

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01620

研究課題名（和文）レイノルズ数効果の流体物理と内層乱流応力バランスモデリング

研究課題名（英文）Flow physics of Reynolds number effects and stress-balance modeling of inner-layer turbulence

研究代表者

河合 宗司 (Kawai, Soshi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：40608816

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、航空機やロケットノズル設計など工学的に重要となる (1) 剥離・再付着を伴う非平衡乱流境界層現象、および (2) 壁面での加熱・冷却を伴う熱乱流境界層現象をターゲットとし、高レイノルズ数流れにLESを適用可能とするLESの内層乱流モデル（壁面モデル）の確立を目指し研究を進めた。本研究ではまず、高忠実な大規模LES解析を実施し、内層乱流現象の非平衡効果や熱との干渉効果における内層乱流応力バランスやその流体现象を明らかにした。また明らかした物理法則やその流体现象を考慮し、簡易で汎用的な非時間発展型・常微分方程式ベースの内層乱流モデルを提案し、その有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

剥離・再付着、加熱・冷却を伴う高レイノルズ数乱流境界層現象は、輸送・エネルギー・環境に関わる航空機やロケット、船舶や大型風車などの性能や安全性に影響を及ぼす重要な流体现象である。本研究で提案する簡易で汎用的なLESの内層乱流モデルは、高レイノルズ数条件での高忠実な流体解析を可能とする手法であり、これらの流体機械を設計する上で重要な役割を果たすと考えられる。また本研究は、学術的にも高レイノルズ数乱流境界層現象の理解や物理モデリングの観点から貢献している。なお構築した高忠実な流体データベースは多くの研究者が活用できるよう公開する予定であり、学术界・産業界コミュニティに広く貢献したいと考えている。

研究成果の概要（英文）：This study investigated inner-layer turbulence modeling (wall modeling) for high-fidelity LES at practical high Reynolds numbers. The flowfields considered are (1) separated and reattached non-equilibrium turbulent boundary layers and (2) thermal turbulent boundary layers with heated and cooled walls. High-fidelity large-scale wall-resolved LES were first conducted to clarify the stress balance of inner-layer turbulence and its flow physics. Then, based on the physical laws and flow physics identified, a simple, general-purpose, non-time evolving, and ordinary-differential-equation-based inner turbulence modeling was proposed.

研究分野：圧縮性流体力学、数値流体力学、航空宇宙工学

キーワード：乱流境界層 高レイノルズ数流れ 数値流体力学 LES

1. 研究開始当初の背景

高レイノルズ数条件での流体现象およびその流体现象が生み出す空気力や熱流束は、様々な流体機械の性能や安定性、さらには熱環境に大きな影響を及ぼすことが知られている。特に剥離や再付着、壁面熱流束を伴う高レイノルズ数の乱流境界層現象は、航空機やロケットノズルの空力特性や安全性に大きな影響を持つため、設計段階で高精度な予測評価が必要となる。

このような中、申請者らは剥離や再付着、壁面熱流束を伴う複雑な乱流現象を高忠実にシミュレーション可能とする Large-eddy simulation (LES) に着目し、LES が可能なレイノルズ数を飛躍的に上げる LES の内層乱流モデル (壁面モデル) を開発してきた [S. Kawai, J. Larsson, *Physics of Fluids*, 24, 015105, (2012) (引用文献[1])]。しかし本壁面モデルは、剥離や再付着、壁面熱流束を伴わない、比較的単純な付着平衡乱流境界層の内層乱流現象を扱いやすい常微分方程式でモデル化したものに止まる。したがって、本研究で着目する剥離や再付着を伴う非平衡乱流境界層現象や、壁面熱流束を伴う熱乱流境界層現象に対する内層乱流モデリングの確立は、学術研究および工学応用の両面から重要な課題といえる。

本研究では、これまで申請者らが開発してきた高精度圧縮性流体ソルバ、およびスーパーコンピュータ「京」を用いた壁面まで準直接的に解像する通常の大規模 LES 解析を実施し、剥離・再付着や熱との干渉を伴う複雑な乱流境界層現象の詳細を明らかにできれば、その現象理解を基により汎用的な LES の内層乱流モデルが確立できるのではと考え、研究を実施した。

2. 研究の目的

本研究では、実際の高レイノルズ数流れに LES を適用可能とする、剥離・再付着や熱との干渉を伴う乱流境界層現象における内層乱流応力バランスを満たす LES の内層乱流モデル (壁面モデル) の確立を目的とする。なお、内層乱流モデルの構築では、簡易で汎用的なモデルの構築を目指し、非時間発展型・常微分方程式ベースの内層乱流モデルの確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、航空機やロケットノズル設計など工学的に重要となる (1) 剥離・再付着を伴う非平衡乱流境界層現象、および (2) 壁面での加熱・冷却を伴う熱乱流境界層現象、の 2 つの乱流境界層現象をターゲットとし、LES の内層乱流モデル (壁面モデル) の確立を試みる。研究方法としては、まず高忠実な大規模 LES 解析を実施し、内層乱流現象の非平衡効果や熱との干渉効果における内層乱流応力バランスやその流体现象を明らかにする。本 LES 解析により、非定常な剥離・再付着現象や熱との干渉現象、またその乱流統計量や応力バランスなど、高忠実な大規模流体データベースを構築し、内層乱流応力バランスの物理法則を明らかにすることを試みる。またその後、明らかにした内層乱流応力バランスの物理法則やその流体现象を考慮し、内層乱流モデルの確立を試みる。なお、本大規模 LES データベースは、開発する内層乱流モデル (壁面モデル) の比較・検証用データとしても活用する。また加えて、モデルの構築では、従来の物理法則の理解を基盤とした解析的アプローチに加え、機械学習や不確かさの定量化などデータ駆動的アプローチの可能性についても研究を進める。

4. 研究成果

(1) 剥離・再付着を伴う非平衡乱流境界層現象の内層乱流モデリング

剥離・再付着を伴う非平衡乱流境界層現象は、航空機をはじめとする様々な流体機械の空力特性や安定性に関わる重要な流体现象である。本研究では翼全体ではなく、その一部を切り取り単純化した剥離・再付着を伴う平板乱流境界層現象を対象とする。まず現象理解やその後の検証データともなる大規模 LES 解析を実施した。図 1 は解析した流れ場の概要を示している。流れ条件は、航空機の離着陸時を想定し、主流マッハ数 $M_\infty = 0.2$ 、レイノルズ数はスーパーコンピュータ「京」を用い出来るだけ高いレイノルズ数条件 $Re_\theta = 2 \times 10^3$ とした。計算領域上部境界で吹き上げ・吹き下ろしの境界条件を課すことで、前半領域では逆圧力勾配による剥離が、後半領域では順圧勾配による再付着が誘起される条件を設定した。また乱流統計量や乱流応力バランスなどの統計量の格子収束性を確認し、総格子点数は約 16 億点とした。本 LES 解析により高忠実な大規模流体データベースを構築し、特に剥離・再付着を伴う非平衡乱流境界層現象における流れ方向運動量・内層乱流応力バランスの物理法則を明らかにする目的で解析を実施した。本解析により、単純な付着平衡乱流境界層では無視される非平衡項 (対流項や圧力勾配項) の効果が無視できないこと、また内層領域の上端部分では、非平衡項である対流項と圧力勾配項がおおよそ

ランスすることが明らかとなった。加えて理論解析から、対流項は壁面に向かって運動量流束 (ρu^2) に比例して減少することを示した。圧力勾配項については、予想通り、壁面に向かって変化はなく、おおよそ一定値を取ることも示した。

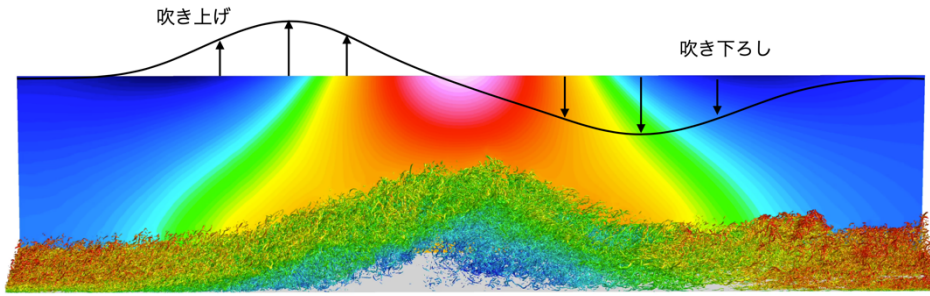


図 1 Schematic of separated and reattached flat-plate turbulent boundary layer induced by pressure gradient.

次に LES 解析から明らかにした内層乱流応力バランスの物理法則を考慮し、引用文献[1]でモデル化した平衡項に加え、非平衡項 (対流項や圧力勾配項) のモデル化を実施した。また本研究で新規提案する内層乱流モデルは、より簡易で汎用的な非時間発展型・常微分方程式ベースの非平衡内層乱流モデル (非平衡壁面モデル) を提案しており、その点が新しい。対流項のモデル化では、上記のデータベース解析と理論解析の結果より、壁面モデルのマッチング高さにおける圧力勾配とバランスするとして、 $-dp/dx$ とモデル化し、さらに壁面に向かって運動量流束 (ρu^2) に比例して減少するとモデル化した。また圧力勾配項は、データベース解析で明らかになったように、マッピング高さにおける圧力勾配と等しく、壁面垂直方向に変化しないとモデル化した。さらには、平衡項で用いる乱流渦粘性係数も、非平衡効果を考慮したモデル化を提案した。

図 2 は、上記で新規開発した非平衡項 (対流項や圧力勾配項) の LES データベースによるアプリオリテストの結果である。参照 LES データと本提案非平衡モデルが非常に良い一致を示し、内層乱流の非平衡効果が常微分方程式で精度良く再現できていることが確認できた。次に本非平衡モデルを用いた壁面モデル LES を LES 解析で用いた流れ場と同条件で実施し、比較することで本提案モデルの妥当性を検証した。なお壁面モデル LES では内層乱流をモデル化することにより、必要となる格子点数約 9000 万点と通常の LES 解析 (16 億点) と比べ大幅に削減され、時間積分幅も約 10 倍と大きくすることが可能となる。以上により、壁面モデル LES では、通常の LES 解析と比べ約 100 倍のコスト削減となる。図 3 はその比較であり、提案非平衡モデルを用いた壁面モデル LES の結果は、参照解である LES データとよく一致しており、剥離・再付着を伴う非平衡乱流境界層現象の高精度な予測が実現できることを確認した。様々な剥離を伴う非平衡現象に対する本モデルの有効性検証は今後の課題として残るが、内層乱流の非平衡効果を単純な常微分方程式としてモデル化に成功した研究成果である。なお本研究成果は、現在、国際学術論文誌への投稿準備中である。

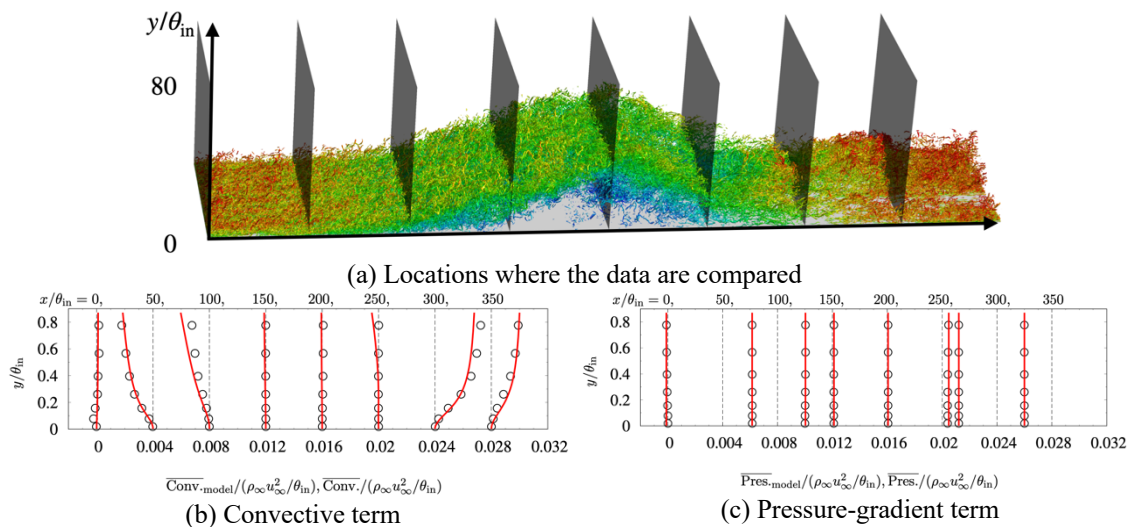


図 2 A priori test of modeled non-equilibrium convective and pressure-gradient terms. Circles, reference wall-resolved LES data; red lines, modeled non-equilibrium terms.

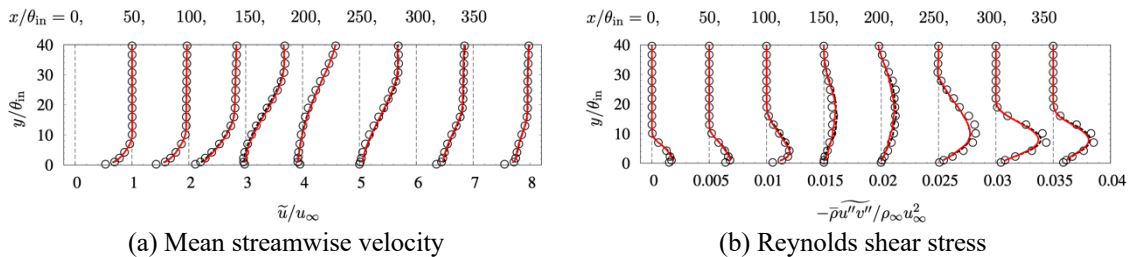


図3 (a) Mean streamwise velocity and (b) Reynolds shear stress obtained by the LES of the proposed non-equilibrium wall model. Circles, reference wall-resolved LES data; red lines, wall-modeled LES with proposed non-equilibrium model.

(2) 壁面での加熱・冷却を伴う乱流境界層現象の内層乱流モデリング

壁面からの熱流束を伴う乱流境界層現象は、再生冷却されるロケットノズル内やタービン翼列などの性能や熱環境に影響を及ぼす重要な流体现象である。(1)の剥離・再付着乱流境界層解析と同様に、ここでも単純化した加熱・冷却壁を伴う平板乱流境界層現象を対象とした。まず現象理解やその後の検証データともなる壁面まで準直接的に解像する通常の大規模 LES 解析を実施した。図4は解析した流れ場の概要を示している。流れ条件は、ロケットノズル内の流れを想定し、主流マッハ数が超音速となる $M_\infty = 2.28$ 、レイノルズ数はスーパーコンピュータ「京」を用い出来るだけ高いレイノルズ数条件 $Re_\theta = 2.5 \times 10^3$ とした。壁面温度 T_w は回復温度を T_r とした時に $T_w/T_r = 0.5, 1.0, 2.0$ の全3ケースを解析した。 $T_w/T_r < 1.0$ のときに壁面冷却条件、 $T_w/T_r > 1.0$ のときに壁面加熱条件、 $T_w/T_r = 1.0$ のときに擬似断熱条件である。ここでは加熱・冷却により壁面近傍内層域の乱流構造や乱流統計量が複雑に変化することが想定される。内層乱流の統一的なモデリングを試みる本研究では、特にこれらの複雑な流体现象を普遍的に表現できるパラメータは何になるかという観点に着目して解析を実施した。この観点から、通常の理想流体に加え、粘性係数が密度の平方根に比例する($\mu/\mu_\infty = \sqrt{\rho/\rho_\infty}$) 仮想流体を設定し、乱流境界層内の局所レイノルズ数 $Re_\tau^* = \sqrt{\rho}\sqrt{\tau_w}\delta_{99}/\mu_w$ が一定となる数値実験も実施した。なお本研究成果の詳細は我々の学術論文 [R. Hirai, R. Pecnik, S. Kawai, *Physical Review Fluids*, 6, 124603, (2021) (引用文献[2])] を参照して頂きたい、ここではその概要のみを述べる。

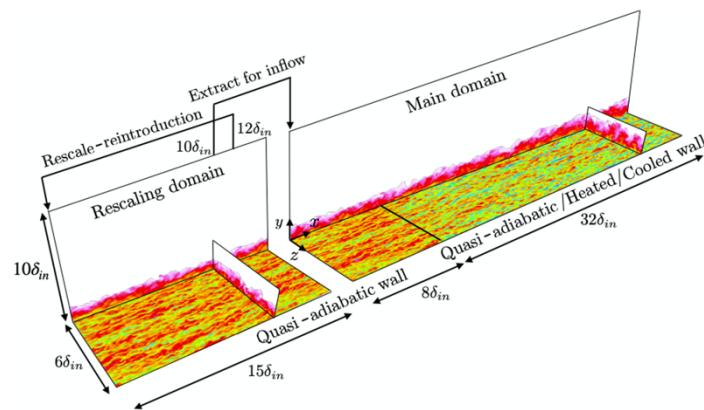


図4 Schematic of quasi-adiabatic, heated, and cooled flat-plate turbulent boundary layers.

図5は、 $y^* \approx 15$ 高さの壁面平行断面における瞬間の主流方向速度変動を示しており、領域の長さスケールは局所的な粘性スケールで規格化している ($l^* = \sqrt{\rho}\sqrt{\tau_w}l/\mu$)。図5左列の理想流体の場合は壁面温度境界条件(擬似断熱壁、加熱壁、冷却壁)により壁面近傍の乱流スケールが大きく異なることが分かる。一方、仮想的な流体を考え局所レイノルズ数を一定とした場合は(図5右列)、壁面での加熱・冷却の有無に関わらず乱流スケールの違いがほとんどないことが明らかとなった。すなわち壁面近傍で発達する乱流現象は、壁面での加熱・冷却による流体の温度や密度などの熱力学の変数そのものが直接影響しているのではなく、局所レイノルズ数という無次元数の空間変化が流れ場を支配しているパラメータであることを示唆している。言い換えると、断熱・加熱・冷却に関わらず局所レイノルズ数が一定であれば、同じ流れ場が得られる。ここでは壁面近傍の乱流構造のみを示したが、引用文献[2]に示されているように、乱流統計量についても局所レイノルズ数が一定であれば、普遍的な分布が得られることが明らかとなっている。またここでは、局所的な粘性スケールで長さスケールを規格化することの重要性が示唆されており、次に示す内層乱流モデリングではその知見を反映させた。

次に、壁面近傍の乱流構造や乱流統計量は、局所的な粘性スケールで長さスケールを規格化できるとの知見を考慮した内層乱流現象のモデル化に着手した。本研究では、平衡項のモデル内で用いる乱流渦粘性係数の壁面近傍ダンピング関数において、通常用いる壁での粘性スケールに

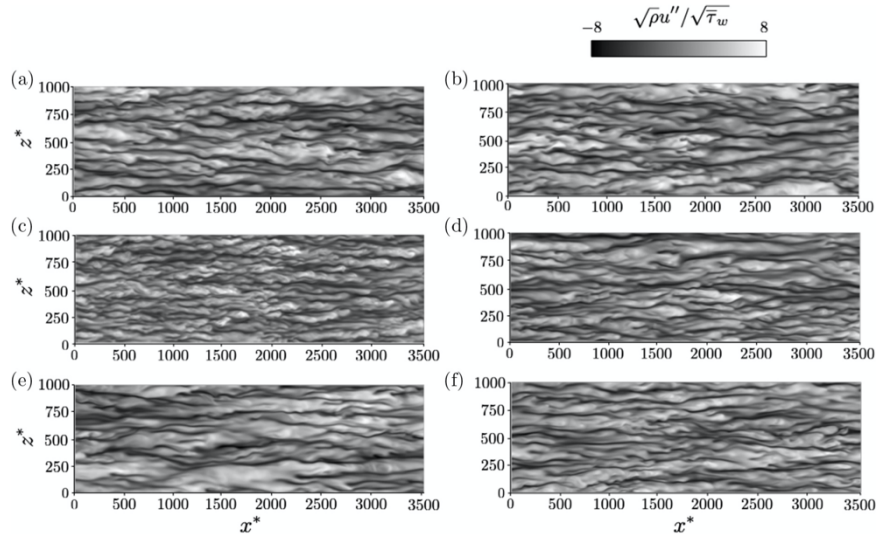


図 5 Instantaneous near-wall streamwise velocity fluctuations at $y^* \approx 15$ in quasi-adiabatic, heated, and cooled flat-plate turbulent boundary layers. Left figures, ideal gas cases; right figures, constant Re_τ^* cases. (a)(b) quasi adiabatic wall, (c)(d) heated wall, (e)(f) cooled wall.

変えて、局所的な粘性スケールで長さスケールを規格化するモデル化を実施した。図 6 はその結果であり、本提案内層乱流モデルを用いた壁面モデル LES、および従来の壁面モデル LES[1] を通常の LES 解析で用いた流れ場と同条件で実施し、比較することで本提案モデルの妥当性を検証した。図 6 より、本提案モデルを用いることで断熱・加熱・冷却の全てのケースで予測精度が大幅に向上することが明らかとなり、本提案モデルの有効性が示された。なお、(1)で提案した内層乱流モデルと本モデルは統一的に記述することが可能であり、様々な流れに対して有効となる統一的内層乱流モデル(壁面モデル)の構築という観点での成果ともなっている。今後は、壁面での加熱・冷却を伴う非平衡剥離乱流境界層現象への本モデルの有効性を検証していく予定である。

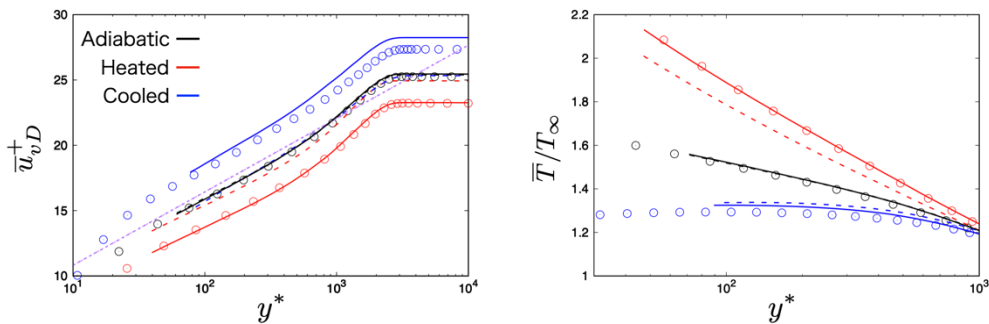


図 6 Mean streamwise velocity (left) and mean temperature (right) distributions in quasi-adiabatic, heated, and cooled flat-plate turbulent boundary layers. Circles, reference wall-resolved LES data; solid lines, proposed wall-modeled LES; dashed lines, existing wall-modeled LES[1].

加えて本研究では、物理法則の理解を基盤とした既存の解析的アプローチに加え、データ駆動的アプローチによる物理モデル構築の可能性についても研究を進めた。機械学習を用いた壁面モデル LES の構築に関する試みでは、入力特徴量を物理法則に従い工夫することで、機械学習を用いて壁面近傍の数値エラーを多く含む物理量から、正しい内層乱流モデルを構築できることを示した。本アプローチは、入力特徴量を適切に工夫する必要があるが、機械学習を用いた物理モデリングの可能性を示すものであり、現在、国際学術論文誌への投稿準備中である。また不確かさを定量化したデータの解析から物理モデルの評価・構築を行う試みでは、不確かさに対する応答を局所スケールと大域的スケールに分けるサロゲートモデリングを提唱し、テスト問題において本手法の有効性を示す成果を得ている。

引用文献

- [1] S. Kawai, J. Larsson, Wall-modeling in large eddy simulation: length scales, grid resolution and accuracy, *Physics of Fluids*, 24 (1), 015105, (2012).
- [2] R. Hirai, R. Pecnik, S. Kawai, Semi-local Reynolds number's effects in scaling turbulent statistics for wall heated/cooled supersonic turbulent boundary layers, *Physical Review Fluids*, 6, 124603, (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuichi Kuya, Soshi Kawai	4. 巻 200
2. 論文標題 A stable and non-dissipative kinetic energy and entropy preserving (KEEP) scheme for non-conforming block boundaries on Cartesian grids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 104427 ~ 104427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2020.104427	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 松尾 裕一, 阿部 浩幸, 河合 宗司	4. 巻 67
2. 論文標題 実フライトレイノルズ数の空気力学に関する科学工学研究の側面	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会誌	6. 最初と最後の頁 304 ~ 309
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14822/kjsass.67.9_304	査読の有無 無
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 下山幸治	4. 巻 59
2. 論文標題 ベイズ最適化: 基礎と流体機械設計への応用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 油空圧技術	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 下山幸治	4. 巻 47
2. 論文標題 設計最適化による「ものづくり」	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 705 ~ 712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 下山幸治	4. 巻 122
2. 論文標題 流体機械の最適設計とUQ	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会誌	6. 最初と最後の頁 14~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 河合宗司	4. 巻 37
2. 論文標題 圧縮性流体のLarge-eddy simulation と航空宇宙分野への展望	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 481-486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Koji Shimoyama, Soshi Kawai	4. 巻 62
2. 論文標題 A Kriging-Based Dynamic Adaptive Sampling Method for Uncertainty Quantification	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 137-150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.62.137	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 Nao Shima, Yuichi Kuya, Yoshiharu Tamaki, Soshi Kawai	4. 巻 427
2. 論文標題 Preventing spurious pressure oscillations in split convective form discretization for compressible flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110060~110060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2020.110060	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 Yuichi Kuya, Soshi Kawai	4. 巻 442
2. 論文標題 High-order accurate kinetic-energy and entropy preserving (KEEP) schemes on curvilinear grids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110482 ~ 110482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2021.110482	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 Ryo Hirai, Rene Pecnik, Soshi Kawai	4. 巻 6
2. 論文標題 Effects of the semi-local Reynolds number in scaling turbulent statistics for wall heated/cooled supersonic turbulent boundary layers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 124603 ~ 124603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.6.124603	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 該当する

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 加茂川諒, 玉置義治, 河合宗司
2. 発表標題 非平衡壁面モデルの開発に向けた剥離乱流境界層の大規模LES解析
3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平井遼, 河合宗司
2. 発表標題 高熱流束を伴う熱乱流境界層の壁面モデル構築に向けたLES解析
3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Hirai, Soshi Kawai
2. 発表標題 Assessment of Wall-Modeled LES for Turbulent Boundary Layers with Heated/Cooled Wall
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久谷雄一, 戸谷晃輔, 河合宗司
2. 発表標題 一般座標系における高次精度運動エネルギー・エントロピー保存(KEEP)スキームの構築
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋直生, 久谷雄一, 玉置義治, 河合宗司
2. 発表標題 運動エネルギー・エントロピー保存(KEEP)スキームにおける内部エネルギー数値流束と圧力平衡
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石塚沙也子, 河合宗司
2. 発表標題 壁面モデルLESにおける乱流生成機構と乱流構造
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田力, 河合宗司
2. 発表標題 数値エラーを含む物理量を用いた機械学習によるLES壁面モデリング
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichi Kuya, Soshi Kawai
2. 発表標題 Stable, non-dissipative and physically-consistent kinetic energy and entropy preserving (KEEP) schemes for compressible flows
3. 学会等名 The AIAA SciTech Forum and Exposition 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下山幸治
2. 発表標題 空力問題における不確かさの定量的評価のためのデータ科学的アプローチ
3. 学会等名 ポスト「京」重点課題 ・ 重点課題 第3回HPCものづくり統合ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下山幸治
2. 発表標題 設計最適化による「ものづくり」
3. 学会等名 ターボ機械協会第81回総会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanguy Appriou, 下山幸治
2. 発表標題 Combination of Local and Global Kernel Functions for Kriging-Based Bayesian Optimization
3. 学会等名 第16回進化計算学会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河合宗司, 福島裕馬, 石塚沙也子, 久谷雄一, 玉置義治
2. 発表標題 高レイノズル数流れのLES解析を可能とする壁面モデルの現状と挑戦
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 / 第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石塚沙也子, 福島裕馬, 河合宗司
2. 発表標題 壁面モデルLESにおける壁面近傍の乱流構造予測精度に関する研究
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 / 第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 戸谷晃輔, 久谷雄一, 河合宗司
2. 発表標題 物理的な整合性を持つ運動エネルギー保存型スキームの高次精度化と一般座標化
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 / 第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 太田力, 下山幸治, 河合宗司
2. 発表標題 Krigingモデルに基づく動的サンプリング法を用いた遷音速翼周りの不確かさ評価
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 / 第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 徳永輝, 外口秋絵, 下山幸治, 藤本圭一郎
2. 発表標題 初期条件の不確かさを考慮したアポロ型カプセルの再突入軌道解析
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 / 第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下山幸治, 徳永輝, 外口秋絵
2. 発表標題 空力問題における不確かさの定量的評価のための自己組織化マップの応用
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 Soshi Kawai
2. 発表標題 Wall modeling in large-eddy simulation: A path to predicting high Reynolds number flows
3. 学会等名 The 15th International Conference on Flow Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Tokunaga, Akie Sotoguchi, Koji Shimoyama, Keiichiro Fujimoto
2. 発表標題 Uncertainty quantification in re-entry trajectory analysis for safety assessment
3. 学会等名 The 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kosuke Totani, Yuichi Kuya, Soshi Kawai
2. 発表標題 High-order-accurate kinetic energy and entropy preserving schemes on curvilinear meshes
3. 学会等名 AIAA SciTech 2019 Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Tokunaga, Akie Sotoguchi, Koji Shimoyama, Keiichiro Fujimoto
2. 発表標題 Stochastic re-entry trajectory analysis with uncertain initial conditions for safety assessment
3. 学会等名 AIAA SciTech 2019 Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平井遼, 河合宗司
2. 発表標題 壁面熱流束を有する乱流境界層のLES壁面モデル構築に向けたLES解析
3. 学会等名 第2回航空機空力研究ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加茂川諒, 玉置義治, 河合宗司
2. 発表標題 剥離乱流境界層LESにおける常微分方程式型非平衡壁面モデルの提案
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 嶋直生, 久谷雄一, 河合宗司
2. 発表標題 低次精度から高次精度の運動エネルギー・エントロピー保存 (KEEP) スキームにおける衝撃波捕獲について
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷野一樹, 河合宗司
2. 発表標題 機械学習を用いたマッハ数・レイノルズ数変化にロバストなデータ駆動型LES壁面モデリング
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平井遼, Rene Pecnik, 河合宗司
2. 発表標題 加熱/冷却壁を伴う乱流境界層現象における無次元支配パラメータ
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020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
研究 分担 者	下山 幸治 (Shimoyama Koji) (80447185)	東北大学・流体科学研究所・准教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
オランダ	Delft University of Technology		