

令和 2 年 9 月 9 日現在

機関番号：15101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18925

研究課題名（和文）限られた離散点データによる大規模構造物の座屈後変位応答上限値の簡易推定法の構築

研究課題名（英文）Establishment of simplified estimation method of upper bound of post-buckling responses of large-sized structure from measurements at few selected points

研究代表者

岩佐 貴史（IWASA, Takashi）

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90450717

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）：本研究は、大規模な構造物の座屈後の変位応答上限値を限定された離散点計測データから一定の信頼度で推定する方法論の構築を行った。対象としたのは膜構造と円筒シェル構造であり、それらの座屈後形状を全視野形状計測法で詳細に計測した。そして、座屈モードが一つの基本パターンの繰り返しで構成される場合には面外変位の空間分布は類似な確率モデルに従うことを明らかにした。この結果を基に限られた離散点データから薄膜や円筒シェル構造の座屈後の変位応答上限値を簡易的に推定する方法論を提案し、その有効性を座屈実験を通して示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、構造物の座屈後の変形モードに含まれる性質（周期性と対称性）を変位応答の空間分布の視点から捉え、限られた離散点計測データから構造物の変形挙動の上限値を一定の信頼度で予測する新たな方法論を構築した。このようなアプローチ法は全視野計測が極めて困難な大規模構造物の計測において、限られた離散点データからでも変位応答上限値を簡易的に推定できる方法論を提供するものであり、センサーネットワーク等の技術と組み合わせることで新たな計測技術の開発が期待できる。

研究成果の概要（英文）：A simplified method to estimate the upper bound of the post-buckling responses of the large-sized structures was established. This method computes the upper bound of the structure responses from measurements at few selected points. The treated buckling behaviors are a wrinkling phenomena of the membrane and a post-buckling behavior of the cylindrical shell under axial compression. Through the full-field surface shape measurement using grating projection method, it was clarified that a point-to-point variation of the out-of-plane displacements of the structures is similarly distributed when the buckling mode is composed of the repetition of the single fundamental mode. Based on the results, a computation method of the upper bound of the post-buckling responses of the structures was proposed, and its effectiveness was presented through the buckling experiment of the treated structures.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：座屈モード 応答予測 空間分布 離散点計測 構造工学 建築構造 計測工学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ロケット胴体、船体構造、タンク、膜構造等の大規模な構造物の座屈後挙動は幾何学的な非線形性が強く、境界条件や初期条件に敏感であることから解析的なアプローチによって実際の挙動を把握することが極めて困難な現象である。一方、近年注目されているセンサーネットワークを駆使した計測技術で構造物の挙動をリアルタイムに取得する場合でも構造物が大型化するにつれセンサー数が膨大となり計測コストは高くなる。センサー数を限定すれば計測データの空間分解能(センサーの設置間隔)が劣化し最大変位を適切に計測することが難しくなる。そのため、大規模な構造物の座屈後の変形挙動を実用的な方法で取得する技術は十分に確立されていないとも言えない状況にある。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、限られた離散点計測データを基に座屈後の構造物の最大変位を簡易的に推定するための方法論の構築を行う。具体的な検討項目は以下のとおりである。

- (1) 座屈後の構造物の変形挙動を光学的全視野形状計測法で詳細に計測し、座屈変位の空間分布特性を明らかにする。
- (2) (1)の結果(座屈変位の空間分布特性)を基に、限られた離散点計測データから大規模な構造物の座屈後変位の上限值を一定の信頼度で推定する方法論を構築する。

### 3. 研究の方法

構造物表面の限られた離散点で計測した変位データは「構造物表面の変位データ全体のサンプル値である」と考えると、限られた離散点で取得した変位データから構造物の変位応答の上限值を推定するには、母集団である変位データ全体の分布特性を明らかにすればよい。この考えに基づき、本研究では薄膜の皺現象と円筒シェルの軸圧縮座屈現象を対象に構造物の座屈後の面外変位の空間分布特性について検討した。ここではページ数の制約から薄膜の皺現象に関する研究について報告する。円筒シェルの軸圧縮座屈現象に関する成果は査読論文[1]として纏めている。

#### (1) 薄膜の皺現象

対象とした膜モデルを図1に示す。本研究では3つの膜モデルを対象とした。材質はいずれも Polyimide Film である。矩形膜のせん断モデルでは、薄膜の下辺を固定し上辺にせん断変位と引張変位を連続して与え、その時に生じる皺現象を対象とした。円形膜のねじりモデルでは、円形膜に初期張力を与え中央に設置した回転軸を反時計方向に回転させることで生じる皺現象を対象とした。正方形の引張モデルでは、水平方向変位を鉛直方向変位に対して大きく与えることで横方向対角上に生じる皺現象を対象とした。本研究では幾何学的非線形有限要素解析を主体に検討を行ったが、矩形膜のせん断モデルに関してのみ画像計測法を利用した計測実験を実施した。本報告では解析結果のみ紹介する。実験の詳細は研究成果[2]にまとめている。解析は汎用有限要素解析ソフトウェア FEAP (Finite Element Analysis Program) ver.8.4 を用いて行った。シェル要素は MITC (Mixed Interpolation of Tensorial Components) シェル要素である。

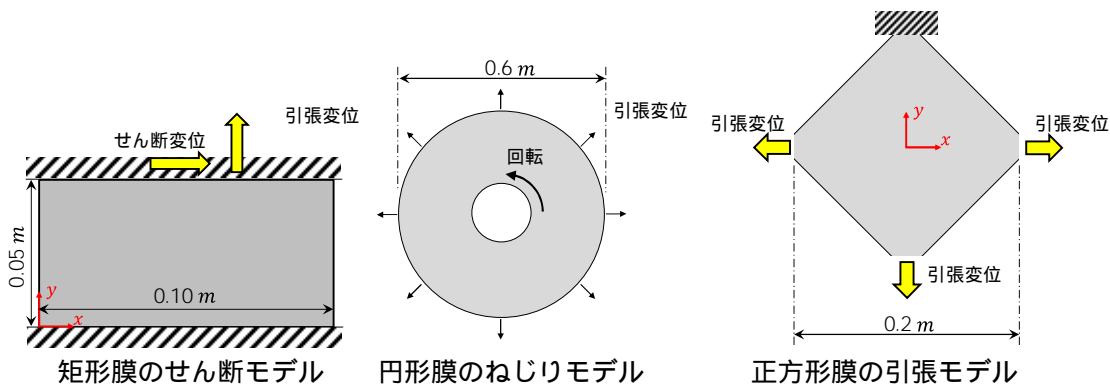


図1 本研究で対象とした膜モデル

#### (2) 座屈後変位の空間分布特性の検討法

シェル要素を用いた幾何学的非線形有限要素解析で取得した各節点の面外方向の変位データを基に座屈後変位の空間分布特性について検討した。まず、得られた変位データを以下の式により正規化する。

$$\bar{w}_{ij} = \frac{w_{ij} - \tilde{\mu}_j}{\text{NIQR}(w_{ij})} \quad (1)$$

ここで、 $w_{ij}$ は節点  $i$  の面外変位であり添字  $j$  は荷重ステップを示す。 $\tilde{\mu}_j$ は荷重ステップ  $j$  における変位データの中央値、NIQRは変位データの正規化四分位範囲である。式(1)で正規化された変位データを正規確率プロットに出力し視覚的に面外変位の空間分布特性を検討した。また、対数変換した変位データに対しても同様の検討を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 座屈後変位の空間分布特性

図2に対象とした3つの薄膜モデルの解析結果を示す。この結果を基に皺の生じた薄膜の面外変位の空間分布特性を検討した。図3にせん断膜モデルの皺領域内の面外変位データ(式(1)で正規化)を正規確率プロットへ出力した結果を示す。図は異なる4つの荷重段階の結果を示しており、 $d_s, d_t$ は矩形膜に与えたせん断変位ならびに引張変位である。図の横軸は正規化された面外変位、縦軸は確率である。図の曲線において、例えば縦軸0.90に対応する横軸の値は正規化された面外変位の90%を包絡する値を示す。図より、線形スケールにおける面外変位の空間分布特性は確率0.75以上の領域で荷重ステップごとに大きなばらつきがみられるが、対数スケールでみるとバラツキは小さく荷重段階に関係なく確率0.75以上で類似な分布特性になっている。図4には円形膜モデルと正方形膜モデルの結果を示す。図はともに対数変換した皺領域内の面外変位を式(1)により正規化した結果である。図より、円形膜モデルの面外変位の空間分布特性は確率0.75以上の領域で荷重量に関係なくよく一致している。一方、正方形膜モデルの面外変位の空間分布特性は円形膜モデルのように一致せず荷重ステップごとに若干の違いが観測される。このように面外変位の空間分布の類似度がモデル毎に異なるのは薄膜の座屈モードの違いによるものである。円形膜モデルの座屈モードは1本の皺の繰り返りで構成されている。荷重量が大きくなれば皺の発生本数も増大するが、変形モード自体は1本の皺の繰り返りで構成されることに変わりはない。このような場合、皺領域全体の面外変位の空間分布は1本の皺の面外変位の空間分布で決まり、荷重によって皺の発生本数が変化したとしても面外変位の空間分布は類似となる。一方、正方形膜の引張モデルの場合、座屈モードは中央の1本の皺が支配的となっており、その側方に生じる小さな皺は中央の支配的な皺と比較して振幅が著しく小さい。そのため、変形モードは1本の皺の繰り返りで構成されておらず、結果として面外変位の空間分布特性に類似性が見られない。せん断膜モデルは円形膜モデルのように1本の皺の繰り返りで変形モードは構成されているが、それぞれの皺の振幅は荷重によってばらつきが生じている。これにより、矩形膜のせん断膜モデルは円形膜モデルほど面外変位の空間分布に類似性が観測されない結果となっている。

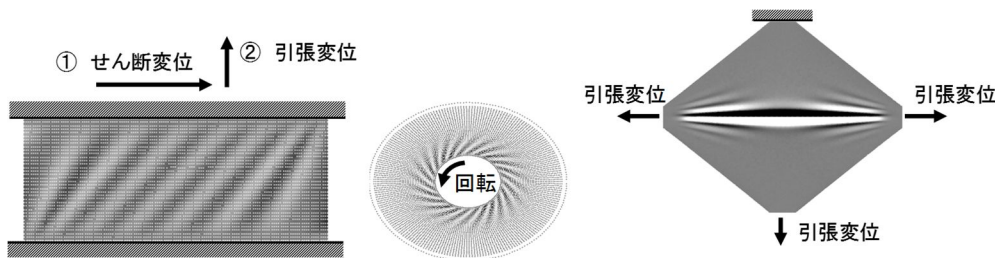


図2 幾何学的非線形有限要素解析の結果

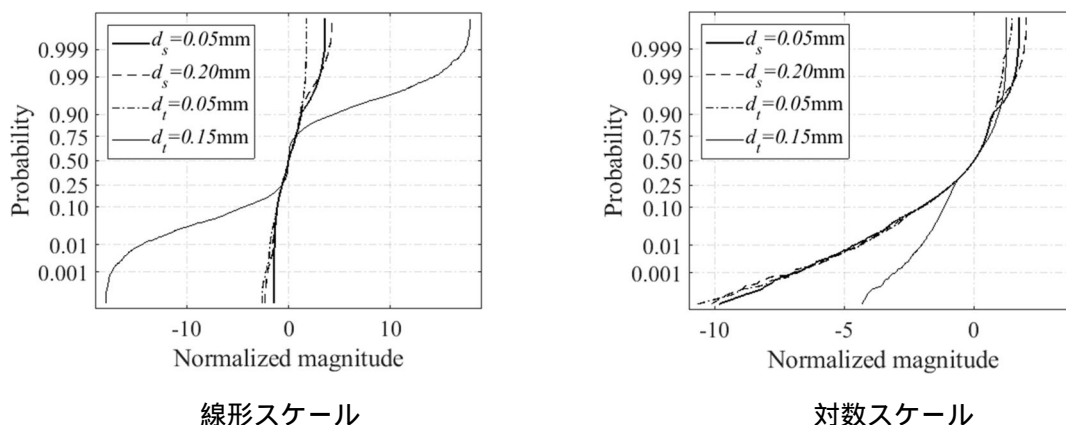


図3 せん断膜モデルの面外変位データの正規確率プロット

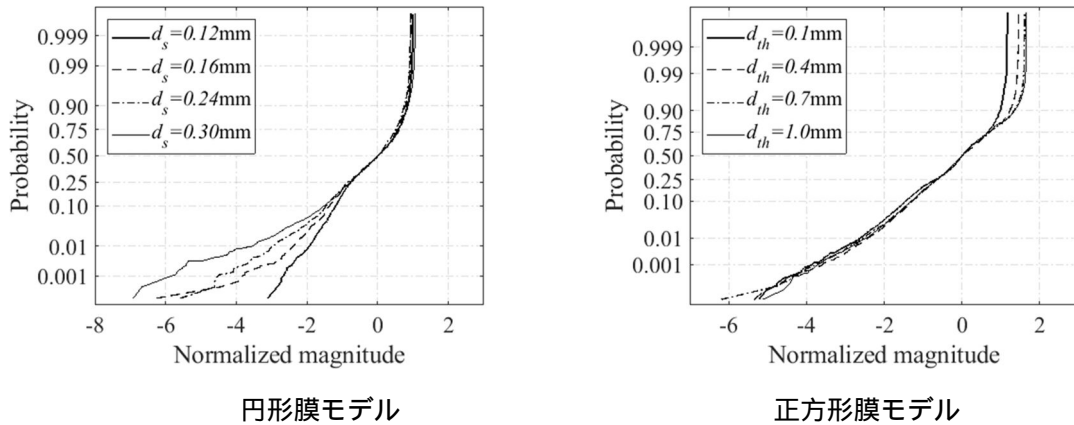


図4 円形膜モデルと正方形膜モデルの面外変位データ（対数スケール）の正規確率プロット

(2) 限られた離散点データによる構造物の座屈後変位応答上限値の簡易計算法

前節の結果より、皺の生じた薄膜の変形モードが基本パターンの繰り返しで構成される場合、変位応答の空間分布は皺の発生本数に関係なく類似性を保つ。これは予め縮尺したモデルで試験を行い図5に示すように面外変位を一定の確率で包絡する値  $r$  を求めておけば、座屈モードを構成する基本パターンが類似であれば寸法が異なるモデルに対してもこの包絡値  $r$  は利用できることを示唆している。すなわち、式(1)における正規化変位  $w_{ij}$  に包絡値  $r$  を代入し元のスケールの面外変位  $w_{ij}$  を求めれば、これが面外変位の95%を包絡する値として求まる。すなわち

$$w_{95\%} = r \cdot \text{NIQR}(w_{ij}) + \tilde{\mu}_j \quad (2)$$

である。この式はパラメータ  $r$  が予め与えられていることから限られた離散点で計測した変位データから中央値と正規化四分位範囲を求めれば面外変位データ全体を一定の確率で包絡する値が計算できることを示している。そこで、矩形膜のせん断モデルを対象に式(2)を用いて限られた離散点データから薄膜の面外変位の上限値が推定し、その有効性を検証した。

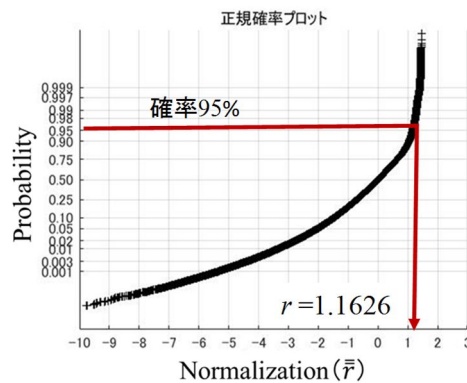


図5 経験的確率分布モデルによる正規化された変位応答上限値の計算法

図6～8に薄膜の皺現象に対する検討結果を示す。図6は矩形膜モデルの上辺にせん断変位0.20mmを与えた際の変形形状と横方向中央断面図を示している。横方向中央断面図に記載されている破線は解析で得られた全節点の変位データからランダムに50のデータを抽出し、中央値と正規化四分位範囲を求め式(2)により求めた95%包絡値である。図より、矩形膜モデルの両端で包絡値を逸脱する面外変位が観測されるが、求めた包絡値は薄膜の皺の上限値を概ね捉えている。図7はせん断変位と引張変位を変化させた場合の薄膜の変形形状を示しており、図8は時々刻々変化する薄膜の変形形状の包絡値である。図8の横軸は強制変位量であり、縦軸は計算した包絡値が実際の薄膜の面外変位の何パーセントを包絡しているかを示す包絡率である。包絡値は95%、85%、75%の3つで計算した。利用したデータ数は50であり、その位置はランダムに選択した。図に示すとおり今回の方法で求めた包絡値は概ね正解値に近く本研究で提案する簡易推定法の妥当性が確認できる。引張変位が大きくなると求めた包絡値の精度が悪くなるが、これは膜面の皺が引張変位によって減少し、引張変位0.16mmを過ぎたあたりから次第に膜面の皺が消失していくためである。



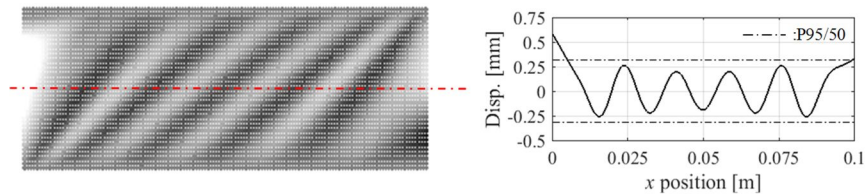


図6 皺の生じた薄膜の面外変位の上限値の推定結果

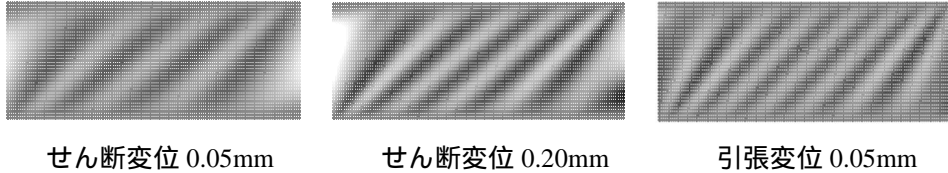


図7 皺の生じた薄膜の面外変位

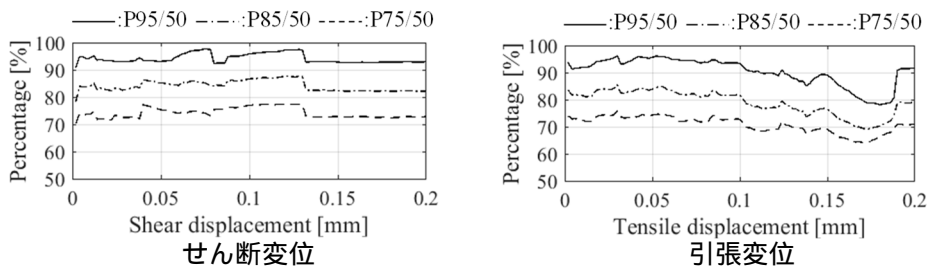


図8 皺の生じた薄膜の面外変位の包絡値の結果

以上、本研究は限られた離散点計測データから座屈後の構造物の最大変位を簡易的に推定する方法論を提案するとともに、その有効性を数値シミュレーションにより示した。現状では座屈モードが基本パターンの繰り返しで構成される場合に対してのみ有効性を確認しているが、今後は提案した推定法をより複雑な座屈モードへ適用できるように修正していく予定である。最後に、薄膜の皺現象を検討している段階で薄膜の皺のスケール則を構築することができた。この結果は研究成果[3]として国際誌へ掲載されている。

研究成果（査読付学術論文）

[1] Iwasa, T., Nishizawa, S., and Sakai, M. "Buckling severity measurement of axially compressed cylindrical structures with periodic buckling pattern," *Engineering Structures* Vol. 213, 2020, p. 110568.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110568>

[2] Iwasa, T., and Nakajima, S. "Applicability of Empirical Tolerance Limit for Wrinkled-Membrane Distortions," *AIAA Journal* Vol. 57, No. 6, 2019, pp. 2562-2574.

doi: 10.2514/1.J057997

[3] Iwasa, T. "Wrinkle-Reduction Law for Rectangular Membranes Under a Shear Load," *AIAA Journal* Vol. 56, No. 7, 2018, pp. 2870-2876.

doi: 10.2514/1.J056870

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Iwasa, S. Nishizawa and M. Sakai	4. 巻 213, 15
2. 論文標題 Buckling severity measurement of axially compressed cylindrical structures with periodic buckling pattern	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 in progress
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110568">https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110568</a>	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 K. Nakamura and T. Iwasa	4. 巻 -
2. 論文標題 Estimation of wrinkle amplitude on square membrane under corner tension loads using tension-field solutions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan	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) なし	査読の有無 無
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 Iwasa, T. and Nakajima, S	4. 巻 (in press)
2. 論文標題 Applicability of Empirical Tolerance Limit for Wrinkled-Membrane Distortions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.2514/1.J057997">https://doi.org/10.2514/1.J057997</a>	査読の有無 無
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 T. Iwasa	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Wrinkle-Reduction Law for Rectangular Membranes Under a Shear Load	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J056870	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Iwasa, T. and Nakajima, S
2. 発表標題 Spatial Distribution Property of Surface Distortion of Square Membrane with Wrinkles subjected to Shear and Tension Loads
3. 学会等名 69th International Astronautical Congress (IAC) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakamura, K. and Iwasa, T.
2. 発表標題 Estimation of maximum wrinkle amplitude on triangular tensioned membrane using in-plane strain fields
3. 学会等名 The 5th Joint Symposium on Materials and Mechanical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桜井秀一朗, 岩佐貴史
2. 発表標題 矩形膜に生じるリンクリング現象の確率モデルの類似性について
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第57期総会・講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩佐貴史
2. 発表標題 張力膜に生じる皺のスケール則
3. 学会等名 日本航空宇宙学会構造強度に関する講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 天本拓哉, 岩佐貴史
2. 発表標題 張力膜の振動モードが従う確率分布モデルに関する実験的検討
3. 学会等名 機械学会中国四国支部第56回総会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西澤周, 岩佐貴史
2. 発表標題 軸圧縮荷重を受ける円筒シェルの座屈後挙動を対象としたスケーラブルな変位予測法の提案
3. 学会等名 日本機械学会宇宙工学部門第28回スペースエンジニアリングコンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩佐貴史, 中嶋慎太郎, 桜井秀一郎
2. 発表標題 限定された離散点計測による皺の生じた膜面の面外変位 の簡易推定法
3. 学会等名 構造強度に関する講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村克哉, 岩佐貴史
2. 発表標題 皺のスケール則の三角形張力膜への応用
3. 学会等名 日本機械学会宇宙工学部門第28回スペースエンジニアリングコンファレンス
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 西澤周, 岩佐貴史
2. 発表標題 円筒シェルの軸圧縮座屈モードの確率モデルについて
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村克哉, 岩佐貴史
2. 発表標題 二次元計測による離散点データを用いた皺振幅簡易推定法の検討
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nakamura and T. Iwasa
2. 発表標題 Estimation of wrinkle amplitude on square membrane under corner tension loads using tension-field solutions
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
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
---------	---------------------------	-----------------------	----