

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360361

研究課題名(和文)微小重力で明らかにされる超流動ヘリウムの特異な膜沸騰の実相と伝熱促進効果の解明

研究課題名(英文) A study of the boiling phenomena with the enhanced heat transfer in superfluid helium under microgravity condition

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,100,000円、(間接経費) 2,430,000円

研究成果の概要(和文)：超流動ヘリウム(He II)は、それ自身が超流動性や超熱伝導性などの特異性を持つだけでなく、沸騰においても非常に特異な特性を持っている。これまでHe II中の膜沸騰について多くの研究が行われたが、その特異性についてすべて理解されたとは云えない。むしろ、極低温中の可視化技術の発達や使用センサーの高感度化により、新しい現象が発見されているのが現状である。本研究は、微小重力落下棟を用いた沸騰可視化実験により重力効果によって隠されたHe II中の沸騰の物理現象を明らかにすることを目的とした。実験からHe II中の沸騰では液相への熱拡散の寄与が大きいことを示した。

研究成果の概要(英文)：Not only itself has unique such as a fluid with zero viscosity and zero entropy or the high thermal conductivity, but also superfluid helium (He II) has a very unique characteristic in the boiling. Many studies were conducted about film boiling in He II, but cannot say until now that the unique was understood all. Rather it is the present conditions that the phenomenon that is new by becoming it the use of high sensitivity sensor and the visualization technology in cryogenic temperature is discovered.

In this study, in order to understand the gravity effect of boiling phenomena in He II, the experiments and its analysis were carried out by optical visualization with high-speed video camera under microgravity condition. It was suggested that the contribution of the thermal diffusion by the film boiling to a liquid phase in superfluid helium was larger than the contribution of the thermal diffusion to a gas phase in normal fluid helium.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：超流動ヘリウム 微小重力 伝熱促進効果 臨界熱流束 可視化技術 膜沸騰

1. 研究開始当初の背景

(1) これまで飽和蒸気圧近傍の超流動ヘリウム (He II) 膜沸騰について膜沸騰開始時の限界熱流束、膜沸騰に遷移した後の沸騰状態及び熱伝達率について実験的並びに理論的研究が進められてきた。膜沸騰開始時の沸騰限界については、2 流体モデルから得られる He II の実効的熱伝導関数を基に議論が進められ、主に液頭分の圧力に起因するサブクール度さらに van del Waals 力を考慮して計算が可能であると報告されている¹⁾。一方、航空機実験を用いたこれまで唯一の微小重力下の He II 膜沸騰実験において実験的に求められた微小重力中の限界熱流束は、上記の予測値を下回っており²⁾、更なる解明が待たれていた。

(2) He II 膜沸騰について液頭高さの 10 ~ 25 cm を境にしてノイズ膜沸騰とサイレント膜沸騰の沸騰モードに分類されることが注目され、実験等が進められてきた。ノイズ膜沸騰とサイレント膜沸騰は様相が激しく変わり、He II 熱伝達にも影響を及ぼすことが示されている。これまでの研究では、主に Ametitov³⁾らが用いた分子動力学からの気液界面を貫く熱流束と飽和蒸気圧との圧力差の関係を示す次式を基にノイズ膜沸騰とサイレント膜沸騰の境界所条件を推定し、熱伝達の予測などの議論が展開されてきた。

$$q_i = \frac{4}{\pi} \Delta p \sqrt{2RT_s}$$

ここで R はヘリウムの気体定数、 T_s は飽和蒸気圧曲線上の温度である。Jebeli⁴⁾や Zhang⁵⁾らの実験では、伝熱面の精密に制御された熱流束とその温度測定による詳細な実験結果を得てはいるものの伝熱面上の蒸気膜の可視化の同時観測が行われていない。このため、沸騰膜の気液界面を貫通する熱流束に関してその形状に関する情報が欠落しており、検証が十分であるとは云えなかった。また、液頭高さ約 10cm 未満で起きるサイレント膜沸騰は、液頭圧が減少することでサブクール度が僅かとなり、さらに自由界面が伝熱面に非常に近いために He II の熱対向流に対して非常に制限された実験環境とならざるを得なかった。さらにサイレント膜沸騰は安定膜沸騰であるにも拘わらず不安定なノイズ膜沸騰よりも熱伝達率が高く、その物理的解釈が残された課題となっていた。

(3) 実験環境の制限を外し、He II 膜沸騰の理論的予測や実験的研究の更なる進展のために、サブクール度と自由界面のコントロールを独立して行う可視化実験が必須である。微小重力環境下での実験はこの問題を解決できる唯一の手段であり、飽和蒸気圧近傍の He II 膜沸騰の実相解明のため、その遂行が求

められていた。

[参考文献]

- 1) Wang and Zhang, ICMF'04, K09 (2004)
- 2) Gradt, et al., *Adv. in Cryog. Eng.* **31** pp.499-504 (1986)
- 3) Ametitov, et al., *Cryogenics* **23**, pp.179-184 (1983)
- 4) Jebali, et al, *Adv. in Cryog. Eng.* **33** pp.425-430 (1988)
- 5) Zhang, private communication
- 6) Kimura, et al., Proc. of ICEC 22, pp.377-382 (2009).
- 7) Takada, et al., Presented at CEC/ICMC conference, June 28 - July 2, Arizona, USA (2009)

2. 研究の目的

本研究の目標は、超流動ヘリウム (He II) の沸騰現象に関する研究の更なる進展を目指し、その特異な実相の解明をすることである。この研究目標を達成するため、実験は沸騰熱伝達が対流等の重力効果から自由となり、He II の沸騰現象が純粋化される自由落下塔の微小重力場下で行う。さらに、実験結果を基に流体力学的安定論を援用した He II 中の膜沸騰モードの考察を行い、He II 中の膜沸騰モードの数値解析モデル作成の端緒を得ることとした。

3. 研究の方法

(1) 研究の期間を 3 年で設定した。計画初年度である 2010 年度は既存の可視化超流動ヘリウム (He II) クライオスタットを改造することにより複数種の沸騰用ヒータの内蔵と可視化画像の精緻化を行った。この改造により、自由落下塔を使った微小重力場 (< 1m g) での実験の効率の向上を図った。

実験は、2 重カプセル構造を持ち、実験装置が搭載される内側のカプセルで、 1×10^{-3} G 未満の質の高い微小重力場が 1.27 秒得られる産総研北海道センターの開放型自由落下塔を用いた。

(2) Fig.1 に自由落下塔の内側カプセルに装着した小型窓付きクライオスタットを示す。クライオスタットの He II 槽内には細線ヒータを水平に張り、その様子をハイスピードカメラで撮影した。微小重力落下中に液面が表面張力に、せり上がり結果として僅かながら実験槽中央部では下向きの流れが生じた場合のデータを除くために、液面が複数のプレートよりも上にある場合のデータのみを使用しているため、微小重力中の He II 流れについては無視できた。ヒータには直径 50×10^{-6} m、 80×10^{-6} m、長さ約 4×10^{-3} m のマンガニンの細線をそれぞれ用いて、フィードバック回路付の定電力電源から電流を印加して沸騰を起こした。4 端子法により熱流束・電気抵抗を測定し、電

気抵抗の温度依存性からヒータ温度を算出した。



Fig.1 2 重カプセル内に設置した小型クライオスタット及び可視化装置

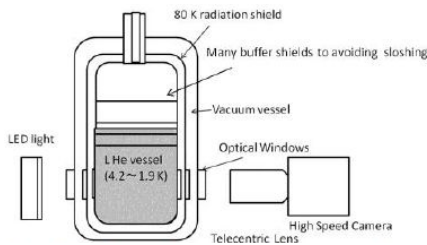


Fig.2 実験装置模式図

Fig. 2 に可視化装置とクライオスタット内 He II 槽との関係を示すための模式図を示す。また、Fig.3 に He II 中に生成した単気泡の可視化画像の例を示す。

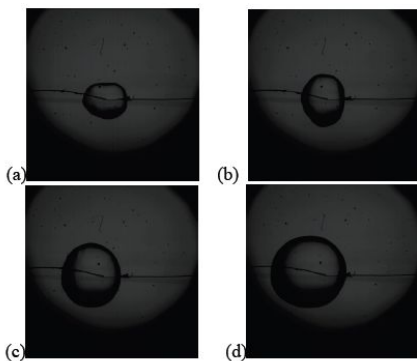


Fig.3 He II 中の単気泡の可視化画像。
He II の温度は 1.9 K

(3) 2011 年度以降の 2 年間は、自由落下塔による微小重力実験を主にして行い、重力場から微小重力場での飽和超流動ヘリウムの沸騰実験を展開した。

4 . 研究成果

(1) クライオスタット内 He II 槽に設置したヒータに異なる熱流束を定常加熱によって矩形波を入力する実験を複数回行って描いた沸騰曲線から臨界熱流束を決定した。Fig.4

に地上重力下 (1 G) での実験から得た臨界熱流束と微小重力実験において得られた実験結果を比較したプロットを示す。同プロットから、臨界熱流束は液頭圧とほぼ線形な関係を持ち、その延長上に微小重力実験における臨界熱流束がのることが判った。これまで、航空機実験で He II の臨界熱流束を測定した Gradt らの実験²⁾では、微小重力中におけるデータが微小重力レベルに応じてバラつきを持っていたため、さらに重力加速度をゼロに近づけた際には、地上実験の傾向から外れる可能性を残していたが、本実験によって地上実験から得られる相関を微小重力に延長できることが明確になった。計算は He II の特徴である超流動乱流下での熱輸送の非線形性を示す Gortor-Millenk の熱伝導式を円筒座標系に展開した下記の式(1)を用いて計算した。

$$q_{cr} = \left(\frac{(m-1)j}{r} \int_{T_b}^{T_f} \frac{dT}{f(T)} \right)^{1/m} \quad (1)$$

ここで、 r は細線の半径、 $f(T)$ は熱伝導関数である。本実験結果では、 $m=3.4$ 、経験定数 $=0.03(50 \square m)$ 、 $0.1(80 \square m)$ とした時よく一致した。ここで、ヒータ面と液温に出来るサブクール度 ($T_f - T_b$) は圧力差に起因し、液頭圧に加えて次式(2)で示されるファンデルワールス圧力を考慮すると算出できる事が確認された³⁾。

$$\Delta p_{vdW} = \left(\frac{r_v}{m_{He4}} \right)^2 \cdot a \quad (2)$$

ここで、 a はヘリウムのファンデルワールス定数、 m_{He4} はヘリウムの物質質量である。ファンデルワールス圧力は 1.9 K で約 76.5 Pa の圧力となる。

以上の考察から 1 mG 未満の微小重力における飽和 He II 中の臨界熱流束において計測し、微小重力においてはファンデルワールス圧力の効果が支配的であることを明確に示した。

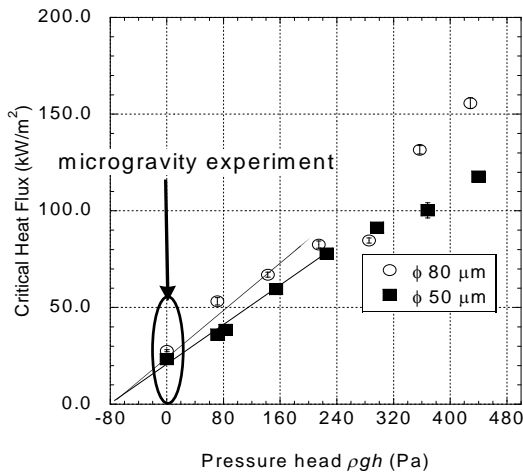


Fig.4 He II 温度 1.9 K での臨界熱流束と液頭圧の関係

(2) 微小重力下飽和 He II 中に単一気泡を生成し、その気泡成長を可視化計測から行った。取得した可視化画像から、気泡の投影面積を計測し、その値から気泡の直径・体積を算出した。Fig.5 に示すように、気泡出現の時間をゼロ秒として時間に対して気泡サイズをプロットすると、約 1 秒間までの気泡の占める体積がほぼ線形の相関を持っていることが判る。熱量の積分値と気泡サイズの間には線形関係が成立していて、温度ごとに熱量に対する気泡成長比率(growth rate $[m^3/J]$)を求める事が出来る。この growth rate と飽和蒸気圧曲線状の潜熱とガス密度の積の逆数を比にとった無次元数を導入する事で、投入したエネルギーのほぼ全てが潜熱輸送に消費されている場合に比べて気泡がどの程度成長しているのかを調べた (Fig.6)。気泡成長は気泡発生から投入したエネルギーと線形関係にある領域があることが判った。この領域の解析から大気圧下 4.2 K の He I では、潜熱輸送がほぼ全てを担うのに対し、He II においては液相への熱拡散の寄与が大きいことを示唆した。

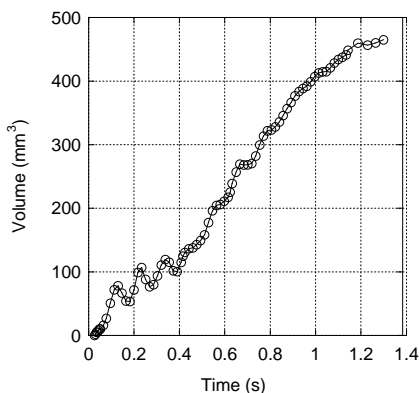


Fig.5 気泡出現の時間をゼロ秒として時間に対して気泡サイズの変化のプロット

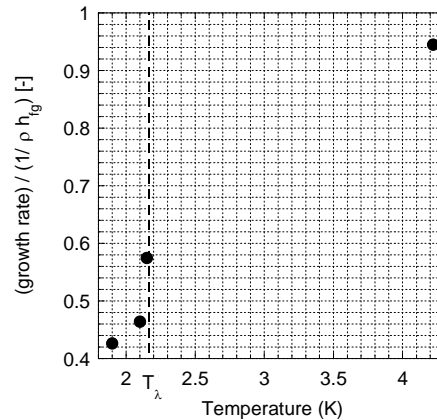


Fig.6 横軸：実験温度、縦軸：気泡成長比率と飽和蒸気圧曲線状の潜熱とガス密度の積の逆数を比にとった無次元数のプロット

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 7 件)

S. Takada, N. Kimura, M. Mamiya, T. Okamura, M. Nozawa, at al., Visualization study of Bubble Generation and Collapse in He II under Microgravity Condition, Adv. Cryog. Eng., 査読有, Vol. 59, 2014, 292-299

S. Takada, N. Kimura, M. Mamiya, T. Okamura, M. Nozawa, at al., Visualization and temperature measurement during vapor bubble growth in He II under microgravity condition, Proc. of ICEC 24, 査読有, 2013, 119-122

S. Takada, N. Kimura, M. Mamiya, T. Okamura, M. Nozawa, at al., Visualization study of difference between superfluid helium and normal helium film boiling under microgravity condition, Proc. of 3rd International Forum on Heat Transfer, 査読有, 2012, 83

S. Takada, N. Kimura, et al., Visual observation of film boiling in saturated He II under microgravity using drop tower, Proc. of ICEC 23, 査読有, 2011, 325-330

S. Takada, M. Murakami, N. Kimura, et al., Visualization study of transition between the noisy and the silent film boiling in He II around a thin wire heater, Proc. of ICEC 23, 査読有, 2011, 319-323

N. Kimura, S. Takada, et al., Development of a Small He II Cryostat with Optical Windows for a Microgravity Experiment, Cryogenics, 査読有, Vol. 51, 2011, 74-78, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.10.008>

木村 誠宏、高田 卓他、微小重力実験
を目指した小型可視化窓付超流動クラ
イオスタットの開発、査読有、低温工学、
45巻、2010、238-243

〔学会発表〕(計 9件)

高田 卓、木村 誠宏他、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、低温工学・超
電導学会、平成 25 年 12 月 4 日、うい
んく愛知、名古屋市

S. Takada, N. Kimura, at al., Visualiza
tion study of Bubble Generation and C
ollapse in He II under Microgravity C
ondition, CEC-ICMC 2013、平成25年6
月17日、Anchorage, Alaska, USA

高田 卓、木村 誠宏、間宮 幹人、
岡村 崇弘、野澤 正和、可視化法
を用いた微小重力中の超流動ヘリウム
と常流動ヘリウムのプール沸騰熱伝達
の研究、日本マイクロ重力応用
学会、平成24年11月20日、九州大学西
新プラザ、福岡市

S. Takada, N. Kimura, M. Mamiya,
T. Okamura, M. Nozawa, at al.,
Visualization study of difference between
superfluid helium and normal helium film
boiling under microgravity condition, 3rd
International Forum on Heat Transfer、平
成 24 年 11 月 13 日、長崎市

S. Takada, N. Kimura, M. Mamiya,
T. Okamura, M. Nozawa, at al.,
Visualization and temperature
measurement during vapor bubble growth
in He II under microgravity condition,
ICEC24-ICMC 2012、平成 24 年 5 月 14
日、福岡国際会議場、福岡市

S. Takada, N. Kimura, at al., Visualiza
tion study of silent film boiling in He
II under microgravity and under norm
al gravity, CEC-ICMC 2011、平成23年
6月14日、Spokane, Washington, USA

高田 卓、微小重力下における HeII
膜沸騰の蒸気膜挙動、低温工学・超電
導学会、平成 22 年 12 月 1 日、かごし
ま県民交流センター、鹿児島市

S. Takada, N. Kimura, et al., Visual
Observation of Film Boiling in Saturat
ed He II under Micro Gravity using D
rop Tower, International Cryogenic Eng
ineering Conference 23、平成22年7月2
0日、Wrocław, Poland

高田 卓、超流動ヘリウム中における
細線ヒータ周りの膜沸騰モードと蒸気
膜厚さの関係、低温工学・超電導学会、
平成 22 年 5 月 13 日、川崎市産業振興
会館

〔図書〕(計 2件)

野澤 正和、超流動ヘリウム中の特
異な極低温膜沸騰現象、伝熱、査読無、
52巻、2013、裏表紙解説

N. Kimura, KEK、2011 at KEK Annual

Report Vol.1、2012、1-52~1-53

6. 研究組織

(1)研究代表者

木村 誠宏 (KIMURA Nobuhiro)
高エネルギー加速器研究機構・共通基盤研
究施設・准教授
研究者番号：10249899

(2)研究分担者

間宮 幹人 (MAMIYA Mikihiro)
独立行政法人産業技術総合研究所・ナノテ
クノロジー・材料・製造分野研究企画室・
主幹
研究者番号：10358062

高田 卓 (TAKADA Suguru)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部装置工
学・応用物理研究系・助教
研究者番号：30578109

野澤 正和 (NOZAWA Masakazu)
秋田工業高等専門学校・機械工学科・講師
研究者番号：60447183

岡村 崇弘 (OKAMURA Takahiro)
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