

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22378

研究課題名（和文）ベクトル・歪変換式で実現する次世代展開構造物の大変形制御と解析・実験的検証

研究課題名（英文）Vector-Strain Transformation for Control and Analysis of Next-Generation Deployable Structures

研究代表者

大塚 啓介 (Keisuke, Otsuka)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：20881189

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：通信・エネルギー・防災の需要増加に伴い、展開翼を有する衛星航空機や高出力大型風車、宇宙・炉心探査用ロボットアームの実用化が期待されている。全長数10mから数100 mに及ぶ細長形状であり、大変形が避けられないこれら次世代構造物を展開するには、実運用中でも計測可能な変形量と数値モデルを用いて、変形を許容内に収める制御が必要である。本研究では実運用中かつ大変形時でも計測が容易な歪を変数とする革新的モデリング法を構築した。構築したモデルによる解析性能を東北大学・流体科学研究所における大型風洞実験を通して実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「歪」を変数とするモデリング法をジョイントを有する展開構造に適用できるように拡張した点が本研究の特筆すべき学術的意義である。ジョイントは「ベクトル」変数で表現されることが一般的であり、これまで「歪」では表現できなかったからである。多様な細長展開構造物の大変形解析・大変形制御を一気通貫して実施でき、航空機・浮体式洋上風車・宇宙アームなど次世代構造の実現に貢献できることが社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：With the increasing demand for telecommunication, renewable energy, and disaster monitoring, high-altitude platform station with deployable wings, large wind turbines, and space robot arms are expected to be developed. To develop these next-generation structures, which have slender bodies with nearly 100 meters and undergo large deformation, deformation and deployment control using a numerical model is necessary. The model should be based on variables that can be measured in actual operation for the purpose of control. In this research, we proposed an innovative modeling method based on strain variables, which are easy to measure in actual operation even when large deformation occurs. The analysis performance of the proposed model was demonstrated through a large wind tunnel experiment at the Institute of Fluid Science, Tohoku University.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：柔軟展開構造物 流体構造連成 空力弾性 非線形有限要素法 マルチボディダイナミクス マルチフィジックス 風洞実験 制御

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究背景

通信・エネルギー・防災の需要増加に伴い、展開翼を有する衛星航空機や高出力大型風車、宇宙・炉心探査用ロングアームの実用化が期待されている。これら次世代展開構造物の実現に向けて、数値モデルを用いて大変形解析する研究が活発化している。その中で大変形解析用のベクトルモデルが展開機構を表現できるよう拡張されてきた。しかし、突風環境や未知探査領域で、これら構造物を展開するためには、設計段階での大変形解析だけでなく、実運用中にリアルタイムで計測される変形量と数値モデルを用いて大変形を伴った展開を制御する必要がある。

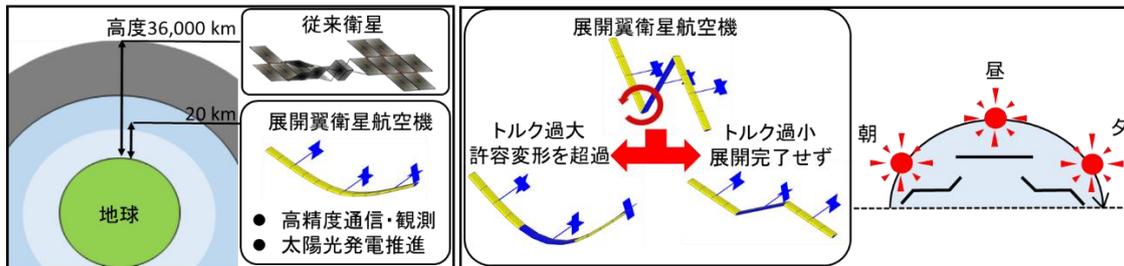


図1 展開翼を有する衛星航空機

(2) 研究課題

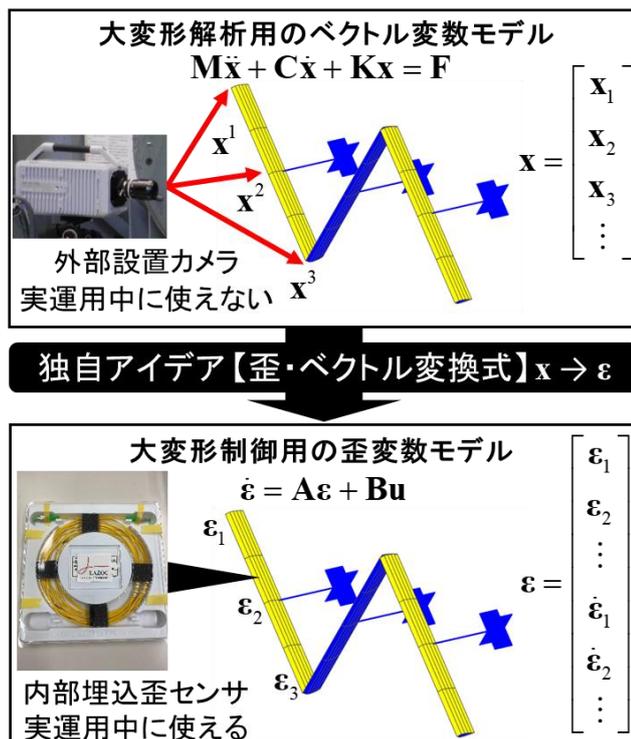
「実運用中かつ大変形時に計測できる値のみを変数とするモデルを構築できるか」が学術的な課題である。従来の展開構造物モデルは、実運用中に計測困難なベクトルを変数としており、制御に利用できなかった。未だ「大変形を解析する」ことに終始しており、「大変形を制御する」という領域まで発想が及んでいないからである。本研究では光ファイバ・無線歪センサの発達で、大変形構造でも計測が容易になってきている歪に着眼することで課題解決に取り組んだ。

2. 研究の目的

(1) 歪モデリング法の構築

次世代展開構造物の大変形制御を可能とするために実運用中でも計測できる値「歪」を変数としたモデリング法の構築を第一目的とした。

ベクトル変位を測定するカメラやレーザ変位計は構造物の外部に設置しなければならないので、実運用中に使えない。一方で、歪センサは構造内部に埋込んで実運用中かつ大変形時も計測が可能になってきている。そこで次世代構造物の細長形状に着目し、幾何学曲線理論との類似性から申請者が見出した独自の【ベクトル・歪変換式】で、大変形解析用のベクトルを大変形制御用の歪に変換するモデリング法を提案した。



(2) 歪モデリング法におけるジョイント表現

図2 解析モデルと制御モデル

展開構造が有するジョイントにおいて、拘束対象となる変数は「歪」ではなく「位置ベクトル」や回転を表す「方向ベクトル」であるため、歪モデルの展開構造への適用は困難という問題があった。以下2つの方法を導入することで、展開パーツ同士を繋ぐジョイント拘束の表現を可能にし、この問題を解決することを第二目的とした。

【方法1：ベクトル・歪変換式を利用したジョイント拘束表現】

まず、歪に変換する前のベクトル変数の段階で、ジョイント拘束式を定義した。このベクトル変数で記載されたジョイント拘束式から導出される項に対して、チェーンルールを適用することで、ジョイントに起因する項さえも歪変数で記述できるようにした。方法1はパーツ同士が閉ループを構成するような複雑な場合でも適用可能である。

【方法2：回転パラメータの導入によるジョイント拘束表現】

歪変数モデルは構造の一端から他端までの変形を漸化的に計算する。漸化計算でジョイント部に差し掛かった際に、回転を表す任意のパラメータ（相対回転角、クォータニオン、方向余弦から選択可能）を加えることで、解析性能を一切落とすことなく、歪モデルによる展開パーツ同士のジョイント拘束表現を可能にした。方法2は適用できる構造は限られるが、方法1よりも少ない変数でより安定した解析を可能にする。

(3) 歪モデリング法と空力解析法の連成

上記の歪モデリング法をイギリスとの共同研究で構築してきた非定常空力解析法 Unsteady Vortex Lattice Method (UVLM)と連成させ、衛星航空機や風車の空力弾性解析を可能とすることを第三目的とする。大変形空力弾性解析に広く用いられてきた空力解析法 Strip Theory は高速計算できるが、三次元効果、非定常効果を考慮し、任意の翼形状に適用するには複雑な補正が必要になってしまう。一方、申請者の手法は補正無しに三次元効果、非定常効果を考慮しつつ、任意の翼形状に適用可能であり、空力弾性制御系設計も可能といった利点を持つ。UVLMはStrip Theoryより計算コストが大きいですが、三次元空間を要素分割するCFDより計算コストは極めて低い。これは下図のようにUVLMの要素分割は翼表面と後流だけだからである。

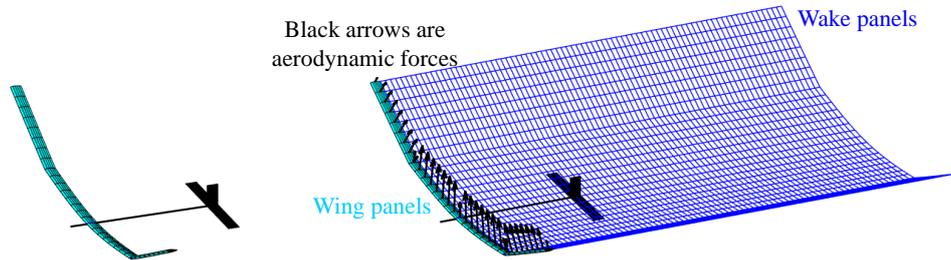


図3 歪モデリング法と空力解析法の連成

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

提案する歪モデルによる解析性能の比較検証を行った。比較対象は「挑戦的研究(萌芽)20K21041 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」において構築されたベクトルモデルである。このため同課題の研究報告書と4. 研究成果における解析結果の一部が重複する点に注意されたい。

(2) 提案手法の風洞実験による妥当性の実証

東北大学流体科学研究所の風洞で、細長翼の変形実験を実施した。計測には歪ゲージを用いた。流速は最大30 m/sに設定し、多様な風速に対する変形挙動を計測した。

4. 研究成果

(1) 三次元構造解析結果

図4に示すように柔軟梁の一端をZ軸に平行な軸を有するヒンジジョイントで原点に固定する。解析対象をX軸上で正の向きに配置した状態から、Z軸周りに初期回転速度 π rad/sを与える。回転しながら重力によって、たわみ変形も発生する3次元運動となる。表1は柔軟梁のパラメータを示す。図5は自由端の初期値からの変位である。三次元解析において、提案歪モデルとベクトルモデルは良く一致することが確認できた。

表1 柔軟梁のパラメータ

パラメータ	値	単位
長さ	473	mm
幅	50.8	mm
厚さ	0.45	mm
ヤング率	127	GPa
密度	4430	kg/m ³
重力加速度	9.8	m/s ²

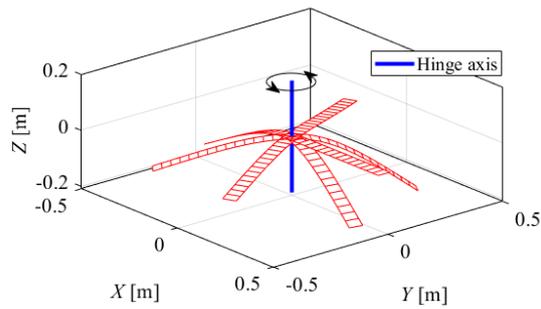


図4 柔軟梁の挙動

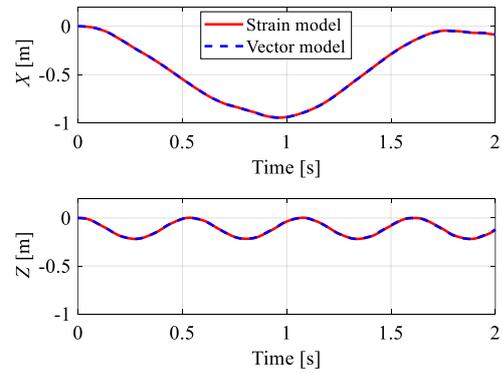


図5 柔軟梁の自由端の時間履歴

(2) 二次元構造解析結果

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。表2は解析対象のパラメータを示す。図6は振子挙動を示す。提案歪モデルとベクトルモデルは良く一致している。図7は自由端の X 座標の時間履歴を示す。変数（自由度 DoF）の数が同一になる要素分割数での結果を比較している。提案歪モデルは少ない変数の数で収束している。なお、提案手法では結果表示のために解析終了後に、歪から変位を復元した。

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 ³
重力加速度	9.8	m/s ²

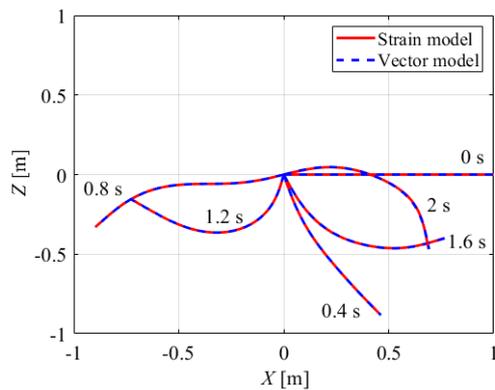


図6 柔軟振子の挙動

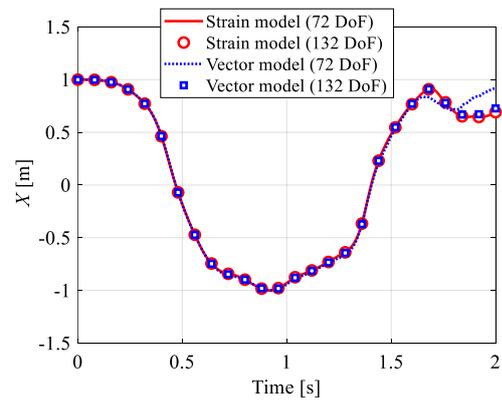


図7 柔軟振子の自由端 X 座標の時間履歴

(3) マルチボディ解析結果

剛体ボディと提案手法で歪モデリングされた柔軟ボディが混在したマルチボディシステムの解析を行った。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8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9に自由端の X 座標時間履歴を示す。マルチボディ解析においても、提案歪モデルとベクトルモデルとの良好な一致が確認できた。

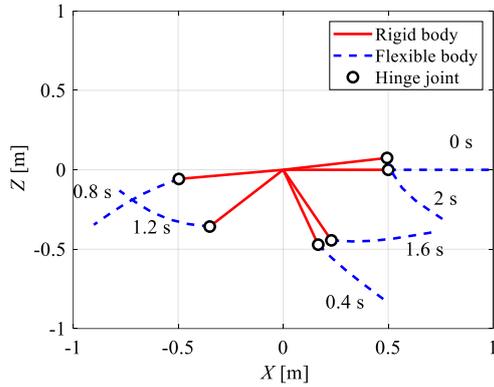


図8 多体構造の挙動

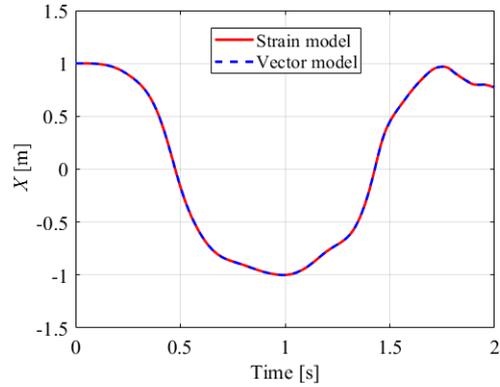


図9 多体構造の自由端 X 座標の時間履歴

(4) 空力弾性解析結果

表3のベンチマーク翼の空力弾性解析を行った. 図10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を採用した. 翼に生じる空気が構造変形を引き起こす. 図11にベンチマーク翼の変形形状を示す. 空力弾性解析においても, 提案歪モデルとベクトルモデルの良好な一致を確認できた.

表3 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	1.0×10^7	N
曲げ剛性 EI_{yy}	2.0×10^4	N m^2
曲げ剛性 EI_{zz}	5.0×10^6	N m^2
ねじり剛性 GJ	1.0×10^4	N m^2
空気密度	0.0889	kg/m^3
流速	25	m/s
迎角	2	deg

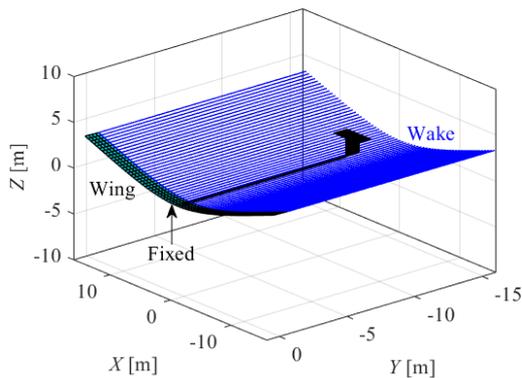


図10 ベンチマーク翼の三次元図

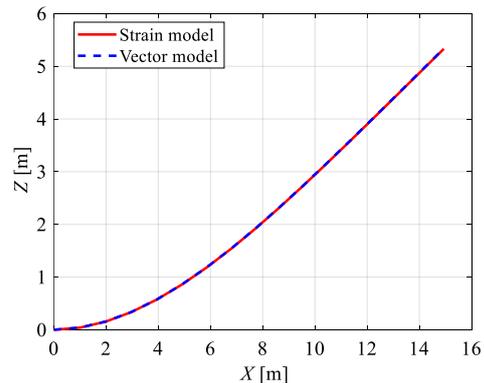
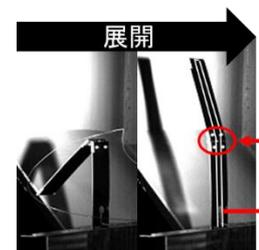


図11 主翼の変形形状

(5) 風洞実験との比較結果

右図のように風洞内に鉛直に置かれた平板翼をバネアクチュエータで展開させた時の歪ゲージデータを解析で得られた歪データと比較したところ良好な一致を示した. この比較結果は本報告書提出時の段階で投稿論文として査読中である.



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 6件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Otsuka Keisuke, Wang Yinan, Makihara Kanjuro	4. 巻 143
2. 論文標題 Three-Dimensional Aeroelastic Model for Successive Analyses of High-Aspect-Ratio Wings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of ASME, Journal of Vibration and Acoustics	6. 最初と最後の頁 61006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4050276	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, Wang Yinan, Makihara Kanjuro	4. 巻 16
2. 論文標題 Absolute Nodal Coordinate Formulation With Vector-Strain Transformation for High Aspect Ratio Wings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of ASME, Journal of Computational and Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 11007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4049028	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, del Carre Alfonso, Palacios Rafael	4. 巻 59
2. 論文標題 Nonlinear Aeroelastic Analysis of High-Aspect-Ratio Wings with a Low-Order Propeller Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIAA, Journal of Aircraft	6. 最初と最後の頁 293 ~ 306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.C036285	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, Makihara Kanjuro, Sugiyama Hiroyuki	4. 巻 in press
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 Transactions of ASME, Journal of Computational and Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 in press
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 Wang Yinan, Zhao Xiaowei, Palacios Rafael, Otsuka Keisuke	4. 巻 60
2. 論文標題 Aeroelastic Simulation of High-Aspect Ratio Wings with Intermittent Leading-Edge Separation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1769 ~ 1782
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J060909	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, Wang Yinan, Palacios Rafael, Makihara Kanjuro	4. 巻 in press
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 1 ~ 15
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 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 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 大塚啓介
2. 発表標題 展開型モーフィング翼のマルチフィデリティ構造空力連成解析
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会「先端技術フォーラム」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣谷俊輔, Dong Shuonan, 大塚啓介, 槇原幹十朗
2. 発表標題 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 日本機械学会東北支部第56期秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shuonan Dong, Keisuke Otsuka, Kanjuro Makihara
2. 発表標題 Multibody Dynamic Analysis Based on Canonical Theory
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keisuke Otsuka, Shuonan Dong, Yinan Wang, Koji Fujita, Hiroki Nagai, Kanjuro Makihara
2. 発表標題 Flexible Wing Fluid-Structure Interaction Model Coupling Unsteady Vortex Lattice Method and Absolute Nodal Coordinate Formulation
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keisuke Otsuka, Shuonan Dong, Shunsuke Hirotani, Ryo Kuzuno, Kanjuro Makihara
2. 発表標題 Flexible Multibody Dynamics Using Absolute Nodal Coordinate Formulation with Internal Constraint Equation
3. 学会等名 The 15th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keisuke Otsuka, Shuonan Dong, Shunsuke Hirotsu, Ryo Kuzuno, Kanjuro Makihara
2. 発表標題 Multibody Modeling Using Absolute Nodal Coordinate Plate Element for Deployable Aerospace Structures
3. 学会等名 The 15th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keisuke Otsuka, Alfonso del Carre, Rafael Palacios
2. 発表標題 Nonlinear Static and Dynamic Analysis Framework for Very Flexible Multibody Aircraft with Propellers
3. 学会等名 AIAA Scitech 2021 Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yinan Wang, Xiaowei Zhao, Rafael Palacios, Keisuke Otsuka
2. 発表標題 Unsteady Aeroelasticity of Slender Wings with Leading-Edge Separation
3. 学会等名 AIAA Scitech 2021 Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

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

1. 発表者名 大塚啓介, Dong Shuonan, 槇原幹十朗
2. 発表標題 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 第63回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Otsuka, Shuonan Dong, Kanjuro Makihara
2. 発表標題 Absolute Nodal Coordinate Formulations for Aeroelastic Analysis of Next-Generation Aircraft Wings
3. 学会等名 17th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control (MSNDC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 葛野諒, 董鏢男, 廣谷俊輔, 大塚啓介, 槇原幹十朗
2. 発表標題 日本機械学会東北支部 第57期秋季講演会
3. 学会等名 非赤道宇宙エレベータにおけるテザーの3次元非線形解析
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kei Imagawa, Keisuke Otsuka, Yu Jia, Yu Shi, Constantinos Soutis, Hiroki Kurita, Fumio Narita, Kanjuro Makihara
2. 発表標題 Experimental Investigation of Flutter Power Generation with Piezoelectric Film
3. 学会等名 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunsuke Hirotsu, Shuonan Dong, Ryo Kuzuno, Taiki Okada, Keisuke Otsuka, Kanjuro Makihara
2. 発表標題 New MMC-Based Topology Optimization Method with Curvilinear Representation
3. 学会等名 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Otsuka, Shuonan Dong, Yinan Wang, Koji Fujita, Hiroki Nagai, Kanjuro Makihara
2. 発表標題 Nonlinear Aeroelastic Analysis Coupling Unsteady Vortex Lattice Method and Strain-Based Beam Formulation
3. 学会等名 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Otsuka, Yinan Wang, Rafael Palacios, Kanjuro Makihara
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 Shuonan Dong, Keisuke Otsuka, Yinan Wang, Koji Fujita, Hiroki Nagai, Kanjuro Makihara
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 (ISTS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------