

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03935

研究課題名(和文) 量子乱流と常流体乱流の結合計算による2流体乱流の特性解明

研究課題名(英文) Investigation of the two-fluid turbulence characteristics by coupled simulation between quantum turbulence and normal-fluid turbulence

研究代表者

小林 宏充 (Kobayashi, Hiromichi)

慶應義塾大学・法学部(日吉)・教授

研究者番号：60317336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：極低温の液体ヘリウムは、粘性ゼロの超流体と粘性を持つ常流体が混合した2流体状態にある。2流体ともに層流、超流体が乱流(量子乱流)だが常流体が層流、2流体ともに乱流という状況が実験で得られているものの、その詳細は未解明のままである。そこで、相互摩擦力を介した2流体結合計算を開発・実施することで、それらの特性を解明する。超流体は量子化された渦糸、常流体は粘性をもつ連続体(粘性流体)として数値解析を行った。その結果、量子乱流との相互摩擦力による常流体の平坦化、助走区間の減少、層流常流体の非等方速度変動、2流体乱流での乱流強度の増強といった現象を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極低温の液体ヘリウムは、MRI、核融合炉、リニアモーターカー、加速器におけるといった超電導磁石の冷却に利用されており、その特性解明はそのような冷却機器の性能向上に役立つ。また、2流体混合状態の物理現象の理解は、微粒子、噴霧、気泡といった分散相を含む2相流の理解にも資する。

研究成果の概要(英文)：Cryogenic liquid helium is in a two-fluid state in which inviscid superfluid and viscous normal-fluid are mixed. Experiments have shown three states: (1) both fluids are laminar; (2) superfluid is turbulent (quantum turbulence), but normal-fluids is laminar; (3) both fluids are turbulent. However, the details remain unclear. Thus, we investigate those characteristics by developing and implementing a two-fluid coupled simulation via mutual friction. Numerical analysis was performed assuming that superfluid is quantized vortices and normal-fluid is a viscous continuum (viscous fluid). It was found that we revealed phenomena such as flattening of normal fluid due to mutual friction by quantum turbulence, reduction of entrance length, anisotropic velocity fluctuation of laminar normal-fluid, and enhancement of turbulent intensity in two-fluid turbulence.

研究分野：流体力学

キーワード：量子乱流 数値流体力学 超流動ヘリウム 2流体結合 混相流

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 極低温の液体ヘリウムは、粘性がゼロの超流体と粘性をもつ常流体が混合した状態として存在し、温度が 0K に近づくにつれて、超流体の割合が増加すると考えられている。これを 2 流体モデルという。1940 年代から、熱カウンター流と呼ばれる実験が盛んに行われてきた。矩形ダクトの一方をヒーターで熱すると常流体が低温側へ流れ、運動量を保存するように超流体が高温側に流れる実験が行われてきたが、熱流束が増加すると超流体が流れにくくなることが分かった。超流体中には循環が一意に決まる量子化された渦糸である量子渦が存在する。古典乱流中の渦管と異なり、量子渦は壁に端を持つか、そうでない場合は、すべて繋がった構造となる。それらが毛玉のような量子渦タングルの状態になることで、常流体と相互作用が発生するため、超流体が流れにくくなったと理解されている。

(2) そのような状態を量子乱流と呼び、Schwarz (Phys. Rev. B, 1985) によって初めて量子渦を渦点の繋がった渦糸とする数値計算が行われた。そこでは、近接の渦のみとの相互作用を考えていたが、足立、藤山、坪田 (Phys. Rev. B, 2010) により、すべての渦との相互作用を考慮した計算が実行され、量子渦がタングル状態になる描像はかなり明確になってきた。

(3) 一方で、これまで目が向けられてこなかった相互作用している常流体の流速分布が 2015 年に Guo らのグループによって実験で可視化された (Marakov ら, Phys. Rev. B, 2015)。熱流束が増加するにつれて流速は増加し、流速分布はポアズイコ流から、中心以外壁面近くまで平坦化する tail-flattened 流、さらに速度が増すと乱流状態になることがわかった。その際速度差の 2 次の構造関数が 2 点間距離  $r$  の 1 乗に比例することが分かり、エネルギースペクトルが波数の -2 乗になることもわかった。また、実験を開始すると常流体は一樣流からポアズイコ流や乱流に遷移するが、その助走距離は量子乱流のない通常の場合に比べて短くなる。このように、熱カウンター流の実験は古くから行われてきたが、最近の可視化実験や数値計算の結果を理解するには、流動特性の解明が不可欠である。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、相互摩擦力を介して 2 流体を結合した数値シミュレーションを行い、量子乱流場での常流体の速度分布や 2 流体乱流の特性を明らかにすることである。

### 3. 研究の方法

(1) 矩形ダクト内熱カウンター流において、量子乱流と相互摩擦力を介して 2 流体カップリング計算を行うことで、常流体が層流状態において、相互摩擦力と粘性の比の平坦化への影響、ならびに再ポアズイコ流化するメカニズムについて検討を行う。

(2) (1)の結果に基づき、助走距離と相互摩擦力の関係を明らかにし、助走距離が短くなる理由について検討を行う。

(3) 量子渦との相互作用の結果、常流体乱流中の渦構造はどのような変調を受けるのか、量子乱流場での常流体の渦構造について解析する。また、常流体のエネルギースペクトルといった統計量についての検討を実施する。

(4) 常流体も乱流とする 2 流体乱流場を再現し、常流体が層流の場合との流動特性の違いを明らかにする。

### 4. 研究成果

(1) 流れに乗って渦点が動いていく渦糸計算で解析される量子乱流と固定した計算格子において流れの変形を解析する常流体といった異なる計算系の現象を解析するため、相互摩擦力を介した 2 流体カップリング計算の実装に成功した。その結果、ダクト流れにおいて、流速が増加し、渦糸密度が増加すると、相互摩擦力が強くなり、常流体は平坦化した速度分布になることがわかった。その後は、圧力勾配と相互摩擦力が釣り合い、放物形分布に戻ることも明らかになった。この成果は、物理系で著名な雑誌 Physical Review Letters に掲載された。

(2) 相互摩擦力が存在する実験下では、矩形ダクト入口から一樣な分布で流入した常流体が放物形の定常流れになるまでの助走距離が、短くなることが知られている。そこで、超流体も常流体と同じく Navier-Stokes 方程式で扱えるように粗視化した方程式を利用した 2 流体カップリング計算を実施した。その結果、超流体が相互摩擦力によって変形した状態で常流体にとっての出口から入口へ向かって流れてくるために、一樣な分布で入口から流入する常流体は相互摩擦力によって早期に変形を受けることで、助走区間が短くなることがわかった。また、超流体の移流項

から予見される超流体の乱流粘性を渦粘性として近似することで、管壁の流速分布が平坦化する現象の再現に成功した。この成果は、低温物理学分野で著名な雑誌の1つである Journal of Low Temperature Physics 誌に掲載された。

(3) 熱対向流の状況下で、渦系と常流体が相互摩擦力を介した、より解像度の高い挙動を説明するために、局所的に相互作用をする2流体同時計算を開発した。これにより、タングル状の渦系の平均渦系間隔より小さいスケールの超流体や常流体の変動を解析することが可能となった。その結果、1つの量子渦輪が移流すると渦輪の内外に1対の常流体の渦輪ができること、渦系の再結合によって、常流体へエネルギーが輸送されることなども再現できるようになった。予備的な結果ではあるものの、常流体のエネルギースペクトルが $\omega^2$ 乗となることも再現された。

(4) 熱対向流実験における T1 状態（超流体は乱流だが、常流体は層流の状態）において、常流体の異方的な速度変動が観測されていた。今回開発した計算により、その原因は量子渦が常流体の中を移動する際にできる常流体の速度変動（wake）が原因であり、異方性など実験と整合する結果が得られた。その際、超流体の渦系の周りに常流体の渦管ができることがわかった。本成果は、物理学分野で最も権威のある雑誌の1つである Physical Review Letters 誌に掲載された。

(5) 常流体も乱流状態の T2 状態での検討を実施した。対向流速度が上昇すると、量子渦密度が急増し、量子渦の計算が不可能になることがわかった。そこで、高速多重極展開法を適用することで、計算量を減らし、計算の高速化を行った。実験ではダクト流であるが、まずは壁のない対向流を有する一様等方性乱流での検討を実施した。実験ではある臨界速度よりも対向流速度が増加すると、量子乱流の渦系密度が急増することが報告されており、これは常流体が乱流化したからと予想されている。人工的に与えた外力によって常流体の乱流強度を変化させ、実験と同じ乱流強度での2流体乱流現象の再現を試みた。常流体の乱流強度が増加すると、量子乱流の渦系密度を増加させる相乗効果が発生し、実験で得られている渦系密度の増加率とよい一致が得られることがわかった。このように、T2 状態の再現に成功した。T2 状態では、流れ方向に軸を持つ常流体のストリーク構造が得られ、同じく超流体の渦系もバンドル上に密になった流れ方向の構造が得られることもわかった。この結果は、未だ大きな謎に包まれているダクト流れ実験の結果の再現・解明に向けて、非常に重要な一里塚となる。本成果は、投稿中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 湯井悟志、小林宏充、坪田誠	4. 巻 76
2. 論文標題 量子乱流状態における超流動の2流体モデル－量子渦と熱励起成分の相互作用が引き起こす奇妙な現象	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 28-33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11316/butsuri.76.1_28	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 小林宏充、湯井悟志、坪田誠	4. 巻 -
2. 論文標題 超流動ヘリウムゆらぎをランダウの2流体モデルで描像する－量子流体力学の最新理論	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 academist Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Yui, Hiromichi Kobayashi, Makoto Tsubota, Wei Guo	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

1. 著者名 Satoshi Yui, Makoto Tsubota, Hiromichi Kobayashi	4. 巻 120
2. 論文標題 Three-Dimensional Coupled Dynamics of the Two-Fluid Model in Superfluid 4He: Deformed Velocity Profile of Normal Fluid in Thermal Counterflow	5. 発行年 2018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.120.155301	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 -

1. 著者名 Hiromichi Kobayashi, Satoshi Yui, Makoto Tsubota	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Study on Entrance Length in Thermal Counterflow of Superfluid 4He	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-019-02169-8	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 Hiromichi Kobayashi	4. 巻 72
2. 論文標題 Improvement of SGS model using scale-similarity model based on analysis of SGS force and SGS energy transfer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Fluid Flow	6. 最初と最後の頁 329-336
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.06.012	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 長谷川雄太、青木尊之、小林宏充、白崎啓太	4. 巻 85
2. 論文標題 格子ボルツマン法による自転車競技の集団走行の大規模LES空力解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 18-00441
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00441	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Satoshi Yui, Hiromichi Kobayashi, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Two-way coupled simulation of quantum turbulence in superfluid helium
3. 学会等名 14th World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress (WCCM) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiromichi Kobayashi, Satoshi Yui, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Two-Way Coupled Simulation between Quantized Vortices and Normal Fluid in Superfluid 4He
3. 学会等名 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiromichi Kobayashi
2. 発表標題 Two-way coupled dynamics in quantum turbulence of superfluid helium
3. 学会等名 Kickoff symposium of Japanese Consortium of Theoretical and Applied Mechanics - Current status and outlook (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林宏充、湯井悟志、坪田誠
2. 発表標題 2流体結合計算による超流動Heの量子乱流現象の理解に向けて
3. 学会等名 日本機械学会 第98期 流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林宏充、湯井悟志、坪田誠
2. 発表標題 超流動4Heにおける常流体の速度変動
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Yui, Hiromichi Kobayashi, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Energy spectra of quantum turbulence and normal fluid in counterflow of superfluid 4He
3. 学会等名 Turbulence of all kinds (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Yui, Hiromichi Kobayashi, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Fully coupled dynamics of quantized vortices and normal fluid in superfluid helium: Energy transfer and velocity fluctuations
3. 学会等名 Turbulence of all kinds (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiromichi Kobayashi, Satoshi Yui, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Three-dimensional numerical simulations of two-fluid coupled dynamics in thermal counterflows of superfluid 4He
3. 学会等名 The 17th European Turbulence Conference (ETC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Yui, Hiromichi Kobayashi, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Energy transfer caused by coupled dynamics between quantized vortices and normal fluid in superfluid 4He
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Yui, Hiromichi Kobayashi, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Elementary process of coupled dynamics between quantized vortex and normal fluid in superfluid 4He
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromichi Kobayashi, Satoshi Yui, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Two-way coupling between superfluid and normal fluid components in thermal counterflows of superfluid 4He
3. 学会等名 The VIII International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 湯井悟志、小林宏充、坪田誠
2. 発表標題 超流動4Heにおける量子渦と常流体間のエネルギー輸送：再結合と渦輸
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 湯井悟志、小林宏充、坪田誠
2. 発表標題 超流動4Heの量子乱流における超流体と常流体のエネルギースペクトル
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 湯井悟志、小林宏充、坪田誠
2. 発表標題 超流動4Heの量子乱流における量子渦と常流動の局所結合ダイナミクス
3. 学会等名 流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 湯井悟志、小林宏充、坪田誠
2. 発表標題 超流動4Heにおける量子渦と常流動の局所結合ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromichi Kobayashi, Satoshi Yui, Makoto Tsubota
2. 発表標題 Numerical Study on Entrance Length in Thermal Counterflow of Superfluid 4He
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Yui, Makoto Tsubota, Hiromichi Kobayashi
2. 発表標題 Numerical Study of Coupled Dynamics in the Two-Fluid Model for Superfluid 4He
3. 学会等名 International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiromichi Kobayashi
2. 発表標題 Quantum turbulence in superfluid 4He and neutrino turbulence in supernovae
3. 学会等名 Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>小林宏充研究者情報ページ  <a href="https://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/72/0007193/profile.html">https://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/72/0007193/profile.html</a></p>
--

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
研究分担者	坪田 誠  (Tsubota Makoto)  (10197759)	大阪市立大学・大学院理学研究科・教授    (24402)	

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	フロリダ州立大学			