

AP研究会 2022年2月  
URSI-F特別講演

# 移動伝搬の基礎的な 伝搬損失モデルの検討

2022年2月17日

市坪 信一

# 目次

## <基本伝搬モデル>

1. 自由空間損失
2. 平面大地反射モデル
3. 多重スクリーン回折モデル
4. ビル屋上伝搬

- ・基本的な伝搬モデルの深掘りと言うほどではなく、私がこれまで理解していなかったことや勘違いしていたこと、また新しく分かったことを説明する。
- ・基本的な3つのモデルを取り上げる。
- ・「ビル屋上伝搬」は基本モデルでなく、今回検討した内容である。

## <物理光学近似による数値計算>

5. 物理光学近似の計算方法
6. 多重スクリーンでの計算

- ・基本的なモデルの1つである多重スクリーン回折モデルを以前から数値シミュレーションで求めてみたいと思っており、今回検討したので、紹介したいと思います。

# 目次

## <基本伝搬モデル>

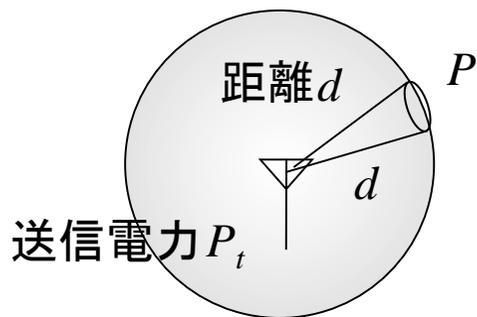
1. 自由空間損失
2. 平面大地反射モデル
3. 多重スクリーン回折モデル
4. ビル屋上伝搬

## <物理光学近似による数値計算>

5. 物理光学近似の計算方法
6. 多重スクリーンでの計算

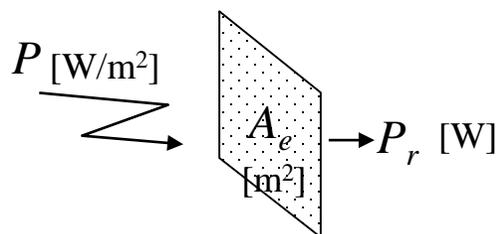
# 自由空間損失モデル

- ・自由空間損失: 自由空間で生じる伝搬損失のこと。
- ・この損失の式は次のように説明される。



電力密度  $P$

$$P = \frac{P_t}{4\pi d^2} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

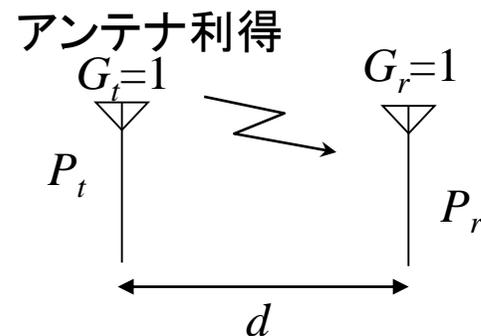


受信アンテナの実効面積  $A_e$

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \text{ [m}^2\text{]} \quad G_r=1$$

受信電力  $P_r$

$$P_r = P A_e = \frac{P_t \lambda^2}{4\pi d^2 4\pi} \text{ [W]}$$



自由空間損失

$$Loss = \frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

$$10\log(Loss) = 20\log \frac{\lambda}{4\pi d} \text{ [dB]}$$

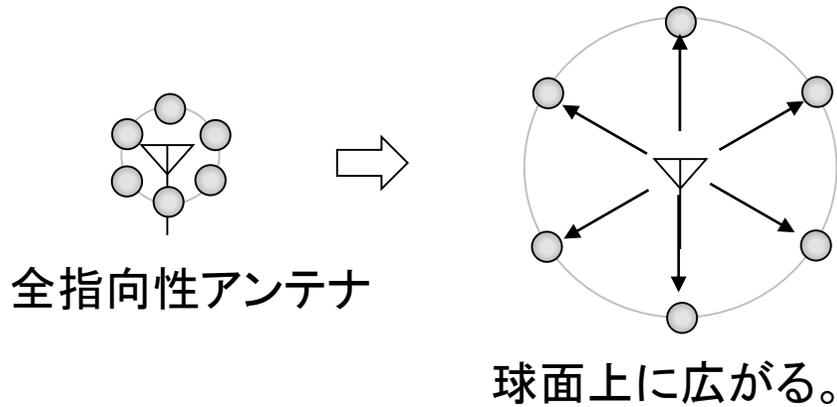
<お話ししたい内容>

- (1) この損失が発生するわけ。
- (2) 自由空間でなくても起きる損失。
- (3) 光通信での損失は。
- (4) 電力密度という考え方。

# 自由空間損失

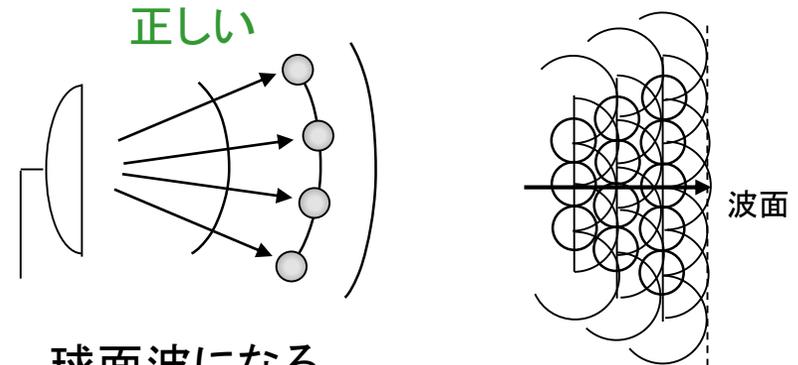
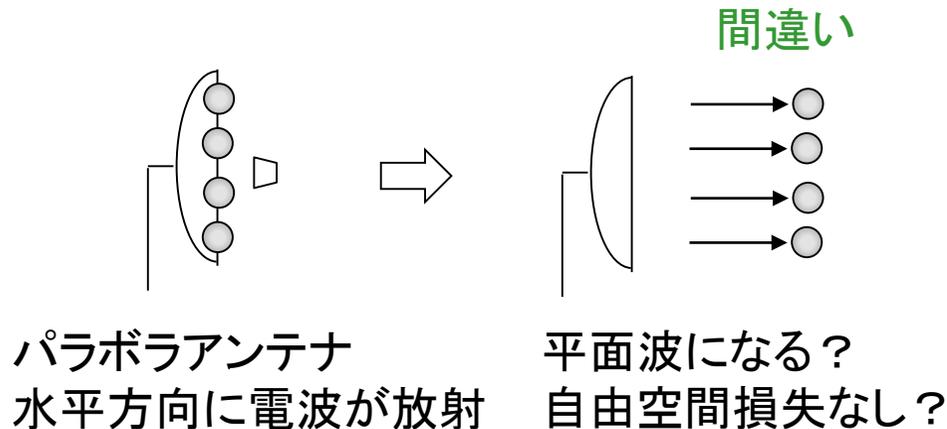
(1)この損失が発生するわけ。 →波面が広がるから。 →波面が広がるとは？

・電波を金属球だと考えると、



・自由空間損失の説明では、この素波の広がりを説明していない。  
・送信に全指向性アンテナを使うから波面が広がると勘違いしやすい。

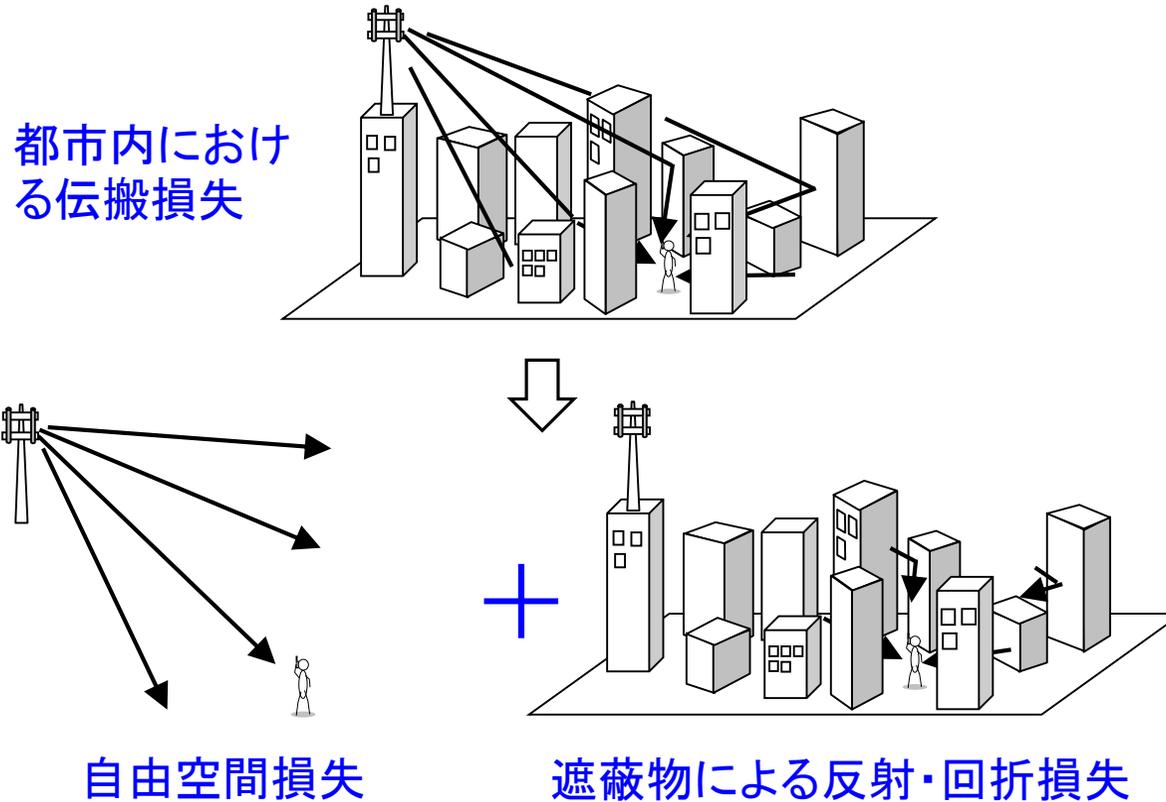
↑  
ホイヘンスの原理によって素波が広がり、で波面が広がる。



# 自由空間損失

(2)自由空間でなくても起きる損失

・波面(素波)の広がりは、どこでも起こるので自由空間でなくても自由空間損失は生じる。



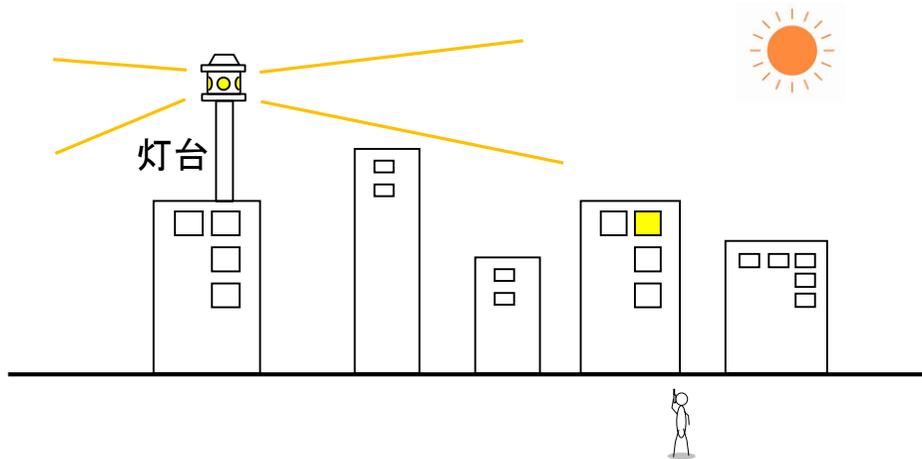
- ・自由空間損失はどんな空間でも起こる現象。
- ・伝搬損失のベースになっているのが自由空間損失。

# 自由空間損失

(3)光通信での損失は。

- ・自由空間損失の式には受信アンテナの実効面積が含まれる。これにより周波数特性が生じる。この実効面積に関わる話。
- ・以前に、移動通信で電波の代わりに光を使えないかを考えた。ビルの上に灯台を。
- ・光通信での自由空間損失は膨大になるか？

<光通信>



- ・自由空間損失の式はアンテナを使うときだけ。

・自由空間損失

$$Loss = \frac{1}{4\pi d^2} A_e = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

波長

- ・光通信にはアンテナの実効面積を適用できない。



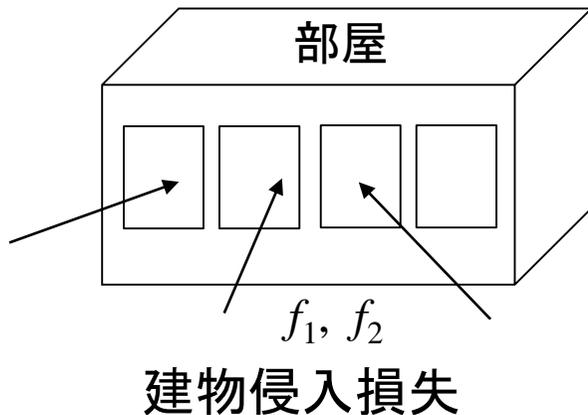
5GHzの  
ダイポール相当

# 自由空間損失

(4) 電力密度という考え方を使う。

- ・多くの伝搬モデルでは電力密度をあまり使わない。  
物理光学近似での微小電界やフレネルゾーンがよく使われる。

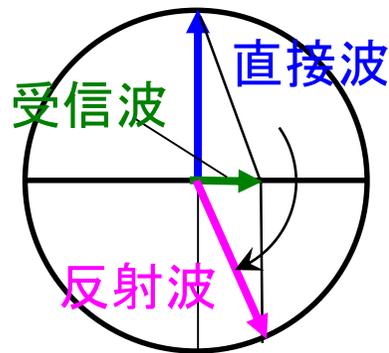
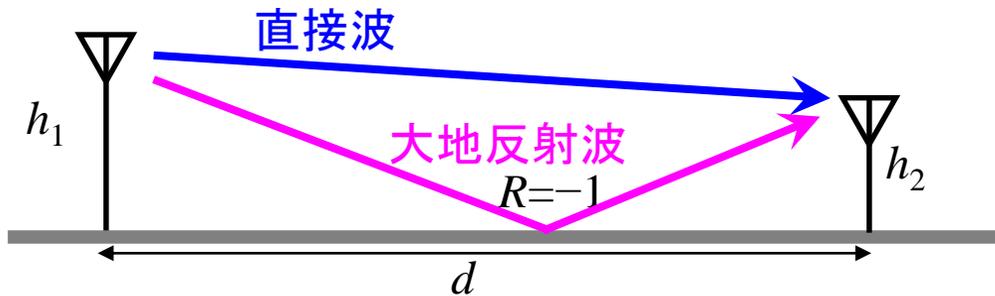
<伝搬損失の周波数特性>



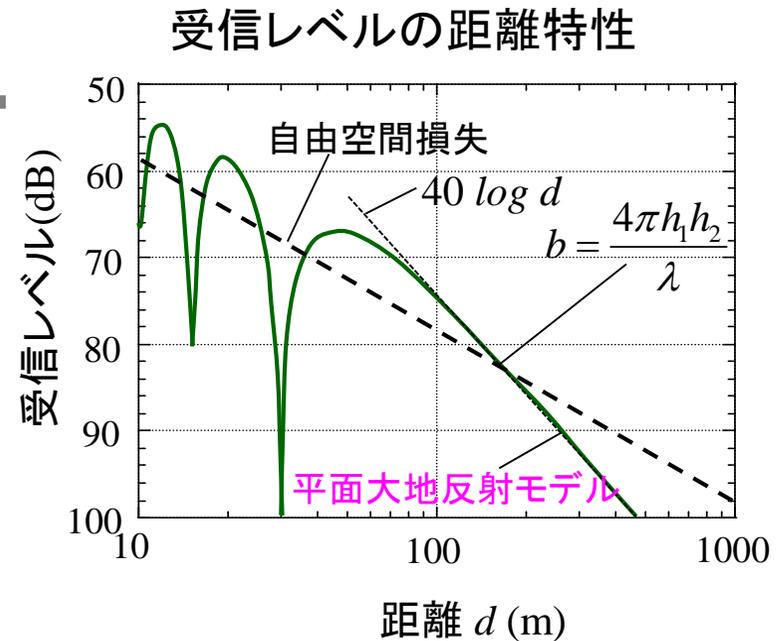
- ・周波数が異なっても「窓の大きさ」や「都市の隙間」は同じ。  
電力密度で考えると、周波数による差はない。

# 平面大地反射モデル

- ・どこにあるのか、フレネルゾーン。
- ・大地上の伝搬損失のモデル
- ・レイ(光線)を使ったモデル。
- ・直接波も反射波も自由空間損失だけで受信点に届く。

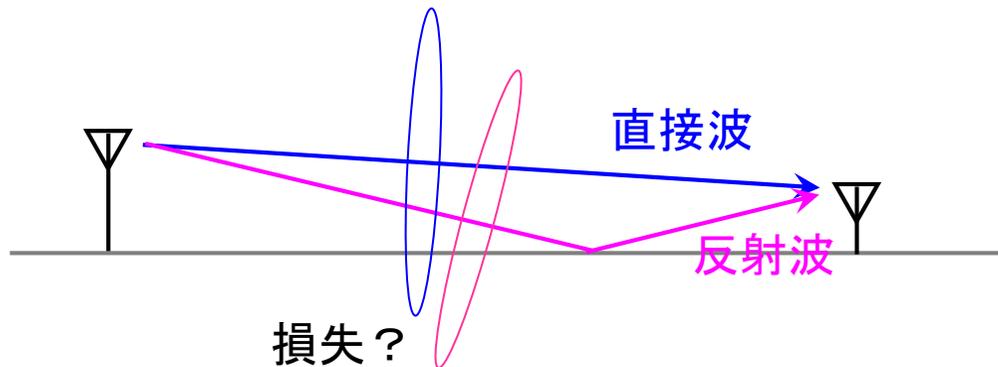


合成した受信レベル



# 平面大地反射モデル

- ・レイでなく波面で考えたときの疑問。
- ・2波のフレネルゾーンを考えると、遠方では大地で遮蔽される。
- ・本当に2波とも自由空間損失以外の損失はないのか。
- ・反射波は大地で完全反射するので損失なしと考えてもいいが、このときにフレネルゾーンをどう考えるか。
- ・2015年ソ大会で発表したけど、うまく説明できなかった。



# 物理光学近似の計算方法

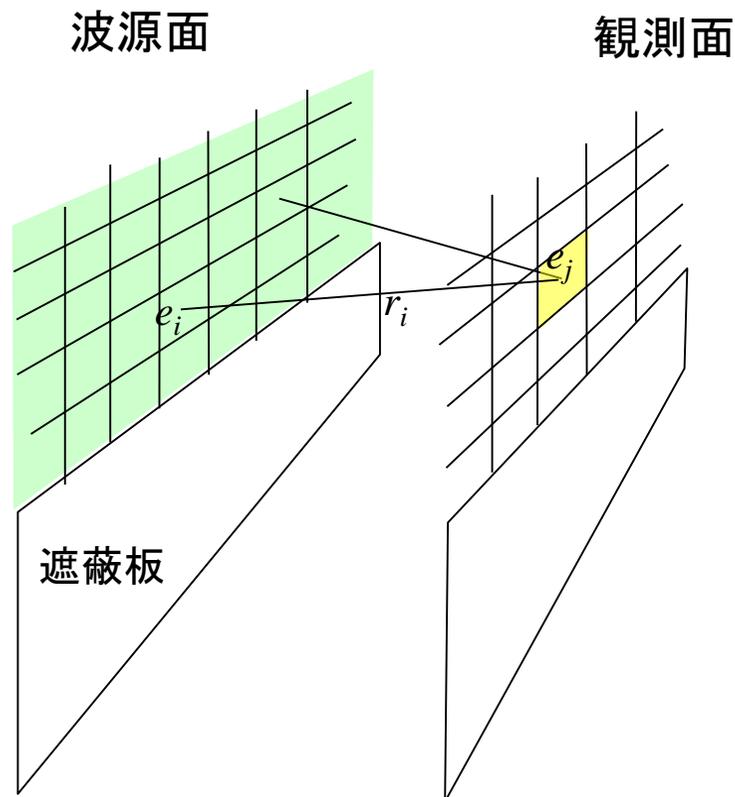
・マクスウェル方程式から導かれるフレネル・キルヒホッフの回折式の数値積分の計算方法のこと。

- ・空間に波源面と観測面を設定して、メッシュに分ける。
- ・波源面の各電界は既知。
- ・観測面の1つのメッシュの電界を求める。
- ・波源面の全ての電界を用いて次式で計算する。

$$e_j = \sum \frac{1}{\lambda} e_i \frac{e^{-jr_i k}}{r_i}$$

$\lambda$        $r_i$   
電界      距離

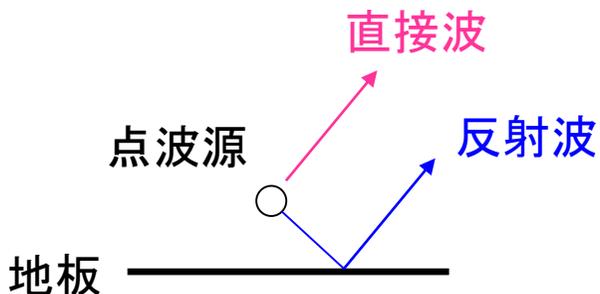
・波源面の電界と距離の伝達関数との掛け算の総和で求められる。



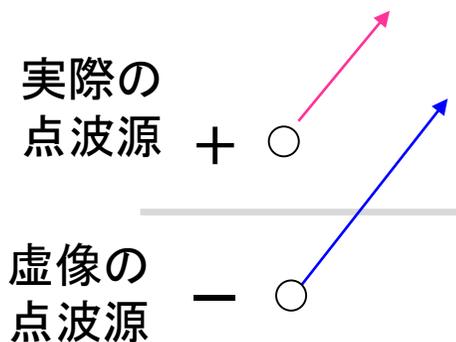
# 平面大地反射モデル

## < 地板付アンテナの指向性パターン >

- ・指向性パターンを求める。
- ・直接波と反射波は自由空間損失で届く。
- ・2波の位相差で指向性パターンを求める。

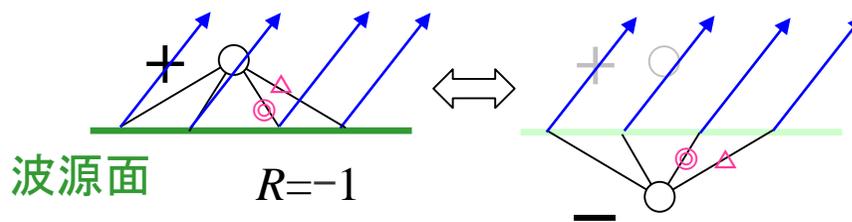


- ・反射波は鏡面の関係を使って求める。
- ・地板を取り除いて、地板を基準にした対称の位置に逆相の点波源を設定して、そこから反射波が放射されると考える。



## < 鏡面の関係 >

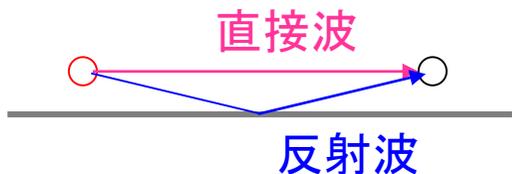
- ・鏡面の関係は物理光学近似の計算方法から説明できる。
- ・2つの点波源から波源面までの距離が同じ。
- ・実際の点波源からの波は地板で反射して逆相になるので、虚像の点波源の位相を逆相にする。
- ・さらに、左から右への変換だけでなく、右から左にも変換できる。



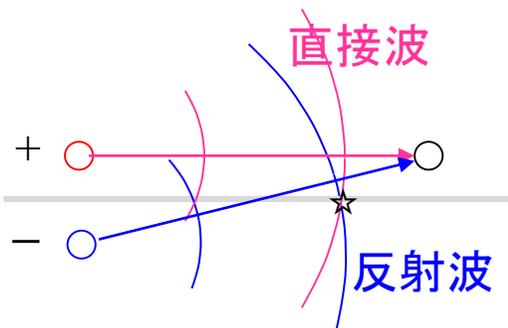
- ・平面大地反射モデルは、この直接波のフレネルゾーンが地板に遮蔽される場合に相当する。

# 平面大地反射モデル

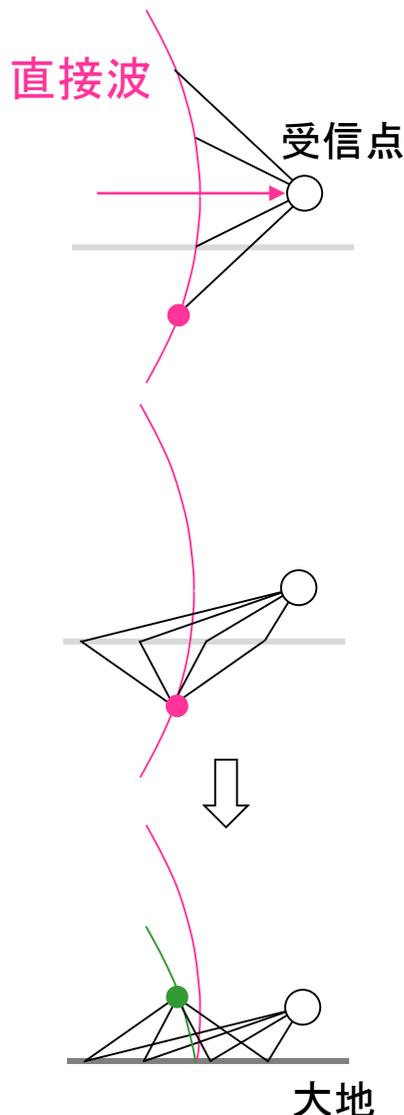
- ・平面大地反射モデルの2波



- ・虚像の送信点から大地反射波を放射。
- ・2波は自由空間損失で届く。
- ・☆印: 2波の波面は大地上で交わる。



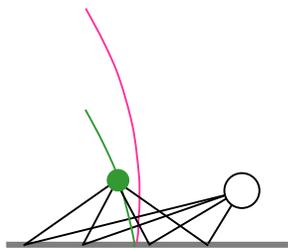
- ・直接波の大地より下の波面を上を持ってくる方法を考える。



- ・直接波の波面が十分にあるので自由空間損失だけで届く。

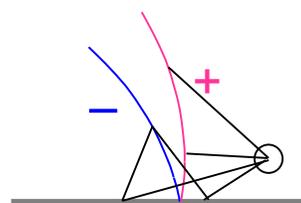
- ・赤丸の微小波源の影響は大地面に波源面を設定して考えてもいい。

- ・波面に鏡面を適用する、大地を設定して、下の波面を上を折り返して、微小波源を逆相にする。

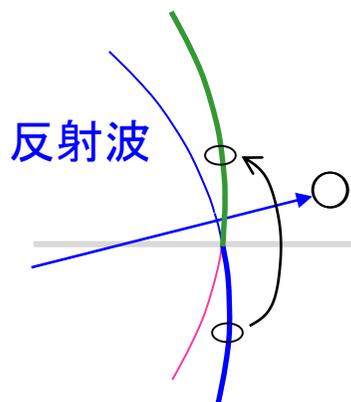


- ・折り返された緑の波面は、反射波の波面と同じ位置になる。
- ・緑の波面の影響は直接でなく大地面の経由で受信点に届く。

### 直接波の抽出

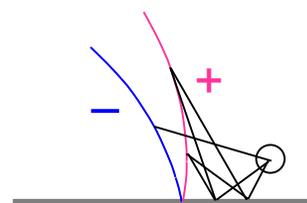


- ・前の波面から受信点に直接及ぼす影響と、後の波面から大地反射させた影響とを足す。

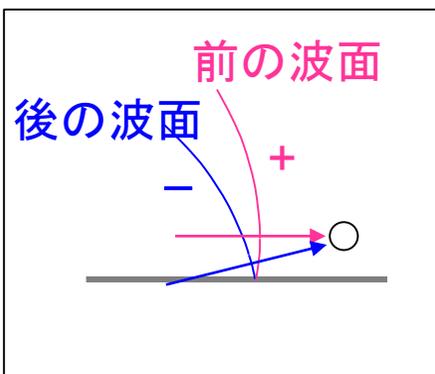


- ・同様に、反射波の下の波面も上に折り返すことができる。

### 反射波の抽出



- ・前の波面から大地反射させた影響と、後の波面から受信点に直接及ぼす影響とを足す。

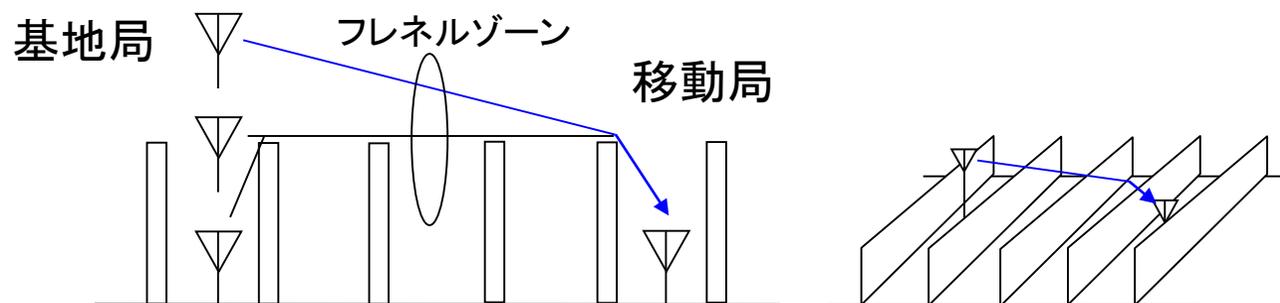


- ・大地上には2つの波面が見える。
- ・お互いに逆相。

- ・直接波や反射波の大地で遮蔽されるように見えるフレネルゾーンは、お互いの波面の中に残っている。

# 多重スクリーン回折モデル

- ・波面の遮蔽のモデル。損失が生じるメカニズムを簡単に表現したい。
- ・都市内の伝搬損失のモデル。
- ・都市のビル群を平板に置き換えて、平板を横に複数並べた環境での伝搬特性を計算機シミュレーションと数式展開を用いて求めた。
- ・電波のフレネルゾーンが平板で複数回遮蔽されることで損失が生じる。ビル幅はなく、反射波を考慮しない。



# 多重スクリーン回折モデル

- ・このモデルでは、距離特性や周波数特性をうまく説明できる。

## <距離特性>

- ・測定からわかっていたこと。

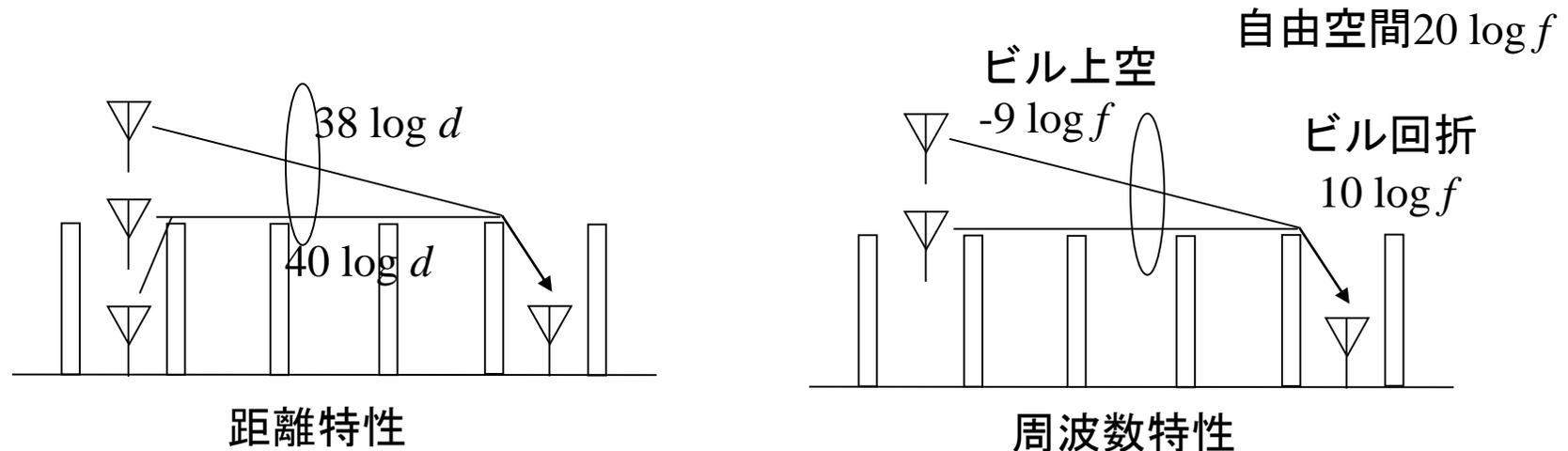
$$L = \alpha_d \log d \quad \alpha_d = 30 \sim 40$$

## <周波数特性>

- ・測定からわかっていたこと。

$$L = \alpha_f \log f \quad \alpha_f = 20 \sim 26$$

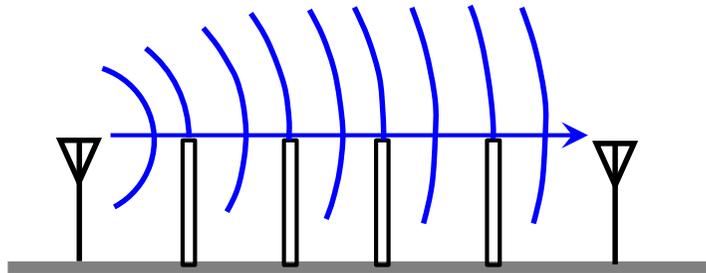
- ・従来は、対数で近似できる理由や $\alpha$ 値の理由がわからなかった。



- ・距離特性や周波数特性を導き出すのは簡易でない。
- ・モデルが示す現象が複雑である。

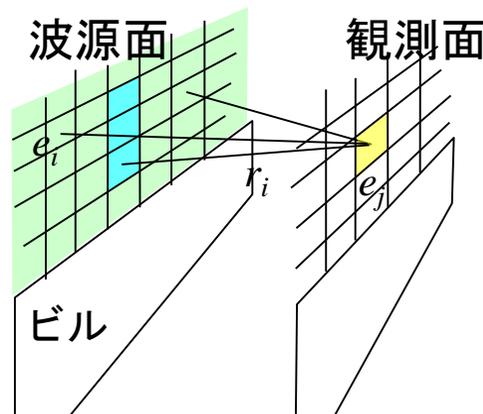
# 多重スクリーン回折モデル

・損失が発生する簡易なモデルを考える。

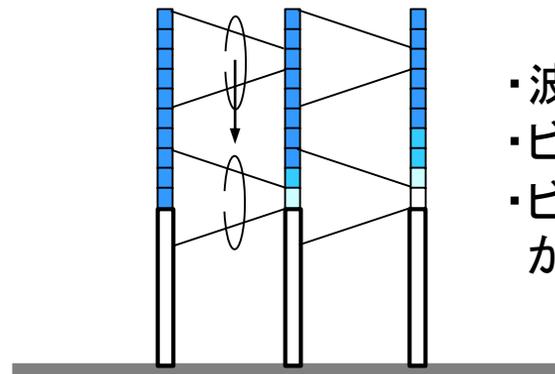


ビル遮蔽の様子

- ・物理光学近似で観測面の電界を求める。
- ・波源面の正面部分(第一フレネルゾーン)の電界しか影響しない。
- ・正面部分の電界の振幅は異なるが位相はほぼ同じ。また距離もほぼ同じ。位相を省いて実数だけで計算する。
- ・横の電界はほぼ同じなので、正面部分の縦一列だけを計算。



物理光学近似の計算

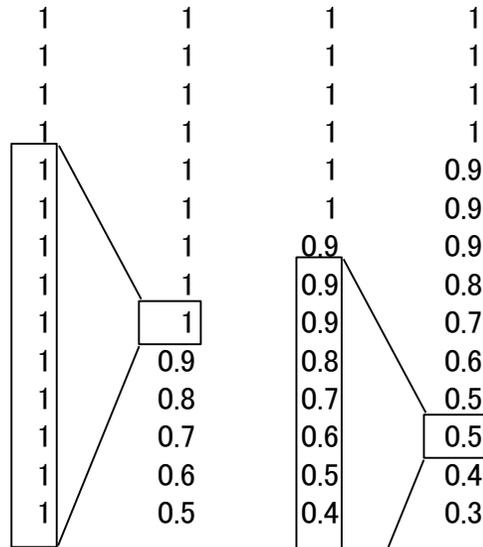


計算モデル(移動平均)

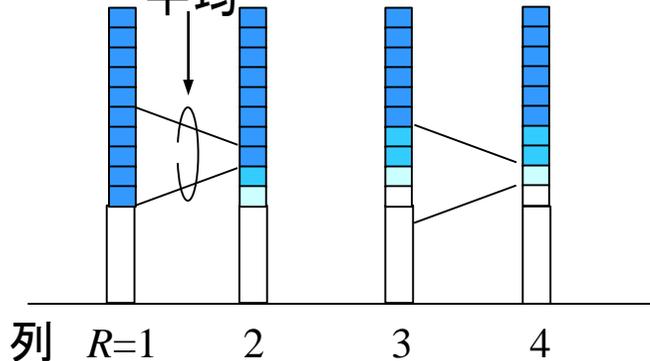
- ・波源面の一列を移動平均する。
- ・ビルの屋上付近は電界が弱い。
- ・ビル列(距離)を増やすと減衰が増える。

# 多重スクリーン回折モデル

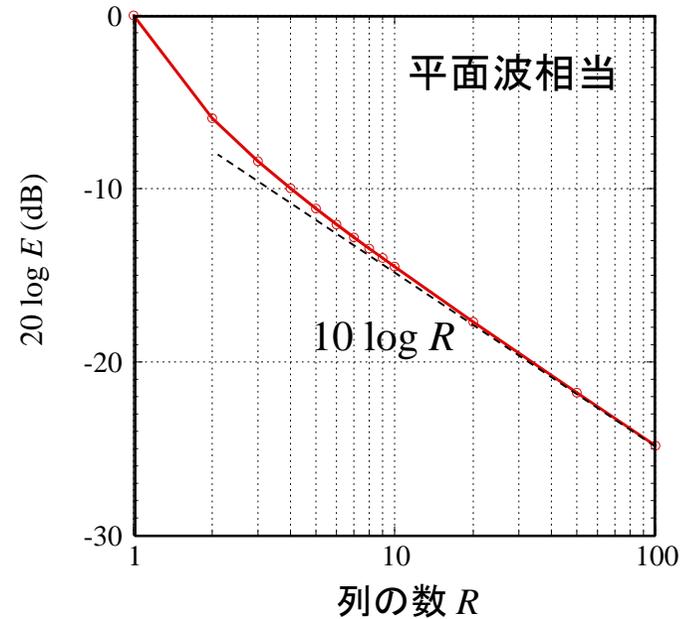
- ・損失が発生する簡易なモデル  
(移動平均のモデル)



移動平均



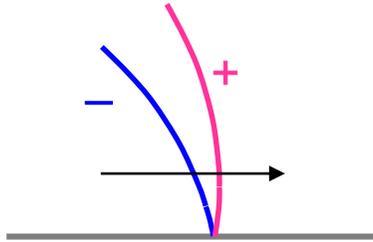
ビル屋上の電界強度



- ・上は簡略化した場合の計算例では距離の対数に比例する。
- ・最初の波源面の電界を全て1にしたので、平面波の場合に近い。

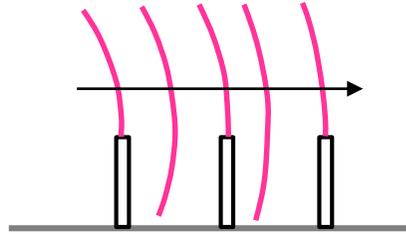
# ビル屋上传搬

## 平面大地反射モデル



- ・逆相の2つの波面が大地を進む。

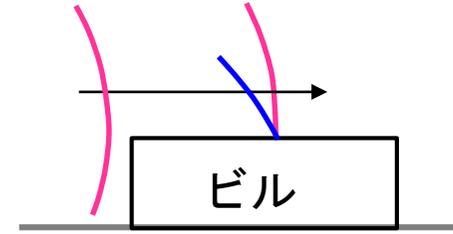
## 多重スクリーン回折モデル



- ・波面がビル列で遮蔽されながら進む。

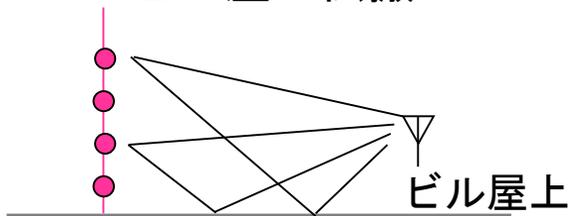


## ビル屋上传搬

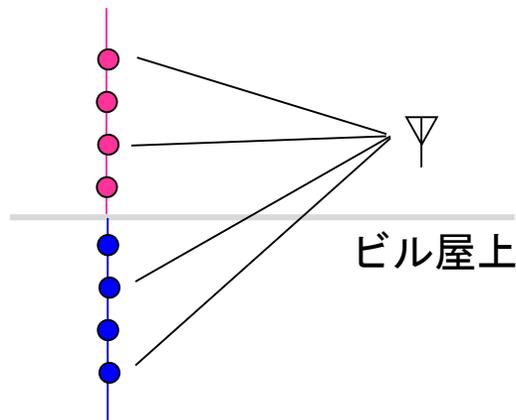


- ・ビル列で遮蔽されて屋上を進む(スロープ回折)。
- ・回折損失だけでなく距離特性などを知りたい。

## ビル屋上传搬



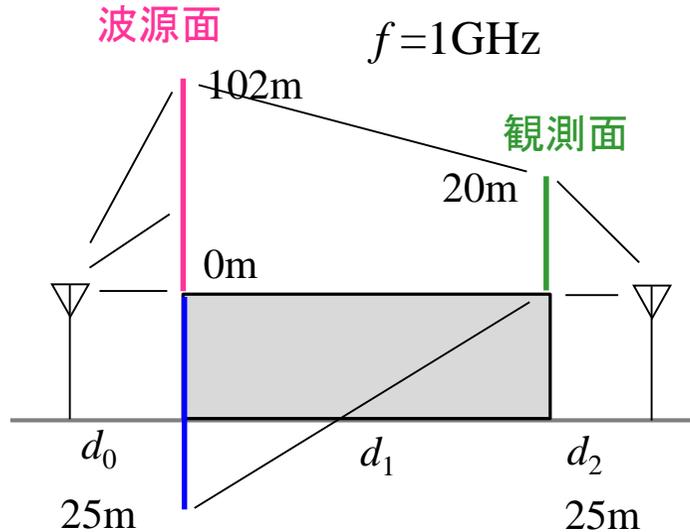
- ・多くの送信点がある平面大地反射と同じ。



- ・鏡面の関係を使って計算できる。
- ・ビル屋上面の電界は0になる。
- ・多重スクリーン回折より損失が少し大きい。

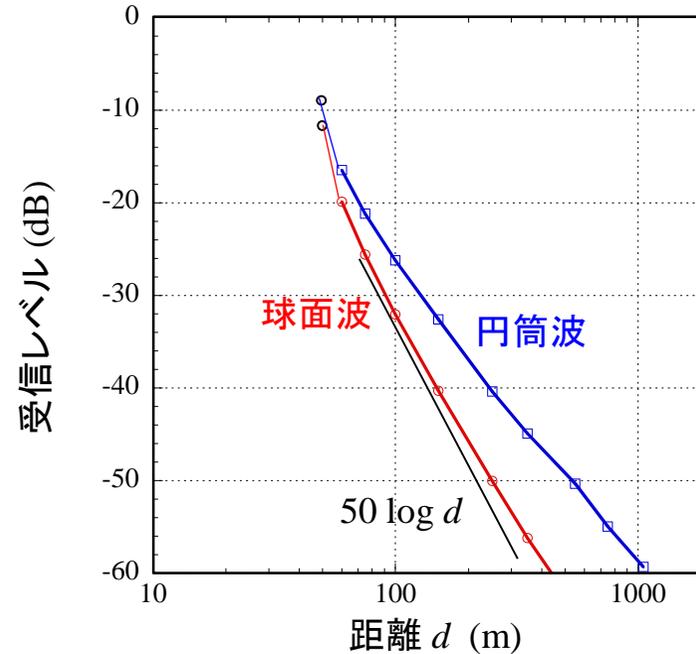
# ビル屋上伝搬

## <計算例>



- ・送受信高とビル高は同じ
- ・距離  $d = d_0 + d_1 + d_2$ 、ビル長 $d_1$ を変化
- ・波源面  $102\text{m} \times 102\text{m}$
- ・観測面  $20\text{m} \times 40\text{m}$
- ・波源面と観測面のメッシュ  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$
- ・計算方法: 波源面と伝達関数をFFTして掛け算して逆FFTする。

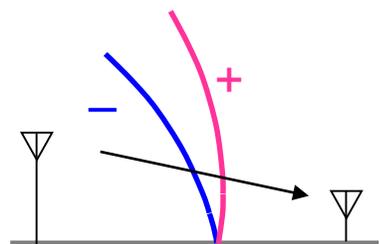
## 伝搬損失の距離特性



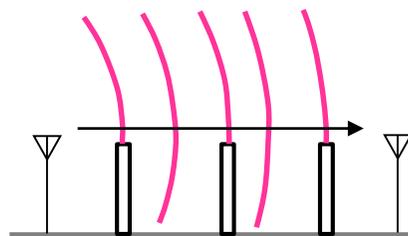
- ・球面波の距離係数は50に近い。
- ・円筒波の結果に自由空間損失分の差の $10 \log d$ を加えると球面波の結果と同じになる。
- ・ $d_0 = 200\text{m}$ でも50に近い。

# 伝搬損失特性の比較

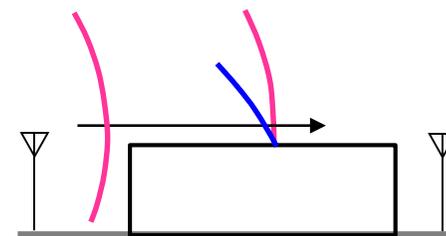
平面大地反射モデル   多重スクリーン回折モデル   ビル屋上傳搬



(ブレイクポイント以遠)



(ビル高と送受信高が同じ)



(ビル高と送受信高が同じ)

<伝搬損失特性>

距離特性

$$40 \log d$$

$$40 \log d$$

$$50 \log d$$

周波数特性

$$0 \log f$$

$$20 \log f$$

$$20 \log f$$

- ・伝搬損失には球面波の自由空間損失分を含む。
- ・ビル屋上傳搬の距離係数は50くらい。
- ・多重スクリーンとビル屋上の周波数特性は自由空間特性のみ。  
入射される反射波がないため。
- また、高さの低い最短経路の影響が小さいため。
- ・ビル屋上傳搬は多重スクリーン回折と同程度と考えていいかも。

# 目次

## <基本伝搬モデル>

1. 自由空間損失
2. 平面大地反射モデル
3. 多重スクリーン回折モデル
4. ビル屋上伝搬

## <物理光学近似による数値計算>

5. 物理光学近似の計算方法
6. 多重スクリーンでの計算

# 物理光学近似

## <取り上げたわけ>

- ・多重スクリーン回折モデルを数値計算してみたかった。
- ・これには物理光学近似が適している。

## <特徴>

- ・伝搬の計算手法は幾つかあり、物理光学近似はその一つ。
- ・計算方法が物理現象をイメージしやすい。
- ・計算負荷が手ごろで、一般的なパソコンでも計算可能。
- ・電界の振幅や位相が異なる波源面も扱うことができる。

# 物理光学近似の計算方法

- ・物理光学近似の計算方法はいくつかあるので、紹介する。
- ・空間に波源面と観測面を設定して、次の計算で観測面の電界を求める。

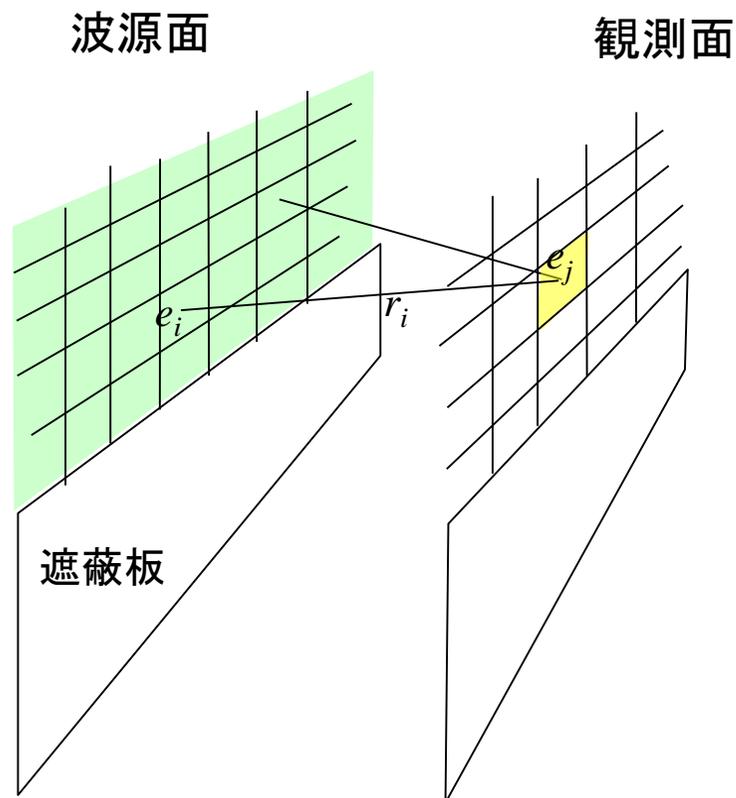
$$e_j = \sum \frac{1}{\lambda} e_i \frac{e^{-jr_i k}}{r_i}$$

$e_i$  → 電界  
 $r_i$  → 伝達関数

- ・波源面の電界と距離の伝達関数との掛け算の総和で求められる。

## 「フレネル・キルヒホッフの回折式の数値積分」

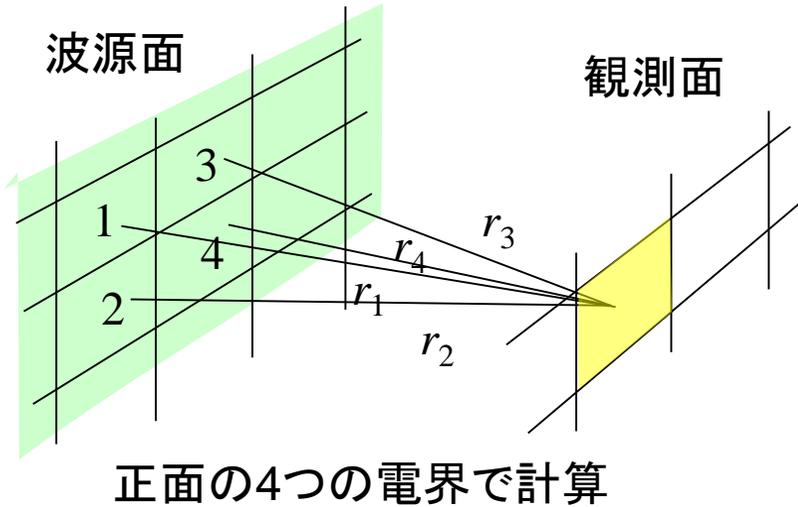
- ・この計算をそのまま忠実に行うこと。
- ・計算精度が高い、計算の工夫の自由度大。
- ・この計算は負荷が大きく計算時間が膨大。



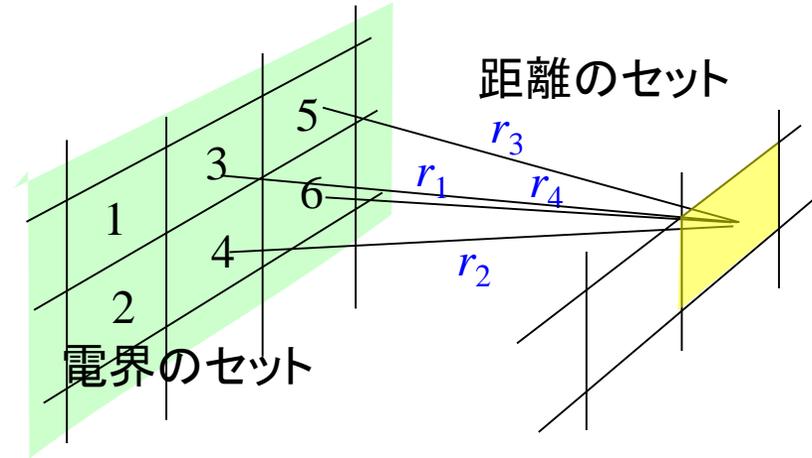
- ・この計算は次で説明するように波源面と伝達関数の畳込積分と同じ。

$$[\text{観測面}] = [\text{波源面}] \otimes [\text{伝達関数}]$$

・観測面の電界の計算は、波源面の電界と距離の伝達関数との畳込積分と同じ。

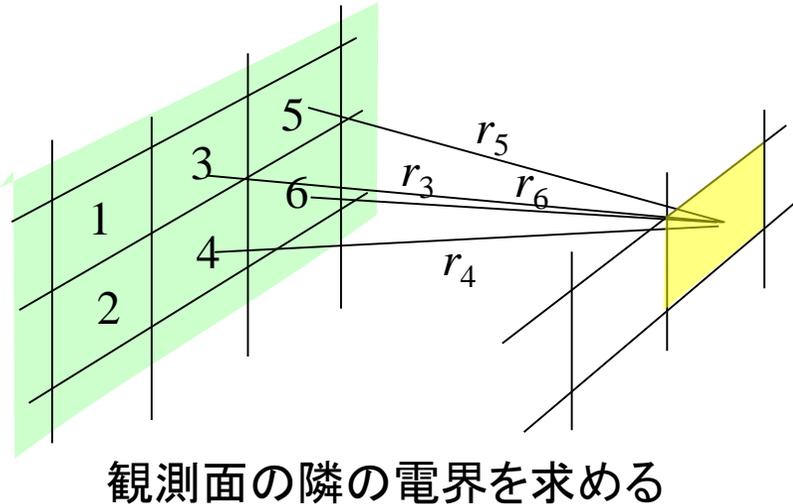


2平面が平行なら、距離のセット $r_1 \sim r_4$ と $r_3 \sim r_6$ は同じ。

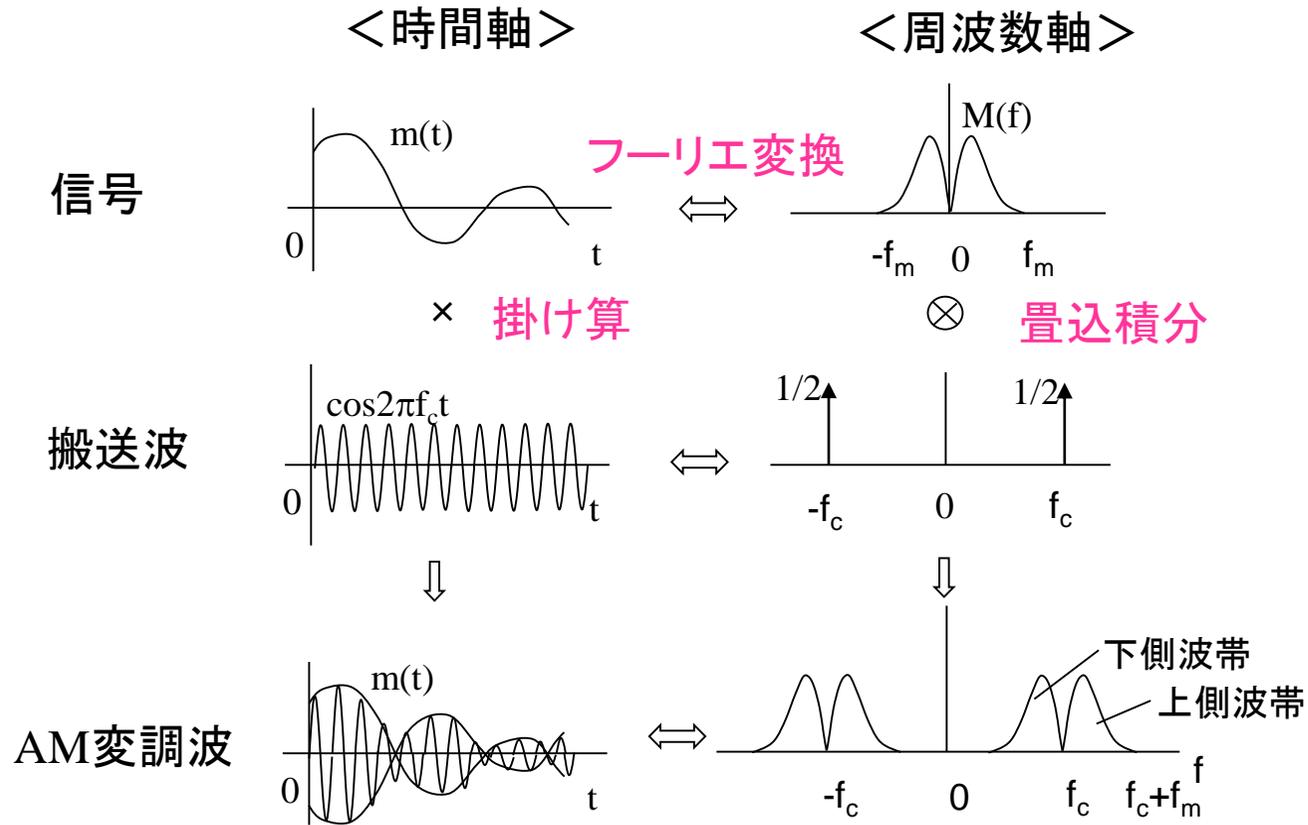


・距離のセットは同じものが使える。

・観測面の電界を順番に求める計算は、波源面の電界セットと距離セットとを畳み込み積分していることと同じ。

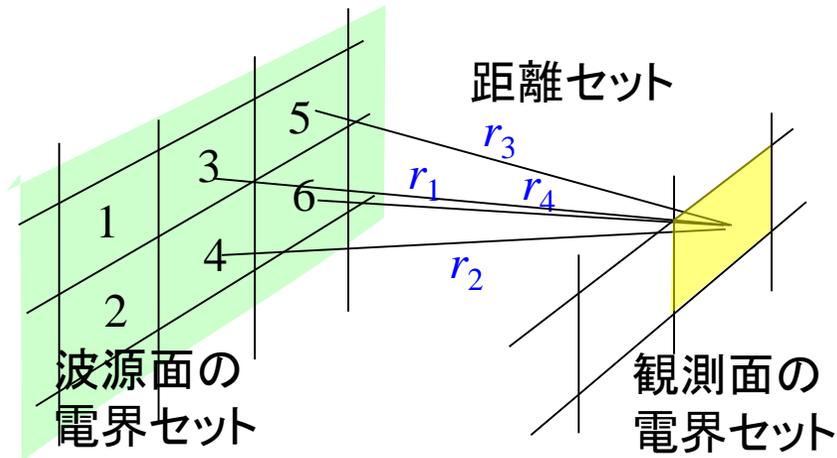


# <畳込積分のフーリエ変換>



・2つの関数を畳込積分して得られた関数のフーリエ変換は、各関数をフーリエ変換して掛け算して得られる関数と同じ。

## 「2関数のフーリエ変換」



[観測面] =

$$\text{FFT} \{ \text{FFT} [\text{波源面}] \times \text{FFT} [\text{伝達関数}] \}$$

- FFT(高速フーリエ変換)を使うことで計算の高速化を図れる。
- しかし、FFTの欠点は繰り返し関数でない関数のときに誤差が出る。
- 3つのFFTが必要なので誤差が増える。

## 「角スペクトル法」

- 伝達関数は指数関数なので、このフーリエ変換を数式によって近似なしで正確に求めることができる。

[観測面] =

$$\text{FFT} \{ \text{FFT} [\text{波源面}] \times [\text{伝達関数}] \}$$

- FFTの回数を2回に減らすことができる。
- 逆に数式化で計算の工夫ができない。

## 「フレネル回折を用いる方法」

- ・距離を近似することで、フレネル・キルヒホッフの式をフーリエ変換の式に変形できる。

$$[\text{観測面}] = \text{FFT} \{ [\text{波源面}] \cdot [\text{距離}] \}$$

- ・観測面のメッシュの大きさが波源面と異なる欠点がある。

## 「フレネル近似を用いた数値積分」

- ・波源面の横方向の電界が全て同じになるときに横方向の積分値を、距離の近似を用いた数式から求める。

$$[\text{観測面}] = [\text{波源面}] \otimes [\text{距離}]$$

の横方向を数式で求める。

- ・平面波や円筒波には適用できるが、球面波には適用できない。

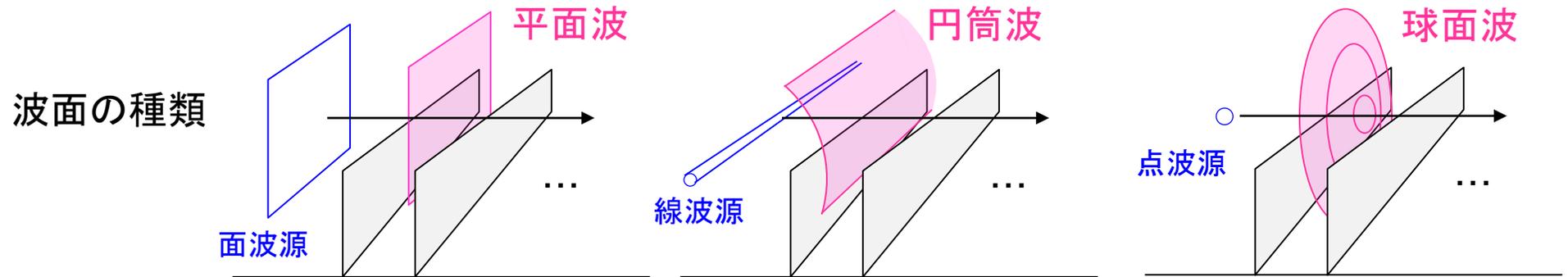
# 物理光学近似の計算方法

計算方法	[観測面]の計算式	利点	欠点
フレネル・キルヒホッフの回折式の数値積分	[波源面] $\otimes$ [伝達関数]	<ul style="list-style-type: none"> <li>・計算精度が高い</li> <li>・計算の自由度大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・計算量が膨大</li> </ul>
フレネル回折を用いる方法	FFT { [波源面]・[距離] }	<ul style="list-style-type: none"> <li>・計算量が小</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・距離の近似</li> <li>・メッシュ間隔異なる</li> </ul>
フレネル近似を用いる数値積分	[波源面] $\otimes$ [距離] 横方向を数式で	<ul style="list-style-type: none"> <li>・FFTなしで計算量削減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・距離の近似</li> <li>・球面波は対象外</li> </ul>
2関数のフーリエ変換	FFT { FFT [波源面] $\times$ FFT [伝達関数] }	<ul style="list-style-type: none"> <li>・距離の近似なし</li> <li>・下より計算の自由度あり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・FFT3回で誤差増</li> </ul>
角スペクトル法	FFT { FFT [波源面] $\times$ [伝達関数] }	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上よりFFTを減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・FFT2回</li> <li>・上より計算の自由度なし</li> </ul>

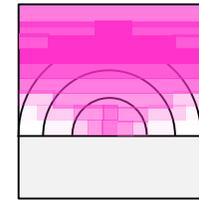
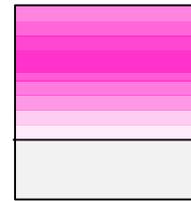
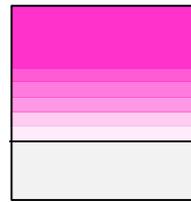
- ・多重スクリーン回折などの繰り返し計算では、青字の計算方法は実用的。
- ・フレネル・キルヒホッフは、計算の自由度が大きいので計算量を削減する工夫が可能。

# 多重スクリーンでの計算

<波面による計算の違い>



観測面(平面)  
の電界



- ・横列の電界が同じなので、縦1列だけを計算すればいい。

- ・超過損失は球面波と同じでない。

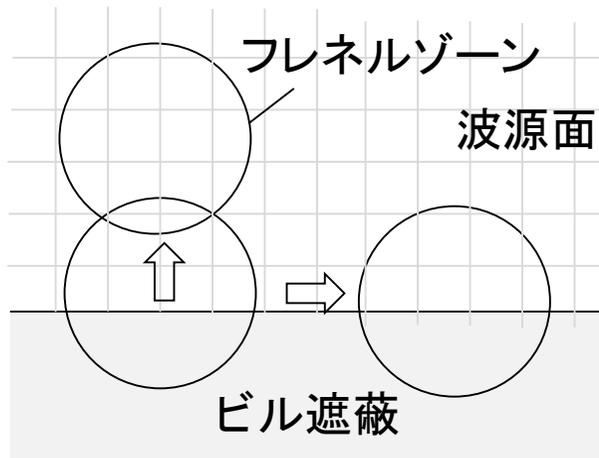
- ・平面波は送信点からビルまでの距離を変えても同じ結果なので、送受信間距離を特定できない。

- ・超過損失は球面波と同じ。

- ・実環境では球面波なので、この結果が必要。

## <円筒波と球面波が同じになる理由>

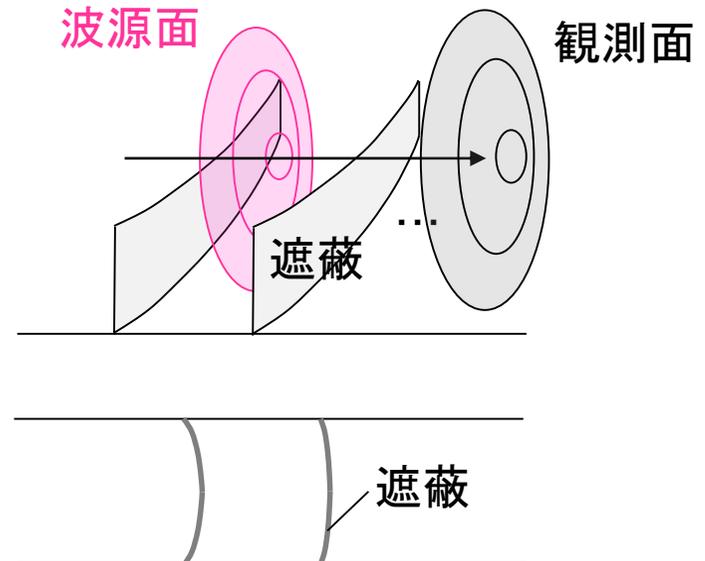
- ・円筒波と球面波の超過損失が同じになる理由について。
- ・観測面の場所ごとの電界の変化をみると、横方向より縦方向の方が変化が大きい。
- ・ビル遮蔽の影響が縦方向に強くでる。
- ・円筒波と球面波の縦方向の波面の広がりと同じである。
- ・しかし、詳細はよくわからない。



受信点から波源面をみた図

## <球面波の計算の工夫>

- ・球面波の計算で横方向の電界を同じにする工夫。
- ・遮蔽板を円弧の形状にする。
- ・波源面と観測面を球面にする。
- ・フレネル・キルヒホッフの方法で計算を行う。伝達関数を固定するFFTは使えない。



# 多重スクリーン回折モデルの検討の歴史

- (1) 多重スクリーン回折モデル、WalfishとBertoni、1988年
  - ・平板の高さより基地高が高い場合(マクロセルを想定)
  - ・計算機シミュレーションで平面波で計算して、球面波に換算(高い基地局の場合なので波面の差の影響は小)
- (2) 多重スクリーンでの平面波と円筒波、XiaとBertoni、1992年
  - ・入射角度が小さいときを対象にして、主に数式展開を行って平面波と円筒波の損失を求めた。
  - ・超過損失は、平面波が $10 \log d$ で、球面波が $20 \log d$ と異なる。
- (3) 基地高が低い場合も含めて数式化、Xia、1997年
  - ・上の(2)を用いて、円筒波の結果を球面波に換算して数式化した。

(2)で得られた距離特性(送受信高とビル高が同じ場合)

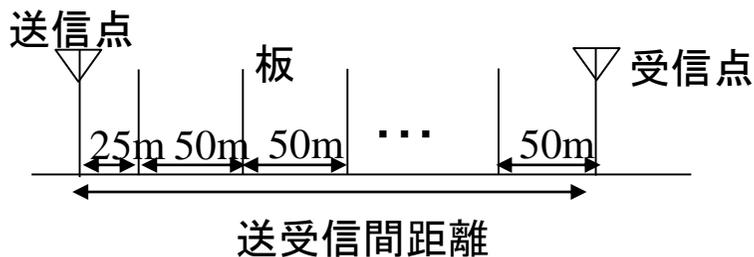
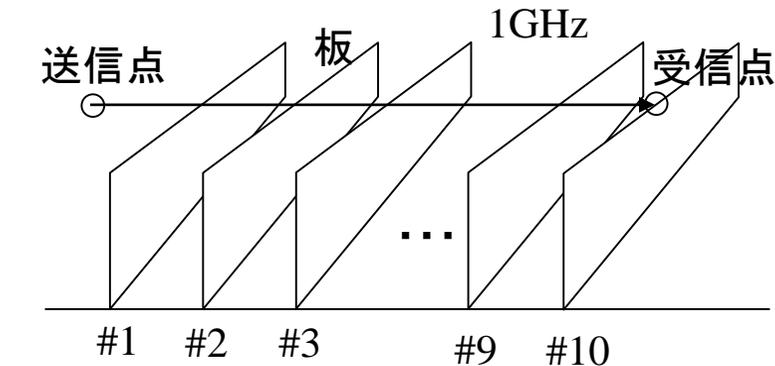
波の種類	自由空間損失	超過損失	伝搬損失
平面波	$0 \log d$	$10 \log d$	$10 \log d$
円筒波	$10 \log d$	$20 \log d$	$30 \log d$
球面波	$20 \log d$	$20 \log d$ ※	$40 \log d$ ※

※直接求められていない。

# 多重スクリーン回折モデルの計算例

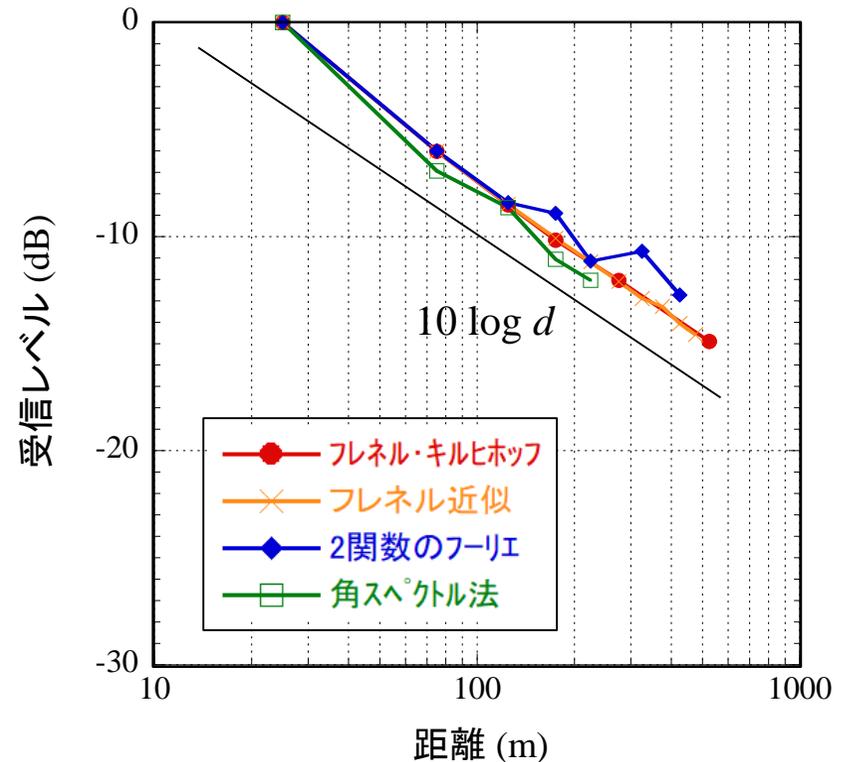
## <伝搬の環境と条件>

- ・周波数:  $f=1\text{GHz}$
- ・板の間隔:  $b=50\text{m}$
- ・板の枚数:  $m=10$ 枚
- ・送受信高: 板の高さと同じ
- ・受信点は板の上
- ・送信点から最初の板までの距離:  $d_0=25\text{m}$
- ・板の横幅: 無限長
- ・送受信間距離:  $d=25\text{m}\sim 475\text{m}$



## <計算結果>

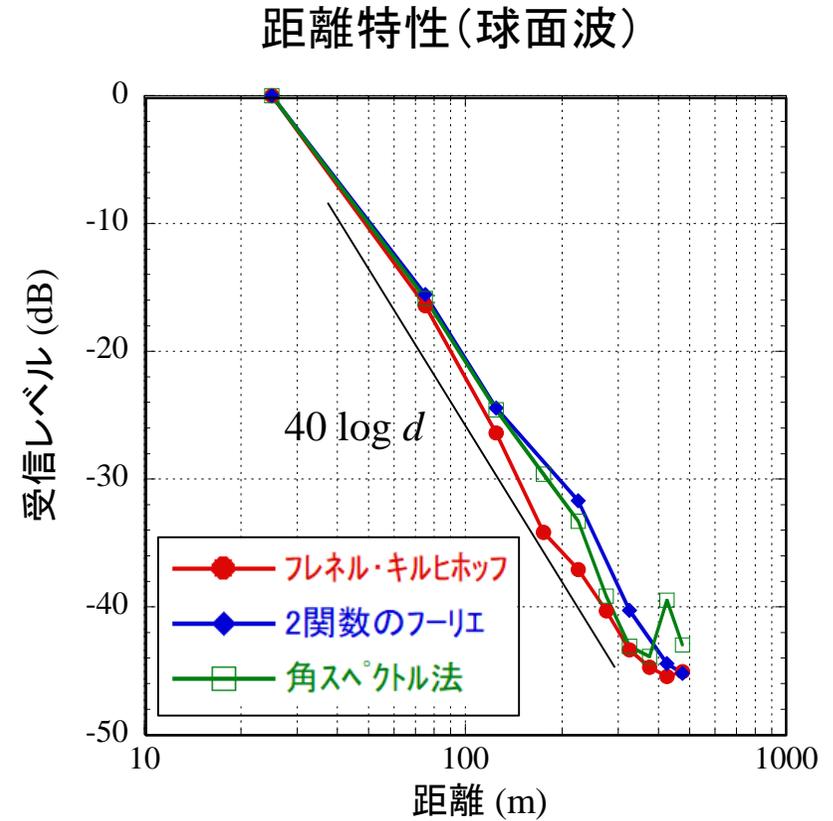
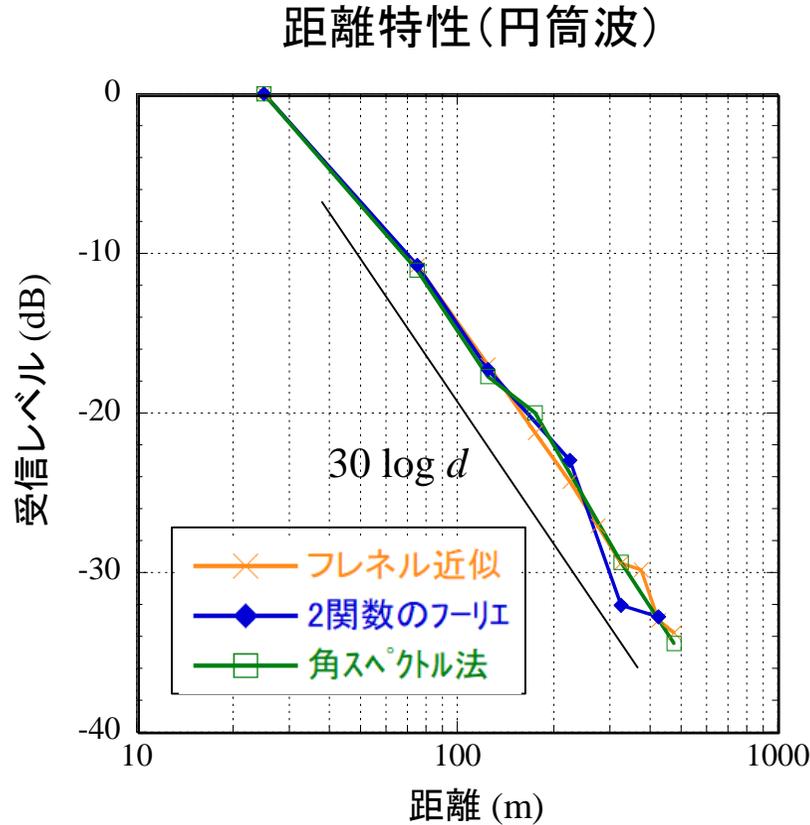
距離特性 (平面波)



- ・直線からのばらつきは誤差と思われる。
- ・各計算の差も誤差と思われる。

# 多重スクリーン回折モデルの計算例

<計算結果>



・3つのグラフから距離係数が検討の歴史の表と同じになる。

# まとめ

「基本伝搬モデル」では私がこれまで理解していなかったことや勘違いしていた等を説明した。

1. 自由空間損失: 波面の広がり、電力密度
2. 平面大地反射モデル: フレネルゾーンとの関係
3. 多重スクリーン回折モデル: 簡易な表現のモデル
4. ビル屋上传搬: 多重スクリーンとあまり変わらない

多重スクリーン回折モデルを数値シミュレーションで求めた。

5. 物理光学近似の計算方法: 5つの方法を説明
6. 多重スクリーンでの計算: 各計算方法での結果を紹介