

非連続反射板形ビームウェーブガイドを用いる 障害物探知の実験

Experiment of the Obstacle Detection Using the Beam Wave-guide
with Discrete Confocal Reflectors

雨宮好文*
Yoshifumi Amemiya

栗田信男*
Nobuo Kurita

上村正雄**
Masao Kamimura

渡部満**
Mitsuru Watanabe

御子柴晃***
Kôichi Mikoshiba

塗田善啓****
Yoshihiro Nurita

阿部康****
Kôichi Abe

要 旨

高速列車の安全運転のために、列車前方の障害物を事前に探知する必要がある。本文は、列車軌道の両側に位相変成器として作用する反射板を交互に非連続的に配置した電磁波ビームウェーブガイドを利用したレーダ方式によって、効果的な障害物探知の可能なことを述べ、伝送路の基本的な諸特性について述べている。

1. 緒 言

障害物探知方式として、ここ数年前から日本国有鉄道技術研究所が主体となって表面波レーダ方式、漏えい波擬レーダ方式⁽¹⁾などが検討されてきた。特に後者に関しては、障害物探知と列車通信および制御が同時に可能であるという点で画期的なものであったが、導波管本体および布設費など経済性に難点があるため、何かこれに代わるものが要求されるに至った。

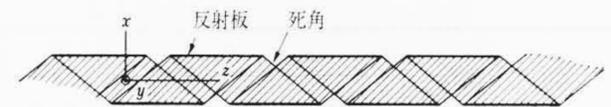
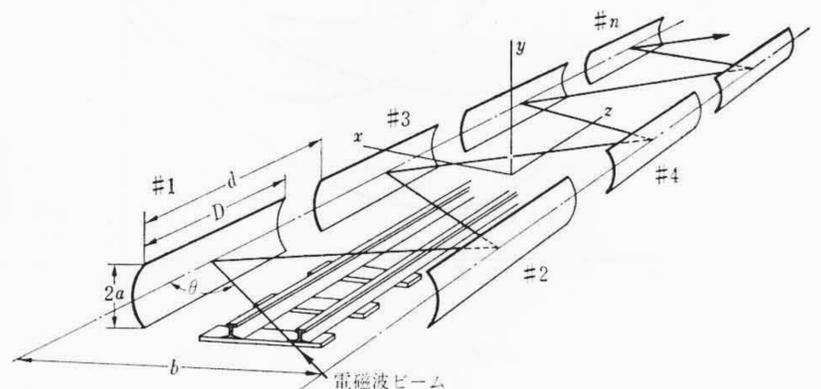
そこで経済性があり、かつ十分な探知能力が期待できる電磁波ビームウェーブガイド（以下ビームガイドと呼ぶ）をとり上げ⁽²⁾、その実験線路として約 80 m を鉄道技術研究所構内に布設した。使用周波数としてレーダバンドの 9.4 GHz を使用した。

ビームガイドは、1961年 G. Goubau 氏によって提案⁽³⁾されて以来、種々の形状のものが発表^{(4)~(6)}されているが、列車障害物探知に適応できる形状としては、電磁波ビームの位相変成器となっている反射板が図 1 (a) (b) のように列車軌道に沿って連続なものと非連続な形状を持つものが考えられる。いずれによっても伝送損失の点では同等な特性が期待できるが、探知能力とか、布設・保線保守などの観点からは両者に一長一短がある。非連続反射板形ビームガイドについては、反射板が間欠的に配置されているためにこの部分にはいった障害物を探知できないという範囲（これを死角と呼ぶ）があるが、保線保守時の線路内への立ち入り退避が容易であり、風土・温度伸縮による影響が少ないという長所がある。

一応、今回は保線の容易性という長所を生かし、非連続反射板形ビームガイドについて検討を行なった。

実験の結果、電磁波ビームを利用したビームガイドによる障害物探知の実用の可能性と基本的な特性をつかむことができ、従来の擬レーダ方式に比較して導波管を使用しないため経済性が大きい。

本報告では、以上述べた非連続反射板形ビームガイドについて原理、構造などを明らかにし、鉄道技術研究所構内における実験とその結果に考察を加えて述べる。



(a) 非連続反射板形ビームガイド

(b) 連続反射板形ビームガイド

図 1 ビームガイド構成図

2. 非連続反射板形ビームガイド⁽⁷⁾

2.1 原 理⁽³⁾⁽⁵⁾

ここでは、原理の定性的な説明と障害物探知へ応用した場合の動作原理を簡単に説明する。

ビームガイドの反射板の形状としては、共焦点だ円面、共焦点円筒だ円面などを満足するものが使用されているが、ここでは円筒だ円面を円筒放物面に近似して、図 1 (a) の座標で $x^2 = 4py$ (p は焦点距離、 $p = \frac{b}{2}$) を満足する曲面を選定し、レールをはさんで電磁波ビームが入射角 θ で伝送されるように反射板を交互に配置する。

このビームガイドが低損失な伝送特性を有する理由は次のように説明される。

一般に 2 枚の平行平板間で電磁波ビームが伝送されると伝送中の回折損失は非常に大きくなるが、上述したように軸断面内でビームを絞る、かつ、相互の反射板が共焦点の関係にあるようにすれば、図 1 (a) において伝ば中の電磁波ビームが #1 の反射板にある位相分布を与えたとき、#1 の反射板で反射された電磁波ビームの位相分布が #2 の反射板上再現される。以下同様に #3, #4 と同位相分布でビームモードを形成して伝送される。図 1 (a) のビームガ

* 日本国有鉄道技術研究所

** 日立製作所中央研究所

*** 日立電線株式会社日高工場 工学博士

**** 日立電線株式会社日高工場

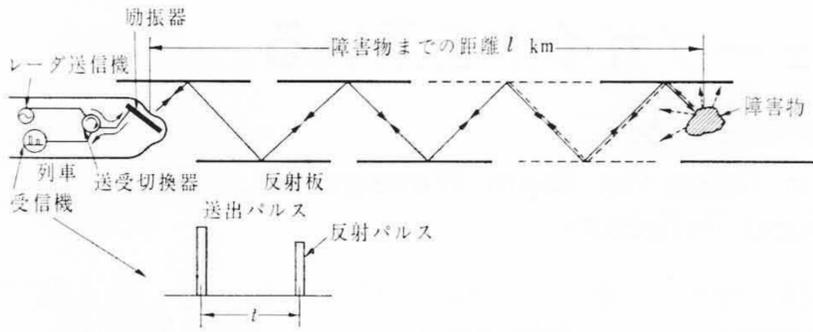


図2 障害物探知原理図

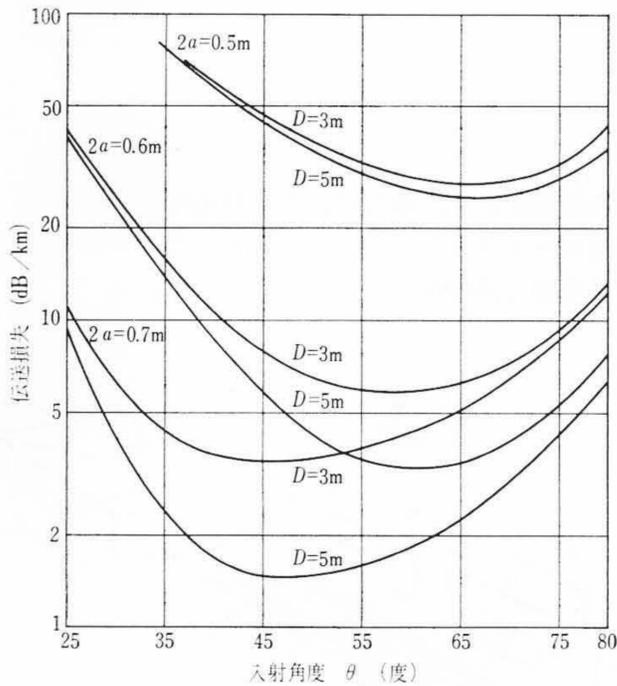


図3 ビームガイドの伝送損失 (計算値)

表1 試作ビームガイドの寸法

項目	寸法	項目	寸法
対向間隔 b	3 m	ビームガイド全長	約 80 m
反射板の高さ 2a	0.7 m	反射板対数	13ブロック
反射板の長さ D	4.95 m	反射板ピッチ d	6 m(可変)
入射角 θ	45°(可変)	曲面焦点距離 a_0	1.5 m

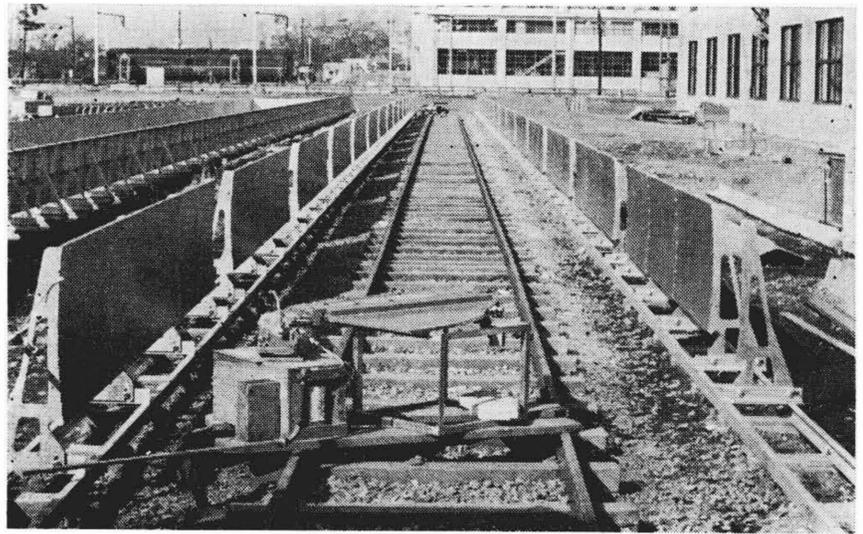
イドでは軸方向に cos 分布，軸断面内で Gauss 分布をなしているものがいちばん安定な基本伝送モードである⁽⁷⁾。損失分としては，反射板の熱損失と反射板が有限であることによる回折損失の和で与えられる。

このようなビーム伝送が行なわれているビームガイド中に図2のように障害物が存在すると障害物により伝送エネルギーの一部が今まで伝送してきた方向に反射されるので，送出パルス位置から，往復に要した時間だけ遅れた位置にその反射パルスがブラウン管上で観測される⁽²⁾。したがって，障害物までの距離はこの遅れた時間を換算することによって知ることができる。

2.2 伝送損失

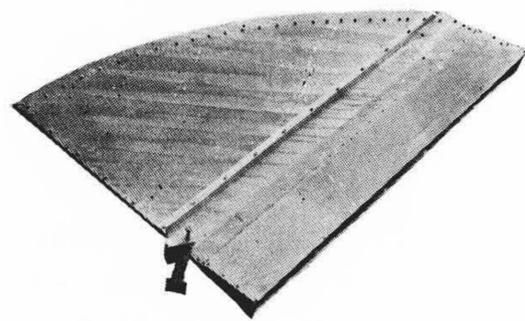
本ビームガイド系の構造の設計で考慮しなければならない重要な点は伝送損失と死角の大きさであるので，実用上問題のない反射板の大きさを選定する必要がある。このため，あらかじめ理論計算で入射角と伝送損失の関係⁽⁷⁾を求めて最小の伝送損失を示す入射角 θ を選定すればよい。図1(a)の記号を用いて計算した結果を図3に示す。

一般に反射板形ビームガイドの伝送損失は回折損失と熱損失の和であり，図3に示すように回折損失は，反射板への入射角 θ が大きくなれば小さくなり，熱損失は逆に大きくなるので，その中間に伝送損失が最小になる入射角が存在する。また図3から明らかなよう



(手前 線路中央は励振器)

図4 鉄道技術研究所構内布設



(開口1mのピルボックスアンテナ)

図5 励振器

に，反射板の長さより高さのほうが伝送損失（特に回折損失）に大きく影響を及ぼしていることがわかる。

2.3 要求性能

200 km/h の高速列車のブレーキ距離は 3 km 以上必要であることを条件にして，現在容易に入手できる送信管出力，受信機能力，予備実験によった障害物からの反射レベルの大きさなどから周波数 9.4 GHz において，(1) 伝送損失：15 dB/km 以下，(2) 励振器励振損失：10 dB 以下，を要求性能とした。このほか，非連続部の死角ができるだけ小さいことが必要である。

2.4 構造

死角をできるだけ小さくすることを考慮に入れ，反射板の長さにある程度の余裕を与えてビームガイドの構造を図3の結果から表1のように決めた。反射板の構造は，実験が容易なように3分割方式とし，かつ入射角を容易に変化できるように反射板支持フレームは2本の連続なチャンネルの上を軸方向に移動が可能であるように考慮した。図4は鉄道技術研究所構内に布設した試作ビームガイドの写真，図5は本実験に使用した励振器の写真である。

3. 非連続反射板形ビームガイドの伝送実験

3.1 伝送損失

図3の計算結果との対応を求め，今後の設計資料を得るために反射板の長さを入射角を表2のように決め，伝送損失を図6に示すようないわゆるシャトルパルス法で測定した。この測定は導波管のシャトルパルス法よりも手数がかかるので，微調機構が結合板とか移動短絡板に配慮されている。測定結果を図7に示す。図8は代表的なシャトルパルスを示したものである。測定結果から明らかなように， $D=4.95\text{ m}$ ， $\theta=45^\circ$ で 6.5 dB/km という値は，理論値の約5倍で実用に供し得る結果である。 $D=3.3\text{ m}$ ， $\theta=45^\circ$ では反射板が短くなるために，回折損失の影響を受けやすくなり，理論値の8倍という結果になった。入射角 θ が 50 度になると計算結果では，その伝送損失は増加するはずであるが，実験値は逆に減少している。こ

表2 伝送損失の実験寸法

反射板の長さ	入射角 θ
4.95 m	45°, 50°, 18.2°
3.3 m	45°, 50°

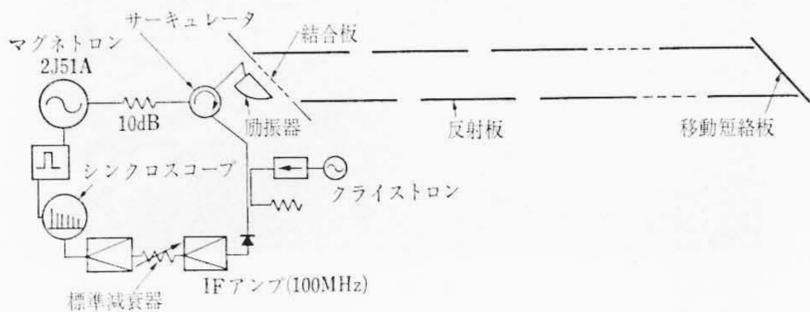


図6 伝送損失測定ブロックダイアグラム

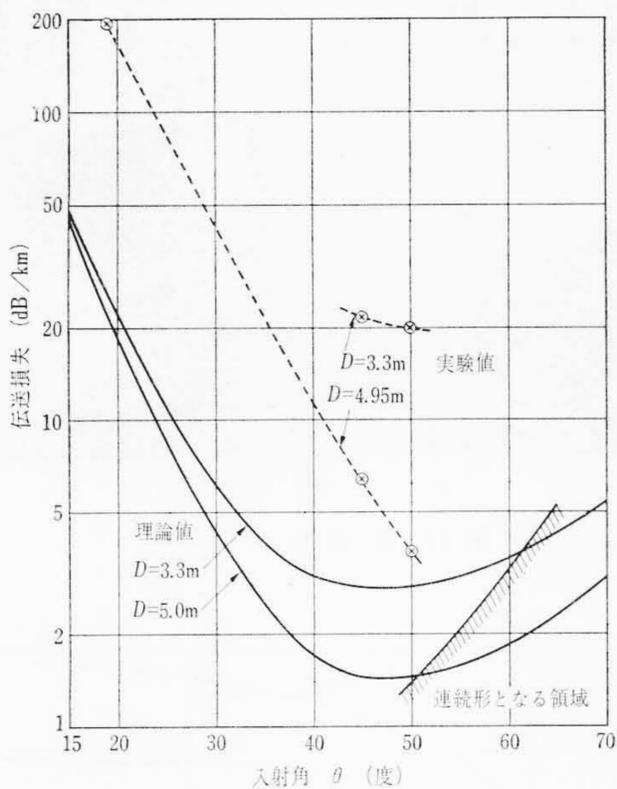


図7 伝送損失実験値

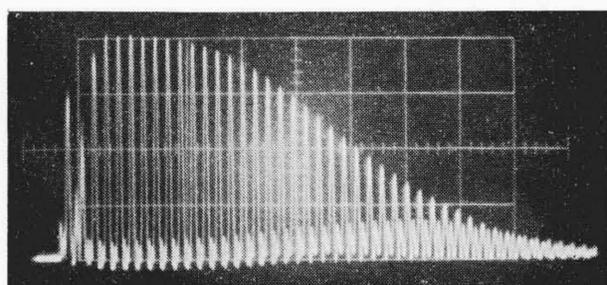


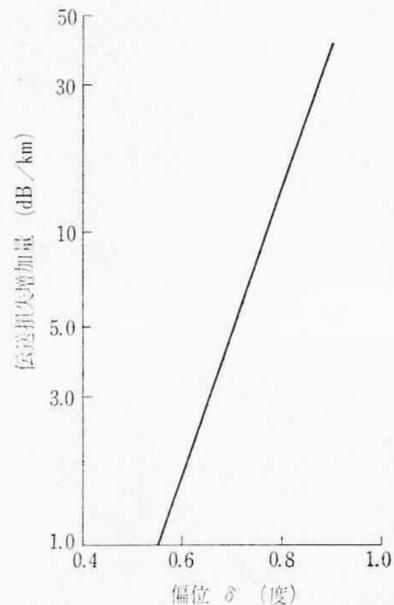
図8 ジャトルパルス列

の理由は、反射板の面精度と布設精度が回折損失の項に影響を与えているためであると考えられる。したがって実用時には入射角を45度より大きい50度ぐらいにとるのが望ましい。

ビームガイドの反射板が変位したとき伝送損失がどの程度の影響を受けるかを知ることは、ビームガイドの布設精度を規定するうえで重要な問題である。今回は、ビームガイドの全反射板を変位することが望ましいが、だいたいの目安を得るために、反射板1枚だけを変位させて図9の結果を得た。

3.2 励振器

ビームガイドの反射板上において、軸方向にcos分布、軸断面ではGauss分布を持つ基本伝送モードを第一番目に反射板に与え得る励振器が望ましい。今回は図5に示すように放射波の軸断面内でGauss分布が得られるようホーン部に段を持たせたピルボックスアンテナを使用した。



- 注：(1) D=3.3 m
- (2) 8ブロックのうちブロックの片側のちを変位
- (3) キロメートルあたり20回通過

図9 反射板の変位による伝送損失増加量

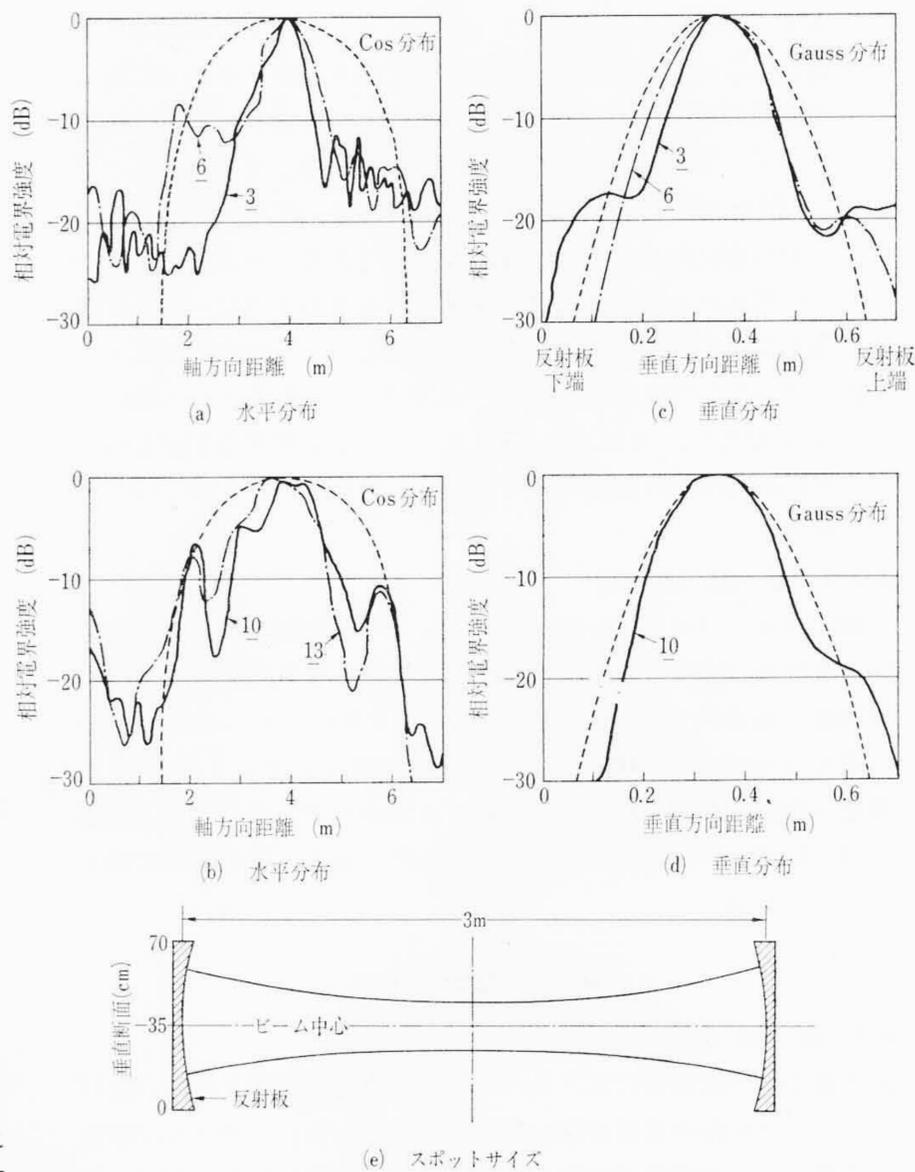


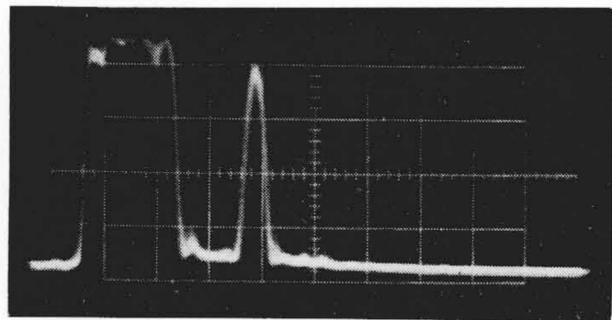
図10 界分布測定結果 (数字はブロック数)

この励振器2個をビームガイドの両端で対向させ、そう入法で励振率を測定したところ-9.1 dBであった。これにはホーン部の開口面をもっと大きくすることによってさらに改善が期待できる。なお、走行中の列車の動揺の影響による励振率の低下が予想されるが、東海道新幹線の実測動揺角の範囲では1 dB以内の低下という結果であったので実用上問題ない。

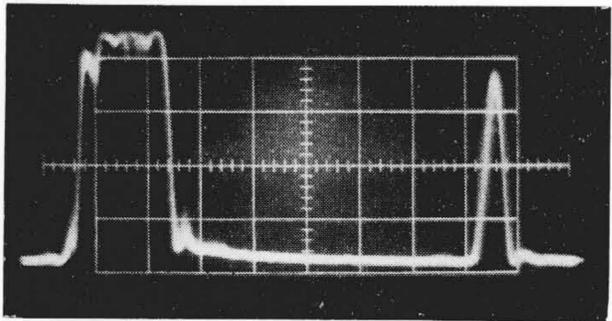
3.3 界分布の測定

3.3.1 水平分布

ピルボックスアンテナで励振したときのビームガイド(D=4.95 m, $\theta=45^\circ$)の3, 6, 10, 13の各ブロックについて、反射板の近傍における水平界分布を図10(a), (b)にcos分布(点線)とと



(a) 障害物までの距離 $l=20$ m



(b) 障害物までの距離 $l=65$ m

図11 受信波形

もに示す。この図からわかるように、ビームガイドの伝送モードを形成しはじめるのは6ブロック以後であり、10ブロック以後では分布曲線の途中にかなり大きな落ちこみが存在して、あたかも高次モードが発生しているかのような結果を示している。この原因は、1.65mの反射板が軸方向に直線ではなく、反射板の中央部がガイドの外側に向かって2~4mm程度弓なりにへこんでいるために、伝送ビームは軸方向にも集束される3個所のピークと2個所の落ちこみが生じたものと考えられることと、軸方向でビームを絞っていないうえに今回のビームガイドが80mという短いものであるために、まだ24~25イタレーション程度の伝ばししていないので完全な伝送モードを形成していないことの二つが考えられる。

3.3.2 垂直分布

図10(c), (d)に3, 6, 10ブロックの反射板上の垂直分布をGauss分布(点線)とともに示す。反射板が垂直方向では焦点の放物面であるので、比較的短い6ブロックあたりからGauss分布に近づいている。10ブロックの反射板間のスポットサイズを測定した結果を図10(e)に示す。これからガイドの中央と端部では、5~9cm程度中央のほうが絞られており、位相変成の様子がよくわかる。

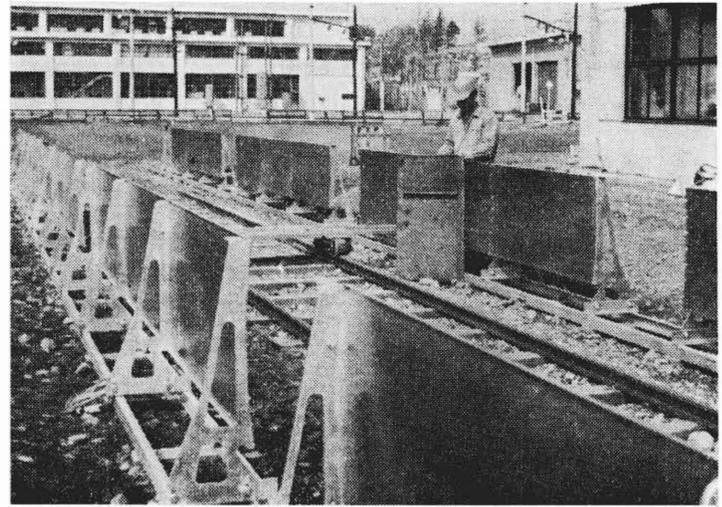
4. 障害物探知の実験

4.1 探知実験

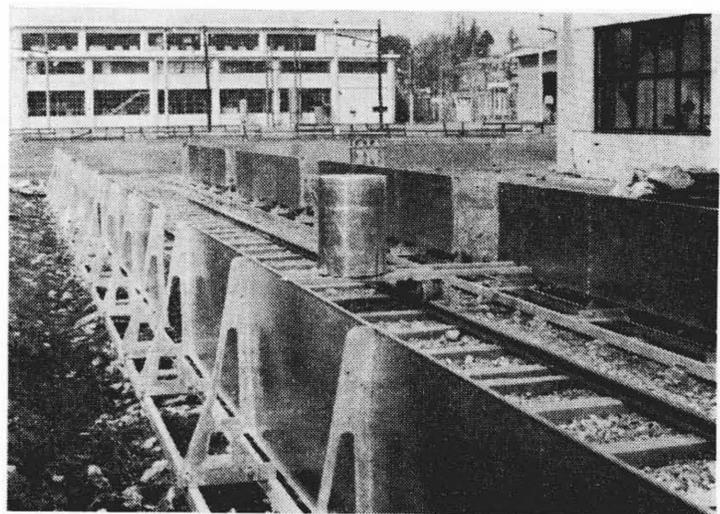
障害物からの反射波はAスコープレーダ方式で観測される。図11(a), (b)は実際の受信波形を示したものである。このように障害物の位置によって受信ブラウン管の時間軸上に現われる反射パルスの位置が異なるので、これを距離に換算して測距を行なうことができる。

障害物探知方式として問題になるのは、障害物の大きさによる反射レベルと非連続部における死角の大きさである。これらを求めるため反射パルスのレベルをAスコープレーダ方式で観測しながら、障害物の種類と形状を変化して測定した結果を図12に示す。また、障害物の代表的な例を図13に示す。図14は10ブロックと9ブロックの間の死角の測定結果を示したものである。これから非連続部を一辺とする三角形の内部は-40dB以下であることがわかったが、前述したようにビーム中心からわずかずれたところに大きな落ちこみがあるために図14は正確な死角を示しているとはいえない。

以上の結果から、障害物がビーム中心に存在するときには小さな



(a) 金属板 (幅0.6m)



(b) アルミ円筒 (0.5mφ)

図12 障害物の一例

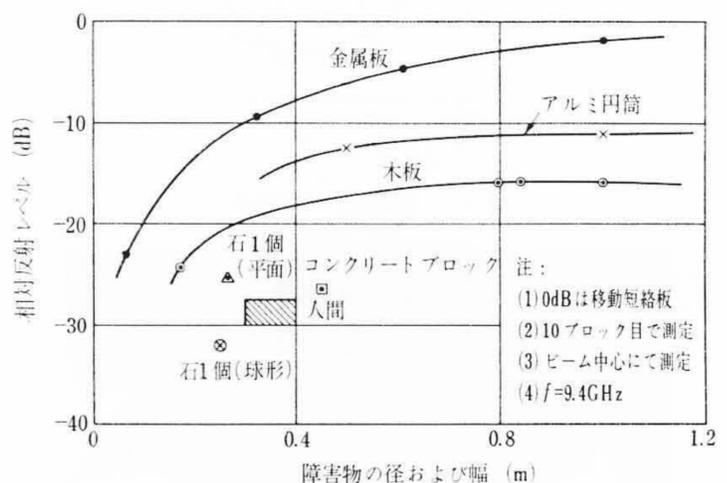


図13 障害物の大きさとその反射レベル

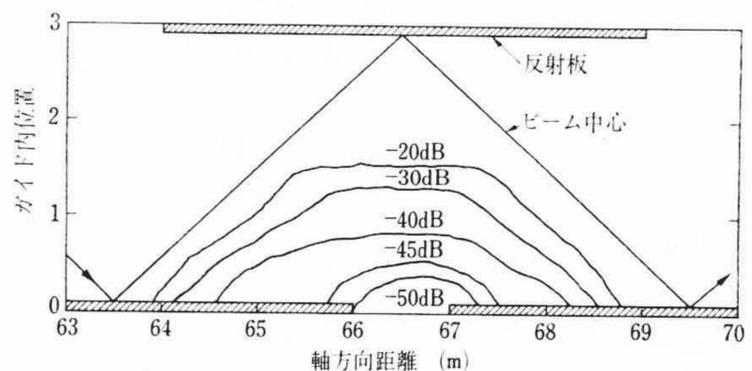


図14 死角の測定結果

石、人間でも-25~-30dBの値で検知可能であるが、ビーム中心からずれた反射板の端部ではさらに-30dB程度の落ちこみが加算されるので合計-60dBの反射レベルとなることが推定できる。

表3 探知距離計算例

項	目	数	値
1	送信機出力 (dBm)		77
2	回路損失 (dB)		-5
3	励振能率 (dB)		-15
4	受信機雑音 (dBm)		-94
5	S/N改善度 (dB)		10
6	余裕度 (dB)		10
7	障害物反射損失 (dB)		-T
8	線路損失 (dB)		- $\alpha l \times 2$
①+②+③+⑦+⑧=④+⑤+⑥			

表4 ビームガイド系と漏えい導波管系の比較

項目	ビームガイド系	漏えい導波管系
諸特性		
伝送損失	6.5 dB/km	4.37 dB/km (3.02 dB/km)*
探知距離	5.5 km	3.7 km (9 km**)
探知能力	人間, 石で検知可能 (死角が存在する)	人間, 石でも検知可能
経済性	安価	かなり高価
列車中央制御, 対列車通信	漏えい導波管と組合せて可能, 単独では不能	可能
列車間隔局所制御	可能	可能
フェイルセーフ	このままでは満足しない	満足する

注: * 5.5φの結合孔を持ったアルミ漏えい導波管 (132φ) の特性
 ** 遮へい形らせん漏えい導波管とアルミ漏えい導波管を適当な割合で使用し, 長さ方向に, たとえば1 km ごとに結合を変えた場合

4.2 探知距離

これまでに得られた実験結果と市販されているレーダ送受信機を使用すると仮定して(表3), 探知距離と伝送損失の関係を障害物の反射レベルをパラメータとして示したのが図15である。これから, 今回の伝送損失の実験値は6.5 dB/kmであるので, 障害物からの反射レベルを-60 dBとしても5.5 kmの探知距離が得られる。また, 伝送損失が9 dB/kmとなったとしても4 kmの探知距離が得られる。

5. 考察

5.1 実験結果に対する考察

このビームガイド系では, 軸断面内では位相補正を行なっているが, 軸方向には行なっていないため, ビームモードを形成するのにかなりのイタレーションが必要であることは Iris 形のビームガイドの場合と同じことである⁽⁸⁾。水平分布の測定結果もたかだか26イタレーション程度のところでの分布であるのでまだ完全なビームモードの分布を形成していない。これは, 図8のシャトルパルス列において最初の3~4往復(約300 m)はパルスが乱れていることからいえる。このことは障害物探知の死角の決定に多少の影響を及ぼすので, さらに正確な死角を決定し, 反射板の間隔(d-D)をどこまで広げられるかなどを決定するには数百メートルのビームガイド系で実験しなければならない。

5.2 実用化の検討

非連続反射板形ビームガイドの死角を救済する一つの手段として, ガイド中に二つのビームを伝ばさせるという2ビーム方式が考えられるので, 死角の救済の必要があるときには, 非連続ビームガイドの有利性を生かすことのできる有効な手段となろう。

次に, 本実験に使用したビームガイドでは障害物からの反射波が戻ってこないようなガイドの倒れ方があり得るので, 厳密な意味で

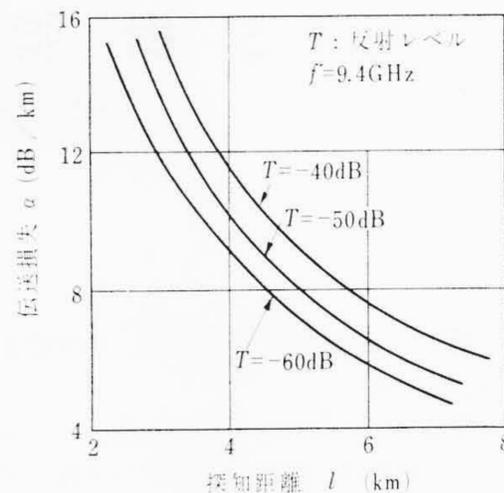


図15 障害物探知距離と伝送損失

フェイルセーフを満足していない。この点が本障害物探知方式における欠点であり, この対策が必要である。これには, (1)擬障害物を置く, (2)2波を使用する, (3)反射板に異常検知装置を付加する, (4)低損失な漏えい導波管と組み合わせる, などが考えられる。特に(4)では, 列車の位置検知, 間隔制御, 対列車通信などと併用した機能を持たすことが可能である。

6. ビームガイド系と漏えい導波管系の比較

ビームガイド系と漏えい導波管系について, それぞれ障害物探知能力, 経済性など両者の諸問題を比較して表4に示す。経済性については障害物探知のみを考えれば, ビームガイド方式が安価で有利であるが, 他の情報伝送ができないので総合的な判断が必要となる。

7. 結 言

以上の実験検討を通じて, ビームガイドを用いるレーダ方式の基本的な特性をつかむことができ, 実用的な障害物探知線路とする目安を得ることができた。特に, 障害物探知において, 非連続部の死角以外では人間, 石(20 cm 角)でも探知できる能力を有し, 5.5 kmの探知距離を持っていることを示した。

今後に残された問題としては, (1)この系がフェイルセーフでないこと, (2)今回の実験は約80mという短い線路であったために, 界分布, 死角の範囲に多少問題があること, (3)ビームガイドの曲がり部の検討などであるので, 数百メートルの長さの線路による実験が必要であろう。

最近, とみに列車の自動運転, 安全運転の要求が高まっており, おそかれ早かれこういった安全対策が実施されると考えられるので今後も検討を続ける予定である。

終わりに, 始終ご指導を賜った日本国有鉄道電気局遊佐氏, 宮越氏および鉄道技術研究所河辺信号研究室長および埼前通信研究室長に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 雨宮ほか: 日立評論 48, 629 (昭41-5)
- (2) 御子柴: 特公 昭 42-27515
- (3) G. Goubau ほか: IRE. Trans. Ap-9, 248 (May 1961)
- (4) J. R. Christian ほか: IRE. Trans. Ap-9, 256 (May 1961)
- (5) J. E. Degenford ほか: IEEE Trans. MTT-12, 445 (July 1964)
- (6) G. Goubau: Electronics 39, 83 (May 16, 1966)
- (7) 上村ほか: 昭 40 電気 4 学会連合大会 No. 1435 (昭 42-4)
- (8) J. R. Christian ほか: IRE. 49, 1679 (Nov. 1961)