

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06195

研究課題名(和文)複合外力を受ける速度・温度非相似乱流場の熱伝達構造の解明と現象モデルの再構築

研究課題名(英文) Study on structures of turbulent heat transfer phenomena in nonsimilarity fields with combined forces and reconstruction of turbulent heat transfer model

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)・技術職員

研究者番号：30467352

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、熱伝達を伴う乱流中において、浮力や圧力勾配等といった外力が重畳し、かつ速度境界層と温度境界層が非相似場となる複合外力非相似乱流熱伝達現象について、その現象が発生すると考えられる円管などの内部流や温度成層流などの外部流を、高精度数値解法である直接数値シミュレーション(DNS)を用いて解析した。その結果、様々な複合外力非相似乱流熱伝達場における詳細な瞬時場データおよび統計量を取得することに成功し、それらから特殊な乱流熱伝達構造や機構の変化を解明した。また、DNSデータを用い、その複合外力非相似乱流熱伝達場を予測する現象モデルを再構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現実の乱流熱伝達場においては、速度場と温度場が非相似形となり、かつ様々な外的要因が作用するために複雑な場が形成され、その解析は困難を極める。そのため、外的要因を分割し、個々の要因の影響について調査した乱流熱伝達研究は多数見られるが、複数の要因を合理的に考えて調査した研究は希少であり、それらを系統的に解明したことによる学術的意義は高い。また、熱流体現象を利用する機器の設計において、そこにおける複雑な乱流熱伝達場を精度良く予測することが、より機器の熱効率等を向上させることとなるが、本研究では、より精度の高い乱流熱伝達予測モデルを再構築したことにより、社会的な意義も併せ持つ。

研究成果の概要(英文)：In this study, the nonsimilarity turbulent heat transfer phenomena between velocity and thermal fields in both the inner flow (such as a pipe flow) and the outer flow (such as a boundary layer with thermal stratification) with combined external forces such as the buoyancy, the pressure gradient etc. have been explored using the direct numerical simulation (DNS) which is the highest accuracy numerical simulation method for the analyses of turbulent heat transfer phenomena. As the results, both instantaneous and statistical turbulent data in various nonsimilarity turbulent heat transfer phenomena with combined external forces are successfully obtained by the DNS, and the characteristics structure and mechanism in such complex turbulent heat transfer phenomena are revealed using the obtained DNS data. Also, the turbulent heat transfer model for the prediction of predict nonsimilarity turbulent heat transfer phenomena with combined external forces is reconstructed using DNS data.

研究分野：伝熱工学，乱流力学，数値流体工学

キーワード：熱伝達 乱流 数値計算 複合外力 非相似場

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高精度な実験装置から得られるデータと同等以上の数値解を算出できる、壁面乱流の直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation: DNS) を駆使して、以下に示す空間発達する乱流境界層や管内乱流場における様々な乱流熱伝達構造の研究を進め、その物理的な機構や、熱伝達性能の向上方法について探求してきた。それらは、大別すると 平面衝突噴流乱流熱伝達場、種々の外力 (温度成層や逆圧力勾配) を伴う壁面乱流熱伝達場、温度助走区間や壁面加熱条件変化を伴う壁面乱流熱伝達場、種々の障害物により剥離・再付着を伴う壁面乱流熱伝達場、混合流路における壁面乱流温度混合場である。これらの場の大きな特徴は、速度場と温度場の相似性が成立していない場が大半である。代表例として、2次元丘を通過する剥離・再付着を伴う温度成層乱流境界層における壁面摩擦係数 C_f と、スタントン数 St の流れ方向に沿った分布では、丘後方で明らかに非相似場を形成している [丘後方の再付着点 ($C_f = 0$) とスタントン数の極大地点もずれていることも、先行研究の DNS で確認している (Hattori ら, 2016)]。この非相似場は、摩擦係数と熱伝達係数のアナロジーが成立しないことから分かるように、機器の伝熱効率を向上させるためには非常に有効な場であり、そのためには、この非相似場の乱流熱伝達機構を詳細に把握する必要がある。ところで、非相似な場を伴い、かつ温度場の統計量を取得した壁乱流熱伝達場の研究事例は、Reynolds ら (1958, 壁面加熱条件変化)、菱田 (1965, 円管内温度助走区間)、Subramanian and Antonia (1981, 壁面加熱条件変化)、Vogel and Eaton (1985, バックステップ乱流熱伝達場)、Hirota ら (2006, 温度混合流路) 等があるが、この中でも壁乱流熱伝達場の理解に重要な速度と温度の相関である乱流熱流束の空間分布を取得した例は多くはないため、より複雑な熱伝達場になると、空間的などこの場所で乱流熱流束が増減し乱流伝熱現象を支配しているのが分からなくなる。そのため、伝熱性能向上の方策が試行錯誤的になる。また、数値予測により乱流熱流束分布を求めるのも重要な手法であるが、この手法に用いられる壁乱流対応型乱流熱伝達モデルの予測精度は未知な場合が多く、予測精度を評価し、モデルを再構築する際には、乱流熱流束のデータが不可欠であるが、比較するデータが乏しいことが、評価と再構築の障害となっている (そのため、世界のモデル研究者から、先行研究で得た DNS データの提供を多く求められている)。

非相似形を有する壁乱流熱伝達場の機構を解析するためには、基本的な場として壁面温度境界条件の違いによる影響を確認しなければならない。壁面温度境界条件は、壁温一定と壁面熱流束一定の2条件があるが (断熱条件は、熱流束一定条件の特殊形)、簡単に非相似場が形成できる円管内温度助走区間においても、温度境界条件の違いのため、ヌセルト数分布に若干の差異ができ、その原因として乱流熱流束の成長速度の違いがあると解明されたが (Hattori ら, 2015)、なぜ成長速度に違いが出るかは、境界条件の違いによる壁温変化の違いにあるということ以上は明確でない。これに、壁面の形状効果や外力の効果を重ねると、ますます複雑な現象となるため、系統的に研究を進めなければならない。そのため、研究代表者は、より先進的な基礎研究として、二つの影響が組み合わさった乱流熱伝達場についての研究を進めてきた。その研究の一例として、温度成層に逆圧力勾配の影響を重ねさせた場合の、壁面摩擦係数とスタントン数の比の流れ方向分布 (Hattori ら, 2016) は、流路入口において、速度場と温度場は相似である。不安定成層の場合には、逆圧力勾配を重ねさせても大きな変化は観察されなかったことは相似性がほぼ保持されていることを示しているが、安定成層の場合には、大きく値が変化していることから非相似場が形成されたことが分かる。また下流で剥離現象が回避されるような特異な現象も観察され、これは安定成層によるレイノルズ応力や乱流熱流束の減少が、逆圧力勾配によって回復することが原因であることまで突き止められたが、現象が起こるパラメーターの閾値を特定するに至っていないため、制御が難しい。そのため、より幅広くパラメーターを考慮した DNS による数値実験を行う必要があるが、パラメータスタディにならないよう、基本場のより詳細なデータ解析を行う必要もある。また、積極的に非相似場を形成させるために、平面噴流場の壁面を途中から加熱させ、温度助走区間を形成させた場の解析も試みた。この場においては、速度場でも平均速度勾配が0と、レイノルズせん断応力が0となる空間点に差異があることが指摘されており、そのため、レイノルズせん断応力 $-\overline{uv}$ を、平均速度勾配と結びつけて、 $-\overline{uv} = \nu_t (\partial \overline{U} / \partial y)$ とモデル化する勾配拡散型モデルでは (ν_t は運動量の渦拡散係数)、この場の解析は困難であることが予想される。また、温度場の解析では、温度と速度境界層が非相似形となり、平均速度勾配0地点が温度境界層内に存在するため (その付近で ν_t が無大となる)、一定値の乱流プラントル数 Pr_t を用いて熱の渦拡散係数 $\alpha_t (= \nu_t / Pr)$ をモデル化した場合には、 α_t が無大となり、この乱流プラントル数一定とした計算が破たんする可能性もある。非相似性を伴う乱流熱伝達場では、このような問題が起こる場合があることから、非相似場が存在する乱流熱伝達場のさらなるデータ取得と、そのデータによる乱流モデルの評価、再構築は急務であると考えた。

2. 研究の目的

乱流境界層内で、壁面を途中から加熱することによって形成される温度助走区間や、加熱壁面から断熱壁面へ変化させた場合、また流路内に障害物を壁面に設置した場では、速度場と温度場は非相似形になることが知られている。その非相似場が形成された乱流熱伝達場に複合的な外力が作用する場合の熱伝達機構には不明な点が多く、機器等の伝熱性能を向上させるのに必要な摩擦係数の減少と熱伝達率の向上を達成させるには、様々な外力を受ける非相似場における伝熱機構を詳細に調べ、理解する必要がある。そこで、本研究では、乱流場に浮力や圧力勾配等を

複数の外力として掛け、かつ壁面の熱的境界条件を操作することによって、速度場と温度場が非相似となる場を直接数値シミュレーション (DNS) によって再現し、その熱伝達構造及び紊過過程を明らかにすることによってこの複雑乱流熱伝達場の機構を明らかにする。そして、その知見と DNS によって得られたデータを用い、大規模渦シミュレーション (Large Eddy Simulation: LES) やレイノルズ平均シミュレーション (Reynolds Averaged Navier-Stokes equation Simulation: RANS) の乱流モデルを評価、再構築し、乱流熱伝達現象の予測精度を向上させる。

3. 研究の方法

研究 PDCA は「DNS による数値実験」、「現象の検証」、「モデル評価・再構築」、「熱伝達向上への応用」、「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。まず、直接数値シミュレーション (DNS) を数値実験と位置づけて、複合外力が作用する非相似乱流熱伝達場が形成されると予想される以下の DNS を行った。

- (1) 流路途中で壁面熱的境界条件を加熱から断熱へと急激に変化させた、逆圧力勾配を伴う共存対流乱流境界層
- (2) 自由せん断流と境界層が複合する壁面噴流乱流場の速度場に付随する、温度助走区間乱流温度境界層
- (3) 2 方向に浮力が作用する、傾斜した加熱平板上を通過する共存対流乱流境界層
- (4) 温度差がある流体が混合する T 型温度混合流路内の乱流温度混合場
- (5) 平板上および円管内における、入口に局所乱れを与えた速度と温度乱流境界層の疑似助走区間
- (6) すべての壁面が加熱された円筒容器内における乱流噴流熱伝達象
- (7) 様々な外力を伴う種々のプラントル数乱流境界層熱伝達

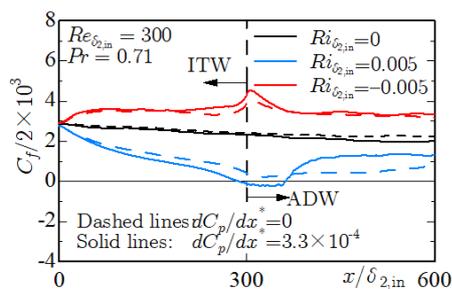
これら数値実験の結果について、乱流熱伝達構造の検証を解析的に行うために、準秩序的な乱流運動とその伴う熱輸送現象の関連を明確にできる 4 象限分類法等の実験的解析法も積極的に用いて解析を行った。また、DNS の優位性である瞬時場のデータを可視化し、これらを併せて現象を観察した。

次に、DNS による数値実験で算出された乱流熱伝達場の統計量を用いて、RANS モデルと LES モデルの評価を行う。評価方法は、DNS データを直接モデルに代入して評価するアプリオリ法と、DNS と同様の場 (RANS においては平均場、LES においては DNS 同様の瞬時場を解き、平均値を比較する) を、モデルを用いて計算した結果を DNS データと比較する、データ検証法の 2 通りを採用した。これらにより、絶対的な乱流熱伝達モデルの予測精度が明確になり、乱流熱伝達場の支配方程式と乱流熱伝達モデルがリンクする場合の総合的な予測精度が明確となることから、現象予測数値モデルの構築の指針を得る。そして、モデル評価で見いだされた既存モデルの欠点と、DNS 結果の解析から得られた知見を基に、LES と RANS で用いる現象予測数理モデルを構築する。

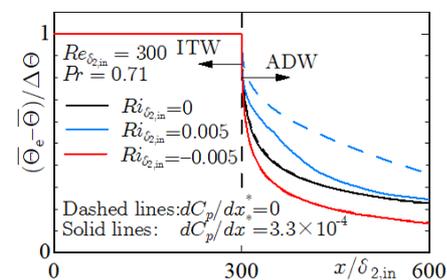
4. 研究成果

研究成果として、特に研究主題が再現できた、上記 (1) の、流路途中で壁面熱的境界条件を加熱から断熱へと急激に変化させた、逆圧力勾配を伴う共存対流乱流境界層の DNS の結果について示す。

壁面の熱的境界条件 (壁の加熱もしくは冷却条件) は、大きく分けて壁温が一定の場合と壁面熱流束が一定の 2 通りがあり、これらは機器の加熱壁面の状態で任意に設定することができる。そのため、壁温一定条件から熱流束一定条件と続く壁や、加熱条件から断熱条件となる (またはその逆) 壁面熱的境界条件が存在する。ここで、断熱条件は、熱流束一定条件の、熱流束が 0 となる特殊条件である。特に注目したのは、これら壁面熱的境界条件が変化する周りにおける、熱伝達現象の変化であるが、これまでの研究では、速度場が変化しない場合が多いため、ここでは、速度場も熱的境界条件の変化に伴い変化するように、共存対流乱流境界層を観察場とした。さらに、速度場の変化による、温度葉の変化も観察するために、圧力が下流方向に増大する逆圧力勾配も付加した。図 1 に、壁温一定から断熱壁へと続く場合の結果を示す。壁面温度が主流温度より高く、浮力の影響がある場合 (図中のリチャードソン



(a) 壁面摩擦係数の変化

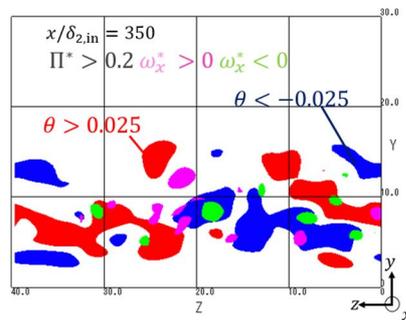


(b) 壁温と主流温度差の変化

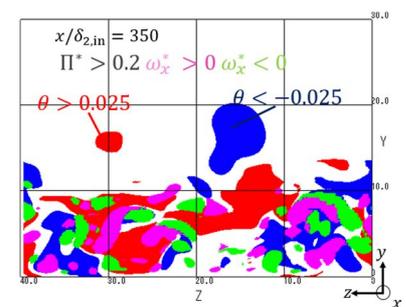
図 1 壁面熱的境界条件が変化 (壁温一定 断熱) する逆圧力共存対流乱流

数 $Ri_{\delta_2, in}$ が $Ri_{\delta_2, in} < 0$ の場合), 図1(a)に示す壁面摩擦係数は, 中立状態(浮力の影響がない場合)と比較して高くなるが, 断熱後は図1(b)のように, 壁温と主流温度差が急激に小さくなるため, 浮力の影響が弱くなり, 摩擦係数が減少していることが観察できる. ここで, 図中の破線は, 圧力勾配がない場合(零圧力勾配)であり, $Ri_{\delta_2, in} < 0$ の場合では, 逆圧力勾配の場合がアルバイト比較してあまり変化がなく, 温度差による浮力の影響が強いことがわかる. 逆に, 壁面温度が主流温度より低い場合($Ri_{\delta_2, in} > 0$)には, 圧力勾配の有無で摩擦係数の断熱後の変化に違いがでていることが観察できる. この場合においては, 図1(b)の温度差を見ると, 逆圧力勾配が作用した時の断熱後の温度差がより小さくなっていることから, 急激に浮力の影響が小さくなり, 摩擦係数が増大していると考えられる. このことを更に詳しく調べるために, それぞれの圧力勾配下の断熱壁面上における変動構造を図2に示す. $Ri_{\delta_2, in} > 0$ では, 乱れが減衰することが知られているが(例えば, Hattori ら 2007, 2014), 零圧力勾配の場合には, 減衰した乱れが断熱壁面上の特に壁面近くで回復していないことがわかる(桃色が紙面に向かって反時計回りの渦構造, 緑色はその逆回り, また, 赤色は正值の, 青は負値の温度変動). 一方, 逆圧力勾配下では, 逆圧力勾配の影響が効いているため, 壁面近くの乱れ変動が再活発化していることが明確に観察される. よって, $Ri_{\delta_2, in} > 0$ の場合のような浮力により減衰した乱流場では, 圧力勾配の有無により, 断熱壁へと熱的境界条件が変化した時には, その統計量に大きな差異があることがわかった.

次に, 乱流熱伝達モデルの再構築を行う検証場として, 温度差がある流体が混合するT型温度混合流路内の乱流温度混合場を選択した. この乱流温度混合場は, 流路がT型に接合されているため, 枝管からの流路が直角に曲がるため, 流れ場に対して曲率の影響(遠心力)が作用する. また, 剥離, 再付着現象も現れ, その影響も温度混合に作用する. そのため, 乱流熱伝達モデルを再構築する上で, モデルの予測値を検証する場として最適な場の一つであると考えた. 図3(a)に, DNSの計算結果から得られたT型温度混合流路内の乱流温度混合場の流線と温度分布を示す. このT型温度混合流路では, 図左上の主管上流から下流へと一様に温度の低い流体(青色)が流入し, その下の枝管から一様に温度の高い流体(赤色)が流入するように, 条件を設定している. そのため, 管の接合部から下流にかけて, 温度差がある流体が混合され, 温度分布が形成される. また, 接合部で, 枝管からの流れが剥離し, 下流で再付着するため, そこで再循環領域が形成されていることが観察できる. この再循環領域では, 枝管からの高温流体が流入しているだけのように見られることから, 温度混合がほとんど促進されず, 剥離に伴う再循環領域が混合現象を阻害する要因であると考えられる. そのため, このT型温度混合流路における乱流温度混合現象を正確に予測するためには, この再循環領域の再現が鍵となる. 図3(b)に, 既存の乱流モデルによる, 再循環領域下の壁面における摩擦係数の予測値を示した. 評価した乱流モデルは, 最も予測精度の高い乱流モデルの一つの, 低レイノルズ数型 $k-\varepsilon-2$ 方程式モデルである, Launder-Sharmaモデル(1974), Abe-Kondoh-Naganoモデル(AKN, 1994), $S-\Omega$ モデル(Nagano-Hattori, 2015)とした. 図から明らかのように, 再循環領域では, 壁面摩擦係数が負値となり, その下流の再付着点($x/D \sim 4$)から正值となるが, どのモデルも定性的には予測しているが, 定量的な一致は見ない. 特に再循環領域上流における予測不足が目立つ. この原因として, 再循環領域では, 乱流状態の変化が大きくなることからDNSの観察から分かったが, 乱流モデルがその変化を予測できないために, 予測不足になった

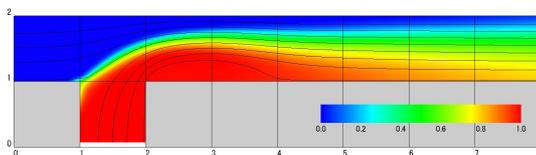


(a) 零圧力勾配

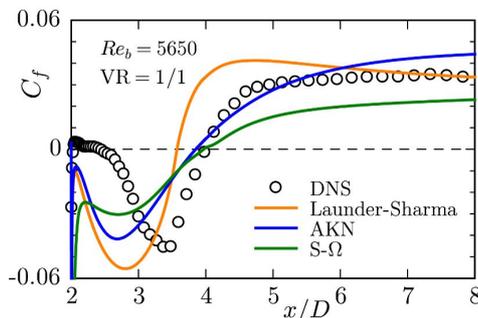


(b) 逆圧力勾配

図2 壁面熱的境界条件が変化(壁温一定 断熱)する逆圧力共存対流乱流場の断熱壁上の乱流変動構造 ($Ri_{\delta_2, in} > 0$)



(a) 流線と温度分布



(b) 乱流モデルによる壁面摩擦係数の予測
図3 T型温度混合流路内の乱流温度混合場

と考えられる。そこで、この予測不足を補うために、混合時間スケール概念が導入されている $S-\Omega$ モデルをベースに、壁面近くの乱流挙動の予測精度を改良した、温度場も予測できる乱流熱伝達モデルを提案した。提案した乱流熱伝達モデルによる、再循環領域から下流における壁面摩擦係数の予測値を図4に示す。提案したモデル(図中の Present)では、再循環領域の最上流で若干の際は見られるものの、ほぼ DNS の結果を予測していることがわかり、乱流モデルの改良の正しさを証明している。次に、T型温度混合流路内における、乱流温度混合場の混合度を予測した結果を、次式に示す混合度 M として図5に示す。

$$M = 1 - \frac{\int_1^2 |\bar{\theta} - \theta_b| dy}{\int_1^2 |\theta_s - \theta_b| dy}$$

ここで、 θ_s は $x/D = 2$ におけるバルク温度、 θ_b は各断面におけるバルク温度である。提案した乱流熱伝達モデルは、下流で若干の予測不足を示しているが、他のモデルと比較すると、最も良い予測値を示している。この予測不足の傾向は、LES モデルでは観察されないため、RANS モデル特有の予測傾向と考えられ、今後、さらなるモデル改良を行わなければならないことが、本研究の成果として挙げられる。

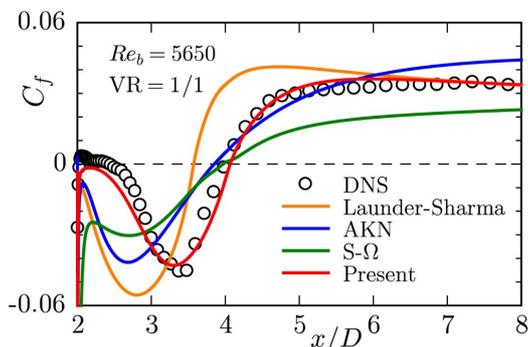


図4 新提案した乱流モデルによる T 型温度混合流路内の乱流温度混合場の壁面摩擦係数の予測

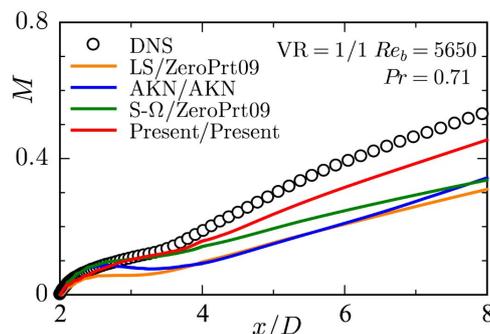


図5 乱流モデルによる T 型温度混合流路内の乱流温度混合場の混合度の予測

引用文献

- Abe, K., Kondoh, T. and Nagano, Y., "A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows - I. flow field calculations," International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 37, 1994, pp. 139-151
- Hattori, H., Yoshikawa, S., Houra, T. and Tagawa, M., "Turbulent Heat Transfer in Thermally-Stratified Boundary Layer over Two-Dimensional Hills by means of DNS," Proceedings of the First Pacific Rim Thermal Engineering Conference, PRTEC, March 13-17, 2016, Hawaii's Big Island, USA, PRTEC-14881 (5 pages)
- Hattori, H., Kono, A. and Houra, H., "Direct numerical simulation of thermally-stratified turbulent boundary layer subjected to adverse pressure gradient," International Journal of Heat and Fluid Flow, 61A, pp. 213-228, October 2016
- Hattori, H., Hosyaku, A., Kamiya, K., Houra, T. and Tagawa, M., "DNS for Turbulent Heat Transfer in Thermal Entrance Region of Pipe Flow," Proceedings of the Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow -ASCHT2015, 23-26 November, 2015, Busan, Korea, ASCHT15-Tue04-007, 6 pages in USB
- Hattori, H., Houra, H. and Nagano, Y., "Direct Numerical Simulation of Stable and Unstable Turbulent Thermal Boundary Layers," International Journal of Heat and Fluid Flow, 28-4, pp. 1262-1271, 2007.
- Hirota, M., Asano, H., Nakayama, H., Asano, T. and Hirayama, S., "Three-dimensional structure of turbulent flow in mixing T-junction," JSME International Journal, Vol. 49, 2006, pp. 1070-1077
- 菱田幹雄, 管内助走区間の温度分布, 日本機械学会論文集, 31 巻 222 号, 1965, pp. 233-242
- Launder B. E. and Sharma B. I., "Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc," Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, No.2, 1974, pp.131-137
- Nagano, Y. and Hattori, H., "Improvement of an LRN Two-Equation Turbulence Model reflecting Multi-Time Scales," International Journal of Heat and Fluid Flow, invited paper, 51, pp. 221-228, February 2015
- Reynolds, W C, Kays, W M and Kline, S J, "Heat transfer in the turbulent incompressible boundary layer, I-constant wall temperature," NASA MEMO, 12-3-58W, 1958
- Subramanian, C S and Antonia, R A, "Response of a turbulent boundary layer to a sudden decrease in wall heat flux," Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 24, 1981, pp. 1641-1647
- Vogel, J. C. and Eaton, J.K., "Combined heat transfer and fluid dynamic measurements downstream of a backward-facing step," Transaction of ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 107, 1985, pp.922-929.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Hattori and K. Tsutsui	4. 巻 11
2. 論文標題 Multi-Time-Scale Turbulent Heat Transfer Model for Predictions of Various Turbulent Heat Transfer Phenomena	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1007/s12572-018-0234-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Hattori, T. Houra, A. Kono and S. Yoshikawa	4. 巻 139
2. 論文標題 Computational fluid dynamics study for improvement of prediction of various thermally stratified turbulent boundary layers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ASME Journal of Energy Resources Technology	6. 最初と最後の頁 051209-051209-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4036177	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計32件（うち招待講演 0件／うち国際学会 10件）

1. 発表者名 H. Hattori, E. Ichikawa, T. Houra and M. Tagawa
2. 発表標題 LES study on turbulent heat transfer and mixing in T-junction channel flow with various wall thermal conditions
3. 学会等名 The 7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Hattori, K. Oura, H. Okabe, T. Houra and M. Tagawa
2. 発表標題 Structures and characteristics of turbulent heat transfer in combined-convection turbulent boundary layer on inclined flat plate
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena（国際学会）
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Hattori, K. Oura, T. Houra and M. Tagawa
2 . 発表標題 DNS of combined-convection turbulent boundary layer on tilted flat plate
3 . 学会等名 The 29th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP29) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Inagawa, H. Hattori, T. Houra and M. Tagawa
2 . 発表標題 DNS study on combined-convection turbulent boundary layer with adverse pressure gradient on varying wall thermal conditions
3 . 学会等名 The 12th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements (ETMM12) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Hattori, K. Oura, T. Houra and M. Tagawa
2 . 発表標題 DNS study for characteristics and structures of combined-convection turbulent boundary layer along vertical flat plate
3 . 学会等名 The 16th International Heat Transfer Conference (IHTC16) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Hattori, Y. Murayama, T. Houra and M. Tagawa
2 . 発表標題 DNS study on characteristics and structures of turbulent heat transfer n thermally-stratified boundary layer over 2d hill
3 . 学会等名 The 9th Turbulence, Heat and Mass Transfer (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 稲川陽介・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 逆圧力勾配共存対流乱流境界層における壁面熱的境界条件の影響に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第68期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永井義男・保浦知也・田川正人・服部博文
2. 発表標題 乱流を伴うH型混合流路内の温度混合に関する研究
3. 学会等名 日本伝熱学会東海支部平成30年度支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宇佐美達也・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 2次元丘を通過する共存対流乱流境界層の予測に関する研究
3. 学会等名 日本流体力学会第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古川達也・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 壁面噴流内における乱流熱伝達構造と特性に関するDNS解析
3. 学会等名 日本流体力学会第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 只野遥・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 円管内の複合対流乱流境界層の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲川陽介・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 急変する壁温条件を有する平板上の逆圧力勾配共存対流乱流境界層に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 服部博文・大浦一樹・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 DNSによる傾斜平板上の共存対流乱流境界層に関する研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 服部博文・大浦一樹・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 傾斜平板上の共存対流乱流境界層の熱伝達特性に関するDNS研究
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲川陽介・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 逆圧力勾配共存対流乱流境界層における壁面熱的境界条件变化の影響に関する研究
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大浦一樹・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 DNSによる傾斜平板共存対流乱流境界層の熱伝達構造解析
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第67期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村山友規・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 種々の高さを有する2次元丘を通過する共存対流乱流境界層のDNS研究
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第67期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲川陽介・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 壁面熱的境界条件が変化する逆圧力勾配共存対流乱流境界層の熱伝達構造解析
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第67期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Hattori, M. Kuroki, T. Houra and M. Tagawa
2 . 発表標題 DNS of heat transfer phenomena in plane turbulent wall jet with thermal entrance region
3 . 学会等名 The 10th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Hattori, K. Oura, T. Houra and M. Tagawa
2 . 発表標題 DNS of combined-convection turbulent boundary layer on vertical heated flat plate
3 . 学会等名 16th European Turbulence Conference (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Hattori, M. Kuroki, T. Houra and M. Tagawa
2 . 発表標題 DNS of combined-convection turbulent boundary layer on vertical heated flat plate
3 . 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Hattori, K. Tsutsui, M. Kuroki, T. Tomida, K. Narukawa, T. Houra, and M. Tagawa
2 . 発表標題 Turbulent heat transfer model with multi-time scales for predictions of turbulent heat transfer and mixing phenomena in complex flows
3 . 学会等名 Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 大浦一樹・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 垂直平板上の共存対流乱流境界層における乱流熱伝達構造解析
3. 学会等名 第54回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大浦一樹・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 DNSによる垂直平板共存対流乱流境界層の乱流熱伝達構造解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 服部博文・筒井研二・生川功祐・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 乱流熱伝達場を予測するマルチタイムスケール乱流熱伝達モデルに関する研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 服部博文・稲川陽介・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 壁面熱的境界条件が変化する逆圧力勾配安定成層乱流境界層のDNS
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 稲川陽介・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 DNSによる逆圧力勾配を伴う壁面熱的境界条件が変化する共存対流乱流境界層の構造解析
3. 学会等名 第15回日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村山友規・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 2次元丘を通過する温度成層乱流境界層の乱流熱伝達構造のDNS研究
3. 学会等名 日本流体力学会第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大浦一樹・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 傾斜平板共存対流乱流境界層のDNS
3. 学会等名 日本流体力学会第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 稲川陽介・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 壁面熱的境界条件が変化する逆圧力勾配共存対流乱流境界層の熱伝達構造解析
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第67期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村山友規・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 種々の高さを有する2次元丘を通過する共存対流乱流境界層のDNS研究
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第67期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大浦一樹・服部博文・保浦知也・田川正人
2. 発表標題 DNSによる傾斜平板共存対流乱流境界層の熱伝達構造解析
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第67期総会・講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考