

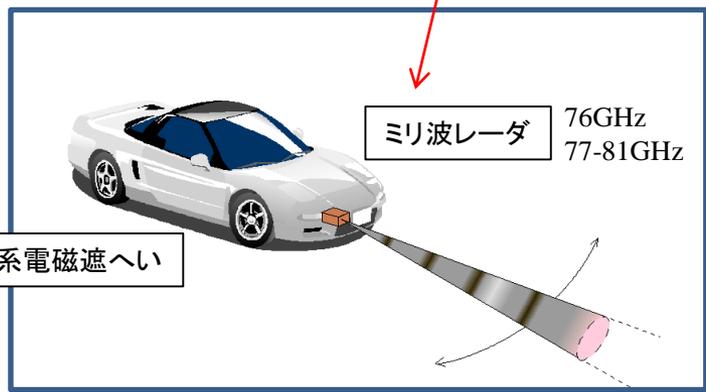
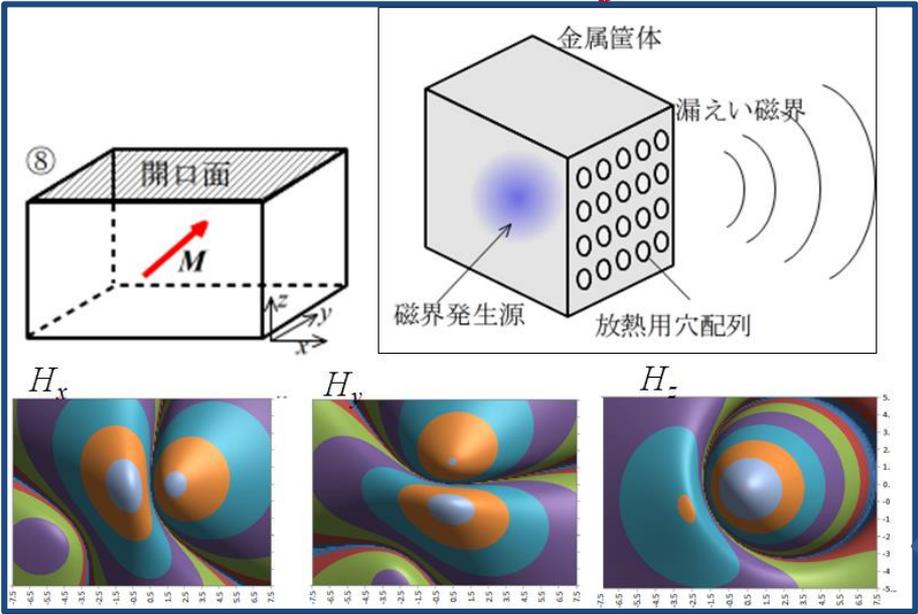
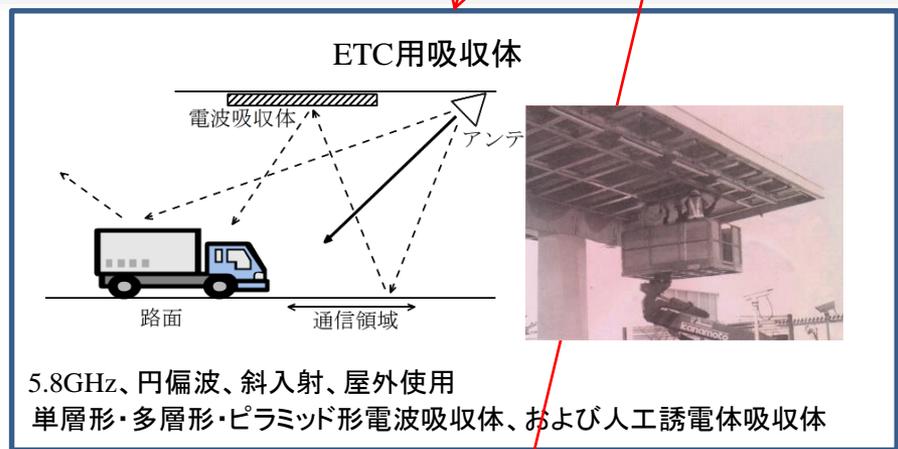
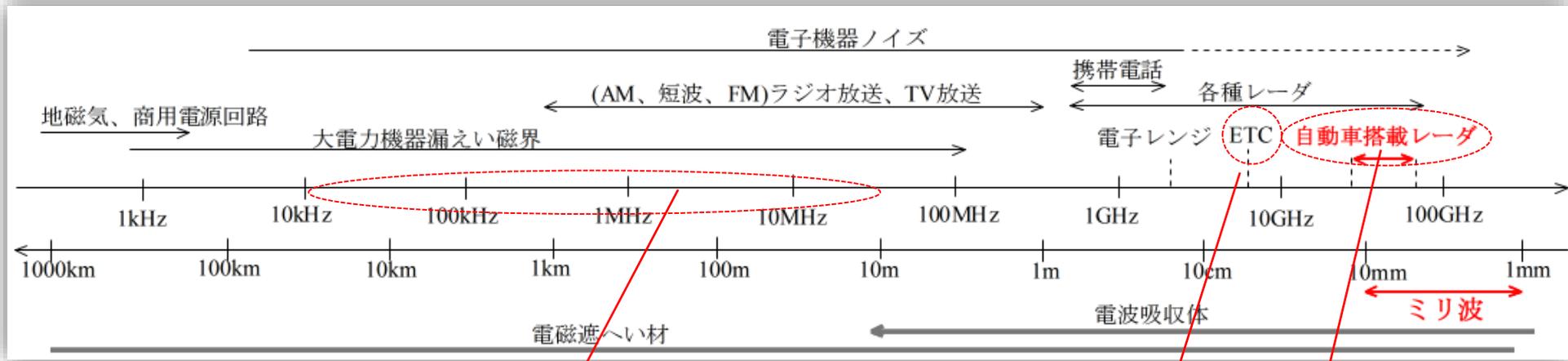
— 電波伝搬基礎から設計まで —

ミリ波帯用電磁波透過材、遮へい材、吸収材の考え方と設計法基礎

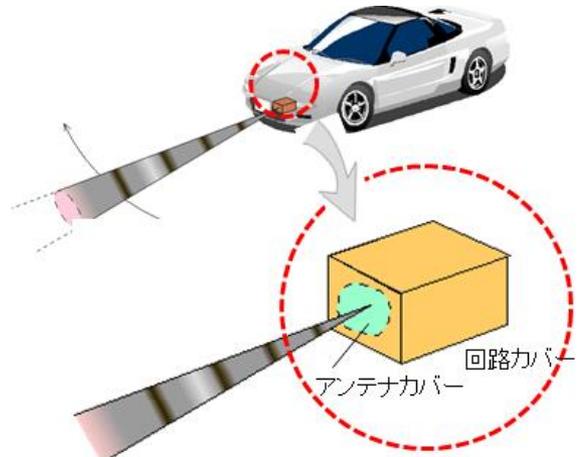
目次

1. ミリ波レーダ、透過材、遮へい材、吸収材
2. 透過材、遮へい材、吸収体設計に必要な電波伝搬基礎
 - 2.1 平面波の伝搬
 - 2.2 伝送線路と電気回路の基礎行列、層状媒質の等価回路
3. 電磁波透過材、遮へい材、吸収材の構成材料
 - 3.1 透過材、遮へい材、吸収材構成材
 - 3.2 導電材の比誘電率
 - 3.3 人工誘電体
4. 透過材の考え方と設計法
 - 4.1 単層構造の透過特性、全透過条件
 - 4.2 層状構造の全透過構造
 - 4.3 斜め入射における全透過条件演習(1) 単層構造の反射・透過特性と全透過
演習(2) 誘電体/周期穴金属板/誘電体の全透過構造
5. 電磁遮へいの考え方と設計法
 - 5.1 電子機器筐体と電磁遮へい、電磁遮へい材のモデル
 - 5.2 導電材の遮へい特性
 - 5.3 各種の遮へい手法
 - 5.4 遠方界と近傍界演習(3) 導電材の遮へい特性
6. 電波吸収体の考え方と設計法
 - 6.1 各種の電波吸収体
 - 6.2 単層構造電波吸収体
 - 6.3 2層構造電波吸収体演習(4) 単層構造電波吸収体の吸収特性

1. ミリ波レーダ、透過材、遮へい材、吸収材

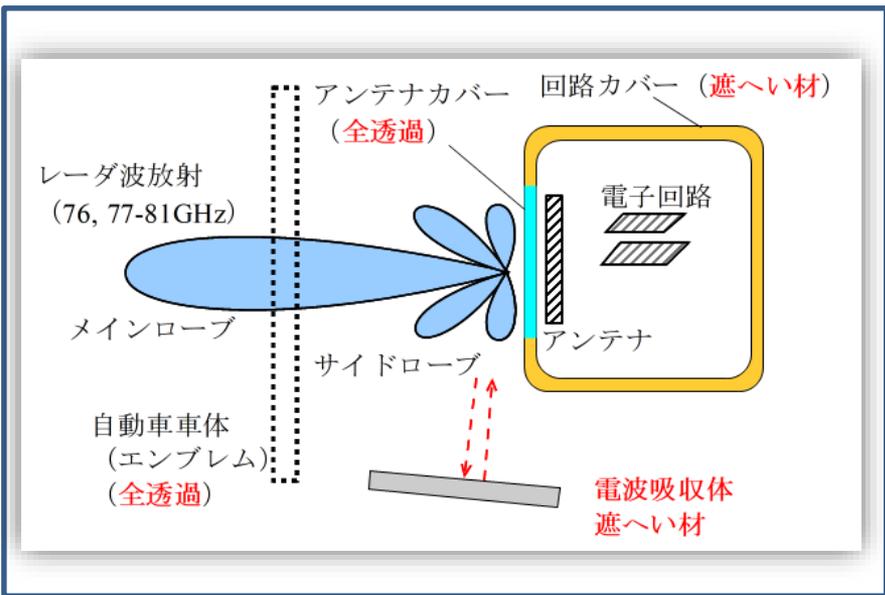


ミリ波レーダと透過材、遮へい材、吸収体

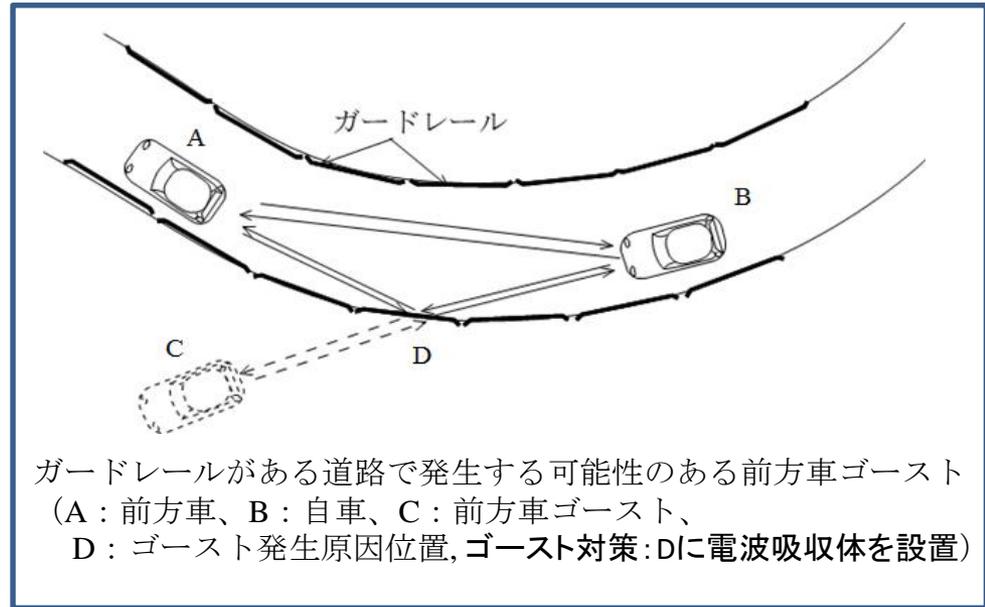


項目	仕様等
レーダ方式	FMCWなど
中心周波数	76GHz、77~81GHz
送信電力	10mW以下
偏波	45° 直線偏波、または円偏波
最大検知距離	100m~120m
ビームスキャン	±45° 程度、電子式、または機械式
消費電力	0.5W程度

ミリ波レーダ用 透過材、遮へい材、吸収体



インフラ用 電磁干渉防止吸収体／遮へい材

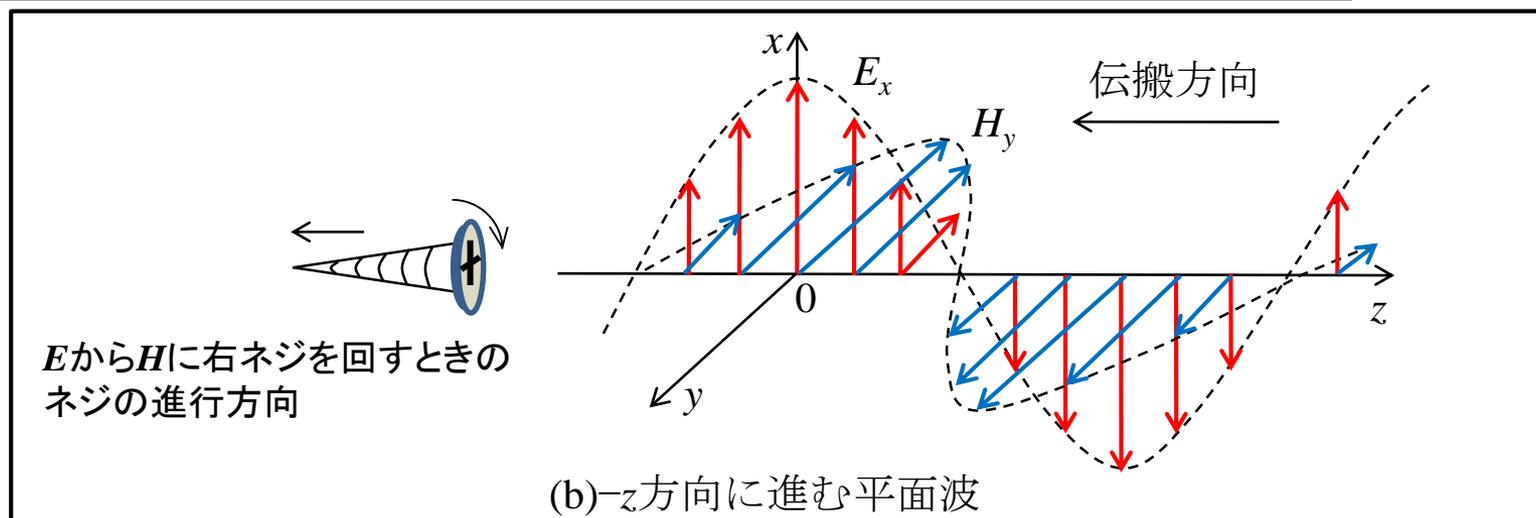
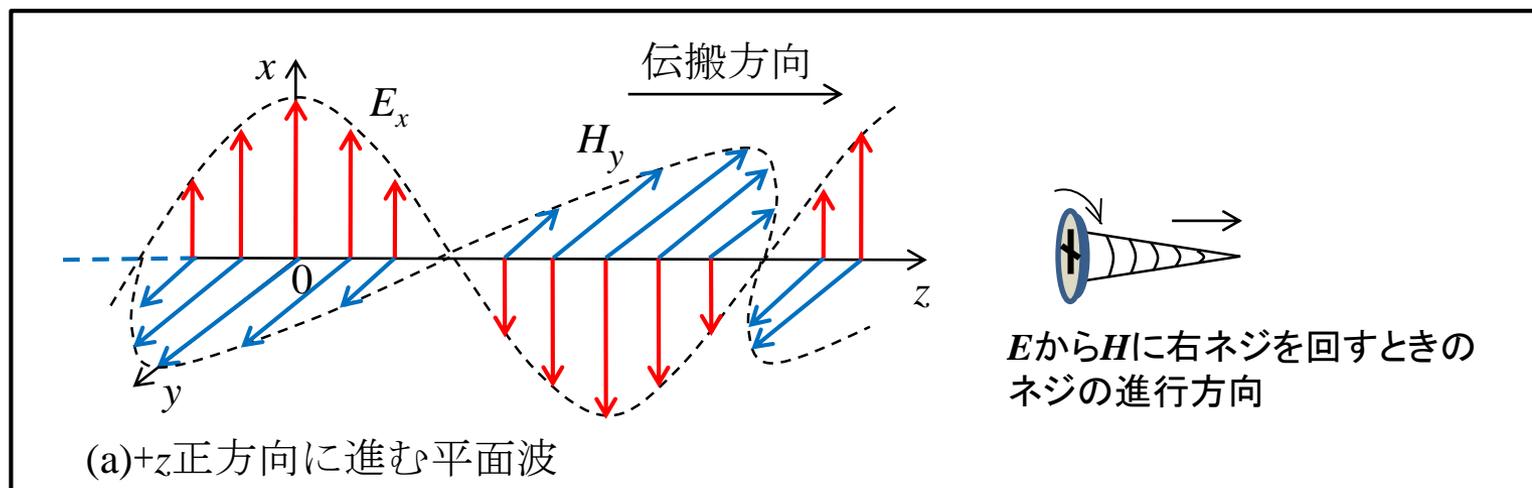


2. 透過材、遮へい材, 吸収体設計に必要な電波伝搬基礎

2.1 平面波の伝搬

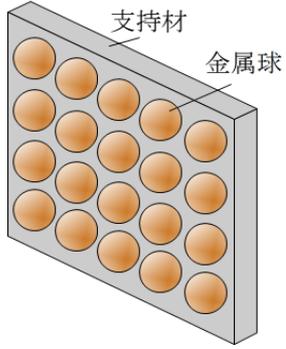
平面波: 自由空間(無限に広い真空の空間)を伝搬する電磁波

- ・電界 E と磁界 H が対になり伝搬
- ・電界 E 、磁界 H 、伝搬方向は互いに直交
- ・ E と H の振幅比は伝搬する媒質により定まる一定値($E/H=Z_w$ —波動インピーダンス)

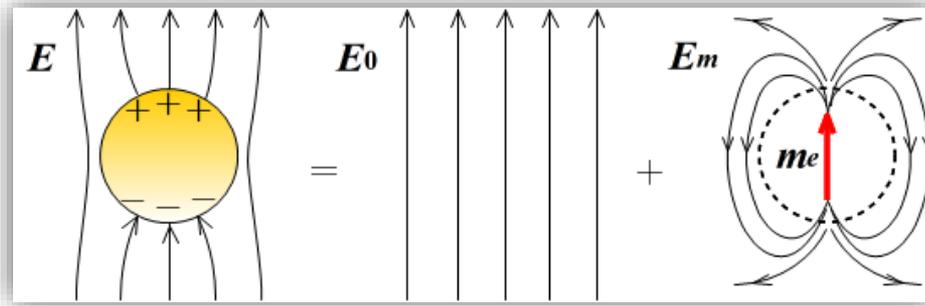


人工誘電体の誘電率

(1) 高誘電率を示す人工誘電体



初期の人工誘電体



金属球→電気ダイポール m_e
 m_e により発生する電界 E_m

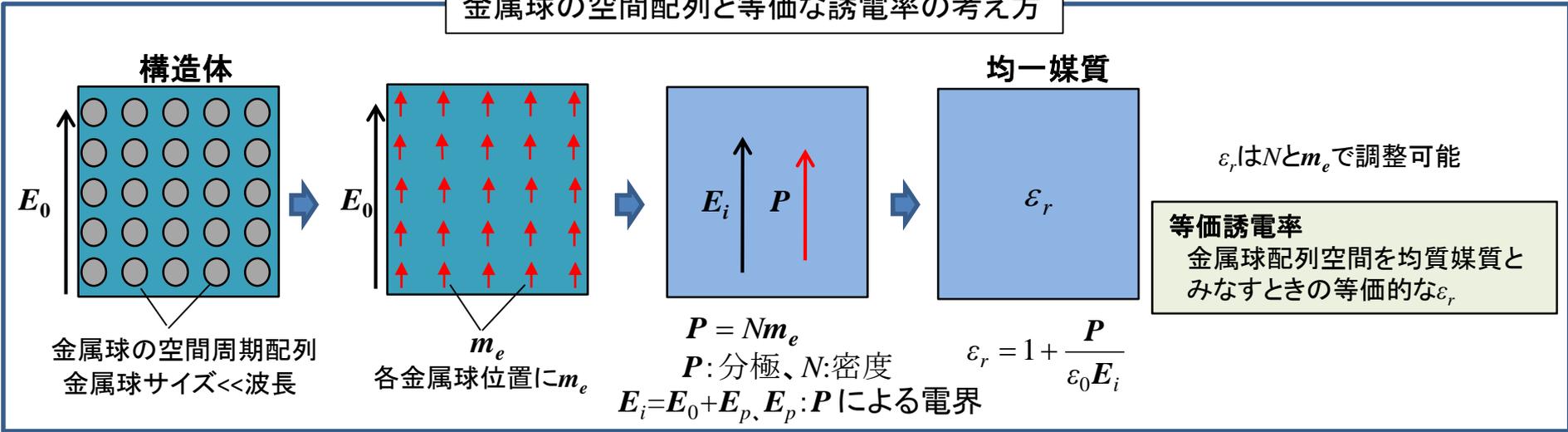
$$E = E_0 + E_m$$

平行電界中に置いた金属球は電気ダイポールとして作用



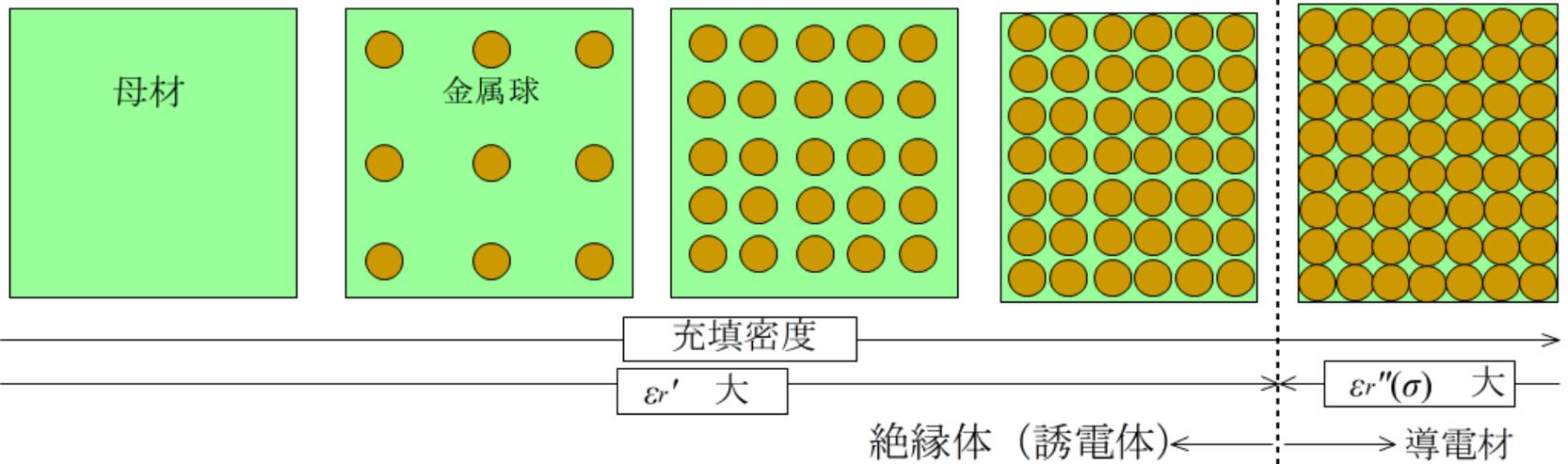
金属球の空間配列は、電気ダイポールの配列と同等

金属球の空間配列と等価な誘電率の考え方



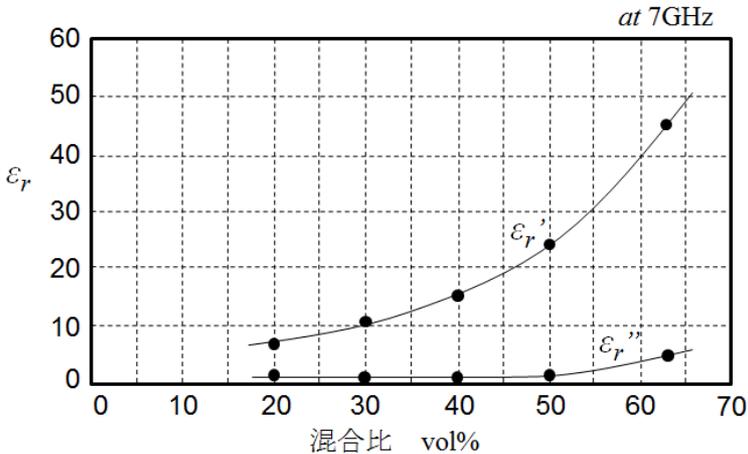
金属体配列密度 N 大 \Rightarrow 電気ダイポール密度 m_e 増加 \Rightarrow 分極 P 増加 \Rightarrow 比誘電率実数部 ϵ_r '増加

金属体充填材の特性 人工誘電体(高誘電率誘電体)→導電材のイメージ



高誘電率誘電体

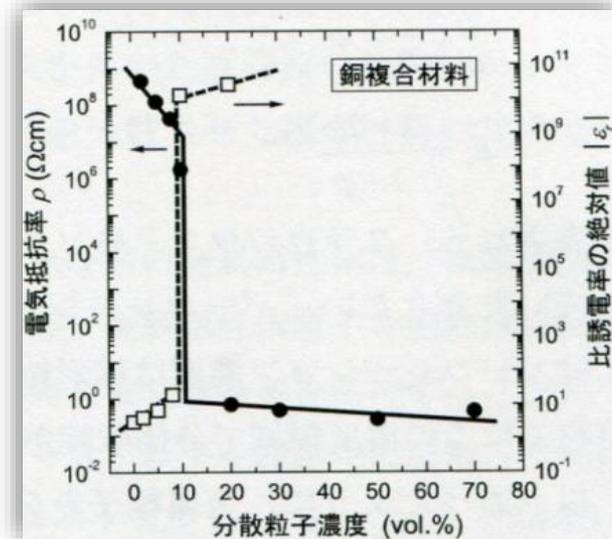
パーマロイ粉混合材(磁性金属粉混合材)
金属粉⇒誘電率の増加
(磁気特性は省略)



金属体充填率が高くなるほど高誘電率

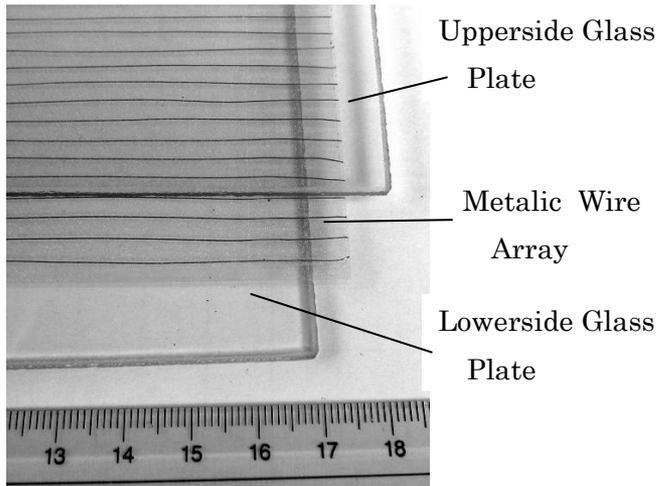
誘電体→導電材への変

銅粒子混合材の抵抗率、比誘電率

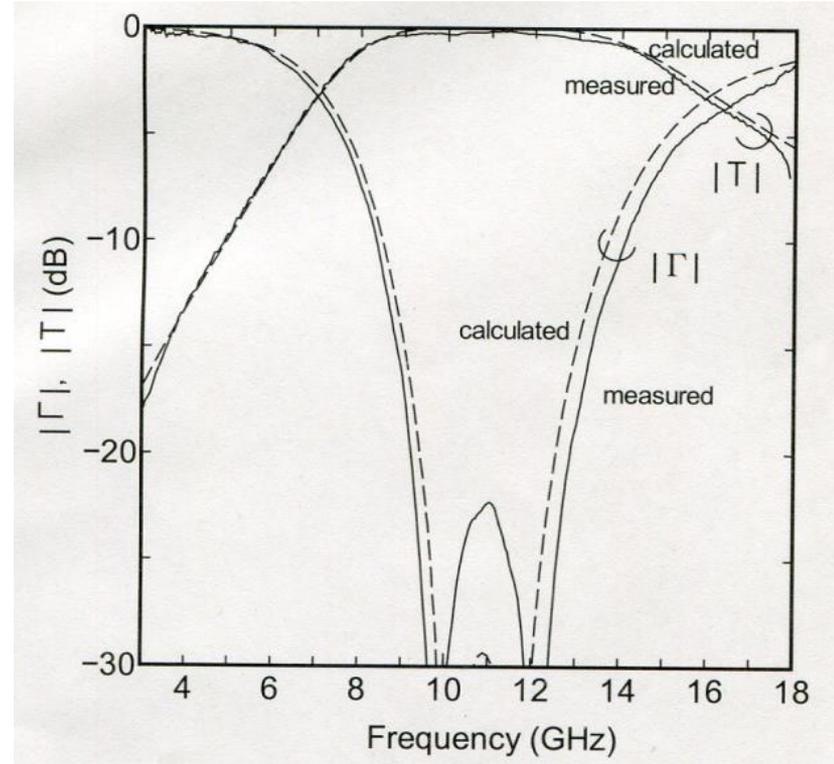


金属体充填率を増すと、ある充填率で絶縁体から導電材へ

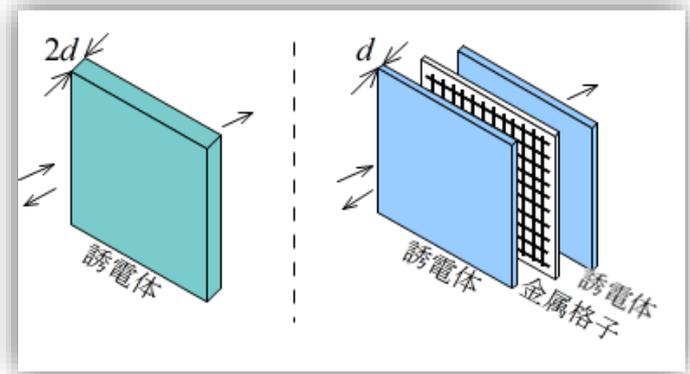
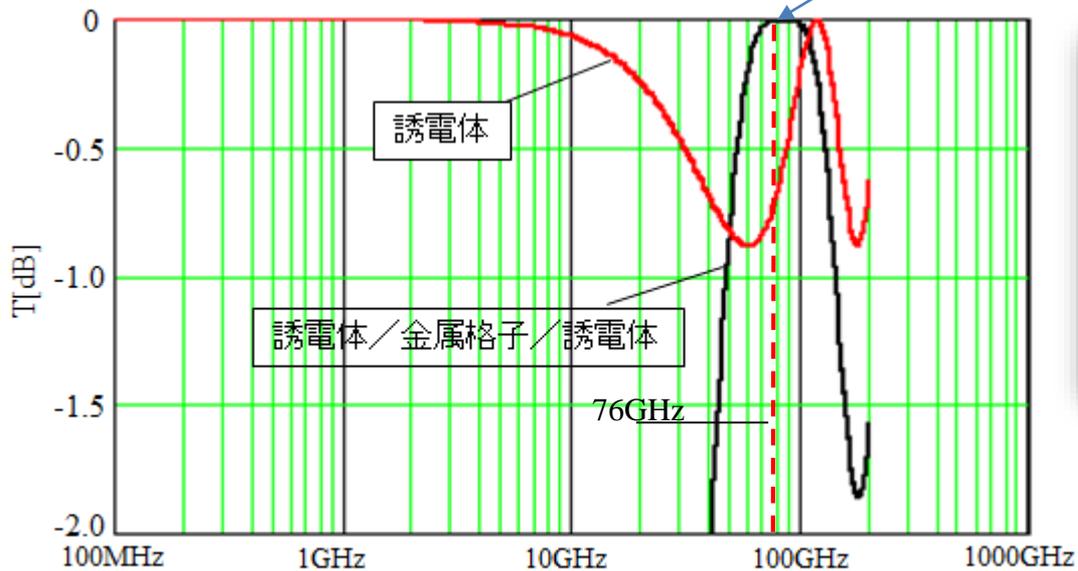
実験例: $\epsilon_{av} \approx 1$ を用いる全透過構造(マイクロ波帯)



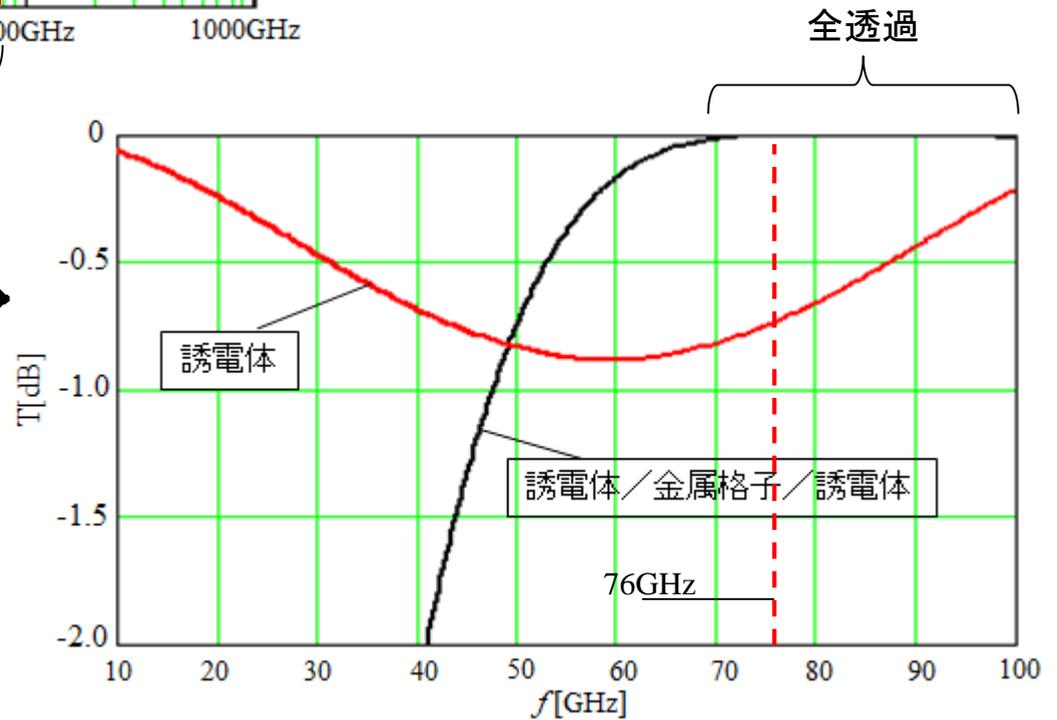
Glass plate: thickness = 1.76mm
Wire array: wire thickness = 0.2mm, spacing = 3.5mm
(金属格子の代わりにワイヤアレイを用いている)



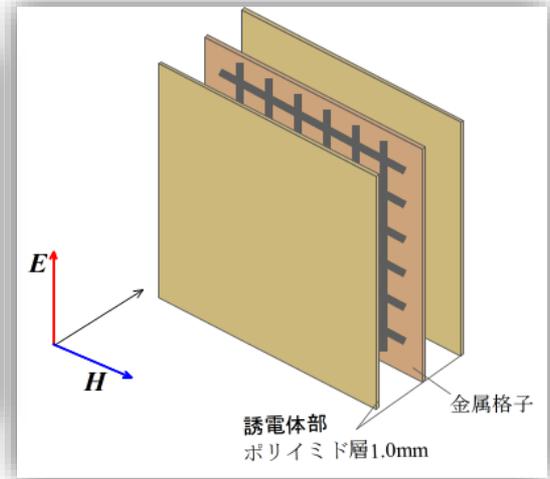
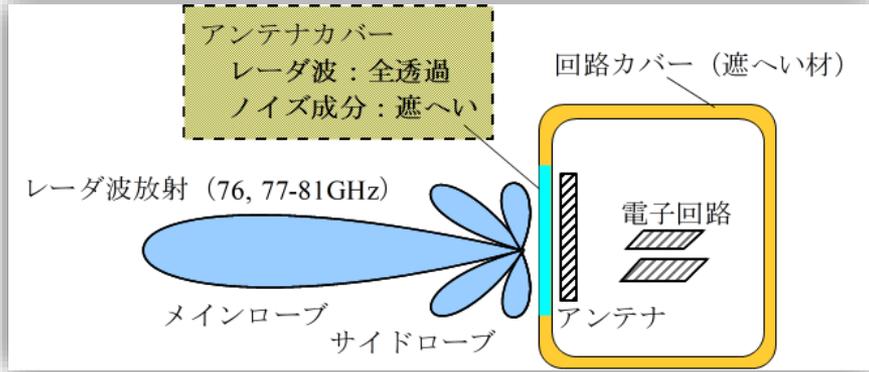
例4 70GHz-100GHz帶全透過特性例一誘電體/金屬格子/誘電體積層構造
全透過



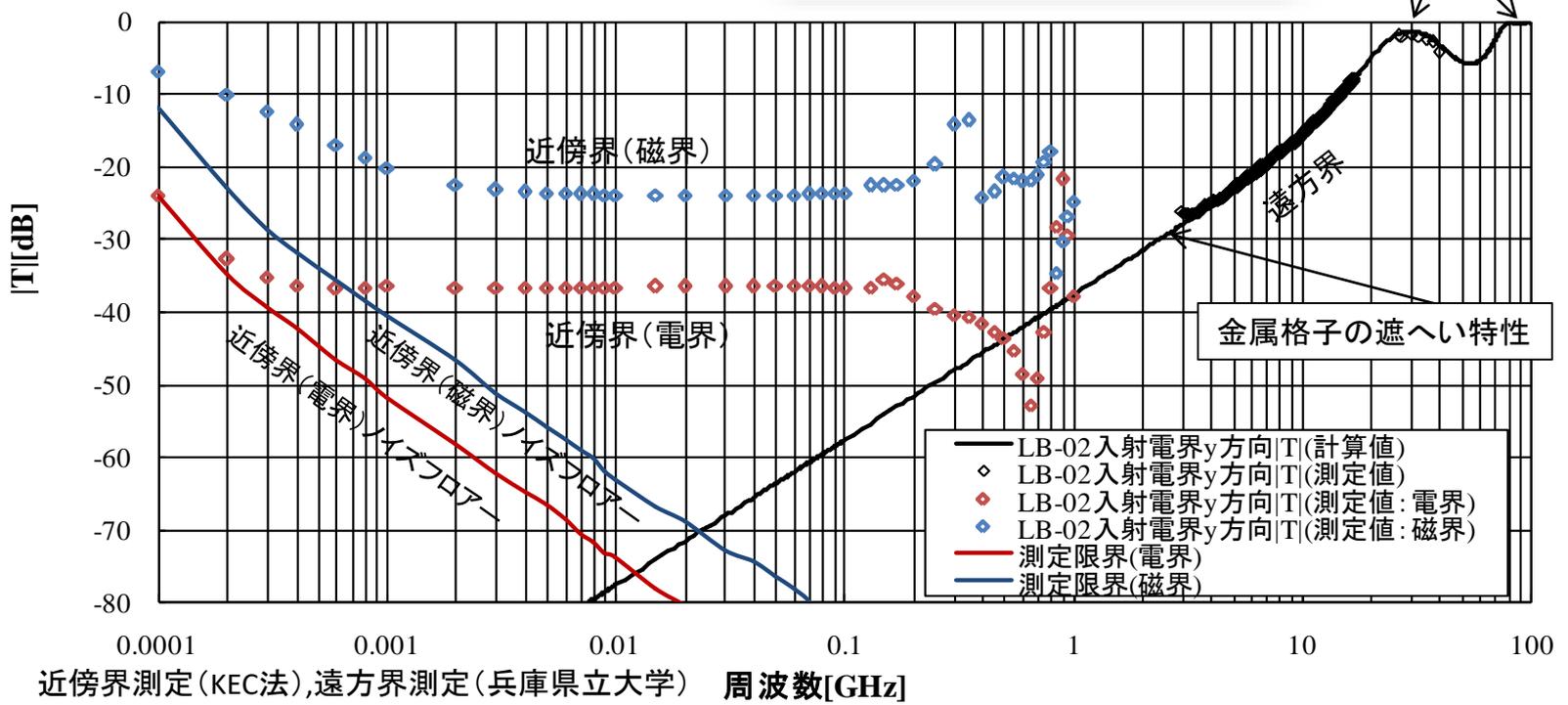
誘電體: $\epsilon_r=2.5-0.001j$, $d=0.4\text{mm}$
 金屬格子: $d=0.01\text{mm}$, $a=0.8\text{mm}$



例5: ミリ波レーダ帯域では全透過特性、1GH以下では遮へい材の構造例



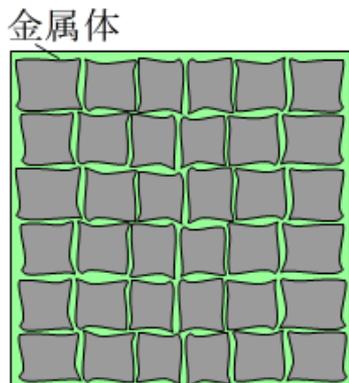
誘電体-金属格子による全透過 ($\epsilon_{av}=1$)



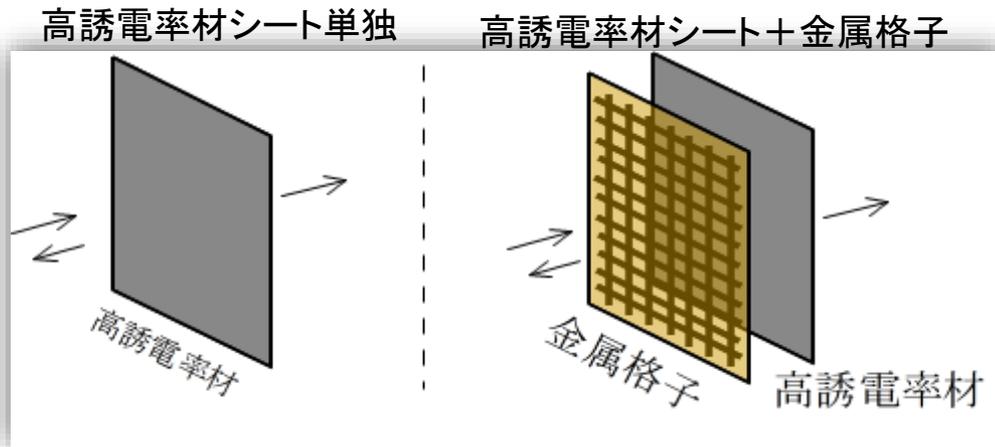
例6: 高誘電率材を全透過にするミリ波帯設計例

高誘電率材: 反射を押さえ、全透過にするために薄くする(全透過条件①)

支持誘電体と積層すると全透過にならない → 人工誘電体と積層して $\epsilon_{av} \approx 1$ にすれば全透過特性が得られる

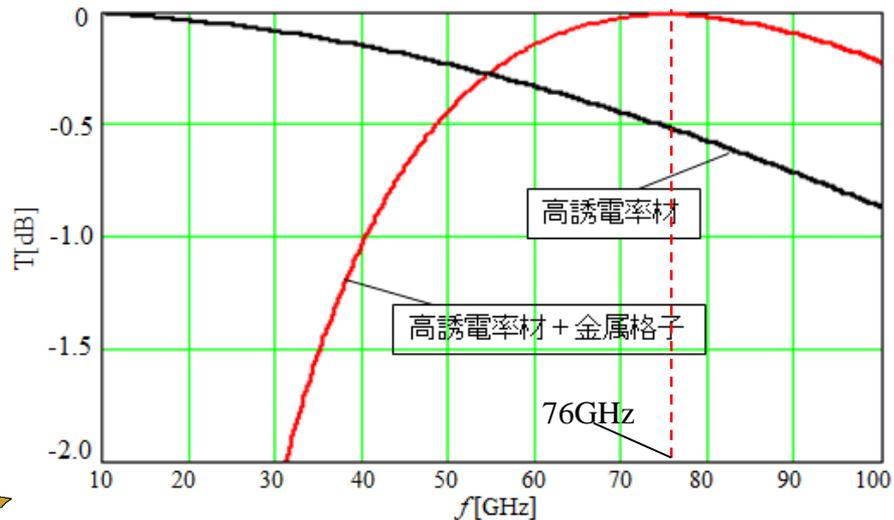
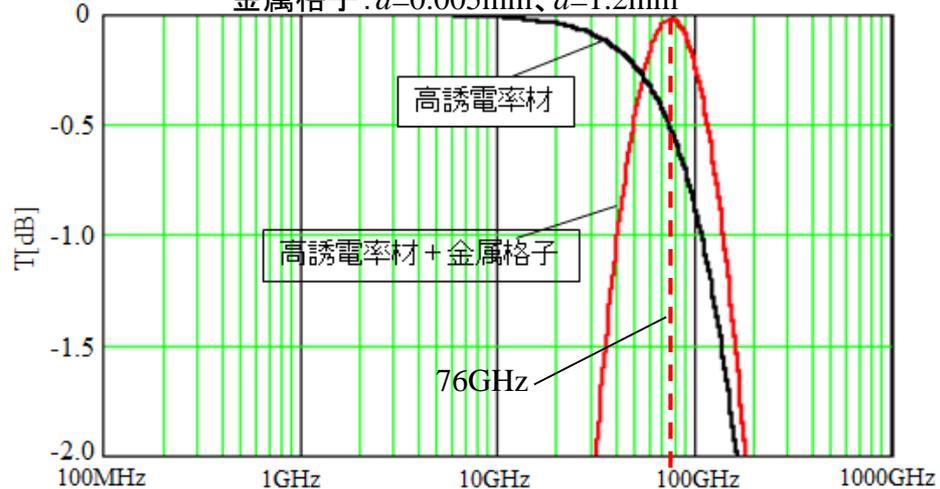


高誘電率材のイメージ
(反射が大きい)



透過特性計算例

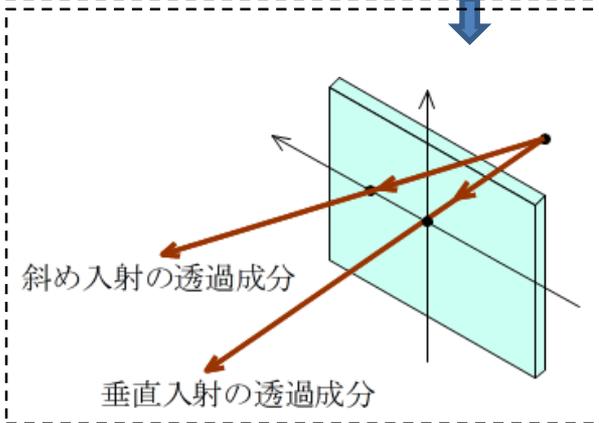
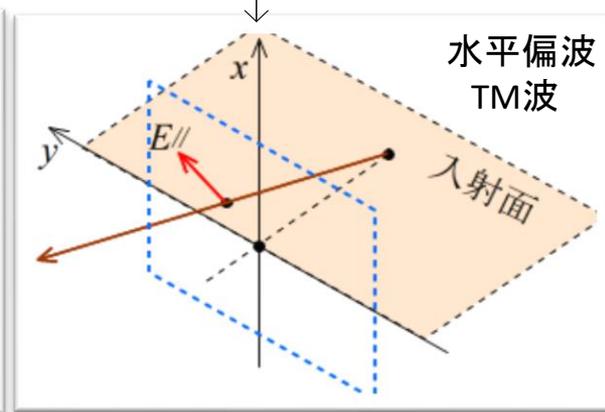
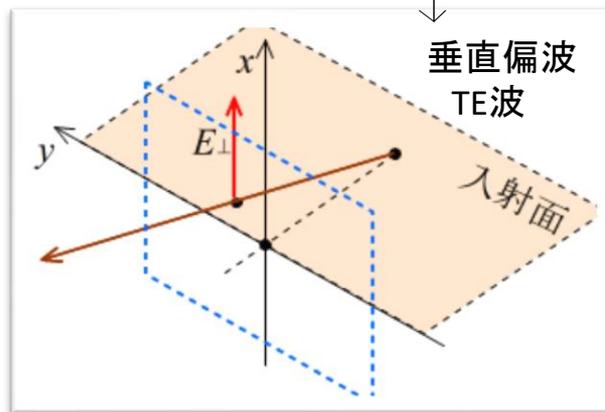
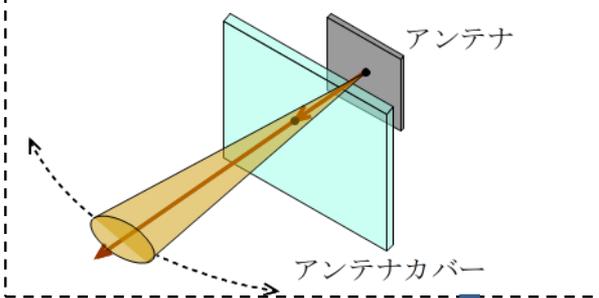
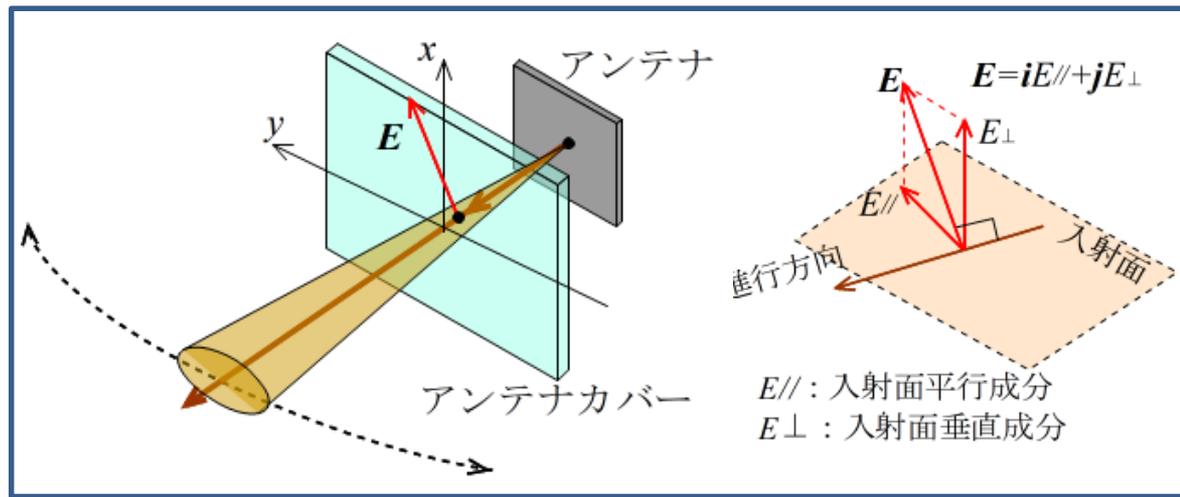
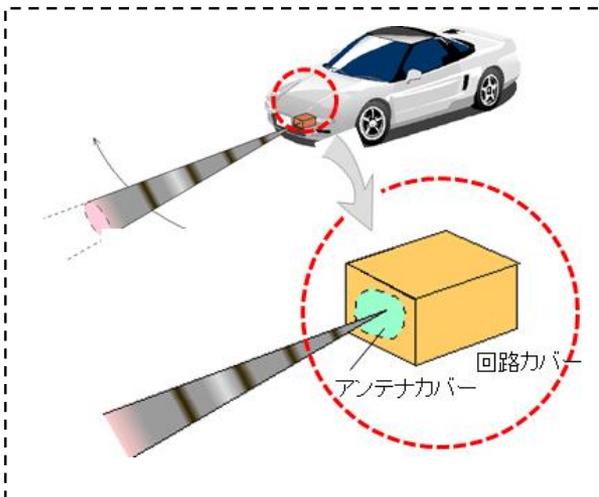
高誘電率材: $\epsilon_r=3000-0.001j, d=150\text{nm}$
 金属格子: $d=0.005\text{mm}, a=1.2\text{mm}$



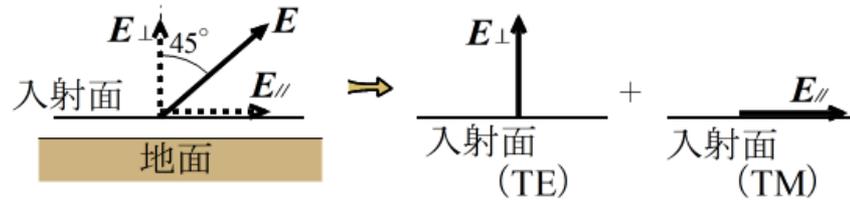
周波数拡大図

自動車ミリ波レーダの偏波

45° 直線偏波、円偏波—TE波とTM波の和



自動車レーダ（運転席から）



TE, TM両偏波で透過特性がよいことが望まれる

全透過の条件

- ① $d \approx 0$ のとき、
- ② d が $\lambda/2$ の倍数のとき、
- ③ $Z \approx Z_0$ ($\epsilon_r \approx \mu_r$) のとき
- ④ 入射角がブリュースター角のとき



②と④を併せて全透過構成

斜め入射における等価的な媒質内波長 λ_θ

$$\gamma_\theta = \gamma \cos \theta_t = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \cos \theta_t = j \frac{2\pi}{\lambda_\theta} \quad , \quad \lambda_\theta = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r} \cos \theta_t}$$

半波長厚み

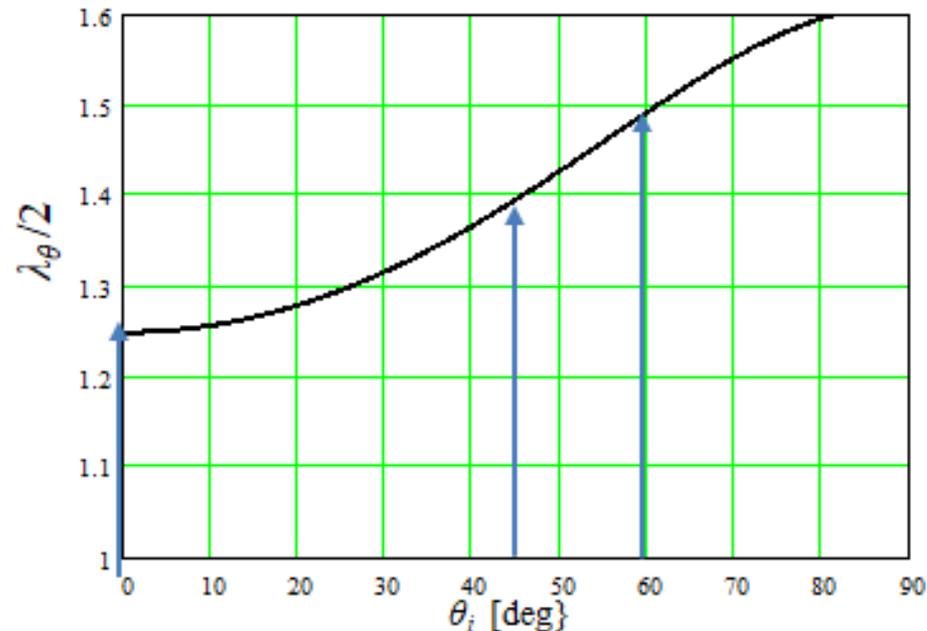
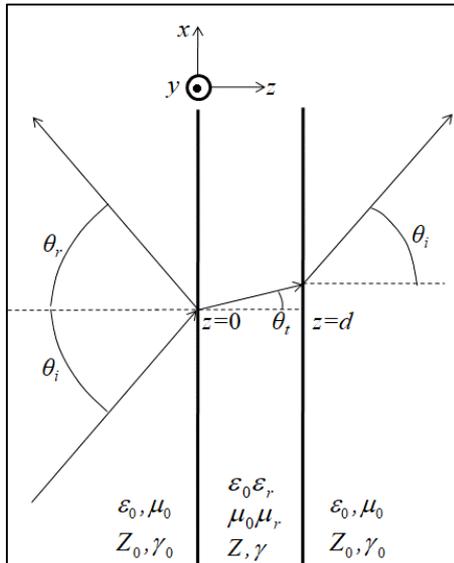
$\theta_i = 0$ [deg] $\rightarrow d = 1.25$ mm

$\theta_i = 45$ [deg] $\rightarrow d = 1.39$ mm

$\theta_i = 60$ [deg] $\rightarrow d = 1.49$ mm

斜め入射における半波長厚み: 入射角により変化

$f = 76$ GHz, $\epsilon_r = 2.5 - j0.001$, $\mu_r = 1$



演習(1) 単層構造の反射・透過特性と全透過 – 全透過条件①,②の演習 –

ファイル：EMCPlaza10-05_die_trans_r

入力部

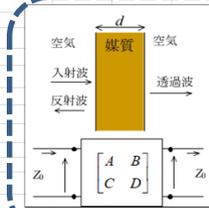
lotop画面

誘電体・導電材板の透過特性、遮へい特性(遠方界)

EMCプラザ

入力部	
厚みd[mm]	5.00
Re(ϵ_r)	2.4
Im(ϵ_r)	-0.110
σ [S/m]	0

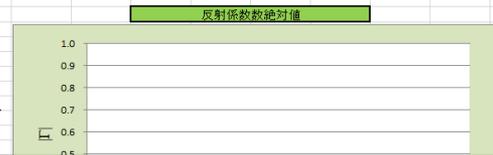
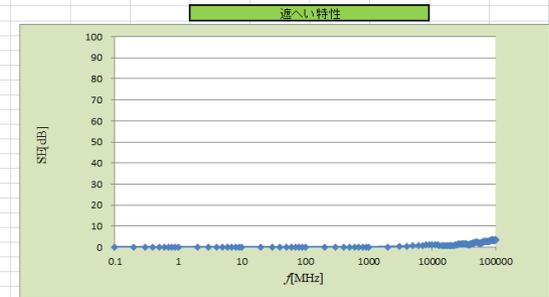
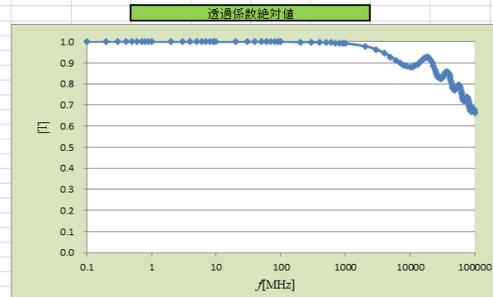
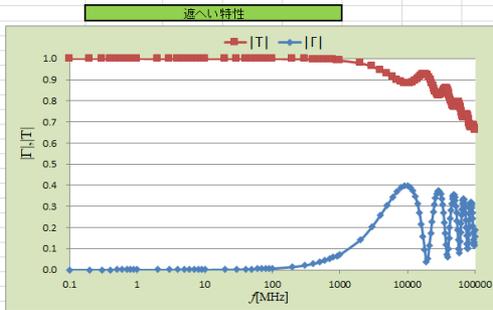
- ・ 入力は大枠の青色セル
- ・ Re(ϵ_r)は負～正の値を入力
- Im(ϵ_r)は負の値の値を入力



$$\text{反射係数 } \Gamma = \frac{A + B/Z_0 - CZ_0 - D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$$

$$\text{透過係数 } T = \frac{2}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}$$

計算式



計算結果

使い方

1. IOTopの入力部に、厚みd[mm]、比誘電率実数部Re(ϵ_r)、虚数部Im(ϵ_r)、導電率 σ [S/m]を入力。
 ϵ_r 'は負～正の値を入力、 ϵ_r ''は負の値を入力、誘電率虚数部は、 ϵ_r ''と σ の寄与分の合計になる。
2. 入力した値に基づいて、MainでT, Γ が計算される。結果はIOTop下段に表示。
3. 誘電体の場合は $\sigma=0$ を入力、導電材の場合は σ [S/m]を入力。

演習(2) 誘電体/周期穴金属板/誘電体の全透過構造 —全透過条件③の演習—

入力部

IOtop画面

ファイル：EMCPlaza50-02_die_Perihole_Die_r

誘電体—周期穴金属板—誘電体構造の反射、透過

EMCプラザ

設定

入力セル				
誘電体板				
Re(ϵ_r)	Im(ϵ_r)	Re(μ_r)	Im(μ_r)	d[mm]
7.000	0.000	1.000	0.000	2.800
周期穴金属板				
a[mm]	$\Delta x (= \Delta z)$ [mm]	t[mm]		
5	12	0.012		

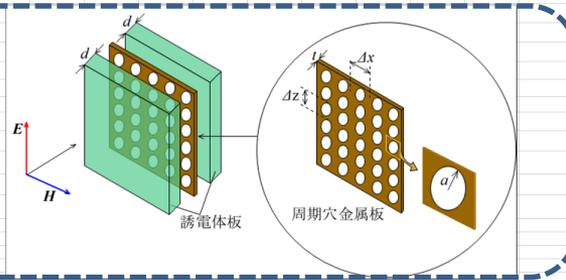
設計周波数f[GHz]

7

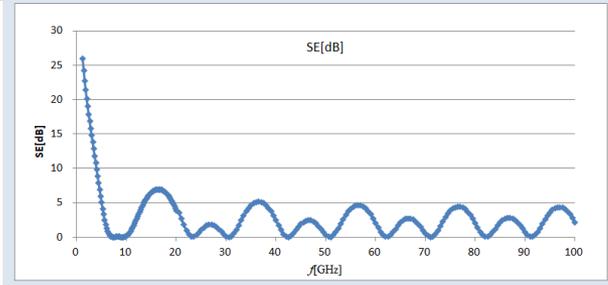
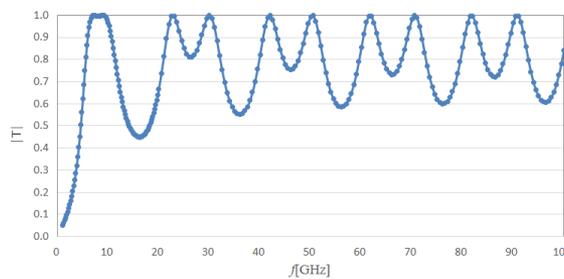
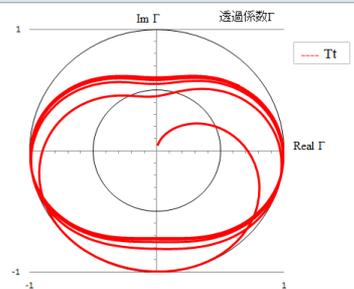
- ・ 入力は大枠の青色セル
- ・ Im(ϵ_r)、Im(μ_r)は負の値の値を入力

設計条件内容

- (1) $2a > \Delta x$
- (2) $\Delta x > \lambda$
- (3) $2a > \lambda$



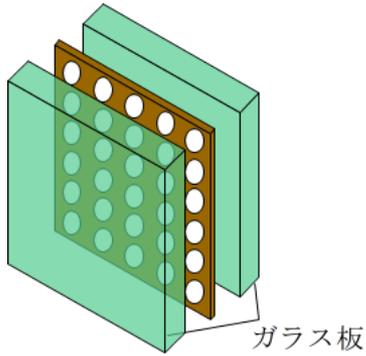
計算結果



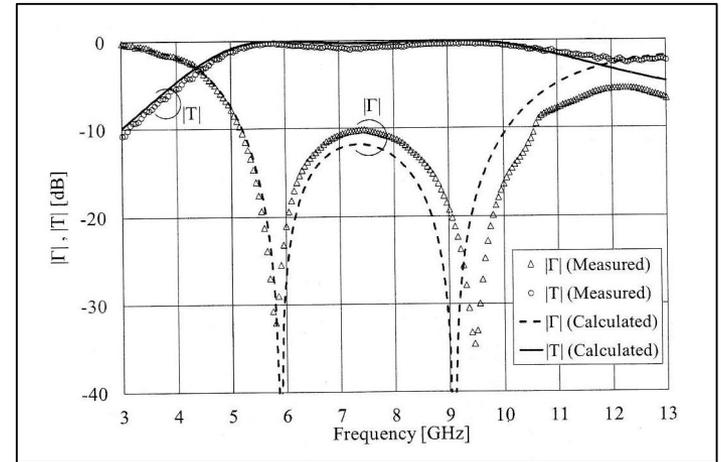
使い方

1. IOtopの入力部に、誘電体のRe(ϵ_r)、Im(ϵ_r)、Re(μ_r)、Im(μ_r)、厚みd[mm]を入力。
2. IOtopの入力部に、周期穴金属板の半径a [mm]、穴周期 Δx [mm] (= Δz)、厚みt[mm]を入力
3. IOtopの周期穴金属板の比誘電率が、設計周波数で所用の値になるようにa、 Δx を設定
4. 入力した値に基づいて、MainでTが計算される。結果はIotopに表示。

例1 周期穴金属板を用いた3層全透過構造例,p.44



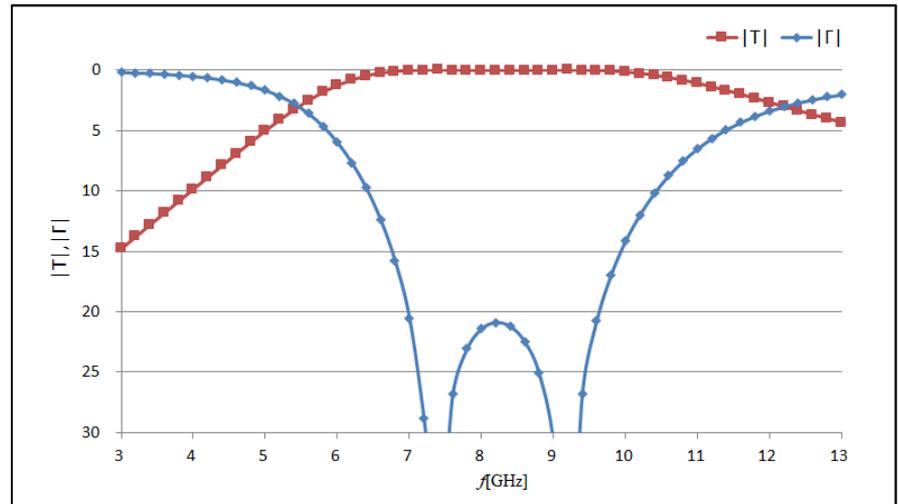
周期穴金属板: $t=0.012\text{mm}$ 、 $a=5.0\text{mm}$ 、
 $\Delta x=\Delta z=12\text{mm}$
 ガラス板: 厚み 2.8mm 、 $\epsilon_r=7.0$

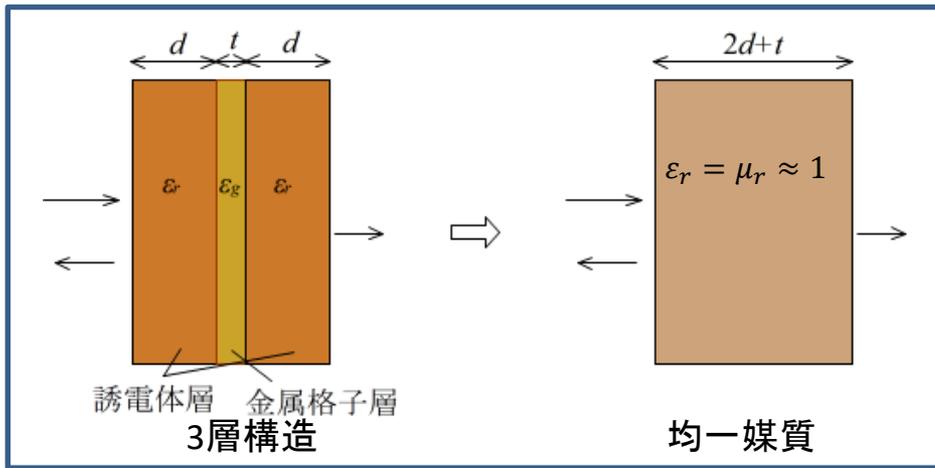


設定

(周期穴金属板両側のPETフィルムは省略)

入力セル					
誘電体板					設計周波数 f_d [GHz]
Re(ϵ_r)	Im(ϵ_r)	Re(μ_r)	Im(μ_r)	d [mm]	7
7.000	0.000	1.000	0.000	2.800	
周期穴金属板					
a [mm]	$\Delta x (= \Delta z)$ [mm]	t [mm]			
5	12	0.012			
設定不適切内容					
(1): $2a > \Delta x$					
(2): $\Delta x > \lambda$					
(3): $2a > \lambda$					





$$\epsilon_g = \frac{2d+t}{t} - 2\epsilon_r \frac{d}{t}$$

を満たすように各定数を選ぶ。

$\epsilon_r=7.0$ 、 $d=1.76\text{mm}$ 、 $t=0.1\text{mm}$
設計周波数 $fd=11\text{GHz}$

ステップ1: $\epsilon_g=-210$ を求める

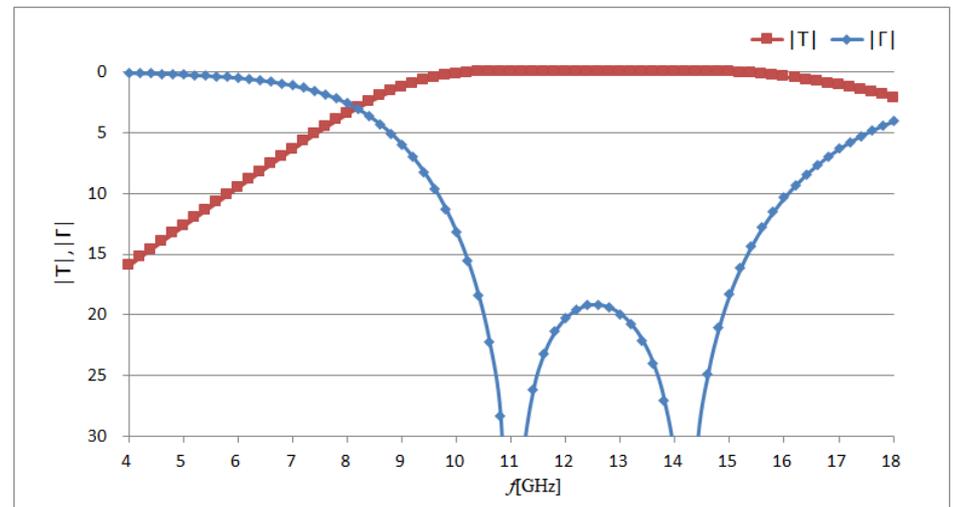
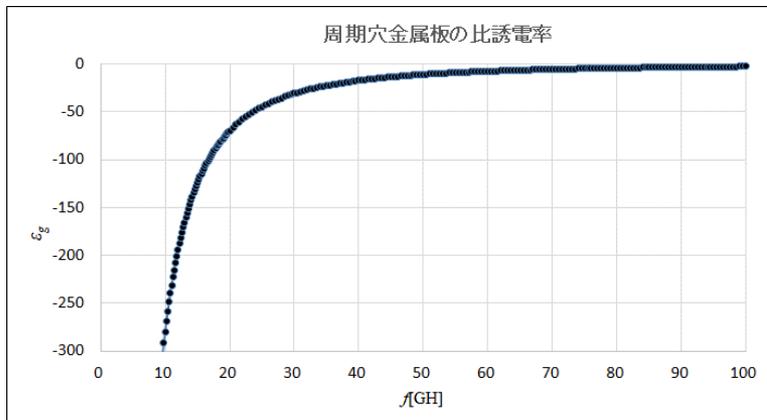
$\epsilon_g=-210$ (at 11GHz)

$a, \Delta x, \Delta z$ を調整

ステップ2: $\epsilon_g=-210$ となる $a, \Delta x, \Delta z$ を見つける

ステップ3: $a, \Delta x, \Delta z$ を調整して最適化

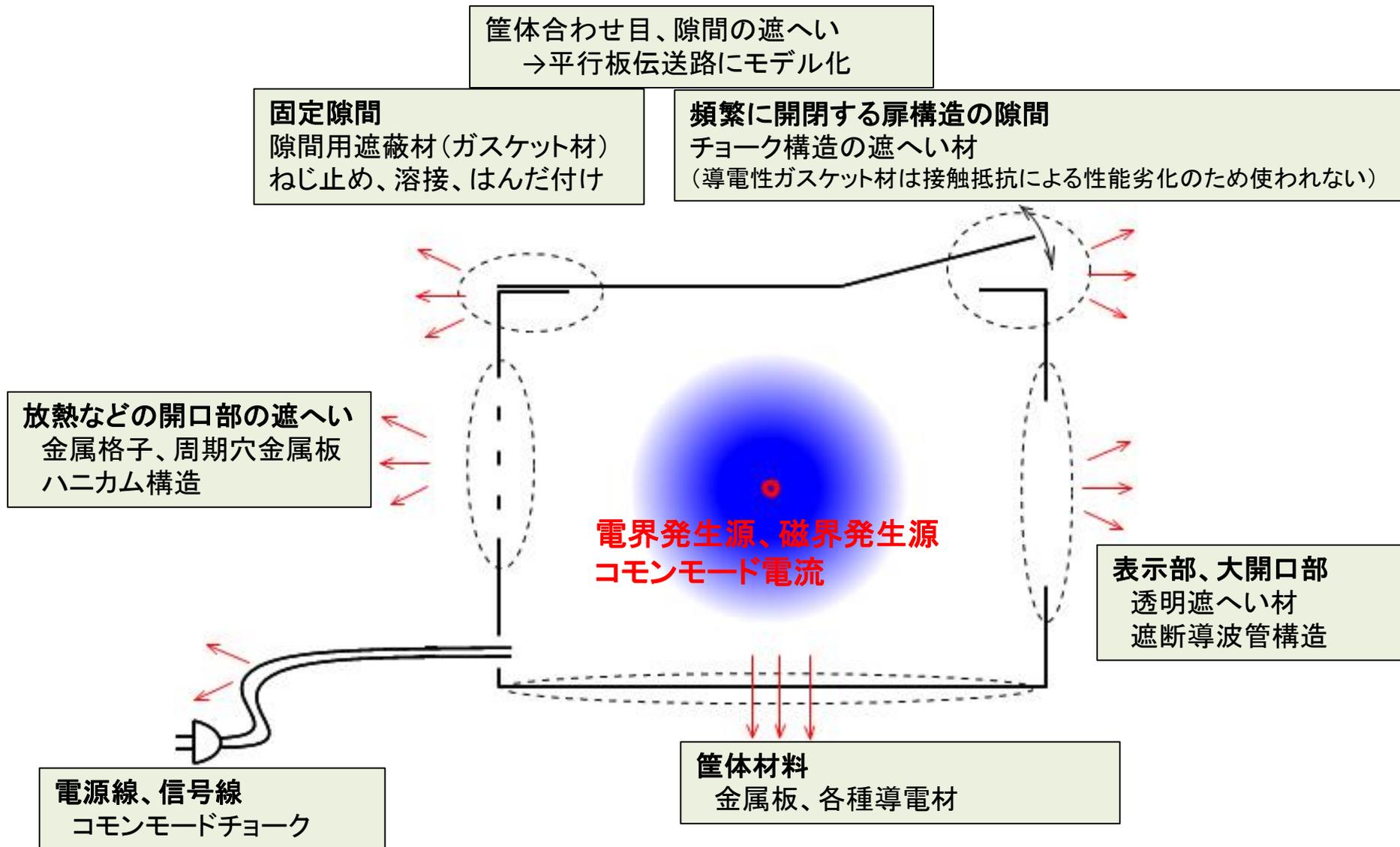
入力セル					設計周波数 fd [GHz]
誘電体板					
Re(ϵ_r)	Im(ϵ_r)	Re(μ_r)	Im(μ_r)	d [mm]	11
7.000	0.000	1.000	0.000	1.760	
周期穴金属板					<ul style="list-style-type: none"> ・ 入力は大枠 ・ Im(ϵ_r)、Im(μ_r)
a [mm]	$\Delta x (= \Delta z)$ [mm]	t [mm]			
5.5	16.5	0.1			

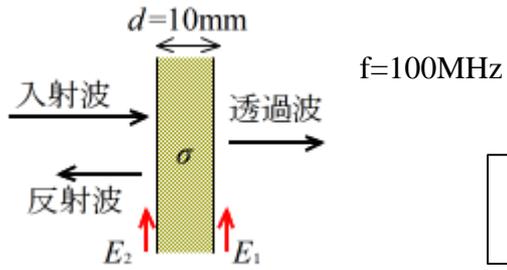


5. 電磁遮へいの考えかたと遮へい材設計法

5.1 電磁遮へい材モデルと電磁遮へい手法

電子機器筐体の電磁波漏えい

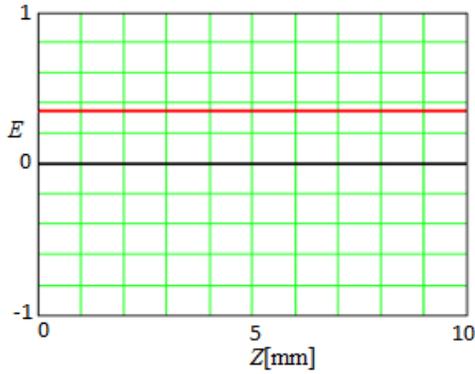




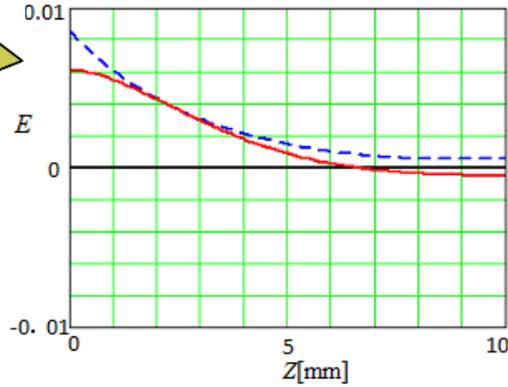
• $d \ll \delta$ の場合: 媒質電磁界は、進行方向にほぼ一定値

• $d > \delta$ の場合: 媒質内電磁界は、進行するにつれて減衰

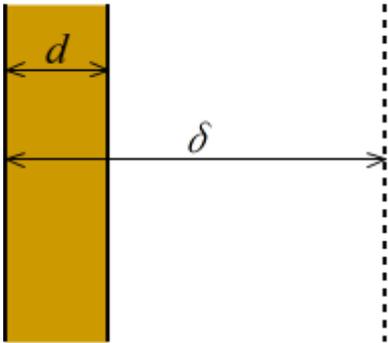
$\sigma: 1\text{S/m}$
 $\delta=50\text{mm}$
 $d \ll \delta$



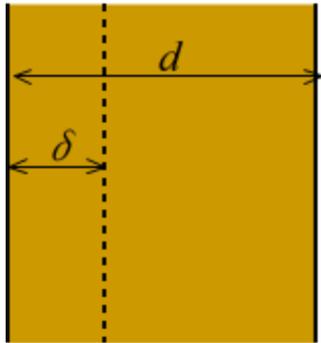
$\sigma: 300\text{S/m}$
 $\delta=2.9\text{mm}$
 $d > \delta$



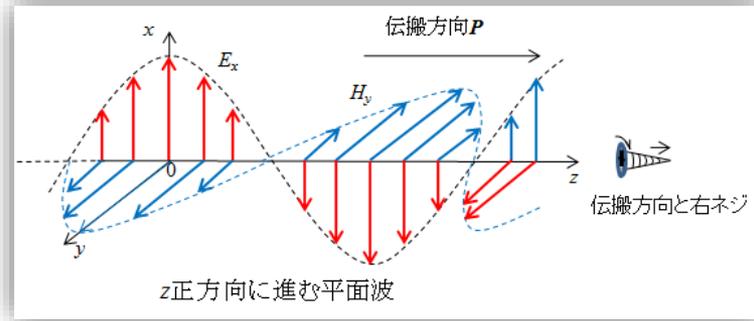
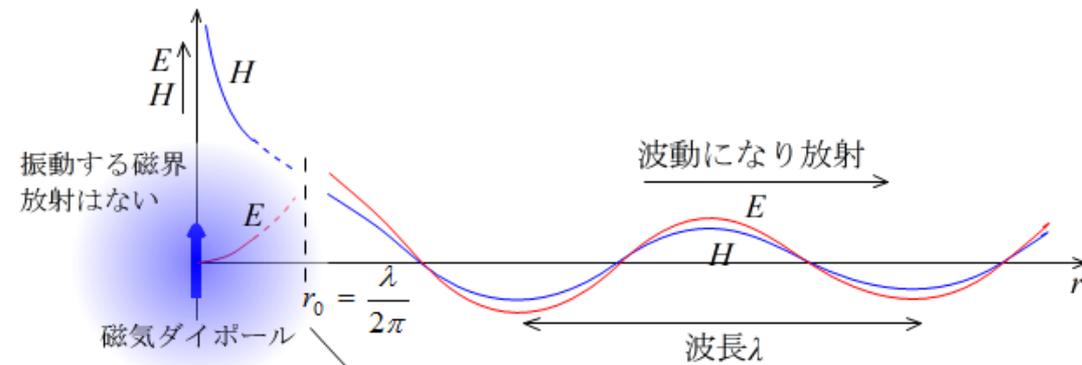
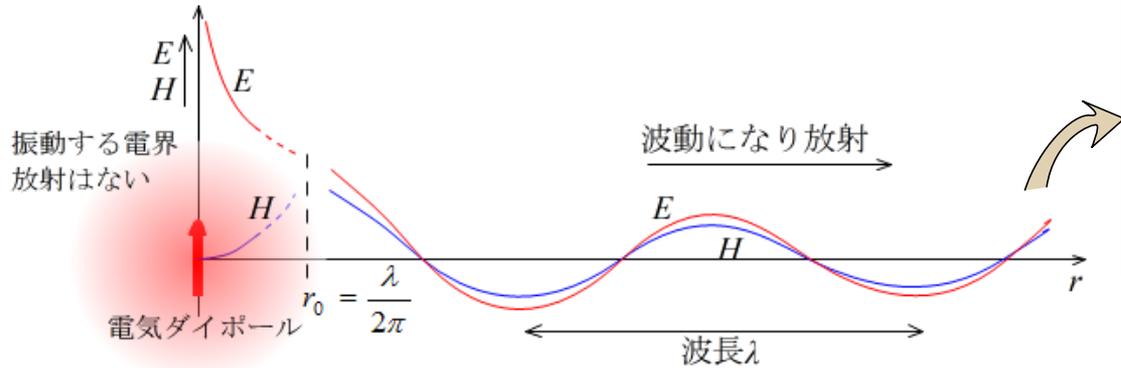
$d \ll \delta$



$d \gg \delta$

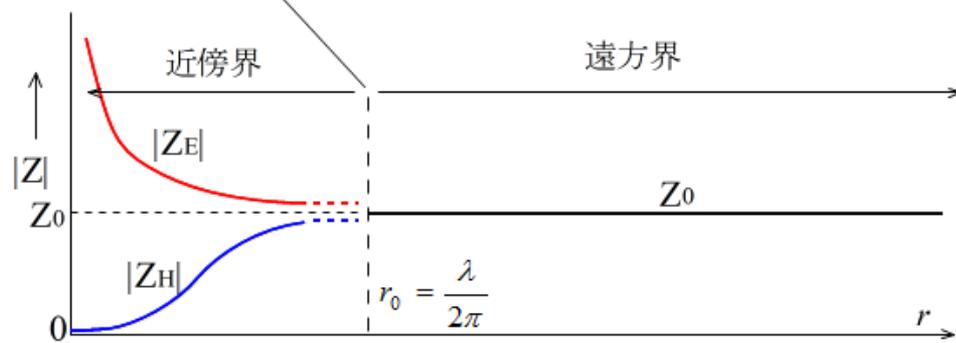


近傍界、遠方界



遠方界ではEとHの比は一定、平面波となり放射

電気ダイポール近傍ではEは大きく、Hは小さくなる
磁気ダイポール近傍ではEは小さく、Hは大きくなる



$|Z_E|$ はダイポールに近いほど大きい
 $|Z_H|$ はダイポールに近いほど0に近づく

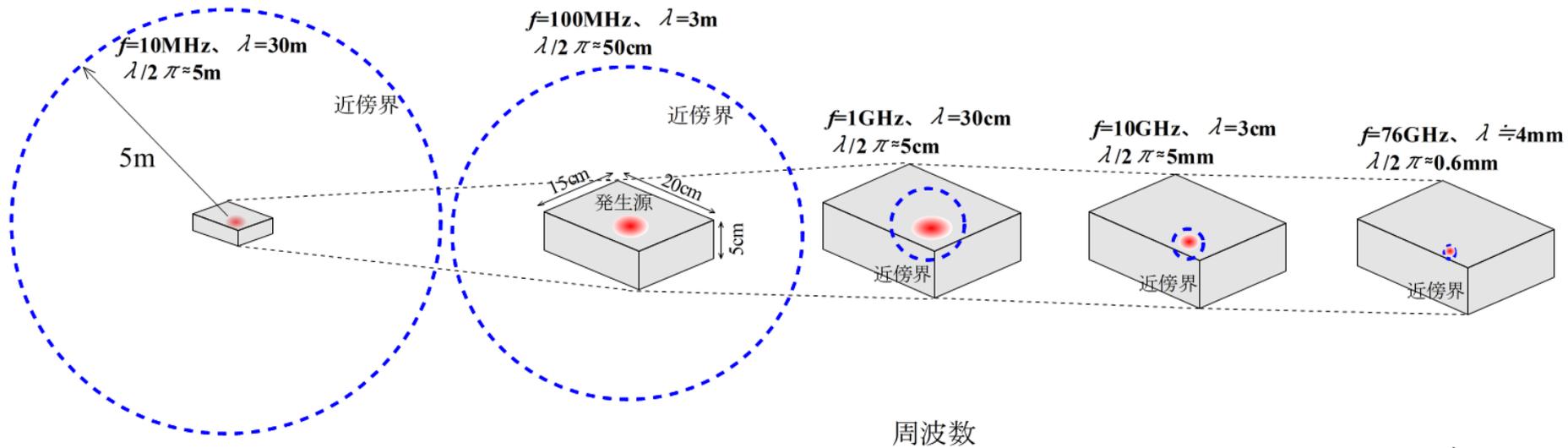
遠方界、近傍界
 $0 < r < r_0$ (近傍界), $r_0 = \frac{\lambda}{2\pi}$
 $r_0 < r$ (遠方界)

波動インピーダンス Z $Z = \frac{E}{H}$
遠方界: $Z = Z_0 = 377\Omega$
近傍界: 電気ダイポール近傍 $Z_E \approx \frac{1}{j\omega\epsilon_0 r}$
磁気ダイポール近傍 $Z_H \approx j\omega\mu_0 r$

遠方界、近傍界の空間領域と周波数



近傍界領域と周波数



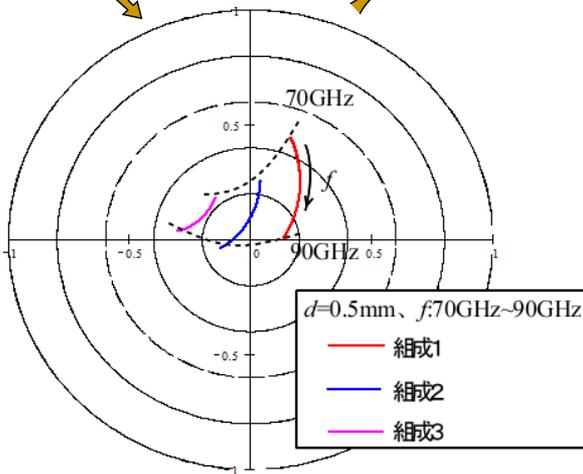
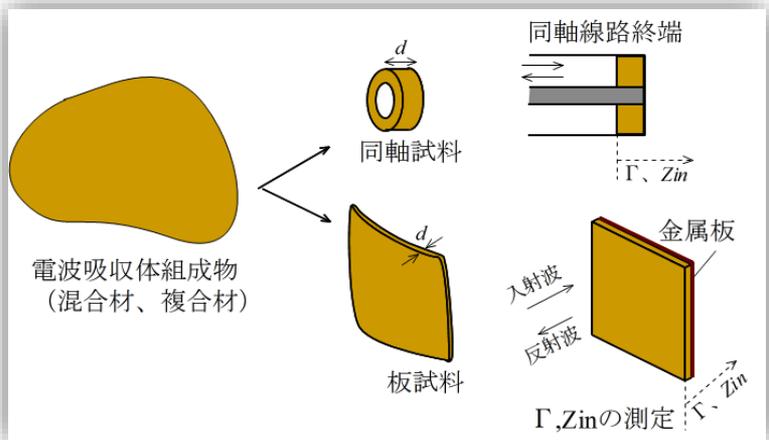
- * ミリ波レーダ帯域では、近傍界は発生源の極近傍(半径0.6mm以内)であるから、近傍界領域の考慮は実際上なくてよい場合が多い。
- * 大電力機器の筐体は、近傍界領域の磁界遮へいを担う場合が多い。

整合条件を満たす ϵ_r 、 μ_r を有する組成物の定め方

組成物の組成を変化させて試料作成

Γ の測定

整合条件は組成2と組成3の間で成立

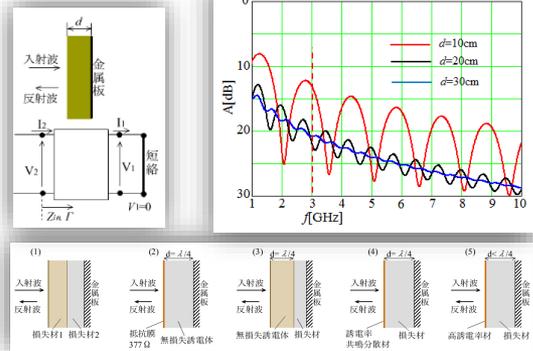


整合条件を満たす組成、厚みを求めることができる

Γ の測定値より、 ϵ_r を求めることができる

組成、 ϵ_r 、 Γ の相互の関係が求められる

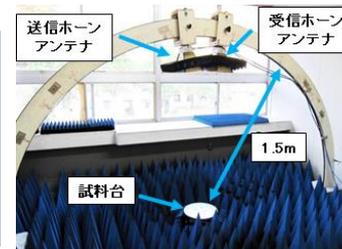
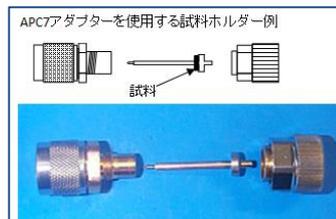
設計—材料—測定



電波吸収体設計
 ϵ_r 、 σ 、 μ_r

反射係数測定
 Γ 、 A 、 Z_{in}

吸収材料の設計
混合材、複合材
人工誘電体



自由空間反射測定装置例(ミリ波帯)

