

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18013

研究課題名(和文)乱流・非乱流界面における乱流と波動の干渉メカニズムの解明

研究課題名(英文)Wave-turbulence interactions near turbulent/non-turbulent interface

研究代表者

渡邊 智昭(WATANABE, TOMOAKI)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：70772292

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：安定密度成層中に発達するせん断流れと圧縮性乱流の直接数値計算を行った。安定密度成層中で内部重力波の放出とともに発達する乱流や圧力波の放出を伴う圧縮性乱流の特性を、乱流領域と非乱流領域を分ける乱流・非乱流界面に着目して明らかにした。また、こうした乱流における分子拡散や熱拡散をラグランジュ粒子を用いてモデル化する手法を提案し、その有効性を明らかにした。さらに、ピストン駆動式の圧縮性噴流形成装置を製作し、シリンダ内部圧力計測やシャドウグラフ法による可視化の実験結果からシリンダ内部圧力と噴流マッハ数の関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Direct numerical simulations (DNS) were performed for stably stratified turbulence and compressible turbulence. Influences of internal gravity waves and pressure waves on turbulent/non-turbulent interfaces were investigated by detecting the turbulent fluid based on vorticity or potential vorticity. A multi-particle interaction model was proposed for molecular diffusion and thermal conduction. The performance of the model was evaluated with the DNS database of turbulent planar jets. The piston jet actuator with single/multiple orifice was experimentally studied with cylinder pressure measurement and flow visualization based on the shadowgraph method. These experiments revealed the relation between the cylinder pressure and jet Mach number.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流 乱流・非乱流界面 安定密度成層 圧縮性流れ

### 1. 研究開始当初の背景

流体中を伝播する波動現象は、水面に現れる表面波、大気や海中の流体密度差により生じる内部重力波、地球の自転に伴うロスビー波など様々な環境中に見られる。海中を伝播する内部重力波は海流の混合に大きな影響を与えると考えられており、内部重力波の特性の解明は未来の地球環境を予測するうえで重要となる。また、流体中の波動現象はロケットエンジンの流体騒音など工業装置・製品から発せられる騒音などにも関連しており、工学的にも重要な現象である。

身の回りに存在する流れ場の多くは乱流であり、多くの場合、流体中の波動は乱流とともに現れる。乱流は非乱流流体からの遷移によって生成するため、乱流流体は非乱流流体とともに存在する。この場合、乱流流体と非乱流流体は薄い層状の領域によって分けられる。この層は乱流・非乱流界面と呼ばれ、非乱流流体は、乱流へ遷移するとともに、界面を通して乱流内部へと取り込まれる。この流体の取り込みにより乱流が空間発展する。近年、乱流の空間発展には界面近傍の渦構造が重要な役割を果たしていることが明らかとなり、界面付近の流れ場の特性が注目されている。乱流の発達は物質や熱の混合・拡散に関連しており、界面近傍の流れ場の特性の解明は、様々な流体现象の予測・制御手法の発展に繋がると期待される。

### 2. 研究の目的

乱流・非乱流界面近傍の乱流と波動の干渉に注目し、その干渉メカニズムを実験と数値シミュレーションにより解明する。また、乱流と波が共存する流れ場の数値計算手法を発展させることを目指す。

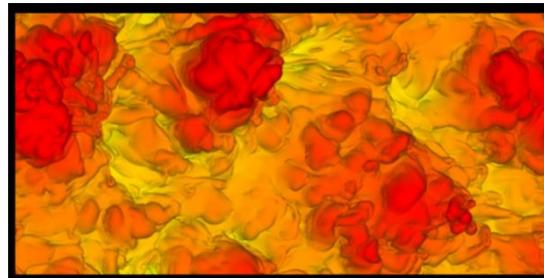
### 3. 研究の方法

安定密度成層中に発達する自由せん断流れの直接数値計算を行う。流れ場から乱流領域を渦度などの指標により抽出することで、乱流と非乱流流体を分ける界面層を検出する。界面層近傍の統計的特性を調査し、内部重力波の放出に伴う乱流の変化を明らかにする。また、圧縮性乱流の直接数値計算および実験を行い、強い密度変動を伴う乱流の空間発展について調査する。

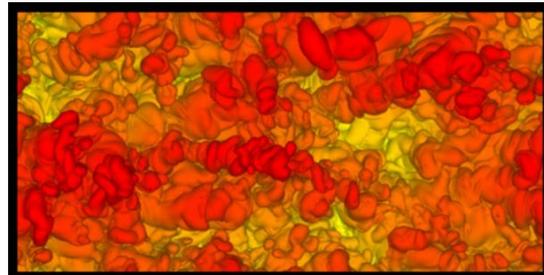
### 4. 研究成果

安定密度成層中で発達する混合層の乱流・非乱流界面を図 1(a)に示す。また、図 1(b)は密度が一樣な流体中に発達した混合層の乱流・非乱流界面を示す。いずれの場合も、渦度の大きさの等値面が可視化に用いられている。安定密度成層中では浮力の効果により界面の形状が平坦になっていることがわかる。乱流による周囲流体の取り込み量は、界面の表面積にほぼ比例する。そのため、安定密度成層下では、界面表面積の減少によって周囲流体の取り込み量が減少することが

わかる。また、こうした流れ場において界面層近傍の乱流の統計的性質を調べた結果、乱流内の浮力レイノルズ数によって界面層および近傍の乱流の特性が大きく変化することが示された。



(a) 安定密度成層中



(b) 密度が一樣な流体中

図 1 混合層中の乱流・非乱流界面の可視化

図 2 に超音速噴流の乱流・非乱流界面、非乱流中を伝播する圧力波、乱流内の渦構造を示す。図のように、界面近傍に強い圧力波が存在し、これにより流体の密度が変化する。こうした傾向は、界面近傍の統計量にも見られた。異なる噴流マッハ数を持つ二次元噴流において界面層の幅を詳細に調べた結果、界面層の幅は噴流マッハ数とともに減少することがわかった。一方、非圧縮性流れでは界面層幅は乱流の最小スケールである Kolmogorov スケールの約 12 倍程度であった。また、界面層近傍の流れ場が乱流・非乱流界面近傍の小渦構造と関連していることも明らかにされ、非乱流流体の局所的な取り込み過程が簡単な渦モデルで記述できることが示された。さらに、乱流中の分子拡散や熱拡散を多数のラグランジュ粒子を用いてモデル化する手法を考案し、その有効性を示した。

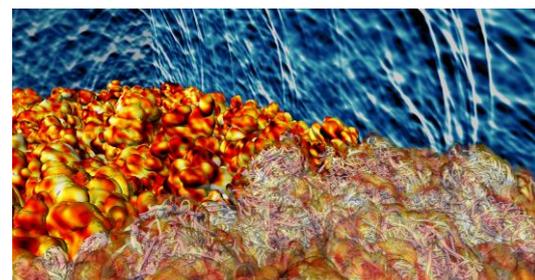


図 2 超音速噴流の乱流・非乱流界面、圧力波および小渦構造の可視化

図 3 に本研究で製作した圧縮性噴流形成装

置を示す。同装置はモータにより駆動され、高周波数での駆動により超音速噴流が繰り返し噴出される。流れ場のシャドウグラフ法による可視化(図4)から、噴流マッハ数を見積もったところ、噴流マッハ数が最大で1.7程度に達することがわかった。この装置を用いて、超音速噴流間の干渉や噴流の空間的広がりを明らかにした。

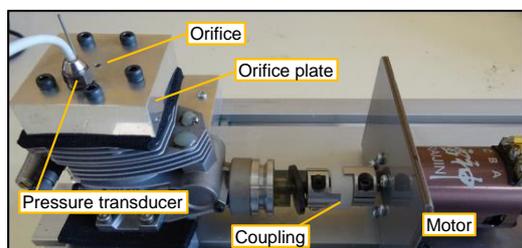


図3 ピストン噴流形成装置

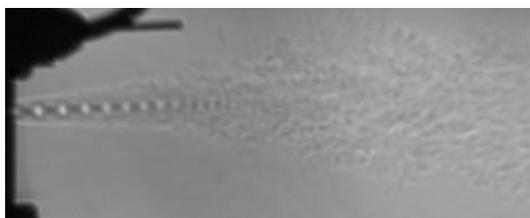


図4 シャドウグラフ法による流れ場の可視化

#### 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 15 件)

1. H. Sakakibara, T. Watanabe, K. Nagata, Supersonic piston synthetic jets with single/multiple orifice, *Exp. Fluids*, 59, 76 (2018). 査読有 10.1007/s00348-018-2529-9
2. K. Tanaka, T. Watanabe, K. Nagata, A. Sasoh, Y. Sakai, and, T. Hayase, Finite response time of shock wave modulation by turbulence, *Phys. Fluids*, 30, 035105 (2018). 査読有 10.1063/1.5019867
3. Y. Tai, T. Watanabe, K. Nagata, Modeling of molecular diffusion and thermal conduction with multi-particle interaction in compressible turbulence, *Phys. Fluids*, 30, 035108 (2018). 査読有 10.1063/1.5018248
4. T. Watanabe, X. Zhang, K. Nagata, Turbulent/non-turbulent interfaces detected in DNS of incompressible turbulent boundary layers, *Phys. Fluids*, 30, 035102 (2018). 査読有 10.1063/1.5022423
5. T. Watanabe, J. J. Riley, and K. Nagata, Turbulent entrainment across

- turbulent/non-turbulent interfaces in stably stratified mixing layers, *Phys. Rev. Fluids*, 2, 104803 (2017). 査読有 10.1103/PhysRevFluids.2.104803
6. T. Watanabe and K. Nagata, Gradients estimation from random points with volumetric tensor in turbulence, *J. Comput. Phys.*, 350, 518-529 (2017). 査読有 10.1016/j.jcp.2017.08.057
7. T. Watanabe, R. Jaulino, R. R. Taveira, C. B. da Silva, K. Nagata, and Y. Sakai, Role of an isolated eddy near the turbulent/non-turbulent interface, *Phys. Rev. Fluids*, 2, 094607 (2017). 査読有 10.1103/PhysRevFluids.2.094607
8. T. Watanabe, C. B. da Silva, K. Nagata, and Y. Sakai, Geometrical aspects of turbulent/non-turbulent interfaces with and without mean shear, *Phys. Fluids*, 27, 085105 (2017). 査読有 10.1063/1.4996199
9. K. Inokuma, T. Watanabe, K. Nagata, A. Sasoh, and Y. Sakai, Finite response time of shock wave modulation by turbulence, *Phys. Fluids*, 29, 051701 (2017). 査読有 10.1063/1.4982932
10. T. Watanabe, C. B. da Silva, K. Nagata, Multi-particle dispersion during entrainment in turbulent free-shear flows, *J. Fluid Mech.*, 805, 1-12 (2016). 査読有 10.1017/jfm.2016.558
11. T. Watanabe, K. Nagata, Mixing model with multi-particle interactions for Lagrangian simulations of turbulent mixing, *Phys. Fluids*, 28, 085103 (2016). 査読有 10.1063/1.4960770
12. T. Watanabe, J. J. Riley, and K. Nagata, Effects of stable stratification on turbulent/non-turbulent interfaces in turbulent mixing layers, *Phys. Rev. Fluids*, 1, 044301 (2016). 査読有 10.1103/PhysRevFluids.1.044301
13. T. Watanabe, J. J. Riley, S. M. de Bruyn Kops, P. J. Diamessis, and Q. Zhou, Turbulent/non-turbulent interfaces in wakes in stably-stratified fluids, *J. Fluid Mech.*, 797, 1-11 (2016). 査読有 10.1017/jfm.2016.285
14. T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito, and T. Hayase, Implicit large eddy simulation of a scalar mixing layer in fractal grid turbulence, *Phys. Scr.*, T91, 074007 (2016). 査読有 10.1088/0031-8949/91/7/074007
15. T. Watanabe and K. Nagata, LES-Lagrangian-particles-simulation of turbulent reactive flows at high Sc

number using approximate deconvolution model, AICHE J., 62, 2912-2922 (2016). 査読有 10.1002/aic.15261

[学会発表] (計 33 件)

1. 猪熊建登, 渡邊智昭, 長田孝二, 佐宗章弘, 酒井康彦, 温度変動場を伝播する衝撃波の背後過剰圧の特性, 衝撃波シンポジウム, 2018
2. 田中健人, 渡邊智昭, 長田孝二, 佐宗章弘, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 一様等方性乱流との干渉による衝撃波の変形と衝撃波背後圧変動の関係, 第 50 回流体力学講演会, 2018
3. 張欣羨, 渡邊智昭, 長田孝二, 圧縮性境界層の直接数値計算における空間分解能と乱流・非乱流界面の関係, TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2018 (TEC18) 第 67 期総会・講演会, 2018
4. Y. Tai, T. Watanabe, K. Nagata, Mixing Volume Model for Molecular Diffusion and Thermal Conduction in Compressible Turbulence, International Conference in Computational Fluid Dynamics, 2018
5. 猪熊建登, 西尾俊亮, 渡邊智昭, 長田孝二, 佐宗章弘, 酒井康彦, 格子乱流中を伝播する球面衝撃波の壁面過剰圧変動, 衝撃波シンポジウム, 2017
6. 田中健人, 渡邊智昭, 長田孝二, 佐宗章弘, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 垂直衝撃波との干渉による一様等方性乱流の特性変化に関する直接数値計算, 衝撃波シンポジウム, 2017
7. 張欣羨, 渡邊智昭, 長田孝二, 圧縮性境界層中の乱流・非乱流界面に関する直接数値計算, TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2017 (TEC17) 第 66 期総会・講演会, 2017
8. 張欣羨, 渡邊智昭, 長田孝二, 圧縮性乱流境界層中の乱流・非乱流界面に関する直接数値計算, 日本航空宇宙学会第 48 期年会講演会, 2017
9. 猪熊建登, 渡邊智昭, 長田孝二, 佐宗章弘, 酒井康彦, 乱流による衝撃波過剰圧変動に関する風洞実験, 第 49 回流体力学講演会, 2017
10. 田中健人, 渡邊智昭, 長田孝二, 佐宗章弘, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 垂直衝撃波面前後の圧力増加に対する乱流変動の影響, 第 49 回流体力学講演会, 2017
11. タイユウミン, 渡邊智昭, 長田孝二, 圧縮性噴流における仮想粒子間相互作用を用いた熱拡散モデルの検証, 流体力学会中部支部講演会, 2017
12. 長尾茉奈, 渡邊智昭, J. J. Riley, 長田孝二, 松田景吾, 大西領, 安定密度成層における水平せん断層の直接数値計算, 数値流体力学シンポジウム, 2017
13. 榎原弘之, 渡邊智昭, 長田孝二, ピストン駆動式高速シンセティックジェットの特性, JSASS 第 54 回関西・中部支部合同秋期大会, 2017
14. T. Watanabe, C. B. da Silva, K. Nagata, Kinetic energy distribution in the space of scales near turbulent/non-turbulent interfaces, Euromech 590, 2017
15. K. Tanaka, T. Watanabe, K. Nagata, A. Sasoh, Y. Sakai, T. Hayase, Direct numerical simulations of interaction between planar shock wave and homogeneous isotropic turbulence at low turbulent Mach number, The 31st International Symposium on Shock Waves, 2017
16. K. Inokuma, S. Nishio, T. Watanabe, K. Nagata, A. Sasoh, Y. Sakai, Measurement of velocity fluctuations and overpressure of spherical shock wave in grid turbulence, The 31st International Symposium on Shock Waves, 2017
17. T. Watanabe, Turbulent/non-turbulent interfaces in a stably stratified fluid, Seminario no DEM, 2017
18. T. Watanabe, Turbulent/non-turbulent interfaces in stably stratified shear layers, Seminar in CEIST, 2017
19. T. Watanabe, K. Nagata, Passive scalar mixing in temporally developing grid turbulence, Turbulent Mixing and Beyond 2017, 2017
20. X. Zhang, T. Watanabe, K. Nagata, Entrainment and scalar mixing process near turbulent/non-turbulent interface in compressible boundary layers, Turbulent Mixing and Beyond 2017, 2017
21. K. Inokuma, T. Watanabe, K. Nagata, A. Sasoh, Y. Sakai, Interaction between shock wave and turbulent wake, Turbulent Mixing and Beyond 2017, 2017
22. T. Watanabe, C. B. da Silva, K. Nagata, Scaling of the non-dimensional dissipation rate  $C_\epsilon$  near turbulent/non-turbulent interfaces, 16th European Turbulence Conference, 2017
23. 渡邊智昭, 長田孝二, 格子乱流背後の高シュミット数反応場のラージエディシミュレーション, 日本航空宇宙学会第 47 期年会講演会, 2016
24. 西尾俊亮, 猪熊建登, 渡邊智昭, 長田孝二, 佐宗章弘, 酒井康彦, 球面衝撃波の過剰圧に及ぼす格子乱流の効果に関する実験, 日本航空宇宙学会第 47 期年会講演会, 2016
25. 渡邊智昭, 長田孝二, C. B. da Silva, 自由せん断流れの乱流・非乱流界面近傍

- における乱流遷移過程の解明, 第 48 回  
流体力学講演会/第 34 回航空宇宙数値シ  
ミュレーション技術シンポジウム, 2016
26. 渡邊智昭, J. J. Riley, 長田孝二, 安  
定密度成層中に発達する混合層の乱流  
非乱流界面, 第 44 回可視化情報シンポ  
ジウム, 2016
  27. 長谷川優樹, 永田亮介, 渡邊智昭, 長  
田孝二, 圧縮性二次元乱流噴流中の乱  
流・非乱流界面に関する直接数値計算,  
日本流体力学学会年会 2016, 2016
  28. タイユウミン, 渡邊智昭, 長田孝二,  
スカラ拡散を伴う圧縮性二次元乱流噴  
流の直接数値計算, 日本流体力学学会年  
会 2016, 2016
  29. 猪熊建登, 西尾俊亮, 渡邊智昭, 長田  
孝二, 佐宗章弘, 酒井康彦, 格子乱流  
場の速度変動と球面衝撃波の壁面過剰  
圧の関係, 日本流体力学学会年会 2016,  
2016
  30. 田中健人, 渡邊智昭, 長田孝二, 佐宗  
章弘, 酒井康彦, 垂直衝撃波が低乱流  
マッハ数一様等方性乱流に及ぼす影響  
に関する直接数値計算, 日本流体力学  
学会年会 2016, 2016
  31. 永田亮介, 長谷川優樹, 渡邊智昭, 長  
田孝二, 直接数値計算を用いた圧縮性  
二次元噴流の乱流・非乱流界面に関する  
研究, 第 30 回数値流体力学シンポジウ  
ム, 2016
  32. K. Tanaka, T. Watanabe, K. Nagata, A.  
Sasoh, Y. Sakai, T. Hayase, DNS study  
on shock/turbulence interaction in  
homogeneous isotropic turbulence at  
low turbulent Mach number, 69th Annual  
Meeting of the APS Division of Fluid  
Dynamics, 2016
  33. T. Watanabe, K. Nagata,  
Characteristics of the mixing volume  
model with the interactions among  
spatially distributed particles for  
Lagrangian simulations of turbulent  
mixing, 69th Annual Meeting of the APS  
Division of Fluid Dynamics, 2016

[図書] (計 1 件)

1. T. Watanabe, K. Nagata, C. B. da Silva,  
Vorticity Evolution near the  
Turbulent/Non-Turbulent Interfaces  
in Free-Shear Flows, Vortex  
Structures in Fluid Dynamic Problems,  
INTECH, 21 ページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 智昭 (Tomoaki Watanabe)

名古屋大学大学院工学研究科 助教

研究者番号 : 70772292