

科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年6月21日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19760144
 研究課題名 (和文) 自然対流及び強制対流における臨界点近傍ヘリウムの流体力学的不安定性の解明
 研究課題名 (英文) Hydrodynamics instability of natural and forced convection of helium near the critical point
 研究代表者
 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・助教
 研究者番号：90415042

研究成果の概要： 臨界点近傍の流体は2つの特異な現象を有する。1つはピストン効果、2つ目はサーマルプルームである。両者の出現の有無は体系に強く依存する。後者は通常流体でも生じることがあるが、臨界点近傍のヘリウムは熱拡散係数が非常に小さい(1×10^{-9} m²/secのオーダー)であるために、わずかな温度差でもプルームもしくはそれに相当する温度場を形成する。すなわち微小擾乱に対しても不安定になり流れ場は乱流状態となる。本研究では極低温環境下での臨界点近傍のヘリウムにおける強制対流・自然対流中で生じる不安定波の成長過程及び伝熱特性について明らかにした。

研究成果の概要 (英文) : The several transport coefficients indicate dramatic behavior near the Gas-Liquid Critical Point (GLCP), for example heat capacity at constant pressure, C_p , and isothermal compressibility is diverged near the GLCP. The thermal diffusivity defined as a function of the inverse of C_p becomes very small. It is known that the heat transfer characteristic improves by existence of the following two effects. One is piston effect generated by high isothermal compressibility. Second is thermal plume caused by buoyant force under the gravitational field. It was clear that growth mechanism of unstable mode, laminar-turbulent transition processes and heat transfer characteristics in natural and forced convection of helium near the GLCP.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,700,000	0	2,700,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
2009年度	200,000	60,000	260,000
総計	3,300,000	180,000	3,480,000

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、物質移動

1. 研究開始当初の背景

超臨界ヘリウム (SHe) が近年超伝導電磁石等の冷媒として用いられている。これに伴い SHe の熱・流体力学的な特性の把握が重要

な課題となっている。一般に臨界点近傍流体は臨界異常に起因して、ピストン効果及びプルームと呼ばれる熱対流が存在することが知られている。これらの出現の有無は着目す

る体系の性質に強く依存する。例えば臨界点近傍の閉じた系においては、ピストン効果が出現する。浮力流によるサーマルブルームは臨界点近傍で密度が大きく変化することのみならず熱拡散係数が非常に小さくなるために生じる。つまり臨界点近傍で閉じた系かつ浮力流が存在する熱対流系においては、早い現象と対流という比較的遅い現象が共存する非常に複雑な場を形成する。一方で開いた系においては、ピストン効果は顕著に出現しないものの低熱拡散性に起因して、微小擾乱に対しても流れ場は不安定になりやすく、乱れた流れ場へと成長していく。これまで行われてきた数値実験や可視化実験で超臨界流体の挙動を観測した例もあるが、これらの多くは流れ場を2次元的に捉えたものであるため、渦構造等の3次元構造や層流から乱流への遷移過程等の動力学に関しては十分に解明されていない。そこで本研究では臨界温度 $T_c=5.201\text{ K}$ にもつ極低温環境下での臨界点近傍のヘリウムにおける強制対流・鉛直平板自然対流中で浮力流により生じる不安定波の成長過程及び伝熱特性について明らかにする。これらの研究により明らかにされた伝熱特性は **SHe** を冷媒として用いる超伝導磁石の冷却設計指針ともなりうる。

2. 研究の目的

本研究は、極低温領域における超臨界ヘリウムの伝熱機構を解明することを目的としている。解明する事項は大きく以下の3点である。

(1) 熱対流発生初期段階で生じる微小擾乱の成長過程すなわち乱流への遷移過程を捉える。具体的には不安定波の成長として、温度場の等値面の成長過程を捉える。また温度場に対応する渦構造を明らかにする。

(2) 熱伝達係数を無次元数を用いて整理し、熱伝達特性と(1)で明らかにする渦構造の関連性を明らかにする。

(3) 乱流への遷移過程及び乱流熱伝達特性の流路形状依存性を明らかにする。同時にここではパッシブな伝熱促進方法を見出すことも目的としている。

3. 研究の方法

2-(1), (2) 項目に関しては、①水平平板自然対流系、②鉛直平板系、③強制対流系の3つの場合について調査研究を行う。熱対流発生初期段階で生じる微小擾乱の成長過程を定性的に明らかにするために、具体的には温度場の等値面の3次元構造に着目するが、これは圧縮性流体基礎方程式を乱流モデルを適用しない直接数値計算(DNS)を行うことにより解析する。①の水平平板系に関して

は周期境界条件を系に適用することで、場の量における水平2成分(x-y成分)をフーリエ変換した擬スペクトル法を適用し、鉛直成分(z成分)に関しては通常の差分法を適用した擬スペクトル-差分ハイブリッド手法を用いた時間発展型DNSを行った。また②及び③系においては周期性は仮定せず、差分法を用いた空間発展型のDNSを行なった。渦構造の詳細な構造は速度勾配テンソル第2不変量を計算することで明らかにした。変動場の性質を押さえる上で、変動成分及び変動成分の空間微分に関するPDF解析を行った。またピストン効果の影響が無視できる開いた系における計算を行い、数値計算から得られた熱伝達係数と実験結果及び熱伝達係数を記述した実験式と比較検証を行うことで計算結果の妥当性について検証を行った。2-(3)に関しては鉛直矩形チャンネル中に縦溝が設けられた場合などを考慮することで乱流遷移のメカニズムの流路形状依存性及び構造物が熱伝達特性に及ぼす影響を明らかにした。

4. 研究成果

臨界点近傍($T=5.25\text{ K}>T_c$, $p=229\text{ kPa}>P_c$, T_c , P_c はそれぞれ臨界温度、臨界圧力を意味する)の開放系における水平平板自然対流場の温度等値面及び渦構造を図1~3に示す。

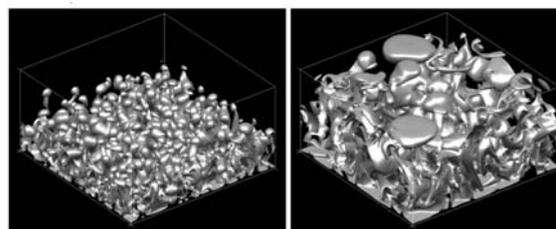


図1. (左) $t=2.2\text{ sec}$, (右) $t=2.7\text{ sec}$ 時の温度場の等値面

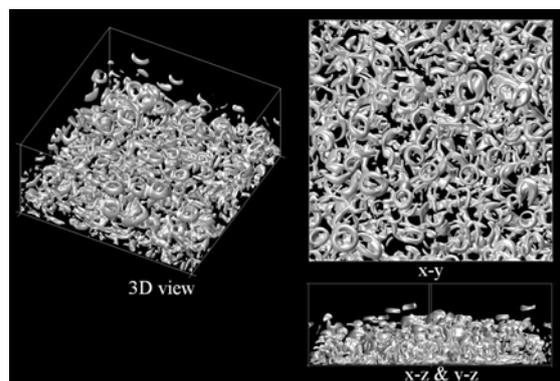


図2. $t=2.2\text{ sec}$ の渦構造 (場は多数の渦輪から構成されている) 灰色の部分が速度勾配テンソルの第2不変量の正值に相当する部分で、管状構造をした渦を意味している。

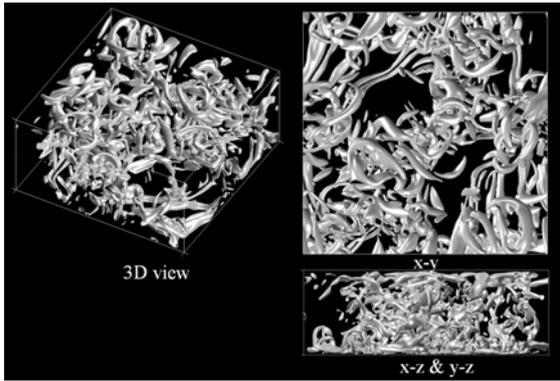


図3. $t=2.8$ secの渦構造（場はループしていない渦管から構成されている）

図示するように対流発生初期の段階で無数のマッシュルーム状のプルームが生じている。これは発熱面近傍の流体密度の減少によるレイリー・テイラー不安定性（RT不安定性）に起因したものである。このプルームに対応する渦構造はループ構造をもつ渦輪に相当していることが図2から伺える。プルームが上部壁面に到達すると、渦輪はループ構造から端部を有する管状渦に様相を変える。これに対応する温度場の等値面は、もはやマッシュルーム構造をしていない複雑形状となっている。一方で閉じた系においては図4に示すように、発熱体加熱開始と共にバルク温度が一様に上昇している。これはピストン効果による断熱圧縮による温度上昇を意味している。そのためバルク温度が上昇したことにより、開いた系の場合と比較してマッシュルーム状のプルームが形成される時間に遅れが見られる。

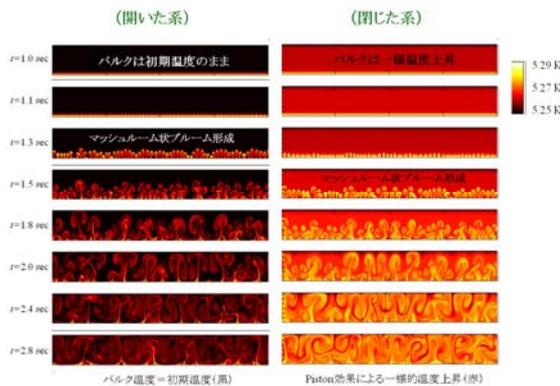


図4. (左) 開いた系, (右) 閉じた系での流れ場の2次元プロット

臨界点近傍ヘリウム ($T=5.25\text{K}$, $p=229\text{kPa}$, 局所レイリー数の最大値, $Ra(\max)=6 \times 10^{12}$) の鉛直平板系における温度場及び渦構造を図5~7に示す。鉛直系の場合、対流発生初期段階で、発熱面のごく近傍で生じる浮力流に起因するケルビン・ヘルムホルツ不安定性（KH不安定性）による2次元横渦がチャネ

ル中央部あたりにほぼ等間隔で形成される。これは水平平板のときの渦輪に対応する渦構造とみなすことが出来る状態である。そして下流側へ移流するに従い、2次元横渦は壁面での滑りなし条件とバルクにおける凍結運動でツイストし始め、すぐ隣の横渦と合体し始める。発達した乱流に遷移する前のこの合体の様子を示したスナップショットが図6である。最終的に $t=1.75\text{sec}$ 時に示すような3次元な複雑な渦構造を示すようになる。図7にDNSで得られた熱伝達特性を示す。図示するように層流域はDNSと理論解は完全に一致しているが、局所レイリー数, Rax が 1×10^{11} 近傍で熱伝達に跳びが見られ熱伝達特性は飛躍的に向上する。とびが見られる点が乱流への遷移点と考えられ、これより下流側は乱流熱伝達となっている。乱流領域においても実験式とも比較的良い一致を示す。ただ乱流への遷移点に関しては実験と異なった結果になっている。

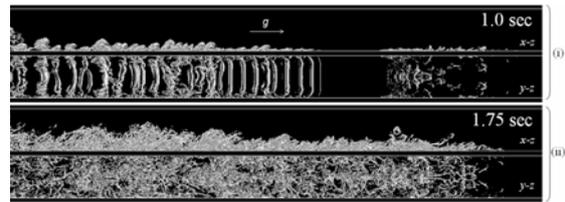


図5. (上) $t=1.0$ sec, (下) $t=1.75\text{sec}$ 時の渦構造

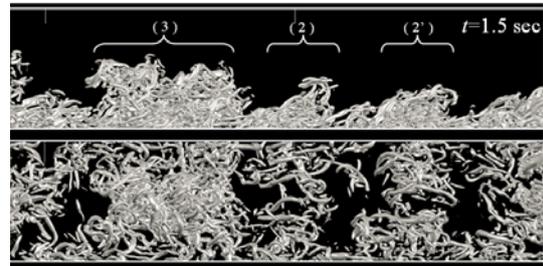


図6. $t=1.5$ sec 時のチャンネル中心近傍の渦構造の側面図(上)、上面図(下)。

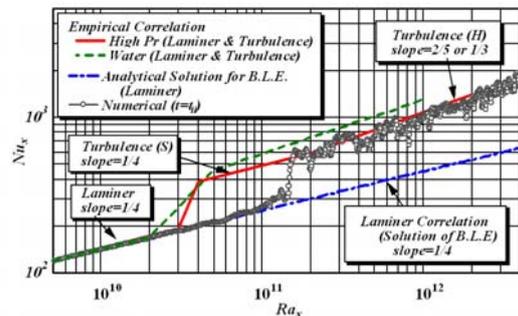


図7. 臨界点近傍 ($T=5.25\text{K}$, $P=229\text{kPa}$, $Ra(\max)=6 \times 10^{12}$) における鉛直平板自然対流系における熱伝達特性

以上から、ダクト内に構造体が無いシンプルな系における自然対流場は次のような2種

類の過程を経て乱流になると考えらる。

(Step1) 第一次不安定性: 流体力学的不安定性に起因した2次元渦の出現 (水平平板系では RT 不安定性に起因する渦輪、鉛直平板系では KH 不安定性に起因する横渦)。

(Step2) 第二次不安定性: Step1 で形成された2次元渦自身の不安定化。(鉛直平板系では凍結運動と壁面での摩擦による渦の振れ・ツイスト構造)

鉛直平板系においては、第二次不安定性に相当する2次元横渦のツイスト構造は明確に出現している一方で、水平平板系における2次不安定性に相当するものは渦輪自身の不安定性と推察されるが、DNS からこのような渦輪不安定性は再現されなかった。渦輪不安定性とはどのような不安定機構なのか明確な描像を明らかにすることが出来なかった。渦輪不安定性そのものは噴流などでも生じることが知られているが、噴流における不安定機構と異なる可能性があり、この点は今後の課題であると考えらる。

縦溝 (リブレット) が設けられた矩形チャンネル中における乱流遷移過程をリブレットが無い鉛直平板の場合と比較し、乱流遷移のメカニズムのチャンネル形状依存性を検証した一例が図8、9である。図8は縦溝が無い場合 (RUN-1, 図8上図) と前縁近傍 $0.08 < x^+ < 0.18$ に縦溝が設置されている場合 (RUN-2, 図8下図) の乱流遷移の時間発展の様子を温度場の等値面で示したものである。縦溝が設置されていない RUN-1 においては、前述のとおり温度場は前縁下流部で KH 不安定性に起因する2次元的構造のロールアップが見られる。これに対応する渦構造が前術の2次元横渦 (図5上図) である。一方で前縁下流部4つの縦溝が存在する RUN-2 の場合、縦溝の存在により RUN-1 で見られるような2次元的ロールアップ構造は見られず、乱流斑点に相当するような擾乱が形成されている。そのため前述の Step1)、Step2) という乱流遷移過程は経由せず乱流斑点が成長し発達した乱流状態へ遷移している様子が得られた。RUN-1、RUN-2 に対応する熱伝達係数を示したのが図9である。図から明らかなように発達した乱流へ遷移するまでの時間は RUN-2 のほうが RUN-1 の場合に比べて約 0.2 sec ほど早くなっている。本研究において、こうした数値実験を行うことで、縦溝を効率的に配置することにより、発達した乱流へ遷移するまでの時間を最大で約 0.6 sec ほど短縮できることなどを示した。すなわち縦溝長 L_r がチャンネル長 L_c に比べて短い場合 ($L_r/L_c \sim 0.1$ 程度) において、縦溝は vortex generator と同じ役割を果たす。

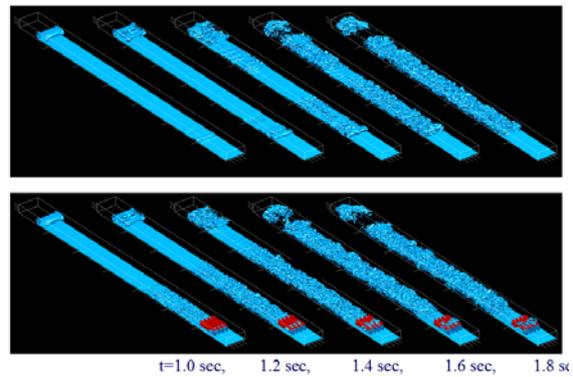


図8. (上) 縦溝が設置されていない矩形チャンネル中の温度場の時間発展の様子 (RUN-1)。(下) 短い縦溝が前縁近傍に設置されたときの温度場の時間発展の様子 (RUN-2)。

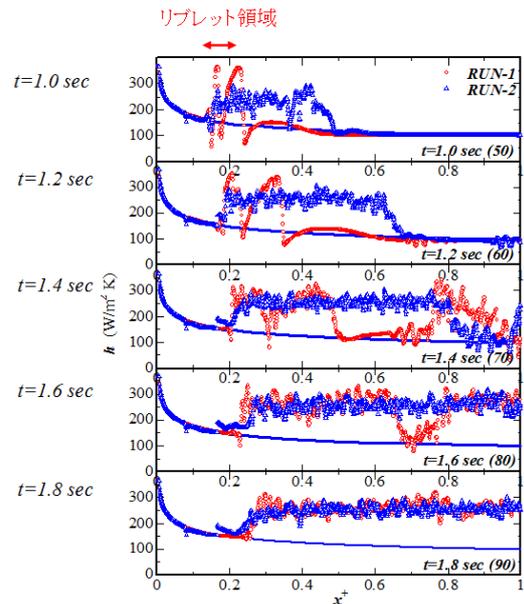


図9. $t=1.0$ sec, 1.2 sec, 1.4 sec, 1.6 sec, 1.8 sec 時における RUN-1 と RUN-2 の熱伝達係数の違い。短い縦溝が前縁近傍に4つ設置された RUN-2 は $t=1.6$ sec でほぼ発達した乱流状態へ遷移しているのに対して、RUN-1 は 1.8 sec で完全に発達した乱流状態へ遷移している。

一方で、縦溝長 L_r がチャンネル長 L_c 程度に長い場合 ($L_r/L_c \sim 0.5$ 以上) においては、熱伝達特性は劣化する場合もありうることを示した例が図10である。RUN-1' は臨界点近傍 ($T=5.25$ K, $P=229$ kPa, 局所レイリー数の最大値, $Ra(\max)=6 \times 10^{11}$) 時の、構造体が設置されていない場合の熱伝達係数であり、RUN-3' は縦溝が7つ $0.08 < x^+ < 0.8$ の範囲で設置されたときの同条件における熱伝達係数である。RUN-3' では時間が経つに従い層流から乱流へ遷移したものが再び層流へ再遷移する再層流化現象が生じていることが伺える。そのため例えば $t=12$ sec において RUN-3' はチャンネルのほとんどの区間層流領域の熱伝達特性を示すのに対し、縦溝が設置されていない RUN-1' の場合はチャンネルの中央

部から下流側にかけては乱流熱伝達による熱伝達係数のジャンプが見られる。このRUN-3⁷で見られる再層流化は縦溝の存在のため浮力流による混合が抑制されたため熱伝達特性が劣化したと考えられる。こうした伝熱特性の劣化や再層流化といった遷移現象は長い縦溝が設置された場合に必ず生じるわけではなく、縦溝のスパン方向の設置間隔（波数）及びリブレット形状にも強く依存することを線形安定性解析を併用することで明らかにした。

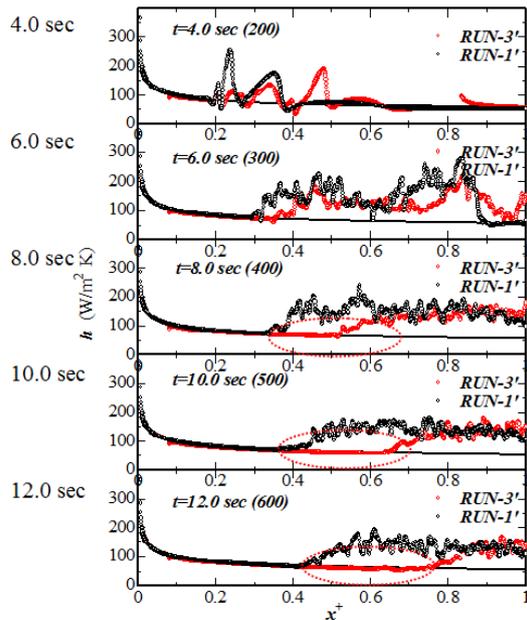


図 10. 縦溝が設置された鉛直平板チャネルの伝熱劣化の一例。縦溝が $0.08 < x^+ < 0.8$ に設置された場合の臨界点近傍ヘリウム ($T=5.25\text{K}$, $P=229\text{ kPa}$, $Ra(\text{max})=6 \times 10^{11}$) の自然対流熱伝達係数。リブレットが設置されていない場合との比較。

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 10 件)

- ① Takahiro Okamura, “HEAT AND FLOW CHARACTERISTICS OF NATURAL CONVECTION ON VERTICAL FLAT PLATE HEATER IN SUPERCRITICAL HELIUM” *Advances in Cryogenic Engineering*, to be published.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 岡村崇弘, 2010 年度春季低温工学・超伝導学会「縦溝が設けられた鉛直チャネル中における超臨界ヘリウムの自然対流伝熱機構」(川崎市産業振興会館) 講演概要集, 2010 年 5 月 13 日
- ② Takahiro Okamura, 2009 年度 JSPS 日中共同研究 研究発表会 (上海交通大学) 「Vortical

structures and heat transfer characteristics during a laminar-turbulent transition in supercritical helium」2009 年 10 月 26 日

- ③ 岡村崇弘, 2009 年度春季低温工学・超伝導学会「超臨界ヘリウムにおける鉛直平板自然対流中の渦構造」(早稲田大学) 講演概要集, 2009 年 5 月 14 日
- ④ Takahiro Okamura, “Numerical simulation of thermal convective instability in helium at supercritical pressures.” in *Proceedings of the 22th International Cryogenic Engineering Conference*, 2009, pp 407-412. 2008 年 7 月 24 日
- ⑤ 岡村崇弘, 2008 年度春季低温工学・超伝導学会「超臨界ヘリウムにおける水平平板自然対流の数値シミュレーション」(明星大学) 講演概要集, 2008 年 5 月 26 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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・助教

研究者番号：9 0 4 1 5 0 4 2