

審査の結果の要旨

論文提出者氏名： 金澤 直也

B20 型化合物とよばれる空間反転対称性が破れた結晶系において様々な興味深い物理現象が発見されてきた。それらの現象は、B20 型結晶の対称性を反映した電子構造・磁気構造に起因したものである。特に近年の重要な発見として、スキルミオン磁気構造とディラック電子構造の観測が挙げられる。スキルミオンは位相幾何学的に安定な(トポロジカルな)新奇磁気構造体であり、その幾何学的に非自明な構造による特徴的な伝導現象も現れる。また、応用面からの関心も高く、スキルミオン磁気構造を用いた次世代磁気記憶媒体の開発にも注目が集まっている。一方、ディラック電子構造はエネルギーと結晶運動量が線形分散の関係を持つバンド構造である。そのバンド構造においては、電子の有効質量が非常に小さく、物質中における非相対論的効果の発現など特異な物理現象の舞台となっている。しかしながら、B20 型化合物における特徴的な電子構造・磁気構造の発現やそれに伴い現れる物理現象との関連については、未踏の領域が多く存在する。その原因として、あらゆる組成の B20 型物質合成が困難であることが挙げられる。本論文では、種々の物質合成法を駆使することにより、様々な組成の B20 型ゲルマニウム化合物の作製に成功し、スキルミオン磁気構造やディラック電子構造の発現と、ホール効果や熱電効果に現れる特徴的な伝導現象について研究を行い、深い実験的知見を得ている。本論文は 7 章から構成されており、以下にその概要を述べる。

第 1 章では、本研究の背景、特に、B20 型シリコン化合物における電子構造と磁気構造について詳しく述べている。

第 2 章では、実験手法、特に、高圧合成法や分子線エピタキシー法といった物質合成法、電気伝導・熱伝導特性測定、中性子回折実験の手法について説明している。

第 3 章では、作製した一連のゲルマニウム化合物における磁化特性、伝導特性の系統的な測定を行い、それらにおける磁気特性の全体像を捉えている。特に、扱っている組成領域 (MnGe-FeGe-CoGe) においては 3 つの異なる磁気相が現れることを示している: (1) 強いスピン軌道相互作用による短周期ヘリカル相、(2) 長周期ヘリカル相、(3) 非磁性相。この結果を基に 4 章から 6 章においては、各磁気相における代表的な物質に注目し、その磁気・電子構造について調べている。

第 4 章では、MnGe に注目し、スキルミオン磁気構造形成に伴う実空間のゲージ場の創発をホール効果によって観測している(トポロジカルホール効果)。さらに、中性子回折実験から磁気構造のモデルを立て、3 次元スキルミオン結晶状態の形成を提唱した。特にこの磁気構造モデルは、B20 型シリコン化合物において従来観測されている 2 次元スキルミオン結晶状態とは異なり、創発ゲージ場の湧き出しと吸い込みをもたらす特異な磁気構造である。また 3 次元スキルミオン結晶状態はトポロジカルホール効果の磁場依存性を良く説明

し、妥当な結論である。

第 5 章では、ナノスケールに加工した FeGe 薄膜のデバイスにおけるスキルミオン形成について調べている。分子線エピタキシー法によって作製した FeGe エピタキシャル薄膜上に 100 nm から 10 μm にわたるサイズのデバイスを描画し、トポロジカルホール効果の観測によってスキルミオン検出を試みている。FeGe におけるスキルミオン磁気構造(大きさ約 70 nm)と同等のサイズ(100 nm)のデバイスにおいてもトポロジカルホール効果の観測に成功し、スキルミオンの形成を確認した。これは、スキルミオンの新規磁気記憶媒体への応用の観点から見ると、高密度な回路設計の可能性を示している。

第 6 章では、高圧合成法を用いて $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Ge}$ や $\text{Co}_{1-y}\text{Ni}_y\text{Ge}$ を作製し、熱起電力の電子フィリング依存性を測定している。特に CoGe が金属伝導と大きなゼーベック効果を併せ持つことを明らかにし、CoGe が高効率の熱電物質であることが示している。また、併せて行ったバンド構造計算から、フェルミ準位付近に現れるディラック電子状態がその大きな熱電効果の起源であることを明らかにしている。

第 7 章では、本研究によって得られた成果についての総括を行っている。

以上をまとめると、本論文では、これまで合成が困難であった B20 型ゲルマニウム化合物の作製を行い、スキルミオン磁気構造やディラック電子構造の発現と、トポロジカルホール効果や大きな熱電効果といった、特徴的な磁気・電子構造由来の電気・熱輸送現象の観測に成功している。本研究は、系統的な物質開拓によって、空間反転対称性が破れた結晶系における物性について、今後の研究展開を図る上でも、非常に重要な知見を与えたと言える。よって本論文は物性科学・物理工学の発展に寄与するところ大であり、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。