漏洩同軸ケーブルの応用

住友電気工業株式会社 中 原 恒 雄

漏洩同軸ケーブルは、同軸ケーブルの外部導体にスロット列をもうけたもので、これに、数十 MHz から数百 MHz の周波数の信号を供給すると、スロットから電磁波が漏れ出て、ケーブルに沿ってその周囲の空間に一定の大きさの電磁界の場ができるので、たとえば、ケーブルと平行して動く移動体と通信するのに都合がよい。本文では、その原理、基本特性を述べ、鉄道における例を紹介し、さらに、画像通信システムへの応用に対する可能性について述べる。

1. ま え が き

一般に、通信システムは、固定局を対象にしたものと移動局を対象にしたものとに分類することができる。移動局を対象にした通信で電磁波の送出方法として従来から用いられているのは、まず、基地局にアンテナを設置し、このアンテナと移動局アンテナの間の空間伝搬を用いる方法である。

しかしながら、この方法は両アンテナの間の距離の変化、さらに地形によって電波伝搬の状況が変わり、電波不到地帯ができる場合もあり、その対策を施す必要があった。

ここでは、上記のアンテナに代わる伝送媒体として考えられた漏洩同軸ケーブルを用いたシステムをとり上げ、その機能、応用例、とくに、画像通信に主眼を置いて述べることにする¹⁾。

2. 漏洩同軸ケーブルの構造²⁾⁻⁵⁾

この漏洩同軸ケーブルを用いた通信システムがとりあげられるようになったのは、移动通信の代表例のひとつである“対列車通信”がトンネル内でとぎれることを防止しようとして、その対策が問題になったからで、それは現東海道新幹線の列車電話システムの計画段階までさかのぼる、いまから 10 余年前のことであった。

当時、対列車情報伝送線路として、種々の形式が検討されたが、その中でも代表的なものは、

- (1) 平行 2 線方式
- (2) 表面波方式
- (3) 漏洩同軸ケーブル方式

であった。いま、これら 3 つの形式について、それら

	対 線 路	同軸ケーブル
TEM モード 表 面 波
漏 洩 波

図 1 (a) 開放形線路の構造例

(注) TEM モード：平行 2 線を用いた伝送方式

図 1 (b) 線路断面内におけるフィールド強度分布

の構造ならびに線路軸に直角な面内におけるレベル変化を示すと図 1 のようになる。同図から明らかなように、線路からの距離とともに界の大きさは小さくなるが、これを界の集中度という点からみると、

- (a) 表面波線路
- (b) 平行 2 線線路
- (c) 漏洩同軸ケーブル

の順となり、(c)が一番広がっていることがわかる。したがって、ケーブルまたは線路に沿う比較的幅の広い(たとえば 10 m 幅)領域内で通信を行なおうとする場合は(c)を用いなければならない。しかし(a)および(b)は線路に近接した領域(たとえば 0.1 m 程度)で通信を行なおうとする場合に適するといえる。また、ケーブルまたは線路表面の汚損に対する伝送損失の増加度という立場から考えると、図 1 の同軸ケーブル方式のほうが対

“Extensive Applications of Leaky Coaxial Cable” by Tsuneo Nakahara (Sumitomo Electric Industries, Ltd., Yokohama)

図2 ジグザグスロット漏洩同軸ケーブル

図3 二重同期構造スロット配列

線路方式より少なく有利といえる。

図2に、山陽新幹線において使用されているケーブルの構造を示している⁴⁾。

図示されているように、その構造は同軸ケーブルの外部導体に、電磁波を漏れさせるためのスロットを周期的に設けたものである。

さらに、後述するように、使用周波数帯域幅を広くする目的で、図3のような配列も考えられている⁵⁾。これは図2と比較すると明らかにように、3つのスロットを1つのグループとして、周期 $p=4p_0$ でジグザグに配置したという構造である。

3. 漏洩同軸ケーブルの基礎特性

本章では、漏洩特性、伝送線路としての特性などについて概説する。

3.1 スロット配列と使用周波数帯域幅の関係

漏洩特性はスロット配列から決まる。図2はその代表的な配列方法のひとつであり、図3は他の代表的なひとつを示している⁵⁾。図2の配列方法の場合、漏洩同軸ケーブルとして使用できる周波数帯域は、つぎの式で与えられる。

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\nu} + 1 \right) < \frac{\lambda}{p} < \left(\frac{1}{\nu} + 1 \right) \quad (1)$$

λ : 自由空間波長, p : スロット配列周期

ν : ケーブルの波長短縮率

上式で与えられる領域で存在する漏洩電磁界は E_ϕ 成分を有するものである。

また、図3の配列方法の場合には、

$$\left(\frac{1}{\nu} - 1 \right) < \frac{\lambda}{p} < \left(\frac{1}{\nu} + 1 \right) \quad (2)$$

となる。

(1), (2) 式において、 $\lambda/p > \{ (1/\nu) + 1 \}$ を満足する

場合には放射が発生しない。一方、使用周波数帯域の上下限比を比較すると $\nu > 1/3$ の場合、図3のほうが大きく、これは図3のスロット配列によって使用周波数帯域幅が拡大されたことを意味している。以下においては、図2の形態について記述する。

3.2 スロットの寸法と結合損失の関係²⁾

漏洩同軸ケーブルの付近にアンテナをおくと、ケーブルから漏れた電磁波をアンテナで受信することができる。すなわち、漏洩同軸ケーブルとアンテナの間に結合が生じることになる。そこで、この結合における損失を結合損失という言葉で表現し、かつ結合損失の量を、ケーブルから 1.5m 離れた点に置かれた半波長標準ダイポールで受信される電力とケーブル伝送電力の比で定義する。

図4は、図2における、 θ , l と結合損失の関係を示している。

3.3 結合損失の周波数特性^{2)~5)}

図5は、400 MHz 帯を対象にしたケーブルの結合損失の周波数特性を示している。図において、4本のグラフはそれぞれ結合損失の異なる4種類のケーブルについて周波数特性を示している。これは、スロットの長さ、傾斜角を変えることによって得られたものである²⁾³⁾。これからわかるように、漏洩同軸ケーブルの結合損失の周波数特性はきわめて均一良好で、広帯域通信への適用

図4 スロットの寸法と結合損失の関係

アンテナ: 標準ダイポールアンテナ,
アンテナ・ケーブル間 1.5m

図5 結合損失の周波数特性

図 6 伝送損失の周波数特性

図 7 漏洩同軸ケーブルとアンテナ間距離の変化による結合レベル変化

に便利となっている。

3.4 伝送損失の周波数特性^{2)~4)}

上記の結合損失の異なる 4 種類のケーブルに対して伝送損失の周波数特性を図 6 に示す。図には、漏洩を発生しない低周波数帯における値も並記してある。図から明らかなように、漏洩の発生しない領域では、漏洩領域において定義された結合損失の値に関係なく、ほぼ同一の伝送損失となっている。

すなわち、このケーブルは周波数によって、あるいは空間へ電波を漏らし、あるいは低損失の伝送線路となるという二重性をもっており、後述するようにこの二重性をたくみに利用すれば、面白い通信システムを作りあげることができるのである。

3.5 ケーブルとアンテナの間隔と結合損失の関係⁴⁾

漏洩を発生する成分は、円筒波として伝搬し、断面内の振幅関数は $1/\sqrt{r}$ に比例する形で与えられる。図 7 は断面内の振幅変化を示している。

3.6 漏洩同軸ケーブルの断面内指向性

図 8 は、漏洩同軸ケーブルの断面内指向性の一例を示している。450 MHz において、図 2 に示された構造に対して前後部比は約 3 dB であり、指向性はほぼ円形ということになる。このことは、ケーブル自体の遮蔽効果は、ほとんど無視できることを意味している。この理由

図 8 450 MHz における断面内放射パターン

は、ケーブル断面寸法が波長にくらべて充分小さいため、回折現象が大きく現われているからである。

3.7 各種寸法の漏洩同軸ケーブルの特性一覧

以上の特性説明は、図 2 に示されたように外部導体径 43 mmφ (外径約 50 mmφ) のケーブルについてなされたが、ここで各種寸法のケーブルの代表的な特性をまとめることにする。一般にケーブルの断面寸法が小さくなればなるほど、伝送損失および、結合損失が大きくなる。伝送損失が大きくなる理由は、スロットの大きさがケーブル寸法により制限されるためである。

表 1 は、各種寸法のケーブルの諸特性を示している。

表 1 各種寸法の漏洩同軸ケーブルの諸特性

ケーブル断面寸法	VSWR	VHF 帯		UHF 帯	
		結合損失 (dB)	伝送損失 (dB/km)	結合損失 (dB)	伝送損失 (dB/km)
外径 50 mmφ	1.3 以下	55 以上	14 以下	50 以上	36 以下
外径 40 mmφ	1.3 以下	60 以上	22 以下	55 以上	40 以下
外径 26 mmφ	1.3 以下	65 以上	30 以下	60 以上	57 以下
外径 16 mmφ	1.3 以下	80 以上	45 以下	75 以上	80 以下

表 1 に記された結合損失および伝送損失は、VHF 帯の代表周波数 150 MHz、UHF 帯の代表周波数 430 MHz における値である。

4. 漏洩同軸ケーブルの応用

以上の基礎特性をもとにして、漏洩同軸ケーブルの応用について、すでに実用化されている新幹線のトンネル内対策システムを例にあげて総括的な説明を行ない、これの発展的応用として画像通信システムへの応用について述べることにする。

上述のように、漏洩同軸ケーブルは、アレイアンテナと、そのアンテナエレメントであるスロットに対する給電線をも兼ねそなえた、いわゆる “wired wireless transmission line” といえ、その応用も興味深いものが多い。

図 9 漏洩同軸ケーブル中継方式の代表例
(IF, RF 変換中継方式)

4.1 鉄道におけるトンネル内対策システム³⁾⁶⁾

現在、移動無線用として使用を許可されている周波数は、150 MHz 帯および 400 MHz 帯である。これらの電磁波が直径 5 m 程度のトンネル内にそのまま入ると、これを伝送する電波は減衰をうけるが、その減衰定数は 150 MHz 帯で 400 dB/km、400 MHz 帯で 100 dB/km 程度となる。ところが新幹線のトンネルは直径約 10 m であるが、列車が侵入すると、車体が約 1/2 占有することになり、そのうえ、列車がすれ違うときには空間はさらに小さくなって、減衰が増加する。そこで、漏洩同軸ケーブルを使用してはとの考えが生まれたわけである。

図 9 は、新幹線におけるトンネル内対策システムの代表的な部分を示している。基地局から列車に対して送られる音声情報は 450 MHz 付近の周波数で PM 変調されており、トンネル外のアンテナがこの電磁波を受けると、中継器 A は同じ 450 MHz 付近の信号 (RF) と、15 MHz 付近の信号 (IF) を作り出し、ケーブルに送出する。450 MHz 帯信号はスロットから漏れて、対列車通信を行なうのに使用されるが、15 MHz 帯の IF 信号は、(1) 式の領域外で $\lambda/p < \{1/\nu + 1\}$ となり漏洩を生じることなく低損失でつぎの中継器 B までに伝送し、中継器 B によってその一部を 450 MHz 帯信号に変換し、前後方に分配給電する。残りの IF 信号はさらにつぎの中継器まで伝送され、同様のくり返しで中継を行なう。

このような中継方式は IF・RF 変換中継方式と呼ばれており、(1) 中継間隔が大きくなる、(2) S/N 比が向上する、などの特徴がある。列車から基地局へ送信する場合 ($f_{RF}=410$ MHz 付近、 $f_{IF}=25$ MHz) も同様である。なお、図 9 において、記号ⓐは左右からきた RF 信号を抵抗で終端し、IF 信号を通過させるフィルターを

意味する。また、対列車情報伝送において、列車受信機に入る無線周波数帯のレベル変化をできるだけ小さくしたほうが回線品質が向上するため、前述したような結合損失の異なる 4 種類のケーブルを使用し、伝送損失によるレベル低下を結合損失の減少によって補償する形 (graded design) をとっている。

すなわち、図 9 において、ケーブル a, b, c, d による受信レベルをそれぞれ a' b' c' d' で表わすと、まず、ケーブル a による RF 信号の受信レベルは、ケーブルの伝送損失によってケーブル軸方向に減衰し、あらかじめ決められた量 GdB (図では 10 dB) だけレベル低下すると、つぎに結合損失がケーブル a より GdB 小さいケーブル b を接続する。このケーブルにより受信レベル b' はケーブル a で発生した減衰を補償し、ケーブル a の始端レベルと同一となる。以下同様のくりかえしにより、受信レベルの変化の幅を GdB に押えることが可能である。

連続的に減衰量を補償していくよう結合損失を連続変化させて綿密に設計すれば $G=0$ とすることも可能である。このようなレベル設計の方法を graded design と呼んでいる。

以上の説明で明らかなように、新幹線のトンネル対策システムは漏洩同軸ケーブルの特性を有効に利用したシステムといえる。すなわち、

- (1) 漏洩を生じる領域を対移動局に、漏洩を生じない領域を対固定局通信に使用していること。
- (2) 結合損失が制御できることを利用して、移動局受信レベル変動幅を小さくしていること。

である。漏洩同軸ケーブルと新幹線車両のアンテナとの間の結合レベルの実測値を図 10 に示す。

なお、図 10 の中でレベル変化がのこぎり歯状になっているのが上記の graded design によるものである。

4.2 画像通信システム

現在実用化されている画像通信システムは、大きく分類して、親局から多くの子局へ画像を伝送する放送形態のシステムと、工業用テレビに多く見られるように多くの子局 (ITV カメラ) から親局 (監視制御センター) へ画像を伝送する形態のシステムの 2 種類となる。この場

図 10 新幹線車両に取り付けられたアンテナと漏洩同軸ケーブルとその間の結合レベルの実測値
(アンテナ: 標準ダイポールアンテナ)

図 11 ビル内における漏洩同軸ケーブルおよびアンテナによる伝搬試験結果
(b), (b') で漏洩同軸ケーブルでは差がでてこない)

合、使用されている伝送媒体は、アンテナを用いた空間波方式、または親局と子局を同軸ケーブルや対ケーブルで結合した有線方式の 2 種類であり、これらの伝送媒体はつぎのような場合に問題になるものと思われる。

(1) 空間波方式の問題

トンネル、ビル内、地下街などで電磁波の空間伝搬に支障を与えるような地域で使用する場合 (図 11 はビル内における空間波の伝搬状態の実測値を示している⁸⁾)。

(2) 有線方式の問題

子局が自由自在に移動しなければならない移動局である場合。

一方、漏洩同軸ケーブルはその特性上

(a) ケーブルに沿う帯状もしくは管状空間の中における無線通信

(b) レベル変動の少ないことが要求される移動通信 (graded design の適用)

に適することを考慮すると、このケーブルは

① 鉄道、ハイウェイなどを走行する移動局を対象と

した帯状領域における画像通信システム

② ビル、地下街、トンネル内における移動局を対象にした画像通信システム

に適用可能であるといえる。

(1) 親局から移動局への画像通信

これは同一の画像を一斉に伝送する放送形態のもの (たとえば CATV システム、ハイウェイを走行する車に対する道路情報サービス、列車内乗客に対する各種情報サービス) と、親局が多くの移動局の中から特定の局を選択して画像を伝送するもの (たとえば、列車の運転手に対する前方障害物の情報伝送) に分類することができる。とくに後者の場合、移動局を選択制御するためのデータ伝送系を併用する必要があり、システムの系統図をかくと 図 12 のようになる。

(2) 移動局から親局への画像通信

これは、双方向画像伝送システムの上り方向回線、あるいは防災システム、工業計測管理システムにおけるプロセス監視用カメラの情報伝送などに適用されるものと

図 12 画像の選択伝送システム

図 13 移動局からの画像伝送システム

考えられる。この場合、移動局の数が多くなると、周波数分割方式による伝送を用いると周波数帯域幅が広くなり、機器のコスト高が問題となろう。したがって、むしろ、選択制御データ伝送回線と併用して、画像伝送回線は共通にしたほうが適切と思われ、図 13 のようなシステム構成となろう。

(3) 画像通信システムへの応用として考えた場合の漏洩同軸ケーブルの評価

(a) 収容チャネル数 先に述べたように、漏洩同軸ケーブルの周波数特性はきわめて平坦であり、スロットの配列方式、設計中心周波数に応じて 50~500MHz の使用可能帯域幅を実用上問題なく確保することができる。すなわち、画像 1 チャネルの占有帯域幅を、たとえば 10 MHz と仮定すると、実用最多チャネル数として 50 チャネルの伝送が可能であるということになる。

(b) 電波法規上の問題と対策 図 7 が示しているように、漏洩同軸ケーブルの自由空間内における断面内電界強度分布は $1/\sqrt{r}$ に比例する形であるため、電波使用免許を受けずに屋外で画像伝送に適用することは実用上大きな問題がある。すなわち、電波法規によると、無免許で使用できる電界強度は、送信点から 100m 離れた点で $15 \mu\text{V/m}$ 以下でなければならないから、画像伝送が可能な範囲は、ケーブルの直近のみであるということになる。

したがって、電波遮蔽物のない屋外で、上記の電界強度の限界内で適用する場合は、図 14 のようなシステム構成を行なう必要があろう。図 14 における結合器は、ケーブル表面に接触させ、またはケーブル直近に置いて信号の授受を行なうためのものである。

図14 密結合画像伝送方式

なお、図 14 の場合、図 1 に示した表面波または TEM 方式の線路でも同様に使用可能である。

5. 漏洩同軸ケーブルの将来性

3 章においても述べたように、漏洩同軸ケーブルは、使用周波数帯について見た場合、漏洩を生じる領域と漏洩の生じない領域に分けることができる。この特性に応用した簡単なシステムが新幹線における列車の無線トンネル内対策であるが、これをさらに発展せしめて、漏洩を生じない領域を固定局間の通信に、漏洩を生じる領域を対移動局通信に周波数配列することにより、1 本のケーブルで固定通信と移動通信を共用することができる。また、図 2 に示された漏洩同軸ケーブルのパイプ状中心導体の内部に別の同軸ケーブル、対ケーブルなどを挿入して固定局通信用に使用しようとする、複合漏洩同軸ケーブルも検討されている。上記のような考え方から新幹線では今後トンネルの有無にかかわらず、移動通信媒体として連続的な漏洩同軸ケーブルの使用も計画されている。このような応用例として高速道路における自動車通信システムも将来でてくるものと思われる。

図 15 (a) 総合通信システム構成例

図 15 (b) 周波数配列の一例

これらの特性を利用して、将来システムの構成の一例を図で示すと図15(a)のようになる。図15(b)はこの場合の周波数配列の一例を示している。図15(a)は今後急増する地下街、密集ビル地域のビル内などで実用化がすすむものと考えられる。また防犯・防災用通信系、テレビ難視対策なども可能なのでCATVの代替システムとしての応用も将来期待されよう。

6. む す び

本文においては、漏洩同軸ケーブルの基礎的特性およびその応用例について概括的に述べた。このケーブルは、現在、音声伝送用媒体としての本格的実用化が始まった段階と考えられ、今後、その機能を生かした種々の応用が上述のシステム例をもとに行なわれ、音声、画像、データなどの多種の情報伝送用として、また対移

動局、対固定局通信を含めた総合通信網の中の伝送媒体として使用されることになろう。

(昭和48年1月5日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 吉田：漏れ同軸ケーブルを用いた各種の新しい通信システムについて、信学誌，55，5（1972）655-663
- 2) 中原ほか：漏洩同軸ケーブルの諸特性，信学会マイクロ波研資（1969，9）
- 3) T. Nagao, et al: Leaky coaxial cable with slot array, IEEE Symposium on Antenna and Propagation (Sept. 1968).
- 4) 夜久ほか：漏洩同軸ケーブル回線の構成法，第7回 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム（昭45，12）p. 348
- 5) 倉内ほか：広帯域漏れ同軸ケーブル，信学論，54-B，10（1971）682
- 6) 夜久ほか：漏洩同軸ケーブルの鉄道通信への応用，第8回 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム（昭46，9）p. 408
- 7) T. Nakahara, et al: Extensive application of leaky cables Sumitomo Electric Technical Review, 15, Aug. (1971).
- 8) 倉内ほか：開放型線路とその応用，信学会通信方式研資（1970，10）

— 今月の表紙 —

単管式カラービジコン H 8374

株式会社 日立製作所

〒100 東京都千代田区大手町2丁目6番2号（日本ビル）
電子事業本部 電話（03）270-2111（大代）

H8374 は、単一撮像管式カラーテレビカメラ用に開発した新しいビジコンです。これまでのビジコンと異なり、光導電面の直前に赤反射と青反射の2群からなる微細なストライプ状の色分解フィルターをならべた面板をもっています。その他の構造は8816と同様、1インチ・セパレートメッシュ・複合集束・電磁偏向です。

性能は高解像度で、出力信号の均一性にすぐれているため、良好な画質が得られます。

教育用・工業用・医療用・CCTV 用などのカラーテレビ撮影に最適で、小形、軽量、取扱いの簡単なカラーカメラの製作ができます。