

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04924

研究課題名（和文）膜面-ケーブル複合構造物を対象としたIGA/FEMハイブリッド解析法の開発

研究課題名（英文）Hybrid IGA-FEA for cable-membrane 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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：従来、数値構造シミュレーションには有限要素法と呼ばれる手法が用いられてきた。これに対し、3D CAD等に採用されている曲面表現技術であるNUBRSを用いた数値構造シミュレーションが米国のHughes等によって提案された。新たな構造解析手法はIsogeometric解析と呼ばれ、有限要素法に対する優位性が次第に明らかとなってきた。本研究ではケーブル-膜面複合構造物に関して、有限要素法とIsogeometric解析を組み合わせた新たな解析手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来の数値構造シミュレーション技術である有限要素法と、新たな構造解析手法であるIsogeometric解析を組み合わせた新たな構造解析技術を提案した。また、ケーブルと膜面の複合構造物である新型の成層圏気球に関する研究を行い、気球の膨張形状を予測できる理論解を導出し、さらに気球に被せる網の幾何パラメータを最適化することで、気球重量を一定に保ったまま、気球容積を3倍程度にまで増加できることが可能であることを見いだした。本研究で得られた成果を用いると、成層圏気球の気球性能を大幅に向上させることが可能である。

研究成果の概要（英文）：Numerical simulations of structures have been mostly carried out with the use of the finite element method. Recently, this de facto standard technique has been being replaced by isogeometric analysis proposed by Hughes et al. in the United States. The present study proposed a hybrid IGA-FEA simulation for cable-membrane structures.

研究分野：数値構造解析

キーワード：Isogeometric解析 Gossamer宇宙構造物 ケーブル-膜面複合構造物 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

(1) CAD ソフトウェア等で用いられる曲面表現技術である NURBS 曲面を数値構造解析に取り入れた Isogeometric 解析 (IGA) が、米国の Hughes 等によって 2005 年に提案された (引用文献)。提案当初は大きな注目を集めていなかった印象のある IGA であるが、その後、数値構造解析のデファクトスタンダードである有限要素解析 (FEA) に対する優位性が明らかとなり、2010 年代以降は欧米の研究者等を中心に IGA がさかんに研究されるようになった。計算力学界における IGA の注目度は、上記オリジナル論文の被引用文献数 (Scopus 記録において現在 4881 件) に如実に表れている。

(2) IGA では解析対象の構造物を NURBS 関数で表現するが、その帰結として曲面上の任意点がグローバル座標と一対一対応する。これは従来の構造解析手法である FEA にはない大きな特徴であるが、この点に注目した研究は存外に少ない。本研究課題は、IGA のこの特徴に注目し、IGA と FEA を組み合わせたハイブリッド解析手法を新たに提案し、さらには従来の FEA では解析困難であったケーブル-膜面複合構造物の接触問題に関する効率的な解析手法の確立を目指すものである。

(3) ケーブル-膜面複合構造物は、地上構造物のほか、超軽量宇宙構造物であるゴッサマー宇宙構造物、あるいは密閉型の成層圏気球であるスーパープレッシャー気球等にみられる構造形態であるが、このような構造物ではケーブルが膜面上を自由に滑動する 경우가少なくない。ケーブルの滑動を数値解析で表現する場合、通常はなんらかの接触アルゴリズムを用いたモデル化が基本となるが、膜面の大変形を許容し、なおかつ膜面とケーブルの接触部が多岐にわたる場合は、安定した計算を実行することが困難となる。その一方で、滑りケーブル問題を正面から扱った研究は非常に少ない。膜面境界に配置されたケーブルの滑り問題を対象とした研究例として Pauletti (2009)、Pargana (2014)、Dinh (2016)、Coulibaly (2018) が、膜面上を自由に滑動するケーブルを対象とした研究例として、境 (1995)、鐘 (1999)、Noguchi (2004) が挙げられるが、未だに標準的手法は確立されていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究課題では、IGA で採用されている NURBS 曲面において、曲面上の任意点がグローバル座標 (これを (ξ, η) で表すことにする) と一対一対応しているという点に注目する。さらに膜面上を滑動するケーブルを IGA ではなく有限要素モデルで定式化する。その上で、ケーブルの有限要素モデル節点を IGA のグローバル座標である (ξ, η) 座標を用いて表現する。このアイデアに基づくと、ケーブル節点を常に膜面上に配置することが可能となり、その結果として接触アルゴリズムを用いることなく、膜面上を滑動するケーブルをモデル化することができる。ここで提案する手法を用いると、膜面に大変形が発生し、なおかつ膜面とケーブルの接触部が多岐にわたる場合であったとしても、安定した数値構造解析が可能となる。以上の手法に基づいて、膜面-ケーブル複合構造物に関する接線剛性マトリクスを導出することが本研究課題の一つの目的である。

(2) (1) の接線剛性マトリクスを導出した後、申請者が開発済みの IGA コードに膜面-ケーブル複合構造物の解析を可能とする計算ルーチンを実装する。

(3) 開発した計算コードを用いて、膜面-ケーブル複合構造物の数値構造解析を実施する。解析対象の構造物として、菱目の網を被せたスーパープレッシャー気球を取りあげ、その構造特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 本研究における基本アイデアを図 1 に示す。NURBS 曲面のパラメータ空間は図中央に示すような (ξ, η) 空間における矩形領域となり、 (ξ, η) はグローバル座標となる。この矩形領域を 3 次元空間に写像すると、図左のような膜面形状や、図右のような膜面形状を表現することができる。本研究では、膜面上を滑動するケーブルを有限要素でモデル化して、ケーブル有限要素モデルの節点を NURBS パラメータ空間の (ξ, η) 座標と対応付け、膜面を 3 次元空間に写像させるのと同様にケーブル節点も 3 次元空間に写像させる。この手法を用いると、ケーブル節点は常に膜面上を滑動することになり、接触アルゴリズムを用いることなく、膜面とケーブルの接触問題を効率的かつ数値的にも安定したかたちで扱うことが可能となる。以上の定式化に基づくと、膜面を IGA で、ケーブルを FEA で定式化したハイブリッド解析に対応する接線剛性マトリクスを導出することが可能である。

(2) 上記の接線剛性マトリクスを申請者が開発済みの IGA 計算コードに実装し、その解析性能を評価する。

(3) 開発した計算コードを用いて、菱目の網を被せたスーパープレッシャー気球を対象とした数値構造解析を実行し、同気球の構造特性を明らかにする。

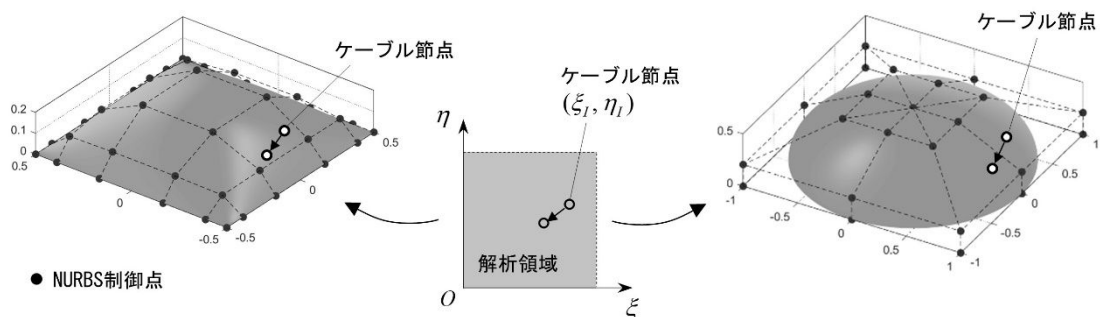


図 1. IGA におけるパラメータ空間と写像後の膜面基本形状

4. 研究成果

(1) IGA/FEA ハイブリッド法における定式化は完了し、膜面-ケーブル複合構造物に対応する接線剛性マトリクスを陽形式で導出した。ただし、既存の IGA コードへ実装するには至らなかった。IGA コードへの実装ならびに IGA/FEA ハイブリッドコードを用いた数値構造解析に関する研究は今後も継続して行う。

(2) 上記の通り、所期の研究計画は完了しなかったものの、当初予定にはなかった研究成果として、菱目の網を被せたスーパープレッシャー気球の膨張時形状を予測できる理論解を導出することに成功した。理論解は変分法に基づいて導かれたものであり、この理論解に基づき、気球膨張形状を算出できる解析コードを開発した。この理論解から、気球膨張形状は気球に被せる網の幾何パラメータに大きく依存し、気球形状は扁平形状から円筒形状に近い形状にまで大きく変化することが明らかになった。

(3) 菱目の網を被せたスーパープレッシャー気球に関する上記の構造特性を実験的に確認するため、小型の試験気球を製作して、地上膨張試験を実施し、気球膨張形状の高精度 3 次元計測を行った。試験時の小型気球外観および 3 次元計測時の気球を図 2 に示した。3 次元計測結果は STL ファイル形式で取得しており、今後データ解析を行って 3 次元形状の定量データを整理する予定である。3 次元計測の他、膨張時の気球全体寸法を計測済みであり、全体寸法の計測結果から、気球が概ね理論解の予測通りに膨張したことを確認した。

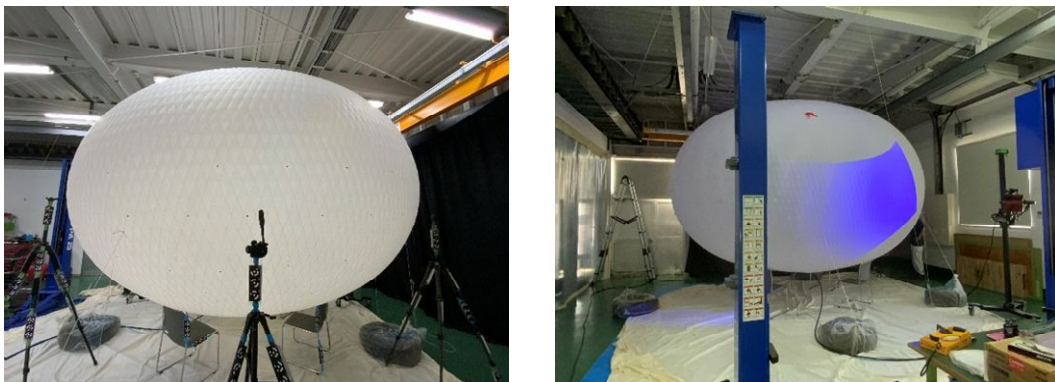


図 2. 製作した小型試験気球を用いた地上膨張試験（左：気球外観，右：3次元計測）

(4) 成果(2)で導出した理論解に関する考察から、菱目網の幾何パラメータを最適化することによって、気球重量を一定に保ったまま、気球容積を 3 倍程度にまで増加させることが可能なことを見いだした。菱目網の幾何パラメータを最適化すると、膨張時の網線張力は増加するものの、十分な安全率を確保したうえでの設計が可能であり、この方法に基づくと気球性能を飛躍的に向上させることができる。菱目の網を被せたスーパープレッシャー気球の研究開発は、本研究課題の共同研究者とともに別途遂行中である。現在、NASA の Balloon Program Office では、lobed-pumpkin 型とよばれるスーパープレッシャー気球の開発が進められているが、本研究で見いだした構造最適化されたスーパープレッシャー気球は、NASA 開発中のスーパープレッシャー気球の気球性能を凌駕する気球となりうる。構造最適化の効果は気球サイズによらず、ほぼ一定であり、容積 7,000m³ を越える大型のスーパープレッシャー気球であっても、前述のとおり、重量を一定に保ったまま、従来設計の気球に比べて容積を 3 倍程度まで増加させることが可能である。

< 引用文献 >

T.J.R. Hughes, J.A. Cottrell, Y. Bazilevs, "Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 194, No. 39-41, pp. 4135-4195, 2005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 Nakashino Kyoichi, Saito Yoshitaka, Akita Daisuke, Matsuo Takuma	4. 巻 71
2. 論文標題 Analytical study on the inflated shape of a super pressure balloon covered with a diamond-shaped net	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 705 ~ 719
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.asr.2022.08.074	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 Kyoichi Nakashino; Yoshitaka Saito; Daisuke Akita; Takuma Matsuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Optimal Configuration of Super-Pressure Balloon Covered by a Diamond-Shaped Net	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 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 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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kyoichi Nakashino, Yoshitaka Saito, Daisuke Akita, Takuma Matsuo
2. 発表標題 Optimum Configuration of Super-Pressure Balloon Covered by a Diamond-Shaped Net
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	齋藤 芳隆 (Saito Yoshitaka) (50300702)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授 (82645)	

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