

電磁波を用いた水溶液の 濃度測定方法およびその装置

秋田大学大学院 理工学研究科

数理・電気電子情報学専攻

電気電子工学コース

講師 淀川 信一

2024年3月14日

現在、水溶液中の濃度測定には様々な方法が存在し、**糖度計**や**血糖値測定**などで利用されている。

- ・糖度計 ➤可視光領域において、水溶液濃度変化による屈折率の変化を利用している^[1]。
- ・血糖値測定 ➤酵素反応によって変化する検査紙の色を読み取る比色法や試薬中の電荷の変化により検出する電極法などがある^[2]。

電磁波を利用した濃度測定も存在し、低侵襲での測定が可能という特徴を有している。主に同軸プローブ法^[3]が用いられており、水溶液の濃度変化により生じる誘電率および導電率の変化(Cole-Cole plotの変化)を測定する。

●問題点

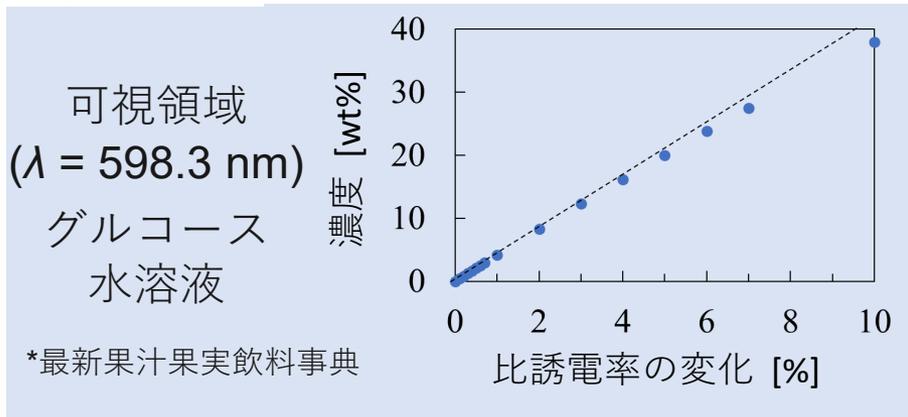
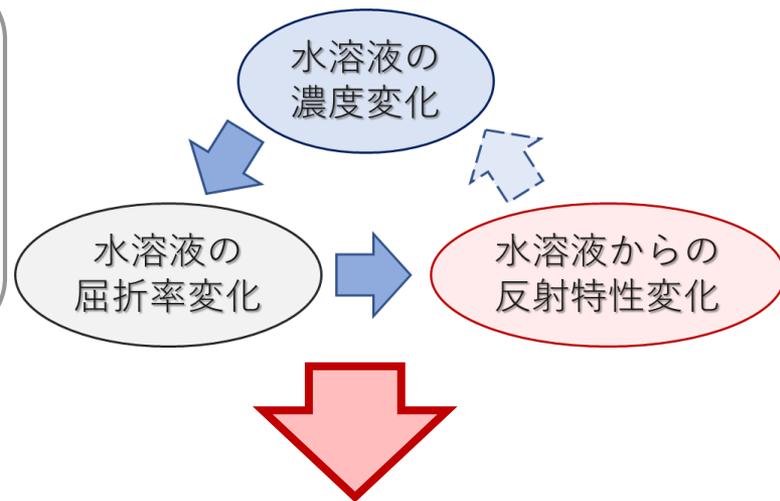
- ・濃度変化に対する感度が十分ではない。
- ・侵襲的な測定が必要。

[1] 株式会社アタゴ, 「光の屈折を利用して水溶液の性質を調べる~屈折計~」, 教科研究 理科 No.200, pp.16-18.

[2] 外山 滋, 「血糖値測定器の開発の歴史と現状」, 国リハ研紀31号 平成22年.

[3] 滝沢 良二, 「材料の誘電率測定 基礎」, Keysight (2017).

- ・ 生体物質の大半は体内で水溶液の状態が存在している。
- ・ 電磁波は低侵襲での測定が可能であり、ミリ波やTHz波で物質特有の振動モードが確認されている。



電磁波の**反射特性**を利用した
生体物質の高感度検出

インピーダンスマッチングを用いることにより、反射波がない状態を作り出すことが可能となる。

➡ 水溶液の濃度変化により反射波が生じるため、微小変化の検出が可能となる。

電磁波のインピーダンスマッチング

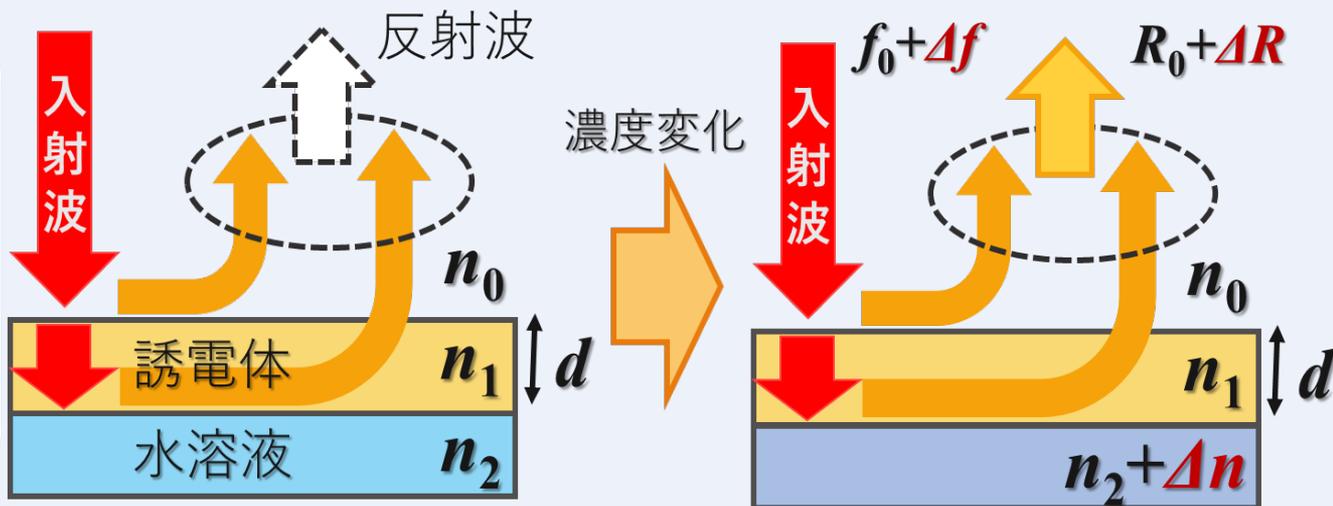
- ・ 振幅整合条件

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$$

- ・ 位相整合条件

$$n_1 d = \frac{\lambda}{4}$$

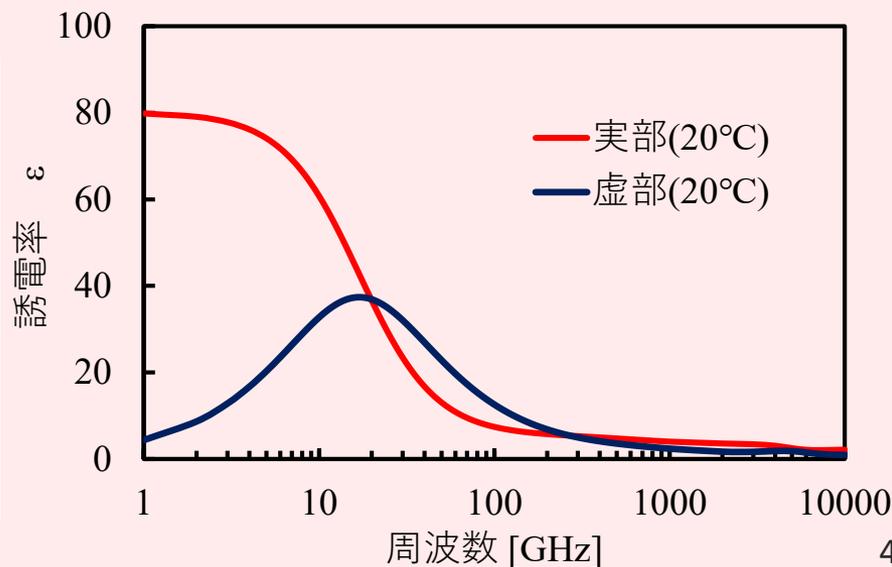
(非吸収媒質)



水の周波数依存性のために、単純な計算では誘電体膜の最適値を特定できない。



FDTD(Finite-Difference Time-Domain)法を用いた逐次近似解析により最適な誘電体膜の探索を行う。



誘電体膜はインピーダンスマッチングに対する理想的な条件を有する。しかし、そのパラメータを有する物質は存在しない。

➡ 複数の誘電体を組み合わせ、厚みや構造を変化させることにより理想的な誘電体膜を作成する。

測定系としてネットワークアナライザを用いることにより、電磁波の微小反射特性を検知する。

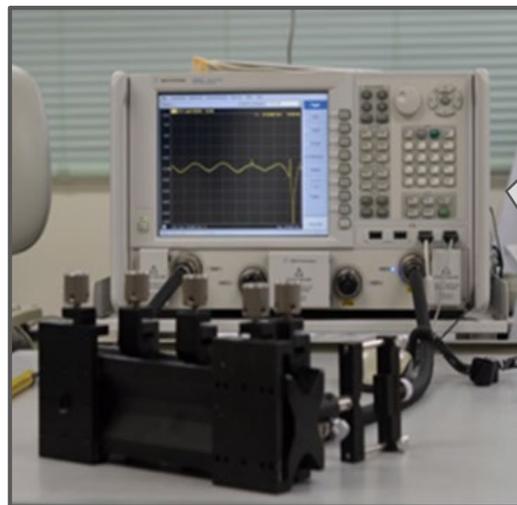
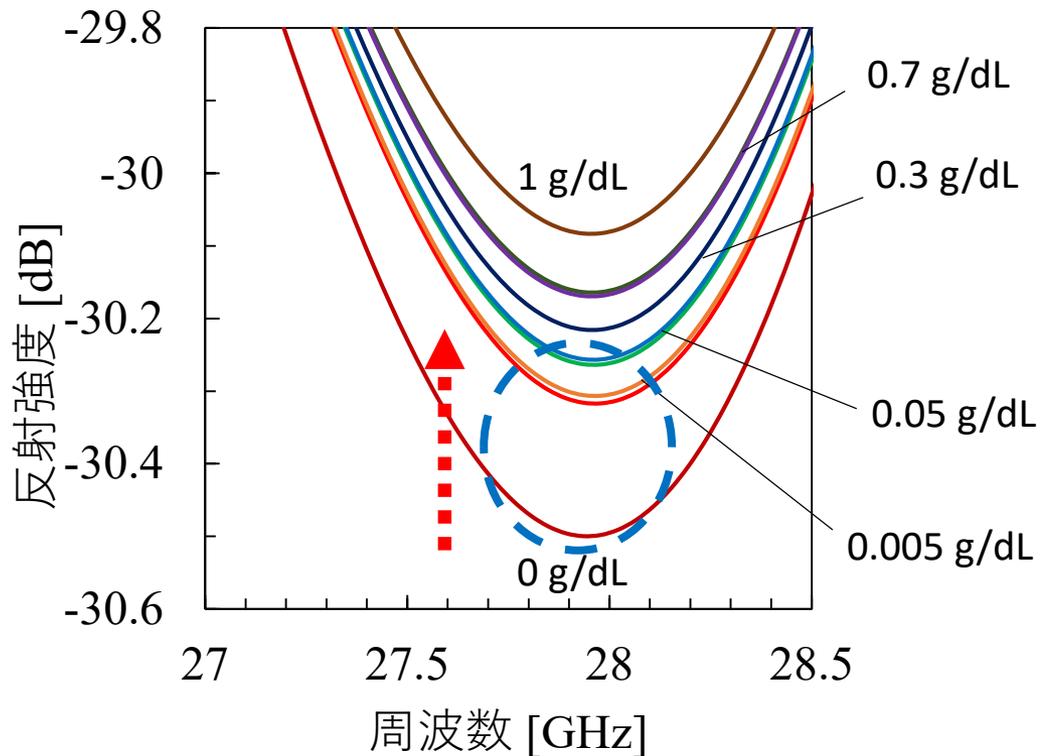
将来展望

現在の血糖値測定では、侵襲型の方法を用いた製品が多く、測定時の痛みや測定時に用いた針やガーゼなどの医療廃棄物が問題となっている。また、ヒトの血糖値に対する感度が非侵襲測定の現在の課題となっている。



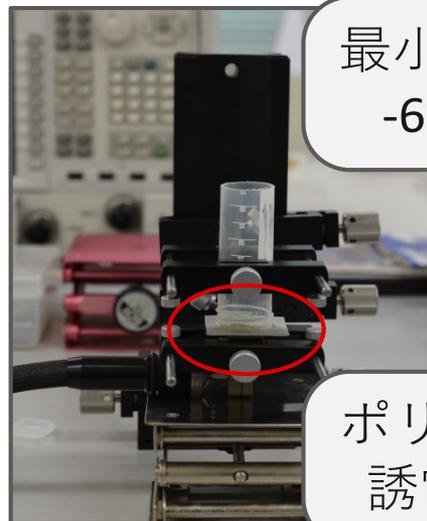
ヒトの皮膚に対応した誘電体層を組み合わせることで、インピーダンスマッチングを実現できれば、ヒト血糖値の高感度での非侵襲測定が可能となり、痛みや医療廃棄物を除去できると考えられる。

濃度変化：0～1 g/100ml H₂O
グルコース水溶液



ネットワークアナライザ
N5244A (0.01～43.5 GHz)

最小検出レベル
-60 ～ -70 dB

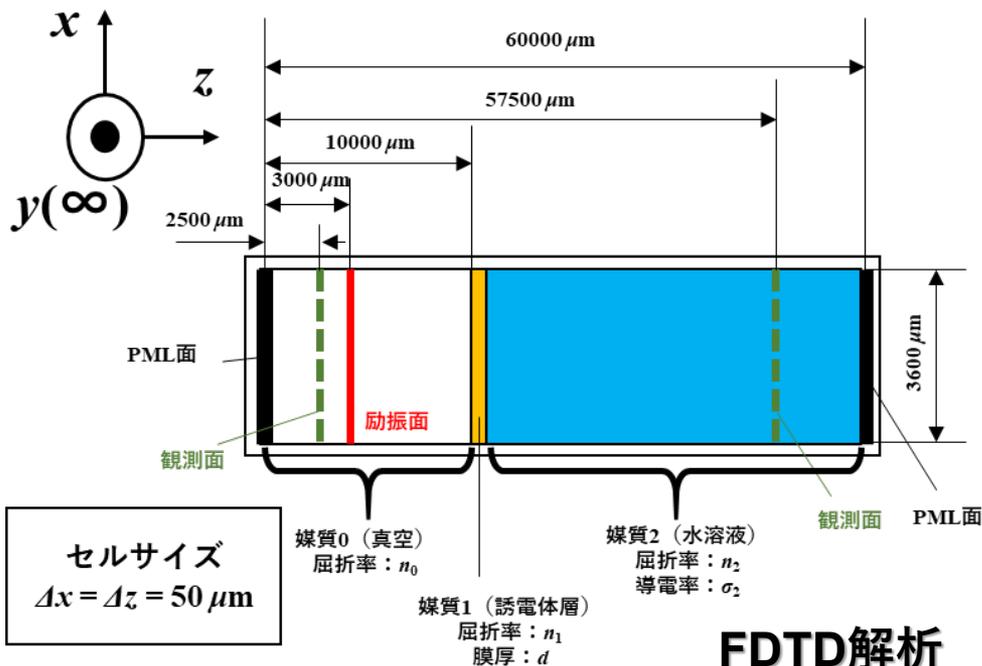


ポリエチレンの
誘電体単層膜

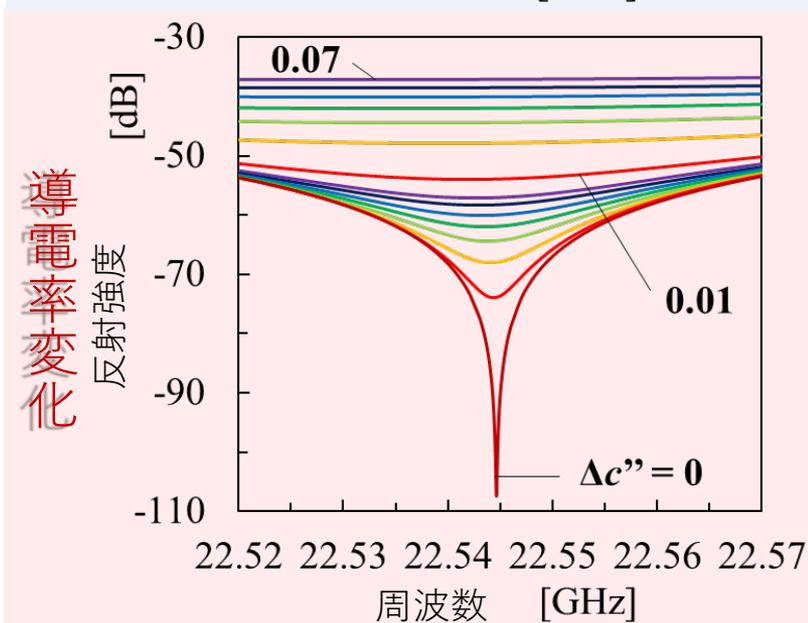
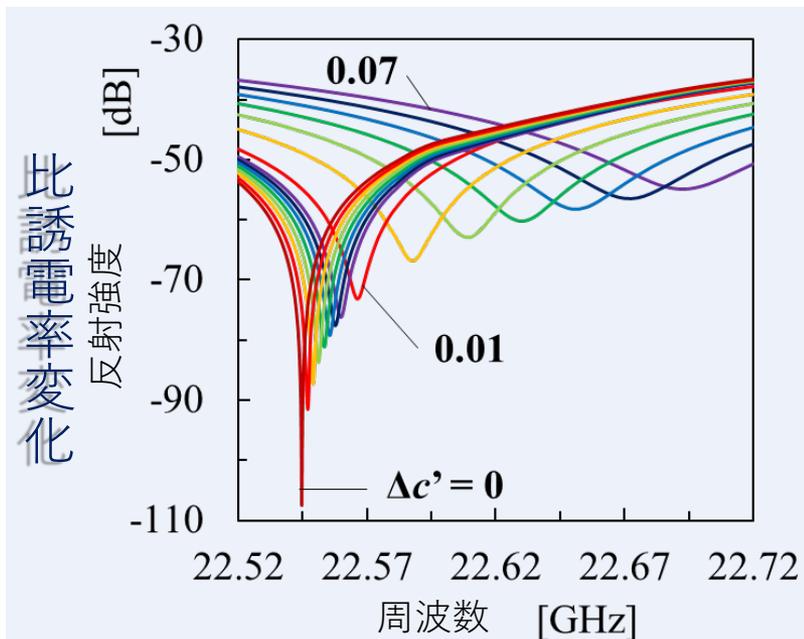
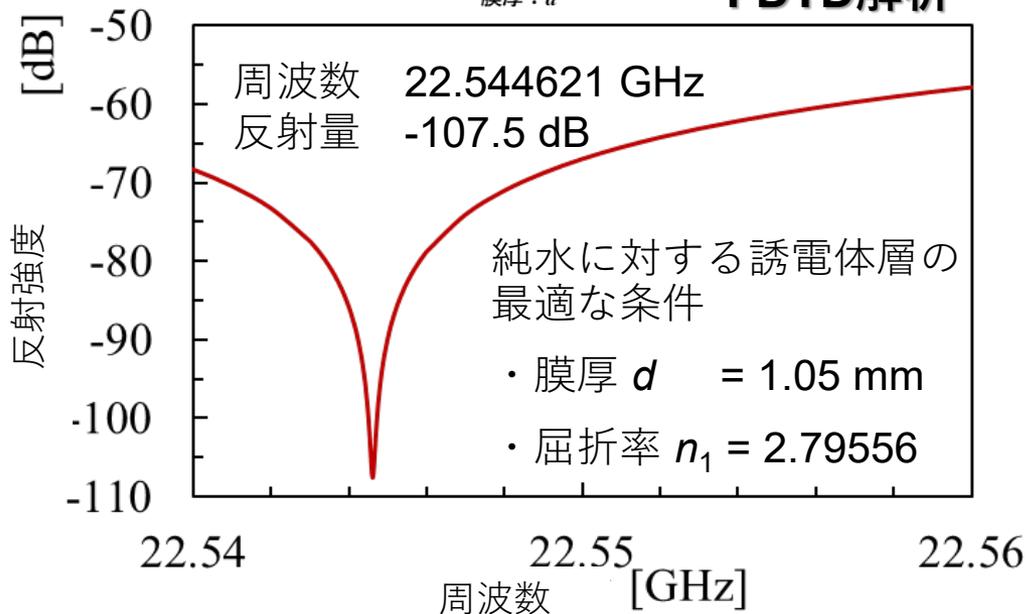
測定系

濃度増加による
反射量の増加

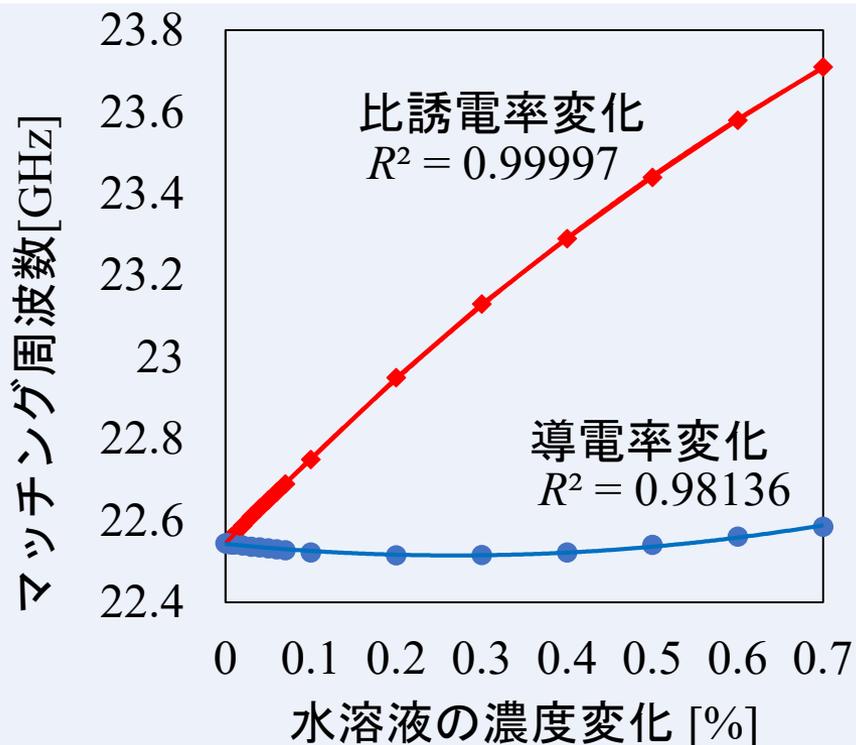
ヒトの血糖値
100 mg/dL



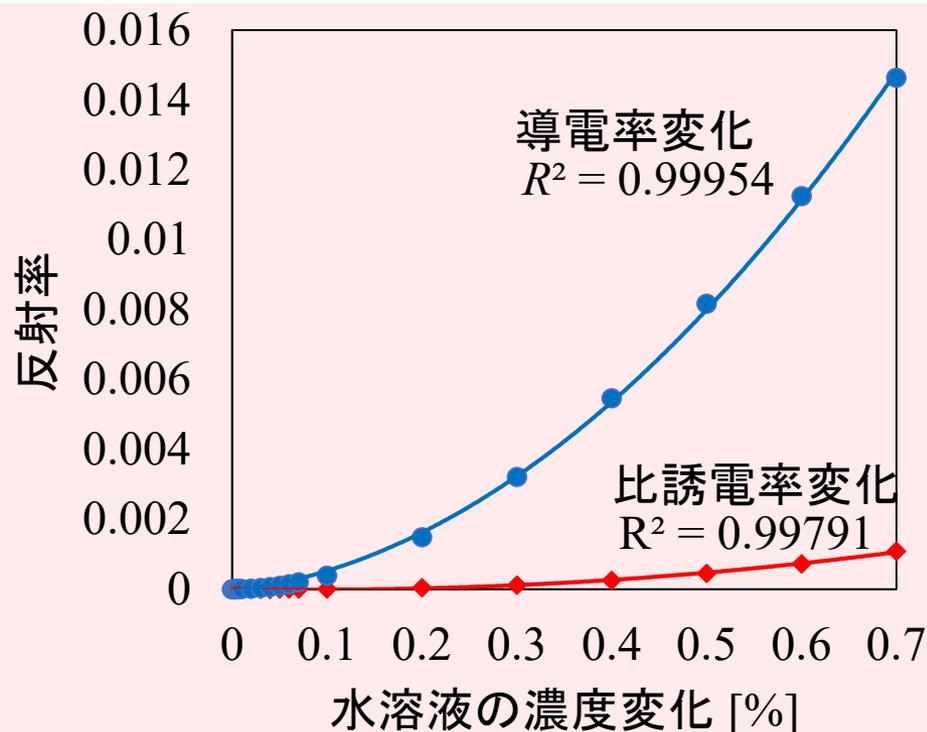
FDTD解析



マッチング周波数シフト



反射率シフト



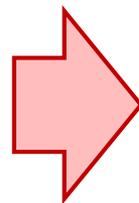
マッチング周波数や反射率により濃度変化を検出可能。
それぞれの変化に対して固有の傾向が確認された。

複合誘電体における解析結果

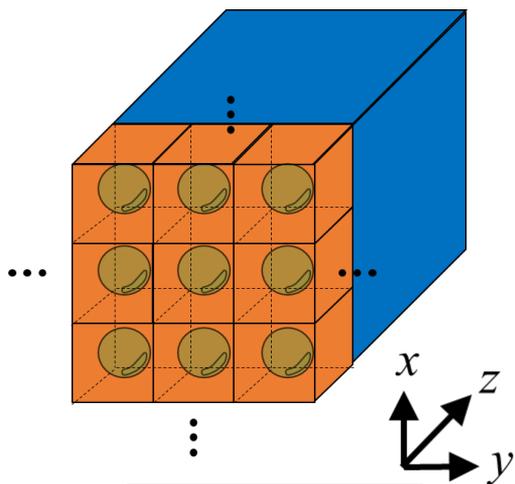
単層膜では、

○構造が単純かつ誘電体の厚さを調整可能.

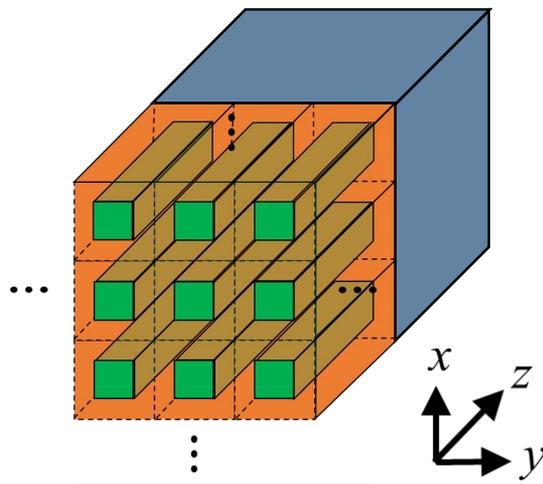
×屈折率の調整が困難.



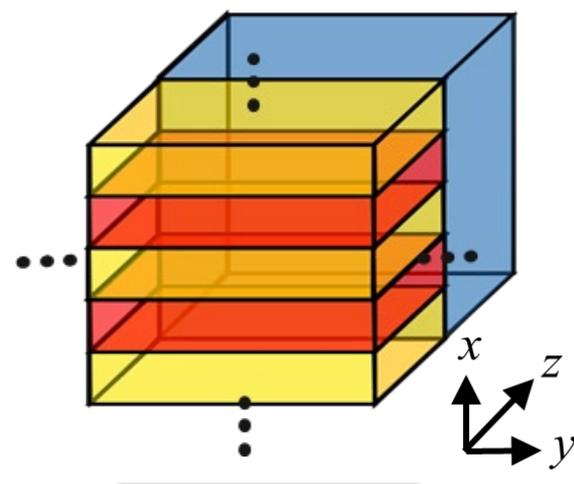
2種類の誘電体を混合し、屈折率を調整



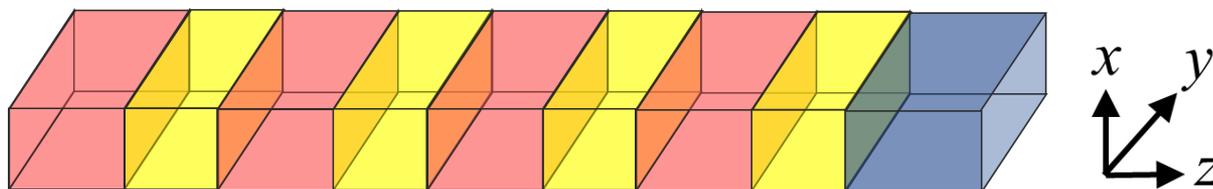
構造A



構造B



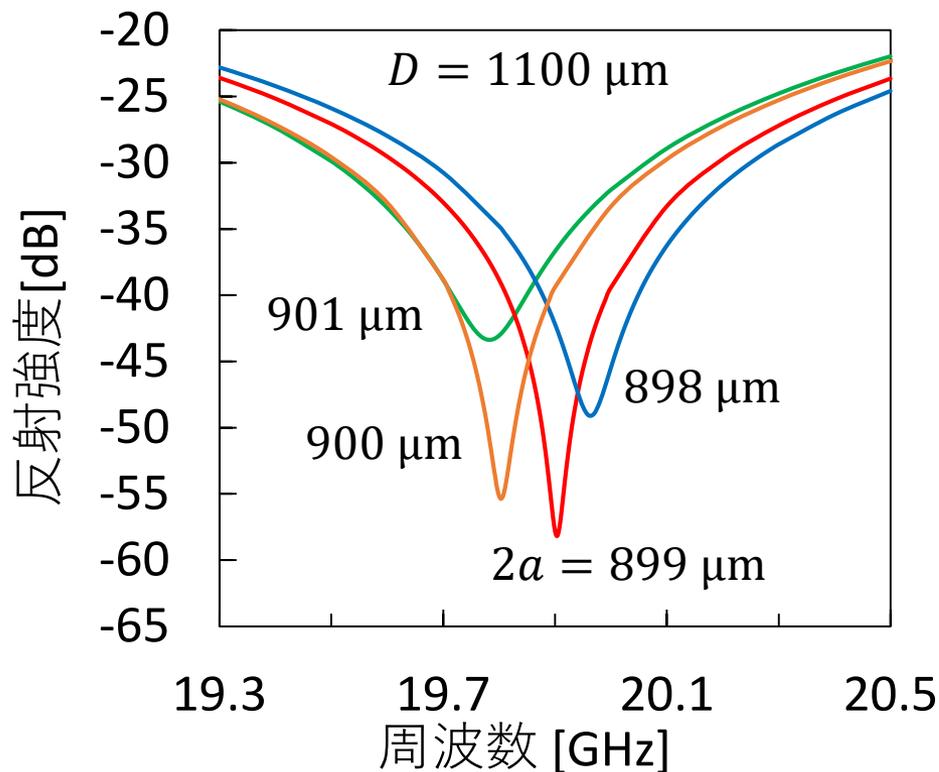
構造C



構造D

構造A

直径 $2a$ を変化

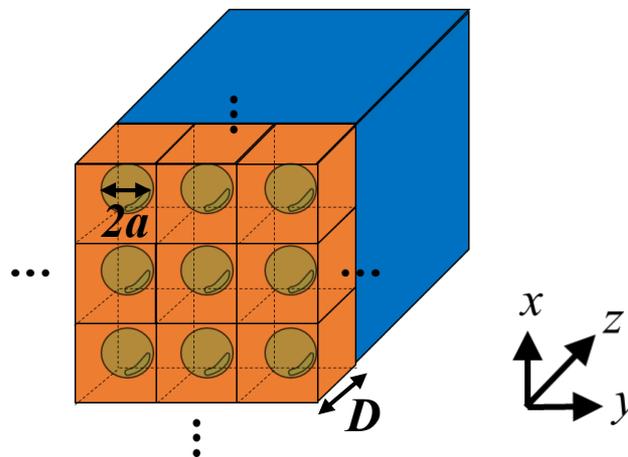


球の直径： $2a$

誘電体の厚み： D

球(セラミック)： $\epsilon_r = 80.0$

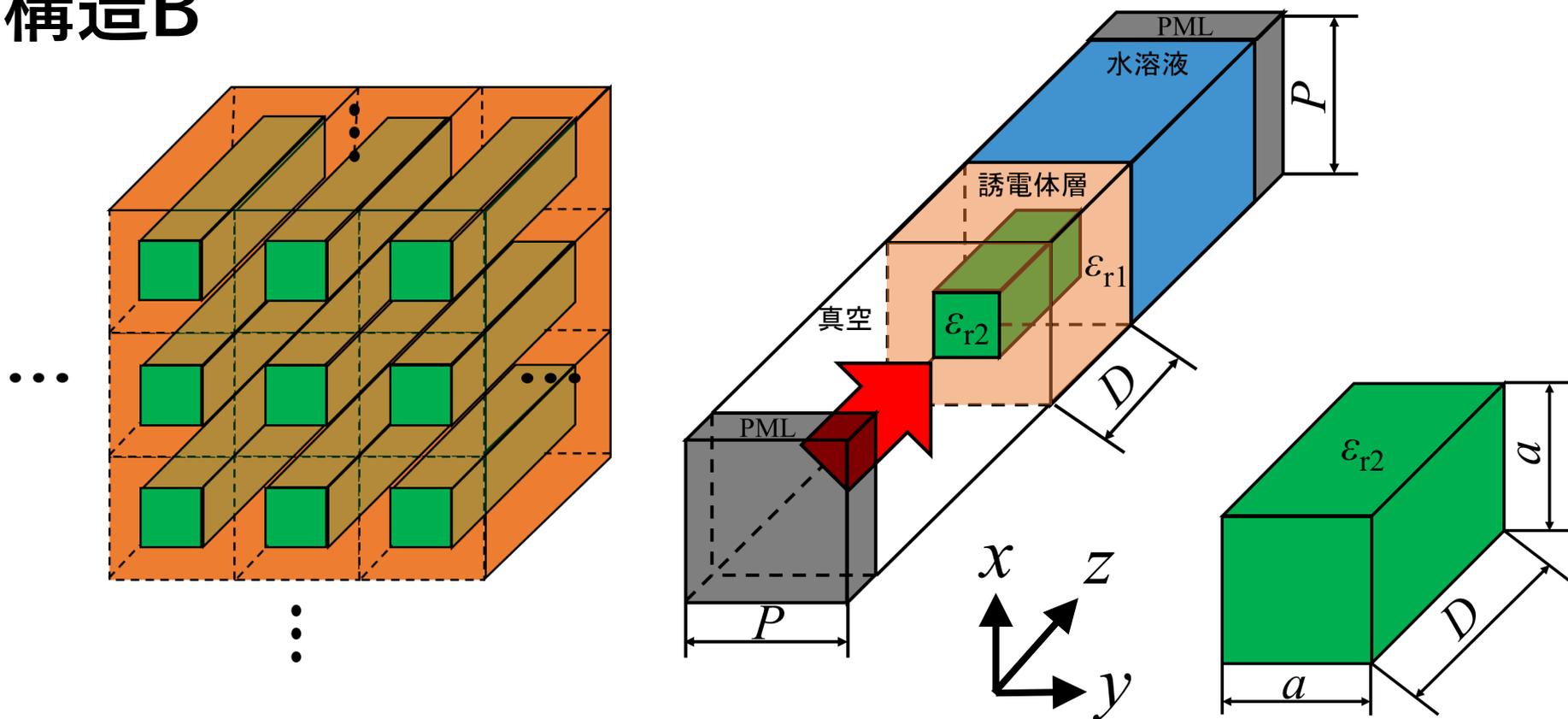
球外(樹脂)： $\epsilon_r = 2.0$



複合誘電体でマッチングが可能.

球の大きさを変えることで実効屈折率を調整可能.

構造B



特徴

- ・メッシュ寸法と誘電体層の厚さを別々に変更可能
- ・曲面がないため製作プロセスが簡単

構造B

ポリイミド $\epsilon_{r1} = 3.4$

シリコン $\epsilon_{r2} = 11.7$

$$a = 852 \mu\text{m} \quad D = 1000.3 \mu\text{m}$$

比誘電率依存性

周期 $P = 1000 \mu\text{m}$

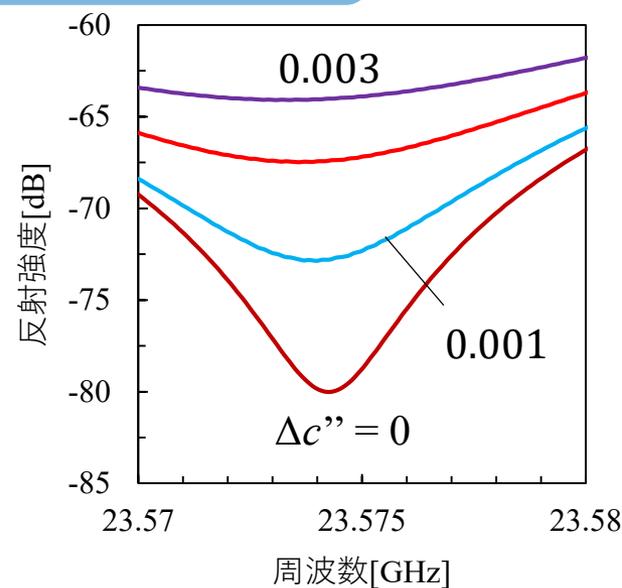
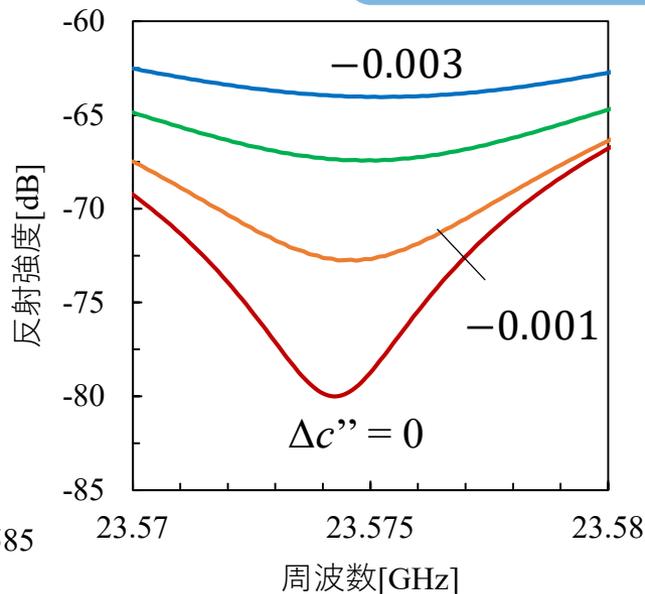
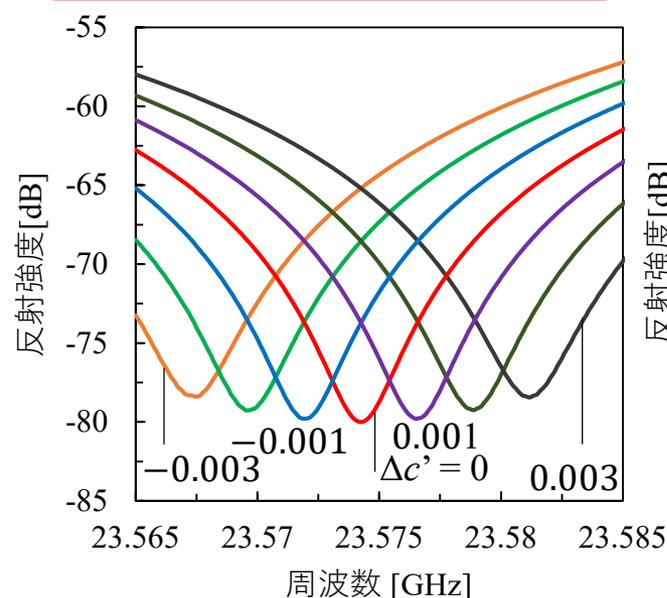
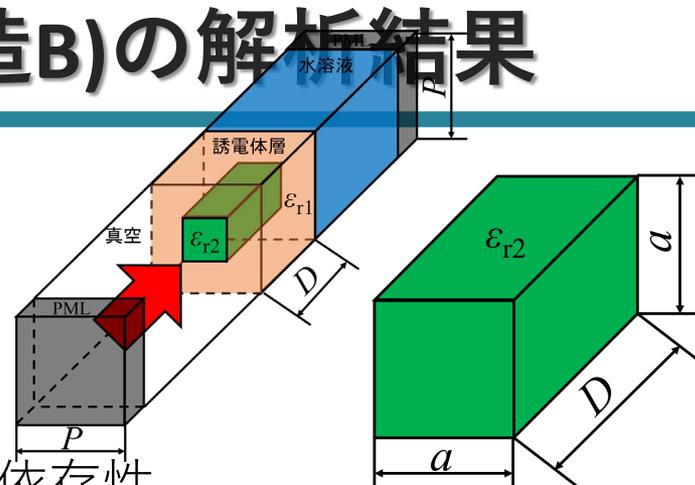
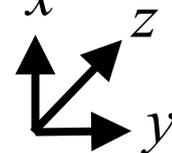
導電率依存性

$$\Delta c' : \Delta c'' = m : 0$$

$$c' = 1 + \Delta c' \rightarrow \epsilon' \times c'$$

$$\Delta c' : \Delta c'' = 0 : m$$

$$c'' = 1 + \Delta c'' \rightarrow \sigma \times c''$$



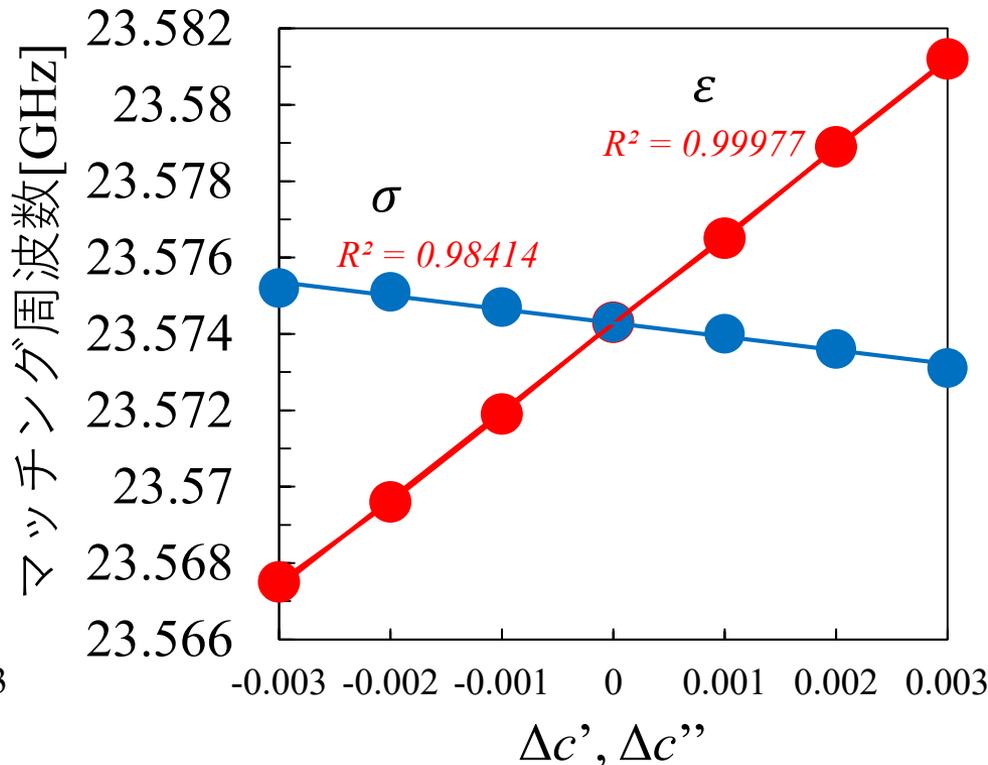
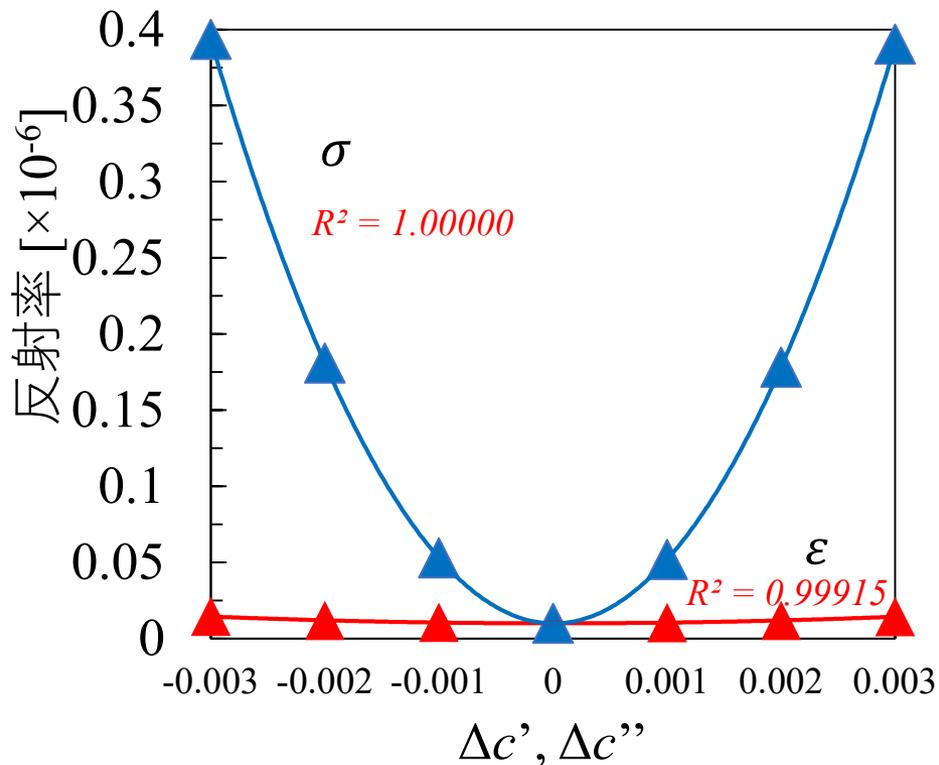
マッチング周波数と反射量が変化

構造B

$$a = 852 \mu\text{m} \quad D = 1000.3 \mu\text{m}$$

反射率

マッチング周波数



二次関数的に変化

線形に変化

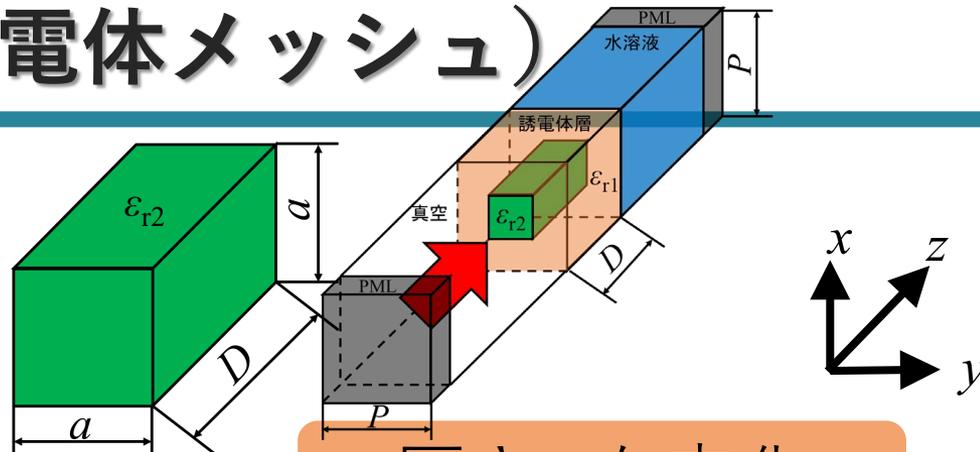
水溶液の ϵ , σ 変化を高感度に検出可能

解析結果 (誘電体メッシュ)

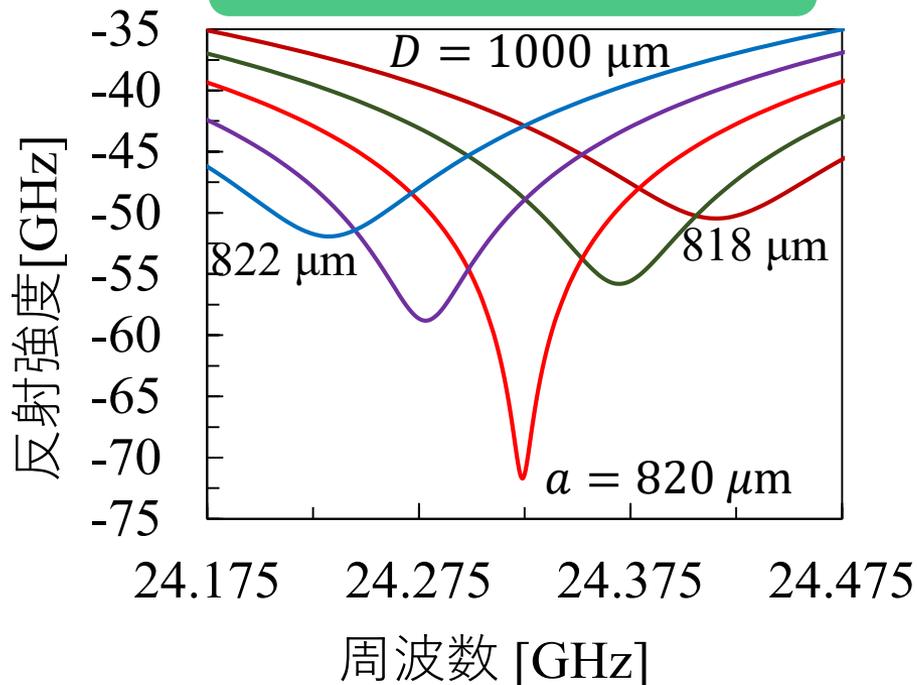
構造B

$$\epsilon_{r1} = 2$$

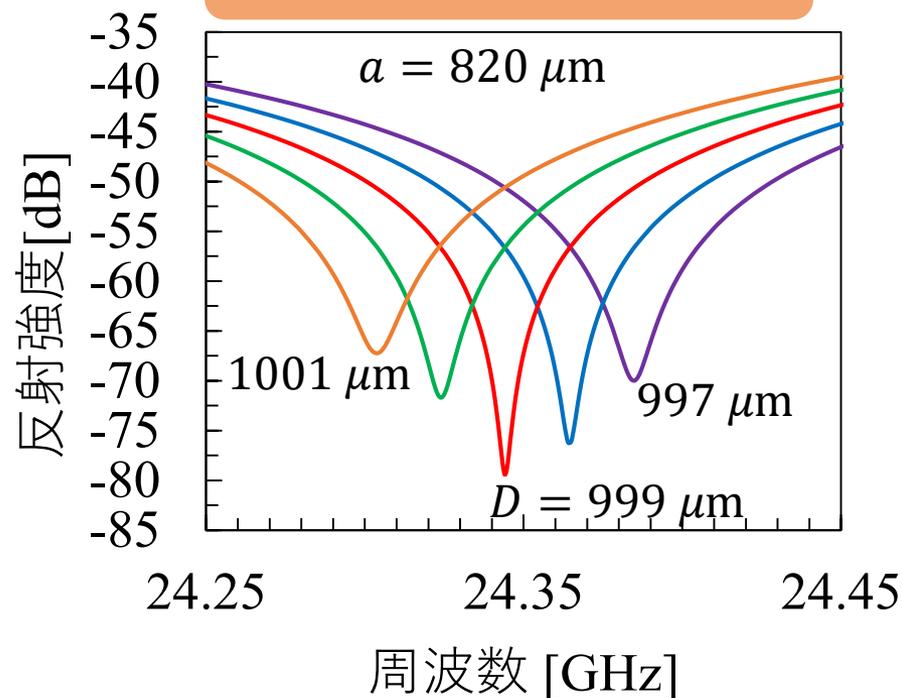
$$\epsilon_{r2} = 20$$



長さ a を変化



厚さ D を変化

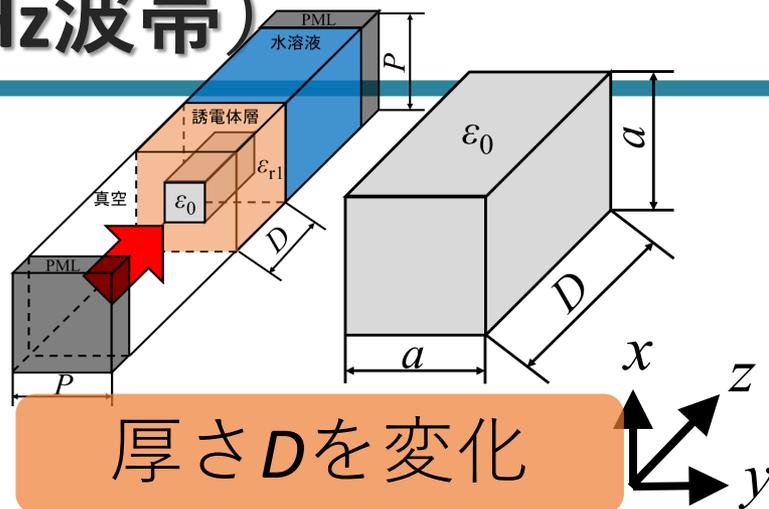


ミリ波領域で反射量が -80 dB

周波数帯の拡張 (THz波帯)

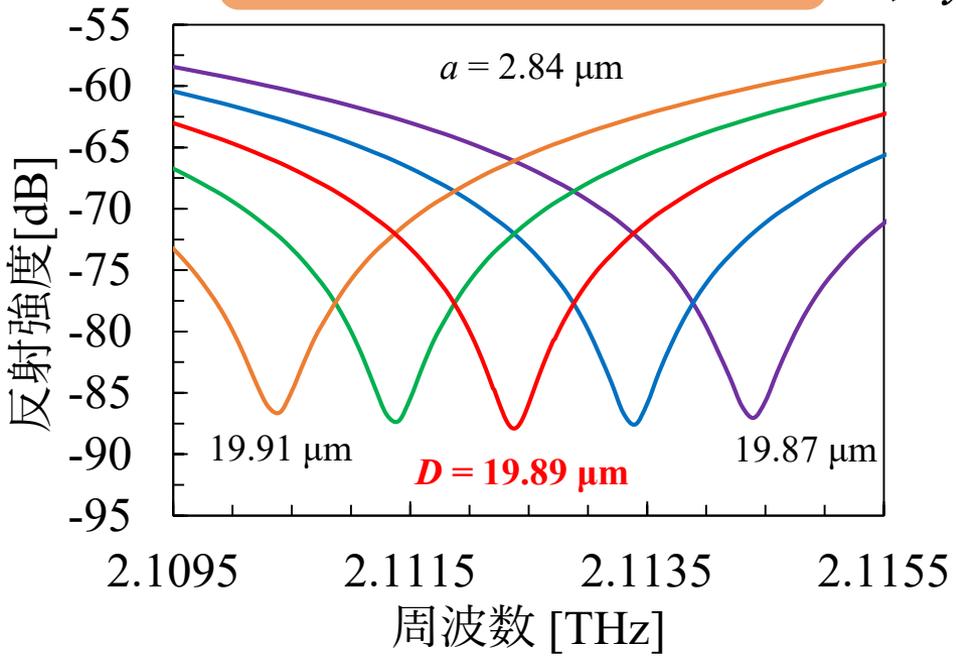
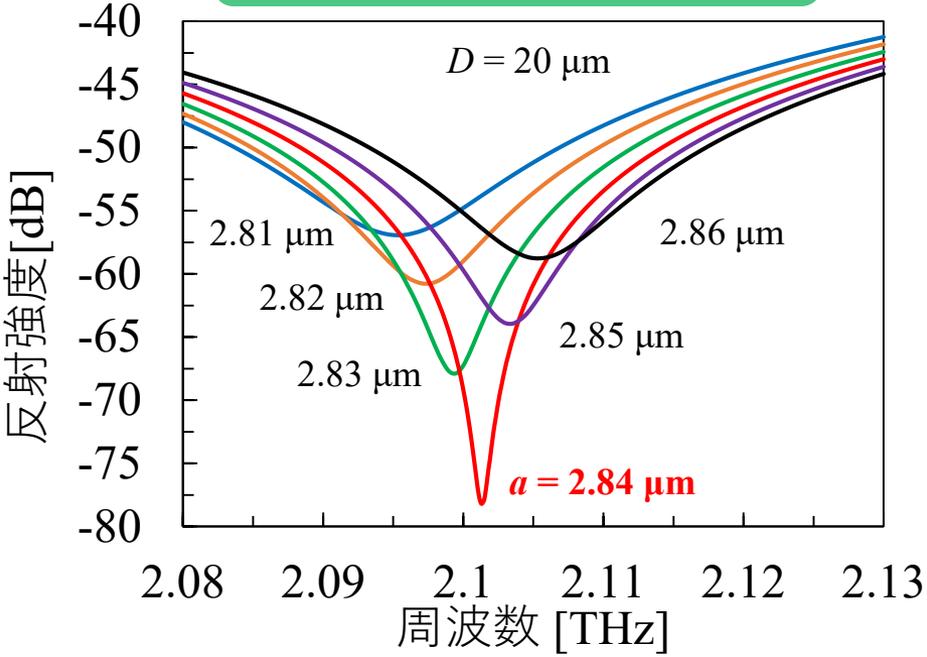
構造B

樹脂 $\epsilon_{r1} = 2.56$ ($n_1 = 1.6$)
 真空 ϵ_0 周期 $P = 6 \mu\text{m}$



aを変化

厚さDを変化

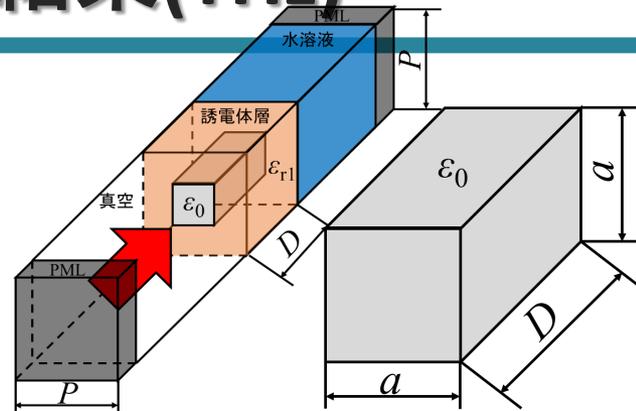


$a = 2.84 \mu\text{m}$ $D = 19.89 \mu\text{m}$ で反射量の最小値が -87.9 dB
 誘電体メッシュ構造がTHz波帯で利用可能

誘電体メッシュの解析結果 (THz)

樹脂 $\epsilon_{r1} = 2.56$ 周波数ステップ
0.01 GHz
真空 ϵ_0 周期 $P = 6 \mu\text{m}$

$$a = 2.84 \mu\text{m} \quad D = 19.89 \mu\text{m}$$



比誘電率依存性

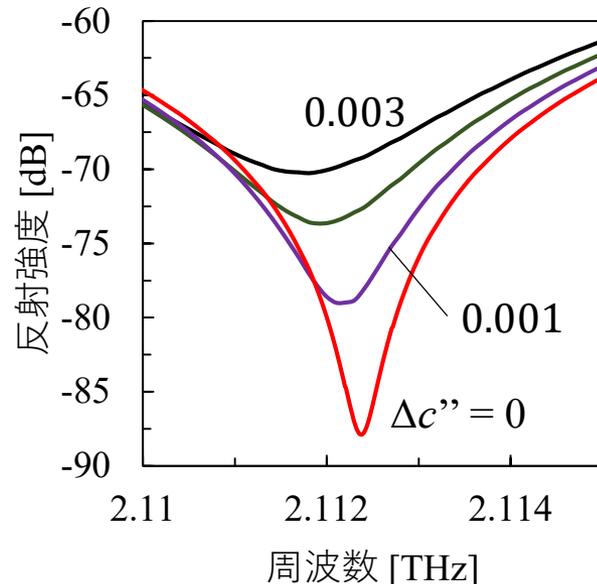
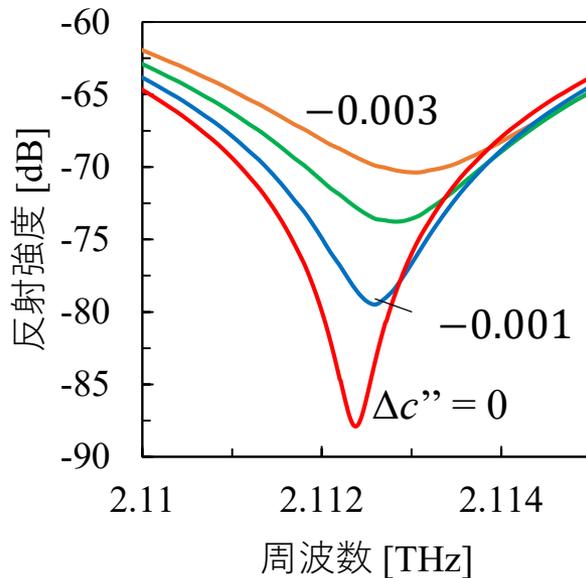
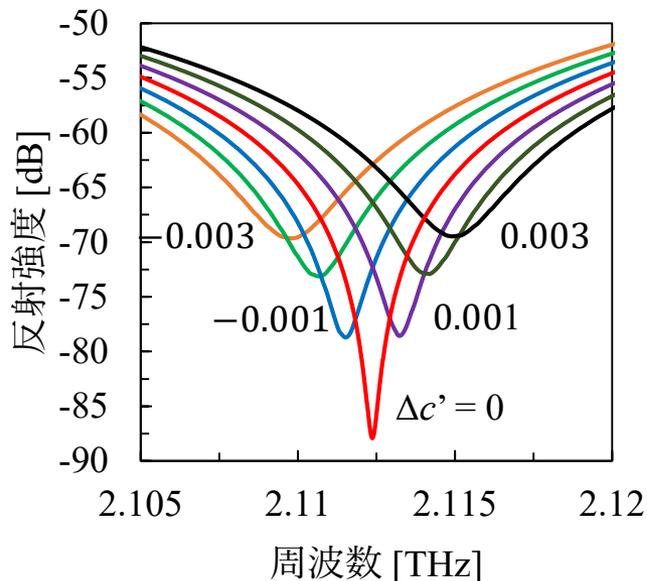
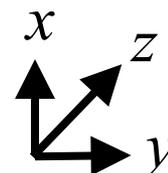
$$\Delta c' : \Delta c'' = m : 0$$

$$c' = 1 + \Delta c' \rightarrow \epsilon' \times c'$$

導電率依存性

$$\Delta c' : \Delta c'' = 0 : m$$

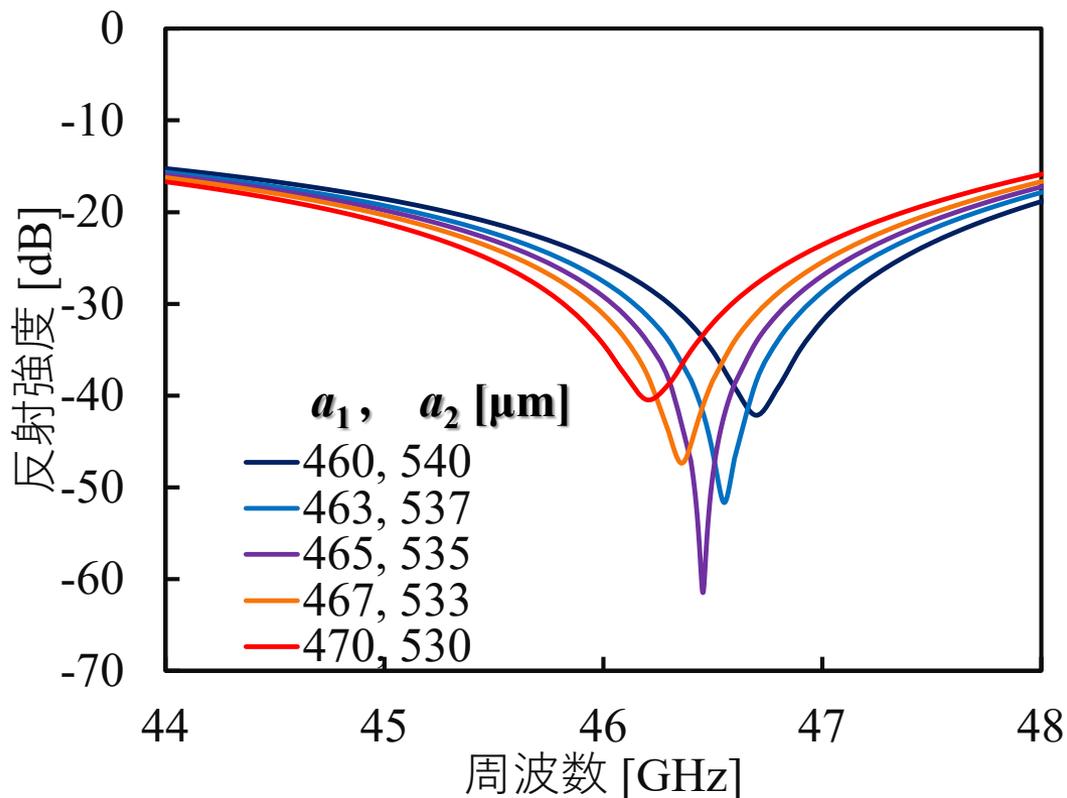
$$c'' = 1 + \Delta c'' \rightarrow \sigma \times c''$$



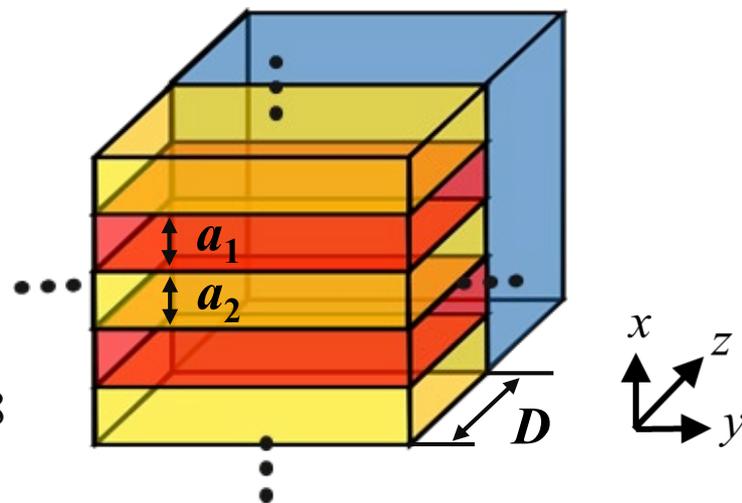
テラヘルツ波帯でも誘電体メッシュが利用可能

構造C

幅 a_1, a_2 を変化



ボーダーの幅： a_1, a_2
 誘電体膜の厚み： D
 赤(セラミック)： $\epsilon_r = 80.0$
 黄色(樹脂)： $\epsilon_r = 2.0$



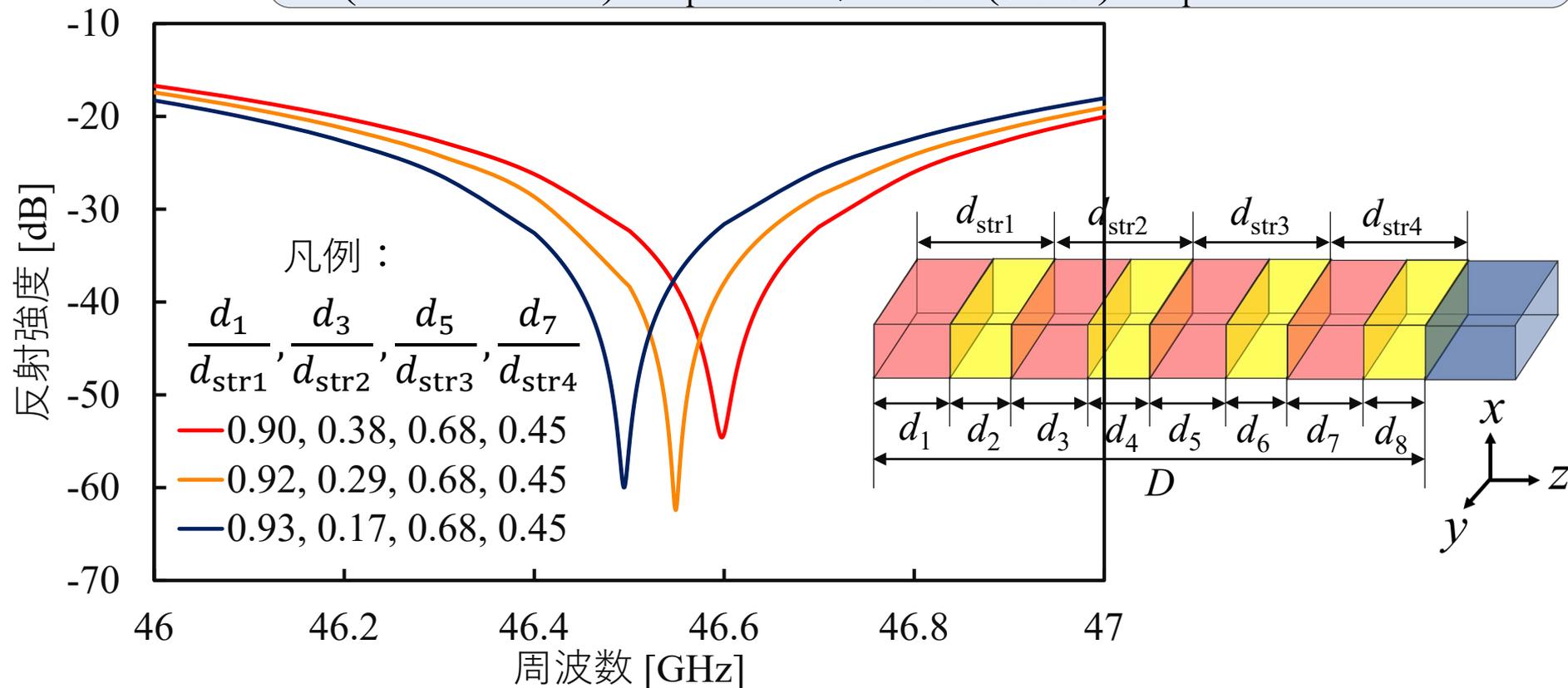
ボーダー構造で-60 dB程度のマッチングが可能.

ボーダーの幅を変えることで実効屈折率を調整可能.

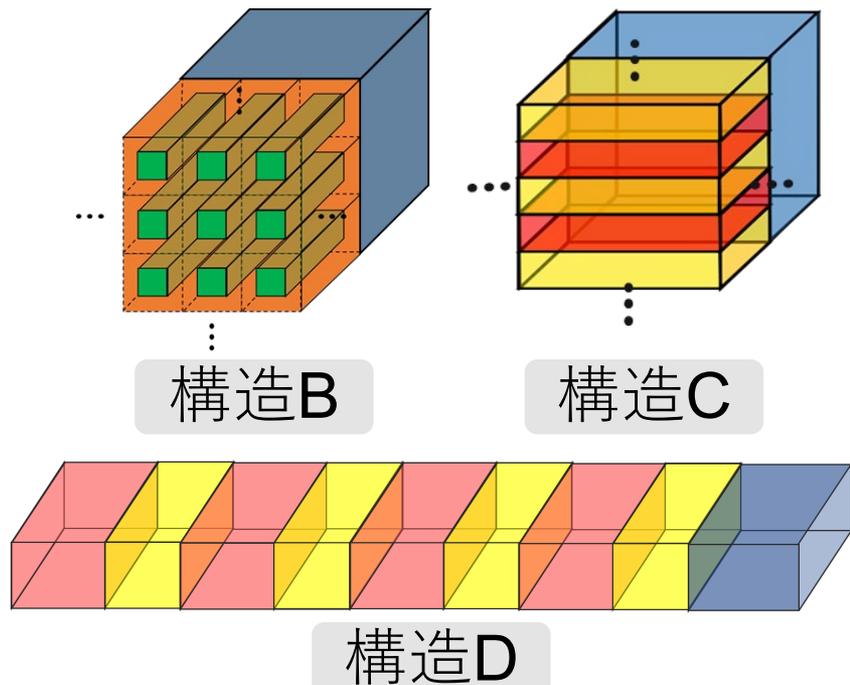
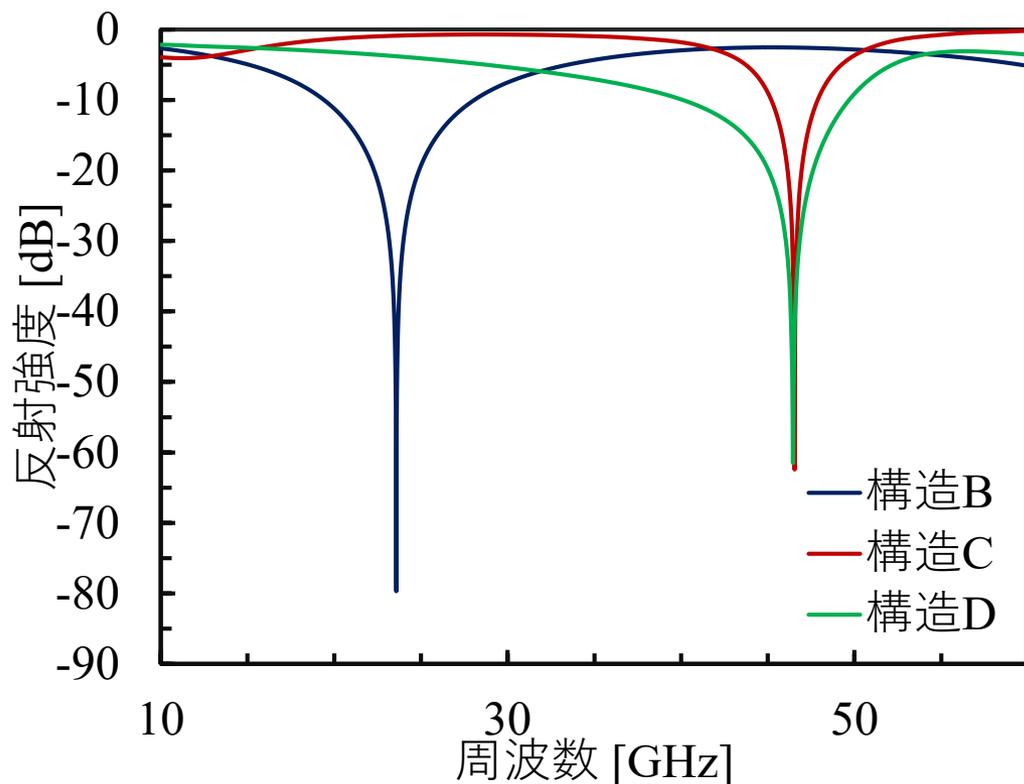
数 μm オーダーでの加工により深いマッチングが実現可能.

構造D

各層の厚み： $d_1 \sim d_8$ ，誘電体膜全体の厚み： D
 赤(セラミック)： $\epsilon_r = 80.0$ ，黄色(樹脂)： $\epsilon_r = 2.0$



各層の厚みを調整することで，任意の周波数でのマッチングが可能。 ※各層の厚みの精度が高い必要有り



- ✓ 提案する構造においてインピーダンスマッチングが可能.
- ✓ 構造を変化させることでマッチング周波数が変化.

任意の構造で高感度な測定が可能.

特許申請を想定した権利範囲

- 電磁波のインピーダンスマッチング現象を用いた微量物質の検出方法および装置
- FDTD法による逐次近似解析を用いた理想的な誘電体膜の特定方法
- 既存の複数の誘電体を複合した特定構造による誘電体膜の実効屈折率の調整と、これを用いた微量物質の検出方法および装置
- 本発明の誘電体複合膜とネットワークアナライザにより構成される水溶液中微量物質の検出装置

- 非侵襲の血糖値センサ
- 水溶液中の微量物質濃度の検出
- 誘電率や導電率の微小変化の測定
- 様々な構造の実効的な誘電率の推定
(FDTD解析より)

- ネットワークアナライザに変わる簡便で安価な電磁波発検出システムの構築
- 測定対象物の詳細な物性値と実験モデル（例えば人の指先や耳たぶ）の取得
- マッチング層（複合誘電体）の作製技術

- 発明の名称 : 電磁波を用いた水溶液の濃度測定方法およびその装置
- 出願番号 : 特願2020-079789
- 出願人 : 秋田大学
- 発明者 : 倉林徹, 高橋徹, 淀川信一

秋田大学

産学連携推進機構 藤原 将司

T E L 018-889-2712

F A X 018-837-5356

e-mail staff@crc.akita-u.ac.jp