

令和 3 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03809

研究課題名（和文）非定常3次元渦流れの計測融合シミュレーション法の開発

研究課題名（英文）Development of measurement fusion simulation method for unsteady three-dimensional vortex flow

研究代表者

大林 茂（OBAYASHI, SHIGERU）

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：80183028

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,300,000円

研究成果の概要（和文）：風洞内に模型を磁気浮揚させて流体力や流れ場を計測する技術を開発・改良して、円柱にはたらく流体力や円柱から放出される渦の様子を調べて基礎流体力学の知識を増やし、槍投げ競技の導入として有益なターボジャブ活用法を提案するなどスポーツ工学に応用した。また、コンピュータ上で流れを再現するシミュレーションが風洞内の流れを忠実に再現できるように、計測値を利用するデータ同化技術を効率化したり、計測位置の最適化をしたりして実用性を高めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気流方向に軸を持つ円柱の軸の長さを変化させたときに、円柱にはたらく抵抗が変化する様子は、2次元角柱の形状を同様に变化させた場合とは全く異なることを初めて明らかにして、基礎流体力学の知識を増やした。また、スポーツ工学への応用は新たな応用分野を開く可能性を秘めている。さらに、実用的なデータ同化技術の開発により、今後物理的な制約により計測が行えない場合でもシミュレーション結果から計測値を得ることができ、「風洞実験デジタルツイン」構築の可能性を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：We developed and improved a technique for measuring fluid forces and flow fields by magnetically levitating a model in a wind tunnel, and increased our knowledge of basic fluid mechanics by investigating the fluid forces acting on a cylinder and the vortices emitted from the cylinder, and applied it to sports engineering by proposing the use of a turbo jab, which is beneficial as an introduction to javelin throwing events. In addition, we improved the efficiency of data assimilation techniques using measured values and optimized the measurement positions so that computer simulations can faithfully reproduce the flow in the wind tunnel.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：風洞 磁力支持 天秤 データ同化 非定常3次元渦流れ

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

これまでの航空機の開発において、研究代表者らを中心に巡航状態での最適設計が適用された。今後、一層の性能改善を実現するためには、離発着や旋回・突風応答を含む非巡航状態での空気力を考慮した最適設計が必要である。しかし、巡航状態では、機体の周りの流れは機体に沿って流れる「付着流れ」になっており、数値シミュレーションや風洞実験の結果が航空機の性能予測のために十分信頼できるのに対して、非巡航状態では機体の周りの流れが機体に沿わず渦を放出する剥離流れとなる。流れは非定常性を持つとともに、複雑な3次元性を持つ「非定常3次元渦流れ」流れとなり、信頼できる予測技術がない。

空気力学の研究手段である数値シミュレーションでは、物体近傍は高精度に解像できるが、同時に空間に放出された渦を高精度に解像することは未だ難しい。もう一つの研究手段である風洞実験では、実験模型が計測部に支持する必要があるため、物体と同時に支持装置とも渦の干渉が起こり、正確な実験が難しい。このため、球や円柱といった流体機器によく現れる3次元物体形状であっても、流れの構造や安定性に関する信頼できるデータベースがない。例として「はやぶさ」のような宇宙探査機のカプセルが大気圏再突入する際に、このような流れの構造、安定性、抵抗が非常に重要となるが、その理解は未だ十分でないために多数の実験で設計を決めている。このような単純な形状がつくる「非定常3次元渦流れ」にも学術的な「問い」が残っている。

2. 研究の目的

本研究では、計測から得られた速度・圧力の計測値と、流れを支配する第一原理であるナビエ・ストークス方程式を風洞内に復元するデータ同化技術により結び付け、これまで計測やシミュレーションの不確かさに埋もれてきた非定常3次元渦流れを解明するため、風洞実験と数値シミュレーションの両面で、新しい技術を組み合わせることで問題解決を図り、非定常3次元渦流れの計測融合シミュレーション法を開発する。

3. 研究の方法

① 風洞実験における問題解決

運動する物体に働く流体力の計測は困難なため、通常は風洞を用いて、流れの中に固定された物体に働く力を測定する。しかし、物体を固定するための装置が流れに干渉する「支持干渉」を避けることが問題となる。本研究では、「支持干渉」を磁力支持天秤装置 (Magnetic Suspension and Balance System、MSBS) を利用して、物体と干渉する非定常3次元渦流れを詳細に解明する。

しかし、MSBS 単体では非接触で模型に働く力は計測できるが、流れの構造は捉えられない。そこで、本研究では、速度に関して、レーザー流速計による点計測、蛍光油膜や粒子イメージ流速計測法 (Particle Image Velocimetry、PIV) による面・体積計測、圧力に関して、感温塗料、感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint、PSP) による面計測など、近年のカメラ・レーザー技術の高度化と共に発達している先進計測手法を利用する。これらの先進流体計測法を、MSBS に必要なセンサー、磁場に干渉しないよう組み合わせ、支持干渉無しに流れ場の構造を高精度に調べることを実現する。

その上で、基礎的な形状である気流方向に軸を持つ円柱の流体力を、支持干渉無しに計測し、教科書を書き換える基準実験データベースを構築する。また、非軸対称物体の計測技術をあわせて構築し、スポーツ工学等他分野への貢献を図る。

② 数値シミュレーションにおける問題解決

流体科学の基礎となる流体力学の支配方程式はナビエ・ストークス方程式である。数値シミュレーションでは、この方程式は離散化されて計算されるが、流体现象にはさまざまなスケールの流れ (波動や渦) を含むため、すべてのスケールを同時に解くことは、スーパーコンピュータを持ってしても未だ難しい。このため、適切なモデル化を含んだ方程式系を計算する必要がある。

シミュレーションモデルを用いて現実の流れにより近い解を得るために、気象海洋分野においては「データ同化」が現業天気予報においても利用され、その他の流体现象に対しても、変分法、アンサンブルカルマンフィルタなど様々なデータ同化手法が研究されてきた。しかし、風洞内の流れをほぼ完全に再現するという条件に、適する方法の構築は未だ実現されていない。そこで本提案では、風洞内流れを完全に再現するデータ同化の適用法を確立することで、数値シミュレーションの問題解決を図る。確立されたデータ同化手法は、風洞実験に対する実験・計算融合アプローチとなる。

4. 研究成果

① 風洞実験における問題解決

気流方向に軸を持つ円柱の抵抗、流れ場の理解は物体周りの流体力学を考える上で重要である。特に二次元の四角柱流れからの類似性から、抵抗値が極大となる臨界形状が存在する否かは特に関心が寄せられる。1.0mMSBS と低乱熱伝達風洞により、細長比 0.5-0.75 の円柱を MSBS

で浮揚させ、その抵抗値を計測した。以前の研究で細長比 0.75 以上では抵抗値に極大値を持たないことが明らかになっていた[1]が、新たな実験結果より細長比 0.5-0.75 の範囲でも極大値を持たないことを明らかにした[2]。この後、より低い細長比での抵抗値を計測するため、低細長比を MSBS で浮揚させる新たな位置計測手法を 0.1mMSBS および 0.3mMSBS において開発し、0.3mMSBS と東北大学基礎実験風洞において細長比 0.3 までの範囲で抵抗値を計測した。結果、細長比 0.3 以上の円柱は抵抗の極大値を持たないことが明らかになった。CFD の結果と合わせて、細長比 0 以上で極大値が無いことが示唆される結果を得ている[2、3](図 1)。さらに 0.3mMSBS を用いて、細長比 1.0-2.25 の範囲で圧力・空気力・粒子画像速度計測法 (PIV) の同時計測を行った。流れ場のスパイラルモードと横力が関連を持つこと、軸対称モードと抵抗・ベース圧力が関連を持つことを明らかにした[3]。細長比 0.5 以下では圧力の同時計測ができなかったが、空気力と PIV の同期計測をおこなった。細長比 0.3-1.5 の広い範囲で再循環領域の広さなど流れ場の幾何学的なパラメタと、抵抗などの関連を明らかにした[4](図 2)。

さらに、カプセルの動的不安定などの現象理解のため 1.0mMSBS において気流方向に軸をもつ細長比 0.75 の円柱を加振させ抵抗の変化などを明らかにした。ストロハル数 0.15 程度で加振すると抵抗値が増加することがわかった。同様の条件で、数値流体力学(CFD)解析を実施し、ストロハル数 0.10 程度で同様に抵抗値が増加することがわかった。ストロハル数の違いは、風洞壁の存在による可能性があるが、今後詳細に検討する必要がある。CFD 解析結果の固有直交分解結果から、加振しない場合はスパイラルモードが発現するが、加振した場合はフラッピングモードが発現することがわかった(図 3)。今回は 1 度程度の微小振動を与えたが、大振幅の場合も検討が必要である。大振幅の振動試験はできなかったが 0.3mMSBS により、0-8 度の範囲で迎角を与え静止状態の流れ場と抵抗の変化を調べた。8 度程度の迎角で流れが再付着する一方空気力の変化は大きくないことなどを明らかにした[5]。

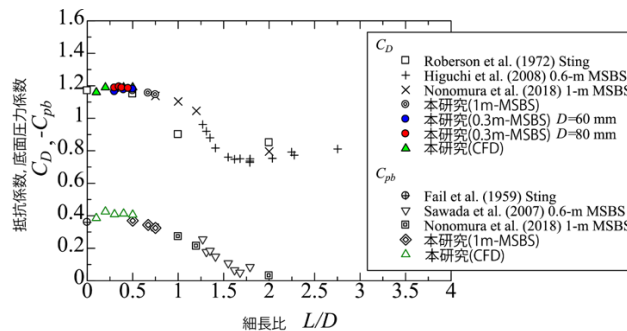


図 1 気流方向に軸を持つ円柱の抵抗係数

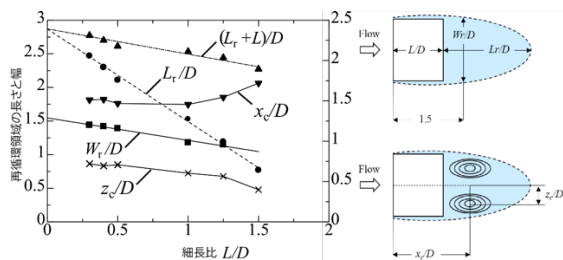


図 2 気流に方向に軸を持つ円柱まわりの流れの再循環領域の幾何学的パラメタ

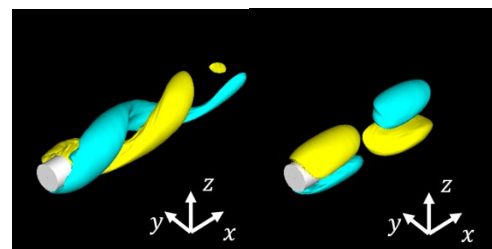


図 3 固有直交分解による速度変動場のモード解析 (左: 非加振時、右加振時、黄: 正、青: 負)

有翼模型である AGARD-B (図 4) を用いて非軸対称形状のセンシング手法を開発し、それを基に迎角 40 度を可能とする高迎角浮揚技術へと発展させた。さらに、模型を運動させることが出来る利点を生かした動的試験法の開発を進め、動的天秤評価法において 3%以下の誤差(図 5)、安定係数取得において 7%の誤差内で試験を実施できる技術を獲得した。

これら非軸対称形状の浮揚技術を用いて、ターボジャブ (図 6) の空力特性を明らかにすべく風洞試験を実施し、特に負のモーメント係数を持つという特徴がフィンの存在により決定づけられていることを明らかにした (図 7)。さらには、最適設計探索を用いて最適投げ出し条件を探索し (図 8)、槍投げ競技の導入として有益なターボジャブ活用法を提案した。

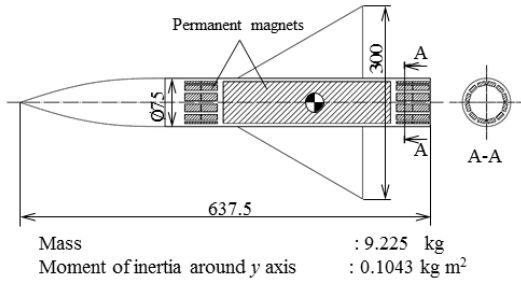


図 4 AGARD-B 模型

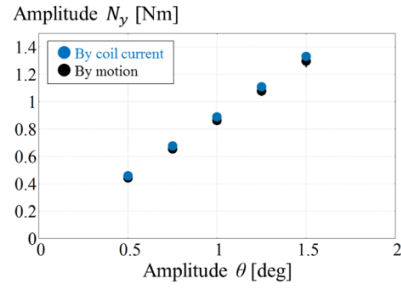


図 5 ピッチ方向慣性力評価結果例

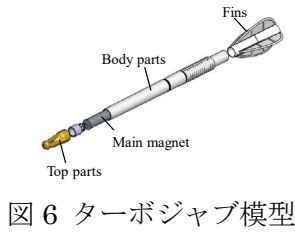


図 6 ターボジャブ模型

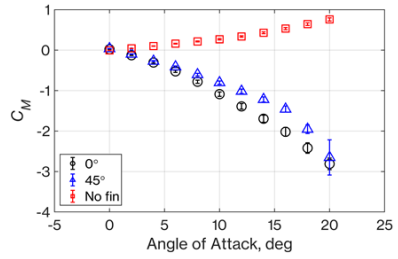


図 7 フィンによるモーメント係数の違い

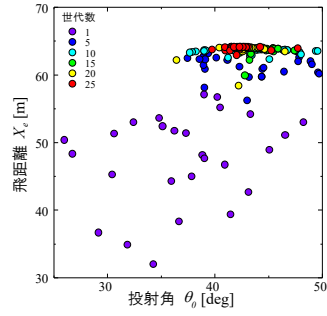


図 8 最適投射角の探索結果例

さらに、MSBS において、振動する物体表面上での流れの可視化を行うための基礎実験を行った。実験では、まずピッチ振動する翼表面上の温度分布変化をカーボンナノチューブ感温塗料 (cntTSP) によって可視化した。流れ場の熱伝達率は層流よりも乱流の方が大きいいため、層流-乱流間の温度差を cntTSP で計測することで境界層遷移位置を可視化できる。今後はこの技術を MSBS 風洞計測に適用していく予定である。

② 数値シミュレーションにおける問題解決

風洞データ同化を実現するためにはデータ同化解析のコストを低減する必要があり、それに繋がる要素技術として、次元縮約モデルや代替モデルを用いて効率的に流れ場推定[14,15]やパラメータ推定[16,17]を行う手法を開発した。また、風洞計測と数値シミュレーションの連携による風洞データ同化の可能性を広げるために、まずは図 9 に示すように気象分野の問題において、データ同化の精度を向上させる計測位置の推定[18]に取り組んだ。可観測性を経験的可観測性グラム行列により近似的に評価することで、比較的容易に計測の流れ場推定への有効性を評価することができた。そして、影響度の大きな観測データを使ってデータ同化を行うことで、より予測誤差を低減できることを確かめた。今後の課題としては、より緊密な風洞実験との連携に基づく風洞実験の不確かさの抽出と、その不確かさを低減するようなデータ同化の適切な問題設定が挙げられる。データ同化研究の成果は学会誌の解説記事とし発表し[19,20]、教科書も出版した[21]。

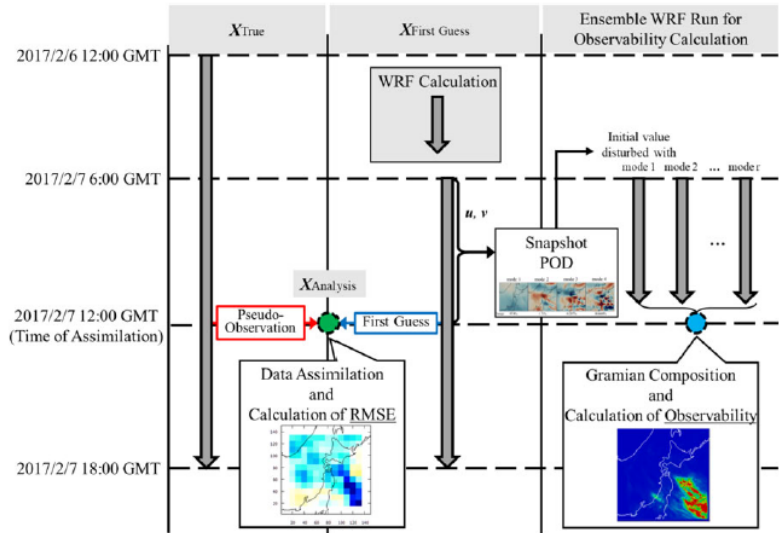


図 9 可観測性に基づく観測影響評価の数値実験 [18]

1. T. Nonomura, K. Sato, K. Fukata, H. Nagaike, H. Okuizumi, Y. Konishi, K. Asai, and H. Sawada, Effect of fineness ratios of 0.75-2.0 on aerodynamic drag of freestream-aligned circular cylinders measured using a magnetic suspension and balance system., *Experiments in Fluids.*, Vol. 59, 77 (2018).
2. K. Shinji, H. Nagaike, T. Nonomura, K. Asai, H. Okuizumi, Y. Konishi, and H. Sawada, Aerodynamic characteristics of low-fineness-ratio freestream-aligned cylinders with magnetic suspension and balance system, *AIAA Journal*, Vol. 58, pp. 3711-3714 (2020).
3. S. Yokota, T. Ochiai, Y. Ozawa, T. Nonomura, and K. Asai, Analysis of unsteady flow around an axial circular cylinder of critical geometry using combined synchronous measurement in magnetic suspension and balance system, *Experiments in Fluids*, Vol. 61, 15, (2021).
4. M. Kuwata, Y. Abe, S. Yokota, T. Nonomura, H. Sawada, A. Yakeno, K. Asai, and S. Obayashi, "Flow Characteristics Around Extremely Low Fineness-Ratio Circular Cylinders," *Physical Review Fluids* to appear 2021.
5. Hassan, M., Yokota, S., Nonomura, T., Asai K., "Effect of Angle of Attack up to 15 deg on Aerodynamic Force on a Freestream aligned Circular Cylinder of Aspect Ratio 1.0 in 0.3 m Magnetic Suspension and Balance System," *The 16th International Conference on Flow Dynamics*, November, 2019.
6. Hiroyuki Okuizumi , Kasumi Sasaki , Yasufumi Konishi and Shigeru Obayashi, Aerodynamic Characteristics of Turbojav Measured with 1-m Magnetic Suspension and Balance System, *AIAA Science and Technology Forum and Exposition, Virtual Event, United States of America*, January, 2021.
7. 佐々木香澄, 小西康郁, 奥泉寛之, 大林茂, 磁力支持天秤装置を用いたターボジャブの空力特性計測, *日本機械学会 シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2019*, 2019.
8. 佐々木香澄, 小西康郁, 奥泉寛之, 大林茂, 1-m 磁力支持天秤装置を用いた高迎角時 5 軸力評価法の実証試験, *日本航空宇宙学会北部支部 2019 年講演会*, 2019.
9. 大山尚悟, 奥泉寛之, 小西康郁, 澤田秀夫, 大林茂, 1-m 磁力支持天秤装置による非定常空力特性の取得に向けた研究, *日本航空宇宙学会北部支部 2019 年講演会*, 2019.
10. Hiroki Senda, Hideo Sawada, Hiroyuki Okuizumi, Yasufumi Konishi, Shigeru Obayashi, Aerodynamic Measurements of AGARD-B Model at High Angle of Attack by 1-m Magnetic Suspension and Balance System, *AIAA Science and Technology Forum and Exposition, Florida, United States of America*, January, 2018.
11. Shogo Oyama, Hiroyuki Okuizumi, Yasufumi Konishi, Hideo Sawada, Shigeru Obayashi, Feasibility of Dynamic Stability Measurements Using 1-m Magnetic Suspension and Balance System, *Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, 2018.
12. 大山尚悟, 奥泉寛之, 小西康郁, 澤田秀夫, 大林茂, 1-m 磁力支持天秤装置による動的風洞試験に向けた模型運動制御法の提案, *第 56 回飛行機シンポジウム*, 2018.
13. Tsubasa Ikami, Koji Fujita, Hiroki Nagai, Daisuke Yorita, Measurement of boundary layer transition on oscillating airfoil using cntTSP in low-speed wind tunnel, *Measurement Science and Technology* 32(7) 075301-075301 2021 年 7 月 1 日.
<https://doi.org/10.1088/1361-6501/abe2be>
14. Ryota Kikuchi, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Hamaki Inokuchi, "Real-Time Estimation of Airflow Vector based on Lidar Observations for Preview Control," *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 13, pp. 6543-6558, 2020.
15. Ryota Kikuchi, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Hamaki Inokuchi, Hiroshi Oikawa, Akeo Misumi, "Nowcasting Algorithm for Wind Fields Using Ensemble Forecasting and Commercial Flight Data," *Meteorological Applications*, Vol. 25, No. 3, pp. 365-375, 2018, DOI: 10.1002/met.1704.
16. Takashi Misaka, Norio Asaumi, Seiji Kubo, Takeomi Ideta, Shigeru Obayashi, "Prediction of Film-Cooling Effectiveness based on Bayesian Model Calibration of SST Turbulence Model," *IGTC-2019-061, Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo, Japan, November 17-22, 2019. ISBN 978-89111-010-9, 2019/11/17.*
17. 三坂孝志, 浅海典男, 出田武臣, 大林茂, "フィルム冷却効率予測のためのベイジアンモデル較正," *日本ガスタービン学会誌*, Vol. 47, No. 2, pp. 43-51, 2019.
18. Ryoichi Yoshimura, Aiko Yakeno, Takashi Misaka and Shigeru Obayashi, "Application of Observability Gramian to Targeted Observation in WRF Data Assimilation," *Tellus A*, Vol. 72, No. 1, pp. 1-11, 2020. DOI: 10.1080/16000870.2019.1697602
19. 三坂孝志, 加藤博司, 大林茂, データ同化支援工学(DAE)のこれまでとこれから, *日本機械学会誌*, Vol. 122, No. 1210, pp. 8-11, 2019.
20. 加藤博司, 三坂孝志, 大林茂, 大規模システムを見える化するデータ同化, *ターボ機械*, Vol. 47, No. 9, pp. 41-49, 2019.
21. 大林茂, 三坂孝志, 加藤博司, 菊地亮太, 「データ同化流体科学 流体现象のデジタルツイン」, 共立出版 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 20件）

1. 著者名 Huang Chih-Yung, Hu Yu-Hsiang, Wan Shaw-An, Nagai Hiroki	4. 巻 156
2. 論文標題 Application of pressure-sensitive paint for the characterization of mixing with various gases in T-type micromixers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 119710 ~ 119710
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119710	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Ikami Tsubasa, Fujita Koji, Nagai Hiroki	4. 巻 58
2. 論文標題 Low-Reynolds-Number Flowfield of Wing with Control Surface in Propeller Slipstream	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Aircraft	6. 最初と最後の頁 228 ~ 235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.C035880	査読の有無 有
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 Egami Y, Hasegawa Y, Matsuda Y, Ikami T, Nagai H	4. 巻 32
2. 論文標題 Ruthenium-based fast-responding pressure-sensitive paint for measuring small pressure fluctuation in low-speed flow field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 024003 ~ 024003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/abb916	査読の有無 有
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 Kurihara Daiki, Gonzales Joseph P., Claucherty Steven L., Kiritani Hideki, Fujita Koji, Jemcov Aleksandar, Nagai Hiroki, Sakaue Hirotaka	4. 巻 120
2. 論文標題 Sub-millimeter resolution pressure measurement on free flight model at Mach 1.5 using novel non-intrusive optical technique	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experimental Thermal and Fluid Science	6. 最初と最後の頁 110243 ~ 110243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.expthermflusci.2020.110243	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 FUJITA Koji, KURANE Kakeru, TAKAHASHI Koichi, NAGAI Hiroki	4. 巻 64
2. 論文標題 Effects of Propeller Position and Rotation Direction on the Ishii Wing at a Low Reynolds Number	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 22 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.64.22	査読の有無 有
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 NAKAZAWA Takashi, MISAKA Takashi, POIGNARD Clair	4. 巻 16
2. 論文標題 Shape optimization for suppressing coherent structure of two-dimensional open cavity flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 0002 ~ 0002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jfst.2021jfst0002	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Kikuchi Ryota, Misaka Takashi, Obayashi Shigeru, Inokuchi Hamaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Real-time estimation of airflow vector based on lidar observations for preview control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Atmospheric Measurement Techniques	6. 最初と最後の頁 6543 ~ 6558
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/amt-13-6543-2020	査読の有無 有
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 Hokpunna Arpiruk, Misaka Takashi, Obayashi Shigeru, Wongwises Somchai, Manhart Michael	4. 巻 423
2. 論文標題 Finite surface discretization for incompressible Navier-Stokes equations and coupled conservation laws	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 109790 ~ 109790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2020.109790	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Sawada Shoko, Itoh Takayuki, Misaka Takashi, Obayashi Shigeru, Czauderna Tobias, Stephens Kingsley	4. 巻 3
2. 論文標題 Streamline pair selection for comparative flow field visualization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art	6. 最初と最後の頁 1-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s42492-020-00056-8	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Cho Junho, Lee Bok Jik, Misaka Takashi, Yee Kwanjung	4. 巻 105
2. 論文標題 Study on decay characteristics of vertical four-vortex system for increasing airport capacity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Aerospace Science and Technology	6. 最初と最後の頁 106017 ~ 106017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ast.2020.106017	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Shinji K., Nagaike H., Nonomura T., Asai K., Okuizumi H., Konishi Y., Sawada H.	4. 巻 58
2. 論文標題 Aerodynamic Characteristics of Low-Fineness-Ratio Freestream-Aligned Cylinders with Magnetic Suspension and Balance System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 3711 ~ 3714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J058925	査読の有無 有
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 Yokota Sho, Ochiai Taku, Ozawa Yuta, Nonomura Taku, Asai Keisuke	4. 巻 62
2. 論文標題 Analysis of unsteady flow around an axial circular cylinder of critical geometry using combined synchronous measurement in magnetic suspension and balance system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-020-03101-7	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 Ryoichi Yoshimura, Aiko Yakeno, Takashi Misaka and Shigeru Obayashi	4. 巻 72
2. 論文標題 Application of Observability Gramian to Targeted Observation in WRF Data Assimilation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tellus A	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) 10.1080/16000870.2019.1697602	査読の有無 有
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 Shiku Hirai, Yuma Fukushima, Shigeru Obayashi, Takashi Misaka, Daisuke Sasaki, Yuya Ohmichi, Masashi Kanamori, and Takashi Takahashi	4. 巻 56
2. 論文標題 Influence of Turbulence Statistics on Stochastic Jet-Noise Prediction with Synthetic Eddy Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Aircraft	6. 最初と最後の頁 2342-2356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.C035465	査読の有無 有
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 三坂孝志, 加藤博司, 大林茂	4. 巻 122
2. 論文標題 データ同化支援工学(DAE)のこれまでとこれから	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 8-11
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 加藤博司, 三坂孝志, 大林茂	4. 巻 47
2. 論文標題 大規模システムを見る化するデータ同化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 41-49
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 T H Tran, T Ambo, T Lee, Y Ozawa, L Chen, T Nonomura, K Asai	4. 巻 60
2. 論文標題 Effect of Reynolds number on flow behavior and pressure drag of axisymmetric conical boattails at low speeds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-019-2680-y	査読の有無 有
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 Tran, T.H., Ambo, T., Chen, L., Nonomura, T., Asai, K.	4. 巻 62
2. 論文標題 Effect of boattail angle on pressure distribution and drag of axisymmetric afterbodies under low-speed conditions	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 219-226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.62.219	査読の有無 有
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 K. Shinji, H. Nagaike, T. Nonomura, K. Asai, H. Okuizumi, Y. Konishi and H. Sawada	4. 巻 58
2. 論文標題 Aerodynamic Characteristics of Low-Fineness-Ratio Freestream-Aligned Cylinders with Magnetic Suspension and Balance System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J058925	査読の有無 有
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 三坂孝志, 浅海典男, 出田武臣, 大林茂	4. 巻 47
2. 論文標題 フィルム冷却効率予測のためのペイジアンモデル較正	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本ガスタービン学会誌	6. 最初と最後の頁 43-51
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fumiya Togashi, Takashi Misaka, Rainald Lohner, and Shigeru Obayashi	4. 巻 35
2. 論文標題 Using Ensemble Kalman Filter to Determine Parameters for Computational Crowd Dynamics Simulations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering Computations	6. 最初と最後の頁 2612 2628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1108/EC-03-2018-0115	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 牧野真弥, 三坂孝志, 大林茂, 廣瀬拓也, 佐々木大輔	4. 巻 17
2. 論文標題 BCM TASカップリングソルバーを用いたNASA CRMの空力解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 199 208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.JSASS-D-17-00038	査読の有無 有
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 Takashi Misaka, Shigeru Obayashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Zonal Reduced Order Modelling toward Prediction of Transitional Flow Fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012012 1 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1036/1/012012	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計44件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 32件)

1. 発表者名 Y. Abe, S. Yokota, T. Nonomura, H. Sawada, A. Yakeno, K. Asai, S. Obayashi
2. 発表標題 Aerodynamic Characteristics of Circular Cylinders with Fineness Ratios Lower than 0.5 Measured by a Magnetic Suspension and Balance System
3. 学会等名 The Seventeenth International Conference on Flow Dynamics, Online (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 M. Horiguchi, Y. Saito, T. Nonomura, K. Asai, Y. Konishi, H. Okuizumi, H. Sawada, S. Obayashi
2 . 発表標題 Wind-tunnel Experiment of Square-Cylinder Model in 1.0-mMagnetic Suspension and Balance System
3 . 学会等名 The Seventeenth International Conference on Flow Dynamics, Online (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Hiroyuki Okuizumi, Kasumi Sasaki, Yasufumi Konishi, Shigeru Obayashi
2 . 発表標題 Aerodynamic Measurements of Turbojav using 1-m Magnetic Suspension and Balance System
3 . 学会等名 AIAA SciTech Forum and Exposition (Virtual Event) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Shigeru Obayashi, Taku Nonomura, Keisuke Asai
2 . 発表標題 An Overview of MSBS Activities at Tohoku University
3 . 学会等名 AIAA SciTech Forum and Exposition (Virtual Event) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Kuwata, Y. Abe, S. Yokota, T. Nonomura, H. Sawada, A. Yakeno, K. Asai, and S. Obayashi
2 . 発表標題 Aerodynamic Characteristics of Circular Cylinders with Fineness Ratios Lower than 0.5 Measured by a Magnetic Suspension and Balance System
3 . 学会等名 The Seventeenth International Conference on Flow Dynamics, Online (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Yokota, Y. Saito, T. Nonomura, and K. Asai
2 . 発表標題 Investigation on Near-wake Structure of Magnetically Levitated Freestream-aligned Circular Cylinder with Fineness Ratio 0.5 - 2.0 in 0.3-m MSBS
3 . 学会等名 The Seventeenth International Conference on Flow Dynamics, Online (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 M. Horiguchi, Y. Saito, T. Nonomura, K. Asai, Y. Konishi, H. Okuizumi, H. Sawada, S. Obayashi
2 . 発表標題 A new position and attitude measurement method for complex shape models with non circular cross section in Magnetic Suspension and Balance System
3 . 学会等名 AIAA SciTech Forum and Exposition (Virtual Event) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Kasumi Sasaki , Yasuhumi Konishi , Hiroyuki Okuizumi , Shigeru Obayashi
2 . 発表標題 A Force Evaluation Test of 5-Axis Controlled Model at High Angles of Attack in 1-m Magnetic Suspension and Balance System
3 . 学会等名 Sixteenth International Conference on Fluid Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Masahide Kuwata, Aiko Yakeno, Yoshiaki Abe, Shigeru Obayashi
2 . 発表標題 Flow Dynamics of Low Fineness Ratio Circular Cylinders Evaluated by IFS 0.1-m MSBS and Large-Eddy Simulation
3 . 学会等名 Sixteenth International Conference on Fluid Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木 香澄, 小西 康郁, 奥泉 寛之, 大林 茂
2. 発表標題 磁力支持天秤装置を用いたターボジャブの空力特性計測
3. 学会等名 日本機械学会 シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahide Kuwata, Sho Yokota, Hideo Sawada, Yoshiaki Abe, Aiko Yakeno, Taku Nonomura, Keisuke Asai, Shigeru Obayashi
2. 発表標題 Drag Coefficients of Circular Cylinders with Fineness Ratios of less than 0.50 measured by 0.1 and 0.3 m Magnetic Suspension and Balance Systems
3. 学会等名 2020 American Institute of Aeronautics and Astronautics Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shinji, H. Okuizumi, Y. Konishi, T. Nonomura, H. Sawada, K. Asai
2. 発表標題 Dynamic Characteristics of Freestream-Aligned Circular Cylinder with Fineness Ratio of 0.75 under Small-Amplitude Forced Oscillation in 1-m MSBS
3. 学会等名 The 16th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Horiguchi, M. Kuwata, T. Nonomura, K. Asai
2. 発表標題 Improvement of Sensor Subsystem for Rectangular Parallelepiped Model in 1-m Magnetic Suspended and Balance System
3. 学会等名 The 16th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Hassan , S. Yokota, T. Nonomura, K. Asai
2 . 発表標題 Effect of Angle of Attack of up to 15 Degree on Aerodynamic Force on a Freestream-aligned Circular Cylinder of Aspect Ratio 1.0 in 0.3-m Magnetic Suspension and Balance System
3 . 学会等名 The 16th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Yokota , T. Nonomura, K. Asai
2 . 発表標題 Investigation of Characteristic Flow Structure around Circular Cylinders with Fineness Ratio 0.5 - 2.25 in 0.3-m MSBS
3 . 学会等名 The 16th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tsubasa Ikami, Koji Fujita, Hiroki Nagai
2 . 発表標題 PIV Measurement of Oscillating Airfoil at Low Reynolds Number
3 . 学会等名 16thInternational Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tsubasa Ikami, Koji Fujita, Hiroki Nagai, Daisuke Yorita
2 . 発表標題 Measurement of Boundary Layer Transition on Oscillating Airfoil using cntTSP in Low-Speed Wind Tunnel
3 . 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 伊神翼, 藤田昂志, 永井大樹, 依田大輔, Christian Klein
2. 発表標題 カーボンナノチューブ感温塗料を利用した低速流れにおけるNACA0012翼の動的境界層遷移計測
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 伊神翼, 藤田昂志, 永井大樹, 依田大輔, Christian Klein
2. 発表標題 低速風洞での流れ場計測におけるcntTSPの応答性評価
3. 学会等名 第47回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊神翼, 藤田昂志, 永井大樹, 依田大輔, Christian Klein
2. 発表標題 低速流れでの動的な境界層遷移計測におけるcntTSPの時間応答性の調査
3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Misaka, Norio Asaumi, Seiji Kubo, Takeomi Ideta, Shigeru Obayashi
2. 発表標題 Prediction of Film-Cooling Effectiveness based on Bayesian Model Calibration of SST Turbulence Model
3. 学会等名 International Gas Turbine Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Kuwata, S. Obayashi
2 . 発表標題 A New Model Position Sensing Method for aSmall Fineness Ratio Bluff Body at the IFS0.1-m MSBS
3 . 学会等名 Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Oyama, H. Okuizumi, Y. Konishi, H. Sawada, S. Obayashi
2 . 発表標題 Feasibility of Dynamic Stability Measurements Using 1-m Magnetic Suspension and BalanceSystemS
3 . 学会等名 Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Obayashi
2 . 発表標題 Multiscale and Multiphysics Modeling for Aircraft Design
3 . 学会等名 Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Kawagoshi, H. Sawada, S. Obayashi
2 . 発表標題 Near-Field Pressure Measurement of a Model Suspended by Magnetic Force in Supersonic Wind Tunnel
3 . 学会等名 Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 大山 尚悟, 奥泉 寛之, 小西 康郁, 澤田 秀夫, 大林 茂
2. 発表標題 1-m 磁力支持天秤装置による非定常空力特性の取得に向けた研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2019年講演会 ならびに第20回再使用型宇宙推進系シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木 香澄, 小西 康郁, 奥泉 寛之, 大林 茂
2. 発表標題 1-m 磁力支持天秤装置を用いた高迎角時5軸力評価法の実証試験
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2019年講演会 ならびに第20回再使用型宇宙推進系シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑田 政英, 澤田 秀夫, 大林 茂
2. 発表標題 IFS 0.1-m 磁力支持天秤装置を用いた低細長比鈍頭物体用位置計測法の開発
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2019年講演会 ならびに第20回再使用型宇宙推進系シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Ambo, Taku Ochiai, Taku Nonomura, Keisuke Asai
2. 発表標題 Investigation of the Effect of Angle of Attack on the Flow Separation of a Prolate Spheroid by Using the 0.3-m MSBS
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 Taku Ochiai, Takumi Ambo, Yuta Ozawa, Taku Nonomura, Keisuke Asai
2. 発表標題 Visualization of the Flow Field around a Circular Cylinder in the 0.3-m MSBS
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 Kento Shinji, Hayato Nagaike, Taku Nonomura, Keisuke Asai, Hideo Sawada, Yasufumi Konishi, Hiroyuki Okuizumi
2. 発表標題 Study of Aerodynamic Characteristics of Axial Circular Cylinders with Low Fineness Ratio by Using the 1.0-m MSBS
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 Taku Ochiai, Takumi Ambo, Yuta Ozawa, Taku Nonomura, Keisuke Asai
2. 発表標題 Effects of Fineness Ratio on Flow Field of Axial Circular Cylinder
3. 学会等名 71th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kento Shinji, Hayato Nagaike, Taku Nonomura, Keisuke Asai, Hideo Sawada, Yasufumi Konishi, Hiroyuki Okuizumi
2. 発表標題 Aerodynamic Characteristics of Axial Circular Cylinders with Low Fineness Ratios between 0.5 and 0.75 using
3. 学会等名 AIAA SciTech 2019, AIAA Paper 2019-0072 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横田 翔, 落合 拓, 安保 巧 小澤 雄太, 野々村 拓, 浅井 圭介
2. 発表標題 磁力支持天秤装置を用いた 細長比0.5の円柱周りの流れ場解析
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2019年講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田昂志, 上地健太, 永井大樹
2. 発表標題 低レイノルズ数における柔軟膜翼の風洞試験
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第49期年会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永井大樹, 倉根翔, 上地健太, 高橋幸一, 藤田昂志
2. 発表標題 プロペラ後流が火星飛行機主翼に与える影響
3. 学会等名 第50回流体力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 依田大輔, Jonathan Lemarechal, Christian Klein, 藤田昂志, 永井大樹
2. 発表標題 カーボンナノチューブTSPを用いた翼のピッチスウィープ試験における境界層遷移の動的可視化
3. 学会等名 第46回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤田昂志, Pomar Guillaume, 永井大樹
2. 発表標題 火星縦穴探査用回転翼機の初期概念設計
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Fujita, Akira Oyama, Daisuke Kubo, Masahiro Kanazaki, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Wind Tunnel Test for Videogrammetric Deformation Measurement of UAV for Mars Airplane Balloon Experiment-1 (MABE-1)
3. 学会等名 Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kano, K. Fujita, H. Nagai
2. 発表標題 Performance Test of Co-axial Rotor of Mars Helicopter for Vertical Hole Exploration on Mars
3. 学会等名 Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Yorita, J. Lemarechal, C. Klein, K. Fujita, H. Nagai
2. 発表標題 Dynamic Visualization of Boundary-layer Transition in a Pitch-sweep Test using Carbon Nanotube TSP
3. 学会等名 Proceedings of 18th International Symposium on Flow Visualization (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Fujita, Kenta Uechi, Koichi Takahashi, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Effects of Rib Number and Rigid Trailing Edge on Flexible-Skinned Thick Wing at Low Reynolds Number
3. 学会等名 AIAA Scitech 2019 Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsubasa Ikami, Kensuke Kanou, Koji Fujita, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Flow Field on Wing Surface with Control Surface in Propeller Slipstream at Low Reynolds Number
3. 学会等名 AIAA Scitech 2019 Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kensuke Kanou, Koji Fujita, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Experimental Study on High Efficiency of Aerodynamic Performance of Rotor Blades for Mars helicopter
3. 学会等名 AIAA Scitech 2019 Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 大林茂, 三坂孝志, 加藤博司, 菊地亮太	4. 発行年 2021年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 272
3. 書名 データ同化流体科学 流体現象のデジタルツイン	

〔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	三坂 孝志 (MISAKA TAKASHI) (20645139)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	浅井 圭介 (ASAI KEISUKE) (40358669)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	
研究分担者	野々村 拓 (NONOMURA TAKU) (60547967)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	奥泉 寛之 (OKUIZUMI HIROYUKI) (60647957)	東北大学・流体科学研究所・技術専門職員 (11301)	
研究分担者	永井 大樹 (NAGAI HIROI) (70360724)	東北大学・流体科学研究所・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