

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18853

研究課題名（和文）新規理論【ベクトル・回転正準変換】で打破する構造解析と機構解析を分かつ壁

研究課題名（英文）A new theory, vectorial and rotational canonical transformation, overcomes a barrier separating structural and mechanism analyses

研究代表者

楨原 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）：研究では部材レベルからベクトルモデリングを行った上で、新規理論【ベクトル・回転正準変換】を導入し、この障壁の打破に挑んだ。これは変換前のベクトルでジョイント表現、変換後の回転角で高精度解析を実現する新規アイデアであった。提案する統合モデリング手法は部材レベルからベクトルモデリングを行うので、【異分野を分かつ変数の相違】が解決され、これまで隔てられていた構造と機構の両解析をシームレスに繋ぐことができた。提案手法の実証のため、同施設の風洞装置で実験を行った。翼模型を用いて部材レベルでの解析精度実証が可能となった。多点カメラ計測法と分布歪計測法を併用することで解析精度実証が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国際共同研究を通して、【異分野を分かつ変数の相違】を解決することで、これまで断裂していた構造解析と機構解析のシームレスな統合を実現する挑戦的意義を有する。これまでに培った計測方法を統合し、システムレベルでの構造・機構連成挙動の風洞実験という過去研究の知見・データが圧倒的に乏しい実験領域に挑戦する意義を有する。提案する【ベクトル・回転正準変換】は細長梁のみならず、板やソリッドに拡張し、高高度風力発電システムや羽ばたきドローンなど多様な構造に適用可能な萌芽性を有する。

研究成果の概要（英文）：In this research, vector modeling was performed from the member level, and a new theory [vector-rotation canonical transformation] was introduced to try to break through this barrier. This was a new idea to achieve joint representation with vectors before the transformation and high-precision analysis with rotational angles after the transformation. Since the proposed integrated modeling method performs vector modeling from the member level, the [difference in variables separating the different fields] was resolved, and both structure and mechanism analyses, which were previously separated, could be seamlessly connected. To demonstrate the proposed method, experiments were conducted in a wind tunnel at the Institute of Fluid Science, Tohoku University, in collaboration with Professor Nagai. The accuracy of the analysis was verified at the component level using an airfoil model.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：正準変数変換 柔軟展開翼 可変翼 モーフィング 風洞実験 航空機モデリング

### 1. 研究開始当初の背景

柔軟ロケット機体や展開翼などの宇宙構造物を解析する際に、マルチボディダイナミクスが有効な手法である。そのモデリングには、ラグランジュ形式の二階時間微分の運動方程式がよく用いられる。一方、ハミルトニアン形式では運動量を独立変数として、一階時間微分の運動方程式が導出され、質量が変化する構造物が扱いやすくなる[1]。ジョイント拘束の取扱いは、ラグランジュ未定乗数法を追加して、微分代数方程式(DAE)を構築する手法がよく用いられる。系統的に定式化できるが、変数が多くなり、計算効率の低下が問題となる。一方、速度変換法に基づき、一般化座標を独立と従属に分類し、常微分方程式(ODE)を構築する手法も用いられる[2]。運動を記述するのに不必要な変数を削減するので、計算効率の向上が期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、高効率かつ高精度のハミルトニアン形式の柔軟マルチボディダイナミクスのモデリング手法を提案する。ハミルトニアンに一階時間微分の拘束方程式を導入し、線形拘束を仮定することで、運動を記述するのに不必要な変数を削減した ODE を導出する。数値シミュレーションと風洞試験を行うことで、提案手法の妥当性と有用性を示す。

### 3. 研究の方法

(1) 従来の DAE に基づくモデリング手法[2]：拘束系のハミルトニアン  $H^*$  を

$$H^*(\mathbf{e}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\lambda}) \equiv H(\mathbf{e}, \mathbf{p}) - \boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{\Phi} = T(\mathbf{p}) + U(\mathbf{e}) - \boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{\Phi} \quad (1)$$

と定義する。 $\mathbf{e}$  は一般化座標 (数が  $n$ )、 $\mathbf{p}$  は一般化運動量、 $\boldsymbol{\lambda}$  はラグランジュ未定乗数、 $\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{0}$  は拘束方程式 (数が  $m$ )、 $T = \mathbf{p}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{p} / 2$  は運動エネルギー、 $\mathbf{M}$  は質量行列、 $U$  はポテンシャルエネルギーである。よって、運動方程式が

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = \partial H^* / \partial \mathbf{p} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{p} - \boldsymbol{\Phi}_p^T \boldsymbol{\lambda} \\ \dot{\mathbf{p}} = -\partial H^* / \partial \mathbf{e} + \mathbf{F}_n = -\partial U / \partial \mathbf{e} + \boldsymbol{\Phi}_e^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{F}_n \end{cases} \quad (2)$$

となる。 $\mathbf{F}_n$  は非保存力である。拘束式  $\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{0}$  と連立して、解く必要がある変数は  $(\mathbf{e}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\lambda})$  である。運動を記述するのに必要がない変数を用いるため、計算効率が悪い。

(2) 提案する ODE に基づく低次元化モデリング手法：変数削減を目標としハミルトニアンを

$$H^*(\mathbf{e}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\lambda}) \equiv H(\mathbf{e}, \mathbf{p}) - \boldsymbol{\lambda}^T \dot{\boldsymbol{\Phi}} = T(\mathbf{p}) + U(\mathbf{e}) - \boldsymbol{\lambda}^T \dot{\boldsymbol{\Phi}} \quad (3)$$

と定義する。拘束方程式を線形拘束、

$$\boldsymbol{\Phi} \equiv \boldsymbol{\Phi}(\mathbf{e}) = \mathbf{0}, \dot{\boldsymbol{\Phi}} = \dot{\boldsymbol{\Phi}}(\dot{\mathbf{e}}) = \mathbf{0} \quad (4)$$

$\boldsymbol{\Phi}$  が一般化座標  $\mathbf{e}$  の線形結合、 $\dot{\boldsymbol{\Phi}}$  が一般化速度  $\dot{\mathbf{e}}$  の線形結合と仮定した。運動方程式が

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{p} - \dot{\boldsymbol{\Phi}}_p^T \boldsymbol{\lambda} \\ \dot{\mathbf{p}} = -\partial U / \partial \mathbf{e} + \dot{\boldsymbol{\Phi}}_e^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{F}_n \end{cases} \quad (5)$$

となる。 $\dot{\boldsymbol{\Phi}}$  のヤコビ行列を計算すると、

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}_p = \partial(\dot{\boldsymbol{\Phi}}_e \dot{\mathbf{e}}) / \partial \mathbf{p} = \boldsymbol{\Phi}_e \mathbf{M}^{-1}, \dot{\boldsymbol{\Phi}}_e = \mathbf{0} \quad (6)$$

の関係式が成立するため、式(5)が

$$\begin{cases} \mathbf{M} \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{p} - \dot{\boldsymbol{\Phi}}_e^T \boldsymbol{\lambda} \\ \dot{\mathbf{p}} = -\partial U / \partial \mathbf{e} + \mathbf{F}_n \end{cases} \quad (7)$$

となる。速度変換法に基づき、 $\mathbf{e}$ 、 $\dot{\mathbf{e}}$ 、変換行列  $\mathbf{B}$  を

$$\mathbf{e} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{dp} \\ \mathbf{e}_{in} \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{e}} = \frac{d\mathbf{e}}{dt} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{e}}_{dp} \\ \dot{\mathbf{e}}_{in} \end{bmatrix}, \mathbf{B} \equiv \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Phi}_{e_{dp}}^{-1} \boldsymbol{\Phi}_{e_{in}} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (8)$$

とする[3]。添え字  $dp$  は従属(dependent)を表し、 $in$  は独立(independent)を表し、運動の記述に必要なであることを示す。拘束条件の一階時間微分より、 $\dot{\mathbf{e}}_{dp}$  と  $\dot{\mathbf{e}}_{in}$  の関係を

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}} = \boldsymbol{\Phi}_{e_{in}} \dot{\mathbf{e}}_{in} + \boldsymbol{\Phi}_{e_{dp}} \dot{\mathbf{e}}_{dp} = \mathbf{0}, \rightarrow \dot{\mathbf{e}}_{dp} = -\boldsymbol{\Phi}_{e_{dp}}^{-1} \boldsymbol{\Phi}_{e_{in}} \dot{\mathbf{e}}_{in} \quad (9)$$

と書けるので、一般化速度が  $\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{B} \dot{\mathbf{e}}_{in}$  となる。式(9)を(7)代入し、

$$\delta \mathbf{e}_{in}^T (\mathbf{B}^T \mathbf{M} \mathbf{B} \dot{\mathbf{e}}_{in} - \mathbf{B}^T \mathbf{p} + \mathbf{B}^T \dot{\boldsymbol{\Phi}}_e^T \boldsymbol{\lambda}) = 0 \quad (10)$$

となる。 $\boldsymbol{\Phi}_e \mathbf{B} = \mathbf{0}$  となるため、運動方程式が

$$\begin{cases} \mathbf{B}^T \mathbf{M} \mathbf{B} \dot{\mathbf{e}}_{in} = \mathbf{B}^T \mathbf{p} \\ \dot{\mathbf{p}} = -\partial U / \partial \mathbf{e} + \mathbf{F}_n \end{cases} \quad (11)$$

となる。運動を記述するのに変数 $(\mathbf{e}_{in}, \mathbf{p})$ のみを用いるため、計算効率の向上が見込める。

(3) 質量が変化する構造を扱いやすい利点：本研究はラグランジュ形式ではなく、ハミルトニアン形式の定式化を行った。その理由はラグランジュ形式に比べ、質量が変化する構造物を扱いやすいからである。例えば、質量行列が時間 $t$ の関数である場合 $(\mathbf{M} = \mathbf{M}(t))$ 、速度変換法に基づいたラグランジュ形式の運動方程式は

$$\mathbf{B}^T \mathbf{M} \mathbf{B} \ddot{\mathbf{e}}_{in} + \mathbf{B}^T \dot{\mathbf{M}} \mathbf{B} \dot{\mathbf{e}}_{in} = \mathbf{B}^T (-\partial U / \partial \mathbf{e} + \mathbf{F}_n) \quad (12)$$

となり、 $\dot{\mathbf{M}}$ を含む項を計算する必要がある。一方、ハミルトニアン形式は、 $\mathbf{M} = \mathbf{M}(t)$ であっても、式(11)と同一の運動方程式を導出でき、 $\dot{\mathbf{M}}$ を計算する必要がある。これにより、質量時変・時不変の双方のシステムを同じ形式で解析でき、さらに計算効率の向上も見込める。

(4) 提案手法の特徴：本研究はハミルトニアン形式の柔軟マルチボディダイナミクスの低次元化モデリング手法を提案した。ハミルトニアン形式の従来手法(式(2))に比べ、提案手法(式(11))は一階時間微分の拘束式を導入し、線形拘束を仮定することで、独立な一般化座標 $\mathbf{e}_{in}$ のみで定式化できる。従来手法で解く必要がある変数は $(\mathbf{e}, \mathbf{p}, \boldsymbol{\lambda})$ であり、変数の数が $2n+m$ である。一方、提案手法で解く必要がある変数は $(\mathbf{e}_{in}, \mathbf{p})$ であり、変数の数が $2n-m$ となる。運動を記述するのに不必要な変数 $(\mathbf{e}_{cp}, \boldsymbol{\lambda})$ を削減することで、計算効率の向上が見込める。特に、拘束条件が多いほど、削減できる変数が多くなるため、提案手法の有用性が顕著となる。

#### 4. 研究成果

(1) 提案手法の妥当性と有用性を検証するために、数値シミュレーションを行う。柔軟ボディのモデリングには、ANCF 梁要素[1]を用いる。図1に示す質量が変化するロケット構造の解析を行う。ノズルと胴体がピンジョイントで結合され、燃料と胴体が固定される。推進力を受けて打ち上げられる。図2にロケットの全長を示す。全長の初期値は26 mであり、弾性変形により変化する。燃料消耗により、断面積が小さくなり、伸び剛性が小さくなる。このためロケットが振動しながら、伸びが大きくなっていく。従来の DAE(式(2))、ラグランジュ形式(式(12))に比べ、提案手法(式(11))に基づいた解析は計算コストを削減できることがわかる。

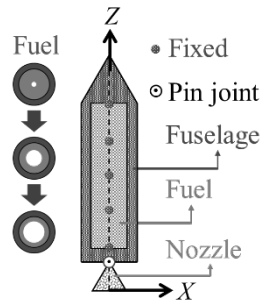


図1 質量が変化するロケット構造の解析例

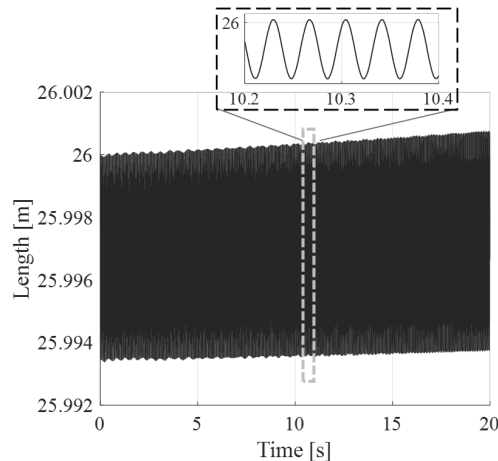


図2 ロケットの全長の時間履歴

(2) 提案手法の有用性を検証するため、東北大学流体科学研究所の低乱熱伝達風洞を用いて、動的实验を実施した。図3に実験設置を示す。風洞開口部に模型を設置し、ワイヤと繋ぐことで初期変位を与える。ワイヤを焼切り、振動を発生させる。長さ400 mm、幅40 mm、厚さ2 mm、密度1425 kg/m<sup>3</sup>、ヤング率2.92 GPaの塩化ビニル製の平板を模型に用いた。レーザ変位計を用いて模型の変位を計測した。図4に点線で流速が5, 7.5 m/sの実験結果を示す。模型の振動速度と風速には相対速度があるため、非定常揚力を受けて、減衰する。流速が大きいくほど、減衰も大きくなる。数値シミュレーションは、提案手法を用いて運動方程式を構築し、流れの三次元効果を考慮した空力モデル(3D-UVLM)を導入して、この減衰傾向を表現できた。図4に破線でシミュレーション結果を示す。実験結果(点線)と一致できており、提案手法の妥当性を実証できた。

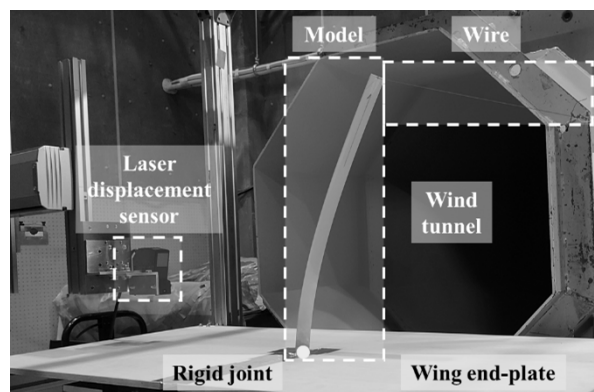


図3 風洞試験の実験設置

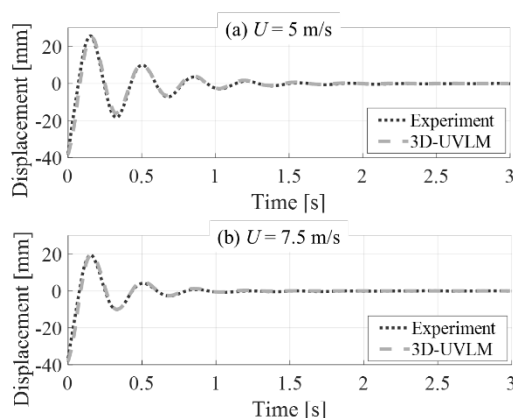


図4 実験結果とシミュレーション結果の比較

(3) 本研究はハミルトニアン形式の柔軟マルチボディダイナミクスの低次元化モデリング手法を提案した。ラグランジュ形式に比べ、質量が変化する構造物を扱いやすい利点があるため、ハミルトニアン形式に着目した。提案手法は、一階時間微分の拘束式を導入し、線形拘束を仮定することで、運動の記述に不必要な変数を削減できた。従来のハミルトニアン手法に比べ、独立な一般化座標のみで定式化できるため、計算効率の向上を実現できた。ラグランジュ形式に比べ、質量時変・時不変の双方のシステムを同じ形式で解析できることも示した。提案手法の検証には、数値シミュレーションと風洞試験を行った。提案手法は従来手法に比べて計算時間を減少できた。さらに、風洞実験では、実験結果と良好な一致を示した。これらより、提案手法は高効率かつ高精度であると言える。今後は、より大きく複雑な構造物を対象として、提案手法の有用性を検討する。

#### <引用文献>

- ① Dong, S., Otsuka, K., and Makihara, K., "Hamiltonian Formulation with Reduced Variables for Flexible Multibody Systems under Linear Constraints: Theory and Experiment," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 547, 2023, p. 117535.
- ② Jalón, J.G., and Bayo, E. "Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems," Springer, 1994.
- ③ Wehage, R.A., and Haug, E.J., "Generalized Coordinate Partitioning for Dimension Reduction in Analysis of Constrained Dynamic Systems," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 104, No. 1, 1982, pp. 249–255.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Otsuka Keisuke, Makihara Kanjuro, Sugiyama Hiroyuki	4. 巻 17
2. 論文標題 Recent Advances in the Absolute Nodal Coordinate Formulation: Literature Review From 2012 to 2020	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Computational and Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 80803
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4054113	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 Kuzuno Ryo, Dong Shuonan, Okada Taiki, Otsuka Keisuke, Makihara Kanjuro	4. 巻 10
2. 論文標題 Dynamics and Energy Analysis of Nonequatorial Space Elevator Using Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Method Extended to Noninertial Coordinate System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 43964 ~ 43980
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3168666	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 Otsuka Keisuke, Dong Shuonan, Fujita Koji, Nagai Hiroki, Makihara Kanjuro	4. 巻 538
2. 論文標題 Joint parameters for strain-based geometrically nonlinear beam formulation: Multibody analysis and experiment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 117241 ~ 117241
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jsv.2022.117241	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 Otsuka Keisuke, Wang Yinan, Palacios Rafael, Makihara Kanjuro	4. 巻 60
2. 論文標題 Strain-Based Geometrically Nonlinear Beam Formulation for Rigid/Flexible Multibody Dynamic Analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 4954 ~ 4968
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J061516	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 Otsuka Keisuke, Wang Yinan, Fujita Koji, Nagai Hiroki, Makihara Kanjuro	4. 巻 17
2. 論文標題 Consistent Strain-Based Multifidelity Modeling for Geometrically Nonlinear Beam Structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Computational and Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 111003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4055310	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 Dong Shuonan, Otsuka Keisuke, Makihara Kanjuro	4. 巻 547
2. 論文標題 Hamiltonian formulation with reduced variables for flexible multibody systems under linear constraints: Theory and experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 117535 ~ 117535
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsv.2022.117535	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, Dong Shuonan, Kuzuno Ryo, Sugiyama Hiroyuki, Makihara Kanjuro	4. 巻 61
2. 論文標題 Moving Morphable Multi Components Introducing Intent of Designer in Topology Optimization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1720 ~ 1734
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J062210	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

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

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

1. 発表者名 Dong, S., Otsuka, K., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K.
2. 発表標題 Development of Multibody Dynamics Formulation Based on Canonical Theory
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kuzuno, R., Dong, S., Takahashi, Y., Okada, T., Shizuno, Y., Otsuka, K., and Makihara, M.
2. 発表標題 Flexible Rotating Multibody Analysis Using Extended NPFEM for Non-Equatorial Space Elevator
3. 学会等名 10th Asian Conference on Multibody Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Dong, S., Mukogawa, T., Hara, Y., Otsuka, K., Chen, B., Shi, Y., Jia, Y., Soutis, C., Kurita, H., Narita, F., and Makihara, K.
2. 発表標題 Investigation of Flutter Velocity and Power Generation with Piezoelectric Film
3. 学会等名 19th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Otsuka, K., Wang, Y., Cheng, K., Dong, S., Fujita, K., Palacios, R., Nagai, H., and Makihara, K.
2. 発表標題 Geometrically Nonlinear Beam Model for Slender Multibody Wings
3. 学会等名 22nd International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Otsuka, K., Dong, S., Kuzuno, R., and Makihara, K.
2. 発表標題 Analysis-Oriented Moving Morphable Components for Topology Optimization
3. 学会等名 AIAA Scitech 2023 Forum (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 1.大塚啓介, Dong Shuonan, 榎原幹十朗
2. 発表標題 プロペラと主翼の空力干渉を考慮した高アスペクト比翼の非線形空力弾性解析
3. 学会等名 第64回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 2.DONG Shuonan, 葛野諒, 岡田大規, 静野芳崇, 大塚啓介, 榎原幹十朗
2. 発表標題 モデル縮約したハミルトニアン形式の柔軟マルチボディシステム解析
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 3.葛野諒, 董鏢男, 高橋侑也, 岡田大規, 静野芳崇, 大塚啓介, 榎原幹十朗
2. 発表標題 非慣性座標系へ拡張した非線形有限要素法による非赤道宇宙エレベータの3次元動解析
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 4. 渡辺聡史, DONG Shuonan, 大塚啓介, 楨原幹十朗
2. 発表標題 大変形する展開構造物の構造最適化
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第58期総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 5. 高橋侑也, 葛野諒, DONG Shuonan, 岡田大規, 静野芳崇, 大塚啓介, 楨原幹十朗
2. 発表標題 非線形有限要素法によるテザー構造物の大変形解析
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第58期総会講演会
4. 発表年 2023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	永井 大樹 (Nagai Hiroki) (70360724)	東北大学・流体科学研究所・教授  (11301)	
研究分担者	大塚 啓介 (Otsuka Keisuke) (20881189)	東北大学・工学研究科・准教授  (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	University of Chester	University of Manchester	Aston University	