

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 井上 亮太郎

固体物性の研究を進める上で、物質のマイクロ波・ミリ波領域（1GHz から 100GHz の周波数）における複素誘電率や複素透磁率を知ることは、極めて重要で基本的な要素である。低次元電子系や超伝導体を始めとして多くの新規物質が開拓されつつある昨今、超伝導体中の磁束ダイナミクスや低次元電子系および強相関電子系の電荷ダイナミクス等を解明するための手段として、その重要性は近年ますます高まっている。

このような高周波複素誘電率または複素透磁率を決定する測定方法として、古くから最も広く利用されているのが、本論文が研究対象とする空洞共振器摂動法と呼ばれる方法である。この方法は、非定形の小さな試料を非接触的に測定できる、という際立った長所を有し、多くの物質にとって他に代替のきかないほぼ唯一の可能な測定方法である。ところが、測定結果（共振周波数のずれと共振 Q 値の変化）を物性的知見（複素誘電率または複素透磁率）に結びつける際に用いる近似的な解析方法の体系が確立していない、という問題を内包していた。数値計算による電磁場解析がまだ現実の試料に適用できる段階に至っていない現在、測定者は実験条件に応じて近似公式を選び、その近似が成立することを期待して物性を議論せざるを得なかった。その際、近似が破綻しているかどうかを判定すべき客観的指針が存在しない、という点が根本的な問題であった。そのため、特に物性が温度や磁場等の物理パラメーターで大きく変化する場合、同一の測定結果から大きな任意性をもって異なる物理的解釈を導くことが可能となり、それが研究の前線にしばしば混乱した議論をもたらす、という弊害が広く存在した。

本論文は、共振器摂動法による解析方法の体系化を試みることにより、上記の状況に光明の糸口を与えることを意図している。その成果の第 1 は、ある条件での厳密解を初めて導いたことである。それをもとに従来の近似方法を点検し直し、それらの適応限界を明らかにした。第 2 に、厳密解から $O(\xi^5)$ 公式と呼ばれる新しい表式を導出したことである。この新たな公式は従来の全ての近似公式のなかで最良の近似を与える。第 3 に、散乱問題との対比により、空洞共振器の壁からの反射波の効果を含めない摂動法の範囲内では、 $O(\xi^5)$ 公式以上の精度を持つ近似公式が存在し得ないことを明らかにしたことである。これらの結果を纏め、本論文は空洞共振器摂動法に対して現時点での最も体系的で徹底した理解を与えている。その結果、広く用いられているこの測定方法の正当な適用方法が初めて明確に示されたが、そのことは、物性研究の進展全般に対して潜在的な寄与が大きいと認められる。

本論文は 5 章からなる。第 1 章は序論で、データ解析のあらましと具体的測定例におけ

る問題点を指摘し、本論文の目的を記述している。第 2 章は球形空洞の中心に球状試料を置くモデル(Double Sphere モデル)を取り上げて厳密解を求めている。無限小伝導度の極限で成立する「反分極領域」の公式と、逆に、無限大の伝導度極限で成立する「表皮深さ領域」での公式が存在したが、厳密解を試料の空洞に対する相対的大きさ ξ をパラメータとして摂動展開することにより、それら既知の公式がパラメータ ξ の 3 乗項までの近似公式であることを示した。また、従来の議論の一般的基礎となっていた Waldron の摂動公式が、実は「反分極領域」以外には適用不可能であることを明らかにしている。さらに ξ の 5 乗項まで取り入れた新たな公式 ($O(\xi^5)$ 公式) を導き、そこにおける ξ の 5 乗項が電場(磁場)による測定の際の、(試料の有限サイズによって) 消失しきらない磁場 (電場) による効果であること、また、摂動的取り扱いの範囲内では $O(\xi^5)$ 公式が期待し得る最良の近似公式であることを議論している。さらに、具体的実験との関連を議論するために、誘電率の実部と虚部をそれらの公式を適用して求めたばあいの真の値からずれを、 ξ や複素誘電率の (真の) 値をパラメータとして求めている。特に、上記両極限の間には、全ての近似公式が破綻するかなり大きな中間的伝導度領域が存在することを示し、スピンドラダー系銅酸化物の測定例を取り上げて具体的問題点を指摘している。また、誘電率の実部が大きい場合も、試料サイズが試料中のマイクロ波波長より大きくなるために従来の近似が完全に破綻することを計算で示し、 TaS_3 、 NbS_3 系の具体的測定例が含む問題点を指摘している。第 3 章は $O(\xi^5)$ 公式を一般形状の試料に拡張する意図で電磁波の散乱問題との関連を探求し、いくつかの試みを行っている。第 4 章では異方性物質と直方体試料につき、その効果を商業的な 3 次元電磁波解析シミュレータを用いて調べ、解析上の幾つかの問題点を指摘している。第 5 章は総括と結論を述べている。

なお、本論文中の第 2、3 章の一部は、北野氏・前田氏との共同研究だが、論文の提出者が主体となって分析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士 (学術) の学位請求論文として合格と認められる。