



KKE VISION 2008
(H20.09.26)

屋内伝搬理解の勘所

- 伝搬とシステムの接点領域を探る -

唐沢 好男

電気通信大学

先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター (AWCC)



講演の内容

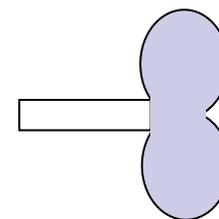
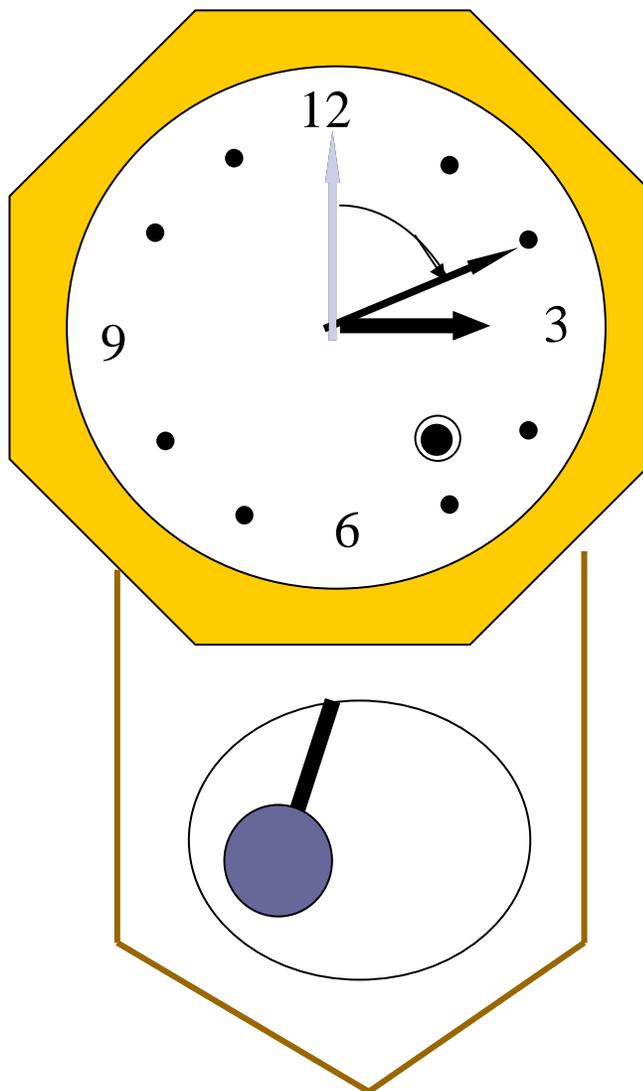
- 1) 伝搬モデルとは
- 2) 屋内伝搬: 測定結果やモデリングの例
- 3) OFDMの符号間干渉問題とそのモデル化(伝搬とシステムを結び付ける等価伝送路モデル)
- 4) 新しいマルチパス伝搬測定法: トータルレコーディング
- 5) 電波伝搬環境の簡易生成: デジタル伝送特性評価システム(電波反射箱)



1. 伝搬モデルとは



むかし振り子、いまクォーツ





電波伝搬の研究： 性格分類

- 電離層伝搬： Radio Science(電波科学)
- 対流圏伝搬(大気・降雨・海面散乱)： Radio Science

自然現象が相手なので、通信回線の伝搬推定法として統計モデルが作りやすい
「電波伝搬」と「システム」を分離した検討が可能

【理論面(物理面)での難しさがある】

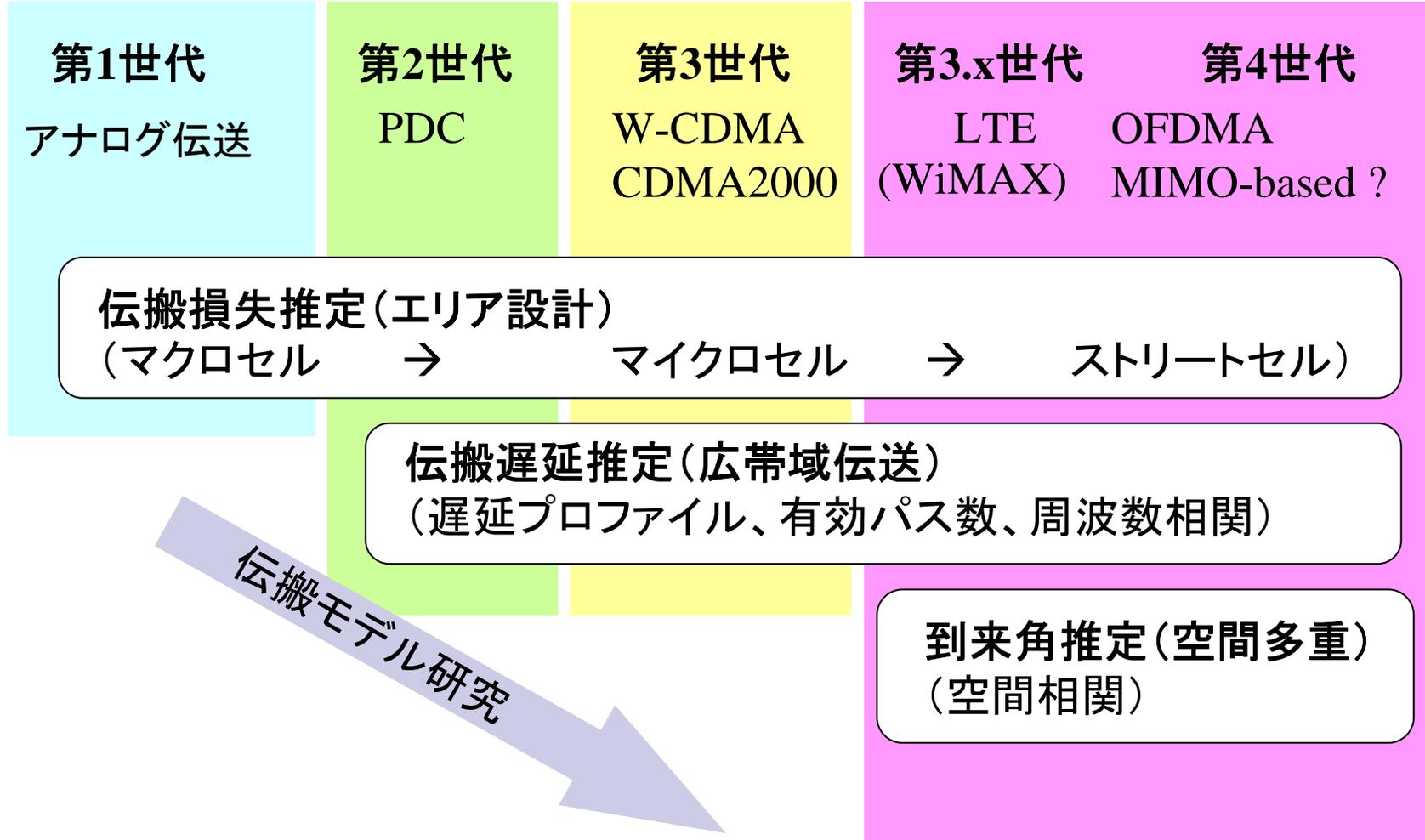
- 移動通信伝搬(屋内伝搬を含む)：

多様な人工構築物の環境での電波伝搬のため、精度の良いモデルが作りにくい
「電波伝搬・アンテナ・システム」の三位一体の検討が必要
(BER, 通信路容量など、システムオリエンテッドな評価が必要)

【モデル化の概念構築に難しさがある(特に屋内伝搬)】



移動通信システムと伝搬モデル





移動通信伝搬モデルの基本概念(奥村モデル)

距離による減衰 (自由空間伝搬損失) d^{-2}

×

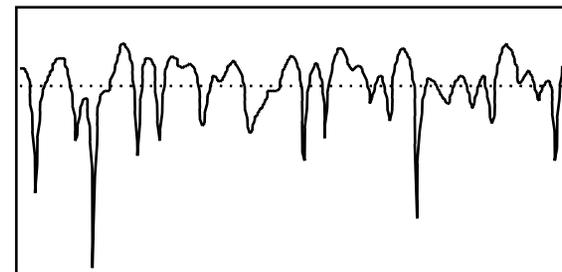
伝搬路の遮蔽による減衰

×

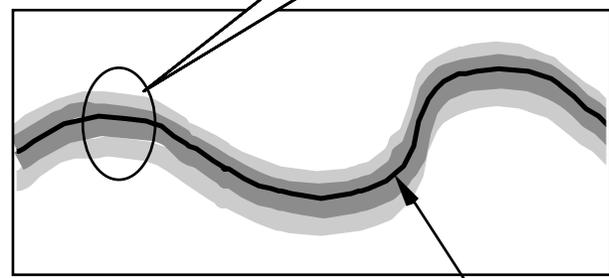
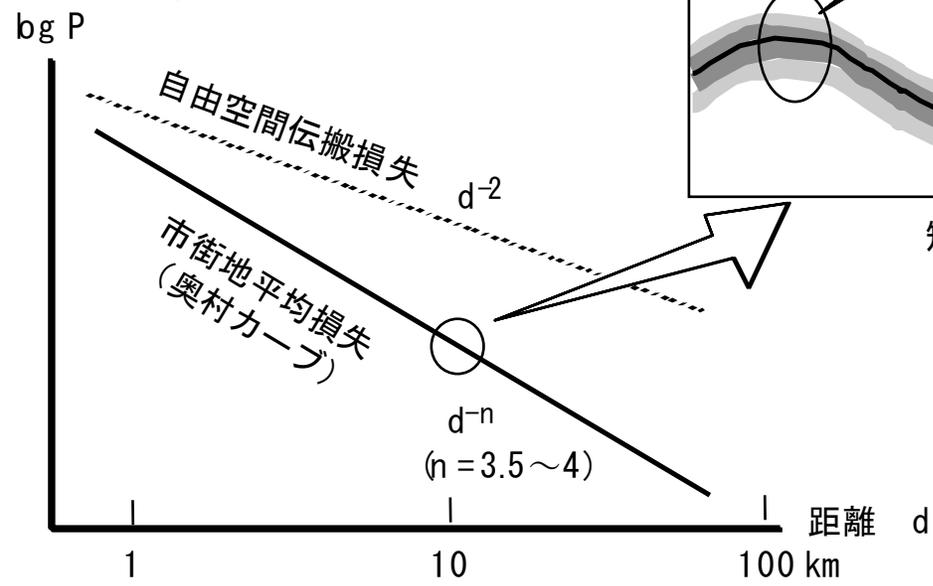
散乱波・回折波によるマルチパスフェージング

d^{-n}
($n=3.5\sim 4$)

[レイリー分布]



マルチパスフェージング
(short-term fading)



[対数正規分布]

短区間中央値変動
(long-term fading)

屋内伝搬は屋外伝搬
のような概念構築
が難しい!!



2. 屋内伝搬 測定結果やモデリングの例



屋内伝搬の多様性

- 一つの部屋の中に送受信機がある場合 (WLAN, UWB)
 - 什器やパーティションの有無 (LOS, NLOS)
 - 壁・床・天井の材質 (反射が強いか弱いか)
 - 人が多いか少ないか (特に高い周波数で)

- 他の部屋、他のフロアからの電波の伝搬 (WLAN)
 - 所望波の伝搬・干渉波の伝搬
 - 壁越え伝搬・廊下のようなガイド構造の伝搬

- 屋外からの電波の浸入 (セルラー、地デジ)
 - 壁越え伝搬
 - 窓からの浸入

屋外移動通信伝搬のような、基本概念構築が著しく難しい？

現在の建築における通信障害の例

- 室内は電磁波の反射面が多く、そこで発生した**反射波**から無線LANは通信障害を受ける

金属デッキプレート
100%

LOW-Eガラス
98%

金属OAフロア
100%

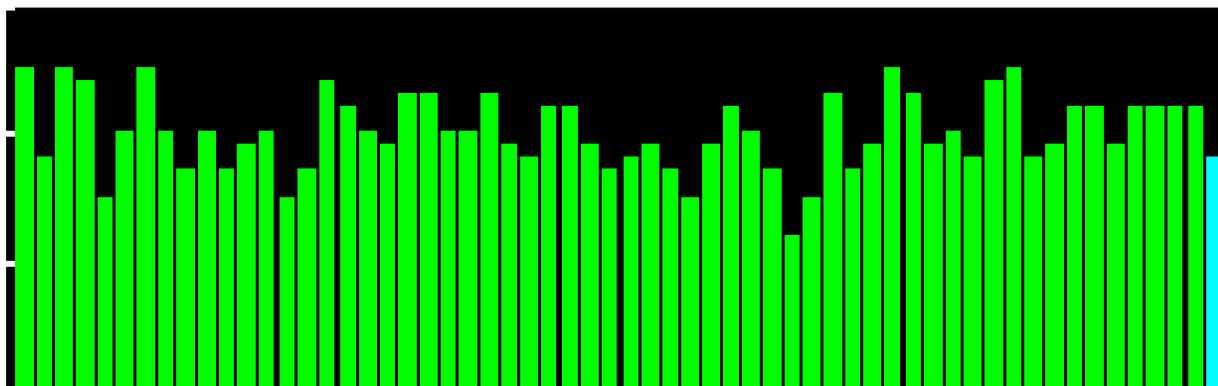
スチールパテーション
100%

数字は電磁波の
反射率を示す

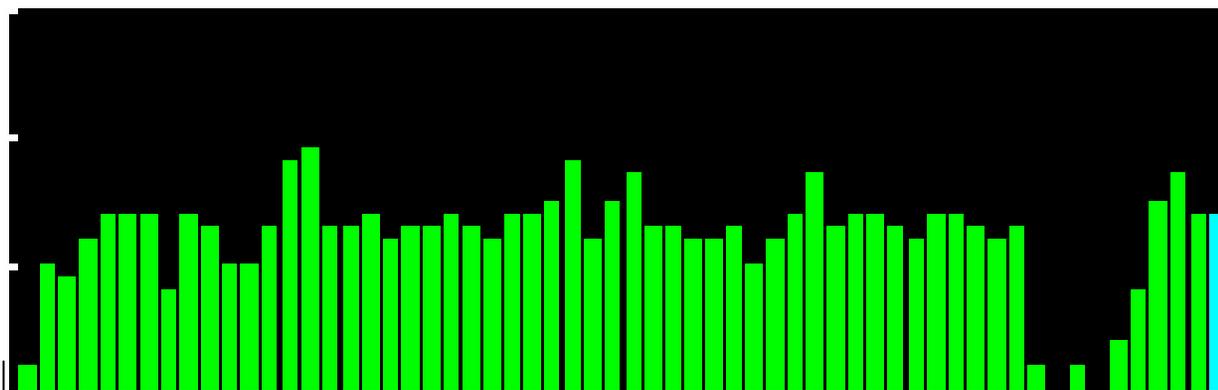


スループット測定

WLAN IEEE 802.11a (5GHz)

2000
kBytes/sec

遅延スプレッド

 $\sigma_\tau : 90 \text{ ns}$ 2000
kBytes/sec $\sigma_\tau : 240 \text{ ns}$

38 cm, 1min / point



屋内伝搬の研究

IEEE Xplore (登録論文数: 1,876,824)

Keywords	全体	論文誌
Propagation, Indoor	2,747	409
Propagation, Indoor, UWB	244	35
Propagation, Indoor, WLAN	158	22
Propagation, Indoor, MIMO	245	35

実測結果の提示

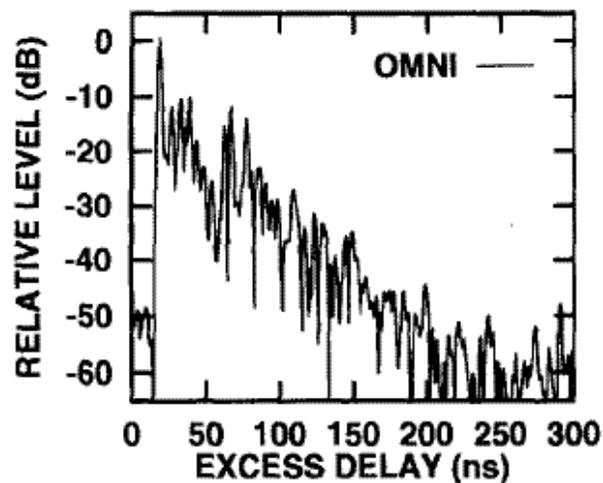
実測データに基づく統計的アプローチ(モデリング)

レイトレーシングでの解析(実測値との比較)

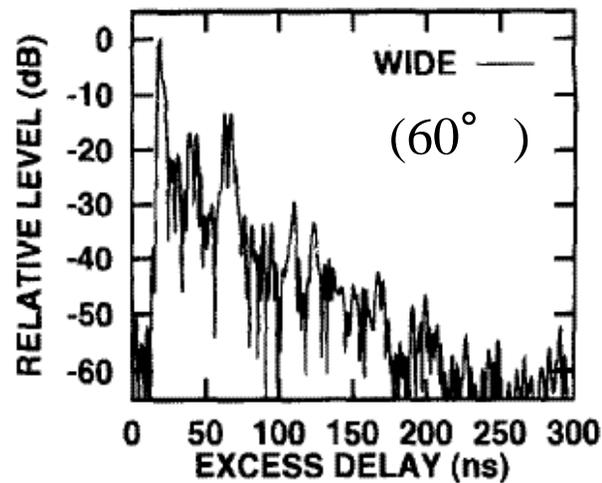
電磁界解析手法(FDTD, TLM法など)での解析



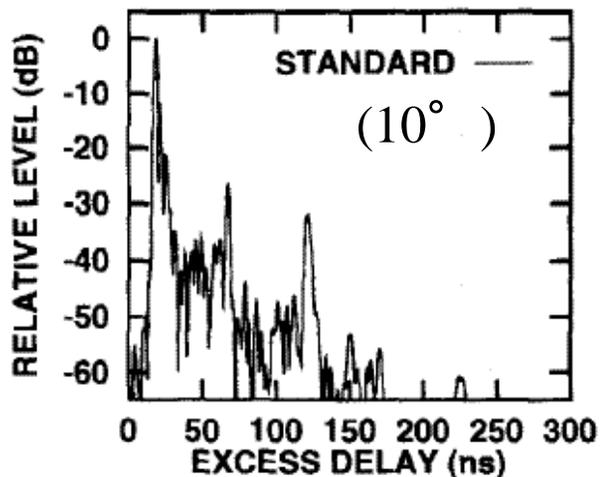
屋内伝搬環境解析例 1 (実測とレイトレーシングの比較 (1/2)): 実測)



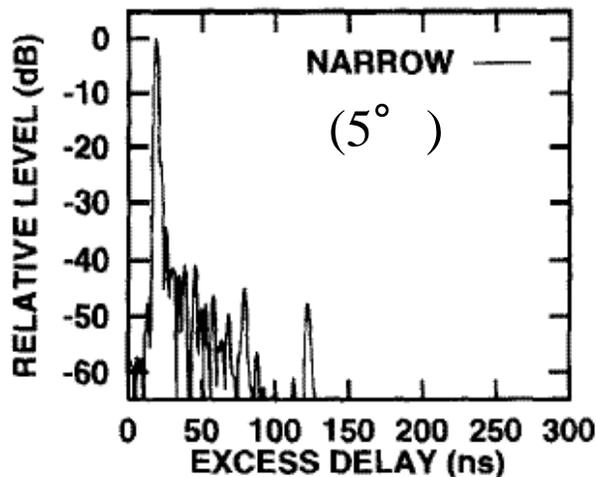
(a)



(b)



(c)

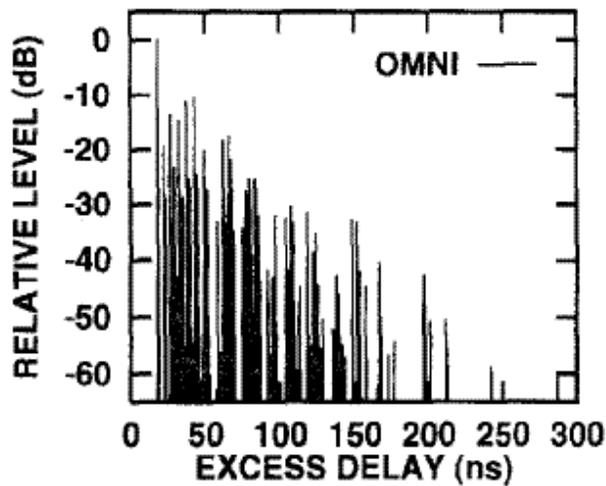


(d)

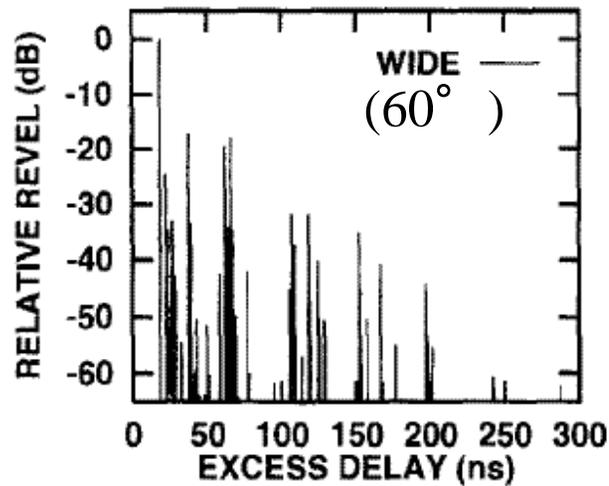
$f = 60\text{GHz}$
Room: 13.5m
x 7.8 m x 2.6 m



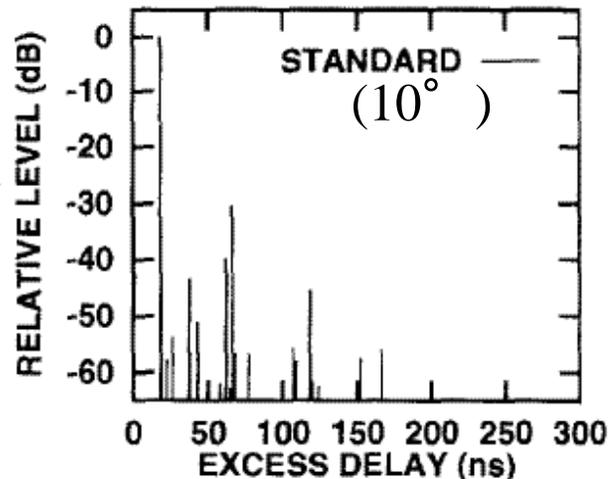
屋内伝搬環境解析例 1 (実測とレイトレーシングの比較 (2/2)): レイトレーシング)



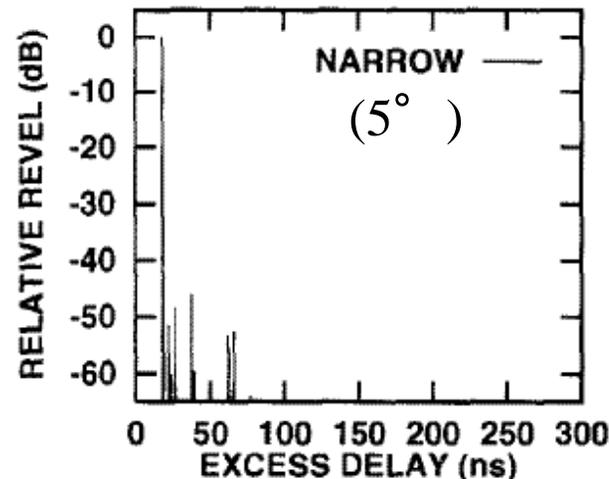
(a)



(b)



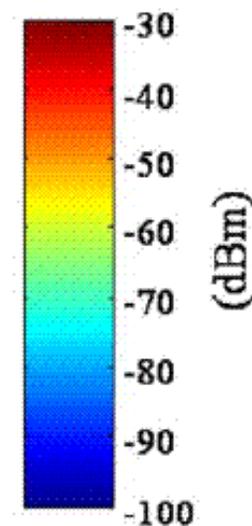
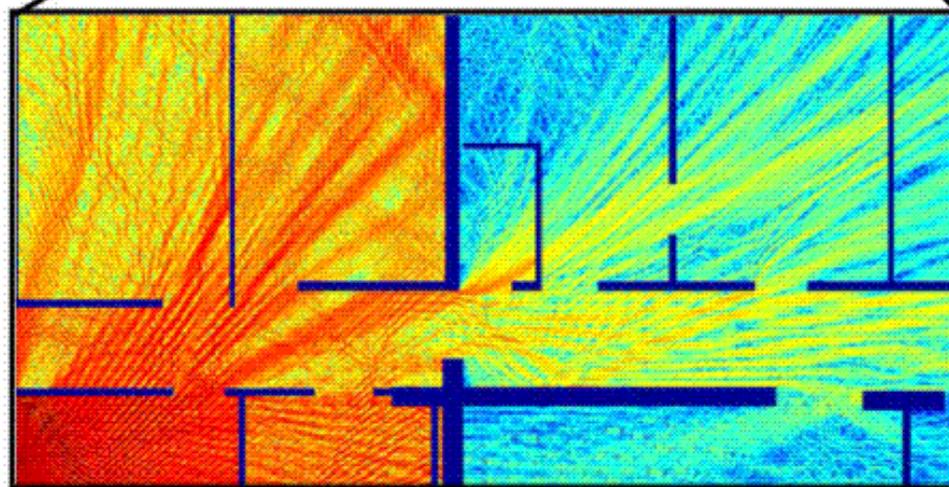
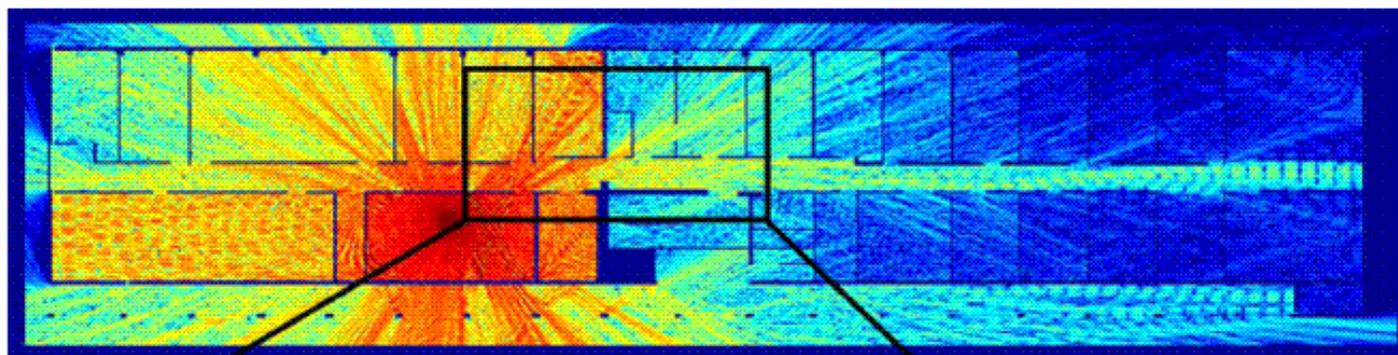
(c)



(d)

$f = 60\text{GHz}$
Room: 13.5m
x 7.8 m x 2.6 m

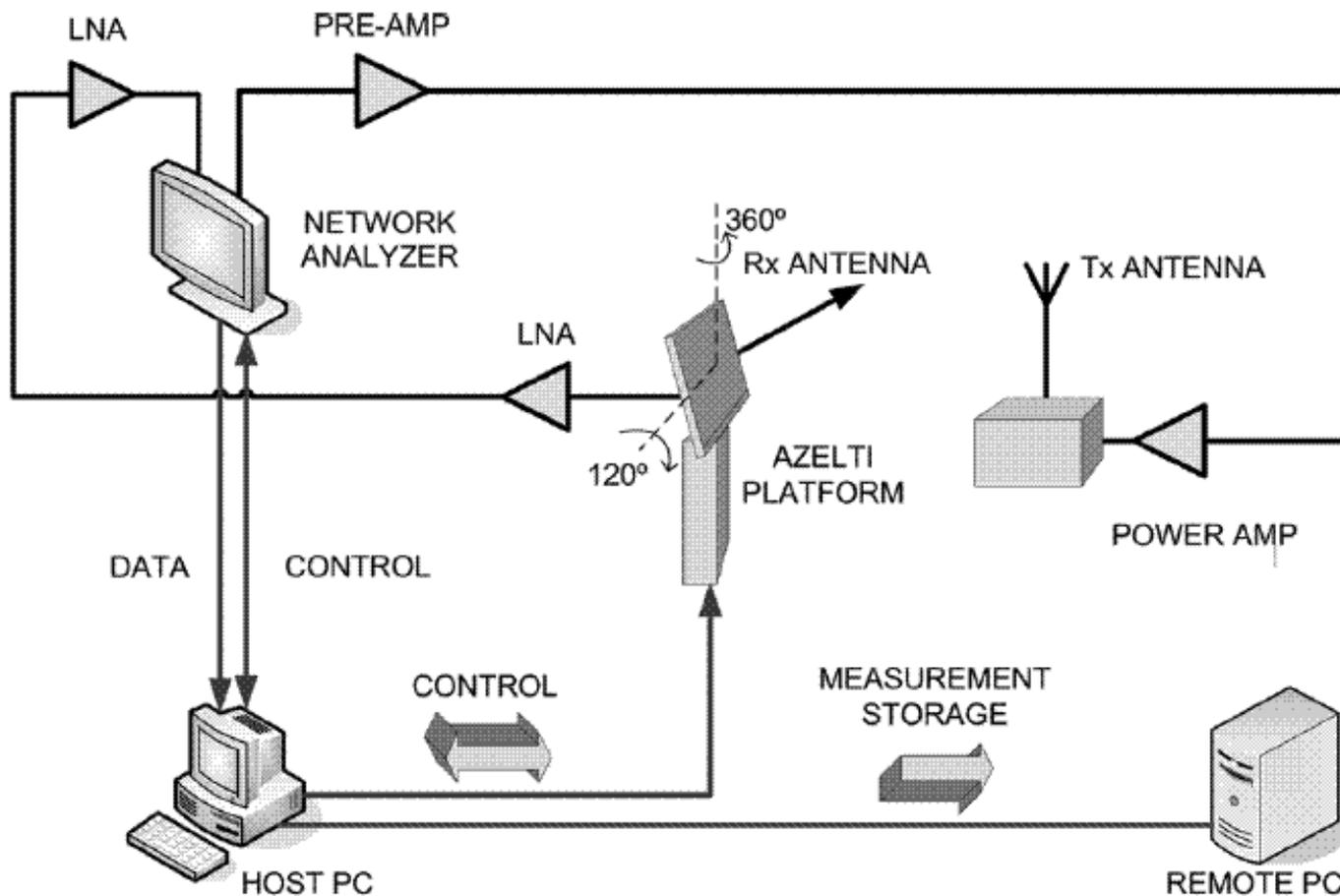
屋内伝搬環境解析例 2 (TLM 法による解析) [Transmission Line Matrix]



$f = 2.4\text{GHz}$
空間分解能
2cm



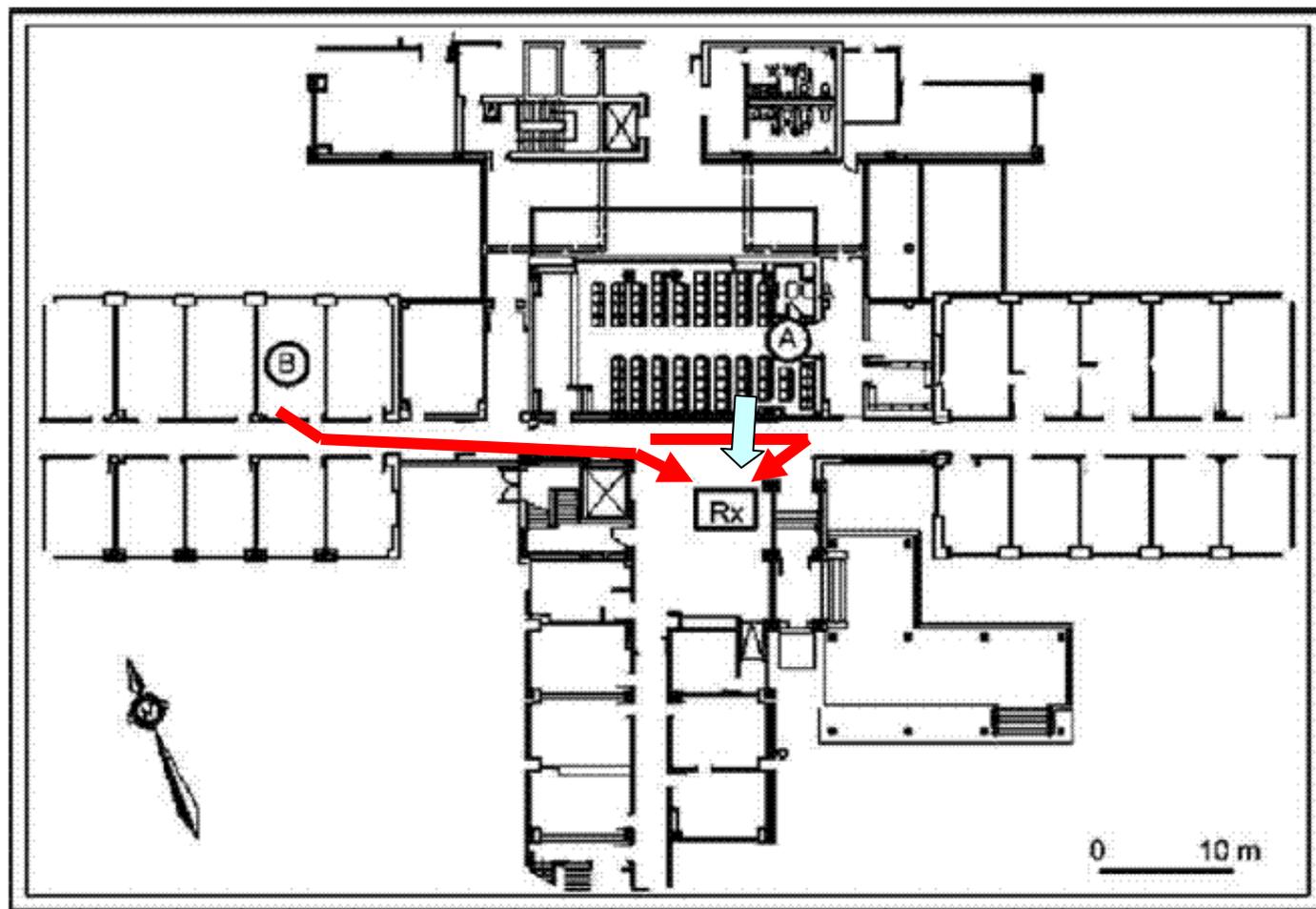
屋内伝搬環境解析例 3 (ネットワークアナライザを用いた測定(1/2): 測定系)



$f = 5.1-5.8\text{GHz}$
(CW)

Rx antenna:
8x8 array
(HPBW: 10°)

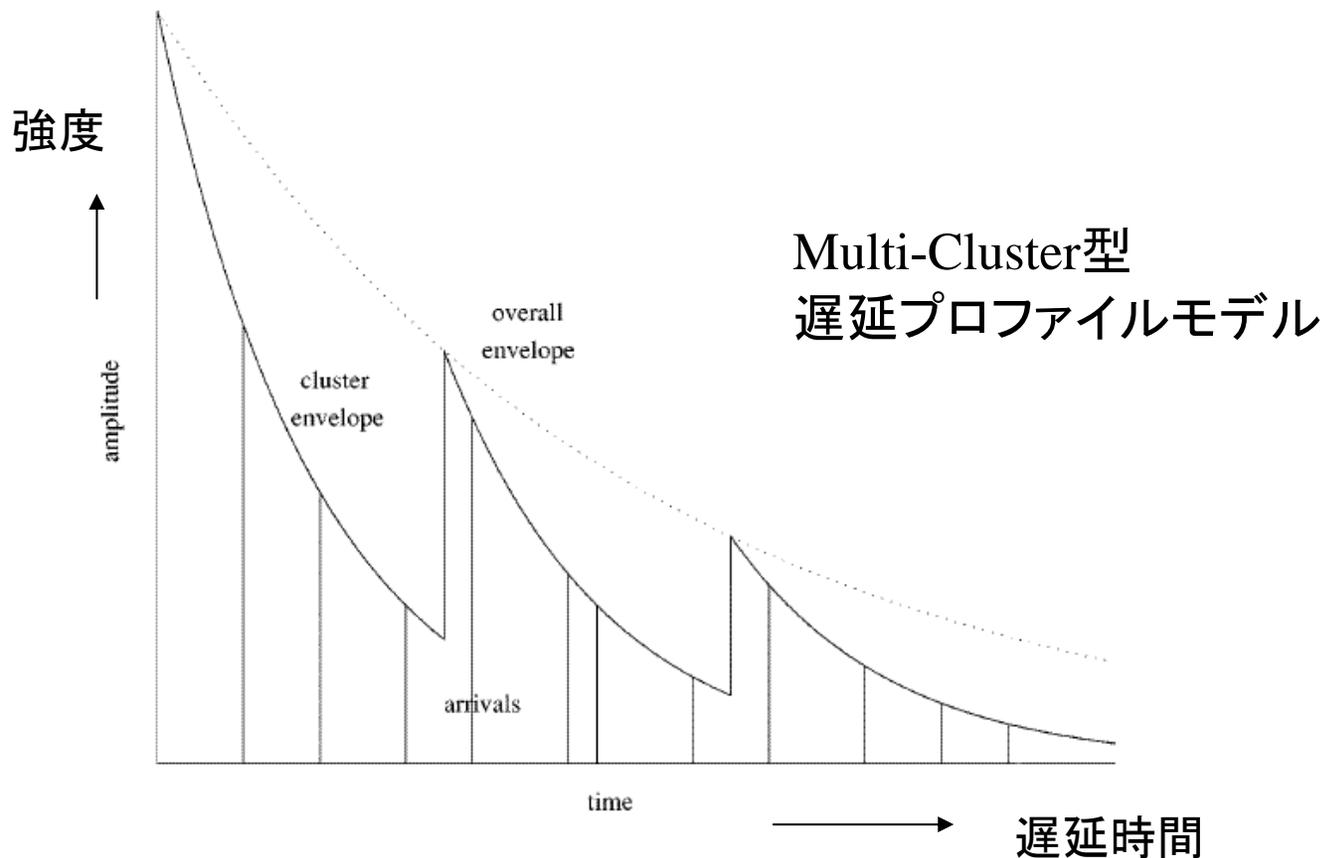
屋内伝搬環境解析例 3 (ネットワークアナライザを用いた測定(2/2): 測定環境)



XPD
(12-15dB)



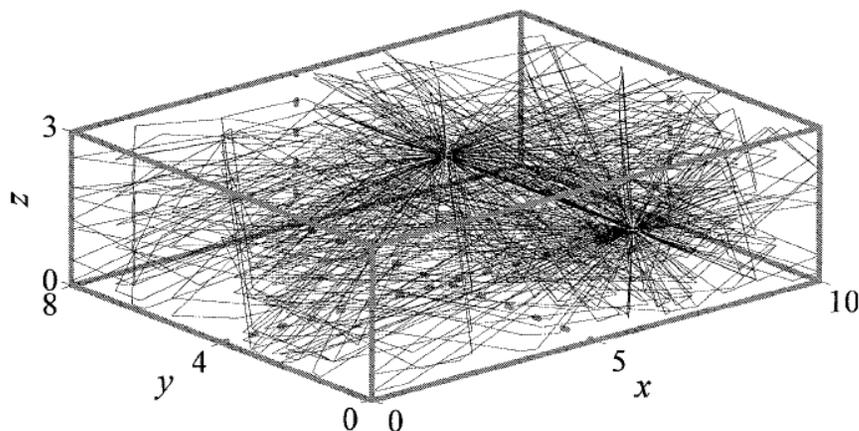
Channel model: Saleh-Valenzuela モデル



Modeling: A.A.M. Saleh and R.A. Valenzuela, IEEE JSAC, vol. SAC-5, 1987
Q.H. Spencer et al., IEEE JSAC, vol. 18, no. 3, 2000.

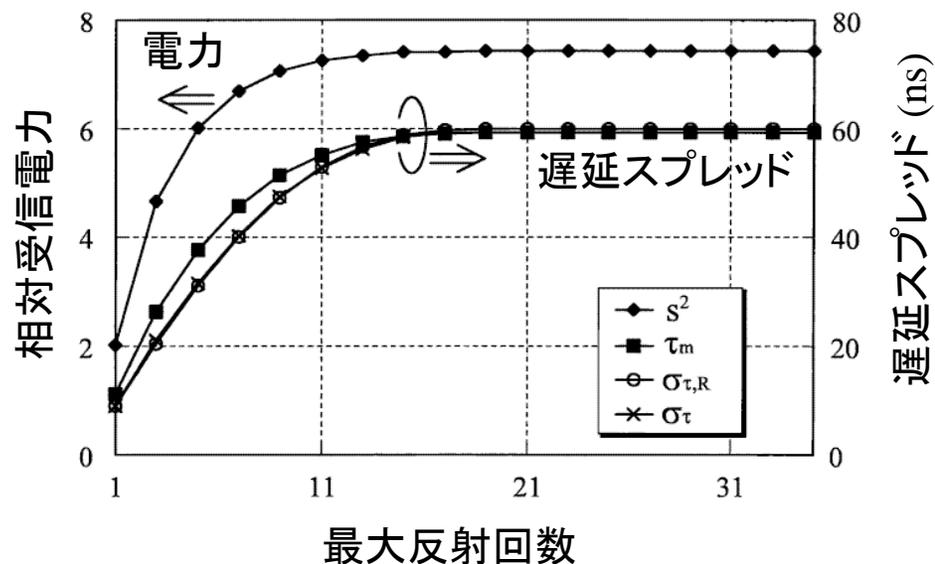
屋内マルチパス環境と電波吸収ボード施工による遅延スプレッド軽減 (1/2)

(レイトレーシングによる評価)



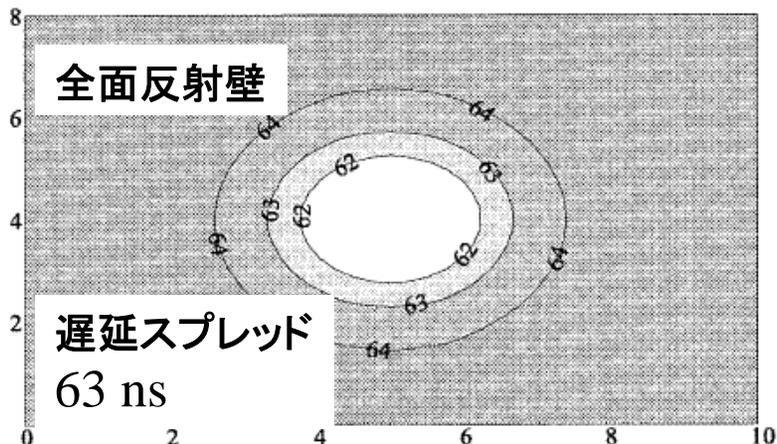
部屋サイズ: 10m x 8m x 3m
(壁面反射損失: 1dB)

レイトレーシングの場合、反射回数を何回まで考慮すればよいか？

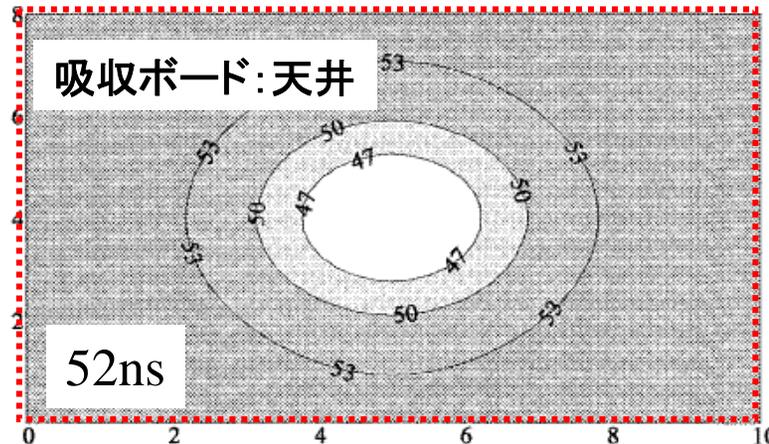




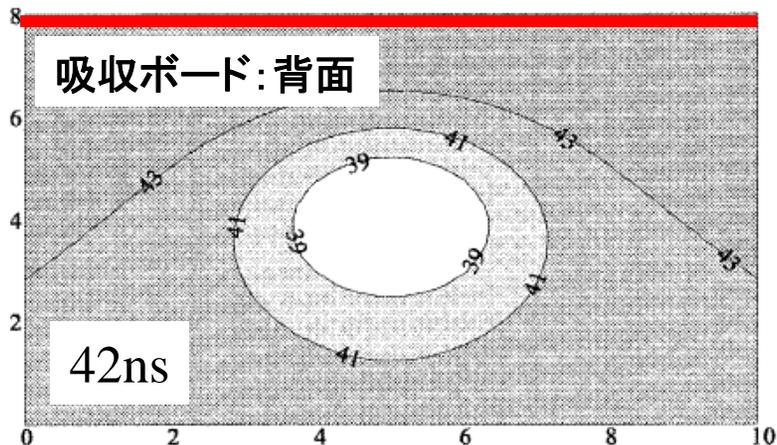
屋内マルチパス環境と電波吸収ボード施工による遅延スプレッド軽減 (2/2)



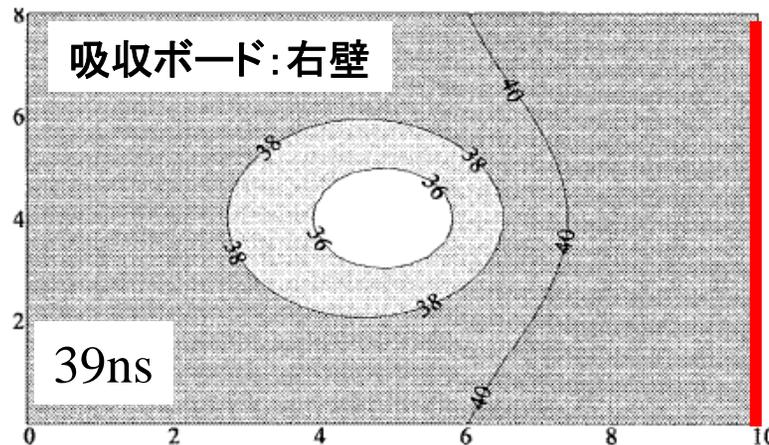
(a) case 1 (Absorption wall: nothing)



(b) case 2 (Absorption wall: ceiling)



(c) case 3 (Absorption wall: back)



(d) case 4 (Absorption wall: right)

遅延スプレッドの空間マップ

下条、唐沢、信学論(B), 2003.12



屋内伝搬の特徴:大雑把に言えること

- 送受信機が同じ部屋にある場合の振幅確率分布は**仲上・ライス分布的**
- 送受信機が同じ部屋にある場合、マルチパスリッチ(無指向性アンテナでの送受信のように)環境では、**遅延プロファイルは指数関数型**
- 到来波は角度的に周囲一様ではなく、**クラスター**のように、部分部分にまとまって到来する場合が多い
- 上記の場合、遅延プロファイルは、**Saleh-Valenzuela型プロファイル**になる
- **遅延スプレッドは、部屋のサイズが大きくなるほど大きくなる**傾向にある
- その場合でも100nsを超えることは少ないが、反射性の材質で囲まれると、200nsを超えることもある
- そのような場合に、どこかに(例えば天井に)一枚、吸収ボードを用いると、遅延スプレッド抑圧に効果がある
- 屋内伝搬解析には**レイトレーシング**が有効な手法である
- より計算機に負担の大きい**電磁界解析手法**(FDTD, TLM法など)も可能な時代になってきている



3. OFDMの符号間干渉問題とそのモデル化(伝搬とシステムを結び付ける等価伝送路モデル)

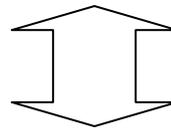


屋内伝搬とシステム(伝送特性)

電波伝搬

- ・電界強度確率分布
- ・遅延広がり
- ・到来方向分布(水平面・垂直面)
- ・交差偏波特性(XPD)

システム



この関係理解が重要

- ・伝送方式(各種変調方式、OFDM等)
- ・ダイバーシチ、MIMO
- ・BER, irreducible BER (BER floor), 通信路容量



OFDMと電波伝搬

OFDMは、情報伝送の広帯域化に立ちはだかる伝搬遅延の問題を克服する方式として、脚光を浴びている

では、遅延問題はOFDMによって解決されたのであろうか？

Not yet !!

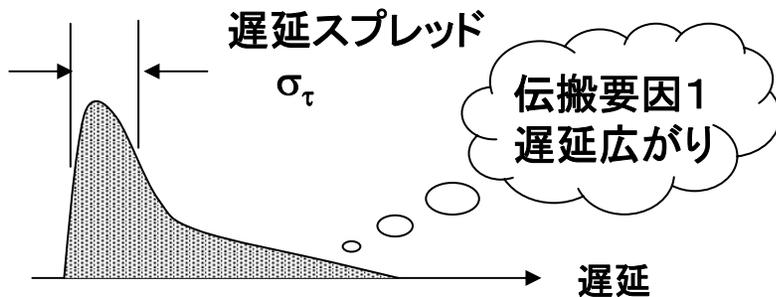
遅延の広がりガードインターバルを超える厳しいマルチパス環境の問題

その伝送特性評価は結構難しい

その解析に役立つ電波伝搬モデル: 等価伝送路モデル (ETP-OFDM)

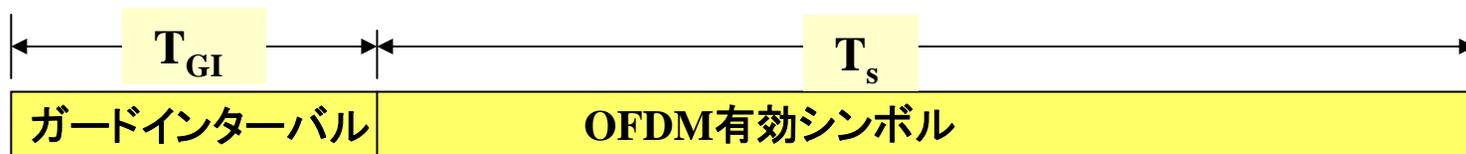


OFDM信号と電波伝搬パラメータとの関係

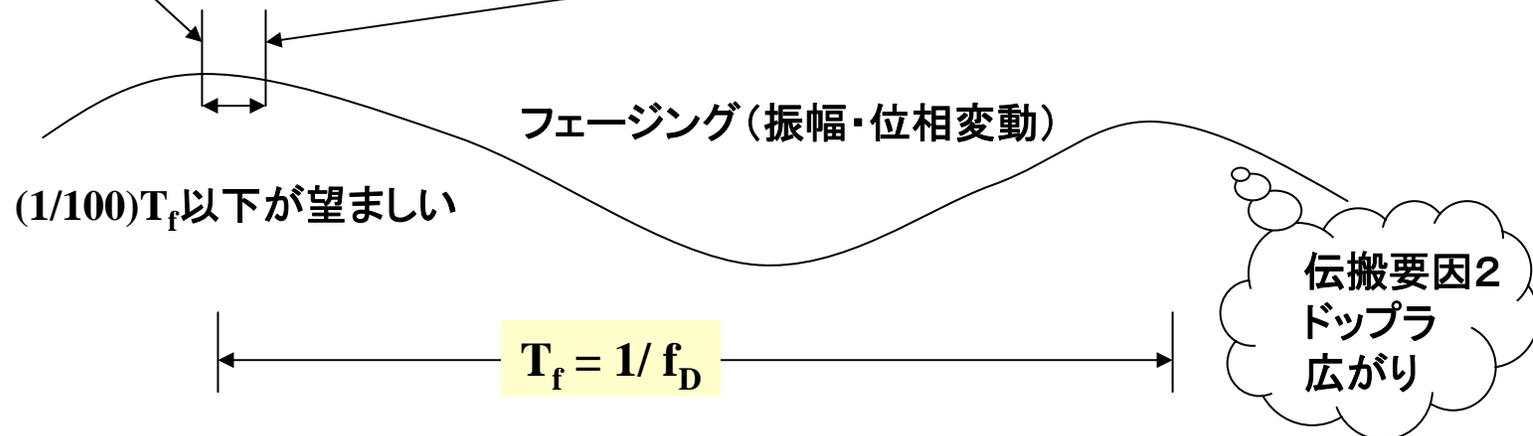


要求条件

$$\sigma_{\tau} \ll T_{GI} \ll T_s \ll T_f$$



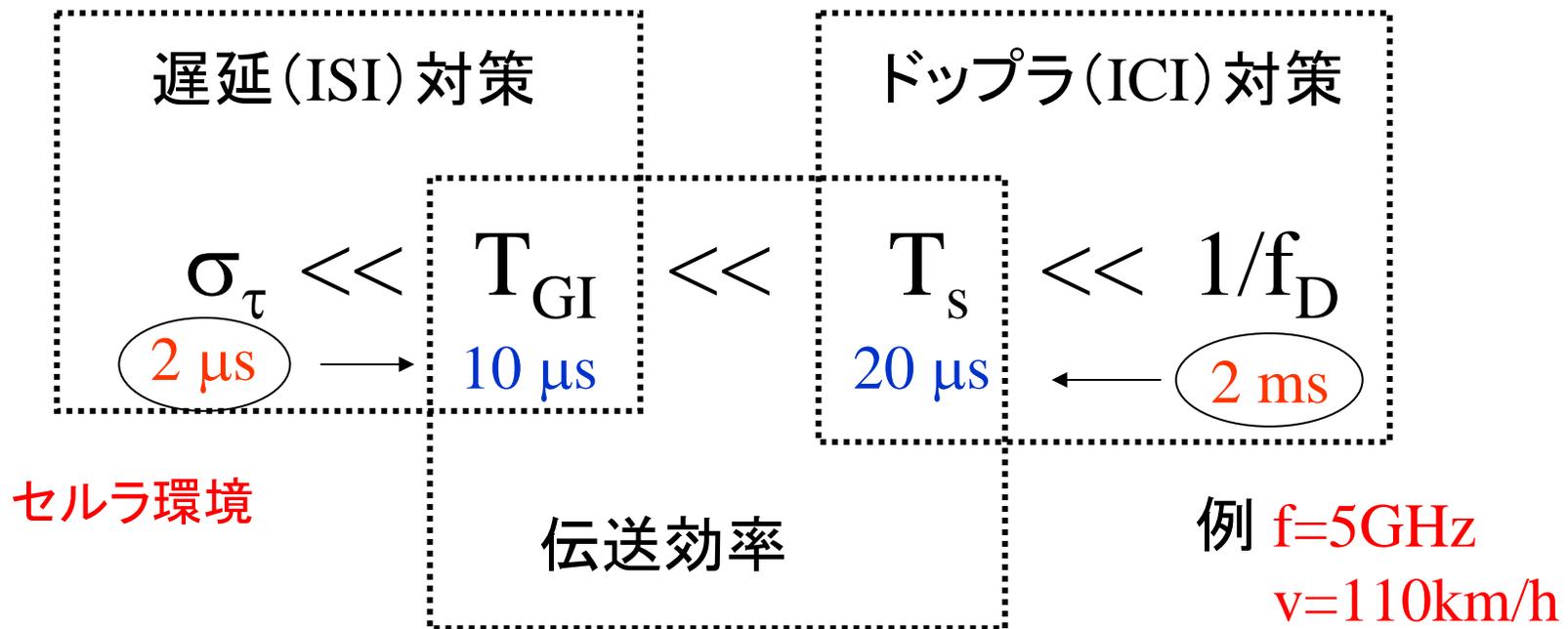
OFDM信号



(1/100)T_f以下が望ましい



移動通信へのOFDM適用: その考慮すべきこと



移動通信応用で、この全ての条件を満足するのは、結構難しい

MIMO適用: ガードインターバルを越える環境に対する耐性
ドップラスプレッドに対する耐性



一等価伝送路モデルとは

- ▶ フェージングのキーパラメータのみに着目して伝送路を簡易化したモデル
- ▶ OFDM伝送において、遅延の広がりGI時間を超える伝搬環境におけるサブチャネル毎のBER特性を簡易に求める手法として提案

→ 全チャネルの平均BERを理論的に推定
(統計的推定)

等価伝送路モデルの基本的考え方: 唐沢、信学会通ソマガジン, vol.1, 2007.06
以下に提示する仲上・ライスフェージングへの適用:

Y. Karasawa et al., IEICE Trans. Commun., 2008.10



誤り発生率(BER) 推定の基本式

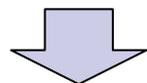
伝搬

システム

$$P_e = \iiint_{x, y, z, \dots} f_p(x, y, z, \dots) \cdot P_0(x, y, z, \dots) dx dy dz \dots$$

伝搬パラメータ x, y, z, \dots ,
結合確率分布

パラメータ x, y, z, \dots ,
を関数とするBER



符号間干渉誤りも基本式で表現できる？ yes

符号間干渉誤り(BERフロア値)の推定式: 等価伝送路モデル

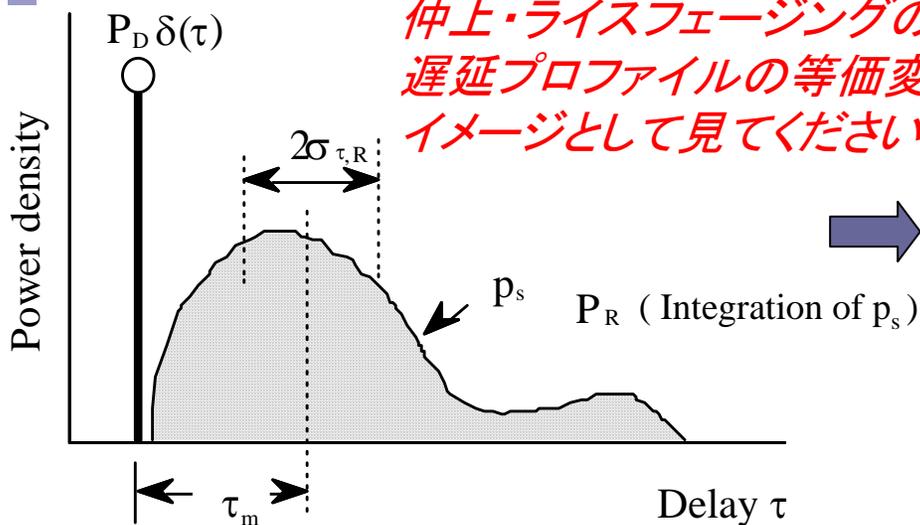
$$P_e(\Delta\tau_e) = \iint f_p(r, \phi; \Delta\tau_e) \cdot P_0(r, \phi; \Delta\tau_e) d\phi dr$$

2波モデルで表わした
 r と ϕ の確率分布

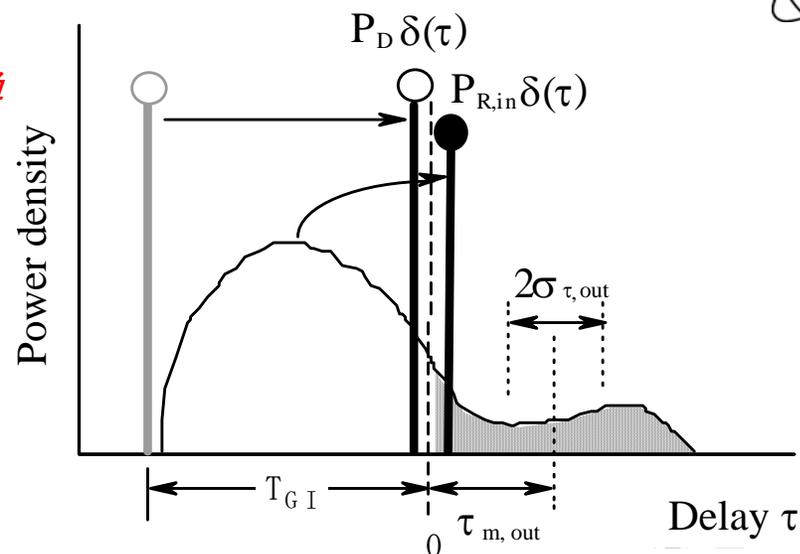
変数を固定した
2波モデルでのBER



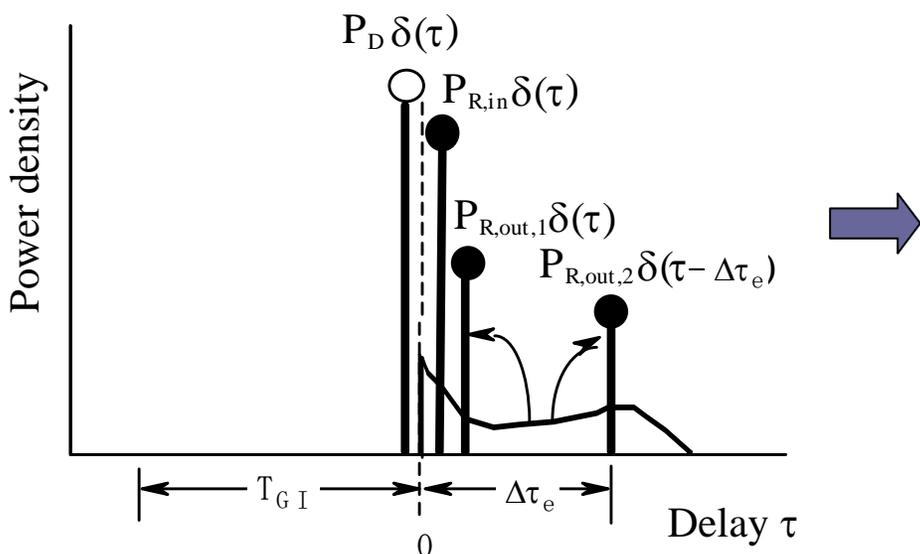
仲上・ライスフェージングの
遅延プロファイルの等価変換
イメージとして見てください



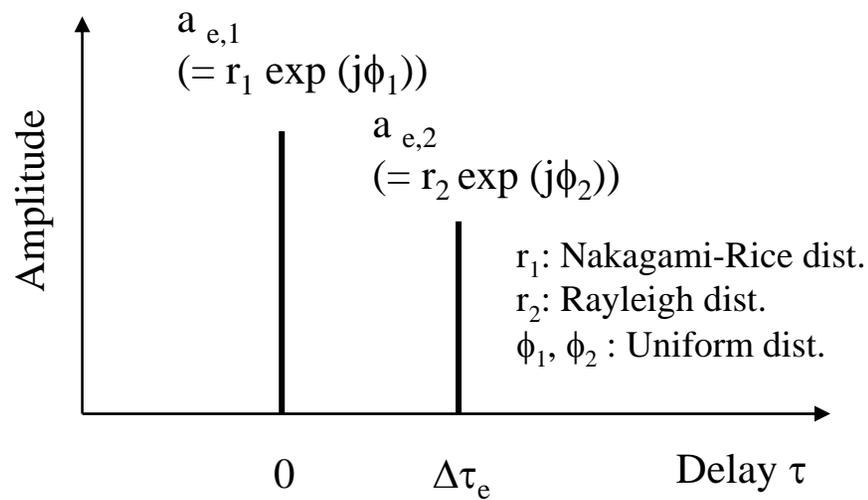
(a)



(b)



(c)



(d)



OFDDMのBER_ISI

この基本式はレイリーフェージングも
仲上・ライスフェージングも同じ

基本式

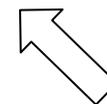
$$P_e = \iint f_p(r, \phi; \Delta \tau_e) \cdot P_0(r, \phi; \Delta \tau_e) d\phi dr$$

仲上-ライスフェージング

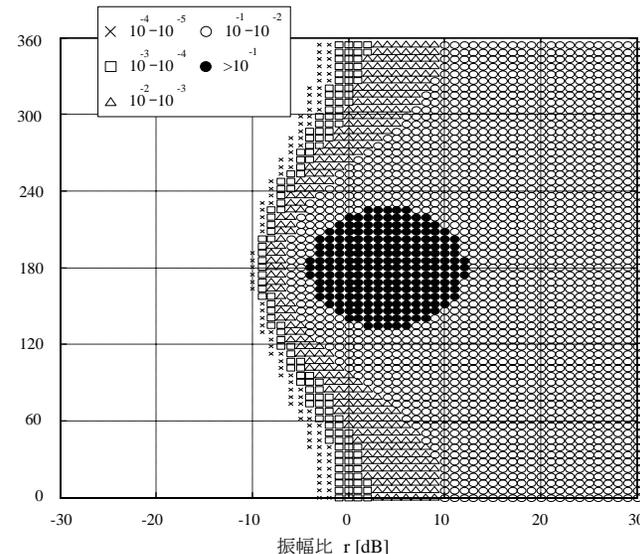
$$\frac{\beta r}{\pi (r^2 + \beta)^2} \exp\{-K(1+\beta)\} {}_1F_1\left\{2, 1; \frac{K(1+\beta)\beta}{r^2 + \beta}\right\}$$

(遅延プロファイル
指数関数型)

$$\beta = \frac{\exp\left(-\frac{T_{GI}}{\sigma_{\tau,R}}\right)}{2 - \exp\left(-\frac{T_{GI}}{\sigma_{\tau,R}}\right)}$$



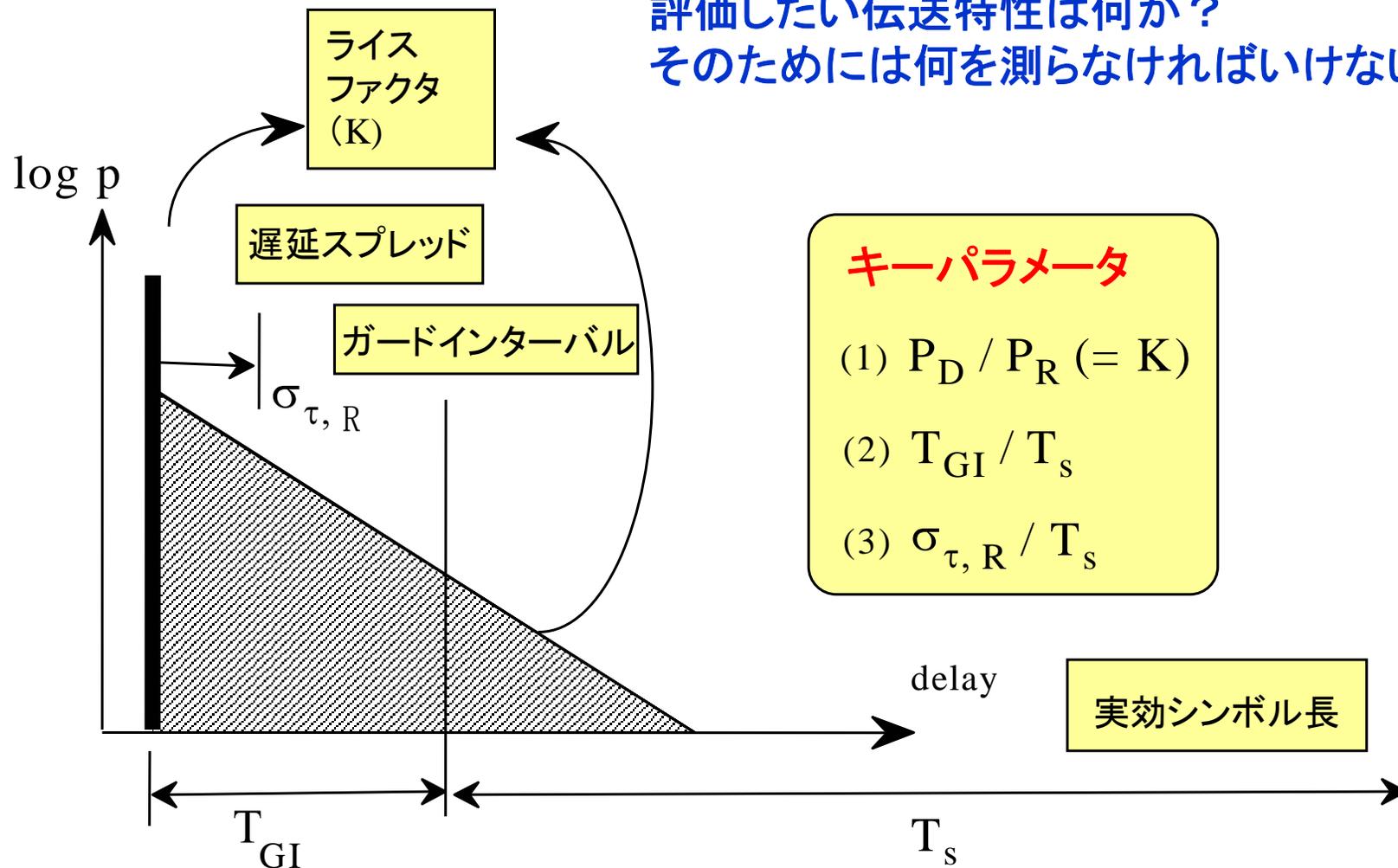
BERマップ





仲上-ライスフェージングBER推定のキーパラメータ

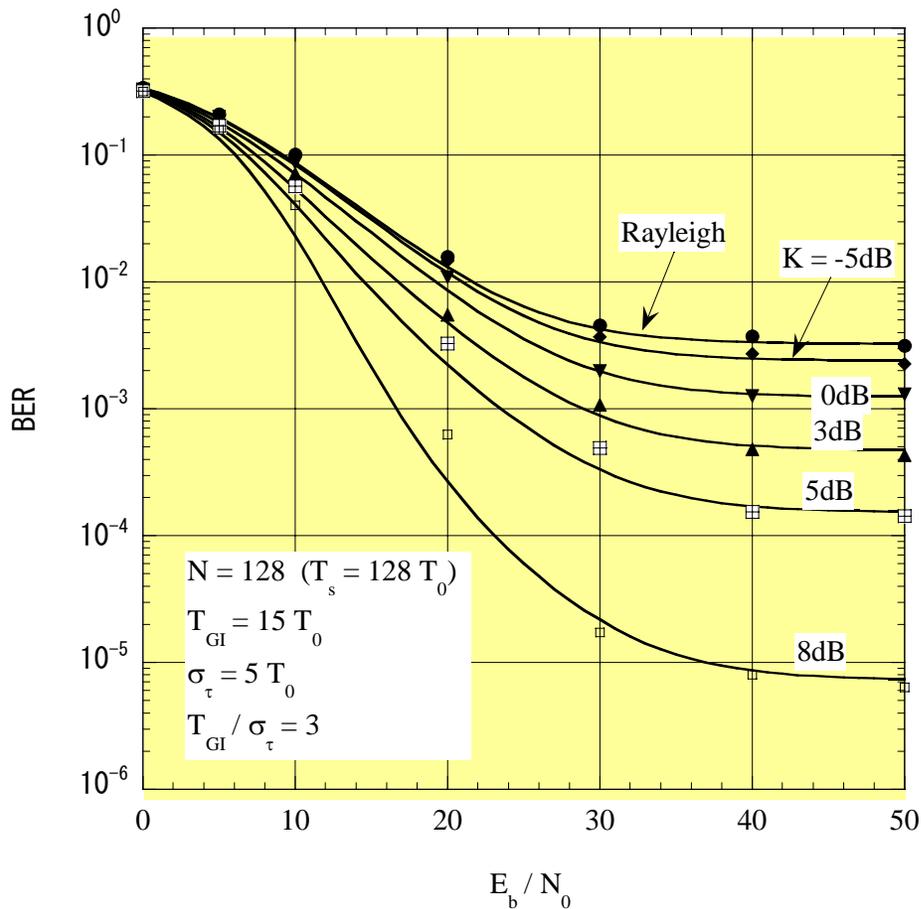
評価したい伝送特性は何か？
そのためには何を測らなければいけないか？



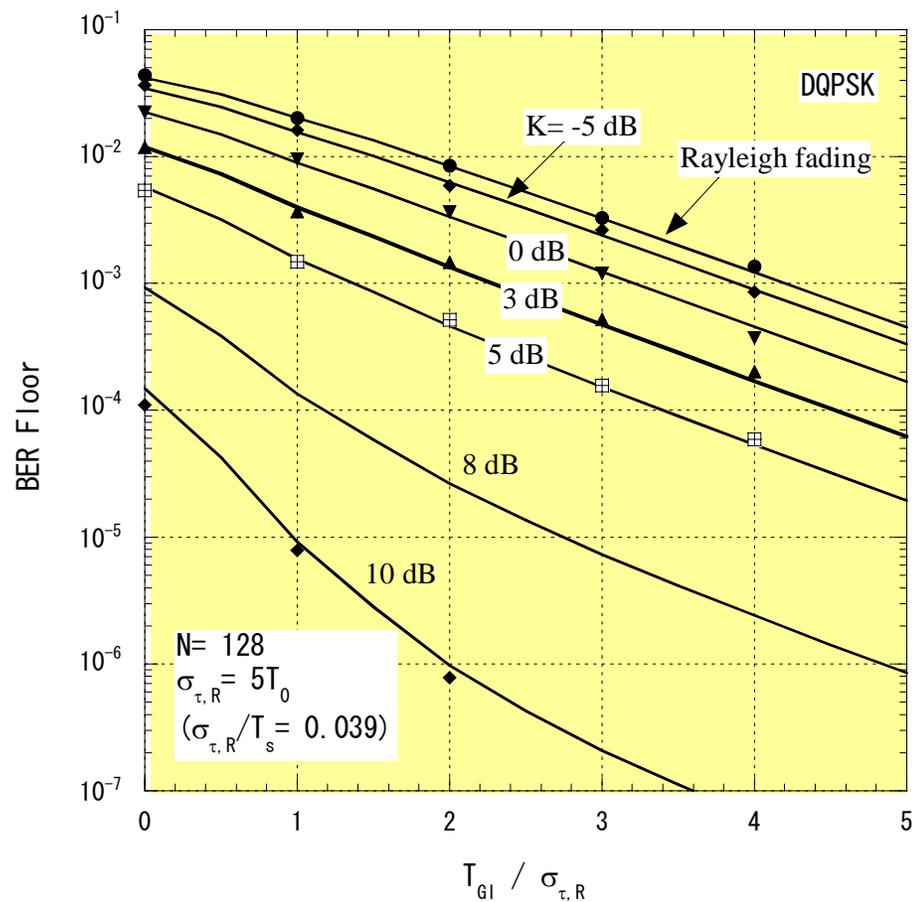


OFDMのBER特性 (DQPSK): 計算値と実測値の比較

BER (ISI + 熱雑音)



BER (ISI)

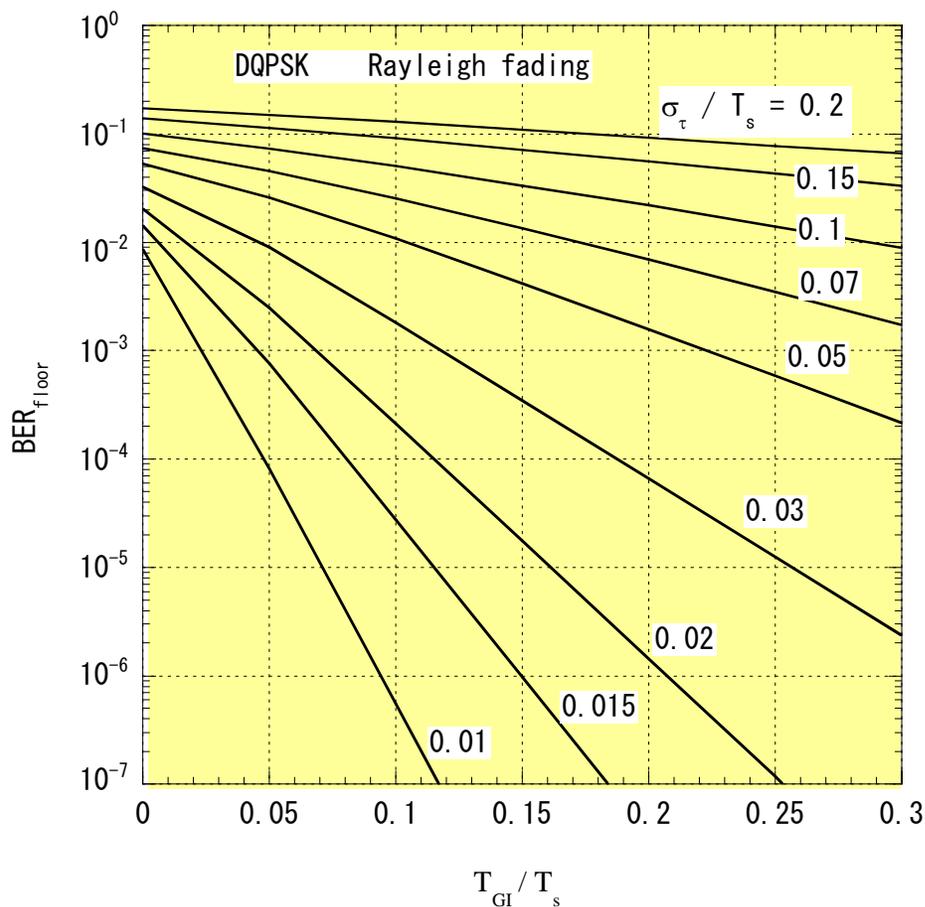


機械 (= 受信機) の反応はピタリと予測できる !!

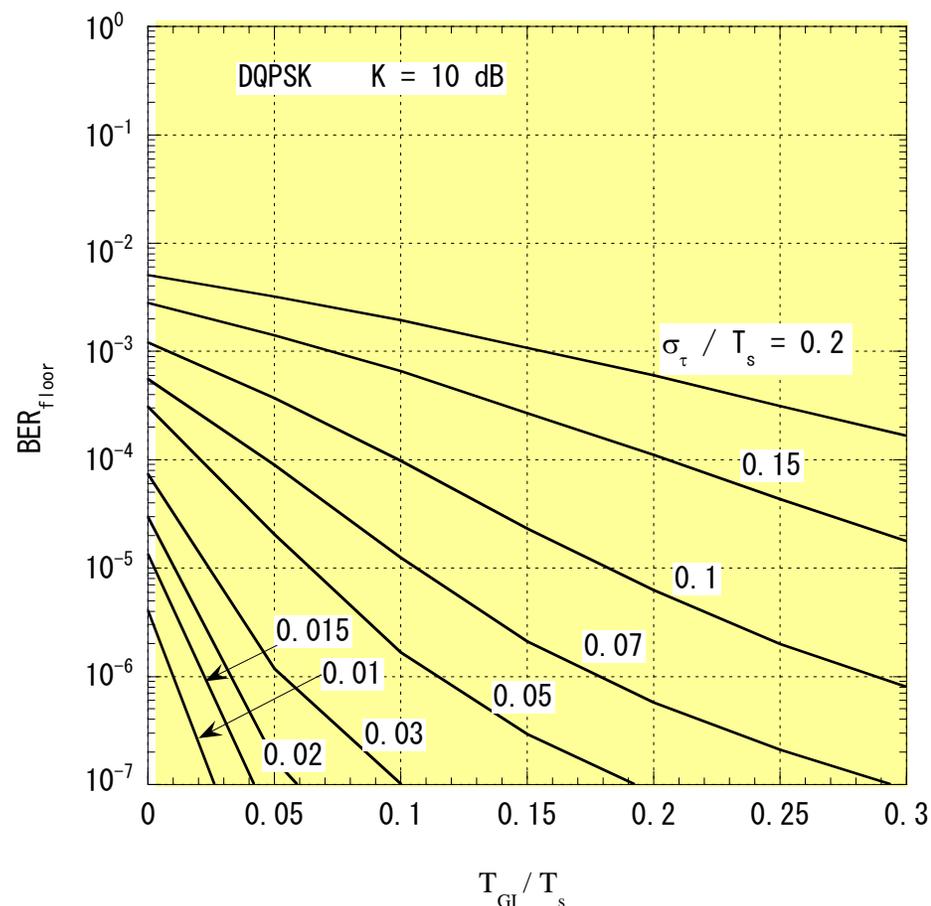


OFDMのBERフロア特性 (DQPSK) : レイリーフェージング

レイリーフェージング



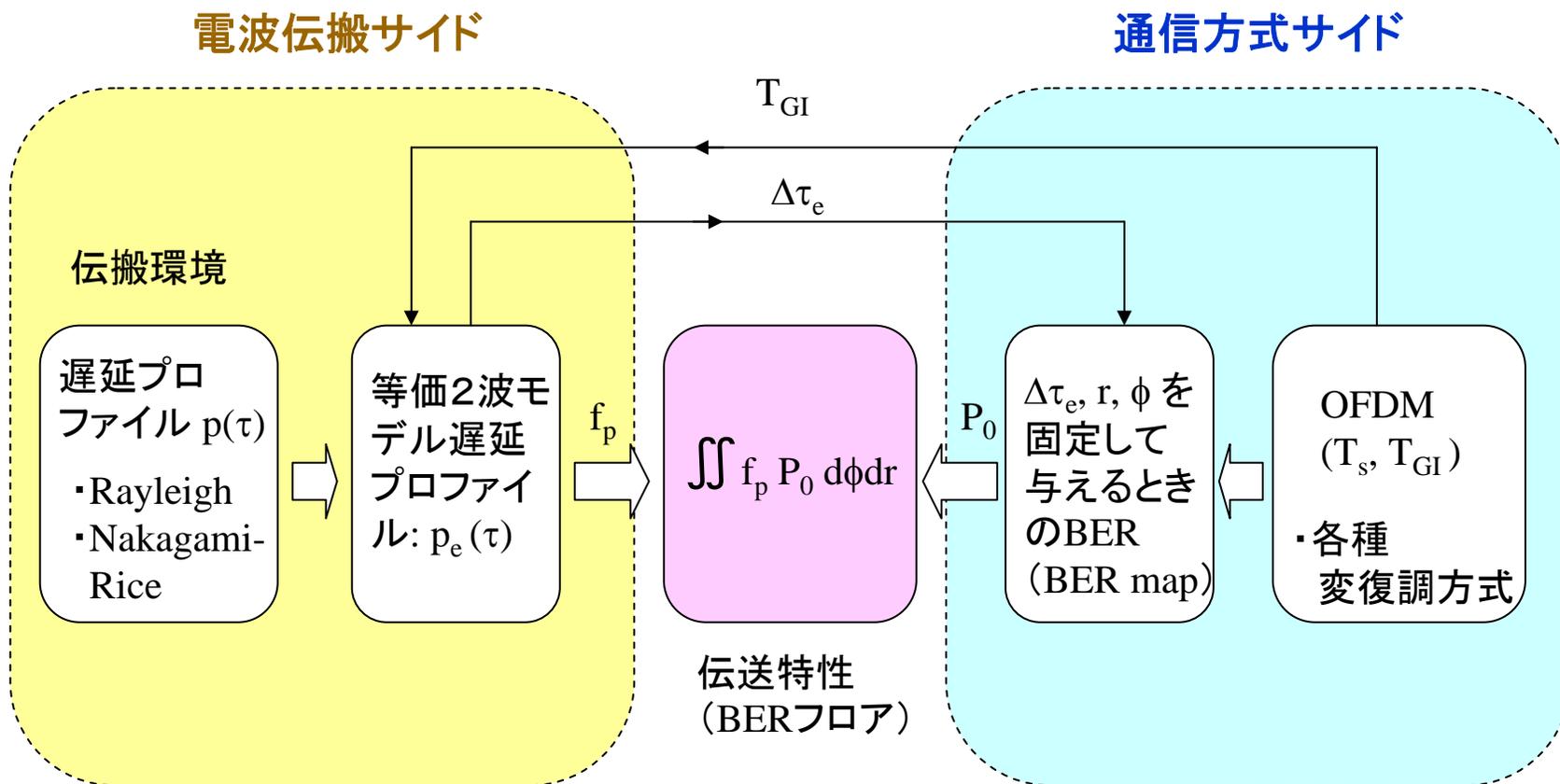
仲上・ライスフェージング (K=10)



種々のKの値の計算結果については、以下の論文に
 Y. Karasawa et al., IEICE Trans. Commun., 2008.10



電波伝搬とシステムの関係：OFDMのISI推定



電波伝搬は物理現象を扱うが、それを受けた受信機の反応もまた物理現象 (池上文夫先生)

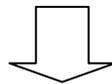


4. 新しいマルチパス伝搬測定法 トータルレコーディング



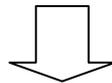
伝搬環境の測定

マルチパス構造の詳細解析
(マルチパス波の数、到来方向、遅延時間、……)



これまでの伝搬測定

- 大規模な実験(測定器も高価: Channel Sounder)
- 電波免許の取得(特に遅延時間測定)

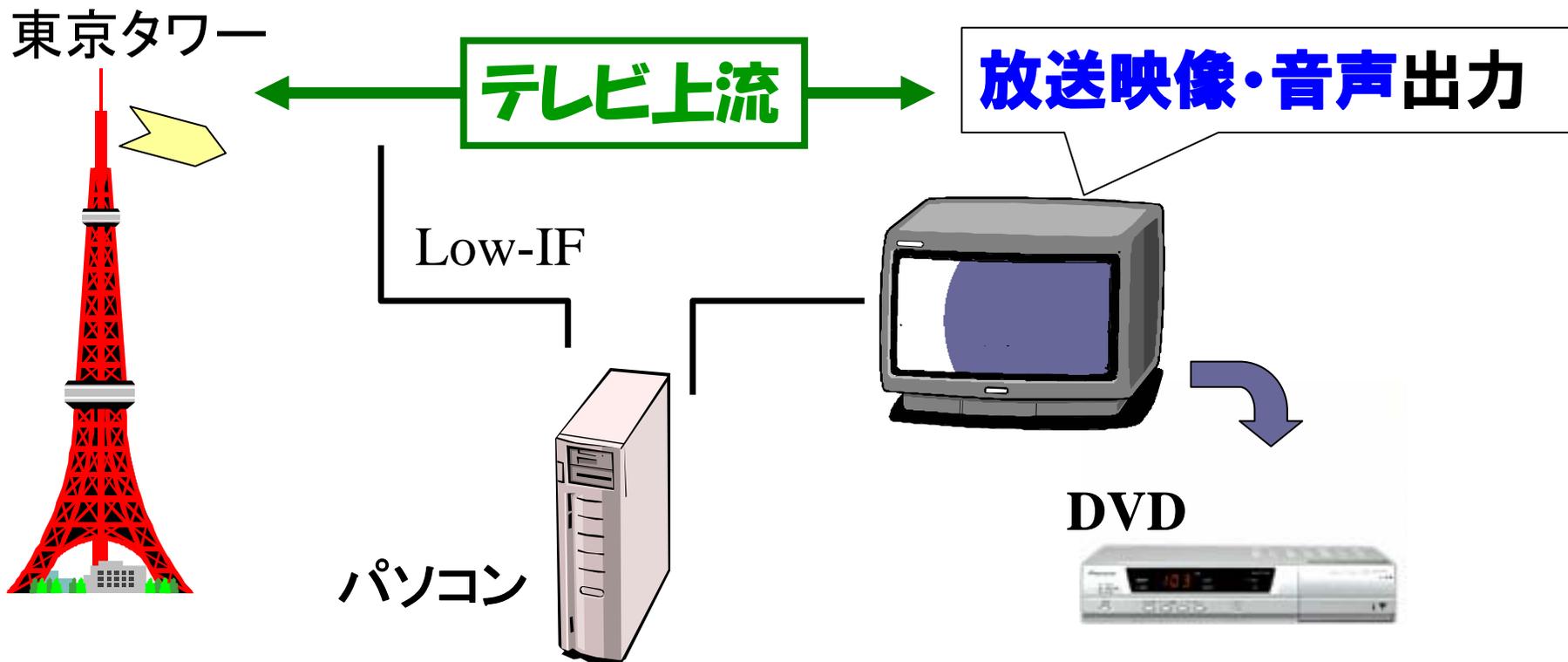


新しい測定法

- 既存電波を利用した簡易な測定(測定器も安価)
- パソコンを利用したトータルレコーディングに基づく伝搬測定



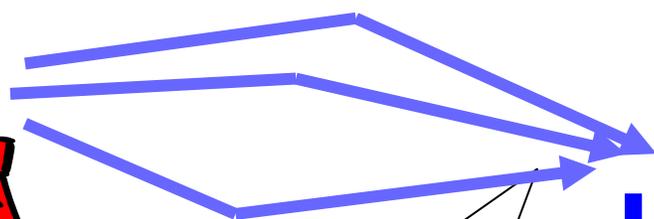
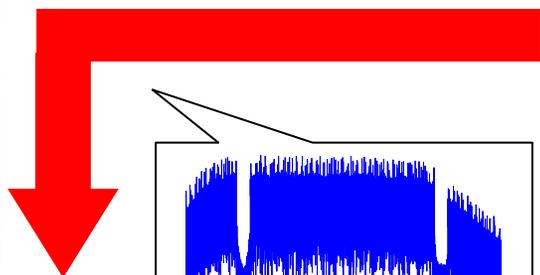
TV放送波のトータルレコーディング



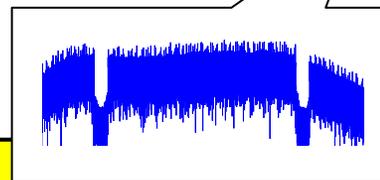
超大容量ハードディスクへ **電波のまま記録**
現時点での実力: 200MB/s (=100MS/s)のHDD直書

新しい伝搬測定法 (信号の形式を問わない)

基準信号受信
(見通しのよい地点)



測定信号受信
(測定環境)

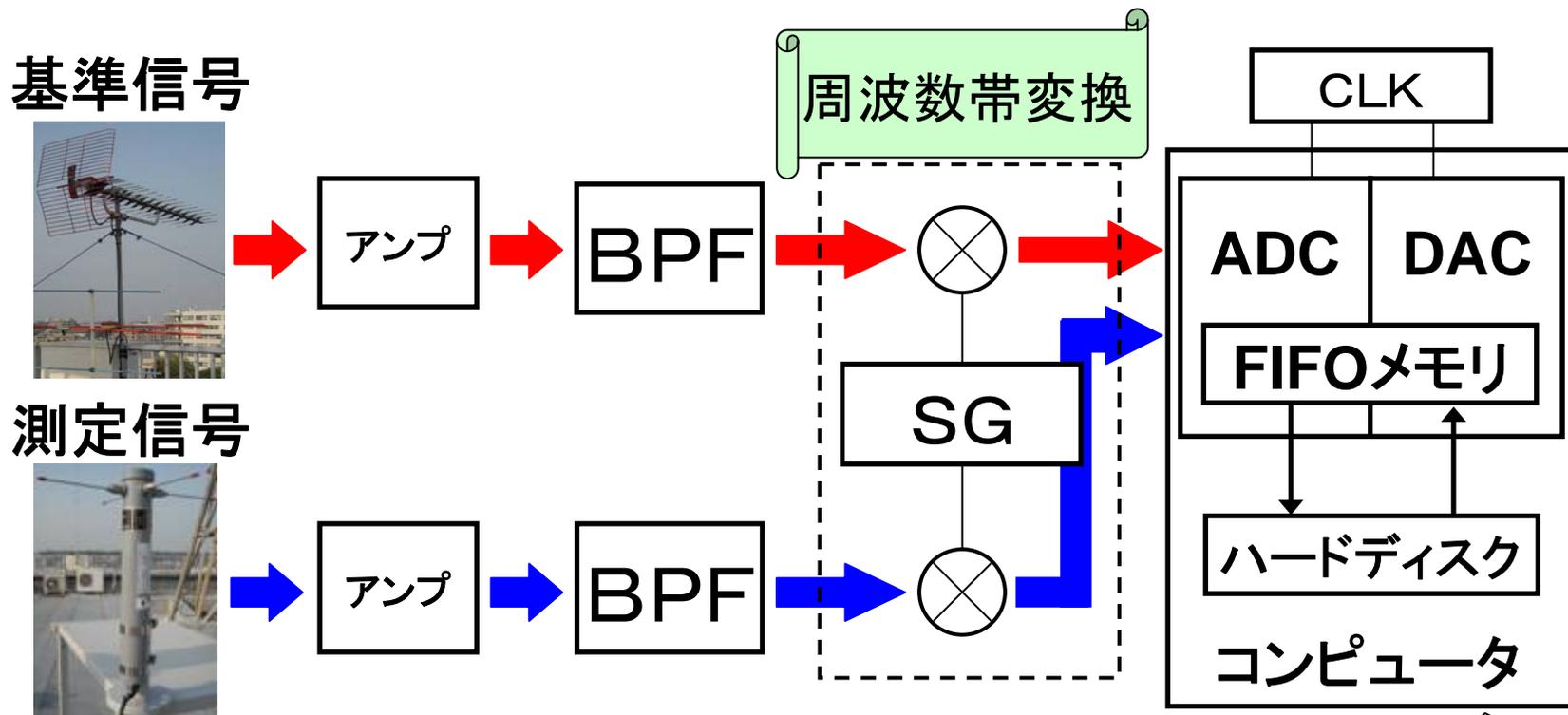


2信号を同時にパソコンヘトータルレコーディング

空間領域信号処理
周波数領域信号処理

到来パスの視覚化

トータルレコーディング



- 受信点を変えて多地点で収録
- 広帯域で収録

空間領域及び周波数領域でのMUSIC法による到来角・遅延時間高分解能推定

電通大 8 階建てビル: 屋上の風景



この屋上で電波環境を調べてみよう！

実伝搬環境での収録

測定場所

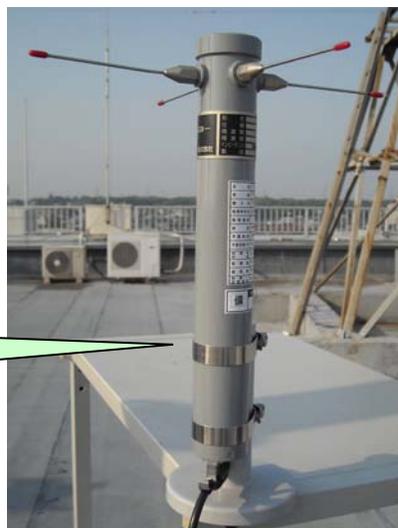
西二号館の屋上(8階建て)

受信環境

送信点である東京タワーが見通し



受信アンテナ(基準信号)
20素子八木宇田アンテナ



受信アンテナ(測定信号)

水平面無指向性
ターンスタイルアンテナ



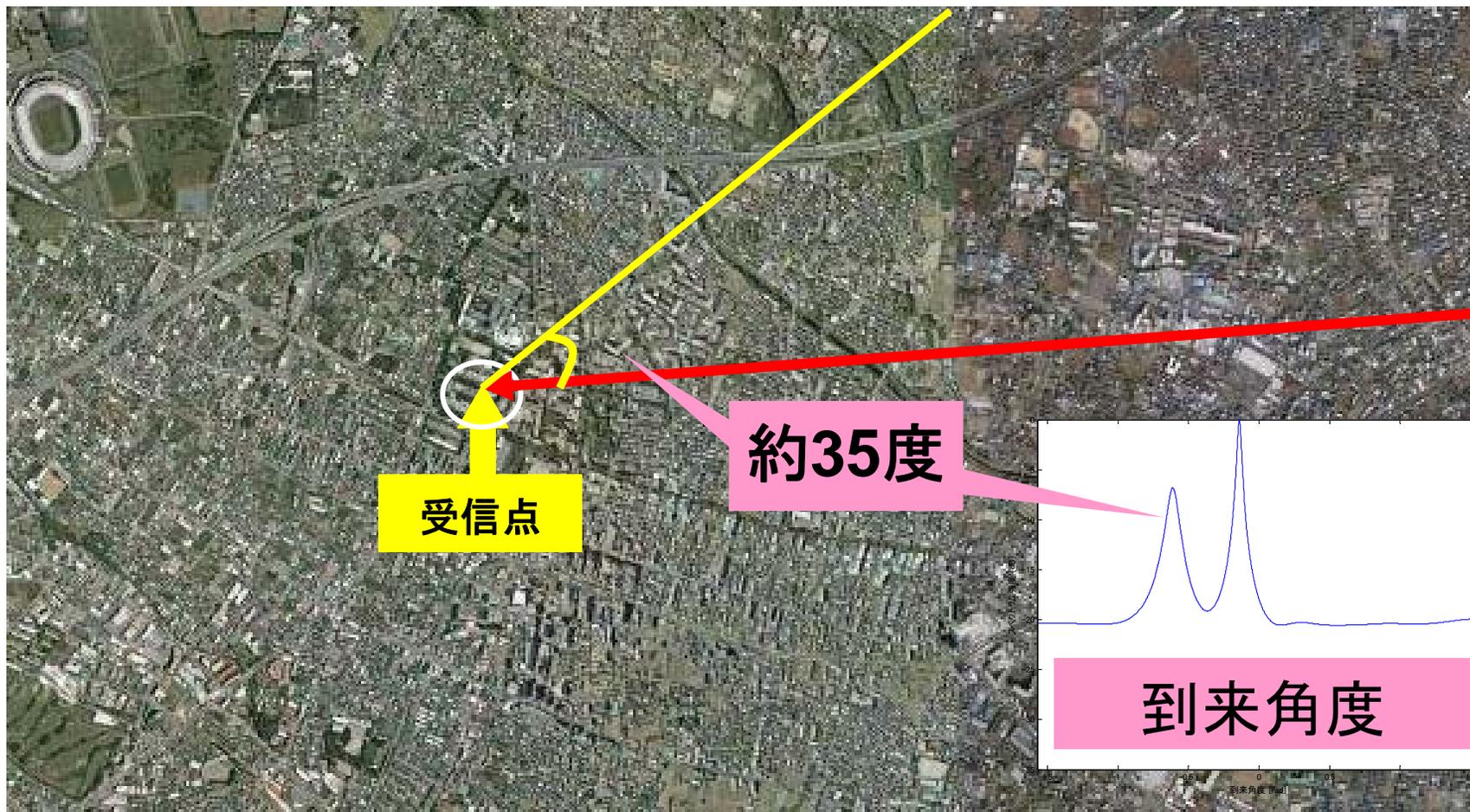
収録機器

トータルレコーダ

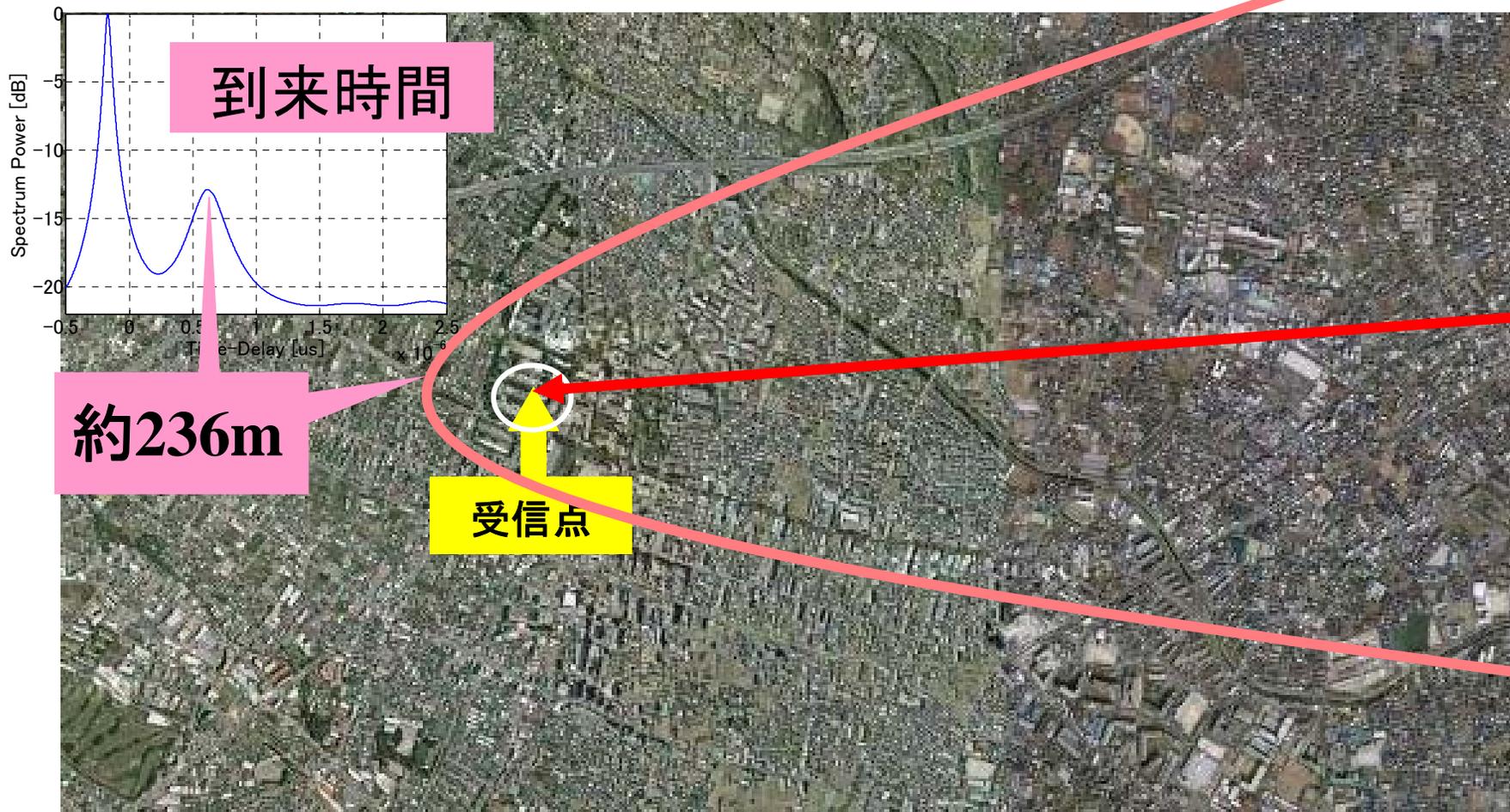
電通大の8階建てビル屋上で 地上デジタル放送電波を受信



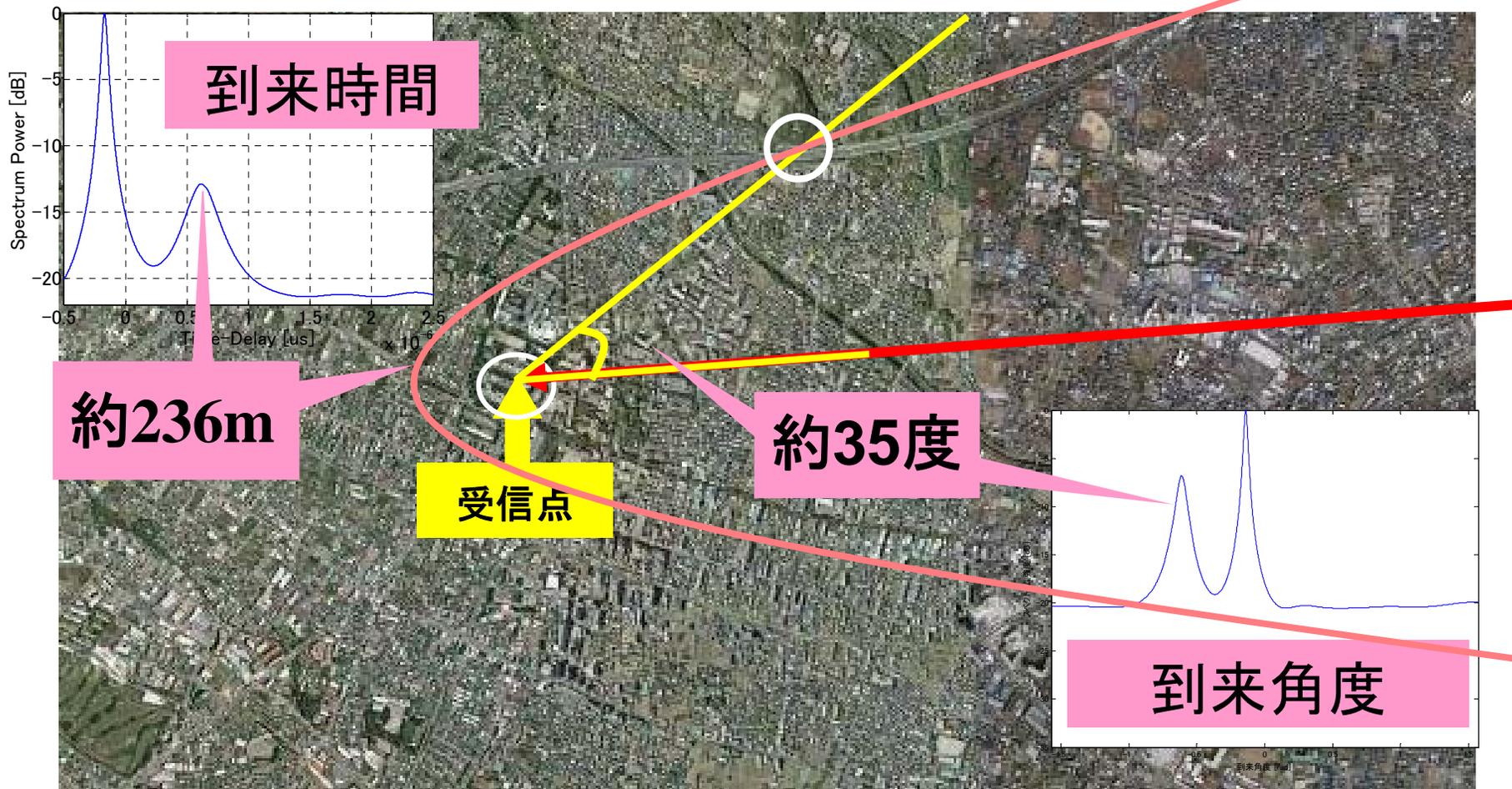
電通大の8階建てビル屋上で 地上デジタル放送電波を受信



電通大の8階建てビル屋上で 地上デジタル放送電波を受信



電通大の8階建てビル屋上で 地上デジタル放送電波を受信



電通大の8階建てビル屋上で 地上デジタル放送電波を受信

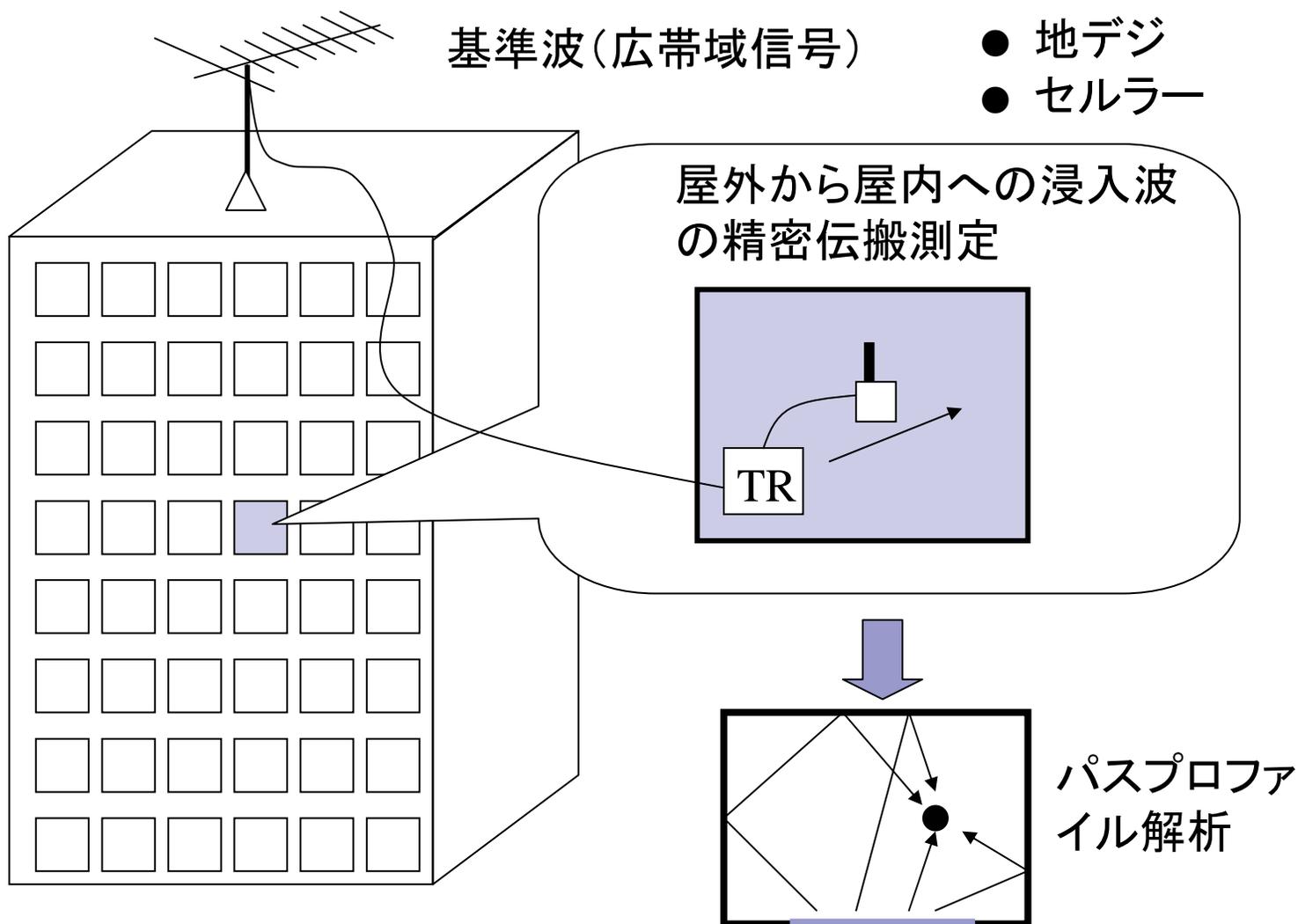
中央高速
道路の側壁

受信点

伝搬は測ってみないとわからない!!



トータルレコーディングシステムを用いた屋内マルチパス環境の精密測定 測定手段の開発から屋内伝搬環境解明へ





5. 電波伝搬環境の簡易生成 デジタル伝送特性評価システム (電波反射箱)



MIMO伝送特性評価用マルチパス環境の構築法

目的: MIMO端末の実環境(主に屋外)を模擬した特性評価法
(測定環境構築法と測定法)

測定したい項目

十分なマルチパス環境でのMIMO伝送特性

- 基本伝送特性(固有値分布、チャネル容量、BER)
- アンテナカップリングの影響(空間相関を含む)
- 交差偏波特性(XPD)、偏波ダイバーシティ
- 広帯域伝送(OFDMのGIを超える遅延広がり)
- fast fading環境での動的特性
-
-



測定環境の特徴

電波反射箱 (Reverberation Chamber: RC)

- ・周囲一様の角度空間からの散乱波到来
- ・0dBに近いXPD
- ・比較的大きな遅延スプレッド (指数関数型遅延プロファイル)

- ・パラメータ値の可変、動的フェージングの生成に難

開発目的の歴史

EMC → 移動端末 → MIMO

実放射素子で測定点を囲みフェージング環境を構築 (フェージングエミュレータ)

- ・動的環境を実現
- ・入射角度特性を制御可能

- ・実験系の構築、かなり大規模
- ・受信点でのフェージング環境は実現できるが、MIMO応用のイメージが確立されていない

実放射素子で測定点を囲みフェージング環境を構築(フェージングエミュレータ)

構築: パナソニック/東工大
(岩井他、信学論B, 2008.09)

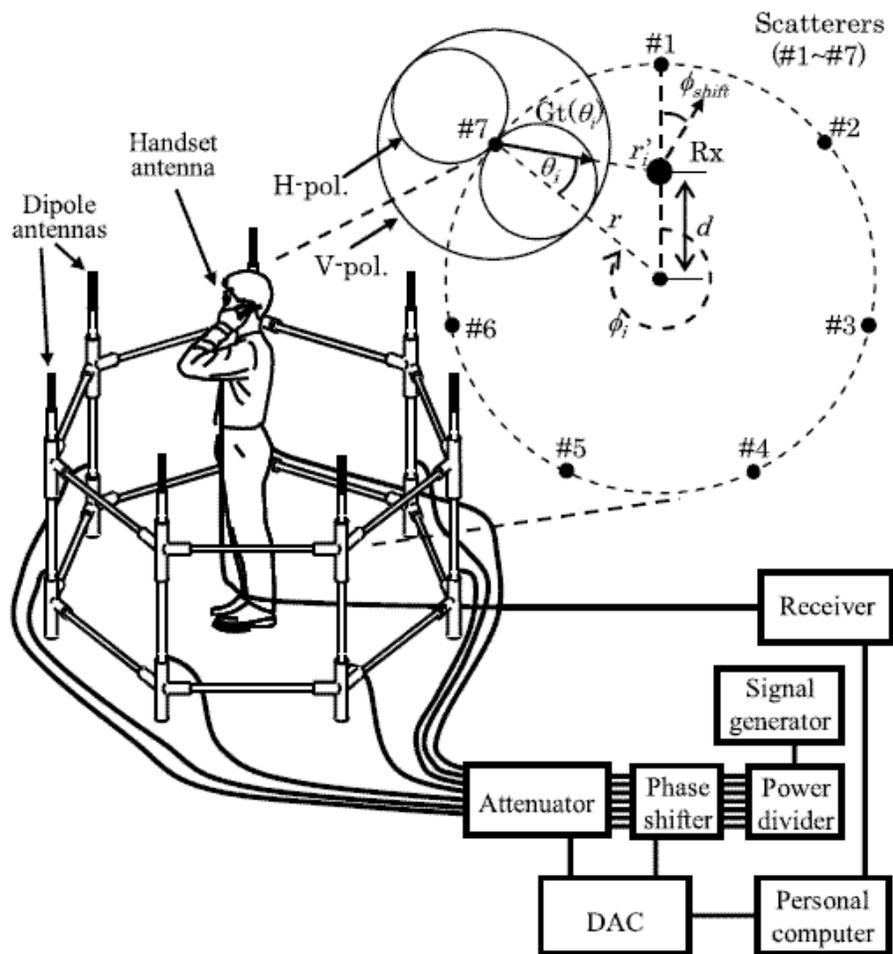


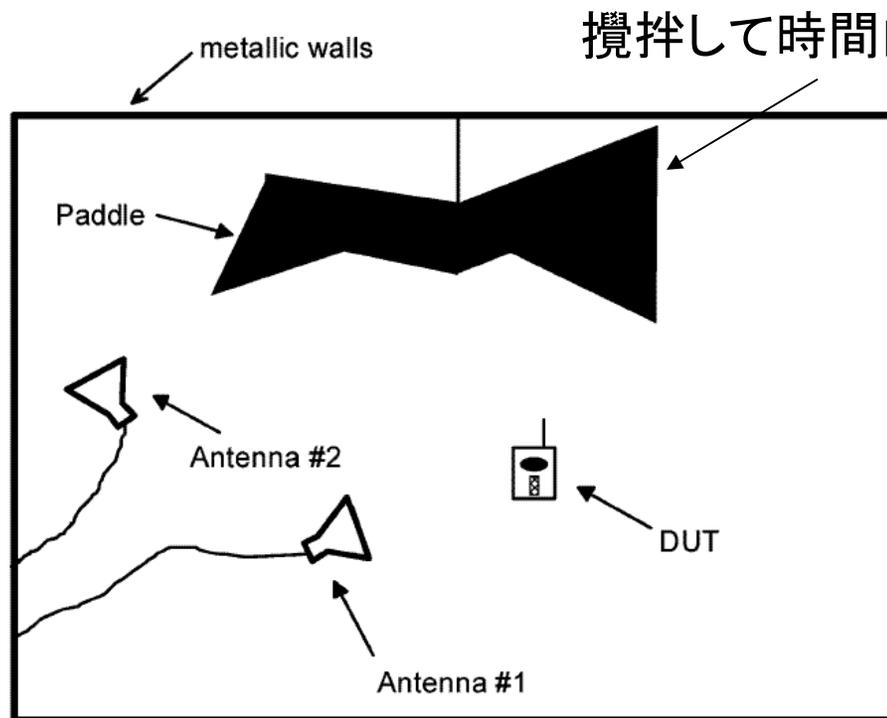
図1 空間フェージングエミュレータの構成
Fig.1 Configuration of the spatial fading emulator.

レイリーフェージングの環境生成
無変調波(狭帯域)
端末測定(MIMOではない)

電波反射箱 (Reverberation Chamber: RC) の例

時間的に変化するマルチパス環境 (端末測定目的)

典型的な例:



仲上・ライスフェージング
環境の生成

C. L. Holloway et al., IEEE Trans. AP, vol. 54, no. 11, 2006. (上の図)

P. Hallbjörner, Microwave & Optical Letters, vol. 35, no. 5, 2002. (上記と類似の構成)

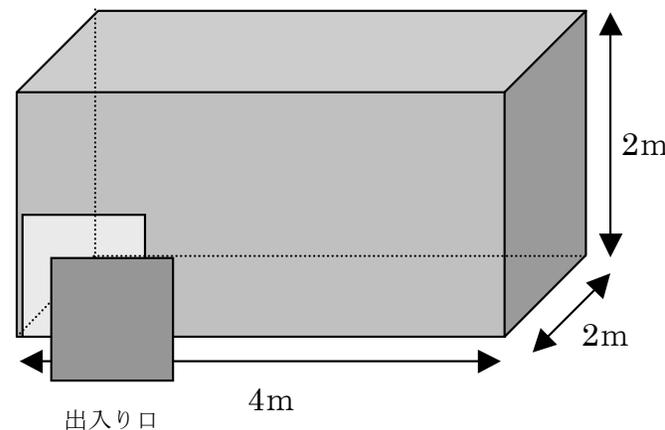
電波反射箱を作ってみると？

全面鏡張りの部屋: 光の反射箱
全面金属壁の部屋: 電波の反射箱

アルミニウム製フレームと
アルミシート付樹脂板で構成

○簡易な構造

○安価で構築可能



電波反射箱内部の構成



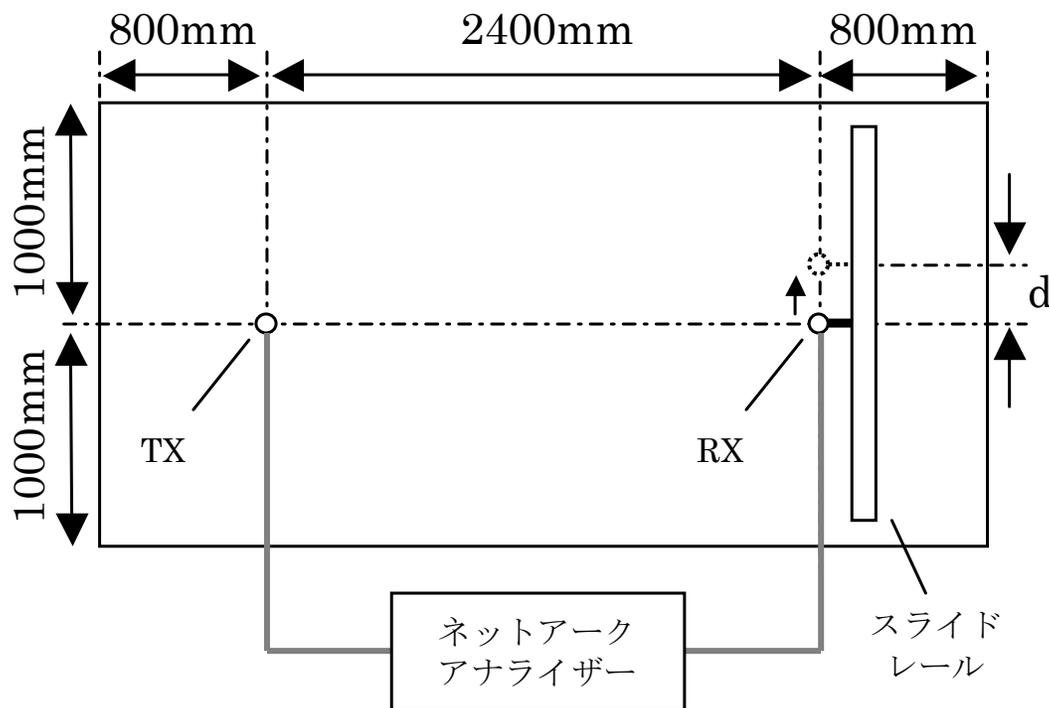
反射箱内部に送信・受信アンテナを設置して使用。

(他の構造物は無し)

反射箱内部の伝搬環境特性は、大きさ・材質・構造(密閉度等)が大きく影響する。

→ 伝搬特性は反射箱固有の値となってしまう。

電波反射箱内の特性(測定方法)



測定周波数

$f = 5.0 \sim 5.2\text{GHz}$ (1601ポイント)

受信アンテナの移動量

$d = 0 \sim 200\text{mm}$ (2mmステップ)

(合計101ポイント)

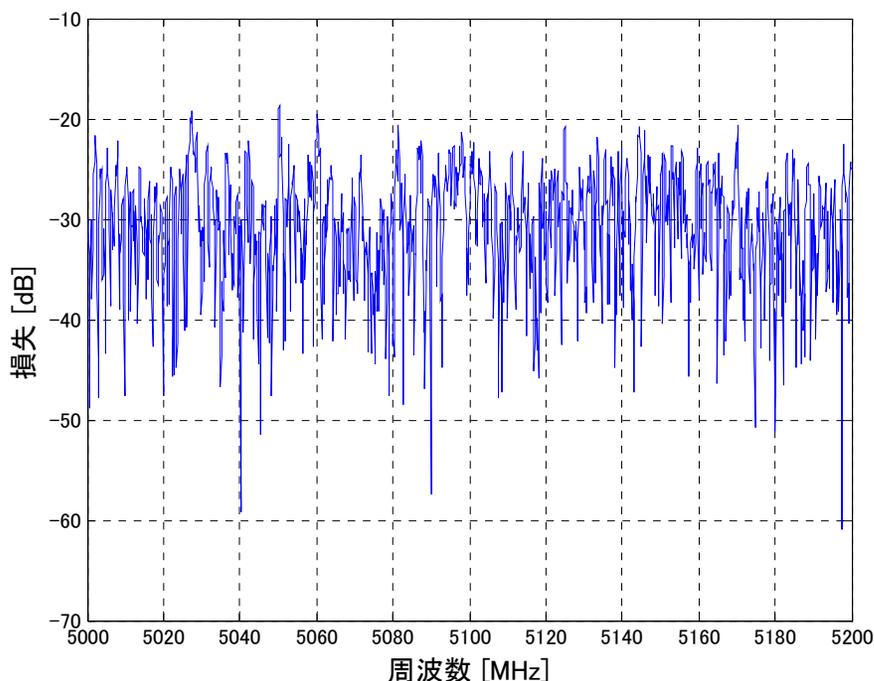
受信側アンテナをスライドレールで移動して測定を実施

取得した161,701ポイント(1601×101)のデータを用い伝搬特性を求める

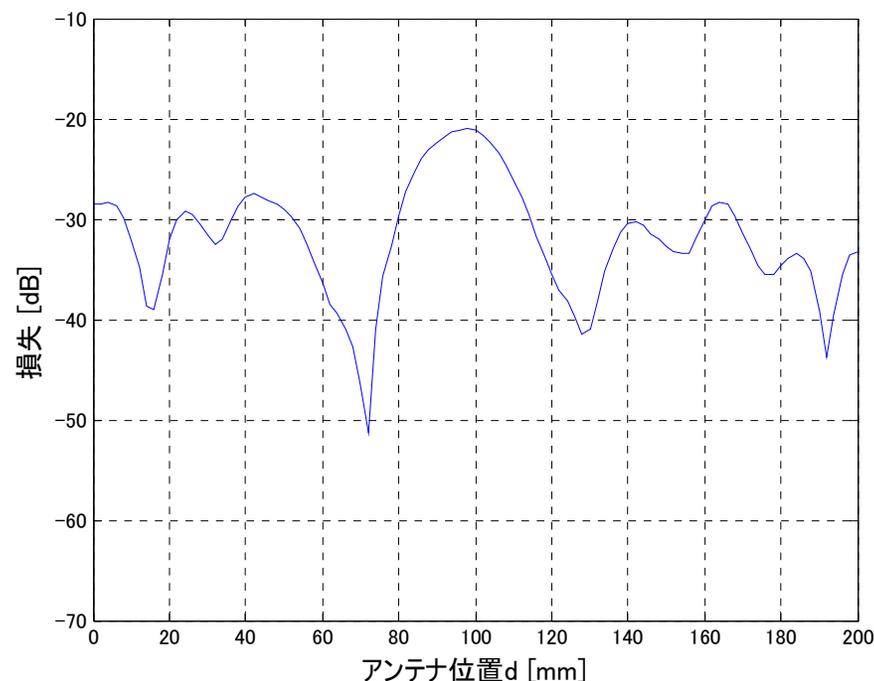


電波反射箱内の特性(周波数・空間特性)

周波数特性 ($d = 0$)



空間特性 ($f = 5.1\text{GHz}$)

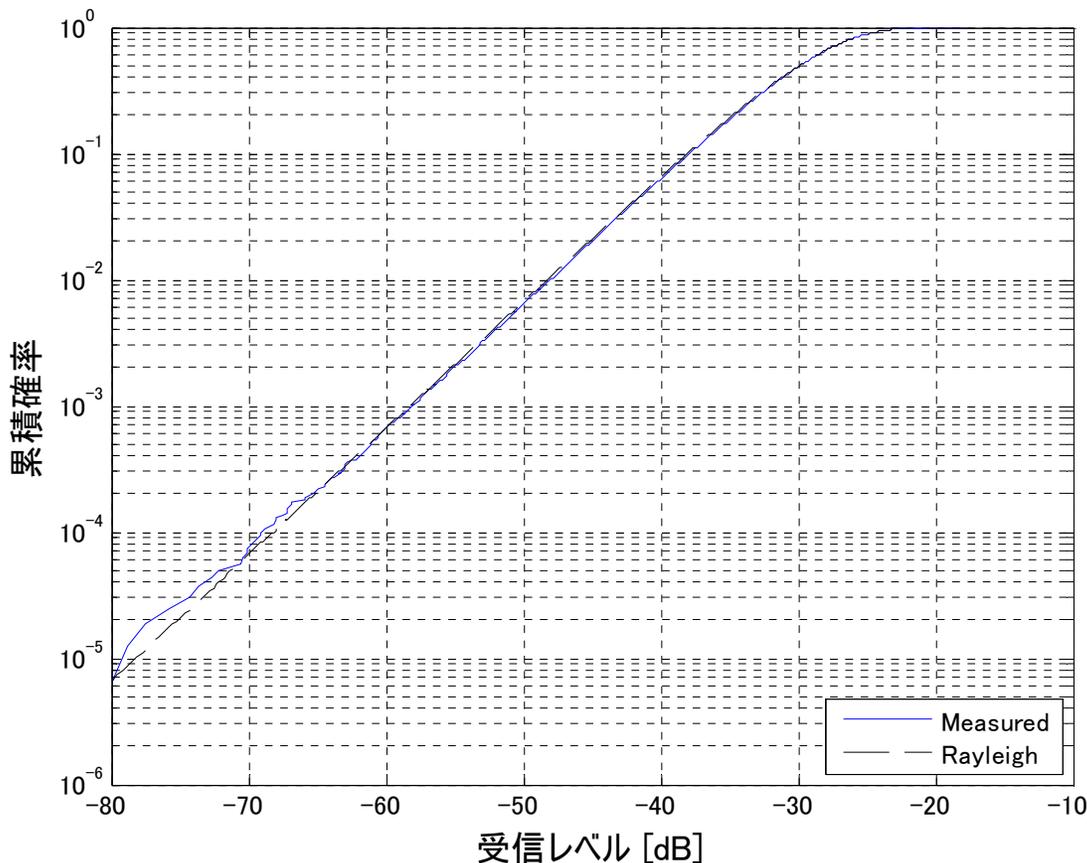


周波数的にも空間的にもマルチパスによるフェージングが発生している
(送信アンテナ:垂直偏波 受信アンテナ:垂直偏波)



電波反射箱内の特性(累積確率分布)

累積確率分布



取得したデータ(161,701ポイント)
の累積確率分布

同じ中央値を持つレイリー分布の
理論値と一致

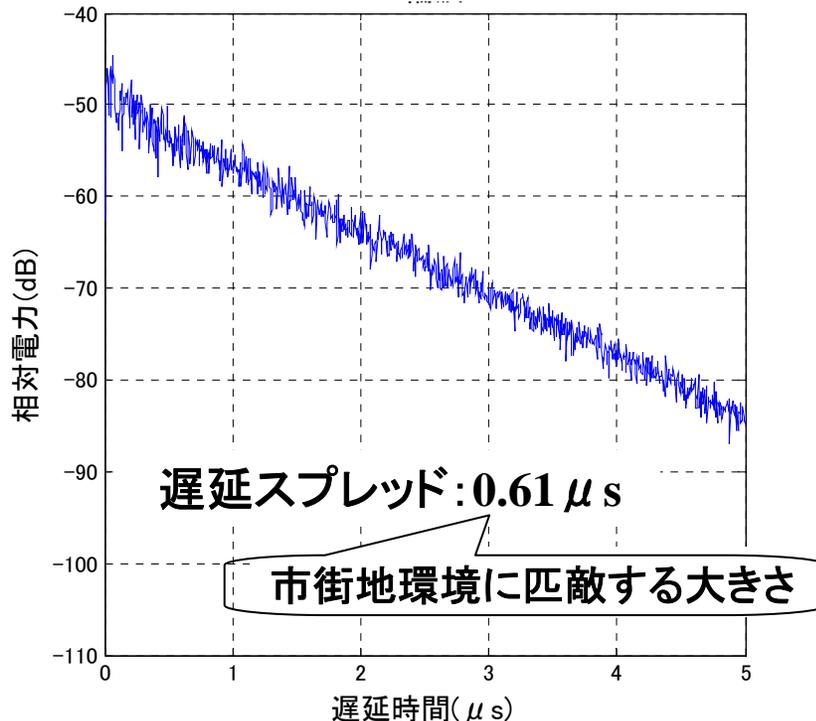
中央値: -29.7dB

**見通し(LOS)なのに、きれいな
レイリーフェージング環境が実現!!**

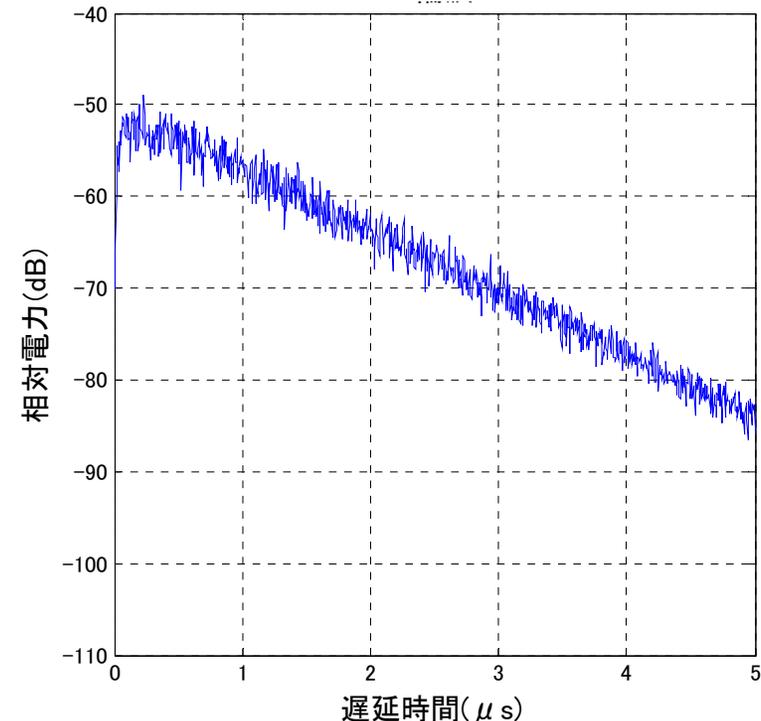


電波反射箱内の特性(遅延プロファイル)

受信アンテナ: 垂直偏波



受信アンテナ: 水平偏波



受信信号の周波数特性から遅延プロファイルの算出

(各位置(101ポイント: $d = 0 \sim 200$)で算出したインパルス応答を平均)

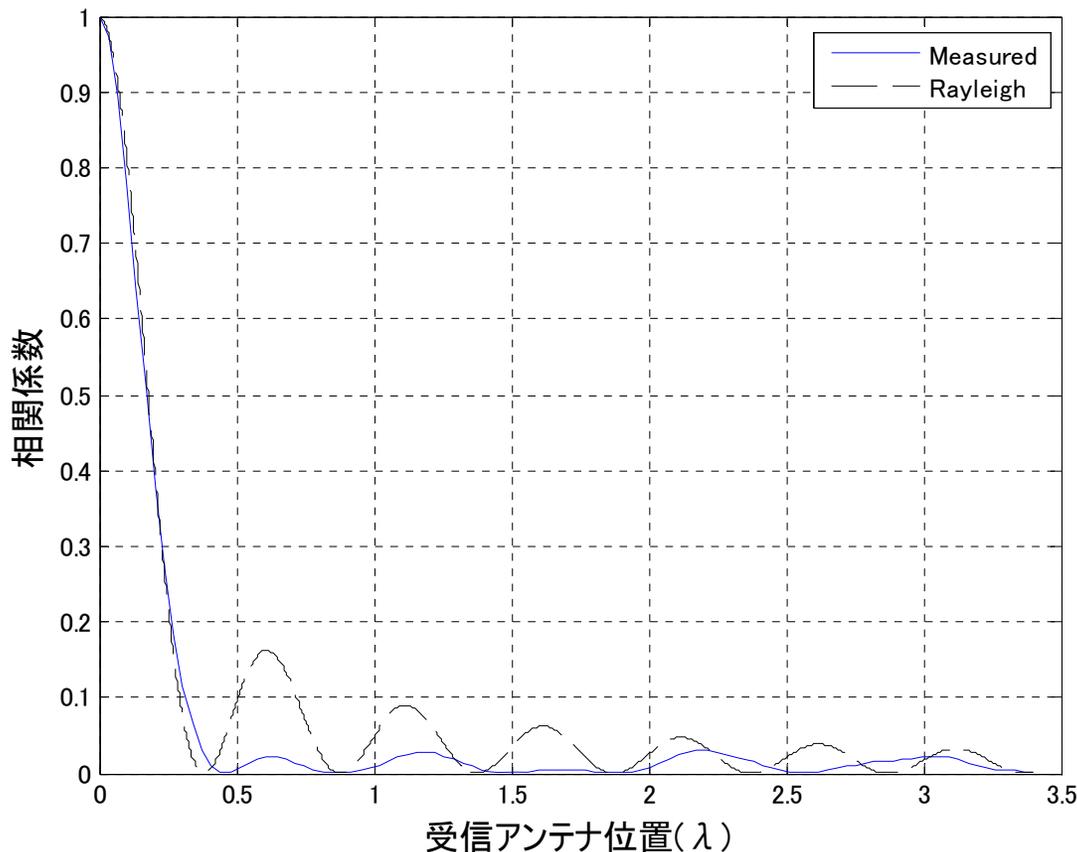
遅延プロファイルの形状は、直線で近似でき、**指数関数型モデル**

交差偏波識別度(XPD)は約 **1.5 dB**



電波反射箱内の特性(到来波角度分布)

空間相関特性

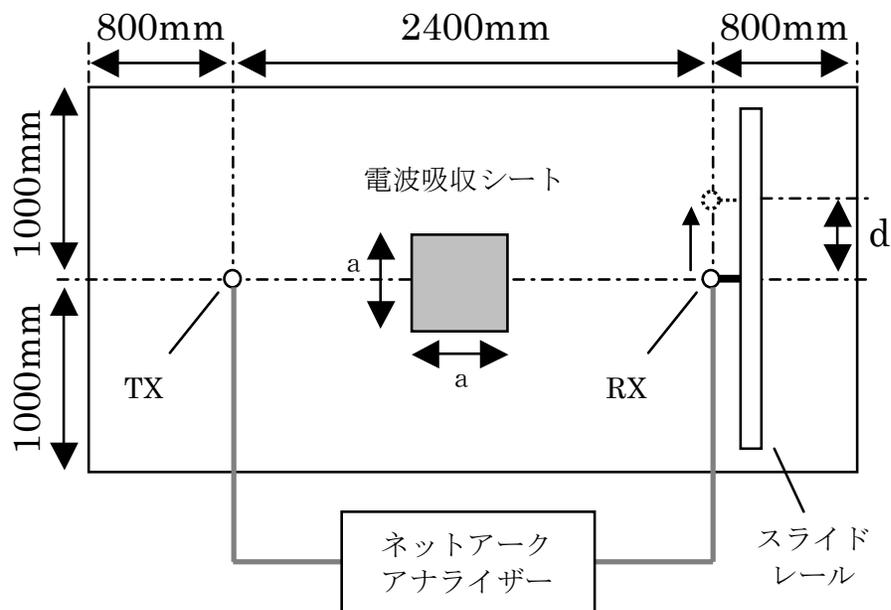


レイリーフェージング、かつ
角度的に到来波が一様の場合の
理論値と比較。

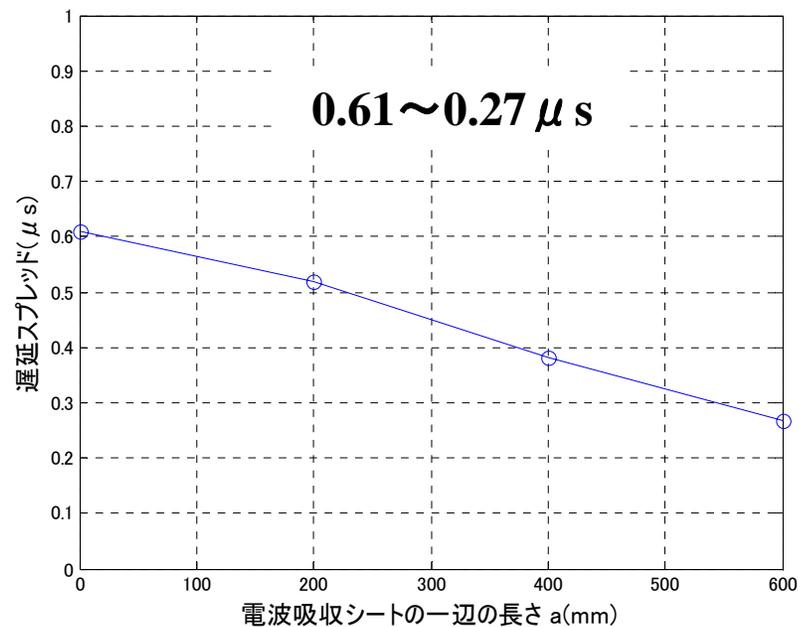
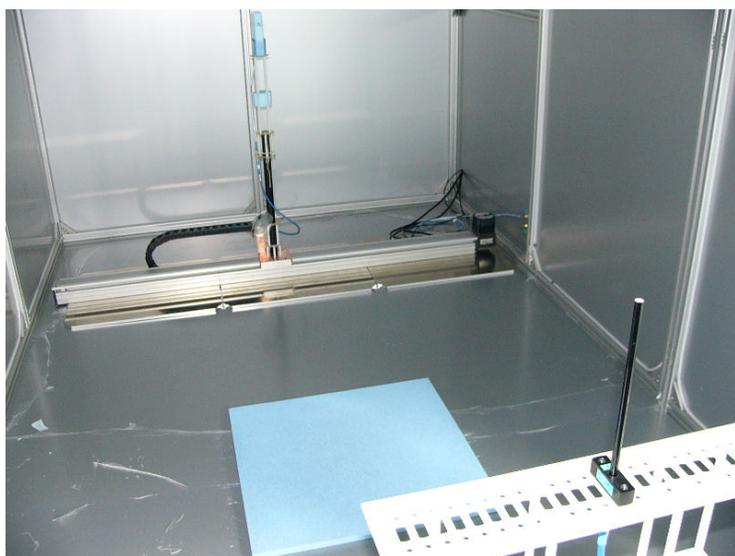
理論値と実測値は類似しており
到来波角度分布は一様と推測

相関係数が0.2以上の場合一致。
0.2以下の小さい相関ではズレ。

→ 理論値は2次元での一様分布



電波吸収シートの設置による 伝搬環境制御 (急所に一枚の電波吸収シートを置く)



遅延スプレッドを簡易に制御できる!!



電波反射箱内の特性(まとめ)

■ 反射箱内の伝搬環境特性

レイリー分布

遅延スプレッド: $0.61 \mu\text{s}$ (屋外に匹敵)

交差偏波識別度: 約1.5dB

到来波角度分布: 一様

課題

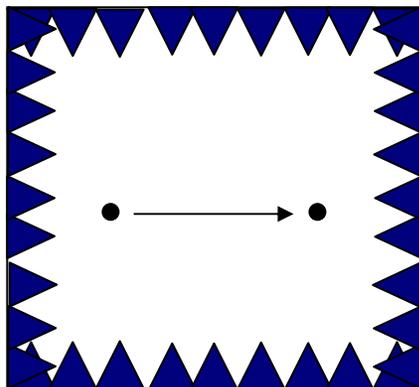
環境パラメータ値の制御

(遅延スプレッドに関しては簡易に制御可)

動的フェージング環境の実現

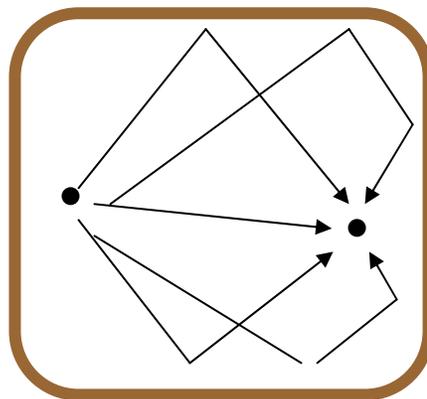
マルチパス環境

電波暗室



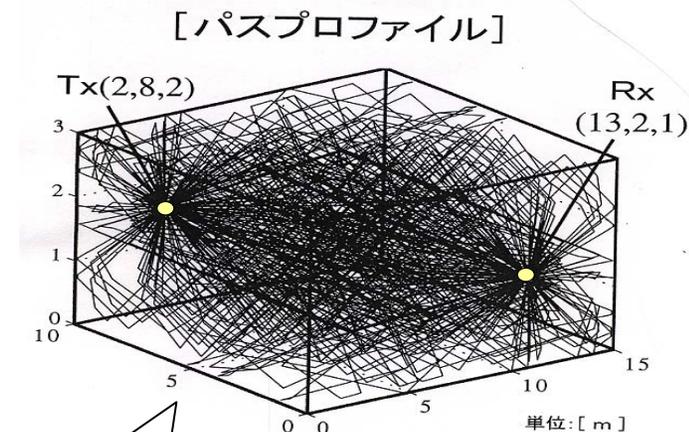
Non-reflective

実際の環境
(屋内・屋外)



Reflective

電波反射箱
Reverberation Chamber



Perfectly
multipath-rich

- ・関所の働き
- ・ここでうまく働かない方式が
実際の環境でうまく働くことはない
- ・ここでうまく働いたとしても
実際の環境でうまく働くとは限らない



講演のまとめ

- 屋内伝搬は、環境が多様すぎて、従来手法によるモデル化が難しい
- 決定論的に解析する手法(レイトレーシング、FDTD等)が有力
- 「伝搬」を「システム」に結びつける考えが重要(キーパラメータの概念: 闇雲に測るだけでは、効率が悪い)
- OFDMの符号間干渉問題とそのモデル化(伝搬とシステムを結び付ける等価伝送路モデル)を紹介
- 新しいマルチパス伝搬測定法: トータルレコーディングを紹介
- 電波伝搬環境の簡易生成: デジタル伝送特性評価システム(電波反射箱)を構築した



*Thank you very much
for your kind attention!*

