

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 21 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360353

研究課題名（和文） 超流動ヘリウムにおける特異熱流体力学状態の定量的同定とその間の遷移の実験的検証

研究課題名（英文） Quantitative identification of unique thermo-fluid dynamic states and experimental verification of transitions among the states in superfluid helium

研究代表者

村上 正秀 (MURAKAMI MASAHIDE)

筑波大学・名誉教授

研究者番号：40111588

研究成果の概要（和文）：超流動ヘリウムの熱カウンター流ジェットについての PIV 法を用いた実験と、可視化法を中心とする沸騰についての実験を例に研究がなされた。前者では、加熱量の増加に伴う、量子化渦の効果の現れ（超流動崩壊）、量子化渦の効果が加熱量に対して線形のおよび非線形的に現れる領域の出現が確認され定量的に評価された。沸騰においては、膜沸騰の開始条件、ノイジーとサイレントの両膜沸騰状態の出現条件などが定量的に同定され、また PIV 法による流動場解析も行われた。

研究成果の概要（英文）： Experiments of superfluid helium were conducted on the thermal counterflow jet using PIV method and the boiling phenomena *by visualization method and by using PIV method. In the former, the appearance of the effect of quantized vortices (superfluid breakdown) and the existence of states where the effect of quantized vortices is in proportion to the heat flux and the square of the heat flux respectively were confirmed, and the physical states have been understood. In boiling experiments, the onset conditions of film boiling, the appearance conditions of both noisy and silent film boiling states were quantitatively identified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

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：航空宇宙流体力学

1. 研究開始当初の背景

超流動ヘリウムの熱流体力学状態は、熱負荷あるいは超・常両流体成分間の相対流速の増加に伴い、理想超流動状態が崩壊して量子化渦が現れ始める(超流動崩壊)。更に増加が進むとやがて超流動乱流化する、と定性的には理解されていた。また、大熱負荷状態では沸騰(それも定常な核沸騰状態無しにほぼ直接的に膜沸騰状態に至る)も起こることが知られていた。しかしそれ等への遷移についての定量的条件、およびそれらの各状態の詳細にまでは理解が及んでいなかった。特に、超流動ヘリウムの熱流体現象において、近年有力な流速計測手段となりつつあるPIV法の応用に関しては、そこで用いられるトレーサ(固体)粒子と量子化渦の相互作用についての定量的理解を全く欠いていた。その帰結として、理論値を下回るPIV出力が何を表し、従ってどの程度下回るのかについては未解決の問題であった。

2. 研究の目的

(1) 加熱量の増加に伴う超流動ヘリウムにおける、量子化渦の効果の現れ(超流動崩壊)から、量子化渦の効果が顕著となった十分に発達した超流動乱流に至るまでに現れる、熱流体力学状態の同定とその間の遷移についての理解。また、それぞれの物理的状態についての定性的把握と開始条件などについての定量評価。

(2) 超流動ヘリウム熱流体現象の流速計測に応用されるPIV法における、トレーサ固体粒子と高密度量子化渦の干渉についての理解と定量評価法の確立。その理解を通してのPIV法の超流動ヘリウム熱流体現象計測の基礎的理解とその応用方式の確立をめざす。

(3) 超流動ヘリウムの沸騰における、膜沸騰の開始条件、ノイジーとサイレントの両膜沸騰状態の出現条件などの定量的理解。また、平板ヒーター上で起こる膜沸騰時の周辺の液体相の流れ場、つまり伝熱に誘起された常流動成分の振る舞いと蒸気泡の発達・収縮によって誘起される全流体としての準周期的な振動流れ、を明らかにすべくPIV法を応用した計測を行う。

3. 研究の方法

(1) 超流動ヘリウムの熱カウンター流ジェットのPIV法による計測。熱流束を従来研究にはなかった程の広範囲($10^2 \sim 10^5 \text{ W/m}^2$)に変化させる。また、温度も従来研究よりも広範囲に(特に T_λ 近くまでの高温)変化させ

る。PIV計測値と常流動流速に関する理論値との比較、またトレーサ固体粒子と高密度量子化渦との干渉に関する現象論的理論(Sergeev等、Phys. Rev. B74 (2006))との比較を試みる。(上記研究目的欄の項目(1)および(2))

(2) 地上実験室における、平板ヒーター周りの沸騰に関する可視化法およびPIV法を主な計測手段とする実験。可視化法では、蒸気泡の形成・発達・消滅過程、また動的安定性について調べ、PIV法では、沸騰気泡周辺の超流動ヘリウム中の流れ場を調べる。また、落下塔を利用した微少重力状態下での細線ヒーター周りの沸騰についての準1次元状況下での実験。(上記研究目的欄の項目(3))

4. 研究成果

(1) 超流動ヘリウムの熱カウンター流ジェットのPIV法による計測:

①極く小さな熱負荷($q < 100 \text{ W/m}^2$)で量子化渦の未発達な理想超流動状態を除き、トレーサ粒子と高密度量子化渦との干渉によりPIV計測値は常流動流速理論値を下回ることが分かっているが、その減殺の程度は、強い温度依存性を示すことが理解できた。両者の比は、1.8 K以下で0.3程度であるが、ラムダ点温度(T_λ)に近づくにつれて急激に1に漸近することが分かった。この結論は、以前我々が実施したLDV(Laser Doppler Velocimeter)計測結果とも定量的に一致するものである。これにより、1.9K程度以下の温度で行われた従前の実験からの帰結、減殺割合は温度に依らず一律にオーダー0.5程度である、は修正が必要なことが示された。この知見は、本実験がこれまでになく広い温度範囲で行われたが故に得られたものである。

②上記の減殺度の熱負荷 q への関数依存性は、 $q \approx 2 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 程度($=q_{crt}$)を境に変化することが分かった： $q \leq q_{crt}$ では減殺度は q に比例し、 $q \geq q_{crt}$ では q^2 に比例する。この実験結果は、従前の実験よりも大幅に広い q の範囲($10^0 \sim 10^5 \text{ W/m}^2$)で実験がなされた結果として得られたものである。この結果は、理論的には渦密度の大きさにより、トレーサ粒子-渦の間の干渉の形態が変わることに依る、と説明されている事実と符合すると思われる。つまり、粒子半径 a_p と平均渦糸間隔 δ との間の大小関係が、 $a_p \leq \delta$ (中間渦密度)では q に比例し、 $a_p \geq \delta$ (高渦密度)では q^2 に比例する、と説明されているものである。

③上記の q に比例する領域:

この領域の下限の q は実験的に確認されて

はないが、今回実施した実験における q の最小値である 100 W/m^2 以下程度 (PIV 法の最小流速分解能近傍) と推測される。この領域における PIV 計測値の減殺度は、上記現象論的理論値と定性的にも、定量的 (オーダー) にも一致する。ただし、この現象論的理論では、与えられている 2 個の現象論的パラメータ値 (高密度量子化渦の配置・配向性などを規定するパラメータ β , 渦密度と超-常両流体成分間の相対速度の間の比例定数 γ) の精度が低く (特に高温域 $T \rightarrow T_h$ で精度は極度に悪化する)、オーダー以上の精度における定量的比較は困難であった。

④上記の q^2 に比例する領域:

非常に大きな q ($2 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 程度以上) の場合に、PIV 計測値の減殺度は q^2 に比例することが実験的に確認され、その臨界値が温度の関数として求められた。線形領域と非線形領域を分ける q の臨界値 q_{crit} については、PIV 計測値は現象論的理論予測と定量的に (オーダー比較) 一致した。

⑤PIV 計測値と上記の理論値との比較においてカーブフィッティングを実施し、両者間のベストフィッティングを求めることにより、 β の値を決めることが出来た。値は、3.7 であり、確かにオーダー 1 で、理論における想定範囲内にあった。

⑥超流動乱流の計測に応用された PIV では何が計測されるのかについて、温度と熱負荷 (もしくは量子化渦密度) の関数として明らかに出来た。これにより、PIV 法の超流動乱流の計測への応用方式がほぼ確立されたと考える。もちろん、超-常内部対向流様式をとらない非熱的誘起の一般流れ (co-flow 構造流れ、 $v_n = v_s$) においては、高密度の量子化渦塊が存在しないので、PIV 法は問題なく適用できる。

(2) 沸騰実験

①平板ヒーター周りの沸騰に関する地上可視化実験により、ノイズーサイレント両膜沸騰間の分界条件の変化の様子を、沸騰形態に対する動的安定解析における中立安定曲線に整合する形で議論を展開することができた。

② μ -重力環境 (落下塔によって作り出された微少重力環境) での沸騰実験が成功裡に実施された。この環境では、密度差 (気-液間密度差、温度差起因の密度差) 起因の流体運動が抑制されるので、細線ヒーター周りの準 1 次元の沸騰が実現され、より現象の特徴が抽出しやすい状態での蒸気泡成長-消滅が計測でき、定量的議論も展開された。

③上記②の実験を基に、気泡成長期における気-液 (ヘリウム蒸気-超流動液体ヘリウム) 界面への界面凝縮についての定量評価が可能となり、その評価が実施されつつある。

(3) PIV 法を応用した膜沸騰時の周辺超流動ヘリウム内の流動挙動の研究

①PIV 法を応用することにより、ノイズーサイレント両膜沸騰時の周辺超流動ヘリウム内の動的挙動に関する知見 (局所流速の空間-時間変動、局所流速の時間平均値) が初めて得られた。

②ノイズー膜沸騰時の準周期的気泡成長-収縮時に伴うバルク流体 (He II) および常流動成分の流体挙動が分かった。

③蒸気泡 (やや高温) 界面からの加熱による He II 中の常流動成分の平均熱流動 (PIV 計測結果) から、局所伝熱の様子が把握できるようになった。これは初めての成果である。

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 Masahide Murakami, Experimental study of thermo-fluid dynamic effect in He II cavitating flow, Cryogenics, 査読有、52-11、2013、620-628.

DOI:10.1016/j.cryogenics.2012.08.008

② 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、査読有、45-2、2010、36-42.
https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jcsj/45/2/_contents/-char/ja/

[学会発表] (計 10 件)

① 石井聡、高田卓、村上正秀、都丸隆行、村上巖、長い蒸発部を持った超流動ヒートパイプの臨界熱量、第 86 回低温工学・超電導学会、2012 年 11 月 8 日、いわて県民情報交流センター

② 村上正秀、超流動熱カウンター流ジェットでの PIV 計測結果における熱入力依存性、第 86 回低温工学・超電導学会、2012 年 11 月 8 日、いわて県民情報交流センター

③ Suguru Takada, N. Kimura, M. Mamiya, T. Okamura, M. Nozawa and M. Murakami, Visualization and temperature measurement during vapor bubble growth in He II film boiling under microgravity condition, 24th International Cryogenic Engineering Conference, 2012年5月15日、福岡国際会議場

④ 高田卓、木村誠宏、間宮幹人、野澤正和、岡村崇弘、村上正秀、微小重力中の He II 膜沸騰の気液界面における熱伝達の研究、第 85 回低温工学・超伝導学会、

- 2011/11/11、金沢、歌舞伎座
- ⑤ M. Murakami, Application of PIV method to superfluid dynamics experiments, 9th International Symposium on Particle Image Velocimetry (招待講演), 2011/7/22, 神戸、神戸大学
 - ⑥ S. Takada, N. Kimura, T. Okamura, M. Murakami, Visualization study of silent film boiling in He II under microgravity and under normal gravity, Cryogenic Engineering Conference, 2011/6/15, Spokane, USA
 - ⑦ 高田卓、木村誠宏、岡村崇広、村上正秀、微少重力下における He II 膜沸騰の蒸気膜挙動、第 83 回低温工学・超伝導学会、12 月 1-3 日 2010 年、鹿児島県民交流センター
 - ⑧ 村上正秀、超流動ヘリウムの熱流体現象とその赤外/X-線観測望遠鏡冷却への応用(特別講演)、第 42 回流体力学講演会、6 月 24, 25 日 2010 年、米子コンベンションセンター
 - ⑨ 村上正秀、横田尚也、高田卓、前田素規、高越威、超流動計測に応用された PIV では何が測られるのか、第 82 回低温工学・超伝導学会、5 月 12-14 日 2010 年、川崎市産業振興会館
 - ⑩ 高田卓、村上正秀、木村誠宏、高びょうん、うく、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、第 82 回低温工学・超伝導学会、5 月 12-14 日 2010 年、川崎市産業振興会館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 正秀 (MURAKAMI MASAhide)
筑波大学・名誉教授
研究者番号：40111588

(2) 研究分担者

高田 卓 (TAKADA SUGURU)
筑波大学・システム情報系・助教
研究者番号：30578109

(3) 連携研究者

木村 誠宏 (KIMURA NOBUHIRO)
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
中納 暁洋 (NAKANOU AKIHIRO)
産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・主任研究員
研究者番号：50344114