

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：24403
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2012～2014
課題番号：24560977
研究課題名(和文) 膜材料で作られた気体展開はりの曲げ特性に関する研究

研究課題名(英文) Bending Property of Gas Inflatable Beam

研究代表者
石田 良平 (Ishida, Ryohei)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30145817
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、三次元画像計測ソフトウェアの導入により、ステレオ画像から計測点の変形状態を定量的に把握した。特に、インフレータブルはりに生ずるしわの実測と有限要素法による定式化と予測等を主目的とし、その目的はほぼ達成された。その他、関連するインフレータブル構造の変形後の形状計測に対しても三次元画像計測ソフトウェアの有効性を確認することができた。

研究成果の概要(英文)：In the research, the deformation of a structure was measured quantitatively from stereo photo image by introduction of three-dimensional photogrammetric measurement software. Especially, our main purpose are the measurement of the inflatable beam with internal pressure and tip loading, and its prediction by the Finite Element Method. Formulation of the Finite Element Method was performed newly. These goals were achieved mostly. The validity of the three-dimensional image measurement software was also confirmed in deformation measurement of other related inflatable structures.

研究分野：膜構造工学

キーワード：膜構造 ガスインフレータブルはり 有限要素法 三次元写真応用計測

1.研究開始当初の背景

(1) 内部に気体圧力を加えて展開してその形状を維持する膜材料で作られたガスインフレーターはり構造に関する研究としては、Main[1]の研究が有名である。これらの研究では、ガスインフレーター片持ちはりの先端に荷重を加えてその荷重を増加させたときの荷重-たわみ曲線を理論的に明らかにしている。

(2) Mainの理論では、仮定としてはりの材料である膜材料が圧縮応力に抵抗できないとしている。また、張力場理論[2]に基づく有限要素法による解析結果もMainの理論とよく合っている。しかし、本研究の予備的研究として実施した研究[3]では、「圧縮応力に抵抗できない」という仮定が成立しない場合があることが明らかになった。このような、仮定が成立しない場合は気体圧力が低い場合に見られる現象であることもその後の研究で明らかになってきたが、宇宙空間での利用においては高い気体圧力より低圧での利用が現実的であり、本研究は重要である。

2.研究の目的

内部に気体圧力を加えて展開しその形状を維持する膜材料で作られたガスインフレーターはり構造の曲げ特性が、従来から言われている特性とは異なることが本研究の予備的な研究によって明らかになった。具体的には、片持ちインフレーターはりにおいて、荷重-たわみ曲線が従来の理論解で予測される曲線と大きくずれることが明らかになった。本研究では、この理論解との差を合理的に説明するための新しい理論を構築し、ガスインフレーターはり構造の設計に役立てることを目的とする。

3.研究の方法

(1) Kuraves-MDシステムの導入 膜の変形状態を計測するために、計測系として三次元写真応用計測システムであるKURABO製Kuraves-MDを導入した。このシステムはカメラによって撮影されたステレオ画像を元にした三次元計測システムである。これにより、研究室で行われてきたレーザー変位計による形状計測における問題

点のうち、レーザー光の散乱によってデータが取れなくなる問題点が解消された。ただ、当初研究室所有のカメラ一台での実施であったため、ステレオ画像取得のためにカメラの位置移動が必要であった。この撮影時のカメラ移動のための時間中に発生する圧力変動によってデータのずれが発生した。この点は、もう一台同型のカメラの追加による同時ステレオ計測が可能になったことで解消することができた。また、二台のカメラ位置が固定されるので、種々の圧力条件下での変形状態の比較が可能になった。

(2) 力学モデルにおいてはインフレーターはり構造を耐圧縮応力特性を組み込んだ張力場理論を用いてモデル化して有限要素法の定式化を行う。また、シェル理論を用いた有限要素法による定式化を行い、実験結果と比較する。全般を通して実験結果と比較してモデルの検討・修正を行う。

4.研究成果

(1) 円形膜構造の変形計測

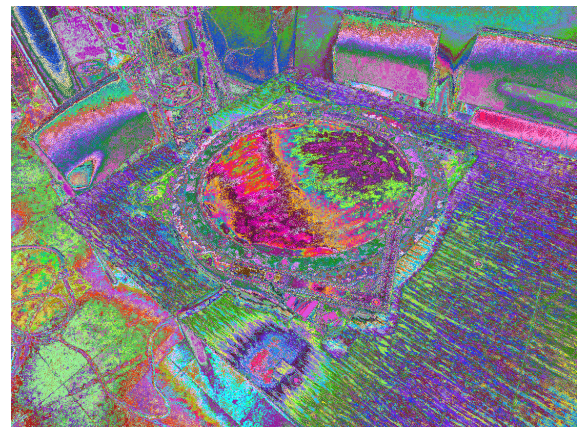


図1 円形膜構造の実験

図1のような円形膜構造の変形計測を行った。面外変位(たわみ)の三次元表示を図2に示す。また、図3に計測結果を示す。これらの図から、良好な計測状態が得られていることがわかるが、この時点では一台のカメラをアングルを変えての計測であったことから、一部計測結果に乱れも見られる。これは、カメラの移動時間内に圧力変動が発生していることが原因と考えられる。

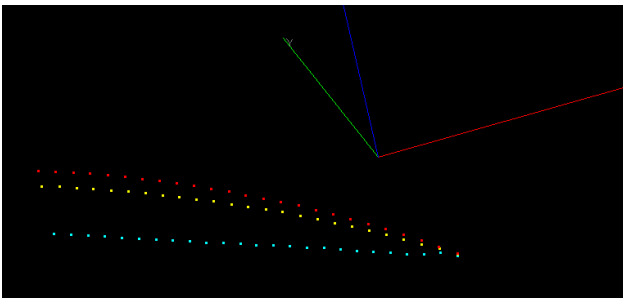


図2 変位の三次元表示

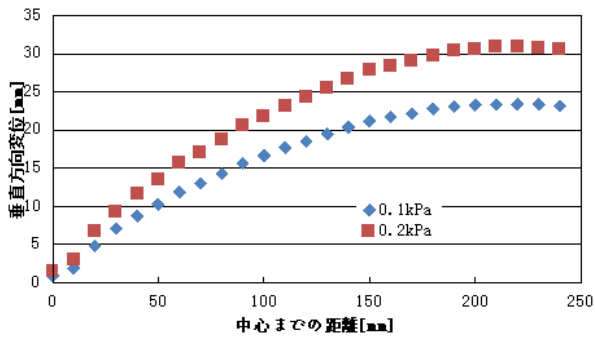


図3 計測結果

(2) インフレーターはりを縦通材に持つ主翼構造の変形解析

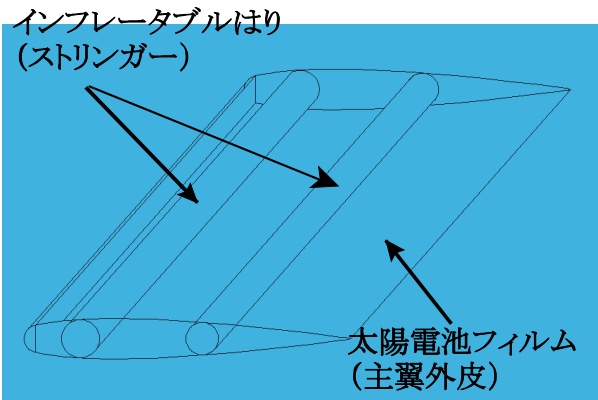


図4 インフレーターはりを縦通材に持つ主翼構造

インフレーターはりを縦通材に持つ主翼構造の概念図を図4に示す。この構造では、インフレーターはりが主翼のストリंगाーの役割を果たしている。ここでは、主翼を方持ちはり状に固定して自由端に静荷重を加えて主翼面の変形状態の計測を行った。

図5に計測例を示す。無負荷時(黄色)から負荷を増すと赤で表示されるたわみ状態に至るが、さらに負荷を

増やすと水色で表示されるような大きなたわみ状態が得られる。水色で表示される状態は、キャンバーの付いた主翼面が大きな荷重で座屈する様子を表している。

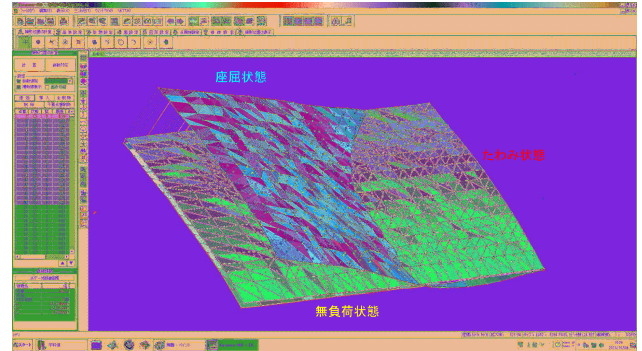


図5 変形状態の表示(成功例)

(3) ケーブル-膜複合構造

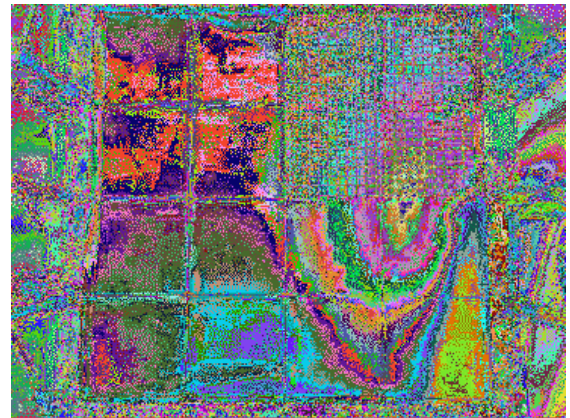


図6 ケーブル-膜複合構造

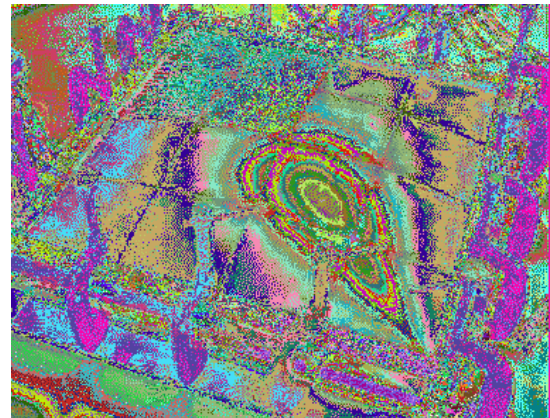


図7 変形状態

図6に示すケーブル-膜複合構造の変形状態の計測を行った。黒く見える部分はネオプレンゴム膜で、縦横に走る赤い線はケーブルである。変形の対称性から全体の1/8部分についてのみ計測を行う。計測点は、これまででは点を打っていたのに対して、今回は縦横の線の交点としている。計測点のための縦横の線は図6右上に示している。

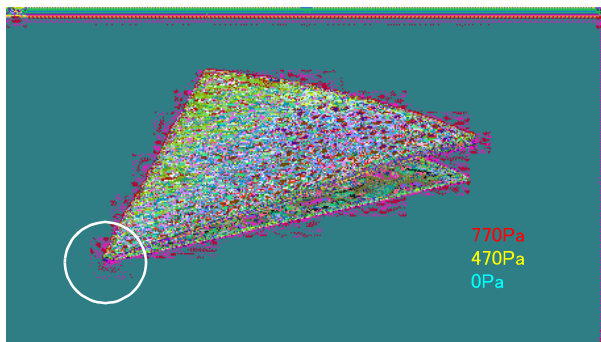


図8 変形の計測結果

図7に変形状態を示し、図8に計測結果を示す。図8で、白い丸で囲んだ部分は図6のコーナー部である。この図から、膜面に作用する圧力が高くなると、コーナー部ではたわみが減少する傾向が見られることがわかる。これは、圧力が高くなるとコーナー部で圧縮応力が発生するためである。より正確には、膜は圧縮応力が発生すると変形抵抗が極端に低下して膜に生ずる応力はゼロに近くなり、たるみやしわが発生することによる。

有限要素法による解析結果を図9に示す。解析は1/4部分としており、黄色の線はケーブルを表している。図9は膜面内の第二主応力の応力コンターである。図で左下隅がコーナー部である。

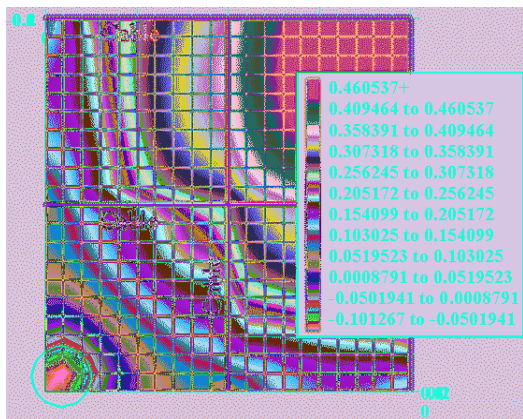


図9 複合構造の第二主応力

これらの図から、第二主応力は左下隅に応力が負になっている(丸で表示。図8の白丸部分に対応)部分が見られる。つまり、第二主応力方向には膜の特性から変形抵抗を持たない。この解析結果は図8のたわみの計測結果とよく符合している。なお、膜材料は圧縮応力を負担できず、力の再配分が起こるが、この解析では力の再配分を考慮していないことを注意しておく。また、本計測からカメラを二台にしている。

(4) インフレータブルビーム

本研究以前では、インフレータブルビームの材料にアルミ蒸着したエバール膜を用いていたが、本研究ではネオプレンゴム膜を採用した。ネオプレン膜採用のもっとも大きな理由は、エバール膜では発生するしわのピッチが小さく、その特性をKuravesで計測して定量化することが極めて困難であることによる。一方、ネオプレンゴム膜の厚さが0.5mmであり、密度も高いため、作成したはりの自重を無視できない問題点もあった。



図10 インフレータブルビーム

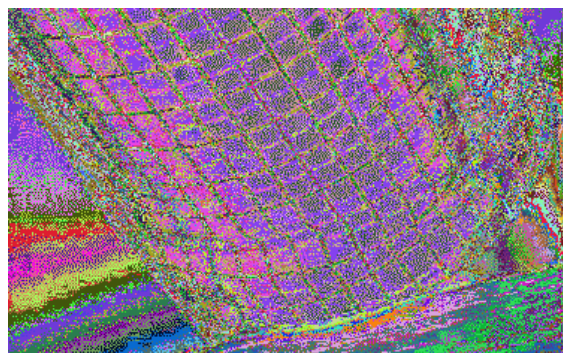


図11 しわの状態と計測点

図10に実験装置を示す。はりの自由端に負荷をかけていない状態でも自重の影響によってわずかにたわみが生じていることがわかる。図11に先端に負荷をかけた状態で生じているしわの状態を示す。

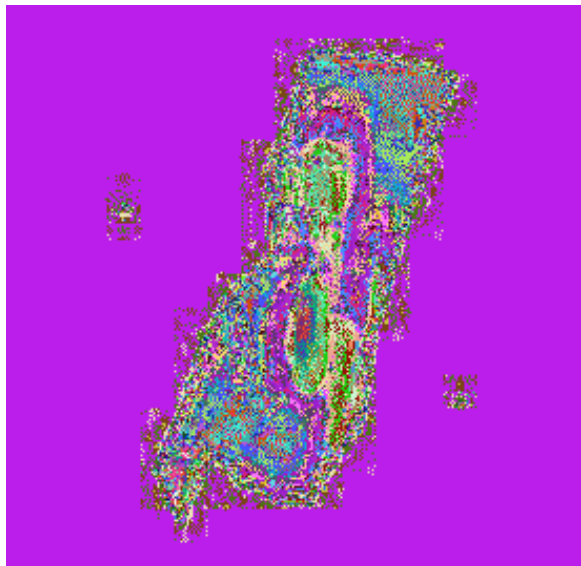


図12 Kuravesで処理したしわの状態2

図12はKuravesで処理したしわの状態である。しわの状態はほぼ再現できているようであるが、画像に写らない計測点の処理に難を残す。

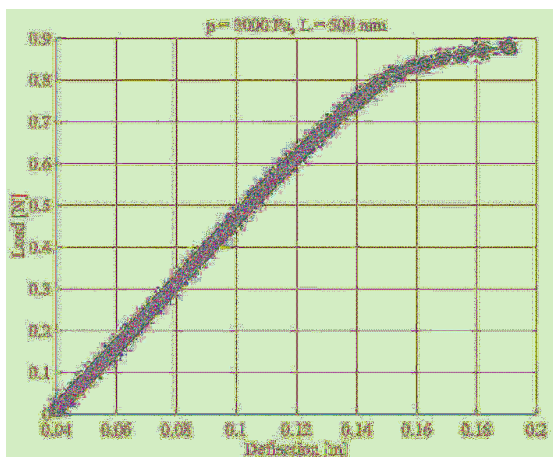


図13 荷重-先端たわみ関係

図13に、実験条件(内圧:3000 Pa, 長さ:500 mm)と同じ条件下での計算結果を示す。この解析では、自重も考慮している。この図から、荷重負荷後荷重と先端たわみとの関係は線形的であるが、線形性が崩れると急激にたわみが増加し始めることがわかる。ただし、実験時の最大荷重は0.93 Nであったが、計算では0.88 N以降

は計算不能になった。

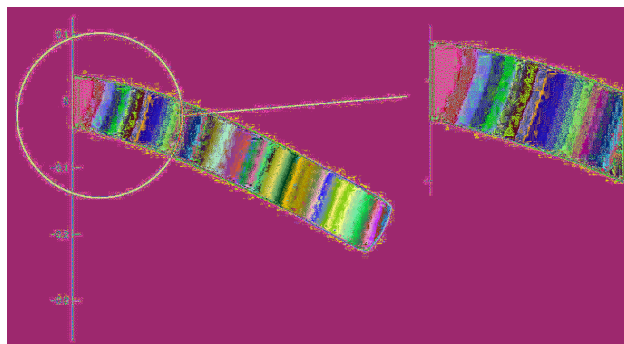


図14 変形状態

図14に、計算された変形状態を示す。固定端(左端)近傍において凹状態が現れている。この部分ではしわの発生により剛性が低下しているものと考えられる。実験結果と比較してしわの発生位置などはほぼ符合している。ただ、ゴムという素材であることと、厚みが0.5 mmであることで、強い非線形性と曲げ剛性の存在が影響していることでしわの状態を完全に予測し切れていないことがわかるが、荷重限界はほぼ予測されているので今回開発した有限要素法計算コードはほぼ完成していると考えられる。

(5) 折り紙工学に基づく三次元立体構造

折り紙工学に基づいてつくられた実際の折り紙構造の三次元計測を試みた。このような実構造の計測は今回が初めてであると思われる。

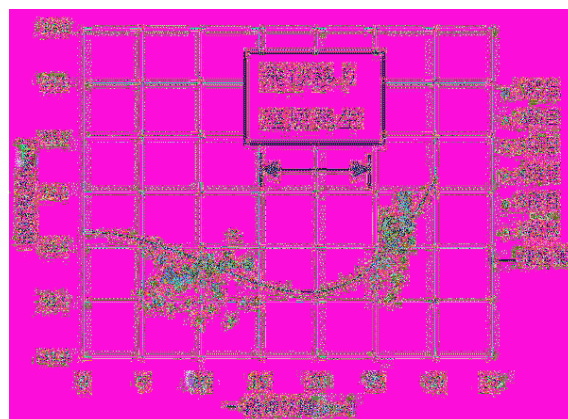


図15 計測結果の一例

ミウラ折りのような完全な剛体折りで作成される構造は珍しく、一般には折りたたんだ状態で構造を形成する面に力が発生していなくても展開途中で力が発生して次

の準安定な状態に移るには面が座屈を経験することになる。ここでは、このような現象を実際に計測によって確認する。このような座屈を、ここでは、飛び移り座屈と表現する。詳細は省略するが、実測例を図15に示す。飛び移り座屈が確認されている。

引用文献

[1]Main,J.,Peterson,S., Strauss,A., Load-deflection behavior of space-based inflatable fabric beam, J.Aerosp.Engng.,7(2), (1994), pp.225-238

[2]Akita T,et.al, A simple computer implementation of membrane wrinkle behaviour via a projection technique, Int.J.Num. Meth. Eng. 71(10), (2007), pp.1231-1259

[3]菅沼・秋田・石田, インフレーターブルビームの曲げ特性について, 日本機械学会論文集A編, 75(751), (2009), pp.388-393

5.主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

①秋田 剛, 石田 良平, インフレーターブルビームのしわ発生後の応力場に関する一考察, 膜構造研究論文集, 査読有, 26巻, 2013, 37-41

[学会発表](計7件)

①勝木 博信, 橋爪 啓輔, 石田 良平, 秋田 剛, 画像計測を用いた気体展開膜の形状計測, 日本機械学会第21回スペースエンジニアリングカンファレンス, 2013.01.25, 「国営飛鳥歴史公園内 祝戸荘(奈良県高市郡明日香村祝戸303)」

②秋田 剛, 石田 良平, 張力場解析と座屈解析によるインフレーターブルビームのしわ発生後の応力場の比較, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013.09.11, 「岡山大学 津島キャンパス(岡山県岡山市北区津島中一丁目1-1)」

③石田 良平, 橋爪 啓輔, 藤田 佑樹, 秋田 剛, 勝木 博信, インフレーターブルはりを用いた主翼構造の変形計測, 日本航空宇宙学会第57回宇宙科学技術連合講演会, 2013.10.11「米子コンベンションセンター BiG SHiP(鳥取県米子市末広町294)」

④石田 良平, 橋爪 啓輔, 藤田 佑樹, 画像を用いた

三次元変形計測, 日本機械学会第89回定時総会講演会, 2014.03.18「大阪府立大学 中百舌鳥キャンパス(大阪府堺市中区学園町1-1)」

⑤石田 良平, 秋田 剛, 気体内圧を受けるインフレーターブル膜構造の三次元形状計測, 日本機械学会第23回スペースエンジニアリングカンファレンス, 2014.12.19「宇宙科学博物館「コスモイル羽咋」(石川県羽咋市鶴多町免田25)」

⑥見戸 清訓, 石田 良平, 秋田 剛, インフレーターブル膜構造の三次元形状測定, 第51回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋季大会, 2014.11.21「名城大学 天白キャンパスタワー75(名古屋市天白区塩釜口1-501)」

⑦深見 祐士, 石田 良平, 秋田 剛, 折り紙工学に基づく三次元立体構造の実形状計測, 第51回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋季大会, 2014.11.21「名城大学 天白キャンパスタワー75(名古屋市天白区塩釜口1-501)」

6.研究組織

(1)研究代表者

石田 良平(ISHIDA, Ryohei)

大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30145817

(2)研究分担者

秋田 剛(AKITA, Takeshi)

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 20405343

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

勝木 博信(KATSUKI, Hironobu)

橋爪 啓輔(HASHIDUME, Keisuke)

藤田 佑樹(FUJITA, Yuhki)

深見 祐士(FUKAMI, Yuhji)

見戸 清訓(MITO, Kiyonori)