

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360410
 研究課題名（和文） λ 圧力近傍の超流動ヘリウムで観測される強い伝熱促進効果の解明とその応用
 研究課題名（英文） Clarification of the emphasis effect of the heat transfer which was observed around λ pressure in superfluid helium, and its applications
 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・講師
 研究者番号：10249899

研究成果の概要：

- (1) 自由落下塔の微小重力を使った本邦初の He II 可視化実験に成功した。実験中、全ての計測機器は制動時に負荷される最大 6G の加速度に耐え、且つ実験槽内を超流動状態に保持した。
- (2) 実験の解析から Rayleigh-Taylor 不安定性を伴う細線ヒータ廻りの膜沸騰が、重力環境 (=1G) から微小重力環境下 ($<1 \times 10^{-3} \text{G}$) に遷移することによって変化することを確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2007年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	7,800,000	2,340,000	10,140,000

研究分野：低温工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：飽和超流動ヘリウムの伝熱促進効果

1. 研究開始当初の背景

宇宙用観測機器の冷却には、小型冷凍機による機械式冷却機も使用されているが、温度 1.9K のような極低温が得られる事や機械的振動が無い事などの点で飽和超流動ヘリウム (He II_s) による冷却法が今後も用いられると考えられていた。また、超伝導磁石を用いた高エネルギー宇宙線観測計画 (AMS-02) においても、超流動ヘリウムを冷媒として計画が進められている。一方、宇宙空間で超伝導磁石を使用するためには、「クエンチ」と呼ばれる超伝導状態から常伝導状態に転移する超伝導特有の問題に対処しなければならない。超伝導磁石がいったんクエンチすれば、磁石内に蓄積された大量のエネルギーが冷媒である

He II_s に放出され、磁石と He II_s との接触面で沸騰が発生するとともに大量の冷媒が消費される。

さらに、超伝導磁石のクエンチ直後にはノイジー膜沸騰又はサイレント膜沸騰と呼ばれる He II_s 固有の沸騰現象が発生すると考えられる。特に、He II_s のノイジー膜沸騰では、急激な蒸気膜の生成と崩壊を繰り返す数 10 から数 100Hz の周期性の大規模振動が発生する。

衛星に搭載された宇宙空間中の超伝導磁石のクエンチを引き金として、He II_s の容器内に大規模振動が発生すれば、観測用機器の性能等に有害な影響を与える可能性を否定できない。

このような状況で、超流動ヘリウムによる宇宙用機器の冷却技術の確立を目指して、申請者の研究グループでは、飽和領域からサブクール領域までの広い範囲に亘って超流動ヘリウム固有の伝熱モードの実相の解明を目的とした実験的研究を進めてきた。申請者らは、高感度センサーによる定量的計測法と可視化による定性的な計測法を相補的に組み合わせた他に例の無い特徴的な研究手法を用いて、サイレント膜沸騰はサブクール領域での膜沸騰と同質の現象であり、ノイズ膜沸騰は発熱体表面上の静水圧に依存した He II_s 固有の不安定性による沸騰現象であること云う新たな知見を得た。この知見から、微小重力場のような静水圧が原理的に無い環境では、発熱体表面上に重力場と同量の He II_s が存在したとしてもノイズ膜沸騰が発生しないと推論できる。しかしながら、この推論を重力場で実験を行う限りにおいてこれを証明することは不可能である。また、過去に NASA で行われた数少ない微小重力環境下の He II_s の伝熱実験においても、前述の着眼点が除外されていた。この結果、微小重力環境下での超流動ヘリウムの伝熱モードに十分な物理的解釈が未だなされていないのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、自由落下塔の微小重力環境を利用して飽和超流動ヘリウム固有の伝熱モードの実相の解明を目的とした。さらに加えて、飽和超流動ヘリウム (He II_s) 固有の沸騰現象であるノイズ膜沸騰の伝熱促進効果の宇宙用観測機器冷却への応用を計画した。

3. 研究の方法

(1) 2008 年度は、自由落下用小型軽量クライオスタットの設計の製作並びに単体での性能確認試験を行った。また、独立行政法人産業技術総合研究所が北海道に所有する電磁ブレーキ付自由落下塔設備とのインタフェースを確認し、接続に必要な関連機器の設計を行った。

自由落下塔設備の直径 720mm、高さ 980mm と云う限られた空間的制約から、本研究のために新たに製作するクライオスタットの目標性能を以下の数値に設定した。

- ① クライオスタット外径 200 mm 以下
- ② クライオスタット高さ 400 mm 以下
- ③ 質量 20 kg 以下
- ④ 最低到達温度 1.9 K (光学窓取り付け時)
- ⑤ 温度制御範囲 1.9K~2.16 K (ラムダ線温度) 内の任意
- ⑥ 熱侵入量 0.1 W 以下
- ⑦ ガスシールド付

図 1 に可視化クライオスタットのフロー図と落下設備に組み込まれた外観を示す。

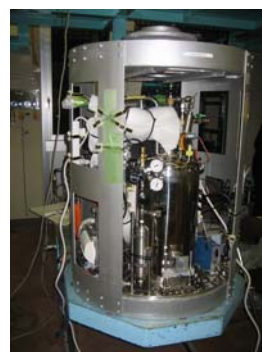
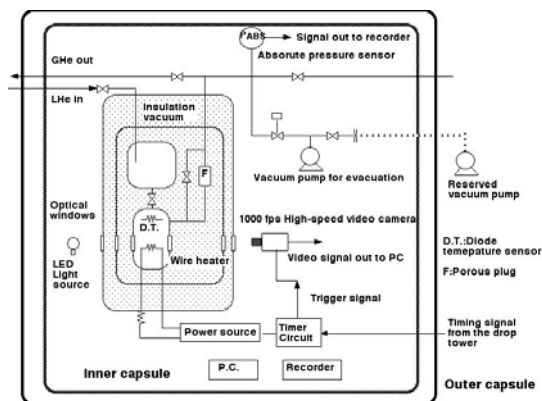


図 1 落下実験用クライオスタットのシステムフロー図とシステムの外観写真

前述の準備作業と平行してノイズ膜沸騰発生機構の基礎実験を行った。実験では透明ヒータ (酸化インジウム薄膜) とガラスとを組み合わせた狭小 2 次元流路を作成し、シャドウグラフ法とハイスピードカメラによりその相転移現象を可視化観測した。

(2) mG オーダーの微小重力環境における He II 可視化実験を研究計画の 2 年目に計画どおり実行し、本邦初の自由落下塔の微小重力環境下での He II 実験を繰り返し行うことに成功した。

(3) 計画最終年度は前年度に引き続き、自由落下塔を用いた微小重力下での超流動ヘリウム膜沸騰実験を行った。実験装置を前年度よりコンパクト、軽量にするセットアップの開発、小型容器に超流動を作り出す実験工程の作成などに尽力し、実験成功に寄与した。これにより、昨年度に行われた実験から大幅に改良された微小重力実験が成功し、世界的にも類を見ない超流動ヘリウム中の膜沸騰実験を微小重力下で行い、その光学的可視化・ヒータ温度測定・ジッター計測等の同時計測結果を取得した。

4. 研究成果

(1) ノイジー膜沸騰発生機構の基礎実験を行った。実験では透明ヒータ（酸化インジウム薄膜）とガラスとを組み合わせた狭小2次元流路を作成し、シャドウグラフ法とハイスピードカメラによりその相転移現象を可視化観測し、次のことが明らかになった。

① 加圧された超流動ヘリウム (He IIp) 中での沸騰開始期の可視化映像から、He IIp 中ではヒータ中央に He IIp-He I 界面が広がり、その内部から蒸気膜が成長する様子が確認された。

② 蒸気膜の成長に伴って重力の影響を受けた蒸気膜は変形し、上方に流れるが、沸騰開始の時点では重力の影響を受けない完全な円状で始まることが理解された。

③ これに対し、飽和超流動ヘリウム (He II_s) では沸騰開始はヒータ中央からは外れた複数の沸騰核から蒸気膜が成長する。このとき過熱（スーパーヒート）He II-He I と考えられる境界面は捕らえられていない。蒸気膜の成長速度は、加圧下のそれと比べて非常に早く、蒸気膜は相互に干渉しあい変形して発達することが理解された。現れたパターンは狭小流路内の液体ヘリウム中に拮がる気液界面が非常に速い速度で広がることに起因した粘性フィンガリングパターンと推測される様子を観測した。(図2)

(2) 本邦初の自由落下塔の微小重力環境下 ($<1 \times 10^{-3} G$ の) での He II 実験を繰り返し行うことに成功した。

初回の試みとして、真空断熱容器外側の窓ガラスの片方に LED 光源、反対側の窓ガラスにハイスピードカメラを設置し微小重力下における可視化実験を行った。結果としてクライオスタットやオシロスコープ・カメラなどの全ての計測機器は、制動時にかかる最大 6G になる重力に耐え健全に動作し且つ実験槽内を超流動状態に保持しすることに成功した。落下実験では、落下から落下後の装置の回収並びにデータ回数を含むクライオスタットの操作までに 15 分程度を要したが、クライオスタットの冷却性能として He II の生成後、約 4 時間超流動状態を維持し、一日十数回の実験が可能であることを実証した。

最終的に小型のクライオスタットを軸としたコンパクトな He II 可視化実験装置が健全に機能し、その実用性・安全性を証明した。

(3) 微小重力環境での He II 可視化実験を繰り返し行うことに成功した。落下実験では、落下から落下後の装置の回収並びにデータ回数を含むクライオスタットの操作までに 15 分程度を要したが、クライオスタットの冷却性能として He II の生成後、約 4 時間超流動状態を維持し、一日十数回の実験が可能である

ことを実証した。

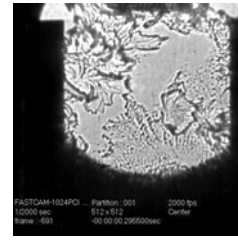


図2 2次元狭小流路中の He II_s の膜沸騰

図の画像は、2000 コマ/秒の高速度カメラにより撮影された。画像から、発熱体表面上のビスカスフィンガリング現象を伴う気液界面運動の様子が理解できる。測定条件は、過熱面熱流束: $q=0.21W/cm^2$ 、加熱液体の温度: $T=1.9K$ 、

(3) 微小重力環境での He II 可視化実験を繰り返し行うことに成功した。落下実験では、落下から落下後の装置の回収並びにデータ回数を含むクライオスタットの操作までに 15 分程度を要したが、クライオスタットの冷却性能として He II の生成後、約 4 時間超流動状態を維持し、一日十数回の実験が可能であることを実証した。

最終的に小型のクライオスタットを軸としたコンパクトな He II 可視化実験装置が健全に機能し、その実用性・安全性を証明した。

図3に実験準備から落下までのシーケンスを写真で示す。

(4) 実験装置をさらにコンパクト、軽量化し、小型容器内に超流動を作り出す過程の短縮などを改良した。改良したセットアップにより、光学的可視化・ヒータ温度測定・3軸加速度計測等の同時計測を行った。

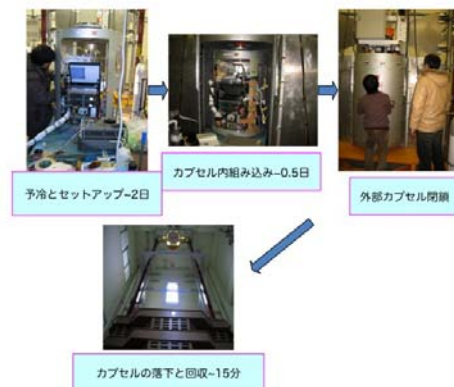


図3 落下実験シーケンス

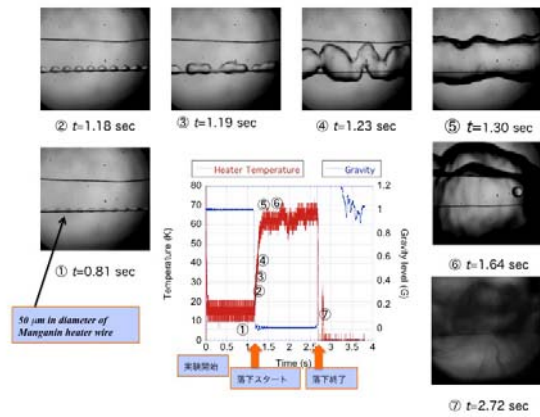


図4 重力加速度と沸騰熱伝達の一例
横軸が経過時間、左縦軸はヒーター温度、右縦軸が重力加速度である。実験槽内の超流動ヘリウムの温度は $T=2.08\text{K}(\pm 25\text{mK})$ であった。図中の数字は、可視化写真の番号を示している。落下開始後 ($t=1.2\text{sec}$)、重力加速度の変化に伴い (①→⑤) ヒーター温度が急激に変化していることが理解できる。また、ヒーター周囲の Rayleigh-Taylor 不安定性を伴う気泡 (②) が微小重力下で発達していく様子 (②→⑤) が確認できる。

可視化画像の解析から Rayleigh-Taylor 不安定性を伴う細線ヒータ廻りの膜沸騰が、重力環境 ($=1\text{G}$) から微小重力環境下 ($<1\text{mG}$) に遷移することに伴い、その不安定性も変化することを確認した。また、沸騰熱伝達の臨界熱流束を示すことができる実験データを得た。

(5) 論文4編の執筆と9件の学会発表等の成果を得た。

(6) 本実験は、世界で初めての自由落下塔を使った微小重力環境下での He II 中の膜沸騰の可視化であるということから、2008年11月に行われた米国物理学会流体力学部門のサテライトワークショップに招待を受けるなど評価を受けた。(業務上の都合により一部の発表について招聘を辞退)

(7) 今後の展開

本研究により確立された微小重力環境下での超流動ヘリウムの可視化実験法により、次のような展開が期待できる。

① 微小重力環境が生成する超流動ヘリウム中の膜沸騰のヌセルト数 $Nu=0$ の熱輸送(対流熱伝達項=0) から沸騰の不安定性の機構の検証

② ヒーター近傍の沸騰現象と水頭圧 rg_h の関係を詳細に測定することにより、飽和超流動ヘリウムの臨界熱流束 q_c と van der Waals の状態方程式に起因する圧力補正との関係

を証明する。

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4件)

- (1) N. Kimura, et al. "Visualization study of film boiling in saturated He II under low gravity environment", Proc. of ICEC 22, (2009). pp. 377-382 (査読有)
- (2) S. Takada, et al. "Vapor behavior around a thin wire during film boiling in He II under atmospheric down to saturated vapor pressure condition", Proc. of ICEC 22, (2009). pp. 371-376 (査読有)
- (3) S. Takada, et al. "Visualization Study of the Interface between Superheated He II and Superheated He I in a Two-Dimensional Narrow Channel by Using the Shadowgraph Method", Cryogenics (査読有), (2009). [in press]
- (4) 高田 卓他, シャドウグラフ法による狭い平行平板内に現れる過熱 He II-過熱 He I 界面の可視化、低温工学 第43巻(2008) pp. 94-99 (査読有)

[学会発表等] (計9件)

- (1) 木村 誠宏他、微小重力実験用可視化クライオスタットの開発、小島・平林記念機械工学・超伝導低温シンポジウム 第10回高エネ研メカ・ワークショッププログラム、2009年4月9日、つくば・高エネ研
- (2) 高田 卓、可視化研究から見た He II 膜沸騰の世界小島・平林記念 機械工学・超伝導低温シンポジウム 第10回高エネ研メカ・ワークショッププログラム、2009年4月9日、つくば・高エネ研
- (3) 高田 卓他、The hydrodynamic and heat transfer characteristics of film boiling modes in He II, FJPPL KEK-Saclay joint workshop、2009年3月24日、つくば・KEK
- (4) 高田 卓他、Visualization of co-existence of superheated He II-He I and vapor-liquid interface in a two-dimensional narrow channel、Workshop on Visualizing Thermo-Fluid Dynamics at Low Temperature of APS、2008年11月20日、Radisson Hill Country Resort in San Antonio, TX (as an invited speaker)・U. S. A.

- (5) 高田 卓他、 λ 点圧力を越える超流動中での膜沸騰遷移の様相と熱伝達の関係、第79回秋季超伝導・低温工学会、2008年11月12日、高知県・高知市文化プラザ
- (6) 木村 誠宏他、Visualization study of film boiling in saturated He II under low gravity environment、ICEC22-ICMC2008、2008年7月22日、韓国・ソウル
- (7) 高田 卓他、Vapor behavior around a thin wire during film boiling in He II under atmospheric down to saturated vapor pressure condition、ICEC22-ICMC2008、2008年7月22日、韓国・ソウル
- (8) 木村 誠宏他、自由落下塔の微小重力環境で用いる He II 用可視化実験装置の開発、第78回春季超伝導・低温工学会、2008年5月26日、東京・明星大学
- (9) 高田 卓他、Visualization study of transient heat transport in narrow channel under Superfluid Helium、^{2nd} Work shop of Saclay-KEK cooperation program、2008年3月28日、CAE/Saclay・France

[図書] (計 1 件)

- (1) 木村誠宏、前川龍司、“特集 可視化法を用いた極低温熱流動現象の研究”、低温工学、第43巻、(2008) 著作物

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 誠宏 (KIMURA NOBUHIRO)
高エネ研・超伝導低温工学センター・講師
研究者番号：10249899

(2) 研究分担者

(2006～2007 年度)

仲井 浩孝 (NAKAI HIROTAKA)
高エネ研・加速器研究施設・研究機関講師
研究者番号：00188872

佐々木 憲一 (SASAKI KENICHI)
高エネ研・超伝導低温工学センター・助教
研究者番号：70322831

岡村 崇弘 (OKAMURA TAKAHIRO)
高エネ研・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号：90415042

岩本 晃史 (IWAMOTO AKIFUMI)
核融合研・大型ヘリカル研究部・助教
研究者番号：00260050

(2007 年度のみ)

野澤 正和 (NOZAWA MASAKAZU)
東北大・流体研・助教
研究者番号：11301810

(3) 連携研究者

(2008 年度のみ)

仲井 浩孝 (NAKAI HIROTAKA)
高エネ研・加速器研究施設・研究機関講師
研究者番号：00188872

佐々木 憲一 (SASAKI KENICHI)
高エネ研・超伝導低温工学センター・助教
研究者番号：70322831

岡村 崇弘 (OKAMURA TAKAHIRO)
高エネ研・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号：90415042

岩本 晃史 (IWAMOTO AKIFUMI)
核融合研・大型ヘリカル研究部・助教
研究者番号：00260050

野澤 正和 (NOZAWA MASAKAZU)
東北大・流体研・助教
研究者番号：11301810

(3) 研究協力者

高田 卓 (TAKADA SUGURU)
筑波大学・大学院システム工学研究科・博士課程