

EEMセミナー

EEM-RTM(レイトレーシング法)

株式会社EEM

# 1. レイトレーシング法

## ●レイトレーシング法とは？

周波数が高いとき、または、計算領域が波長に比べて十分大きいとき、電波の直進性を利用して電界分布を近似計算する方法

光と同じように、直進・反射・回折・透過を考える

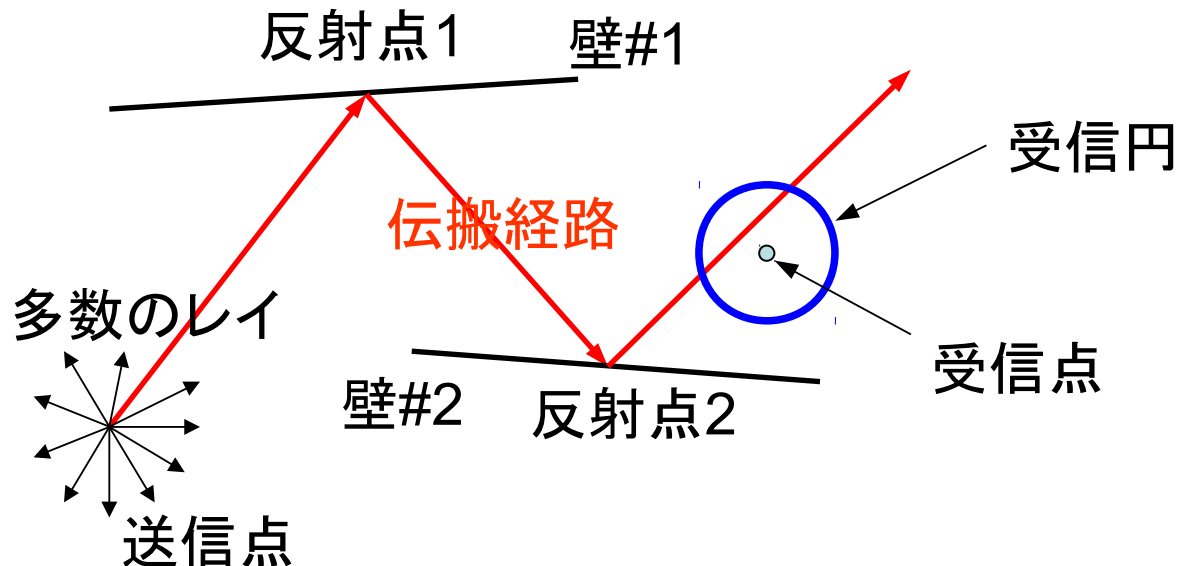
波動方程式をFDTD法などで直接解析することができない広い領域を短時間で計算することができる

## ●用途

- ・市街地の電波伝搬解析(通信、放送)
- ・屋内の電波伝搬解析(無線LAN)

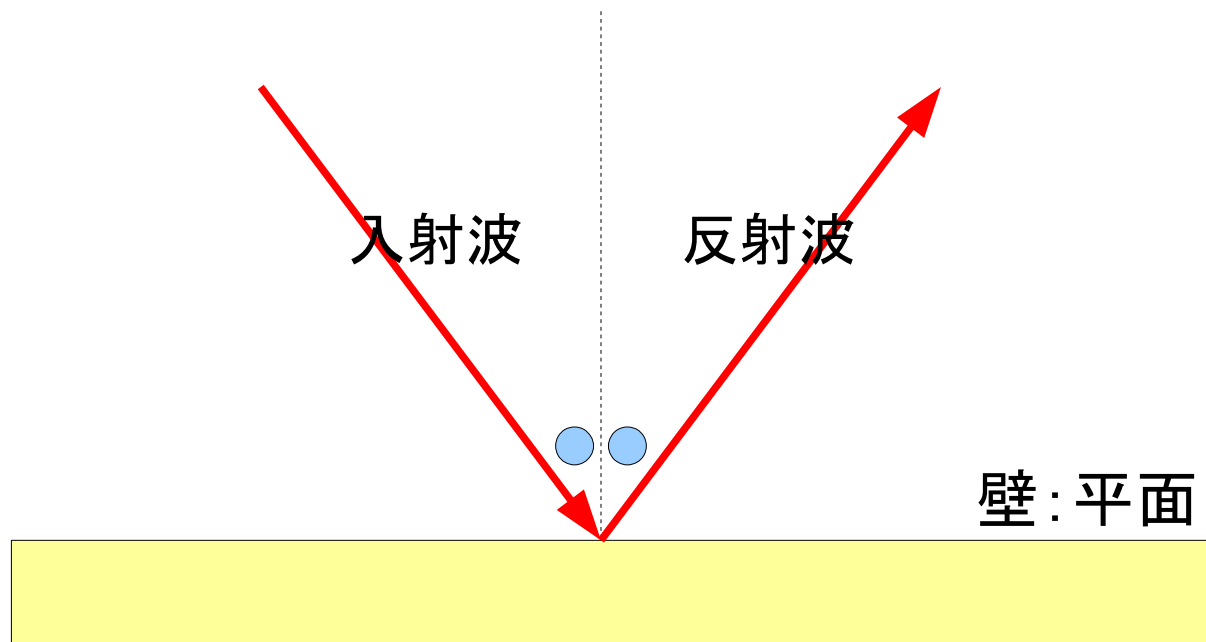
## レイラウンチング法とは？

- ・レイトラッキング法の一種
- ・送信点から多数(10万～100万本)のレイを飛ばしてその軌跡を追跡し、受信点の近くを通過するものを探索する方法
- ・受信円の広さに伴うあいまいさをなくすために、適切な後処理を行うことにより、伝搬経路の漏れと重複をなくす
- ・演算量が反射回数に比例するだけなので多重反射の計算が容易



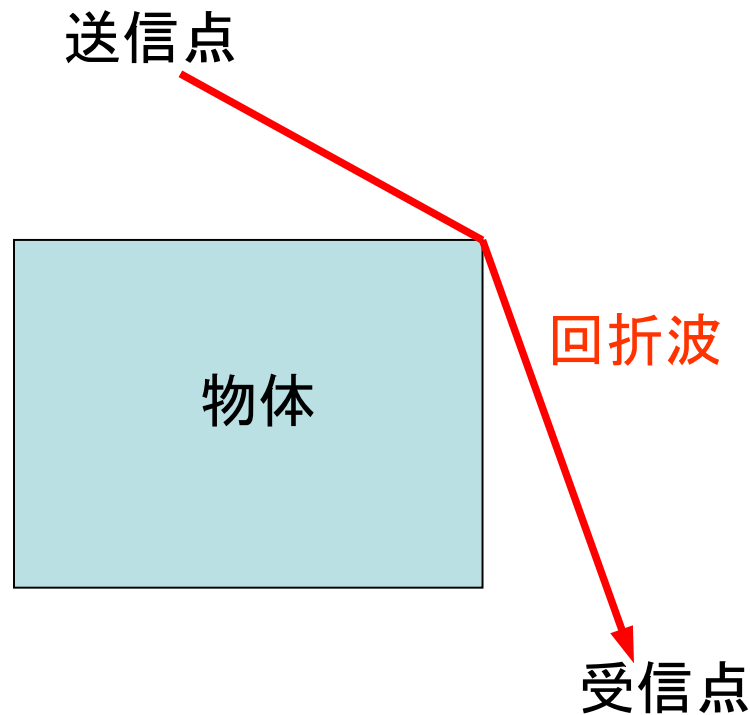
# 反射波

物体を平面の集合と考え、Snellの法則(入射角=反射角)に従う方向に反射波が発生すると考える  
反射係数にはFresnelの公式(無限平面の解析解、入射角・誘電率・偏波の関数)を用いる



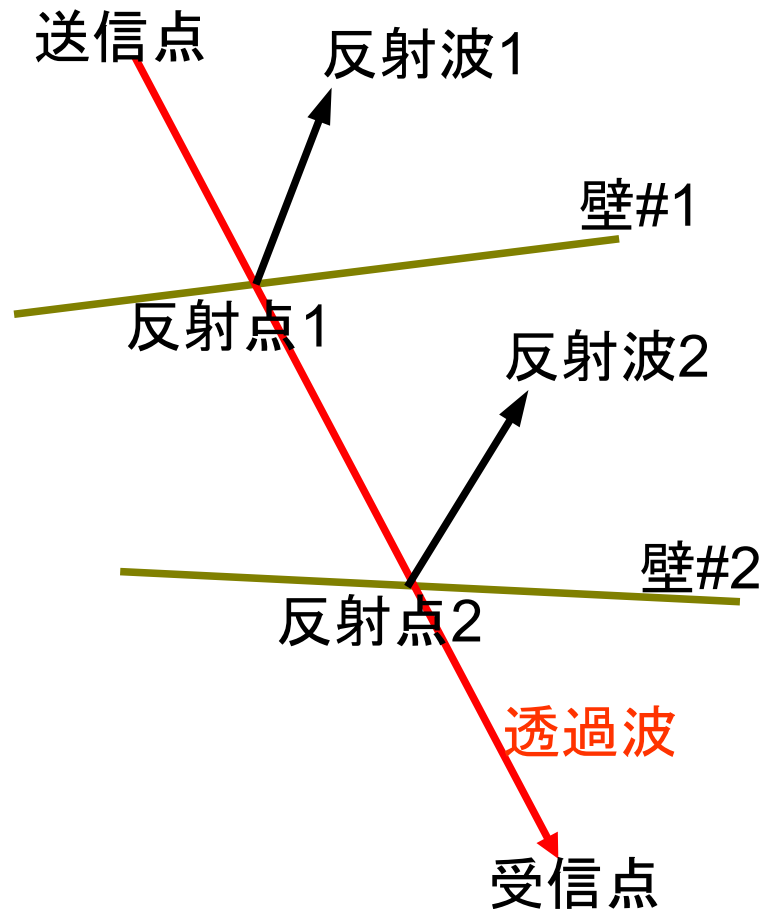
# 回折波

物体を角を通るとき回折波が発生する  
回折波の大きさは楔近似の公式で計算する  
周波数が高くなると回折波は弱くなる



# 透過波

壁に入射した電界は一部が反射し一部が透過する  
透過係数には無限平面の解析解を用いる



## Friisの公式

指定した受信点における受信電力を計算する公式

$$P_r = P_t \sum_i G_{t,i} G_{r,i} R_i^2 \left( \frac{\lambda}{4\pi l_i} \right)^2$$

$P_r$  : 受信電力

$P_t$  : 送信電力

$i$  : 伝搬経路

$G_{t,i}$  : 送信アンテナ利得 \* 指向性

$G_{r,i}$  : 受信アンテナ利得 \* 指向性

$R_i$  : 反射係数 \* 回折係数 \* 透過係数

$l_i$  : 伝搬経路長

$\lambda$  : 波長

## 衝突判定法

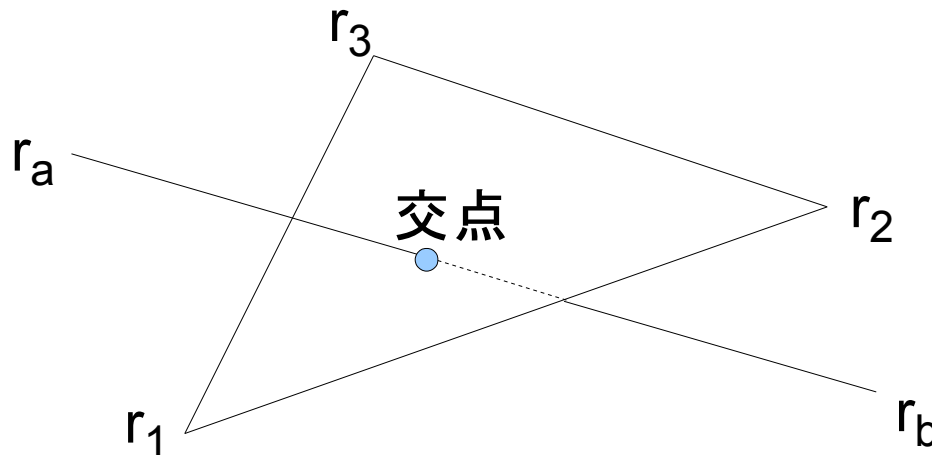
2点 $\mathbf{r}_a=(x_a, y_a, z_a)$ と $\mathbf{r}_b=(x_b, y_b, z_b)$ を通る線分と、頂点が $\mathbf{r}_i=(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=1,2,3$ )である3角形が交わる条件は以下のようになる。

交点を2通りで表現すると

$$\mathbf{r}_a + \alpha_1(\mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a) = \mathbf{r}_1 + \alpha_2(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) + \alpha_3(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1)$$

となり、この3X3行列を解いて $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ が得られる。交わる条件は以下のようになる。

$$0 < \alpha_1 < 1 \quad 0 < \alpha_2 \quad 0 < \alpha_3 \quad \alpha_2 + \alpha_3 < 1$$

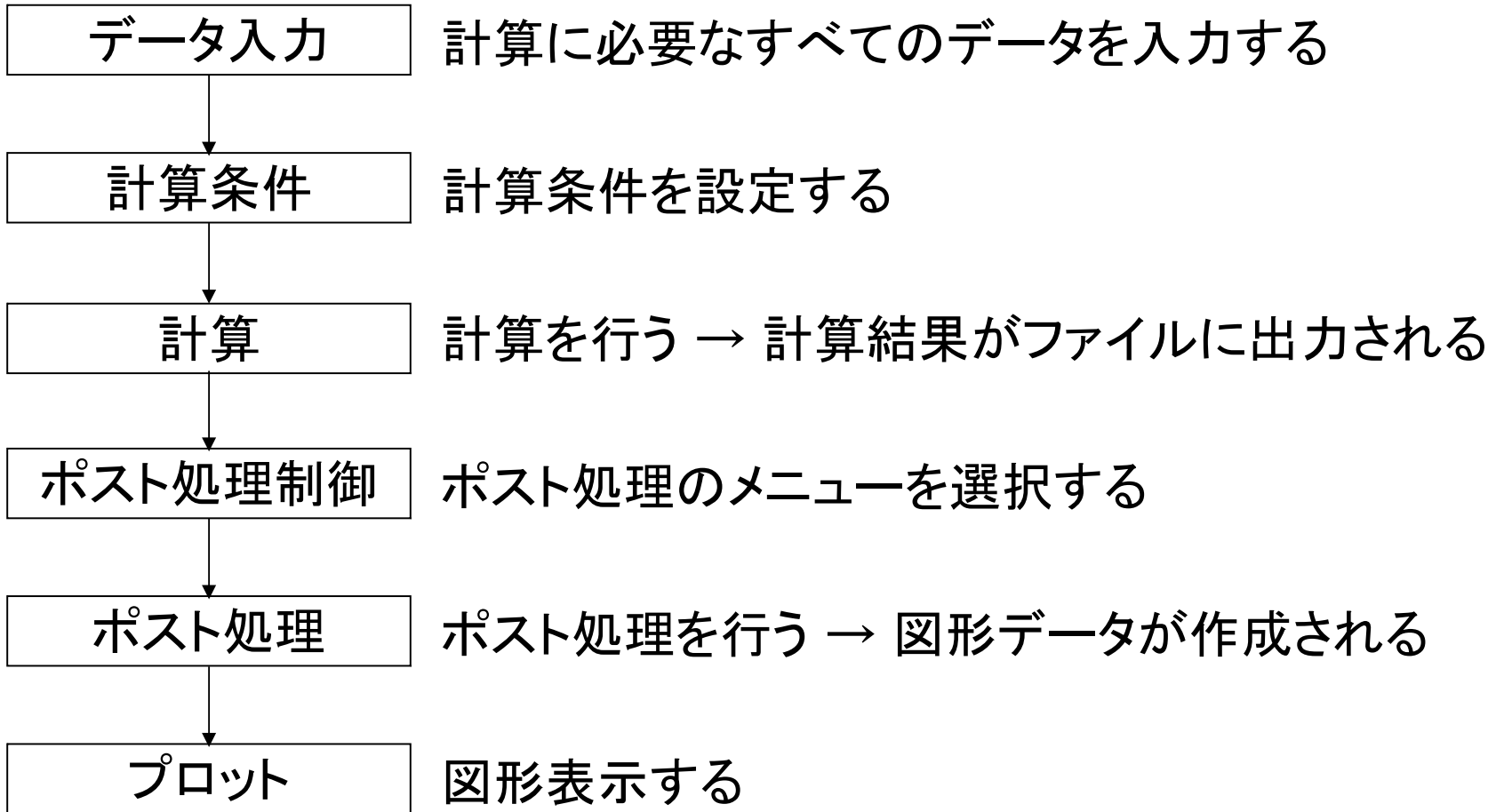




## 2. EEM-RTM操作方法

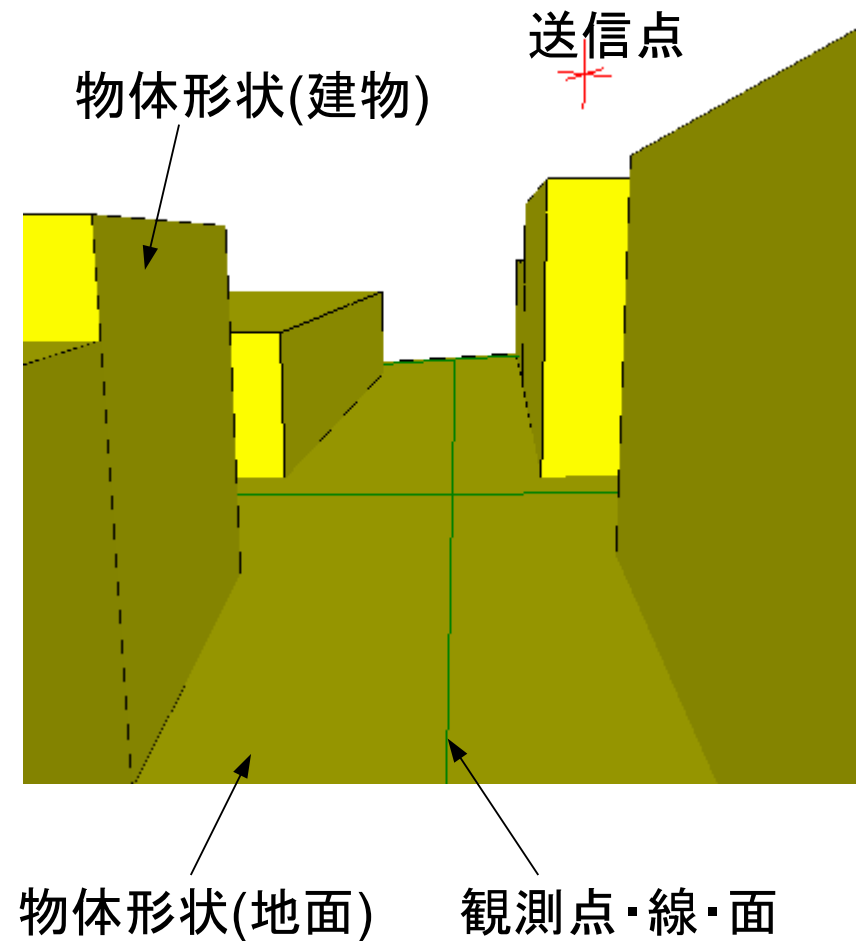


## 操作手順



# 入力データとして必要なもの

- 1)物体形状
- 2)物体の物性値(誘電率、導電率)
- 3)送信点の位置、送信アンテナ特性
- 4)観測点の位置、受信アンテナ特性
- 5)計算条件



# データ入力手順

(1)必要なら背景図を読み込む。  
補助線をもとに形状を入力するときは省略可。

(2)基準線を設定し、画面上の座標と実際の座標の関係を与える。  
その後、必要なら、補助線を設定する。

(3)物性値を編集する。  
使用する材質を登録する。

(4) 幾何データを入力する。

(5)幾何データの属性(高さ・物性値)を入力する。

(6)送信点の位置を入力する。

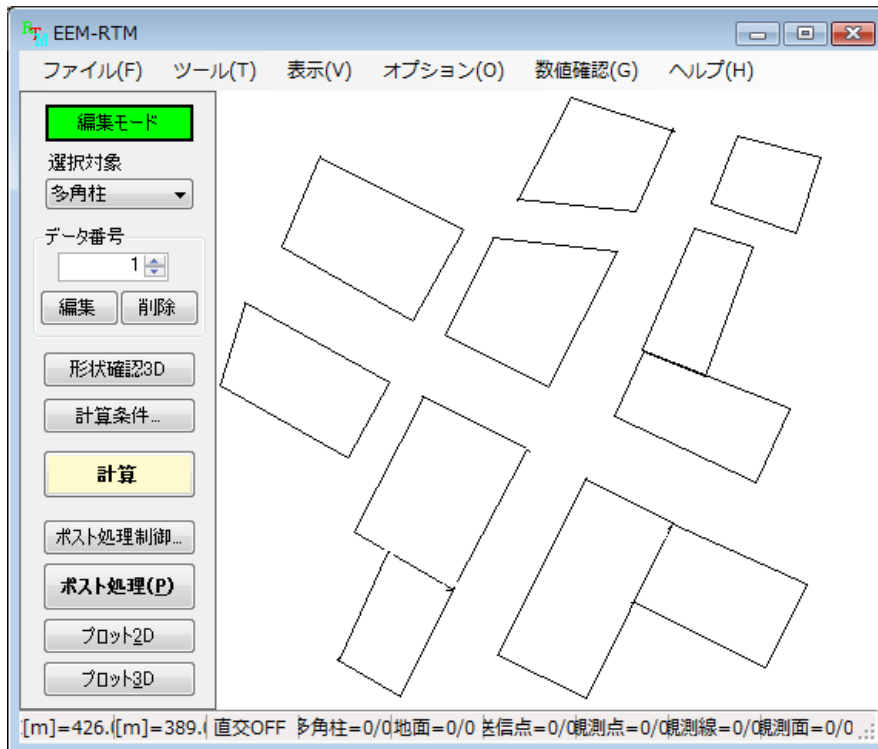
(7)送信点の属性(高さ、送信アンテナ特性)を入力する。

(8)観測点・線・面の位置を入力する。

(9)観測点・線・面の属性(高さ、受信アンテナ特性)を入力する。

## (1)背景図

[ファイル]→[図形読み込み]メニューにより背景図を読み込む。  
図形ファイルはgifまたはjpegファイルであれば何でもよい。



背景図を読み込んだ状態



背景図を用いずに基準線と  
補助線のみを用いるとき

## (2)基準線設定(必須)

[ツール]→[基準線設定]メニューで基準線を設定する。  
これにより画面上の座標が実座標に変換される。

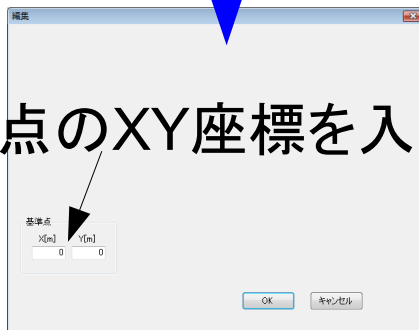


適当な1点をクリックする

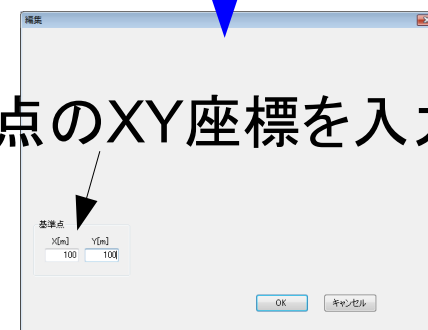


第2点をクリックする

その点のXY座標を入力する



その点のXY座標を入力する



この数値が実座標に変わる

### (3)物性値編集

[ツール]→[物性値編集]メニューで使用する材質を登録する。

物性値編集

OK キャンセル 注 周波数 = 1 [GHz]

No.	名称	入力方法	比誘電率	導電率[S/m]	厚さ[m]	反射透過ファイル	plot
2	<input checked="" type="checkbox"/> 地面	数値入力、厚さなし	10	0.2	0	->	plot
3	<input checked="" type="checkbox"/> 建物の壁	数値入力、厚さあり	5	0.1	0.05	->	plot
4	<input checked="" type="checkbox"/>	反射透過ファイル	1	0	0	-> sample1.txt	plot
5	<input checked="" type="checkbox"/>	多層壁&ファイル	2 3	0.1 0.2	0.03 0.04	-> test.txt	plot
6	<input type="checkbox"/>	数値入力、厚さなし	1	0	0	->	plot
7	<input type="checkbox"/>	数値入力、厚さなし	1	0	0	->	plot
8	<input type="checkbox"/>	数値入力、厚さなし	1	0	0	->	plot
9	<input type="checkbox"/>	数値入力、厚さなし	1	0	0	->	plot
10	<input type="checkbox"/>	数値入力、厚さなし	1	0	0	->	plot
11	<input type="checkbox"/>	数値入力、厚さなし	1	0	0	->	plot

0[dB] 反射係数の入射角特性 TE(S) TM(P)

0[dB] 透過係数の入射角特性 TE(S) TM(P)

物性値の入力方法は以下の4通りから選択する

1) 数値入力、厚さなし

比誘電率と導電率を入力する。  
この壁は透過波を考えない。

2) 数値入力、厚さあり

比誘電率、導電率、厚さを入力する。  
この壁は透過波を考える。

3) 反射透過ファイル

ユーザーが作成した反射・透過係数の入射角特性ファイルを用いる

4) 多層壁&ファイル

2層以上からなる壁の反射・透過係数を使用する

右の[plot]をクリックすると、その行の材質の反射・透過係数の入射角特性が下にプロットされる。

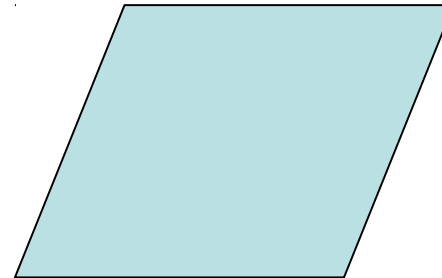
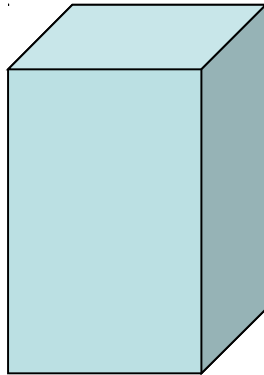


## (4)幾何データ入力

物体は平面の集合で定義する

個々のデータは多角柱または平面(=地面、四角形)である

物性値は個々のデータごとに指定することが可能



### 多角柱:

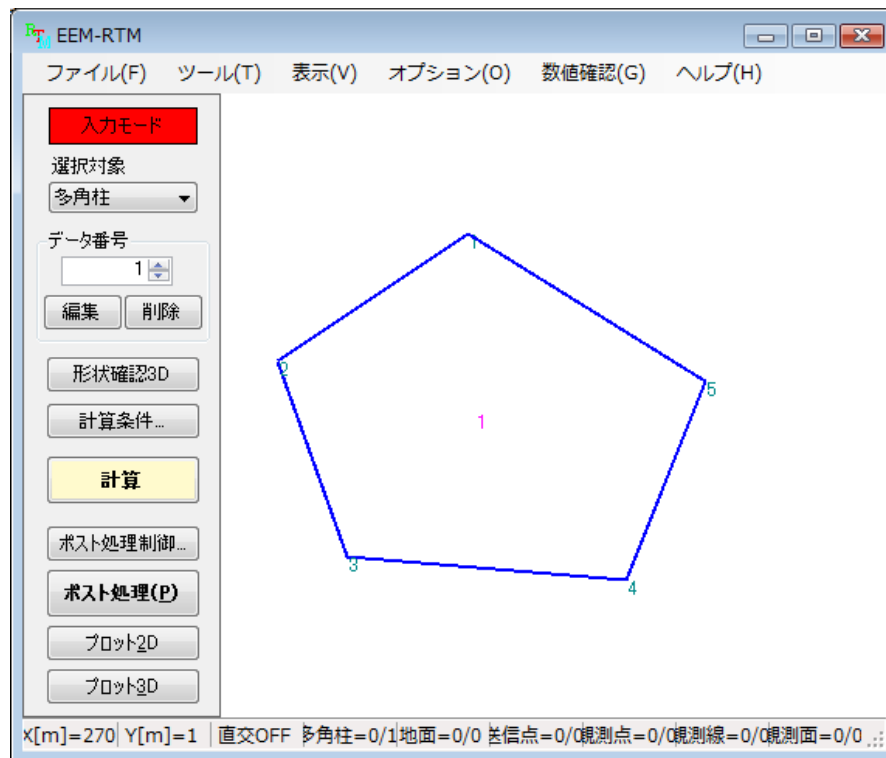
- ・各頂点のXY座標と高さを入力する
- ・屋外モデル: 建物
- ・屋内モデル: 壁、柱

### 平面:

- ・4頂点のXYZ座標を入力する
- ・屋外モデル: 地面(傾斜可)
- ・屋内モデル: 床、天井

現在のモードを選択する

- ・編集モード: 入力したデータを編集するとき
- ・入力モード: 画面をクリックして座標データを入力するとき

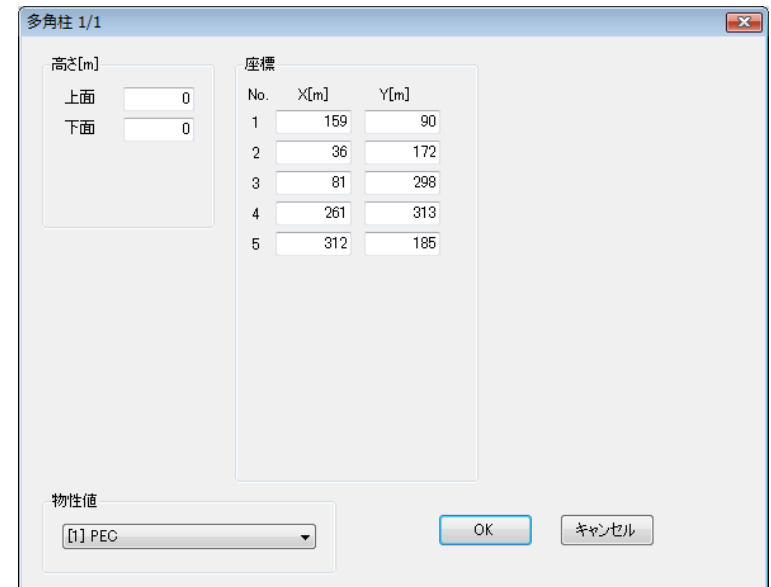
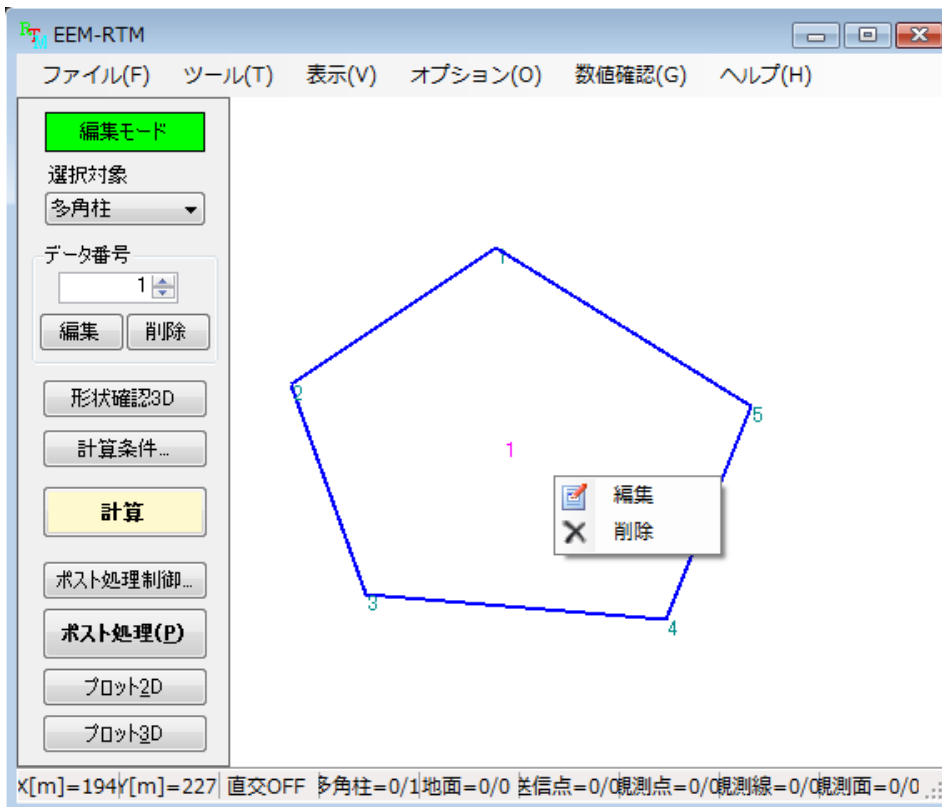


座標データ入力方法:

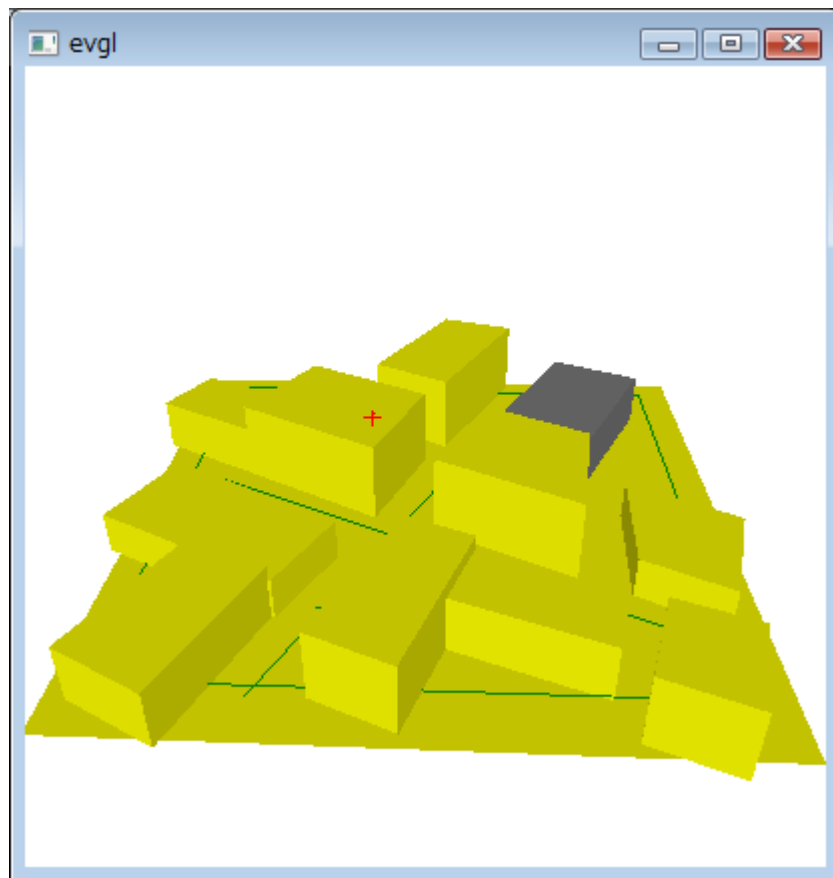
- ・[入力モード]にする
- ・[選択対象]を[多角柱]または[地面]とする
- ・頂点を順に左クリックする
- ・多角柱では任意のN角形の入力が可能(最後の頂点を右クリックする)

## (5)幾何データの属性の入力

- ・[編集モード]にする([入力モード]のままでも可能だが操作ミスを減らすため)
- ・編集対象の内部を右クリックし[編集]をクリックするか、[データ番号]を指定して[編集]をクリックする
- ・編集ウィンドウで[高さ]と[物性値]を入力する
- ・必要なら[座標]を修正する
- ・以上で3次元座標と物性値が定義され、計算に必要なデータがそろふ



データ入力中は時々[形状確認3D]をクリックしてデータを確認する

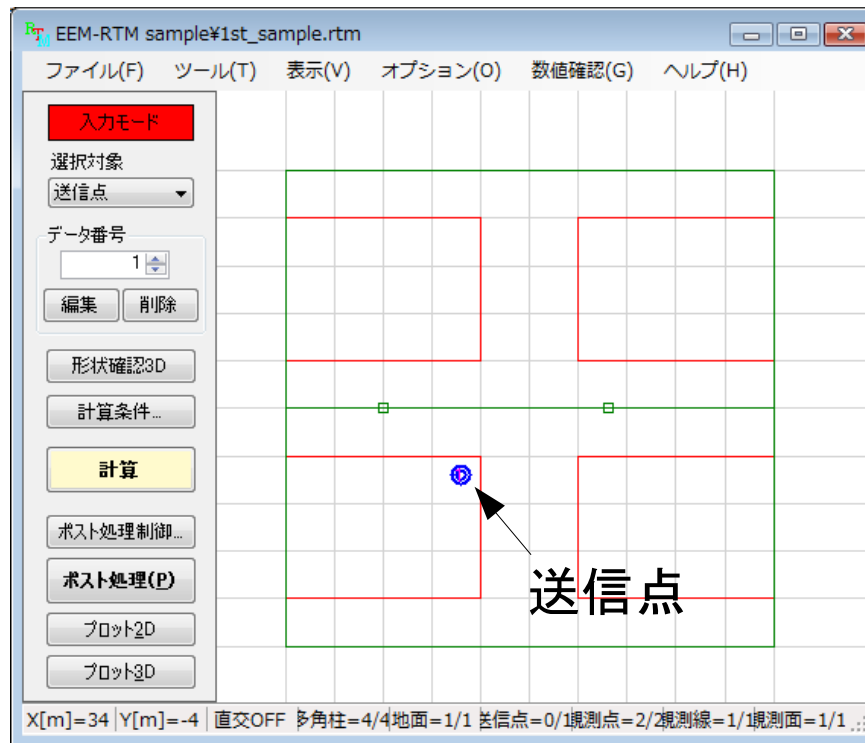


- ・多角柱・地面は材質によって色が異なる
- ・送信点: 赤
- ・観測点・線・面: 緑
  
- ・マウสดラッグで回転
- ・キーボードZ/Shift-Zで拡大/縮小

形状確認3D図

## (6)送信点入力

- ・[入力モード]にする
- ・[選択対象]を[送信点]にする
- ・送信点位置を左クリックする→◎印が表示される



## (7)送信点の属性の入力

- ・[編集モード]にする
- ・編集対象の内部を右クリックし[編集]をクリックするか、[データ番号]を指定して[編集]をクリックする
- ・編集ウィンドウで[高さ]と[送信アンテナ]を入力する
- ・必要なら[座標]を修正する
- ・属性が定義されると送信点が◎になる

送信点 1/1

高さ[m]

座標 X[m] Y[m]

送信アンテナ  
指向性

偏波方向

送信電力[W]   
位相[度]

プロット

OK キャンセル

# アンテナデータの入力法

## ● 指向性

以下の4通りから選択する。[プロット]で3D表示を確認する。

1) 無指向性

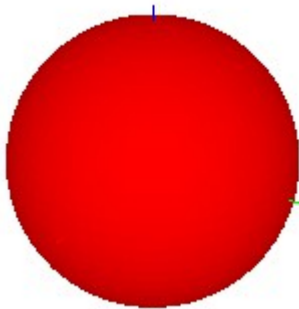
2) ダイポール

3) ビーム

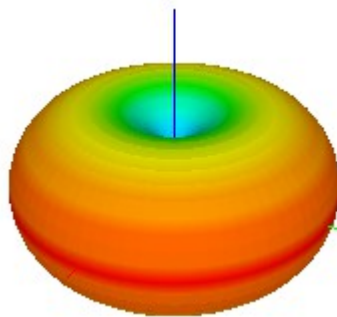
4) ファイル: ユーザーが作成した全方向指向性ファイルを使用する

## ● 偏波方向

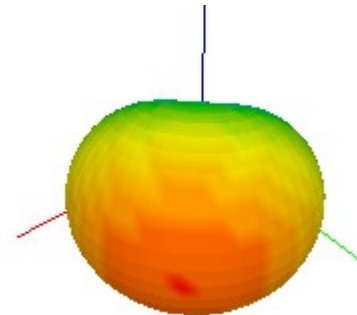
[垂直偏波],[水平偏波],[右旋円偏波],[左旋円偏波]から選択する



無指向性



ダイポール



ビーム

## (8)観測点・線・面の入力

- ・[入力モード]にする
- ・[選択対象]を[観測点]、[観測線]、[観測面]にする
- ・マウスをクリックして座標を入力する

### ○観測点

- ・1点を入力する
- ・指定した点の詳細な特性を計算することに使用する  
(遅延プロファイル、伝搬経路3D図)

### ○観測線

- ・始点と終点を入力する
- ・線分に沿った電界分布を計算することに使用する

### ○観測面

- ・4頂点を入力する
- ・広い領域の電界分布とその統計を計算することに使用する



# (9)観測点・線・面の属性入力

観測点



観測線



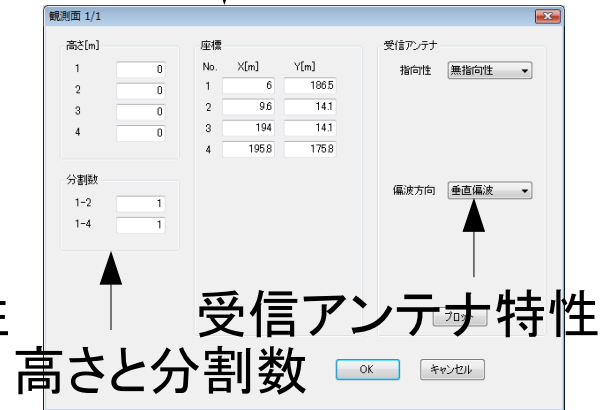
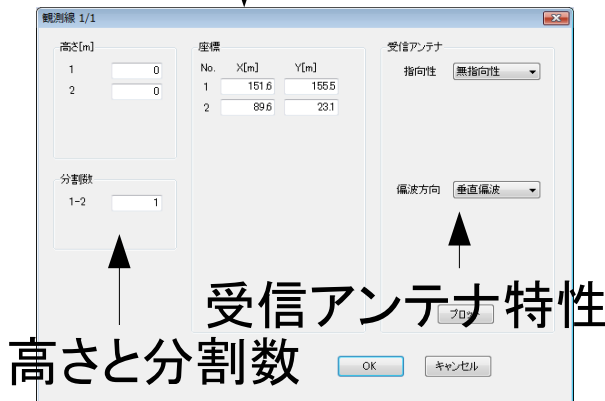
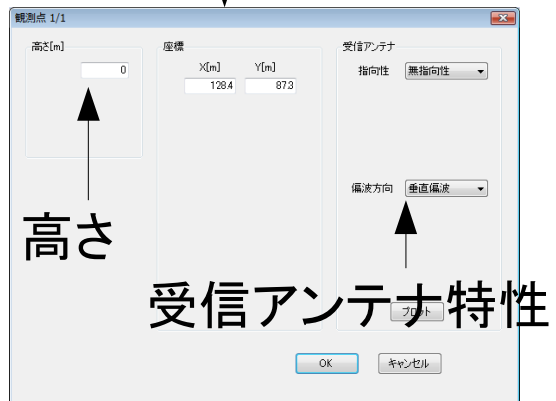
観測面



編集

編集

編集



# 3. 計算

計算を行う前に、[計算条件]を設定する。  
詳しくは[注]を参考のこと。

計算条件

計算条件

最大反射回数 3 注

緯度方向分割数 90 注

透過波を計算する 注

レイ放射方向を絞る 注

伝搬経路別データをpath.logに数値出力する 注

回折波

なし 注

回折、回折+回折

回折、回折+回折、反射+回折、回折+反射

回折波を近似計算する 注

タイトル test

周波数[GHz] 1

減衰定数[dB/m] 0 注

伝搬経路最大数 30 注

OK キャンセル

# 計算条件

## ○最大反射回数

- ・計算時間は反射回数に比例する
- ・屋外では2-4回程度、屋内では5-10回程度が標準的

## ○緯度方向分割数

- ・180度をこの数値で割ったものが初期レイの間隔になる
- ・90-360が標準的
- ・計算時間はこの数値の2乗に比例する
- ・必要以上に大きくしても計算時間が増えるだけで計算結果は変わらない
- ・遠くにある小さい面の反射が必須のときは大きい数値にする

## ○透過波

- ・透過波の計算を行うとレイが枝分かれし、計算時間が増える
- ・屋外では不要、屋内では発生する

## ○回折波

- ・回折波の計算を行うと計算時間が増える
- ・屋外・屋内の両方で発生する

# 計算経過出力sol.log

```
<<< EEM-RTM Ver.2.1 >>>
CPU : threads          = 2
Title                  : テスト
Max reflection times  = 1
Diffraction            : YES (D, D+D)
Transmission          : NO
Beam window           : NO
Log path data         : YES
Frequency [GHz]       = 1.000
No. of Rx's (0D+1D+2D) = 2 + 101 + 10000 = 10103
No. of Tx's           = 1
No. of planes         = 25
No. of ray segments  = 14308
Memory size [MB]     = 24
Max paths to a point = 4 (10)
Sum, Average of path  = 13412 1.328
Average <E> [dBW]    = -63.519 -63.427
<<< NORMAL END >>>
=== time [sec] ===
part-1 :      0.015
part-2 :      0.843
part-3 :      0.327
-----
total  :      1.185
```

## 計算時間の評価式

$$\text{計算時間} \propto L^2 \times N \times M \times K$$

(L:緯度方向分割数、N:面の数、M:最大反射回数、K:観測点の数)

(注)回折波を計算するときは計算時間が余分にかかる

### 並列計算

計算時間の短縮にはマルチコアを用いた並列計算が有効  
(レイトレーシング法は並列計算向きのアルゴリズムである)

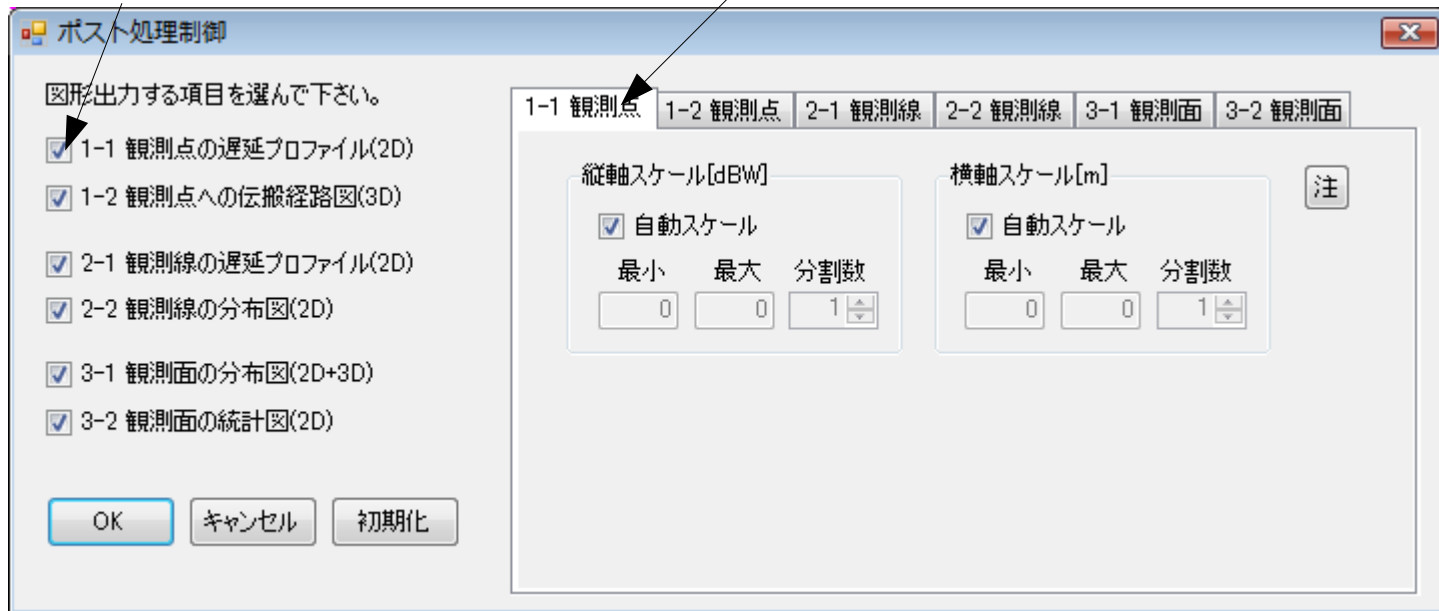
計算時間の1例(L=180, N=1591, M=3, K=100000)

コア数	計算時間(速度比)
1	109.5秒(1.0)
2	59.8秒(1.8)
4	34.1秒(3.2)
6	23.6秒(4.6)

# 4. ポスト処理

計算結果を図形表示することをポスト処理とよぶ。  
[ポスト処理制御]で各種の設定を行ってから、[ポスト処理]→[図形表示]を行う。

図形表示する項目をONにする      各タブの設定を行う

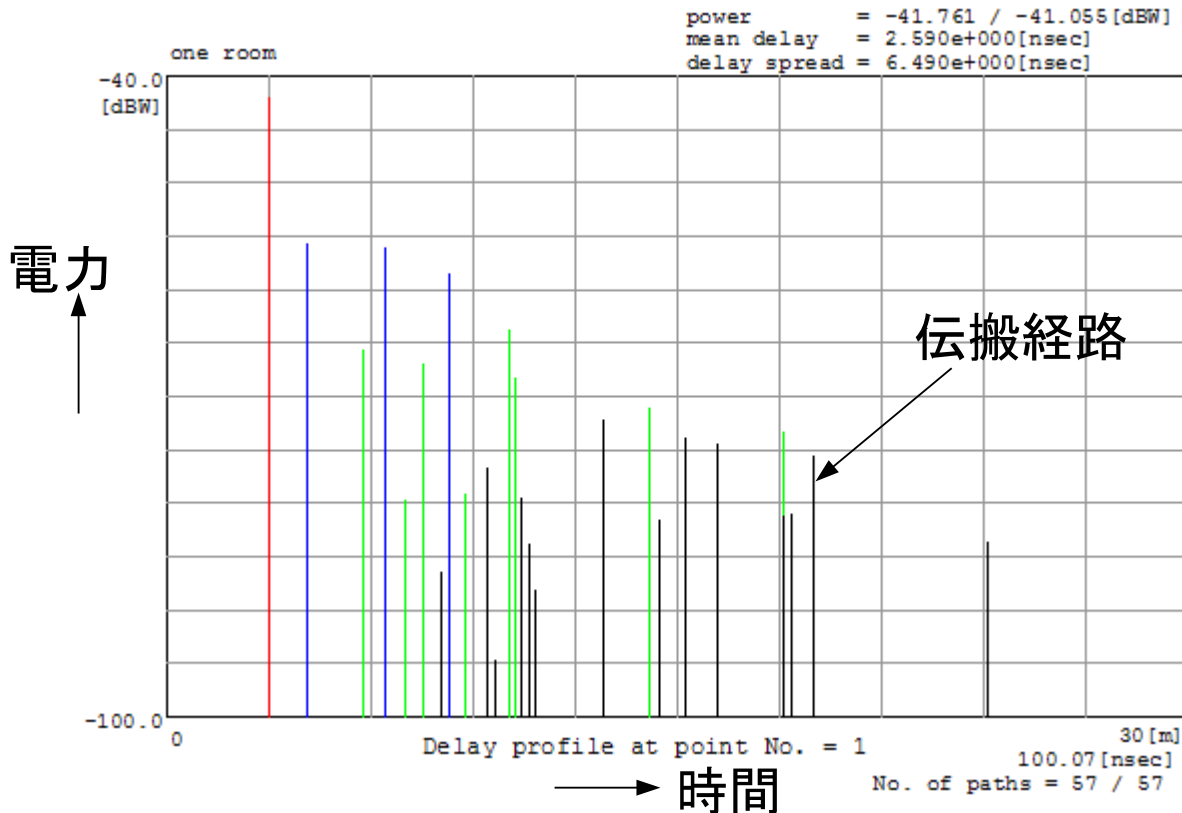


※計算結果はすべてテキストファイルにも出力されるのでユーザーが独自処理することも可能

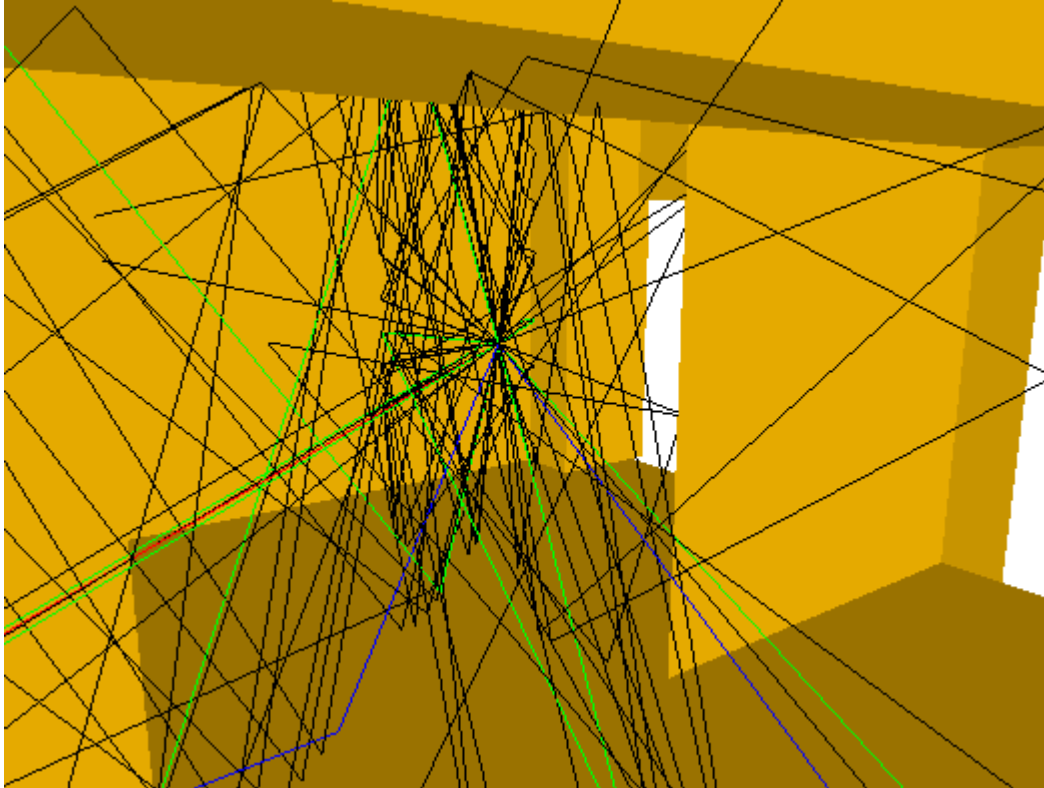
## (1-1)観測点の遅延プロファイル

観測点で横軸を時間、縦軸を受信電力としてプロットした図

- ・伝搬経路の数だけの棒がプロットされる
- ・赤: 直接波、青: 1回反射波、緑: 2回反射波、黒: 3回以上
- ・右上に合成電力、平均遅延、遅延スプレッドが表示される



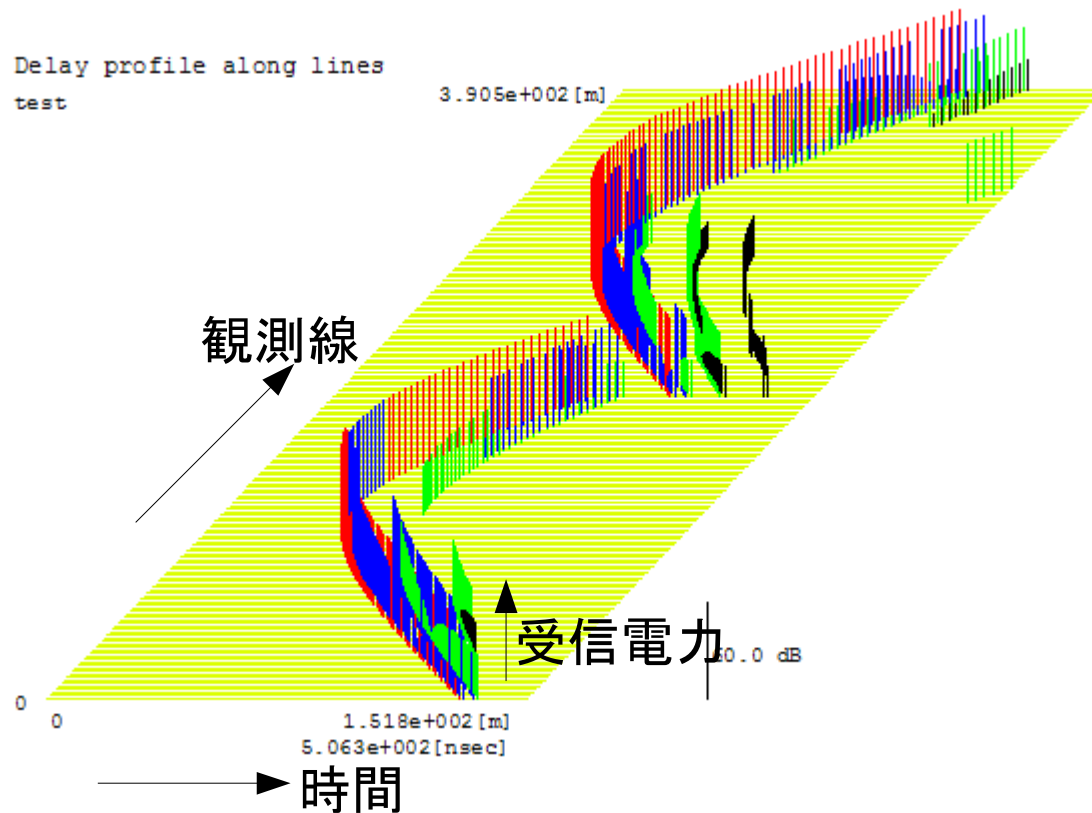
## (1-2)観測点への伝搬経路図(3D)





## (2-1)観測線の遅延プロファイル

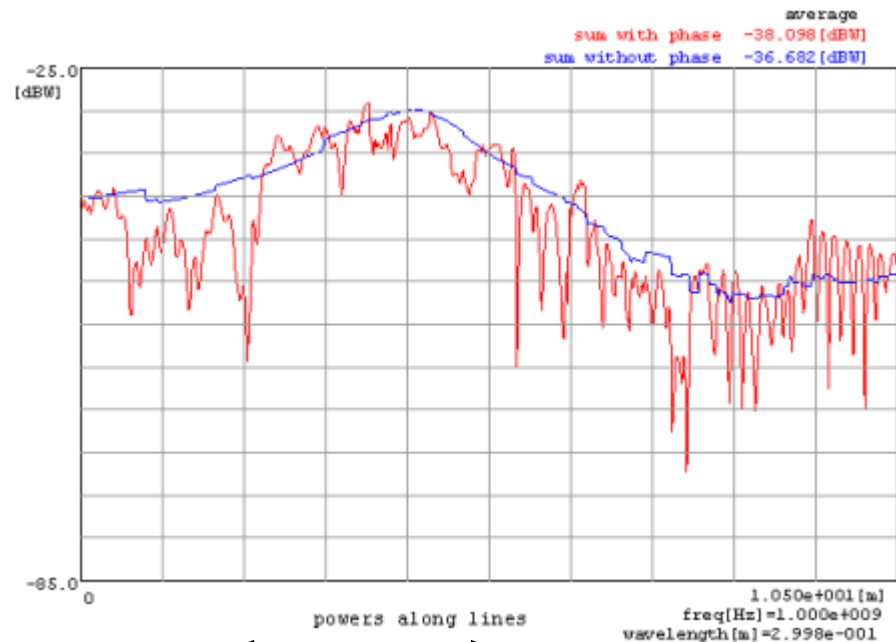
観測線に沿った遅延プロファイルを1枚の図にプロットしたもの



## (2-2)観測線の分布図

### 受信電力

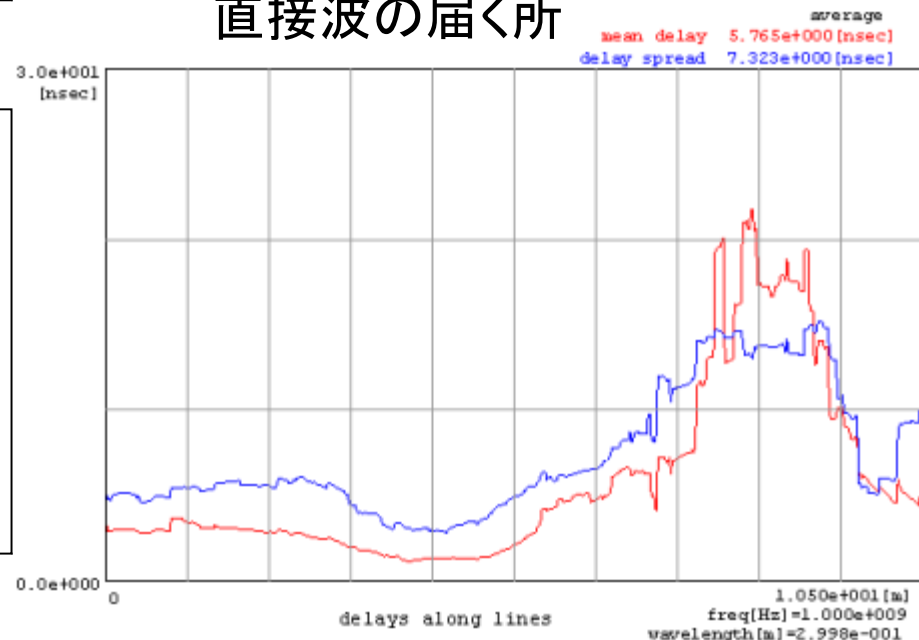
- ・赤/青: 各伝搬経路の位相差を考慮した/しない合成電力
- ・直接波の届く所は電力が大きく、直接波の届かない所は電力が小さい



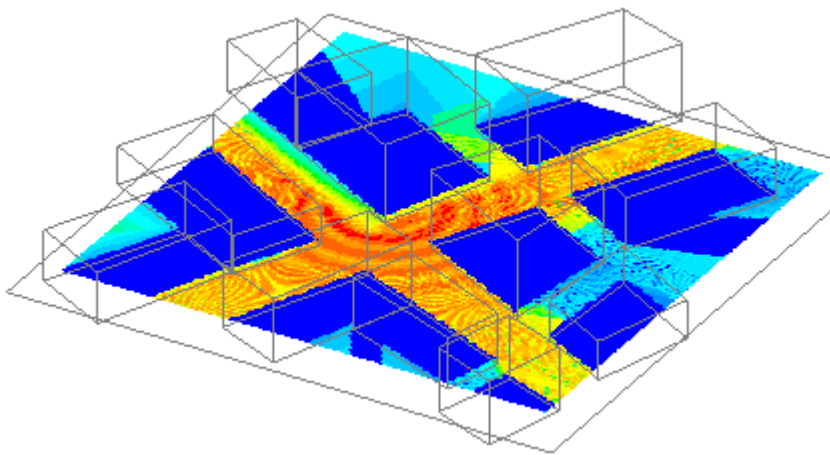
直接波の届く所

### 平均遅延と遅延スプレッド

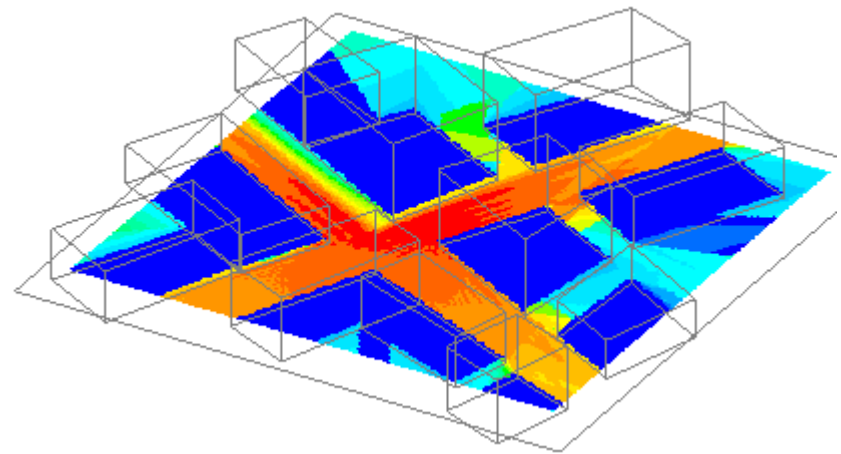
- ・平均遅延と遅延スプレッドの分布は似ている
- ・直接波の届く所は値が小さく、直接波の届かない所は値が大きい



### (3-1)観測面の分布図

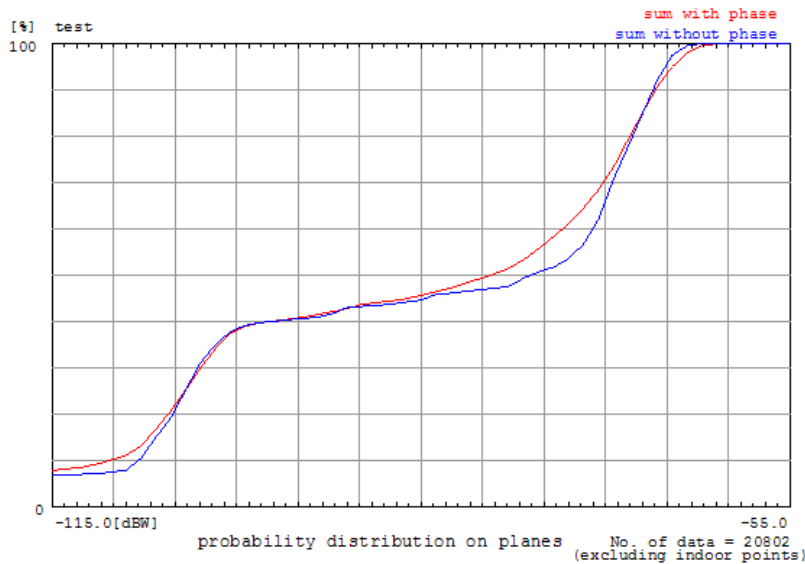


位相差を考慮した電力分布図  
場所による変動が大きい

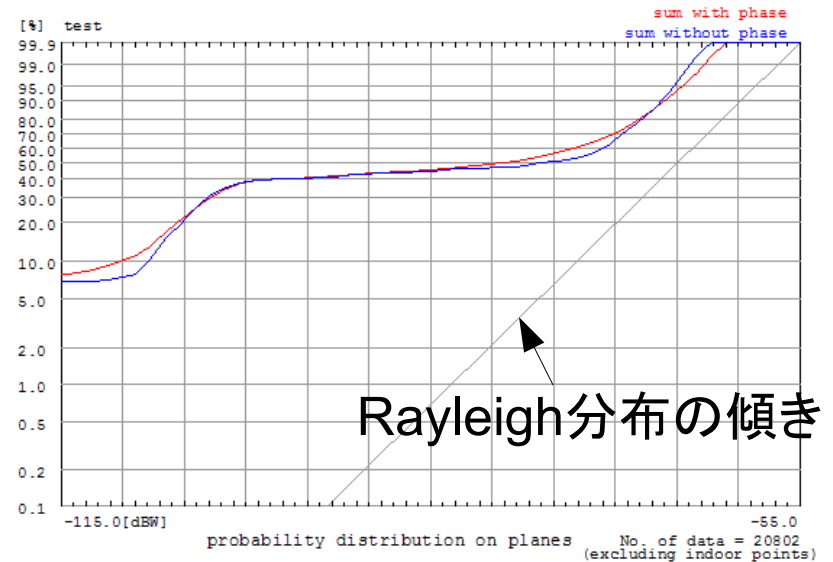


位相差を考慮しない電力分布図  
場所による変動が小さい

## (3-2)観測面の統計図

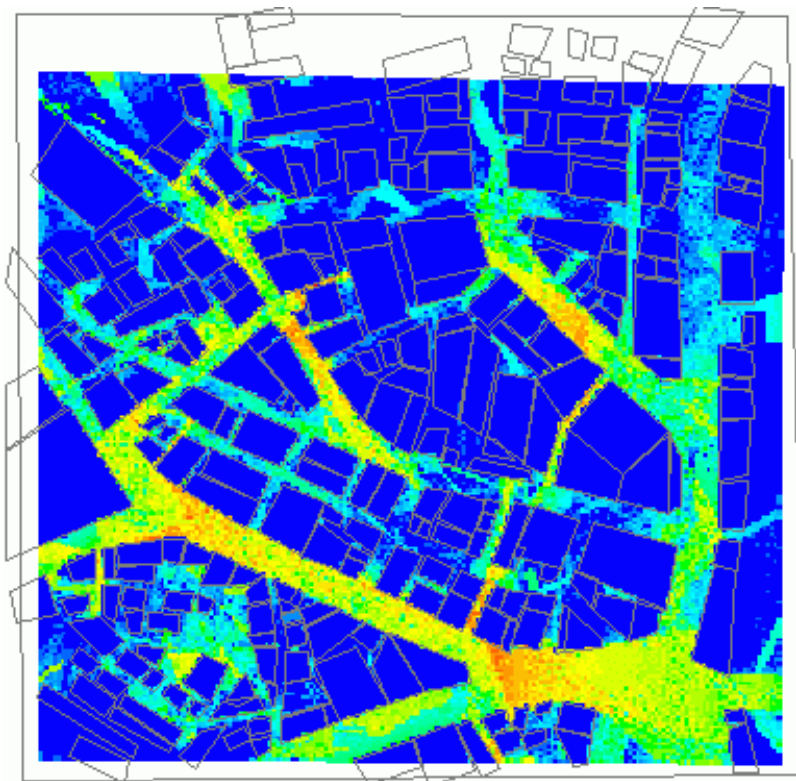


受信電力の累積確率分布図  
横軸: 受信電力  
縦軸: 受信電力がそれ以下である  
観測点の割合



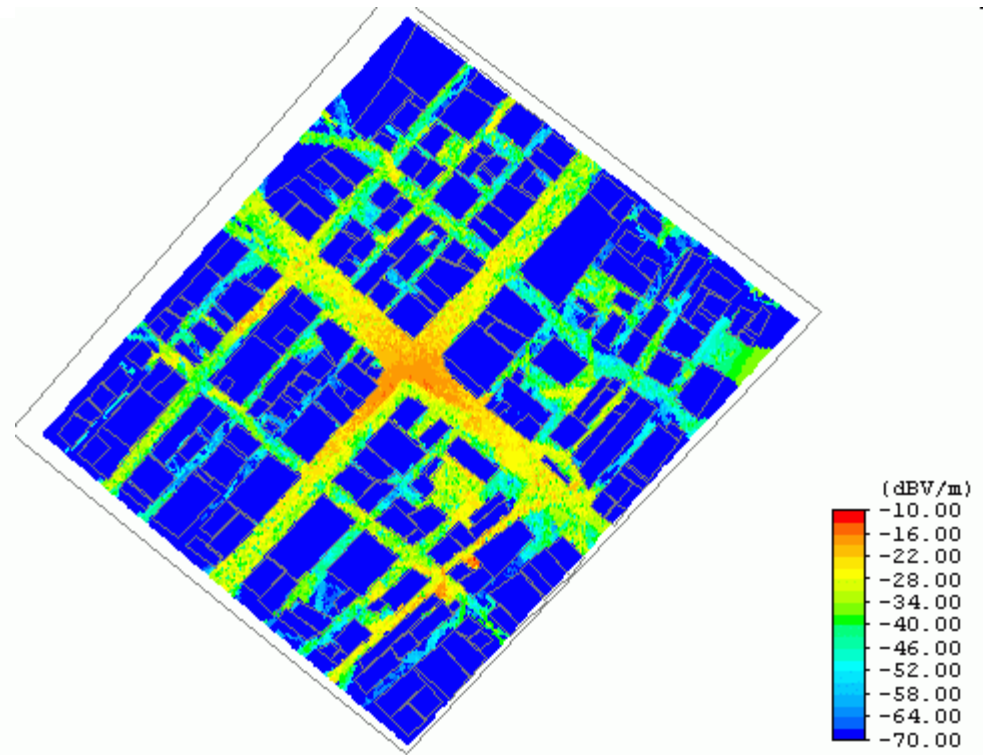
同左(Rayleigh確率紙にプロットしたもの)

# 5. 計算例

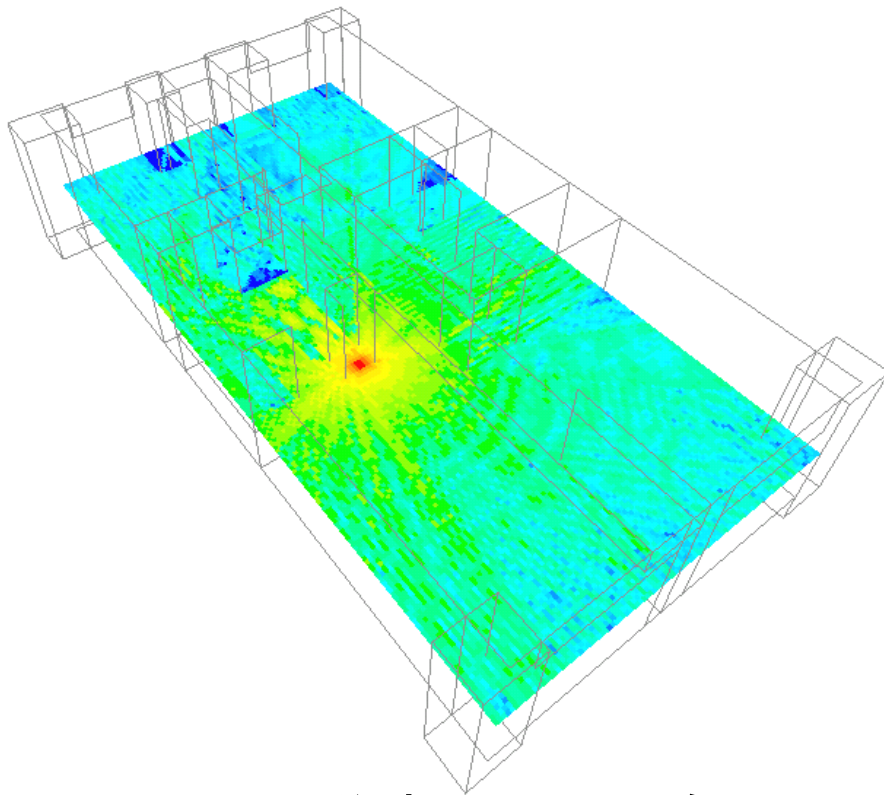


市街地の電界分布

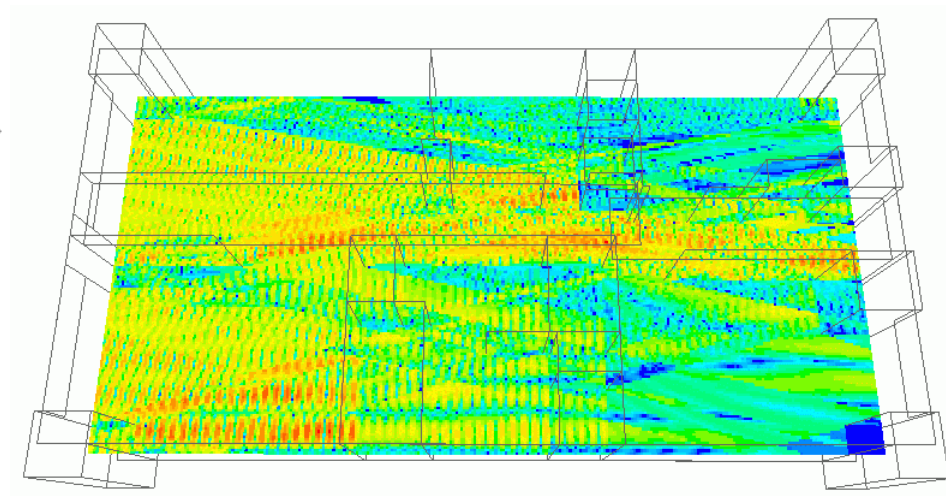
500mX500m、1GHz



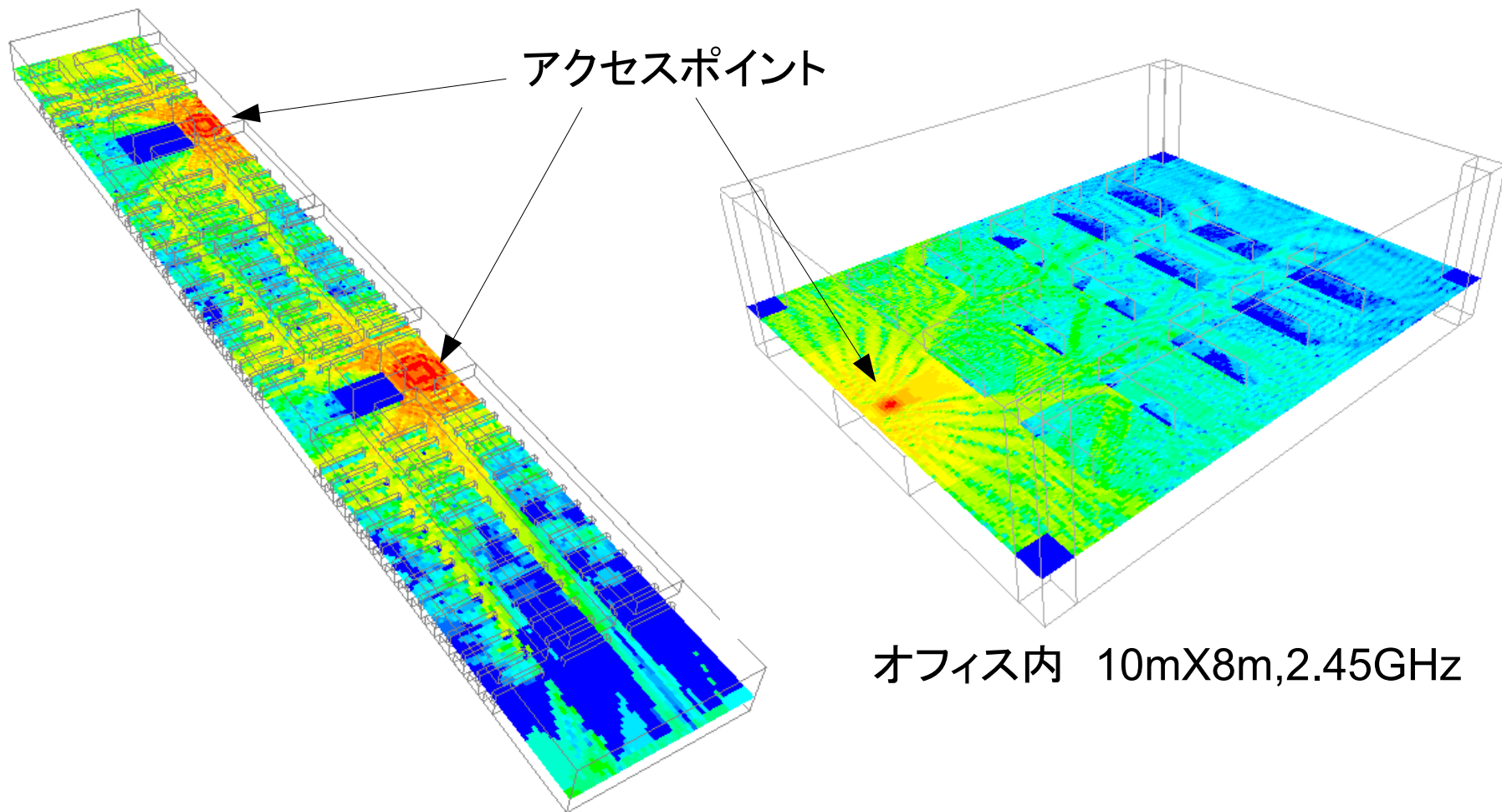
市街地の電界分布



屋内(住宅)の電界分布  
11mX5.5m、1GHz

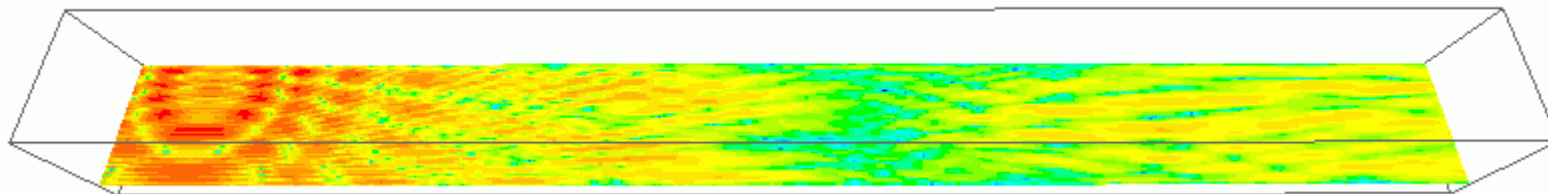


同左、外部波源

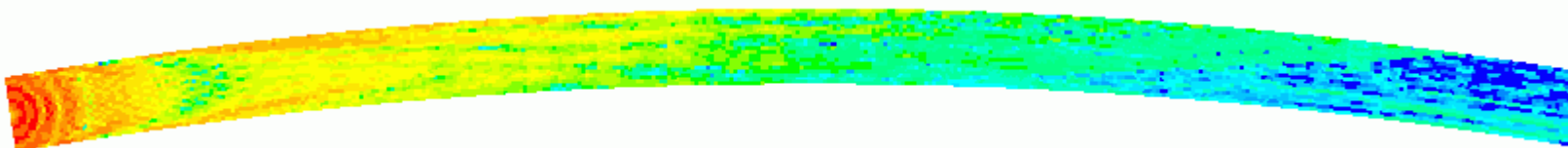


オフィス内 10mX8m,2.45GHz

航空機内 B777-200,2.5GHz  
データ作成ライブラリ使用



トンネル内 50mX5mX5m,1GHz



曲がったトンネル内  
データ作成ライブラリ使用



## 6. 電子地図

市街地の電子データをとりこむことが可能

電子データの販売元:

- ・朝日航洋株式会社(建物形状、標高)
- ・株式会社ゼンリン(建物形状)

地面の標高は国土地理院の50mメッシュが安価に入手でき、EEM-RTMデータに変換可能

詳細はEEM-RTMのホームページ参考

# 7. データ作成ライブラリ

○データ作成ライブラリとは？

- ・データをウインドウ上で入力するのではなく、データを作成するプログラムを作成するためのツール
- ・EEMホームページに公開されているフリーソフト

○必要な知識は？

- ・CまたはJavaの初歩的なプログラミング知識(for文やif文程度)が必要

○どのようなときに使うのか？

- ・データ量が多く、規則的なとき
- ・何らかの電子データがあり、それを利用するとき
- ・パラメータを変えて多数回計算するとき

```

#include "rtm_datalib.h"
int main(void)
{
    double xp[4], yp[4], zp[4];

    // ==== initialize ====

    rtm_init();                初期化

    // ==== data ====

    // (2) title
    rtm_title("sample");      タイトル

    // (3) frequency
    rtm_freq(2e9);           周波数

    // (4) material
    rtm_material(3.0, 0.2, 0); 物性値1
    rtm_material(5.0, 0.1, 0.03); 物性値2

    // (5/6) geometry

    rtm_pillar_rect(+10, +10, +50, +30, 0, 10, 2); 以下、建物
    rtm_pillar_rect(+10, -10, +50, -30, 0, 15, 2);
    rtm_pillar_rect(-10, +10, -50, +30, 0, 20, 2);
    rtm_pillar_rect(-10, -10, -50, -30, 0, 25, 2);

    rtm_plane_rect(-50, -30, +50, +30, 0, 3);      地面

    // (8) TX

    rtm_antenna_dipole(0, 0, 90, 1);              アンテナ
    rtm_tx(12, 12, 15, 1, 0);                     送信点

```

```

// (9) Rx0

rtm_antenna_iso(1);
rtm_rx0(-20, 0, 1.5);

// (10) Rx1

xp[0] = -30; xp[1] = 30;
yp[0] = 0; yp[1] = 0;
zp[0] = 1.5; zp[1] = 1.5;
rtm_rx1(xp, yp, zp, 60);

// (11) Rx2

xp[0] = -30; xp[1] = -30; xp[2] = +30; xp[3] = +30;
yp[0] = -5; yp[1] = +5; yp[2] = +5; yp[3] = -5;
zp[0] = 1.5; zp[1] = 1.5; zp[2] = 1.5; zp[3] = 1.5;
rtm_rx2(xp, yp, zp, 10, 60);

// (12) solver

rtm_solver(2, 90, 1, 0, 0, 0, 1, 0.0, 10);

// (13) misc

rtm_misc(500, 20);

rtm_outdat("sample.rtm");

return 0;
}

```

アンテナ  
観測点

観測線

観測面

計算条件

ウィンドウサイズ

出力ファイル

EEM-RTMドキュメント(理論説明書、取扱説明書)

<http://www.e-em.co.jp/document.htm>

EEM-RTMホームページ(詳細な技術情報)

[http://www.e-em.co.jp/rtm/eem\\_rtm.htm](http://www.e-em.co.jp/rtm/eem_rtm.htm)