

論文の内容の要旨

論文題目 空洞共振器摂動法の測定技術

氏名 井上亮太郎

空洞共振器摂動法はマイクロ波・ミリ波領域における物質の電磁波応答を測定する一方法である。空洞共振器中に微小な試料を挿入し、引き起こされる共振周波数と Q 値の変化から挿入した試料の複素誘電率もしくは複素透磁率を求めることができる。共振器中の定在波を考慮して電場もしくは磁場のアンチノードの位置に試料を挿入し、これをそれぞれ E 測定及び H 測定と呼ぶことにする。データは $\Delta\omega/\omega_0 = \Delta f/f_0 - i\Delta(1/2Q)$ のように定義された複素共振周波数シフトとして得られる。ここで記号 Δ は試料挿入時と非挿入時(ブランク)の差をとることを表している。複素共振周波数シフトから試料の複素誘電率もしくは複素透磁率を抽出する作業を、データ解析と呼ぶことにする。空洞共振器摂動法は非接触の測定法であるためにこのデータ解析が測定上きわめて重要になってくる。

空洞共振器摂動法のデータ解析は、ひとことでは Maxwll 方程式の固有値逆問題である。そして次に示すような所謂 Waldron の摂動公式が基本的であるとこれまで考えられてきた。

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \approx \frac{-\int dV(E_0^* \cdot (\epsilon - 1)E + H_0^* \cdot (\mu - 1)H)}{\int dV(E_0^* \cdot E_0 + H_0^* \cdot H_0)}$$

ここで (E_0, H_0) はブランク共振器の電磁場分布、 (E, H) は試料挿入時の電磁場分布である。また ϵ 及び μ はそれぞれ試料の複素誘電率、複素透磁率を表している。

しかしこの摂動公式の適用限界がどこにあるのかははっきりしていなかった。

そこで本研究では Maxwell 方程式の厳密解が得られる Double Sphere モデルについて調べた。

図 1 に Double Sphere モデルを示す。完全導体でできた球形空洞共振器の中央に等方性物質からなる球形試料が挿入されている。試料の複素誘電率 ϵ 、複素透磁率 μ 、試料と共振器のサイズ比 $\xi = b/a$ は自由に変えることができる。また固有モードを選択することによって E 測定 H 測定両方について調べられる。

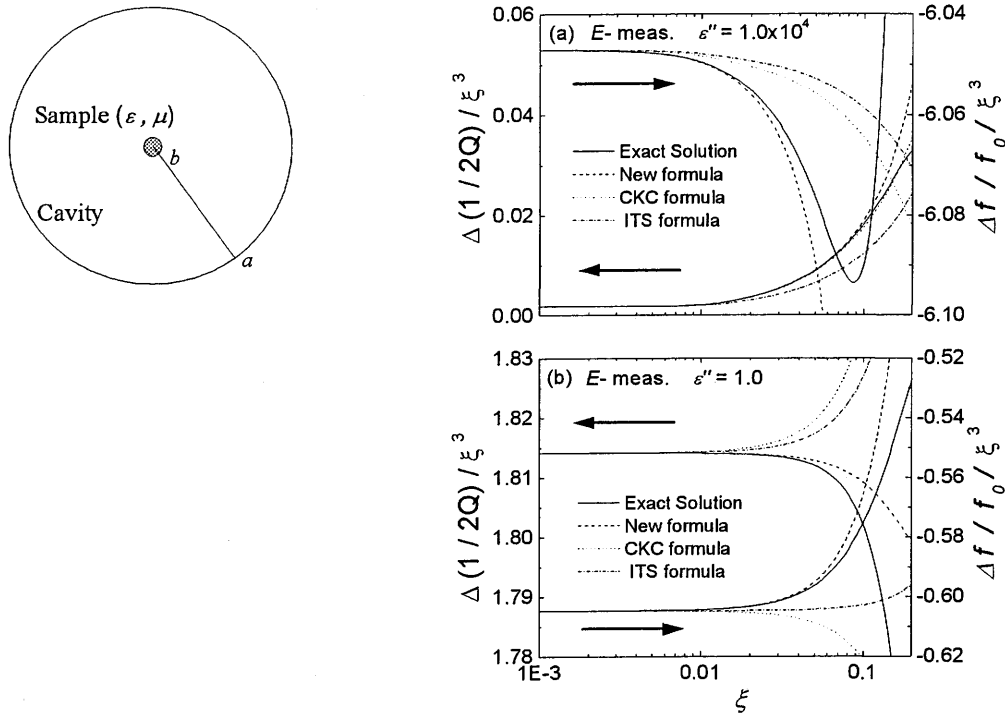


図 2 に E 測定における複素共振周波数シフトの厳密解と球状試料に対してこれまでに知られている幾つかのモデルによる近似解を示す。 ξ が十分に小さい時には全ての近似解は厳密解と一致しているが、現実の実験に使われる ξ の範囲である 0.01 から 0.1 では、これまでに知られていた Champlin-Krongard-Cassimir モデル及び Inoue-Tompkin-Spencer モデルは何れも厳密解からかなりずれている。これに対して厳密解をサイズ比 ξ に関して $O(\xi^5)$ まで摂動展開して得た次の公式は現実の実験に使われる ξ の範囲でかなり厳密解をよく近似できている。

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = -3\gamma_E \xi^3 \frac{P_E \epsilon - 1}{P_E \epsilon + 2} \left(1 + \xi^2 \left(\frac{\omega_0 a}{c} \right)^2 \left(\frac{1}{2} \frac{P_E - 2}{P_E + 2} - \frac{1}{10} \frac{2P_E \epsilon - 1}{P_E - 1} \right) + o(\xi^2) \right)$$

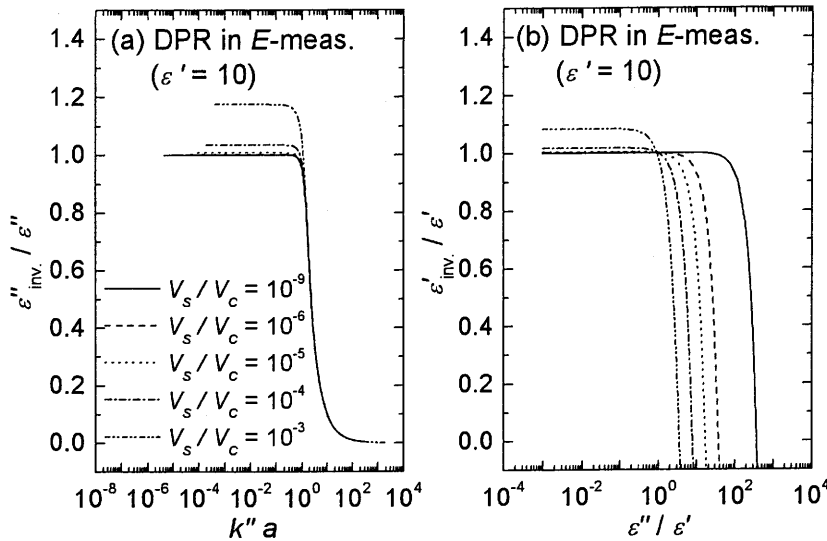
る。

ここで γ_E は所謂 cavity constant、 P_E は補正因子である。

これまでに知られていたモデル計算は何れも Waldron の摂動公式に基づいており、摂動公式が現実の実験に対応する ξ の範囲で破綻しかかっていることが示された。

Double Sphere モデルで厳密に求められる共振周波数シフトを使ってこれまで知られている近似公式の精度を逆解析の視点から定量的に議論できる。図 3 に示す通り試料の表皮深さが試料サイズに比べて十分に大きいと考えられる反分極領域の解析公式によって得た複素誘電率の実部と虚部をそれぞれの真の値と比較した。まず虚部(電気伝導度)の解析は試料内波数の虚部と試料サイズの積 $k''a$ が 1 より大きいところで一様に破綻している。また ξ が 0.1 に近づくと Waldron の摂動公式の破綻によって 1 より小さい $k''a$ でも測定誤差が大きくなる様子

が見てとれる。次に実部の解析の方を見ると $\varepsilon'' \approx \varepsilon''$ で出現する所謂 Depolarization Peak より電気伝導度が増加すると周波数シフト $\Delta f / f_0$ の符号の変化に伴って解析が破綻することが分かる。このように同じ公式の実部と虚部であってもその適用条件に違いがあることが分かった。



上に示した新しい公式における $O(\xi^5)$ の効果の物理的起源について考えることによって空洞共振器摂動法の全く新しい近似方法が明らかになった。これまで空洞共振器摂動法の摂動パラメータは試料と共振器の体積比、 ξ^3 であると考えられてきたが、これに従えば摂動展開の次の項は ξ^6 になるはずである。この $O(\xi^6)$ の効果は例えば試料で散乱された電磁場が共振器の壁で再び散乱される効果を含んでおり、試料近傍の電磁場のみを考慮しても決めることができないという意味で、大域的である。これに対して新しく現れた $O(\xi^5)$ の効果は局所的であり、試料近傍の電磁場のみから決定することができる。即ち上の球状試料に関する公式は共振器の形状が球でなくても正しい。

そこで本研究では引き続き空洞共振器摂動法のデータ解析に散乱問題を応用する手法の研究を行った。まず、ブランク共振器の電磁場分布を調べて、試料挿入位置の近傍では測定する側の場合(E測定における電場、H測定における磁場)のアンチノードが測定しない側の場合(E測定における磁場、H測定における電場)のラインノード上にあるという共通の特徴に注目し、試料にかかる外場を4つの平面波の重ね合わせとして近似した。そしてRayleigh散乱において用いられる波数によって電磁場を展開するStevensonの展開を空洞共振器摂動法に応用した。その結果表皮深さが試料の曲率半径に比べて十分小さいと考えられる、所謂表皮深さ領域においては幾何学的な効果を完全に $O(\xi^5)$ の精度で計算できることを示した。また等方性物質についてはWaldronの摂動公式に替わる新しい $O(\xi^5)$ の精度の公式を提唱した。これによってデータ解析の精度が向上するのみならず、複雑な形状の物質や異方性物質の測定に散乱問題を応用し電磁波解析シミュレーションが利用できる可能性が出てきた。

次いで異方性物質におけるデータ解析の問題に取り組んだ。空洞共振器摂動法を用いての異方性物質の測定は古くから行われているが、その解析手法の妥当性について定量的に論じた研究はほとんどない。(株)エー・イー・ティー・ジャパンの協力によって3次元電磁波解析シミュレータMW-STUDIO(ver.4)の固有値ソルバによって一軸的異方性を持った誘電体の応

答について調べた。直方体試料の形状、かけた交流電場に平行な方向と垂直な方向の複素誘電率を変化させて計算を行った。

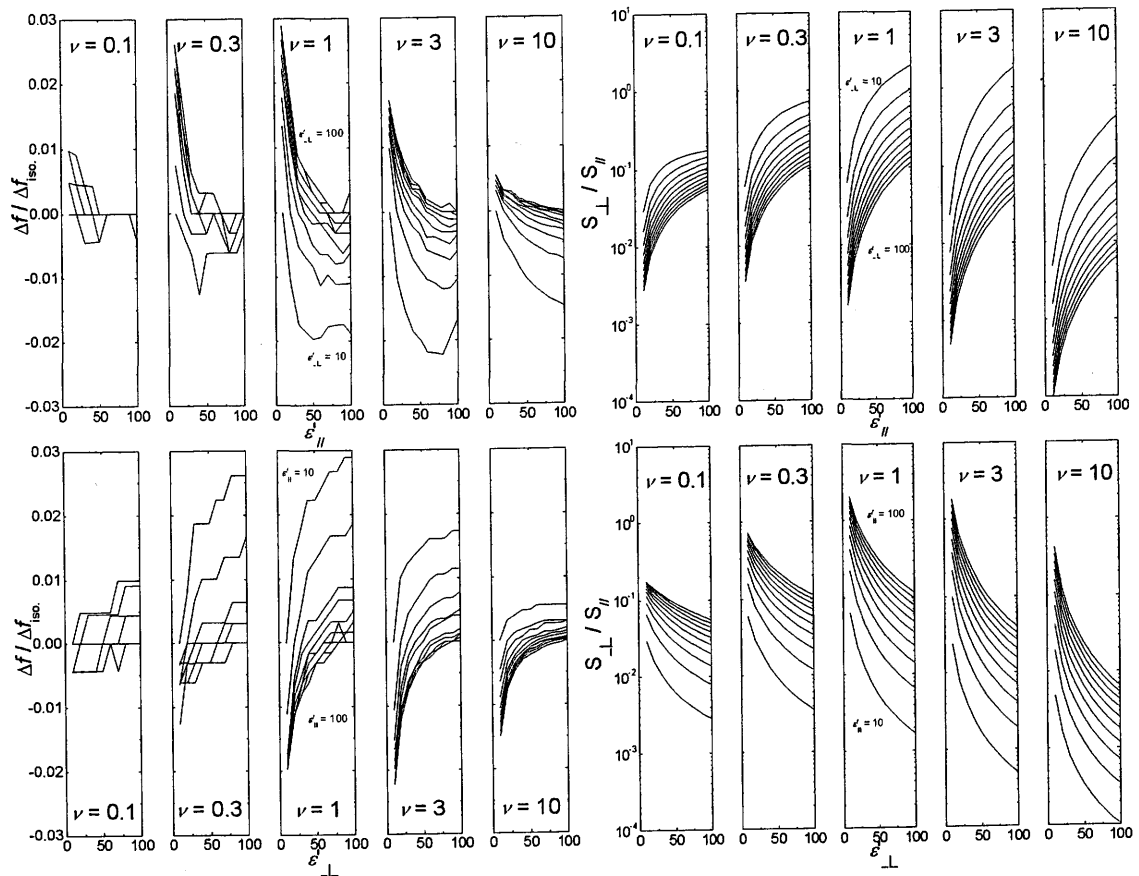


図 4 は等方性物質の場合で規格化した周波数シフトである。また図 5 は平行・垂直軸方向の Q 値比例係数の比で、各軸方向の電気伝導度がもし同じであった場合のエネルギー散逸の比を表している。これを見ると異方性の効果は共振周波数に対して約 3%、Q 値に対しては各軸方向の電気伝導度の大きさによるがおよそ 1%以下であるといえる。

また ν は直方体試料の形状をあらわすパラメータであり、 $\nu=0.1$ の平板状試料や $\nu=10$ の針状試料に比較して $\nu=1.0$ 程度の立方体に近い直方体の場合が一番異方的な効果が大きいと分かった。これは直方体試料の形状がもっとも楕円体からずれる場合であることを反分極係数の実効値から調べた。

低誘電率領域では特に応答が激しく変化していて、これは楕円体と見なして解析を行う従来の方法が破綻している可能性を示唆する。

最後にデータ解析の研究によって得られた知見を活かし新しい空洞共振器摂動法の測定システム開発に取り組んだ。寒剤非接触型の超伝導空洞共振器による高精度、高安定の測定システムを目指し、E 測定に円柱型空洞共振器の TE_{111} モードというこれまでに使用してこなかったモードを使った。