

電磁気材料定数測定

3年生向け卒業研究紹介

1st 2021/09/13

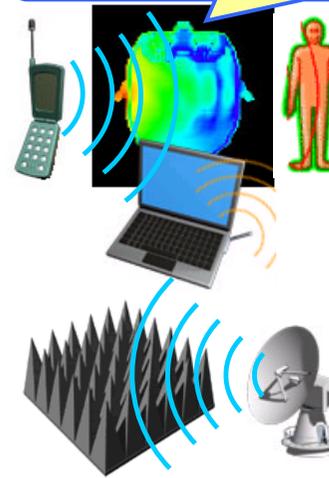
Lst 2021/09/15

電気電子情報工学科

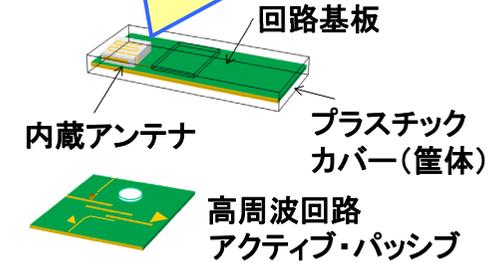
草間裕介

電磁気材料定数とは？

電磁波エネルギーの
吸収・放射量の評価



アンテナ設計・回路設計



マクスウェルの方程式

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \end{cases}$$

マクスウェルの
方程式を解くには、誘電率・透
磁率・導電率の
3つの電気材料
定数が必要

電磁気材料定数の把握が重要

マクスウェルの方程式

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \end{cases}$$

透磁率 $\mu = \mu_1 - j\mu_2$
誘電率 $\epsilon = \epsilon_1 - j\epsilon_2$
導電率 σ
電気材料定数

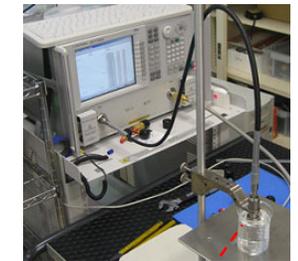
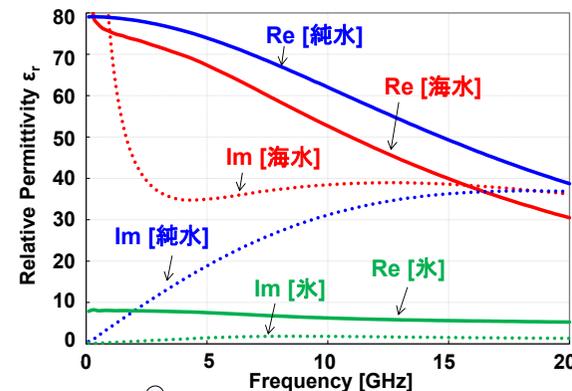
周波数 f [Hz]
温度 T [K]
分散特性

気体
液体
固体
相特性

ほとんどの物質が状態によって異なる電磁気特性を有する。

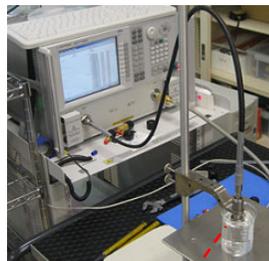
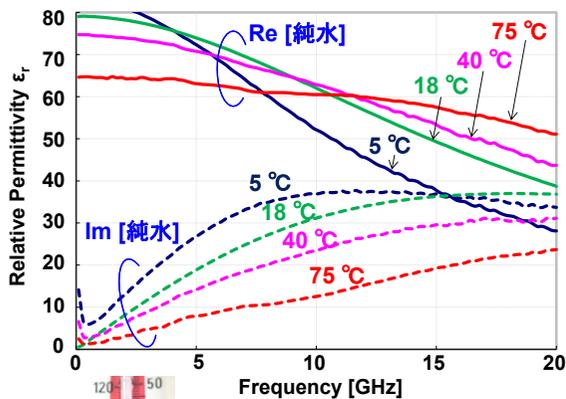
周波数分散の例

純水・海水・氷の複素比誘電率の違い



温度分散の例

温度による純水の複素比誘電率の違い



抵抗(導電率)に温度特性があるように、分子の格子振動によって誘電率にも温度特性がある

前田, ``同軸プローブ法による複素誘電率測定'', 読関電波高専卒業研究論文集, T-2011 (H23) ※仏教では縁起

媒質の種類

媒質 medium または媒体(複数形 media)

- 無損失 lossless
 - 真空, 空気ほか $\sigma = 0, \epsilon'' = 0$
 - 完全電気導体(PEC) $\sigma = \infty$
 - 完全磁気導体(PMC) $\sigma^* = \infty$
- 損失性 lossy
 - ジュール損失 σE
 - 誘電損失 $\omega \epsilon'' E$
 - 磁性損失 $\omega \mu'' H$
- 分散性 dispersive $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r(\omega)}}$
 - 周波数によって位相速度が異なるため、パルス波形は徐々に崩れる
 - ⇔ 非分散性 non-dispersive
 - 位相速度が不変なため、パルス波形は崩れない
- 異方性 anisotropic
 - ⇔ 等方性 isotropic

構成方程式

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

媒質定数による材料分類

電気材料

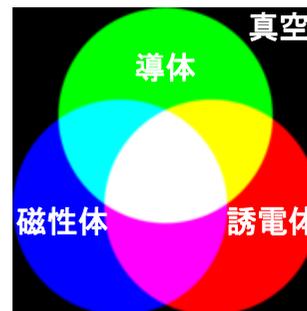
無損失材料(伝送) 損失材料(電波吸収)

媒質名称	誘電率実部 ϵ_r'	誘電率虚部 ϵ_r''	透磁率実部 μ_r'	透磁率虚部 μ_r''	導電率 σ	例
空気(真空)	1	0	1	0	0	空気, 真空
誘電体(無損失)	$\epsilon_r'(\omega)$	0	1	0	0	テフロン, ガラス
損失性誘電体	$\epsilon_r'(\omega)$	$\sigma/\omega\epsilon_0$	1	0	σ	ゴムカーボン
磁性体(無損失)	1	0	$\mu_r'(\omega)$	0	0	通信用フェライト
損失性磁性体	$\epsilon_r'(\omega)$	0	$\mu_r'(\omega)$	$\mu_r''(\omega)$	0	フェライト
損失性磁性体	$\epsilon_r'(\omega)$	$\epsilon_r''(\omega)$	$\mu_r'(\omega)$	$\mu_r''(\omega)$	0	ゴムフェライト
導電性材料	-	$\sigma/\omega\epsilon_0$	1	0	σ	銅, アルミ
導電性材料(磁性)	-	$\sigma/\omega\epsilon_0$	$\mu_r'(\omega)$	0	σ	鉄, ニッケル

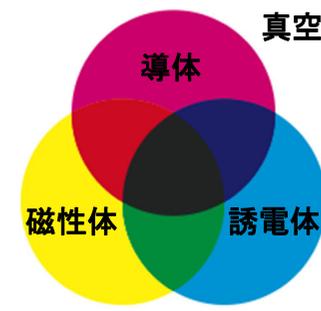
※ (ω) は値が定数でなく、一般に周波数特性を有すること示す

清水, 杉浦, 電磁妨害波の基本と対策, p. 79, 88, 電子情報通信学会, 1995

電磁気媒質の分類イメージ



加法混色 (テレビモニタや照明)



減法混色 (絵具やカラー印刷)

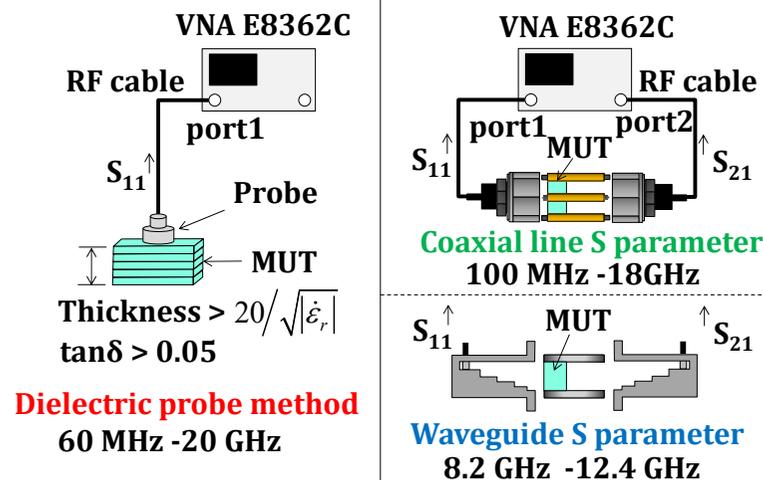
伝送線路への置き換え

媒質	平面波	分布定数線路	回路素子対応
無損失			$\epsilon \leftrightarrow C$ $\mu \leftrightarrow L$
導電損失 誘電損失			$\epsilon \leftrightarrow C$ $\mu \leftrightarrow L$ $\sigma \leftrightarrow G$
磁気導電損失 磁性損失			$\epsilon \leftrightarrow C$ $\mu \leftrightarrow L$ $\sigma^* \leftrightarrow R$
一般損失			$\epsilon \leftrightarrow C$ $\mu \leftrightarrow L$ $\sigma \leftrightarrow G$ $\sigma^* \leftrightarrow R$

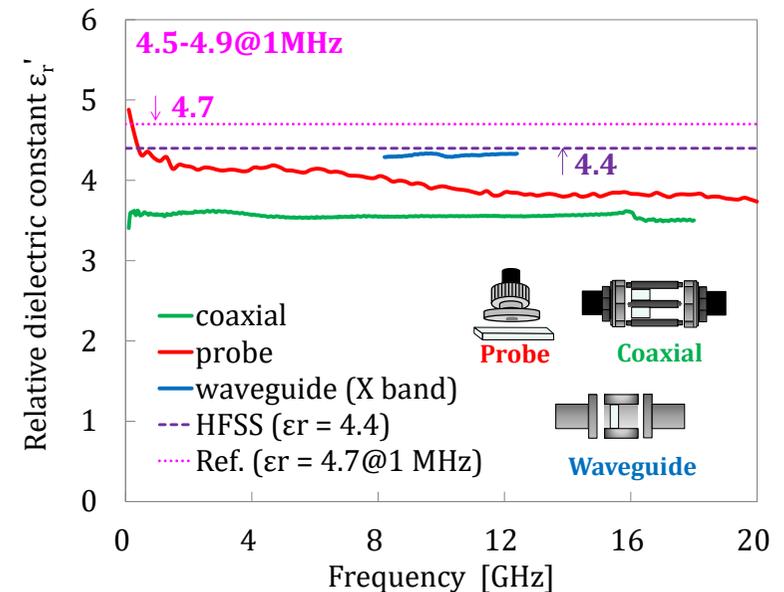
どうやって測定するか？(1)

Dielectric Probe	Coaxial Line	Waveguide
Probe position and Crimp strength, N=13	Concentric samples, Number of samples, N=15	Rectangular samples, Number of samples, N=5
Sample size : W × D × T 100mm × 75mm × 14.4mm	Sample size : a × b × t 3mm × 7mm × 1.6mm	Sample size : a × b × t 22.9mm × 10.2mm × 1.6mm
Thickness > 20/√ ε _r ' tan δ > 0.05	Sample holder (APC-7)	Sample holder (X band 8.2-12.4 GHz)

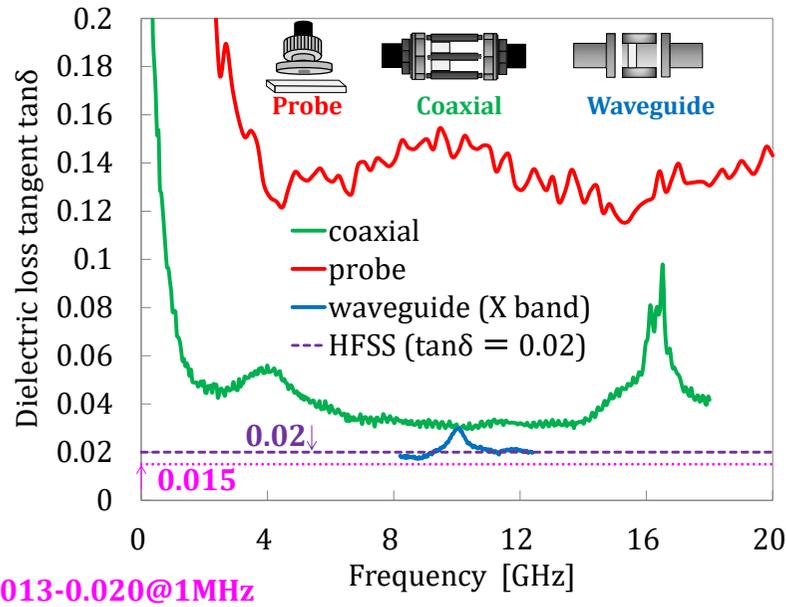
誘電率測定系



誘電率実部の測定結果



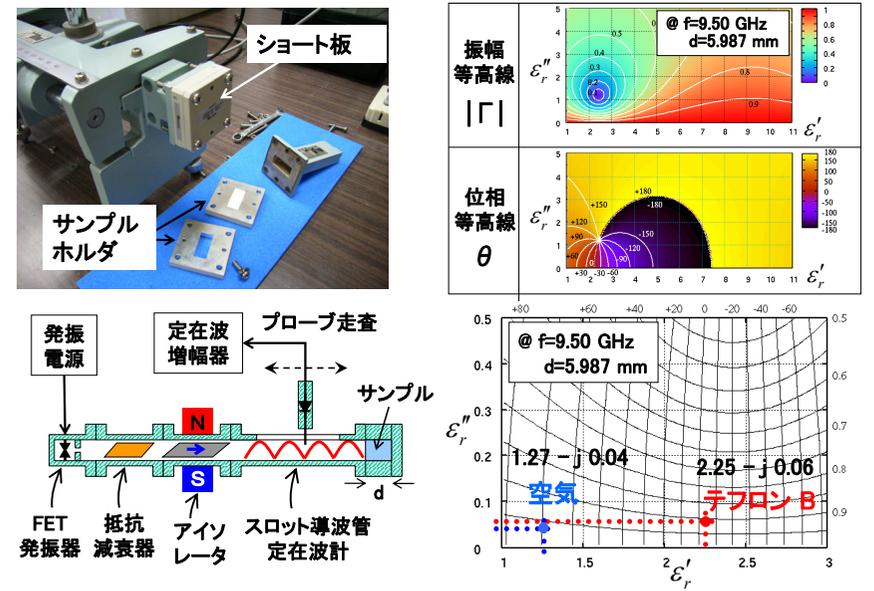
誘電正接の測定結果



13

どうやって測定するか？(2)

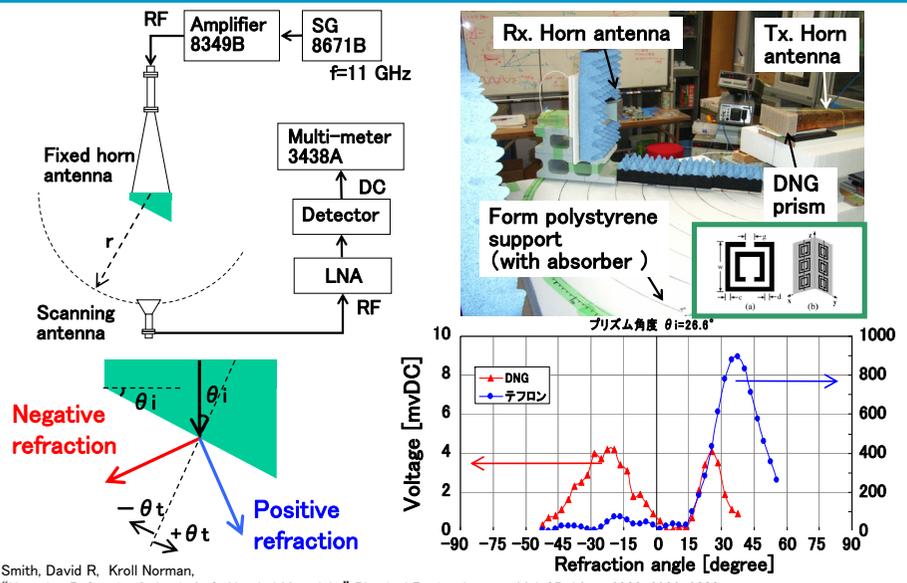
14



藤原, 草間, "反射係数チャートを使った誘電率測定," 詫間電波高専卒業研究論文集, 2006

どうやって測定するか？(3)

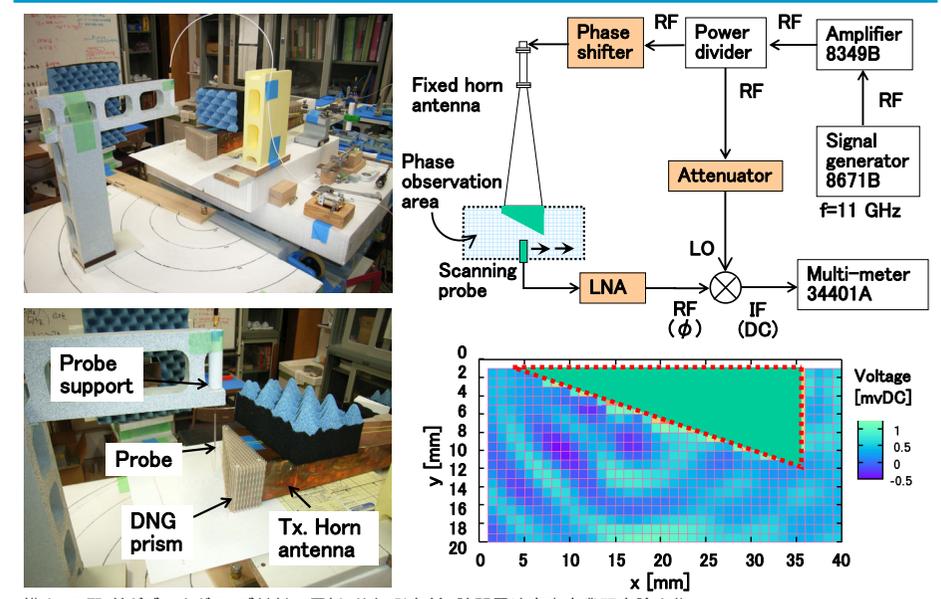
15



Smith, David R, Kroll Norman, "Negative Refractive Index in Left-Handed Materials," Physical Review Letters, Vol. 85-14, pp.2933-2936, 2000
 横山, 三野, "ダブルネガティブ材料の屈折・位相測定," 詫間電波高専卒業研究論文集, 2005

どうやって測定するか？(4)

16



横山, 三野, "ダブルネガティブ材料の屈折・位相測定," 詫間電波高専卒業研究論文集, 2005