Technical Report of International Development Engineering 国際開発工学報告

TRIDE-2010-02

February 17, 2010

高田潤一, 吉敷由起子, 高尾肇, 杉原 善洋, 松永 繁秋, 上坂文哉, 前島嘉明, 市塚善己, ナワラット ラーツィリソーポン, ギルバート シー チン, 川村雅彦

> トンネル内遠隔制御のための 電波伝搬特性および メッシュ無線LAN伝送特性

Department of International Development Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology http://www.ide.titech.ac.jp/TR トンネル内遠隔制御のための電波伝搬特性および

メッシュ無線 LAN 伝送特性

高田潤一1\*, 吉敷由起子1,4,

高尾肇<sup>2</sup>, 杉原 善洋<sup>2</sup>, 松永 繁秋<sup>2</sup>, 上坂文哉<sup>2</sup>, 前島嘉明<sup>3</sup>, 市塚善己<sup>3</sup>, ナワラット ラーツィリソーポン<sup>4</sup>, ギルバート シー チン<sup>4</sup>, 川村雅彦<sup>4</sup>

> 東京工業大学<sup>1</sup>,日揮株式会社<sup>2</sup>, ヒビノデータコム株式会社<sup>3</sup>,株式会社構造計画研究所<sup>4</sup>

\* 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1-S6-4, e-mail: takada@ide.titech.ac.jp

1. まえがき	1
1.1 通信距離を把握するためのデータ	1
1.1.1 遅延特性	1
(1) 環境条件	1
(2) 測定場所	2
(3) 試験方法	4
1) 試験機材	4
2) 試験機器配置	4
3) 試験設定	4
(4) 試験結果	5
1) アンテナ位置中央	5
2) アンテナ位置壁際	5
3) 周波数選択性の確認	5
1.1.2 伝搬利得距離特性(坑道中央)	9
(1) 試験内容	9
(2) 試験方法	9
1) 試験機材	9
2) 試験機器配置	9
3) 試験設定	10
(3) 試験結果	10
1.1.3 伝搬利得距離特性(坑道壁際)	14
(1) 試験内容	14
(2) 試験方法	14
1) 試験機材	14
2) 試験機器配置	14
3) 試験設定	14
(3) 試験結果	15
1.1.4 伝搬利得距離特性(自由空間)	20
(1) 環境条件	20
(2) 試験方法	20
1) 試験機材	20
2) 試験機器配置	21
3) 試験設定	21
(3) 試験結果	21
1.1.5 遮蔽体の影響	26
(1) 試験内容	26

(2) 試験万法	
1) 試験機材	
2) 試験機器配置	
3) 円盤遮蔽体設置位置	
4) 試験設定	27
(3) 試験結果	27
1.2 移動速度の影響を把握するためのデータ	29
1.2.1 マルチホップ転送レート	29
(1) 試験内容	29
(2) 試験方法	29
1) 試験機材	29
(3) 坑道内試験結果	29
1) 0 ホップ	29
2) 1 ホップ	
3) 2 ホップ	
(4) 屋外試験結果	31
1) 0 ホップ	31
2) 1 ホップ	31
3) 2 ホップ	32
(5) 坑道と屋外での転送レート比較	32
(5) 坑道と屋外での転送レート比較 1.2.2 基置局切替え時の応答時間の変化	32 33
<ul> <li>(5) 坑道と屋外での転送レート比較</li> <li>1.2.2 基置局切替え時の応答時間の変化</li></ul>	
<ul> <li>(5) 坑道と屋外での転送レート比較</li></ul>	
<ul> <li>(5) 坑道と屋外での転送レート比較</li> <li>1.2.2 基置局切替え時の応答時間の変化</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>1) 試験機材</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>1.2.3 移動速度の通信品質への影響</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(1) 試験内容</li> </ul>	
<ul> <li>(5) 坑道と屋外での転送レート比較</li></ul>	
<ul> <li>(5) 坑道と屋外での転送レート比較</li> <li>1.2.2 基置局切替え時の応答時間の変化</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>1) 試験機材</li> <li>2) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>1.2.3 移動速度の通信品質への影響</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(3) 試験機材</li> <li>(3) 試験機材</li> <li>(3) 試験機材</li> <li>(3) 試験機務配置</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験機器配置</li> </ul>	
<ul> <li>(5) 坑道と屋外での転送レート比較</li> <li>1.2.2 基置局切替え時の応答時間の変化</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(1) 試験機材</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(4) 試験機器配置</li> <li>(5) 試験結果</li> <li>(5) 試験結果</li> <li>(6) 試験結果</li> <li>(7) 試験結果</li> </ul>	
<ul> <li>(5) 坑道と屋外での転送レート比較</li> <li>1.2.2 基置局切替え時の応答時間の変化</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>1.2.3 移動速度の通信品質への影響</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(1) 試験機材</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>1.2.4 映像信号伝送</li> <li>(1) 試験内容</li> </ul>	
<ul> <li>(5) 坑道と屋外での転送レート比較</li> <li>1.2.2 基置局切替え時の応答時間の変化</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>1) 試験機材</li> <li>2) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>1.2.3 移動速度の通信品質への影響</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>1) 試験機材</li> <li>2) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>(4) 試験内容</li> <li>(5) 試験結果</li> <li>(5) 試験結果</li> <li>(6) 試験結果</li> <li>(7) 試験相案</li> <li>(7) 試験格容</li> <li>(8) 試験結果</li> <li>(9) 試験方法</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>(4) 試験内容</li> <li>(5) 試験方法</li> </ul>	
<ul> <li>(5) 坑亘と屋外での転送レート比較</li> <li>1.2.2 基置局切替え時の応答時間の変化</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(2) 試験機材</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(1) 試験機材</li> <li>(2) 試験満累</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(4) 試験機材</li> <li>(5) 試験結果</li> <li>(5) 試験結果</li> <li>(6) 試験方法</li> <li>(7) 試験内容</li> <li>(8) 試験結果</li> <li>(9) 試験方法</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>(4) 試験内容</li> <li>(5) 試験方法</li> <li>(5) 試験方法</li> <li>(6) 試験方法</li> <li>(7) 試験機材</li> </ul>	
<ul> <li>(5) 坑道と屋外での転送レート比較</li> <li>1.2.2 基置局切替え時の応答時間の変化</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(2) 試験機材</li> <li>(3) 試験機器配置</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(3) 試験機材</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>(4) 試験機材</li> <li>(5) 試験方法</li> <li>(5) 試験方法</li> <li>(6) 試験結果</li> <li>(7) 試験内容</li> <li>(8) 試験結果</li> <li>(9) 試験方法</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>(4) 試験内容</li> <li>(5) 試験方法</li> <li>(1) 試験内容</li> <li>(2) 試験方法</li> <li>(3) 試験結果</li> <li>(4) 試験内容</li> <li>(5) 試験方法</li> <li>(5) 試験方法</li> <li>(6) 試験方法</li> <li>(1) 試験機材</li> <li>(2) 試験洗器配置</li> <li>(3) 試験機材</li> <li>(3) 試験機材</li> </ul>	

1.2.5 無線 LAN システムによる通信データのまとめ	40
(1) 置局設計のための主な設計データ	40
設置距離:中継なく 240m まで通信可能	40
通信品質:通信速度が下がる場所が局所的に存在するが実用上問題ない	40
伝搬遅延:多重反射、周波数選択性が認められるが通信に影響を与えるほどではない.	40
転送速度:今回の測定系では、応答時間 30msec 以下、転送速度 10Mbps 以上	40
(2) 運用のための主な設計データ	41
移動速度:10km/h でマルチホップ通信可能	41
大量伝送:映像信号の送受信が可能	41
長距離通信:固定局の追加・切り替えにより動的に延長可能	41
2. 無線通信技術の地下坑道内での評価手法	42
2.1 円筒面での解析方法	42
2.2 モデル化とパラメータ検討	43
2.2.1 シミュレーションのケース設定	43
2.2.2 方形形状モデルとパラメータ	45
2.2.3 トンネルモデルとパラメータ	47
2.3 円筒面反射を考慮した解析手法によるシミュレーション	49
2.3.1 実測結果	49
2.3.2 シミュレーション結果	49
2.3.3 レイごとの結果	52
2.3.4 シミュレーションの誤差評価	57
2.4 アンテナの評価	59
2.5 トンネル内の減衰特性	61
2.6 遠距離での評価	63
2.7 遮蔽盤による影響の評価	66
2.8 まとめ	70
2.9 円筒面中心付近における反射係数	71
3. 測定結果一覧	73
3.1 遅延特性測定結果(トンネル内部、実機)	73
3.2 遅延特性測定結果(地上、実機)	73
3.3 障害物の影響(トンネル、フレネルゾーン遮蔽、シグナルジェネレータ)	73
3.4 障害物の影響(地上、フレネルゾーン遮蔽、実機)	73
3.5 障害物の影響(トンネル、アンテナ遮蔽、実機)	73
3.6 障害物の影響(トンネル、アンテナ遮蔽、シグナルジェネレータ)	74
3.7 障害物の影響(地上、アンテナ遮蔽、シグナルジェネレータ)	74
3.8 遅延特性測定結果(トンネル内部、実機、周波数変更)	74
3.9 アンテナ変更(パッチアンテナ(固定側)とコリニアアンテナ(移動側)の組み合	わせ)
	74

参考文献112
---------

図 1-1	実験に使用した坑道の入口と出口付近	$\dots 2$
図 1-2	測定場所	3
🛛 1-3	機器設置概念図	4
🙁 1-4	試験結果(アンテナ位置中央)	6
🛛 1-5	試験結果(アンテナ位置壁際)	7
🗵 1-6	周波数選択性の確認	8
図 1-7	試験機器配置図	9
図 1-8	伝搬路の利得 Gp (dB)	. 11
🙁 1-9	伝搬路の利得 Gp (dB) (距離を対数で表示 )	.12
図 1-10	坑道中央と自由空間(屋外)の伝搬路利得比較	.13
図 1-11	試験機器配置図	.14
図 1-12	伝搬路の利得 Gp (dB)	.16
🙁 1-13	伝搬路の利得 Gp (dB)(距離を対数表示)	.17
🗷 1-14	坑道壁際と自由空間(屋外)伝搬路の利得比較	.18
図 1-15	坑道中央と坑道壁際伝搬路の利得比較	.19
図 1-16	試験場所の航空写真図	.20
図 1-17	試験風景	.20
図 1-18	試験機器配置図	.21
図 1-19	伝搬路の利得 Gp(dB)	.23
図 1-20	伝搬路の利得 Gp(dB)(距離を対数で表示)	.24
🗷 1-21	坑道中央、坑道壁際と自由空間の伝搬路利得比較	.25
図 1-22	試験器記配置図	.26
🙁 1-23	試験概念図	.27
🗷 1-24	遮蔽版の位置と信号強度の計測結果	.28
🗷 1-25	機器配置概念図	.30
図 1-26	スループット測定結果(平均値)	.30
図 1-27	機器配置概念図	.30
図 1-28	スループット測定結果(平均値)	.30
<b>図</b> 1-29	機器配置概念図	.31
<b>⊠</b> 1-30	スループット測定結果(平均値)	.31
¥ 1-31	機器配置概念図	.31
¥ 1-32	スループット測定結果(平均値)	.31
🗷 1-33	機器配置概念図	.32
<b>⊠</b> 1-34	スループット測定結果(平均値)	.32
図 1-35	機器配置概念図	.32
図 1-36	スループット測定結果(平均値)	.32
図 1-37	試験機器配置概念図	.33

# 図目次

図 1-38	応答時間と移動位置の関係	35
図 1-39	試験機器配置概念図	
図 1-40	信号強度と位置の関係	
図 1-41	機器配置概念図(時速 3.6km)	
図 1-42	機器配置概念図(時速 10km)	
<b>⊠</b> 1-43	移動中の映像	
<b>⊠</b> 2-1	曲率を有する面の扱い	
<b>⊠</b> 2-2	最短延べ距離のレイを選択	43
<b>⊠</b> 2-3	アンテナパターン パッチアンテナ	
<b>2</b> -4	方形形状モデル	45
<b>2</b> -5	反射回数変動による結果 - 方形形状モデル	
図 2-6	トンネルモデル	
図 2-7	反射回数変動による結果 - トンネルモデル	
図 2-8	実測結果	
🗷 2-9	シミュレーション結果	51
<b>⊠</b> 2-10	直接波からの遅延波 (d=235m)	53
🗷 2-11	到来方向 水平面 (d=235m)	54
図 2-12	到来方向 垂直面 (d=235m)	55
🗷 2-13	反射係数	56
🗷 2-14	実測との誤差評価	57
<b>⊠</b> 2-15	シミュレーション結果 - アンテナの影響	59
<b>⊠</b> 2-16	減衰定数との比較	62
図 2-17	遠距離における方形形状モデルの伝搬利得	64
図 2-18	フレネルゾーンの説明(直接波のフレネルゾーン)	65
図 2-19	直接波の第1フレネルゾーンの半径(C 点は中間地点,d1=d2)	65
図 2-20	遮蔽盤配置モデル	66
🗷 2-21	遮蔽盤の位置による伝搬利得の推移	67
図 2-22	第1フレネルゾーンの領域	67
<b>⊠</b> 2-23	各レイの電界強度(横軸:実部、縦軸:虚部 )	
<b>⊠</b> 2-24	全レイを合計した電界強度(横軸:実部、縦軸:虚部)	69
図 2-25	円筒面での反射	71
図 2-26	焦点領域の検討	72

表 目 次

表 1-1	使用機材4
表 1-2	送信側スペクトラムアナライザ設定4
表 1-3	受信スペクトラムアナライザ設定5
表 1-4	試験機材
表 1-5	スペクトラムアナライザ設定10
表 1-6	試験機材14
表 1-7	スペクトラムアナライザ設定14
表 1-8	試験機材
表 1-9	スペクトラムアナライザ設定21
表 1-10	試験機材
表 1-11	スペクトラムアナライザ設定27
表 1-12	試験機材
表 1-13	転送速度一覧表
表 1-14	試験機材
表 1-15	試験機材
表 1-16	固定側機材
表 1-17	移動機側機材
表 2-1	ケース一覧表
表 2-2	<b>シミュレーション条件</b>
表 2-3	誤差 1 [dB]
<b>表</b> 2-4	障害物の位置によるレイの本数
表 2-5	シミュレーションモデルの評価70
表 2-6	今後の課題

1. まえがき

無線 LAN 技術の普及により、無線 LAN 設備を用いた自営無線通信網の構築が容易となり、産業用途での画像伝送、センシングおよび制御情報伝送への使用も検討されている。

トンネルを無線通信環境として捉えた場合に、その特異性として導波効果が指摘されており、 導波路理論を用いた伝搬損失の理論検討や実測もなされている[1-4]。一方、幾何光学近似に基づ くレイトレース法を用いた予測も広く行われ[5-6]、近年では広帯域伝送を意識した遅延特性の評 価も行われている[7-10]。しかしながら、導波路理論および幾何光学近似のそれぞれの適用範囲に 関しては明確にされておらず、長距離トンネルにおける適用可能性の是非については、未だに各 論の域を抜け出ているとは言いがたい。これらを踏まえると、トンネル内電波伝搬に関しても、 他の多重波伝搬環境と同じく、実験抜きでの予測は非現実的であるといわざるを得ない。 そこで、本研究調査では、トンネル内における無線 LAN による自営通信網構築に関する基礎的な

実験を行い、その特性を評価した。

実験に用いた坑道は馬蹄形トンネルで、入口から出口までほぼ直線で約 250m である。入口から出口まで形状はほぼ一様で、高さは約 5m、幅は約 6m である。坑道内の床面及び壁面はコンクリートで覆われ電源ケーブルや突起物などはない。

実験は通信距離による電波伝搬特性を把握する「通信距離を把握するためのデータ」と、発信 局、基地局が移動することを想定したことによる特性を把握するための「移動速度の影響を把握 するためのデータ」の2つの実験シリーズよりなる。

「通信距離を把握するためのデータ」では遅延特性と伝搬利得距離特性を取得する実験を行った。伝搬利得距離特性は馬蹄形トンネル壁面の影響を考慮して坑道中央部と坑道壁面近傍(坑道 壁面から 1m の位置)におけるデータを取得するとともに、自由空間で取得した同一条件のデータ との比較を行った。

「移動速度の影響を把握するためのデータ」では実用化が進められている無線 LAN システムを 使用することを想定し、無線局と基地局が移動することの影響を考慮した特性データを把握した。 無線局と基地局が移動する影響として、中継局のマルチホップの影響と基地局切り替え時の影響、移動速度による通信品質に与える影響についてのデータを取得した。

- 1.1 通信距離を把握するためのデータ
- 1.1.1 遅延特性

坑道内 240m 区間での電波伝搬の遅延特性の把握を目的にデータを取得した。

(1) 環境条件

本実験で使用した坑道を図 1-1 に示す。

坑道は入口から出口までほぼ直線で約250mである。入口から出口まで形状はほぼ一様で、高さは約5m、幅は約6mである。坑道内の床面及び壁面はコンクリートで覆われ電源ケーブルや突起物などはない。

本実験では入口から数mの地点に信号発信局を設置し、そこから無線 LAN 信号を発信し、 順に 60m、120m、180m、240mの地点で受信した信号の強度を測定した。



図 1-1 実験に使用した坑道の入口と出口付近

(2) 測定場所

本実験では、基地局や中継局の設置位置を検討するために、坑道内中央に基地局と端末 を設置する場合(以下、坑道中央)と、坑道壁際に基地局と端末を設置する場合(以下、坑 道壁際)の2つで計測を行った。何れの場合も、端末を移動しながら計測するため中継局は 坑道壁際に設置して実験を行った(図1-2参照)。



図 1-2 測定場所

# (3) 試験方法

1) 試験機材

# 本実験で使用した機器を表 1-1 に示す。

機材	メーカー	型式	数量	備考	
メッシュ型無線機	ストリックス	OWS2400-20	2台		
スペクトラムアナライザ	アドバンテスト	R3162	1台		
スペクトラムアナライザ	マイクロニクス	MSA458	1台		
4.9GHz 帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロス含) E面:40°H 面:70° 同軸ケーブル 8DFB 5m 付属	
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	5m	ケーブルロス:約3~4dB	
その他電源ケーブル等					

表 1-1 使用機材

## 2) 試験機器配置

機器設置概念図を図 1-3 に示す。

使用周波数:IEEE802.11j(4920MHz 固定)



図 1-3 機器設置概念図

## 3) 試験設定

試験装置の設定を表 1-2 と表 1-3 に示す。

表 1-2 送信側スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920MHz
スパン	100MHz
リファレンスレベル	10.0dBm
掃引時間	100s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	25dB

中心周波数	4920MHz
スパン	100MHz
リファレンスレベル	-5dBm
掃引時間	100s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	5dB

表 1-3 受信スペクトラムアナライザ設定

## (4) 試験結果

#### 1) アンテナ位置中央

図 1-4 に試験結果を示す。

本図は、0m 地点から実機により無線 LAN 信号を送信し、60m、120m、180m、および 240m の各測定点で受信信号をスペクトラムアナライザで測定した結果である。240m 地点で、-64dBm と実用的に十分な強度の信号が観測された。また、顕著な周波数選択 性も観測されず、本規格のメッシュ型無線 LAN システムは坑道内直線距離で 240m まで使用可能であることが分かる。

#### 2) アンテナ位置壁際

図 1-5 に試験結果を示す。

本図は、0m 地点から実機により無線 LAN 信号を送信し、60m、120m、180m、および 240m の各測定点で受信信号をスペクトラムアナライザで測定した結果である。

このとき、発信用アンテナと受信用アンテナは坑道壁際 1m の位置に設置し、坑道中央 (壁から 3.15m の位置)に送受信アンテナを設置した場合と比較した。

図に示す通り、240m 測定点での信号強度は-60dBm でアンテナ位置中央の場合と比べ て著しい信号の減衰は観測されず、また、周波数選択性も観測されなかったことから、 この間で坑道壁際にアンテナを設置することが可能であることが分かった。

3) 周波数選択性の確認

図 1-6 に試験結果を示す。

本図は、坑道出口付近の 235m で送信チャンネル毎の受信波形とシミュレーション() による周波数別の遅延拡がりを比較したものである。

この結果、この距離では各チャンネルとも十分な電力が受信され、周波数の選択性に 問題はないと考えられるが、受信距離が延びた場合の周波数選択性について、さらに長 い距離で実測してシミュレーション結果と比較を行う必要がある。

;シミュレーションについては次節参照。



受信信号強度:

送信信号	60m 受信波形	120m 受信波形	180m 受信波形	240m 受信波形
7.87dBm	-48dBm	-55dBm	-63dBm	-64dBm

図 1-4 試験結果(アンテナ位置中央)



送信信号	60m 受信波形	120m 受信波形	180m 受信波形	240m 受信波形
7.84dBm	-48dBm	-49dBm	-60dBm	-60dBm

図 1-5 試験結果(アンテナ位置壁際)



d=235m(Tx:5m,Rx:240m)

Frequency[GHz]

🗙 :シミュレーション結果

図 1-6 周波数選択性の確認

1.1.2 伝搬利得距離特性(坑道中央)

0~60m 区間の坑道を用いた電波伝搬特性試験からは坑道内で電波伝搬路における顕著な 周波数選択性は観測されなかった[11]。この結果を受け、実機の中心周波数 4.92GHz の信号 を使用して 0~240m までの伝搬利得距離特性を測定した。

本実験では、坑道内中央を直線で 240m 移動して測定する場合と、坑道内壁際を直線で 240m 移動して測定する場合がある。それは、坑道中央と坑道壁際とで伝搬利得に差異があ るか、あるとすればどの程度かを観測し、今後の置局設計などに資することを想定している。

(1) 試験内容

伝搬利得距離特性の坑道中央部での特性データを取得した。

(2) 試験方法

・坑道中央を 1m/s の定速で移動しながら、4.92GHz 信号スペクトルを連続測定した。

1) 試験機材

試験機材を表 1-4 に示す。

機材	メーカー	型式	数量	備考
信号発生器	HP	8350B 86290B	1台	RF Plug-In 2.0-18.6GHz
スペクトラムアナライザ	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz 帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロ ス含) E面:40°H面: 70° 同軸ケーブル8DFB5m付 属
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	$5 \mathrm{m}$	<b>ケーブルロス</b> :約3~4dB
その他電源ケーブル等				

表 1-4 試験機材

## 2) 試験機器配置

試験機器配置図を図 1-7 に示す。



(1m/s(3.6Km/h)で定速測定)



# 3) 試験設定

スペクトラムアナライザ設定を表 1-5 に示す。

中心周波数	4920.14MHz
スパン	Zero Span
掃引時間	Sweep Mode: Single Sweep Sweep Time:30s
検波	Detector: Sample
VBW	300KHz
分解能帯域幅	100KHz

#### 表 1-5 スペクトラムアナライザ設定

#### (3) 試験結果

伝搬路の利得 Gp (dB)を図 1-8 と図 1-9 に示す。

また、坑道中央と自由空間(屋外)の伝搬路利得比較を図 1-10 に示す。

図 1-8 は、横軸に発信アンテナからの距離、縦軸に伝搬路の利得をとり、伝搬利得の距離特性を表したグラフである。同じ結果を横軸対数でプロットしたものが図 1-9 である。 この結果、受信信号は 20m 近くまで坑道内反射の影響を受けずほぼ直線的に減衰し、その 後坑道内の反射の影響を受けていることが分かる。

図 1-10 は、自由空間(通信路の側面および上部に反射体がない屋外)での同様の実験結 果と比較したものである。屋外でも 20m 近辺から地面の反射波の影響を受けはじめ、その 影響が徐々に大きくなっている。坑道内では 20m を過ぎたあたりから坑道内壁面各方向か らの反射の影響を受けていることが分かる。また、50m 近辺以降では坑道内の方が信号強 度の減衰が抑えられていることが分る。

ただし、測定は人が台車を押しながら行ったため、動きだし近辺数 m では測定誤差を含む。特に、横軸対数表示ではその誤差が拡大されて見える。



図 1-8 伝搬路の利得 Gp (dB)



図 1-9 伝搬路の利得 Gp (dB) (距離を対数で表示)



図 1-10 坑道中央と自由空間(屋外)の伝搬路利得比較

1.1.3 伝搬利得距離特性(坑道壁際)

伝搬利得距離特性の坑道壁際(坑道壁面から1m)での特性データを取得した。

#### (1) 試験内容

実機の中心周波数 4.92GHz の信号を使用して、坑道内壁際に発信局を設置し、同じく 壁際に受信局を設置した場合の伝搬利得距離特性を測定した。

(2) 試験方法

・坑道壁際を定速(1m/s)で移動しながら、信号スペクトルを連続測定した。

1) 試験機材

試験機材を表 1-6 に示す。

機材	メーカー	型式	数量	備考
信号発生器	HP	8350B 86290B	1台	RF Plug-In 2.0-18.6GHz
スペクトラムアナライザ	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz 帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロ ス含) E面:40°H面: 70° 同軸ケーブル8DFB 5m付 属
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	5m	<b>ケーブルロス</b> :約3~4dB
その他電源ケーブル等				

## 表 1-6 試験機材

# 2) 試験機器配置

試験機器配置図を図 1-11 に示す。





(1m/s(3.6Km/h)で定速測定)

## 図 1-11 試験機器配置図

3) 試験設定

スペクトラムアナライザ設定を表 1-7 に示す。

表 1-7 スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920.14MHz
スパン	Zero Span

掃引時間	Sweep Mode: Single Sweep Sweep Time:30s
検波	Detector: Sample
VBW	300KHz
分解能帯域幅	100KHz

## (3) 試験結果

伝搬路の利得 Gp (dB)を図 1-12 と図 1-13 に示す。

また、坑道中央と自由空間(屋外)の伝搬路利得比較を図 1-14 に示し、坑道中央と坑 道壁際伝搬路の利得比較を図 1-15 に示す。

自由空間(屋外)での試験状況は後述する。

これらは、前述の坑道中央の試験結果同様、横軸に発信アンテナからの距離、縦軸に伝搬路の利得をとり、伝搬利得の距離特性をプロットした結果である。坑道中央が発信点から 20m 近辺であったのに比べ坑道壁際は 6m 近辺と、早くから特に側面方向からと考えられる反射波の影響が観測された。

ただし、測定は人が台車を押しながら行ったため、動きだし近辺数 m では測定誤差を含む。特に、横軸対数表示ではその誤差が拡大されて見える。











図 1-14 坑道壁際と自由空間(屋外)伝搬路の利得比較



図 1-15 坑道中央と坑道壁際伝搬路の利得比較

1.1.4 伝搬利得距離特性(自由空間)

坑道内での電波伝搬特性と自由空間(屋外)での電波伝搬特性の比較を目的に以下の実験を 実施した。

実験条件は前記までの坑道内の試験条件と同様とした。

(1) 環境条件

試験場所の航空写真に送受信点を記入したものを図 1-16 示す。

試験場所は海に面した平坦な土地であるが、若干の起伏がある。表面はアスファルト舗 装されている。



図 1-16 試験場所の航空写真図

試験風景を図 1-17 に示す。



送信点

移動台車(受信点) 図 1-17 試験風景 送信点と遮蔽物

(2) 試験方法

1) 試験機材

試験機材を表 1-8 に示す。

機材	メーカー	型式	数量	備考
信号発生器	HP	8350B 86290B	1台	RF Plug-In 2.0-18.6GHz
スペクトラムアナライザ	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz 帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロ ス含) E面:40°H面: 70° 同軸ケーブル8DFB5m付 属
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	5m	<b>ケーブルロス</b> :約3~4dB
その他電源ケーブル等				

表 1-8 試験機材

2) 試験機器配置

試験器記配置図を図 1-18 に示す。

屋外自由空間を定速で移動しながら、信号スペクトルを測定した。





3) 試験設定

表 1-9 にスペクトラムアナライザ設定を示す。

中心周波数	4920.00MHz			
スパン	Zero Span			
掃引時間	Sweep Mode: Single Sweep			
נייוניאר	Sweep Time:30s			
検波	Detector: Sample			
VBW	300KHz			
分解能帯域幅	100KHz			

|--|

# (3) 試験結果

伝搬路の利得 Gp (dB)を図 1-19 に示した。また、図 1-20 は同一内容を対数表記して 示す。 また、坑道中央と坑道壁際伝搬路及び自由空間(屋外)の利得比較を図 1-21 に示す。

これらは、前述同様、横軸に発信アンテナからの距離、縦軸に伝搬路の利得をとり、 伝搬利得の距離特性をプロットしたグラフである。屋外では、20m 近辺まで伝搬利得が 減衰し、その後地面からの反射波の影響を受けながら次第に減衰している結果が得られ た。

坑道中央、坑道壁際、及び屋外の測定結果を比較すると、坑道壁際では早くから反射 波の影響を受け、坑道中央では屋外と同様 20m 近辺以降から反射波の影響を受け始める。 坑道内中央では、地上の反射波の影響と内壁の反射波の影響を重畳して受けていると考 えられる。また、坑道内は屋外に比べて長い距離で信号強度を維持していた。



図 1-19 伝搬路の利得 Gp(dB)



図 1-20 伝搬路の利得 Gp(dB)(距離を対数で表示)



図 1-21 坑道中央、坑道壁際と自由空間の伝搬路利得比較

#### 1.1.5 遮蔽体の影響

伝搬利得に対して、発信局と受信局の間に障害物が存在することを想定した実験データを 取得した。

#### (1) 試験内容

坑道内で無線通信を行う場合、発信局と受信局の間で通信を阻害する状態が発生するこ とが考えられる。そこで、発信アンテナの前面に遮蔽板を設置し、240m 地点での受信信 号強度によりその影響を測定する実験を行った。

#### (2) 試験方法

1) 試験機材

## 試験機材を表 1-10 に示す。

機材	メーカー	型式	数量	備考
信号発生器	HP	8350B 86290B	1台	RF Plug-In 2.0-18.6GHz
スペクトラムアナライザ	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz 帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロス 含) E 面:40°H 面:70° 同軸ケーブル 8DFB 5m 付 属

## 表 1-10 試験機材

2) 試験機器配置

試験器記配置を図 1-22 に示す。



図 1-22 試験器記配置図

3) 円盤遮蔽体設置位置

試験概念図を図 1-23 に示す。赤い点線で囲まれた部分は第一フレネルゾーンを示し、 送受信アンテナの中心を軸とした回転楕円体である。理想的な自由空間ではこの回転楕 円対の中にほとんどの電磁波のエネルギーが伝搬し、この部分を遮蔽すると理論的には 損失が 16dB 生じる[11]。



#### 4) 試験設定

表 1-11 にスペクトラムアナライザ設定を示す。

中心周波数	4920.46MHz
スパン	10MHz
掃引時間	Sweep Time:0.1s
検波	Detector: Sample

表 1-11 スペクトラムアナライザ設定

(3) 試験結果

図 1-24 に遮蔽版の位置と信号強度の計測結果を示す。

これは、横軸に発信点からの遮蔽体の設置位置を、縦軸に信号強度(RSSI)を採ったグラフである。

遮蔽体は直径 1m の円形電波反射板で、中心が送信アンテナの中心と重なる様に設置した。この遮蔽体をアンテナ送信点から 4m の位置から順に 1m 間隔で遠ざけながら 240m 地点での受信強度を測定した。なお、4m 点から開始している理由は、0~3m に遮蔽体を 設置した場合 240m 地点で受信信号とノイズ信号を分離できなかったためである。

図 1-24 の破線は、遮蔽体が無い場合の 240m 地点での受信信号強度である。遮蔽体が 発信点に近づくほどフレネルゾーンの遮蔽率が高くなるため、240m 受信点での信号強度 は減衰する。グラフでは、遮蔽体が無い場合の信号強度に近づいている。




 $\frac{28}{28}$ 

1.2 移動速度の影響を把握するためのデータ

1.2.1 マルチホップ転送レート

(1) 試験内容

移動速度が置局切り替え時のデータ転送レートに与える影響を調査するために本実験を 実施した。実験はホップなし、1 ホップ、2 ホップの3 通りで実施した。

ホップなしでは、発信局を 0m 地点、受信局を 240m 地点に設置し両局で FTP による連 続データ転送を行い、その時の転送レートを測定した。

1 ホップでは、120m 地点に中継局を設置し、発信局から中継局に局の切り替えが発生 するそこから 10m の地点に受信局を設置して同様に転送レートを測地した。

2 ホップでは 120m 地点に中継局 1 を、240m 地点に中継局 2 を設置し、中継局 1 から 中継局 2 に局の切り替えが発生するそこから 10m の地点に受信局を設置して転送レート を測定した。

また、比較のため、屋外でも同様の設定で転送レートを測定した。

# (2) 試験方法

1) 試験機材

表 1-12 に試験機材を示す。

機材	メーカー	型式	数 量	備考
メッシュ型無線機	ストリックス	OWS2400-20	2台	
4.9GHz 帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロ ジー	AT719	2 <b>本</b>	利得:9.5dBi(ケーブルロス 含) E面:40°H面:70° 同軸ケーブル 8DFB 5m付属
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	5m	ケーブルロス : 約 3 ~ 4dB
PC	ネットワーク診断 ツール		2台	FTP 中の転送レートを計測

表 1-12 試験機材

#### (3) 坑道内試験結果

1) 0 ホップ

図 1-25 に機器配置概念図を示す。このケースでは基地局同士が単独で対向している。 つまりホップ回数は0回となる。ホップ回数が0回なのでホップによる伝送遅延は生じ ない。



図 1-25 機器配置概念図

図 1-26 にスループット測定結果の平均値を示す。



2) 1 ホップ

図 1-27 に機器配置概念図を示す。このケースでは基地局同士が1つの中継局を経由 して対向している。つまりホップ回数は1回となる。



図 1-27 機器配置概念図

図 1-28 にスループット測定結果の平均値を示す。



図 1-28 スループット測定結果(平均値)

3) **2 ホップ** 

図 1-29 に機器配置概念図を示す。このケースでは基地局同士が2つの中継局を経由 して対向している。つまりホップ回数は2回となる。



図 1-29 機器配置概念図

図 1-30 にスループット測定結果の平均値を示す。



図 1-30 スループット測定結果(平均値)

# (4) 屋外試験結果

1) **0 ホップ** 

図 1-31 に機器配置概念図を示す。このケースでは基地局同士が単独で対向している。 つまりホップ回数は0回となる。ホップ回数が0回なのでホップによる伝送遅延は生じ



図 1-32 スループット測定結果(平均値)

2) 1 ホップ

図 1-33 に機器配置概念図を示す。このケースでは基地局同士が1つの中継局を経由 して対向している。つまりホップ回数は1回となる。



図 1-33 機器配置概念図

図 1-34 にスループット測定結果の平均値を示す。



図 1-34 スループット測定結果(平均値)

### 3) 2 ホップ

図 1-35 に機器配置概念図を示す。このケースでは基地局同士が2つの中継局を経由 して対向している。つまりホップ回数は2回となる。



図 1-36 にスループット測定結果の平均値を示す。



図 1-36 スループット測定結果(平均値)

### (5) 坑道と屋外での転送レート比較

表 1-13 に転送速度一覧表を示す。屋外の場合にはホップ数が増加に伴いするプットの 減少が見られた。しかしながら坑道内では端末 基地局(ダウンロード)ではホップ数の 増加に従ってスループットの減少が見られたが、基地局 端末(アップロード)では2ホ ップ、0ホップ、1ホップの順番にスループットが減少した。また、坑道内の2ホップを 除いて、ダウンロードの方がアップロードよりもスループットが早かった。

スループットがホップ数に比例して変化する屋外に比較すると、坑道内部のスループッ

トは屋外とは異なった環境の影響を受けていると思われる。

	0 ホップ		1 ホップ		2 ホップ		
実施場所	基置局→ 端末	端末→ 基地局	基置局→ 端末	端末→ 基地局	基置局→ 端末	端末→ 基地局	
坑道内	15.48	19.34	14.05	17.33	16.69	15.47	Mbps
屋外	19.04	20.16	15.35	18.42	9.46	11.52	Mbps

表 1-13 転送速度一覧表

1.2.2 基置局切替え時の応答時間の変化

(1) 試験内容

中継局切替り時における応答時間変化を測定した。

- (2) 試験方法
  - 1) 試験機材

表 1-14 に試験機材を示す。

機材	メーカー	型式	数量	備考
メッシュ型無線機	ストリックス	OWS2400-2 0	2台	
4.9GHz 帯パッチ型ア ンテナ	アンテナテクノロ ジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロ ス含) E面:40°H面: 70° 同軸ケーブル8DFB5m付 属
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	5m	<b>ケーブルロス</b> :約3~4dB
PC	ネットワーク診断 ツール		2台	Ping 応答時間を連続計測

表 1-14 試験機材

2) 試験機器配置

図 1-37 に機器配置概念図を示す。



図 1-37 試験機器配置概念図

(3) 試験結果

図 1-38 に応答時間と位置の関係を示す。

これは、横軸に発信点からの距離、縦軸に応答時間を採り、測定結果をプロットしたものである。発信局から端末に PING を発し、連続的に応答時間を測定した。一方、端末は定速で 240m 移動した。トンネル内の中間点には置局切替え点を設置し、置局切替え前後を含めて応答時間を測定した。

その結果、開始から終了までの端末からの応答時間はほぼ 10msec から 20msec の間で あり、置局切替え点の前後においても顕著な応答時間の遅延は観測されなかった。



図 1-38 応答時間と移動位置の関係

မ ပ 1.2.3 移動速度の通信品質への影響

(1) 試験内容

無線 LAN システムを坑道内での比較的低速の移動体での利用を想定し、人間の歩行に よる移動速度 3.6km/h と速度 10km/h での移動による影響の影響を把握する実験を行った。 この移動速度の通信品質への影響を確認するために移動体に無線機を搭載して信号強度を 連続的に測定した。

- (2) 試験方法
  - 1) 試験機材

表 1-15 に試験機材を示す。

機材	メーカー	型式	数量	備考			
メッシュ型無線機	ストリックス	ストリックス 0WS2400-20					
4.9GHz 帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得 : 9.5 d Bi(ケーブルロ ス含)E 面 : 40 ° H 面 : 70 ° 同軸ケーブル 8DFB 5m 付属			
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	5m	ケーブルロス:約 3~4dB			
PC	ネットワーク診断 ツール		2台	信号強度を連続計測			

#### 表 1-15 試験機材

### 2) 試験機器配置



図 1-39 に試験機器配置概念図を示す。



# (3) 試験結果

図 1-40 に信号強度と位置の関係を示す。

これは、横軸に距離、縦軸に信号強度を採り移動体の受信信号強度をプロットしたもの である。測定結果は、移動体の速度を 3.6km/h とした場合と、実用に近い 10km/h とした 場合の 2 通りある。この結果、0~240m の移動中の受信信号強度はどちらも-50dBm から -30dBm で推移し大きな違いがなかったことから、移動速度を 10km/h としてもこの間の 通信が可能であることが分った。



図 1-40 信号強度と位置の関係

37

# 1.2.4 映像信号伝送

トンネル内部で移動局を移動させつつ映像データの品質低下と移動速度の影響についての 基礎的な特性を把握するために、移動時の映像データの転送を実施した。

#### (1) 試験内容

固定基地局をトンネル内に設置し、トンネル内部で移動局を移動させつつ映像を転送した。速度は時速 3.6km と時速 10km で行った。

### (2) 試験方法

1) 試験機材

表 1-16 に固定側機材を、表 1-17 に移動機側機材を示す。

機材	メーカー	型式	数量	備考
メッシュ型無線機	ストリックス	OWS2400-20	3台	
4.9GHz 帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	5本	利得:9.5dBi(ケーブル ロス含) E面:40°H面:70° 同軸ケーブル 8DFB 5m 付属
ビデオデコーダ	ヒビノデータコム	HD-900AVR	1台	MPEG-4 圧縮
ハードディスクレコーダ	パイオニア	DVR-330H	1台	映像録画用
液晶モニター	ヒビノデータコム	MS-10S	1台	映像確認用

表 1-16 固定側機材

表 1-17 移動機側機材

機材	メーカー	型式	数量	備考
メッシュ型無線機	ストリックス	OWS2400-10	1台	
4.9GHz 帯コリニア型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT750	1本	利得:4dBi(ケーブ ルロス含) E面:40°H面:360° 同軸ケーブル 8DFB 3m 付属
ビデオエンコーダ	ヒビノデータコム	HD-900AVR	1台	MPEG-4 圧縮
CCD カラーカメラ	ヒビノデータコム	STC-260X	1台	38万画素 CCD

2) 試験機器配置

図 1-41 に 機器配置概念図(時速 3.6km)を、図 1-42 に機器配置概念図(時速 10km) を示す。

Ind (中継局) -2-



図 1-41 機器配置概念図(時速 3.6km)



図 1-42 機器配置概念図(時速 10km)

(3) 試験結果

画素数は 640×480 ピクセル、圧縮方式として MPEG4 を採用した。平均データ転送 レートは 15Mbps で、中継局の前後を含み画像停止や画像の乱れは観測されなかった。 図 1-43 に移動中の映像を示す。



図 1-43 移動中の映像

1.2.5 無線 LAN システムによる通信データのまとめ

(1) 置局設計のための主な設計データ

設置距離:中継なく240mまで通信可能

アンテナ中央では、240m 地点で、-64dBm と実用的に十分な強度の信号 が観測された。また、顕著な周波数選択性も観測されず、本規格のメッシ ュ型無線 LAN システムは坑道内直線距離で 240m まで使用可能であるこ とが分かる。

アンテナ壁際 1m では、240m 測定点での信号強度は-60dBm でアンテナ 位置中央の場合と比べて著しい信号の減衰は観測されず、また、周波数選 択性も観測されなかったことから、この間で坑道壁際にアンテナを設置す ることが可能であることが分かった。

アンテナ中央では、235m 地点で、各チャンネルとも十分な電力が受信 され、周波数の選択性に問題はないと考えられるが、受信距離が延びた場 合の周波数選択性について、さらい長い距離で実測してシミュレーション 結果と比較を行う必要がある

通信品質:通信速度が下がる場所が局所的に存在するが実用上問題ない

発信局から端末に PING を発し、連続的に応答時間を測定した。一方、 端末は定速で 240m 移動した。トンネル内の中間点には置局切替え点を設 置し、置局切替え前後を含めて応答時間を測定した。開始から終了までの 端末からの応答時間はほぼ 10msec から 20msec の間であり、置局切替え 点の前後においても顕著な応答時間の遅延は観測されなかった。

伝搬遅延:多重反射、周波数選択性が認められるが通信に影響を与えるほどではない アンテナ中央では、受信信号は20m近くまで坑道内反射の影響を受けず ほぼ直線的に減衰し、その後坑道内の反射の影響を受けていることが分か る。

> アンテナ壁際では、坑道中央が発信点から 20m 近辺であったのに比べ坑 道壁際は 6m 近辺と、早くから特に側面方向からと考えられる反射波の影 響が観測された。

転送速度:今回の測定系では、応答時間 30msec 以下、転送速度 10Mbps 以上

発信局から端末に PING を発し、連続的に応答時間を測定した。一方、 端末は定速で 240m 移動した。トンネル内の中間点には置局切替え点を設 置し、置局切替え前後を含めて応答時間を測定した。開始から終了までの 端末からの応答時間はほぼ 10msec から 20msec の間であり、置局切替え 点の前後においても顕著な応答時間の遅延は観測されなかった。

屋外の場合にはホップ数が増加に伴いするプットの減少が見られた。し かしながら坑道内では端末 基地局(ダウンロード)ではホップ数の増加 に従ってスループットの減少が見られたが、基地局 端末(アップロード) では2ホップ、0ホップ、1ホップの順番にスループットが減少した。また、 坑道内の2ホップを除いて、ダウンロードの方がアップロードよりもスル ープットが早かった。

スループットがホップ数に比例して変化する屋外に比較すると、坑道内 部のスループットは屋外とは異なった環境の影響を受けていると思われる。

(2) 運用のための主な設計データ

移動速度:10km/h でマルチホップ通信可能

移動体の速度を 3.6km/h とした場合と、実用に近い 10km/h とした場合 の 2 通りある。この結果、0~240m の移動中の受信信号強度はどちらも -50dBm から-30dBm で推移し大きな違いがなかったことから、移動速度 を 10km/h としてもこの間の通信が可能であることが分った。

#### 大量伝送:映像信号の送受信が可能

画素数 640 × 480 ピクセル、圧縮フォーマット MPEG、転送レート

15Mbps、中継局の前後を含み画像停止や画像の乱れは観測されなかった。 長距離通信:固定局の追加・切り替えにより動的に延長可能

試験結果を総合的に判断して、240m 間隔で配置した固定基地局間を移動局が時速 10km で走行しつつ、通信が可能であると判断した。

2. 無線通信技術の地下坑道内での評価手法

遠隔制御で運用が想定される周波数や断面の大きさから、地下坑道を評価するのに最も適して いるのはレイトレーシング法である[2]。検討されるカーブを持つ坑道で解析を行うと、通常レイ トレース計算には曲率を有する面での解析ができず、正しい伝搬状況を解析できない可能性があ る。そこで円筒面での解析を含めた方法を試行し、同様な断面をもつトンネル内で実測値と比較 することで、坑道内での伝搬環境を評価できるようなシミュレーションに発展させ、また坑道内 での伝搬環境の傾向を考察する。

# 2.1 円筒面での解析方法

通常のレイトレース法では構造物のモデル化は平面のみを扱うため、図 2-1 のような曲率を有 する構造物に対して反射係数を求める場合には、構造物の構成面を複数の平面板に分割して平面 として扱う。ただし、近似精度をあげようとして分割する平面板の大きさを小さくすれば、反射 係数を求める際に、『面が波長に対して十分に大きい』というレイトレース法の仮定が成り立たな くなるため、検討を要する。



図 2-1 曲率を有する面の扱い

今回検討する坑道は円筒面により形成されるため、本検討ではレイトレース法に円筒面として の反射の散乱現象を追加する。通常電波は球面状に発生するが、曲率を有する面で反射する点で は歪んだ波面となって放射される。曲率半径を用いることによって、その歪みを考慮した反射波 を計算することができる。

通常のレイトレース法では、曲率を有する面は複数の平面に分割しレイを探索するが、本検討 では通常のレイトレース法から求めた全てのレイの中でレイの延べ距離が最短なレイを選び(図 2-2) 円筒面での反射波として考える。



a) 従来法

b) 提案法

### 図 2-2 最短延べ距離のレイを選択

2.2 モデル化とパラメータ検討

2.2.1 シミュレーションのケース設定

シミュレーションのケースとして「方形形状モデル」と「トンネルモデル」の2つのモデルで 検討する。「方形形状モデル」はトンネルのような導波管の基本モデルとして既に多くの研究がさ れているモデルである。方形形状モデルでのシミュレーションは既往技術での適用性を検討する ために行う。「トンネルモデル」は実環境を模擬した、断面が馬蹄型のモデルである。円筒面をモ デル化することで方形形状モデルよりも実際の実験環境に近い形で評価できる。

各シミュレーションケースは表 2-1 の通りである。アンテナ位置はトンネル断面の中央と壁側の2ケースがあり、壁側とは壁際 1m に設定したものである。

妥当なシミュレーション値を得られる計算条件を検討するため、最大反射回数を変動させた予 備シミュレーションを行い、その結果をもとに最適な計算条件を決定する。次に、本検討で新た に追加した円筒面の解析方法の妥当性を検討するため、従来のレイトレース計算(円筒面反射なし) と円筒面を考慮したレイトレース計算(円筒面反射あり)を比較する。さらに、坑道内伝搬に影響が あると思われるアンテナの影響評価、実測していない 240m 以遠での遠距離伝搬特性の評価、お よび遮蔽盤の影響評価を行う。

解析条件の組み合わせ	方形形状モデル		トンネルモデル		
	中央	壁側	中央	壁側	
最大反射回数変動1回~6回					
伝搬距離 0m~1,000m					
円筒面反射あり/なし					
アンテナの影響 パッチ / 無指向性					
遠距離伝搬 0m ~ 10,000m					
遮蔽盤による影響					

表 2-1 ケース一覧表

また各シミュレーションにおけるその他の共通の条件は表 2-2 の通りである。

周波数	4920MHz ( =0.061m)
アンテナ	パッチアンテナ (図 2-3)
	無指向性アンテナ
Tx・Rx 間距離	0m~240m(0.03m 間隔、1802 ポイント)
Tx・Rx 高さ	2.2m
材質	コンクリート

表 2-2 シミュレーション条件



図 2-3 アンテナパターン パッチアンテナ

なお、本研究では上記のパラメータが設定可能なレイトレース法を使用した電波伝搬シミュレー タ RapLab(株式会社構造計画研究所開発・販売)を利用している。

### 2.2.2 方形形状モデルとパラメータ

方形形状モデルの詳細を図 2-4 に示す。簡単な形状であるために、計算は非常に高速に行える が、今回のような曲率を有する面をもつような断面形状には正確に対応できない。また、方形形 状モデルは平面のみで構成されているため、回折は考慮せず反射だけを考慮したシミュレーショ ンとなる。通常トンネル内伝搬では反射波がかなり影響するため、反射回数を多く考慮した方が 精度が向上する[3]。ここでは、反射1回~6回によるシミュレーションを行い、反射回数による 違いを確認する。



図 2-4 方形形状モデル

シミュレーションの結果を図 2-5 に示す。グラフは 0.03m ごとに受信点を移動していき、1m 内での中央値をとっている。また、図中「Ref:1」は最大反射回数が1回であり直接波と反射回数 が1回のレイが含まれており、「Ref:2」は最大反射回数が2回で、直接波と反射回数1回および 2回のレイが含まれていることを示す。送受信位置が中央の場合は、反射回数3回以上で変動の ばらつきが収束している。また、壁側の場合は、反射回数が増えるにしたがって変動幅が大きく なり、多重反射波の影響が出ている。したがって、少なくとも反射回数3回以上のシミュレーシ ョンが必要であると推測される。



a)中央



b)壁側

図 2-5 反射回数変動による結果 - 方形形状モデル

# 2.2.3 トンネルモデルとパラメータ

トンネルモデルの詳細を図 2-6 に示す。トンネル内では反射を繰り返して伝搬していくモード伝 搬であり反射波が大きく影響を及ぼすため、最大反射回数を何回にするかを検討する必要がある。 送受信間距離が遠くになればなるほど、最大反射回数を大きくする必要がある。トンネルモデル で反射回数を1回~6回まで変動させた結果が図 2-7 である。「Ref:1」は最大反射回数が1回で あり、「Ref:2」は最大反射回数が2回である。送受信位置が中央と壁側の両方とも、最大反射回 数が4回以上になるとだんだんと収束している。反射回数が増えるに従って変動幅は小さくなり、 変動の周期は短くなる。この結果から本検討では最大反射回数が6回で十分収束しているといえ る。



図 2-6 トンネルモデル



b) 壁側 図 2-7 反射回数変動による結果 - トンネルモデル

2.3 円筒面反射を考慮した解析手法によるシミュレーション

#### 2.3.1 実測結果

実測は約 0.03m ごとに受信し、10m 内で中央値をとっている(図 2-8)。図中の「Center」は 送受信位置がトンネル断面の中央であり、「Side」はトンネル断面の壁側に配置されていることを 示す。「Center\_#1」とは1回目の実測結果で、実測は全部で3回行っている。送受信位置が20m 付近までは中央と壁側の両方ともに3dB~8dBの差がある。50m 以遠では中央と壁側の両方の平 均的な伝搬利得は同じになり、約40m を境に伝搬利得の傾きが変わっていることがわかった。 また、壁側では30m 付近でピークが見られる。



#### 2.3.2 シミュレーション結果

最大反射回数を 6 回として、トンネルモデル(円筒面反射あり/円筒面反射なし)と方形形状モ デルの比較を行う(図 2-9)、「Measurement」が実測結果、「Tunnel 円筒面反射あり」がトンネ ルモデルで円筒面反射のアルゴリズムを加味したもの、「Tunnerl 円筒面反射なし」はトンネルモ デルで円筒面反射のアルゴリズムを加えず、従来のレイトレース計算で求めたもの、「Square」 は方形形状モデルでの結果、「Free Space」は自由空間損失(直接波の損失)である。送受信位置 が中央の時、各シミュレーションと実測値は自由空間損失よりも伝搬利得が高くなっている。つ まりトンネル内で繰り返し反射が行われ、減衰せずに伝搬していることがわかる。また円筒面反 射ありの伝搬利得が大きな値となり、方形形状モデルのほうが実測値に近い値を示した。これは 送受信位置が中央の場合、送信点と受信点が円の中心点付近になり、円筒面での反射係数がレイ トレース計算では正確に計算できず(詳細は 2.9 )、伝搬利得が非常に大きな値となっていたため である。方形形状モデルと実測値の結果がほぼ同じ傾向を示す理由は、方形形状モデルでの反射 点が馬蹄型トンネルでの反射点とほぼ同じ位置であるためと考えられる。 一方、送受信位置が壁側では同様に各シミュレーションと実測値は自由空間損失よりも伝搬利 得が高くなっている。円筒面反射なしの伝搬利得は距離に従って上昇していき、実測値との隔た りが大きくなっている。これは円筒面を分割した平面で複数のレイが発生しているためだと考え られる。円筒面反射ありと実測値は同じような傾向を示している。また方形形状モデルも同じよ うな傾向を示すが、変動幅は方形形状モデルのほうが大きくなった。





の 空 (m) 図 2-9 シミュレーション結果

#### 2.3.3 レイごとの結果

各レイの伝搬利得からトンネル内伝搬での特性を詳しくみてみる。受信位置が 235m において 各レイの伝搬利得の結果を載せる。図 2-10 は、直接波からの遅延波の電力と時間の分布 (インパ ルス応答)であり、「円筒面反射あり」はトンネルモデルで円筒面の反射がある計算、「円筒面反 射なし」は従来のレイトレース計算、「Square」は方形形状モデルである。通常遅延時間が大き い場合、伝搬利得が小さくなるが、全モデルとも遅延時間が大きくても、伝搬利得が大きいまま のレイが多くあることがわかる。また、トンネルモデルの円筒面反射ありは円筒面反射なしや方 形形状モデルに比べて、5dB~20dB 程度大きなレイがあることがわかる。これは中央と壁側の両 方ともにみられる。

レイの水平面到来方向(図 2-11)では、送受信点が±180度方向に位置しているので、送信点 がある方向から±9度の間からしかレイがきていない。また垂直面(図 2-12)では 90度付近、つ まり送信点と受信点の高さが同じであるため、送信点のある方向から±7度の間からしかレイが きていないことがわかる。これは中央、壁側の両方とも同じような結果となった。





図 2-10 直接波からの遅延波 (d=235m)





図 2-11 到来方向 水平面 (d=235m)



a) 中央



図 2-12 到来方向 垂直面 (d=235m)

反射回数の多いレイのほうが、伝搬距離が長くなり、また反射損失の回数も増えるため、伝搬 利得は小さくなる。壁面で反射するレイと天井・大地で反射するレイを比べると壁面で反射する レイのほうが伝搬利得は大きい。これは反射波の入射角度は同じであるが、反射面と偏波面の角 度が異なるためである。 送信アンテナは垂直偏波、つまり垂直に電波が送信されており、受信アンテナでも垂直偏波で 受信している。このことを考えると壁面での反射波は入射面(レイが入射する面)に対して TE 波、天井大地面での反射波は入射面に対して TM 波で伝搬する。ここに入射角度による反射係数 を図 2-13 に示す。「TM」は入射面に対して水平、「TE」は入射面に対して垂直成分である。たと えば 80 度で入射した電波は反射係数の TE 波成分は 0.87、TM 波成分は 0.34 であり、壁面で反 射した波のほうが大きな伝搬利得で受信されることがわかる。



2.3.4 シミュレーションの誤差評価

どのシミュレーションモデルが実測により近く推定できたかを定量的に評価するため、一般的 に誤差の累積分布で評価を行うことが多い。実測と各種シミュレーションの差分を誤差として、 誤差の累積度数分布(図 2-14)で評価を行う。また、1 の値を表 2-3 に示す。中央の場合は、 トンネルモデルの円筒面反射ありが一番差が大きくなり、方形形状モデルの誤差は 8.28dB とな った。壁側の場合は、トンネルモデルの円筒面反射ありが一番差が少なく 8.15dB で、円筒面反 射なし、方形形状モデルも近い誤差となった。通常電波は周波数によらず 5dB ~ 10dB ほどの振動 があるため、誤差が約8dB という結果からシミュレーション結果は実測値と十分近いといえる。



	送受信位置		
	中央  雪		
トンネルモデル 円筒面反射あり	12.66	8.15	
トンネルモデル 円筒面反射なし	9.50	8.41	
方形形状モデル	8.28	8.21	

表 2-3 誤差 1 [dB]

# 2.4 **アンテナの評価**

送受信位置が中央と壁側の両方の実測結果(図 2-8)をみると、距離が 40m 付近で伝搬利得の傾 きが変わっている。この傾きが使用しているパッチアンテナの指向性の影響かどうかを調査する ため、パッチアンテナと無指向性アンテナとのシミュレーション比較を行った。0.03m 間隔で受 信点を配置し、0.1m の中央値で図 2-15 に示す。「PatchAntenna」は実測と同じパッチアンテナ を使用、「OmniAntenna」は指向性が一様であるオムニアンテナを使用している。



a) 中央



図 2-15 シミュレーション結果 - アンテナの影響

アンテナの指向性の影響は近距離で見られることが多いが、本結果から距離によらず指向性に よる大きな影響は見られない。最大反射回数を変動させたグラフ(図 2-7)より近距離付近では 最大反射回数が1回と6回で大きな差が見られない。また自由空間損失とも大きな差異がみられ ない。つまり近距離では直接波の影響が非常に大きく、アンテナ指向性の影響はあまりないこと がわかった。このことからトンネル内伝搬では、ある距離から伝搬利得の傾きが変わる(ブレー クポイント)現象があることがわかった。

#### 2.5 トンネル内の減衰特性

実測結果とシミュレーション結果の妥当性を検討するため、トンネル内伝搬での近似による減 衰特性との比較を行う。トンネル内伝搬では平面波が壁面で反射を繰り返しながら伝搬する。壁 面での反射という観点から減衰特性を調べることができる。本検討では垂直偏波での実験を行っ ているため、垂直偏波における単位長あたりの減衰量 *a*v[dB/m]を、トンネル断面の幅 *a*[m]、高さ *b*[m]を用いて、以下の式で求める[4]。

$$\alpha_{v} = K_{v} \lambda^{2} \left( \frac{1}{a^{3} \sqrt{\varepsilon_{r}^{*} - 1}} + \frac{\varepsilon_{r}^{*}}{b^{3} \sqrt{\varepsilon_{r}^{*} - 1}} \right) \qquad [dB / m] \qquad \dots \neq 2^{-1}$$

ここで r\*は複素誘電率で、比誘電率 rと導電率 を用いて、 $\varepsilon^* = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_o}$ で表せる。Kvは断面 形状によって違う値で、今回のような馬蹄型トンネルでは Kv=5.09 と報告されている。ここでは トンネルを囲む損失媒体はコンクリートで $\varepsilon_r = 6.76$ 、 $\sigma = 2.3 \times 10^{-3}$ の値を用いると、減衰定数は  $\alpha_r = 4.57 \times 10^{-4}$  [dB/m]となる。図 2-16 には距離 dに対して式 2-1 から求めた減衰定数 と定数項(オ フセット) により式 3-2 の近似直線 (「Attenuation Coeff」ラベル ) として示した。

$$P_r = \alpha d + \beta \quad [dB] \qquad \dots \vec{r} 2^2$$

減衰定数の近似直線と送受信位置が中央の実測値の傾きは30m以遠で大体あっているが、壁側で は傾きに差がある。

また、トンネル表面に凹凸がある場合には、トンネル断面の幅・高さ方向に対して、表面の粗 さの平均高 h<sub>1</sub>・h<sub>2</sub>[m] を用い、表面の粗さによる傾き roughが求まる。

$$\alpha_{\text{rough}} = 4.343\pi^2 \lambda \left\{ \left(\frac{h_1}{a^2}\right)^2 + \left(\frac{h_2}{b^2}\right)^2 \right\} \dots \overrightarrow{\text{rt}} 2-3$$

最終的な は

$$\alpha = \alpha_v + \alpha_{rough} \qquad \dots \text{ t} 2^-4$$

となり、近似曲線は式 2-2 から求める。図中の「rough=10cm」とは表面の粗さの平均値を 10cm としている。このように、表面が粗くなる程その影響も大きくなることがわかる。



### 2.6 遠距離での評価

送受信が中央と壁側の両方とも方形形状モデルでのシミュレーション結果が実測に近い値を示し たため、この方形形状モデルで10kmまでの解析を行った。最大反射回数が6回から10回までの 結果を図2-17に示す。「Ref:6」とは最大反射回数が6回で、反射回数5回以下も含めている。1km では反射回数6回で十分であったが、5km以遠では反射回数10回で収束していないため、大体の 傾向を推測するためには10回以上の解析が必要であると考えられる。伝搬利得の傾きはほぼ一定 であり、実測結果の40m付近で見られた伝搬利得の傾きの変化とは異なる結果となった。送受信 が中央の場合は方形形状モデルと実測結果で40m付近までの傾きが異なっている。壁側の実測結 果は20m付近まで非常に大きな伝搬利得で自由空間損失よりも大きく、この部分を除けばほぼシ ミュレーションと同じ傾きで推移している。




図 2-17 遠距離における方形形状モデルの伝搬利得

例えば-100dBを受信電力の閾値とした場合、送受信が中央では 200m までは通信可能領域、6km 以降は通信不可能領域といえる。一方、送受信が壁側では 200m までは通信可能領域、2km 以降は 通信不可能領域といえる。ただし、遠距離になるとトンネルの壁面や天井が送受信点の第1フレネ ルゾーン内(図 2-18)に入る可能性がある。この第1フレネルゾーンが確保されていないと、たと えば直接波では送信点から受信点への直接波のエネルギーは、レイトレース計算で求めた伝搬利得 とは異なるので、レイトレース計算で推定できるか否かは今後の課題である。参考までに直接波の 第nフレネルゾーン半径 Rnの式は式 2-5 から求められ、直接波の第1フレネルゾーン半径を図 2-19 に示す。

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \qquad \dots \texttt{I} 2-5$$

は波長、d1はTxからC点までの距離、d2はC点からRxまでの距離となっている。



図 2-18 フレネルゾーンの説明(直接波のフレネルゾーン)



図 2-19 直接波の第1フレネルゾーンの半径(C点は中間地点,d1=d2)

#### 遮蔽盤による影響の評価 2.7

送受信の間に直径1mの電波遮蔽用円盤を送信側4mの位置から16mまで1mごとに移動させ ながら配置し伝搬利得の変化を評価する。図 2-20 のように遮蔽盤は送受信の直線上の中心に置く。



図 2-20 遮蔽盤配置モデル

方形形状モデル、トンネルモデルの円筒面反射ありの結果と実測を比較する(図 2-21)。実測 と方形形状モデルの両者とも、遮蔽盤の位置が4mでは損失が大きい。これは直接波が遮蔽され、 また直接波のエネルギーが確保されるエリア(第1フレネルゾーン)がほぼ遮蔽される影響で、 大きく損失を受けているためである。4mの位置での第1フレネルゾーンは0.98mで1mの遮蔽 盤によりほとんど遮蔽される(図 2-22)。シミュレーションではフレネルゾーンの概念が入って いないが、直接波を含むレイが多く遮蔽され、伝搬利得が小さくなっている。トンネルモデルの 円筒面反射ありでは遮蔽位置が6m以遠では伝搬利得に変動はなかった。方形形状モデルは伝搬 利得の絶対値は実測値に近いが、遮蔽盤の位置を変動した伝搬利得の推移は実測と異なる傾向と なった。



図 2-22 第1フレネルゾーンの領域

反射回数ごとのレイの数を表 2-4 に示す。遮蔽盤が 4m の位置では反射回数が 6 回のレイが 2 本ある。遮蔽盤の位置が遠距離になるに従い、レイの本数が増えていることがわかる。一般的に 反射回数の少ないレイのほうが伝搬利得は大きい。遮蔽盤が 5m から 6m に移動すると、反射 4 回のレイが 2本、遮蔽物が 6m から 7m に移動すると、反射 3 回のレイが 2本、遮蔽盤が 10m か ら 11m に移動すると、反射 2 回のレイが 2 本発生する。レイの経路をみると、伝搬利得の大きい 壁面での反射波であった。このタイミングで全レイを合計した伝搬利得は大きく変わることが予 想される。

遮蔽盤	反射回数					
の位置	2回	3 🛛	4 🛛	5回	6回	計
4m					2	2
$5 \mathrm{m}$				8	8	16
6m			2	16	12	30
7m		2	4	20	12	38
8m		3	8	20	12	43
9m		6	8	20	12	46
10m		8	8	20	12	48
11m	2	12	8	20	12	54
12m	2	12	8	20	12	54
13m	4	12	8	20	12	$\overline{56}$
14m	4	12	8	20	12	$\overline{56}$

表 2-4 障害物の位置によるレイの本数

遮蔽盤が 5m、6m、7m、10m、11m の位置での各レイの電界強度を図 2-23 に示す。また、各 レイをベクトル和で合計した電界強度を図 2-24 に示す。遮蔽盤が 6m から 7m に移動した際に、 反射 3 回の伝搬利得の大きなレイが増えるが、この位相は 6m の全レイの電界強度の位相と逆向 きで相殺されてしまうため、遮蔽盤が 7m の位置では伝搬利得が小さくなっている。同じように 遮蔽盤が 11m に移動すると、反射回数が 2 回のレイが大きく影響し、遮蔽盤が 10m の時より伝 搬利得が上昇していることがわかる。





2.8 まとめ

アンテナがトンネル断面の中央に位置している場合、方形形状モデルでのシミュレーションで 大体の傾向はつかめることが分かった。トンネルモデルの円筒面反射ありの解析結果では、円筒 面で発生するレイの反射係数が発散するため、実測結果と隔たりがあった。方形形状モデルと実 測結果は似た傾向となった。方形形状モデルのほうが変動幅は大きい。

アンテナがトンネル断面の壁側に位置している場合、トンネルモデルの円筒面反射ありのシミ ュレーションで妥当な結果となった。円筒面反射ありの解析結果は方形形状モデルと似た傾向と なった。トンネルモデルの円筒面反射なしの解析結果は遠距離になるに従い、伝搬利得が上昇し ていく結果となった。

シミュレーションモデルの評価を表 2-5 にまとめた。送受信位置が中央、壁側の両方ともに妥 当な結果となったのが方形形状モデルであった。

	送受信位置		
	中央	壁側	
トンネルモデル 円筒面反射あり			
トンネルモデル 円筒面反射なし			
方形形状モデル			

表 2-5 シミュレーションモデルの評価

また、今後の課題を表 2-6 にまとめた。シミュレーション方法の課題として、円筒面の中心付 近におけるモデル化の検討や、送受信点距離が長い場合にはレイトレース計算では近似できない 可能性があるため、導波管モードでの計算検討などがあげられる。さらに入力パラメータの課題 として、実際のトンネル壁面には経年劣化による表面の粗さがあり、この表面の粗さを考慮した シミュレーションの検討や、材質の含水率による電気的特性の変化の影響をどのように考慮する かなどの課題も残っている。

今後の課題		備考	
	円筒面中心付近におけるモ	他の手法をレイトレース計算に組み込むことで対応	
シミュレ	デル化の検討	可能であり、また中心付近におけるシミュレーション	
シミュレ	(送受信位置が中心位置に	結果は大きく変わる可能性がある。精度を上げるため	
ち注の理	ある場合の問題)	には重要な課題である。	
りない味	遠距離伝搬における、シミ	検討する必要があるが、現状のシミュレーションでも	
ALC:	ュレーション方法の検討	十分に実測に近い値を示しているので、費用対効果は	
		薄い。	
λ カパラ	壁面の表面の粗さへの対応	粗さを測定することは難しいが、表面の粗さによって	
スカハフ	検討	どのくらい伝搬利得が変動するかはシミュレーショ	
アークの		ン可能である。定性的な変動を押さえておくことでも	
山木正思		精度向上に寄与すると考えられる。	
	材質の電気的特性への対応		
	検討	調査するためには多くの実験およびシミュレーショ	
	ンとの比較を要するが、実際の現場との誤差もあるこ		

表 2-6 今後の課題

		とから、必要な労力に対しての効果は薄い。
経	年劣化による壁面の形状	トンネルの施工方法や場所(海に近いなど)によりば
	化への対応検討	らつきが大きい。多くのサンプルが必要になるため、
		費用対効果は薄い。

2.9 円筒面中心付近における反射係数

送受信が中央にある場合は、トンネルの円弧の中心位置に送受信が配置されていて、壁側より も反射係数が1を超える現象(焦点: Caustics)が多く発生しており、伝搬利得が大きな値を示 していると予想される。ここでは反射係数が1を超える現象、つまり焦点領域について、どの場 合に超えるかの指標を検討する。円筒面での反射係数(式 2-6)は、平面での反射係数 R に減衰 係数(赤枠)をかけて求める。



## 図 2-25 円筒面での反射

$$\rho_1^{r} = s', \quad \frac{1}{\rho_2^{r'}} = \frac{1}{s'} + \frac{1}{f_2} \qquad \dots \vec{r} \sqrt{2-7}$$

 $\rho_1^i 、 \rho_2^i :$ 入射波面での主曲率半径 球面波なので s'

 $f_{1,2}$ :焦点距離、s':1つ前の散乱点から反射点  $Q_R$ までの距離

減衰係数が 1 を超える場合、円筒面での反射係数が大きな値になりこの式は使えないが、トン ネルでは円筒面で $\rho_1^r = s'$ となるため、式 2-8 の $\rho_1^r$ の項は 1 を超えることはない。

$$\mathbf{E}^{r}(S) = E^{i}(Q_{R}) \cdot \widetilde{R} \sqrt{\frac{\rho_{1}^{r}}{(\rho_{1}^{r} + s)}} \sqrt{\frac{\rho_{2}^{r}}{(\rho_{2}^{r} + s)}} e^{-jks} \qquad \dots \mathbf{\vec{x}} 2-8$$

 $\rho_2^{\mathsf{r}}$ の項を横軸に反射係数を縦軸に図示したものが図 2-26 である。 $\rho_2^{\mathsf{r}}$ の項が 0 に近い値を示すと 反射係数が 1 を超えているのがわかった。この指標を用いれば、焦点付近か否かを判断でき、焦





b) 壁側



- 3. 測定結果一覧
- 3.1 遅延特性測定結果(トンネル内部、実機)
  - 1- トンネル、60m、アンテナ位置中央・中央
  - 1- トンネル、120m、アンテナ位置中央・中央
  - 1- トンネル、180m、アンテナ位置中央・中央
  - 1- トンネル、240m、アンテナ位置中央-中央
  - 1- トンネル、60m、アンテナ位置壁側・壁側
  - 1- トンネル、120m、アンテナ位置壁側-壁側
  - 1- トンネル、180m、アンテナ位置壁側-壁側
  - 1- トンネル、240m、アンテナ位置壁側-壁側
  - 1- (参考)トンネル、240m付近、アンテナ位置中央・中央
  - 1- (参考)トンネル、180m付近、アンテナ位置中央・中央
  - 1- (参考)トンネル、180m付近、アンテナ位置壁側・壁側

### 3.2 遅延特性測定結果(地上、実機)

- 2- 地上、60m
- 2- 地上、120m
- 2- 地上、180m
- 2- 地上、240m
- 3.3 障害物の影響(トンネル、フレネルゾーン遮蔽、シグナルジェネレータ)
  - 3- 3m 校正值
  - 3- 遮蔽物なし
  - 3- 16m地点
  - 3- 15m地点
  - 3- 12m地点
  - 3- 10m地点
  - 3- 8m地点
  - 3- 7m地点
  - 3- 6m地点
  - 3- 5m地点
  - 3- 4m地点
- 3.4 障害物の影響(地上、フレネルゾーン遮蔽、実機)
- 3.5 障害物の影響(トンネル、アンテナ遮蔽、実機)
  - 5- 3m 校正値
  - 5- 遮蔽物なし
  - 5- 送信側:上50%、受信側:上50%

- 5- 送信側:上50%、受信側:なし
- 5- 送信側:なし、受信側:上50%
- 5- 送信側:左50%、受信側:左50%
- 5- 送信側: 左 50%、受信側: なし
- 5- 送信側:なし%、受信側:左50%
- 3.6 障害物の影響(トンネル、アンテナ遮蔽、シグナルジェネレータ)
  - 6- 3m 校正値
  - 6- 遮蔽物なし
  - 6- 送信側:上50%、受信側:上50%
  - 6- 送信側:上 50%、受信側:なし
  - 6- 送信側:なし、受信側:上50%
  - 6- 送信側:左50%、受信側:左50%
  - 6- 送信側:左50%、受信側:なし
  - 6- 送信側:なし%、受信側:左50%
- 3.7 障害物の影響(地上、アンテナ遮蔽、シグナルジェネレータ)
  - 7- 3m 校正值
  - 7- 遮蔽物なし
  - 7- 送信側:上50%、受信側:上50%
  - 7- 送信側:上50%、受信側:なし
  - 7- 送信側:なし、受信側:上50%
  - 7- 送信側:左50%、受信側:左50%
  - 7- 送信側: 左 50%、受信側: なし
  - 7- 送信側:なし%、受信側:左50%
- 3.8 遅延特性測定結果(トンネル内部、実機、周波数変更)
  - 8- 送信側 4920MHz (参考值)
  - 8- 受信側 4920MHz
  - 8- 受信側 4940MHz
  - 8- 受信側 4960MHz
  - 8- 受信側 4980MHz
  - 8- 受信側 5040MHz
  - 8- 受信側 5060MHz
  - 8- 受信側 5080MHz

3.9 アンテナ変更(パッチアンテナ(固定側)とコリニアアンテナ(移動側)の組み合わせ)

## 1.遅延特性測定結果(トンネル内部、実機)

試験構成



<u>試験項目</u> ①送信側スペクトラムアナライザにて、送信波形を観測。 ②受信側スペクトラムアナライザにて、受信波形を観測。※その際、端末側無線機電源OFF ③無線機にPCを接続し、RSSI及び無線伝送レートを測定。

#### 試験機材

機材	メーカー	型式	数量	備考
メッシュ型無線機	ストリックス	OWS2400-20	2台	
スペクトラムアナライザ(送信側)	アドバンテスト	R3162	1台	
スペクトラムアナライザ(受信側)	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得 : 9. 5dBi(ケーブルロス含) E面 : 40°H面 : 70° 同軸ケーブル8DFB 5m付属
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	5m	ケーブルロス:約3~4dB
その他電源ケーブル等				

#### 試験設定

#### 送信側スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920MHz他適宜
スパン	100MHz
リファレンスレベル	10.0dBm
掃引時間	100s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	25dB

#### 受信側スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920MHz他適宜
スパン	100MHz
リファレンスレベル	-15dBm
掃引時間	1s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	0dB

## 1- トンネル内、60m、アンテナ位置中央・中央の結果









<u>実機測定値</u>			
RSSI	-31dBm	-30dBm	-31dBm
伝送レート	Mbps	Mbps	Mbps

## 1- トンネル内、120m、アンテナ位置中央・中央の結果





-	J
-	j.



RSSI	-38dBm	-38dBm	-37dBm			
伝送レート	6Mbps	6Mbps	6Mbps			

## 1- トンネル内、180m、アンテナ位置中央・中央の結果









<u>実機測定値</u>			
RSSI	−43dBm	-42dBm	-41dBm
伝送レート	6Mbps	6Mbps	6Mbps

## 1- トンネル内、240m、アンテナ位置中央・中央の結果









<u> </u>			
RSSI	−37dBm	-36dBm	
伝送レート	6Mbps	6Mbps	

## 1- トンネル内、60m、アンテナ位置壁側・壁側の結果









<u>実機測定值</u>				
RSSI	-32dBm	-32dBm	-31dBm	
伝送レート	6Mbps	-	-	

## 1- トンネル内、120m、アンテナ位置壁側-壁側の結果









<u>実機測定值</u>				
RSSI	-33dBm	-33dBm	−33dBm	
伝送レート	6Mbps	6Mbps	6Mbps	

## 1- トンネル内、180m、アンテナ位置壁側-壁側の結果









<u>実機測定值</u>				
RSSI	-46dBm	−44dBm	-43dBm	
伝送レート	6Mbps	6Mbps	6Mbps	

## 1- トンネル内、240m、アンテナ位置壁側-壁側の結果









<u>実機測定值</u>				
RSSI	-41dBm	-40dBm	-41dBm	
伝送レート	6Mbps	6Mbps	6Mbps	

1- (参考)トンネル、240m 付近、アンテナ位置中央・中央





84

1- (参考)トンネル、180m 付近、アンテナ位置中央・中央

 $\frac{3}{20}$ 







<u>実機測定値</u>		
RSSI		
伝送レート		

1- (参考)トンネル、180m 付近、アンテナ位置壁側-壁側









<u>実機測定値</u>	<u>z機測定值</u>			
RSSI				
伝送レート				

## 2.遅延特性測定結果(地上、実機)

#### <u>試験構成</u>



#### <u>試験項目</u> ①送信側スペクトラムアナライザにて、送信波形を観測。 ②受信側スペクトラムアナライザにて、受信波形を観測。※その際、端末側無線機電源OFF ③無線機にPCを接続し、RSSI及び無線伝送レートを測定。

#### <u>試験機材</u>

機材	メーカー	型式	数量	備考
メッシュ型無線機	ストリックス	OWS2400-20	2台	
スペクトラムアナライザ	アドバンテスト	R3162	1台	
スペクトラムアナライザ	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロス含) E面:40°H面:70° 同軸ケーブル8DFB 5m付属
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	5m	ケーブルロス:約3~4dB
その他電源ケーブル等				

#### 試験設定

送信側スペクトラムアナライザ	設定
中心周波数	4920MHz
スパン	100MHz
リファレンスレベル	10.0dBm
掃引時間	100s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	25dB

#### 受信側スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920MHz
スパン	100MHz
リファレンスレベル	-15dBm
掃引時間	100s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	0dB

## 2- 地上、60m









#### <u>実機測定値</u>

88

RSSI	-48dBm	-50dBm	-49dBm		
伝送レート	54Mbps	54Mbps	54Mbps		

## 2- 地上、120m











<u>実機測定值</u>				
RSSI	-51dBm	-52dBm	-51dBm	
伝送レート	54Mbps	54Mbps	54Mbps	

## 2- 地上、180m











RSSI	-61dBm	-61dBm	-61dBm	
伝送レート	54Mbps	54Mbps	54Mbps	

## 2- 地上、240m











<u>美惯测定值</u>					
RSSI	-62dBm	-62dBm	-63dBm		
伝送レート	54Mbps	54Mbps	54Mbps		

### 3.障害物の影響(トンネル、シグナルジェネレータ) 使用周波数:4920MHz(CW)



<u>試験項目</u> ①送信側スペクトラムアナライザにて、送信波形を観測。 ②受信側スペクトラムアナライザにて、受信波形を観測。※その際、端末側無線機電源OFF ③無線機にPCを接続し、RSSI及び無線伝送レートを測定。

#### 試験機材

機材	メーカー	型式	数量	備考
シグナルジェネレータ	HP	-	1台	
スペクトラムアナライザ	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロス含) E面:40°H面:70° 同軸ケーブル8DFB 5m付属

・送信点から4~16m位置に直径1m円盤を設置し、電波遮断



3- 3m 校正值



3-93

## 3- 遮蔽物なし



3- 16m地点



3- 15**m**地点



3- 12m地点



## 3- 10m地点



3- 8m地点







3- 6m地点



## 3- 5m地点



3- 4m地点



## 4.障害物の影響(地上、実機) <sub>試験構成</sub>



<u>試験項目</u> ①送信側スペクトラムアナライザにて、送信波形を観測。 ②受信側スペクトラムアナライザにて、受信波形を観測。※その際、端末側無線機電源OFF ③無線機にPCを接続し、RSSI及び無線伝送レートを測定。

### )

機材	メーカー	型式	数量	備考
メッシュ型無線機	ストリックス	OWS2400-20	2台	
スペクトラムアナライザ	アドバンテスト	R3162	1台	
スペクトラムアナライザ	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロス含)E面:40°H面:70° 同軸ケーブル8DFB 5m付属
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	5m	ケーブルロス:約3~4dB
その他雷源ケーブル等				

#### 試験設定

試験機材

	送信側ス	ペクトラム	ムアナライ	イザ設定
--	------	-------	-------	------

中心周波数	4920MHz
スパン	100MHz
リファレンスレベル	10.0dBm
掃引時間	100s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	25dB

#### 受信側スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920MHz
スパン	100MHz
リファレンスレベル	-15dBm
掃引時間	100s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	0dB

・送信点から4~16m位置に直径1m円盤を設置し、電波遮断











#### <u>実機測定値</u>

RSSI	-71dBm	-62dBm	-63dBm		
伝送レート	36Mbps	48Mbps	48Mbps		

# 5.障害物の影響(トンネル、アンテナ遮蔽、実機) <sup>試験構成</sup>



<u>試験項目</u> ①送信側スペクトラムアナライザにて、送信波形を観測。 ②受信側スペクトラムアナライザにて、受信波形を観測。※その際、端末側無線機電源OFF

③無線機にPCを接続し、RSSI及び無線伝送レートを測定。

#### 試験機材

機材	メーカー	型式	数量	備考
メッシュ型無線機	ストリックス	OWS2400-20	2台	
スペクトラムアナライザ(送信側)	アドバンテスト	R3162	1台	
スペクトラムアナライザ(受信側)	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロス含) E面:40°H面:70° 同軸ケーブル8DFB 5m付属
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	5m	ケーブルロス:約3~4dB
その他電源ケーブル等				

#### 試験設定

#### 送信側スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920MHz他適宜
スパン	100MHz
リファレンスレベル	10.0dBm
掃引時間	100s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	25dB

#### 受信側スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920MHz他適宜
スパン	100MHz
リファレンスレベル	−15dBm
掃引時間	1s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	0dB

## ・アルミホイルにて、アンテナ面をカバー



5- 3m 校正値



5- 遮蔽物なし



5- 送信側:上50%、受信側:上50%



## 5- 送信側:上50%、受信側:なし


5- 送信側:なし、受信側:上 50%



- 3 100
- 5- 送信側:左50%、受信側:左50%



5- 送信側:左50%、受信側:なし



### 5- 送信側:なし%、受信側:左50%



## 6.障害物の影響(トンネル、アンテナ遮蔽、シグナルジェネレータ)

使用周波数:4920MHz(CW)



<u>試験項目</u> ①送信側スペクトラムアナライザにて、送信波形を観測。 ②受信側スペクトラムアナライザにて、受信波形を観測。※その際、端末側無線機電源OFF ③無線機にPCを接続し、RSSI及び無線伝送レートを測定。

#### 試験機材

機材	メーカー	型式	数量	備考
シグナルジェネレータ	アジレントテクノロジー	N5181A	1台	
スペクトラムアナライザ	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロス含) E面:40°H面:70° 同軸ケーブル8DFB 5m付属

・アルミホイルにて、アンテナ面をカバー



6- 3m 校正値



6- 遮蔽物なし



6- 送信側:上50%、受信側:上50%



### 6- 送信側:上50%、受信側:なし







3-103

# 6- 送信側:左50%、受信側:左50%



6- 送信側:左50%、受信側:なし



### 6- 送信側:なし%、受信側:左50%



# 7.障害物の影響(地上、アンテナ遮蔽、シグナルジェネレータ)

使用周波数:4920MHz(CW)



<u>試験項目</u> ①送信側スペクトラムアナライザにて、送信波形を観測。 ②受信側スペクトラムアナライザにて、受信波形を観測。※その際、端末側無線機電源OFF ③無線機にPCを接続し、RSSI及び無線伝送レートを測定。

#### <u>試験機材</u>

機材	メーカー	型式	数量	備考
シグナルジェネレータ	アジレントテクノロジー	N5181A	1台	
スペクトラムアナライザ	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロス含) E面:40°H面:70° 同軸ケーブル8DFB 5m付属

<sup>・</sup>アルミホイルにて、アンテナ面をカバー



7- 3m 校正値



3 - 105

# 7- 遮蔽物なし



7- 送信側:上50%、受信側:上50%



# 7- 送信側:上50%、受信側:なし



7- 送信側:なし、受信側:上 50%



7- 送信側:左50%、受信側:左50%



7- 送信側:左50%、受信側:なし





### 7- 送信側:なし%、受信側:左 50%

# 8.遅延特性測定結果(トンネル内部、実機、周波数変更)

### 試験構成

使用周波数:4920MHz(CW)



#### <u>試験項目</u> ①送信側スペクトラムアナライザにて、送信波形を観測。 ②受信側スペクトラムアナライザにて、受信波形を観測。※その際、端末側無線機電源OFF ③無線機にPCを接続し、RSSI及び無線伝送レートを測定。

#### <u>試験機材</u>

機材	メーカー	型式	数量	備考
メッシュ型無線機	ストリックス	OWS2400-20	1台	
スペクトラムアナライザ	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	2本	利得:9.5dBi(ケーブルロス含) E面:40°H面:70° 同軸ケーブル8DFB 5m付属

#### 試験設定

送信側スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920MHz,4940MHz,4960MHz,4980MHz,5040MHz,5060MHz,508
スパン	100MHz
リファレンスレベル	10.0dBm
掃引時間	100s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	25dB

#### 受信側スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920MHz,4940MHz,4960MHz,4980MHz,5040MHz,5060MHz,508
スパン	100MHz
リファレンスレベル	-15dBm
掃引時間	1s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	0dB

### 8- 送信側 4920MHz (参考值)



8- 受信側 4920MHz



8- 受信側 4940MHz



8- 受信側 4960MHz



### 8- 受信側 4980MHz



8- 受信側 5040MHz



8- 受信側 5060MHz



8- 受信側 5080MHz



# 9.アンテナ変更(パッチアンテナ(固定側)とコリニアアンテナ(移動側)の組み合わせ)

#### <u>試験構成</u>



<u>試験項日</u> ①送信側スペクトラムアナライザにて、送信波形を観測。 ②受信側スペクトラムアナライザにて、受信波形を観測。※その際、端末側無線機電源OFF ③無線機にPCを接続し、RSSI及び無線伝送レートを測定。

試験機材

3-110

機材	メーカー	型式	数量	備考
メッシュ型無線機	ストリックス	OWS2400-20	2台	
スペクトラムアナライザ(送信側)	アドバンテスト	R3162	1台	
スペクトラムアナライザ(受信側)	マイクロニクス	MSA458	1台	
4.9GHz帯パッチ型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT719	1本	利得:9.5dBi(ケーブルロス含) E面:40°H面:70° 同軸ケーブル8DFB 5m付属
4.9GHz帯コリニア型アンテナ	アンテナテクノロジー	AT750	1本	利得:4dBi(ケーブルロス含) E面:40°H面:360° 同軸ケーブル8DFB 3m付属
高周波同軸ケーブル	フジクラ	8DFB	5m	ケーブルロス:約3~4dB
その他電源ケーブル等				

#### 試験設定

#### 送信側スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920MHz他適宜
スパン	100MHz
リファレンスレベル	10.0dBm
掃引時間	100s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	25dB

#### 受信側スペクトラムアナライザ設定

中心周波数	4920MHz他適宜
スパン	100MHz
リファレンスレベル	-15dBm
掃引時間	1s
RBW	100KHz
VBW	300KHz
ATT	0dB





美候溯定框						
RSSI	-41dBm	-41dBm	-41dBm			
伝送レート	Mbps	Mbps	Mbps			

- 4. 参考文献
- 山口芳雄,阿部武雄,"損失誘電体内装導波管における減衰特性の実験的確認",電子通信学会論 文誌 B, Vol.J64-B, no.6, pp.550 – 551, June 1981
- [2] 山口芳雄, 阿部武雄, 清水富男, "だ円断面をもつトンネル内の基本波の伝搬特性", 電子通信学
  会論文誌 B, Vol.J64-B, no.9, pp.1032 1038, Sept. 1981
- [3] 山口芳雄, 阿部武雄, 関口利男, "トンネル内の基本モードの伝搬特性", 電子通信学会論文誌 B, Vol.J65-B, no.4, pp.471 – 476, April 1982
- [4] 山口芳雄, 阿部武雄, 関口利男, "任意断面をもつトンネル内電波減衰定数の近似式について,"
  電子通信学会論文誌 B, Vol.J67-B, no.3, pp.352 353, March 1984
- [5] D. Didascalou, T. Schafer, F. Weinmann, and W. Wiesbeck, "Ray-density normalization for ray-optical wave propagation modeling in arbitrarily shaped tunnels," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 48, no. 9, pp. 1316-1325, Sep. 2000.
- [6] 今井哲朗, "レイトレース法を用いたトンネル内伝搬特性の推定," 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J85-B, no. 2, pp. 216-226, Feb. 2002.
- [7] J. Molina-Garcia-Pardo, J. Rodriguez, and L. Juan-Llacer, "Wide-band measurements and characterization at 2.1 GHz while entering in a small tunnel," IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 53, no. 6, pp. 1794-1799, Nov. 2004.
- [8] Y. P. Zhang and H. J. Hong, "Ray-optical modeling of simulcast radio propagation channels in tunnels," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 53, no. 6, pp. 1800-1808, Nov. 2004.
- [9] M. Lienard and P. Degauque, "Natural wave propagation in mine environments," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 48, no. 9, pp. 1326-1339, Sep. 2000.
- [10] C. Nerguizian, C. Despins, S. Affes, and M. Djadel, "Radio-channel characterization of an underground mine at 2.4 GHz," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 4, no. 5, pp. 2441-2453, Sep. 2005.
- [11] 細矢良雄監修,電波伝搬ハンドブック,リアライズ社,東京,1999.