

平成23年6月9日現在

研究種目：若手研究（B）
研究期間：平成21年度～平成22年度
課題番号：21760148
研究課題名（和文） 超流動ヘリウムの異相界面近傍に発生するマイクロ熱流動機構の解明
研究課題名（英文） Micro thermo-fluid mechanism generated near the interface in superfluid liquid helium
研究代表者 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

研究成果の概要（和文）：

超流動ヘリウム（He II）中の相界面近傍における熱流動状態について明らかにする。詳細な蒸気膜挙動の観測により、飽和 He II 中で発生するノイジー膜沸騰、サイレント膜沸騰の界面挙動と沸騰状態の安定性について考察を行った。ノイジー膜沸騰、サイレント膜沸騰とも、He II 温度の変化による蒸気膜の平均厚さの変化はほとんど見られなかった。一方、蒸気膜の平均厚さが減少するに従って、蒸気膜の挙動の周波数は増加傾向にあった。ノイジー膜沸騰の蒸気膜厚さがある臨界値を超えると、蒸気膜近傍の熱輸送のバランスが変化して、膜沸騰モードが変化し、もう一つの膜沸騰モードであるサイレント膜沸騰に変化すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：

The heat transfer characteristics and the vapor layer behavior of the film boiling in the saturated superfluid helium (He II) were experimentally investigated. He II has been utilized as an excellent coolant for cooling of the superconducting magnet and the space observation instrument. In the present study, the heat transfer coefficient during film boiling was measured by use of the stainless thin film heater and the vapor layer behavior was observed by use of the high speed video camera. The hydrodynamic stability of the film boiling in He II was examined. It is confirmed that the heat transfer during the saturated film boiling correlates with the heat conductivity function for turbulent He II. It is found that the heat transfer is enhanced as the mean vapor layer thickness decreases and the frequency of the vapor layer behavior increases.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
21年度	2,600,000	780,000	3,380,000
22年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱工学、流体工学、低温工学、超流動、可視化

1. 研究開始当初の背景

近年、He II をマイクロ粒子の粒径分類へ応用する試みがなされている。He II 中で発生する熱カウンター流を用いることで、加熱のみで粒径の制御を行うことができる。これにより、ミクロン～サブミクロンオーダーでのマイクロ粒子粒径制御が可能となり、産業面への応用が期待されている。しかしながら、加熱により発生する高密度量子化渦挙動を含めた超流動乱流状態における流動現象及び伝熱機構は明らかにされていない。

液体ヘリウムは、He I と He II の二つの液相を持つ。特に He II は、良好な熱伝達特性を持つ。そのため、欧州原子核研究機構 (CERN) での大型陽子・陽子衝突型加速器 (LHC) 計画に代表されるような、大型超伝導電磁石冷却のための冷媒として利用されてきており、素粒子物理学の実験研究を支える重要な要素技術の一つと言える。また、衛星搭載用の赤外線天文観測機器の冷却にも用いられ、He II の熱機械効果を利用したポラスプラグにより、宇宙空間における液体ヘリウム容器中の気液弁別を実現している。このような背景から、He II 中における熱伝達特性は長らく研究されてきている。

He II は量子流体としての側面も持つ。He II 中に熱が加わると、熱源近傍に高密度の量子化された渦糸が発生する。この量子化渦が加熱面近傍の He II 中の伝熱機構及び乱流状態を決定づけている。しかし、量子化渦挙動と伝熱機構との関連性は明らかにされていない。He II 中に大きな熱量が加わると、量子化渦が発生し、渦が高密度化すると超流動状態が崩壊し、常流動状態または沸騰状態へと転移する。さらに、He II の圧力を λ 点の圧力 (5.04 kPa) 以上に加圧したサブクール状態では、加熱面近傍に He II-He I-ヘリウム蒸気の三相共存状態が実現する。この状態は、他の流体では確認できない非常に特殊な状態である。従って、発生する高密度量子化渦が熱流動状態及び膜沸騰状態を含めた、He II、He I、ヘリウム蒸気の相界面挙動に及ぼす影響を解明することは、学術的にも工学的応用の観点からも重要であると言える。

2. 研究の目的

超流動液体ヘリウム (He II) 中での He II-ヘリウム蒸気界面および He II-常流動液体ヘリウム (He I)-ヘリウム蒸気界面での相変化を伴う伝熱機構の解明を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 可視化観測による熱流動状態の解明。

シャドウグラフ法を用いて、He II 中の膜沸

騰時における蒸気膜界面の詳細な挙動を観測する。得られた可視化映像に関して蒸気と He II の濃淡を利用した PIV 解析を行い、蒸気膜挙動の定量的な解析を行う。

(2) 圧力・温度変動測定による相界面挙動の解明。

これまでの研究において、膜沸騰発生時の圧力変動は、非常に高周波の変動が観測されている。この圧力振動は、気液界面の振動に呼応しており、He II 界面の微視的な熱流動状態が関与している可能性が示唆される。そこで、より高精度の圧力センサを用いて圧力変動計測を行う。

(3) He II マイクロ伝熱機構のモデル化。

He II 中に発生する高密度量子化渦が熱流動状態に及ぼす影響についての考察をまとめ、量子化渦挙動も考慮した He II-He I-蒸気界面でのマイクロ伝熱モデルを構築する。

4. 研究成果

(1) 飽和 He II 中の膜沸騰時の熱伝達特性

図 1 にノイジー膜沸騰、サイレント膜沸騰時における熱伝達率と He II 温度の関係を示す。ノイジー膜沸騰時における熱流束は 1.7 W/cm^2 、気液自由界面からヒータ面までの深さ (ヒータ浸漬深さ) は $225 \pm 25 \text{ mm}$ 、サイレント膜沸騰時における熱流束は 2.0 W/cm^2 、ヒータ浸漬深さは $55 \pm 35 \text{ mm}$ の範囲で計測を行った。ヒータ浸漬深さが約 90 mm 以上ではノイジー膜沸騰が発生し、それ以下ではサイレント膜沸騰が発生する。またヒータ浸漬深さが $50 \sim 90 \text{ mm}$ では、両膜沸騰モードが断続的に発生する遷移領域が確認された。熱伝達率 h は

$$h = \frac{q}{T_w - T_b}$$

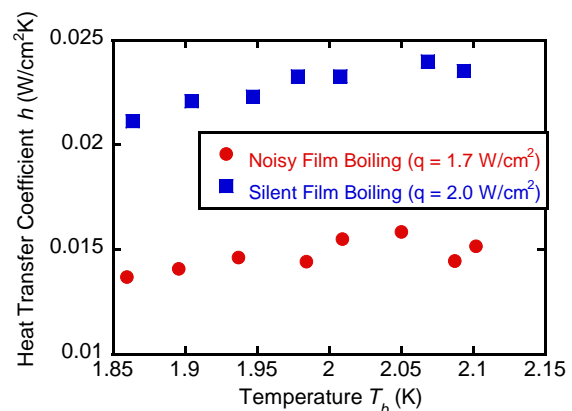


図 1. 飽和 He II 中の膜沸騰時の熱伝達特性

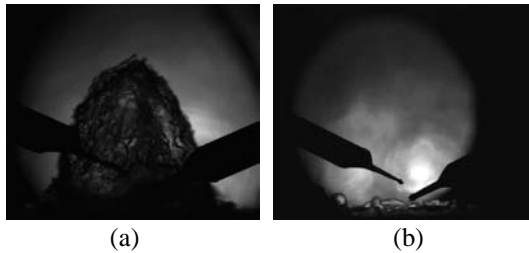


図 2. ノイジー膜沸騰及びサイレント膜沸騰の可視化写真. (a)ノイジー膜沸騰. $T_b = 2.05$ K, $q = 3.3$ W/cm². (b)サイレント膜沸騰. $T_b = 2.07$ K, $q = 2.0$ W/cm².

より算出した。ここで q は熱流束、 T_w はヒータ温度、 T_b は He II 温度である。熱伝達率は、加熱開始 0.2~0.4 sec 後の膜沸騰状態が定常状態の部分での値を用いている。

ノイジー膜沸騰、サイレント膜沸騰とも、温度が 2.00~2.05 K で熱伝達率が良好となっている。この傾向は、He II 中の乱流状態における伝熱特性を示す熱伝導関数[3]の傾向とよく一致している。従って He II 中の膜沸騰熱伝達は He II 温度の影響を受けると言える。

(2) 蒸気膜挙動と He II 温度との相関

図 2 にノイジー膜沸騰及びサイレント膜沸騰の可視化写真を示す。ノイジー膜沸騰は、ヒータ面上に大きな蒸気泡が発生し、それが発生・成長・崩壊を繰り返す挙動となっている。一方、サイレント膜沸騰では、薄い蒸気膜がヒータ面全体を覆う。蒸気膜界面で多数の小さな蒸気泡が発生し、蒸気泡はヒータ面から離脱せずに消失する挙動となっている。

図 3 に平均蒸気膜厚さとヒータ浸漬深さとの関係を示す。蒸気膜厚さは、ヒータ加熱開始 0.2~0.4 sec 後の定常状態における蒸気膜厚さの平均値を用いている。熱流束は 2.0 W/cm² である。ノイジー膜沸騰、サイレント膜沸騰の両膜沸騰モードとも、ヒータ浸漬深さが減少するにしたがって、平均蒸気膜厚さが増加しているのが分かる。この傾向は、どの温度においても同様となった。両膜沸騰モードとも、ヒータ浸漬深さが減少するにしたがって、熱伝達率も低下することが報告されている。よって、ノイジー膜沸騰、サイレント膜沸騰は、熱伝達率と蒸気膜厚さに相関があると考えられる。

次に、蒸気泡の発生から消失までの挙動の周期と蒸気膜厚さとの関連性について考察する。図 4 に蒸気泡挙動の周波数と平均蒸気膜厚さとの関係を示す。熱流束は 2.0 W/cm² である。両膜沸騰モードとも、蒸気膜厚さが減少するにしたがって周波数が増加傾向にあることが分かる。また、蒸気膜挙動に関しては、どの He II 温度においても、同様の傾向となることが分かった。

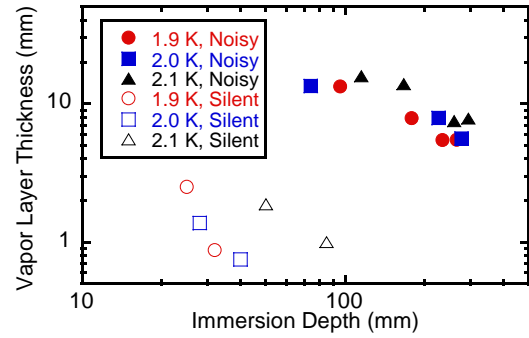


図 3. 平均蒸気膜厚さとヒータ浸漬深さとの関係

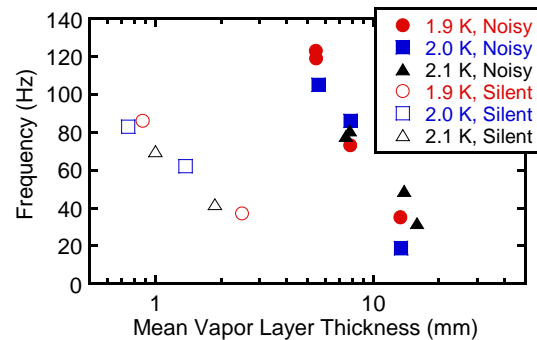


図 4. 蒸気泡挙動の周波数と平均蒸気膜厚さとの関係

以上のことから、飽和 He II のノイジー膜沸騰、サイレント膜沸騰とも、蒸気泡の発生・成長・崩壊の周波数が増加するにしたがって、伝熱特性の非常に良好な周囲の He II との攪拌作用の促進により、熱伝達が促進される。ノイジー膜沸騰では、ヒータ浸漬深さが減少するにしたがって、蒸気膜厚さが増加し、厚さがある臨界値を越えると、もう一方の膜沸騰モードである、サイレント膜沸騰へ遷移すると考えられる。

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 2 件)

1. 野澤 正和、木村 誠宏、村上 正秀、高田卓、「He II 中の大気圧から飽和圧力の範囲で発生する各膜沸騰モードの熱流動状態」、低温工学第 45 巻 (2010)、pp.36-42
2. M. Nozawa, N. Kimura, M. Murakami and S. Takada, “Thermo-fluid Dynamics of Several Film Boiling Modes in He II in the Pressure Range between Atmospheric Pressure and Saturated Vapor Pressure”, Cryogenics 49 (2009), pp.583-588

〔学会発表〕（計 2 件）

1 . Masakazu Nozawa, Shinichi Chiba, Nobuhiro Kimura, Katsuhide Ohira, “Study of Unstable Phenomena of Film Boiling in Superfluid Helium”, The Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Nov. 4, 2009, Sendai

2 . 野澤 正和, 千葉 真一, 大平 勝秀, 木村 誠宏, 「超流動ヘリウム中の飽和膜沸騰における蒸気膜界面近傍の伝熱特性」、日本機械学会 2009 年度年次大会、2009 年 9 月 14 日、盛岡

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野澤 正和 (NOZAWA MASAKAZU)

研究者番号 : 60447183

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号 :