

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760670

研究課題名(和文) 不確かさの確率論的定量化法を用いたLESの非平衡壁面モデルの開発

研究課題名(英文) Development of non-equilibrium wall-modeling for LES using uncertainty quantification method

研究代表者

河合 宗司 (KAWAI, Soshi)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・国際トップヤングフェロー

研究者番号：40608816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：航空機や宇宙機の性能に大きな影響を与える要因となる、高レイノルズ数剥離境界層流れを精度良く評価しうる、シンプルかつ物理ベースなLESの非平衡壁面応力モデルを確立した。提案したモデルは、剥離境界層の非平衡効果である対流項・圧力項・粘性項の各タームの寄与バランスを自動的に満たすモデルである。またKriging理論に基づく新たな不確かさの確率論的定量化手法を開発し、数値解析に含まれる様々な不確かさを定量化し、そのデータを解析することで、モデルの改良指針や流体現象の解明を試みるという、従来のアプローチとは異なる計算科学の展開を試みた。

研究成果の概要(英文)：A simple yet very effective non-equilibrium wall-model for large-eddy simulation (LES) at arbitrarily high Reynolds numbers was proposed. The proposed model automatically satisfies the total shear stress balance within the log-layer by considering how the turbulence length scale changes with wall distance in the inner layer. We also developed a new Kriging-surrogate-model-based dynamic adaptive sampling method for an accurate and effective uncertainty quantification (UQ). The UQ algorithm was coupled with numerical simulation to quantify the impact of intrinsic uncertainties involved in the simulation on the quantities of interest for validation, rigorous measure of confidence, priorities and sensitivities, physical model development, and fine understanding of physics.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙流体力学 数値流体力学 圧縮性流体力学 乱流 流体工学 高レイノルズ数流れ ラージ・エディ・シミュレーション 不確かさの定量化

## 1. 研究開始当初の背景

スケール効果(高レイノルズ数流れ)は航空機や宇宙機の性能に大きな影響を与える要因の一つであり、特に近年の航空機の巡航速度(遷音速)や、遷・超音速飛行する宇宙機では顕著である。現状、これ等の高レイノルズ数流れの解析には、莫大なコストをかけた高レイノルズ数風洞や実機飛行試験に頼らざるを得ない。

この高レイノルズ数流れの評価は数値シミュレーションが得意とする分野の一つと期待されて久しい。しかし、剥離や乱流遷移を伴う高レイノルズ数流れを、正確に予測するシミュレーション技術は未だに確立されておらず、一般に LES の壁面モデルという重要課題として知られている。主要なものとして DES や LES/RANS ハイブリッド法 [Spalart 2009] が提案されているが、経験的パラメータの導入無しでは、速度のミスマッチ(Log-layer mismatch)が発生し、付着境界層の壁面摩擦さえも正確に予測できないのが現状である [Nikitin et al. 2000]。

このような中、本研究では壁面応力モデルをベースとした LES 壁面モデルを独自に開発し [Kawai & Larsson 2011]、成果を挙げた。これは経験的なパラメータの導入無しに高レイノルズ数付着乱流境界層(平衡境界層)を LES で正確に予測した成果である。しかし、本研究でターゲットとする剥離や乱流遷移を伴う非平衡剥離境界層に対しては、開発したモデリングに加えて非線形な対流項や圧力項効果と粘性項効果とのバランスのモデル化が必要不可欠となる。

また一方で、数値シミュレーションには様々な不確かさ要因が常に存在しており、これら様々な不確かさ要因(例えばモデル化による不確かさ)が結果に与える影響をどう厳密に定量化するか、どう計算結果にエラーバーを付けるか、またその不確かさを定量化したデータを如何に活用するか、については未だ揺籃期にある重要な研究領域である。特に LES における不確かさの定量化に関する研究は国内外いずれにおいても非常に少ない。

本研究では、LES の非平衡壁面モデルの構築と、その過程で不確かさを定量化したデータが活用できないだろうか、という観点から研究を遂行した。

## 2. 研究の目的

本研究では、航空機や宇宙機の開発で不可欠となるスケール効果の評価、すなわち高速流中の高レイノルズ数剥離流れを精度良く評価しうる Large-eddy simulation (LES) の非平衡壁面応力モデルを確立する。剥離境界層の非平衡効果のモデリングには、通常行われる理論や実験データとの比較による検証、および不確かさの確率論的定量化法を応用するアプローチを試し、モデルの洗練・確立、

流動現象の解明を試みるという、計算科学の新しい展開を試みた。

## 3. 研究の方法

まず本研究で開発した LES 壁面モデルをベースとし、剥離を伴う高レイノルズ数非平衡境界層内の対流・圧力・粘性項バランスを満たすモデリングの実装・検討を行う。また並行して効率的かつ高精度な不確かさの確率論的定量化手法を構築し、シミュレーションとのカップリングから、数値解析に付随する不確かさが結果に与える影響を定量化し、そのデータから不確かさ要因に対する感度や重要度、モデル化に関する改良指針、さらには流動現象の解明を試みる。本研究では最終的に、対流項・圧力項・粘性項の各タームの寄与バランスを自動的に満たす LES の非平衡壁面モデルの構築を行う。

## 4. 研究成果

(1) 高レイノルズ数剥離流れに対する LES の非平衡壁面モデルの構築

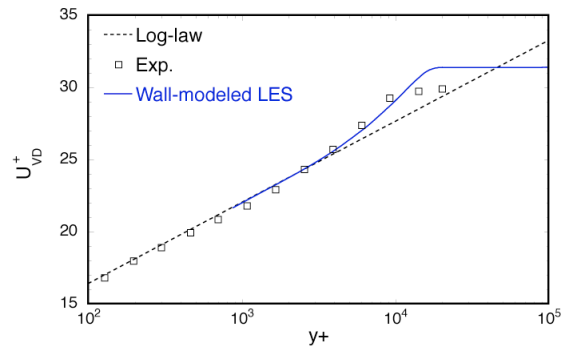
### (1-1) 付着平衡乱流境界層

高レイノルズ数乱流境界層を正確に予測するシンプルかつ物理ベースな LES の非平衡壁面モデルを提案した。剥離流れにも対応するため、提案するモデルは平衡境界層仮定を用いない非平衡モデルである。本壁面モデルの構築では、log-layer における乱流の長さスケールがどう変化するかに基づき、非平衡壁面モデルに含まれる 2 つの大きなエラー要因 (1. LES 壁面近傍の格子点での数値エラー、2. 壁面モデルそのもののエラー) を特定し、そのエラーを排除するシンプルかつ物理的な方法を提案した。本非平衡壁面モデルのキーとなるアイデアは、壁面モデル内において格子で解像している乱流スケールと解像できていないスケールが壁面垂直方向に変化しており、log-layer における乱流の長さスケールがどう変化するかに基づき、その影響を近似的にモデルに取り込んだところである。

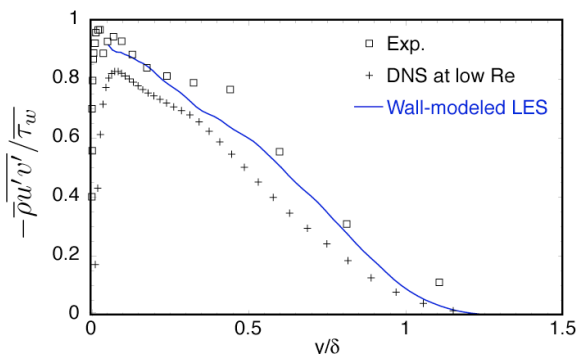
エラー要因 1 に関しては、事前の研究から LES 壁面近傍の格子点における数値エラーの原因を明らかにし、今までの既存の研究方向性とは決定的に異なる物理ベースでシンプルかつ効果的な解決法を提案し、数値実験でその有効性を示した。更にその成果を基に、本研究ではエラー要因 2 の解決法として、乱流の長さスケールの壁面垂直方向の変化を考慮し、対流項や圧力項、粘性項のバランスを自動的に考慮する物理ベースなダイナミック非平衡壁面モデルを提案した。

本研究ではまず、高レイノルズ数付着乱流境界層(平衡境界層)のレイノルズ数の異なる 2 ケース (運動量厚さベースのレイノルズ数  $Re=50,000$  及び  $5,000$ ) に対して数値実験を

行い、理論や実験データとの比較を行う事で、提案した非平衡壁面モデルの妥当性を検証した。図1は、本壁面モデルによって得られた van Driest 変換をした平均速度とレイノルズ応力を示しており、DES や RANS/LES ハイブリッドに見られるような”log-layer mismatch” は本手法では見られず、log-law (またそれに伴う壁面摩擦) やレイノルズ応力を正確に予測できることを示した。また log-layer における瞬間の流れ場構造を図2に示す。本手法は、DES 等が非物理的な流れ構造を示す log-layer においても、レイノルズ応力が非常に良く予測されている事からも分かるように、物理的な乱流構造を再現できることを確認した。



(a) 平均速度分布



(b) レイノルズ応力

図1: 壁面モデル LES を用いた  $Re\theta=50,000$  の乱流境界層解析結果

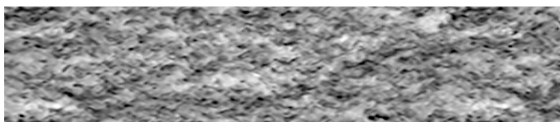


図2:  $y+=878$  における瞬間の速度変動場

以上の計算で用いた格子は、 $dx/\delta=dz/\delta=0.05$  (流れ方向とスパン方向は等間隔 20 格子点/ $\delta$ )、 $dy/\delta=0.01-0.03$  (壁面垂直方向はスムーズにストレッチ) である。この格子解像度を viscous ユニットで表すと  $dx+=dz+=640$ 、 $dy+=160-385$  であり、通常の LES と比べ各方向 20 倍以上も荒い格子を用いていることを強調しておく。 $Re\theta=5,000$  の乱流境界層解析を既存の LES 解析で行うと約 1 億点規模の格子点が必要となるが、本

壁面モデルを用いた LES では一桁高い  $Re\theta=50,000$  の境界層も約 300 万点規模の計算で可能となっている。

数多くの DES を含む LES の壁面モデルが提案されているが、現状なんらかの経験的な補正もしくは制御理論を用いた補正無しに、正確な log-law を再現できない中、本手法は物理的な背景のみから構築されいながら、正確に log-law や乱流統計量を予測できることを示した。

### (1-2) 流れの剥離を伴う非平衡乱流境界層

本研究の目的は、高速流中の高レイノルズ数剥離流れを精度良く評価しうる LES の非平衡壁面応力モデルを確立することであり、次に(1-1)で付着平衡乱流境界層に対して確立・検証した LES の非平衡壁面モデルを、剥離を伴う流れ場に適用し、その有効性を検証した。

1 つ目の解析対象は、詳細な速度場や乱流統計量データの計測が行われた Souverein 等による衝撃波-乱流境界層干渉剥離流れとした。一様流マッハ数 1.69、レイノルズ数  $Re\theta=50,000$ 、境界層と干渉する斜め衝撃波の偏向角は 6.0 度である。このレイノルズ数は通常の LES では計算できない高レイノルズ数であるが、壁面モデルを用いる事により 300 万点規模の格子で LES 解析が可能となる。またここでは、6 次精度コンパクト差分法を用いて衝撃波をロバストに捕らえるため localized artificial diffusivity (LAD) 法 [Kawai et al. 2010] を用いている。

図3は本壁面モデルを用いた LES で得られた瞬間の流れ場である。付着乱流境界層が斜め衝撃波と干渉し、その背後で剥離(青色の領域)、再付着する様子が壁面モデルを用いた LES で再現できている。衝撃波干渉による剥離・再付着領域における本 LES と実験との比較を図4に示す。剥離領域の平均速度や速度変動量に関して、実験データと本 LES は良好な一致を示すことを確認した。また剥離領域における逆流確率分布も実験データと非常に良い一致を示しており、従来の RANS 解析では精度の良い予測が困難であった剥離流れに対しても、本壁面モデルを用いた LES は有効であることを示した。

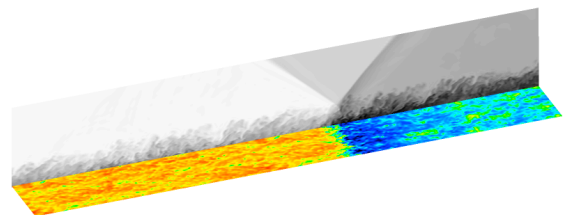


図3: 壁面モデル LES を用いた衝撃波-乱流境界層干渉剥離流れ

本研究では 2 つ目の剥離流れに対する解析として、高レイノルズ数 ( $Rec = 2.1 \times 10^6$ ) 翼

型周りの層流剥離・乱流遷移・乱流再付着

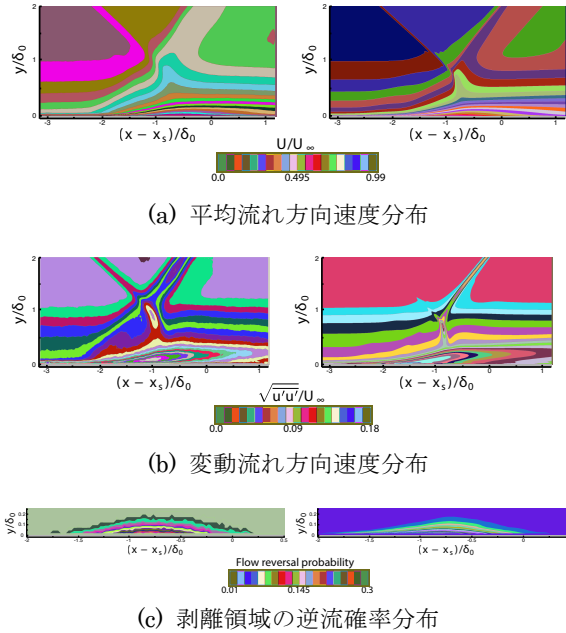


図 4: 衝撃波-境界層干渉剥離流れにおける実験(左図)と壁面モデル LES(右図)の比較

という、より複雑な流れに対する本壁面モデルの有効性の検証を行った。ここでは、本壁面モデルに乱流遷移の効果をモデル化し導入することで、本壁面モデルの複雑な流れへの適用可能性について議論を行なった。

対流項及び圧力項の効果を考慮した非平衡モデルを用いた LES では翼前縁の層流剥離、乱流遷移、乱流再付着、発達する乱流境界層の領域で平均量、乱流統計量共に精度良く予測することが可能であることを示した(図 5)。さらに、図 6 は非平衡モデルを用いた LES で得られた翼前縁付近の瞬間の渦構造を示したものだが、本 LES は層流剥離によってスパン方向に 2 次元的な渦が放出される様子や、それらが流体の不安定性で崩壊する様子、さらには微細な乱流渦構造へと乱流遷移し、流れが再付着するという一連の物理現象を捉えることができることを示した。

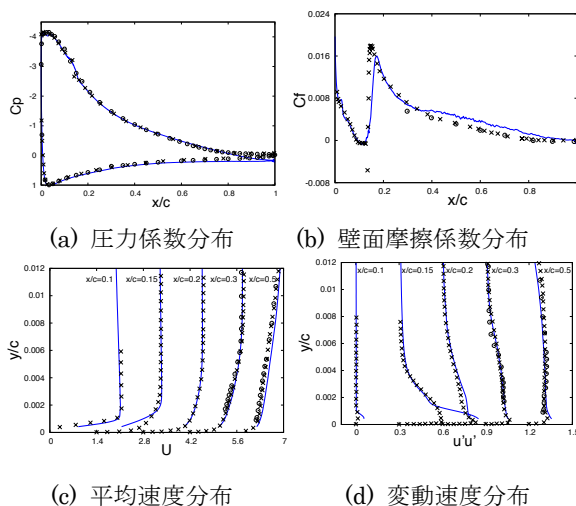


図 5: 翼流れにおける実験と壁面モデル LES の

比較(シンボル: 実験; 青線: 壁面モデル LES)

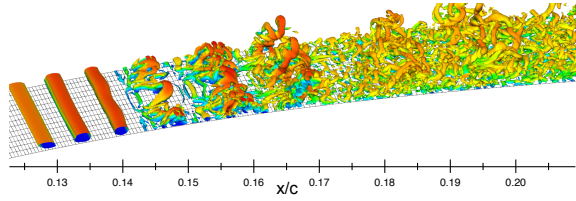


図 6: 翼前縁付近の瞬間の渦構造

本研究のレイノルズ数領域 ( $Rec = 2.1 \times 10^6$ ) において、壁面モデルを用いた LES は境界層の内層領域まで解像する LES に比べて、格子点数の削減及び最小格子幅に依存する時間刻みの制限緩和により、実に 100 倍近いオーダーで計算コストを削減できることが確認できた。

(2) 不確かさの確率論的定量化手法の構築

本研究では、現状の決定論的な数値シミュレーションから脱却し、数値解析に含まれる様々な不確かさ要因(例えばモデル化による不確かさ)が結果に与える影響を定量化し、更にはその不確かさを定量化したデータから不確かさ要因に対する感度や重要度、モデル化に関する改良指針、さらには流動現象の解明を試みた。

非線形な流体现象に対する不確かさの定量的評価を成功させるキー要素は、入力不確かさ要因に対する出力の不確かさが強い非線形性を示す(急激な変化を伴う)ケースに対して、如何に少ないサンプル計算でロバストで精度良く不確かさを定量的に評価するかである。本研究では、この要求を満足する Kriging 理論に基づく新たな不確かさの確率論的定量化法を開発し、より少ないサンプル数で精度良く不確かさが評価可能になることをまずはテスト関数を用いることで示した。本提案手法のキーとなるアイデアは、Kriging モデルで推定する応答曲面で結果の統計的な振る舞いを近似し、さらに、Kriging モデルで推定した応答曲面とその不確かさデータを基に効果的に動的サンプリングを行うことである。これにより入力の不確かさに対する応答が、線形的で滑らかな場合や非線形的で急激な勾配を持つ場合の双方において、少ないサンプル計算でロバストかつ精度良く出力不確かさを定量的に評価できることを示した。

次に翼型周りの高レイノルズ数衝撃波一境界層干渉問題に対し、本 Kriging 理論に基づく不確かさの確率論的定量化法と数値シミュレーションをカップリングさせることで、遷音速翼流れ解析における不確かさが結果に与える影響の定量的評価を行った。本不確かさの定量化法を用いる事で、わずか 10 ケースのサンプル計算で精度良く出力不確かさの応答および確率密度関数が得られることを示した。また不確かさを考慮した解析

を行う事で実際の統計的平均値を得る事が可能となることを示し、得られる確率論的情報(確率密度関数等)から、入力の不確かさが結果にどのような影響を与えるか定量的に評価することが可能となることを示した(図7)。さらに、不確かさを定量化したデータは単に不確かさの評価のみに止まらず、その出力不確かさの定量的データから不確かさ要因が空力性能に与える影響の重要度や感度や、モデル化に関する改良指針、不確かさに敏感な現象理解が得られる事を示した。

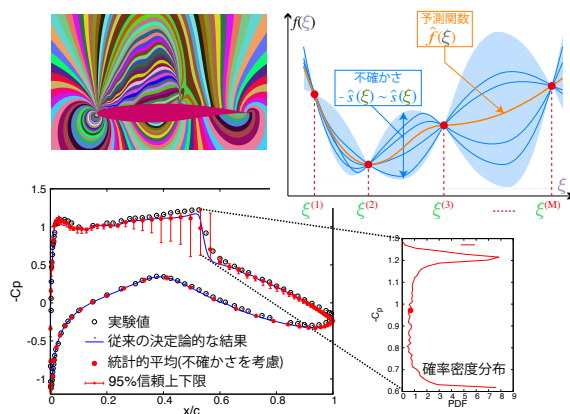


図7: 数値シミュレーションと Kriging 理論に基づく不確かさの確率論的定量化法のカップリングによる遷音速翼流れ解析における不確かさが結果に与える影響の定量的評価

## 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 3 件)

- ① Soshi Kawai and Johan Larsson, "Dynamic non-equilibrium wall-modeling for large eddy simulation at high Reynolds numbers," *Physics of Fluids*, 25 (1), 015105 (2013).
- ② Soshi Kawai and Kengo Asada, "Wall-modeled large-eddy simulation of high Reynolds number flow around an airfoil near stall condition," *Computers & Fluids*, 85, 105-113 (2013).
- ③ 浅田健吾, 河合宗司, 藤井孝藏, "LES のダイナミック壁面モデル: 剥離・遷移・再付着を伴う高レイノルズ数翼流れ," *ながれ*, Vol. 32, No. 2, pp. 95-105, 2013.

[招待講演] (計 3 件)

- ① Soshi Kawai, "Wall modeling in large-eddy simulation: Accurate simulation at realistic high Reynolds numbers," NASA Langley Research Center, VA, U.S.A., April 2013.
- ② Soshi Kawai, "Wall modeling in large-eddy simulation: Accurate simulation at realistic (high) Reynolds

numbers," 5th Aerospace Innovation Workshop, The University of Tokyo, Japan, February 2013.

- ③ 河合宗司, "LES におけるダイナミック壁面モデル," 招待セミナー, 東京大学生産技術研究所 LES 研究会, 東京大学生産技術研究所, 2012 年 10 月.

[学会発表] (計 11 件)

- ① Koji Shimoyama and Soshi Kawai, "Kriging-based dynamic adaptive sampling for effective uncertainty quantification," 6th ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conferences, accepted, ECCOMAS, Barcelona, Spain, July 2014.
- ② Soshi Kawai and Koji Shimoyama, "Kriging-model-based uncertainty quantification in computational fluid dynamics," 44th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, accepted, AIAA, Atlanta, GA, U.S.A., June 2014.
- ③ Soshi Kawai, Kengo Asada, Kozo Fujii, "A non-equilibrium dynamic wall-model for LES of high Reynolds number airfoil flow near stall," AIAA Paper 2013-0683, 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA, Grapevine, TX, U.S.A., January 2013.
- ④ Koji Shimoyama, Soshi Kawai, and Juan Alonso, "Dynamic adaptive sampling based on Kriging surrogate models for efficient uncertainty quantification," AIAA Paper 2013-1470, 15th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference, AIAA, Boston, MA, U.S.A., April 2013.
- ⑤ Soshi Kawai and Johan Larsson, "Dynamic wall-modeling for LES of shock/boundary-layer interacting separated flow at high Reynolds number," D22.00007, 65th APS Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, APS, San Diego, CA, U.S.A., November 2012.
- ⑥ Soshi Kawai and Johan Larsson, "A dynamic wall-model for large-eddy simulation of high Reynolds number shock-induced separated flows," ECT119, the Eighth Conference in the Engineering Computational Technology, Civil-Comp, Dubrovnik, Croatia, September 2012.
- ⑦ Soshi Kawai, "A non-equilibrium wall-model for LES of shock/boundary layer interaction at high Reynolds number," AIAA Paper 2012-2976, 42nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, AIAA, New Orleans, LA, U.S.A., June 2012.

- ⑧ Kengo Asada and Soshi Kawai,  
“Wall-modeled large-eddy simulation of  
transitional separated flow over an  
airfoil at high Reynolds number,” S6,  
9th International ERCOFTAC  
Symposium on Engineering Turbulence  
Modeling and Measurements,  
ERCOFTAC, Thessaloniki, Greece,  
June 2012.
- ⑨ 河合宗司, 下山幸治, “CFD による不確か  
さの定量的評価: Kriging モデルに基づく  
動的サンプリング法,” E04-1, 第 27 回数  
値流体力学シンポジウム, 名古屋大学, 愛  
知, 2013 年 12 月.
- ⑩ 浅田健吾, 河合宗司, 藤井孝藏, “LES の  
ダイナミック壁面モデル: 剥離・遷移・再  
付着を伴う高レイノルズ数翼流れ,”  
C05-4, 第 26 回数値流体力学シンポジウ  
ム, 東京, オリンピックセンター. 2012  
年 12 月.
- ⑪ 河合宗司, “LES におけるダイナミック壁  
面モデルの提案: 高レイノルズ数剥離流れ  
の予測,” JSASS-2011-2016-A, 第 43 回  
流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレ  
ーション技術シンポジウム 2012, 富山, 富  
山国際会議場, 2012 年 7 月.

[その他]

ホームページ

<http://flab.eng.isas.jaxa.jp/member/kawai/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河合 宗司 (KAWAI, Soshi)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙  
科学研究所・国際トップヤングフェロー  
研究者番号: 40608816

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし