

機関番号：14301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740290

研究課題名 (和文) 非定常乱流「レイリー・テイラー乱流」の時空間スケーリング則

研究課題名 (英文) Spatio-temporal scaling law of unsteady turbulence: Rayleigh-Taylor turbulence

研究代表者 松本 剛 (MATSUMOTO TAKESHI)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：20346076

研究成果の概要 (和文)：重力があるとき、上に重い流体を置き、下に軽い流体を静かに配置すると、いずれ二つの流体は乱れながら混ざり合う。この乱流がレイリー・テイラー乱流であり、日常的に自然発生する乱流のひとつである。そのため、この乱流の性質の理解や混合の様子を把握することの意義は大きい。本研究では、レイリー・テイラー乱流の速度や密度の乱れが時間や空間に対してどのような関数になっているか(スケーリング則)を計算機実験を通じて明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：Under the influence of the gravity, when a heavy fluid is placed on top of a light fluid, the two fluids soon become turbulent and mix each other. This turbulent flow is known as Rayleigh-Taylor turbulence. Since it is one of the most frequently seen turbulent flows in our everyday life, understanding the nature of the turbulent fluctuation and its mixing properties has a significant value. In the present study, we measure functional dependence (so-called scaling law) of the turbulent velocity and density fluctuations on the time and spatial scales by using numerical experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |
| 2010年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,100,000 | 630,000 | 2,730,000 |

研究代表者の専門分野：乱流を中心とした流体物理学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：流体物理、乱流の統計理論、レイリー・テイラー不安定性、密度変動乱流

1. 研究開始当初の背景

- (1) レイリー・テイラー乱流 (Rayleigh-Taylor turbulence、以下 RT 乱流)とは、重力の影響下で高密度流体を上部に、低密度流体を下部に静かに配置し、その後発達した乱流のことをさす。密度の異なる2つの流体(水と油など)が密度勾配方向(密度の小さいほう

から大きい方へ向く向き)と逆方向に加速される、というこの設定はサラダドレンシングの調合などの日常的な現象のみならず、核融合科学、地球流体力学や超新星爆発などとも密接に関係する。こうした密度差に起因する多様な乱流現象の普遍性が明らかになれば、個々の現象を統一的に理解できることになり、RT乱流の制御や RT 乱流混合の応用を容易

- にする。
- (2) RT 乱流の特徴は、空間的に統計的非一様非等方であること、時間的にも統計的非定常であることにある。これは、最も理解の進んでいる定常一様等方乱流(以下 HIT 乱流)とは正反対の性質である。このような難しさを伴う系であるが、2003 年に Chertkov によって RT 乱流のスケールリング則が予想された。これは HIT 乱流のスケールリング則についての現象論(コルモゴロフスケールリング則)を非定常な場合に拡張したものである。具体的には、RT 乱流中で、2 地点間の速度の差および密度の差のモーメント量が空間や時間のどのようなスケールリング則に従うか、がカスケード描像にもとづいて次元解析的に導きだされたのである。この直後に、この予想が正しいか否かを調査研究する RT 乱流の新しい研究潮流が生まれた。特に、Chertkov の予想が正しいとしても、高次統計量においては HIT 乱流の場合のように異常スケールリング(ここではスケールリング指数が現象論予測からずれることを指す)が現れると予期されるため、この異常性がどのようなものになるのかという点が大きな焦点となった。従来にしられている HIT 乱流の異常性とは質的に異なるものが現れるとすれば、乱流揺らぎの普遍性の問題などに対して新知見が得られる可能性も期待された。

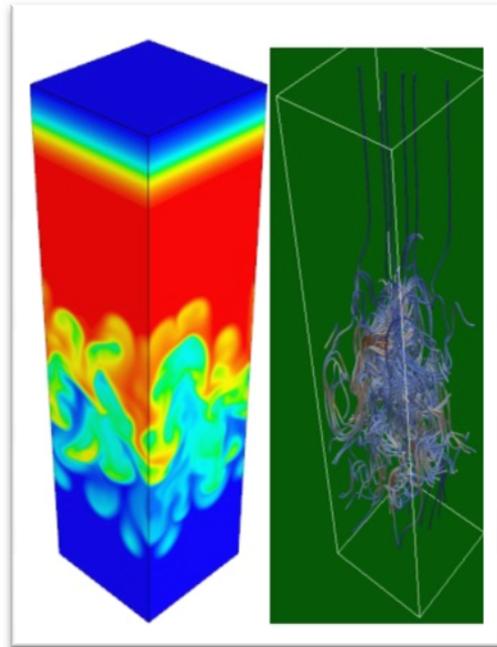
2. 研究の目的

- (1) RT 乱流のスケールリング則同定
3 次元 RT 乱流の数値シミュレーションを実行する。なお、ここでの設定は、可混合な 2 流体の RT 乱流である。この乱流場について集団平均を施し、2 地点間の速度差と密度差のモーメント量を計算し、時間、空間についてのスケールリング指数を同定する。この結果と Chertkov の現象論を比較検討することで、RT 乱流の異常スケールリング指数を定量的に明らかにする。
- (2) 可解モデルによる解析
RT 乱流の密度場は乱流によって輸送されるスカラー量である。乱流中のスカラー量の異常スケールリングに関しては可解モデル(クライチナンモデルと呼ばれる)が知られており、その異常スケールリングの起源について詳細な理解が得られている。RT 乱流の密度場は能動スカラー量であるため、この可解モデルのスカラー量と直接一致するものではないが、RT 乱流に類似した設定のもとで可解モデルを数値計算することで RT 乱流の密度場につ

いての異常スケールリングの起源について示唆を得ることをめざす。

3. 研究の方法

- (1) RT 乱流の数値シミュレーションにおいては、スーパーコンピュータを使用して流体の基礎方程式を忠実に数値計算することで乱流ダイナミクスを追跡する。つまり乱流モデルは使わない。数値計算法は、フーリエスペクトル法を用いた RT 乱流のシミュレーション法が既に知られているのでこれに従う。
- (2) 可解モデルの解析においては、従来知られている可解モデルを RT 乱流に相当する非定常な設定に拡張する。この拡張したモデルを解析する際にも数値計算が必要である。ここでは統計量について完結した方程式についてモンテカルロシミュレーションをおこなって密度揺らぎに相当する乱流揺らぎ量のスケールリング指数の解析をおこなう。



(3) 図 1. RT 乱流の密度場(左)と瞬時の流線(右)

4. 研究成果

- (1) RT 乱流のスケールリング則同定
- ① 本研究での RT 乱流の数値シミュレーションで得られた乱流場スナップショットの可視化図を図 1 に示す。重力は図 1 の上から下向きであり、上部の高密度流体と下部の低密度流体の界面が不安定化して乱流となっている。この乱流領域が時間とともに

に上下に広がっていくことが RT 乱流の特徴の一つである。図 1 の右図の流線は細かく入り組んで、らせん状にからまっている。これは発達した乱の特徴である活発な渦運動を表している。しかし、RT 乱流に特徴的な空間構造は、図 1 左にも見られるように密度場がつくるキノコ状のブルームである。ブルームには渦輪が付随するため、HIT 乱流における秩序渦構造(渦管)とは定性的に異なるようである。これが統計量に違いをもたらすか否か、がひとつの焦点となる。

② RT 乱流は上下流体の密度差が小さい場合と大きい場合でその性質は異なると考えられている。本研究の着手時には密度差が小さい場合のみを対象とする予定であった。しかし、

我々とほぼ同じ 2009 年初めに Boffetta らの研究グループが、この密度差が小さい場合(無次元数アトウッド数で 0.1 程度の場合)について包括的な数値研究結果を出版したため、我々は密度差が大きい場合(アトウッド数 0.5、上部流体密度が下部の 2 倍に相当)の RT 乱流も同時に研究の対象とした。密度差が大きい場合の RT 乱流は、密度差が小さい場合とくらべて方程式が複雑となるため数値計算も難しくなる。ここでは可混合非圧縮密度変動乱流の枠組みを用いてアトウッド数 0.5 の場合の数値計算をおこなった。図 1 はこの高密度差の場合の結果である。また、

前述した Chertkov の現象論はアトウッド数が小さい場合を前提としたものである。数値計算の最大格子点数は $512 \times 512 \times 4096$ である。

③ RT 乱流の乱流領域内で、二地点間の速度差および密度差のモーメント量(乱流の速度構造関数、密度構造関数と呼ばれる)を集団平均によって計算した。集団平均は、数値計算の初期条件において上部流体と下部流体の界面にあたる 2 次元攪乱を変えた複数のアンサンブルを用意することで行った。

アトウッド数が小さい場合(上下流体の密度差が小さい場合)には、密度構造関数のスケーリング則は HIT 乱流によって移流される受動スカラーの構造関数のスケーリング則と異常性(現象論からのズレ)も含めて同じであることが判明した。時間についてのスケーリング則は RT 乱流の乱流領域長さ(図 1 に示した乱流

領域の鉛直方向長さ)をもちいた相似変換を行えばよいことも確かめられた。この相似変換は高次統計量でも成立するようである。以上のことは Chertkov の現象論がたしかに低アトウッド数 RT 乱流で成立していることを示す。また、この現象論からのズレが HIT 乱流と同じであることは、RT 乱流が頑強な普遍性を持つことが明らかになった。他の研究グループ(Boffetta ら)は同時期に低アトウッド数の RT 乱流の速度揺らぎについても同様の発見を報告している。これらの発見によって低アトウッド数の RT 乱流の制御や混合促進などは、HIT による受動スカラー混合についての膨大な蓄積を相似変換すれば良いことが示唆された。このことは応用上の意義も大きい。

④ 次に高アトウッド数(0.5)の場合の密度構造関数、速度構造関数のスケーリング則についての結果を示す。

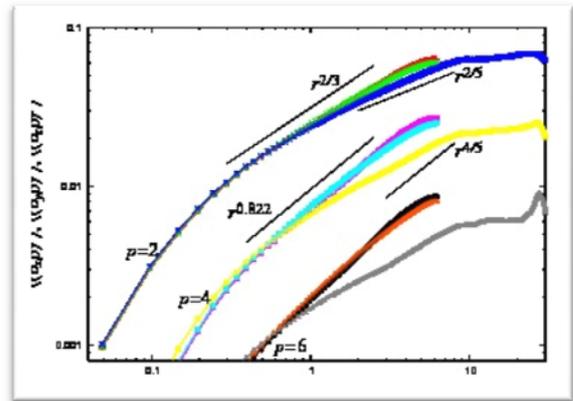


図 2. 2 地点間の密度差の 2, 4, 6 次積率

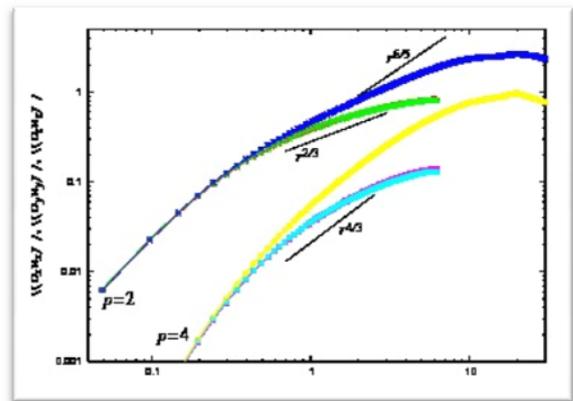


図 3. 2 地点間の速度差の 2, 4 次積率

図 2, 3 のいずれもある時刻で固定したときの構造関数を 2 地点間の距離の関数として示したものである。図 2 に示す密度構造関数においては、2

地点差を鉛直方向にとったもの（それぞれの次数でもっとも右にのびている曲線）において興味深い振る舞いがみられる。大スケールでのスケールリング則が Chertkov の現象論から異なっている。これは低アトウッド数 RT 乱流の場合には見られなかったものである。特に2次モーメントにみられる、この大スケールでのスケールリング指数は、成層乱流のスケールリング則の候補の一つとして知られているスケールリング則（ボルジャーノ・オブコフ則）に近いと考えられ、異常スケールリングではないと判断される。また、小さいスケールにおいては HIT 乱流のスケールリング則に近いことから、この RT 乱流においてはコルモゴロフ則とボルジャーノ・オブコフ則が混在しているとも考えられる。この原因は、高アトウッド数効果によって乱流場の非等方性が持続され、統計量が強くこの影響を受けたものであると考えられる。

この一方、図3の速度構造関数については、スケールリングの質が密度構造関数のものと比べて悪いため、速度場については定量的にボルジャーノ・オブコフ則が見えているとは結論できない。定性的にそれに近い結果がでていいるといえるのみである。図では示さないが、空間2地点を固定した構造関数を時間の関数として追跡し、時間スケールリングについても同様の測定を行った。それによると、Chertkov 現象論の基礎である、乱流領域長さを用いた相似変数が高アトウッド数 RT 乱流の場合でも有効であることが判明している。

高アトウッド数 RT 乱流における、二つのスケールリング則の混在、および高次モーメントの異常スケールリングは従来とは異なる知見を与え、熱対流乱流や混合層乱流などの他系への応用も考えられる。

(2) 可解モデルによる解析

可解モデルが対象とできるのは、低アトウッド数 RT 乱流の密度揺らぎの時空間スケールリング則である。従来の可解モデルは統計的に定常な HIT 乱流で輸送される受動スカラー量を対象としたものである。非定常性への拡張は、モデル中のスカラー外力の特徴的空間スケールが RT 乱流の乱流領域長さに対応すると

考え、外力スケールが時間の二乗で変化するとして行った。このモデルを流体粒子描像(ラグランジュ描像)を通して確率シミュレーションする標準的な方法を用いて数値的に解析した。この結果は低アトウッド数 RT 乱流の結果を再現し、異常スケールリングについて既知の受動スカラーの機構と類似であることが示唆された。

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 1 件)

- ① Takeshi MATSUMOTO, Anomalous scaling of three dimensional Rayleigh-Taylor turbulence, Phys. Rev. E, 査読有, 79, 2009, 05530R-1-4.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 松本剛, 3次元高密度差レイリー・テイラー乱流のスケールリング則、日本物理学会秋季大会、2010年9月25日、大阪府立大学
- ② 松本剛, 高アトウッド数レイリー・テイラー乱流のスケールリング則、日本流体力学会、2010年9月10日、北海道大学
- ③ 松本剛, 高密度レイリー・テイラー乱流の統計則、日本物理学会第65年次大会、2010年3月21日、岡山大学
- ④ 松本剛, レイリー・テイラー乱流の非定常特性、日本物理学会秋季大会、2009年9月28日、熊本大学
- ⑤ 松本剛, Rayleigh-Taylor turbulence and scalar turbulence、京大数理研合宿型セミナー 乱流現象の多様性を貫く数理と物理、2009年7月7日、神戸インスティテュート

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 剛 (MATSUMOTO TAKESHI)
京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：20346076

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者