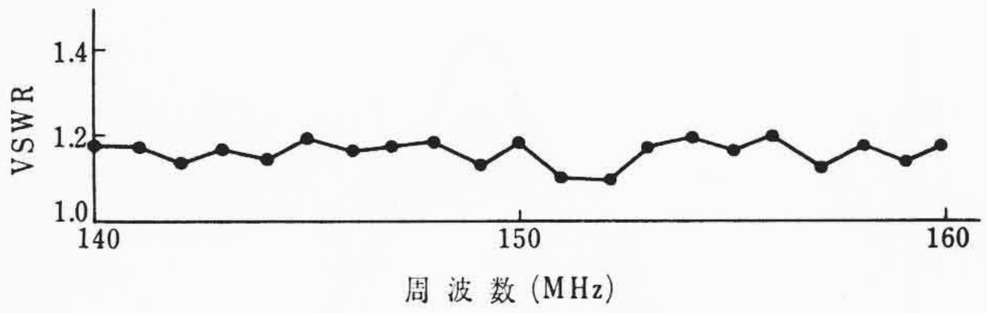

図9　VSWRの周波数特性

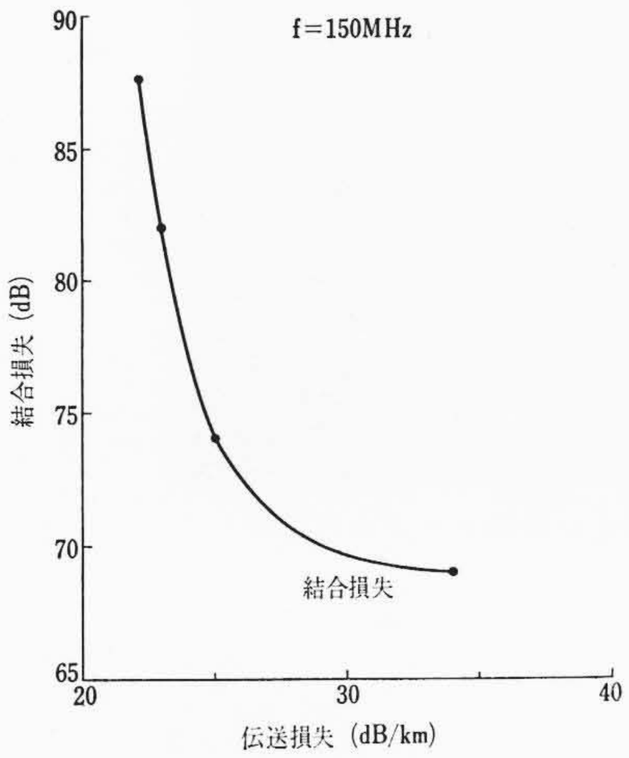

図7　15Cバロン形漏えい同軸ケーブルの特性

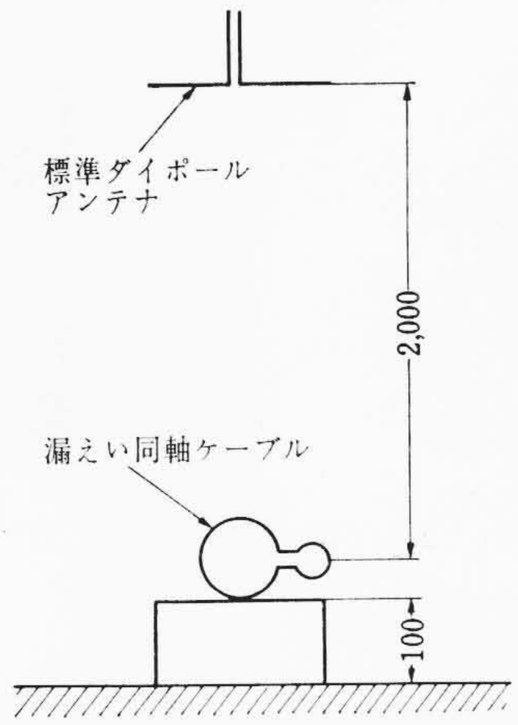

図8　結合損失を測定する場合のケーブルとアンテナの位置

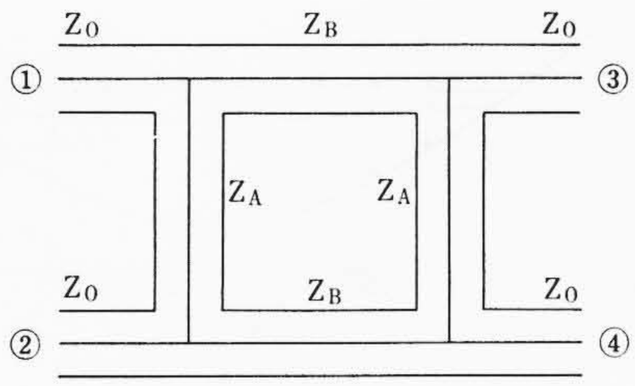

図10　リング形ハイブリッド回路

表1　6号線に用いた漏えい同軸ケーブルの特性

ケーブルの種類	伝送損失 (dB/km)	結合損失 (dB)	特性インピーダンス (Ω)	VSWR
B　形	22.8	83.1	75±2	1.2 以下
C　形	25.3	73.7		
D　形	34.5	69.2		

f=150 MHz

て図6に示す構造とする。同軸ケーブルの管径が細いためにスロット上の波はリアクティブな減衰波となり共振現象は起こらない。漏えい同軸ケーブルはこのような非共振ふく射素子を用いて長大なアレーを構成したものであり，一つのふく射波を得るためにアレーの間隔(P)を(1)式のように選ぶ[3]。

$$\frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon}+1}<P<\frac{2\lambda}{\sqrt{\varepsilon}+1} \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに，λは自由空間波長，εは同軸ケーブルの等価誘電率である。

漏えい同軸ケーブルからのふく射量を変えるには，スロットの円周方向の長さ(W)を変えるのが有効である。15Cバロン形漏えい同軸ケーブルの結合損失と伝送損失の関係を示したのが図7である。結合損失は地上10 cmに置かれた漏えい同軸ケーブルからのふく射波を，ケーブルから2 mの高さの標準ダイポールアンテナで受信したものである(図8)。受信電界は軸方向に細かく変動するので，結合損失は電界強度が測定長の50%に達するときの値で定義されている。

アレーは非共振のためケーブルと直角の方向にはふく射せず，ビームは傾いている。VSWRは共振周波数で大きな値になるが，使用帯域内では小さい(図9)。今回使用した漏えい同軸ケーブルの特性は表1に示すとおりである。

4. 付　属　機　器

系統を構成するのに若干の付属機器を必要とする。無線機との整合をとるためのインピーダンス変換器，分岐および合成を行なうためのT分岐およびハイブリッド回路を製作した。これらは，いずれも同軸コードを利用したものであり小形，軽量である。

4.1　インピーダンス変換器

基地局無線機出力端子が50Ωであり，一方，漏えい同軸ケーブルは75Ωである。そのためλ/4同軸形インピーダンス変換器を使用した。

4.2　T　分　岐

一つの無線機から両方向の漏えい同軸ケーブルにT形給電されるために分岐回路を必要とする。整合をとるため53Ωのλ/4同軸形インピーダンス変換器を用いてT分岐回路を構成した。

4.3　ハイブリッド回路

トンネルの構造により漏えい同軸ケーブルが1条架線される区間と2条架線される区間がある。そのために漏えい同軸ケーブルの分岐および合成を行なう必要があり，これにはリング形ハイブリッド回路を用いた。その構造は図10に示すように4本の同軸コードより構成され，端子①からの入力波は端子③④に2等分され，その位相差は90度となる。また逆に端子③④に90度の位相差で同振幅の波がはいると端子①にはそれらが合成され，それぞれの入力電力の2倍の出力が得られる。いずれの場合にも端子②へは出力は現われない。特性インピーダンスは理想的には75Ωと53Ωであるが，それがわずかにずれてもハイブリッド特性に及ぼす影響は比較的少ない。実際に使用したハイブリッド回路の特性は図11に示すとおりである。

2条に分かれた漏えい同軸ケーブルを1条に合成する場合にはハイブリッド回路への入力波の振幅と位相の関係が重要であり，それらは主として2条の漏えい同軸ケーブルの長さの違いによる[4]。振幅の偏差についてはあまり問題はないが，位相の偏差の影響は大きい。そこで漏えい同軸ケーブルの架設完了後に現地で位相合わせを行なった。

トンネル構造により3方向および4方向の分岐を必要とする場合がある。そのためT分岐およびハイブリッド回路を組み合わせて一つのきょう体に収め，3方向分配器および4方向分配器を製作した。きょう体にはメラミン塗装を施こし，防水構造とした。また位相調整および漏えい同軸ケーブルとの接続を容易にするために同軸コードのリード線を付けた（図12)。

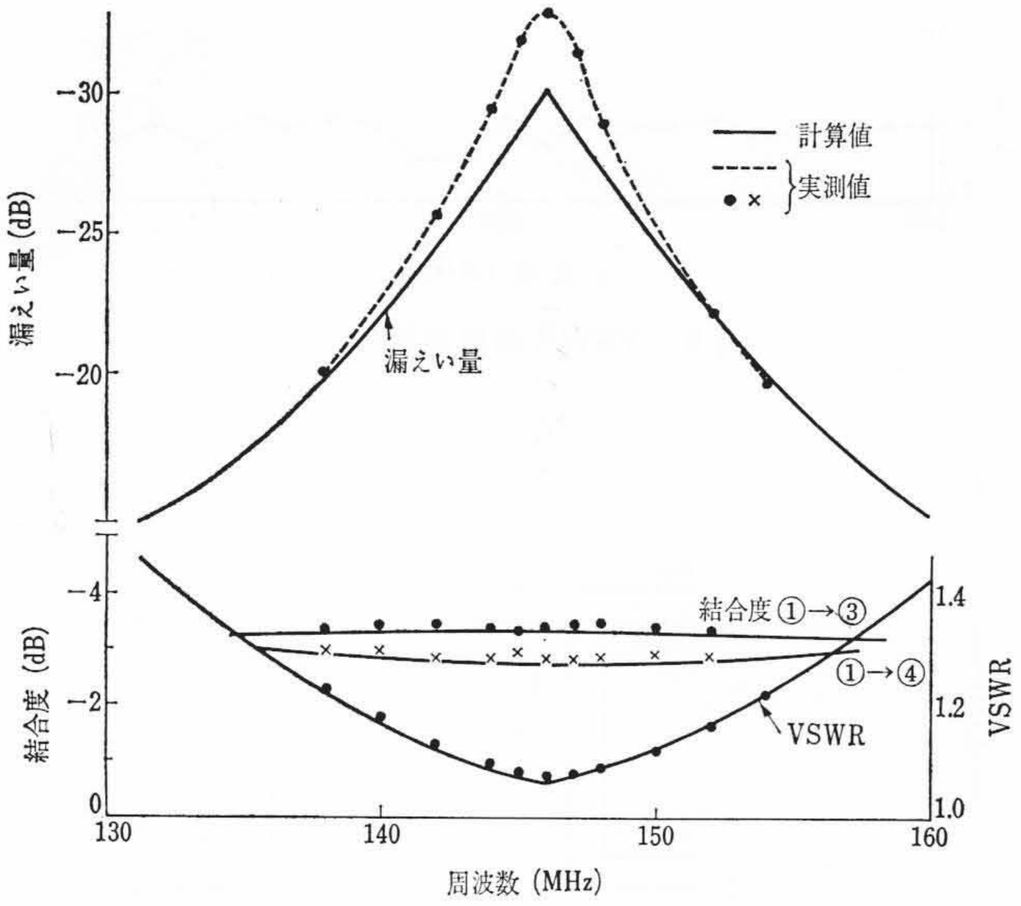

図 11　リング形ハイブリッド回路の特性

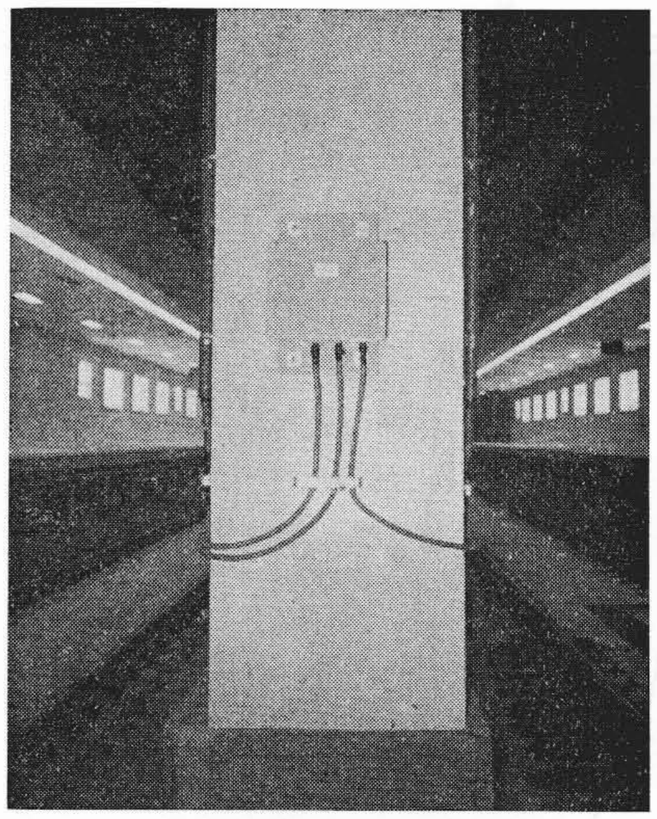

図 12　漏えい同軸ケーブルの分岐

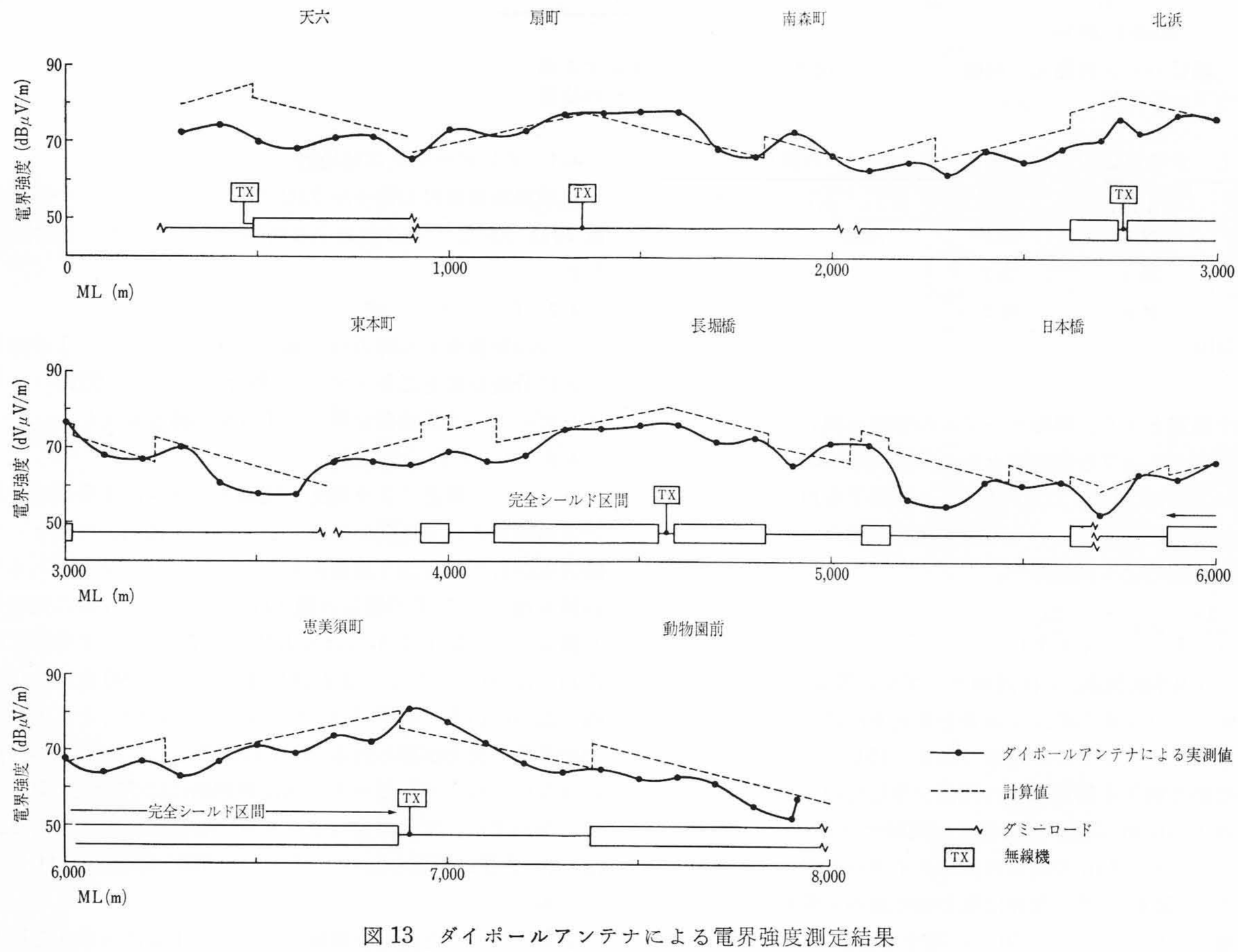

図 13　ダイポールアンテナによる電界強度測定結果

4.4　給電用同軸ケーブル

駅構内にある無線機と漏えい同軸ケーブルを結ぶ給電線として，15Cバロンタフレックス同軸ケーブルを使用した。伝送損失は25 dB/km（f＝150 MHz）である。

5.　トンネル内電界強度

工事完了後にトンネル内電界強度の測定が行なわれた。測定にはダイポールアンテナと実際の車両のアンテナを用いた。

5.1　ダイポールアンテナによる測定

南行線レール中央でダイポールアンテナを用い垂直偏波の測定を行なった。測定は100 m 間隔で行なわれ，1個所では1 m 間隔に5点測定され，それらの平均値から電界強度が求められた。アンテナの高さはレール面より3.3 m であり，周波数145.94 MHz，送信出力4 W である。図13はその結果を示したものである。

5.2　実 車 測 定

電車の屋根上に取り付けられたアンテナは逆L形アンテナで送信用と受信用の2種類あり，利得はほぼ0 dB である。受信アンテナからの入力を電界強度測定器を通してレベル記録計で連続的に記録した。電車の速度は10～25 km/h である。測定は北行線，南行線および天六駅周辺の三つに分けて行なわれた。天六駅周辺は図4に示

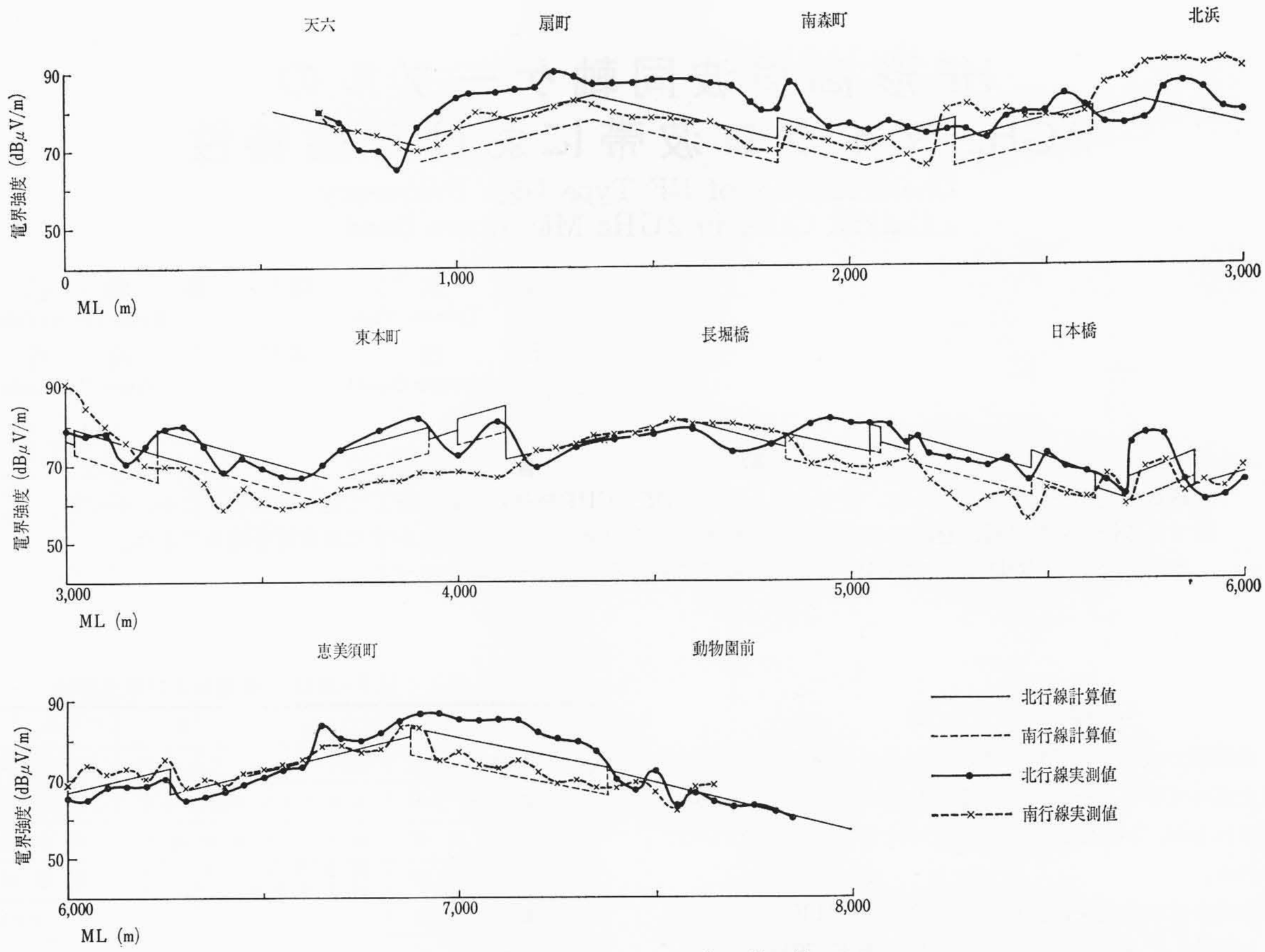

図 14　実　車　測　定　結　果

すように市交と阪急の漏えい同軸ケーブルが平行して架線されている区間と，市交の漏えい同軸ケーブルが中央の引き込み線にはいる区間がある。後者においては阪急線は徐々に高くなって地上に出て行く。その間，上下差が少ない部分では市交の引き込み線と阪急線の間の壁には窓があるため，電波は完全には遮蔽(しゃへい)されない。このような架線状況であるために二つの系統が互いに影響し合うことは避けられず，測定も市交送信および阪急送信の二つの場合について図 1 に示すルートで行なわれた。測定は連続的に行なわれたが，その結果を 50 m 間隔にプロットしたものが図 14, 15 である。

5.3　考　察，検　討

5.3.1　ダイポールアンテナによる測定結果

トンネル内の電界強度を設定するために予備実験を市交 3 号線の四ツ橋と難波元町の間で行なった。その結果をもとにした電界強度の計算値を図 13 に併記した。 実測値は計算よりも下まわる部分があるが，全体的にはかなり近い値になっている。電界強度が部分的に弱くなっている所もあるが，その原因として，1 条架線区間で隔壁が長く南行側に電波が遮蔽されていることが考えられる。

5.3.2　実車測定結果

トンネル内に電車がはいると電界強度が変化する。 図 13 と図 14 より南行線のレベルを比較すると，全体的に実車測定結果のほうがレベルが高くなっていることがわかる。特に扇町駅および北浜駅付近が著しい。これは漏えい同軸ケーブルとアンテナの距離が近くなっているためであると思われる。南行線と北行線のレベル差は 1 条架設区間では比較的大きく，2 条架線区間では全体的にレベル差は小さい。しかし一部干渉などによりレベル差の大きくなっている部分も見受けられる。また完全シールド区間では南行線と北行線が全く独立しているために，レベル差は少なくかつ計算値にきわめて近い値となっている。

測定の途中，1 条架線区間においてすれ違い実験を行なった。

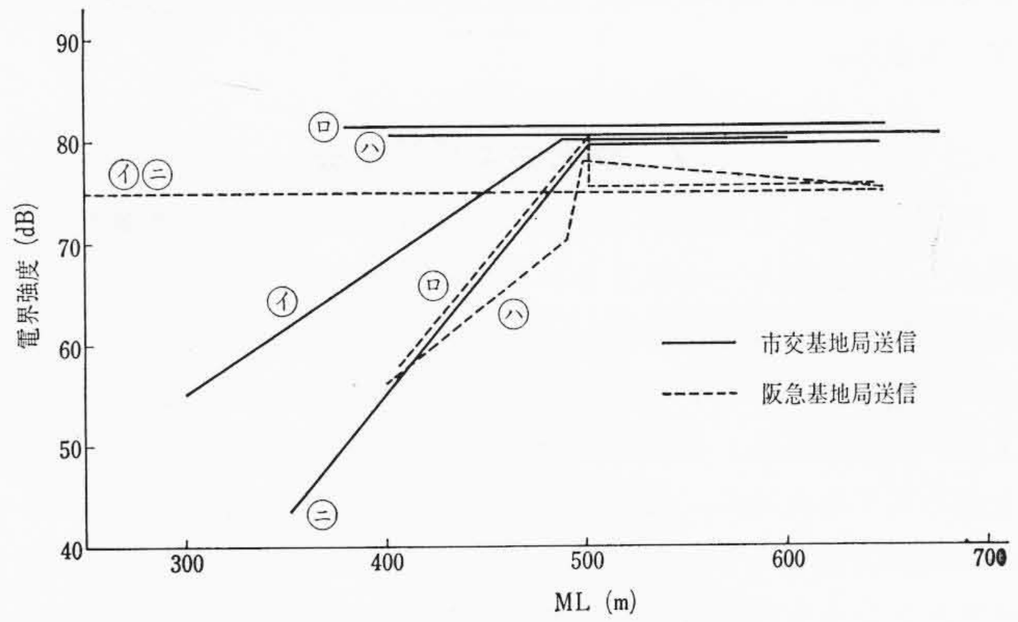

図 15　天六駅周辺の電界強度

その結果，北行線では全く影響はみられず，南行線では約 2 dB 電界強度が増加した。

6.　結　　言

移動体通信に対して多くの長所を備えている漏えい同軸ケーブルが大阪市交通局高速 6 号線に世界にさきがけて採用された。構造が非常に複雑な地下鉄トンネルにもかかわらず，トンネル内電界強度はじゅうぶんに確保され，通信を行なうには全く支障のないことが判明した。

最後に現地測定を行なうにあたり便宜を図っていただいた大阪市交通局のかたがたに厚くお礼申し上げる。

参　考　文　献

(1)　MICROWAVE, 7, 10 (1968-11)
(2)　吉安龍夫：　鉄道通信 20, 2 (昭 44-8)
(3)　御子柴，塗田，岡田：　信学誌，51-B，499 (昭 43-10)
(4)　岡田，大竹：　電気四学会連合大会，1317 (昭 45-4)