

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25289300

研究課題名(和文) 微小重力下の超流動ヘリウムに特異な超熱伝導性起因の沸騰・凝縮気泡挙動の解明

研究課題名(英文) Study on the heat transfer mechanism of boiling and condensation in superfluid helium under microgravity condition

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) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：落下塔を用いて微小重力下の超流動ヘリウム(He II)中の沸騰について可視化実験を成功させた。これにより気泡の成長・収縮挙動を可視化することで、気泡の挙動を決めるHe IIの気液界面の熱輸送機構を明らかにし、気泡成長収縮の予測モデルを構築した。また、微小重力下におけるHe IIの臨界熱流束についても地上実験からの外挿が可能であることを示した。また、He II中の膜沸騰周りの流動現象について、固体水素-重水素の微粒子を用いた可視化実験を行い、He IIの挙動が変動成分である気泡運動と熱源からの距離で決まる熱流束から計算される流体挙動によって構成されていることを明らかにすることが出来た。

研究成果の概要(英文)：The microgravity experiments of boiling and condensation in superfluid fluid (He II) were carried out successfully using by a drop tower. The analysis results on the visualization experiment was found the heat transfer mechanism on the vapor liquid interface during boiling in He II under microgravity environment. The prediction model of bubble expansion were described basis on this experimental results. We also found that the critical heat flux in microgravity can be predict using by the data on the earth gravity. And we tried to visualize the fluid motion of normal fluid component around vapor during boiling with the PIV(Particle Image Velocimetry) method. The flow filed was determined by the heat flux calculated by the length from the heat source and the bubble motion.

研究分野：極低温工学

キーワード：微小重力 超流動ヘリウム 可視化 沸騰

### 1. 研究開始当初の背景

科学衛星における超流動ヘリウム (He II) 利用は、機械式冷凍機や新しい超伝導検出器の登場により新たなフェーズへと移行している。特に天文観測衛星においては、機械式冷凍機の開発が大きく進展した事によって、He II による冷却から機械式へと移行しつつある。一方で、サブケルビンを必要とする超伝導検出器の目覚ましい発展により、求められる 0.1 K 級冷凍機 (多段ADRなど) では、大きな間欠的な排熱を伴うため、高温段を安定作動させる為には、2K 付近における熱の緩衝が必要となる。極低温では、固体の熱容量が小さく、He II タンク内の沸騰・凝縮を熱緩衝に用いる事が有利であり、ゼロボイルオフの冷凍チェーンという、新たな He II 利用が想定できる。

### 2. 研究の目的

上記の提案に必要な基礎データとなる超流動ヘリウムの気泡発生条件並びに凝縮の挙動について、ほとんど報告が無く、特に凝縮については一切データが出ていない。そのため上記のようなコンパクトな冷凍チェーンの設計は難しい。そのため、微小重力下の He II の気泡の発生ならびに消滅過程の物理的な解明の為の実験的研究が必要であった。

上記に述べた背景から微小重力中の He II 気泡の発生・成長・収縮過程について実験的基礎データを取得するため、微小重力環境下における沸騰の可視化、地上実験における He II 沸騰周りの流れの可視化などを通じて明らかにすることを目的として、本科研費補助金の助勢をいただいた。

### 3. 研究の方法

落下塔を用いて落下中の微小重力環境を用いて He II 沸騰が落下中にどのような挙動をするのか実験的に明らかにした。

2013 年には産総研北海道センターの落下塔を使用し約 1.2 秒間の微小重力時間の中で実験を繰り返し知見を深めた。その後、更なる微小重力時間の延長を求めて、申請時には北海道赤平の COSMOTORRE を念頭に打ち合わせ等を進めた。しかしながら、実験装置の制約から COSMOTORRE 使用は難しいと断念し、ドイツ・ブレーメンにある ZARM (Center of Applied Space Technology and Microgravity, Bremen, Germany) という施設の微小重力落下塔を使用した実験計画へと切り替え、クライオの改造等を行った後 2016 年に落下実験を終えた。

落下実験は期間が限られるため、その間には落下用実験装置の改造並びに準備実験を行う傍ら、地上では別途飽和超流動ヘリウムを用いた静水圧ヘッドを変数とした実験に取り組んだ。さらに沸騰周りの流動現象を明らかにするため、水素-重水素混合パーティ

クルを用いた PIV 計測 (particle image velocimetry) によって He II 中の膜沸騰周りの流体挙動特に常流動成分の挙動を明らかにした。

### 4. 研究成果

微小重力中の He II 沸騰実験、特に制動 G が 40-g を超える環境に耐える He II の実験を成功させたこと自体が一つの成果であり、世界初の試みの成功である。さらについてのいくつもの知見が本研究計画における成果であるが、ここでは便宜上主な得られた知見について下記の 3 つのパートに分けて解説する。

#### 4-1. 気泡成長・収縮について

He II 中の気泡成長収縮の可視化に成功した。下部図 1 に記載した写真が可視化結果の 1 例である。中央に見える細線ヒータから球状の気泡が成長する様子をハイスピードカメラで捕らえ、その気泡成長速度、気泡収縮速度の計測に成功した。

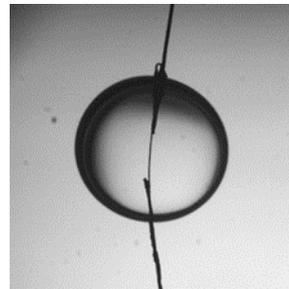


図 1 落下中に引き起こした沸騰の様子。気泡のサイズ 5mm 程度の綺麗な球形。中央に見える細い線が直径 50 ミクロン長さ約 2mm のヒータ

気泡成長や収縮過程は気体分子運動論から導かれた界面を貫通する熱流束の予測式と He II の潜熱輸送によって解説がつくことが明らかになった。また He I についてもおおむねこの予想が使用できることも明らかになった。しかしながら、 $\lambda$  点近傍において気泡成長速度は理論予想から比べ格段に遅く小さな気泡にしか成長しない (図 2)。この点については、本研究においてはじめて発見された  $\lambda$  点近傍における特異状態であり、 $\lambda$  点近傍で大きくなる界面熱抵抗が大きく影響していることが予想される。

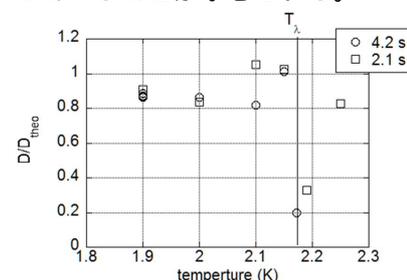


図 2. 理論予測と実験結果の気泡直径の比の温度依存性  $\lambda$  点 (2.17K) 近傍以外ではおおむね理論予測に合致することが分かる。

#### 4-2. 微小重力中の沸騰限界熱流束

He II 中の臨界熱流束と液頭圧の相関は非常に小さな液頭圧ではほぼ線形である。線形と近似すると、おおよそ 80 Pa 程度のオフセットした圧力が付加されているとして考察できる。こうした事実を元に、微小重力下の飽和 He II 中の臨界熱流束の推定は、液頭圧を変化させる地上実験から外挿可能であり、van der Waals 力による圧力差を考慮した He II の熱伝導方程式から微小重力下における He II 臨界熱流束を見積もることが可能であることが分かった。

比較の為行った古典流体である He I の実験結果は、TEXUS (R113) 実験や KC135 (R12) 実験の傾向と近い値を示す (図 3)。Straub が示したのと同様に、 $R^* < 0.1$  の領域で Lienhard-Dhir 関係式の 2~3 倍程度大きな結果を示し、He I は古典流体としての共通の理解が可能であろうと考えられる。しかしながら He II 中において実験値は定量的に一致せず、浮力と表面張力から導かれた Zuber の式を元にした考察は適用できない。このことは可視化結果からも明らかのように、He II には核沸騰領域が無く He II 中においては臨界熱流束が気泡生成に必要な最小の熱流束考えられるためである。古典流体の臨界熱流束の理論に比べて、He II の臨界熱流束は著しく高いことが、古典流体の理論との大きな離を生んでいるが、こうした高い臨界熱流束は He II 特有の超熱伝導性に起因するものと考えられる。

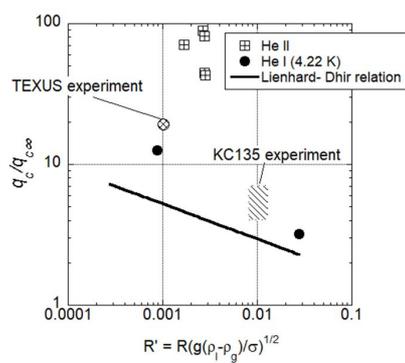


図 3 Lienhard-Dhir correlation との比較を示した臨界熱流束

#### 4-3 He II 中の PIV 計測結果

沸騰気泡周りの流体挙動について水素-重水素混合パーティクルを用いた PIV 計測 (particle image velocimetry) によって He II 中の常流動成分の挙動を明らかにした。He II は熱源から放射状に動く常流動成分によってエントロピーが運ばれる。膜沸騰周りの He II 流体挙動を PIV 解析した結果、気泡からの距離によって熱流束が比例して下がるこれに応じて常流動成分速度が比例して下がることが分かった。こうした相関はノイズ-膜沸騰と呼ばれる激しい気泡の運動のある沸騰においても He II 領域の常流動成分流体

速度の平均値においてははっきりと確認できる。つまり、流体の挙動は気泡の動きに加え熱源からの距離で決まる熱流束に応じて予想可能であることが分かったと言える。微小重力実験結果の気泡成長速度予測により気泡周りの流体運動まで予測可能となったのである。

一方で、超流動乱流研究者を悩ませる問題として、こうした PIV 計測結果が理論流速よりも小さな値を示してしまうことが知られていた。一方でごく小さな熱流束で研究を続けていたグループは理論流速との一致を報告しており、その実験条件には隔たりがあり、実験セットアップの問題による差がある臨界熱流束を境に相関が代ってしまうのかという問題が明らかになっていなかった。そこで、我々はこれまでの比較的広い熱流束レンジで系統的に実験を進めることによってこの問題が普遍的にみられる層流-乱流の遷移に対応することが示唆される事実を見板出した (図 4)。

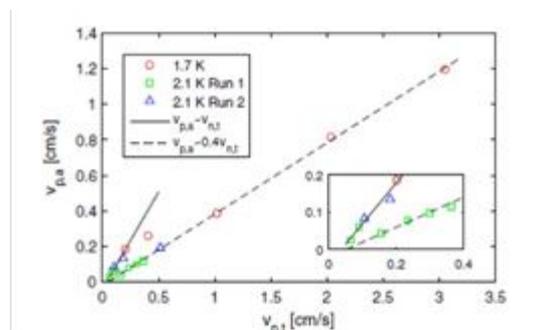


図 4 PIV 計測によって求められた理論流速と実験で得られた流速の比較

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- (1) Suguru Takada, Nobuhiro Kimura, Sławomir Pietrowicz, Krzysztof Grunt, Masahide Murakami, Takahiro Okamura "Visualization of He II boiling process under the microgravity condition for 4.7 s by using a drop tower experiment" *Cryogenics* vol.89 (2018) pp.157-162 査読有
- (2) S. Takada, N. Kimura, S. Pietrowicz, K. Grunt, The first trial of microgravity experiment in He II for 4.7 seconds using ZARM drop tower, September 2017 *Journal of Physics Conference Series* 897(1):012013 査読有
- (3) Brian Mastracci, Suguru Takada, Wei Guo Study of Particle Motion in He II Counterflow Across a Wide Heat Flux Range *Journal of Low Temperature Physics* · January 2017, 1 - 1 査読有

(4)Suguru Takada, Nobuhiro Kimura, Masahide Murakami, Takahiro Okamura, Heat transfer during bubble shrinking in saturated He II under microgravity condition, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 101, conference 1 (2015) 012163 査読有  
(5)Masahide Murakami, Suguru Takada, Masakazu Nozawa, PIV Measurement of Flow Field around Film Boiling in He II, Physics Procedia, Volume 67, 2015, Pages 596-601 査読有  
(6)Suguru Takada, Nobuhiro Kimura, Masahide Murakami, Takahiro Okamura, Visualization study of growth of spherical bubble in He II boiling under microgravity condition, Physics Procedia, Volume 67, 2015, Pages 591-595 査読有  
(7)Suguru Takada, Nobuhiro Kimura, Mikito Mamiya, Takahiro Okamura, Masakazu Nozawa and Masahide Murakami, Visualization Study of Bubble Generation and Collapse in He II under Microgravity Condition, Advances in Cryogenics Engineering vol.59A (2014)p.292-299 査読有  
(8)高田 卓, 木村 誠宏, 間宮 幹人, 永井 秀明, 岡村 崇弘, 村上 正秀, 野澤 正和, 微小重力実験による飽和超流動ヘリウム中膜沸騰の臨界熱流束における van der Waals Force 力効果の検証, International Journal of Microgravity Science and Application Vol. 31, No. 4 pp.186-193 (2014) 査読有  
(9)Takada S., Kimura N., Mamiya M., Nozawa M., Okamura T., Murakami M., Visualization and temperature measurement during vapor bubble growth in He II film boiling under microgravity condition, Proceedings of International cryogenic engineering conference 24th (2013)119-122 査読有

〔学会発表〕(計 14 件)

(1)村上 正秀, 高田 卓, He II ノイジー膜沸騰で誘起される変動流れ場の PIV 解析、低温工学・超電導学会 2017 年度秋季大会  
(2)高田 卓, 木村 誠宏, Slawomir Pietrowicz, Krzysztof Grunt, 村上 正秀, 岡村 崇弘「4.7 秒間の微小重力落下塔実験における He II 中の気泡成長の可視化結果解析」低温工学・超電導学会 2017 年度春季大会  
(3)Suguru Takada, Nobuhiro Kimura, Slawomir Pietrowicz, Krzysztof Grunt, Masahide Murakami, Takahiro Okamura “Visualization of He II boiling process under microgravity condition for 4.7 seconds by using drop tower experiment” on The 27th Space Cryogenics Workshop 2017  
(4)高田 卓, 木村 誠宏, Slawomir Pietrowicz, Krzysztof Grunt, 落下塔を用

いた微小重力下における超流動ヘリウム沸騰研究, 宇宙航行の力学シンポジウム (2016)

(5)S. Takada, N. Kimura, S. Pietrowicz, K. Grunt, The first trial of microgravity experiment in He II for 4.7 seconds using ZARM drop tower, 1st Asian ICMC-CCSJ 50th Anniversary Conference, Kanazawa, (2016)

(6)高田 卓, 木村 誠宏, 村上 正秀, 岡村 崇弘, 微小重力下の He II 中における単気泡の成長-収縮に関する研究, 秋季低温工学・超電導学会, (2015)

(7)Suguru Takada, Nobuhiro Kimura, Masahide Murakami, Takahiro Okamura, Heat transfer during bubble shrinking in saturated He II under microgravity condition, C3OrJ, CEC-ICMC2015, 2015

(8)高田 卓, 木村 誠宏, 間宮 幹人, 永井 秀明, 村上 正秀, 微小重力下 He II 中における単気泡生成の可視化実験、春季低温工学・超電導学会 2014

(9)高田 卓, 木村 誠宏, 村上 正秀, 岡村 崇弘, 気泡収縮過程の可視化から求めた微小重力中の He II-vapor 界面の熱輸送、秋季低温工学・超電導学会、福島 2014

(10)村上 正秀, 高田 卓, 野澤 正和, PIV 法による He II 中の膜沸騰現象の研究, 春季低温工学・超電導学会、船堀(東京) 2014

(11)Suguru Takada, Nobuhiro Kimura, Mikito Mamiya, Hideaki Nagai, Masahide Murakami, Visualization Study of Growth of Spherical Bubble in He II Boiling under Microgravity Condition, International cryogenic engineering conference 25th (2014)

(12)Masahide Murakami, Suguru Takada, Masakazu Nozawa, PIV Measurement of Flow Field around Film Boiling in He II, International cryogenic engineering conference 25th (2014)

(13)Suguru Takada, Nobuhiro Kimura, Mikito Mamiya, Takahiro Okamura, Masakazu Nozawa, Masahide Murakami, Visualization Study of Bubble Generation and Collapse in He II under Microgravity Condition, CEC-ICMC2013

(14)高田 卓, 木村 誠宏, 間宮 幹人, 永井 秀明, 村上 正秀, 微小重力中の細線ヒータ上における He II 中の臨界熱流束に関する研究, 春季低温工学・超電導学会 2013

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

6. 研究組織  
(1)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

(2)研究分担者

村上 正秀 (MURAKAMI Masahide)  
筑波大学システム情報系・名誉教授  
研究者番号：40111588

木村 誠宏 (KIMURA Nobuhiro)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構超伝導低温工学センター・准教授  
研究者番号：10249899

(3)連携研究者

(4)研究協力者

岡村 崇弘 (OKAMURA Takahiro)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所・准教授  
研究者番号：90415042

野澤 正和 (NOZAWA Masakazu)  
秋田工業高等専門学校創造システム工学科・准教授  
研究者番号：60447183

間宮 幹人 (MAMIYA Mikito)  
永井 秀明 (NAGAI Hideaki)  
Slawomir Pietrowicz,  
Kryzstof Grunt  
Wei Guo  
Brian Mastracci