

# (再)入門 電波伝搬 一周波数特性の本質的理解のために

高田潤一  
東京工業大学

# ついに5Gがやってきた

電波監理審議会からの答申を踏まえ、条件を付した上で、それぞれの申請者の開設計画に対して、以下のとおり周波数を指定して認定を行う予定です。

○株式会社NTTドコモ:

3,600MHzを超え3,700MHz以下及び4,500MHzを超え4,600MHz以下  
27.4GHzを超え27.8GHz以下

○KDDI株式会社/沖縄セルラー電話株式会社:

3,700MHzを超え3,800MHz以下及び4,000MHzを超え4,100MHz以下  
27.8GHzを超え28.2GHz以下

○ソフトバンク株式会社:

3,900MHzを超え4,000MHz以下  
29.1GHzを超え29.5GHz以下

○楽天モバイル株式会社:

3,800MHzを超え3,900MHz以下  
27.0GHzを超え27.4GHz以下

マイクロ波  
ミリ波

総務省, 第5世代移動通信システムの導入のための特定基地局の開設計画の認定, 2019.4.10  
[http://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01kiban14\\_02000378.html](http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000378.html)

# 移動通信の周波数

UHF (300-3000 MHz)

- 移動通信(見通し外)に好適
  - 回折による影領域への回り込み
  - 無指向性・低利得アンテナ

マイクロ波・ミリ波 (3-300 GHz)

- もっぱら見通し通信に利用
  - 回折損失の増大による影領域での遮蔽(人体含む)
  - より広い帯域
  - 指向性・高利得アンテナ

# シャノンの通信路容量

- 誤りなく伝送できるデータレートの上限

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

$C$ : 通信路容量 [bit/s]

$B$ : 帯域幅 [Hz]

$S$ : 受信信号電力 [W]

$N$ : 受信機雑音電力 [W]

- データレートは帯域幅に比例
- 比帯域一定なら  
周波数が高いほど帯域幅は広い



- 周波数が高いほどデータレートが確保しやすい

# ヘテロジニアス・ネットワーク

- 2周波数帯の利用
  - よく飛ぶUHF: 制御および安定した低速データ
  - 飛ばないマイクロ波・ミリ波: オポチュニスティックな高速データ

# Massive MIMO

- 大型アレーアンテナによるビームフォーミング
  - 波長短縮によるアンテナの小型化
  - 伝搬損失増加の補償
  - 角度領域での多元接続

# (再)入門 電波伝搬

ねらい

- 周波数によって電波伝搬がどのように変化するかを, 実感をもって理解する
  1. 自由空間伝搬
  2. 幾何光学と波動光学
  3. 波動光学による伝搬現象の説明
    - フレネルゾーン, 反射, 回折, 粗面

# 自由空間伝搬

- フリスの伝送公式

$$G = \frac{1}{L} = \frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{c}{4\pi f d} \right)^2 G_r G_t$$

自由空間伝搬利得

$G$ : 伝送利得,  $L$ : 伝送損失

「周波数が高いほど伝搬損失が大きい」

→ 現象の分解



# 自由空間伝搬

- 距離 $d$ における電力密度 $S$ : 周波数依存なし

$$S = \frac{G_t P_t}{4\pi d^2}$$

$P_t$ : 送信電力

$G_t$ : 送信アンテナ利得

「伝搬損失は周波数に無関係？」

# 自由空間伝搬

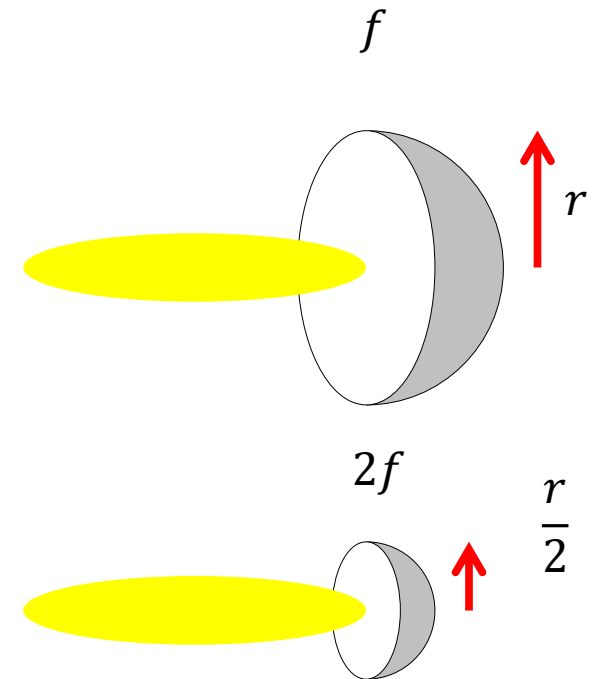
- 受信電力 $P_r$ はアンテナ実効開口面積 $A_r$ に比例

$$P_r = A_r S = A_r \frac{G_t P_t}{4\pi d^2}$$

# 受信アンテナの利得と大きさ

- アンテナ利得 $G_r$ は波長 $\lambda$ で正規化した実効開口面積 $A_r$ に比例

$$G_r = \frac{4\pi A_r}{\lambda^2}$$



# 自由空間伝搬

- $A_r$ をアンテナ利得 $G_r$ に置き換え

$$\begin{aligned} P_r &= A_r \frac{G_t P_t}{4\pi d^2} = \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \frac{G_t P_t}{4\pi d^2} \\ &= \left( \frac{c}{4\pi f d} \right)^2 G_r G_t P_t \end{aligned}$$

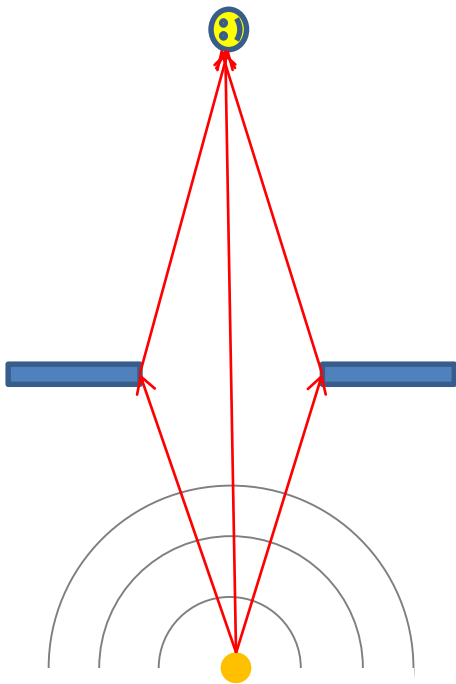
⇒ フリスの伝送公式

「『自由空間伝搬損失』が周波数特性をもつのは  
周波数が高いほど受信アンテナが小さくなるから」

# 幾何光学と波動光学

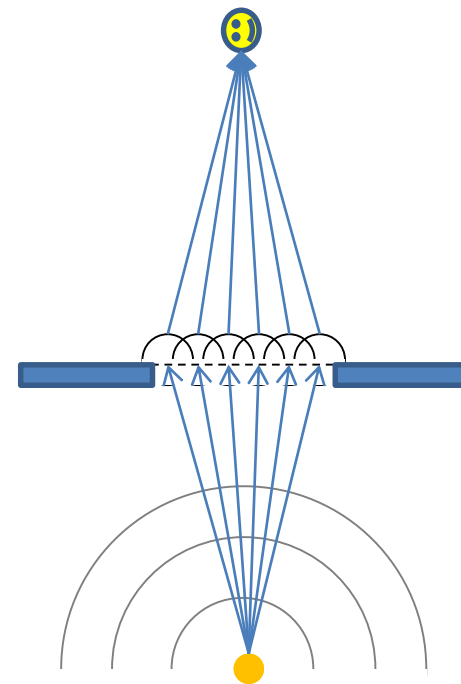
## フェルマの原理

- 光線の経路は光路長の極値をとる



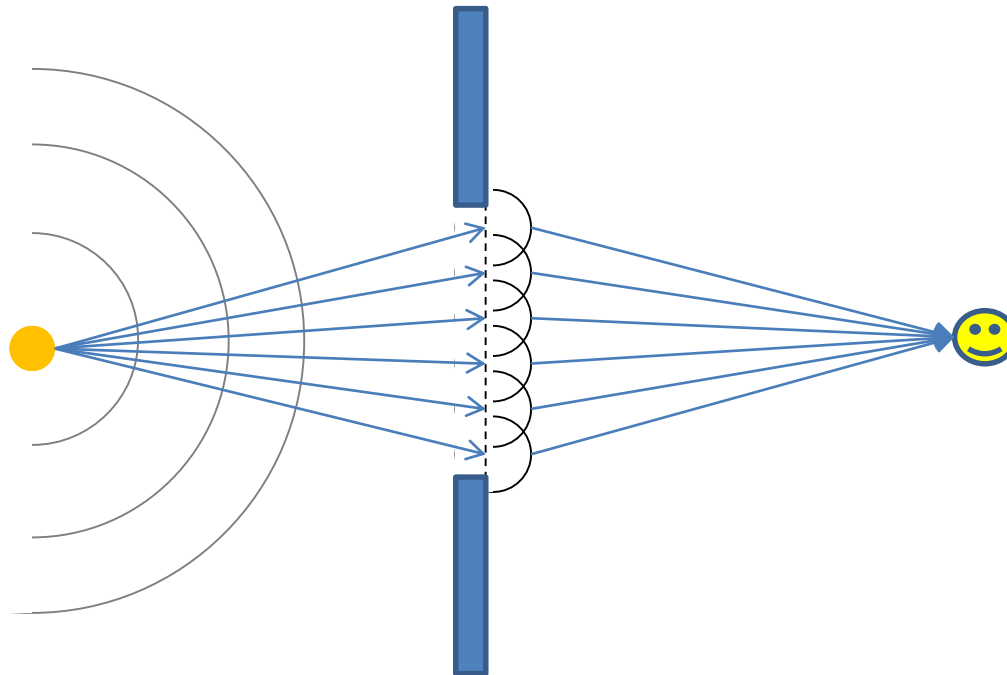
## ホイヘンスの原理

- 任意の境界上で入射波を二次波源と想定



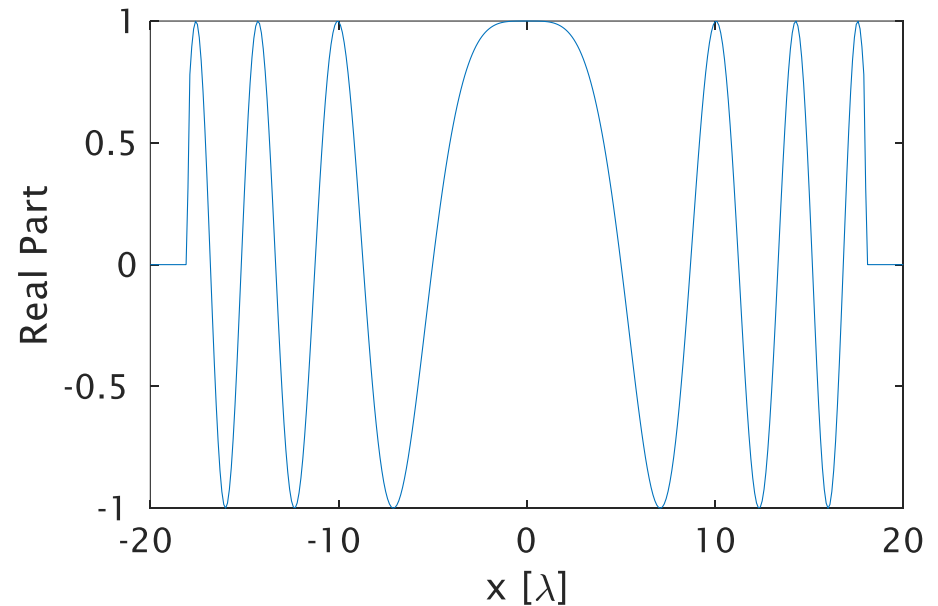
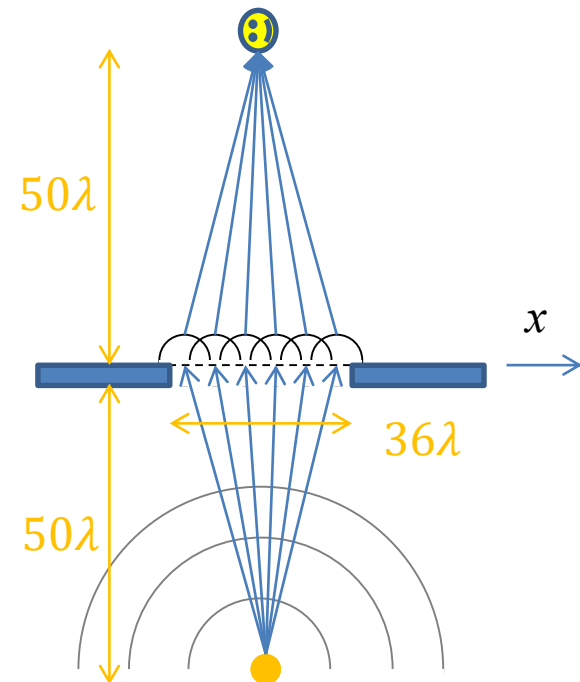
# ホイヘンスの原理とフェルマの原理

- ホイヘンスの原理（波動光学）
  - 任意の境界上で入射波を二次波源と想定
- 開口における回折の例



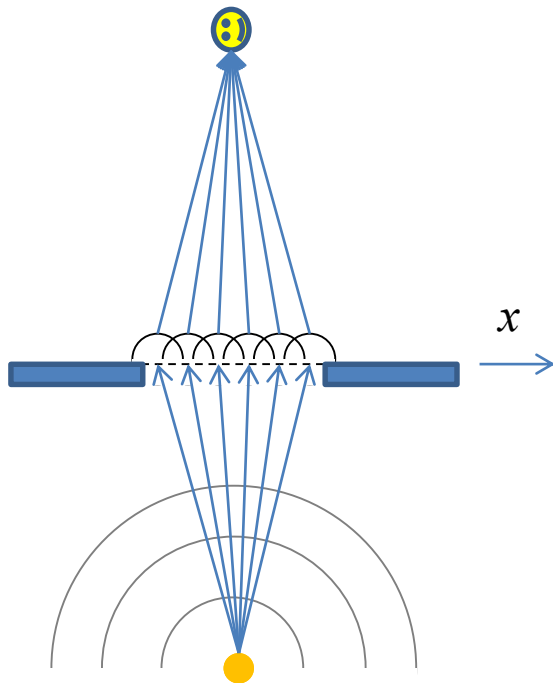
# ホイヘンスの原理とフェルマの原理

- 2次波源からの  
寄与の重ね合わせ

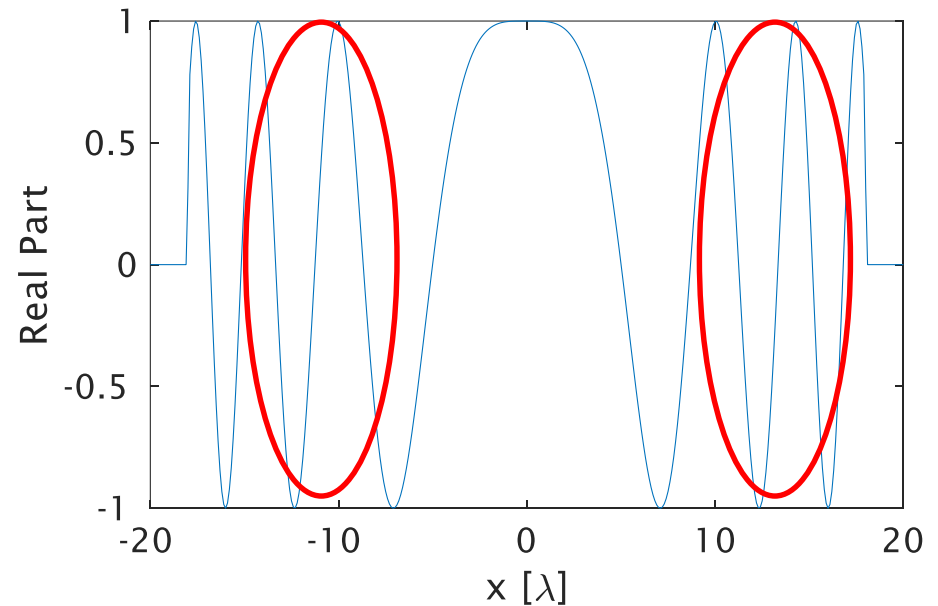


# ホイヘンスの原理とフェルマの原理

- 2次波源からの  
寄与の重ね合わせ



変化が速い領域  
～互いに打ち消し合う

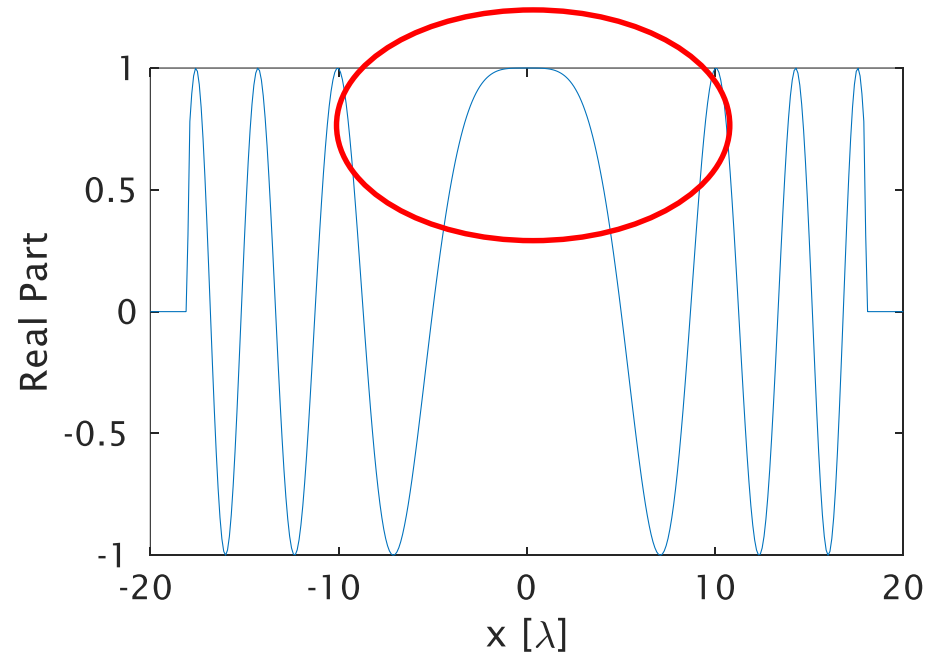
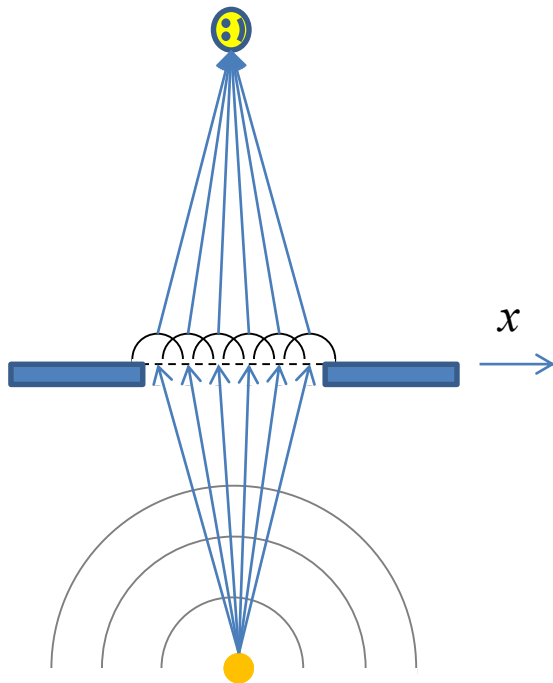




# ホイヘンスの原理とフェルマの原理

- 2次波源からの  
寄与の重ね合わせ

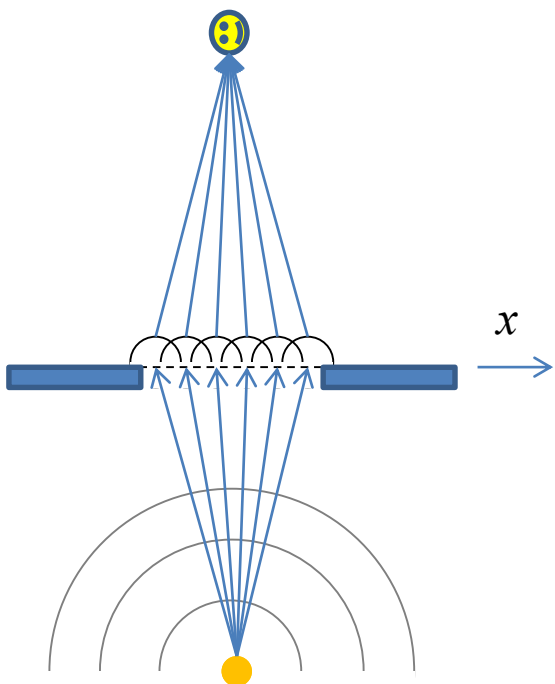
変化が遅い領域  
～打ち消し合わない



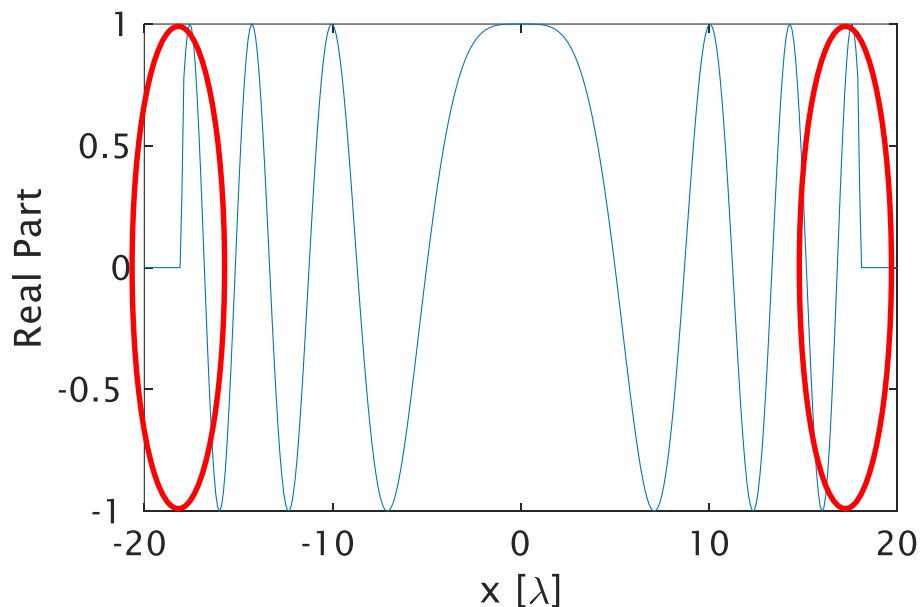
⇒ 行路長が最短となる点周辺

# ホイヘンスの原理とフェルマの原理

- 2次波源からの  
寄与の重ね合わせ



振幅が急に  
変化する点  
～打ち消し合わない

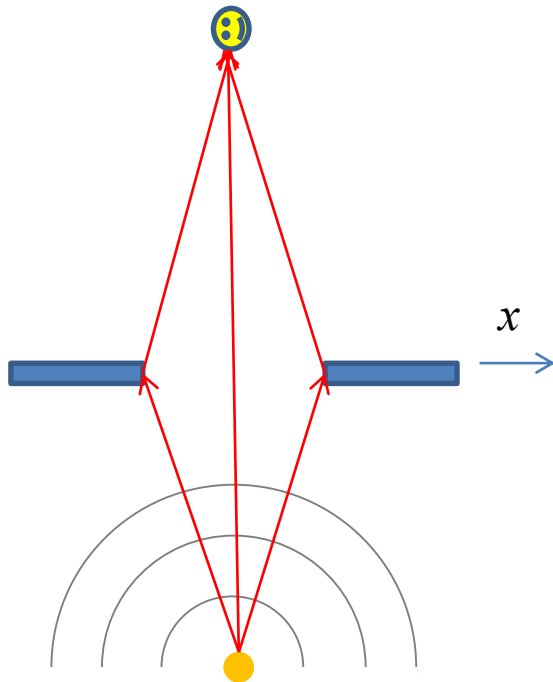


⇒ 行路長が最長となる点周辺

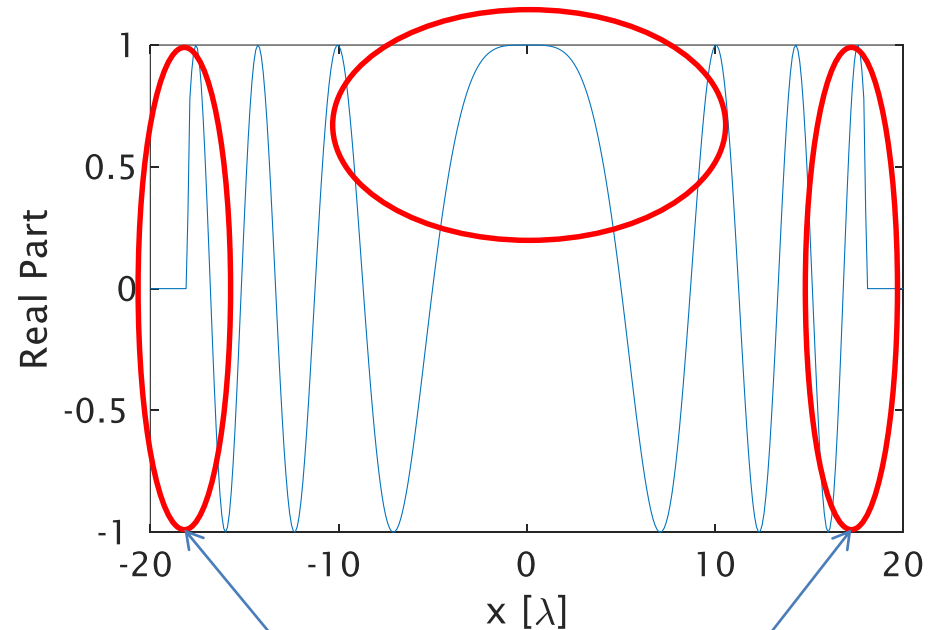
# ホイヘンスの原理とフェルマの原理

## フェルマの原理(幾何光学)

- 光線の経路は光路長の極値をとる



見通し成分



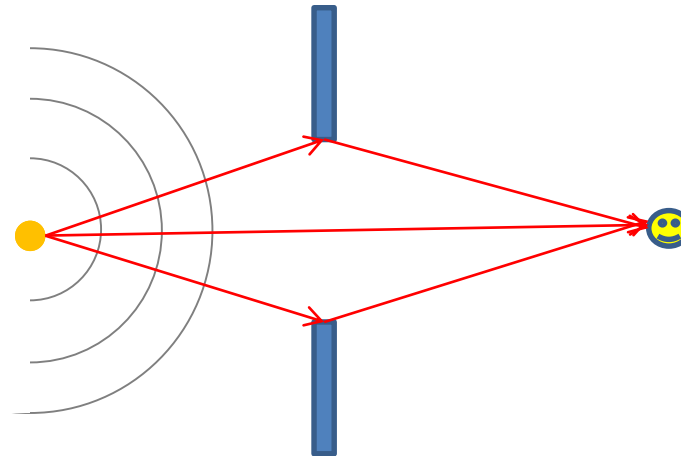
回折波成分

# ホイヘンスの原理とフェルマの原理

ホイヘンスの原理(波動光学)と

フェルマの原理(幾何光学)の等価性

- 見通し線: 極小経路
- 端部の回折: 極大経路



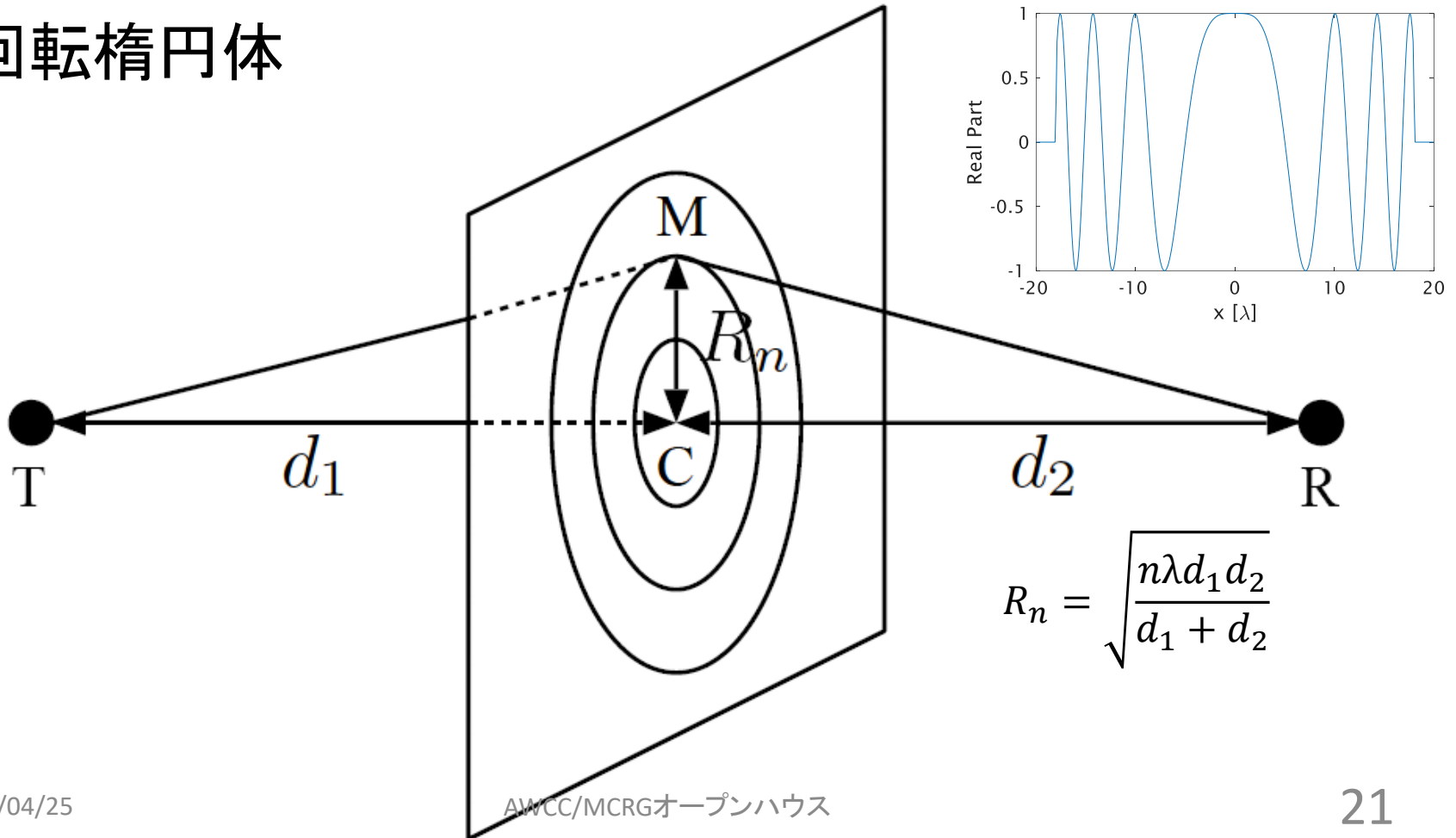
これを理解しておけば電波は見える

# フレネルゾーン

## ・第 $n$ フレネルゾーン

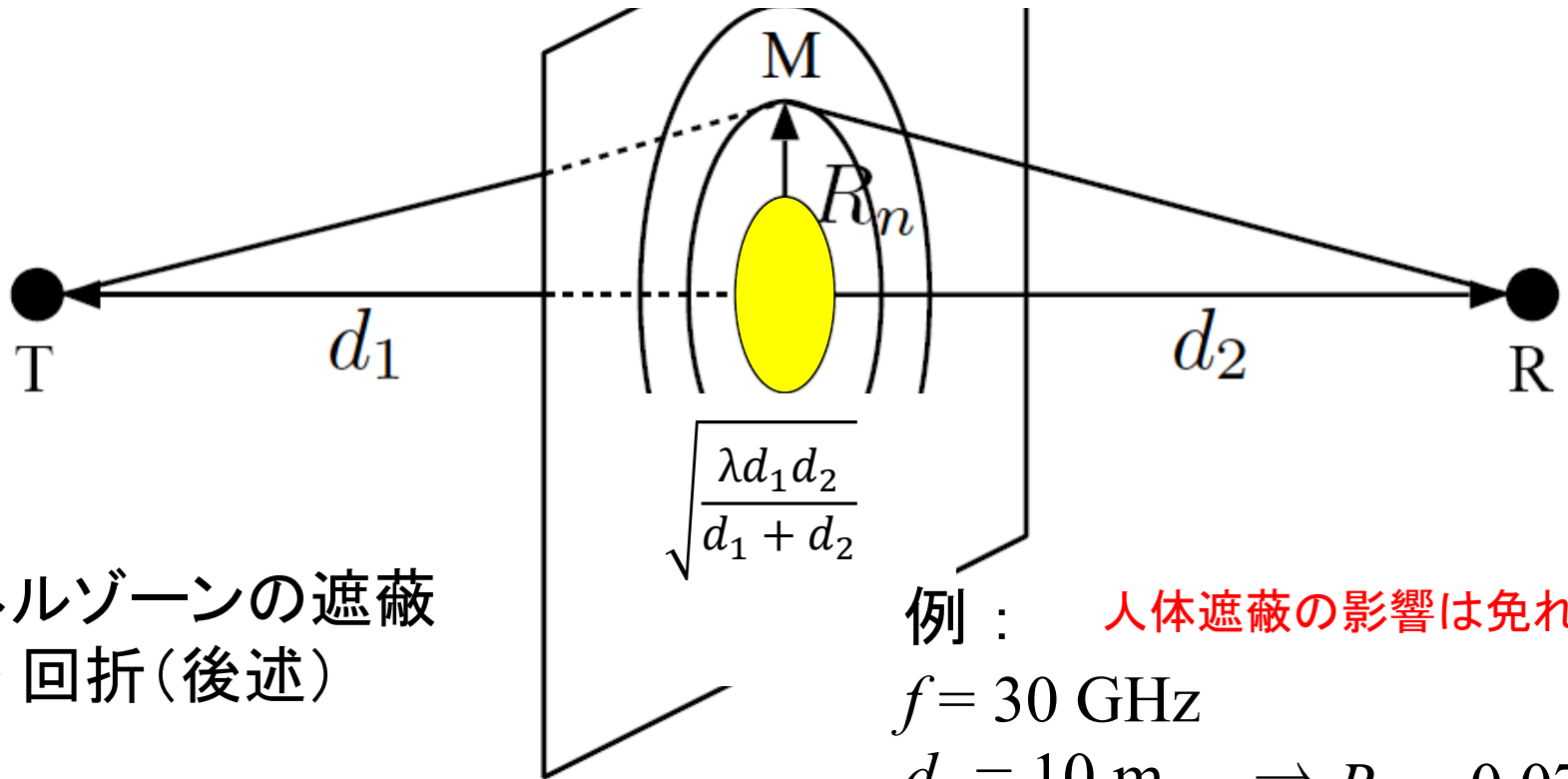
-見通し線との経路差が  $0.5(n-1)\lambda \sim 0.5n\lambda$

-回転楕円体



# 見通し (LOS) とフレネルゾーン

第1フレネルゾーン内に障害物がないこと  
- エネルギーの大半が第1フレネルゾーンに集中



フレネルゾーンの遮蔽  
⇒ 回折(後述)

例： 人体遮蔽の影響は免れない

$$f = 30 \text{ GHz}$$

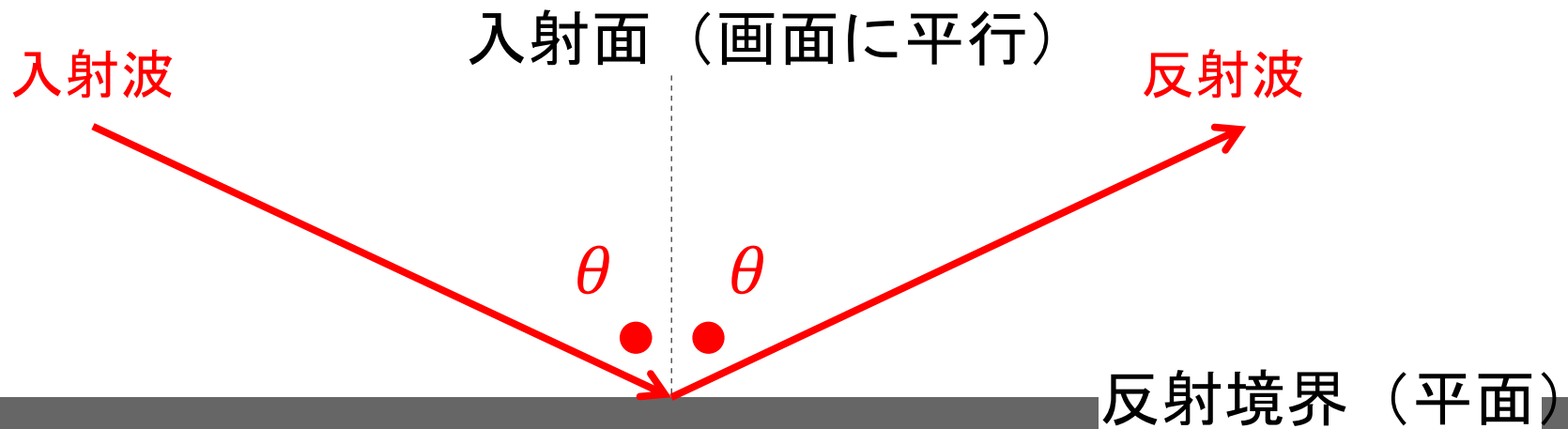
$$d_1 = 10 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad R_1 = 0.07 \text{ m}$$

$$d_2 = 0.5 \text{ m}$$

LOS: Line-of-Sight

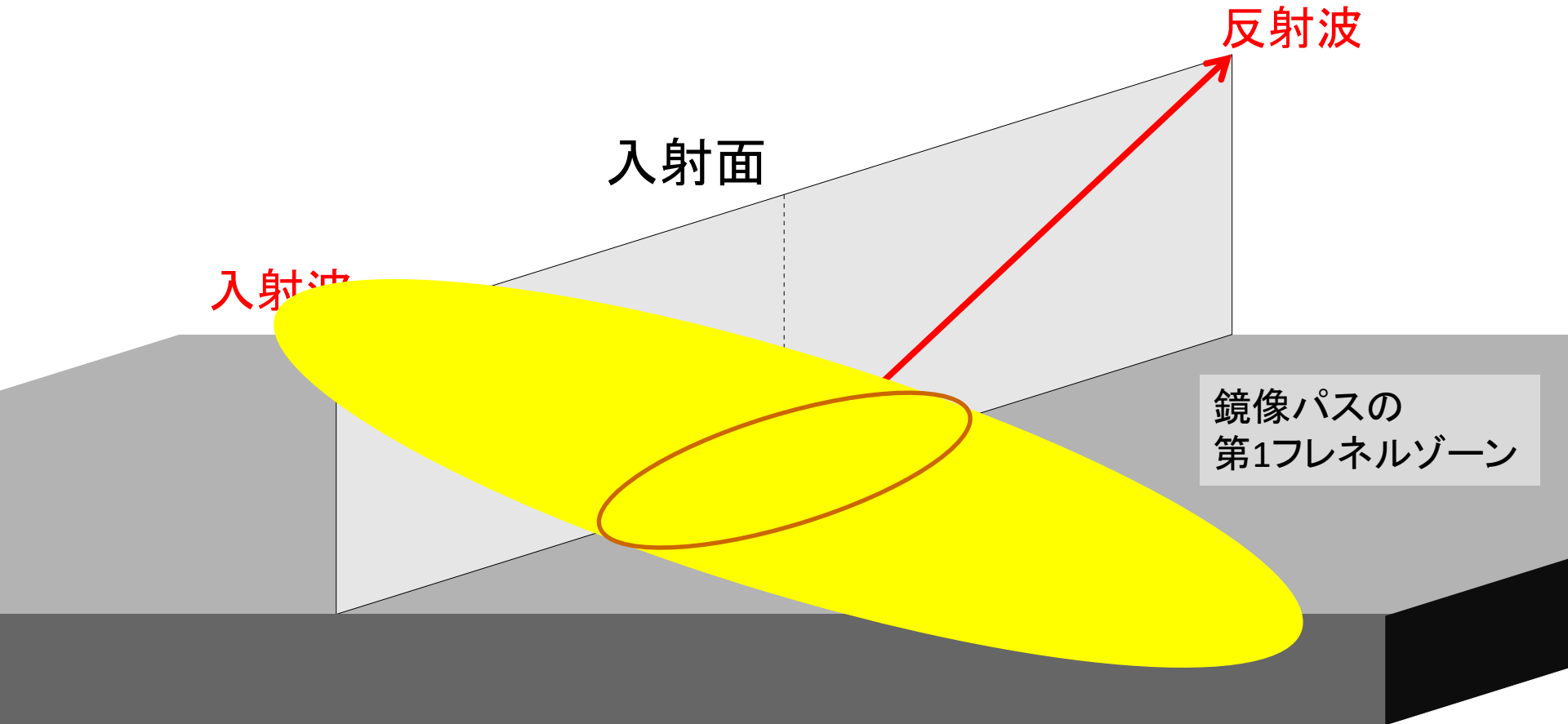
# 反射の法則

レイトレースシミュレーションの基本



比誘電率  $\epsilon_r$

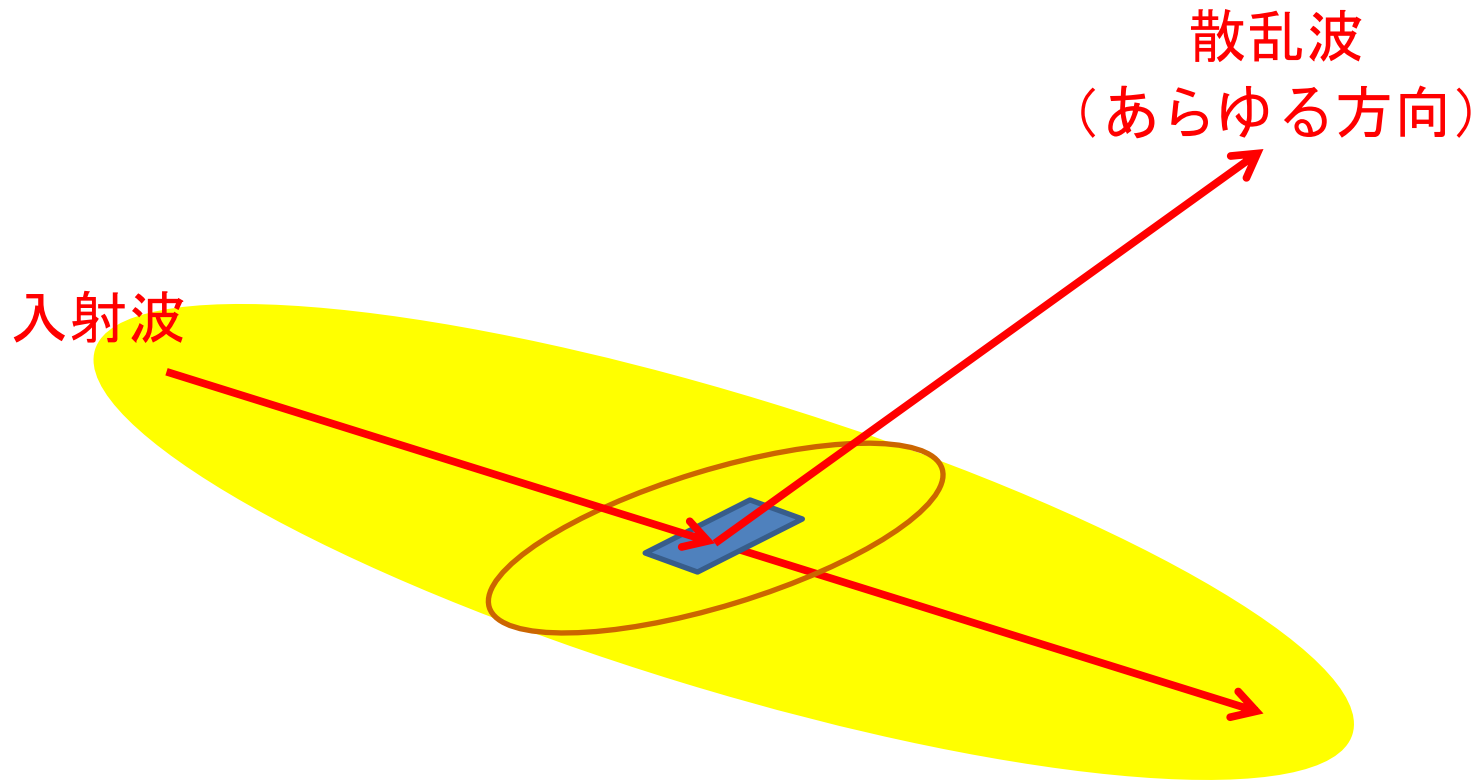
# 反射の法則の適用範囲



鏡像パスの第1フレネルゾーンが境界面に含まれること



# 反射の法則が適用できない場合



レーダ方程式を用いる～全方向への散乱を考慮

# よくある間違い

- 伝搬シミュレーションの精度を上げるために、環境を細部まで精密にモデル化

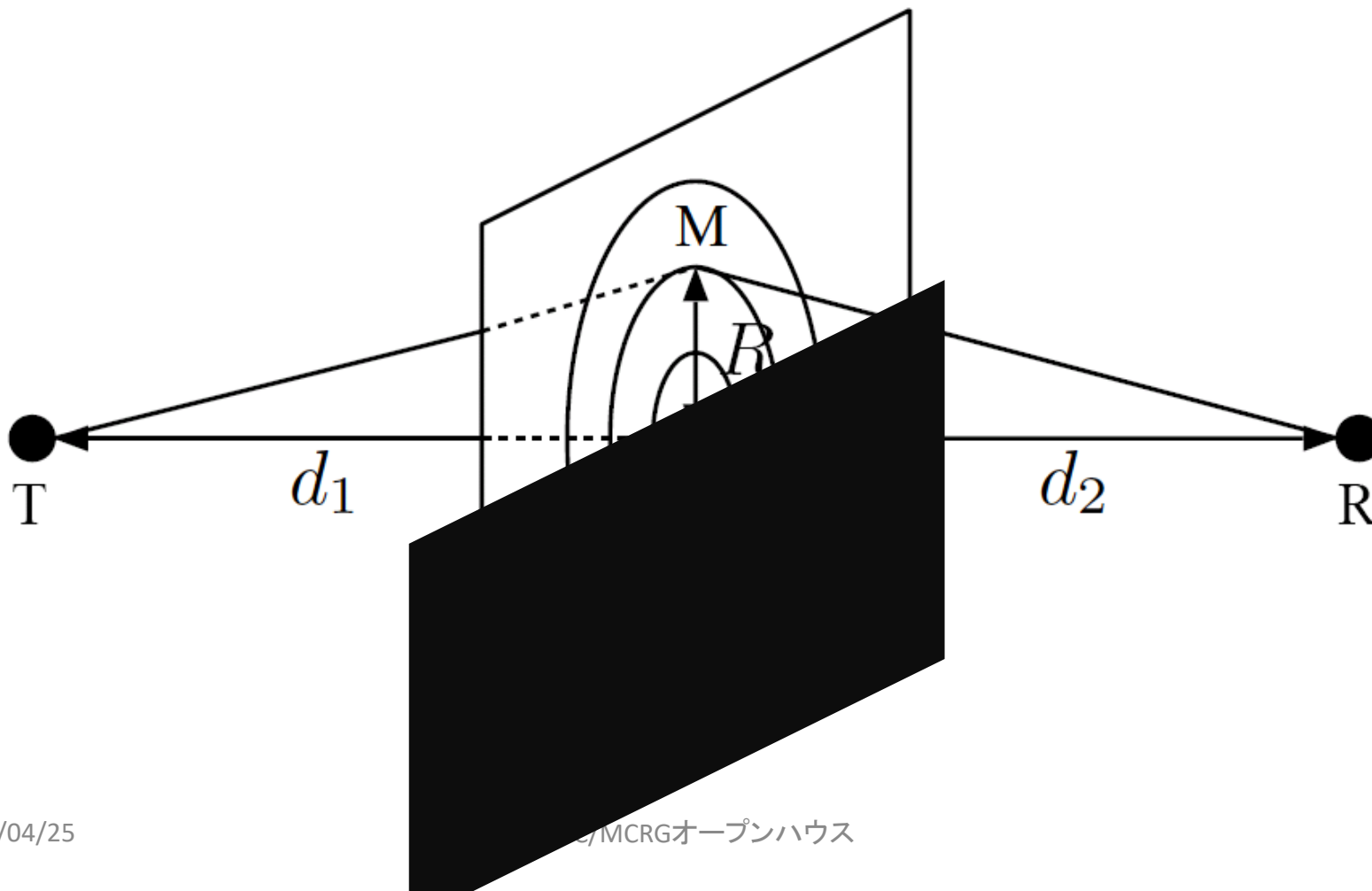


- レイトレース法の適用範囲を逸脱

# フレネルゾーンの遮蔽

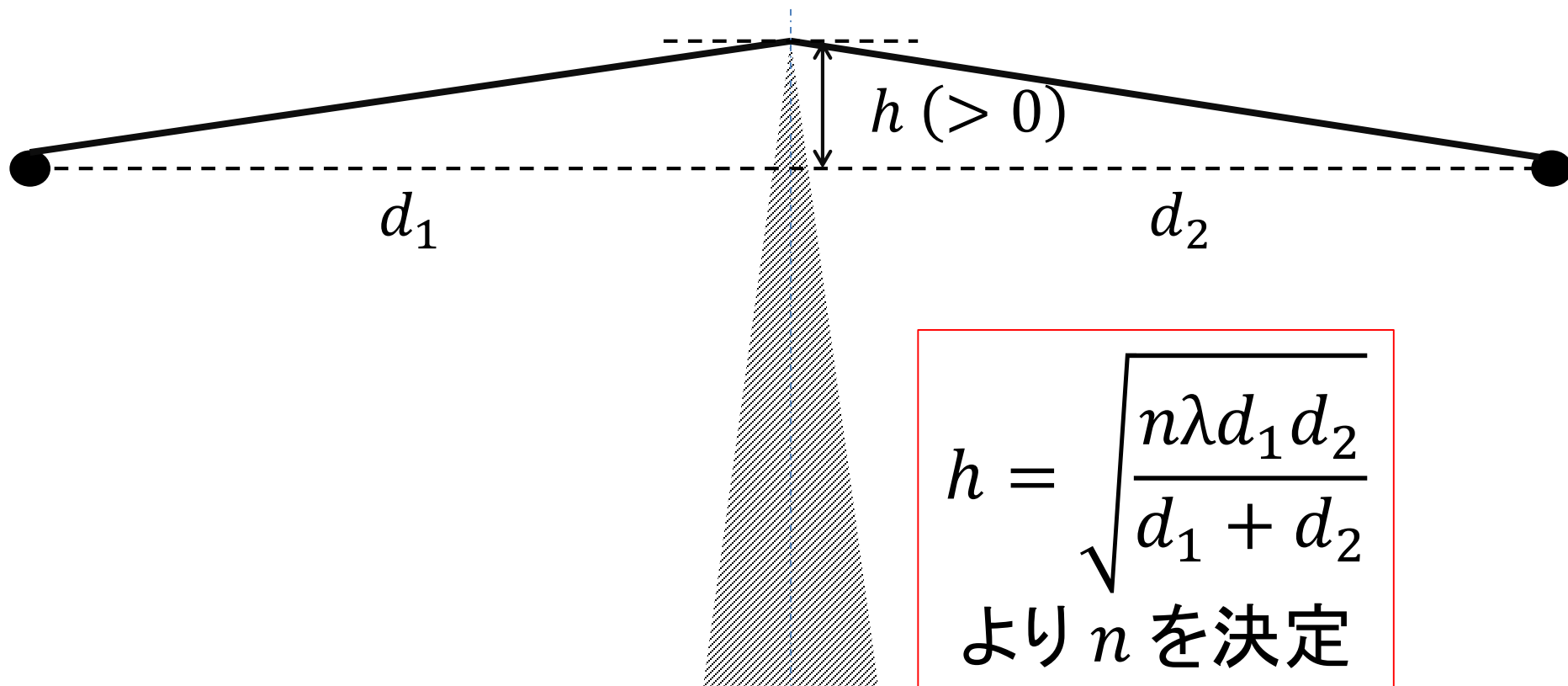
## ・回折波の発生

-吸収スクリーンを想定 ~ 前方散乱のモデル化

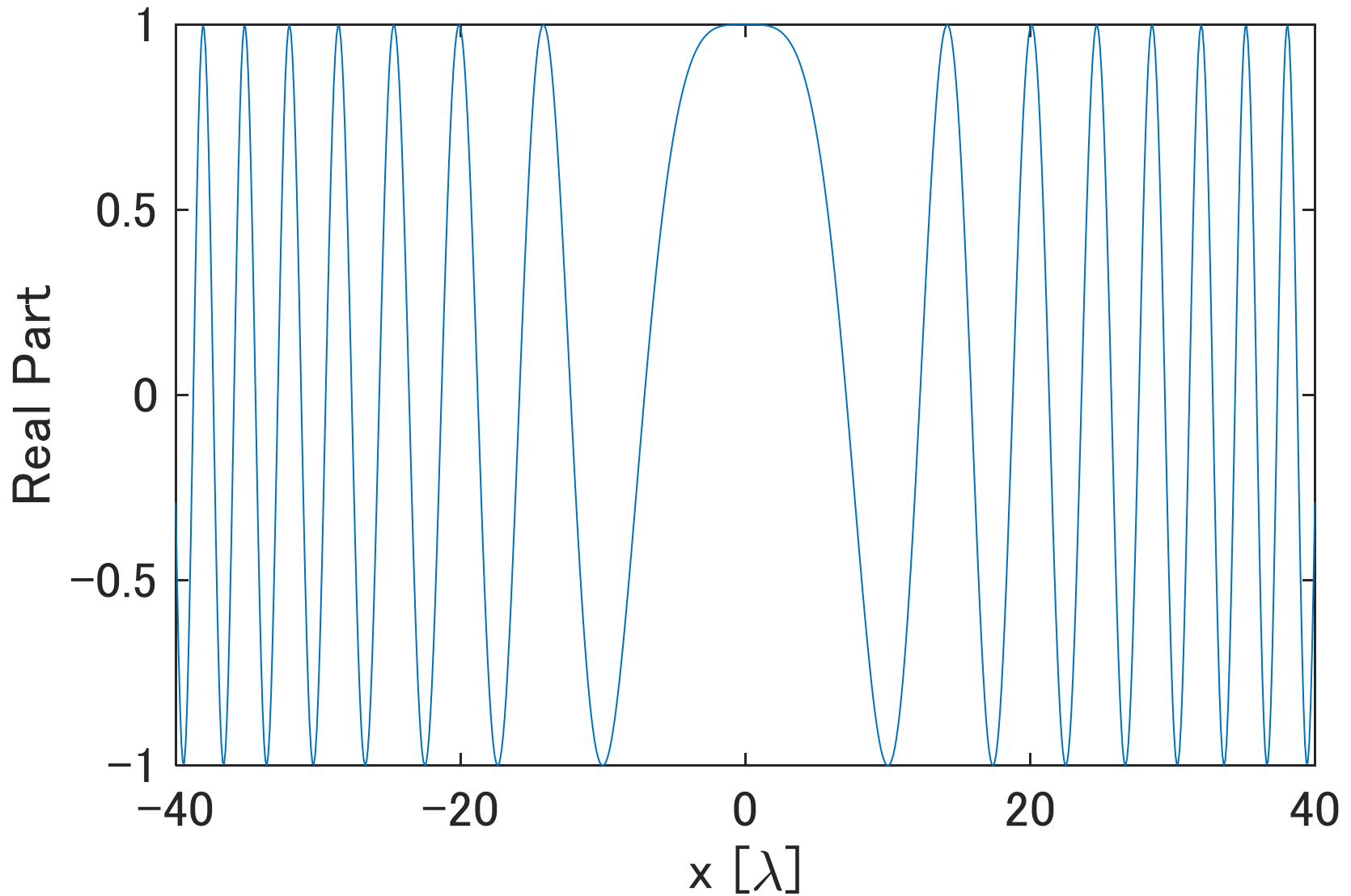


# ナイフエッジ回折

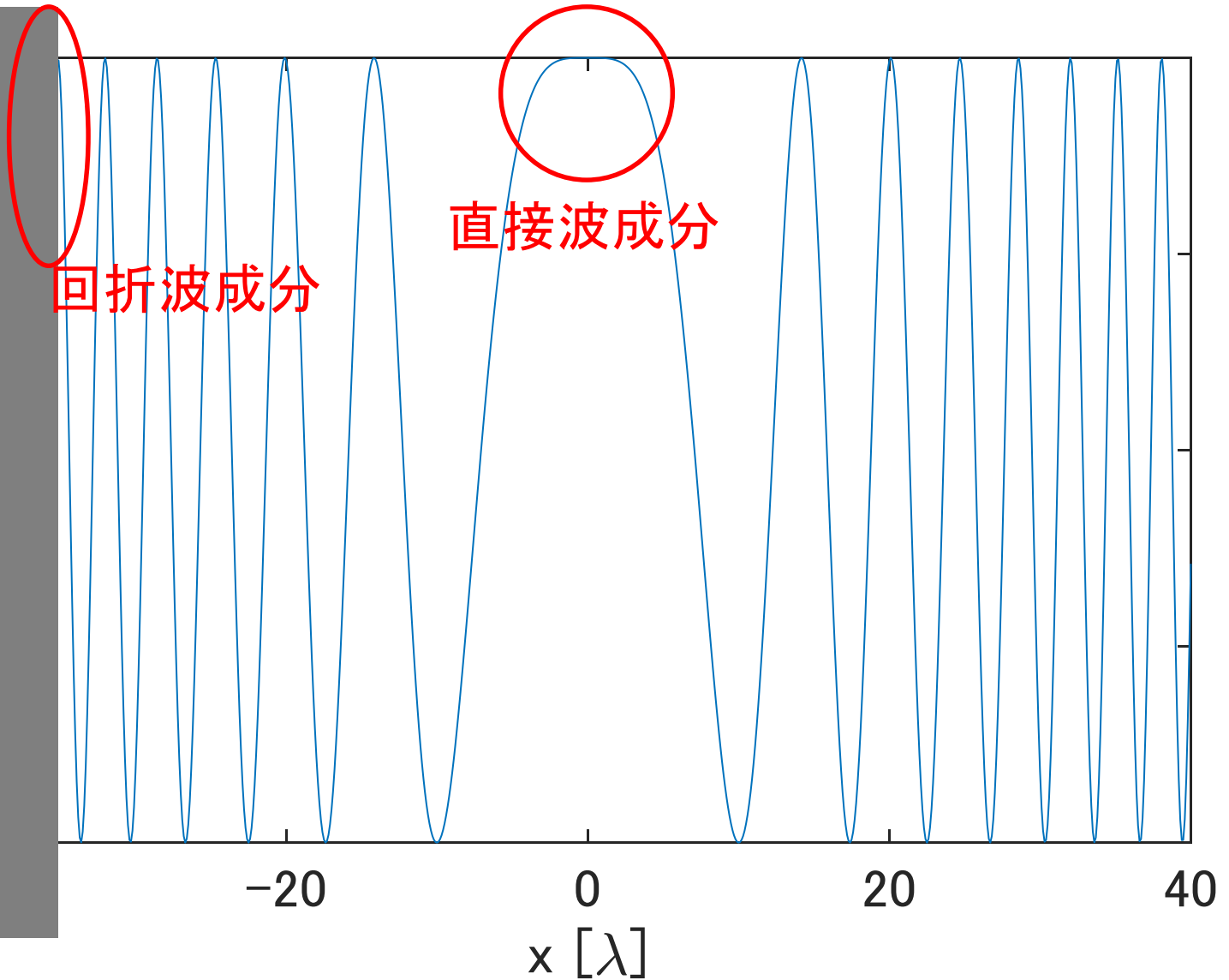
- 第1フレネルゾーンの遮蔽の影響の定量化
  - ホイヘンスの原理から計算



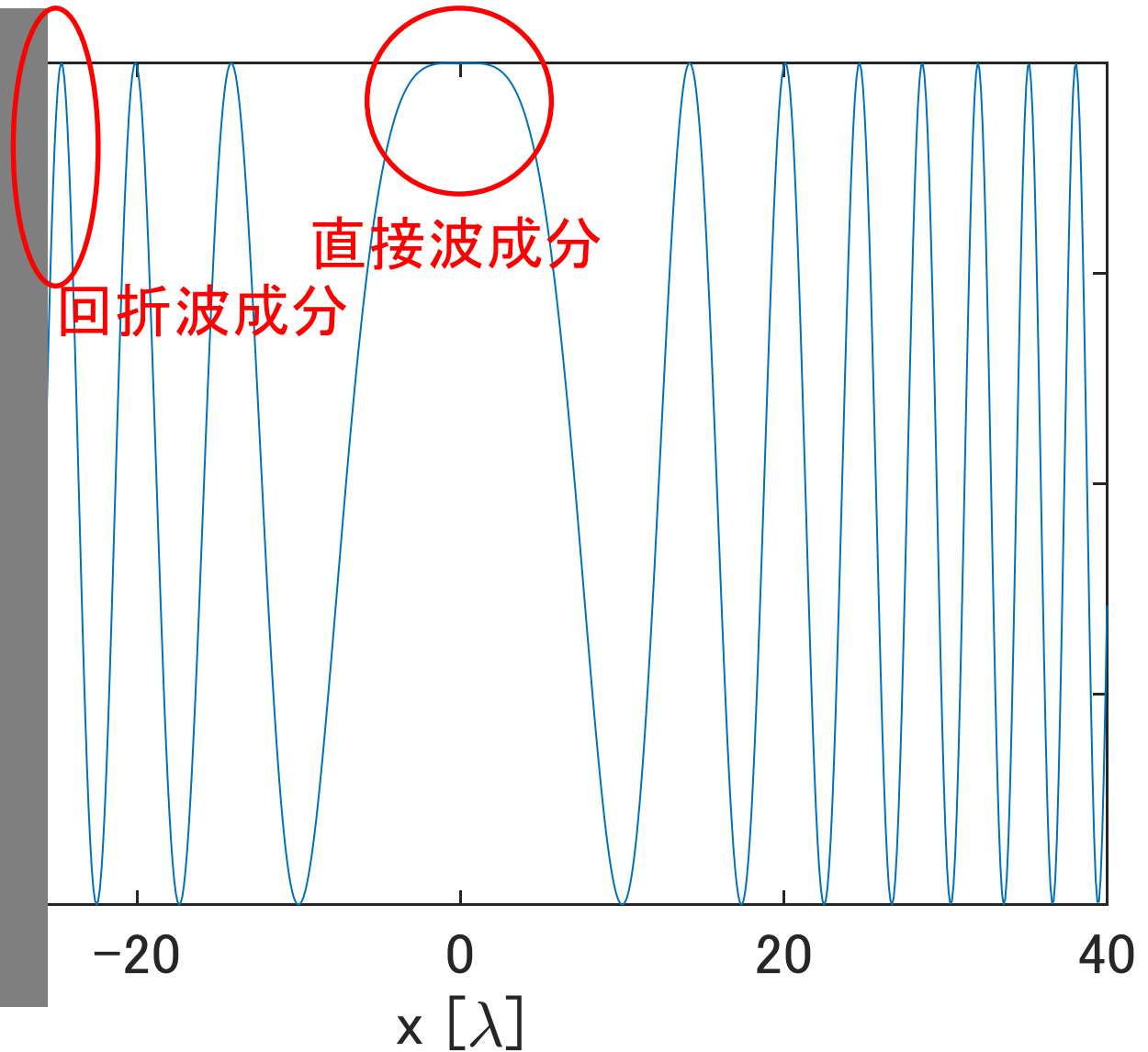
# フレネルゾーンの遮蔽



# フレネルゾーンの遮蔽



# フレネルゾーンの遮蔽

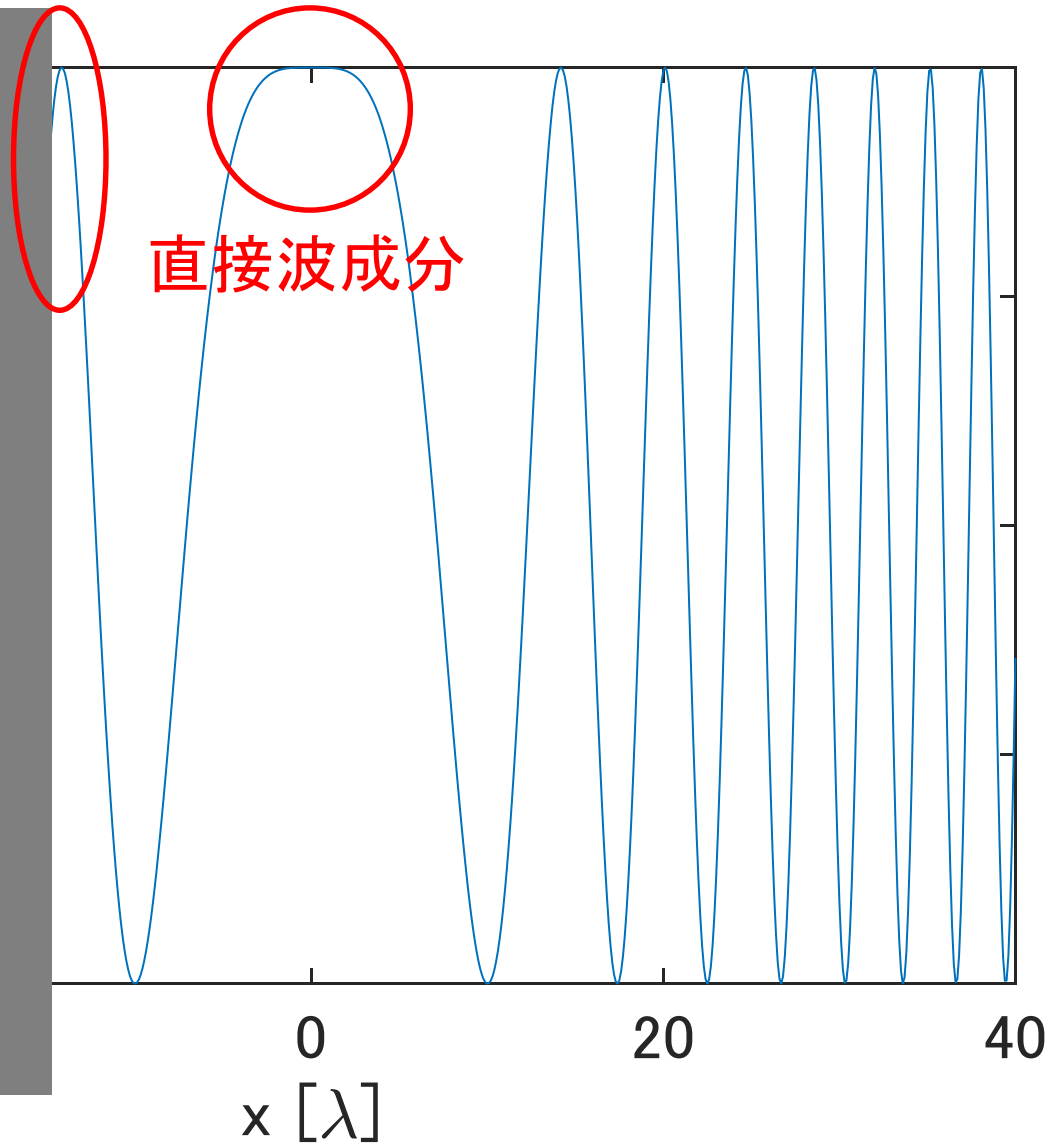


# フレネルゾーンの遮蔽

回折波成分

直接波成分

見通しに近づく  
ほど幅が広い  
→強い回折波

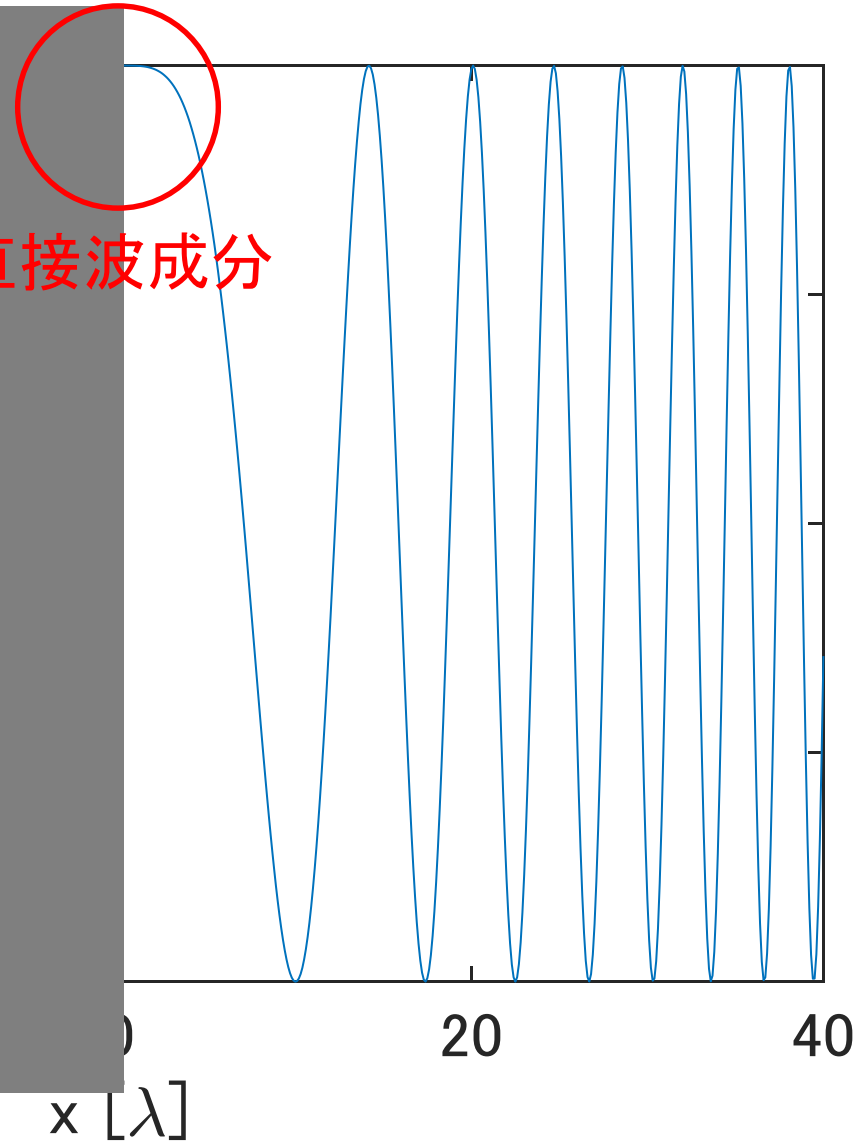




# フレネルゾーンの遮蔽

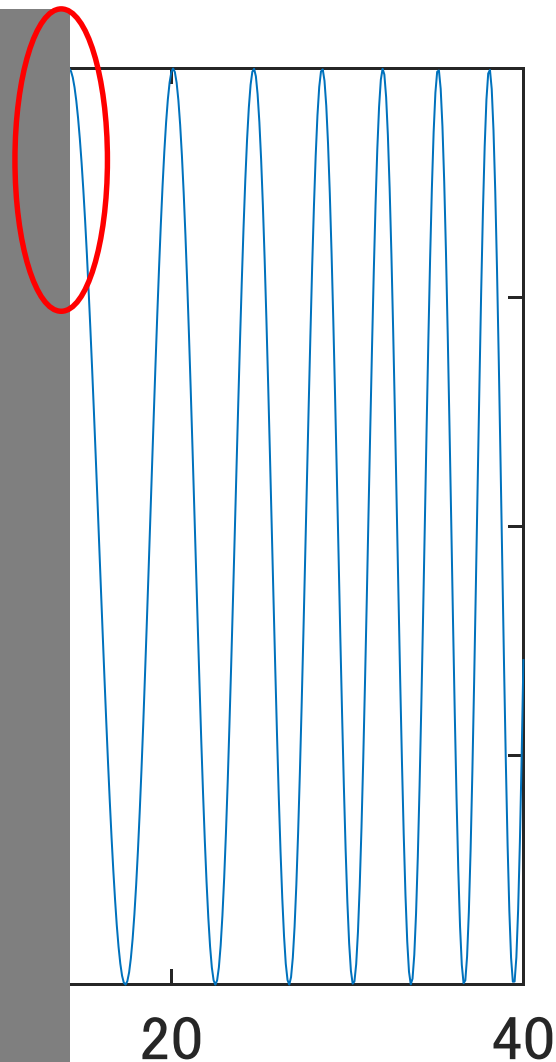
直接波を半分遮蔽  
→振幅が半分 (-6dB)

直接波成分



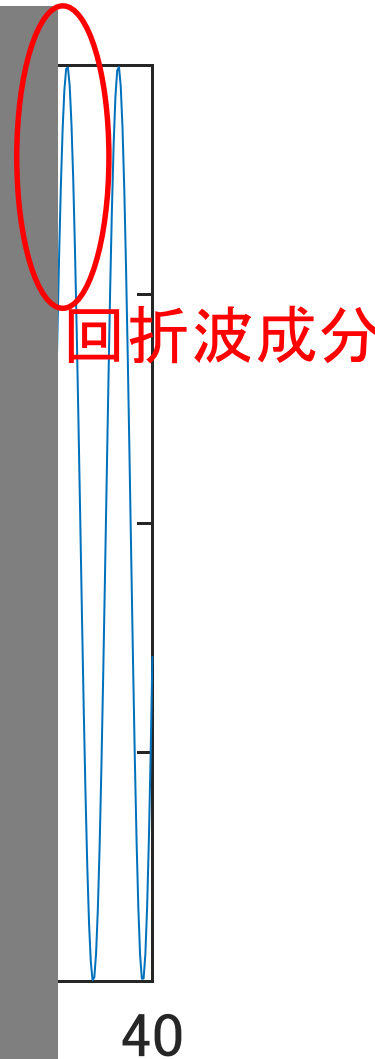
# フレネルゾーンの遮蔽

回折波成分



# フレネルゾーンの遮蔽

見通しから遠ざかる  
ほど幅が狭い  
→弱い回折波

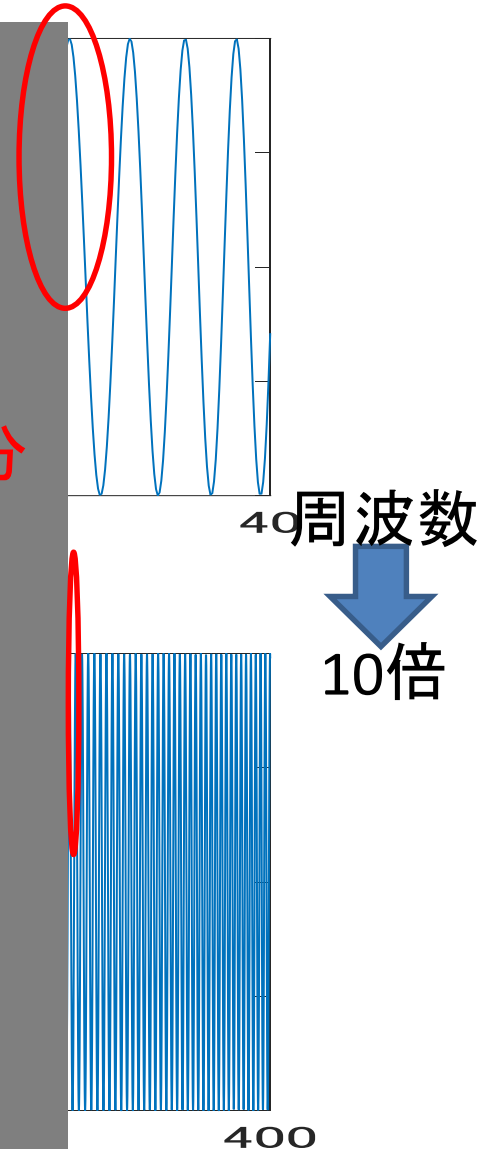


# フレネルゾーンの遮蔽

周波数が高いほど  
幅が狭い  
→弱い回折波

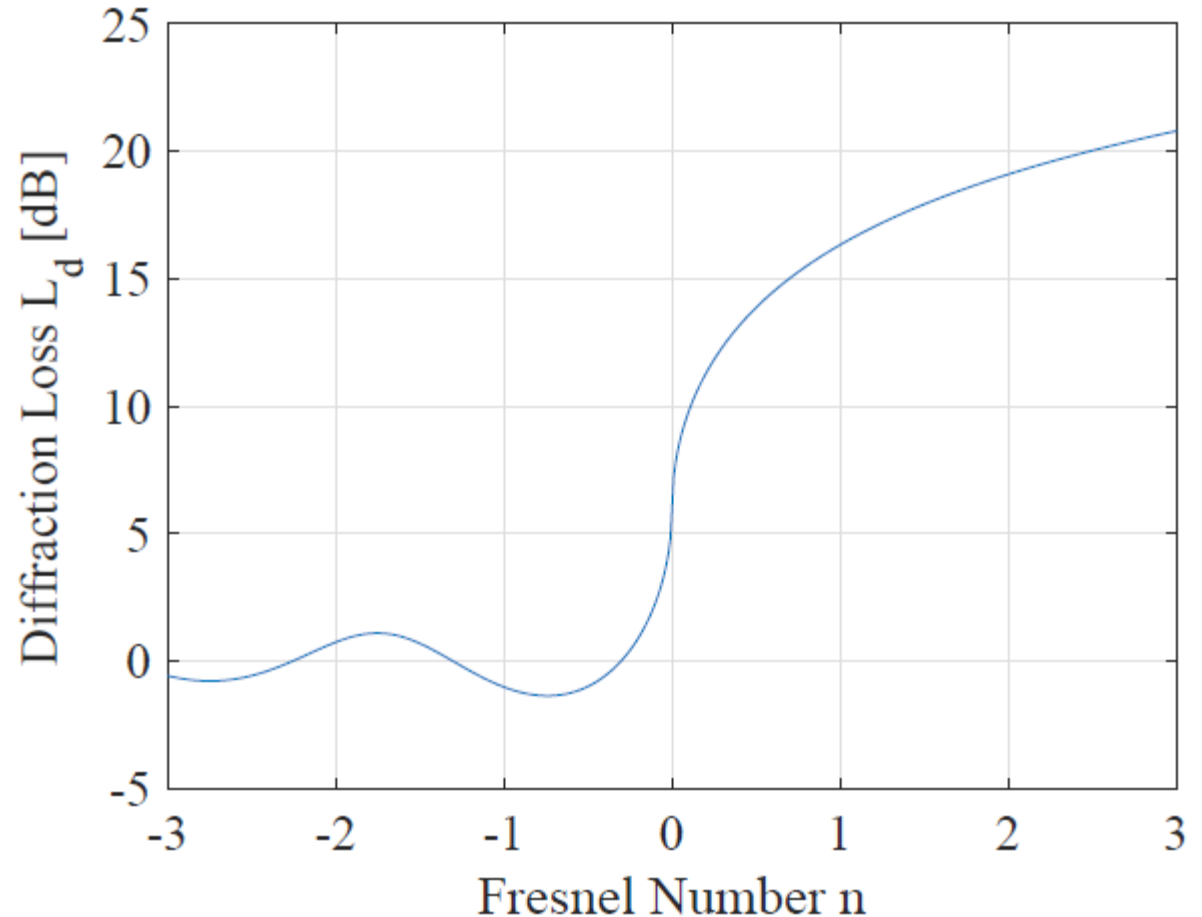
「周波数が高くなると回折しなくなる」

回折波成分



# ナイフエッジ回折係数

- 見通し線の遮蔽  
~ -6 dB
- 第1フレネルゾーンの遮蔽  
~ -16 dB



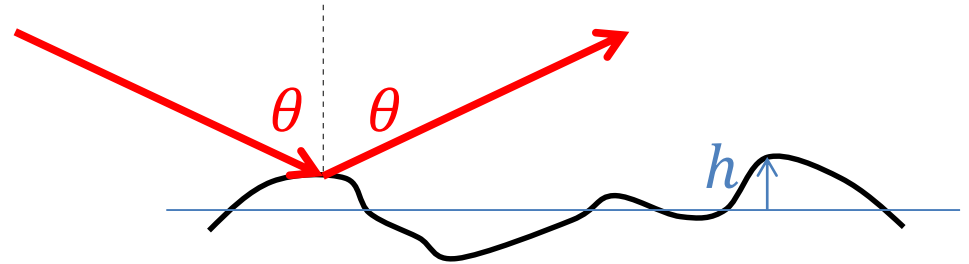
# 粗面条件

- 反射の法則は境界面が平滑な場合のみ成立
- 鏡と白紙のアナロジー: 暗室に置いた光源



# レイリーの基準

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



- $\sigma_h$  : 表面粗さ  $h$  の標準偏差
- 平滑と見なせる条件 :  $g \ll 1$ 
  - 例 : 30 GHz ・ 垂直入射  $\Rightarrow \sigma_h \ll 0.8 \text{ mm}$   
～ 微視的には満足, 巨視的には不成立
- 平滑と見なせないとき  
 $\Rightarrow$  角度広がり・遅延広がりの原因, レイリー分布

# (再)入門 電波伝搬 まとめ

## 1. 自由空間伝搬

- 周波数特性はアンテナの大きさに起因

## 2. 幾何光学と波動光学

- フェルマの原理とホイヘンスの原理の等価性

## 3. 波動光学による伝搬現象の説明

- フレネルゾーン: 高い周波数ほど小さい
- 反射と回折: フレネルゾーンで説明
- 粗面: 粗ければレイリー散乱(フェージング)