

漏えい同軸ケーブル各種応用分野の開発

Application of Leaky Coaxial Cable

Radio communication with travelling vehicles is becoming all the more important from the viewpoint of prevention of accidents, maintenance, service and the like. However, radio communication is not available for vehicles operated in underground areas or tunnels.

LCX (Leaky Coaxial Cable), an improved type of coaxial cable provided with leaky holes, has been developed in an attempt to find a solution to this problem. In this article basic features of this new coaxial cable and some examples of its application to vehicular communications such as railway radio systems, highway radio systems and patrolman radio systems are introduced. Although its use is presently restricted to transmission of voice signals alone this cable is expected to be used for picture signal and data transmission as well.

大西 満* Mitsuru Ohnishi
高橋一雄* Kazuo Takahashi
青木 正* Tadashi Aoki
岡田茂生** Shigeo Okada

1 緒言

VHFまたはUHF帯の列車無線や自動車無線のような、移動体との無線通信は、トンネル内、山と山の谷間、地下道内のような電波伝搬の困難なところでは確実に行なうことがむずかしい。この点を解決する手段として各種アンテナおよび開放形伝送路の検討が進められてきた。なかでも漏えい同軸ケーブルLeaky Coaxial Cable(以下、LCXと略す)は、その特性のコントロールが容易であること、特性が安定していることなどにより、非常に有力な手段であると考えられている。日立電線株式会社においては昭和37年、日本国有鉄道東海道新幹線小田原モデル線区に試験納入したのを皮切りに、山陽新幹線用、在来線長大トンネル通信対策用伝送路としてまた日立運輸東京モノレール株式会社および大阪市交通局にてトンネル内通信用伝送路として開発製造を進めてきた。

これらLCXの基本特性および応用例について述べ、おおかたの参考に供したい。

2 漏えい同軸ケーブルの基本特性

LCXは開放形伝送路の一種であるため、その特性を理解するため、まず開放形伝送路について述べつつLCXの特徴について併記する。

2.1 開放形伝送路

2.1.1 開放形伝送路の種類

信号エネルギーを伝送すると同時にそのエネルギーの一部を自由空間と共有する、換言すればケーブルとアンテナの性質を合わせもつ伝送路は開放形伝送路と呼ばれ、次の3形式に分類される。

(1) 誘導界によるもの

平行2線、開放同軸ケーブルのようにTEM波の伝送路で誘導界が主体となるもの

(2) 表面波界によるもの

Gラインで知られる表面波が主体となるもの

(3) 放射波界によるもの

アンテナの放射波と同様な性質によるものでLCXがこれにあたる⁽¹⁾⁽²⁾。LCXの研究はわが国が最も進んでおり諸外国

からも注目されている。外国における開放形伝送路の実用例としては、アメリカにおける平行2線、ヨーロッパにおける開放同軸の例が知られている。

図1は伝送路中心からの離隔距離と電磁界の強さの関係を示したものであり、それぞれの特徴が理解できる。また、誘導界、表面波界のエネルギーの流れは、伝送エネルギーと同方向であり、伝送路を中心としたある半径内にほとんどのエネルギーが集中している。一方、放射波界はアンテナと同様に放射方向にエネルギーが流れ、これは必ずしも伝送方向と同じでない。これが非常に大きな相違点である。

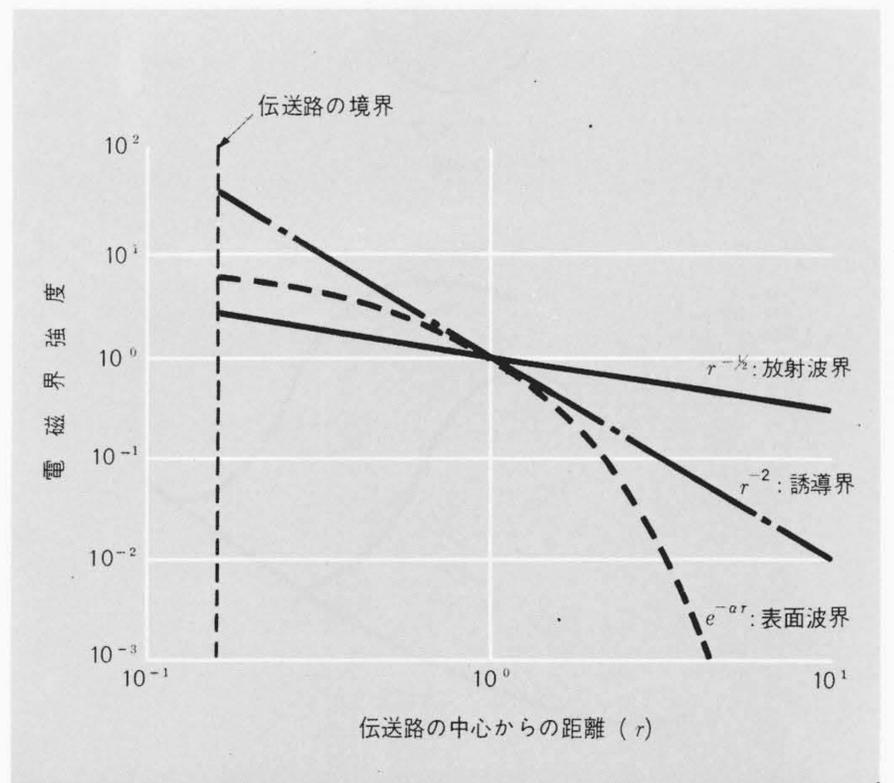


図1 各種開放形伝送路の離隔距離—電磁界強度特性 伝送路中心からの離隔距離 $r=1$ における電磁界強度を1としたときの相対電磁界強度を示すものである。

Fig. 1 Relation between Distance and Field Strength of Open Wire Transmission Line

*日立電線株式会社日高工場

**日立電線株式会社研究所

2.1.2 開放形伝送路の特性

この種の伝送路の特性で特に重要視されるのは、伝送損失と、伝送路からある距離離れた点で標準ダイポールアンテナにどの程度のエネルギーが受信できるかの度合いを示す結合損失である。これらの特性は、伝送路の構造寸法および使用周波数によって異なり要求に応じた設計が行なわれる。

(1) 伝送損失

誘導界または表面波界形式を用いる伝送路は電磁界が伝送路の近辺に集中しているため、大地の影響、水分、塵芥（じんかい）などの付着により伝送損失が大きく変化するが、放射波を利用する形式のもの（LCX）は、伝送路のエネルギーの一部が放射波として伝送路から外部に向かって出て行くので上記のような影響は非常に少なくなる。図2および図3はこの状況を示すものである。

(2) 結合損失

アンテナとの結合損失は図1の伝送路外の電磁界強度で決まり、誘導界および表面波界の場合には、伝送路に近いほうが結合損失も小さくなり安定性もよいので密結合に有利となるが、伝送路からの距離が大きくなると放射波界が有利となる。この相違の一例として図4はLCX結合損失の実測値（最大値、最小値）を示すものである。LCXでは後述するようにスロット間隔によって放射波を発生する周波数帯域が決められ、それより低い周波数帯域では表面波形として働く。したがってLCXにつき広帯域特性を測定することにより、表面波形と放射波形の特性比較ができる。同図より、放射波形伝送路は結合損失が小さく、最大最小の幅も小さいことがわかる。

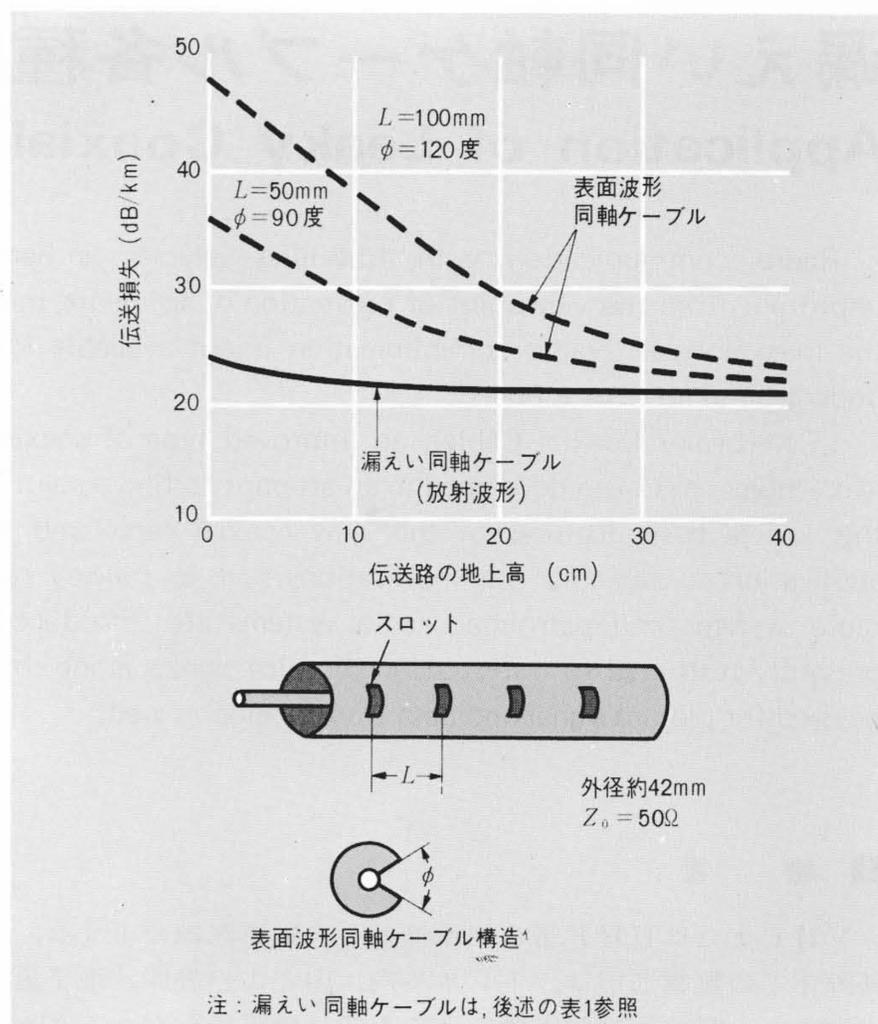


図3 開放形伝送路(同軸ケーブルタイプ)の地上高さによる伝送損失の変化(周波数：450MHz) 放射波形のケーブルでは、地上高さによる伝送損失の変化は少ないことがわかる。

Fig. 3 Transmission Loss of Open Wire Transmission Line (coaxial cable type)

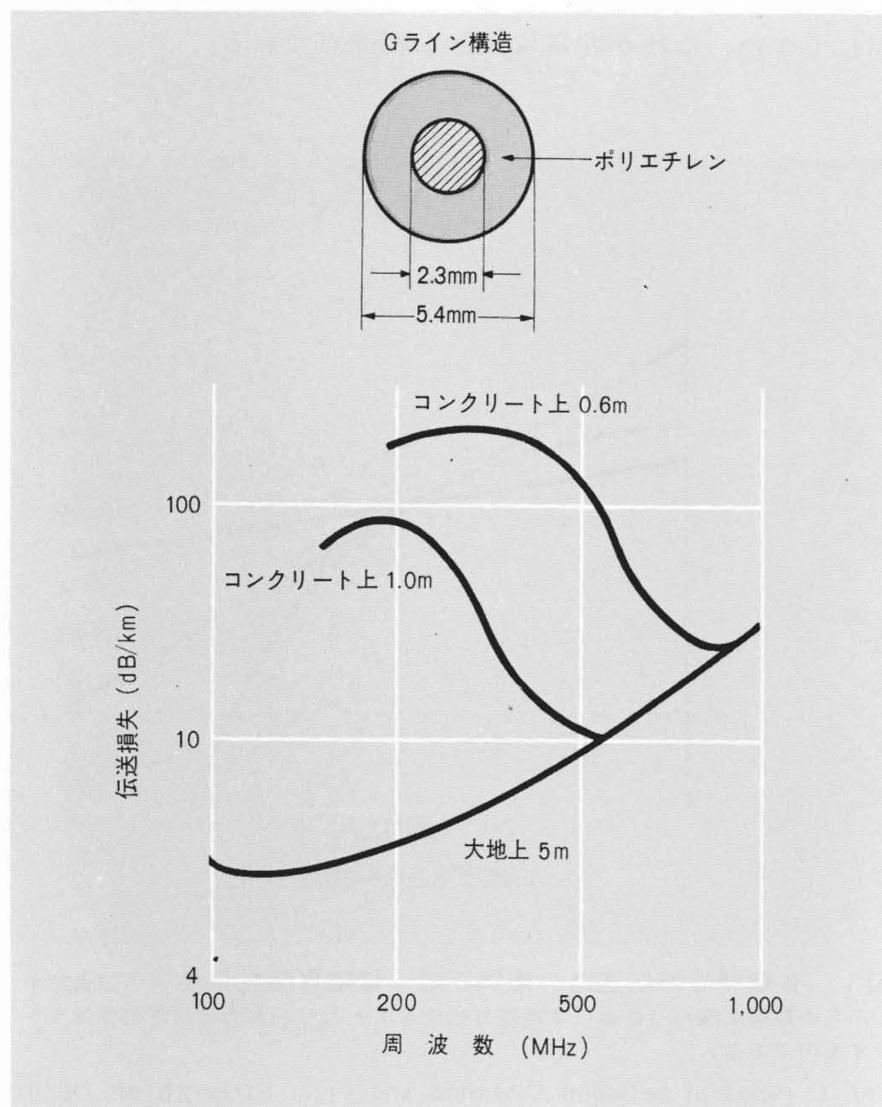


図2 Gラインの伝送損失特性 外径5.4mm程度のGラインは、コンクリート上60cmに布設した場合、VHF帯では実用に供せられないことがわかる。

Fig. 2 Transmission Loss of G-line

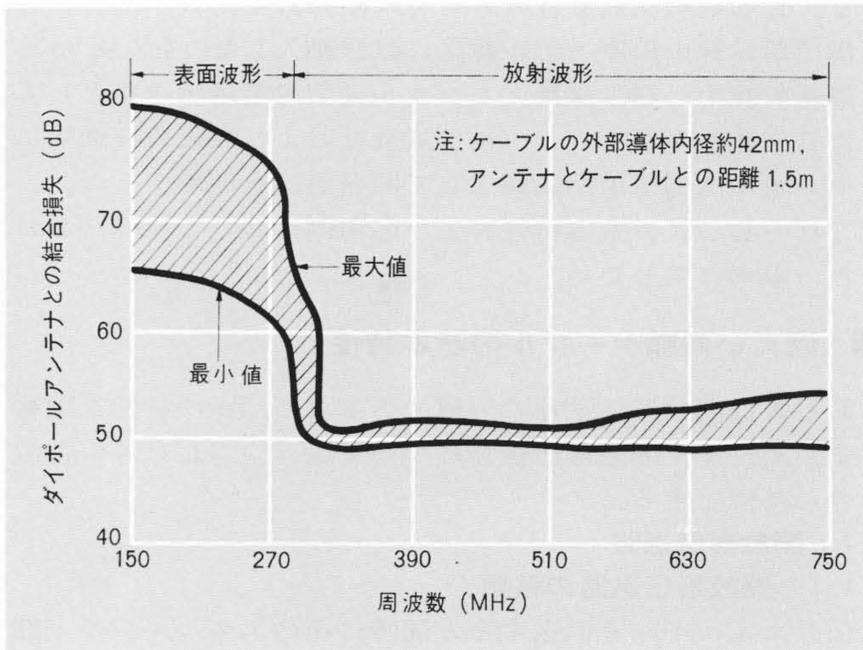


図4 漏えい同軸ケーブルの結合損失周波数特性の一例 表面波形および放射波形ケーブルの結合損失特性が直接比較できる。

Fig. 4 One Example of Coupling Loss-frequency Characteristics of Leaky Coaxial Cable

2.2 漏えい同軸ケーブルの一般特性

2.2.1 放射特性

同軸ケーブルからの放射は、ケーブル外径(D)と使用波長(λ)の比、 D/λ が小さくなるにつれてむずかしくなり、効果的に放射が行なわれないで誘導界としての性質が強くなる。したがってケーブルの選定は使用目的、要求性能および経済性などを勘案して行なう必要がある。

2.2.2 放射方向

LCXは放射を行なうためのスロットが外部導体上に周期(L)で設けられた同軸ケーブルであり、これらのスロットからの放射波が等位相面をなして進む方向が放射方向である。放射方向θとして図5の角度をとるとθは次式で示される。隣接スロット間に位相差のない場合、

$$\cos \theta_m = \frac{\lambda}{\lambda_g} - \frac{m\lambda}{L} = \sqrt{\epsilon} - \frac{m\lambda}{L} \quad (m=0, \pm 1, \pm 2 \dots) \dots (1)$$

隣接スロット間にπの位相差がある場合、

$$\cos \theta_n = \frac{\lambda}{\lambda_g} - (n + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{L} = \sqrt{\epsilon} - (n + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{L} \quad (n=0, \pm 1, \pm 2 \dots) \dots (2)$$

λは自由空間の、またλgは同軸ケーブル内の波長を、εは同軸ケーブルの等価比誘電率を示しており |cos θm| < 1、|cos θn| < 1 が放射波を与える条件となる。これより、放射方向は周波数によって異なることがわかる。

2.2.3 結合損失と伝送損失

効果的な放射を行なっているLCXでは、2.1.2に述べたように大地などの影響による伝送損失の増加は無視できるので、LCXの伝送損失は、一般の同軸としての伝送損失と、スロッ

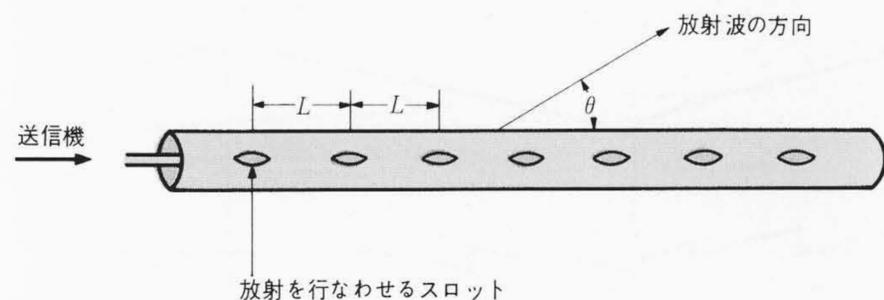


図5 漏えい同軸ケーブルの放射方向 各スロットからの放射波が等位相面をなして進む方向が放射方向である。

Fig. 5 Radiation Direction of Leaky Coaxial Cable

トを設けることによる放射のための損失と、放射をさせるための損失との和と考えることができる。結合損失70dB以上では同軸ケーブルのサイズにあまり関係なく伝送損失の増加は約10%程度であるが、70dB以下になると同軸ケーブルのサイズにより損失増加の程度が大きくなり、細いサイズのものほど不利となる。

3 各種漏えい同軸ケーブル

以上、述べたようにLCXは結合損失のコントロールが容易であり、各種製作が可能であるが、表1および表2に示す構造ならびに特性のものをシリーズ化している。

表2 漏えい同軸ケーブル特性表 結合損失および伝送損失は標準値を示す。

Table 2 Characteristics of Leaky Coaxial Cable

| 種類 | 形式 | 150MHz帯(150MHz) | | 400MHz帯(430MHz) | |
|---------|-------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | | 結合損失 (dB) | 伝送損失 (dB/km) | 結合損失 (dB) | 伝送損失 (dB/km) |
| 42D-LCX | HW-48 | 80 | 12 | 75 | 23 |
| | " 47 | 70 | 12 | 65 | 23 |
| | " 46 | 60 | 13 | 55 | 26 |
| | " -45 | 55 | 15 | 50 | 40 |
| | HN-48 | | | 75 | 23 |
| | " 47 | | | 65 | 23 |
| | " 46 | | | 55 | 26 |
| | " -45 | | | 50 | 36 |
| 33D-LCX | HN-19 | 90 | 15 | | |
| | " 18 | 80 | 15 | | |
| | " 17 | 70 | 18 | | |
| | " -16 | 60 | 20 | | |
| 20D-LCX | HN-19 | 85 | 20 | | |
| | " 18 | 75 | 23 | | |
| | " -17 | 65 | 28 | | |
| 15C-LCX | HN-19 | 90 | 23 | | |
| | " 18 | 80 | 23 | | |
| | " -17 | 70 | 30 | | |

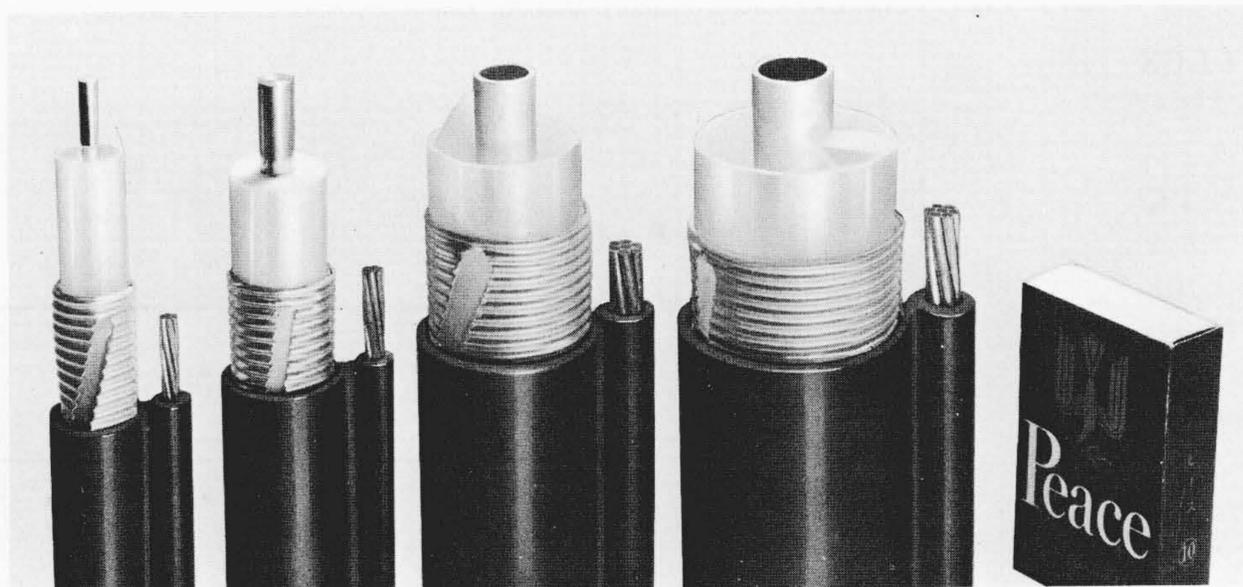


図6 漏えい同軸ケーブル 日立電線株式会社で製造している各種漏えい同軸ケーブルを示す。

Fig. 6 Leaky Coaxial Cable

表1 漏えい同軸ケーブル構造表 外径の異なる4種類の構造、特性インピーダンスは15C-LCXのみ75Ωで、他は50Ωである。

Table 1 Structures of Leaky Coaxial Cable

| 種類 | 中心導体 | 絶縁体 | 外部導体 | ケーブル仕上り (外径mm) | 概算重量 (kg/m) |
|---------|--------|---------------------|-------------|----------------|-------------|
| 42D-LCX | アルミパイプ | PEコルデル+PEチューブ | スロット付アルミテープ | 50 | 1.4 |
| 33D-LCX | アルミパイプ | PEコルデル+PEチューブ | " | 40 | 1.1 |
| 20D-LCX | 軟銅単線 | PEFまたはPEコルデル+PEチューブ | " | 27 | 1.0 |
| 15C-LCX | 軟銅単線 | パロン+PEチューブ | " | 21 | 0.5 |

4 漏えい同軸ケーブル各種応用分野

最近、各地にトンネル、地下道、地下街などの建設が進められているが、VHF、UHF空間波のトンネル内伝搬特性はきわめて悪く、このような波を利用した無線通信を確保することは実際上困難である。したがって列車無線、パトロールカー無線、タクシー無線、パトロールマン無線、ラジオ波の受信などでいずれも問題が起こってくる。この対策としてトンネル内に多くのアンテナを配置して低損失ケーブルにて給電することにより可能であるが、実際に数多くのアンテナを設置することは建設、保守、干渉など電気特性面からも問題が多い。しかし、同軸ケーブルの外部導体にスロットを周期的に設けることにより、ケーブルの長手方向に一様に電波を放射させるLCXの技術が開発され、この問題は一挙に解決された。

ここに数件の使用例につき概要を説明する。

4.1 列車無線システム⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

近年、大量輸送機関としての高速鉄道には激増する旅客および貨物を輸送するために運転保安の確保と高密度、高速度の列車運転の確保が要求されている。この実状に対処するために、列車と運転指令、列車間あるいは列車の前後部連絡用に無線回線を設けることが必要になってきており、トンネル内においても確保されねばならない。山陽新幹線ではLCX方式が実用化されており、全国新幹線網あるいは長大トンネル内通信に大量の使用が計画されている。また地下鉄用としては大阪市交通局高速堺筋線の使用実績がある。

ここでは山陽新幹線におけるLCXシステムの基本設計例について述べる。LCXとしては42Dタイプをトンネル壁面に架設し、前述のような結合損失の異なる4種類のケーブルを逐次、直列に接続することにより、伝送損失によるレベル低下を結合損失の低減により補償し(グレーディング)、列車の受信信号レベルの変動を少なくする設計を行なっている。また標準中継区間長でカバーできないトンネルについてはIF方式のブースタにより通話を確保している。

4.2 自動車無線システム

最近の自動車台数の増加はめざましく、それにつれ高速自動車道路の建設が進められ、自動車トンネルの数は増加し、長大化している。トンネル内を移動している場合、通信がとだえることは防災面、サービス面などから問題となってくる。またラジオ波についても受信不可となるが、

これを可能にすることは、サービス面のみならず、防災面からも有益である。これらの対策としてLCXを使用する方法がクローズアップされ、すでに数個所で実用化されており好結果を得ている。

LCXを用いた自動車トンネル通信システムの実例(首都高速道路公団「八重洲トンネル」)

八重洲トンネルは東京駅八重洲側地下に最近建設された、上り下り4車線より成る長さ約1,500mの自動車専用トンネルであり、途中より分岐出口のある複雑な形状になっている。自動車用LCXシステムをモデル化して示すと図8のようにな

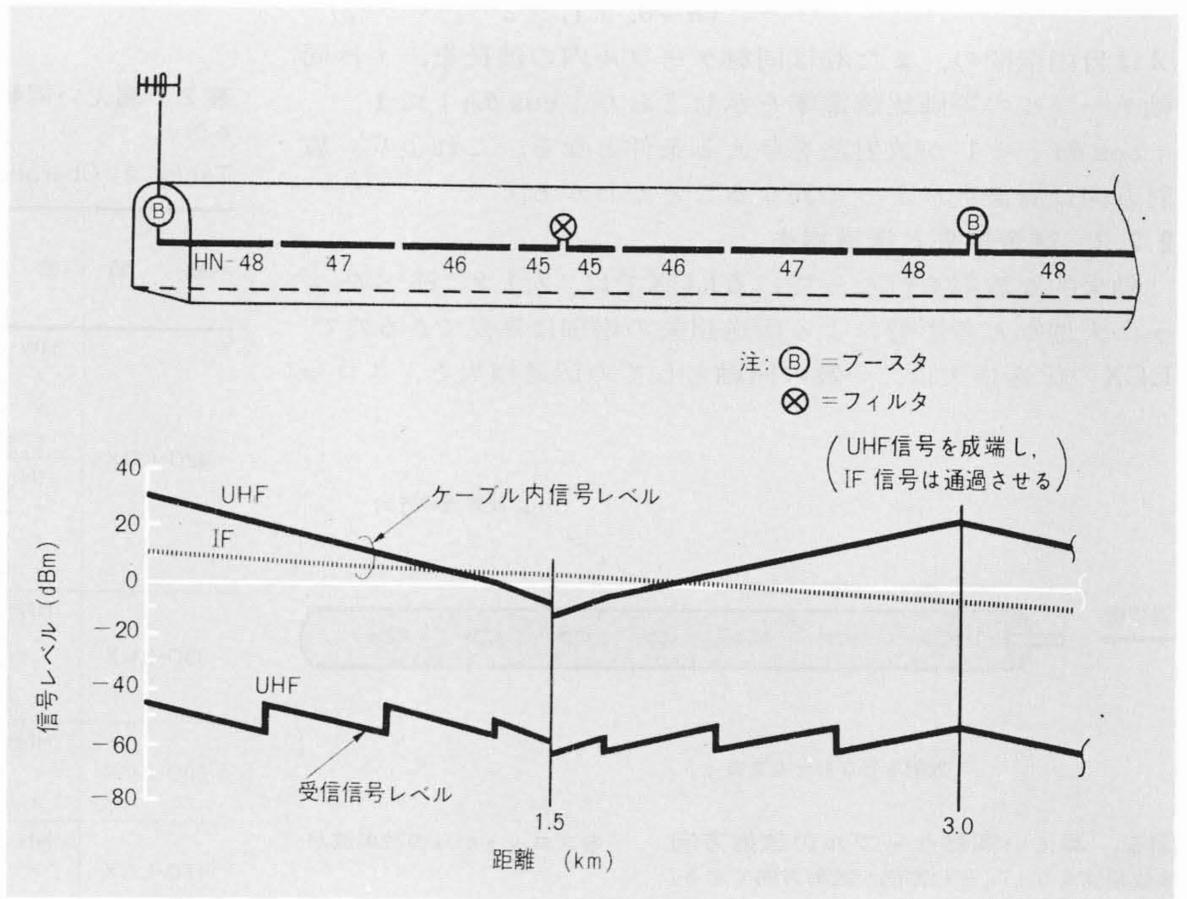


図7 漏えい同軸ケーブルシステム基本設計例 グレーディングを行なうことにより受信信号レベルの変動幅を少なくすることができる。

Fig. 7 One Example of Leaky Coaxial Cable System Graded Design

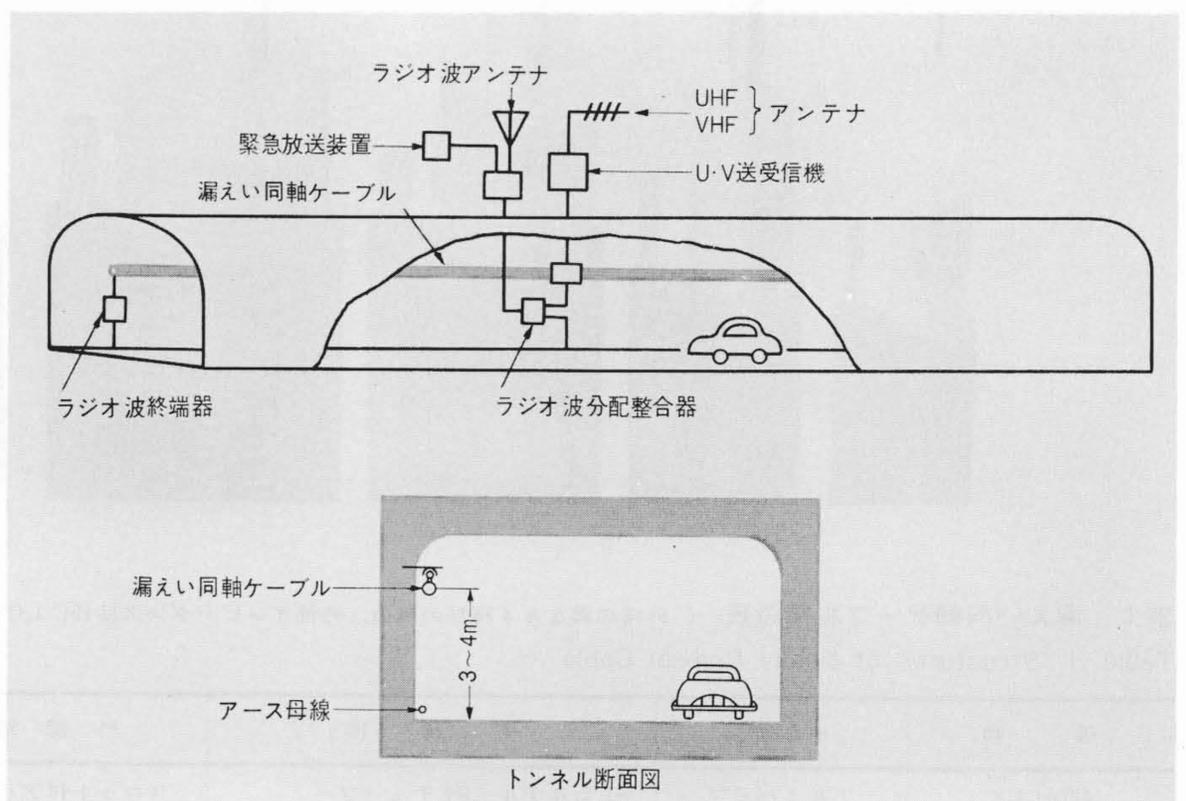


図8 トンネル内漏えい同軸ケーブルシステム トンネル内自動車とのVHF・UHF通信とラジオ波サービスを可能にする漏えい同軸ケーブルシステムを示すものである。

Fig. 8 Leaky Coaxial Cable System for Vehicular Communication in Tunnel

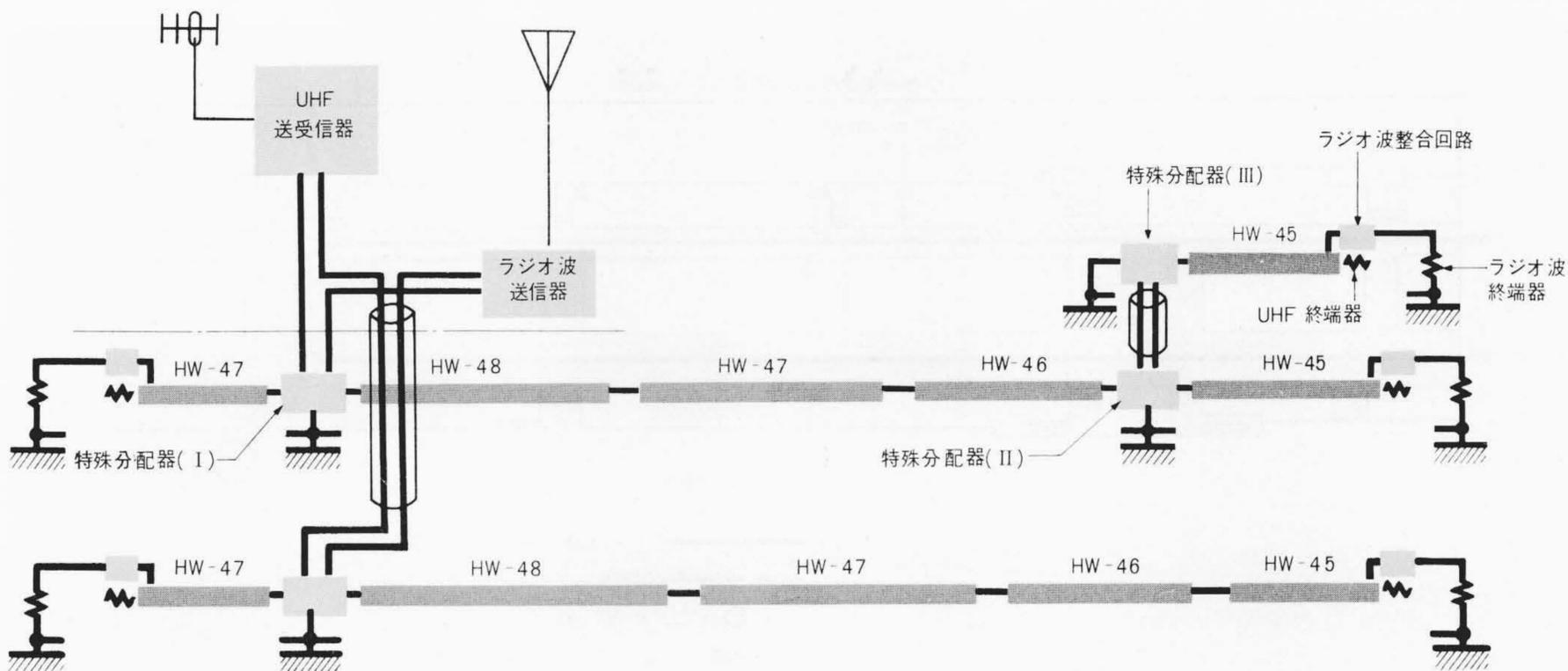


図9 「八重洲トンネル」漏えい同軸ケーブルシステム 42D-LCX 4種類を使用してグレーディングを行ない、またLCX外部導体とアース母線間でラジオ波を伝送する。
Fig. 9 Leaky Coaxial Cable System of YAESU Tunnel

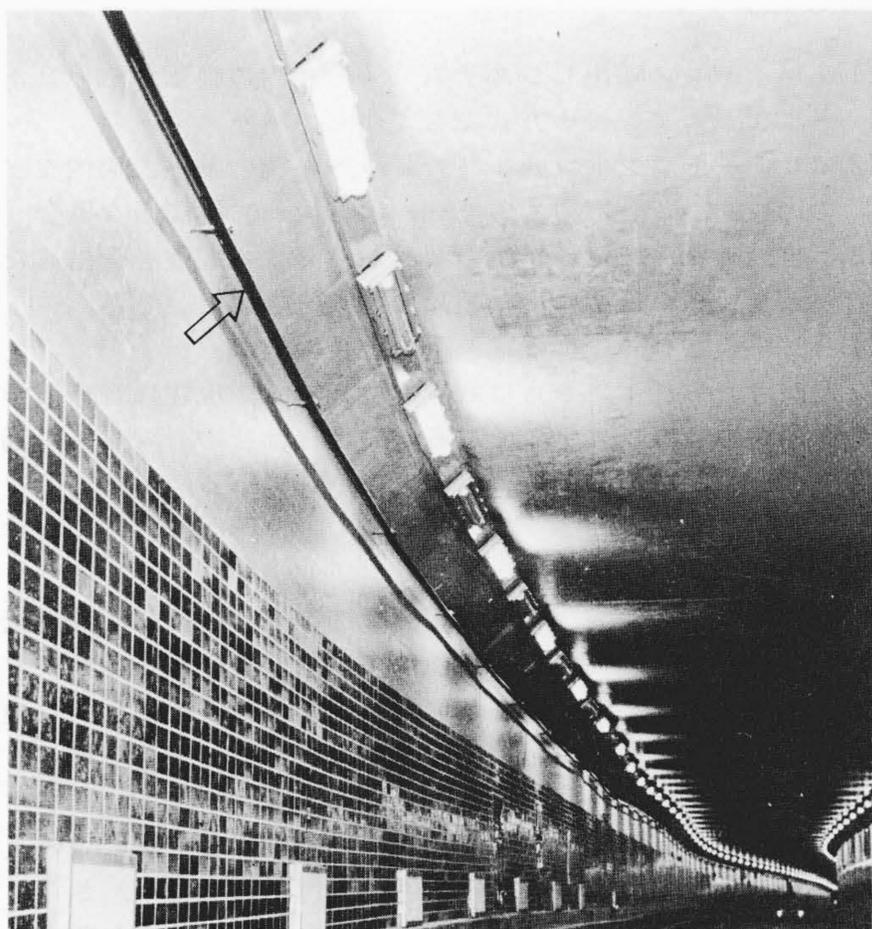


図10 トンネル内に布設された42D-LCX ラジオ波伝送の関係から壁面より若干離れた位置に布設されているのがわかる。
Fig. 10 42D Leaky Coaxial Cable Laid in Tunnel

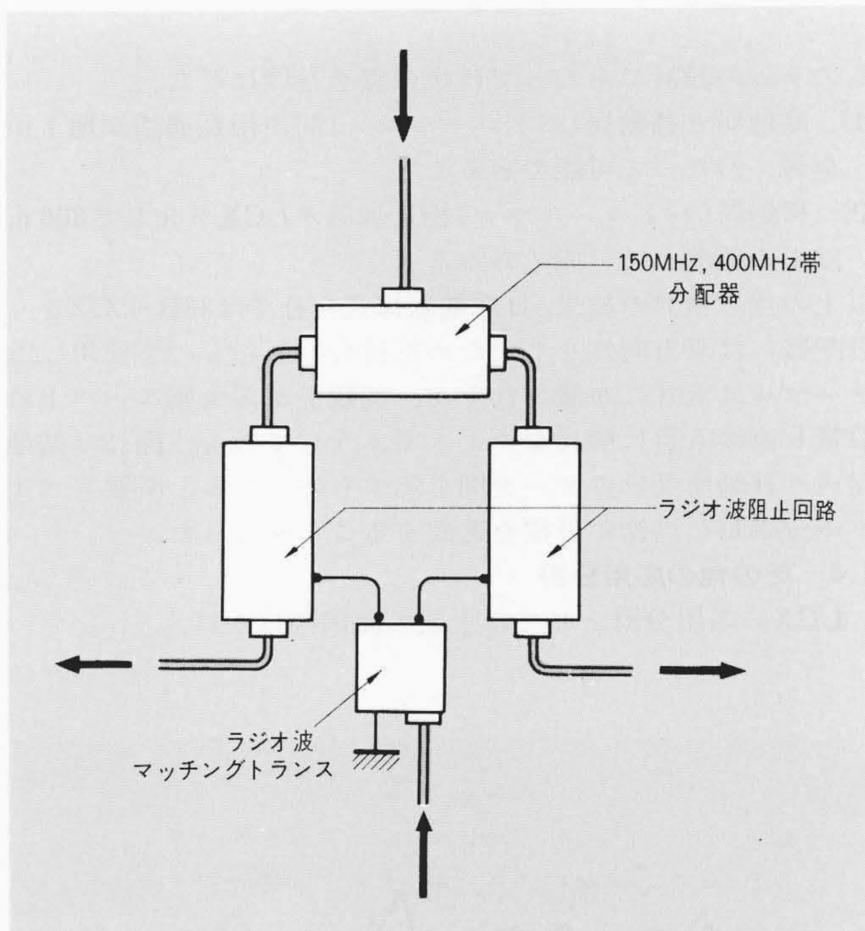


図11 特殊分配器(I) 150MHz帯、400MHz帯、ラジオ波用特殊分配器のブロックダイヤグラムを示すものである。
Fig. 11 Special Distributor

るが、「八重洲トンネル」におけるシステムは図9に示すとおりである。

本LCXシステムでは日立電線株式会社の42D、HWタイプのLCXが使用され、400MHz帯および150MHz帯の電波を伝搬、放射し、自動車と基地相互間の通話を確保し、またLCXの外部導体とアース母線間にてラジオ波を伝送、自動車アンテナに誘導する方式になっている。これら各種機能をもたせるため、150MHz、400MHzの同時分配器、ラジオ波の分配器、

ラジオ波しゃ断器を開発使用した(図11)。

4.3 地下街防災無線システム

最近、各地に大規模な地下街が建設されているが、このような地下街の保安対策や緊急連絡用の通話路として、LCXを用いた移動無線システムが設備されるようになってきた。LCXを用いた地下街防災対策システムの実例(大阪市ミナミ地下街「虹の町」)

図12は上記地下街のLCX布設ルートを示すものである。本

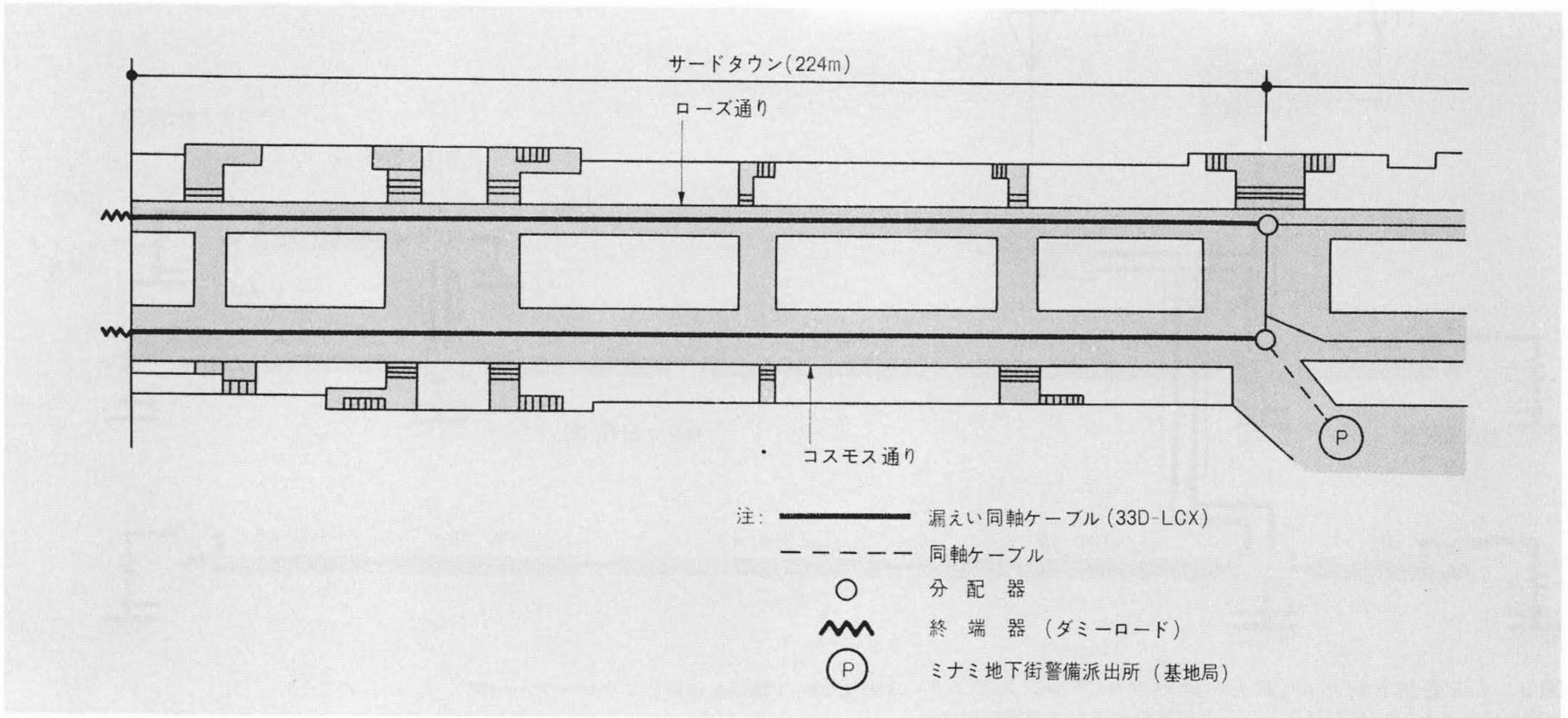


図12 ミナミ地下街漏えい同軸ケーブル布設図 地下街におけるLCXの布設例である。
Fig. 12 Laying Route of Leaky Coaxial Cable at "MINAMI" Underground Town

システムの設計にあたっては次の点を目標にした。

- (1) 基地局と移動局(パトローマン)間の相互通話が地下街全域にわたって可能であること。
- (2) 移動局(パトローマン)相互通話がLCXを介して300 m以上の距離まで可能であること。

以上の点を検討の結果、日立電線株式会社では33D-LCXを、分配器には双方向性をだすため抵抗分配形のものを使用した。ケーブルは天井に布設されたが、美観上から金属ルーバ上に設置し直接人目に触れないようくふうしてある。図13は基地局送り移動局受けのデータ例を示すものである。所要レベルを十分満足し当初の目標を達成することができた。

4.4 その他の応用分野

LCXの応用分野としては上記の諸例のほかに、

- (1) ワイヤレス呼出しシステム ビル内の廊下あるいはホールなどのアンテナ方式でむずかしい場所
- (2) リモートコントロール シャベりの多い工場内などで比較的小さい電力でリモートコントロールするような場合
- (3) 自動計測 流れ作業の製品から発する電波を受信したいとき、または逆にその製品に電波を与えたいとき。
- (4) ビルの陰などによる電波不感地帯の救済などが考えられる。さらに観点を換えれば、現在は音声信号の伝送が中心のシステムであるが、今後は音声のみならず画像、データ伝送用などの利用が期待されている。

5 結 言

わが国の交通機関は近年飛躍的な進歩をとげ、日本経済発展の原動力となっている。それにつれ、安全性およびサービス面その他から、移動体と基地間あるいは移動体相互間の通信網整備は必要欠くことのできないものとなってきている。本論文ではこれら通信の媒体としてLCXの諸特性および応用例について述べたが、LCXの応用は、いわばまだ緒についたばかりであり、今後、広範な応用が期待されており、さらにいっそうの研究開発に努力しなければならないものと考えている。

終わりに臨み、諸応用例を述べるにあたりデータ収集に際してご尽力いただいた関係各位に深謝する。

参考文献

- (1) 御子柴, 塗田, 岡田:「同軸ケーブルからのふく射とその漏れ同軸ケーブルへの応用」 信学誌 51-B, 10, 499 (昭43-10)
- (2) 御子柴, 岡田, 青木:「漏れ同軸ケーブルの近傍界の分布について」 信学誌 54-B, 12, 789 (昭46-12)
- (3) K.Mikoshiba and Y.Nurita: Guided Radiation by Coaxial Cable for Train Wireless Systems in Tunnels, IEEE Trans. on Vehicular Technology, VT-18, 2, 66 (1969-8)
- (4) 吉安, 八田, 岡田, 花岡:「VHF列車無線用漏えい同軸ケーブル」 日立評論 52, 941 (昭45-10)
- (5) 赤川, 高橋:「山陽新幹線通信設備の試験結果」 鉄道通信, 7, (昭47-3)

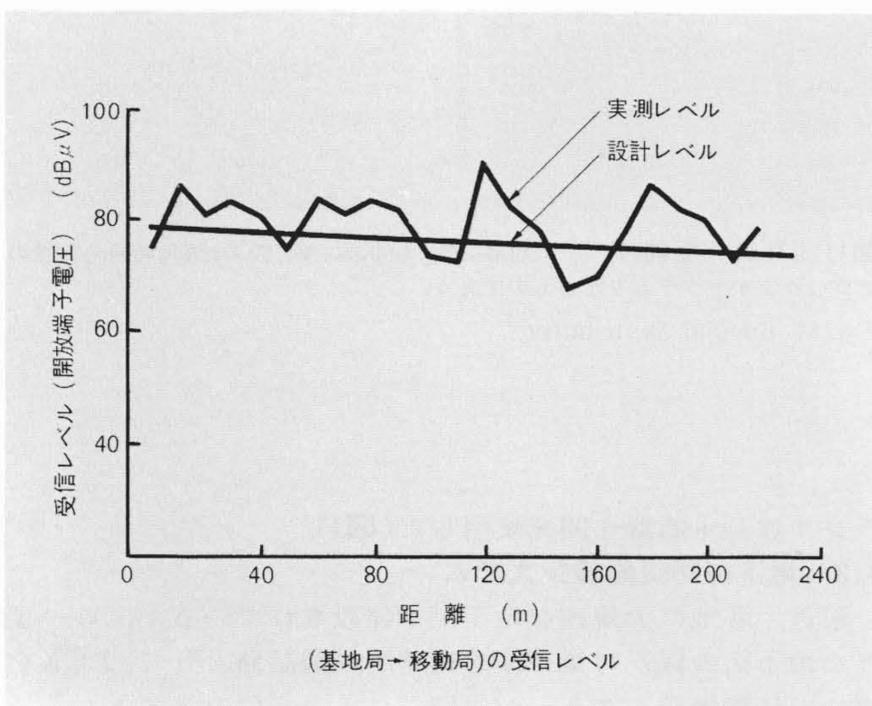


図13 「ミナミ地下街」受信レベル図(実測例) 天井ルーバ上にLCXを布設したが所望の値を満足することができた。
Fig. 13 Measured Example of Receiving Signal Level