

## Universal Phenomena in Topological Solids

(トポロジカル固体における普遍的現象)

## 学位論文内容の要旨

近年、結晶学・物性・宇宙・素粒子論などの領域においてトポロジカル欠陥の重要性が理論・実験的に指摘されており、その配列や運動が物理現象に及ぼす影響が盛んに研究されている。一般的にトポロジカル欠陥は局所的に安定に存在し、お互いに相互作用を及ぼす。系全体で考えると、表面で消失したり、対称性により配置や状態が変化したりすることがすでに調べられている。だが、系の大局的トポロジギーがトポロジカル欠陥のダイナミクスに影響を及ぼすかどうかは現在も議論の最中である。系全体のトポロジギー、つまり大局的なトポロジギーに特徴付けられる現象として Aharonov-Bohm(AB) 効果や電荷密度波(CDW) 環流などがあげられる。別のトポロジギーを有する系として  $\pi$ ひねりをもって繋ぎ合わされたメビウスの輪を考えると、隣接するスピンを揃えていっても必ずあるところで反転し系全体では強磁性秩序にならず、相転移の臨界領域の増大や外部磁場に対する応答の変化などに影響が現れる。このような単連結ではない大局的なトポロジギーを有する系における局所的なトポロジカル欠陥に及ぼす影響を調べることは、新奇物理現象の発見や宇宙の大域構造を調べる上で大変重要である。

本研究では、様々な大局的なトポロジギーをもつ結晶が発見されているトポロジカル結晶の中からリング結晶を選び、CDW のダイナミクスに関して調べた。CDW には位相ソリトンの励起が提案されており、そのダイナミクスから大局的な系のトポロジギーによるトポロジカル欠陥への影響を調べた。さらに系を再考するため、結晶生成に関して詳しく調べ、トポロジカル欠陥の直接観察による考察をおこなった。

本論文は全五章から構成される。

第一章では、序論として本研究の背景と目的を述べた。さらに、いままでに報告されている CDW の AB 効果や超電導などの理論について記述した。従来の針状結晶では、単連結かつ端のピン止めによりこれらの現象が観測できない。

第二章では、CDW のダイナミクスについて既存のモデルを基に簡単に振り返った。そのうえで、ダイナミクスを考える上で CDW ループという存在が現象に大きく影響を及ぼすことを述べた。CDW ループはトポロジカル結晶上にだけ存在する連結して端がない CDW である。

第三章では、トポロジカル結晶の成長メカニズムについて述べた。さらに、実空間におけるトポロジカル欠陥の大局的トポロジギーによる影響を調べた。リング結晶にはフラスト

レーションの緩和のため転位の進入が考えられる。転位密度は、結晶の半径と幅に依存するため、32個のリング結晶を幅と半径に関してプロットしたところ、半径が小さい結晶 ( $<2\mu\text{m}$ ) において角があるポリヘドラルトポロジカル結晶を発見した。角が発生するメカニズムに関して、林理論を基に転位の応力場を考えると、転位間の平均距離に依存する引力相互作用が存在することが分かった。このことから、十分に半径が小さい結晶ならば引力が働く頻度が増加し、転位が集中して角を形成することが分かった。

第四章では、位相ソリトンの励起が期待される  $\alpha\text{-TaS}_3$  のリング結晶における電子輸送特性を調べた。温度を 5.1K まで下げ、一定電圧を印加しながら磁場をスイープし、そのときの電流値を測定した。印加電圧を CDW のしきい電圧より大きくすると、磁場の变化に合わせて電流値の周期振動を観測した。この振動を離散フーリエ変換によって調べると、AB 効果の式、 $BS = h/e^*$ 、(B は磁束密度、S はリング面積、h はプランク定数) から  $e^* = 2e$  の周期、つまり  $h/2e$  周期で振動していることが分かった。驚くべきことに温度を 79K に変えて同様の実験をしても同じ周期が現れた。さらにリングの直径が異なる 3 つの試料で同様の実験をしても、やはり振動は観測し、周期は磁束にのみ依存する  $h/2e$  周期となった。これらの試料のサイズは準粒子の相関長より十分長いため、CDW が関与する AB 効果と考えられる。 $h/2e$  周期から、CDW の波 1 つをディスロケーションが取り囲む位相ソリトンによる干渉モデルを提案した。次に、熱揺らぎや時間的な揺らぎの効果を測定結果から排除するため、以下のような実験をおこなった。I. 一定電圧を印加したまま、磁場を固定、II. 1 秒に 1 回電流値を測定し、500 秒間測定、III. 500 点データを平均する、IV. 磁場を変化して繰り返す。この結果、磁場による電流値の変化に加えて、時間による電流値のスイッチング現象を発見した。このスイッチング現象も磁場により頻度が変わり、 $h/2e$  周期で振動することを発見した。つまり、電流値の磁場による振動とスイッチングの頻度の変化の振動が足し合わさった電流振動を観測していることが分かった。スイッチングには phase slip による CDW 環流の発生が影響していると考えられる。phase slip は CDW 全体で起こるものと考えられるため、通常ならば  $h/2e$  の周期は発生しない。結晶のトポロジカル欠陥である転位が集中するメカニズムを CDW のトポロジカル欠陥である位相ソリトンに適用し、波 1 つを取り囲む位相ソリトンが集まりバンドルとして、phase slip が起こっているモデルを新しく提案した。

第五章では、本論文の研究成果を総括した。

以上、本研究は  $\text{TaS}_3$  リング結晶を用いて、単連結ではない大局的なトポロジーによるトポロジカル欠陥への影響を調べることを目的とし、CDW の位相ソリトンや結晶転位が安定に存在し引力相互作用を及ぼすことを明らかにした。トポロジカル固体では普遍的な現象として、位相ソリトンバンドルやポリヘドラルトポロジカル結晶など新しい秩序をつくる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 丹 田 聡  
副 査 教 授 矢久保 考 介  
副 査 准教授 戸 田 泰 則

学位論文題名

## Universal Phenomena in Topological Solids

(トポロジカル固体における普遍的現象)

近年、結晶学・物性・宇宙・素粒子論などの領域においてトポロジカル欠陥の重要性が理論・実験的に指摘されており、その配列や運動が物理現象に及ぼす影響が盛んに研究されている。一般的にトポロジカル欠陥は局所的に安定に存在し、お互いに相互作用を及ぼす。系全体で考えると、表面で消失したり、対称性により配置や状態が変化したりすることがすでに調べられている。だが、系の大局的トポロジギーがトポロジカル欠陥のダイナミクスに影響を及ぼすかどうかは現在も議論の最中である。系全体のトポロジギー、つまり大局的なトポロジギーに特徴付けられる現象として Aharonov-Bohm(AB) 効果や電荷密度波 (CDW) 環流などがあげられる。別のトポロジギーを有する系として  $\pi$ ひねりをもって繋ぎ合わされたメビウスの輪を考えると、隣接するスピンを揃えていても必ずあるところで反転し系全体では強磁性秩序にならず、相転移の臨界領域の増大や外部磁場に対する応答の変化などに影響が現れる。このような単連結ではない大局的なトポロジギーを有する系における局所的なトポロジカル欠陥に及ぼす影響を調べることは、新奇物理現象の発見や宇宙の大域構造を調べる上で大変重要である。

本研究では、様々な大局的なトポロジギーをもつ結晶が発見されているトポロジカル結晶の中からリング結晶を選び、CDW のダイナミクスに関して調べた。CDW には位相ソリトンの励起が提案されており、そのダイナミクスから大局的な系のトポロジギーによるトポロジカル欠陥への影響を調べた。さらに系を再考するため、結晶生成に関して詳しく調べ、トポロジカル欠陥の直接観察による考察をおこなった。

本論文は全五章から構成される。

第一章では、序論として本研究の背景と目的を述べた。さらに、いままでに報告されている CDW の AB 効果や超電導などの理論について記述した。従来の針状結晶では、単連結かつ端のピン止めによりこれらの現象が観測できない。

第二章では、CDW のダイナミクスについて既存のモデルを基に簡単に振り返った。そのうえで、ダイナミクスを考える上で CDW ループという存在が現象に大きく影響を及ぼすことを述べた。CDW ループはトポロジカル結晶上にだけ存在する連結して端がない CDW である。

第三章では、トポロジカル結晶の成長メカニズムについて述べた。さらに、実空間におけるトポロジカル欠陥の大局的トポロジギーによる影響を調べた。リング結晶にはフラストレーションの緩和のため転位の進入が考えられる。転位密度は、結晶の半径と幅に依存するため、32 個のリング結晶を幅と半径に関してプロットしたところ、半径が小さい結晶 ( $<2\mu\text{m}$ ) において角があるポリヘ

ドラフトポロジカル結晶を発見した。角が発生するメカニズムに関して、林理論を基に転位の応力場を考えると、転位間の平均距離に依存する引力相互作用が存在することが分かった。このことから、十分に半径が小さい結晶ならば引力が働く頻度が増加し、転位が集中して角を形成することが分かった。

第四章では、位相ソリトンの励起が期待される  $\alpha$ - $\text{TaS}_3$  のリング結晶における電子輸送特性を調べた。温度を 5.1K まで下げ、一定電圧を印加しながら磁場をスイープし、そのときの電流値を測定した。印加電圧を CDW のしきい電圧より大きくすると、磁場の変化に合わせて電流値の周期振動を観測した。この振動を離散フーリエ変換によって調べると、AB 効果の式、 $BS = h/e^*$ 、(B は磁束密度、S はリング面積、h はプランク定数) から  $e^* = 2e$  の周期、つまり  $h/2e$  周期で振動していることが分かった。驚くべきことに温度を 79K に変えて同様の実験をしても同じ周期が現れた。さらにリングの直径が異なる 3 つの試料で同様の実験をしても、やはり振動は観測し、周期は磁束にのみ依存する  $h/2e$  周期となった。これらの試料のサイズは準粒子の相関長より十分長いいため、CDW が関与する AB 効果と考えられる。 $h/2e$  周期から、CDW の波 1 つをディスロケーションが取り囲む位相ソリトンによる干渉モデルを提案した。次に、熱揺らぎや時間的な揺らぎの効果を測定結果から排除するため、以下のような実験をおこなった。I. 一定電圧を印加したまま、磁場を固定、II. 1 秒に 1 回電流値を測定し、500 秒間測定、III. 500 点データを平均する、IV. 磁場を変化して繰り返す。この結果、磁場による電流値の変化に加えて、時間による電流値のスイッチング現象を発見した。このスイッチング現象も磁場により頻度が変わり、 $h/2e$  周期で振動することを発見した。つまり、電流値の磁場による振動とスイッチングの頻度の変化の振動が足し合わさった電流振動を観測していることが分かった。スイッチングには phase slip による CDW 環流の発生が影響していると考えられる。phase slip は CDW 全体で起こるものと考えられるため、通常ならば  $h/2e$  の周期は発生しない。結晶のトポロジカル欠陥である転位が集中するメカニズムを CDW のトポロジカル欠陥である位相ソリトンに適用し、波 1 つを取り囲む位相ソリトンが集まりバンドルとして、phase slip が起こっているモデルを新しく提案した。

第五章では、本論文の研究成果を総括した。

以上、本研究は  $\text{TaS}_3$  リング結晶を用いて、単連結ではない大局的なトポロジーによるトポロジカル欠陥への影響を調べることを目的とし、CDW の位相ソリトンや結晶転位が安定に存在し引力相互作用を及ぼすことを明らかにした。トポロジカル固体では普遍的な現象として、位相ソリトンバンドルやポリヘドラフトポロジカル結晶など新しい秩序をつくる。

これを要するに、著者は、トポロジカル結晶場のトポロジカル欠陥の相互作用を局所的、大局的に熟慮し、それを踏まえてトポロジカル結晶場における磁気抵抗測定を行い CDW 量子位相干渉の存在を初めて明らかにしたものである。このことは自然科学全般に対してトポロジーというコンセプトの必要性をより認識させたことになり貢献大なるものがある。よって著者は北海道大学博士の学位 (工学) を授与される資格あるものと認める。