

令和 5 年 4 月 8 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01855

研究課題名(和文)量子流体力学と量子乱流の研究

研究課題名(英文)Studies of quantum hydrodynamics and quantum turbulence

研究代表者

坪田 誠 (Tsubota, Makoto)

大阪公立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10197759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,930,000円

研究成果の概要(和文)：超流動ヘリウムおよび原子気体ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)を対象に、量子流体力学および量子乱流の理論的および数値的研究を行なった。主な成果は以下の通り。  
超流動ヘリウム：(1)2流体完全結合のダイナミクスの定式化、(2)局所乱流の形成とその内部構造、そこからの渦輪の放出、(3)量子渦の超拡散、(4)シリコンナノ粒子による量子渦の可視化  
原子気体BEC：(1)2成分BECにおける量子渦対の消滅と再帰現象、(2)2成分BECの異成分の量子渦間の相互作用、(3)ボックスポテンシャル内の乱流における等方対称性の回復

研究成果の学術的意義や社会的意義

いずれの研究も、低温物理学における重要分野である量子流体力学および量子乱流の研究の最先端を切り拓くものである。例えば、超流動ヘリウムの2流体完全結合ダイナミクスは、1940年代に2流体モデルが提案されて以来、低温物理学の分野の宿願であった。そしてこの我々の貢献により、ここ数年著しく発展した可視化実験の理解を可能にした。また局所量子乱流の研究は、ここ最近注目されている微小空間における量子流体力学研究の先駆けとなる。また、世界の実験研究に与える影響は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：Theoretical and numerical studies of quantum hydrodynamics and quantum turbulence have been performed on superfluid helium and atomic Bose-Einstein condensates (BEC). The main results are as follows.

Superfluid helium: (1) Formulation of the dynamics of full coupling of two fluids, (2) Formation of local turbulence, its internal structure, and vortex ring emission from it, (3) Superdiffusion of quantum vortices, and (4) Visualization of quantum vortices using silicon nanoparticles

Atomic BEC: (1) annihilation and recurrence of vortex pairs in a two-component BEC, (2) interaction between vortices of different components in a two-component BEC, and (3) restoration of isotropic symmetry in turbulent flows in a box potential

研究分野：低温物理学、物性理論

キーワード：量子流体力学 量子乱流 超流動ヘリウム 量子渦 ボース・アインシュタイン凝縮 乱流

### 1. 研究開始当初の背景

超流動ヘリウムや原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)などの量子凝縮系における量子流体力学及び量子乱流は、低温物理学の重要な分野として活発な研究が行われている。この分野は半世紀以上の歴史を持つ一方で、世界的に見て、可視化に代表される優れた実験研究が進み、従来は不明だった物理が明らかにされつつある。研究代表者はこれまでこの分野を世界的に牽引して来たが、本研究ではこれまでの実績にもとづき、量子流体力学および量子乱流に関して、最新の研究を行った。

### 2. 研究の目的

ここ数年明らかになってきた量子流体力学および量子乱流の重要課題と、その解明に向けての本研究の目的は以下である。

- (1) 超流動ヘリウム：1941年にランダウが提案した2流体モデルが、その流体力学の基礎にある。量子凝縮の結果として量子渦の出現が予言・観測された1950年代以降、超流動の回転を表す量子渦の物理が、長く量子流体力学の主要テーマであった。1970年代にSchwarzに始まる量子渦糸モデルの数値計算は、2010年の坪田達の計算により、熱対向流のバルク状態に関してはおおよそ解決を見た(と思われた)。ここまでのほとんど全ての数値計算は、常流体を固定し、そこからの相互摩擦は考慮して渦糸の運動を調べる、言わば一方向のものであった。しかし、2000年代半ばから、量子渦、および常流動速度場の可視化実験が現れ、状況はさらに進んだ。最も驚くべき結果は、Guo達によって行われた、熱対向流中の励起ヘリウム分子を用いた可視化実験で、流速を上げたときの常流動速度場の非一様分布の可視化である。この問題は、それ以前には理論および数値計算でほとんど考慮されていなかった二つの効果を考える必要性を提示した。一つは、バルクではなく、流体が流れる管壁の効果である。もう一つは、量子渦糸と常流体の運動を連立して解く双方向の計算である。その後、Guo達は熱対向中の異方的な常流動速度のゆらぎ、および量子渦の異常な拡散を観測した。これらの解明が本研究の目指す所である。
- (2) 原子気体BEC: 原子気体BECは1995年に実現した後、当初、主な量子流体力学の研究は、捕獲ポテンシャル内の比較的少数の量子渦の運動に限られていた。坪田達は2007年に捕獲BECにおける量子乱流とコルモゴロフ則実現の可能性を示したが、それに触発されたブラジルの実験グループが2010年に3次元量子乱流と量子渦の可視化を実現し、新時代に突入した。その後、複数の実験グループが2次元量子乱流の実現にも成功した。しかし、これらの研究ではいずれも捕獲有限系の影響を受けて、量子渦の本数は少なく、これが乱流と呼べるのかという批判を免れ得なかった。これらが乱流であると主張するためにはコルモゴロフ則に象徴されるような統計則の観測が必要だが、そのような研究は無かったのである。しかし、2016年にケンブリッジの実験グループが箱形ポテンシャル中のBECを振動させて乱流を作り、捕獲ポテンシャルを切った後のTime of Flightで運動量分布のべき則を観測し、大きなブレイクスルーを行った(N. Navon et al., Nature 539, 72 (2016))。本基盤研究(C)が始まる直前の2016年3月、Navonから坪田に共同研究の申し入れがあり、捕獲原子気体BECの乱流に関し、共同研究を行うこととなった。それは乱流における初のカスケードの観測(N. Navon et al., Science 366, 382 (2019))に結実したが、乱流が発達しカスケードが高波数に進むにつれ、粒子分布が等方化するという大きな謎があった。その理解が大きな目的の一つである。

### 3. 研究の方法

(1)超流動ヘリウム：超流体の運動は量子渦糸モデルを用い、常流体の運動はNavier-Stokesモデルで扱い、両者を相互摩擦で結合させ、双方向の計算を行う。

(2) 原子気体BEC：巨視的波動関数に対するグロス・ピタエフスキー(GP)方程式を扱う。ただし、ケンブリッジの実験を想定して、円筒箱形ポテンシャルを用い、ポテンシャルの外側には粒子の吸収を表す散逸項を導入する。

### 4. 研究成果

1.超流動ヘリウム：1-1.Guo達の実験に関連して、微粒子と量子渦タングルの混合系に対する数値計算を行い、量子渦の拡散に特徴的な法則があることを見いだした(図1)。即ち、短い時間スケールでは素早く広がる「超拡散」を起こすのに対し、長い時間スケールでは「常拡散」を起こすことを明らかにした。二つの異なる挙動を区別するのは平均渦間距離であることを見いだした。

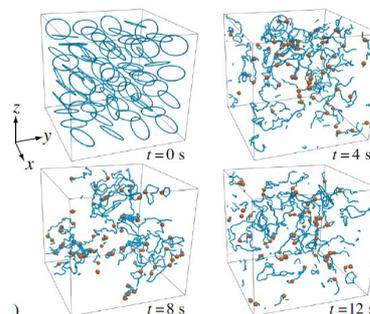


図1 量子渦タングルと微粒子

1-2. 大阪大学の実験グループとの共同研究により、半導体シリコンナノ粒子による量子渦の可視化に世界で初めて成功した。従来は、固体水素微粒子をトレーサーとする可視化しか行えなかったが、より多様な(汎用性のある)トレーサー粒子の適用が可能であることを見いだした。典型的運動である再結合の場合に数値計算を行い、実験との良い一致を得た。この研究は、量子渦の可視化手法を、さらに広げ発展させるものである。

1-3. 大阪市大実験グループの研究に関連して、局所的な量子乱流(渦タングル)を作り、そこから放出される渦輪の分布を調べた。結果は、実験結果と定性的に符合した。局所渦タングルの内部構造(フラクタル次元と自己相似性)を調べた。

1-4. 球対称熱源が作る局所量子乱流について調べた。特に、固体壁を持つ球状熱源と、点熱源の場合である。いずれも、渦タングルの成長および熱を切った時の減衰について調べ、バルクとは異なる特徴的挙動を得た。

1-5. 大阪市大実験グループの超流動ヘリウム中の吸い込み渦の実験に関連した数値計算を行った。実験と符合する、量子渦のバンドル構造の出現を確認した。

1-6. 格子ボルツマン法に基づく新たな2流体モデルを提案した。すなわち、超流体は渦糸モデルで、常流体は格子ボルツマン法で記述し、従来の結果と良い一致を得た。

2. 原子気体 BEC : 2-1. 古典乱流では、乱流が発達するにつれ、速度分布が統計的に等方性を回復することが知られている。ケンブリッジの実験グループは、箱型ポテンシャルに閉じ込められた BEC の量子乱流において、TOF によりその兆候を観測したが、その物理は不明であった。我々は、実験に対応した状況で、BEC の巨視的波動関数に対する GP 方程式の数値計算を行い、図 2 に示すように、実空間および運動量空間での乱流の発展を見た。実空間で凝縮体の分布が乱れるに連れ、運動量空間ではカスケードが低波数から高波数に進み、合わせて分布が等方化していることがわかる。この運動量分布の異方性を定量的に特徴付ける量を定義し、その解析により、低波数から高波数へのカスケードの進行にともない、波数に依存して運動量分布が徐々に等方化することを明らかにした。

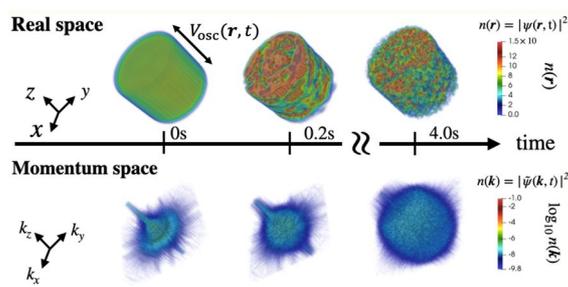


図 2 箱形ポテンシャル中 BEC の量子乱流の発展。上段が実空間、下段が運動量空間。

2-2. 2次元2成分 BEC において、量子渦対の消滅とそれに付随する再帰現象について調べた。

1成分系では渦対消滅にはエネルギー散逸や触媒渦が必要だが、2成分系では異成分間の斥力相互作用によるエネルギー交換が対消滅を引き起こすことを示した。また、特定の条件下では、一方の成分の対消滅後、他方の成分に量子渦対が現れることを見いだした。条件に依存して、両成分間で、この対消滅と対形成が繰り返されること(再帰現象と呼ぶ)を見いだした。

2-3. 2次元2成分 BEC において、両成分が1本ずつ量子渦を持つ場合のダイナミクスを調べた。円形ボックスポテンシャルの中心でそれらの量子渦が重なった状態を考え、異成分間の斥力相互作用による量子渦の分離を確かめた。また、分離後のダイナミクスを解析し、2本の渦が同符号の場合、回転運動の角速度を量子渦の運動方程式と渦間距離から導出し、異符号の場合、並進運動中に鏡像渦の影響で2本の渦が再度重なることを見いだした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Minowa Yosuke, Aoyagi Shota, Inui Sosuke, Nakagawa Tomo, Asaka Gamu, Tsubota Makoto, Ashida Masaaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Visualization of quantized vortex reconnection enabled by laser ablation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabn1143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abn1143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yui Satoshi, Tang Yuan, Guo Wei, Kobayashi Hiromichi, Tsubota Makoto	4. 巻 129
2. 論文標題 Universal Anomalous Diffusion of Quantized Vortices in Ultraquantum Turbulence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 25301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.025301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hejazi S. Sahar S., Polo Juan, Tsubota Makoto	4. 巻 105
2. 論文標題 Formation of local and global currents in a toroidal Bose-Einstein condensate via an inhomogeneous artificial gauge field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 53307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.105.053307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sano Yuto, Navon Nir, Tsubota Makoto	4. 巻 140
2. 論文標題 Emergent isotropy of a wave-turbulent cascade in the Gross-Pitaevskii model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Europhysics Letters	6. 最初と最後の頁 66002 ~ 66002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1209/0295-5075/aca92e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Han Junsik, Kasamatsu Kenichi, Tsubota Makoto	4. 巻 91
2. 論文標題 Dynamics of Two Quantized Vortices Belonging to Different Components of Binary Bose-Einstein Condensates in a Circular Box Potential	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 24401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.024401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Han Junsik, Tsubota Makoto	4. 巻 103
2. 論文標題 Annihilation and recurrence of vortex-antivortex pairs in two-component Bose-Einstein condensates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 53313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.053313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inui Sosuke, Tsubota Makoto	4. 巻 104
2. 論文標題 Coupled dynamics of quantized vortices and normal fluid in superfluid 4He based on the lattice Boltzmann method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.214503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakagawa Tomo, Inui Sosuke, Tsubota Makoto	4. 巻 104
2. 論文標題 Internal structure of localized quantized vortex tangles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 94510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.094510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakagawa Tomo, Inui Sosuke, Tsubota Makoto, Yano Hideo	4. 巻 101
2. 論文標題 Statistical laws and self-similarity of vortex rings emitted from a localized vortex tangle in superfluid 4He	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1844515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.184515	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inui Sosuke, Tsubota Makoto	4. 巻 101
2. 論文標題 Spherically symmetric formation of localized vortex tangle around a heat source in superfluid 4He	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.214511	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inui Sosuke, Nakagawa Tomo, Tsubota Makoto	4. 巻 102
2. 論文標題 Bathtub vortex in superfluid 4He	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.224511	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yui Satoshi, Kobayashi Hiromichi, Tsubota Makoto, Guo Wei	4. 巻 124
2. 論文標題 Fully Coupled Two-Fluid Dynamics in Superfluid 4He: Anomalous Anisotropic Velocity Fluctuations in Counterflow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 155301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.155301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Weican Yang, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Vortex motion and dissipation mechanism in strongly coupled holographic superfluid
3. 学会等名 ULT2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Yui, Yuan Tang, Wei Guo, Hiromichi Kobayashi, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Numerical study on superdiffusion of ultra-quantum turbulence in superfluid helium-4
3. 学会等名 ULT2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宿野伸征, 佐野融人, 坪田誠
2. 発表標題 Bose-Einstein凝縮体におけるFaraday waves : 相互作用およびポテンシャルの振動による励起
3. 学会等名 日本物理学会、2023年春期大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Makoto Tsubota
2. 発表標題 Numerical studies of quantum hydrodynamics and turbulence
3. 学会等名 Multiscale Analysis and Methods for Quantum and Kinetic Problems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浅川研太, 石原秀樹, 坪田誠
2. 発表標題 Gross-Pitaevskii-Poissonモデルによる自己重力Bose凝縮体の研究
3. 学会等名 日本物理学会、2022年年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuto Sano, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Emergent Isotropy in a Matter-Wave Turbulent Cascade
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junsik Han, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Annihilation and recurrence of vortex; antivortex pairs in two-component Bose-Einstein condensates
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Gamu Asaka, Tomo Nakagawa, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Plug of Quantum Turbulence in Counterflow
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Weican Yang, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Quantum Turbulence in Holographic Model: Vortex Statistics and Inverse Cascade
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 湯井悟志、小林宏充、坪田誠、横田理央
2. 発表標題 超流動4Heの熱対向流：常流体乱流が量子乱流に与える影響
3. 学会等名 日本物理学会、2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川朋、乾聡介、坪田誠
2. 発表標題 超流動4He量子渦タングルにおける自己相似構造の形成
3. 学会等名 日本物理学会、2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野融人、坪田誠
2. 発表標題 ボース凝縮体における乱流の異方性とその波数依存性
3. 学会等名 日本物理学会、2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 韓俊植、坪田誠
2. 発表標題 2成分Bose-Einstein 凝縮体中の渦の対消滅と再帰現象による対称性の回復
3. 学会等名 日本物理学会、2021年年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Yale University	Florida State University	