
Improvement of 3D Ray Tracing Simulation in Microcell Environment by Introducing the Complex Radar Cross Section

D3 吉敷 由起子
Yukiko Kishiki

高田研究室

Outline

- ◆ 1) 背景と目的
- ◆ 2) 小さい散乱物体の定義
 - 2.1) 本研究の流れ
 - 2.2) 小さい散乱物体の定義
 - 2.3) 複素数のレーダ断面積の導出
 - 2.4) レイトレース法への適用
- ◆ 3) 実測とシミュレーションとの比較
 - 3.1) 理想的なストリートセルモデル
 - 3.2) 実環境.1
 - 3.3) 実環境.2
- ◆ 4) まとめと今後の課題

1) 背景と目的

第4世代移動通信

※2010年の実現を目指す移動通信システム

- ・広帯域伝送
- ・マルチメディア化
- ・周波数の有効利用
- ・近くのセルで同じ周波数を利用

⇒エリアの狭いマイクロセル環境が想定されている。

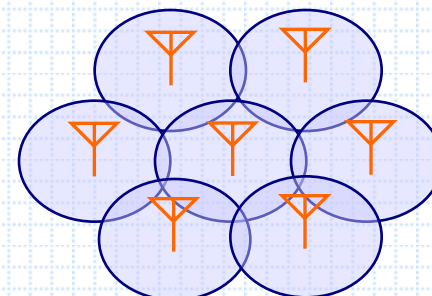
置局設計
の情報を
取得した
い

置局設計: 基地局を事前に設計すること

マイクロセル環境とは・

1基地局がカバーするエリアのことをセルと呼ぶ。

マクロセル(数km) ⇒ マイクロセル(数百m~1km程度)



セル構成

伝搬シミュレータ

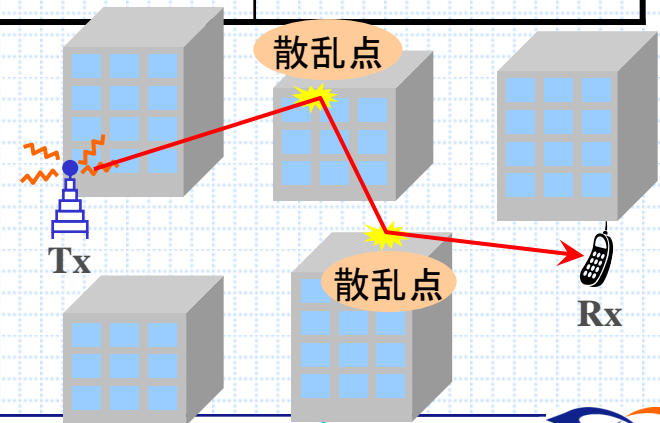
- 1) レイトレース法
- 2) FDTD・モーメント法

FDTD : Finite Difference Time Domain Method

1) 背景と目的

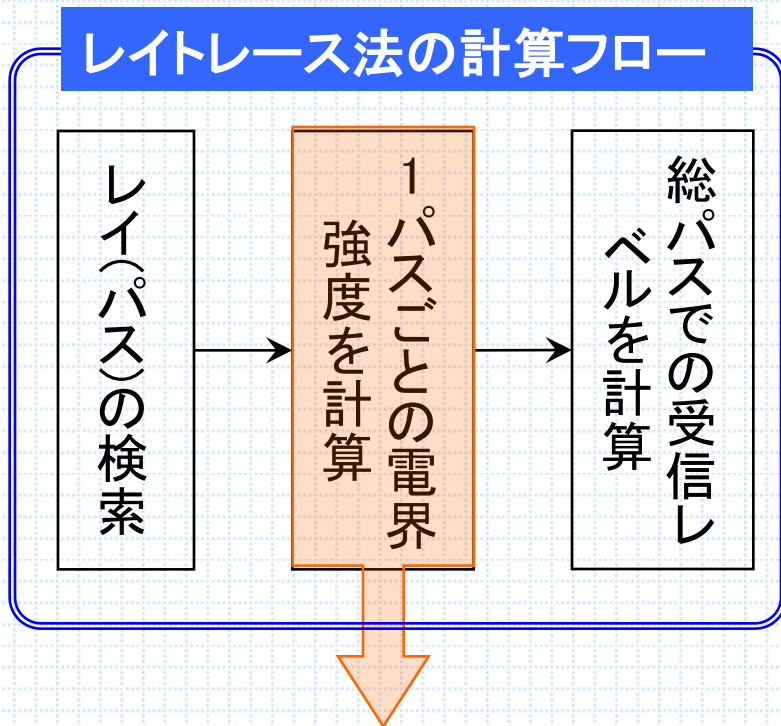
	計算方法	特徴	計算エリア
レイトレース計算	幾何光学手法の1種。送信点と受信点との間にある物体における幾何光学的散乱に基づきレイを探索する手法。	マルチパス環境を模擬できることから、伝搬損失、受信レベル、パスの遅延時間、到来方向などが得られる。	数kmまで計算できる。
FDTD・モーメント法	Maxwell方程式を微分・積分方程式で解く手法。	時系列で計算可能。近傍界の計算も可能。	計算領域が狭く、計算時間がかかる。

➡ マイクロセル環境ではレイトレース計算が使われる。



1) 背景と目的

レイトレース法の計算フロー



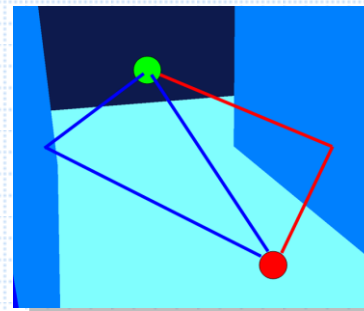
送信点から散乱点を通り、受信点へ到達。

$T_x \Rightarrow$ 回折 \Rightarrow 反射 $\Rightarrow R_x$

この経路のとおり、損失を計算していく。

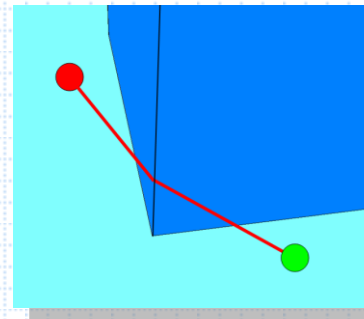
散乱点の種別

反射



- *入射と反射の角度が同じ
- *反射係数は無限の大きさを有する面での係数を用いる。

回折



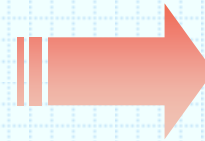
- *回折係数は無限の面で形成される無限長のエッジを仮定している。

1) 背景と目的

レイトレース計算の問題点

①幾何光学近似が成り立たない数波長程度以下の物体が扱えない。

レイトレース計算の代わりに、散乱物体を物理光学積分により与える。ただし計算時間がかかる。



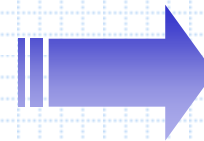
本研究の目的

幾何光学近似の限界と対応策を検討。小さい散乱物体の定義を行う。この問題が顕著に現れるストリートセル環境について検討する。

本発表

②曲面や曲線が扱いづらい。

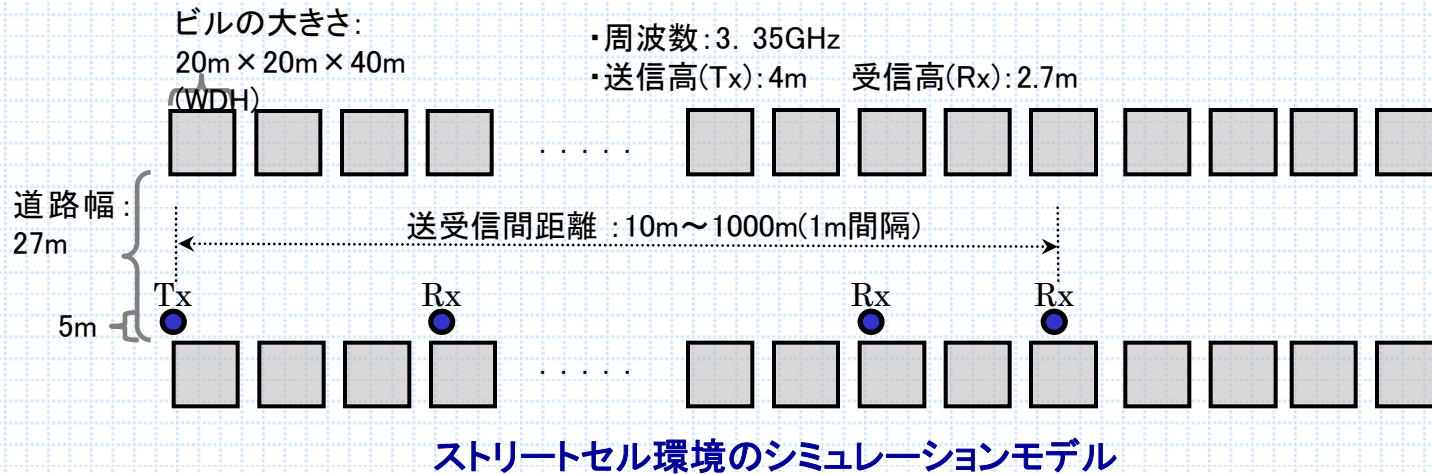
通常レイトレース計算では曲面や曲線を多角形にて近似し、回折波として扱っている。



幾何光学での取り扱いについて検討する。

1) 背景と目的

ストリートセル環境



ストリートモデルにおける計算条件

Frequency	3.35 GHz($\lambda = 0.09\text{m}$)
Tx and Rx polarization	vertical
Height of Antennas	Tx:4.0 m, Rx:2.7 m
Tx-Rx Distance from the street line.	5.0 m
Maximum number of scattering	reflection:1 diffraction:1
Building material	Concrete
Ground material	Earth

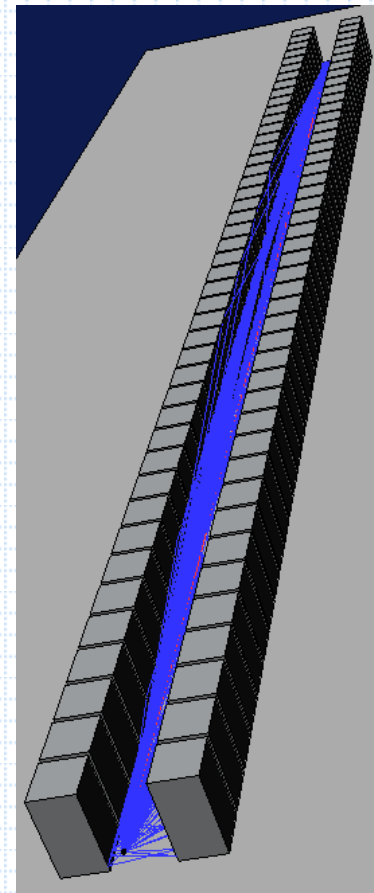
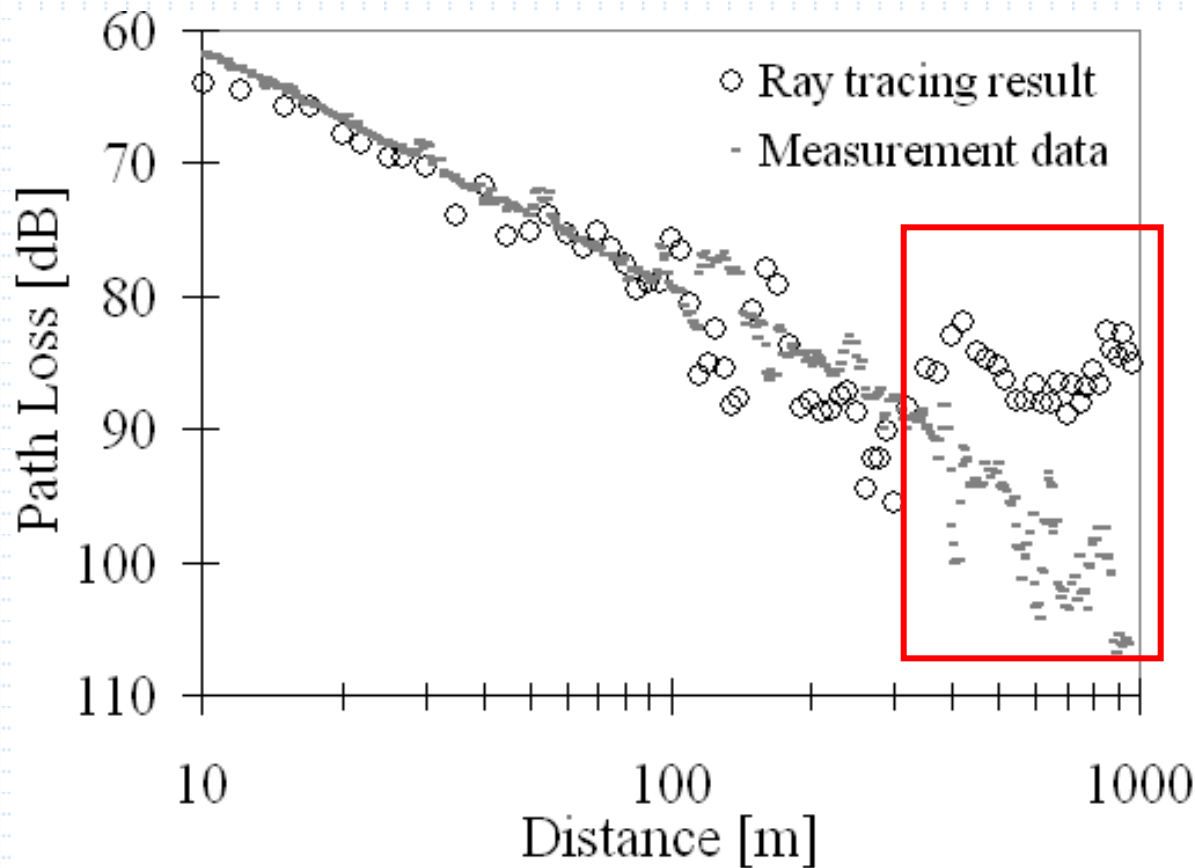
コンクリート, 大地, アスファルトの電気的特性

Parameter	Concrete	Earth	Asphalt
Permittivity(ϵ_r)	6.76	3.0	2.7
Permeability(μ_r)	1.0	1.0	1.0
Conductivity(σ)[S/m]	2.3E-3	1.0E-4	1.0E-2

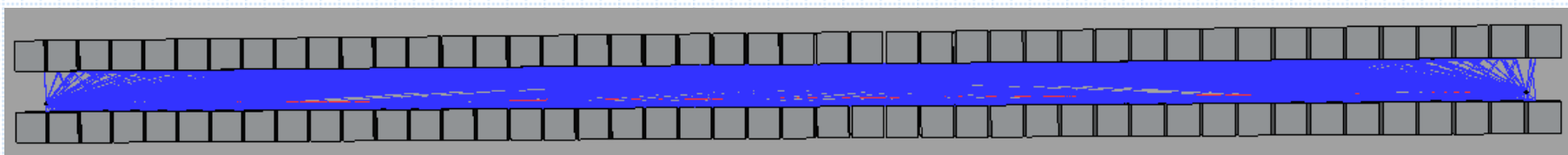
1)背景と目的

ストリートセル環境における伝搬損失の推移

Rxは1m刻みに計算し、10m区間の中央値をプロット

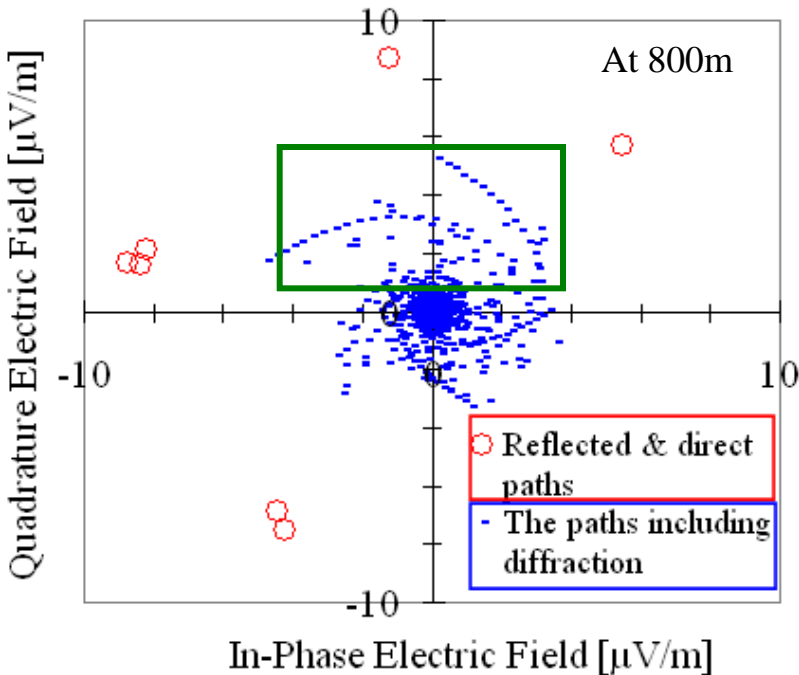


◆ 遠距離における伝搬損失が経験的に知られる値よりも非常に小さくなる。

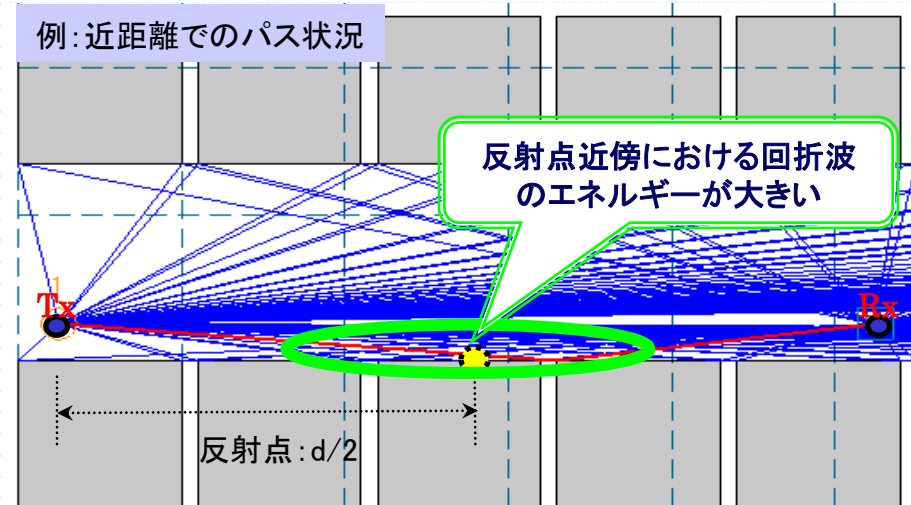


1) 背景と目的

幾何光学近似の問題点



- 正規反射のパス以外に、道路に面した多数の建物によるエッジ回折のパスが多数存在する。
- 正規反射点近傍のエッジからの回折波のエネルギーが大きい。



◆ 幾何光学近似の問題点

- 正規反射・エッジ回折はそれぞれ反射面・回折エッジが無限の大きさと仮定して計算している。
 - 個々の散乱体の大きさがパスの第1フレネルゾーンよりも大きい必要がある。
- 現実には、正規反射パスの第1フレネルゾーン内に多数の回折エッジが存在するため、反射と回折でダブルカウントしている。

→遠距離における伝搬損失が過小評価された原因である。

2.1) 本研究の流れ

◆ Step1) 小さい散乱物体の定義

- 幾何光学 Geometrical Optics (GO) が適用できる範囲の調査
 - 物理光学 physical optics (PO) と幾何光学 GO の比較

◆ Step2) 複素数のレーダ断面積 Radar Cross Section (RCS) の導出

- 幾何光学が適用できない領域に、RCSによる係数で損失を与える

◆ Step3) レイトレース法への複素数のRCSを適用

- RCSで与えられるパスの生成方法
- RCSによる電界強度の求め方

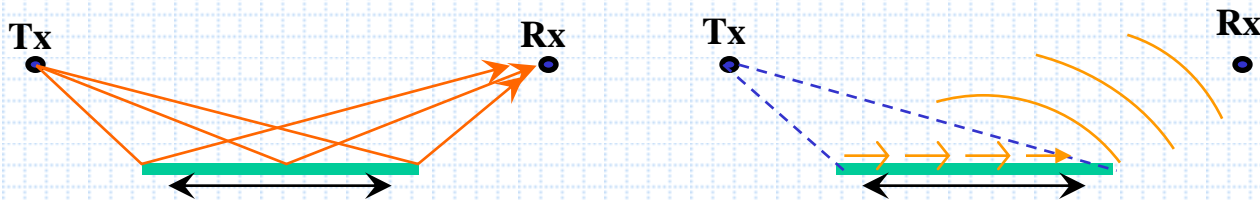
◆ Result) 従来法、提案法、実測との比較

- 理想的なストリートモデルと実測環境

2.2) 小さい散乱物体の定義

小さい散乱物体の定義

どのくらいの小ささ、短さだと、幾何光学で用いている反射と回折が
使えないのか。



幾何光学

反射波、回折波2パス

物理光学積分

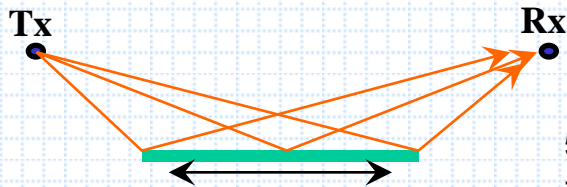
受信点での散乱電界

散乱物体の長さを変動
→両者を比較

レイトレース法の中で幾何光学
近似が使える(正規反射と回折
の切り分けができる)散乱体の
大きさを検討。

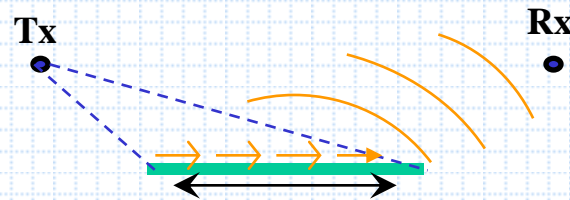
幾何光学	光の幾何光学的な直線とみなす手法 反射や回折は散乱体の局所的な幾何光学形状に依存すると仮定。
物理光学	高周波近似の一種。入射波に照らされた面上に面電流を仮定し、この電流からの再放射として散乱界を求める手法。

2.2) 小さい散乱物体の定義 物理光学法と停留位相法



幾何光学
反射波、回折波2パス

物理光学に停留位相法を適用すると幾何光学に収束される。



物理光学積分
受信点での散乱電界

物理光学積分の停留位相近似
受信点での散乱電界

散乱物体の長さを変動
→両者を比較

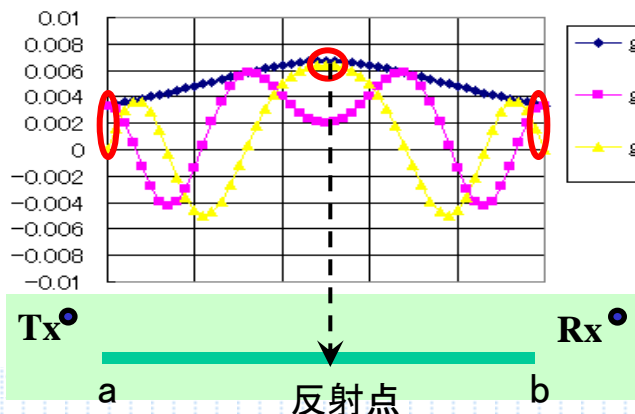
停留位相法(Stationary Phase: SP)

高周波において積分を解析的に近似評価する数学的手法

観測点での受信電界の式

$$F(x) = \int_a^b e^{ikf(x)} g(x) dx$$

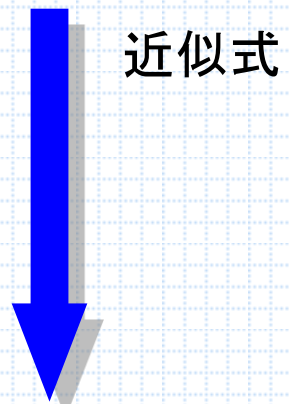
波数kが十分に大きいとき、振動が多く発生する。



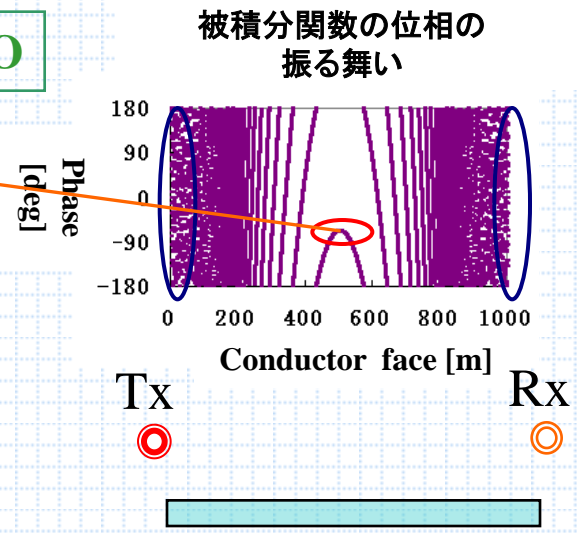
積分の結果にはある位相停留点近傍からの寄与が支配的であり、そこから十分に遠い領域では激しく振動して互いに打ち消しあう。

2.2) 小さい散乱物体の定義 物理光学積分と停留位相法

◆ 物理光学積分 (Physical Optics; **PO**)



停留点
(フェルマーの原理を満たす点)



◆ 停留位相法 (Stationary Phase; **SP**)

- 高周波において積分を解析的に近似評価する数学的手法
- 積分値への寄与
 - 主要項...位相が停留となる点の近傍から生じる
 - 次に主要な補正項...積分の端点から生じる
- 積分上の停留点と端点以外はキャンセルされる。

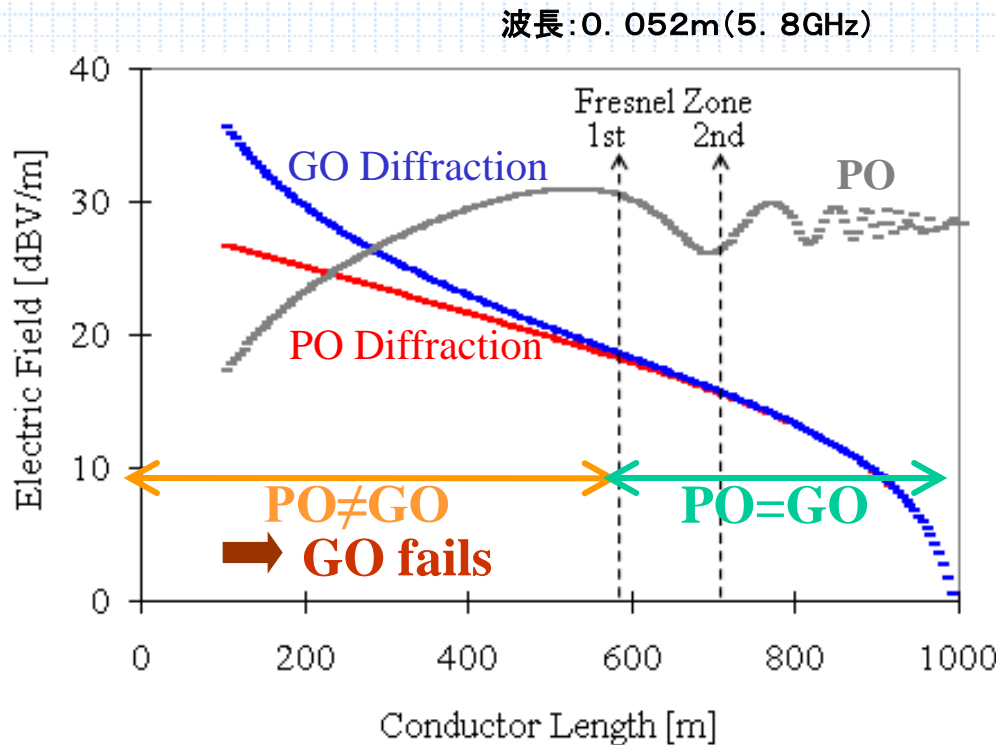
正規反射成分

エッジ回折成分

近似式 $\text{PO} \doteq \text{正規反射成分} + \text{エッジ回折成分}$

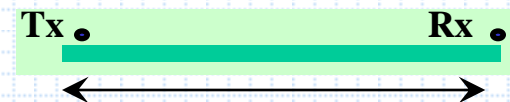
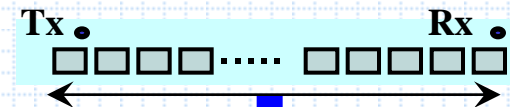
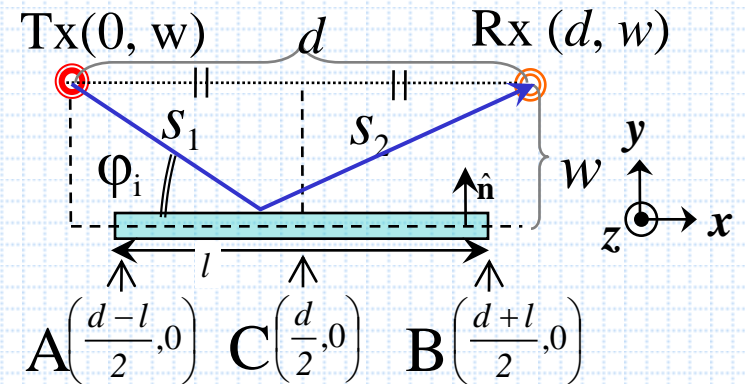
2.2) 小さい散乱物体の定義 正規反射と回折の分離の解析結果

- (1) **PO** — **正規反射成分** ⇒ 正しい回折成分 ; PO 回折
- (2) **エッジ回折成分** ⇒ GO 回折



第1フレネルゾーン内の領域では幾何光学
が使えない。

有限長の導体平板による円筒波
の散乱の2次元モデル

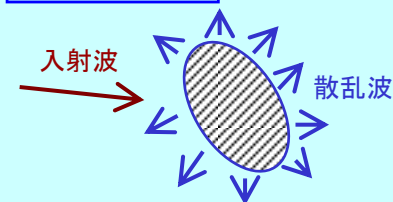


※導体と送受信点は中心線に対して対称に配置

2.3) 複素数のレーダ断面積の導出

散乱現象

幾何光学が適用できない領域 → 散乱断面積



散乱断面積 (Radar Cross Section: RCS)

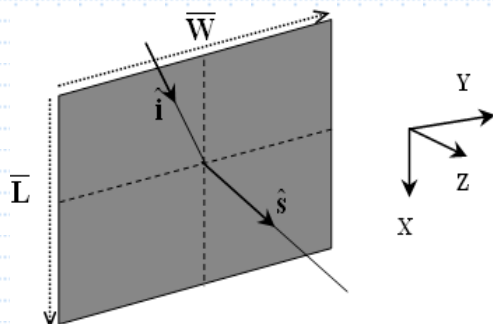
入射波に対して、どのくらい散乱するか、を定義したもの。
2次波源で散乱波が再放射される。ある指向性をもった点波源と考えられる。

物理光学による散乱電界

求め方

散乱断面積

平板モデルの散乱断面積



導体以外の材質にも適用できるように、波動インピーダンスから導出

位相項を加味した複素数の散乱断面積を求めた。

$$\sqrt{\sigma_c} = \frac{jkLW}{\sqrt{\pi}(1+Z/\eta)} \left(Z/\eta \hat{n} \cdot \hat{h}_r \times \hat{e}_i + \hat{n} \cdot \hat{e}_r \times \hat{h}_i \right) \frac{\sin[1/2k\bar{L} \cdot (\hat{i} - \hat{s})]}{1/2k\bar{L} \cdot (\hat{i} - \hat{s})} \frac{\sin[1/2k\bar{W} \cdot (\hat{i} - \hat{s})]}{1/2k\bar{W} \cdot (\hat{i} - \hat{s})} e^{-jk\bar{r}_o \cdot (\hat{i} - \hat{s})}$$

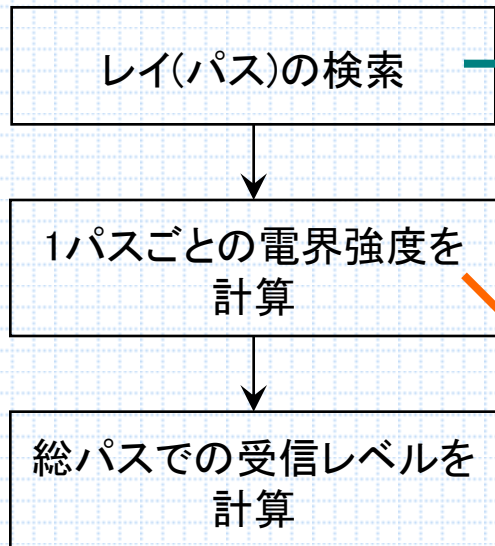
- \hat{e}_r The unit vector along the electric polarization
- \hat{h}_i The unit vector along the incidence magnetic polarization
- \bar{r}_o The position vector of the origin of the coordinate system.

2.4) レイトレース法への適用

散乱種別

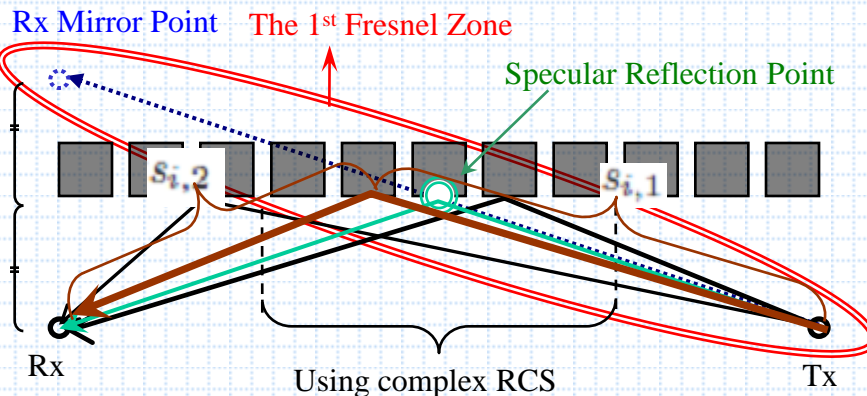
反射 透過
回折 **RCS散乱**

レイトレース法の計算フロー



パスの生成方法

RCS散乱として、新たな波源を与える。



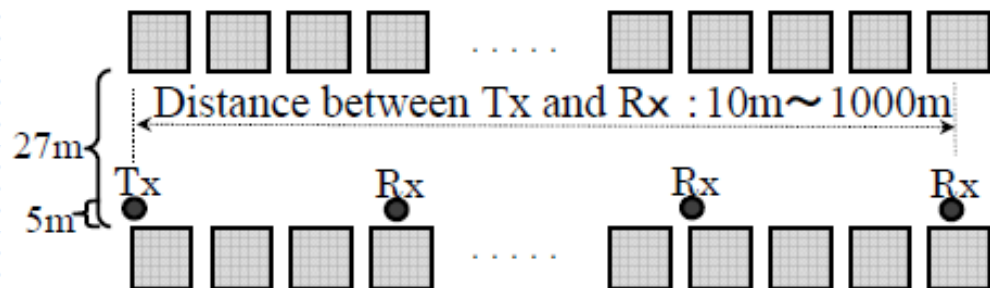
RCS散乱波の生成方法

- 1) 送信点と受信点の鏡像点から第1フレネルゾーンを生成
- 2) 第1フレネルゾーン内の反射波と回折波を削除
- 3) 面の中心点(RCS点)を経由するパスを生成

レーダ方程式より電界強度の計算式を導出

$$E_i = \frac{\lambda E_t e^{-jks_{t,1}}}{4\pi s_{i,1}} \cdot \underbrace{g_t(i)}_{\text{Antenna gain}} \cdot \underbrace{\tilde{R}_i}_{\text{Reflection}} \cdot \underbrace{\tilde{T}_i}_{\text{Transmission}} \cdot \underbrace{\sqrt{\tilde{\sigma}_{ci}}}_{\text{RCS}} \cdot \underbrace{g_r(i)}_{\text{Antenna gain}} \frac{e^{-jks_{t,2}}}{\sqrt{4\pi s_{i,2}}}$$

3) 実測とシミュレーションとの比較 計算条件 - 基本モデル



散乱体サイズ: 20m × 20m × 40m (W × D × H)

周波数	920MHz ($\lambda=0.32\text{m}$)
送信電力	1W
アンテナ	Tx : オムニアンテナ 垂直偏波 Rx : オムニアンテナ 垂直偏波
アンテナ高	Tx : 4m Rx : 2m
材質	Building : Concrete (Permittivity = 6.76, Conductivity = 2.3E-3 [S / m]) Ground : Earth (Permittivity = 3.0, Conductivity = 1.0E-4 [S / m])
散乱の最大回数	Reflection : 1 Diffraction : 1 Scattering by RCS : 1

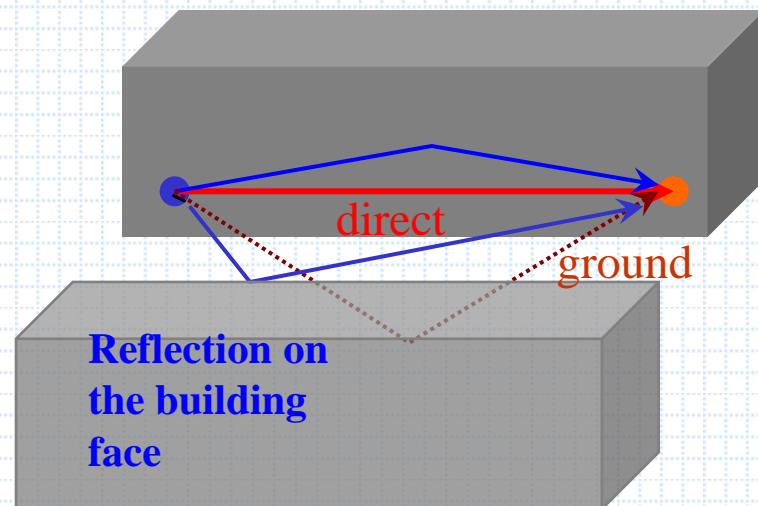
<計算手法>

*従来法

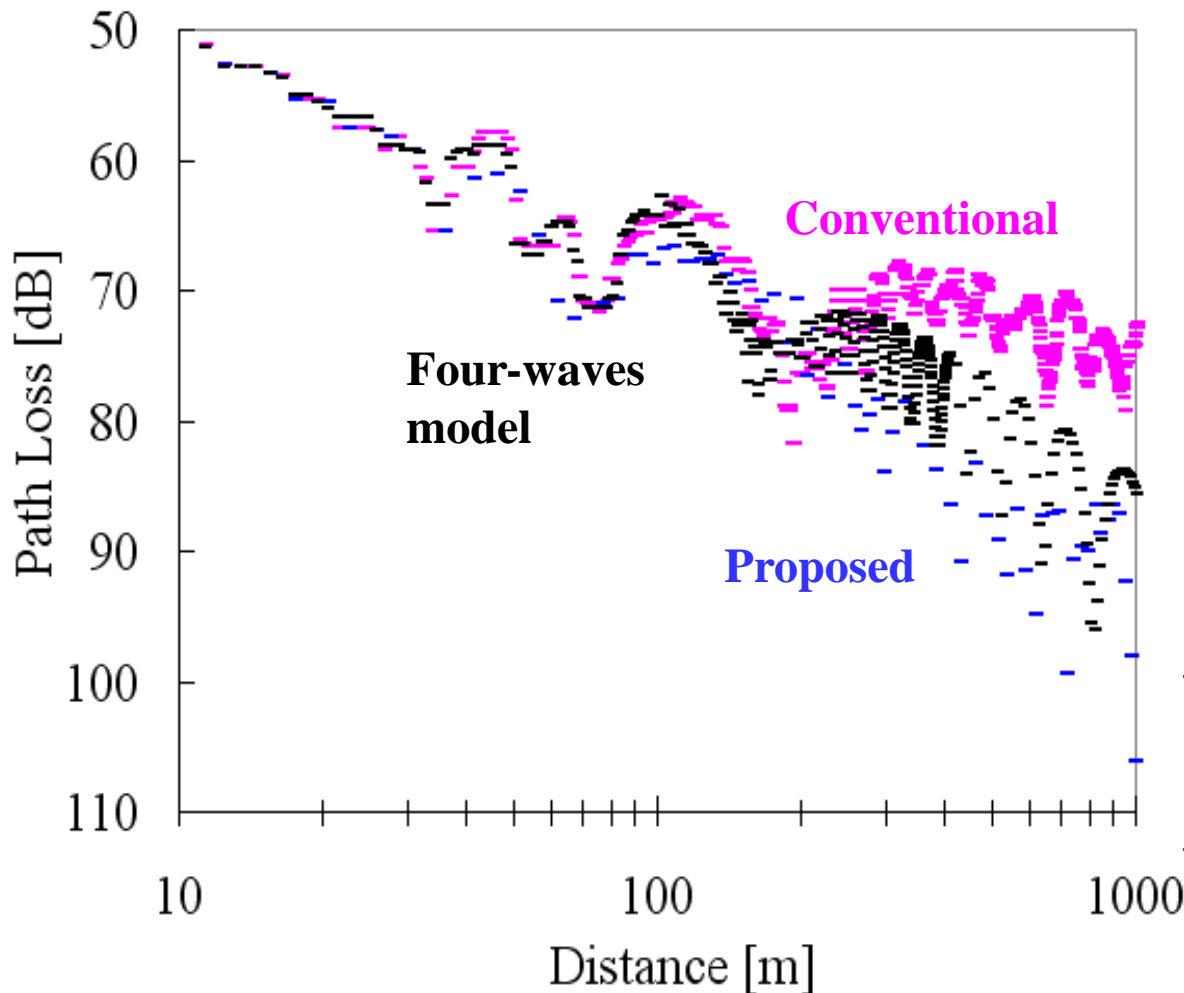
*提案法

*4波モデル

直接波、大地反射、壁面
反射2波



3) 実測とシミュレーションとの比較 結果 - 基本モデル



<計算手法>

*従来法

*提案法

*4波モデル

直接波、大地反射、
壁面反射2波

*従来法

-遠距離で伝搬損失が小さくなる。

*提案法

-従来法よりも遠距離では、大きな値となった。

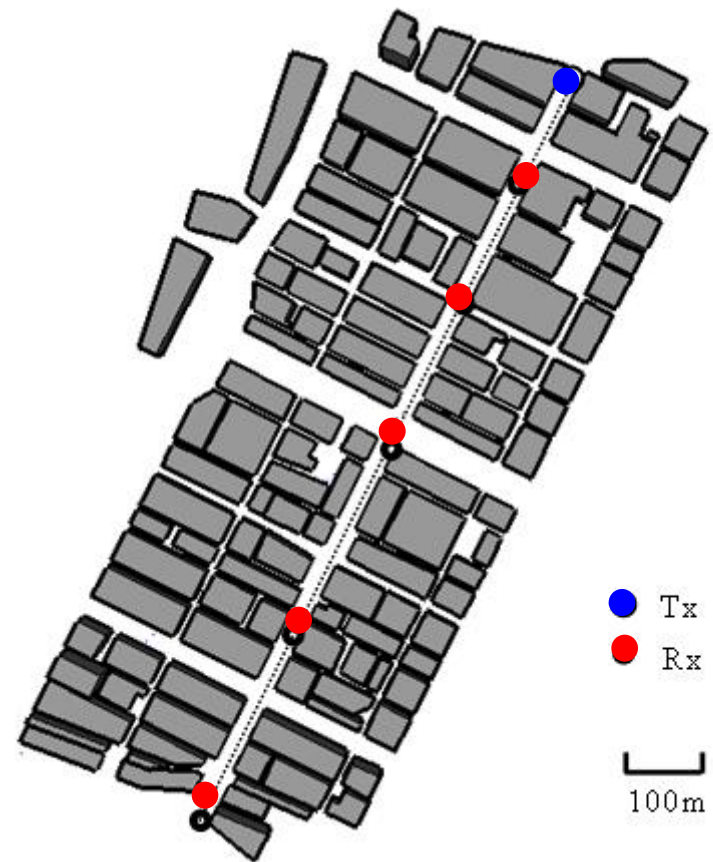
-4波モデルに近づいている。

10m区間の中央値をプロット

3) 実測とシミュレーションとの比較 計算条件 – 実測モデル1(東京駅周辺)

周波数	3.35GHz ($\lambda=0.09\text{m}$)
送信電力	1W
アンテナ	Tx : $\lambda/2$ Dipole Rx : $\lambda/2$ Dipole
アンテナ高	Tx : 4m Rx : 2.7m
材質	Building : Concrete (Permittivity = 6.76, Conductivity = $2.3\text{E-}3$ [S / m]) Ground : Asphalt (Permittivity = 2.7, Conductivity = $1.0\text{E-}2$ [S / m])
散乱の最大回数	Reflection : 1 Diffraction : 1 Scattering by RCS : 1

夜間観測

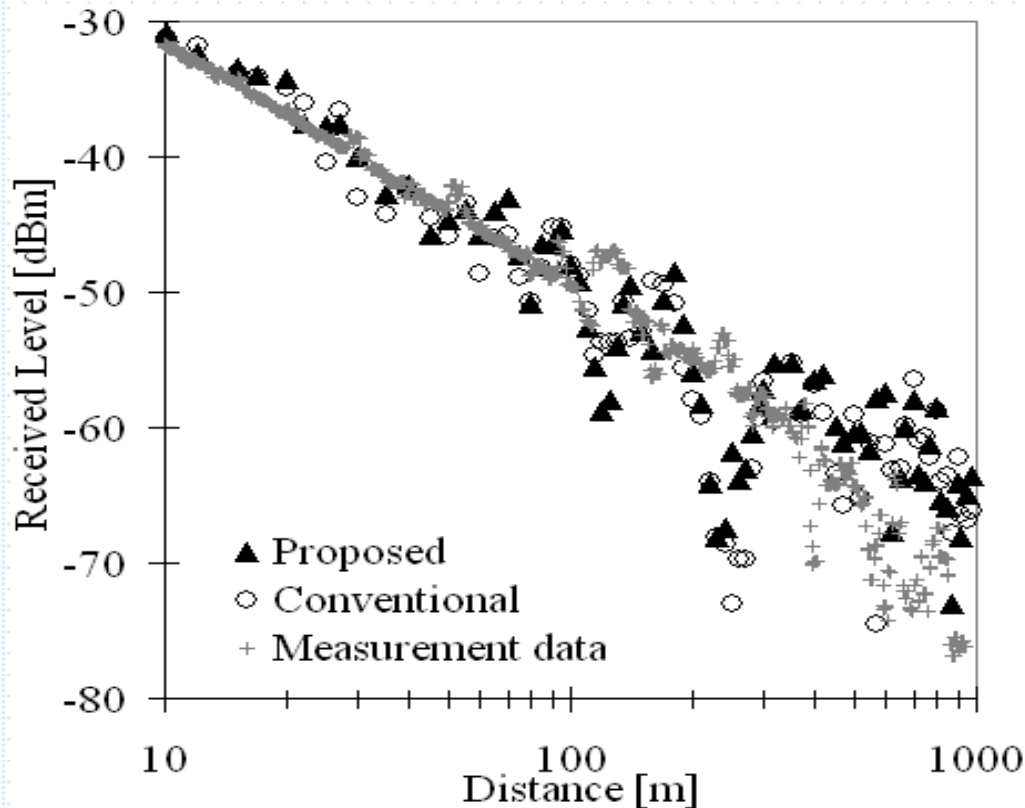


散乱体高さ:50m 道幅: 約 27m

参考文献:

増井裕也,“マイクロ波帯移動通信における電波伝搬特性の研究”,2003年東京工業大学学位論文

3) 実測とシミュレーションとの比較 結果 - 実測モデル1(東京駅周辺)



10m区間の中央値をプロット

- ◆ パスの多くは、送信点と受信点があるストリートの壁面上から発生していた。
- ◆ このモデルでは、従来法が実測モデルに近い値を示した。
 - このモデルではオブジェクトサイズが大きいため、大きなエネルギーを持ったパスが少ないためと考えられる。
- ◆ しかし、実際のビルには沢山の散乱体で構成されているため、今回の提案法の有効性は期待できる。

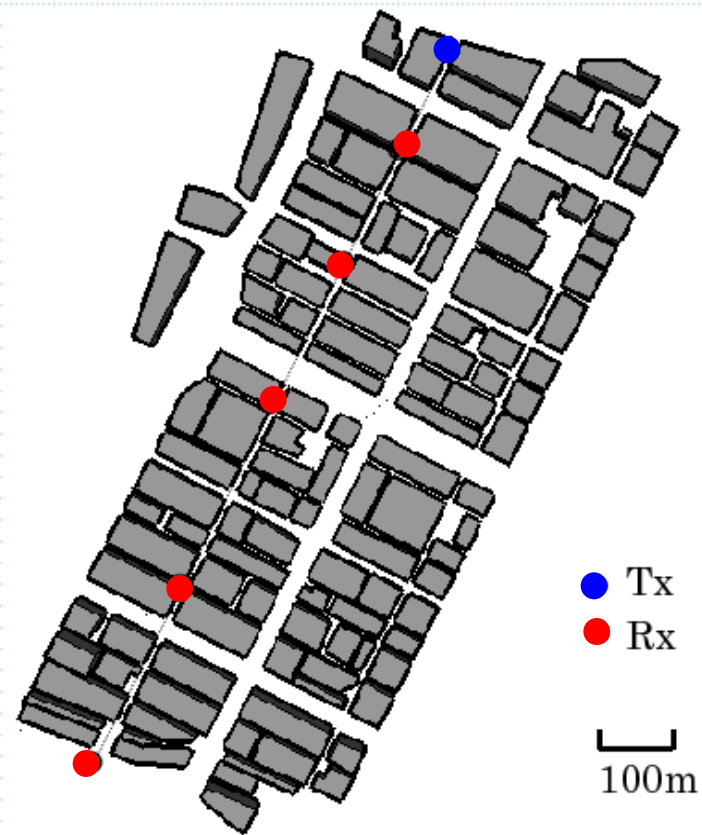
参考文献:

増井裕也, “マイクロ波帯移動通信における電波伝搬特性の研究”, 2003年東京工業大学学位論文

3) 実測とシミュレーションとの比較 計算条件 – 実測モデル2(東京駅周辺)

周波数	450MHz ($\lambda=0.67\text{m}$) 920MHz ($\lambda=0.33\text{m}$) 2200MHz ($\lambda=0.14\text{m}$)
送信電力	1W
アンテナ	Tx : $\lambda/2$ Dipole Rx : $\lambda/2$ Dipole
アンテナ高	Tx : 15m Rx : 2.1m
材質	Building : Concrete (Permittivity = 6.76, Conductivity = $2.3\text{E-}3$ [S / m]) Ground : Asphalt (Permittivity = 2.7, Conductivity = $1.0\text{E-}2$ [S / m])
散乱の最大回数	Reflection : 1 Diffraction : 1 Scattering by RCS : 1

夜間観測：道路工事や大型トラックが時
おり往来していた環境



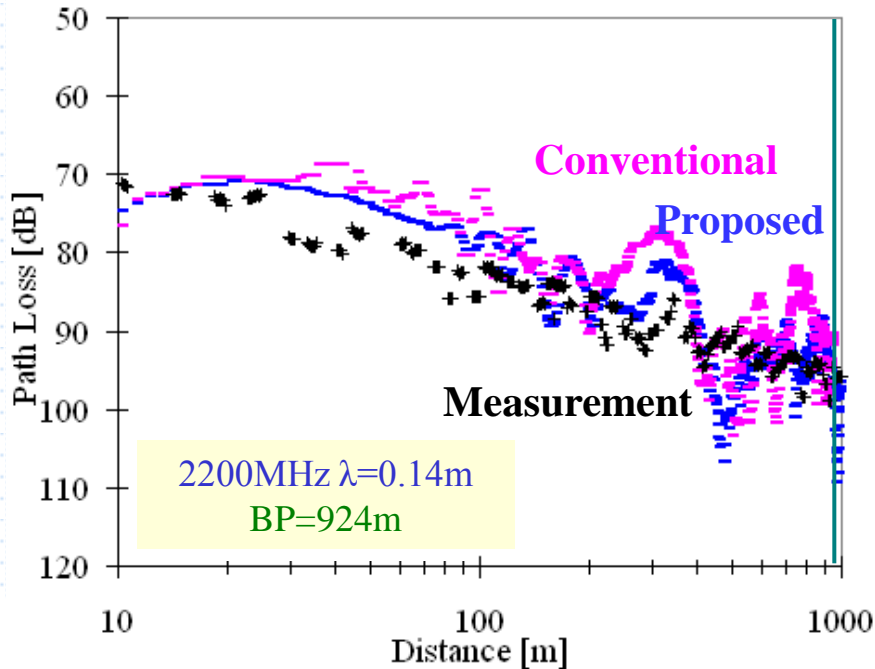
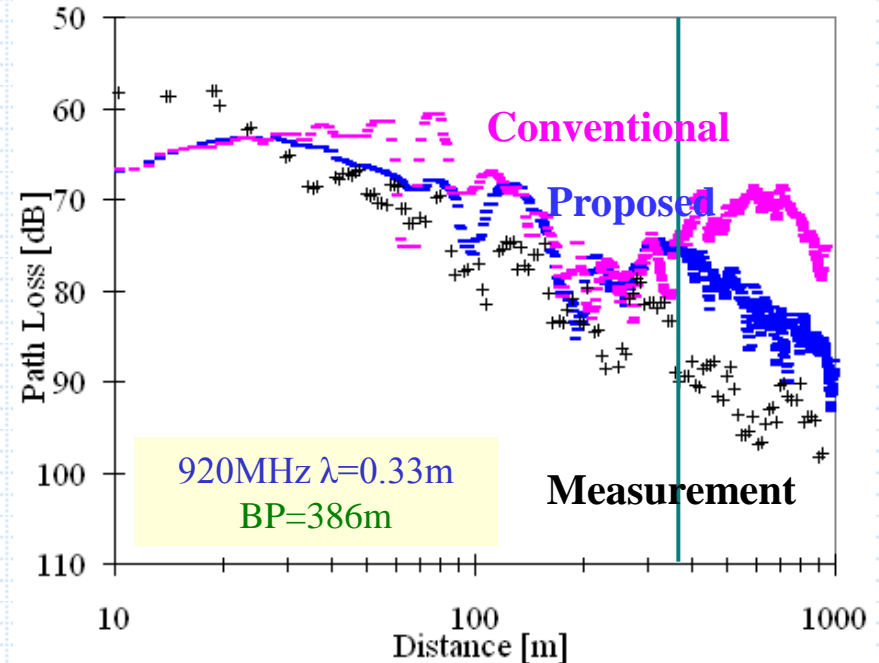
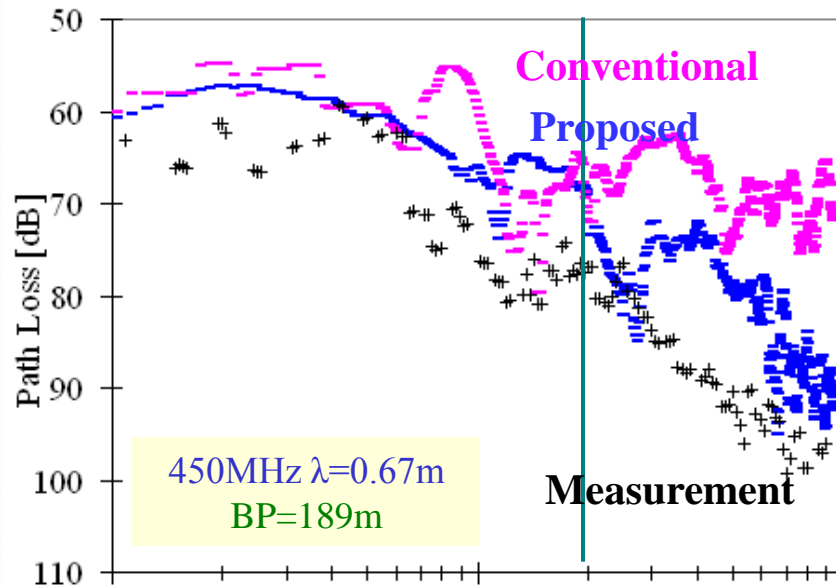
散乱体高さ: 50m 道幅: 約 6m

参考文献:

小園茂, 田口朗, "市街地の路上に置かれた低基地局アンテナ高による伝搬特性—基地局を置いた路上での特性—," 電子情報通信学会論文誌B, Vol.J72-B2, No.1, pp.34-41, 1989

3) 実測とシミュレーションとの比較 結果 - 実測モデル2(東京駅周辺)

The median of the 10 m section



450MHz, 920MHz

- >遠距離で従来法は伝搬損失が小さくなった。
- >提案法は大きくなり、実測結果に近づいた。

2200MHz

- >従来法で十分に実測と近い値を示した。

ブレイクポイント以遠で本提案の有効性が確認できた。

3) 実測とシミュレーションとの比較 従来法と提案法との計算時間の比較

- ◆ 計算時間には大きく差がない。

Calculation type		Simulation time [hh:mm:ss]	Difference [mm:ss]
450MHz	Conventional	5:24:41	+0:41
	Proposed	5:25:22	(0.21%)
920MHz	Conventional	5:25:53	+0:41
	Proposed	5:26:34	(0.21%)
2200MHz	Conventional	6:07:13	+1:00
	Proposed	6:08:13	(0.27%)

1 Tx – 996 Rx

Model : the number of edges .. 1517

the number of faces .. 617

4) まとめと今後の課題

◆ 本研究のまとめ

- 第4世代移动通信の実現に向けて、多重波伝搬環境のモデル化を目的としてレイトレース法が盛んに研究されている。
- 幾何光学近似に起因し、対象となる環境によっては大きな誤差が発生する場合がある。
- 本研究ではこの問題に焦点を当て、2つの異なる幾何光学近似である正規反射波と回折波の分離について、物理光学法とそのよい近似法である停留位相法を用いて検討を行い、幾何光学近似が使えない領域を第1フレネルゾーンと断定した。
- また幾何光学近似が使えない領域に対して複素散乱断面積の概念を適用した。
- ストリートセル環境において、従来のレイトレース法と提案法、ならびに実測値の比較を行った。

◆ 今後の研究 円柱問題

- 現在のレイトレース計算における円柱問題の解析と厳密解との比較。
- 反射波として扱える大きさと、非幾何光学成分として扱う大きさの調査
- レイの発生方法
- 電界強度の求め方の調査
- 基本モデルと実測モデルでの評価を行い、妥当性を検討。