

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760197

研究課題名(和文) 臨界点近傍ヘリウムの高圧縮性がもたらす複雑熱流動場のダイナミクスと伝熱制御

研究課題名(英文) Compressible flow dynamics and heat transfer control 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・准教授

研究者番号：90415042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：熱力学的状態が臨界点近傍にあるヘリウムの主に高圧縮性がもたらす乱流場として、特にピストン効果ならびにブルームが出現もしくは共存する開いた系閉じた系において、層流乱流への遷移、または乱流層流への再層流化のメカニズム、境界層内の流れ場の微細構造、変動量の統計的な性質について明らかにした。またピストン効果ならびに浮力流が共存する閉じた系における変動量の統計的性質については現在も継続して調査中である。これらの研究成果は加速器等の大型の超伝導磁石の冷却システムを設計する際に必要不可欠となる流体挙動予測や伝熱促進を目指した乱流制御手法の構築などにフィードバックすることを考えている。

研究成果の概要(英文)：In this study, direct numerical simulations were mainly performed in order to clarify laminar-turbulent transition process, vortical structures in the boundary layer and characteristics of mean field and fluctuation field in the supercritical helium near the gas-liquid critical point. Not only open system which means isobaric system but also closed system are considered in this study. In the case of the closed system, not only convection but also piston effect simultaneously occurs in the system. The simulations are performed by means of GPGPU (TESLA C2075) and CUDA 4.2 architecture are employed. These results will be applied to establishment of turbulent control and turbulent model construction for the helium near the critical point in order to predict the fluid flow phenomena and to control actual cooling channel of large scale superconducting magnet system.

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：臨界点近傍 ヘリウム 乱流 直接数値計算 GPGPU 渦構造 乱流遷移

1. 研究開始当初の背景

超臨界ヘリウム(SHe)は加速器などで用いられる大型超伝導磁石の冷媒として利用される。SHeを超伝導磁石の冷媒として用いる場合、通常は強制対流による冷却が行われるが、強制対流が発生しない盲腸管等の冷却流路においては自然対流熱伝達を考慮する必要がある。こうした盲腸管部分では超伝導ブスバーがクエンチすることを避ける目的で伝熱特性を向上させるための流路形状最適化等の伝熱促進を講じることが望ましい。また超伝導磁石内の冷却流路は空間的制約が強く、そのため限られた冷却流路空間で適切な伝熱促進を講じるためには、超臨界ヘリウム中に形成される渦の構造と力学過程を把握することが必要不可欠である。

一方でヘリウムに限らず臨界点近傍における流体の物性は、臨界現象に起因して比熱・等温圧縮率等が非常に大きくなる一方で熱拡散率は非常に小さくなる傾向がある。そのため、過去の研究から臨界点近傍流体の伝熱特性は、①熱が音波として伝わるピストン効果、②プルームと呼ばれる浮力流や気液二相流のように振舞う擬似沸騰現象という主に2つの特異な熱輸送特性を有していることが明らかにされてきた。加えてヘリウムの場合、動粘度ならびに熱拡散係数は他の流体に比べて小さい。そのため特に自然対流場においては発熱体からの入熱により形成される高温ドメインと低温ドメインの界面が明確かつ複雑化し、流体中に形成される構造の最小スケールも他の流体に比べて小さくなる。

これまでSHeに関しても実験研究ならびに数値解析が行われてきたが、それらは主に平均熱伝達に着目したものがほとんどである。特に実験においては極低温であることに加えて臨界点近傍の物性値異常により均一な理想的な初期場を形成することが困難であり、これらの揺らぎを平均化することで解析が可能になることにも由来している。一方で大規模な超伝導磁石などの冷却システムを設計するにあたり数値シミュレーションによる流れ場の予測が必要不可欠であるが、系が大規模であるため微細構造や変動量までを正確に再現することは不可能であり、変動量に関しては平均量を用いて繰り込むなどした乱流モデルを適用することが不可欠となる。ここで上述の①、②の特異性を有する流れ場において従来の乱流モデルでの記述が適切であるかについての検証し、標準的なモデルの適用限界を明らかにするとともに必要に応じてモデルの修正を行う必要がある。これを行うためには、①、②が出現する系もしくは共存する系における流れ場の微細構造や変動成分の特性を明らかにすることが不可欠である。

2. 研究の目的

こうした背景を踏まえて、本研究は特に熱力学的状態が臨界点近傍にあるヘリウムの主に高圧縮性がもたらす自然対流乱流場としてとりわけ①ならびに②が出現もしくは共存する開いた系、閉じた系において主に以下の項目を明らかにすることを目的としている。

- A) 層流—乱流への遷移、または乱流—層流への再層流化の遷移メカニズムの解明。
- B) 境界層内の流れ場の微細構造の解明
- C) 変動量の統計的な性質と乱流モデルへの適用限界

工学的応用の知見に立てば、A), B) は、乱流遷移過程を明らかにすることで、乱流遷移を促進する流路の形状・構造を明らかにし、乱流による伝熱促進をもたらすことのできる適切な伝熱制御法を見出すことを狙ったものである。またB), C) に関しては実際に大規模な冷却系における予測シミュレーションを行う際に必要不可欠となる乱流モデルの構築もしくは従来のモデルの検証ならびに適用限界を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、もっとも特異性の顕著な臨界点近傍のヘリウム(5.25 K, 229 kPa-abs)の熱力学的状態に着目している。体系としては①ピストン効果、②浮力流が共存する閉じた系、並びに②浮力流が主に生じる開いた系に着目している。

微細渦構造、ならびにプリミティブ関数の変動成分を正確に抽出するために、本研究では乱流モデル等は一切用いない直接数値シミュレーションを行っている。上述の対象としている温度・圧力においては連続体近似が成立する領域であるため、基礎方程式は密度変化を考慮した連続式、運動量式、エネルギー式である。方程式系を閉じるために熱的状态方程式の一般系が必要となるが、これに関しては低マッハ数流れを仮定することで、圧力場を熱力学的な圧力、流体力学的圧力ならびに静水圧に分解して計算を行い、特に閉じた系におけるピストン効果の動的過程については、直接計算を行わず熱力学的圧力項に繰り込むことで計算負荷の低減を図っている。

乱流遷移過程を明らかにするために、空間発展型の直接計算を行い、さらに計算負荷低減のために GPGPU (General-purpose

computing on graphics processing units)として Fermi 世代の TESLA C2075 を用いている。ソースコードは CUDA アーキテクチャー 4.2 を用いて自作した。また特に計算負荷の大きい圧力に関するポアソン方程式の反復計算は Red & Black SOR 法を用いている。

4. 研究成果

(1) 乱流遷移過程と渦構造

図 1 は鉛直平板自然対流中に形成される $t = 1.5 \text{ sec}$ 時の乱流境界層内の渦構造を可視化したものである。一般に渦は渦層と渦管に大別されるがここでは管状渦の振る舞いに着目し、具体的には速度勾配テンソル $\partial_j u_i$ の第 2 不変量 $Q = \Omega_{ij}\Omega_{ij} - \varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}$ の正值を抽出する。この抽出方法は場のすべての渦を抽出することは出来ないが、粘性流特有の太さを持ち、流体の回転場の大きさ $\|\Omega_{ij}\|$ がせん断の大きさ $\|\varepsilon_{ij}\|$ よりもある閾値以上で上回る場を渦管として抽出している。

乱流への遷移過程については過去の研究でも報告してきたとおり、最初 Kelvin-Helmholtz 不安定性による二次元渦が形成され(第一次不安定性)、やがてそれが不安定になり(第二次不安定性)を経て最終的に発達した乱流になることを確認した。図 1 の流れ場はこれら二種類の不安定性を経て得られた乱流場中での渦構造である。図示するように乱流境界層内部は多数の U 字型構造をもつヘアピン渦が形成されていることを

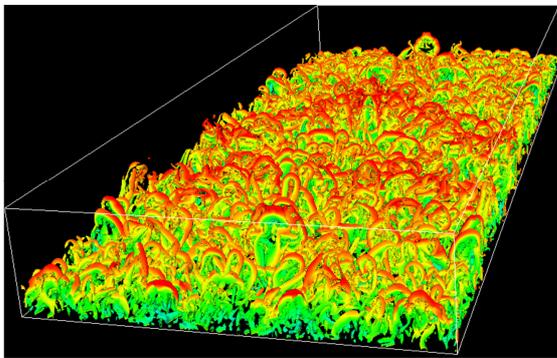


図 1. $t = 1.5 \text{ sec}$ 時の発達した境界層内部の渦構造 (速度勾配テンソル第二不変量の正值)

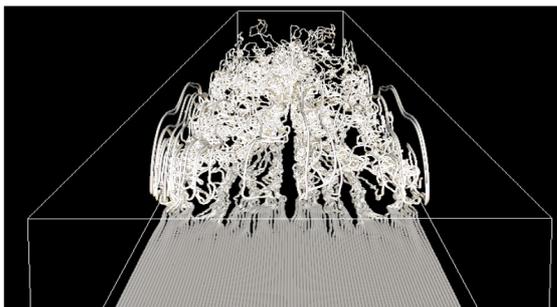


図 2. $t = 2.0 \text{ sec}$ 時の擬似的流線の様子

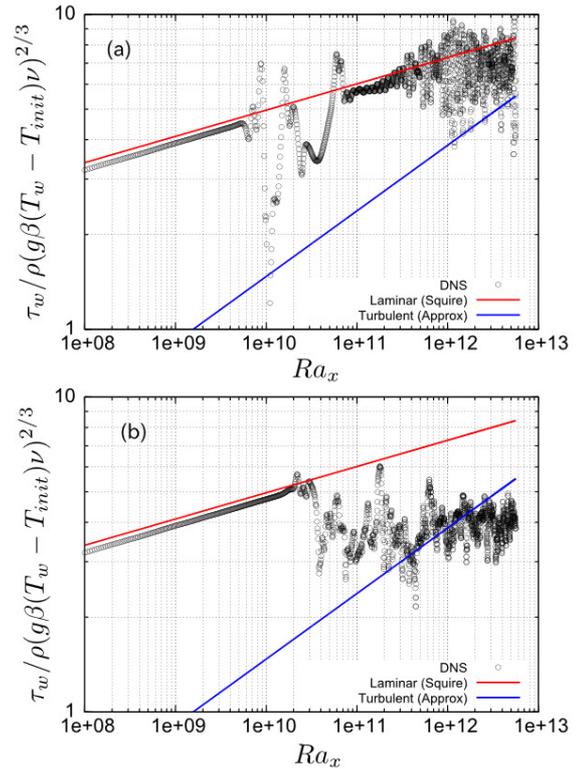


図 3. $t = 1.2, 1.75 \text{ sec}$ 時の壁面摩擦応力

明らかにした。

図 2 には $t = 2.0 \text{ sec}$ における瞬時場の流線を示す。流れ場が定常でないため図中の流線は擬似的な流線である。仮想粒子を発熱面かつ前縁部近傍の層流境界層内に 100 個設けラグランジュ的に追跡している。擬似的流線は 4 次の Runge-Kutta により数値積分した経路である。ラグランジュ追跡する際の時間ステップについては実時間ではなくある瞬時ベクトル場中の流線を記述するための擬似的な時間ステップとなっている。乱流遷移点近傍から下流では擬似流線同士がツイストしながら下流側へ移流していることが伺える。

(2) 平均場の性質 (熱伝達と壁面摩擦応力)

図 3 (a), (b) $t = 1.2, 1.75 \text{ sec}$ 時における DNS から得られた壁面摩擦応力 τ_w と局所レイリー数 Ra_x の関係を示す。局所レイリー数が $Ra_x \sim 2 \times 10^{10}$ を超えたあたりから壁面摩擦応力 τ_w は揺らぎはじめ乱流に遷移している。また熱伝達の場合は同様の局所レイリー数でジャンプし熱伝達が向上しており、コルバーンアナログが成立していないことが伺える。

(3) 平均場の性質 (温度分布)

図 4 には発達した流れ場中における平均温度場の空間発展を示す。図中の実線は層流領域・乱流領域の温度分布を示している。 $y^+ = y/\delta^*, T^+ = (T_w - T)/t^*$, でありそれぞれ

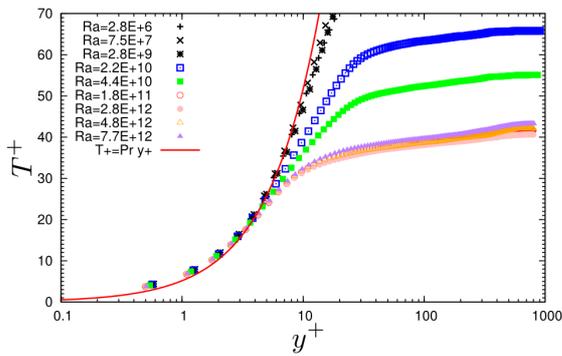


図4. 平均温度のノーマル方向分布の局所レイリー数依存性

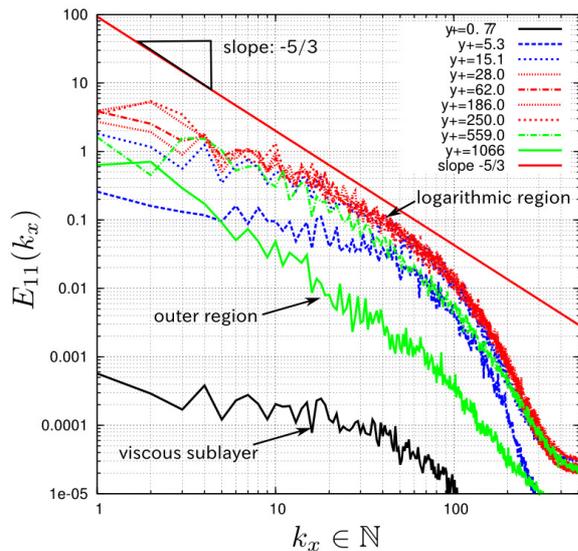


図5. 速度変動成分のエネルギースペクトル

チャンネルノーマル方向の無次元座標並びに無次元温度である。 $\delta^* = \nu/u^*$ は粘性長, $t^* = q_w/(\rho c_p u^*)$ は摩擦温度, $u^* = \sqrt{(\tau_w/\rho)}$ 摩擦速度をそれぞれ意味する。図示するように局所レイリー数 $Ra_x < Ra_c$ なる前縁近傍領域では温度場は $T^+ = \langle Pr \rangle y^+$ なる粘性低層で見られる普遍則に従う。一方で $Ra_x > Ra_c$ では下流に行くに従い粘性低層の領域 ($y^+ < 5$) と対数則の領域 ($y^+ > 5$) に明確に分かれる。

(4) 変動量のエネルギースペクトル

図5にDNS結果から得られた主流方向速度変動成分の1次元エネルギースペクトルを示す。図示するように $y^+ > 20 \sim 30$ なる対数領域においてはスペクトルは $-5/3$ の傾きに従うコルモゴロフ則 K41 の慣性領域が存在するが、粘性低層・バッファ層 $y^+ < 20 \sim 30$ においてはコルモゴロフ則に従わないことがわかる。

(5) 従来の乱流モデルへの適用可能性

上記の結果は開いた系におけるDNS結果を示したものである。閉じた系についても同様に計算を実施し、平均場並びに変動量の統計

的性質の詳細な解析を現在継続して実施している。開いた系においては従来の自然対流の特性をよく再現している一方で閉じた系においてはピストン効果によるバルク温度の上昇に起因して乱流への遷移時間等において閉じた系とは異なる結果が得られており、解析結果の妥当性にも十分に留意しながら今後も引き続いてモデリングについて定量的な評価を行っていく予定である。

(6) 計算結果の妥当性並びに臨界点近傍の計算限界に関する検証について

臨界点近傍ヘリウムの流れ場計算を行うに当たりプラントル数の発散の影響について十分に留意する必要がある。それはコルモゴロフ長と比較してバッチャー長が小さくなるためである。そのため、計算結果の空間解像度の妥当性の検証並びに臨界点近傍におけるプラントル数の影響を調査するためにより大自由度系を解析できる4台のGPGPUを用いた解析コードの作成にとりかかった。GPUの構成はFermi世代のTESLA C2075が4台で、解析コードは現在も構築中で研究期間終了後も継続してコードの完成を目指し取り組んでいく予定であるが、臨界点に近づくにつれてプラントル数が非常に大きくなり、速度場と温度場の最小スケールは大きく異なるため、温度場をオイラー的に解いている現在の解析コードでは解析不可能であり、連続体モデルでの解析限界も考慮しつつこの点は今後の研究課題にしたいと考えている。

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)

[学会発表] (計2件)

- ① 岡村崇弘, 2013年度秋季低温工学・超伝導学会 “臨界点近傍ヘリウムにおける自然対流中境界層の統計的性質” 講演概要集, P22, 2013年12月6日, ウィンクあいち(愛知県産業労働センター)
- ② 岡村崇弘, 2012年度日本混相流学会年会講演会 “自然対流中における臨界点近傍ヘリウムの乱流渦のダイナミクス” 講演概要集 P328-329, 2012年8月11日, 東京大学柏キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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・クライオジェニックグループ・准教授

研究者番号: 90415042