

ギガヘルツ対応広帯域漏洩同軸ケーブル (WBLCX™)

メタルケーブル事業部 高野一彦¹・石井伸直¹・鈴木文生²・小川幸三³
光ファイバケーブルシステム事業部 御園信行⁴

Wide-band Leaky Coaxial Cable (WBLCX™) Used in Gigahertz Band

K. Takano, N. Ishii, F. Suzuki, K. Ogawa & N. Misono

周波数0.8～2.6GHzで使用されている携帯電話、PHS、無線LAN、モバイル放送用の送受信アンテナとして使用可能な2種類のギガヘルツ対応広帯域漏洩同軸ケーブル (Wide-band Leaky Coaxial Cable, 以下WBLCX™と略す.)を開発した。布設時の取扱い性を重視した外径18mmの細径WBLCXでは、周波数2.6GHzにおいて、結合損失59dB、減衰量14.5dB/100m、また、長距離での使用を可能とした外径29mmの低損失WBLCXでは、結合損失58dB、減衰量9.5dB/100mの優れた性能を得た。これらのWBLCXは、障害物の多い空間や狭く曲がりくねった空間など、電磁波の伝搬しにくい環境に特に有用である。

We have developed two types of Wide-band Leaky Coaxial Cable (WBLCX™) which can be used as an antenna for mobile phone, wireless LAN and satellite broadcasting in the wide frequency range from 0.8 to 2.6GHz. The small-sized WBLCX with 18mm in diameter enabling easy handling at installation has a coupling loss of 59dB and attenuation of 14.5dB/100m at 2.6GHz. And the large-sized WBLCX with 29mm in diameter aiming low attenuation has a coupling loss of 58dB and attenuation of 9.5dB/100m at 2.6GHz. These cables are suitable to use in an area placing many conductive obstacles and in narrow space which is hard to propagate electromagnetic wave.

1. ま え が き

携帯電話や無線LANに代表される無線通信システムは、いつでも、どこでも、誰でも通信ネットワークを利用できることから急速に拡大しつつある。また、無線通信システムの大容量伝送にともない、使用周波数の高周波帯への移行が進んでおり、地上波の行き届かない地下街、ビル内のみならず、ビルの影等の電波不感地帯へ電波を確実に送り届けることが重要な課題となっている。従来から、不感地帯用のアンテナとして、伝送線路型の漏洩同軸ケーブル (Leaky Coaxial Cable, 以下LCXと略す.)が使用されており、主に、トンネル内の列車や車に対する移動体無線や、地下街で警察、消防が使用する防災無線の用途に利用されてきた。¹⁾

一般のアンテナと比較してLCXの優れている点は、次のとおりである。

線状体であり布設しやすく、外観も目立たず美観に優れる。

電磁波の通過性の悪い障害物の存在する、あるいは、狭く曲がりくねった空間でも見通し内にLCXを1本布設すれば通信を可能にできるので、優れた経済効果が得られる。

メンテナンスフリーであり、人の出入りが制限される施設内での通信用に最適である。

しかし、これまでのLCXの使用周波数は900MHz以下であり、近年の高周波化するメディアでは使用できなかった。そこで当社は、0.8～2.6GHzを使用している携帯電話、PHS、無線LAN、モバイル放送等に対応可能なギガヘルツ対応広帯域漏洩同軸ケーブル (Wide-band Leaky Coaxial Cable, 以下WBLCX™と略す.)を開発した。製品化したWBLCXには2種類あり、細径・軽量化により布設の簡便さをねらった外径18mmの細径10D型、および長距離使用をねらい低い減衰量とした外径29mmの20D型である。これらのWBLCXは、周波数2.6GHzにおいて、10D型では結合損失59dB、減衰量14.5dB/100m、また20D型では結合損失58dB、減衰量9.5dB/100mの優れた性能を得た。

WBLCXは、株式会社フジクラの登録商標です。
WBLCX is a trade mark of Fujikura Ltd.

1 技術部
2 技術部上席技術員
3 製造部主席部員
4 通信技術開発部長

2. LCXの基本特性

LCXを含む空間に対して、図1に示すようにLCXの半径方向を r 、円周方向を θ 、そして長さ方向を z とする円

筒座標を適用した．LCXは，同軸ケーブルの外部導体にスロットと呼ばれる長穴をz方向に対してジグザグ状態で周期的に設けている．LCXの電波漏洩機構は，外部導体の内面をz方向に流れる電流をこのスロットによって擾乱し，ケーブル内部の電磁界を漏洩させるものである．通信には，z方向の電界成分であるEを主に使用する．なお，LCXについてはこれまで多くの研究が行われており^{2)～6)}，また，標準規格も導入されつつある．^{7,8)}

2.1 使用周波数範囲

LCXの任意のスロットから放射される電磁波と隣のスロットから放射される電磁波の位相差が $2n$ (n :整数)であるとき，LCXの外部空間には各スロットから放射された電磁波により等位相面が形成される．この条件は自由空間における波長 λ ，ケーブル内の比誘電率 ϵ_r およびスロットピッチ P により式(1)で表すことができる． n は λ と P の関係により複数存在することができ，これに対応してLCXからは複数のモードでの放射が行われる．この放射は n が奇数のときはE成分の放射となり，また偶数のときはEz成分の放射となる．式(1)中の n は，放射波のモード次数を表している．

$$\left| \frac{n}{P} + \sqrt{\epsilon_r} \right| \leq 1 \quad (n = -1, -2, -3, \dots) \dots (1)$$

LCXから放射が行われる最低限界周波数 f_L は，式(1)において， $n = -1$ として式(2)により計算される． C は光の速さである．なお f_L より低い周波数では，LCXからの電磁波の放射は行われず表面波となることが知られている．

$$f_L = \frac{C}{P(1 + \sqrt{\epsilon_r})} \dots (2)$$

ケーブル内を伝搬する信号の波長がスロットピッチと一致するとケーブル内で共振が起り，反射電力が増大して定

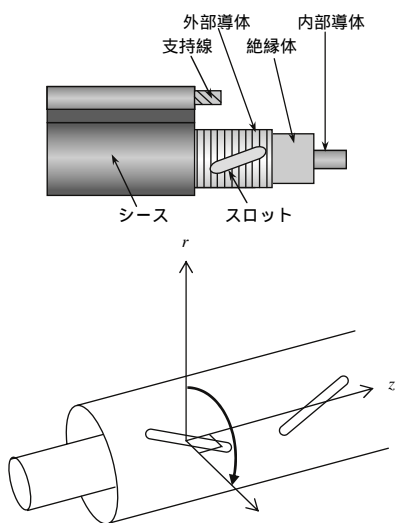


図1 LCXの円筒座標表示
Fig. 1. Cylindrical coordinate for LCX.

在波比 (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR) が悪化するのので，使用する周波数帯域からこの共振周波数は外す必要がある．この周波数は式(3)により計算することができる．

$$f_n = \frac{C \cdot n}{P \cdot \epsilon_r} \dots (3)$$

LCXから放射される電磁波は図2に示すような角度 θ をもってケーブルから放射される．この角度 θ はスロットのピッチとケーブル中を伝搬する信号の周波数により決定され，各モードに対して式(4)により計算することができる．

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{C \cdot n}{P \cdot f} \right) \dots (4)$$

θ は $-90^\circ \sim +90^\circ$ の値をとる． θ が+の場合，電磁波はケーブルを軸方向として円錐方向に終端側に放射する．この状態でのLCXは，エンドファイア型と呼ばれる．逆に θ が-の場合，電磁波は給電側に放射し，このときのLCXはバックファイア型と呼ばれる．なお， $\theta = 0^\circ$ の場合には共振状態となる．例として，開発した20DタイプのWBLCXの0.84GHzと2.4GHzでの放射パターンを電波無響室(千葉大学大学院自然科学研究科)にて測定した結果を図3に示す．同図より，このLCXは0.84GHzではバックファイア型，2.4GHzではエンドファイア型として動作していることがわかる．



図2 LCXからの電磁波の放射角度
Fig. 2. Radiation angle of electromagnetic wave from LCX.

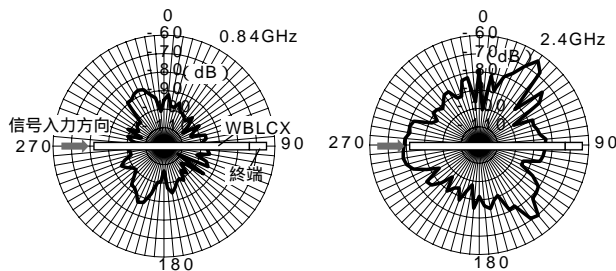


図3 ケーブル軸を含む面内での放射パターン (周波数0.84, 2.4GHz)
Fig. 3 The radiation patterns in the z-plane at 0.84GHz and 2.4GHz.

2.2 結合損失と減衰量

結合損失 L_c はケーブル内を伝搬する電力 P_i と外部空間に置かれた半波長標準ダイポールアンテナの受信電力 P_r との比によって式 (5) により定義され、 L_c が小さいほど LCX からの放射が強くなり、ダイポールアンテナの受信電力が大きくなる。

$$L_c = -10 \log \frac{P_r}{P_i} \dots\dots\dots (5)$$

結合損失は、スロットの長さおよび傾斜角度により制御することができ、その値は長手方向における累積確率値の 50% で一般的に定義される。実用上結合損失は、使用周波数 f について式 (6) により計算することができる。ここで r はケーブルとアンテナの離隔、 α_r は放射による減衰量の増加分である。

$$L_c \cong 3.66 + 10 \log (rf^2) - 10 \log \alpha_r \dots\dots\dots (6)$$

減衰量 α は、外部導体にスロットを空けない状態でのケーブル減衰量 α_0 (dB/km) とスロットを空けたときの放射による減衰量の増加分 α_r (dB/km) との和で、式 (7) により計算される。

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_r \text{ (dB/km)} \dots\dots\dots (7)$$

また α_r は式 (8) で計算することができる。

$$\alpha_r = 2.323 \times r \times f^2 \times 10^{-\frac{L_c}{10}} \text{ (dB/km)} \dots\dots\dots (8)$$

2.3 広帯域化

LCX で使用できる周波数帯域を広くするには、高次モードを抑圧すればよく、各スロットの波源強度を周期的に変える手法や、図 4 に示すようなスロット配列パターンを決

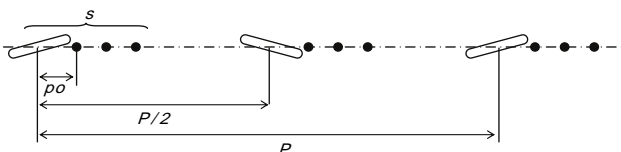


図 4 広帯域化のための多連スロットの配列
Fig. 4. The configuration of multiple slots for wide band.

まった周期で多連配列し、広帯域化を行う手法が知られている。これらのうち代表的な手法として以下の例を示す。

LCX の各スロットの波源強度が作り出す E 成分における高調波を、スロットの傾き および長さ l で決まる係数 $A(n, l, P)$ を用いて表すと式 (9) のとおりとなる。

$$I_n = A(n, l, P) \frac{1 - \exp(j \frac{2\pi n}{P} s p_0)}{1 - \exp(j \frac{2\pi n}{P} p_0)} \dots\dots\dots (9)$$

ただし

I_n : 各スロット波源が作り出す高調波成分の強度

s : 半スロットピッチ内におけるスロットの数

p_0 : 隣接するスロットの距離

このとき高調波成分である $n = -3$ において $I_n=0$ となる条件は、式 (10) から式 (11) のとおり求めることができる。式 (11) より、 $s = 3$ の 3 連スロットにした場合、 $R = -1$ の時には、 p_0 は $P/9$ にすればよいことがわかる。

$$\frac{2\pi n}{P} s p_0 = 2\pi R \quad (R=0, \pm 1, \pm 2 \dots) \dots\dots\dots (10)$$

$$s p_0 = \frac{P}{3} R \dots\dots\dots (11)$$

また、広帯域化により多連化したときの結合損失の強度増加分 $L(s)$ は、式 (12) で求めることができる。

$$L(s) = 20 \log \left| \frac{1 - e^{-j \frac{2\pi}{3}}}{1 - e^{-j \frac{2\pi}{3s}}} \right| \text{ (dB)} \dots\dots\dots (12)$$

表 1 WBLCX の構造と電気特性
Table 1. Structure and electrical characteristics of WBLCX.

項目		単位	WBLCX-10D-SSD	WBLCX-20D-SSD
内部導体	材料	-	無酸素銅パイプ	
	外径	mm	5	9
絶縁体	材料	-	超高発泡ポリエチレン	
	外径	mm	約 12	約 22
外部導体		-	銅ラミネートテープ	
支持線		-	亜鉛めっき銅撚り線	
シース		-	黒色ポリエチレン	
仕上外径		mm	約 18 × 25	約 29 × 40
標準減衰量	0.8 GHz	dB/100m	6.7	4.2
	2.0 GHz		11.9	7.0
	2.6 GHz		14.5	9.5
標準結合損失	0.8 GHz	dB	73	73
	2.0 GHz		62	60
	2.6 GHz		59	58

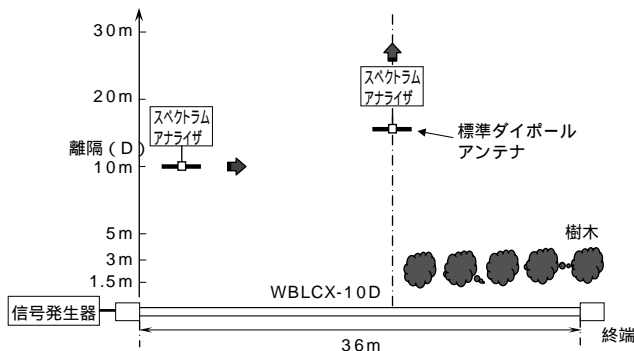


図5 WBLCXの結合損失測定時の構成
Fig. 5. Configuration of coupling loss measurement for WBLCX.

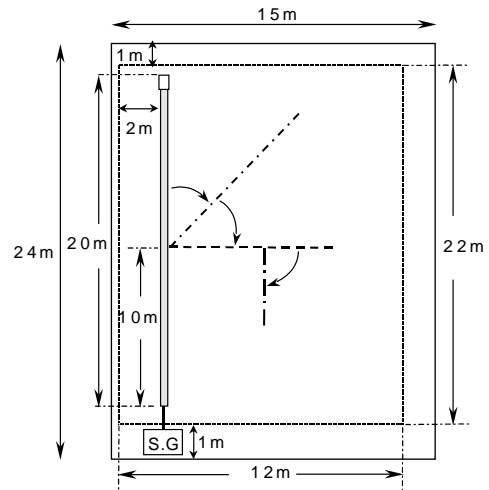
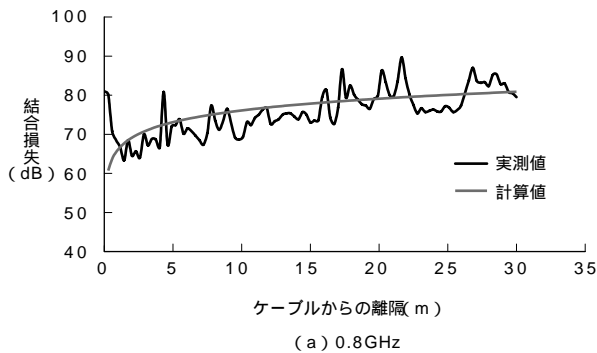
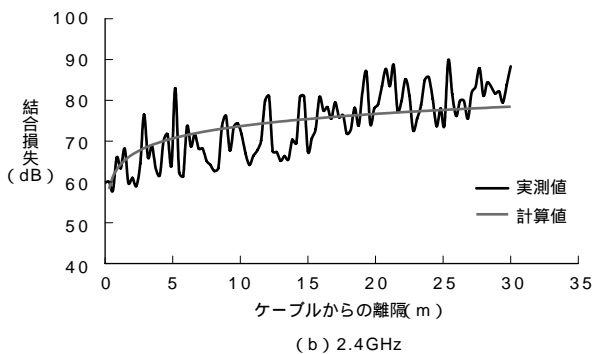


図7 WBLCXの配置
Fig. 7. Layout of WBLCX.



(a) 0.8GHz



(b) 2.4GHz

図6 アンテナのWBLCXからの距離による結合損失の変化
(周波数0.8, 2.4GHz)
Fig. 6. The coupling loss variation for the distance of the antenna from WBLCX at 0.8GHz and 2.4GHz.

3. WBLCXの特性

布設時の作業性を容易にした軽量で細径の10Dタイプ(WBLCX-10D)と、長距離での使用を可能にした減衰量の低い20Dタイプ(WBLCX-20D)を開発した。これらのWBLCXの構造と電気特性を表1に示し、各種実験の結果を述べる。

3.1 アンテナとの距離による結合損失の変化

鉄道で使用されているLCX通信システムでは、列車とケーブルとの間隔が決まっているため、電波の空間減衰量はほぼ一定しているので安定した通信が可能である。これに対し携帯電話や無線LANにWBLCXを使用したシステムでは、ケーブルの布設される場所や無線端末機器を使用

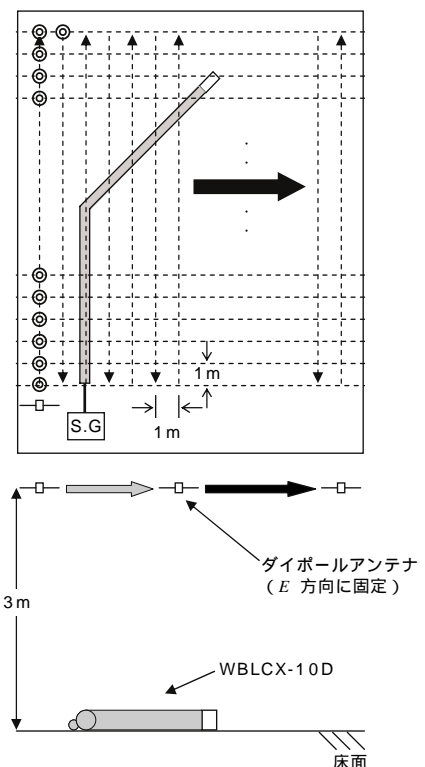


図8 屈曲部を有するWBLCXに対する結合損失測定
Fig. 8. Measurement setup for bent WBLCX.

する利用者の位置により、端末機器とケーブルとの距離が不規則になるので、放射電力が場所によって変化すると考えられる。従ってアンテナとケーブルとの距離変動による結合損失の変化を調査し、システムのサービス可能エリアを確認する目的で次の実験を行った。

地上から1.2mの位置に固定したWBLCX-10Dを屋外に配置し、0.8GHzおよび2.4GHzのそれぞれの信号をケーブルに入力して、ケーブルとダイポールアンテナとの距離を変えながら結合損失の測定を行った。このときの位置関係を図5に示す。そして、WBLCXの中央部でアンテナを隔離した場合の測定結果を周波数0.8GHzおよび2.4GHzに対

してそれぞれ図6(a),(b)に、式(6)から計算した結合損失の結果とともに示す。

0.8GHzでケーブル近傍において計算値とのずれがあるものの、全体として良く一致した結果となっている。この0.8GHzにおけるケーブル近傍でのずれは、0.8GHzでは2.4GHzよりも波長が長く、他のスロットから放射される電界の寄与が少ないために結合損失が弱くなったものと考えられる。

3.2 曲がりによる結合損失の変化

WBLCXが布設される場所は、地下街やビル内の通路といった入り組んだ場所であることが想定される。これらの場所でのWBLCXは、通路の曲がり角や壁の角などで曲げて布設されることが多い。また、WBLCX同士が対向する位置に布設される可能性などが考えられる。

曲げて布設する場合や対向位置での布設は、従来のLCX布設ではほとんど行われなかった配置である。また結合損失は、各種条件のパラメータが複雑になることから計算は困難である。従って実際にWBLCX-10Dを図7の配置で屋内に布設し、図8に示すように1m間隔でWBLCX周囲の結合損失を測定した。測定周波数は2.0GHzとした。なおこのときのアンテナの受信電界成分は、信号入力部のケーブルを基準にE方向に決め、アンテナの方向および角度

は一定として測定を行った。

図9はケーブルを直線状に配置し、ケーブルとダイポールアンテナの離隔を3mとしたときの、結合損失の測定結果である。また図10～図12は、図9と同じ測定条件で、ケーブルの中間部を45°、90°、カギ状に曲げた状態で結合損失を測定した結果を示したものである。これらの実験結果からケーブルが曲げられた付近やケーブルに挟まれた場所では結合損失が小さく、すなわち、放射が強くなる傾向にあることが確認された。しかしながらそれ以外の場所では図11に示すように、特定の一部に電界が弱くなる場所も確認できており、これらはアンテナの受信方向、ケーブルからの電波の放射方向、壁面からの反射、各スロットから放射された電波の位相の重なりなどが複雑に影響しあい発生しているものと考えられる。

3.3 半径方向の指向性

LCXからの電磁波の放射は、ケーブル断面において半径方向に均等に放射されることが知られており、指向性はほとんどないものであった。これに対しWBLCXで使用する周波数はギガヘルツ帯と高く波長が短いため、直進性が強く回折しにくいものであるので指向性への影響が懸念される。このため電波無響室に図13の方法でWBLCX-10Dを固定し、放射される電磁波の指向性を測定した。

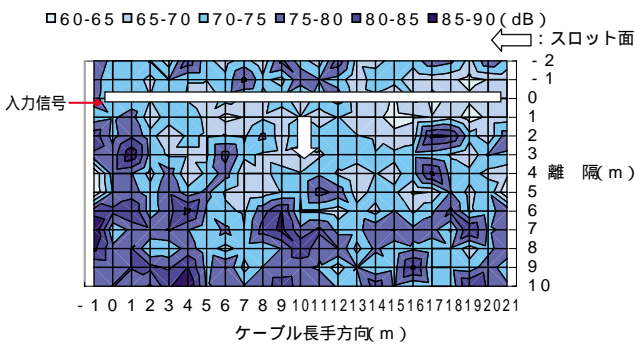


図9 直線状WBLCXの結合損失分布
Fig. 9. The coupling loss distribution on a dB scale for the straight WBLCX.

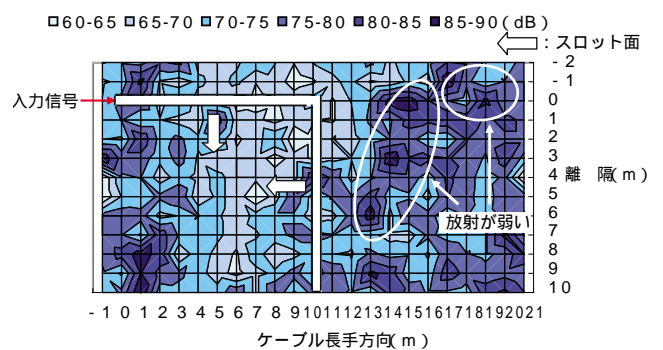


図11 90°に曲がったWBLCXの結合損失分布
Fig. 11. The coupling loss distribution on a dB scale when WBLCX is bent at 90 degrees.

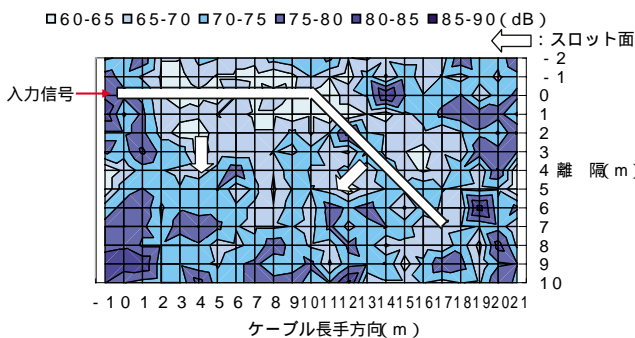


図10 45°に曲がったWBLCXの結合損失分布
Fig. 10. The coupling loss distribution on a dB scale when WBLCX is bent at 45 degrees.

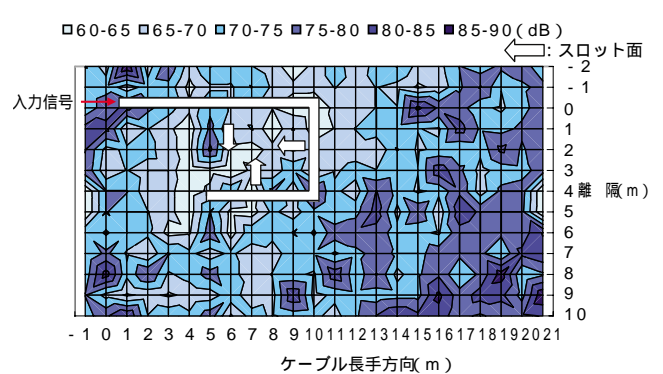


図12 カギ状に曲がったWBLCXの結合損失分布
Fig. 12. The coupling loss distribution on a dB scale when WBLCX is bent at 90 degrees twice.

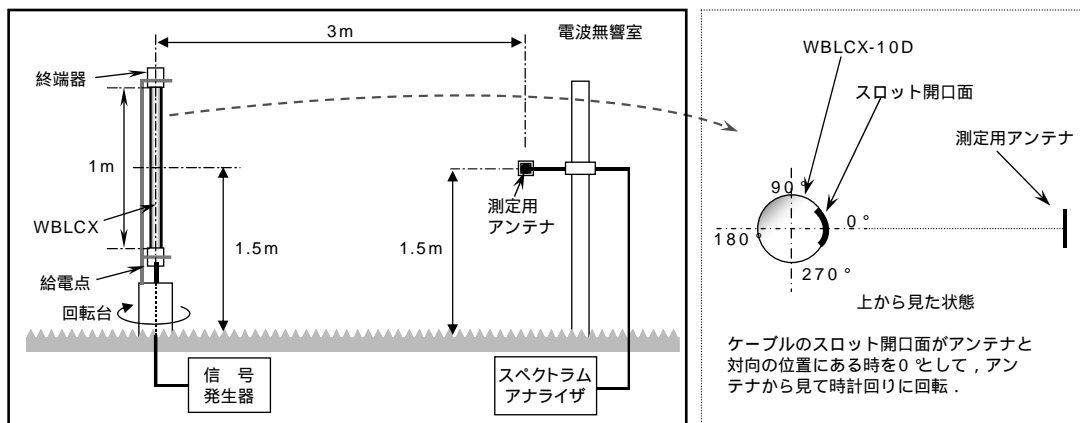


図13 WBLCXの半径方向を含む面内での指向性の測定
Fig. 13. Measurement setup for radiation pattern of WBLCX in the *r*-plane.

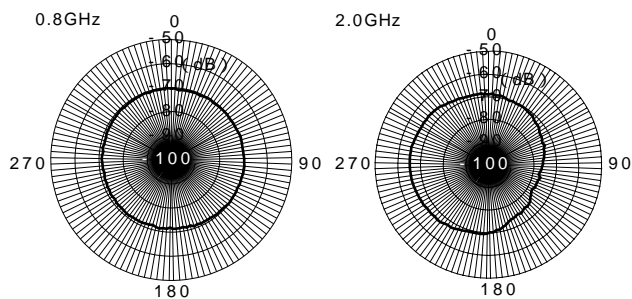


図14 WBLCX-10Dの半径方向を含む面内でのE成分指向性(周波数0.8GHz, 2.0GHz)
Fig. 14. Radiation patterns of *E* component in the *r*-plane for WBLCX-10D at 0.8GHz and 2.0GHz.

図14に0.8GHzおよび2.0GHzにおけるE成分の指向性パターンを測定結果を示す。この測定結果から0.8GHzにおける指向性はほぼ無指向性であるが、2.0GHzでは120度方向で放射が若干弱いことが確認された。この指向性は微弱なものであり、支持線で放射方向を固定して使用するかぎりは、実使用上問題となるレベルではないと考えられる。

3.4 ねじれによる結合損失の変動

鉄道で使用されているLCXは、線路脇の防護壁に決められた高さの間隔を保持して設置する必要がある。そのため列車の風圧や振動でケーブルが振動しないように支持線を把持して強固に固定されている。これに対しWBLCXは、軽量化と細径化の目的で支持線無しで布設される可能性があり、ケーブルにねじれが加わることが考えられる。このためWBLCX-10Dを使い、図15のように布設してねじれを加えてE成分の結合損失が長手方向にどのように変化するか検証した。

E成分の結合損失の測定結果を、周波数0.8GHzと

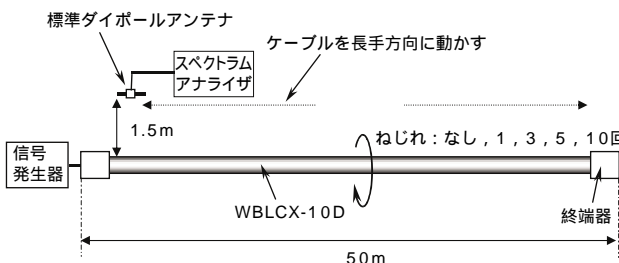


図15 ねじれを受けたWBLCXの結合損失測定
Fig. 15. Measurement setup of coupling loss for twisted WBLCX.

2.0GHzに対して、それぞれ図16および図17に示す。実験の結果、0.8GHzにおいてはねじれを加えた時の結合損失には大きな特性の変化は認められないが、2.0GHzでは、捻回を3回、5回加えたときの結合損失は直線状態よりも全体的に5dB程度大きく変化していることがわかる。さらに10回のねじれを加えたときの結合損失は、ねじれを加えなかった状態とほぼ同程度となっている。本実験より、ねじれによって生じるケーブルのねじれピッチと放射特性には関係のあることが明らかになった。

次に、ねじれを加えたときの長手方向の変動を見ると、2.0GHzではその変動が大きくなっていることが確認できる。これは、3.3節の2.0GHzにおける指向性と関係しており、ケーブルにねじれを加えることによりスロット面がケーブル長手方向に変化することにより、指向性の強い部分と弱い部分がアンテナに対向するため、長手方向のばらつきが大きくなるものと考えられる。したがって、可能であればWBLCXを支持線で固定し、放射面を安定させた状態のほうがより良好な特性が得られることがわかった。

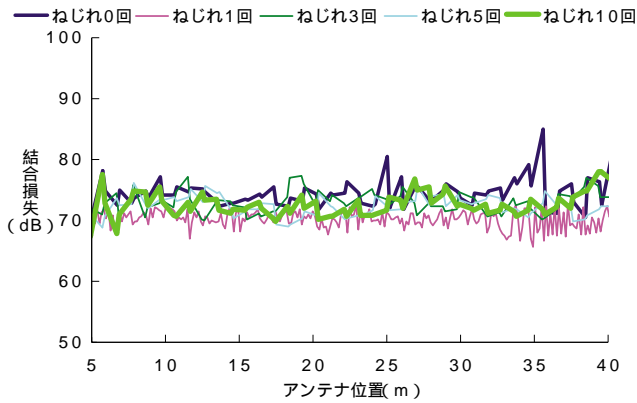


図 16 ねじれによる結合損失の変化 (周波数0.8GHz)
Fig. 16. Torsion dependence of coupling loss at 0.8GHz.

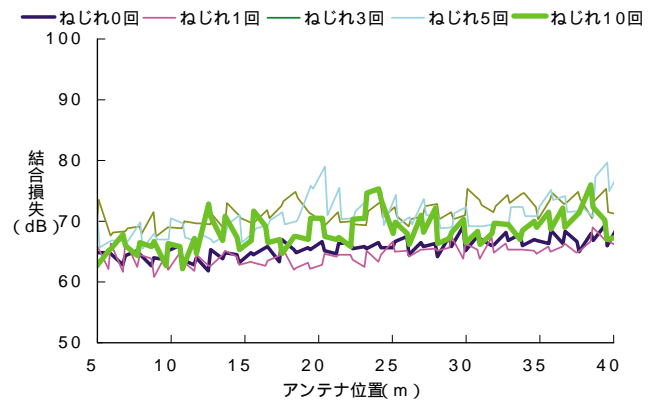


図 17 ねじれによる結合損失の変化 (周波数2.6GHz)
Fig. 17. Torsion dependence of coupling loss at 2.6GHz.

4. む す び

WBLCXを使用し多くの布設状況を模擬した各種実験を行いながら、ケーブルの基礎的特性を明らかにするとともに、WBLCXのアンテナとしての有効性について検証を行ってきた。その結果、WBLCXは高周波・広帯域用のアンテナとして十分機能できる特性を有していることが明らかになった。今後は通信システムに組み込んでの実証試験を行いながら、アンテナとしてのさらなる有効性の確認を行う。WBLCXは、電波の届きにくい場所での通信サービスや電波不感地帯を解消するために非常に有効であることを確認した。さらにWBLCXは、無線を利用した遠隔監視やRadio Frequency Identification (RFID) への応用など、ユビキタス社会の基盤製品として非常に有望であることを確認した。

最後に、本ケーブルの開発にあたり御指導と御協力を頂いた千葉大学伊藤公一教授に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 岸本, 佐々木: LCX 通信システム, 3版, 社団法人電子情報通信学会, 1991
- 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, 電子通信学会論文誌, Vol.54-B, No.12, pp.789 ~ 796, 1971
- 3) 新谷, 堀, 山口: 広帯域漏洩同軸ケーブル, 大日本電線時報, 第47号, pp.1 ~ 7, 1971
- 4) 稲田, 安原, 福田, 小口: 漏洩同軸ケーブル, 藤倉電線技報, 第46号, pp.19 ~ 28, 1972
- 5) 佐甲, 三沢, 安原: 漏洩同軸ケーブルに関する最近の開発, 藤倉電線技報, 第50号, pp.19 ~ 27, 1974
- 6) 進藤, 堀: 漏洩同軸ケーブルの特性, 大日本電線時報, 第60号, pp.1 ~ 7, 1975
- 7) 小電力データ通信システム/ワイヤレスLANシステム, RCR STD-33 5.2版, 社団法人電波産業会, 2005
- 8) 第二世代小電力データ通信システム/ワイヤレスLANシステム, ARIB STD-T66 2.3版, 社団法人電波産業会, 2005