

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18905

研究課題名（和文）新規概念「局所ジョイント座標」で打ち破る柔軟展開翼モデルの2次元と3次元間の壁

研究課題名（英文）New concept "local joint coordinates" to break down the barrier of flexible deployable wing model between 2-D and 3-D dimensions

研究代表者

榎原 幹十郎 (MAKIHARA, Kanjuro)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：60392817

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：新規概念【局所ジョイント座標】により、2次元柔軟展開翼モデルを3次元モデルに拡張する挑戦的な研究である。柔軟翼の構造的特徴に基づく「伸び変形微小」を適切に導入すれば、3次元展開角を表現し得る【局所ジョイント座標】を定義できることを実証した。この新たな発想をもって3次元構造モデリングにチャレンジした。現実に即したモデリング法を創生する目的で、3次元効果を考慮した風洞実験を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

挑戦的研究としての意義は、提案する【局所ジョイント座標】により、従来不可能とされてきた「3次元運動する柔軟展開構造の展開角表現」と「空気力の作用方向の3次元定義」に挑戦する意義と、提案する3次元モデル構築の精度を精査するために風洞実験での実証に挑戦する意義である。過去研究から得られる知見が圧倒的に乏しい未開拓研究領域で、国際協力と風洞実験を活用して構造モデルのみならず空力モデルも3次元へと到達しようとする挑戦的な意義を有する。

研究成果の概要（英文）：This is a challenging study to extend a 2D flexible deployable wing model to a 3D model using a new concept [local joint coordinates]. It was conceived that by appropriately introducing "extension deformation small" based on the structural characteristics of flexible wings, it is possible to define [local joint coordinates] that can express the three-dimensional deployment angle. We challenged 3D structural modeling with this new idea. To create a realistic modeling method, we conducted a wind tunnel experiment considering three-dimensional effects.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：局所ジョイント座標 柔軟展開翼 展開翼

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 2016年にNASAは航空機の劇的な性能向上を目指して、飛行中にジョイントを介して柔軟翼を折り畳み展開する航空機コンセプトを示した。その早期実現には、翼の大剛体回転、翼の大柔軟変形、飛行挙動の3者が連成した3次元構造空力連成モデルによる解析が必須となる。しかし、展開トルク計算のための展開角 θ が大剛体回転だけでなく大柔軟変形によっても生じるので、2次元構造モデルの構築でさえ難しかった。

(2) 更に3次元飛行挙動が加わる場合、回転軸が3次元運動する場合の展開角表現は困難を極める。このため、世界レベルでも3次元構造モデルの構築に成功した研究例はない。例え、展開角表現に成功して3次元構造モデルが構築できても、更に3次元空力モデルも必要となる。本研究で取り組む研究領域（柔軟展開翼機の3次元構造空力連成モデリング）は未開拓となっていた。

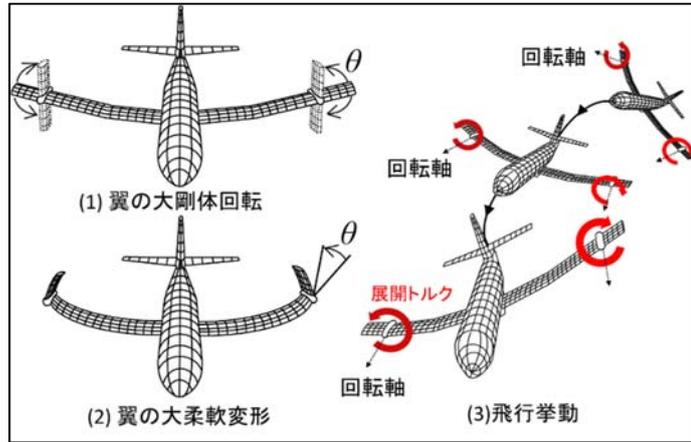


図1 革新的航空機の展開翼

2. 研究の目的

(1) これまでに提案した2次元柔軟展開翼モデルの利点を損なう事なく、3次元展開翼機モデリング法に拡張する。回転角 θ の代わりに単位ベクトル (r_x, r_y) を節点変数とする有限要素モデリングにより、3次元化の困難（計算を発散させる特異回転角 θ を含む非線形ジョイント表現、回転座標変換に伴う見かけの力）を全て回避する。展開角を表現するために、ジョイント節点1と2において、直交する単位ベクトルを基底とした【局所ジョイント座標】を考案した。従来の発想では3つのベクトルに直交性がなく展開角表現に必要な基底が得られない。しかし、応募者は翼の特徴「伸び微小」を導入すれば、3つのベクトルは直交できることを見出し、ジョイント座標への応用を考案した。直交性を利用して、軸1に対する軸2の回転として展開角表現が可能となる。

(2) 本研究では、応募者が提案する3次元構造モデルと3次元空力モデルを連成させる。柔軟展開翼機が大移動・大変形・飛行挙動を受ける場合、空気力の作用方向の定義が困難となる。しかし、ここでも我々が提案する【局所ジョイント座標】を用いれば、空気力の作用方向の3次元定義が可能となる。本研究は回転軸が3次元運動する場合における柔軟展開構造の展開角表現という従来不可能とされてきた問題に挑戦する意義を有する。

(3) 本研究の波及効果は展開翼機に留まらず、軽量化・小型化の要求から将来的に必ず台頭してくる多様な柔軟展開構造物に通用する3次元モデリング法構築につながる萌芽的要素を含む。例えば、折り畳み羽式洋上風車や、太陽風を受ける薄型展開パドルのモデリングの基礎研究となる。これまで柔軟展開翼機モデル構築では、2次元モデルのみが研究されてきた。過去研究から得られる知見が圧倒的に乏しい未開拓研究領域で、国際協力と風洞実験を活用して構造モデルのみならず空力モデルも3次元へと到達しようとする挑戦的な意義を有する。

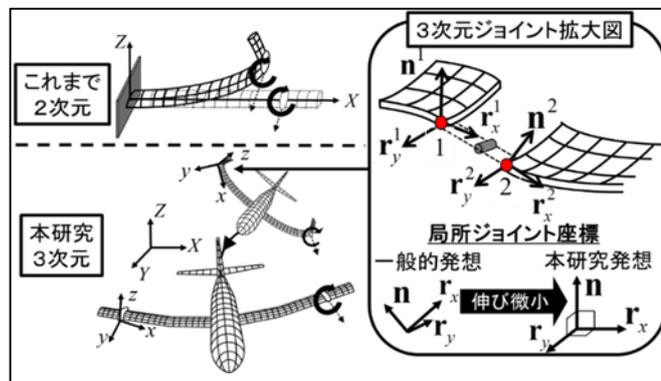


図2 本研究で提案する3次元局所ジョイント座標

3. 研究の方法

(1) 流体と構造に焦点を当てたモデリング法の精度向上を行った。構築したモデリング法を用いた数値解析の妥当性実証の為に、下記の翼展開実験を流体研・低乱熱伝達風洞で行った。図3に使用した実験系を示す。2つの塩ビ板を回転バネ付き蝶番で結合した平板矩形翼を風洞内に鉛直に設置した。測定データの精度を高めるため、図4に示す近距離高精度レーザー変位計を導入

した。さらに、手動展開を電動展開に変更し、測定データのバラツキを低減した。



図3 風洞測定部へ供試モデルの設置図



図4 実験装置

(2) 平板翼供試モデルの風上に新規製作した可変翼列（図5）を設置した。可変翼列を偏向させることで突風が発生し、供試モデルに変形が生じる。図6に示すひずみ計測ユニットを導入した。これにより、解析で得られるひずみ履歴を実験値と直接的に比較できるようになった。

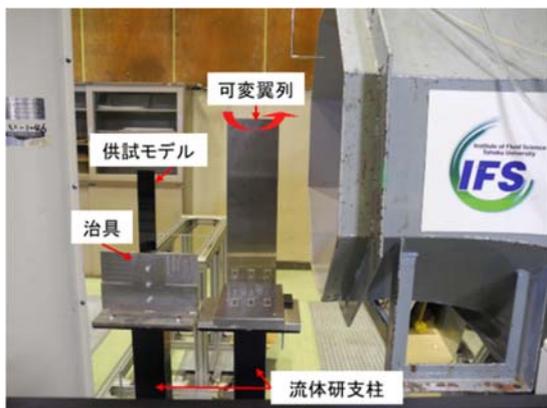


図5 風洞測定部へ供試モデルの設置図

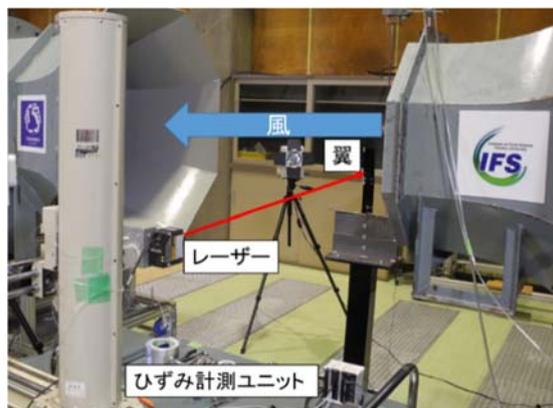


図6 計測装置

4. 研究成果

(1) 提案する弾性力の計算効率を示すために、有限変形理論から弾性力を導出する非線形性の強い従来 ANCF と比較した。解析対象は一辺を全体座標系 XYZ にヒンジジョイントした 1 m 四方の柔軟な正方形薄板を水平状態から自由落下させた挙動である。図7は奥行 Y 方向に 1 要素分割、 X 方向に 10 要素分割した板の三次元挙動を側面から見た図である。従来 ANCF を用いた解析結果が妥当といえる（滑らかに変形している）範囲の挙動を示している。提案 ANCF と従来 ANCF は良く一致しており、原点にあるヒンジ軸周りの剛体回転と弾性変形を表現できている。時刻後半で若干の差がある。これは時刻後半では遠心力が大きくなり、なおかつ解析対象が実際の翼以上に極めて柔軟であるため、提案 ANCF で微小と仮定した面内変形が大きくなったことが原因である。表1は解析時間を示す。提案 ANCF は従来 ANCF に比べて、計算時間を約 10 万分の 1 に低減した。

表1 提案 ANCF と従来 ANCF の計算時間の比較

| | 提案手法 | 従来手法 |
|------|-------|-------------|
| 計算時間 | 4 (s) | 134,149 (s) |

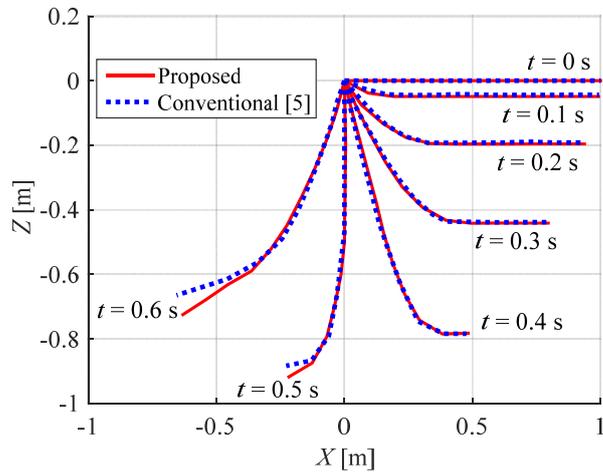


図7 柔軟板の自由落下の側面図

(2) 提案する展開機構モデルが三次元運動中でも、正常に機能することを実証した。解析対象は両翼を回転バネアクチュエータで順次展開する機体である。主翼は展開時のアスペクト比が20となる塩ビ平板矩形翼を用いた。主翼の構造モデルは、各ボディをコード方向に1要素分割、スパン方向に4要素分割することで得る。本解析目的は展開機構モデルを示すことなので、ここでは空力モデルは考慮しない。最初、両翼は $\theta_1 = \theta_2 = 180 \text{ deg}$ で折り畳まれている。左翼から展開を開始し、 $\theta_1 = 90 \text{ deg}$ で右翼が展開を開始する(図8)。両翼とも相対回転角 θ が 0 deg になった時点でラッチ機構が作動し、展開が完了する。三次元飛行を示すために、対象を座標系に固定せず、 X 負方向に初期速度 1 m/s を与える。図8は三次元運動を示す。弾性変形を伴う三次元剛体運動をしつつ、両翼を順次展開していることから、展開アクチュエータモデルが正常に機能していることが分かる。図9は相対回転角の時間履歴である。0.23 sで $\theta_1 = 90 \text{ deg}$ となり、 θ_2 が変化し始めていることから、順次展開機構モデルが正常に機能していることが分かる。また、0.32 s、0.64 sでそれぞれ $\theta_1 = 0 \text{ deg}$ 、 $\theta_2 = 0 \text{ deg}$ となり、それ以降は 0 deg を保っていることからラッチモデルも正常に機能しているといえる。

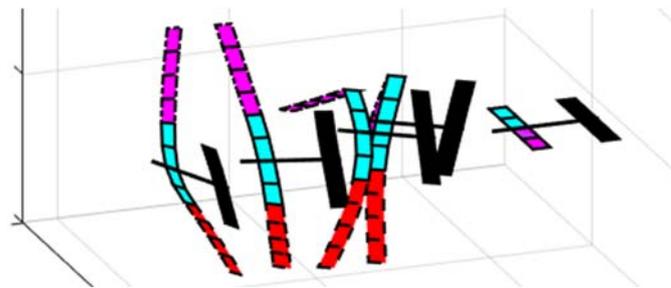


図8 三次元運動中の翼の順次展開

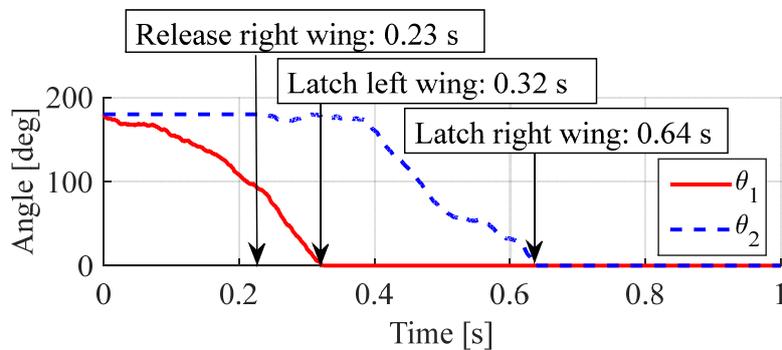


図9 相対回転角の時間履歴

(3) 東北大学・流体科学研究所の風洞を用いて翼の展開実験を行った。試験模型は2つの塩ビ平板をバネ蝶番で結合した展開翼である。180度折り畳まれた状態からバネ蝶番の発生させるトルクで展開する。構造モデルは前節と同様に各ボディをコード方向に1要素分割、スパン方向に4要素分割することで得る。本解析では、この構造モデルに対して、コード方向に4要素分割、スパン方向に8要素分割した空力モデルを連成させる。図10は流速 30 m/s で展開した場合の実験と構造空力連成解析で得られた展開挙動を 0.07 s ごとに示す。実験と解析ともに剛体回転と弾

性変形が確認できる。図 11 は流速を変更した場合の展開に要した時間を示す。両図で実験と解析は良好な一致を示していることから、提案モデルによる解析法の妥当性が実証できた。

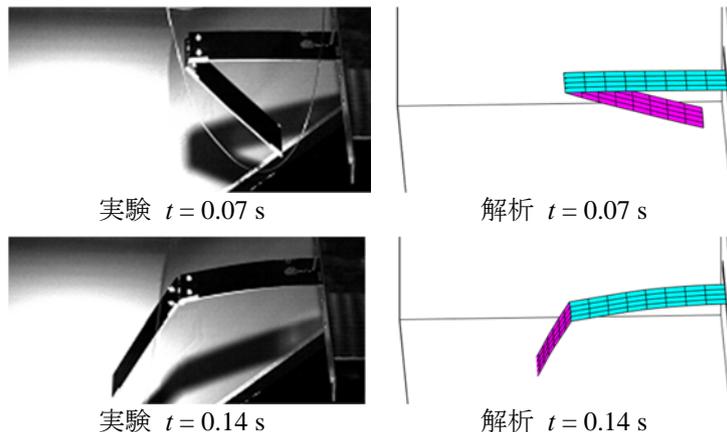


図 10 実験と解析で得られた展開挙動

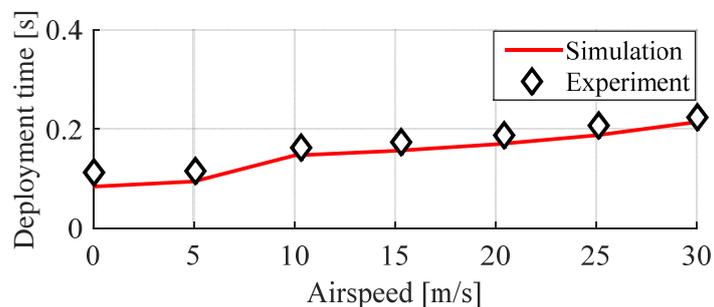


図 11 実験と解析で得られた流速と展開時間

(4) 図 12 は流速と展開に要する時間の関係を示す。過去に提案したモデルによる解析，本研究で精度を向上させたモデルによる解析，および実験を比較した。本研究のモデルによる解析の方が実験値と良好な一致を示した。

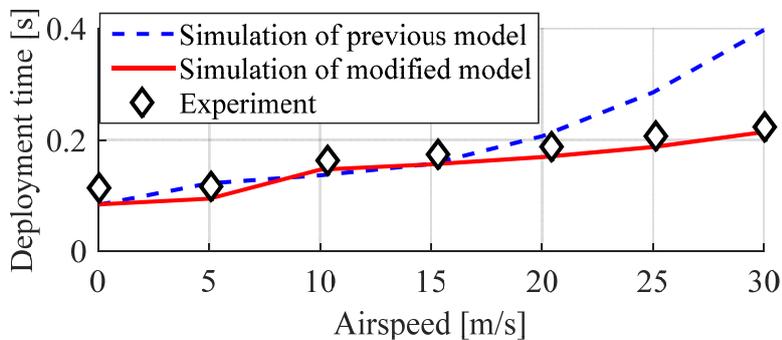


図 12 実験と解析の比較

図 13 は解析と実験で得られたひずみ履歴を示す。突風によってひずみが増大する様子が確認できる。解析と実験は良好な一致が得られた。

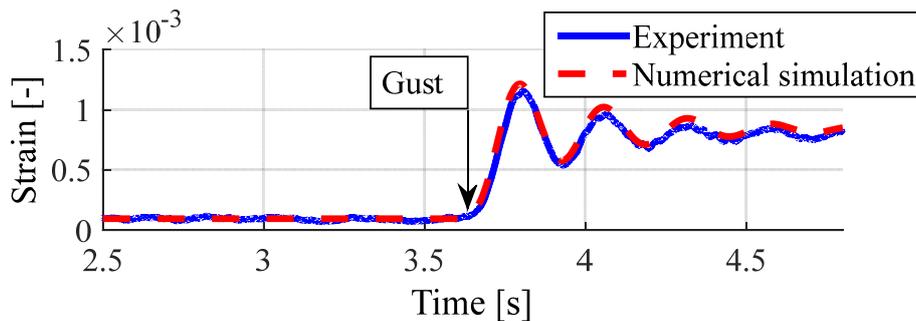


図 1 3 実験と解析の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|---------------------------------|
| 1. 著者名 Otsuka Keisuke, Makihara Kanjuro | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 Deployment Simulation Using Absolute Nodal Coordinate Plate Element for Next-Generation Aerospace Structures | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 AIAA Journal | 6. 最初と最後の頁 1266 ~ 1276 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J056477 | 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 Otsuka Keisuke, Wang Yinan, Makihara Kanjuro | 4. 巻 141 |
| 2. 論文標題 Versatile Absolute Nodal Coordinate Formulation Model for Dynamic Folding Wing Deployment and Flutter Analyses | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Vibration and Acoustics | 6. 最初と最後の頁 011014 ~ 011014 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4041022 | 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 Otsuka Keisuke, Makihara Kanjuro | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 Absolute Nodal Coordinate Beam Element for Modeling Flexible and Deployable Aerospace Structures | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 AIAA Journal | 6. 最初と最後の頁 1343 ~ 1346 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J057780 | 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 TSUSHIMA Natsuki, ARIZONO Hitoshi, YOKOZEKI Tomohiro, MAKIHARA Kanjuro | 4. 巻 85 |
| 2. 論文標題 Geometrically nonlinear electro-aeroelastic framework for morphing wing with piezoelectric actuators | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese) | 6. 最初と最後の頁 1800506 ~ 1800506 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.18-00506 | 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 Otsuka Keisuke, Wang Yinan, Fujita Koji, Nagai Hiroki, Makihara Kanjuro | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 Multifidelity Modeling of Deployable Wings: Multibody Dynamic Simulation and Wind Tunnel Experiment | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 AIAA Journal | 6. 最初と最後の頁 4300 ~ 4311 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J058676 | 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14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Satoru Onuki, Keisuke Otsuka, Takahiro Suzuki, Hiroki Nagai, Koji Fujita, Kanjuro Makihara |
| 2. 発表標題 Motion Analysis of Flexible Folding Wing with a Hinge Joint Loaded by Gust |
| 3. 学会等名 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yinan Wang, Keisuke Otsuka, Koji Fujita, Hiroki Nagai, Kanjuro Makihara |
| 2. 発表標題 Simulation and Control of Flexible Aero-Structures using Nonlinear Reduced-Order Models |
| 3. 学会等名 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Keisuke Otsuka, Yinan Wang, Koji Fujita, Hiroki Nagai, Kanjuro Makihara |
| 2. 発表標題 Dynamic Simulation of Deployable Wing Mars Airplane |
| 3. 学会等名 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Keisuke Otsuka, Kanjuro Makihara |
| 2. 発表標題 ANCF-ICE Beam Element for Modeling Highly Flexible and Deployable Aerospace Structures |
| 3. 学会等名 2019 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大塚啓介, 槇原幹十朗 |
| 2. 発表標題 全体座標表現に基づく柔軟展開翼の3次元マルチボディ解析法の開発 |
| 3. 学会等名 第60回構造強度に関する講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大塚啓介, 槇原幹十朗 |
| 2. 発表標題 展開型モーフィング翼の柔軟マルチボディシミュレーション |
| 3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 須崎貴大, 大塚啓介, 小貫慧, 槇原幹十朗 |
| 2. 発表標題 歪量を要素変数とする3次元柔軟梁要素の研究 |
| 3. 学会等名 東北支部第54期秋季講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 津島夏輝, 有園仁, 横関智弘, 槇原幹十郎 |
| 2. 発表標題 ビエゾアクチュエータによるモーフィング翼の非線形空力弾性解析 |
| 3. 学会等名 第27回交通・物流部門大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 須崎貴大, 大塚啓介, 小貫慧, 槇原幹十郎 |
| 2. 発表標題 Strain Based Beam Formulationの発展手法に関する研究 |
| 3. 学会等名 日本機械学会東北支部第54期総会講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Suzaki, T., Otsuka, K., Hirotsu, S., Dong, S., and Makihara, K. |
| 2. 発表標題 New Framework of Strain Based Beam Formulation for Rigid Body Motion |
| 3. 学会等名 16th International Conference on Flow Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Otsuka, K., Suzaki, T., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K. |
| 2. 発表標題 Comparison of 2D and 3D Simulation Models for Deployable Wing |
| 3. 学会等名 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Otsuka, K., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K. |
| 2. 発表標題 Deployable Wing Model Using ANCF and UVLM: Multibody Dynamic Simulation and Wind Tunnel Experiment |
| 3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 大塚啓介, 須崎貴大, 藤田昂志, 永井大樹, 楨原幹十郎 |
| 2. 発表標題 鳥の羽を模した折り畳み機構を有する翼のマルチボディ解析 |
| 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 津島夏輝, 玉山雅人, 楨原幹十郎, 有園仁 |
| 2. 発表標題 3Dプリンティング翼の空力弾性 |
| 3. 学会等名 第28回交通・物流部門大会 |
| 4. 発表年 2019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 | 亀山 正樹 (KAMEYAMA Masaki) (30302178) | 信州大学・学術研究院工学系・准教授 (13601) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 | 永井 大樹 (NAGAI Hiroki) (70360724) | 東北大学・流体科学研究所・教授 (11301) | |