

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：32644

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K18941

研究課題名(和文) Gossamer宇宙構造物を対象とした革新的シミュレーション技術の創出

研究課題名(英文) A novel simulation technique for Gossamer space structures

研究代表者

中篠 恭一 (Nakashino, Kyoichi)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：60408028

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)：柔軟な膜面を主体的に利用した宇宙構造物はGossamer宇宙構造物と呼称され、その研究開発事例は近年特に増加傾向にある。一方、柔軟膜面にはwrinkle(しわ)やcrease(深い折り目)の発生といった特有の力学的応答があり、Gossamer宇宙構造物を対象とした数値構造解析では、これらの現象を忠実に評価できる技術が必要となる。

本研究では、従来の有限要素法に代わる数値構造解析法として近年注目を集めているアイソジオメトリック解析に着目し、Gossamer宇宙構造物への適用を念頭に、柔軟膜面構造に対するアイソジオメトリック解析の解析性能を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Gossamer宇宙構造物に限らず、数値構造解析には従来から有限要素法と呼ばれる手法が用いられており、デファクトスタンダードとなっている。一方、Gossamer宇宙構造物に使用されている柔軟膜面には「しわ」や「深い折り目」の発生といった特有の力学応答があり、有限要素法を用いた場合、解析が困難となることも少なくない。本研究は、有限要素法に代わり近年注目を集めているアイソジオメトリック解析を、柔軟膜面の数値構造解析に適用したものである。本研究を通じて、柔軟膜構造物に対するアイソジオメトリック解析の解析性能が一部明らかとなり、将来の解析技術として有望であることが確認された。

研究成果の概要(英文)：Space structures that utilize large flexible membranes are called Gossamer space structures. In recent years, Gossamer space structures have been intensively studied by research institutions including NASA, JAXA and ESA. Flexible membranes used in Gossamer space structures have unique mechanical responses such as wrinkles and creases, and characteristics of which should be reasonably evaluated in numerical structural analysis.

In place of standard numerical structural method, i.e., finite element method, we applied isogeometric analysis (IGA) to numerical structural analysis of flexible membranes, and evaluated performance of IGA as a tool for numerical simulations for Gossamer space structures.

研究分野：数値構造解析

キーワード：有限要素法 アイソジオメトリック解析 Gossamer宇宙構造物 膜構造物

1. 研究開始当初の背景

柔軟な膜面を主体的に利用した宇宙構造物は Gossamer 宇宙構造物と呼称され、その研究開発事例は近年特に増加傾向にある。例えば、遠心力を利用して大面積の膜面を展開するソーラーセイル実証機の IKAROS、再突入カプセルの周囲に風船形式で膜面を膨張展開して大気圏突入を行う NASA の HIAD などが Gossamer 宇宙構造物に相当し、いずれも将来の宇宙開発に変革をもたらすシステムとして注目されている。

ところで、柔軟膜面には wrinkle(しわ)や crease(深い折り目)の発生といった特有の力学的応答があり、Gossamer 宇宙構造物を対象とした数値構造解析では、これらの現象を忠実に評価できる技術が必要となる。現在、Gossamer 宇宙構造物の構造解析には有限要素法と呼ばれる解析技術が用いられているが、有限要素法を柔軟膜面の構造解析に適用した場合、解析が困難となる場合も少なくない。この問題に関して、本課題研究者は有限要素法の離散化手法に原因の一部があるのではないかと推察した。有限要素法は、対象構造物を有限要素と呼ばれる三角形や四面体の集合体として表現し、外力に対する応答変形を求める手法である。各有限要素の形状は、形状関数によって表現されるが、要素境界での連続性は C^0 連続にとどまり、高次の連続性を達成することができない。一方、上述の wrinkle や crease は膜面の形状連続性と密接に関わる現象である。

近年、有限要素法に代わる新たな構造解析法として、アイソジオメトリック解析(IGA)と呼ばれる解析技法が開発され、研究者の注目を集めている。IGA は、CAD 研究者と計算力学研究者との結びつきによって派生した新たな数値構造解析技術である。有限要素法が対象構造物を有限要素の集合体として表現するのに対し、IGA では構造物の形状を NURBS 関数で表現する。NURBS は CAD 技術で用いられている曲面表現法であり、よって IGA では CAD モデルと数値構造モデルとのシームレス解析が可能となる。シームレス解析は確かに IGA の利点の一つであるが、NURBS を用いる IGA は、実は Gossamer 構造物に代表される柔軟膜面の数値構造解析と高い親和性を持っている。先に有限要素法における連続性の問題に触れたが、NURBS で膜面形状を表現した場合は、膜面形状に高次の連続性を導入することが可能である。加えて、crease のように局所的に高い曲率をもった形状も表現可能であり、よって IGA は wrinkle や crease の発生する柔軟膜面の数値構造解析に極めて適した解析手法であると考えられる。しかしながら、IGA を柔軟膜面の解析に適用した例は少なく、その際の解析性能は明らかとなっていない。

2. 研究の目的

前項の背景を踏まえ、本研究課題では Gossamer 宇宙構造物を対象とした数値構造解析を念頭に置き、従来の有限要素法に代えて、新規構造解析技術である IGA に注目する。前述の通り、IGA は Gossamer 宇宙構造物に利用される薄膜構造の数値構造解析と高い親和性を持っており、Gossamer 構造物のシミュレーションにブレークスルーをもたらす可能性がある。具体的な研究目的は以下の通りであった。

- (a) 膜面に発生する crease 変形は、曲げ剛性を省略した膜モデルでも表現可能であり、実際、膜モデルを用いた有限要素解析でも crease 変形は再現される。そこで、膜モデルに IGA を適用して、crease 変形に対する IGA の解析性能を評価する。なお、膜モデルでは膜面上に発生する wrinkle 形状を再現することが原理上不可能であるため、wrinkle の影響を考慮するために張力場理論を膜モデルに適用して IGA を実施する。IGA では NURBS 曲面によって膜面形状を表現するため、NURBS 次数が 2 次以上の基底関数を用いた場合、特別な場合を除いて C^1 不連続な曲面を表現できない。したがって IGA において crease 変形のような折れ曲がりが発現するかどうかは未知数である。実際の IGA 計算例を通じて、crease 変形が表現可能であるかどうかを調査する。
- (b) wrinkle の形状を評価するためには、曲げ剛性を考慮したシェルモデルを採用する必要がある。そこで IGA における wrinkle 形状の再現性能を評価するため、シェルモデルによる IGA を実施する。なお、IGA に用いられる NURBS 曲面は高次の連続性をもっているため、回転自由度を省略したシェルモデルを採用することができる。そこで本研究では、Kirchhoff-Love 型のシェルモデルを IGA 計算コードに実装して wrinkle 解析を実施し、IGA の wrinkle 解析性能を評価する。

3. 研究の方法

前項の目的を達成するため、IGA の計算コードを独自開発した。また、開発したコードに張力場理論に基づく膜モデル、ならびに Kirchhoff-Love 型のシェルモデルを実装して、crease 解析ならびに wrinkle 解析を実施した。なお、前者の張力場膜モデルでは、膜面に張力が導入されていない場合、剛性マトリクスが特異となり、Newton-Raphson 法による非線形方程式の求解が実行できない。そこで、膜構造物やケーブル構造物の解析で利用されている Dynamic-Relaxation 法を導入して剛性マトリクスの特異性の問題を回避した。Dynamic-Relaxation には

種々のアルゴリズムが存在するが、本研究では速度比例型の減衰は導入せず、代わりに運動エネルギーが極値をとるタイミングで速度成分を強制的に零とする、Kinetic damping と呼ばれる手法を採用した。

4. 研究成果

(a) IGA における張力場膜要素の検証

IGA による薄膜構造の解析に関しては過去に研究例があるが、張力場理論を導入した解析については僅か 1 件の研究報告があるのみで、IGA における張力場膜要素の妥当性も十分には検証されていない。そこで、crease 解析を実施する前に、簡単な 2 次元モデルで張力場膜要素の妥当性を検証した。具体的な問題設定としては、図 1 に示すようなリング状の膜面を考慮して膜面に σ_0 の初期張力を与える。次に中央にある半径 a のハブにモーメントを加えると、膜面にはハブ外周を起点として wrinkle が発生する。この問題には理論解が与えられており、理論解と IGA の数値解とを比較することで張力場膜要素の妥当性を検証できる。図 2 が両者の比較であり、数値解と理論解とが良好に一致していることが分かる。

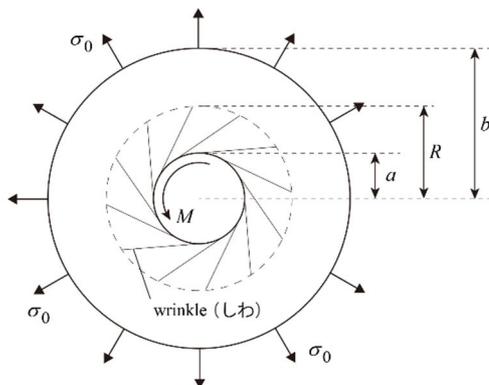


図 1 張力場膜要素の検証モデル

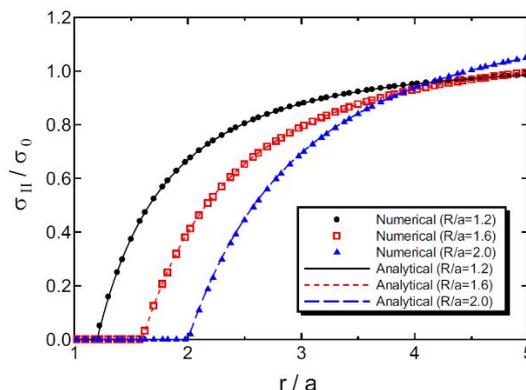


図 2 理論解と解析解の比較 (最小主応力)

(b) Dynamic-Relaxation 法と Newton-Raphson 法の組合せによる膜構造物の解析

前項を踏まえ、3次元形状の膜構造物を対象として IGA による非線形構造解析を実施した。3次元膜構造物の解析では、前述した剛性マトリクスの特異性の問題が発生する。そこで、Dynamic-Relaxation 法を IGA 計算コードに実装して構造解析を行った。ただし、Dynamic-Relaxation 法のみで求解プロセスを遂行すると残差の収束までに多くの計算ステップが必要となる。そこで残差が閾値を下回ったら求解アルゴリズムを Newton-Raphson 法に切り替えて解析を行う手法を新たに開発した。本手法の有効性は実際の解析例で確認している。

(c) Shadow control-point 法による境界条件の導入

柔軟膜面の IGA を実施している中で、境界条件の導入法に関して有限要素法にはない注意点が必要であることが判明した。対称性のある構造物を解析する場合、対称性を利用して構造物の一部のみをモデル化して解析することが可能であるが、その際、有限要素法の場合は対称面上の節点にのみ適用な境界条件を与えればよい。これに対し、IGA の場合は対称面上の制御点に境界条件を与えるだけでは不十分であり、対称面近傍の制御点にも拘束条件を加える必要がある。この問題に関連して、Kiendl 等は second-row strategy と呼ばれる方法を提案したが、高次の NURBS モデルに対しては十分な境界条件となっていない。そこで NURBS 曲面の連続性も含め完全な対称境界条件が導入できるよう、新たな手法を開発した (Shadow control-point 法と命名した)。図 3 は、Shadow control-point 法概念を示したものである。対称境界面の近傍に NURBS 次数に応じた影の制御点 (Shadow control-point) を用意し、これらの制御点とモデル内部の制御点との間に追加の拘束条件を加えることで NURBS 曲面の連続性も含めた完全な対称境界条件を導入することが可能となる。

(d) crease の発生する膜構造物の解析

crease の発生する膜構造物の例として、方形エアバッグの解析を IGA で実施した。本解析には項目(a)の張力場膜要素を用い、また求解プロセスには項目(b)で述べた手法を採用した。さらに項目(c)で述べた Shadow control-point 法を利用して対称境界条件を導入している。解析結果の例を図 4.5 に示す。本解析では 4 次の NURBS 基底関数を使用しているが、図 4 に示すように変形後の膜面には crease 状の変形が発現しており、高次の NURBS 関数を採用した場合でも crease のように C^1 不連続に近い変形形状が再現可能であることが確認できた。

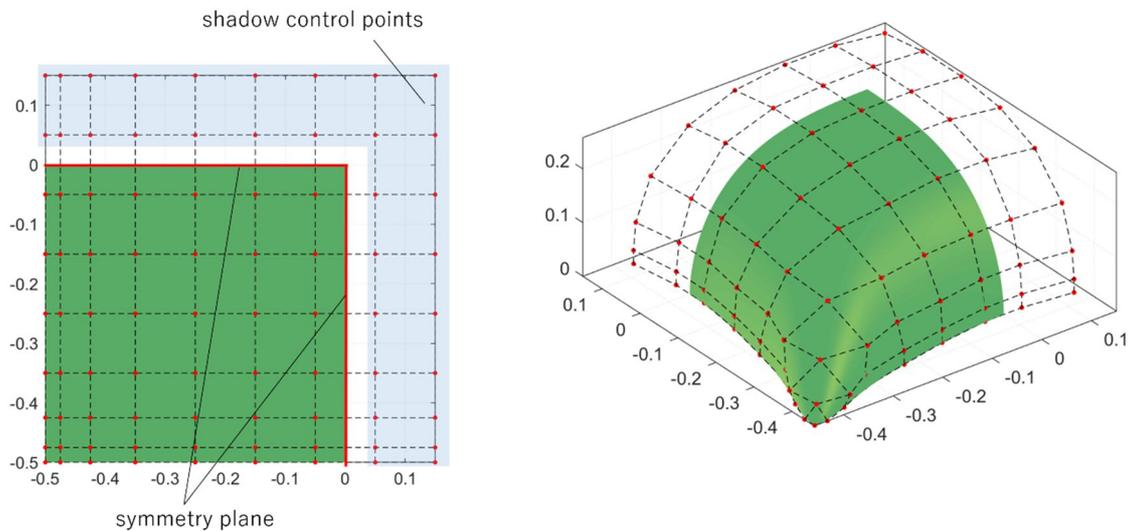


図 3 Shadow control-point 法の概念図（左）と解析例（右）

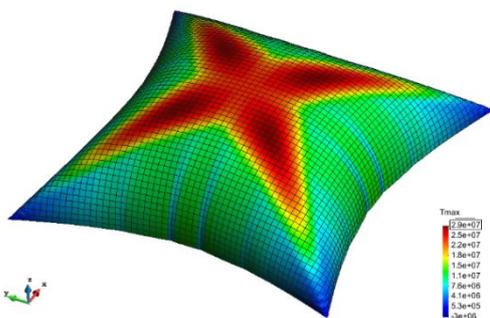


図 4 方形エアバッグの解析（最大主応力）

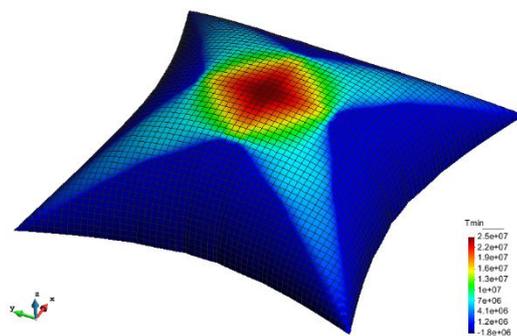


図 5 方形エアバッグの解析（最小主応力）

(e) Mooney-Rivlin 体膜構造物の解析

前項に示した解析例では、膜面の構成則として線形構成則を採用している。一方で、ゴム弾性のモデル化に採用される Mooney-Rivlin 則を導入した場合の解析も興味のある研究項目である。当初予定には含まれていなかった項目であるが、開発した IGA 計算コードに Mooney-Rivlin 則を導入して IGA を実施した。また、Mooney-Rivlin 膜モデルに対しても張力場理論を導入して wrinkle の影響を考慮できる計算コードを開発した。解析の結果、線形構成則モデルに比べて、収束性はやや劣るものの、IGA により Mooney-Rivlin 膜構造物の変形解析が実施できることを確認した。

(f) Kirchhoff-Love 型のシェルモデルによる wrinkle 解析

開発した IGA 計算コードに Kirchhoff-Love 型のシェルモデルを実装して wrinkle 解析を実施した。解析の結果、有限要素解析と同様に IGA でも wrinkle 状変形が再現できることを確認した。ただし、IGA による wrinkle 解析性能を定量評価するうえでは課題が残った。本項目に関しては、NURBS 次数やメッシュの粗密を変更した更なる解析が必要であり、本研究課題終了後も調査を継続する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakashino Kyoichi, Nordmark Arne, Eriksson Anders	4. 巻 239
2. 論文標題 Geometrically nonlinear isogeometric analysis of a partly wrinkled membrane structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Structures	6. 最初と最後の頁 106302 ~ 106302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compstruc.2020.106302	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0件

〔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		
スウェーデン	KTH Royal Institute of Technology		