

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560225

研究課題名(和文)乱流熱伝達場における逆勾配拡散現象の発生限界とその発生メカニズムに関する研究

研究課題名(英文) Study on the generation mechanism and the delimitation of occurrence of counter gradient diffusion phenomenon in turbulent heat transfer

研究代表者

服部 博文(Hattori, Hirofumi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・その他

研究者番号：30467352

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、逆勾配拡散現象が特に顕著に出現すると予測される様々な条件下による温度安定成層や剥離・再付着を伴う乱流中において、直接数値シミュレーション法(DNS)によりその発生を成功させ、その発生条件とメカニズムを乱流素過程を探索することにより、調査、解明した。また、DNSから得られた結果を基に、乱流モデルを伴う大規模渦シミュレーションやレイノルズ平均モデルの予測性能評価も行い、次世代乱流熱伝達シミュレーション技術の確立と発展に向けてのモデリング技術の向上を図ることも行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, the counter gradient diffusion phenomenon which often happens in the stably thermally stratified turbulent boundary layer and turbulent boundary layer with separation and reattachment, had been investigated by means of the direct numerical simulation (DNS), in which the rudimentary process of turbulence the counter gradient diffusion phenomenon appeared was observed and studied. The rmally stratified turbulent boundary layers under various weather and various turbulent heat transport phenomena in boundary layer with separation and reattachment were carried out via DNS, and the occurrence of the counter gradient diffusion phenomenon was successfully reproduced. Also, using the results of DNS, turbulence models in the large eddy simulation and Reynolds averaged Navier-Stokes equation simulation is evaluated in order to reconstruct technique of modelling of turbulence toward the establishment of the simulation of turbulent heat transfer in the next generation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：逆勾配拡散現象 乱流熱伝達 成層乱流 剥離再付着乱流 直接数値シミュレーション 乱流温度混合 壁面熱的境界条件

1. 研究開始当初の背景

乱流中の特異な現象である逆勾配拡散が発生した場合、流体の運動方程式や、エネルギー方程式中のレイノルズ応力や乱流熱流束を勾配拡散型モデルとして表現した時に現れる乱流拡散係数は負値となる。そのため、実効拡散係数が減少し輸送現象が抑制されることとなる。これが逆勾配拡散現象の特徴である。逆勾配拡散現象の発生は、これまで言われてきた強い安定成層（例えば Komori ら, 1996）や、密度差と曲がり（遠心力）（Tagawa ら, 2002）等の外力の影響だけでなく、壁面形状の影響からも発生することが分かっていたが、逆勾配拡散現象が発生する条件として、リチャードソン数のような無次元スケールの臨界値が決定されていなかった。そのため、乱流熱・物質伝達場において、逆勾配拡散現象の発生を決定する支配スケールパラメータと乱流構造との定量的な関連性を明確にし、現象の発生限界と、乱流構造に与える影響を力学的に調査する必要があった。

2. 研究の目的

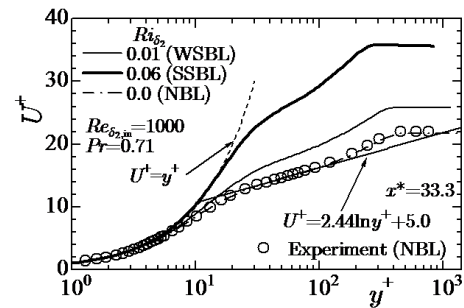
本研究では、安定成層境界層や、剥離・再附着を伴う乱流境界層熱伝達場において、リチャードソン数等の無次元数や、乱流の長さや時間といった支配スケール等、逆勾配拡散現象が発生する条件に関わると予測されるパラメータを整理し、そこから発生限界に対する普遍パラメータを発見することを目的としている。また、乱流熱・物質伝達構造研究の観点から、逆勾配拡散現象が発生する場合の熱・物質輸送の時・空間構造を調査し、逆勾配拡散現象の発生メカニズムに関するさらなる理解を得る。その知見を基に、乱流熱伝達現象制御に応用出来るかを探り、現象予測数値モデルの評価と再構築を行うことも目的としている。

3. 研究の方法

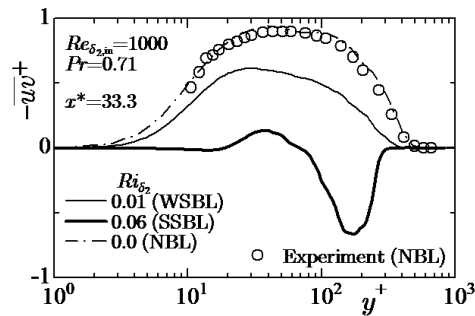
本研究は、「DNS による数値実験」、「現象の検証」、「モデル評価・再構築」、「総括」で構成し、「DNS による数値実験」に対して、他の内容をフィードバックしながら研究を進めた。特に、「総括」では、研究が円滑に進行するように、全体の進捗状況に応じて研究内容の調整と計画の修正をきめ細かく行い、着実に目標に到達できるように研究を推進した。DNS による数値実験によって現象のデータ取得を主に行い、現象の検証とモデル評価・構築を取得したデータにより行った。

4. 研究成果

(1) 温度成層における逆勾配拡散現象発生：図 1 に、本研究で行った DNS によって発生が確認された逆勾配拡散現象を示す。図中の記号 はリチャードソン数であり、成層の強さを表すパラメータである。リチャードソン数の違いにより、WSBL (弱い安定温度成



(a) 平均速度分布



(b) レイノルズせん断応力分布

図 1 逆勾配拡散現象の発生

層境界層：Weakly Stably thermally-stratified Boundary Layer), SSBL (強い安定成層境界層：Strongly Stably thermally-stratified Boundary Layer), NBL (中立成層境界層：Neutrally thermally-stratified Boundary Layer)と分類している。図中の平均速度分布より、それらの勾配が正值であることがわかるが、対応するレイノルズせん断応力の符号が逆転している領域があることがわかる。NBL のように、成層の効果がない乱流境界層の場合では、レイノルズせん断応力と壁面垂直方向乱流熱流束分布の符号は常に正值を取るが、特に SSBL の場合に顕著な負値の分布が出現し、逆勾配拡散現象が明確に再現されている。また、温度場についても同様に逆勾配拡散現象が再現されていることが確認されている。

(2) 壁面効果が作用する場における逆勾配拡散現象発生：壁面効果とは、壁面上に設置された障害物等により流れ場が変化させられる効果であり、壁面に設置されたブロックにより、流れ場が急激に曲げられ、流れ場に剥離、再附着といった現象が現れる。剥離、再附着現象が流れ場に発生すると、流れは逆流を起すが、この場でも逆勾配拡散現象の発生が確認された。

(3) 逆勾配拡散現象が発生する原因：本研究における DNS の結果により、逆勾配拡散現象が発生する場は強い安定成層乱流境界層や壁面効果により流れ場が急激に曲げられる場ということが明らかになった。これらの結果から、逆勾配拡散現象が発生する原因は、強い安定成層効果と曲りによる遠心力の効果であることがわかった。しかしながら、本研究の期間内では、発生に関連するパラメー

ターの限界値(しきい値)までは特定することができなかった。この問題については、今後の研究に引継いでいく予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

H. Hattori, K. Hotta and T. Houra, 2014, "Characteristics and structures in thermally-stratified turbulent boundary layer with counter diffusion gradient phenomenon," International Journal of Heat and Fluid Flow, selected paper, 掲載決定.

H. Hattori, S. Yamada, M. Tanaka, T. Houra and Y. Nagano, 2013, "DNS, LES and RANS of turbulent heat transfer in boundary layer with suddenly changing wall thermal conditions," International Journal of Heat and Fluid Flow, 41, June 2013, pp. 34-44.

H. Hattori, T. Umehara and Y. Nagano, 2013, "Comparative Study of DNS, LES and Hybrid LES/RANS of Turbulent Boundary Layer with Heat Transfer over 2D Hill," Flow, Turbulence and Combustion, April 2013, 90, Issue 3, pp. 491-510.

H. Hattori and Y. Nagano, 2012, "Structures and Mechanism of Heat Transfer Phenomena in Turbulent Boundary Layer with Separation and Reattachment via DNS," International Journal of Heat and Fluid Flow, 37, pp. 81-92.

H. Hattori, S. Yamada and H. Houra, 2012, "DNS Study for Effects of Suddenly-Vanishing Wall Heating in Turbulent Boundary Layer," Journal of Thermal Science and Technology, 7-1, pp. 313-321.

[学会発表](計29件)

- (1) 筒井研二・服部博文・河野周・保浦知也・田川正人, DNSによる熱移動を伴う逆圧力勾配乱流境界層に関する研究, 日本機械学会東海学生会第45回学生員卒業研究発表講演会, 2014.3.17, 名古屋(大同大).
- (2) 服部博文・吉川翔太・保浦知也・田川正人, 2次元丘を通過する成層乱流境界層の乱流構造解析, 第29回生研TSFDシンポジウム, 2014.3.5, 東京(東京大).
- (3) 服部博文・岩瀬仁俊・保浦知也・田川正人, T型混合路内乱流熱伝達と混合のDNSとLES, 第26回数値流体力学シンポジウム, 2013.12.17, 名古屋.
- (4) 服部博文・堀田宏介・保浦知也・田川正人, 温度成層を伴う乱流境界層温度助走区間のDNS, 熱工学コンファレンス2013, 2013.10.19, 青森(弘前大).
- (5) H. Hattori, S. Yoshikawa, T. Houra,

and M. Tagawa, "Structures of Turbulent Heat Transfer having Thermal Stratification in Separated Flow caused by 2-Dimensional Hill," Proceedings of the 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (The 4th ICJWSF), paper No. ICJWSF2013-1114, 6 pages, in CD-ROM, 2013.9.17, Nagoya.

- (6) 服部博文・田中優洋・保浦知也・田川正人, 変化する壁面温度境界条件を持つ乱流境界層温度場の予測と観察, 日本流体力学会年会2013, 2013.9.12, 東京(東京農工大).
- (7) H. Hattori, K. Hotta, T. Houra and M. Tagawa, "Characteristics and structures of turbulent boundary layer with counter diffusion gradient phenomenon," Proceedings of the 8th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 6 pages, in SD-card (paper No. ENV2B), 2013.8.28, Poitiers, France.
- (8) H. Hattori, T. Yasunishi, T. Houra, M. Hirota and M. Tagawa, "Turbulent heat transfer and mixing in T-junction by means of DNS," Proceedings of the Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow -ASCHT2013, paper No. ASCHT0254-T07-1-A, p. 204 (6 pages in CD-ROM), 2013.6.3, Hong Kong.
- (9) 岩瀬仁俊・服部博文・保浦知也・田川正人, 数値計算によるT型混合路内の乱流熱伝達と混合に関する研究, 日本機械学会東海学生会第44回学生員卒業研究発表講演会, H25.3.17, 津(三重大学)
- (10) 河野周・服部博文・保浦知也・田川正人, DNSによるはく離再付着を伴う温度成層乱流境界層の研究, 日本機械学会東海学生会第44回学生員卒業研究発表講演会, H25.3.17, 津(三重大学)
- (11) 服部博文・田中優洋・保浦知也・田川正人, 乱流境界層熱伝達場におけるスカラ一線形性の検証, 第28回生研TSFDシンポジウム, H25.3.8, 東京(東京大)
- (12) 服部博文・安西輝顕・保浦知也・田川正人, DNSによるT型混合路内の乱流熱伝達と混合に関する研究, 第26回数値流体力学シンポジウム, H24.12.18, 東京.
- (13) 吉川翔太・服部博文・保浦知也・田川正人, はく離と再付着を伴う温度成層境界層の乱流熱伝達構造, 熱工学コンファレンス2012, H24.11.17, 熊本(熊本大).
- (14) H. Hattori, K. Hotta, T. Houra and M. Tagawa, "DNS investigation of counter gradient diffusion phenomenon in stably thermally stratified turbulent boundary layer," Proceedings of JSME-CMD ICMS 2012, 2 pages in USB, 2012.10.8, Kobe.

- (15) H. Hattori, M. Tanaka, T. Houra and M. Tagawa, "Numerical study of turbulent heat transfer in boundary layer with various wall thermal conditions," Proceedings of JSME-CMD ICMS 2012, 2 pages in USB, 2012.10.8, Kobe.
- (16) H. Hattori, S. Yoshikawa, T. Houra, M. Tagawa and Y. Nagano, "DNS of Thermally-Stratified Turbulent Boundary Layer over 2-Dimensional Hill," Proceedings of the 7th Turbulence, Heat and Mass Transfer, pp.603-606, and 10 pages in CD-ROM, 2012.9.24, Sicily, Italy.
- (17) 服部博文・吉川翔太・保浦知也・田川正人, 2次元丘を通過する種々の温度成層乱流境界層のDNS, 日本流体力学会年会2012, H24.9.16, 高知(高知大).
- (18) H. Hattori, S. Yamada, M. Tanaka, T. Houra and Y. Nagano, "DNS and Predictions for Turbulent Heat Transfer in Boundary Layer with Suddenly Changing Wall Thermal Conditions," Proceeding of the 9th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements - ETMM9-, Thessaloniki, 6 pages, in USB, 2012.6.6, Greece.
- (19) 服部博文・山田翔平・保浦知也・田川正人, DNSによる乱流境界層熱伝達場のスカラー輸送における線形性の検証, 第49回日本伝熱シンポジウム, H24.5.29, 富山.
- (20) H. Hattori, T. Houra and M. Tagawa, "Investigations of Counter Gradient Diffusion Phenomenon in Thermal Field of Turbulent Boundary Layer by means of DNS," Proceedings of the eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, -TFEC8, 4pages in USB, 2012.3.20, Incheon, Korea.
- (21) 田中優洋・服部博文・保浦知也・田川正人, 数値解析による壁面温度境界条件が変化する乱流温度場境界層に関する研究, 日本機械学会東海学生会第43回学生員卒業研究発表講演会, H23.3.14, 名古屋(名古屋工業大学)
- (22) 吉川翔太・服部博文・保浦知也・田川正人, 2次元丘を通過する温度成層乱流境界層に関する研究, 日本機械学会東海学生会第43回学生員卒業研究発表講演会, H23.3.14, 名古屋(名古屋工業大学)
- (23) 堀田宏介・服部博文・保浦知也・田川正人, 温度成層を伴う乱流境界層の乱流熱伝達構造に関する研究, 日本機械学会東海学生会第43回学生員卒業研究発表講演会, H23.3.14, 名古屋(名古屋工業大学)
- (24) 服部博文・山田翔平・保浦知也・田川正人, 断熱壁を持つ温度場乱流境界層の予測評価, 第25回数値流体力学シンポジウム, H23.12.18, 大阪(大阪大)
- (25) H. Hattori, S. Yamada, H. Houra and M. Tagawa, "Effects of suddenly-vanishing wall heating in turbulent boundary layer," Proceedings of the Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow -ASCHT2011, paper ID #150, 6 pages, 2011.9.24, Kyoto, Japan.
- (26) 服部博文・川島信一・田川正人, 強い温度安定成層を伴う乱流境界層の乱流構造解析, 日本機械学会年次大会2011, H23.9.13, 東京(東京工大)
- (27) 服部博文・田川正人・中村元, はく離・再付着乱流熱伝達解析-DNSと実験の比較, 日本流体力学会年会2011, H23.9.9, 東京(首都大東京)
- (28) H. Hattori, T. Noda, M. Tagawa and Y. Nagano, 2011, "Structures and Mechanism of Heat and Mass Transport Phenomena in Turbulent Boundary Layer with Separation and Reattachment," Proceedings of the 7th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 6 pages in USB, 2011.7.31, Ottawa, Canada.
- (29) 服部博文・野田智揮・山田翔平・田川正人, 再付着点周りの乱流熱伝達構造解析, 第48回日本伝熱シンポジウム, H23.6.3, 岡山
- [図書](計0件)
- [産業財産権]
出願状況(計0件)
- 取得状況(計0件)
- [その他]
なし
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
服部 博文 (HATTORI, Hirofumi)
名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・その他
研究者番号: 30467352