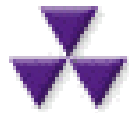




レイトレーシングシミュレーションによる 車々間通信電波伝搬特性の総合的評価



2007年3月15日
同志社大学工学部
岩井 誠人

本研究はITS情報通信システム推進会議・車々間通信システム専門委員会からの委託研究「車々間通信における電波伝搬シミュレーション解析及び調査研究」の中で行ったものである。本研究を進めるにあたり有益な議論およびご支援を頂いた関係各位に深く感謝申し上げます。



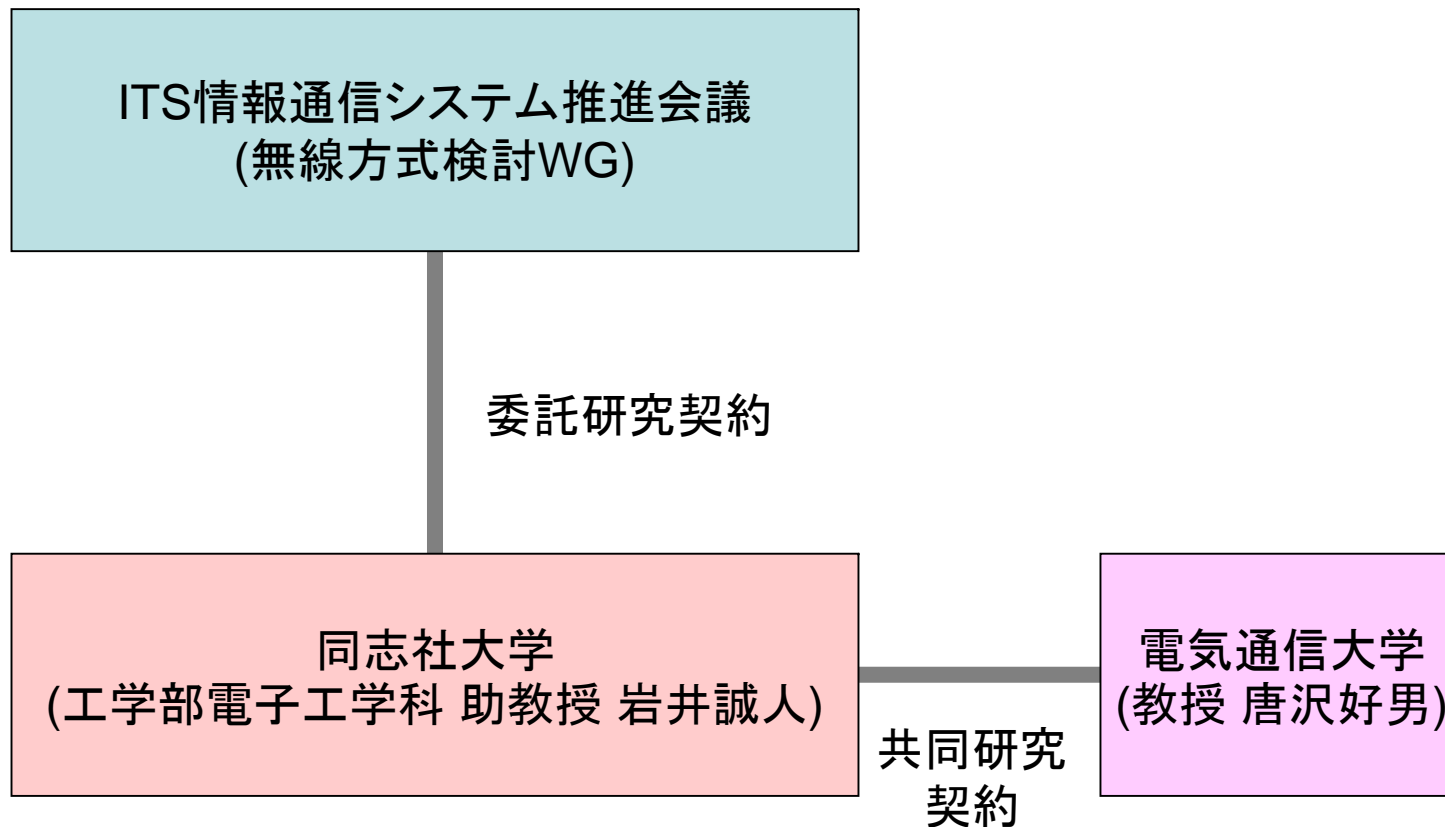
発表内容

- 伝搬特性評価の概要と検討体制
- 伝搬特性評価結果
 - シミュレーションの前提とモデル
 - レイトレーシング計算から得られた結果のサマリ
 - 交差点における伝搬モデルの考え方
- まとめ

伝搬特性評価の概要

- ITS情報通信システム推進会議・車々間通信システム専門委員会からの委託研究
「車々間通信における電波伝搬シミュレーション解析及び調査研究」
- 車々間無線通信を想定したレイトレーシングシミュレーションによる電波伝搬特性の解析
- シミュレーションによる定量評価および考察、伝搬モデルの検討

検討体制



レイトレーシングによる電波伝搬特性の解析

- 目的および進め方

- 車々間通信を想定した環境について、多くのパラメータを変化させた場合の伝搬特性を計算・解析し、車々間通信環境における伝搬特性の全体的・総合的な傾向を把握する

- 変化させるパラメータ

- ・見通し内/外
- ・周波数
- ・道路幅
- ・アンテナ高
- ・交差点形状
- ・交差点角度
- ・交差点周囲の建物の有無
- ・アンテナ指向性
- ・遮蔽車両の影響
- など

- 伝搬特性の評価結果は前提とするモデルに依存する。ただし、傾向としては、ここで示す結果は実際の環境の特性に沿うものと考えられる

シミュレーションのパラメータ

変化させるパラメータは
【主要な変化パラメータ】と
【その他の変化パラメータ】の
二種類に分類する。

【主要な変化パラメータ】は、各パラメータの全ての変化の組合せに対する計算を行う(=たすきがけ)

【その他の変化パラメータ】は、主要な変化パラメータの基本パラメータセット(後に規定)を基本として、【その他の変化パラメータ】の個々のパラメータのみを変化させた場合を計算する(=たすきがけは行わない)

【主要変化パラメータ】

全ての組合せを
たすきがけで計算

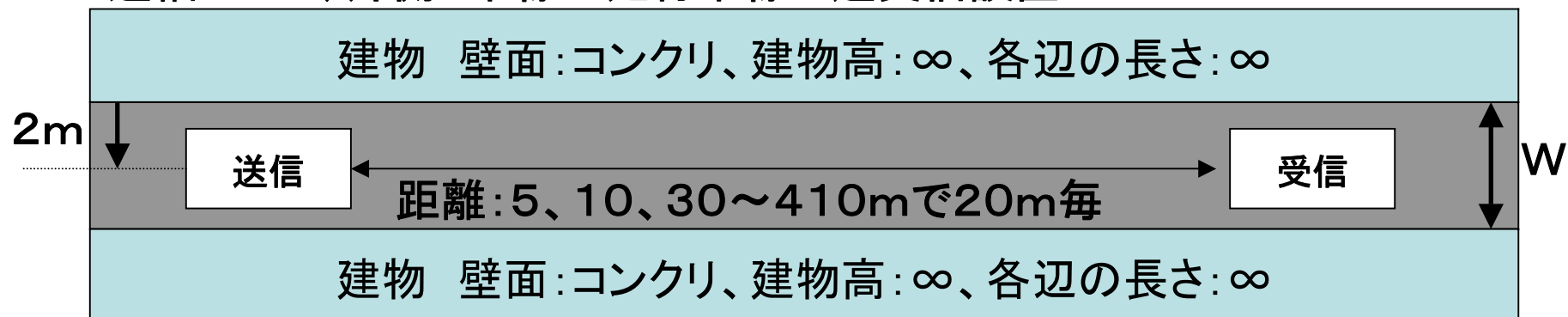
分類		パラメータ値						
環境条件	環境モデルおよび 送受信点位置	見通し内		見通し外				
		都心		都心		市街地	郊外	
	道路幅	8m	16m	8m(内) 16m(外)	16m(内) 16m(外)	8m(内) 16m(外)	8m(内) 8m(外)	8m(内) 16m(外)
通信条件	周波数	740MHz		5.815GHz				
	アンテナ利得・指向性	無指向性(0dBi)						
	アンテナ高	1.5m						

- 環境モデルおよび送受信点位置は次ページ以降参照
- 上記黄色部分は[その他の変化パラメータ]を変化させる場合の基本パラメータセット
- 見通し外環境の道路幅における、(内)は見通し内道路の幅、(外)は見通し外道路の幅

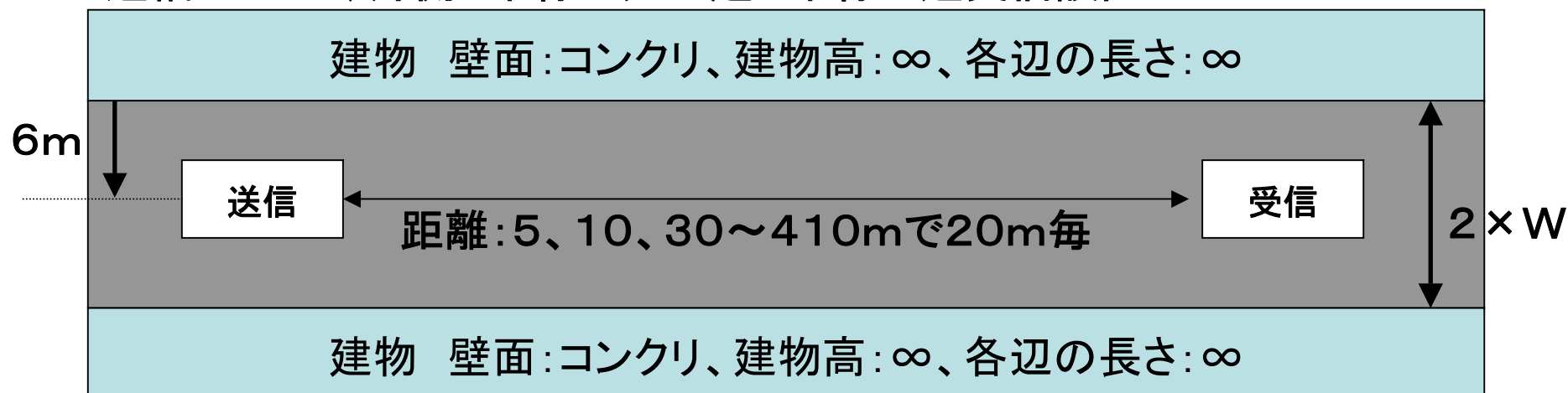
【見通し内環境モデル】

見通し内送受信点位置 道幅は8mと16m ($W=8m$)

道幅8mで、片側1車線の走行車線に送受信設置



道幅16mで、片側2車線の追い越し車線に送受信設置



【見通し外環境モデル】

都心・市街地・郊外の建物条件

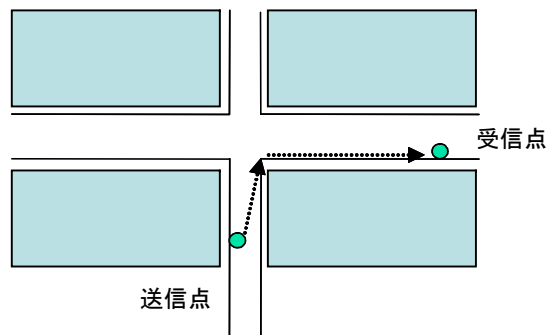
壁面条件

コンクリ (比誘電率: 7、比透磁率: 1、導電率: 0.0023S/m)

木造 (比誘電率: 2、比透磁率: 1、導電率: 0.0290S/m)

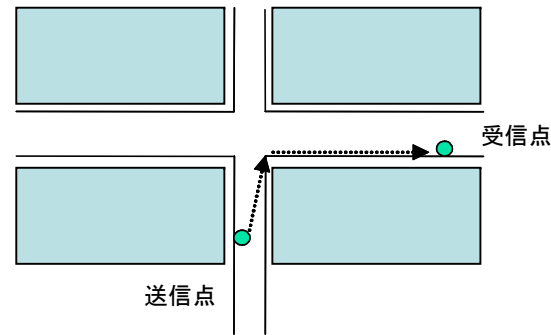
アンテナ工学ハンドブック: アリカ松

(1) 都心: 壁面コンクリ



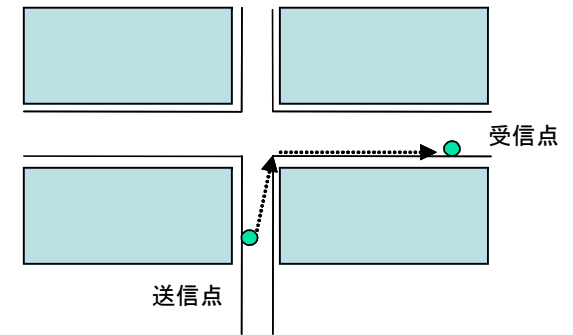
建物高: ∞
各辺の長さ: ∞

(2) 市街地: 壁面コンクリ



建物高: 25m
各辺の長さ: ∞

(3) 郊外: 壁面木造

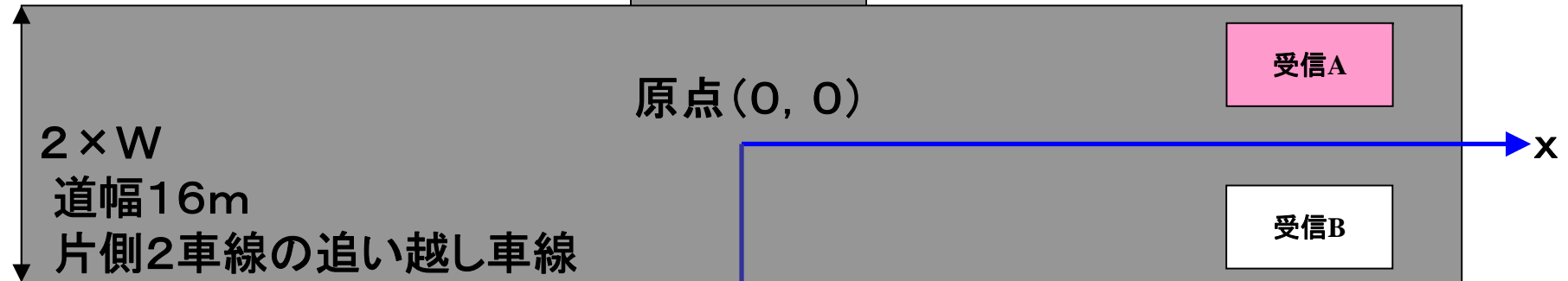


建物高: 12m
各辺の長さ: ∞

【見通し外環境モデル】

見通し外送受信点位置 $W=8m$

道幅8m
片側1車線の走行車線



送信点5点 単位 m
(-2, 13) (-2, 23) (-2, 33)
(-2, 53) (-2, 93)

のときで

受信点9点 単位 m
(4, 2) (29, 2) (54, 2)
(79, 2) (104, 2) (129, 2)
(154, 2) (179, 2) (204, 2)

このモデルは

見通し内道路幅: 8m

見通し外道路幅: 16m の場合

道路幅を変化させた場合には、交差点までの距離(図中の原点ではなく交差点入り口までの距離)と道路中央までの距離が変化しないように(追い越し車線を走行している車両を想定)、座標を変化させる

【その他の変化パラメータ】

	分類	パラメータ値			
環境条件 (見通し外のみ)	交差点形状	T字	Y字(それぞれの間120度)		
	直交四差路交差点の角度	30度	60度	120度	150度
	交差点周辺の建物数	1	2	3	4
通信条件 (見通し内外両方)	周波数	200MHz		2.45GHz	
	アンテナ利得・指向性	ダイポールアンテナ(垂直偏波)			
	アンテナ高	2.5m			

基本パラメータセットに対して、
これらのパラメータをそれぞれ
一つのみ変化させ計算する
(=たすきがけは行わない)

交差点周辺の建物数モデルについては次ページ参照

本日の講演では結果省略

【交差点周辺の建物数】

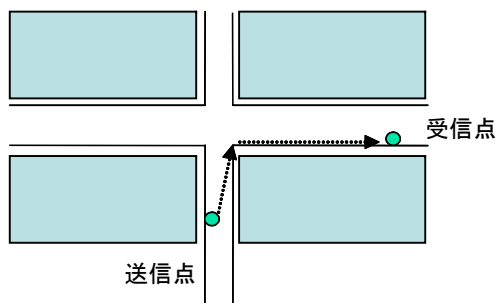
本日の講演では結果省略

①都心・市街地・郊外の建物条件

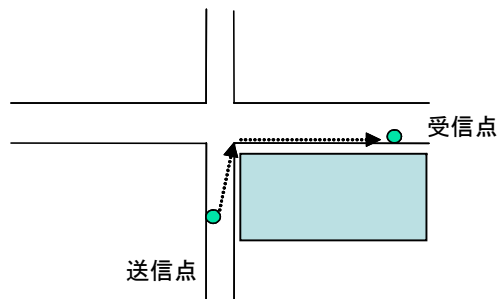
壁面条件 コンクリ(比誘電率:7、比透磁率:1、導電率:0.0023S/m)

(1) 都心:壁面コンクリ、周波数は700MHzと5.8GHz

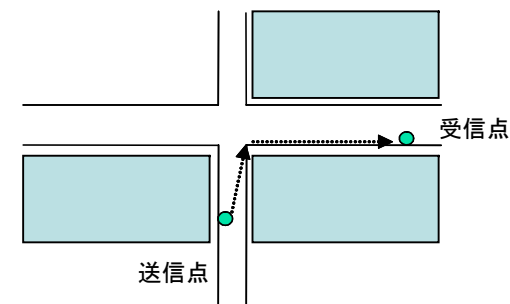
(a) 基本



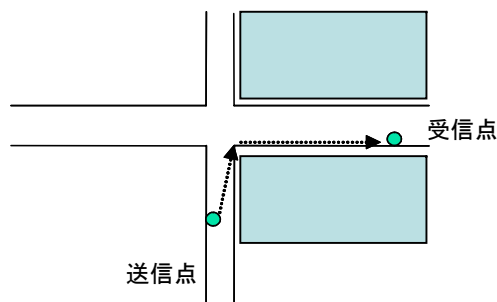
(b) 右下のみ有り



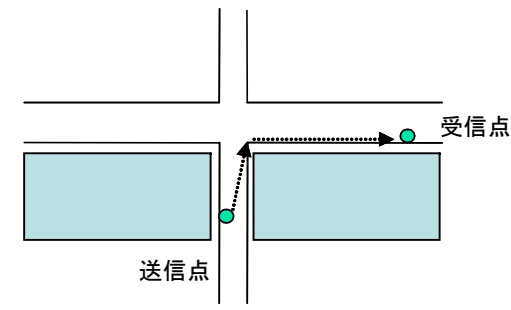
(c) 左上のみなし



(d) 右下、右上に有り



(e) 右下、左下に有り



(a)から(e)同一条件

建物高: ∞

各辺の長さ: ∞

遮蔽車両がある場合の伝搬特性

【計算の概要】

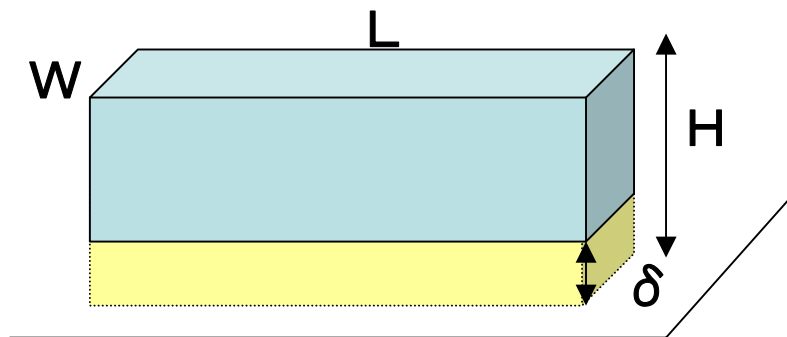
- ・ 「基本パラメータセット」を前提とし、
次ページに示す「遮蔽モデル」の環境に
おける伝搬特性を計算する

【遮蔽モデル】

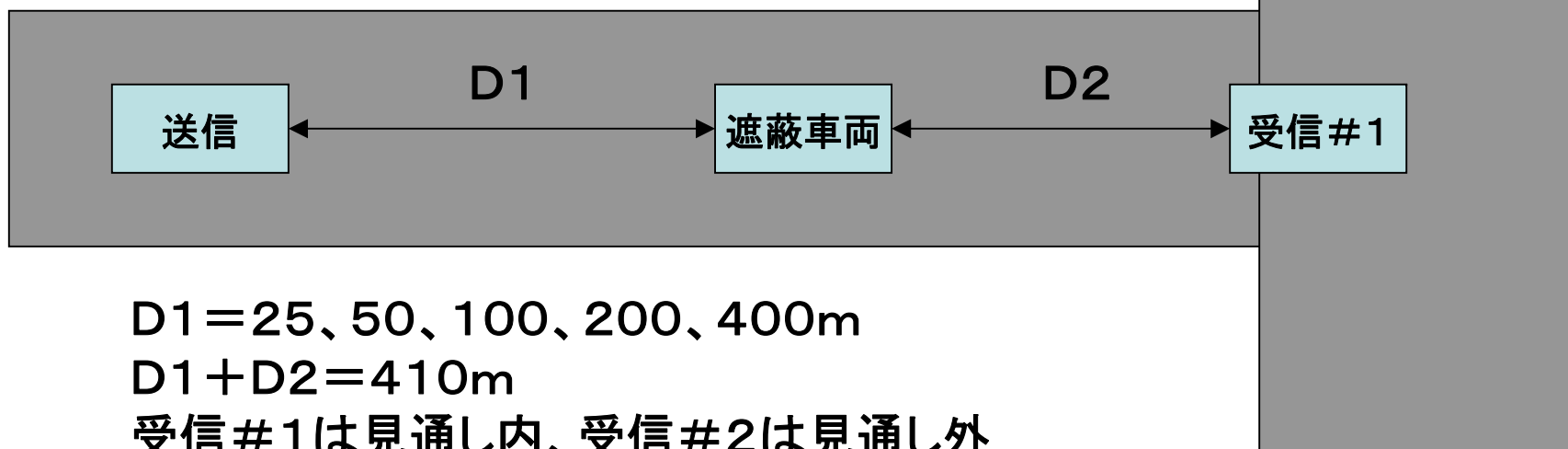
車型条件 GSとアルファードを想定

セダン (W:1.8m、L:4.8m、H:1.4m、最低地上高 δ :0.1m)

ミニバン (W:1.8m、L:4.8m、H:1.9m、最低地上高 δ :0.2m)



遮蔽車両の配置条件



$D1 = 25, 50, 100, 200, 400\text{m}$

$D1 + D2 = 410\text{m}$

受信#1は見通し内、受信#2は見通し外

【計算方法および条件】

レイトレーシング法	反射5回、回折2回
偏波	垂直偏波送信、垂直偏波受信特性・水平偏波受信特性の両方 (ただし、1ケースについてのみ、円偏波を想定した計算を行う。受信側では正旋・逆旋の両方の特性を取得する。パラメータは基本パラメータとし、周波数のみ700MHzおよび5.8GHzの両方を計算する)
反射係数	誘電率・透磁率・導電率より各周波数において計算
回折係数	UTDにより計算

本日の講演では結果省略

【取得する特性】

- 伝搬損失特性
 - － 電界合成による伝搬損失
 - レイトレーシングにより得られる複数の到来パスの信号を電界(複素数)として合成し、その地点での受信電力を求める。これと仮想する送信電力の差を求め、伝搬損失とする
 - － 電力合成による平均伝搬損失
 - 電界合成による計算法では、マルチパスフェージングによる大きな強度変動が発生する。平均的な伝搬損失を求めることが目的の場合には、この信号強度変動により、平均特性が把握しづらい。そこで、各到来パスを電力次元で合成し、これをその地点での平均受信電力と考える(=フェージングを平均した電力値)。各到来パスの位相変動が無相関であると考えられる場合には、この方法で求めた平均受信電力は正しい値となる。これと仮想する送信電力の差を求め、平均伝搬損失とする
- 遅延スプレッド特性
 - － 到来パスの分布によって与えられる遅延プロファイルの標準偏差(=遅延スプレッド)を求める

その他の計算条件

- レイトレーシング計算は、同志社大学工学部通信方式研究室においてC言語により作成したプログラムを用いる。このプログラムはレイトレーシングにおいて一般的な以下の方法に基づいている
 - イメージング法による反射波計算
 - UTD法による回折波計算
- このプログラムによる計算結果の妥当性を示すために、簡単な環境を想定して(株)構造計画研究所製の市販レイトレーシング計算ソフトウェアRapLabを用いる計算を行い、上記プログラムによる計算との一致を確認する

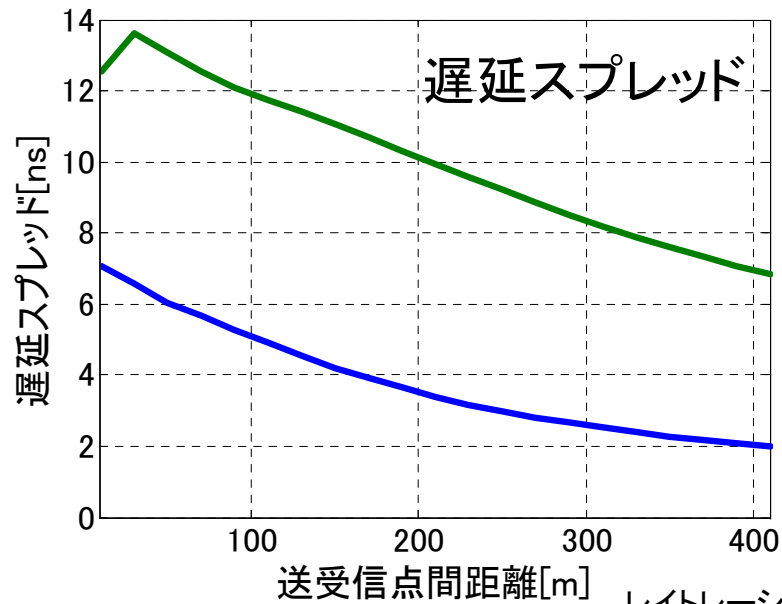
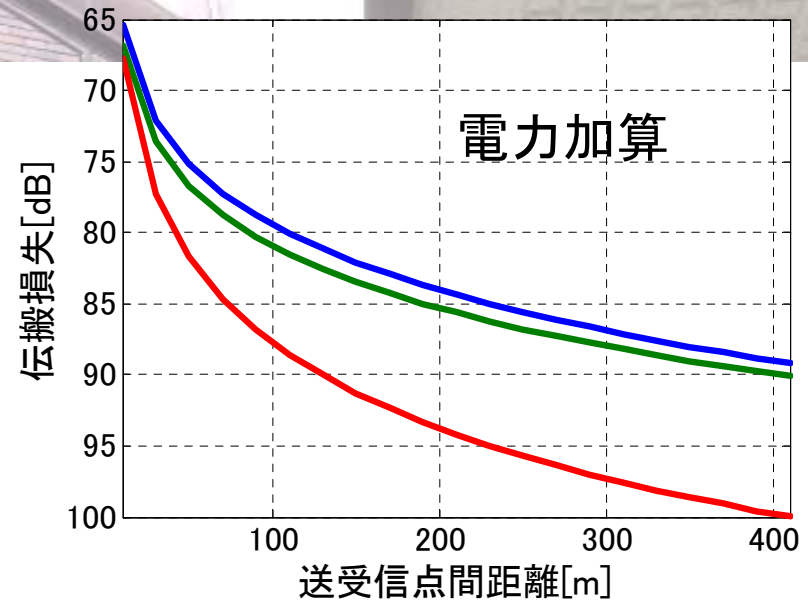
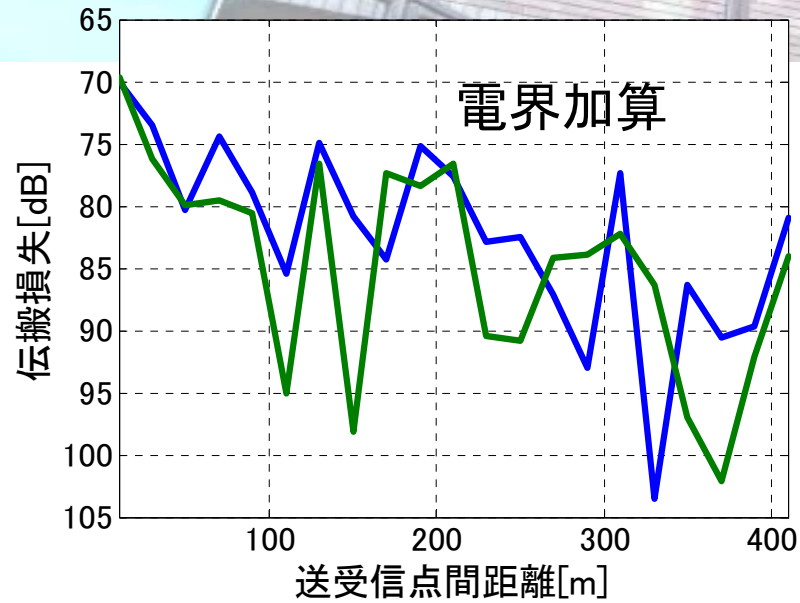
レイトレーシング計算から得られたサマリ[1]

車々間無線通信環境の伝搬特性に関する主な知見

- 見通し内環境
 - 平均伝搬損失は自由空間伝搬よりも小さい
 - 遅延スプレッドは10nsec以下
- 見通し外環境
 - 交差点から近い環境と遠い環境に状況が大別され、前者は主に反射波が、後者は主に回折波が、それぞれ支配的な伝搬パスとなる
 - 遅延スプレッドは最大40nsec程度
- 交差点形状
 - 四差路とT字の差は小さい。120度Y字は大きく異なり平均伝搬損失が小さい
 - 120度Y字を含めて、交差角度に大きく依存する
- 交差点付近の建物数
 - 全体的な傾向として、建物数が多い方が回折波が多く発生し、その結果、平均伝搬損失は小さくなる
 - 遅延スプレッドは反射波が多い場合に大きくなる傾向がある

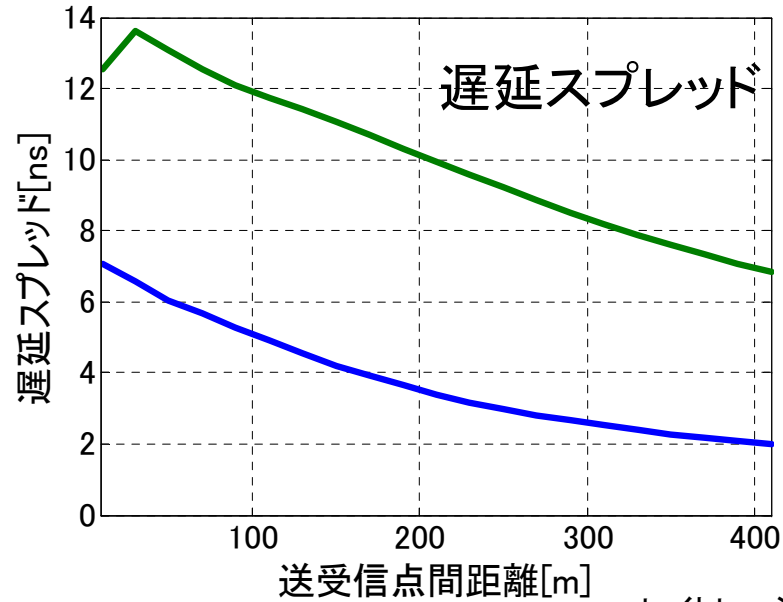
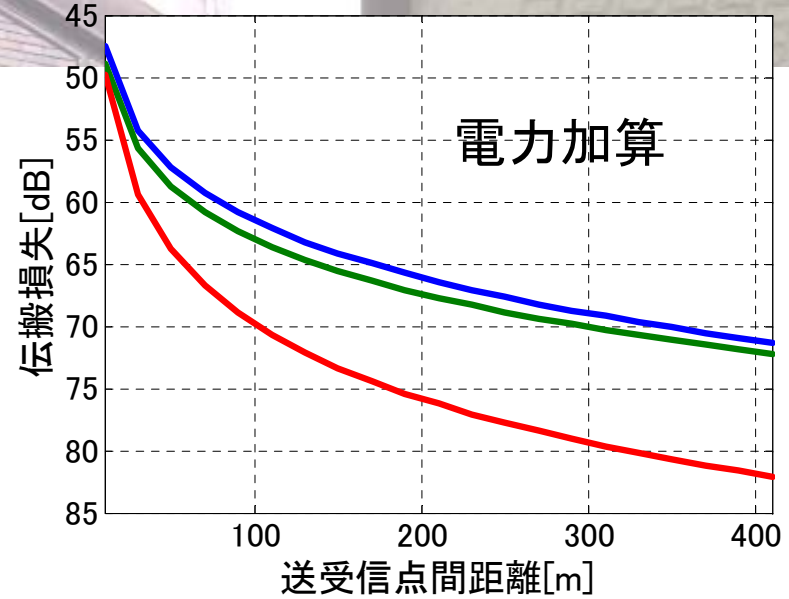
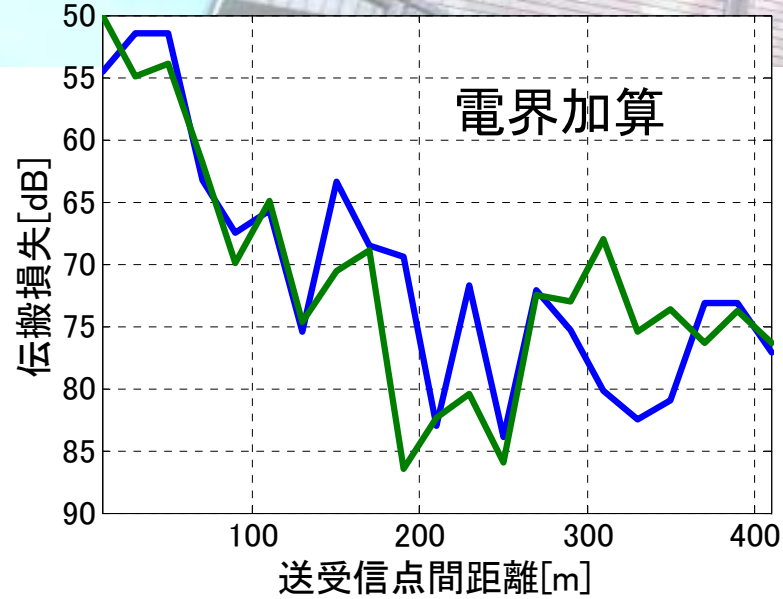
本日の講演では結果省略

見通し内基本パラメータセット(5.815GHz)



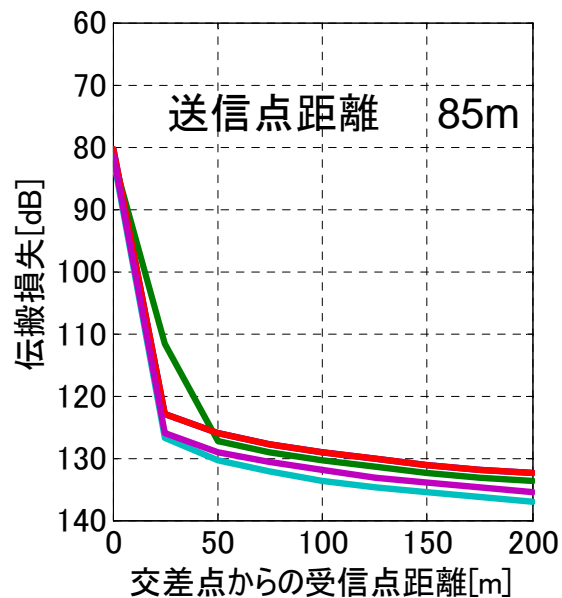
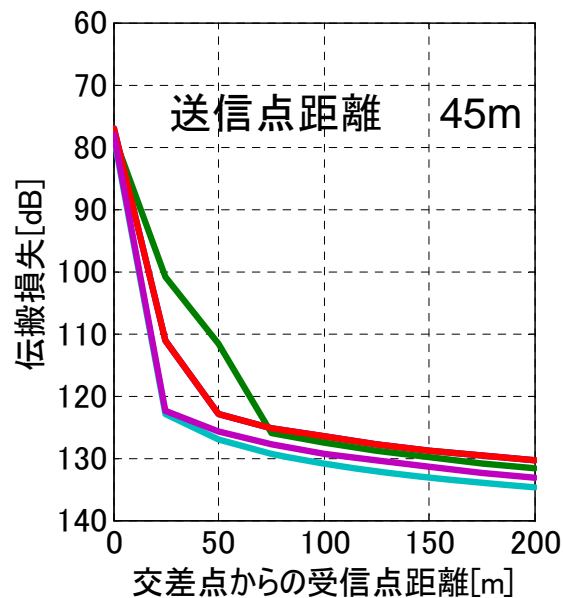
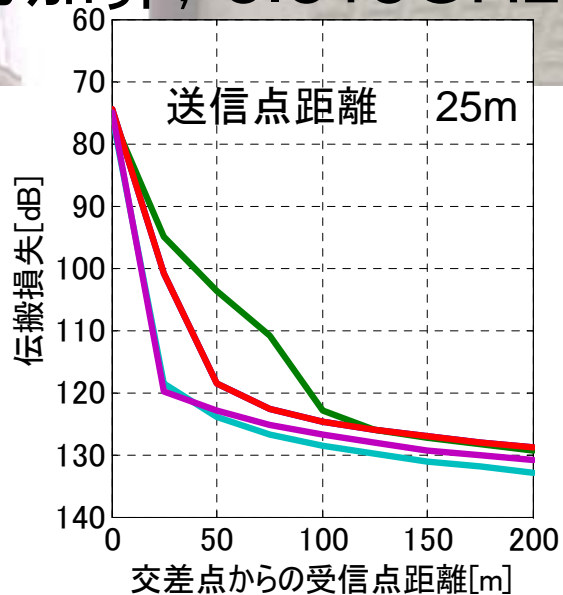
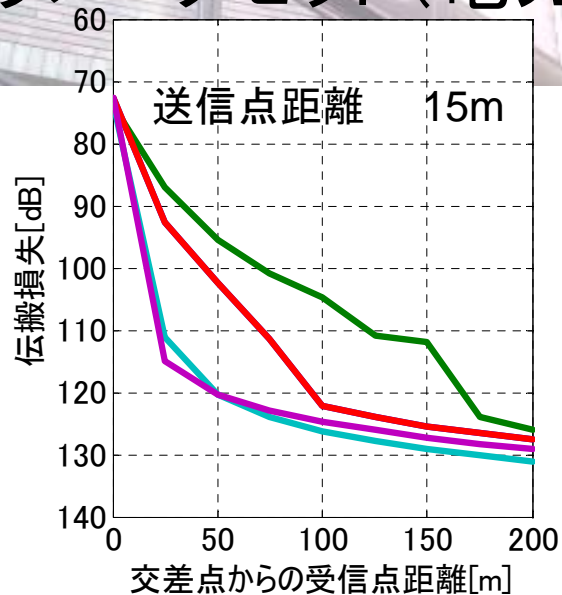
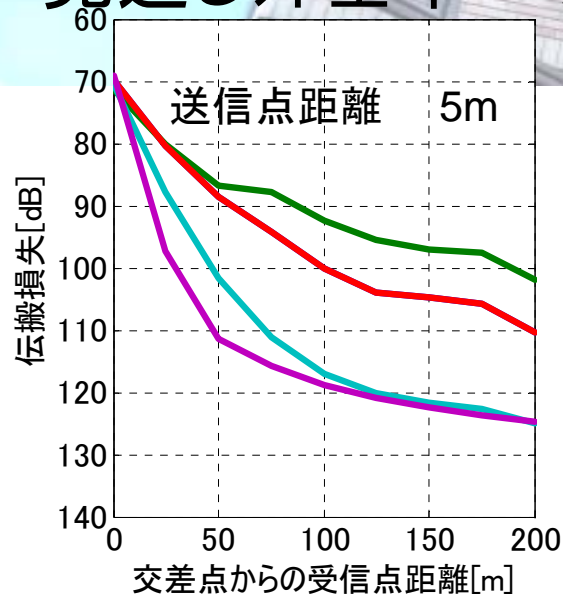
- 道幅8m
- 道幅16m
- 自由空間伝搬損失

見通し内基本パラメータセット (740MHz)



- 道幅8m
- 道幅16m
- 自由空間伝搬損失

見通し外基本パラメータセット(電力加算, 5.815GHz)

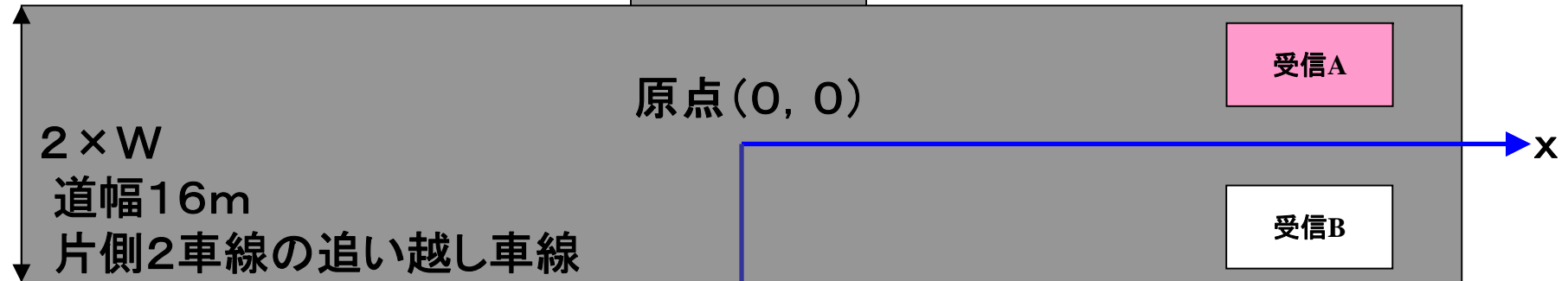


- 都心8m_16m
- 都心16m_16m
- 市街地8m_16m
- 郊外8m_16m
- 郊外8m_8m

【見通し外環境モデル】

見通し外送受信点位置 $W=8m$

道幅8m
片側1車線の走行車線



$2 \times W$
道幅16m
片側2車線の追い越し車線

原点(0, 0)

受信A

受信B

x

y

送信点5点 単位 m
(-2, 13) (-2, 23) (-2, 33)
(-2, 53) (-2, 93)

のときで

受信点9点 単位 m
(4, 2) (29, 2) (54, 2)
(79, 2) (104, 2) (129, 2)
(154, 2) (179, 2) (204, 2)

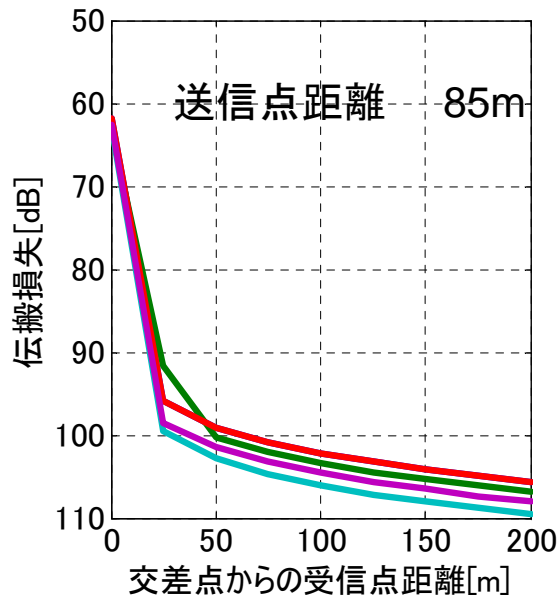
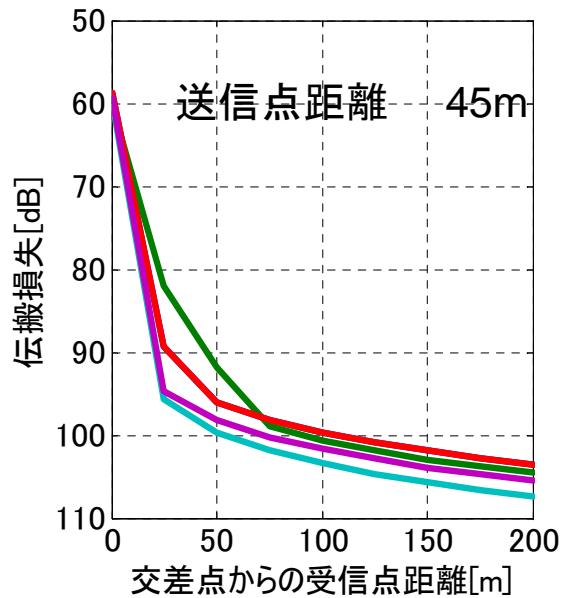
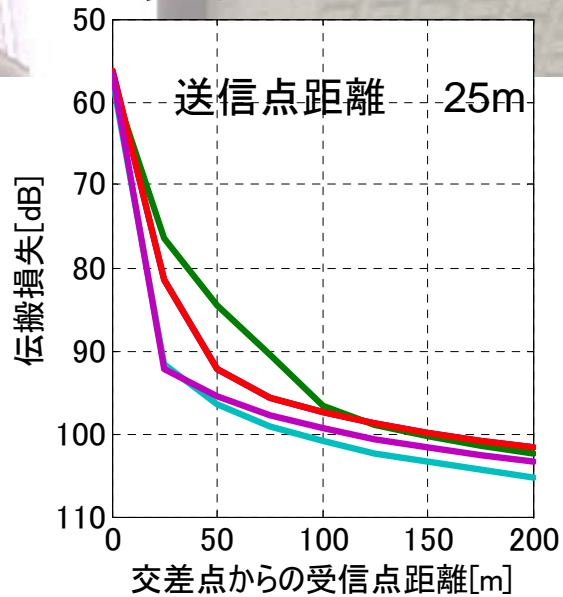
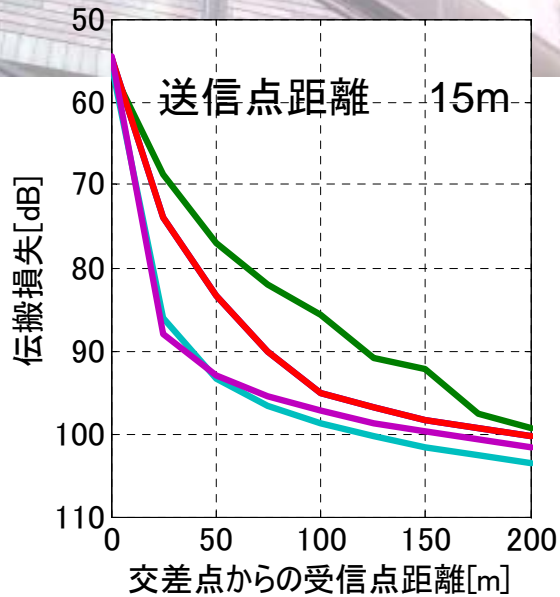
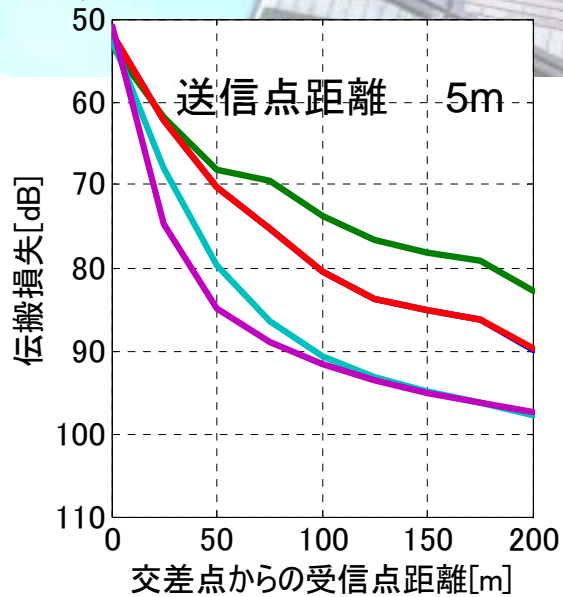
このモデルは

見通し内道路幅:8m

見通し外道路幅:16m の場合

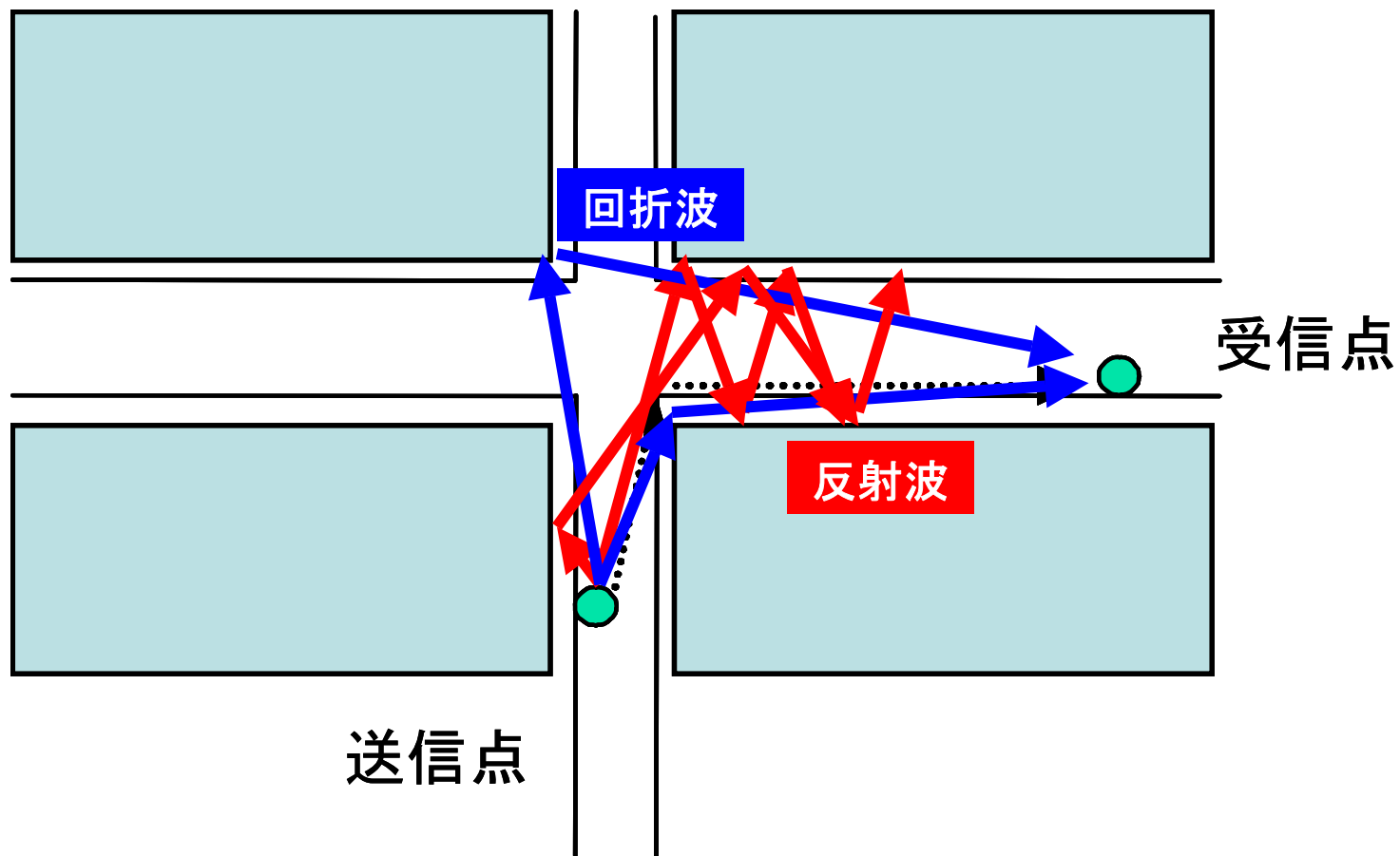
道路幅を変化させた場合には、交差点までの距離(図中の原点ではなく交差点入り口までの距離)と道路中央までの距離が変化しないように(追い越し車線を走行している車両を想定)、座標を変化させる

見通し外基本パラメータセット(電力加算, 740MHz)

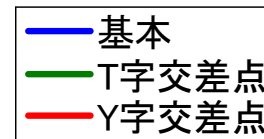
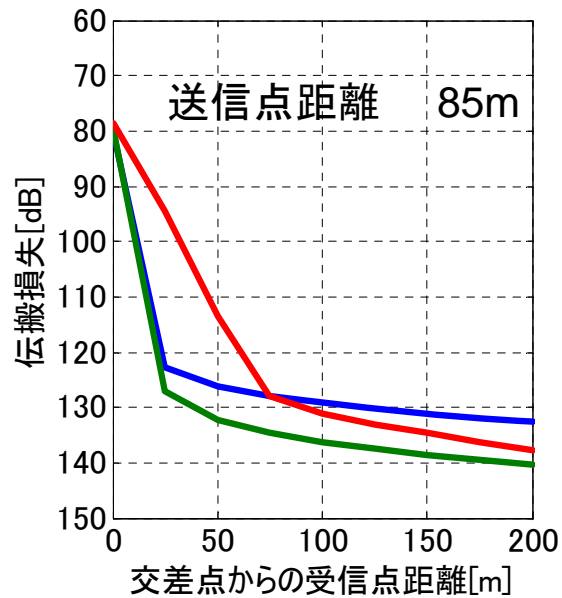
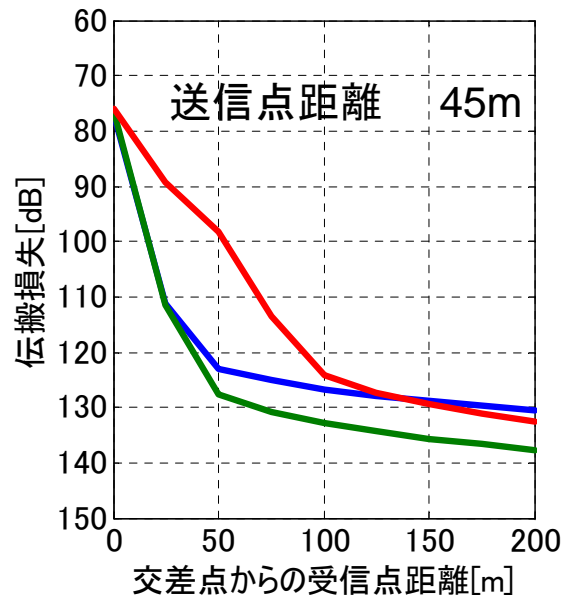
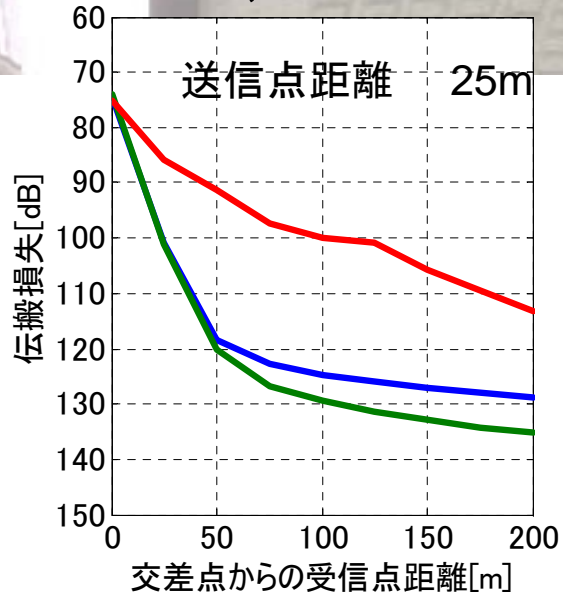
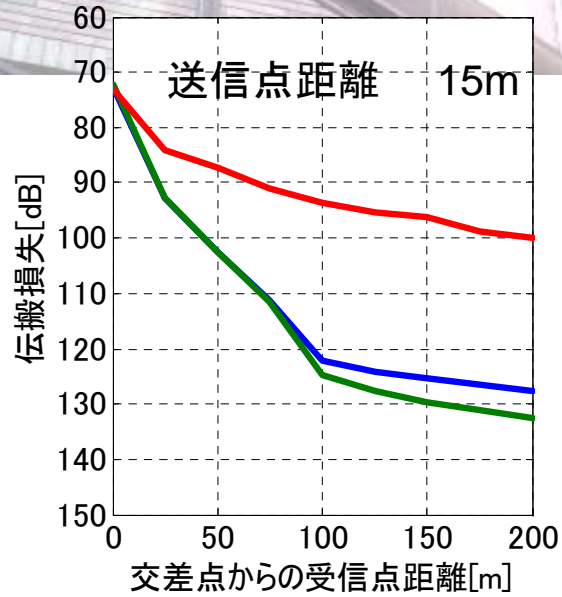
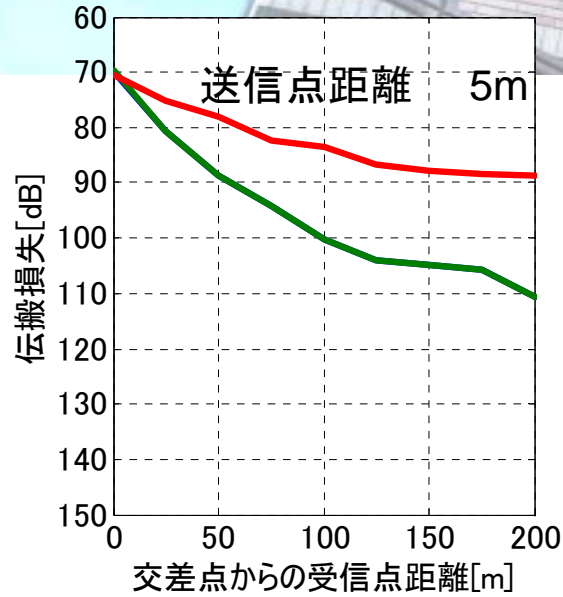


- 都心8m_16m
- 都心16m_16m
- 市街地8m_16m
- 郊外8m_16m
- 郊外8m_8m

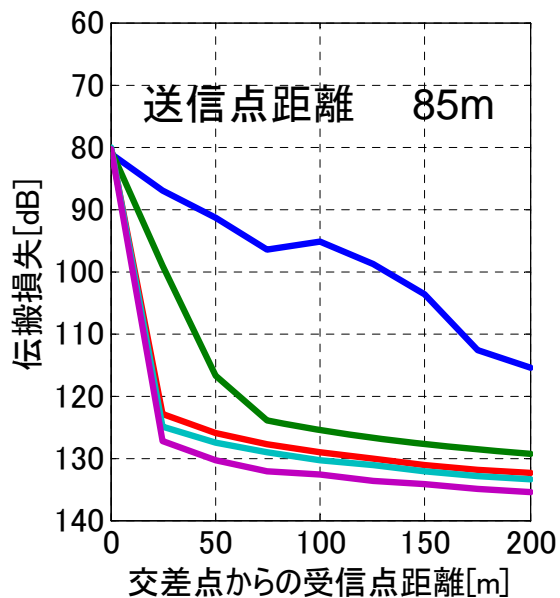
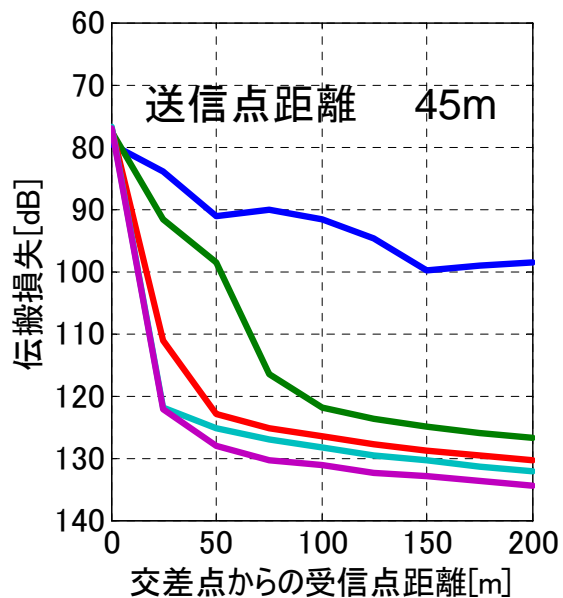
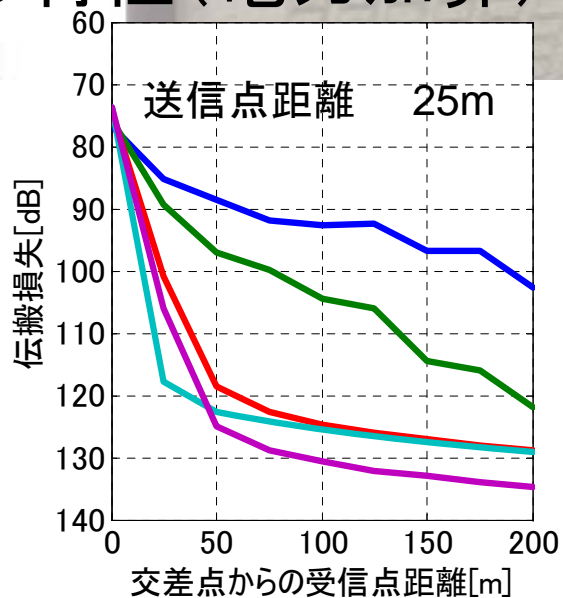
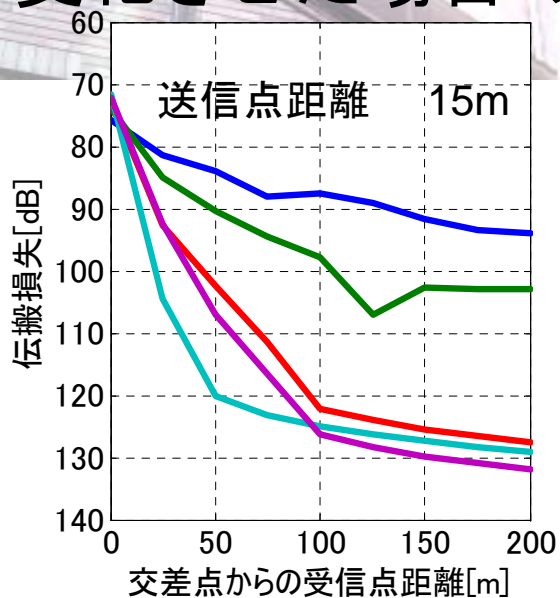
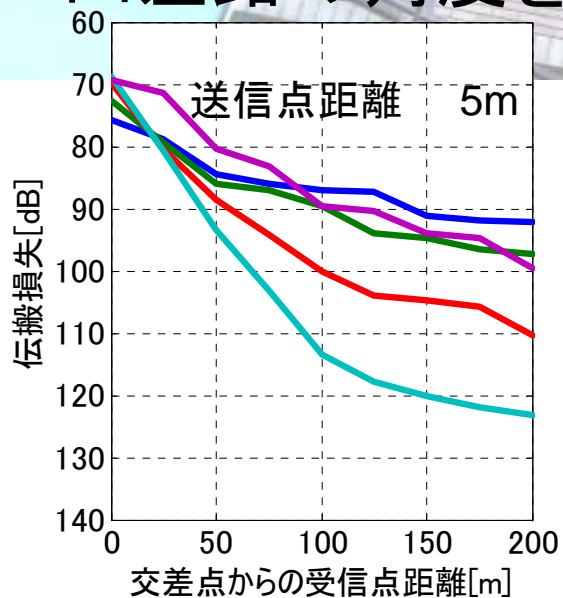
反射波と回折波



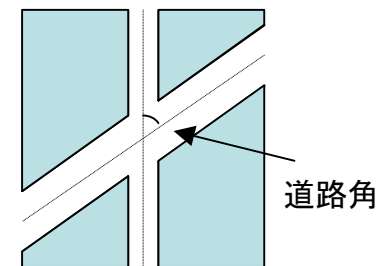
交差点形状変化に対する特性 (5.815GHz, 電力加算)



四差路の角度を変化させた場合の特性(電力加算)



- 道路角30度
- 道路角60度
- 道路角90度(基本)
- 道路角120度
- 道路角150度



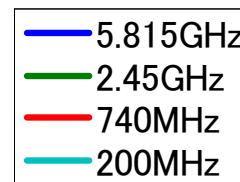
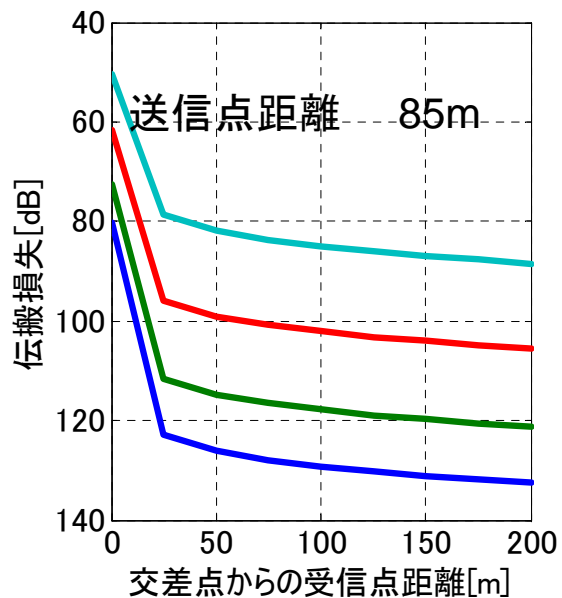
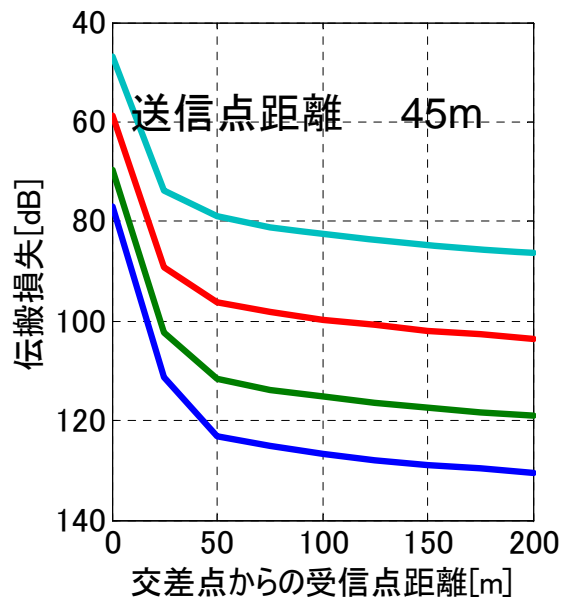
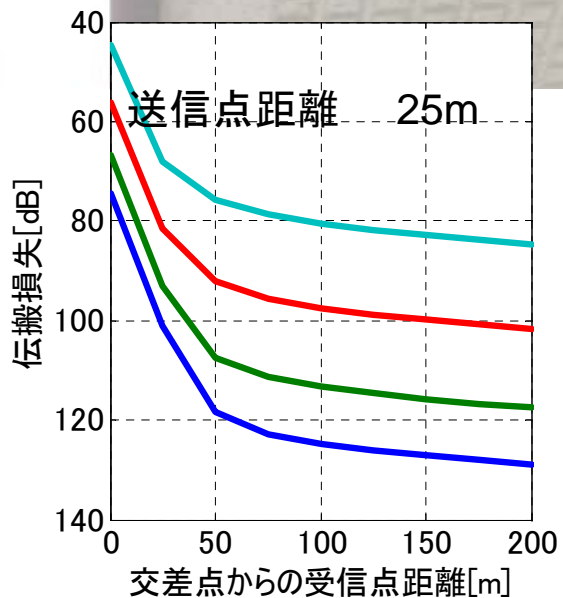
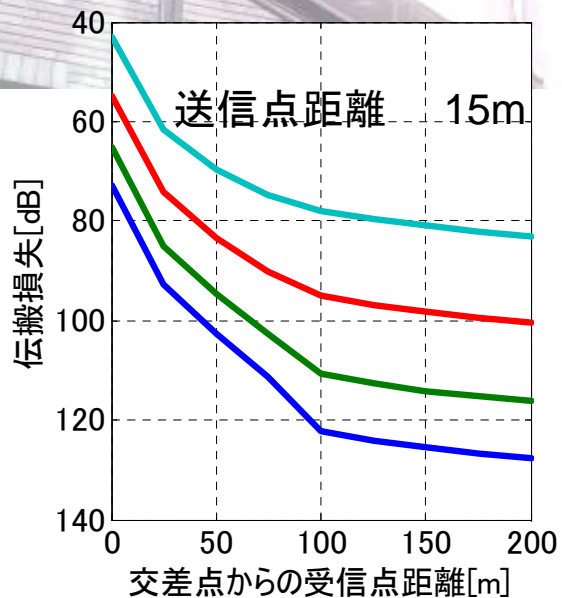
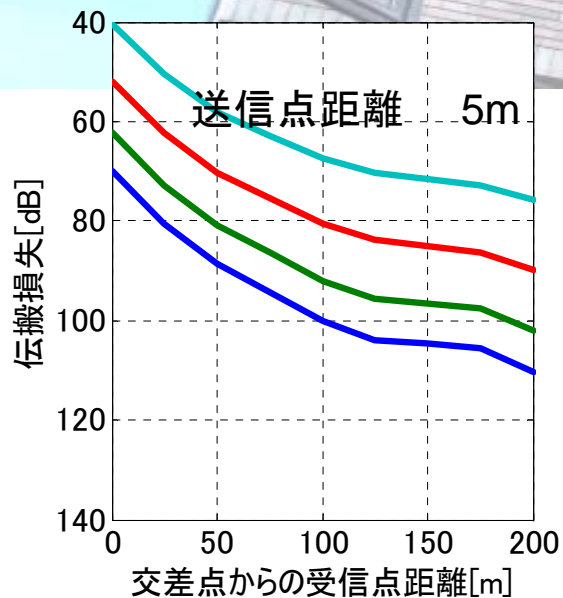
レイトレーシング計算から得られたサマリ[2]

車々間無線通信環境の伝搬特性に関する主な知見

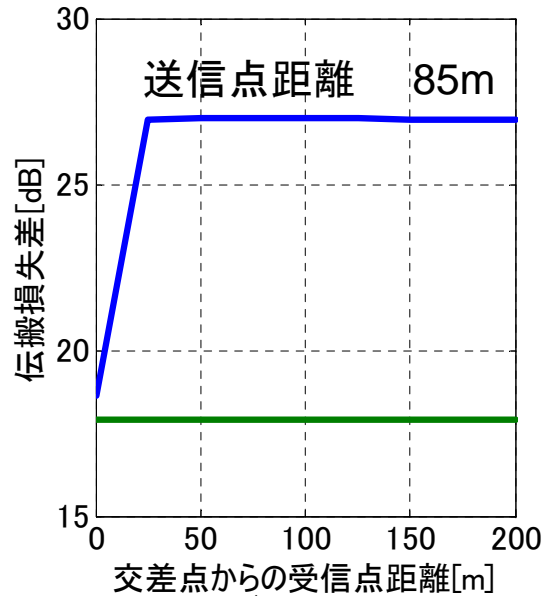
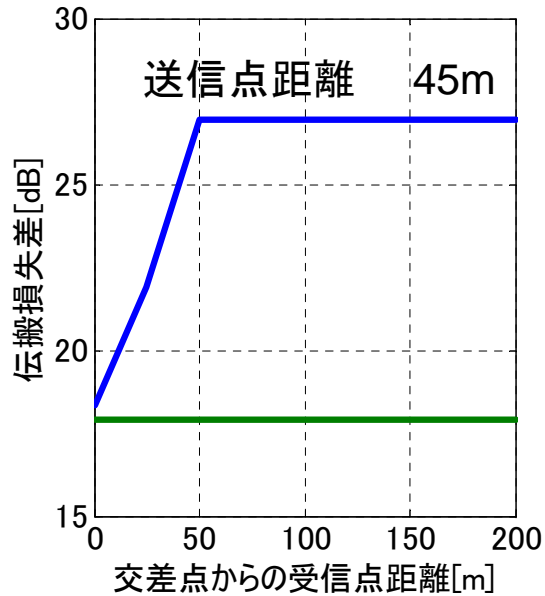
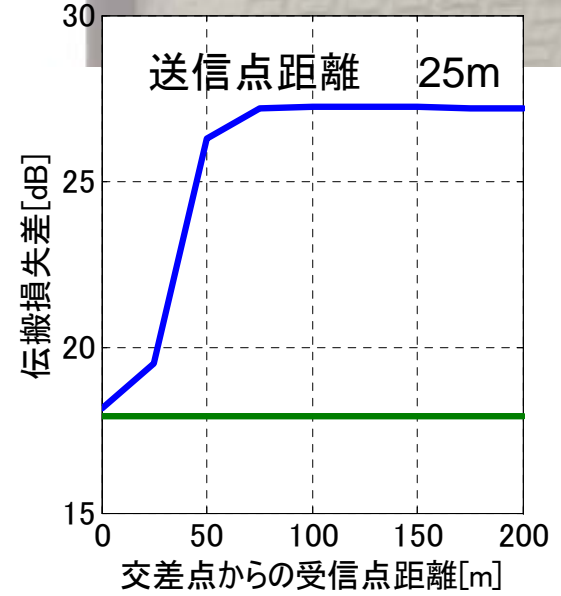
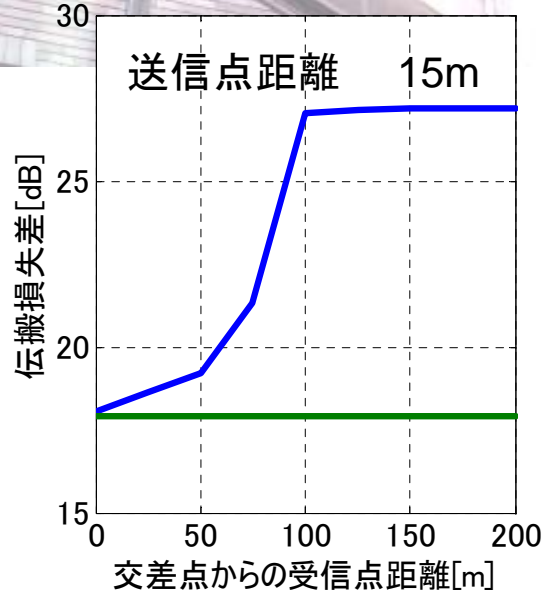
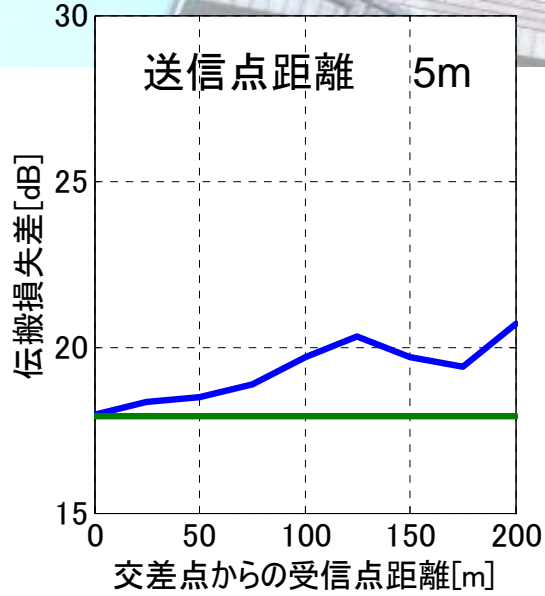
- 周波数特性

- 見通し内では、平均伝搬損失が周波数の二乗に比例するという自由空間伝搬と同様の特性を示す
- 見通し外でも、交差点近傍では、見通し内と同様の傾向である
- ただし、見通し外の交差点から離れた地点では、周波数の二乗以上の差が生じる
- 以上の特性は、見通し外環境の支配的な伝搬路(交差点近傍: 反射波、交差点遠方: 回折波)の差、および、この周波数帯(>100MHz)では反射係数の周波数特性はほぼ無視できるのに対して回折係数には周波数特性がある、ことによって説明される
(注: 角度によっては回折係数も周波数特性がない)
- 以上の結果として、たとえば高い周波数から低い周波数に移った場合、自由空間伝搬で想定される以上の伝搬損失の縮小が得られる。さらに、これが見通し外の交差点遠方というサービスエリアエッジになると予想される領域で顕著な現象であることから、低い周波数に移った場合のエリア拡大効果は、周波数差の影響(二乗特性)よりもさらに大きくなると考えられる

周波数を変化させた場合の特性(電力加算, 見通し外)



5.8GHzと740MHzの伝搬損失差(電力加算, 見通し外)



— レイトレーシング計算の結果
— 自由空間伝搬 (17.9dB)

レイトレーシング計算から得られたサマリ[3]

車々間無線通信環境の伝搬特性に関する主な知見

- アンテナ指向性(等方向性アンテナとダイポールアンテナの比較)
 - 垂直偏波方向に設置した場合には、ダイポールアンテナの方がアンテナ利得分だけ平均伝搬損失が低下する
 - 水平偏波方向に設置し、アンテナ指向性ピークを常に交差点方向とした場合には、送受信局が交差点近傍にある場合は、等方向性アンテナの方が平均伝搬損失が小さい場合がある。どちらかの局が交差点から離れると、垂直偏波の場合と同様にアンテナ利得分だけダイポールアンテナの平均伝搬損失が小さくなる
- アンテナ高
 - 1.5mと2.5mの差は小さい
 - ただし、それ以外の高さについてハイトパターンを計算した結果、高さ方向の依存性は存在する
- 建物上部のエッジによる回折損失
 - 今回の想定建物高(市街地:25m、郊外:12mおよび7m)では、建物上部のエッジによる回折波(建物越え伝搬路を含む)の影響は無視でき、通路沿いに伝搬する伝搬路が支配的である

本日の講演では結果省略

レイトレーシング計算から得られたサマリ[4]

車々間無線通信環境の伝搬特性に関する主な知見

- 伝搬経路沿いの建物面に通路のような空間がある場合
 - 空間のエッジによる回折波が新たに加わるので、遅延スプレッドが大きくなる傾向がある。信号強度的には大きくない
- 建物ブロックに空間がある場合
 - ブロック内を通り抜けるような伝搬パスは存在する
 - その結果、その通路の出口付近で、電波が”染み出す”ような現象が生じる
 - 上記「伝搬経路沿いの建物面に通路のような空間がある場合」と同様に、遅延スプレッドはやや増加する
 - 平均伝搬損失に対する影響は大きくない
- 受信点位置AおよびBの差
 - 差は小さく、無視できる程度である
 - 道路の幅方向には、伝搬特性は大きく変化しない
- レイトレーシング計算の反射回数
 - 伝搬損失は3~5回の特徴に変化はない
 - 見通し内環境の遅延スプレッドは回数に応じて増加するが、見通し外では顕著ではない

本日の講演では結果省略

レイトレーシング計算から得られたサマリ[5]

車々間無線通信環境の伝搬特性に関する主な知見

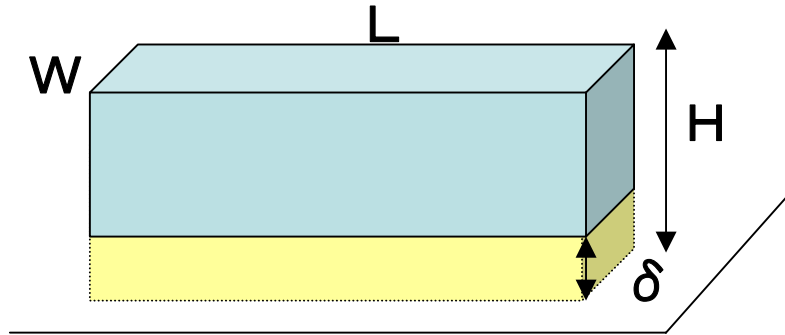
- 遮蔽車両がある場合
 - セダンの場合は送受アンテナ高が車高よりも高く直接波が遮られない環境であるので、ほぼ影響はない
 - ミニバンの場合は直接波が遮られ、影響が生じる。遮蔽車両が送受信点のどちらかの10m程度以下に近接した場合には大きな遮蔽が生じるが、それ以上に離れると大きな伝搬損失の増加は見られない
 - 遮蔽が発生する環境では、周波数が低い方が遮蔽の影響はやや小さい
 - 空間のエッジによる回折波が新たに加わるので、遅延スプレッドが大きくなる傾向がある。信号強度的には影響は大きくない
- フェージングの大きさに関する解析
 - 到来パスの電力分布という観点からは、送受信点が極めて近距離の環境を除き、見通し内でも見通し外でも、ほぼレイリーフェージングに近いフェージングとなる
 - つまり、卓越した定常波に散乱波成分が干渉するような仲上ライスフェージング環境よりもレイリーフェージングに近い環境であると言える
 - 送受信点が近距離(<10~20m)の場合はフェージング変動幅が小さくなっており、より定常波が強い仲上ライスフェージング環境になっていると思われる

【遮蔽モデル】

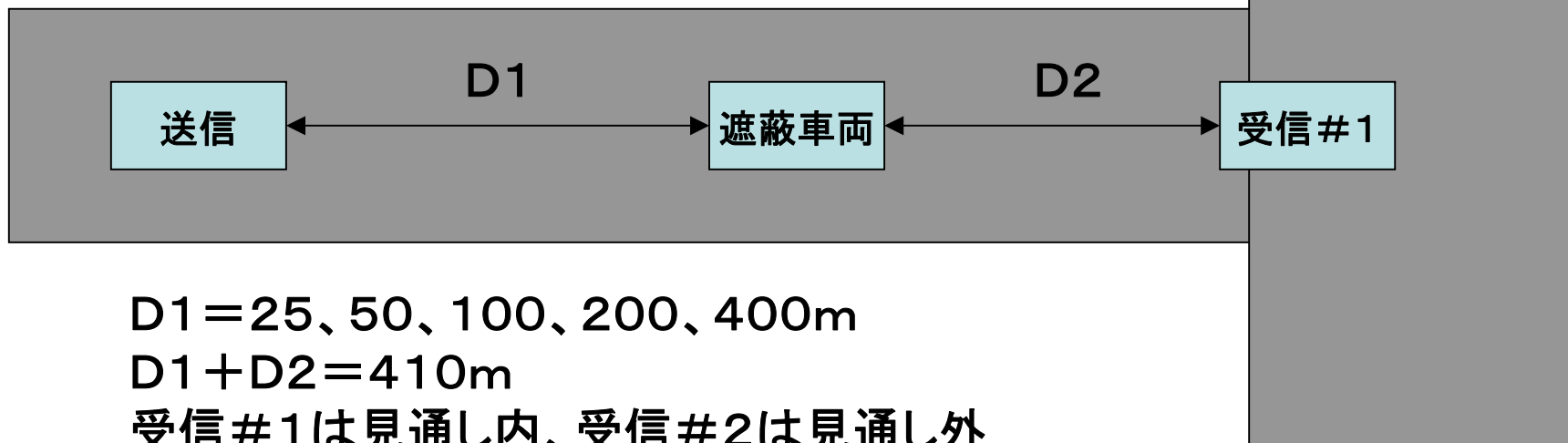
車型条件 GSとアルファードを想定

セダン (W:1.8m、L:4.8m、H:1.4m、最低地上高 δ :0.1m)

ミニバン (W:1.8m、L:4.8m、H:1.9m、最低地上高 δ :0.2m)



遮蔽車両の配置条件

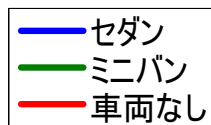
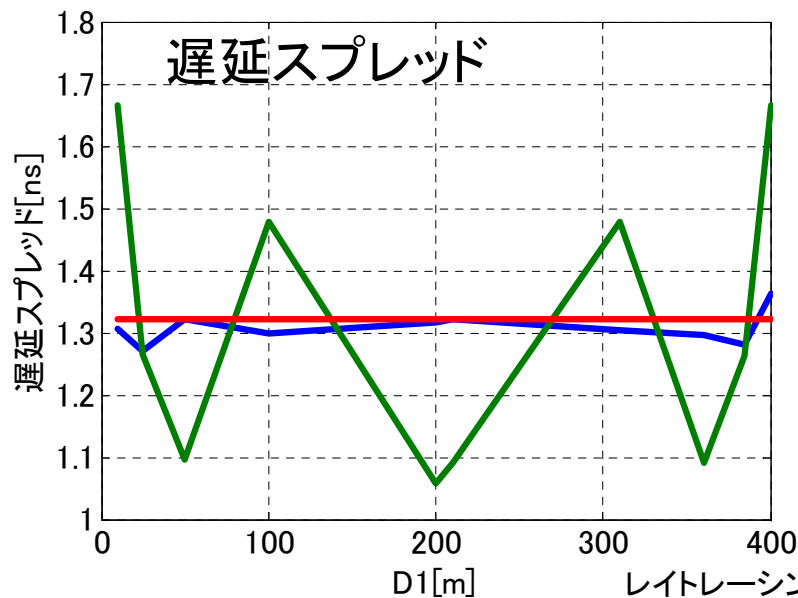
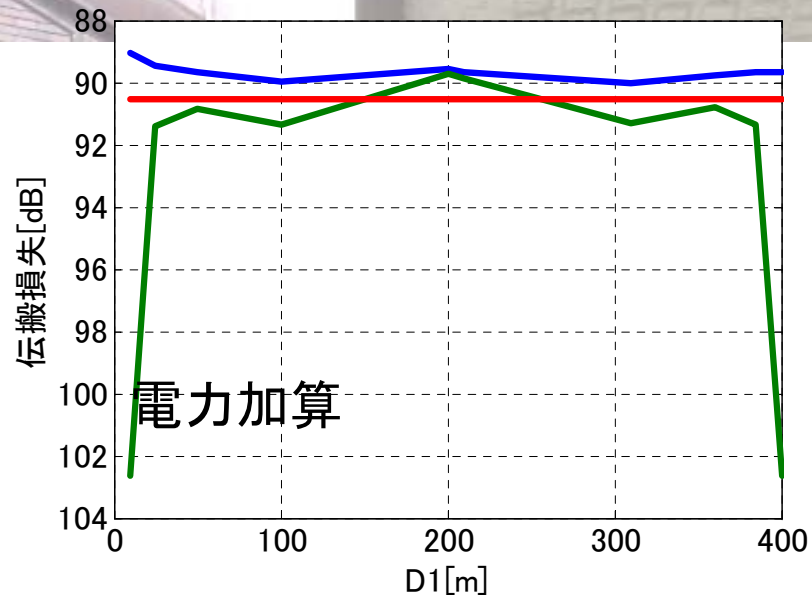
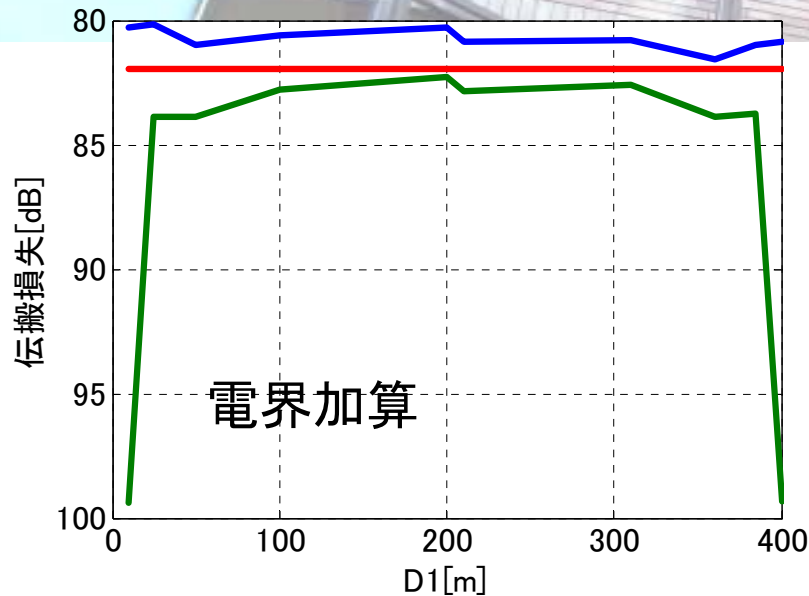


$D1 = 25, 50, 100, 200, 400\text{m}$

$D1 + D2 = 410\text{m}$

受信#1は見通し内、受信#2は見通し外

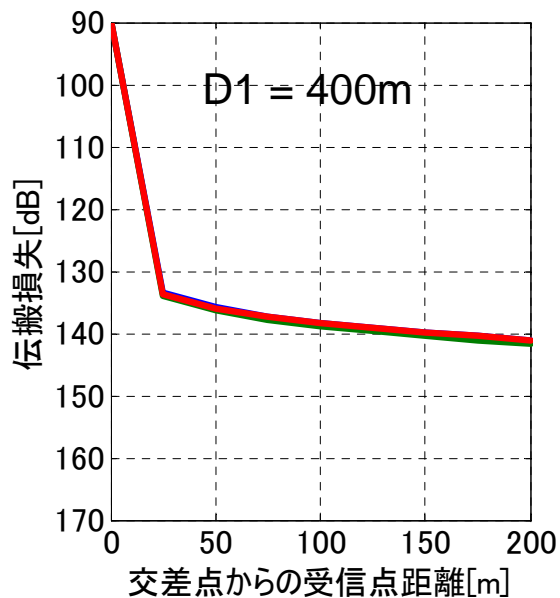
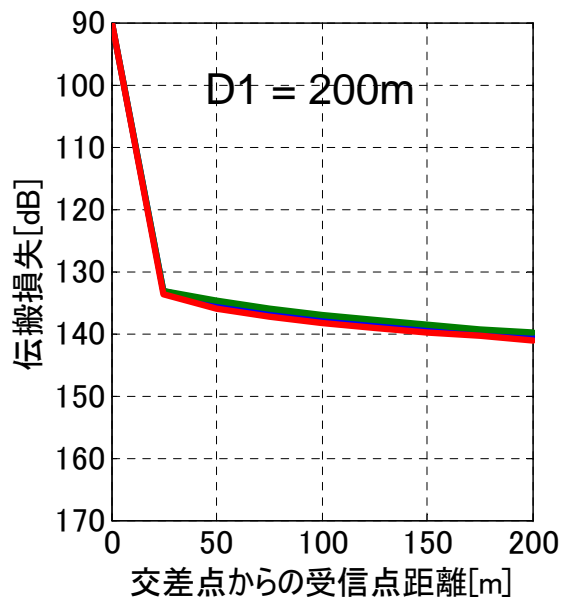
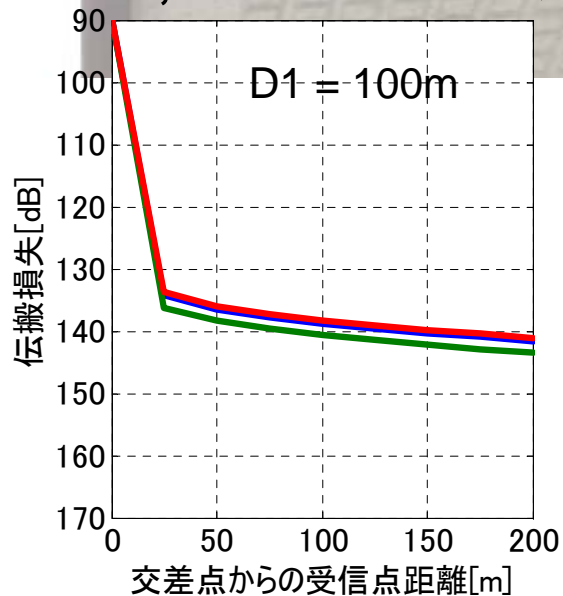
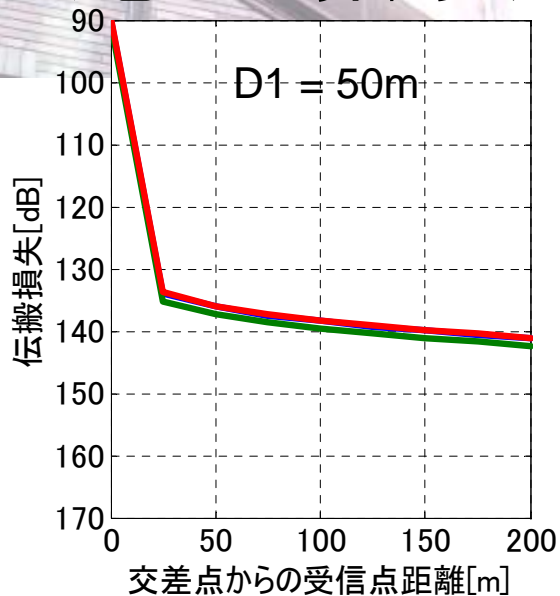
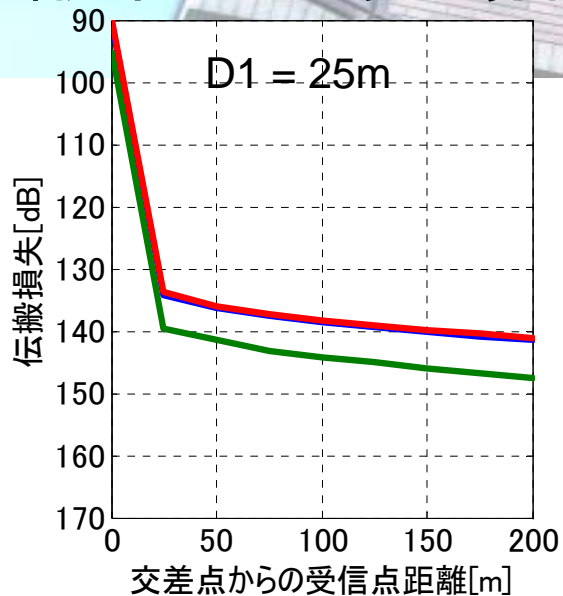
遮蔽車両がある場合（見通し内, 5.815GHz）



D1: 送信点からの車両距離

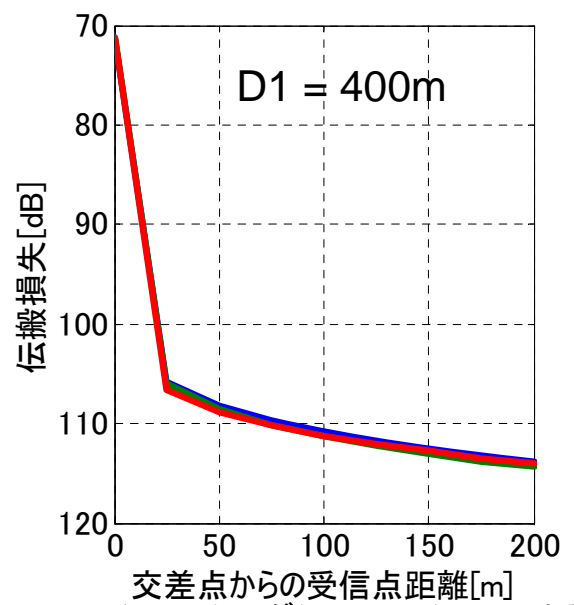
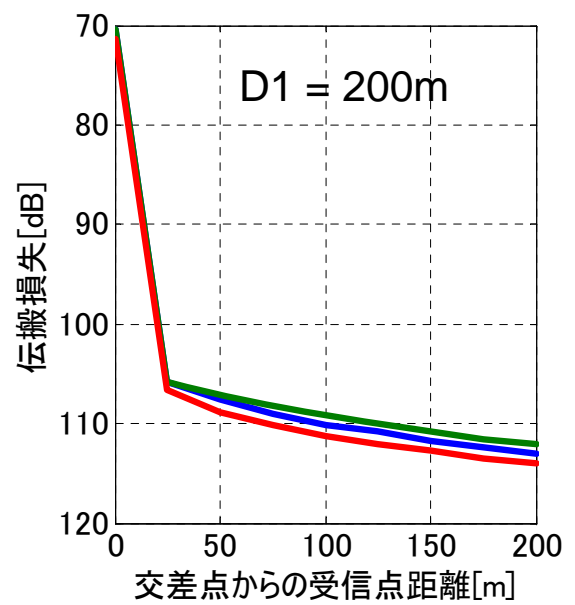
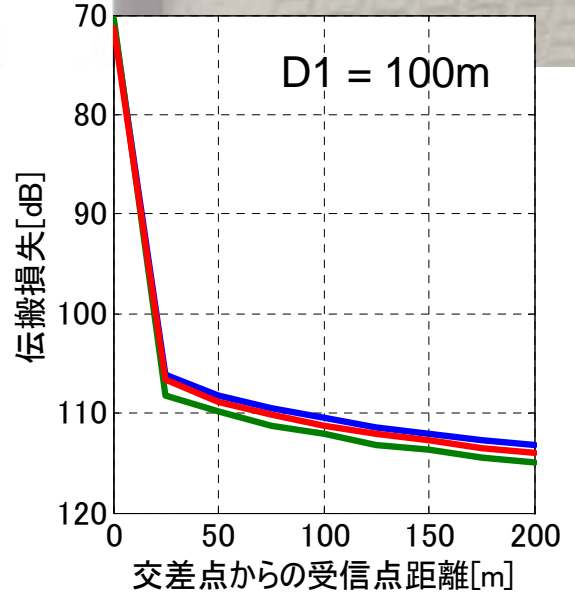
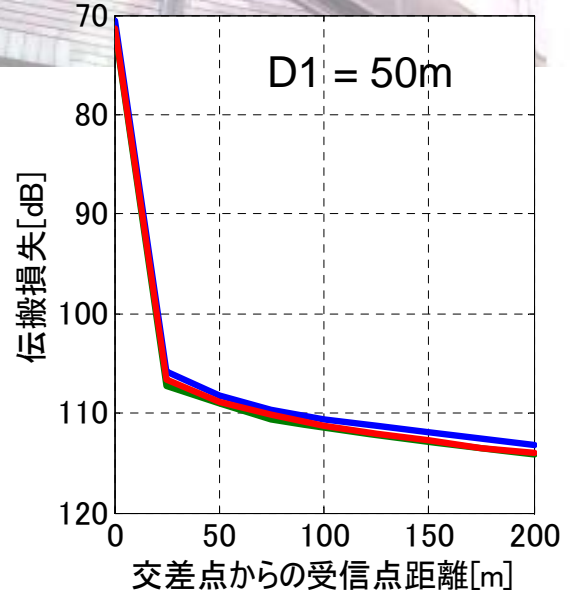
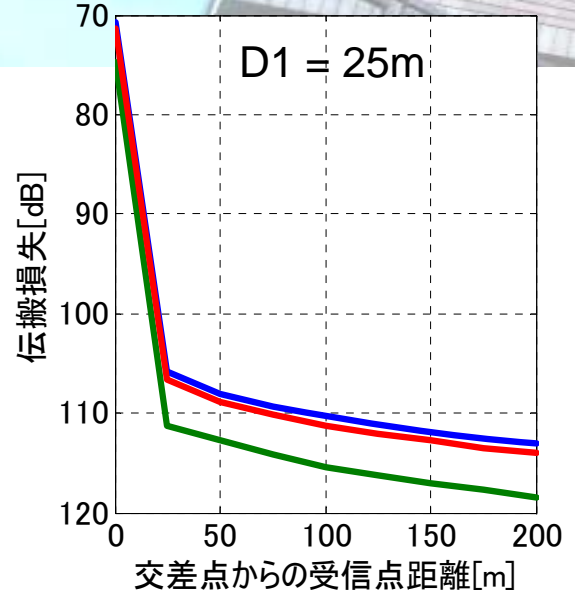
D1 = 10m, 25m, 50m, 100m, 200m, 210m, 310m, 360m, 385m, 400m

遮蔽車両がある場合(電力加算, 見通し外, 5.815GHz)



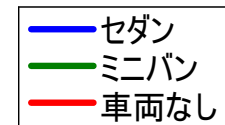
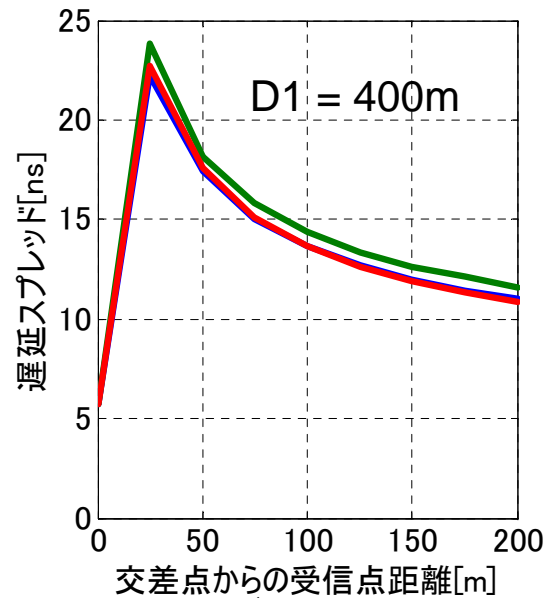
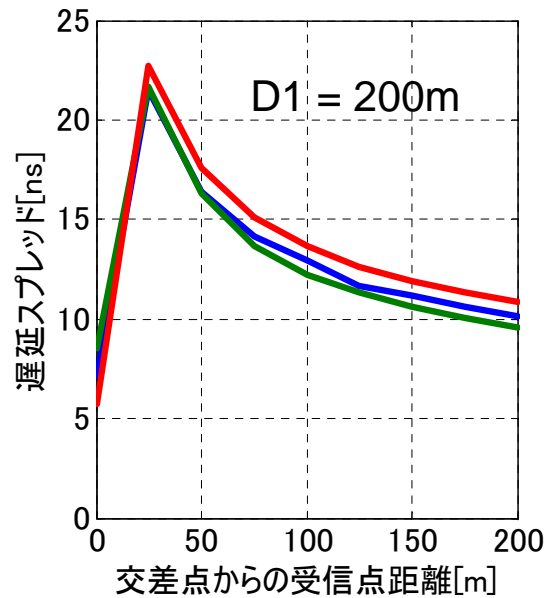
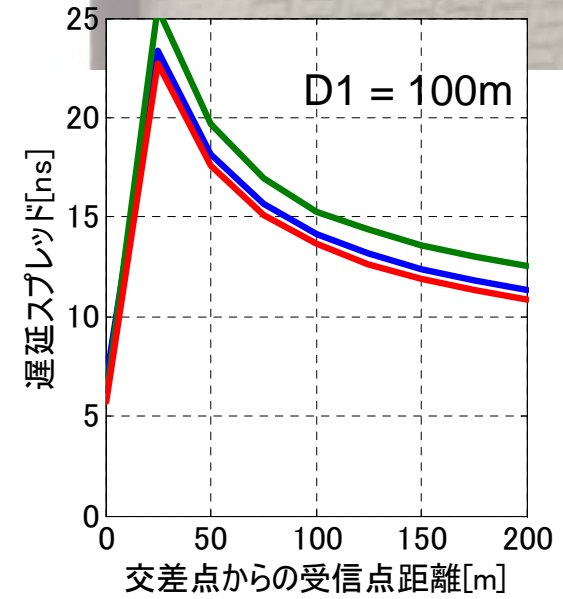
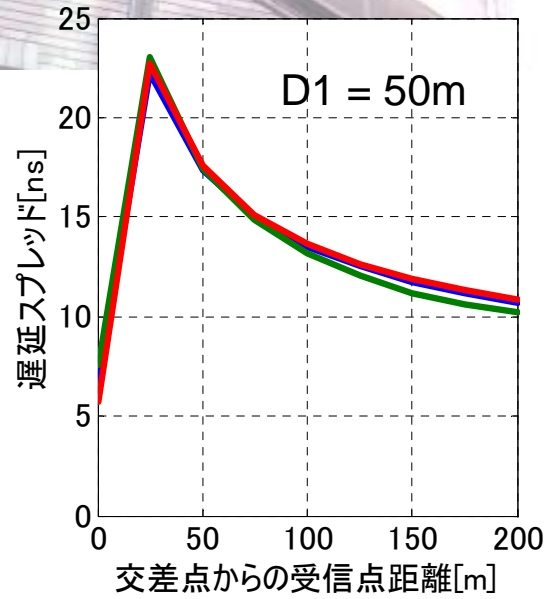
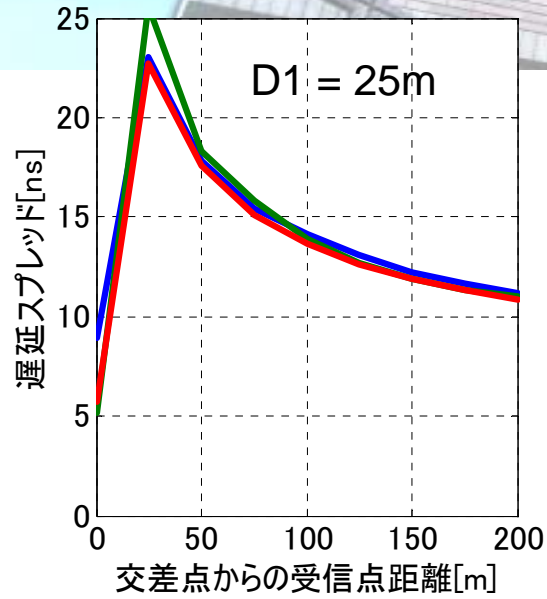
- セダン
- ミニバン
- 車両なし

遮蔽車両がある場合(電力加算, 見通し外, 740MHz)



- セダン
- ミニバン
- 車両なし

遮蔽車両がある場合(遅延スプレッド, 見通し外, 5.815GHz)

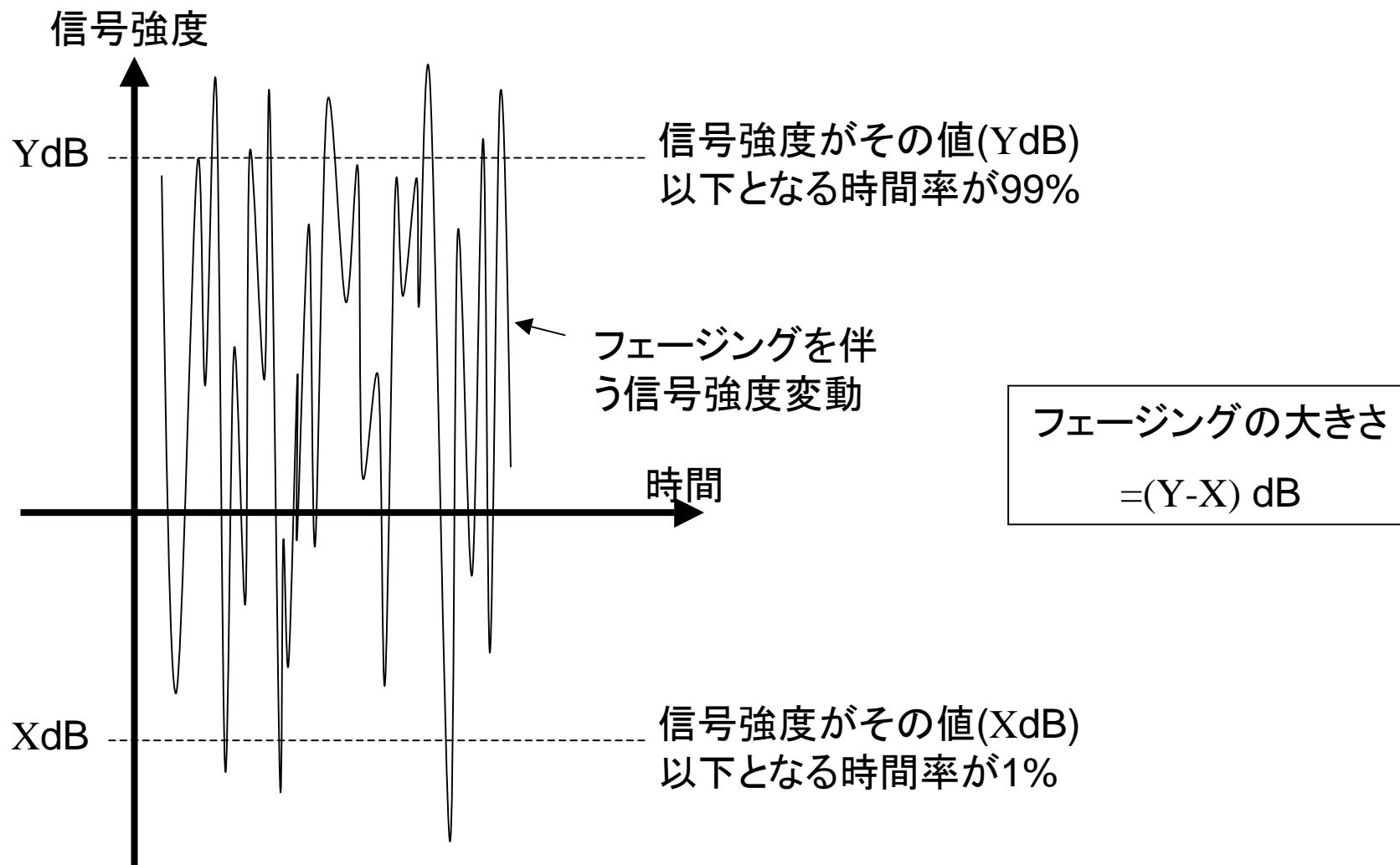


レイトレーシング計算から得られたサマリ[5]

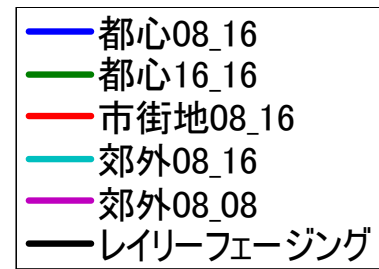
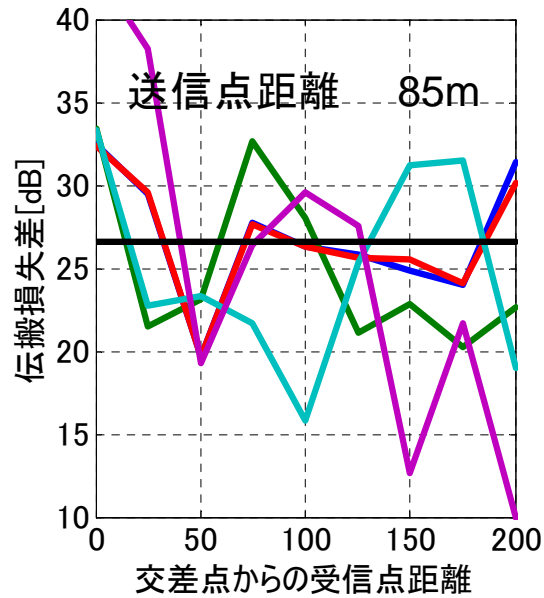
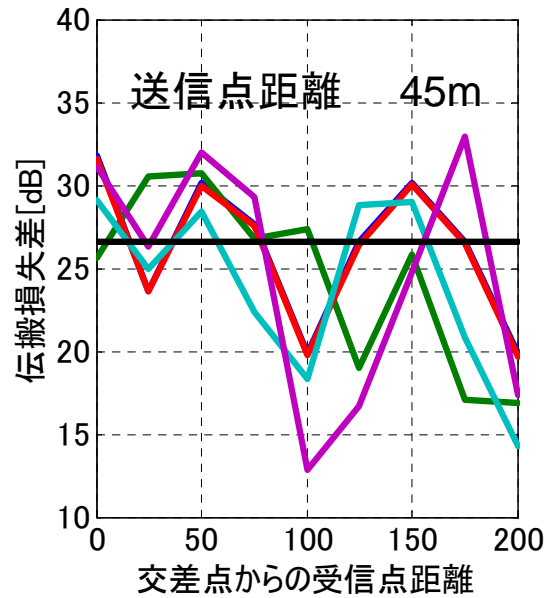
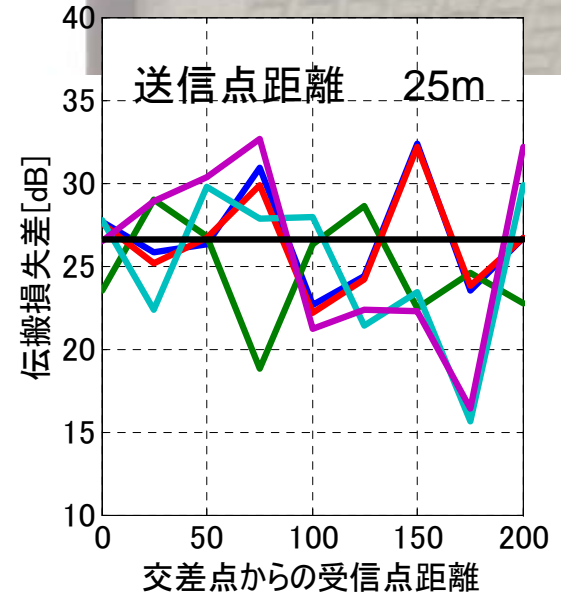
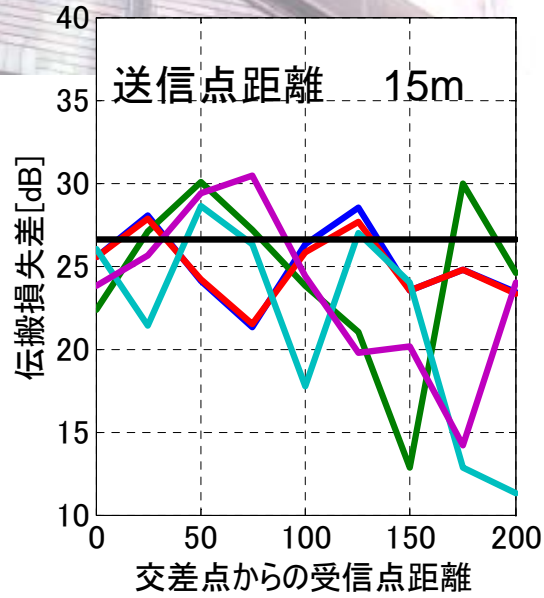
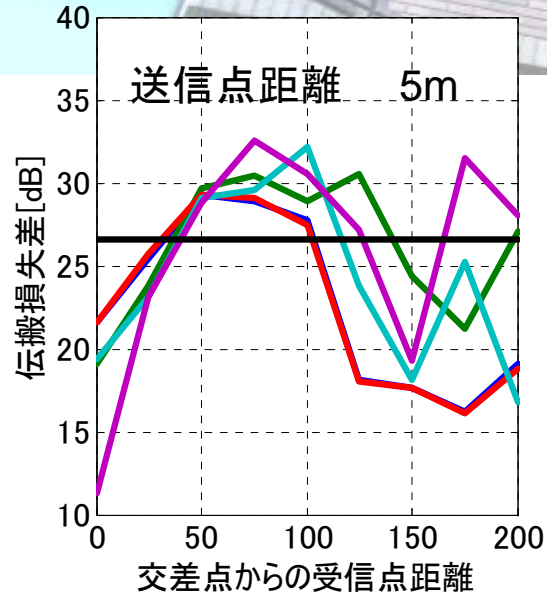
車々間無線通信環境の伝搬特性に関する主な知見

- 遮蔽車両がある場合
 - セダンの場合は送受アンテナ高が車高よりも高く直接波が遮られない環境であるので、ほぼ影響はない
 - ミニバンの場合は直接波が遮られ、影響が生じる。遮蔽車両が送受信点のどちらかの10m程度以下に近接した場合には大きな遮蔽が生じるが、それ以上に離れると大きな伝搬損失の増加は見られない
 - 遮蔽が発生する環境では、周波数が低い方が遮蔽の影響はやや小さい
 - 建物上部のエッジによる回折波が新たに加わるので、遅延スプレッドが大きくなる傾向がある。信号強度的には影響は大きくない
- フェージングの大きさに関する解析
 - 到来パスの電力分布という観点からは、送受信点が極めて近距離の環境を除き、見通し内でも見通し外でも、ほぼレイリーフェージングに近いフェージングとなる
 - つまり、卓越した定常波に散乱波成分が干渉するような仲上ライスフェージング環境よりもレイリーフェージングに近い環境であると言える
 - 送受信点が近距離(<10~20m)の場合はフェージング変動幅が小さくなっており、より定常波が強い仲上ライスフェージング環境になっていると思われる

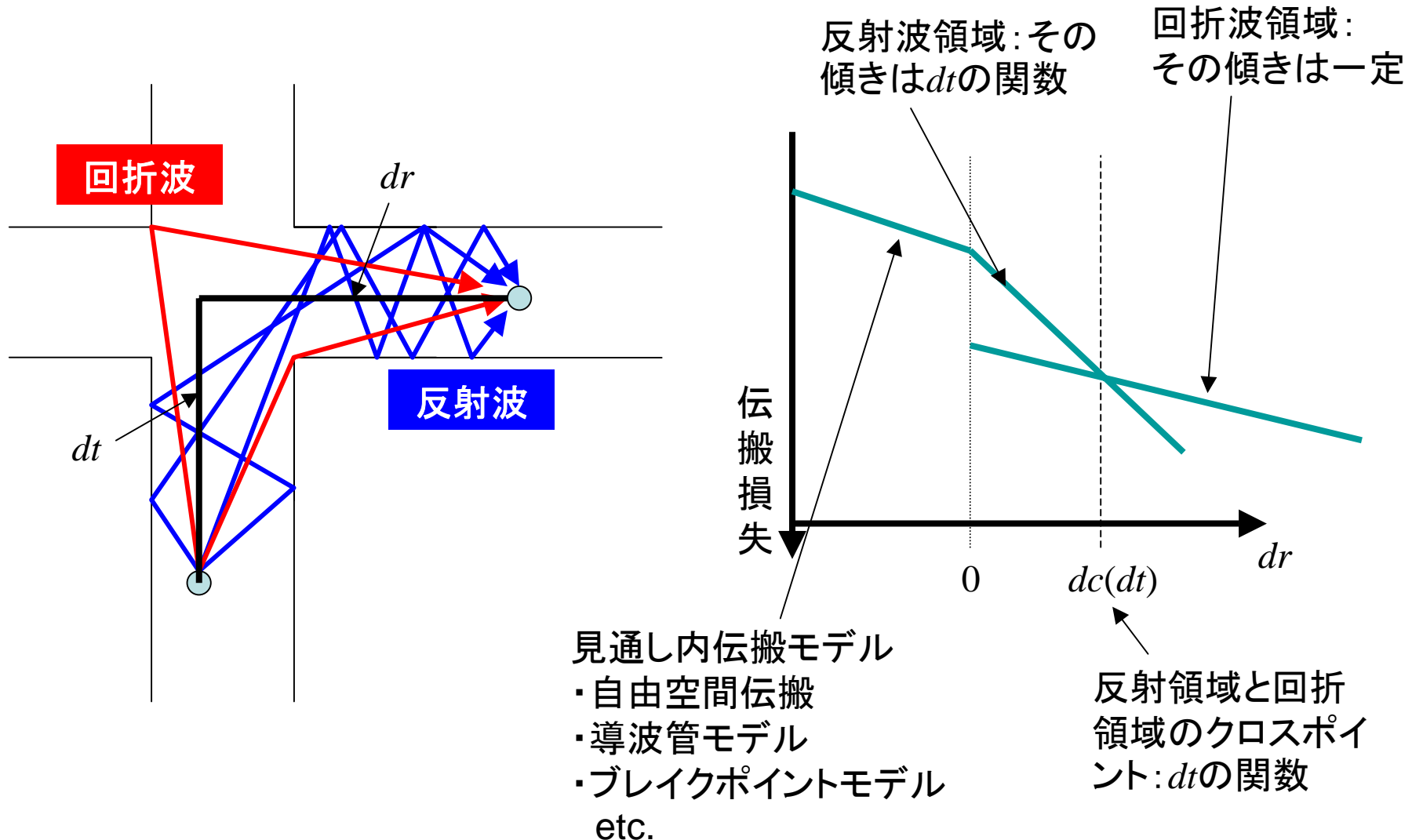
フェージングの大きさの定義



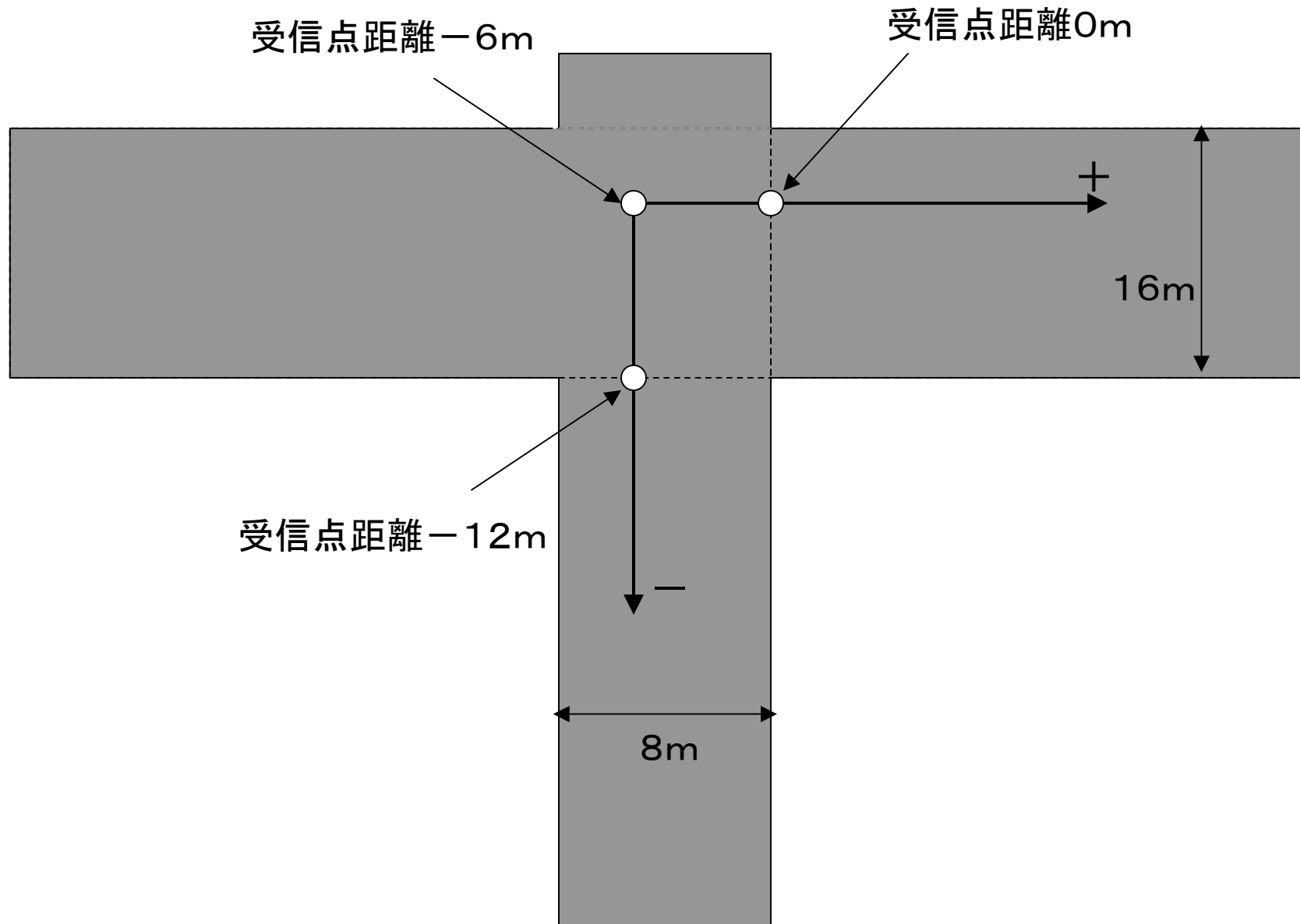
99%値と1%値の差 (5.815GHz, 見通し外)



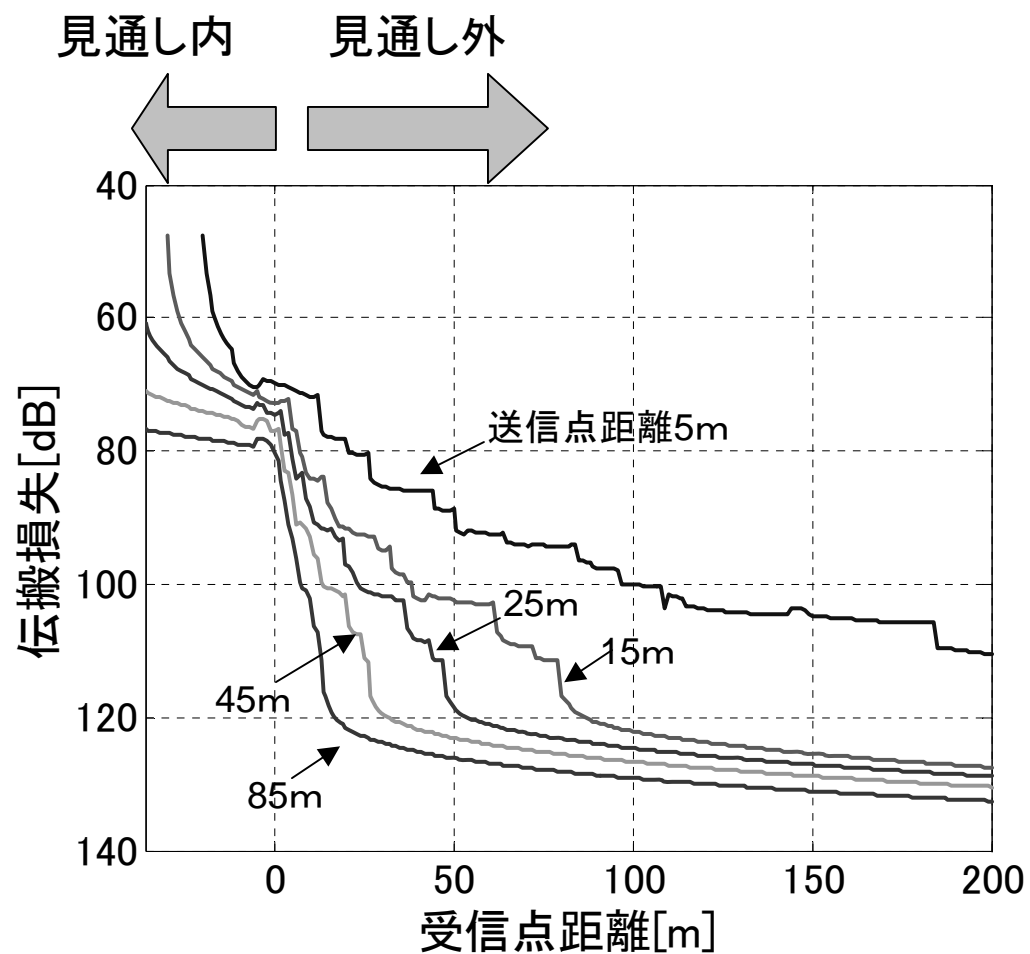
交差点における伝搬モデルの考え方



受信点位置



受信点位置の変化に対する伝搬損失特性



まとめ

- 車々間通信システム専門委員会からの委託研究「車々間通信における電波伝搬シミュレーション解析及び調査研究」の内容と結果のご紹介
- シミュレーション結果
 - 道路幅・周波数・市街地/郊外・アンテナ高、などの種々のパラメータを変化させた場合の総合的な伝搬特性の変化傾向を示した
 - 伝搬特性解析の結果に基づく、見通し外車々間通信環境における伝搬モデルの方向性
- 今後の課題
 - さらに詳細な伝搬特性解析に基づく伝搬モデルの確立
 - 実験データとの比較