

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00800

研究課題名（和文）変形する物体が生む非定常流れの計測とロコモーション原理の解明

研究課題名（英文）Measurement of unsteady flow generated by deformable object for understanding locomotion principle

研究代表者

浅井 圭介 (Asai, Keisuke)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：40358669

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,350,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、運動を伴う翼面の非定常流体力によるロコモーションの空気力学的メカニズムの解明とそのために必要となる実験手法を確立することを目的に実施した。酸素消光性を有する色素分子からなる感圧塗料に寿命計測法とデータ同化を利用した3次元形状変形計測を組み合わせ、変形する翼面上の非定常圧力分布を画像に捉える技術を開発し、回転翼と羽ばたき翼を対象にした評価試験でその有効性を実証した。これらの新手法を用いて、大規模剥離渦と翼面に働く流体力の関係を調べ、運動する翼面が揚力や推力を効率的に生むメカニズムに関する多くの知見を得、理論だけでは解決できなかった設計上の諸問題の解決に道を拓いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

運動する翼面の周囲には前縁剥離渦や渦輪などの大規模な剥離渦が存在し、それらと翼面との相互作用で生まれる流体力が外乱に対するロバスト性を生んでいる。回転翼や羽ばたき翼を有する飛行ロボットは社会における様々な分野での利用だけでなく、火星などの大気を有する天体の探査計画への適用が期待されている。様々な大気条件下における安定した飛行を保証するには、大規模剥離渦と翼面に働く流体力の関係を調べる先進的な実験手法の確立が不可欠であり、本研究で得られた技術と知見は、運動を伴う翼面の非定常流体力によるロコモーションの空気力学的メカニズムの解明だけでなく、様々な形態の飛行機械の設計指針の確立に寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to clarify the aerodynamic mechanism of locomotion caused by unsteady flow forces on a moving wing surface and to establish the experimental methods necessary for this purpose. By combining a pressure-sensitive paint (PSP) consisting of dye molecules having oxygen quenching properties with a lifetime measurement method and three-dimensional deformation measurement (VDM) using data assimilation, we developed a technique to image unsteady pressure distribution on a deforming wing surface and demonstrated its effectiveness in the benchmark experiments on a rotating wing and a flapping wing. Using the newly-developed techniques, we investigated the relationship between the large-scale separation vortex and the hydrodynamic forces acting on the wing surface, and obtained many insights into the mechanism by which a moving wing surface generates lift and thrust, paving the way to solving design problems that could not be solved by theory alone.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：感圧塗料 変形計測 回転翼 羽ばたき翼 ロコモーション原理

## 1. 研究開始当初の背景

回転翼や羽ばたき翼は揚力や推進力を効率的に発生するだけでなく、乱気流のなかでも安定性や操縦性を保持する能力を持っている。運動する翼面の周囲には前縁剥離渦や渦輪などの大規模な離渦が存在し、それらと翼面との相互作用で生まれる流体力が外乱に対するロバスト性を生んでいる。回転翼や羽ばたき翼を有する飛行ロボット(ドローン)は、輸送、インフラ点検、救助などの社会における様々な現場での利用だけでなく、火星などの大気を有する天体の探査計画への適用が期待されている。しかし、その設計指針は必ずしも確立しておらず、特に様々な大気条件下における安定した飛行を保証するには、大規模な離渦と翼面に働く流体力の関係を調べる先進的な実験手法の開発が必要とされていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、運動を伴う翼面の非定常流体力によるロコモーションの空気力学的メカニズムの解明するための実験手法を確立することである。そのため、酸素消光性を有する色素分子からなる感圧塗料(PSP)に寿命計測法とデータ同化を利用した3次元形状変形計測(VDM)を組み合わせることによって、変形する翼面上の非定常圧力分布を画像に捉える技術の開発に取り組む。併せて、周囲酸素濃度を可変することでPSPの感度を飛躍的に向上させる新手法の開発に挑む。対象とするのは回転翼と羽ばたき翼であり、これらの推進機構を有する飛行ロボットの飛行状態を模擬したベンチマーク実験を通じて、大規模な離渦と翼面に働く流体力の関係を調べ、運動する翼面が揚力や推力を効率的に生むロコモーションのメカニズムを調べ、理論だけでは解決できなかった設計上の諸問題の解決に道を切り拓く。

## 3. 研究の方法

変形する物体が生じる非定常圧力場を光学的に計測する新規技術を開発し、その能力を実験により実証するため、本研究では、全体を(1) 先進計測手法の研究開発、(2) ベンチマーク試験による評価、(3) ロコモーションメカニズムの解明という三段階に分けて研究開発を行う。

### (1) 先進計測手法の研究開発

PSP計測には、物体の運動や変形による励起光強度の変化の影響を受けない寿命計測法を適用し、これにデータ同化を利用した3次元形状変形計測を組み合わせる。これらの手法の開発によって、従来は不可能と考えられていた高速で運動する翼面の非定常圧力場と変形の同時計測が実現する。最適ゲートの決定法の研究と併せて、試験環境の酸素濃度を最適値に制御する新手法の適用により、PSPの応答性・感度・発光強度を極限まで高めることを試みる。一方、3次元形状変形計測の実証試験については、写真測量法によるステレオ計測を教師データとして、データ駆動科学の手法を用いてシングルカメラで3次元形状を計測する技術を開発し、その計測精度を実験によって評価する。

### (2) ベンチマーク試験による評価

回転翼と羽ばたき翼の2種類の模型に対してベンチマーク試験を実施する。回転翼については、高速で回転するブレード上の表面圧力場の計測に挑む。試験は大気圧下と減圧下の2つの環境で実施する。実験では温度補正法の検討を行うとともに、最適ゲートの決定法や信号雑音比を向上するための各種手法を評価する。減圧下での実験では、任意の酸素モル分率でPSP計測が行える環境を整備し、最適酸素濃度におけるPSP計測を試みる。一方、羽ばたき翼に対するベンチマーク試験では、強力なモーターとリンククランク機構からなる評価用ロボットを設計製作する。この実験には、(1)で開発した寿命法、酸素濃度可変機構、3次元変形計測手法等の技術を統動員して臨み、羽ばたき運動しながら弾性変形する翼面の3次元形状の動的計測を試みる。

### (3) ロコモーションメカニズムの解明

小型ドローンや火星ヘリコプターなどが飛行する低レイノルズ数環境では、翼性能に対する圧縮性効果が未解明のままである。この問題を解明するため、空気力計測やPSP計測のほか、高速度シュリーレン画像を高信号雑音比する信号処理手法を開発し実験に投入する。平板や角柱列、NACA-0006/0012などの基本形状翼型を供試体として、揚力・抗力発生の機構とそれに対する圧縮性の影響を評価する。また実験と並行に、ホバリング運動する羽ばたき翼周り流れ場のALE解析を行い、数値計算で得られた流れ場より推力発生メカニズムを推測する。

## 4. 研究成果

### (1) 非定常圧力分布計測技術の高度化

寿命法を使った圧力・温度同時計測の最適な計測条件を決定する手法を提案し、その能力をサンプル実験によって評価した。圧力計測誤差を最小とする計測条件を最適ゲートと定義し、適切なPSPとTSP(感温塗料)の組み合わせと最適ゲートを理論的に決定する手法を考案した。系統的なサンプル試験の結果、最適ゲートでは従来手法のゲート設定より圧力計測誤差が減少することが確認された。一方、低圧環境におけるPSPの応答特性を評価するため、気柱音響共鳴管を用いて様々なPSPの周波数応答を計測し、それに対する圧力の影響を評価した。その結果、高速応答性を有するTLC-PSP、PC-PSP、AA-PSPという組成の異なる3種類のPSPについて、応答性を支配する因子を特定することができた。この知見を基に、低圧において高い周波数特性をもつポリマーセラミックPSP(PC-PSP)を新規開発した。

感圧塗料の特性の雰囲気圧依存性をサンプル試験により評価した。雰囲気圧が異なる条件でのPSPの計測性能を公平に評価するパラメータを提案し、感圧塗料が最も性能を発揮する雰囲気圧力を同定した。また、雰囲気の酸素モル分率を変化させた場合についての試験を行い、図1に示すように、酸素モル分率が異なる場合でも感圧塗料の特性は酸素分圧で整理できることを明らかにした。これにより、使用する感圧塗料の性能が最大となる酸素分圧になるよう酸素モル分率を調整すれば高感度のPSP計測が行えて、計測精度の向上が期待できることが示された。

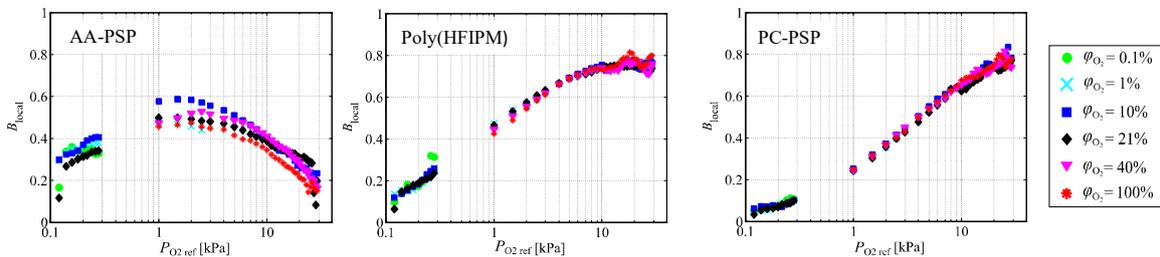


図1 各種PSPの圧力感度の酸素分圧に対する変化

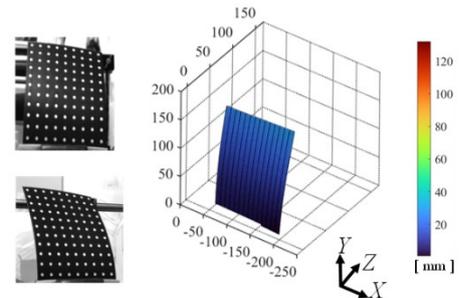
また、これとは並行に感圧・感温色素を1つのバインダに混合した複合塗料の寿命計測の検討を行った。3ゲートの計測に加え、劣化補正パラメータを新たに導入することで、温度の影響を受けない高精度の圧力計測が行えることを明らかにした。もう一つの誤差源である画像の特徴点検出手法については、明示的なマーカーを用いずに移動物体の感圧塗料計測画像の位置合わせを行う手法を提案した。この方法により、既存の特徴点検出手法を用いた場合と同等の精度の計測が低コストで行えることを確認した。

### (2) 3次元形状変形計測手法の開発

共線性方程式に基づき2つの画像から3次元形状を計測する従来の写真測量法に加えて、データ駆動型手法によってシングルカメラで変形計測を行う新手法を提案し、その計測誤差を模擬実験により評価した。この方法では、事前に計測したターゲットの2次元座標と3次元変形量を写真測量法により計測し、それを教師データとし特異値分解を用いて空間情報を得ることで、シングルカメラで模型の変形が計測できる。弾性変形するプラスチック板を用いた予備実験を行った結果、表1に示すように、十分な学習を行えばシングルカメラで3次元形状の高精度の計測が実現できることを確認した。

表1 シングルカメラ計測の計測誤差

	x	y	z
Error [mm]	0.0220	0.0415	0.1872
Error [%]	0.0110	0.0208	0.0936
Standard deviation [mm]	0.0316	0.0546	0.2291



### (3) 回転翼流れの計測と推力発生メカニズムの考察

回転翼によるベンチマーク試験は、大気圧下で行うものとチャンバーに入れ減圧下で行うものの2つに分かれる。大気圧下での試験では、一般的なプロペラ形状のブレードのほか、材質の異なる2種類の平板ブレードを製作し、圧力分布の計測のほか発生する推力によるブレードの形状変形

の効果を調べた。回転翼は2枚のブレードからなり、ブレードの片翼に PSP ，もう一方に TSP を塗装して、寿命法により圧力と温度を同時計測した。図 2 に写真と計測結果の一例を示す。計測した温度情報を用いて PSP の圧力データに対する温度の影響を補正し、さらに回転によるブレの影響を逆関数法によって補正した。その結果、圧力計測誤差は大きく改善され、圧力変換器の測定値との差は 80Pa 程度にまで低減した。

一方、火星大気風洞を用いた低圧下で行った回転翼のベンチマーク試験では、当初予定した塗料が有機物等の汚染による劣化の影響を受けることが判明したため、塗料の選定をやり直した。雰囲気圧を 10 kPa とし、酸素モル分率を 10%, 21%, 40% の 3 条件とし、アスペクト比 2 の矩形平板ブレード上の圧力場を計測した。図 3 に示すように、雰囲気酸素モル分率を 40% に上昇させることで感圧塗料の感度が増加し、信号雑音比が向上することがわかった。計測された圧力分布は前縁剥離渦による低圧域の広がりを示しており、低レイノルズ数における推力発生に剥離渦の挙動が重要な役割を果たしていることを確認した。

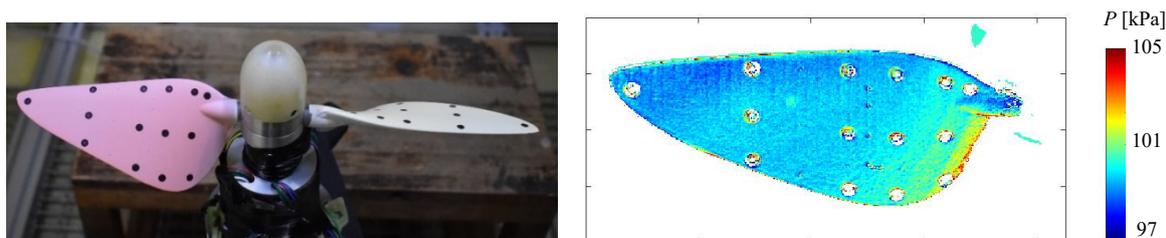


図2 大気圧実験で使用した回転翼模型と計測結果の一例(回転数 3,000RPM)

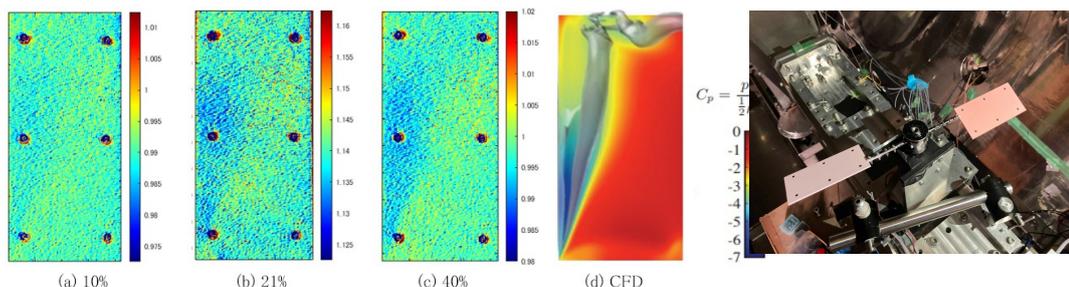


図3 平板ブレード上の圧力分布に対する酸素モル分率の影響(周囲圧10kPa)

#### (4) 羽ばたき翼流れの計測と推力発生メカニズムの考察

羽ばたき翼によるベンチマーク試験では、羽ばたき翼面の非定常圧力と形状変形の同時計測が可能な計測システムの構築に重点をおいた。PSP 計測では十分な発光強度を得ることが重要であり、光源を 4 台にし、光源と模型の距離を接近させることで、発光強度の増加を実現した。図 4 にシステムの全体像を示す。チャンバー圧力を可変して、*in situ* 較正を行ったところ、PSP の寿命計測に十分な感度があることを確認した。このシステムにもう1台のカメラを組み込むことで、圧力分布と 3 次元形状変形の同時計測を可能にする計測システムを構築することができた。

PSP による羽ばたき翼面圧力分布計測のためには、高速で動作する羽ばたき運動機構が不可欠である。高速強力なモーターの回転運動をリンククランク機構により往復運動に変換する形式の羽ばたき翼ロボットを製作し、設計羽ばたき翼型振幅(120 度)を達成することには成功したが、設

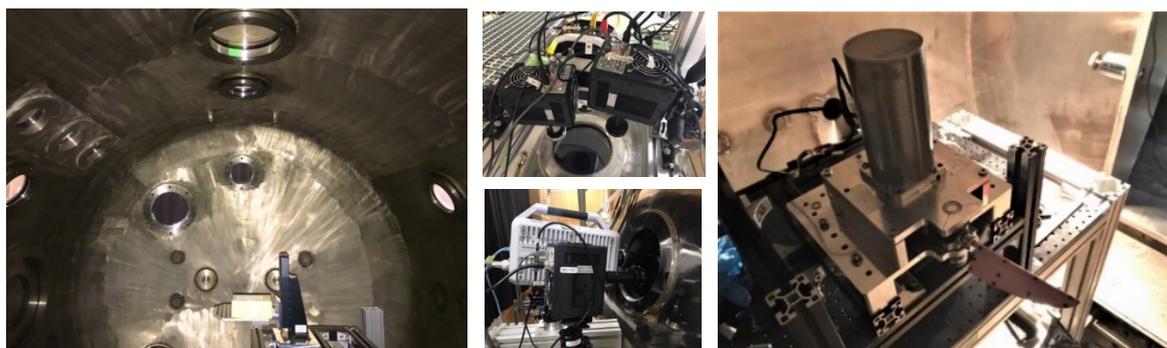


図4 羽ばたき翼の計測システム(チャンバー, 励起光限, 高速度カメラ, 羽ばたき翼ロボット)

計羽ばたき周波数の 30Hz での駆動には至らなかった。安定駆動できた 15Hz での羽ばたき翼面の非定常 PSP 計測および変形計測を試みた結果、それらの量の同時計測が実現可能であることが確認できた。

3次元形状計測の評価のため、PSP 評価用ロボットとは別に翼長が短い小型羽ばたき翼ロボットを設計製作した。このロボットを用いたベンチマーク試験で、約 36Hz で羽ばたく翼面の 3次元形状を時分解で計測することに成功した。これらの一連の実験により、運動中の羽ばたき翼の変形は非常に複雑で、これが発生する推力に大きな影響を及ぼしていることが明らかになった。

#### (5) ロコモーションメカニズムの解明のための基礎研究

低圧下での流れ場の状態を可視化する第3の手法として高速度シュリーレン法を導入した。低圧での密度勾配による微小な光路の変化を捉えるため、光路の延長、ダクトによる揺らぎ防止、高輝度 LED の導入などの対策を講じるとともに、乱択特異値分解とバンドパスフィルタ処理を組み合わせたノイズ除去処理を開発した。この手法を用いて、火星風洞で取得した平板や角柱、円柱などの基礎形状物体や三角翼型や NACA 翼型などの翼周り流れのデータの解析を行った結果、各物体に共通して高マッハ数流れでは、剥離せん断層が安定化し渦放出が抑制されることが明らかになった(図 5)。これらは、小型ドローンやローター先端の揚力発生に影響する重要な因子である。

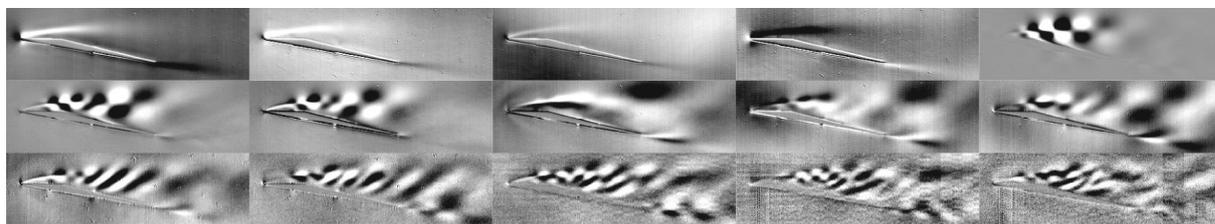


図5 モード分解された三角翼型周りの流れ場 ( $\alpha=10$  deg,  $Re=10,000$ ,  $M=0.5$ )

上記の実験的研究に加えて、ホバリング運動する羽ばたき翼周り流れ場の ALE 解析を行なった。計算より得られた 20 周期分の位相平均流れ場を観察すると翼反転時に翼と後流の干渉現象 (WWI) が生じ、後流渦と前縁渦による翼に沿う上昇流と下降流の発生を確認した。一方で、翼反転時の角振幅は WWI に対して重要な運動パラメータでないことがわかった。さらに、 $Re=25,000$  でホバリングする二次元平板翼周り流れ場を 40 周期の長周期数値解析を実施した。10-15 周期、35-40 周期で得られた  $C_L$  履歴を位相平均すると、流れ場中の残存渦と平板翼との干渉による強い影響があり、各位相で得られる  $C_L$  値は一致しないことが明らかになった。

#### (6) 国際共同研究の推進

本研究を推進する過程で複数の海外機関から共同研究の申し出があった。個別の課題毎に詳細な打合せを行い、合意に至ったものについて共同研究を推進した。

その一つ目が米国 NASA Ames Research Center の回転翼最適設計プロジェクト「ROAMX」メンバーとの共同研究である。ROAMX は人類史上初めて地球以外の天体で飛行した火星ヘリコプター「Ingenuity」の後継である「Mars Science Helicopter (MSH)」のローターの最適設計に従事する研究グループである。彼らが必要としているのは、最適化に使用する数値計算コードの検証を行うための実験データで、彼らが設計した最適翼型について、火星風洞で取得した低レイノルズ数・高亜音速の実験データを提供することで合意した。

2つ目は、英国 Imperial College London の Vincent 教授のグループとの共同研究である。同グループは DNS などの高忠実度数値計算で世界的に有名なグループであり、共通の課題となったのは風洞実験における側壁干渉の影響の評価である。当方が天秤や PSP のデータを供給し、Imperial が数値計算を行った。その結果、側壁の影響を考慮すると実験と数値計算との一致が著しく改善されることが明らかになった。

さらには、ドイツ航空宇宙研究センター (DLR) と共同で、PSP を正弦波励起した際の位相と振幅の変化から圧力と温度を算出する「FLIM 法」(Frequency-domain Lifetime Imaging Technique) の評価を行った。パラメータを系統的に変化させた実験を行い、温度の補正が可能であることを確認した。この他、信州大学を通じて米国アラバマ大学と火星探査用の羽ばたきロボットに関する共同実験を実施した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 T. Okudera, T. Nagata, M. Kasai, Y. Saito, T. Nonomura and K. Asai	4. 巻 21
2. 論文標題 Effect of oxygen mole fraction on static properties of pressure-sensitive paint	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1062 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21041062	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 M. Kasai, T. Nagata, T. Nonomura, and K. Asai	4. 巻 21
2. 論文標題 Frequency Response of Pressure-Sensitive Paints under Low-Pressure Conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3187 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21093187	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. Kusama, T. Nagata, M. Anyoji, T. Nonomura and K. Asai	4. 巻 53
2. 論文標題 Investigation of Mach number effects on flow over a flat plate at Reynolds number of $1.0 \times 10^4$ by Schlieren visualization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fluid Dynamic Research	6. 最初と最後の頁 015513 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/abe04c	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 A. G. Herrero, A. Noguchi, K. Kusama, T. Shigeta, T. Nagata, T. Nonomura and K. Asai	4. 巻 62
2. 論文標題 Effects of compressibility and Reynolds numbers on the aerodynamic of a simplified corrugated airfoil	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 63 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-021-03164-0	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

1. 著者名 K. Suzuki, T. Inoue, T. Nagata, M. Kasai, T. Nonomura and Y. Matsuda	4. 巻 22
2. 論文標題 Markerless image alignment method for pressure-sensitive paint measurement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 453 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22020453	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 T. Shigeta, T. Nagata, T. Nonomura and K. Asai	4. 巻 25
2. 論文標題 Enhancement of signal-to-noise ratio of schlieren visualization measurements in low-density wind tunnel tests using modal decomposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Visualization	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12650-022-00829-8	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 L. Caros, O. R. H. Buxton, T. Shigeta, T. Nagata, T. Nonomura, K. Asai and P. E. Vincent	4. 巻 60
2. 論文標題 Direct numerical simulation of flow over a triangular airfoil under Martin atmospheric conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J061454	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

1. 著者名 Yosuke Sugioka, Kazuyuki Nakakita, Shunsuke Koike, Tsutomu Nakajima, Taku Nonomura, Keisuke Asai	4. 巻 62
2. 論文標題 Characteristic unsteady pressure field on a civil aircraft wing related to the onset of transonic buffet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 20-1 20-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-020-03118-y	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 Marco Costantini, Taekjin Lee, Taku Nonomura, Keisuke Asai, Christian Klein	4. 巻 62
2. 論文標題 Feasibility of skin friction field measurements in a transonic wind tunnel using a global luminescent oil film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 21-1 21-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-020-03109-z	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

1. 著者名 Kazuki Uchida, Yosuke Sugioka, Miku Kasai, Yuji Saito, Taku Nonomura, Keisuke Asai, Kazuyuki Nakakita, Yusuke Nishizaki, Yoshiyuki Shibata, Seiichi Sonoda	4. 巻 62
2. 論文標題 Analysis of transonic buffet on ONERA-M4 model with unsteady pressure-sensitive paint	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 134-1 134-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-021-03228-1	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 Nagata T., Noguchi A., Kusama K., Nonomura T., Komuro A., Ando A., Asai K.	4. 巻 893
2. 論文標題 Experimental investigation on compressible flow over a circular cylinder at Reynolds number of between 1000 and 5000	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A13-1 ~ A13-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2020.221	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 Kasai Miku, Sugioka Yosuke, Yamamoto Masanori, Nagata Takayuki, Nonomura Taku, Asai Keisuke, Hasegawa Yasuchika	4. 巻 20
2. 論文標題 Characteristic Evaluation of Chameleon Luminophore Dispersed in Polymer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2623 ~ 2623
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20092623	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 Nagata Takayuki, Kasai Miku, Okudera Tomohiro, Sato Hitomi, Nonomura Taku, Asai Keisuke	4. 巻 31
2. 論文標題 Optimum pressure range evaluation toward aerodynamic measurements using PSP in low-pressure conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 085303 ~ 085303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ab81bb	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 Lee Taekjin, Lee Chungil, Nonomura Taku, Asai Keisuke	4. 巻 23
2. 論文標題 Unsteady skin-friction field estimation based on global luminescent oil-film image analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Visualization	6. 最初と最後の頁 763 ~ 772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12650-020-00661-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 Lee Chungil, Lee Taekjin, Nonomura Taku, Asai Keisuke	4. 巻 23
2. 論文標題 Evaluating the applicability of a phase-averaged processing of skin-friction field measurement using an optical flow method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Visualization	6. 最初と最後の頁 773 ~ 782
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12650-020-00667-6	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 Miku Kasai, Takayuki Nagata, Taku Nonomura, Yuji Saito and Keisuke Asai	4. 巻 33
2. 論文標題 Optimal Gate Selection Method for Simultaneous Lifetime-based Measurement of PSP and TSP	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ac769b	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33件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 山崎智基, 有木健人, 久谷雄一, 澤田恵介
2. 発表標題 ホバリング運動する羽ばたき翼と後流の干渉流れ場に関するALE解析
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 重田剛志, 永田貴之, 野々村拓, 浅井圭介
2. 発表標題 信号処理を用いた低密度風洞試験におけるシュリーレン可視化計測の高信号雑音比化
3. 学会等名 第53回流体力学講演会 / 第39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 2021年

1. 発表者名 笠井美玖, 永田貴之, 野々村拓, 浅井圭介
2. 発表標題 レイノルズ数 $0(10^3)$ における直列2角柱間の流体力学的干渉への圧縮性の影響
3. 学会等名 日本流体力学学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎智基, 阿部圭晃, 岡部朋永, 澤田恵介
2. 発表標題 Re=25000でホバリングする2次元平板翼の空力解析
3. 学会等名 第53回流体力学講演会 / 第39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 2021年

1. 発表者名 笠井美玖, 永田貴之, 野々村拓, 齋藤勇士, 浅井圭介
2. 発表標題 寿命法感圧・感温塗料計測における最適ゲート選定法
3. 学会等名 第49回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笠井 美玖, 永田 貴之, 小澤 雄太, 野々村 拓, 浅井 圭介
2. 発表標題 低圧風洞試験におけるポリマー/セラミック感圧塗料を用いた直列二角柱上の圧力計測
3. 学会等名 第17 回学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kasai M., Nagata, T., Nonomura, T., and Asai, K.
2. 発表標題 AMT Rising Stars: Pressure-Sensitive Paint in Low-Pressure Condition Toward Understanding Unsteady Compressible Low-Reynolds-Number Flow Phenomen
3. 学会等名 AIAA Scitech Forum 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青野光、志村一樹、土屋脩、宮坂章吾、浅井圭介、小澤雄太、野々村拓
2. 発表標題 異なる駆動系を有する羽ばたき翼型飛行ロボットの研究
3. 学会等名 日本機械学会第32回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Haley Cummings, B. Natalia Perez Perez, Witold Koning, Taku Nonomura, Keisuke Asai, et al.
2. 発表標題 Overview and Introduction of the Rotor Optimization for the Advancement of Mars eXploration (ROAMX) Project
3. 学会等名 Aeromechanics for Advanced Vertical Flight Technical Meeting, Transformative Vertical Flight 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅井 圭介
2. 発表標題 ”風洞屋”の流体力学
3. 学会等名 第53回流体力学講演会 / 第39回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥寺 智弘, 永田 貴之, 笠井 美玖, 齊藤 勇士, 野々村 拓, 浅井 圭介
2. 発表標題 酸素濃度が感圧塗料の特性に与える影響の評価
3. 学会等名 第48回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笠井 美玖, 小澤 雄太, 齊藤 勇士, 野々村 拓, 浅井 圭介
2. 発表標題 寿命法によるローターブレード表面の感圧・感温塗料計測
3. 学会等名 第48回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤間 健斗, 齋藤 勇士, 野々村 拓, 浅井 圭介
2. 発表標題 シングルカメラ可視化情報によるデータ駆動型模型変形計測
3. 学会等名 第48回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ma Jingqi, Lee Taekjin, 齋藤 勇士, 野々村 拓, 浅井 圭介
2. 発表標題 非正常TSP計測に基づく後ろ向きステップ流れの摩擦応力場の可視化
3. 学会等名 第48回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤間 健斗, 齋藤 勇士, 野々村 拓, 浅井 圭介
2. 発表標題 低次元線形モデルを用いたシングルカメラ模型変形計測
3. 学会等名 第16回 学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 重田剛志, 永田貴之, 齋藤勇士, 野々村拓, 浅井圭介
2. 発表標題 感圧塗料の反射係数計測における鏡面反射成分の影響
3. 学会等名 第16回 学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内田和樹, 中北和之, 西崎祐輔, 鈴木互, 川村健生, 柴田欣幸, 齋藤勇士, 野々村拓, 浅井圭介
2. 発表標題 複合PSPを用いた3ゲート寿命法による圧力・温度同時計測
3. 学会等名 第16回 学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笠井美玖, 永田貴之, 齋藤勇士, 野々村拓, 浅井圭介
2. 発表標題 低圧風洞試験に向けたPC-PSPの性能評価
3. 学会等名 第16回 学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥寺智弘, 永田貴之, 笠井美玖, 齋藤勇士, 野々村拓, 浅井圭介
2. 発表標題 酸素モル分率の最適設定による感圧塗料計測の高感度化に向けた検討
3. 学会等名 第16回 学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yosuke Sugioka, Kazuyuki Nakakita, Tsutomu Nakajima, Kazuo Arakida, Hitomi Sato, Taku Nomura, Keisuke Asai
2. 発表標題 Application of advanced pressure-sensitive paint techniques to windtunnel and flight testing for aerodynamics studies
3. 学会等名 7th Japanese--German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	Yuta Ozawa, Taku Nonomura, Bertrand Mercier, Thomas Castelain, Christophe Bailly, and Keisuke Asai
2. 発表標題	Cross-spectral analysis of unsteady PSP images for estimation of surface pressure spectra corrupted by the shot noise
3. 学会等名	7th Japanese--German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Hitomi Sato, Daisuke Yorita, Ulrich Henne, Christian Klein, Yuji Saito, Taku Nonomura, Keisuke Asai
2. 発表標題	Parametric investigations for frequency-domain lifetime PSP technique (FLIM)
3. 学会等名	7th Japanese--German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Miku Kasai, Takayuki Nagata, Tomohiro Okudera, Yuji Saito, Taku Nonomura, Keisuke Asai
2. 発表標題	Characteristic Evaluation of Pressure Sensitive Paints toward Low-Pressure Wind Tunnel Tests
3. 学会等名	7th Japanese--German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Tomohiro Okudera, Miku Kasai, Takayuki Nagata, Yuji Saito, Taku Nonomura, Keisuke Asai
2. 発表標題	Effect of oxygen concentration on characteristics of Pressure Sensitive Paint
3. 学会等名	7th Japanese--German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (国際学会)
4. 発表年	2019年

1 . 発表者名 Kento Akama, Taku Nonomura, Yuji Saito, Keisuke Asai
2 . 発表標題 Camera calibration in photogrammetry toward model deformation measurement
3 . 学会等名 7th Japanese--German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Taekjin Lee, Marco Costantini, Keisuke Asai, Christian Klein
2 . 発表標題 Global Luminescent Oil Film (GLOF) Skin-Friction Field Measurement on Supercritical Airfoil Model VA-2
3 . 学会等名 7th Japanese--German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Kusama <sup>1</sup> , A. Noguchi, T. Nagata. A. Komuro, T. Nonomura, A. Ando, K. Asai
2 . 発表標題 FLOW VISUALIZATION AND DRAG MEASUREMENT OF A CIRCULAR CYLINDER IN COMPRESSIBLE FLOW AT REYNOLDS NUMBER BETWEEN 1000 AND 5000
3 . 学会等名 8th Joint Fluids Engineering Conference AJKFluids2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Jingqi Ma, Taekjin Lee, Chiaki Kawase, Lin Chen, SAITO Yuji, Taku Nonomura, Keisuke Asai
2 . 発表標題 ESTIMATION OF SKIN-FRICTION FIELD ON A BACKWARD-FACING STEP (BFS) MODEL FROM TSP IMAGES USING LINEAR-LEAST-SQUARES METHOD
3 . 学会等名 The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 馬 敬旗, 李 澤辰, 河瀬 千暁, 陳 林, 齋藤 勇士, 野々村 拓, 浅井 圭介
2. 発表標題 線形最小二乗法を用いた感温塗料における表面摩擦応力場の推定
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 笠井美玖, 杉岡洋介, 齋藤勇士, 野々村拓, 浅井圭介
2. 発表標題 寿命法による回転翼上の感圧塗料計測のための温度補正手法の検討
3. 学会等名 第15回学際領域における分子イメージングフォーラムプログラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤仁美, Daisuke Yorita, Michael Hilfer, Ulrich Henne, Christian Klein, 齋藤勇士, 野々村拓, 浅井圭介
2. 発表標題 周波数領域におけるPSP寿命法計測のパラメータ解析
3. 学会等名 第15回学際領域における分子イメージングフォーラムプログラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内田和樹, 笠井美玖, 杉岡洋介, 中北和之, 西崎祐輔, 園田欣幸, 園田精一, 齋藤勇士, 野々村拓, 浅井圭介(東北大)
2. 発表標題 ONERA-M4 模型の遷音速パフエット現象の非定常感圧塗料による解析
3. 学会等名 第15回学際領域における分子イメージングフォーラムプログラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土屋 脩, 青野 光, 浅井 圭介, 野々村 拓, 小澤 雄太, 安養寺 正之, Kang Chang-kwon
2. 発表標題 減圧環境下でのデュアルモーター駆動羽ばたき翼型飛行ロボットの翼運動と空気力の計測と解析
3. 学会等名 第40回 ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Tianshu Liu, John P. Sullivan, Keisuke Asai, Christian Klein, Yasuhiro Egami	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer, Cham	5. 総ページ数 542
3. 書名 Pressure and Temperature Sensitive Paints	

1. 著者名 日本機械学会	4. 発行年 2022年
2. 出版社 日本機械学会	5. 総ページ数 324
3. 書名 流体計測法 (改訂版)	

〔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	青野 光  (Aono Hikaru)  (10623712)	信州大学・学術研究院繊維学系・准教授    (13601)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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	齋藤 勇士  (Saito Yuji)  (50828788)	東北大学・工学研究科・助教    (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	小澤 雄太  (Ozawa Yuji)  (10898290)	東北大学・工学研究科・助教    (11301)	
研究分担者	澤田 恵介  (Sawada Keisuke)  (80226068)	東北大学・工学研究科・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			
英国	Imperial College London			
フランス	SUPAERO			
米国	NASA Ames Research Center	Jet Propulsion Laboratory,	The University of Maryland	他1機関
ドイツ	DLR (ドイツ航空宇宙研究センター)			
米国	University of Alabama			