

# 移動体衛星通信のための 電波伝搬再入門

東京工業大学  
高田潤一

電子情報通信学会衛星通信研究会  
2005年2月25日

# 自己紹介と背景

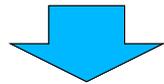
- 陸上移動および屋内ワイヤレス通信の伝搬の研究をしています.
- 衛星通信研究会の専門委員ですが, この研究会で発表するのは初めてです.
- 移動体衛星通信の伝搬は私の専門分野ではありませんが, 伝搬の基礎理論を移動体衛星通信に適用するという観点から説明します.
- 再入門の「再」は, 伝搬技術者である私が移動体衛星通信の伝搬に再び入門するという意味です.
- KDDI 研究所はこの分野では世界的な貢献をしていることで著名です.

# 電波伝搬の(再)入門の早道

- ITU-R Recommendation (勧告)  
P (Radiowave Propagation) シリーズ
  - ITU-R (<http://www.itu.int/>)
    - International Telecommunication Union  
Radiocommunication Sector
    - 国連機関
    - 国際的な技術標準を勧告の形でまとめている.
  - ITU 勧告は年間 3 編まで無料ダウンロード可能
  - 参考文献リストがないので, 根拠がわからない場合がある.

# 衛星通信の電波伝搬の流れ

- 固定衛星通信
  - 見通し内伝搬が基本
  - 降雨・大気等の減衰が支配的メカニズム



- 移動体衛星通信
  - 見通し外伝搬が基本
  - 多重波伝搬が支配的メカニズム



- 陸上移動通信
  - 支配メカニズムは同じ

# 目次

- 基本的な伝搬メカニズム
- 伝搬変動のスケール
- シャドウイング
- フェージング
- チャネルモデル

# 基本的な伝搬メカニズム

- 自由空間伝搬
- フレネルゾーン
- 反射
- 回折

# 自由空間伝搬

- フリスの伝送公式

$$G = \frac{P_t}{P_r} = \left( \frac{\overset{\text{波長}}{\lambda}}{\underset{\text{距離}}{4\pi d}} \right)^2 G_t G_r$$

アンテナ利得  
(送受)

自由空間伝搬利得

# 自由空間伝搬利得

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

- 距離の-2乗に比例

- 球面波の面積

- 波長の2乗に比例

- 同利得のアンテナは  
同じ電気長

- 例

- 2.6 GHz / 36,000 km

- ⇒ -96 dB

- 距離 × 周波数

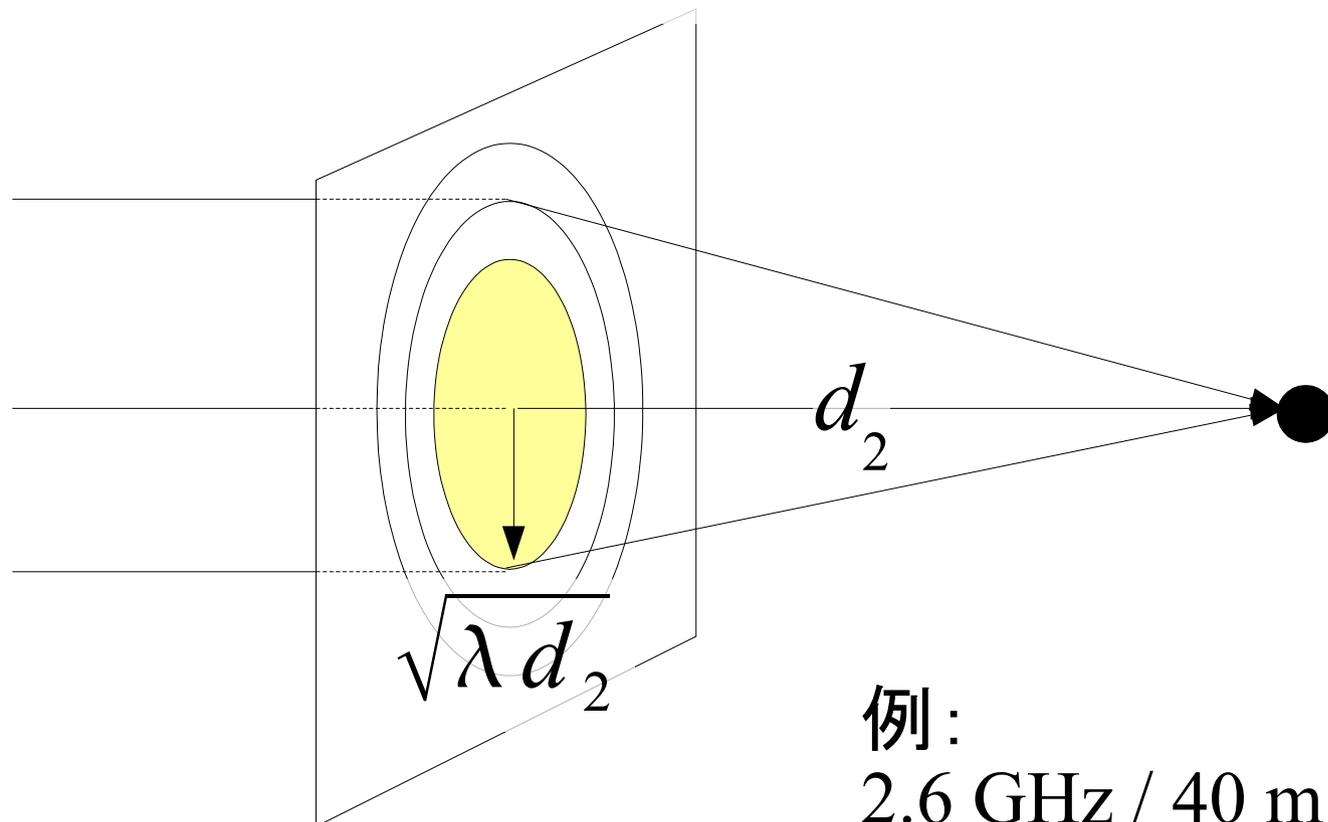
- 2倍 ⇒ 6dB

- 10倍 ⇒ 20dB

# 見通しの定義

第1フレネルゾーンが遮蔽されていないこと

- エネルギーの大半が第1フレネルゾーン内を伝送



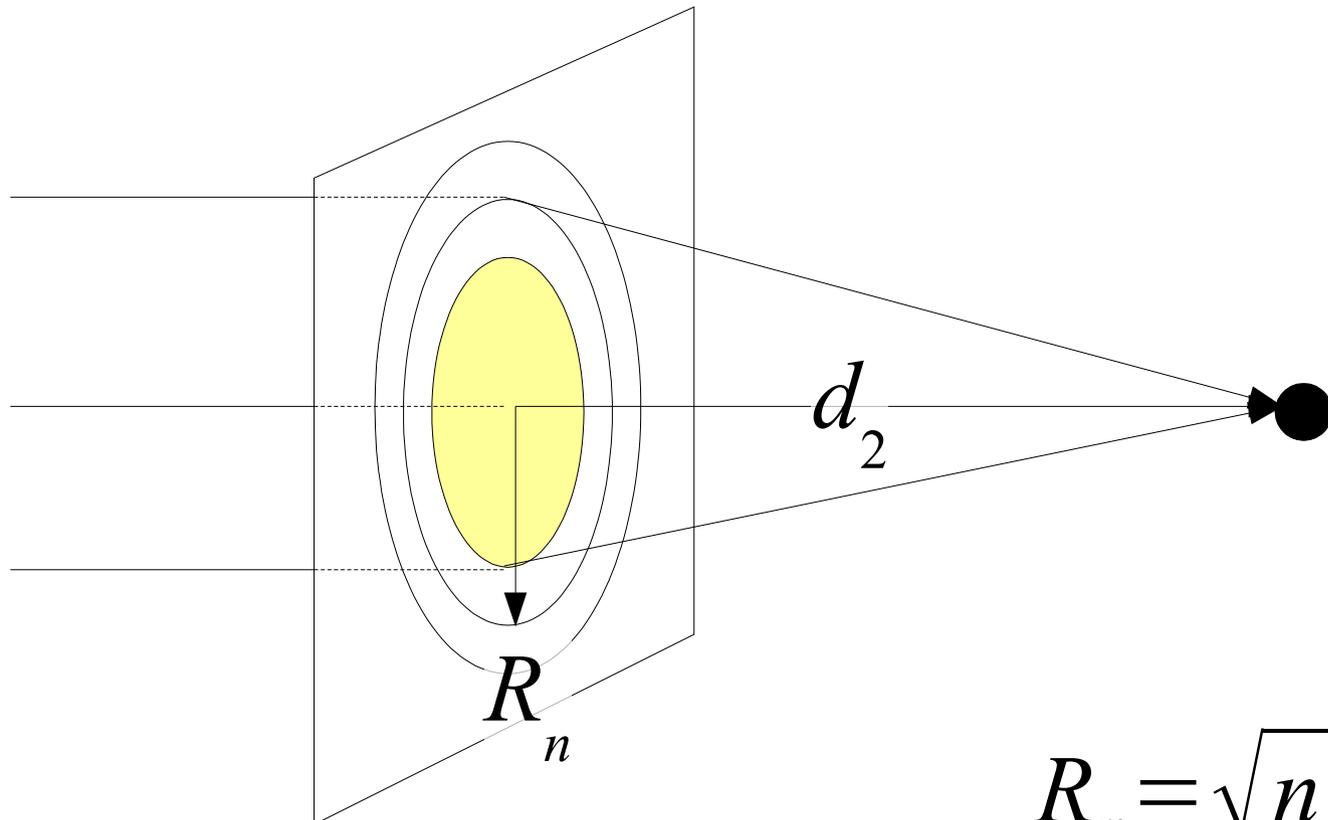
例:

2.6 GHz / 40 m

$\Rightarrow$  2.15 m

# フレネルゾーン

- 見通し線との行路位相差が  $n\pi$  となる点の集合  
- 回転楕円体



$$R_n = \sqrt{n \lambda d_2}$$

# 反射

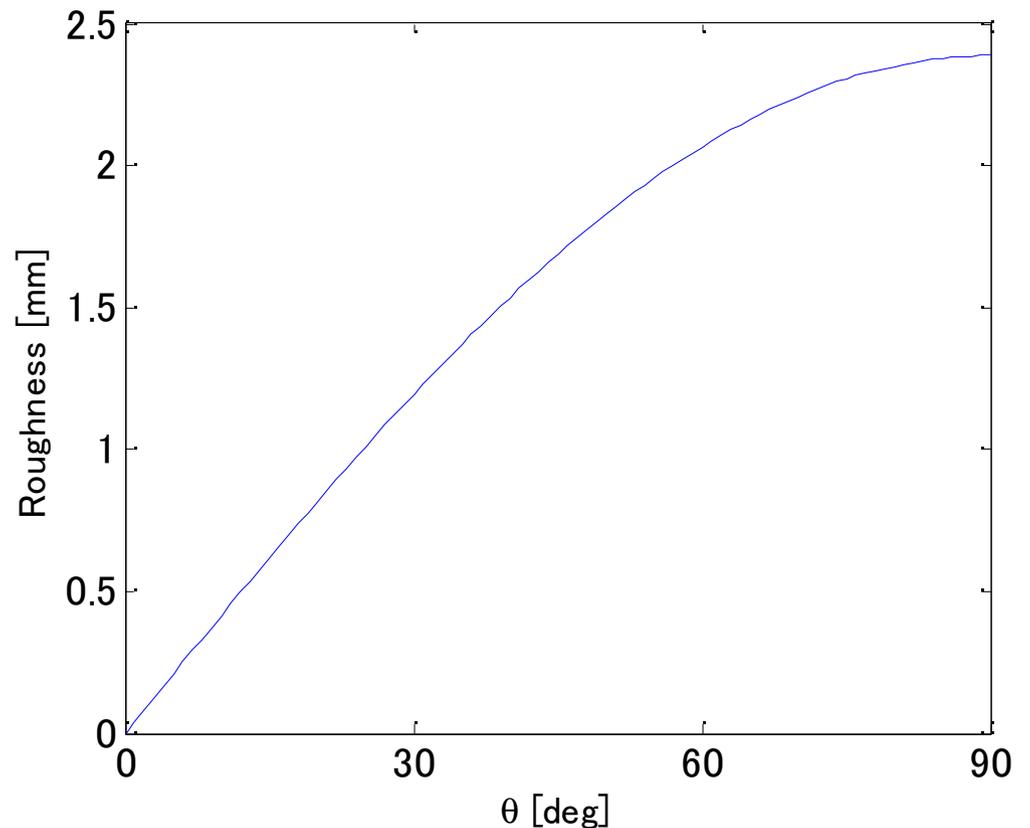
反射面は平坦か？  
～レイリーの基準

$$g = \frac{4\pi\sigma_h}{\lambda \sin \theta}$$

- $g < 1$  : 平坦
- $g > 1$  : 粗い

$$\rho = \exp\left(-\frac{g^2}{2}\right)$$

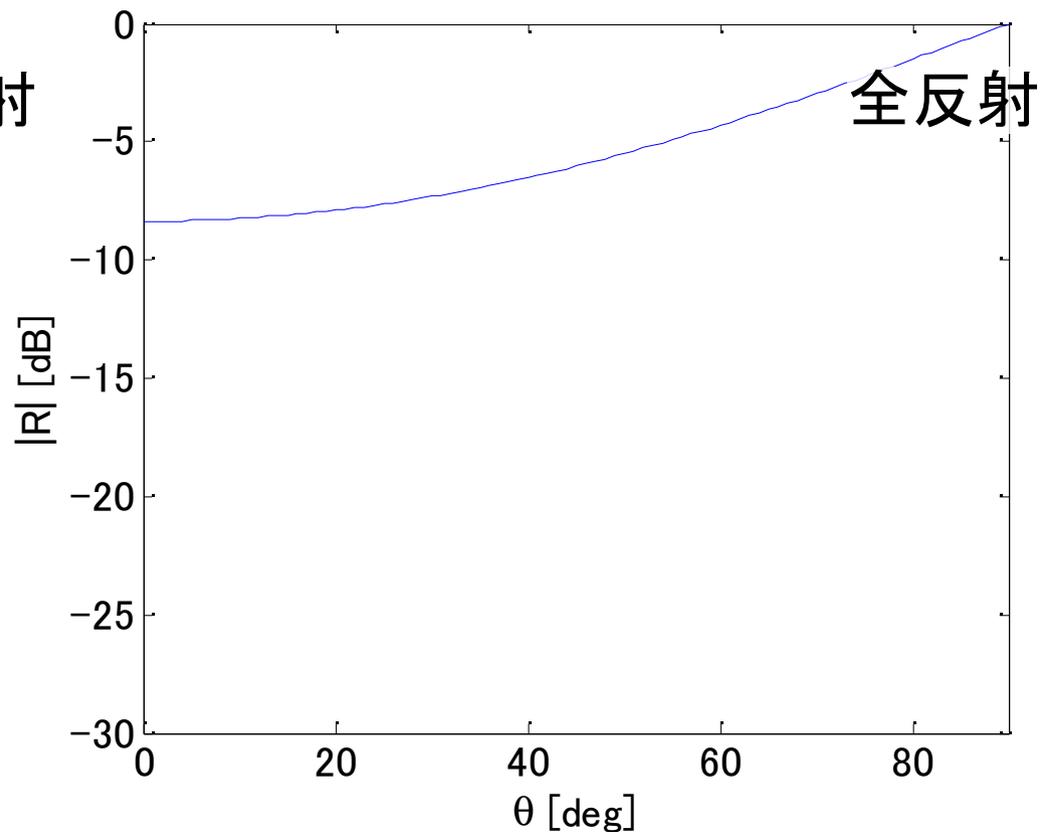
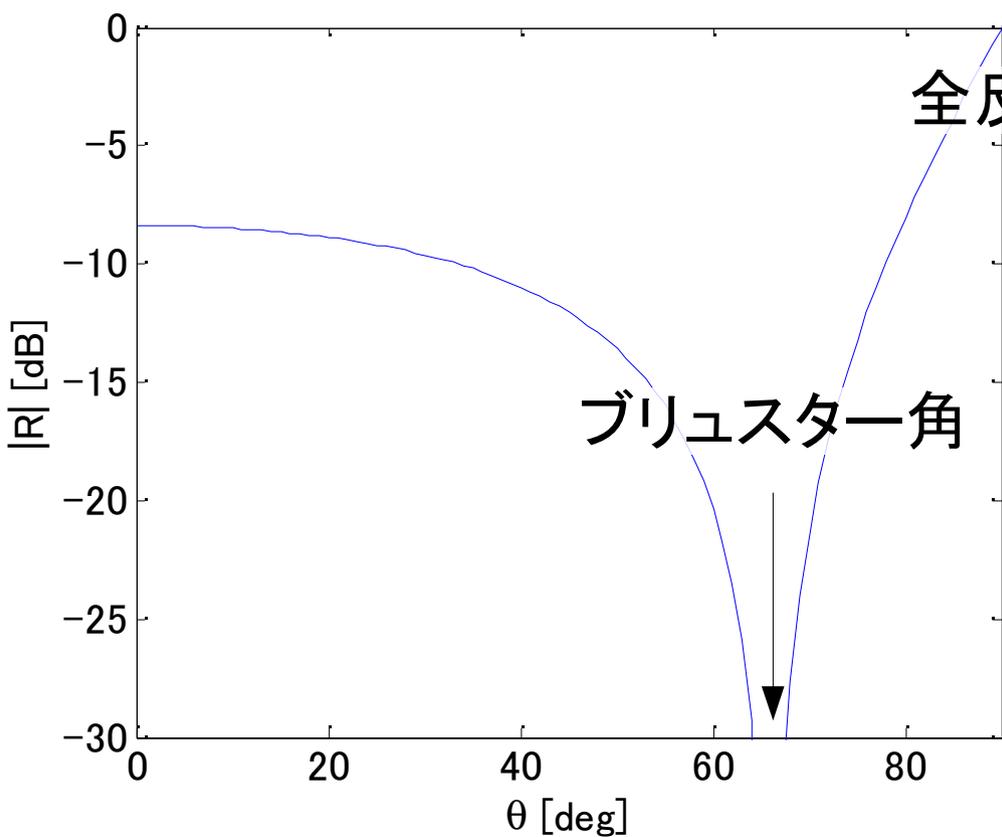
- 1GHzで平坦とみなせる粗さ



# フレネルの反射係数

• 入射面に平行成分

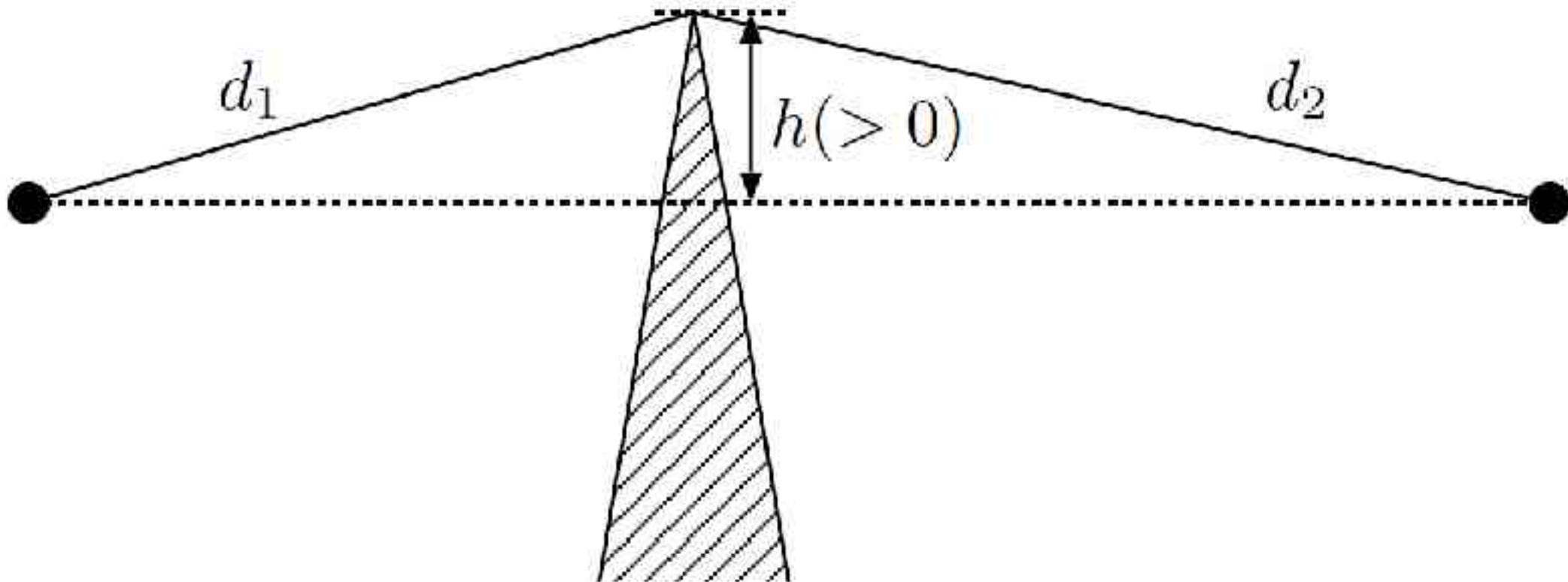
• 入射面に垂直成分



コンクリート  $\epsilon=5.0-j0.1$  の場合

# 回折

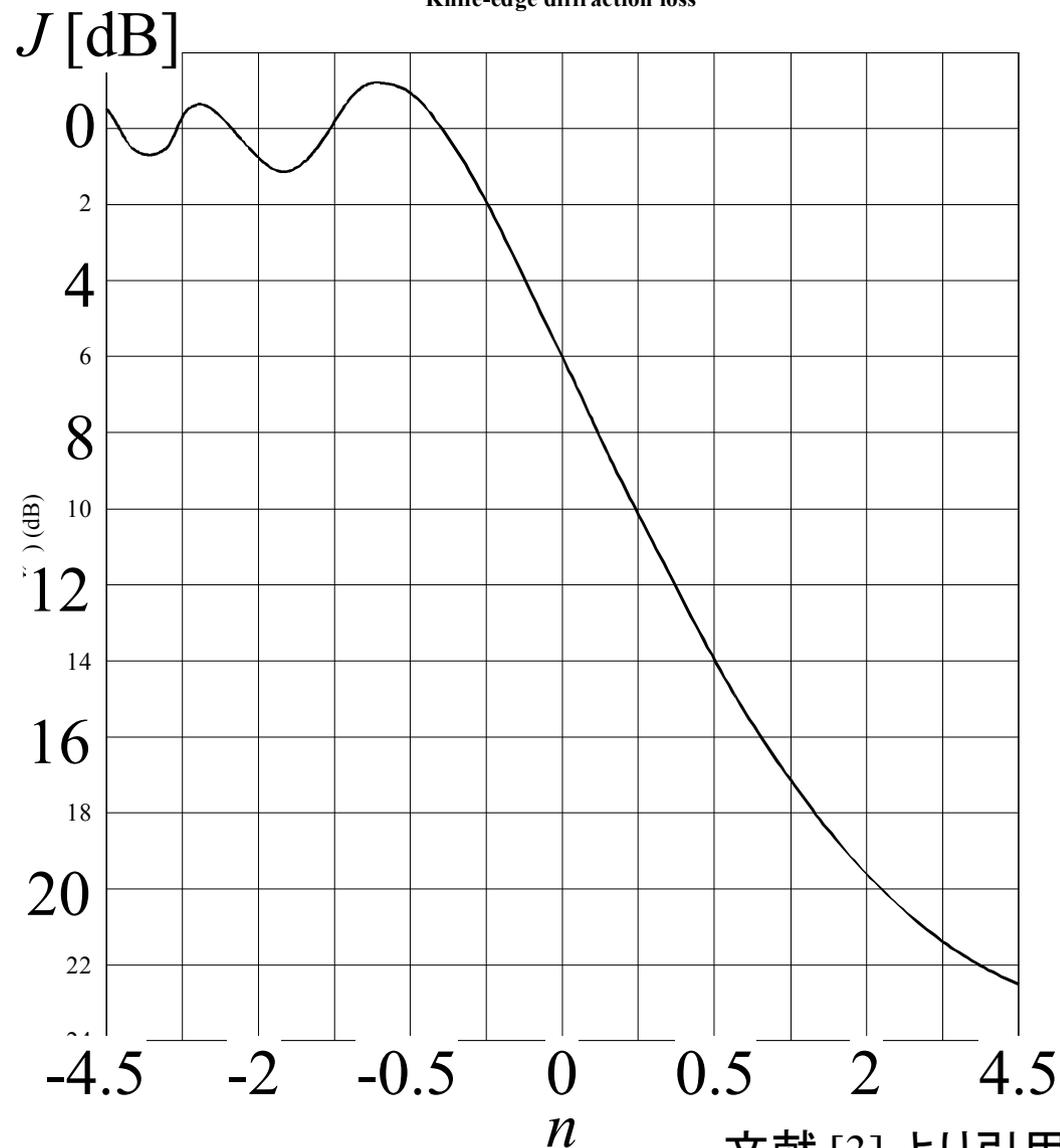
- 第1フレネルゾーンを遮蔽するインパクト



# ナイフエッジ回折損

- 見通し線を遮蔽  
⇒ -6dB
- 第1フレネルゾーンを遮蔽  
⇒ -16dB
- 周波数が高いほど  
 $n$  が大きい

FIGURE 7  
Knife-edge diffraction loss



文献 [3] より引用

# 有限回折スクリーン

- 各エッジでの電界回折損失  $j_m(\nu)$

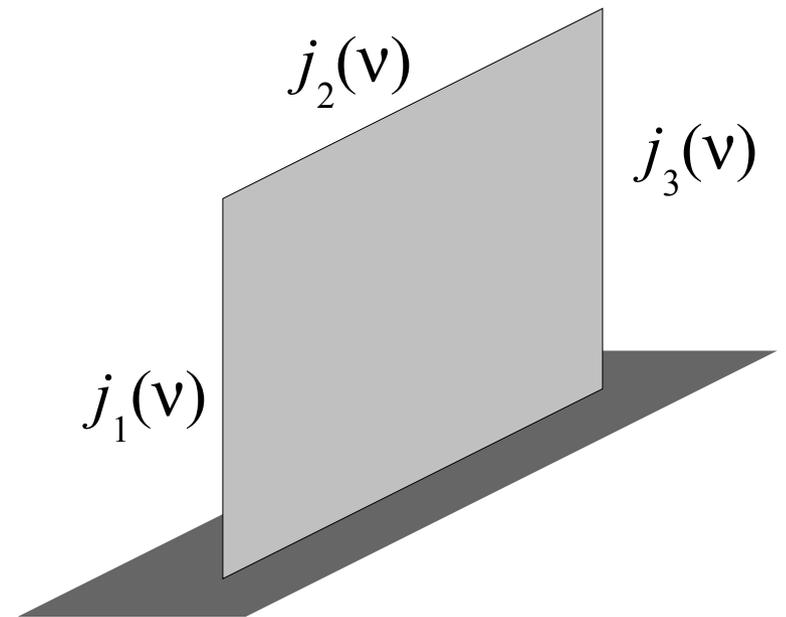


- 平均損失
  - インコヒーレント和

$$J_{\text{av}}(\nu) = -10 \log \left[ \frac{1}{j_1^2(\nu)} + \frac{1}{j_2^2(\nu)} + \frac{1}{j_3^2(\nu)} \right]$$

- 最大損失
  - コヒーレント和

$$J_{\text{max}}(\nu) = -20 \log \left[ \frac{1}{j_1(\nu)} + \frac{1}{j_2(\nu)} + \frac{1}{j_3(\nu)} \right]$$



# 伝搬変動の3つのスケール

- 距離減衰: 距離による減衰
- シャドウイング: 建物・地物スケールの変動  
⇒ 回線設計
- フェージング: 多重波干渉  
⇒ 方式設計

# 距離減衰

- 衛星通信の場合は
  - 自由空間損失
  - 媒質による損失
    - 電離層
    - 降雨
    - 大気
    - ...

# シャドウイング

移動体周囲の建物や樹木・電柱などの状況により生じる数  $m$  オーダでの変動

# 建物によるシャドウイング

- ほぼ完全な遮蔽物
- 伝搬メカニズムは回折が支配的

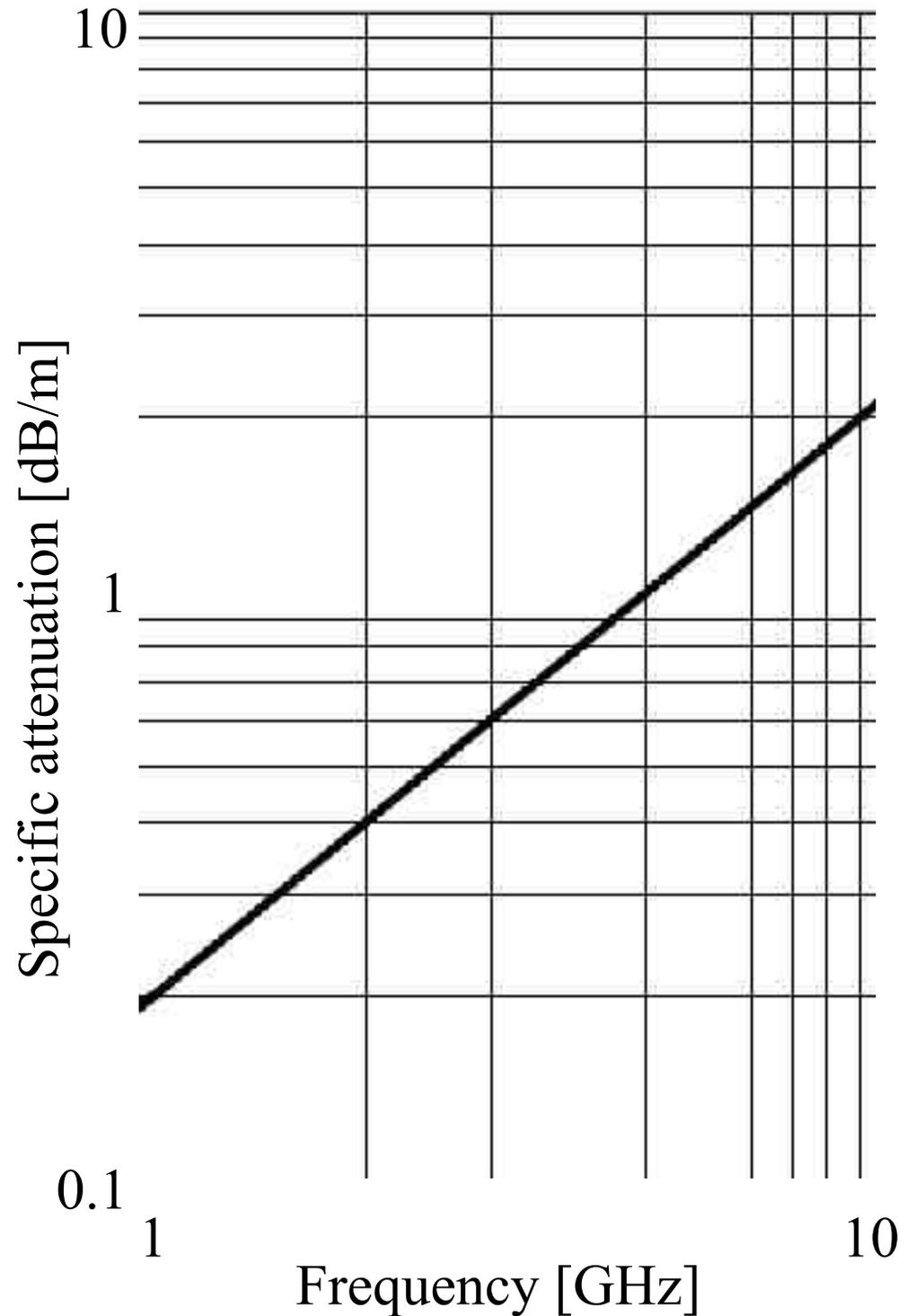
# 樹木による シャドウイング

- 電波は減衰し透過
- 伝搬媒質と同じ扱い

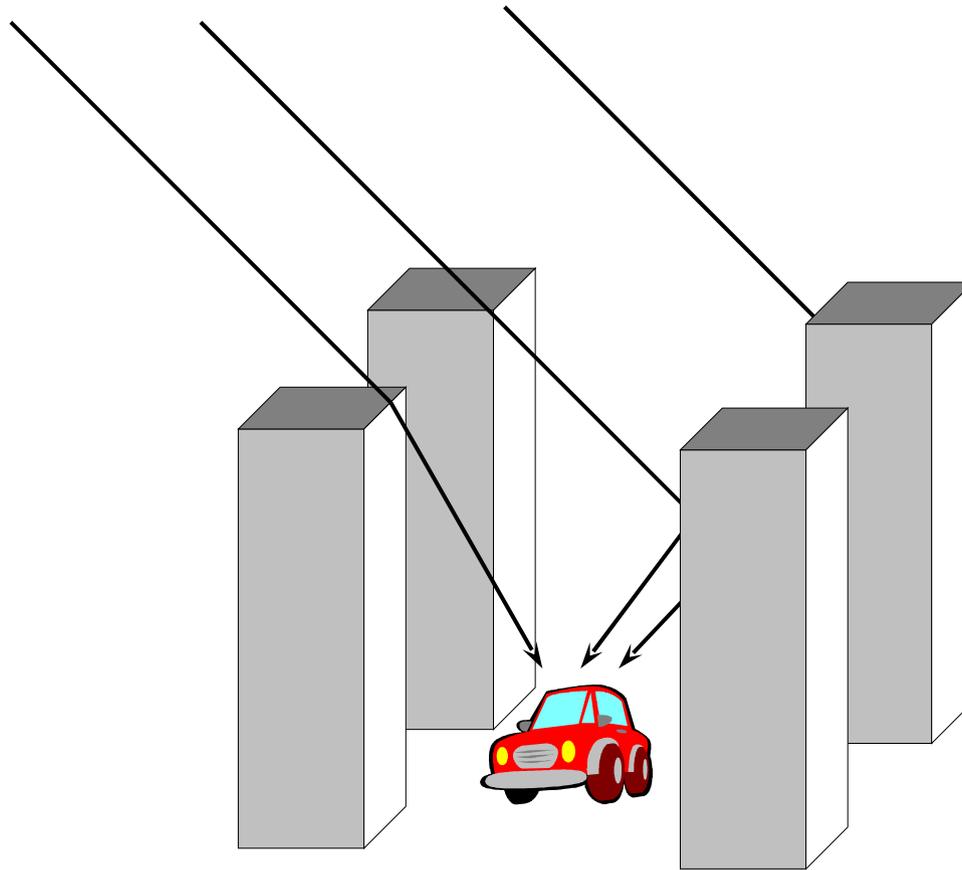
$$A = d \gamma \quad [\text{dB}]$$

樹木内  
伝搬距離  
[m]

減衰定数  
[dB/m]



# 多重波伝搬



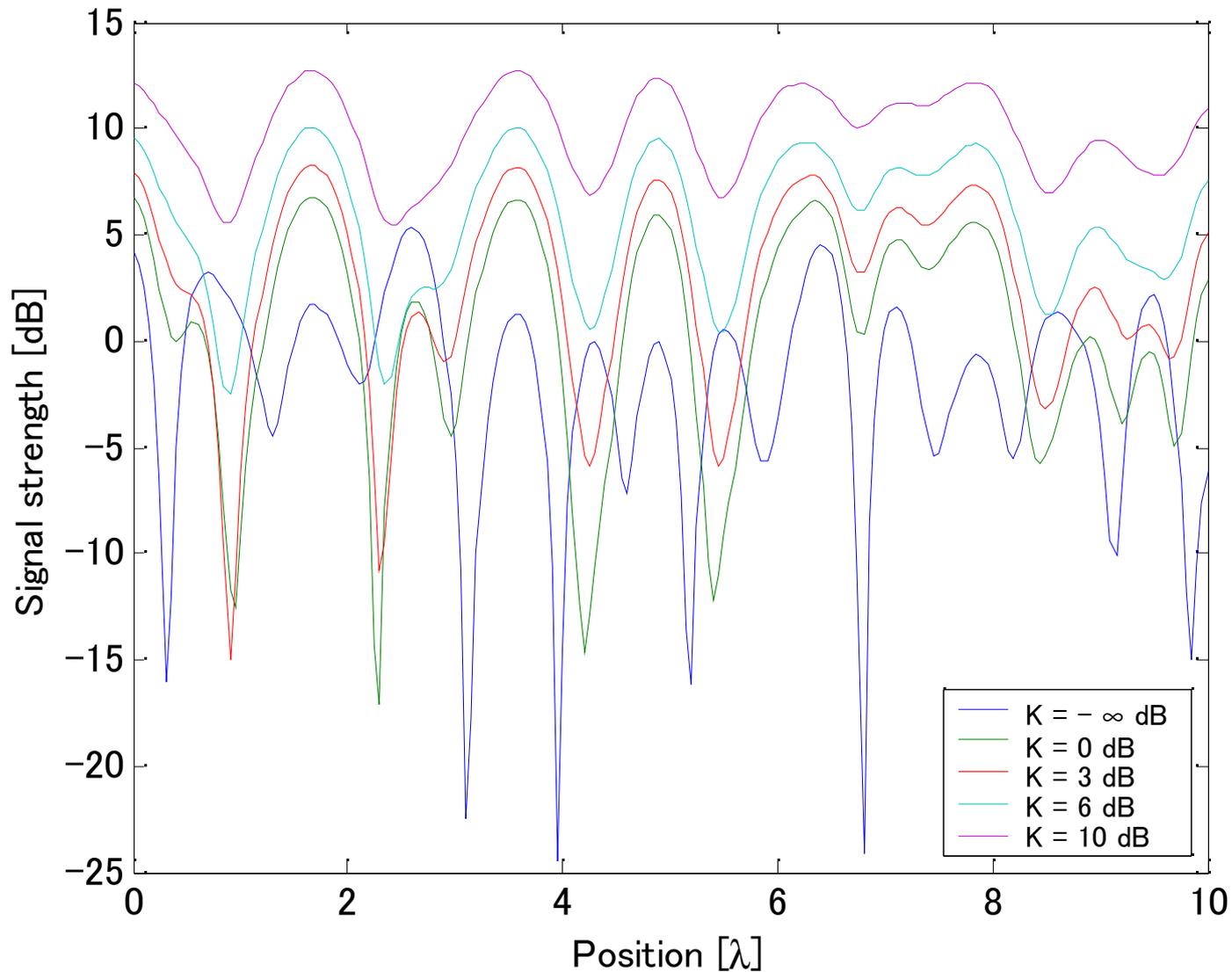
反射・回折などの複数の伝搬経路が存在する

# フェージング

- 多重波の干渉によって生じる
- 変動の周期は波長の半分程度
- 直接波の強度によって変動幅が変化
  - 直接波なし:レイリー分布
  - 直接波あり:仲上ーライス分布
  - ライス係数  $K = \text{直接波電力} / \text{散乱波電力}$   
⇒ 大きいほど変動幅が小さい

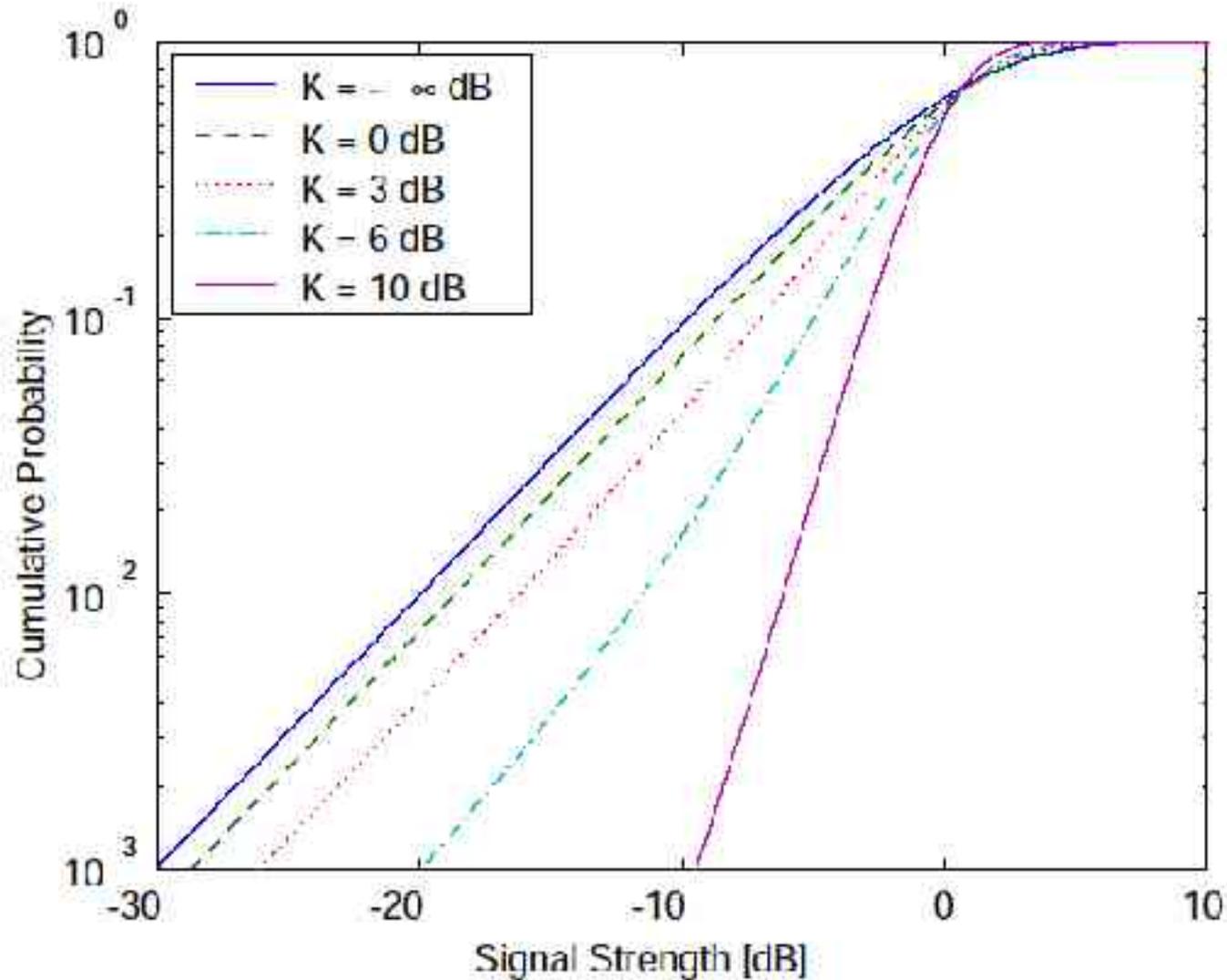
# フェージング変動の例

- 全方向から一様到来 + 直接波



# フェージング累積確率

- 平均レベルからの劣化の割合を示す

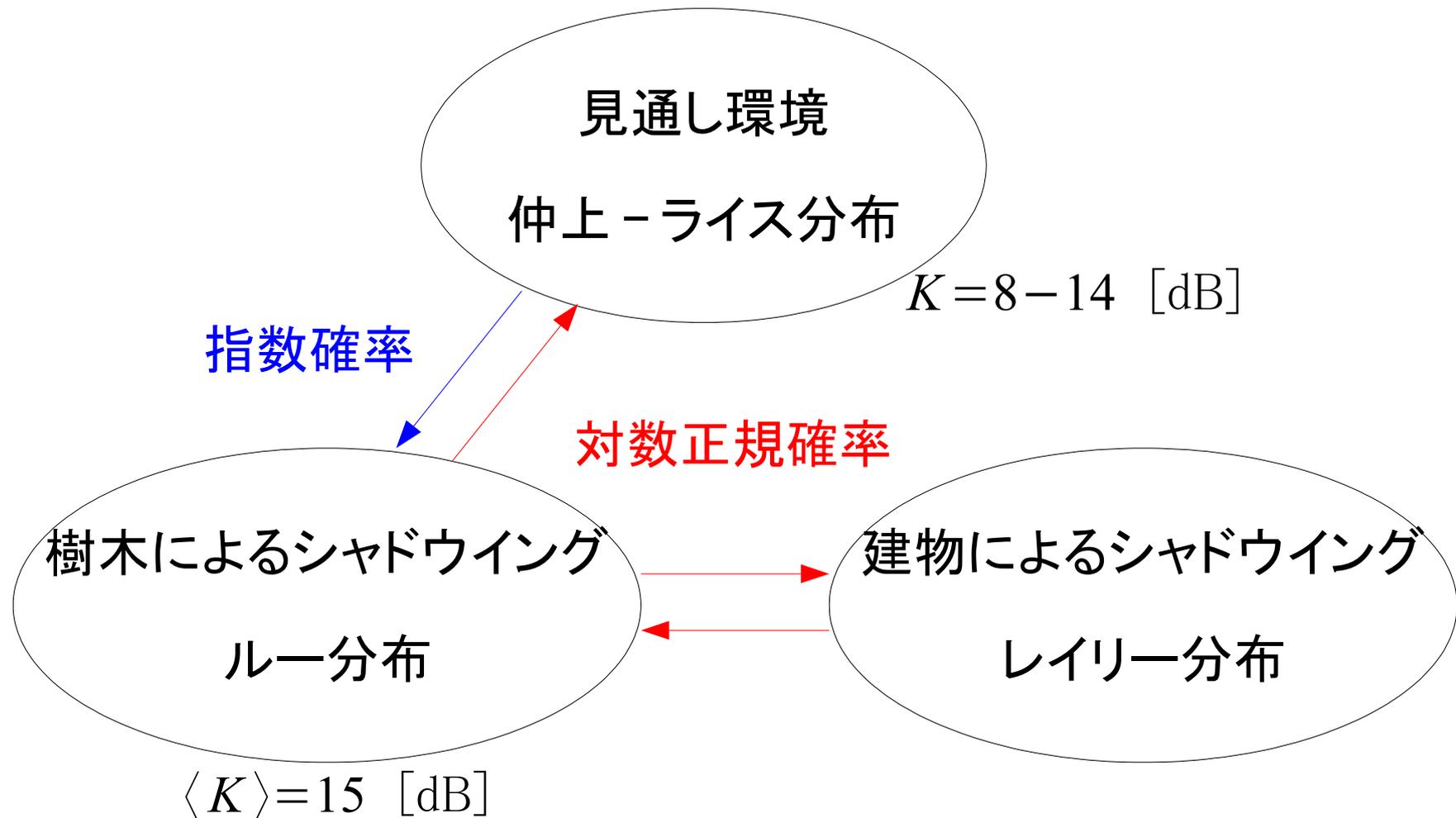


ライス係数が大きくなると大幅な劣化は生じなくなる

# 混合フェージングモデル

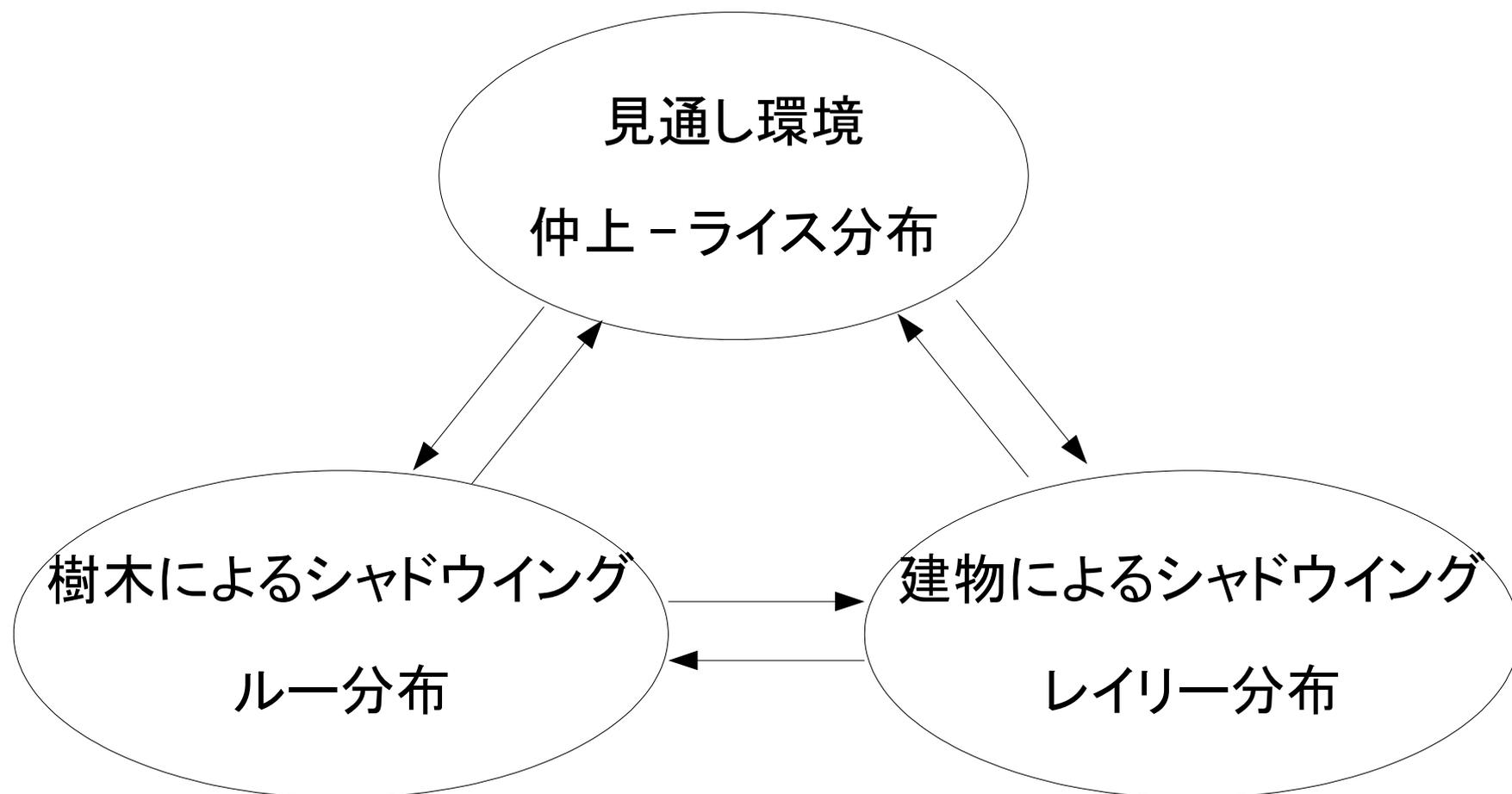
- KDD 研究所で提案されたモデル [2]
- 移動に伴う環境の変動を考慮
  - 見通し: 仲上 - ライス分布
  - 樹木によるシャドウイング: ルー分布  
(ライス係数が対数正規分布)
  - 建物によるシャドウイング: レイリー分布
- 3つの状態がランダムに発生する.
- 準静的モデル
  - ドプラスペクトルは規定されていない

# 混合フェージングモデル



直接波変動:  $m = -10$  [dB];  $\sigma = 3$  [dB]

# ITU-R 勧告での 混合フェージングモデル



状態遷移は規定されず，各状態の生起確率だけが規定

# 動的なフェージング モデルへの拡張は？

- GSO か LEO か
  - 見通し方向の変化
- 移動方向と速度
  - ドプラ周波数
- 散乱波成分のドプラスペクトル
  - 散乱波成分の角度スペクトル
- ルー分布におけるシャドウイングの動的変動
  - 樹木の間隔・方向

# まとめ

## 移動体衛星通信のための電波伝搬の基礎理論

- 基本的な伝搬メカニズム
- 伝搬変動のスケール
- シャドウイング
- フェージング
- チャネルモデル