

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630393

研究課題名(和文) 翅・葉の脈網構造の模倣による宇宙用インフレータブル構造の性能向上

研究課題名(英文) Performance Improvement of Space Inflatable Structures by Imitating Inset-Wing/Leaf Veins Structures

研究代表者

小島 広久 (Kojima, Hirohisa)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：50322350

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：インフレータブル構造物の展開確実性，剛性などの向上を目的とし，昆虫の翅脈構造を模擬した膜面構造を作成，翅脈部分相当のチューブの各種パラメータ，膜面の折り畳み方を変化させ，展開特性や展開復元力などを実験的に調査し，以下の成果を得た．展開終了時間は流入流量に逆比例する．チューブ分岐角が小さい場合，膜面の両端には張力が生じず，端部分はたわむ．展開復元力はチューブ幅のおよそ3乗に比例する．ミウラ折りの膜面は膜面全体が同時に展開する．折り畳み方は流量と内圧の時間履歴に殆ど影響を与えない．昆虫の翅を模擬した膜面の展開は成功した．

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to develop secure and efficient inflatable space structures by clarifying the deployment characteristics of insect wings and imitating those characteristics. To this end, the influence of vein tube pattern parameters and folding schemes on the deployment characteristics is experimentally studied from viewpoints of deployment behavior, deployment force and so on. As the results of the experiments, the followings are revealed: 1) deployment time is inversely proportional to air flow rate. 2) the outside parts of membrane are not sufficiently deployed and slack in case of narrow veins. 3) deployment force is approximately proportional to the third power of vein width. 4) all part of membrane folded with the Miura-Ori is deployed simultaneously. 5) the time histories of air flow rate and internal pressure are not influenced by the folding schemes. 6) inflatable membranes which imitate the inset-wing vein network and folding pattern were successfully deployed.

研究分野：宇宙工学

キーワード：インフレータブル構造物 昆虫翅 膜面 展開 ミウラ折り

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙構造物は折り畳まれた状態で打ち上げられ、宇宙で展開されて運用されることが一般的であり、打ち上げ重量制限から、より軽量であることが求められる。こうした宇宙構造物の実現を目指して考えられたものとして、「ミウラ折り」が有名である。最近では小型ソーラー電力セイル実証機「イカロス」の膜面展開が成功している。「イカロス」では遠心力による展開方式が採用された。一方、海外ではブームを用いる展開方法が主に研究されている。遠心力方式は展開後の剛性に難があり、ブーム方式は機構的に複雑で収納および展開の確実性に問題がある。一方、自然界を見渡すと昆虫の翅や植物の葉など可展面構造物が多く存在する。翅・葉内部には脈網が縦横に走っており、その脈網内に体液を充填することで確実な展開が行われている。このことから、脈網が膜の展開の容易さ、展開後の剛性に寄与していると思われる。その構造を模倣することは、宇宙用インフレーター構造物の展開の確実性向上、展開後の剛性向上に欠かせない技術と考えられる。

## 2. 研究の目的

昆虫の翅（ハネ）や植物の葉といった極めてコンパクトに畳まれた状態から広い面積へ展開される自然界に存在する膜面展開構造物の脈網パターン・折りパターンを、フラクタル・ボロノイズ図作成アルゴリズム等を用いて模倣するとともに、脈網内部構造を模倣し、ガス充填により展開する方式とすることにより、今までにない高い収納効率を有し、かつ少ないガス量でもって確実に展開可能、かつ展開後の剛性が高い新しい形態の宇宙用インフレーター構造物を実現するための基礎的知見を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

- (1) 昆虫の翅を顕微鏡により観察し、膜構造の収納、脈網パターンのパラメータを調べる。
- (2) 翅脈パターン・室形状・配置を模擬するアルゴリズムを考案する。
- (3) 翅脈に相当するインフレーターチューブの展開特性を実験により確認する。
- (4) 脈網パターンであるチューブの太さ、分岐角、および膜の折り方を変化させたインフレーター構造物を作成する。収納効率を計測、さらに展開ガスを脈網に注入したときの展開率および展開速度等を測定する。また、展開力や復元力を測定し評価する。展開実験から得られた結果から、各種のパラメータがインフレーター構造物の展開挙動等にどう影響しているかを調べる。展開実験装置の概略図を図1に示す。

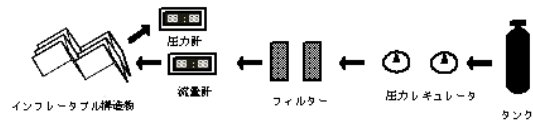


図1: 実験装置概略図

## 4. 研究成果

### (1) 昆虫の翅の特徴的なパラメータの観察による抽出結果

成長の影響が小さく、展開のみであるが収納効率の高い昆虫の羽化に注目し、検体の入手の容易さからアブラゼミを観察し、以下の成果を得た。

#### 翅脈の分岐

翅の付け根から正規化した距離における翅脈の分岐角を図2に示す。翅脈の分岐角は翅の根元から離れるほど分岐角が小さくなる傾向があることがわかる。角度が翅の付け根から離れるほど室を折りたたむ角度が小さくなる原因と同様であると考えられる。また、同様に根元の翅脈の直径を基準として正規化した翅脈の直径を図3に示す。例外的に翅の前縁付近の翅脈の2本は距離が離れると直径が大きくなっているが、基本的には翅の付け根から離れるほど翅脈の直径が細くなる傾向がある。昆虫は飛翔時に翅の後縁をしならせる。そのため、翅の端と後縁付近の剛性を低くする必要があり、翅の構造を支える翅脈の直径が細くなっていると考えられる。

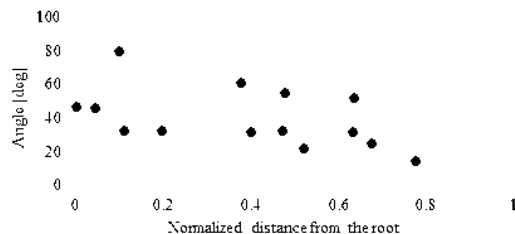


図2: 翅の付け根から正規化した距離における分岐角

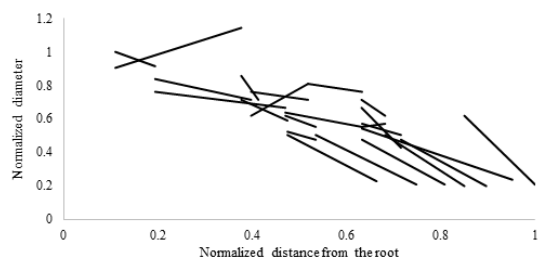


図3: 翅の付け根から正規化した距離における翅脈の太さ

#### 室の折りたたみ方

図4はアブラゼミの羽化の様子を示している。室が凹凸状に繰り返し折りたたまれている様子がわかる。この折りたたみ方はミウラ

折りと類似している。

翅に関して室の折り目の角度に注目すると、翅の付け根付近では直角に近い角度である一方、翅の縁に近づくにつれて次第に鋭角になっている。同一の膜面を展開する場合、分岐角が大きい方が膜面を小さく折りたたむことができる。一方で、膜面を展開する距離が長くなるため展開に大きなエネルギーが必要になり展開しにくい。翅脈は翅の付け根から離れるほど細くなっている。翅脈が太ければ太いほど復元力が大きくなるため、細ければそれだけ復元力は小さくなってしまふ。そのため、翅脈が太い付け根付近では折りたたみの角度を大きくして収納率を高くしている。一方、翅の端になるにつれて細くなる翅脈に合わせ、収納率よりも展開のしやすさを優先して折りたたみの角度が小さくなっていると判断できる。



図 4: 展開中のアブラゼミの翅の様子

また、顕微鏡で 60 倍に拡大した展開中の室の状態および翅脈の折りたたみ方の様子を図 5 に示す。翅全体は前述したようしミウラ折りに似た折り目で折りたたまれているが、そのミウラ折りに折りたたまれた室がさらに微細な蛇腹状に折りたたまれている様子がわかる。ミウラ折りで膜面を折りたたんだ場合、その一つの要素の面積以下では折りたたむことができない。そのため、要素自体をさらに蛇腹状に折りたたみ、より小さく膜面を折りたたむことを可能にしていると考えられる。



図 5: 顕微鏡を用いた羽化時の室および翅脈の様子

得られた昆虫の翅の展開に関わる特徴とそれらから考えられる展開に影響を与える翅のパラメータについてまとめる。

(a) 室はミウラ折りに類似した折りたたみ方であり、ミウラ折りの一要素がさらに蛇腹状に折りたたまれている。

(b) 翅脈は大部分が円筒折りであり、翅の縁部分のみ蛇腹折りである。

(c) 翅脈の分岐角は翅の根元から離れるほど分岐角が小さくなる。

(d) 翅脈の直径は翅の縁に近づくにつれて細くなる。

## (2) 翅脈パターン・室形状・配置を模擬するアルゴリズムの考案

翅脈パターンはフラクタル分岐木に類似しており、室の形状・配置はポロノイズに似ていることから、フラクタル分岐木により翅脈パターンを、翅脈両側にポロノイズ母点を配置し、その他の部分は母点をランダムに配置することで、翅脈パターン・室形状・配置の模擬を試みた。結果の一例を図 6 に示す。

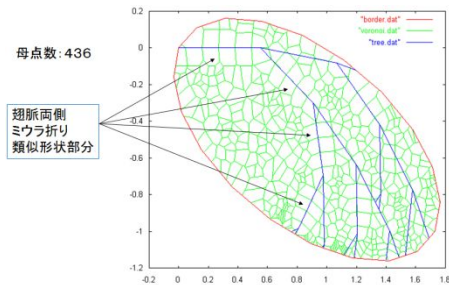


図 6: フラクタル分岐木, ポロノイズ図による翅脈パターン・室形状模擬の一例

## (3) インフレータブルチューブの展開実験

展開に影響を与えると考えられる翅のパラメータを用いた膜面の展開実験の前段階として、インフレータブルチューブのみの展開挙動の実験を行った。図 7 に作成したインフレータブルの外観を、表 1 にチューブの諸元および実験条件をそれぞれ示す。実験においてパラメータを (a) 気体の流入流量, (b) チューブ内圧, (c) 折り畳み方, (d) チューブ幅, の 4 点とし、各パラメータが 展開挙動, 展開時間, 収納時のスケールの 3 点に与える影響を展開中の流量と圧力に着目し評価した。さらに折れ目を一段にした場合のインフレータブルチューブが発生させる復元力を計測した。(a) 展開角度, (b) ヒンジ周りの腕の長さ, (c) チューブ内圧, (d) チューブ幅の 4 パラメータと復元力との関係性を評価した。

以下、実験結果について述べる。



図 7: 作成したインフレータブルの外観



表 1:チューブの諸元および実験条件

材料	ポリエチレンフィル ム
膜厚 [μm]	30
長さ L [mm]	450
チューブ幅 w [mm]	30,60
折りたたみ方	ロール, 蛇腹, 円筒
流入気体の圧力 [kPa]	5,10
流入気体流量 [L/min]	2,4

折り畳み方に対する展開挙動の違い

3種類の折り畳み方に対する展開挙動をそれぞれ図 8~10 に示す。図 8 はロール折り, 図 9 は蛇腹折り, 図 10 は円筒折りの展開挙動を示している。折り畳み方それぞれに対する展開挙動を比較する。ロール折りと蛇腹折りは平面折りであり, 円筒折りは立体折りである。そのため, 前者は流入気体の上流と下流で共通空間を持たないためチューブ根元からチューブが順次展開し, 後者はチューブ全体が同時に展開する様子が確認された。

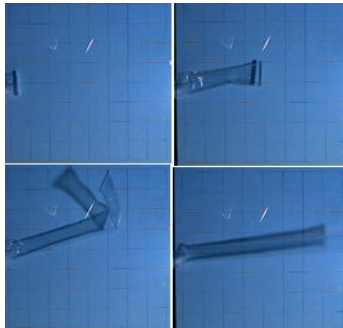


図 8: ロール折りのチューブの展開挙動

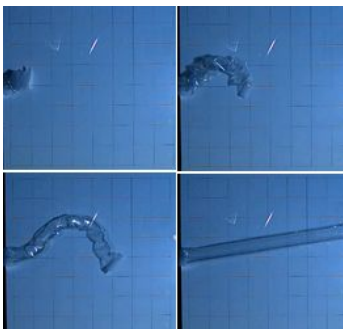


図 9: 蛇腹折りのチューブの展開挙動

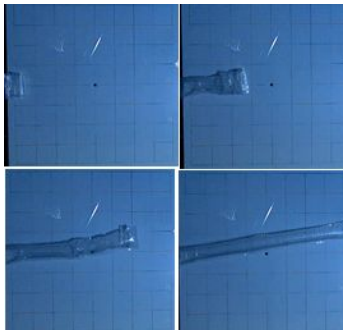


図 10: 円筒折りのチューブの展開挙動

展開時間

(a) 流入流量による影響

展開終了時間は流入流量に逆比例する。

(b) 内圧による影響

展開開始から 6 秒付近までは流量も内圧もほぼ同じ時間履歴であったが, 圧力が高いチューブはその後 1 秒ほど展開し続けた。これは高い圧力のために膜面に作用する張力が大きく, 低い圧力で展開したときよりもチューブが張るためである。

(c) 折り畳み方による影響

展開時間の長さを比較すると, 蛇腹折り > ロール折り > 円筒折りの順であった。上流側と下流側で共通空間を持ち, 折り目の抵抗が小さい折りたたみ方においては展開の滞りがほとんどないため展開時間が短くなるためである。

(d) チューブ幅による影響

チューブ幅が大きくなると, 断面積が大きくなるため, その分展開時間が長くなる。

以上のことから, 展開時間を短縮するためには, 流量を多くする, 内圧を上げる, チューブ幅を狭くすることが有用であることが確認された。ただし, チューブの耐圧を超えないことが前提である。

収納時のスケール

表 2 は, チューブ幅 6mm のチューブを各折りたたみ方で収納した時の最大長さ, 前方投影面積および体積を示したものである。表 2 より, 前方投影面積はロールが有利であり, 最大長さと同体積では円筒折りが有利であるといえる。

表 2: 収納時のスケール比較

	最大長さ [mm]	前方投影面積 [mm <sup>2</sup> ]	体積 [mm <sup>3</sup> ]
ロール折り	60	456	2722
蛇腹折り	60	1350	1080
円筒折り	35	1225	980

チューブが発生する復元力

チューブは折りたたまれた状態から気体を流入することによって直線の状態に展開する。その際に発生する復元力を, (a)内圧, (b)腕長さ・展開角度, (c)チューブ幅ごとに計測し比較した。

(a)内圧による復元力の違い

内圧と復元力の関係図を図 11 に示す。復元力が内圧に比例することが確認できる。

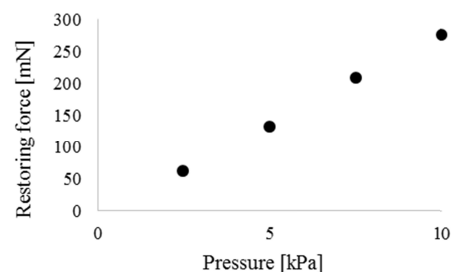


図 11: 内圧と復元力の関係

(b)腕長さ・展開角度による復元力の違い  
 チューブ幅：6 mm，内圧：5kPa の場合の展開角度と復元力の関係をヒンジ周りの腕長さごとに図 12 に示す．復元力は展開角度 90deg で最小になり，90 度から角度が離れるにつれて値が大きくなっている．また，腕長さが長いと復元力が大きくなる傾向があり，腕長さに対する依存性も認められる．

(c)チューブ幅による復元力の違い  
 内圧 2.5kPa，腕長さ 200 mm のときのチューブ幅と復元力の関係を展開角度ごとに図 13 に示す．チューブ幅が広くなるとともに復元力も大きくなり，チューブ幅のおよそ 3 乗に比例していることが分かる．

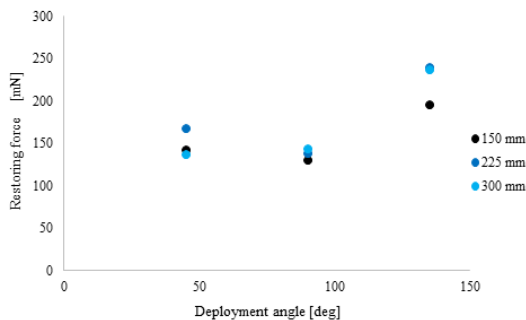


図 12: 腕長さ・展開角度と復元力の関係

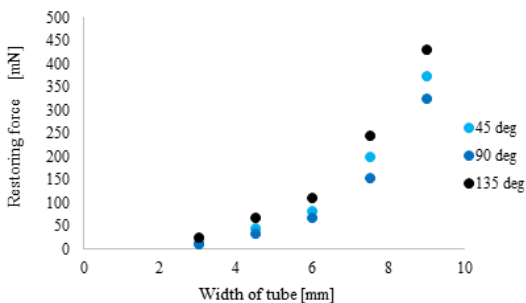


図 13: チューブ幅と復元力の関係

#### (4) 膜面展開実験

翅脈を模したチューブをポリエチレンフィルムに張り付けた膜面モデルを作成した．膜面の諸元および実験条件を表 3 及び図 14，チューブのパラメータを表 4 に示す．

表 3: 膜面の諸元および実験条件

材料	ポリエチレン
膜厚 [ $\mu\text{m}$ ]	30
膜面サイズ (縦 [mm] × 横 [mm])	400 × 400
流入気体圧力 [kPa]	5
流入気体流量 [L/min]	4

表 4: チューブのパラメータ

チューブ幅 $W$ [mm]	10, 20, 30, 40
分岐角 [deg]	30, 45, 60, 75
分岐位置 $P$ [mm]	150, 200, 250
折りたたみ方	ロール, 蛇腹, ミウラ

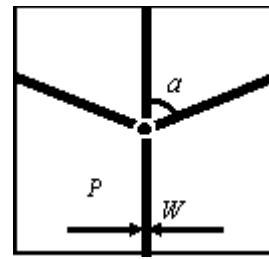


図 14: 膜面モデル

以下，展開実験結果を示す．

#### 折り畳み方による展開挙動の違い

3 種類の折りたたみ方それぞれの展開挙動を図 15～17 に示す．

(a)ロール折りの膜面展開では，チューブ展開のときは異なり，常に順次展開している．これはチューブの両端に膜面が接続しているために，チューブ折れ目部の厚さが一定以上に厚くならないためであると考えられる．  
 (b)蛇腹折りの場合，気体流入側の膜面から順次展開している．ただし，途中で急激に膜面が展開している．気体が流入されるとチューブ内部の圧力が上昇し，復元力が床面との摩擦よりも大きくなるためである．  
 (c)ミウラ折りは 2 方向に展開可能な折りたたみ方であるため，膜面全体が同時に展開している様子が確認できる．また，時間ごとの展開率がほぼ一定であり，チューブ全体に均等に気体が流入していると考えられる．

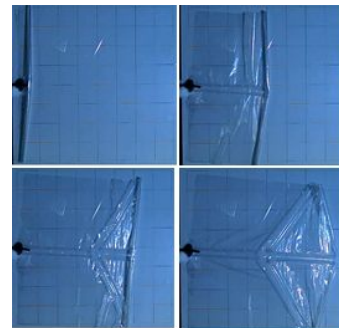


図 15: ロール折りの展開挙動

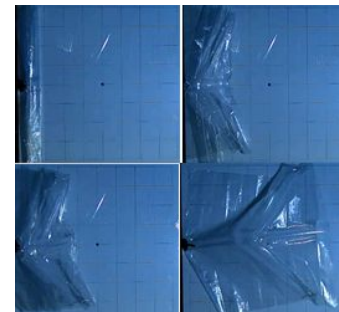


図 16: 蛇腹折りの展開挙動

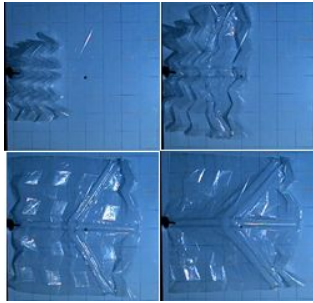


図 17: ミウラ折りの展開挙動

各パラメータの膜面展開への影響

(a) チューブ幅による影響

チューブ幅が狭いと復元力も小さくなるため、チューブ幅が狭い膜面は展開が滞ることがある。

(b) 分岐角による影響

分岐角が小さい場合、膜面の両端にはチューブの張力が生じないため、端部分は完全には展開せずにたわむ。

(c) 分岐位置による影響

分岐位置による流量と内圧の時間履歴の相違はほとんどない。しかし、展開後の膜面の様子を確認すると、分岐位置が短い場合は膜面の先端部がたわんでいる。

(d) 折りたたみ方による影響

折りたたみ方による展開挙動の違いは見られるが、流量と内圧の時間履歴に関しては相違がほとんどない。

(e) 左右非対称の膜面の展開

分岐角が大きいチューブが先に展開し、次に分岐角が小さいチューブが展開しながら、最後に縦方向のチューブが展開した。分岐角が大きいチューブの方が分岐点においてより広い流路を確保できるため、分岐角が大きいチューブが先に展開すると考えられる。

昆虫翅構造を取り入れた膜面の展開実験

翅の長さに対する翅脈の直径の長さの比率を同様にすることで、アブラゼミの翅と同じスケールの膜面を作成した。翅構造を模擬した膜面の外観を図 18 に示す。また展開の様子を図 19 に示す。実験条件は流入流量：4L/min，内圧：10kPa，折りたたみ方：ミウラ折りである。

展開初期では膜の根元が展開，展開開始後 0.8 から 1.4 秒で後翅が展開，その後残りの前縁付近と共に膜面全体が展開した。流量と内圧の関係では，流量は一定で流れておらず途中で流量が大きくなったが，膜面全体の展開はほぼ成功した。

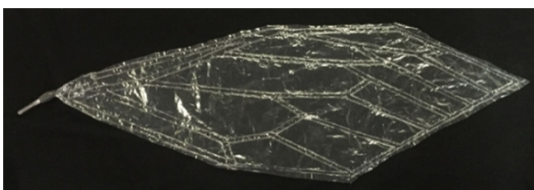


図 18: 翅構造を模擬した膜面の外観

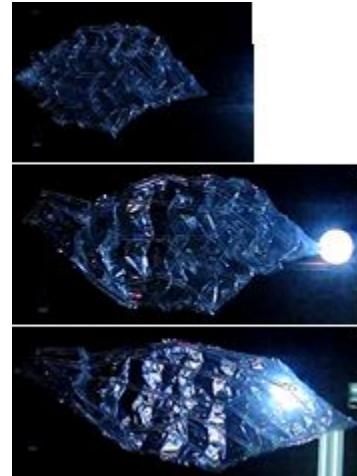


図 19: 翅構造を模擬した膜面の展開の様子

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3 件)

菊地孝明, 小島広久, 昆虫翅構造に学ぶ宇宙インフレータブル構造物の実験的研究, 関東支部第 22 期総会・講演会, 東京, 2016 年 3 月 10-11 日.

Kikuchi, T. Kojima, H., Analysis of Deployment Behavior of Insect Wing-inspired Space Inflatable Structure, 30th ISTS, Hyogo, Kobe, July 4-11 2015.

小島広久, 菊地孝明, 昆虫翅構造に学ぶ宇宙インフレータブル構造物の研究: 第一報, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 鳥取県, 米子, 2013 年 10 月 9-11 日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小島 広久 (KOJIMA, Hirohisa)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：50322350