

令和 4 年 5 月 10 日現在

機関番号：11301  
研究種目：挑戦的研究（萌芽）  
研究期間：2020～2021  
課題番号：20K21041  
研究課題名（和文）革新概念「内部変形制御」で乗り越える可変翼航空機モデリングのフィデリティの谷  
研究課題名（英文）Novel Internal-Deformation Control to Bridge Fidelity Gap in Variable-Wing Aircraft Modeling  
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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：革新概念【内部変形制御】により、可変翼機の構造モデルの忠実度・詳細度（フィデリティ）を意のままに変えられる構造解析法を確立して、フィデリティの谷を解決した。国際共同研究と大型風洞実験を通して、理論解析と実証実験の両面から、提案手法の有効性を明らかにした。挑戦的研究としての意義は、前例研究が少なく知見が乏しい研究分野で、新規アイデアに基づいて【フィデリティの谷】に挑む萌芽的要素があること、新規【内部変形制御】と国際協力と大型風洞実験をフルに活用して「真のマルチフィデリティの実現」に果敢に挑戦することである。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は以下の4つの学術的意義や社会的意義を有する。(1) 知見が乏しい研究分野で新規研究を展開する萌芽的要素を持つ。(2) 新規アイデア【内部変形制御】と国際協力と大型風洞実験をフルに活用して「真のマルチフィデリティ」を実現する挑戦的意義を持つ。(3) 既存概念にとらわれない先進的研究で、当該分野の学術体系を転換する潜在性を持つ。勾配ベクトルを用いる提案手法は、可変翼を始め「関節ジョイントの大幅回転を伴う構造」の計算に適しており、従来の微小変形解析に比べ、大きな研究波及効果を持つ。(4) 将来発展例は、首振り機構を持つ大型洋上風車や災害地探索用羽ばたきドローンなど、多岐に渡る。

研究成果の概要（英文）：We established a structural analysis method that can change the fidelity and detail of the structural model of variable wing aircraft by using the innovative concept “internal deformation control”. We solved “valley of fidelity” with “internal deformation control” of controlling the deformation constraint equation that controls the internal deformation with the model expression. Through international joint research and large wind tunnel experiments, we clarified the effectiveness of the proposed method in both theoretical analysis and demonstration experiments. The significance of challenging research is (1) a research field with few previous studies and poor knowledge, and there is a budding element that challenges based on new ideas, (2) utilize new “internal deformation control”, international cooperation, and large wind tunnel experiments to realize the true multi-fidelity.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：柔軟展開翼 展開翼 内部変形制御 マルチフィデリティ

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は飛行中に翼を折り畳み展開する次世代可変翼機コンセプトを示した。可変翼の設計開発には、構造空力連成モデルを用いた挙動解析が必須となる。これまでは、低精度・高速計算の低フィデリティモデルと、高精度・低速計算の高フィデリティモデルが、別々に開発され、可変翼の設計段階に応じて選択されてきた。しかし、現状では低・高フィデリティ構造モデルで使用される変数が共有されておらず、設計段階ごとにモデルを作成しなければならない。さらに、構造と空力を連成させる際にも、選択したモデルに応じた別々の連成手法が必要になり、可変翼の設計開発を困難にしていた。フィデリティ間での一貫性の無さ【フィデリティの谷】が解決すべき課題である。

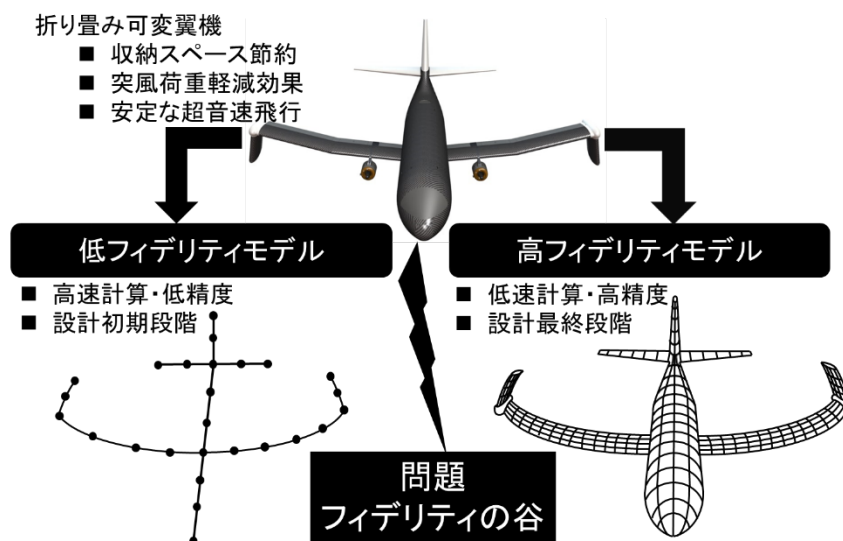


図1 研究課題：フィデリティの谷

2. 研究の目的

(1) これまでの研究でベクトル変数表現の梁モデルを提案してきた。ベクトルのみを変数とすることで、慣性力・可変機構を簡潔に数式表現できる。さらに、複雑な回転座標変換が不要となるなど多数の利点を有する。本研究では、より低フィデリティな剛体モデルとより高フィデリティな柔軟板・立体モデルも統一的にベクトル表現し、さらにフィデリティの谷を解決する【内部変形制御】を提案することで、「可変翼機のマルチフィデリティモデリング法を確立すること」を目的とする。【内部変形制御】は構築後のモデルに変形制御式を作用させることで、変数を変更せずに変形表現レベル(構造モデルのフィデリティ)を意のままに制御する新規アイデアである。従来の低フィデリティ剛体モデルは、ベクトル表現ができず、複雑な回転座標変換が問題となっている。そこで、これまでのベクトル表現梁モデルに対して、【内部変形制御】を行うことで内部変形の発生を防ぎ、剛体モデルのベクトル表現を可能とする。また、航空機翼のような複雑形状に対する高フィデリティ柔軟板・立体モデルのベクトル表現はそもそも出来なかったが、翼で非支配的となる変形に対して、【内部変形制御】を行うことで可能となる。

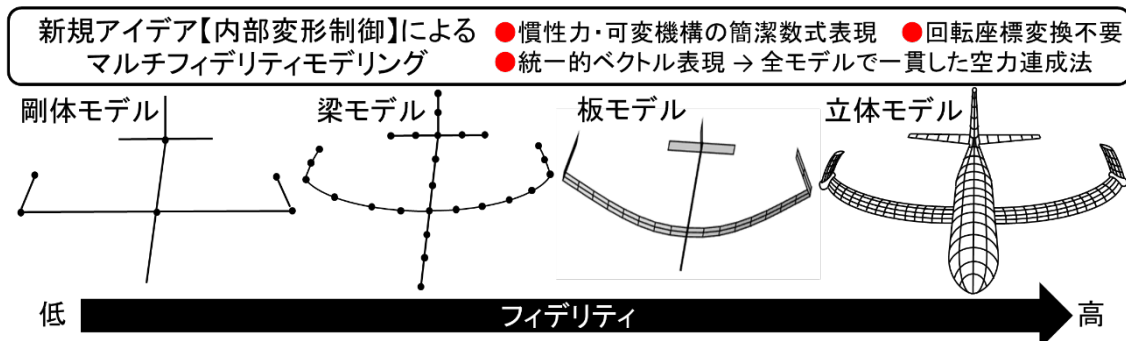


図2 新規アイデア【内部変形制御】によるマルチフィデリティ構造モデリング

(2) マルチフィデリティ解析への有用性が示されてきた空力モデル Unsteady Vortex Lattice Method (UVLM) を採用し、構造空力連成を行う。図3のように構造空力連成は構造モデルから空力モデルを生成し、算出された空気力を構造モデルに作用させるループを必要とする。従来、このループは選択した構造モデルに応じて個別の物が必要であった。本研究では【内部変形制御】による統一ベクトル表現を利用し、「剛体・梁・板・立体いずれのフィデリティを有する構造モ

デルに対しても、構造変数に形状関数  $S$  をたった一度掛けるだけで、空力モデル・空力作用点生成を可能とする統一連成法を構築すること」を目的とする。



図3 新規アイデア【内部変形制御】を用いたマルチフィデリティ構造空力連成

(3) 本研究は可変翼機の設計開発を困難にしてきた【フィデリティの谷】を解決する意義を有する。この問題解決の波及効果は可変翼機に留まらず、多様な柔軟可変構造物のあらゆる設計段階で使用できるモデリング法となる萌芽的要素を含む。この萌芽的要素を示すために、提案手法の「浮体式洋上風車」や「宇宙空間で使用する長大テザー」への適用性を検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 提案手法の数値解析による妥当性の検証

提案手法を Imperial College London が開発を行っている構造空力連成解析ソフト SHARPy と比較した。SHARPy は図 4 に示すような細長大変形翼を有する航空機解析のために開発されたフリーソフトであり、マルチフィデリティ梁モデルの妥当性検証に適している。同様に細長構造の解析に適した歪有限要素法（図 5）との比較も行った。

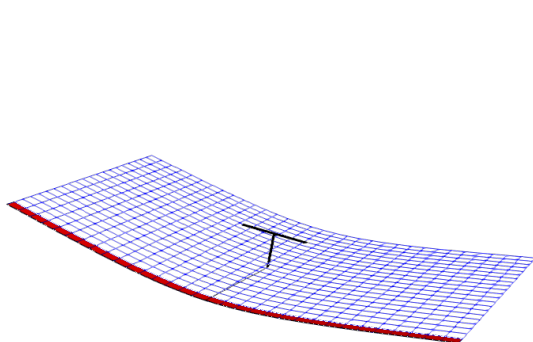


図4 SHARPy による解析例

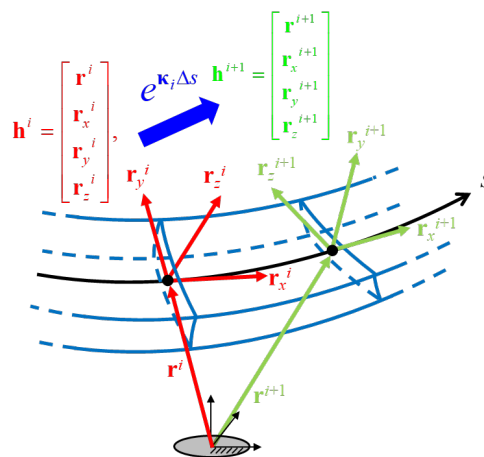


図5 歪有限要素法の概念図

#### (2) 提案手法の風洞実験による妥当性の実証

図 6, 7 に示す東北大学・流体科学研究所の大型風洞と研究室の小型風洞でフラッタ実験を行った。フラッタはある速度に達すると翼に生じた振動が発散に転じる構造空力連成現象である。フラッタ発生速度を解析で正確に求めることは極めて重要である。

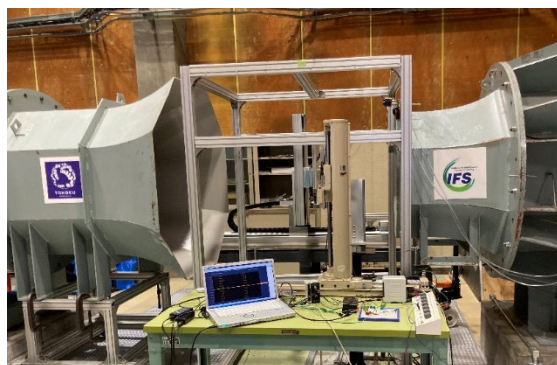


図6 大型風洞

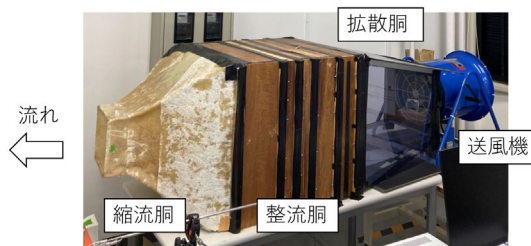


図7 小型風洞

#### 4. 研究成果

##### (1) 構造解析結果 (SHARPy との比較)

提案手法の大変形解析精度を実証する．解析対象はベンチマークとして用いられるアスペクト比 32 の柔軟翼を中央で片持ち固定し，重力で自由落下させる挙動である．表 1 に柔軟翼のパラメータを示す．図 8 は自由端の鉛直方向変位を梁の全長 16 m で正規化した値の時間履歴である．たわみ 30% 以上の大変形において，提案手法と SHARPy は良好な一致を示している．

表 1 ベンチマーク翼のパラメータ

| パラメータ              | 値                 | 単位                |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| 長さ $L$             | 16                | m                 |
| 幅 $c$              | 1                 | m                 |
| 伸び剛性 $EA$          | $1.0 \times 10^7$ | N                 |
| 曲げ剛性 $EI_{yy}$     | $2.0 \times 10^4$ | N m <sup>2</sup>  |
| 曲げ剛性 $EI_{zz}$     | $5.0 \times 10^6$ | N m <sup>2</sup>  |
| ねじり剛性 $GJ$         | $1.0 \times 10^4$ | N m <sup>2</sup>  |
| 面密度 $\rho A$       | 0.1               | kg/m              |
| 回転慣性 $\rho I_{xx}$ | 0.75              | kg m <sup>2</sup> |
| 重力加速度 $g$          | 9.8               | m/s <sup>2</sup>  |

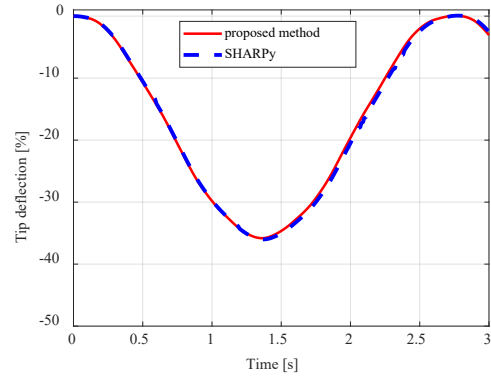


図 8 柔軟翼の自由端変位の時間履歴

##### (2) 構造解析結果 (歪有限要素法との比較)

柔軟梁の一端を原点にボールジョイントし， $X$  軸上 (正の向き) に配置した状態から重力で自由落下する振子挙動を解析した．解析対象のパラメータを表 2 に示す．図 9 は十分に細かい要素分割で得られた梁の挙動を示す．提案手法と歪有限要素法は良く一致している．図 10 は自由端の  $X$  座標の時間履歴を示す．この図でも提案手法と歪有限要素法は良好な一致が確認できた．

表 2 柔軟振子のパラメータ

| パラメータ | 値    | 単位                |
|-------|------|-------------------|
| 長さ    | 1    | m                 |
| 幅     | 0.02 | m                 |
| 厚さ    | 0.02 | m                 |
| ヤング率  | 0.02 | GPa               |
| 密度    | 7200 | kg/m <sup>3</sup> |
| 重力加速度 | 9.8  | m/s <sup>2</sup>  |

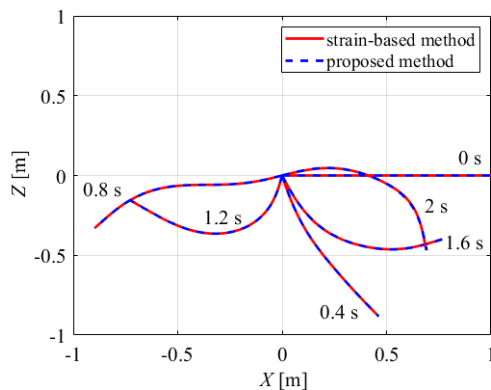


図 9 柔軟振子の挙動

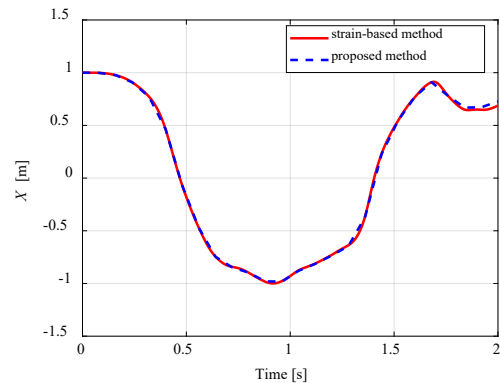


図 10 柔軟振子の自由端  $X$  座標の時間履歴



### (3) 多体構造解析結果（歪有限要素法との比較）

提案手法から統一的に導出された剛体モデルと柔軟モデルが混在した多体系の解析を行った。前節で使用した柔軟振り子の根本半分を剛体ボディに置き換え、先端半分を柔軟ボディのままとする。2つのボディをヒンジジョイントで連結する。図11はこのマルチボディシステムを重力で自由落下させた場合の解析結果である。ジョイント周りの剛体回転と柔軟ボディの変形が確認できる。図12に自由端の $X$ 座標時間履歴を示す。異なるフィデリティのボディが混在した多体解析においても、提案手法は歪有限要素法との良好な一致が確認できた。

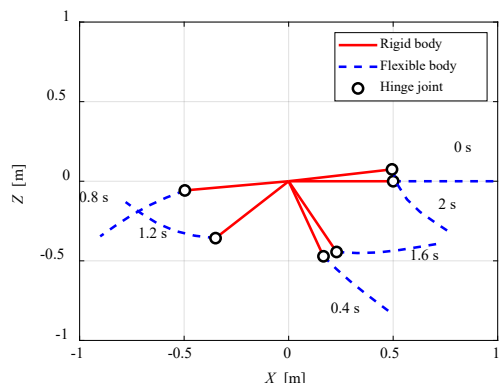


図11 多体構造の挙動

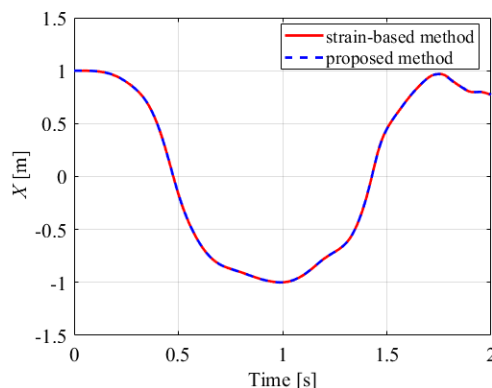


図12 多体構造の自由端 $X$ 座標の時間履歴

### (4) 構造空力連成解析結果（SHARPyとの比較）

表1のベンチマーク翼の構造空力連成解析を行いSHARPyと比較した。図13のようにベンチマーク翼に迎角を持たせて、全体座標原点に固定する。 $Y$ 軸負の方向に流速25 m/sを与える。空気密度はベンチマーク翼機の運用が想定されている高高度における値 $0.0889 \text{ kg/m}^3$ を採用した。翼に生じる空気が構造変形を引き起こす。図14にベンチマーク翼の変形形状を示す。提案手法はSHARPyと良好な一致を示した。

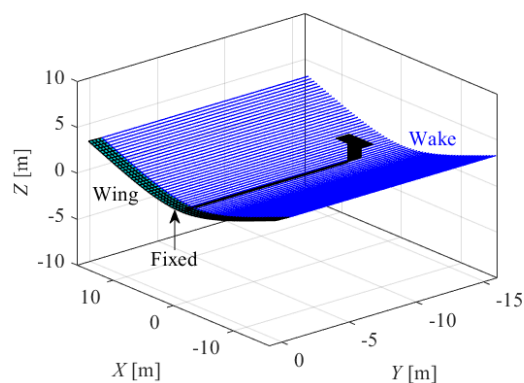


図13 ベンチマーク翼の三次元図

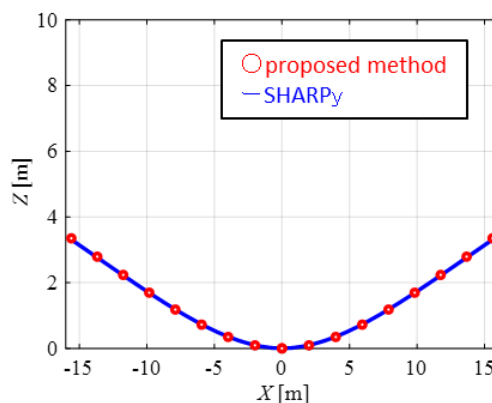


図14 主翼の変形形状

### (5) 風洞実験による実証結果

長さ130 mm、幅40 mm、厚さ0.5 mmの平板矩形翼に対して、微小擾乱を与えたときの振動をマルチフィデリティ板モデルで解析した。図15は流速が20 m/sの時の自由端たわみの時間履歴である。振動が発散しており、フラッタ発生が確認できる。実験でも流速が20 m/s前後で振動が増大したことから、提案手法の実証ができたといえる。

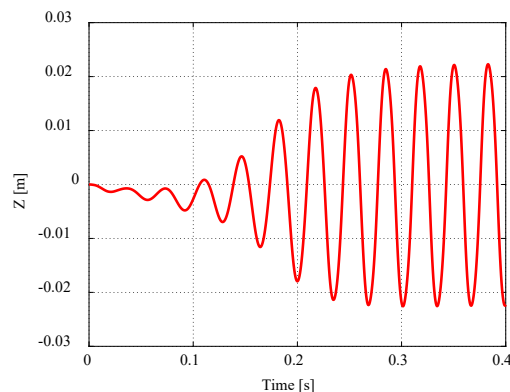


図15 自由端の時間履歴

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 0件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Otsuka Keisuke, Wang Yinan, Makihara Kanjuro  | 4. 巻<br>143                   |
| 2. 論文標題<br>Three-Dimensional Aeroelastic Model for Successive Analyses of High-Aspect-Ratio Wings | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Vibration and Acoustics  | 6. 最初と最後の頁<br>061006 ~ 061006 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1115/1.4050276   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Tsushima Natsuki, Tamayama Masato, Arizono Hitoshi, Makihara Kanjuro  | 4. 巻<br>117                   |
| 2. 論文標題<br>Geometrically nonlinear aeroelastic characteristics of highly flexible wing fabricated by additive manufacturing | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Aerospace Science and Technology  | 6. 最初と最後の頁<br>106923 ~ 106923 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.ast.2021.106923   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Otsuka Keisuke, Makihara Kanjuro, Sugiyama Hiroyuki  | 4. 巻<br>17          |
| 2. 論文標題<br>Recent Advances in the Absolute Nodal Coordinate Formulation: Literature Review From 2012 to 2020 | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Computational and Nonlinear Dynamics  | 6. 最初と最後の頁<br>80803 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1115/1.4054113  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>TSUSHIMA Natsuki, TAMAYAMA Masato, MAKIHARA Kanjuro, ARIZONO Hitoshi                  | 4. 巻<br>86         |
| 2. 論文標題<br>Structural and aerodynamic characteristics of additively manufactured flexible wings | 5. 発行年<br>2020年    |
| 3. 雑誌名<br>Transactions of the JSME (in Japanese)  | 6. 最初と最後の頁<br>1-10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1299/transjsme.19-00452  | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1. 著者名<br>Otsuka Keisuke, Wang Yinan, Makihara Kanjuro   | 4. 巻<br>16         |
| 2. 論文標題<br>Absolute Nodal Coordinate Formulation With Vector-Strain Transformation for High Aspect Ratio Wings | 5. 発行年<br>2020年    |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Computational and Nonlinear Dynamics  | 6. 最初と最後の頁<br>1-10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1115/1.4049028  | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する       |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Otsuka Keisuke, Wang Yinan, Makihara Kanjuro  | 4. 巻<br>143        |
| 2. 論文標題<br>Three-Dimensional Aeroelastic Model for Successive Analyses of High-Aspect-Ratio Wings | 5. 発行年<br>2021年    |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Vibration and Acoustics  | 6. 最初と最後の頁<br>1-10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1115/1.4050276   | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する       |

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Otsuka, K., Dong, S., and Makihara, K.   |
| 2. 発表標題<br>Absolute Nodal Coordinate Formulations for Aeroelastic Analysis of Next-Generation Aircraft Wings  |
| 3. 学会等名<br>Proceedings of International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Imagawa, K., Otsuka, K., Jia, Y., Shi, Y., Soutis, C., Kurita, H., Narita, F., and Makihara, K. |
| 2. 発表標題<br>Experimental Investigation of Flutter Power Generation with Piezoelectric Film                  |
| 3. 学会等名<br>Proceedings of the 18th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)                        |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hirotsu, S., Dong, S., Kuzuno, R., Okada, T., Otsuka, K., and Makihara, K. |
| 2. 発表標題<br>New MMC-Based Topology Optimization Method with Curvilinear Representation |
| 3. 学会等名<br>Proceedings of the 18th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Otsuka, K., Dong, S., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K.                                  |
| 2. 発表標題<br>Nonlinear Aeroelastic Analysis Coupling Unsteady Vortex Lattice Method and Strain-Based Beam Formulation |
| 3. 学会等名<br>Proceedings of the 18th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)                                 |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Otsuka, K., Wang, Y., Palacios, R., and Makihara, K.                                 |
| 2. 発表標題<br>Strain-Based Geometrically Nonlinear Beam Formulation for Multibody Dynamic Analysis |
| 3. 学会等名<br>Proceedings of AIAA Scitech 2022 Forum (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Dong, S., Otsuka, K., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K.                |
| 2. 発表標題<br>Development of Multibody Dynamics Formulation Based on Canonical Theory                |
| 3. 学会等名<br>Proceedings of the 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |



|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>今川慶, 大塚啓介, 槇原幹十朗    |
| 2. 発表標題<br>大変形を伴う板振動に関する研究     |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会東北支部第56期総会講演会 |
| 4. 発表年<br>2021年                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>大塚啓介, Dong Shuonan, 槇原幹十朗      |
| 2. 発表標題<br>歪を要素変数とする非線形梁要素の柔軟マルチボディ解析への拡張 |
| 3. 学会等名<br>歪を要素変数とする非線形梁要素の柔軟マルチボディ解析への拡張 |
| 4. 発表年<br>2021年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Otsuka, K., Dong, S., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K.   |
| 2. 発表標題<br>Flexible Wing Fluid-Structure Interaction Model Coupling Unsteady Vortex Lattice Method and Absolute Nodal Coordinate Formulation |
| 3. 学会等名<br>Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Dong, S., Otsuka, K., and Makihara, K.                                   |
| 2. 発表標題<br>Multibody Dynamic Analysis Based on Canonical Theory                     |
| 3. 学会等名<br>Proceedings of the 17th International Conference on Flow Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Otsuka, K., Dong, S., Hirotsu, S., Kuzuno, R., and Makihara, K.   |
| 2. 発表標題<br>Flexible Multibody Dynamics Using Absolute Nodal Coordinate Formulation with Internal Constraint Equation |
| 3. 学会等名<br>Proceedings of the 15th International Conference on Motion and Vibration Control (国際学会)                   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Otsuka, K., Dong, S., Hirotsu, S., Kuzuno, R., and Makihara, K.                                      |
| 2. 発表標題<br>Multibody Modeling Using Absolute Nodal Coordinate Plate Element for Deployable Aerospace Structures |
| 3. 学会等名<br>Proceedings of the 15th International Conference on Motion and Vibration Control (国際学会)              |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>大塚啓介, Dong Shuonan, 榎原幹十朗 |
| 2. 発表標題<br>絶対節点座標法を用いた柔軟翼の非線形構造解析    |
| 3. 学会等名<br>第62回構造強度に関する講演会           |
| 4. 発表年<br>2020年                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>廣谷俊輔, 董鏢男, 大塚啓介, 榎原幹十朗      |
| 2. 発表標題<br>弾性力を簡易化したANCF/CRBF梁モデルの運動解析 |
| 3. 学会等名<br>東北支部第56期秋季講演会               |
| 4. 発表年<br>2020年                        |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                 | 備考 |
|-------|--|---------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 亀山 正樹<br>(Kameyama Masaki)<br><br>(30302178)   | 信州大学・学術研究院工学系・准教授<br><br>(13601)      |    |
| 研究分担者 | 永井 大樹<br>(Nagai Hiroki)<br><br>(70360724)      | 東北大学・流体科学研究所・教授<br><br>(11301)        |    |
| 研究分担者 | 川畑 成之<br>(Kawabata Nariyuki)<br><br>(70390507) | 阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・准教授<br><br>(56101) |    |

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      | University of Warwick  |  |  |
| 米国      | University of Illinois |  |  |