

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540447

研究課題名(和文)乱流-非乱流境界面近傍の構造とエネルギー・物質輸送機構

研究課題名(英文) Structure, energy transfer and material transport near turbulent-nonturbulent interface

研究代表者

金田 行雄 (Kaneda, Yukio)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：10107691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：自然や科学技術に現れるさまざまな流れにおいて、しばしば乱れの非常に強い領域と弱い領域の境界面(乱流-非乱流境界面：T-NT境界面)が現れる。本研究では乱流中のT-NT境界面近傍の乱流場の構造とエネルギー・物質輸送機構に着目して研究を行った。とくに格子点数が4096の3乗におよぶ一様等方性乱流の大規模な乱流の直接数値シミュレーションのデータの条件付き統計解析によって、その構造やエネルギー輸送などについていくつかの特徴を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Interfaces between strongly turbulent and almost non-turbulent regions often appear in flows in nature and technology. Such interfaces are called here turbulent-nonturbulent(T-NT) interfaces. We have studied T-NT interfaces within turbulent flows with particular attention to the flow structure, energy transfer and material transport near the interfaces. By applying the method of conditional statistical analysis to the data of direct numerical simulations with the number of grid points up to the cube of 4096, we have revealed some characteristic features of the structure and energy transfer.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数理物理・物性基礎

キーワード：乱流-非乱流境界面 直接数値シミュレーション 一様等方性乱流 条件付き統計解析 剪断層 乱流の構造 エネルギー輸送 物質輸送

1. 研究開始当初の背景

乱流は、巨大自由度を含む非線形・不可逆・開放系の現象の典型であり、これまでの多くの研究にも関わらず未解決の問題として知られている。当然、計算科学的方法による挑戦もなされてきたが、乱流場の含む自由度の巨大さのため、乱流の解明はきわめて困難であった。一方、近年コンピュータのハード、ソフト両面での進展は著しく、それに伴い乱流の計算科学に大きな変化が起き、計算科学による乱流解明のブレークスルーに国内外で大きな期待が寄せられている。

その中で、乱流解明における乱流-非乱流 (Turbulent-NonTurbulent; 以下 T-NT と略記) 境界面の理解の重要性は特に最近強く認識され、研究が進展しつつある。しかしながら、乱流の本質的特徴である十分強い非線形性を持つ、すなわち高いレイノルズ数 Re (乱流中の非線形性の強さを表す指標) の乱流中の境界面を解像できる直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation; 以下 DNS と略記) は困難であった。特に一様乱流中の T-NT 境界面についての研究はほとんどなかった。

一方、このような状況の中で、我々は地球シミュレータを用いて、一様等方性乱流の従来と桁違いの自由度を持つ世界最大規模の DNS を実現し、そのデータ解析を行ってきた。その結果、このような桁違いの量的変化は高い Re の乱流解明への質的变化をもたらす得るとの考えを持つに至った。

また、一連のデータ解析から、例えば火山噴煙や乱流混合層などの非一様乱流だけでなく、統計的に一様な乱流それ自体の中にも速度場などの物理量が急激に変化する境界面があることを見出した。

さらに、予備的な解析から、T-NT 境界面は乱流場全体の統計に大きな影響を与え得ることが示された。これらのことから、T-NT 境界面の計算科学的解明が乱流理論の展開に重要であるとの考えに至った。

2. 研究の目的

自然や科学技術に現れるさまざまな流れにおいて、しばしば乱れの非常に強い領域と弱い領域の境界面 (T-NT 境界面) が現れ、その境界面で渦度などの物理量が急激に変化する。その存在は流れ場全体に大きな影響を果たす。

本研究ではこれまでの高 Re 乱流研究の実績をもとに、T-NT 界面に注目して、主として計算科学的方法によってその構造およびエネルギー、物質輸送機構を明らかにすることを目的とする。そのために規範的な乱流場的を絞り、世界最大クラスの DNS によるデータの解析を行なう。

本研究期間内に具体的には主として以下の(1)、(2)、(3)の研究を行う。また、T-NT 境界面近傍以外の領域においても同様な解析を行い、T-NT 近傍およびその他の領域の比較によって T-NT 境界面近傍の特徴を明らかにする。

(1) T-NT 境界面近傍の流れ場の構造 :

速度、渦度分布などの諸統計の解析によって T-NT 境界面近傍の構造の特徴を抽出する。また、 Re と共にその構造がどのように変化するかを調べる。

(2) エネルギー輸送 :

T-NT 境界面近傍、およびそれ以外の領域における乱流エネルギー、およびエネルギー散逸率の分布の特徴を明らかにする。また、渦同士の非線形相互作用による、大きな渦から小さな渦への乱流の運動エネルギーの輸送 (すなわち異なるスケール間の輸送) や空間的輸送について調べる。またそのモデルを構築する。

(3) 物質輸送 :

T-NT 境界面近傍ではその両面の物質や熱が非常に激しく混合される。その物質が粒子群からなるとし、特に粒子の慣性 (あるいは周りの流体に対する相対質量比) の空間的物質輸送への影響について調べる。

3. 研究の方法

本研究では計算科学的方法によって乱流中の T-NT 境界面近傍およびそれ以外の領域における速度、渦度場の統計の比較を行い、高い Re の乱流-非乱流境界面近傍の(1)流れ場の構造、(2)エネルギー輸送、(3)物質輸送について調べる。とくに、(1)、(2)については格子点数が 4096 の 3 乗に及ぶ大規模 DNS のデータ解析を行う。また PIV (Particle Image Velocimetry; 粒子画像流速測定) を用いた実験との比較検証も行う。具体的には以下のとおり研究を進める。

(1) T-NT 境界面近傍の流れ場の構造 :

一様乱流中の T-NT 境界面について、Westerweel らが導入した条件付き統計解析を適用し、T-NT 近傍およびそれ以外の領域における速度、渦度場を比較し、T-NT 境界面の特徴を抽出する。また、 Re 依存性についても調べる。

(2) エネルギー輸送 :

T-NT 境界面近傍、およびそれ以外の領域における乱流エネルギー、エネルギー散逸率の分布、エネルギー輸送の特徴を DNS データ解析により明らかにする。また、エネルギー輸送についての簡単なモデルの構築を行い、DNS データ、実験データとの比較・検証を行なう。

(3) 物質輸送 :

流体運動によって運ばれる粒子群を追跡す

る数値シミュレーション手法を開発し、それに基づくシミュレーションコードを作成する。そのコードによって、とくに渦運動との関わりに着目して乱流中の粒子追跡を行う。

本研究は流体物理学、大規模並列計算の専門家の有機的連携のもとに研究を行う。

4. 研究成果

本研究では上記(1)、(2)、(3)について概略以下の研究成果を得た。

(1) T-NT 境界面近傍の流れ場の構造：

格子点数が 4096 の 3 乗の DNS による、テイラーマイクロスケールレイノルズ数 R が 1100 程度の乱流場を合計 512 個の部分領域に分割し、そのうちのとくに強い渦分布を含む領域に注目し、条件付き統計解析を行った。また R が 100 程度の比較的低い DNS による乱流場との系統的な比較も行い R の増加につれて渦領域がどのように変化するかを解析した、その結果以下のことが分かった。

(i) R の増加とともに強い渦領域の集団の形が変化し、十分高い R の乱流場では T-NT 境界面に挟まれた強くて薄い剪断層領域が形成される。(図 1 参照)

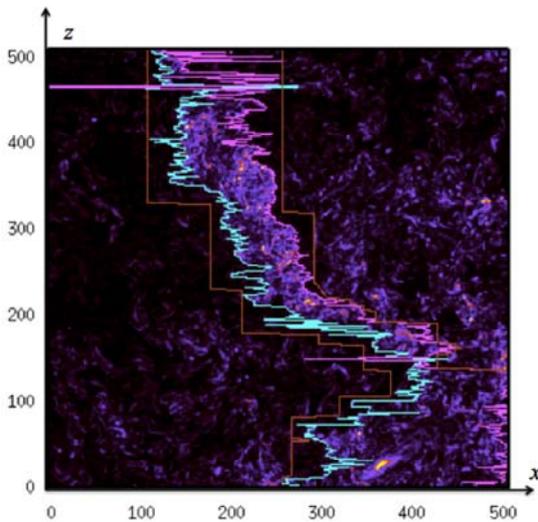


図 1：強い渦分布を含む領域中のある断面上の渦分布。青（左）と紫（右）の線近傍に渦分布の界面があり、その二つ面に囲まれた領域に強くて薄い剪断層がある。

(ii) その境界面近傍で渦度やエネルギー散逸率が大きく変化する。(図 2 参照)

(iii) 各剪断層の広さおよび各剪断層の間の代表的距離はおおよそ積分長の程度であり、剪断層の厚みはおおよそテイラーマイクロスケールのオーダーである。

(iv) 上記剪断層を横切って乱流場全体の速度揺らぎに匹敵する程度の強い速度変化が生じる。

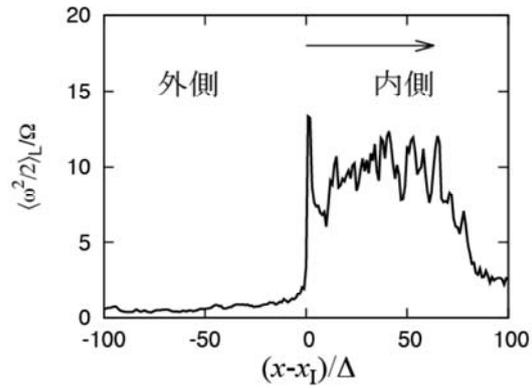


図 2：条件付き統計解析による渦度分布。 $x-x_1$ は図 1 の緑の線からの x 方向（図 1 の水平方向）の距離。縦軸は $x-x_1$ を一定としての渦度の条件付き平均。右側が剪断層の内側

(v) 剪断層の内部は大きさがコルモゴロフスケール程度の直径を持つ渦管が密集しており、その間隔もおおよそコルモゴロフスケール程度である。その渦管はエネルギー保有渦程度の非常に強い速度揺らぎを持っている。各渦管は主として剪断層に平行な方向にある。また従来のコルモゴロフの理論では説明しにくいほどの大きな渦度を有している。

(vi) 強い剪断層領域の占める体積は流れ場全体の体積に比べて小さいため、2次速度相関などの低次の統計量には強い影響を持たないけれども、高次の統計量には重要な寄与しうると考えられる。

(vii) T-NT 境界面はその境界面の一方から他方への影響の伝播に対するある種の障壁の役割を果たしている。

最終年度には DNS データだけでなく、実験家との協力により得られた実験データをも用いて解析を行った。その結果はおおむね DNS データ解析と整合するものである。

(2) エネルギー輸送：

一様等方性乱流中の空間上の各場所におけるエネルギー散逸率と大きな渦から小さな渦へのエネルギー輸送（ここではカスケードと呼ぶ）の大規模 DNS データに基づく解析を、とくに T-NT 境界面近傍に着目して行い、以下の結果を得た。

(i) T-NT 境界面に挟まれる薄くて強い剪断層内における局所的なエネルギー散逸率は、その他の領域における局所的散逸率に比べて非常に（おおよそ 10 倍程度）大きい。しかし、剪断層領域の体積は全領域の体積に比べてかなり小さいので、乱流場全体としてのエネルギー散逸に大きくは寄与しない。

(ii) 大きい渦から小さな渦へのエネルギー輸送、およびその逆方向の輸送(カスケード)が上記の薄くて強い剪断層の内部、及びその外側

近傍で強く起きている。そのカスケードは渦の粗視化の程度（スケール）に依存する。（図3参照）

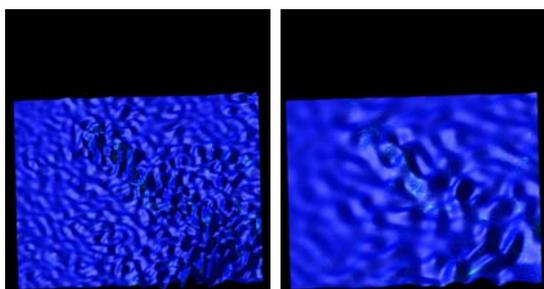


図3：剪断層近傍のある断面における大きな渦から小さな渦へのエネルギーカスケードの空間分布。右の図は左の図に比べて粗視化の程度が粗い。

(iii)剪断層の内部では強い渦度が存在し、激しいエネルギー散逸が起きている。DNSデータは、上記剪断層領域の外側から剪断層に向けて乱流エネルギーの輸送が生じ、その輸送により剪断層内部の細く、密集した強い渦管の生成と非常に強いエネルギー散逸が生じるという理解と整合している。

なお、剪断層内におけるこのような渦の成長過程において、上の(1)-(vii)で述べたように、剪断層はT-NT境界面によって外部から影響を遮蔽されるため、非常に長い間その剪断層が存続し得ると考えられる。このことはPIVを用いた実験による時系列データ解析の結果とも整合している。

また、Rapid Distortion Theory (RDT)と呼ばれる線形理論に基づいて、T-NT界面近傍でのエネルギーのカスケードおよび空間的輸送のモデルを構築し、その検証を行った。従来のリチャードソン・コルモゴロフ理論に代表される乱流理論（カスケード理論）ではお互い似た大きさの渦同士の相互作用が主要であるとされるが、RDTではむしろ互いに大きさの非常に違う渦の相互作用が主要であるとするモデルである。フーリエ空間だけでなく実空間でのエネルギー輸送が簡単にモデル化される。

RDTモデルによれば強い剪断層領域の外側から剪断層に向けて乱流のエネルギーが輸送され、そのことによって剪断層内部で細長く密集した強い渦管が生成され、剪断層の外側に比べて非常に強いエネルギー散逸が生じることが説明される。この描像は、DNSおよび実験結果とも整合している。

(3)物質輸送:

流体運動によって運ばれる粒子群を、超並列コンピュータを用いて追跡するためのシミュレーションコードを作成し解析を行った。

具体的には乱流DNSコードに粒子の慣性効果を取り入れて、並列版3次元スプライン補間粒子追跡コードを組み込み、乱流中の粒子追跡を行った。

開発したコードを用いた数値実験により、ストークス数 St (流体への追従性を表す無次元数: $St \ll 1$ ならば、微粒子の軌跡は流体の流線にほぼ一致する)の各粒子位置における渦度（粒子渦度）への影響を調べた結果、渦度のラグランジュ的相関は St が大きいほど早く減衰すること、およびある特徴的な St (0.05程度)が存在し、その St では粒子渦度の統計平均が低いことが分かった。また、慣性粒子は、渦管の密集した領域からは排出される傾向が観察された（図4参照）。以上の結果は剪断層近傍における粒子密度が St の影響を受けることを示唆している。また、乱流混合層の T-NT 界面近傍に慣性粒子が集まりやすいことを示す我々のシミュレーション結果とも矛盾していない。

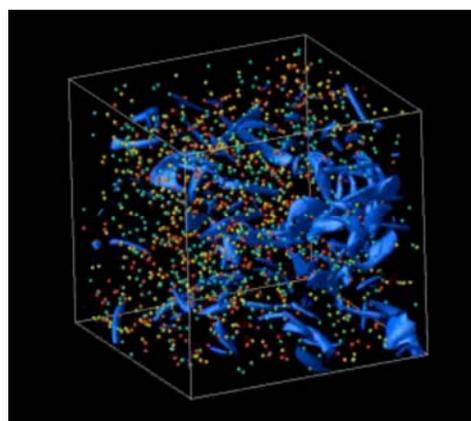


図4：乱流中の St の値が異なる粒子の運動のシミュレーション。時間発展後の粒子位置 $St=0$ (水色), $St=0.5$ (黄色), $St=1.0$ (赤色) と高渦度領域(青色)の可視化。

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4件)

- (1) Julian C. R. Hunt, Takashi Ishihara, Nicholas A. Worth, Yukio Kaneda; Thin shear layer structures in high Reynolds number turbulence -Tomographic experiments and a local distortion model, Flow, Turbulence and Combustion, 査読有, 92(3) (2014) pp. 607-649.
- (2) Takashi Ishihara, Yukio Kaneda, Julian C.R. Hunt; Thin shear layers in high Reynolds number turbulence-DNS results, Flow, Turbulence and Combustion, 査読有, 91(4) (2013), pp. 895-929.
- (3) Takashi Ishihara, Julian C. R. Hunt, Yukio Kaneda; Conditional analysis near strong thin shear layers in DNS of isotropic turbulence at

high-Reynolds number, 査読有, Journal of Physics: Conference Series, 318 (2011), 042004(4pages).

〔学会等発表〕 (計 15 件)

- (1) 石原 卓, Pradeep Jha, 金田行雄, Julian C.R. Hunt; 高レイノルズ数乱流中の薄い剪断層とその時間変化について, 大スケール流体運動と乱流揺らぎ-京都大学数理解析研究所共同研究集会, 京都大学, 2014年1月10日
- (2) 石原 卓, Pradeep Jha, 金田行雄, Julian C.R. Hunt; 高レイノルズ数乱流中の剪断層の時間発展, 日本流体力学会年会 2013, 東京農工大学, 2013年9月12日
- (3) Yukio Kaneda; Some lessons from the statistical mechanics for thermal equilibrium systems, Turbulence Colloquium TCM 2013, Tunis, Tunisia, 2013年9月6日
- (4) Julian C. R. Hunt, Takashi Ishihara, Yukio Kaneda; Thin shear layers in high Reynolds number turbulence- A coherent-structure model, 14th European Turbulence Conference, Lyon, France, 2013年9月3日
- (5) Takashi Ishihara, Julian C.R. Hunt, Yukio Kaneda; Thin shear layers in high Reynolds number turbulence -DNS results, 14th European Turbulence Conference, Lyon, France, 2013年9月3日
- (6) Yukio Kaneda, Koji Morishita, Takashi Ishihara; Small scale universality and spectral characteristics in turbulent flows, Eighth International Symposium on Turbulence and Shear flow Phenomena, Poitiers, France, 2013年8月28日
- (7) Takashi Ishihara, Julian C.R. Hunt, Yukio Kaneda; Intense dissipative mechanisms of strong thin shear layers in high Reynolds number turbulence, APS 65th annual DFD meeting, San Diego, USA, 2012年11月18日
- (8) Takashi Ishihara, Julian C.R. Hunt, Yukio Kaneda; Strong thin shear layers in homogeneous high Re turbulence- structures and statistics, First Multiflow Conference on the Turbulent-Nonturbulent interface, Madrid, Spain, 2012年10月26日
- (9) 小笠原浩樹, 石原 卓, 金田行雄; 乱流境界層の直接数値シミュレーションを用いた乱流・非乱流界面の解析, 日本流体力学会年会 2012, 高知大学, 2012年9月18日
- (10) 石原 卓, Julian C.R. Hunt, 金田行雄; 高レイノルズ数一様等方性乱流中の強い剪断層, 日本流体力学会年会 2012 高知大学, 2012年9月17日

(11) Takashi Ishihara, Julian C.R Hunt, Yukio Kaneda; Strong thin shear layers in high Reynolds number turbulence, APS 64th annual DFD meeting, Baltimore, USA, 2011年11月21日

(12) Takashi Ishihara, Julian C.R Hunt, Yukio Kaneda; Conditional analysis near strong shear layers in DNS of isotropic turbulence at high Reynolds number, 13th European Turbulence Conference, Warsaw, Poland 2011年9月14日

(13) Yukio Kaneda; Energy Transfer in Turbulence –the roles of local and non-local interactions, Nordita Astrophysics seminars, NORDITA, Stockholm Sweden, 2011年9月7日

6. 研究組織

(1)研究代表者

金田 行雄 (KANEDA, Yukio)
愛知工業大学・工学部・教授
研究者番号: 10107691

(2)研究分担者

石原 卓 (ISHIHARA, Takashi)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10262495