

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：63902

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18827

研究課題名(和文) 過熱状態崩壊を引き起こす超流動2次元乱流機構の解明

研究課題名(英文) Study on the superfluid turbulent flow inducing to phase transition in superheated state

研究代表者

高田 卓 (Takada, Suguru)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：30578109

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：超流動ヘリウム(He II)について、狭隘流路中に容易に形成される過熱状態と沸騰における過熱状態の崩壊要因が何かという問題があった。本研究においては過熱状態の崩壊時のHe II特有の熱対向乱流の状態を調べた。He II中にトレーサ粒子を導入する方法で流速分布から明らかにしようとする試みを行ったが、当初予定していた狭隘流路中のPIVには失敗してしまった。しかし、沸騰直前と沸騰周りの熱対向流場については気泡振動の影響を除くと同様の関係が成り立ち続けることや過熱状態を伴う沸騰においては気泡成長速度が過熱状態を伴わない場合に比べて早いことが起因して高い熱伝達率を実現していることなどが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

当初の計画通り過熱状態の崩壊を記述する物理を明らかにすることが出来ず過熱状態を自在に活用する方法を提案することは出来なかった。しかし、沸騰しても気泡の運動以外沸騰前と全く変わらない熱対向流の性質が明らかになるなど超流動ヘリウムの液相の乱流状態と沸騰開始には強い相関が見いだされない事が判り示唆されることは、特別なトリガーが存在するわけではなく幾何学形状に由来する熱流束の不均一などの比較的単純な物理でのみこの過熱状態の生成崩壊が決定されている可能性が高い。このような考察を延伸すれば超流動ヘリウムが冷媒として使用される超伝導加速空洞のような応用においての設計指針に適応できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The superheated state; meta stable state, easily is able to be created in narrow channel in saturated Superfluid helium (He II) though superfluid turbulence due to thermal counter flow must exist. In this study, particle image velocimetry (PIV) method was tried to be applied to superheated state collapse. The trial of PIV in narrow parallel channel were failed because of small S/N ratio. However, the several characteristics were revealed by PIV. During Boiling, velocity distribution was synchronized with the vapor oscillation but the DC flow that subtracted the oscillation motion still preserve same correlation in the case of no boiling state. On the other hand, high heat transfer coefficient appears when bubble repeats generation and collapse intermittently accompanying with metastable state of superheating. The vapor expands faster than that in the case of accompanying with normal He I. Rapid vapor expansion in the superheated He I caused the high heat transfer coefficient.

研究分野：極低温工学

キーワード：超流動ヘリウム 可視化 狭小流路 準安定状態 沸騰

1. 研究開始当初の背景

超流動ヘリウム (He II) は先進的な加速器用超伝導マグネットの冷媒として使用されるなどしている。こうした超伝導マグネットにおいては超伝導線間の狭小流路など様々な流路によって冷却されている。超伝導マグネットにおけるクエンチ(一部が突如として常伝導となってしまう現象)などにより、大量のジュール発熱が発生することが考えられる為、He II がこうした場面でどのような沸騰現象を引き起こすかについて研究が求められている。

特に He II においては、狭小 2 次元流路内に準安定状態である過熱 He II および過熱 He I が容易に形成されることが申請者らの過去の研究によって明らかになった。しかしながら、He II は熱によって誘起される熱対向流が超流動乱流を形成する激しい流動がある中で過熱状態が容易に形成されるのかは分かっておらず、この解明が求められていた。

他方で、超流動乱流研究においては He II 中に固体粒子を混入させ、この粒子を追跡することで流れ場を可視化する PIV (Particle Image Velocimetry) 法の進展が続いている。しかしながら、超流動乱流研究者は主に等方性乱流など理想的に近い系における乱流研究を中心に進める傾向にあり、工学的な視点の研究者によって進められてきた He II 中の沸騰現象や壁によって拘束される系における可視研究は進めてこられなかった。

こうした状況を鑑みて過熱現象、沸騰開始における超流動乱流の流れ場の影響を明らかにすべく、PIV 法の He II 中の沸騰現象への適応によって、新たな知見を得ようという試みが計画された。

2. 研究の目的

上記の背景の通り、He II 沸騰の研究および超流動乱流の可視化研究を協調することで新たな知見を得ることを目的とした。これにより、超流動乱流という激しい流れ場があるにも関わらず狭隘路では、防振等の特別な処置を施さなくても何故準安定状態の過熱流体が形成されるのかという問題に取り組んだ。一方で、超流動乱流の熱対向流の研究手法として PIV 及び PTV (particle tracking velocimetry) という固体粒子を導入して流れ場を可視化する技術を本問題に適応させ、過熱状態崩壊の萌芽が超流動乱流の状態にあるのか否かについて明らかにすることを目標として取り組んだ。

3. 研究の方法

超流動ヘリウム (He II) 中に各種の固体粒子の導入方法を検討した。ポリマーや中空ビーズなどの固体粒子及び、固体水素 重水素を考えた。その導入先をガラス板で形成した平行平板間を 150 ミクロン程度にした狭小流路に導入しようということを計画した。しかしながら、固体粒子の静電気及び狭小流路故の粒子数の少なさから十分な S/N 比が得られず、本方法における実験は失敗に終わった。一方で進められた従来の実験系である開放空間での He II 沸騰に対して固体水素 重水素粒子を導入し、これをトレーサ粒子として He II 流動と沸騰の関係を可視化する実験及び解析を行った。図 1 が可視化された 1 例であり沸騰周りに固体水素 重水素の中立的な粒子が混入しハイスピードカメラと垂直の方向から入射されたレーザーシートによって断面の流れの可視化が実現している。



図 1. He II 沸騰周りの流れの可視化 (沸騰気泡とトレーサ粒子が同時に捉えられている)

また、一方で平行平板間の狭小流路の可視化については別途行われたガラス板に酸化インジウム薄膜を蒸着した透明なヒータと流路の壁としての石英ガラスによって形成された流路が使われた(図2)。光学的にはシャドウグラフ法によって撮影され、先述のPIV法と同じくハイスピードカメラを使って沸騰の様子が可視化された。

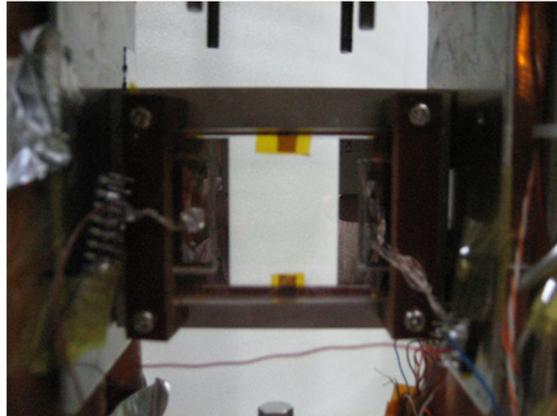


図2 使用された酸化インジウム薄膜ヒータを蒸着した平行ガラス流路

4. 研究成果

He II 沸騰周りのPIV法の適応の結果として、沸騰周りのHe IIの挙動が比較的単純な沸騰気泡に連動した動きと、He IIの特徴的な流れである熱対向流の和で構成されていることが判明した。図3は典型的なPIV結果としての速度場の表示であるが、気泡拡大時と収縮時で気泡に同期して速度場が変化している様子が見て取れる。

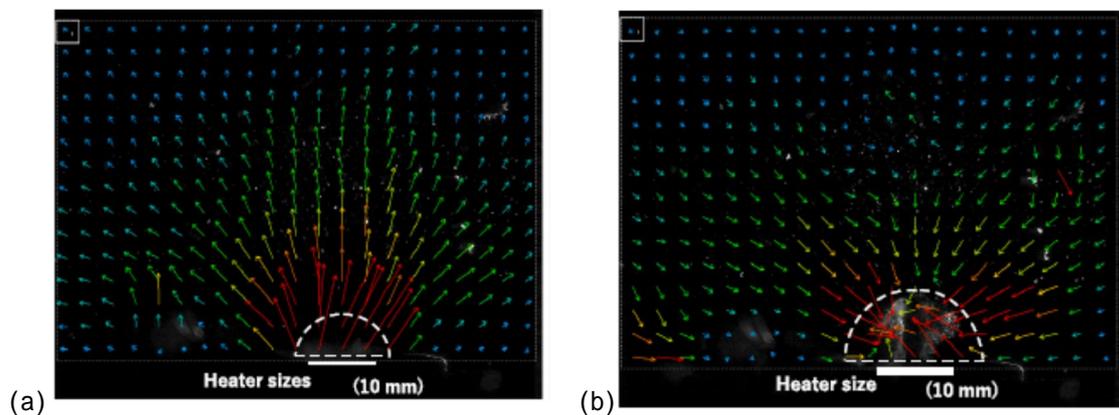


図3(a)気泡の拡大時のPIV結果 (b)気泡収縮時のPIV結果

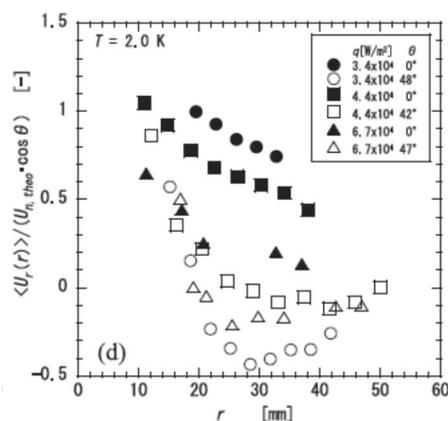


図4 ヒータを中心とした極座標系における常流動速度成分の理論比(理論値算出に用いる熱流束はヒータ直上の値を取った場合)

こうした気泡の運動に由来する速度の変動成分を差し引いた速度成分について検討を行うと、先行研究に類似した熱対向流ジェットのような速度分布が現れる。そしてその値は非常に単純

な 2 流体モデルからの常流動成分の速度予測値に良く一致する傾向を見せ (図 4) ヒータ中心において理論値との比が 1 に漸近していく。これは、気泡運動を伴った非常に複雑に見える速度変動も非常に単純な熱対向流の 2 流体モデルによる記述と気泡運動の足し算で表せることを示している。言い換えれば、He II 中の速度場は激しい気泡挙動などの外乱を加えてもなんら変わりなく熱対向流におけるロンドン則が成り立ち続けていることを示唆している。

一方で、平行平板間の過熱を伴う沸騰状態についてもさらなる可視化研究を進めた。特に別途行われた熱伝達率測定との比較研究により、過熱状態を伴う沸騰気泡の気泡成長・収縮の周期、そのスピードと熱伝達率の関係を求めることが出来た。特に、ラムダ圧力 (He II, He I, vapor の 3 重点の圧力) 以上に加圧された He II では、ラムダ圧力以下で見られるような過熱した He II、過熱した He I が現れることなく安定状態の He I が現れ、沸騰に至る。しかしながら、可視化結果では密度変化に感度のあるシャドウグラフ法で撮影する限りは非常に似た描像であり、気泡の成長収縮が周期的に起こる現象も共通である。しかしながら、その二つには熱伝達率の側面で大きな差が見られる。図 5 はラムダ圧力以上において見られる He I を伴う沸騰とラムダ圧力以下において見られる過熱した He I を伴う沸騰時の熱伝達率の比較である。ラムダ圧力を境にジャンプが見られ、過熱した He I を伴うラムダ圧力以下の沸騰において熱伝達率が上がることが判る。更に図 6 に示すように可視化結果をつぶさに見ることで過熱 He I という準安定状態の He I を伴う沸騰と安定状態の He I を伴う沸騰では、気泡の成長スピードに差があることが判明した。気泡の収縮速度は両者に差が無いものの、気泡の成長スピードは準安定状態を伴う方が 2 倍程度早いことが明らかになった。その気泡成長速度の差が熱伝達率の差を生んでいると考察される。

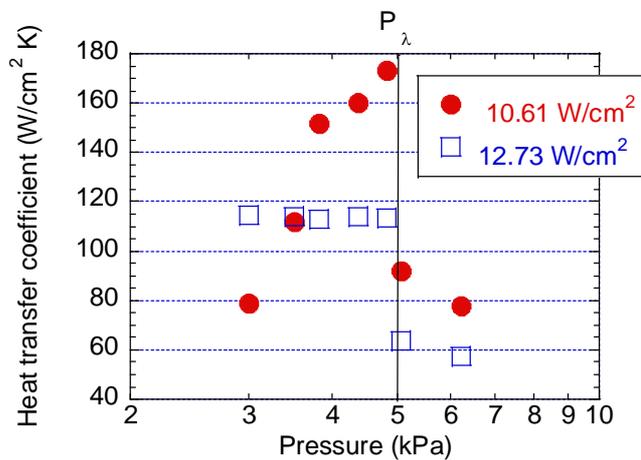


図 5 150 ミクロン平行平板間におけるラムダ圧力以上において見られる He I を伴う沸騰とラムダ圧力以下において見られる過熱した He I を伴う沸騰時の熱伝達率

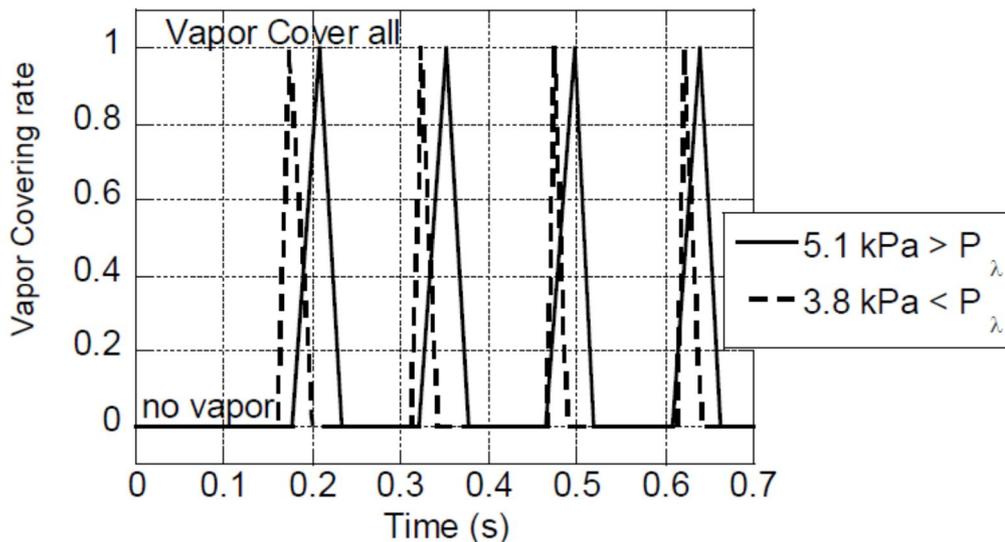


図 6 気泡の成長収縮の時間変化におけるラムダ圧力以上とラムダ圧力以下の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Murakami M., Takada S.	4. 巻 108
2. 論文標題 PIV measurement of flow field generated during noisy film boiling in saturated He II	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cryogenics	6. 最初と最後の頁 103083 ~ 103083
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cryogenics.2020.103083	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 Takada S., Kobayashi H., Murakami M., Kimura N.	4. 巻 755
2. 論文標題 Comparative Study of Heat Transfer Performance and Visualization Images of Superfluid Helium Boiling in Narrow Two-dimensional channel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 012142 ~ 012142
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/755/1/012142	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Suguru Takada
2. 発表標題 Comparative Study of Heat Transfer Performance and Visualization Images of Superfluid Helium Boiling in Narrow Two-Dimensional Channel
3. 学会等名 CEC-ICMC2019（国際学会）
4. 発表年 2019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
研究分担者	村上 正秀 (Murakami Masahide) (40111588)	筑波大学・システム情報系(名誉教授)・名誉教授 (12102)	

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
---------	---------