

令和元年6月25日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18309

研究課題名(和文) DBDプラズマアクチュエータの実環境利用に向けた性能実証に関する研究

研究課題名(英文) Research on performance demonstration for practical use of DBD plasma actuator

研究代表者

浅田 健吾 (Asada, Kengo)

東京理科大学・工学部情報工学科・研究員

研究者番号：00773318

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ流体制御デバイスであるDBDプラズマアクチュエータの乱れを伴う実環境下での利用に向けて、乱れた流れ(乱流)のシミュレーション手法を開発し、平板上に形成される剥離泡への影響を検証した。その結果、乱れない理想的なシミュレーションに比べ、乱れを伴うケースでは流れが平板に沿って流れない剥離泡領域が小さくなり、実験結果に近づくことがわかった。また、乱流の強さやスケールも剥離泡の大きさに影響を与えることを明らかにし、乱れ評価の重要性を示した。また、翼周り流れの大規模な乱流シミュレーションを行い、壁近傍の乱流モデル構築に必要な非定常な物理現象を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

DBDプラズマアクチュエータは小さなエネルギーで流れを制御することで流体機器の効率を大きく向上させることが期待されるデバイスである。しかしながら、その有用性が示されているのは乱れを含まない理想的な流れに限られており、実用化には実利用環境に近い乱れを含む流れでの性能実証が不可欠である。本課題で得られた成果はシミュレーションによる乱れの評価を可能とし、当デバイスの実用化を加速するものである。当デバイスの実用化は航空機や発電機をはじめとする流体機器の効率向上を可能とし、持続可能な社会実現に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：Toward utilization of DBD plasma actuator which is a micro flow control device in real environments with flow disturbance, we developed a simulation method of turbulent flow and verified the influence on a separation bubble formed on a flat plate. As a result, it was found that the separated bubble area where the flow does not flow along the flat plate becomes smaller in the cases with disturbance compared with the ideal simulation without disturbance, and it approaches the experimental result. In addition, we clarified that the intensity and scale of the turbulent flow also affect the size of the separated bubbles, indicating the importance of turbulence evaluation. Moreover, large-scale turbulence simulations of the flow around the wing were conducted, and the unsteady physical phenomena necessary for constructing a turbulent flow model near the wall were clarified.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：流体制御 乱流 ラージエディシミュレーション DBDプラズマアクチュエータ 高レイノルズ数流れ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

Dielectric Barrier Discharge (DBD) プラズマアクチュエータは小さな投入エネルギーで大きなスケールの流れを制御可能な流体制御デバイスとして、近年注目されている。当デバイスは、一枚の誘電体を二枚の電極で挟んだ単純な構造に、交流高電圧を負荷する事で駆動し、発生したプラズマが大気と相互干渉することで数 m/sec の気流を誘起する。機械的な可動部が不要、消費電力が非常に小さい等の理由で高い将来性を有する流れ制御技術として、これまで流体制御メカニズムの解明や最適な駆動条件に関する研究など様々な研究がされている [1, 2]。しかしながら、これらの多くは理想的な乱れのない流れにおける研究が大半である。実環境の流れは乱れた流れ（乱流）を含む小さなスケール流れ（低レイノルズ数流れ）及び乱流へと容易に遷移する大きなスケール流れ（高レイノルズ数流れ）の二つに大別できるが、いずれの環境においても DBD プラズマアクチュエータの有用性に関する議論はあまりなされておらず、実用化の際には乱れを含む環境下での性能実証および、現象理解が不可欠である。乱れの影響を議論する場合、乱れを取り除いた流れとの比較が必要であるが、実験で乱れを完全に除去することは難しく、シミュレーションでの評価が望ましい。しかしながら、低レイノルズ数条件下の非制御流れであっても同様流中の乱れが流れ場に与える影響に関して議論を行った研究はほとんどない。また、高レイノルズ数のシミュレーションにおいてはそもそも制御したい非定常な剥離現象などを現実的な計算コストでシミュレーションできないために計算コストが集中する壁面近傍流れのモデル化が必要であるが、そのモデル構築に必要な高レイノルズ数流れの詳細データが不足しているのが現状である。

2. 研究の目的

本課題では“DBD プラズマアクチュエータによる流れ制御”の基本メカニズム解明と最適機器パラメータに関する知見が一定レベルに達したことを踏まえ、実流れにおける性能実証をシミュレーションによって行うことを目指す。そのために本研究では、以下2つを目的とする。1) 低レイノルズ数流れにおける乱れのシミュレーション手法を構築し、制御対象となる剥離流れが主流の乱れによって受ける影響を明らかにする。2) 高忠実度シミュレーションにより高レイノルズ数流れの壁面近傍モデル構築に必要な物理現象の解明、詳細データの取得を行う。

3. 研究の方法

本課題では乱れを正確に評価するために非定常な流体シミュレーション手法として信頼性の高い large-eddy simulation (LES) を用いる。支配方程式を 3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式とし、大規模計算実績の豊富な圧縮性流体ソルバーである LANS3D [3] を用いて LES を実施した。空間離散化には 6 時精度コンパクト差分 [4] を用い、高周波の数値振動を抑えるために 10 時精度 3 重対角フィルタ [5] によるフィルタリングを行った。時間積分には 2 次精度 3 点後退差分に内部反復を用いることで時間精度を確保した ADI-SGS 陰解法 [6] を用いた。また、サブグリッドスケールモデルはフィルタが陰的に担うと考える陰的 LES を採用し、陽的なモデルは用いていない。これらの手法を用い、“乱れを有する低レイノルズ数流れ”と“乱流遷移を伴う高レイノルズ数流れ”の 2 つの LES を実施した。

(1) 乱れを有する低レイノルズ数流れの LES

乱れを有する低レイノルズ数流れの LES では平板流れを対象とし、主流乱れが流れの剥離や再付着に与える影響を明らかにする。一樣流と平板の長さを基準とするレイノルズ数は $Re_c = 2 \times 10^4$ であり、平板上に剥離泡が形成される（流れが剥離し、乱流遷移後に再付着する）。LES で用いる格子は Lee ら [7] によって格子収束が得られたものを用い、一樣流乱流を解像するために平板上流領域に格子解像度の高い格子を別途使用した。総格子点数は約 2100 万点である。主流に乱れを与える方法として、空間内に擬似的な一樣等方性乱流場をランダムフーリエモード法 Kraichnan [8] により生成し、乱流場に時間相関を与えるために、各時間ステップにおいて Billson ら [9] によって提案されたフィルタを適用した。

表 1 に今回用いた主流乱れのパラメータを示す。主流乱れを表現するパラメータとして、一樣流に対する速度変動の rms 値 (u_{rms}/U_∞) および、長さスケール (L_t/c) を用い、それぞれのパラメータが剥離泡に及ぼす影響を明らかにする。

表 1 流入乱流パラメータ。

	u_{rms} / U_∞	L_t / c
Case a (乱れなし)	N/A	N/A
Case b	0.03	0.01
Case c	0.05	0.01
Case d	0.03	0.03

(2) 乱流遷移を伴う高レイノルズ数流れの LES

層流剥離・乱流遷移・乱流再付着・付着乱流境界層・乱流剥離というマルチスケールな現象を伴う高レイノルズ数翼流れ (図 1, [10]) の LES を行い, 高レイノルズ数流れにおける壁面近傍モデル構築に不可欠な物理現象を明らかにする. レイノルズ数はコード長, 一様流速基準で $Re_c=2.1 \times 10^6$, 迎角は失速迎角付近の 13.3 度である. 格子解像度は壁面応力で無次元化した値で $(\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+) \sim (25, 0.8, 13)$ と高レイノルズ数条件下でも十分な格子解像度を用いた. ここで x : 流れ方向, y : 壁面垂直方向, z : スパン方向である. また時間刻み幅も非定常な乱流変動を捉えるのに十分な $\Delta t^+ < 0.1$ とした. 総格子点数は約 12 億点である.

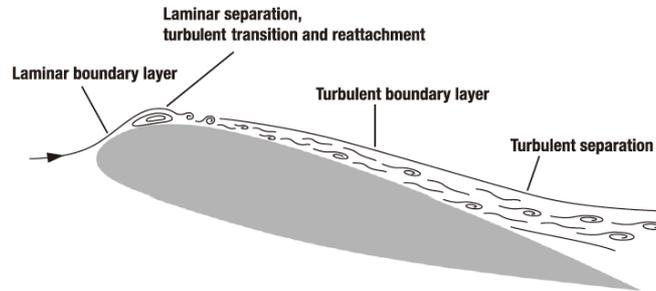


図 1 高レイノルズ数条件下での A-airfoil 周り翼流れ.

4. 研究成果

(1) 乱れを有する低レイノルズ数流れの LES の成果

図 2 に各ケースで得られた平板上面の表面圧力 (C_p) 分布を Anyoji ら[11]によって得られた風洞実験データとともに示す. いずれのケースも前縁付近で平坦な圧力分布を示し, $x/c = 0.2$ 付近で急激な圧力回復が起こっている. これは層流剥離泡に見られる典型的な C_p 分布である. 主流乱れを与えた 3 ケースと主流乱れなしのケースを比較すると, 主流乱れを与えた 3 ケースの方が, 乱れなしのケースよりも平坦な圧力分布を示す領域が短く, 圧力回復の起こる位置が実験データに近いことがわかる. 図 3 に今回行った LES の表面摩擦係数 (C_f) 分布を示し, C_f から得られる剥離点 (x_s) と再付着点 (x_r) を表 2 に示す. 図 3 において表面摩擦係数が正から負の値に変化する点を剥離点, 負から正の値に変化する点を再付着点として定義する. 全てのケースにおいて剥離点は前縁の $x/c = 0.0$ に固定されているが, 乱れを有するケースでは再付着点が乱れのないケースに比べて上流に移動しているのがわかる. さらに, 乱れ強度が大きいケースほど再付着点は前縁に移動している. また, 長さスケールに関しても同じ乱れ強度 ($u_{rms}=0.03$) で比較した際に, $L_t/c = 0.03$ のケースの方が $L_t/c = 0.01$ に比べて再付着点が前縁に移動しているのがわかる.

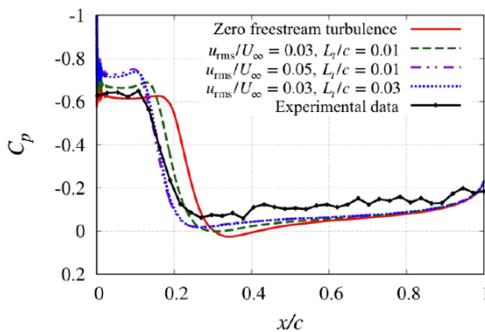


図 2 平板上面の圧力係数 (C_p) 分布.

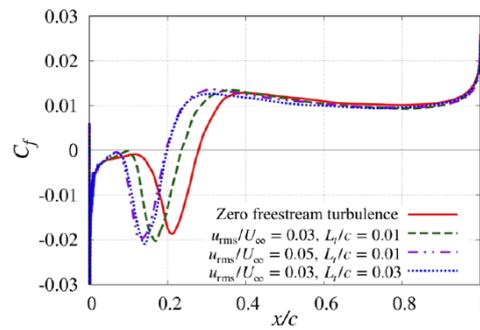


図 3 表面摩擦係数 (C_f) 分布.

表 2 剥離点 (x_s/c) および再付着点 (x_r/c).

	x_s/c	x_r/c
Case a	0.0	0.277
Case b	0.0	0.232
Case c	0.0	0.194
Case d	0.0	0.198

図4に各ケースの瞬間流れ場を示す。いずれのケースも流れは前縁から層流で剥離し、2次元
的な流れが3次元的な渦構造をもつ乱流へと遷移しながら再付着する。また、3次元的な渦構造が
生じる位置が主流乱れを有するケース (b)-(d) で上流側に移動しているのがわかる。さらに、
同じ乱れを有するケースであっても、乱れ強度の強い(c)のケースや乱流の長さスケールが大き
い(d)のケースの乱流遷移位置が特に上流に移動していることがわかる。

以上のように一様流中に乱れが存在することで剥離領域は小さくなり、本研究で行った
シミュレーションの範囲では乱れの強度および長さスケールが大きいほど流れの再付着位
置は上流へ移動することがわかった。

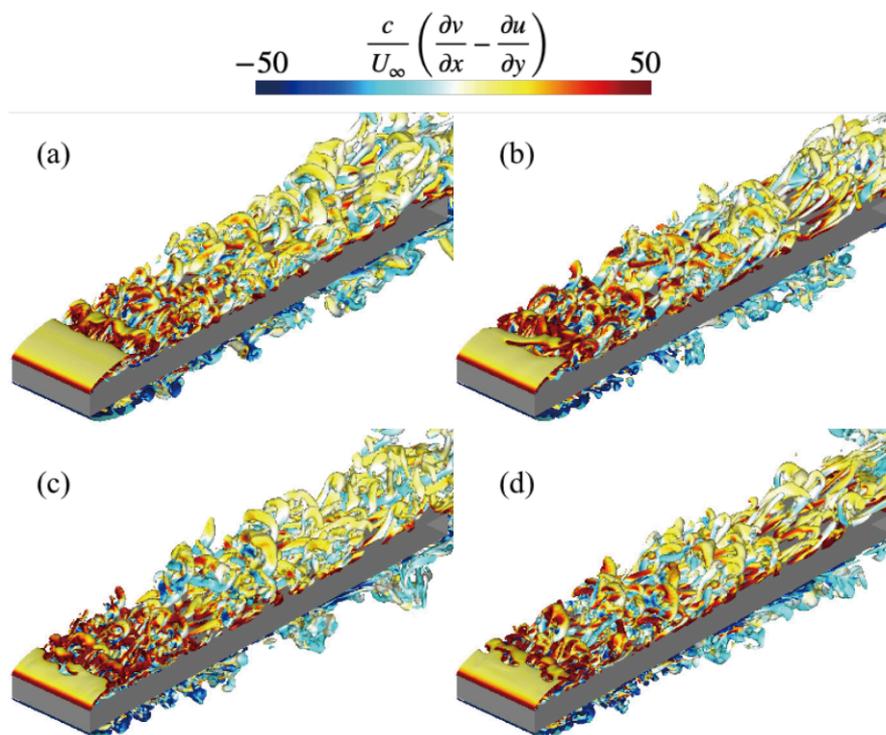


図4 瞬間流れ場。速度勾配テンソルの第2不変量 Q の等値面 ($Q=1.0$) をスパン方向温度で色
付け。

(2) 乱流遷移を伴う高レイノルズ数流れのLESの成果

高レイノルズ数流れのLESでは剥離、乱流遷移、乱流再付着を伴う流れの物理現象を明らか
にすることで、LESにおける壁面近傍モデルの構築のための知見を得る。モデルの構築には移
流項、粘性項、圧力項、レイノルズ応力項の4つの統計量の分布を精度良く予測することが必
要となり、本研究ではそれらの詳細なプロファイルを明らかにした。図5にLESによって得ら
れた応力バランスを示す。前縁の層流剥離付近 ($x/c=10\%$)、乱流再付着付近 ($x/c=15\%$)、乱
流境界層付近 ($x/c=50\%$)、乱流剥離付近 ($x/c=70\%$) の各コード長位置において、移流項、粘
性項、圧力項、レイノルズ応力項を横軸、壁面垂直方向距離を縦軸にプロットしている。いず
れもコード長と一様流で無次元化している。再付着した後 ($x/c=15\%$ 以降) は流れが乱流に遷
移しているためにレイノルズ応力項が大きくなり、それを粘性項が打ち消す形でバランスして
いるのが分かる。また、前後縁の剥離付近では圧力項の影響が非常に大きくなっており、圧力
勾配が剥離現象に寄与していることがわかる。圧力項は簡易的な平衡モデルではしばしば省略
される項であるが、この結果は剥離を生じるに流れにおいて圧力項は無視できず、考慮する必
要があることを示唆している。本研究ではこれらの他に前縁の層流剥離領域で無次元周波 St
が $St \sim 130$ 、後縁の乱流剥離領域で $St \sim 2$ の振動現象が起こることを明らかにした。詳細は
投稿論文としてまとめて発表済みである (雑誌論文1)。

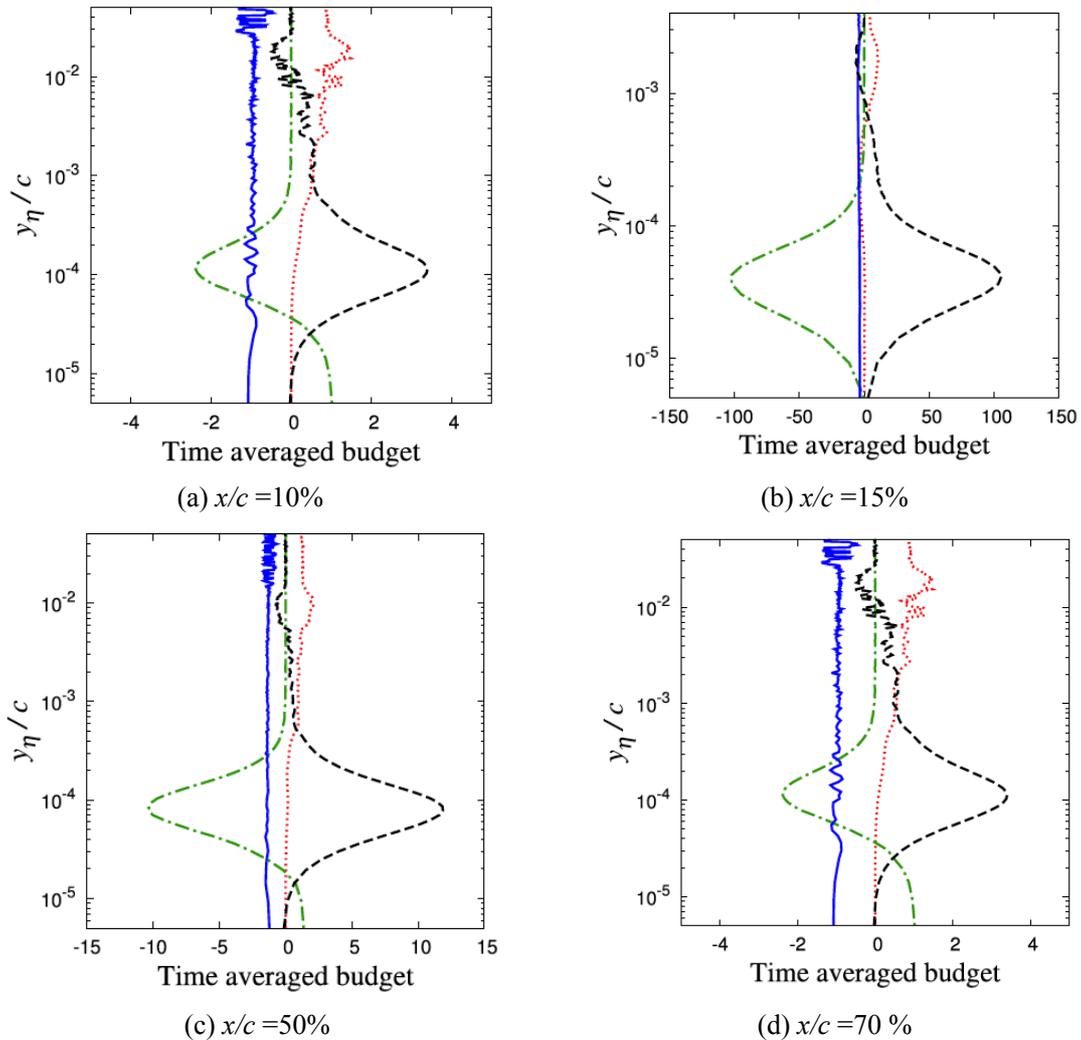


図5 各コード長位置 (x/c) における応力バランス. 点線 (赤): 移流項, 鎖線 (緑): 粘性項, 実線 (青): 圧力項, 破線 (黒): レイノルズ応力項.

(3) 研究成果のまとめ

本課題では乱れを含む流れの制御を目指し, “乱れを有する低レイノルズ数流れの LES” と “乱流遷移を伴う高レイノルズ数流れの LES” を行った. 前者では主流中の乱れが平板上の剥離泡において乱流遷移を促進し, 再付着点が上流に移動することを明らかにした. また, 乱れの強度に加えて長さスケールが大きくなることによっても乱流遷移が促進されることがわかった. この結果は一様流中の乱れが剥離制御と似た効果をもつことを示しており, 乱れを含む条件下での流れ制御効果が乱れのない理想的環境下と異なる可能性を示唆している. 一方後者では, 高レイノルズ数条件下の翼流れにおいて LES の壁面モデル構築に不可欠な詳細な応力分布を明らかにし, 圧力項の重要性を示した. 研究期間内の成果としては, 流体制御を行わない流れの現象理解に留まったが, これらの成果は今後制御流れのシミュレーションへと発展させていく際の有益な知見であると考えている.

参考文献

- [1] T. C. Corke, C. L. Enloe, and S. P. Wilkinson, “Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 42 (2010), pp505-529.
- [2] M. Sato, T. Nonomura, K. Okada, K. Asada, H. Aono, A. Yakeno, Y. Abe, and K. Fujii, “Mechanisms for laminar separated-flow control using dielectric-barrier-discharge plasma actuator at low Reynolds number,” *Physics of Fluids*, Vol. 27 (2015), pp117101-117101.
- [3] H. Aono, T. Nonomura, N. Iizuka, T. Ohsako, T. Inari, Y. Hashimoto, R. Takaki and K. Fujii, “Scalar Tuning of a Fluid Solver using Compact Scheme for a Supercomputer with a Distributed Memory Architecture,” *CFD letters*, Vol. 5 (2013), pp143-152.
- [4] S. K. Lele, “Compact Finite Difference Schemes with Spectral-like Resolution”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 103 (1992), pp16-42.

- [5] D. V. Gaitonde and M. R. Visbal, “Pade’-type higher-order boundary filters for the Navier-Stokes equations,” AIAA Journal, 38 (2000), pp2013-2112.
- [6] H. Nishida and T. Nonomura, “ADI-SGS scheme on ideal magnetohydrodynamics”, Journal of Computational Physics, Vol. 228 (2009), pp3182–3188.
- [7] D. Lee, S. Kawai, T. Nonomura, M. Anyoji, H. Aono, A. Oyama, K. Asai and K. Fujii “Mechanisms of surface pressure distribution within a laminar separation bubble at different Reynolds numbers,” Physics of Fluids, Vol. 27 (2015), No. 023602.
- [8] R. H. Kraichnan, “Diffusion by a Random Velocity Field,” Physics of Fluids, Vol. 13 (1970), pp22–31.
- [9] M. Billson, L.-E. Eriksson and L. Davidson, “Jet Noise Prediction Using Stochastic Turbulence Modeling,” AIAA Paper 2003-3282, 2003.
- [10] I. Mary and P. Sagaut, “Large Eddy Simulation of Flow Around an Airfoil Near Stall,” AIAA Journal, Vol. 40 (2002), pp1139-1145.
- [11] M. Anyoji, T. Nonomura, H. Aono, A. Oyama and K. Fujii “Computational and Experimental Analysis of a High-Performance Airfoil Under Low-Reynolds-Number Flow Condition,” Journal of Aircraft, Vol. 51 (2014), pp1864–1872.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

1. Kengo Asada and Soshi Kawai, “Large-eddy simulation of airfoil flow near stall condition at Reynolds number 2.1×10^6 ,” Physics of Fluids, Vol. 30 (2018), pp085103-085103.

〔学会発表〕 (計 4 件)

1. Shigetaka Kawai, Kengo Asada and Akira Oyama, “Evaluation of Inflow Turbulent Fluctuation Effects on Laminar Separation Bubbles Using Large Eddy Simulations,” 2019 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (2019), AIAA paper 2019-1871.
2. Kengo Asada and Soshi Kawai, “Revisiting LESFOIL: Wall-resolved LES of Flow Around an Airfoil at $Re_c = 2.1 \times 10^6$,” 2018 AIAA Science and Technology Forum and Exposition (2018), AIAA paper 2018-0840.
3. 浅田健吾, 河合宗司, “LES 壁面モデル構築に向けて：剥離・再付着を伴う高レイノルズ数翼流れの LES 解析”, 第 30 回数値流体力学シンポジウム (2016).
4. Kengo Asada and Soshi Kawai, “Wall-resolved LES of high Reynolds number airfoil flow near stall condition for wall modeling in LES: LESFOIL revisited,” 69th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (2016).

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：河合宗司

ローマ字氏名：Soshi Kawai

研究協力者氏名：河合成孝

ローマ字氏名：Shigetaka Kawai

研究協力者氏名：大山聖

ローマ字氏名：Akira Oyama

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。