

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 井口 智明

100T を超える「超強磁場」は破壊的かつ瞬時的（幅数 μ 秒）にしか発生できないため、その下での物性実験は、100T 以下の通常の強磁場実験に比べ技術的に格段に困難となる。特に、①巨大な誘導電圧や放電雑音の重畳、②誘導電流による試料の自己発熱、という不可避の問題のために、従来の超強磁場下物性実験の多くは比較的電磁雑音の影響を受けにくい光学的測定手段に限られ、その対象も自己発熱のない半導体・絶縁体試料に限られてきた。しかし電子多体効果や電子相の探索、格子系（Bloch 電子系）の問題など、超強磁場下の電子物性研究には電気伝導実験が必須である。②の発熱問題は試料サイズの微小化が唯一の解決法であり、各試料に対する微細加工技術という個別の問題に帰着する。結局、①の誘導・雑音問題を克服できる一般的な電気伝導測定技術の開発が課題となる。

本論文は、「超強磁場における半金属および低次元電子系の量子極限物性」と題し、超強磁場下電気伝導測定技術の確立を目的として、一巻きコイル法と電磁濃縮法により発生されたパルス超強磁場の下で、RF 高周波バイアスを用いた反射係数法による電気伝導測定技術を初めて開発し、それをグラファイト、ビスマスおよび半導体 2 次元電子系の伝導実験に適用した結果について記述したものである。

第 1 章「序論」では、本論文の目的、構成について述べられている。

第 2 章「パルス超強磁場下での電気伝導測定法」では、まず 2. 2 節で 100T を超えるパルス超強磁場発生法として本研究で用いた一巻きコイル法と電磁濃縮法について、また低温技術などの周辺技術について解説がなされている。2. 3 節は本論文の中核をなす部分であり、上に述べたパルス超強磁場実験の問題点①と②について詳細に分析した後、①の誘導・雑音問題に対する解決策として高周波反射係数法による電気伝導測定法を初めて提案し、開発した新技術について詳細に説明している。これは、誘導電圧と放電雑音の主たる周波数分布域より十分高い RF 帯周波数（ $\sim 100\text{MHz}$ ）の高周波バイアスを試料に加え、インピーダンス不整合による試料からの反射信号を方向性結合器で分離、高域フィルタを通したのち位相検波して検出するものである。反射信号に重畳する誘導電圧・放電雑音はフィルタと位相検波により原理的には除去される。試料を取り付ける測定プローブの周波数特性を振幅・位相共に平坦にすることが、測定の信頼性を確保する上で極めて重要であることが強調されている。

第 3 章「超強磁場におけるグラファイトの電子状態」では、高周波反射係数法によるグラファイトの超強磁場下電気伝導の実験について述べられている。グラファイトは 7.3T 以上の磁場で少数のランダウサブバンドのみがフェルミ準位と交叉する準量子極限に入り、系が 10K 以下の低温・25T \sim 55T の磁場範囲で密度波相と考えられる電子相に入ることが知られていた。磁場掃引時の自己発熱による試料の温度上昇過程を考慮して、一巻きコイ

ル法および電磁濃縮法の実験結果を整理すると、準量子極限に入った後、低温では密度波相を経て、63T 付近にシュブニコフ・ドハース振動と思われる構造が存在すること、115T 付近から 350T 以上まで磁気抵抗は磁場に対し減少傾向を示すこと等が今回初めて明らかになった。10T 以下の電子構造を高い精度で再現する一体バンド理論に従うと、100T 以下の領域では 45T、70T、90T 付近にシュブニコフ・ドハース振動が現れるはずであるが、観測された構造は 63T のもの一つである。これは『量子極限近傍では電子相関効果が強調され、一体バンド理論に対し大きな自己エネルギー補正が現れる』とする高田らの理論を支持する結果であると議論されている。

第4章「超強磁場におけるビスマスの電子状態」では、高周波反射係数法によるビスマスの超強磁場下電気伝導の実験について述べられている。測定された磁気抵抗は 40T 以下の低磁場領域では従来から知られている振舞を良く再現し、60T 付近にも一体バンド理論から予測されるシュブニコフ・ドハース振動を見出した。しかし過去の超強磁場下遠赤外線透過実験で観測され、半金属半導体転移であると主張された 88T の構造の兆候は、本実験では見られなかったと報告されている。

第5章「超強磁場における 2 次元電子系の電子状態」では、ランダウ準位占有率 ν が 1 よりも十分小さい強磁場極限における量子ホール系の電子相を調べることを目標に行った、高周波反射係数法による GaAs/AlGaAs 界面 2 次元電子系の超強磁場下電気伝導測定技術の開発について述べられている。量子ホール系の抵抗率は、超強磁場では極めて高くなり、また非常に広い範囲で変動する。このように試料のインピーダンスが 50Ω より十分高くなると、高周波反射係数法の感度は著しく低くなり、浮遊容量や残留インダクタンスのために変動に対する応答が遅れる。こうした問題点を克服するために、試料をチャンネル部を折畳んだ変形コルビノ型に微細加工することを発案し、試料の低インピーダンス化を実現している。その結果、2 次元電子系のコンダクタンスを 100T までの磁場領域で測定することに初めて成功した。1/3 分数量子ホール効果に相当する構造を 4.2K で 80T 付近に観測し、強磁場で分数量子ホール状態が安定化したと議論している。

第6章「総括」では、以上の研究の概要がまとめられている。

以上を要約すると、本研究はパルス超強磁場下での有力な電気伝導測定技術として、高周波反射係数法の開発に初めて成功し、それを半金属や 2 次元電子系に適用して新たな知見を得たものである。超強磁場下の輸送現象測定の試みは過去いくつか存在するが、現時点で最も実用的な測定法である高周波反射係数法は本学位論文請求者によって初めて確立されたものである。技術上の注意点、問題点と解決法も各測定例で実戦的に示されている。これらは今後推進されるであろう超強磁場下伝導物性研究の技術的な基礎となる重要な知見であり、物理工学、物性物理学の発展に寄与するところが極めて大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。