

氏名(本籍)	瀬川武彦 (奈良県)
学位の種類	博士(情報科学)
学位記番号	情博第74号
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院情報科学研究科(博士課程) システム情報科学専攻
学位論文題目	発達熱乱流における新構造の研究
論文審査委員	(主査) 東北大学教授 沢田 康次 東北大学教授 海老澤 丕道 東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学助教授 佐野 雅己 (工学研究科)

論文内容要旨

第1章 はじめに

1980年代後半に行なわれた低温 He ガスによる熱乱流の実験で、これまで「熱乱流」として考えられていた状態 (Soft 乱流) とは異なる、Hard 乱流という新しい状態が存在することが明らかになった。対流セルの中心での温度ゆらぎ確立分布は、Soft 乱流では Gauss 分布であるのに対して、Hard 乱流では指数分布である。また、対流セル内は乱流化し激しく乱れているにもかかわらず、Soft 乱流中には見られない安定して流れる巨視的流れが存在することが明らかになったのである。この流れは、対流セル内の熱輸送に大きな影響を与えている。それでは Hard 乱流は熱乱流の最終状態なのであろうか？それともさらに高い究極的な熱乱流状態が存在するのであろうか？はたまた、空間構造が現れては消えるといった現象が永遠と繰り返されるのであろうか？本研究では液体金属である水銀を使用し、Hard 乱流を超える新しい熱乱流状態が存在するか、またそのような乱流状態の内部構造がどのようになっているかを実験的に確かめた。

第2章 熱乱流の研究に関する歴史的背景

本章では、まず対流系を特徴づける幾つかの無次元数やベナール対流に関する基礎的な知識を説明し、さらに過去に行なわれてきた熱乱流に関する実験的・理論的研究を紹介している。

図1は、熱対流系の Hard 乱流中における温度と速度の空間分布の概念図を示している。プレート付近では流体の速度が無視できるため、熱は熱伝導のみで運ばれる。そのため温度は直線的に変化するが、セルの中心へ向かうにつれ勾配は小さくなり一定温度になる。中央領域の温度は、対流セルに与えられた温度差 ΔT の平均値である $\Delta T/2$ となる。プレートと、直線的に温度が上昇する領域と一定温度の領域の外挿の交点を、熱境界層と定義し、プレートから熱境界層までの距離を λ_T とする。

一方、速度はプレートではゼロで、プレートから離れるにつれ徐々に速くなるが、ある地点で最大値になる。その地点を越えると速度は減衰し、中心部では速度の平均はゼロとなる。これは乱流中に安定した巨視的流れが存在するためである。この速度が最大になる地点を速度境界層と定義し、プレートから速度境界層までの距離を λ_v とする。

Belmonte *et al.* (1993) は、高圧 SF₆ ガスの熱乱流中の様々な場所での温度ゆらぎを幅広い Rayleigh 数 (Ra) で測定することにより、熱境界層と速度境界層の位置関係を解析した。その結果、測定された全範囲 ($Ra \leq 10^{12}$) において、

熱境界層は速度境界層の内側にあるが、高 Rayleigh 数側に外挿すると $Ra \sim 10^{14}$ 付近で逆転する可能性があることを示唆した (図 2)。しかし、実際に $Ra \sim 10^{14}$ を実現することは高圧 SF_6 ガスの実験では困難であり、高圧 SF_6 ガスでは逆転現象が確認されていない。

水銀は熱拡散定数が大きく熱交換性が極めてよいことと同時に、動粘性率が小さく乱流化しやすいため、小さい温度差で高い熱乱流状態になる。このため境界層の逆転現象が、 $Ra \sim 10^8$ と期待され、本研究において確かめることができる。

第 3 章 水銀熱乱流における実験装置と測定系

本章では、Hard 乱流を超える熱乱流状態を発生させるために作成された実験装置 (図 3) と局所的な温度ゆらぎを測定するための測定系について述べている。本研究では 4 種類の円筒状の対流セルを使用し、 $9.0 \times 10^4 \leq Ra \leq 1.2 \times 10^{10}$ の熱乱流状態を実現している。

上部プレートは銅製であり、さらにプレート中には冷却水が通過する空洞があり、この中を通過する冷却水で上部プレートの温度を一定に保つようには作られている。下部プレートも銅製であり、その裏側には溝がらせん状に掘ってある。その溝にマンガニン線がヒーターとして巻かれており、定電圧、定電流で発熱させる。

下部プレートは、同じ温度に設定してある外部ジャケットで囲まれているため、セルへ与えた熱に対する対流セル外へのリークは、1%以下となる。

可動式温度センサーは、対流セルの外部にあるステージにより制御され、 $0.5 \mu m$ 精度で移動することができる。そのため、上部プレート付近の様々な場所での温度ゆらぎを測定することができる。

第 4 章 水銀熱乱流における温度ゆらぎの測定結果

本章では、対流セル内の様々な場所で得られた温度ゆらぎ時系列データを測定し、温度ゆらぎ確率分布、温度ゆらぎパワースペクトラム、および 2 つの境界層を解析した結果が述べられている。平均温度の空間分布は、可動式温度センサーにより対流セル内の様々な場所で得られた温度ゆらぎ時系列から求めることができる。一方、水銀乱流内の速度ゆらぎを測定することは困難なため、平均速度の空間分布も本研究において考案した新しい解析法により、温度ゆらぎ時系列データから見積った。

まず水銀熱乱流の特徴として、アスペクト比 1 (高さ $10cm$, 幅 $10cm$) のセルの場合、測定した全範囲 ($10^6 < Ra < 10^8$) で、対流セルの中心での温度ゆらぎ確率分布は Hard 乱流に特徴的な指数分布に近い形をしている。一方、温度ゆらぎパワースペクトラムは、低温 He ガスの Hard 乱流領域のそれと比べて大きく異なる特徴を示している。

次に、アスペクト比 1 の対流セルにおいて、 $10^6 < Ra < 10^8$ の範囲で 2 つの境界層を測定した結果、測定した全範囲で速度境界層が熱境界層より薄い (図 4)。つまり、2 つの境界層は高圧 SF_6 ガスに対して、逆転関係にあったのである。このような関係は、本研究以外では発見されておらず、熱乱流の新しい構造である。

また 4 種類の対流セルを使用し、 $9.0 \times 10^4 \leq Ra \leq 1.2 \times 10^{10}$ の範囲で Nusselt 数を測定した結果、スケーリング指数 ($Nu \sim Ra^\gamma$) は、 $1/4 \leq \gamma \leq 2/7$ となった (図 5)。2 つの境界層が逆転した後、Kraichnan (1962) は $\gamma = 1/2$ なるスケーリングが現れることを理論的に予測したが、それは確認されなかった。

第 5 章 考 察

本章では、逆転境界層を持つ水銀熱乱流の内部構造について以下のように考察している。

熱乱流を特徴づける内部構造の 1 つとして、plume があげられる。plume とは、熱境界層から出る温度の塊であり、自らの浮力を駆動力として運動する。実際に水の熱乱流での実験において、plume は確認されている。温度ゆらぎパワースペクトラムから、対流セルの中心で浮力と慣性力の比を見積ることができる。低温 He ガスでは、中央領域でそれらはバランスしている。一方水銀では、浮力が慣性力の 1% 程度と算出される。つまり、中央領域では浮力が効かず passive scalar と呼ばれる状態になっていると考えられる。

温度ゆらぎの 3 次のモーメントである skewness (S) と温度ゆらぎの時間微分の 3 次のモーメント (S') を計算した結果、本研究では上部プレートの境界層の外側で $S < 0$, $S' > 0$ となり、高圧 SF_6 ガスで得られた $S < 0$, $S' < 0$ という結

果と異なった。passive scalar の実験では本研究と整合性のある結果が得られているため、水銀熱乱流では境界層付近でも浮力は支配的でないと考えられる。つまり逆転境界層を持つ熱乱流状態では、熱乱流に特徴的とされてきた plume は存在せず、乱流内のほとんどの部分で浮力が効いていないと推測される。

また、Hard 乱流中の温度ゆらぎや平均速度の種々の統計量をプレートからの距離 (z) で表し、 $\Theta(z)$ と書くと、それらは Rayleigh 数の関数となることが分かっており、仮に z を λ_T や λ_v で規格化しても Θ は Rayleigh 数に依存する。

$$\Theta(z) = F(z, Ra)$$

一方水銀では、熱境界層の厚さ (λ_T) で規格化した無次元の高さ ($z^* = z / \lambda_T$) に対して、様々な統計量は、

$$\Theta(z^*) = F(z^*)$$

となり、Rayleigh 数によらないユニークな関数を持つことが分かった。その一例を図6に示す。つまり、新しく見出された乱流状態で存在する長さのスケールは唯一熱境界層の厚さであり、Hard 乱流を超えて、熱乱流の新しい状態に達していると考えられる。

第6章 結論

本研究では水銀熱乱流を実験的に研究し、これまで最も高い熱乱流状態として研究されてきた Hard 乱流には見られない様々な特異な性質を見出した。

熱境界層と速度境界層の位置関係は、従来知られていたものとは逆転しており、逆転状態が初めて観測された。Kraichnan が予測した $Nu \sim Ra^{1/2}$ というスケーリングは、境界層が逆転しても現れない。また水銀のような低 Prandtl 数流体の熱乱流では、対流セルのほとんどの場所で浮力は支配的ではなく、特に中心部では passive scalar の性質を持ち、境界層からは plume が発生しない。温度ゆらぎの周波数スペクトラムのスケーリングは、従来のものとは異なる。このことは、温度ゆらぎが passive scalar の性質を持つことに対応している。さらに、系には一つの長さスケールしか存在せず、様々な統計量の境界層付近における空間プロファイルは、熱境界層の長さで規格化すると Rayleigh 数によらずユニークな関数になり、漸近状態に達していると考えられる。

以上のことから、本研究で見出した境界層の逆転による熱乱流状態は、漸近状態でかつ様々な点でこれまでの知見と異なる特異性を持ち、Hard 乱流を超えた新しいスケーリング領域であると結論づけた。

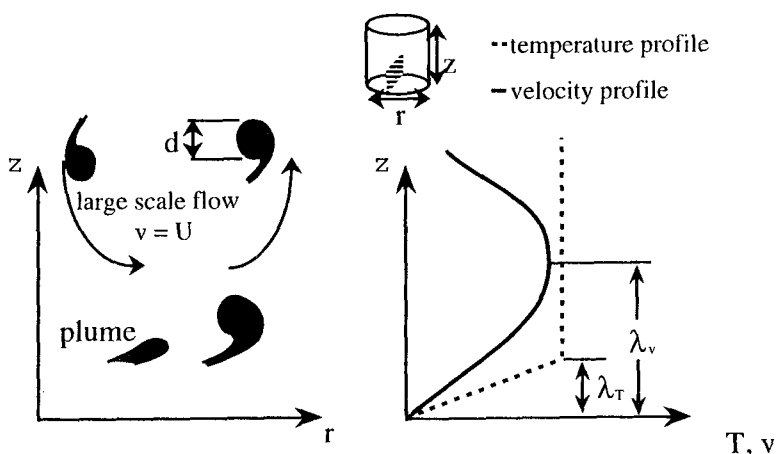


図1. Hard 乱流中に存在する2つの境界層の概念図

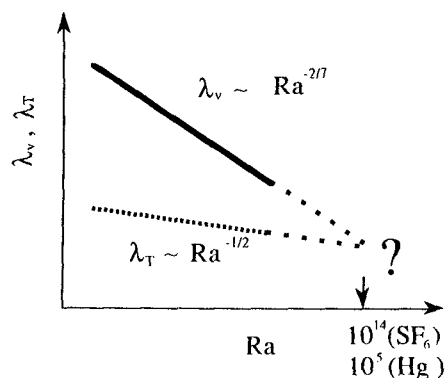


図2. Hard 乱流中の2つの境界層の Rayleigh 数依存性。高圧 SF₆ ガスでは、 $Ra \sim 10^{14}$ 、水銀では、 $Ra \sim 10^5$ で一致すると評価される。

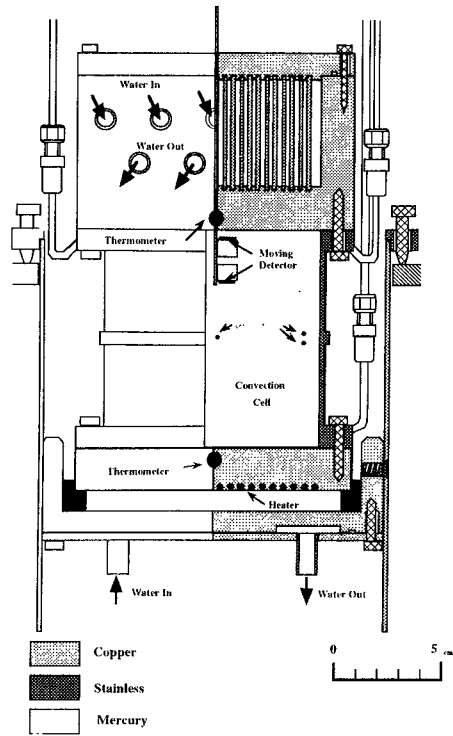


図3. 実験装置の全体図

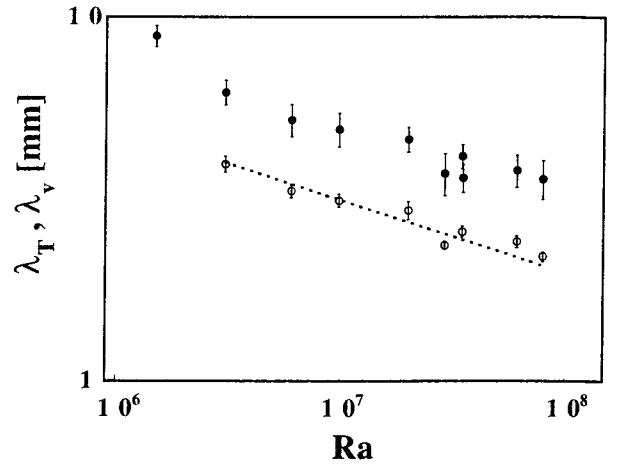


図4. 2つの境界層の厚さの Rayleigh 数依存性。速度境界層は熱境界層より薄い。

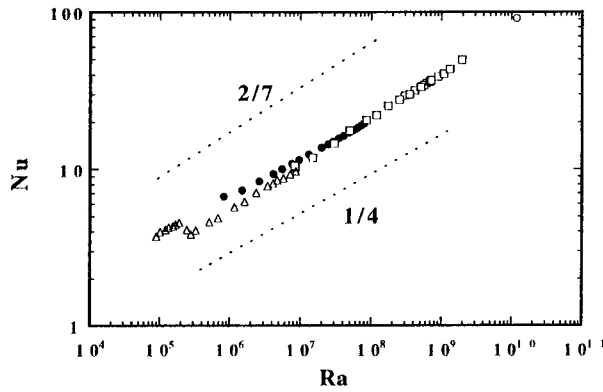


図5. 4種類のセルにおける Rayleigh 数と Nusselt 数の関係。アスペクト比 1 (●), 1/2 (□) における 2 (△) におけるスケーリング指数 (γ) はそれぞれ, $\gamma = 0.25 \pm 0.02$, 0.28 ± 0.02 , 0.27 ± 0.02 である。 $\gamma = 1/2$ は見られない。破線は $\gamma = 2/7$, $1/4$ 。○は高さ 60cm のセル。

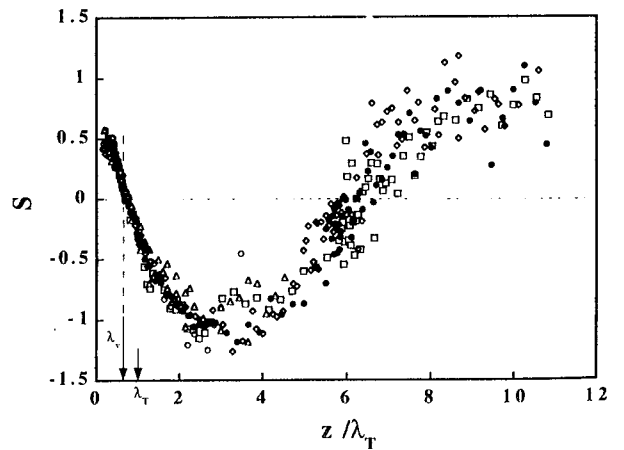


図6. S vs z/λ_T . Ra : (□) 8.0×10^7 , (●) 6.1×10^7 , (◇) 3.5×10^7 , (△) 2.0×10^7 , (○) 3.0×10^6 . その他, 温度ゆらぎや平均速度のプロファイルも Rayleigh 数に依存しないユニークな関数を持つ。

審査結果の要旨

近年、環境科学、地球科学、エネルギー工学など広範な分野で乱流現象の理解と制御が重大な研究課題となっている。熱乱流においては、ソフト乱流、ハード乱流の二つの状態が知られていたが、さらに高いレイリー数では、熱境界層と速度境界層の位置関係が逆転した究極状態が存在すると理論的に予測されていた。最近、世界的に高レイリー数を実現するため、低温ヘリウム気体などを用いて実験が行われてきたが、この状態を実現するレイリー数を達成した実験はなかった。著者は、液体金属である水銀を用いて、低プラントル数流体では世界最高のレイリー数を実現して、熱輸送量やゆらぎの定量的測定を行い発達熱乱流の新しい状態を見出した。本論文は、これらの成果をまとめたもので全文6章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、研究の目的を述べ、液体金属である水銀を用いるとプラントル数が極めて小さいために、境界層の逆転がレイリー数 10^5 で起こると予想し、実験を計画した理論的根拠について述べている。

第3章では、本研究のために製作した実験装置について述べている。液体金属を用いてレイリー数 10^5 から 10^{10} を実現するための装置、精密温度制御および温度ゆらぎの測定方法などについて説明している。

第4章では、高いレイリー数における熱輸送量と温度ゆらぎの測定結果について記し、熱境界層と速度境界層の位置が逆転した状態が初めて観測されたことを述べている。また、様々な統計量の境界層付近における空間プロファイルは、熱境界層の長さで規格化するとレイリー数によらない関数になり、究極状態に達していると考えられること、さらに、境界層が逆転することによって従来の理論の予想とは異なる熱流のスケーリング則が出現することなど多くの発見について述べている。これらは新しい重要な知見である。

第5章は考察であり、測定データの統計的解析から、低プラントル数流体では、空間の殆どの場所で浮力は支配的でなく、従来乱流ゆらぎの原因と考えられていたブルームも存在しないと結論づけるとともに、前章で得られた結果の物理的解釈を行っている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、発達乱流の系統的な実験研究を行い、その構造を初めて明らかにしたもので、システム情報科学、流体科学、情報物理学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。