

氏 名 中川 朋

学位の種類 博士 (理学)

学位授与年月日 令和6年3月31日

学位論文名 超流動  $^4\text{He}$  における量子渦の非バルク的效果に支配されたダイナミクスの理論的研究  
(Theoretical study of dynamics of quantized vortices governed by non-bulk effects in superfluid  $^4\text{He}$ )

論文審査委員 主査 教授 坪田 誠

副査 教授 小栗 章

副査 教授 矢野 英雄

### 論文内容の要旨

超流動ヘリウム4は代表的な量子流体であり、そこで実現する量子渦が系の物性に強く関わっている。量子渦研究は、境界などの効果があまり効かないバルク系が主となり、行われてきた。近年では、実験技術の向上もあり、微小な構造をもった物体を制御し、それを用いた量子渦研究が行われてきている。ここでは、境界へのピンニングや不純物のトラップなど非バルク的な効果で優位である。本学位論文では、実験系をモデル化し、数値シミュレーションを用いて解析する。内容は大きく分けて2つであり、「プレート状 MEMS 共振器中の量子渦ダイナミクス」と「帯電粒子をトラップした量子渦のダイナミクス」である。

#### プレート状 MEMS 共振器中の量子渦ダイナミクス

MEMS は、非常に小さく軽い電気機械デバイスを指しており、受ける力に非常にセンシティブに反応する。このようなデバイスが、近年超流動ヘリウム研究に用いられている。Barquist らはプレート状の MEMS 共振器を用意し、超流動ヘリウム4中にて振動させ、その応答を調べ、振動の異常減衰など興味深い観測結果をあげた。

我々はこの背景には、プレートと基板の間に挟まれて存在する量子渦と量子渦のピンニングが関わっていると考え、固体境界への量子渦のピンニングを記述するモデルを2種類のモデルを提案し、実験系をモデル化した。このモデルを数値解析することで、系の量子渦のダイナミクスの記述と実験事実の説明を試みた。

#### 帯電粒子をトラップした量子渦のダイナミクス

Minowa らは、近年超流動ヘリウム4内にシリコン微粒子を生成し、それらが量子渦にトラップされることを利用して、量子渦の可視化に成功した。系に電場を印加することにより、生成された微粒子は一部帯電しているらしいことが、実験的に確かめられた。彼らは量子渦にその帯電粒子がトラップされている時に系に振動電場を印加すると Kelvin 波のような構造が励起されることを発見した。我々は、量子渦にトラップされた帯電粒子のダイナミクスをモデル化することで、Kelvin 波励起の様子を調べた。

## 論文審査結果の要旨

本学位論文は、超流動  $^4\text{He}$  における量子渦ダイナミクスの理論的及び数値的研究について報告したものである。この問題は半世紀以上にわたり研究されてきたが、これまでほとんどの研究はバルクの系を対象としていた。本論文は、非バルク的效果を扱った実験結果に着想を得て、実験系をモデル化し解析することで、現象の理解を試みている。主な内容は以下の2つである。

(1) 米国フロリダ大学のグループが行った、超流動  $^4\text{He}$  中でのプレート状の MEMS (microelectromechanical systems) 共振器実験をモデル化し、シミュレーションを行った。本研究では、取り扱いが難しい量子渦の表面粗さによるピンニング現象をモデルに組み込み、量子渦のダイナクスによる観測結果の理解を行った。また、渦が MEMS 共振器に与える力を計算することで、実験で観測された振動の減衰のメカニズムを明らかにした。

(2) 阪大グループが行ったレーザーアブレーションによる量子渦の可視化実験に関連して、量子渦が帯電粒子をトラップしている系をモデル化した。本研究では、量子渦の運動方程式と帯電粒子の運動方程式を連立して解くことでダイナミクスを記述した。系に振動電場がかかった時に粒子が振動し、量子渦に Kelvin 波が励起されることを明らかにした。さらに、Kelvin 波の分散関係や振幅を求め、実験結果と良い一致を得た。

このように、本論文は量子流体（超流動  $^4\text{He}$ ）に関する独創的な研究を行い、その理解を大きく進めたものであり、博士（理学）の学位を授与するに値するものと審査した。