

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月10日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05852

研究課題名(和文) 臨界点近傍ヘリウムのマルチスケール熱流動のダイナミクスとそのユニバーサリティ

研究課題名(英文) Multiscale thermo-fluid dynamics and its universality 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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：臨界点近傍ヘリウムの熱流動場は物性値異常性によりシャープな界面をもつサーマルブルーム、擬似沸騰や熱が流体自身の圧縮性により通常の対流よりも早い時間スケールで伝搬するピストン効果などが生じる。本研究ではこういった臨界点近傍ヘリウムにおける壁面近傍からバルクにいたる速度場ならびに温度場により形成される秩序的構造についての時間発展ならびに空間発展挙動について明らかにした。また工学的応用として超臨界状態のヘリウムが大気放出された場合の挙動についても数値実験を行い、実験により検証を行うことが難しい事象について予測するシステムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超臨界ヘリウムは主に素粒子実験等の比較的中規模から大規模超電導マグネットなどの冷却に使用される。ヘリウム3はもとよりヘリウム4も近年価格が高騰しており、インベントリ低減が必須となる。本研究で得られた知見は冷却流路形状などのシステム最適化を図るために適用することが出来ると考えている。またこうした大規模システムにおいて、こうした極低温のヘリウムが何らかの事象により装置外部へ放出された際の流動挙動から設備全体の安全に関する知見について、実験を実施することの困難さから十分に明らかにされているとは言えない。本研究ではこうした点においても知見を与えるものである。

研究成果の概要(英文)：Flow field induced by heat input often shows unique characteristics such as thermal plume with sharp interface between hot domain and cold one, pseudo boiling and piston effect that heat propagates due to the adiabatic compression process. These phenomena are mainly induced due to the special behaviors of the thermo physical properties near critical point. In this study, we clarified the time and spatial evolution behaviors of the coherent structures formed by the velocity and temperature field from near the wall to the bulk. In addition, as an engineering application, we also developed simulation tool to predict the thermo-fluid behaviors of helium in the large scale systems that can not be verified from experiments. The numerical experiments were also performed on the helium convection diffusion behaviors when helium with the supercritical pressure was released to the atmosphere from large scale cryogenic equipment such as superconducting detector and accelerator.

研究分野：熱流体工学

キーワード：超臨界ヘリウム 乱流 直接数値計算 超電導 冷却技術 冷媒放出

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

一般に臨界圧力よりも高い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。こうした第二種相転移に伴う臨界異常により臨界点近傍流体の伝熱特性は通常と異なる現象が出現しうる。出現の有無は開いた系か閉じた系か加熱面の方向と重力方向の位置関係など系の状態に強く依存するが、例えば低熱拡散性と密度の大きな変化により生じる浮力流は加熱された流体部分と非加熱部分との界面がクリアになり両ドメインの移動速度・温度の違いから界面は不安定化しその構造は複雑化する。またその低熱拡散性を有しながらも、加熱部分の流体膨張が加熱部分から遠い部分のバルク流体を断熱圧縮しバルク温度が一様に上昇するといったピストン効果も生じ、さらにこれが熱容量の大きな面が冷却面として機能しそこから対流をもたらすといったことが生じうる。本研究では超臨界流体として特にヘリウムに着目している。臨界温度を 5.2K 近傍にもつヘリウムは超電導電磁石の冷却に使用される。ヘリウムは近年価格が高騰してきており冷却設計にあたり上記の特異性を明らかにした上でその知見を設計に反映し、例えば狭隘流路をもちいるなどインベントリの最小化等を行い、ヘリウム使用コストの削減に務めるなど冷却システムの最適化を行うことが求められる。その際、臨界点のごく近傍で動粘度と熱拡散係数の比であるプラントル数が大きくなり、速度場ならびに温度場のダイナミクスに解離が見られる領域が存在する。またヘリウムの場合、これらの拡散係数が非常に小さくなることから乱流状態になりやすいことに加えて、流動中に生じる渦等の構造の最小スケールも小さくなる。こういった熱流動特性を十分に把握した上で流路形状最適化をおこなう必要がある。

またこれらを明らかにするにあたり、ヘリウムの物性値の温度変化を考慮した解析が不可欠であり、さらには GPU や MPI を用いた並列プログラミングコードの作成が不可欠となる。こうした解析のためのプログラム構築技術は、実験を行うことが難しい事象において代替的にシミュレーションによって予測する際においても威力を発揮するものである。その一環として、極低温のヘリウムを用いた素粒子実験装置・加速器施設のような大規模の設備において、設備の安全性を評価する際においてヘリウム漏洩時の流動・拡散挙動がどのようになるか問題視されることがある。これを実験的に検証することは、貴重なヘリウムを大量に消費することになるのでほぼ不可能と言ってよくシミュレーションによる検証がコスト的にも効率的な方法と言える。またこうしたヘリウム放出事象は超臨界状態かつ極低温のヘリウムが大気圧室温環境下に放出され、物性値の温度依存性はもちろんのこと上述で得られる超臨界ヘリウムの流動特性の知見、並列計算に関する技術的知見が必要不可欠となってくる。

2. 研究の目的

(1) 臨界点近傍のヘリウムにおいてプラントル数が 0.7 から徐々に大きくなる温度領域における速度場ならびに温度場の時間的・空間的発展の挙動を明らかにする。特に臨界点近傍においては熱拡散係数が小さいことから発熱面近傍において加熱流体成分と非加熱流体成分との間のある種の界面が存在し両者の物性値が異なってくることから、発熱面に対して鉛直方向の構造は場所によって大きく異なることが定性的に示される。

こうした鉛直方向での構造の違いを 3 に示す方法で可視化すると共に、流れ場の速度、温度の変動成分の分布関数などを調べることで明らかにする。

(2) 上記 (1) の基礎研究の工学的応用として、超臨界状態のヘリウムが大気放出された場合の挙動についても数値実験を行い、実験により検証を行うことが難しい事象について予測するシステムを構築しその有用性を検証する。

3. 研究の方法

2-(1) においては典型的な鉛直円柱の発熱体を考える。また速度場、温度場のコヒーレント構造の時間発展挙動においては、直接数値計算を行い、速度場が作り出す構造は速度勾配テンソルの第二不変量の正值に着目することで渦管の抽出を行った。また温度場においては、それ自身はスカラー量であるため、温度場の勾配の内積の形で記述されるエントロピー散逸率から計算する。直接数値計算のための数値解析プログラムは CUDA-Fortran を用いて行い、実際に NVIDIA Tesla K80 を導入した計算環境を整えた。

2-(2) においては、(1) においてはヘリウム 1 成分系とみなせたが、(2) においては 2 成分系の拡張に加えて時間発展方程式として化学種保存式を追加する必要がある。また特に極低温のヘリウムが室温環境下に放出されるため、厳密にはソレ効果、デュフォ効果の相反定理を取り込むことが必要と思われるが現時点ではこれらについては考慮されていない。これらの効

果を陽に含まない場合について、図1に示すようにトンネル内やホール内などの比較的規模の大きい空間内に複数ヶ所に設置されたラプチャーディスクから同時多発的にヘリウムが放出された際のヘリウムの時間発展挙動や酸素濃度変動について定量的に評価した。

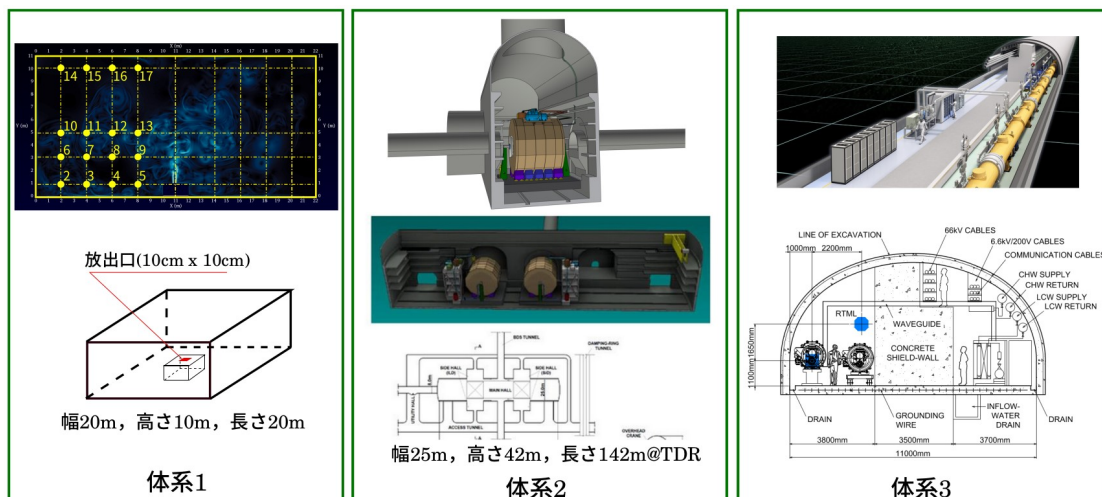


図1 ヘリウム放出シミュレーション体系

4. 研究成果

2-(1) の研究成果

鉛直平板自然対流において典型的な渦構造の発展の様子を図2に示す。これは速度勾配テンソル第二不変量正值で定義された渦構造であり、圧力場のラプラシアンが正すなわち渦度の変形速度よりも支配的な領域に相当する。図の右側が流れ上流方向、左側が下流方向を示す。流れの初期段階において(状態b)流れ上流側は円柱発熱体の周りに渦輪が形成される。これは発熱面近傍のみ加熱されて浮力流が生じているのに対して、加熱部分外側の非加熱部分においては流体がほぼ静止しているために、速度差で生じるケルビンヘルムホルツ不安定性に起因するものであると言える。この渦輪は熱拡散係数が小さいことからエントレインメントによる構造が拡散で鈍されにくいために、渦輪同士が隣接する渦輪対なるものが形成されるようになる。その後隣接する渦輪同士のすなわち渦輪対による相互作用により、渦輪管に縦渦がいくつも形成され、最終的に図2の(e)に示すように発達した乱流を形成するに至る。また温度場が形成する秩序構造を図3に示す。これは3で示したように温度勾配から算出されたエントロピー散逸が強い領域を示しており温度場がつくりだす一種の秩序構造とみなせる。これらは図2で示した速度勾配テンソルから算出された渦構造と異なることが示される。また発熱面に垂直方向の分布も異なっている事が伺える。そのため種々の壁面からの距離における速度、圧力、温度場ならびにそれらの空間微分に関する変動成分の分布関数を求め非対称性ならびに正規分布からの逸脱の程度を調べたところ結果は強制対流の場合と大きく異なっており同様に変動成分によるレイノルズ応力項の対角成分(乱流強度)ならびに非対角成分については従来の自然対流の層流乱流領域の実験データとの比較検討しながら現在も解析を続けているところである。

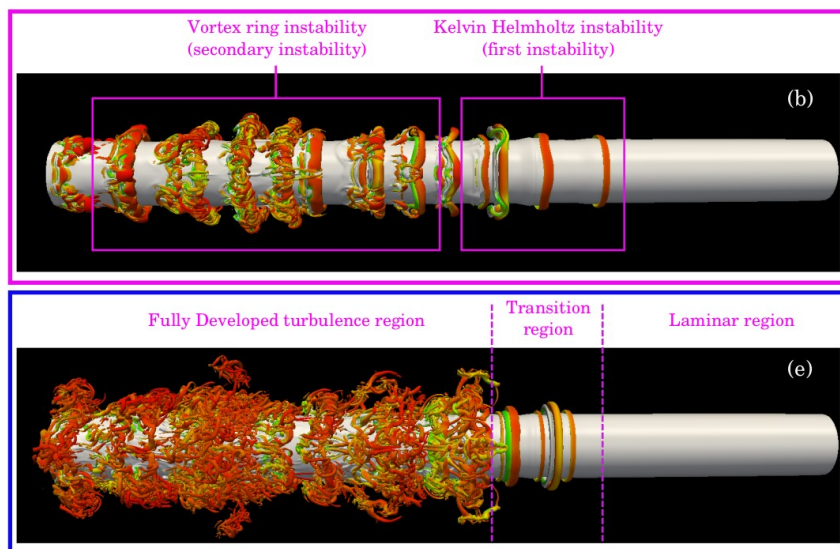


図2 速度勾配テンソル第二不変量正值によって定義された渦構造

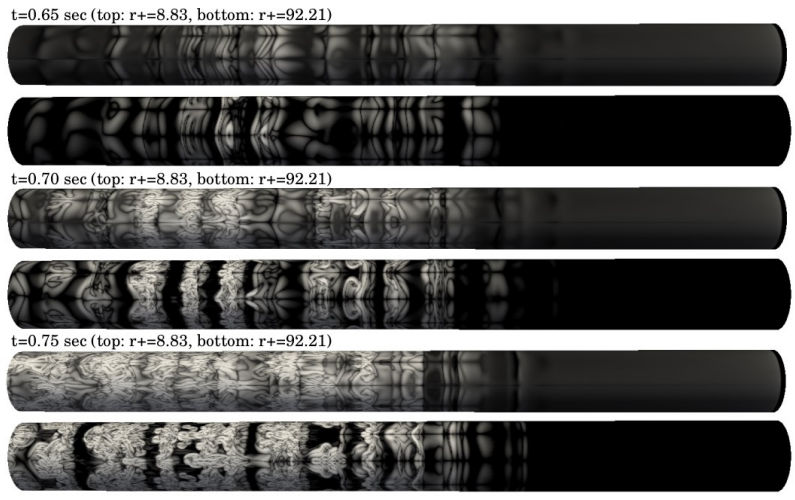


図3 エントロピー散逸率により定義された秩序構造

2- (2) の研究成果

図4の2つの図はそれぞれ図1の体系2, 体系3で実施したヘリウム拡散シミュレーションの一例を示す. ヘリウムの拡散挙動は放出流量と放出箇所ならびに閉空間のボリュームに強く依存するが, 系2のような大空間の中間部に吹き出し箇所が1, 2箇所あるような場合, 床面にまでヘリウムが充満することはなく上部へと流動していく. 一方トンネルなどのような細長い閉空間の場合, 吹き出しポイントが1箇所の場合, ヘリウムガスはトンネル天井部を流動していき床面近傍部にまでヘリウムが拡散する可能性は低いが, 吹き出し点が多点からなる場合, それぞれの箇所から放出された流動してきたガス同士が干渉することで, 床面近傍にまでヘリウムが拡散する事が示されている. 本シミュレーションは温度勾配, 濃度勾配が質量流束, 熱流束を生み出すソレ効果, デュフォ効果が組み込まれていないため, この効果がどの程度寄与するのかは今後の検討事項である. 図4は計算の一例であり, 種々の吹き出し温度, 吹き出し流量によってどのような拡散挙動・酸素濃度変動を示すかについても系統的にシミュレーションを実施した. 現在はこれらの結果を体系のボリューム, 流量, 吹き出し温度等のパラメータで整理した線図を構築しているところである. 一方でこうした数値実験は実験との対比による妥当性の検証が必要である. 実際に極低温ヘリウムを使ってトンネル内などの大規模系において1箇所から放出された場合の拡散実験は2例ほどあり, この場合天井部のみをヘリウムガスが流動するという定性的な結果は一致しているものの, 多点からの放出についてや酸素濃度の時間変動などの定量的な評価については今後の課題である.

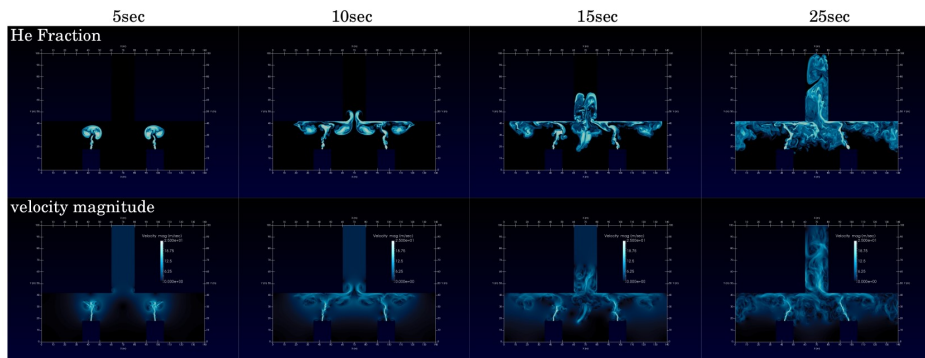


図4 : 体系2におけるヘリウム拡散挙動の時間発展シミュレーションの一例

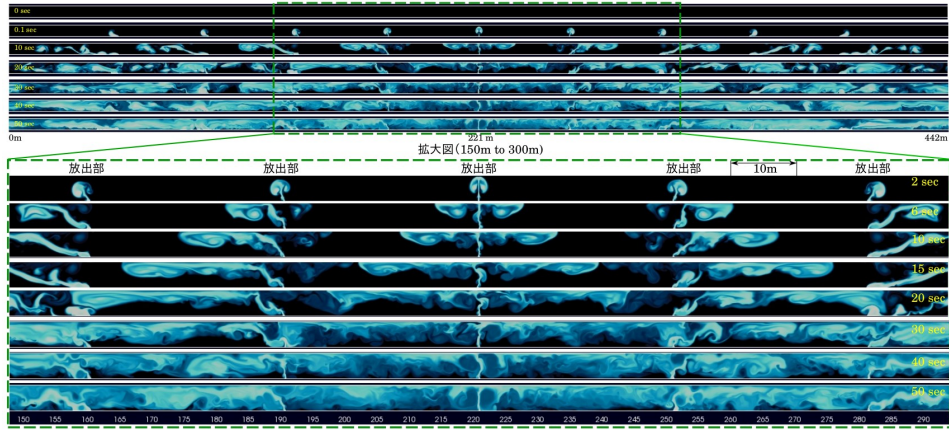


図5 体系3におけるヘリウム拡散挙動の時間発展シミュレーションの一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 件）

〔学会発表〕（計2件）

- ① 岡村崇弘, 大気中への種々冷媒ガス放出時の流動ならびに酸素濃度変動に関する数値実験, 秋季低温工学・超電導学会, 2017
- ② T. Okamura, GPU Accelerated Numerical Investigation on Natural Convection along a Vertical cylinder in a Supercritical Helium, 1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference, 2016

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年：
 国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年：
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。