

# 葉脈を模したインフレーターブルチューブ構造の解析と設計

秋田 剛<sup>\*1</sup>  
森 涼司<sup>\*2</sup>

## 1. 梗 概

本研究では植物の葉を模したインフレーターブルチューブ膜構造を提案し、加圧膨張後の剛性に注目したインフレーターブルチューブ構造の形態設計を行う。具体的には、葉脈状のチューブ構造を考え、脈の角度や付け根位置などをパラメータにして高剛性なインフレーターブル膜構造を設計する。チューブ構造の形状解析には張力場理論による非線形有限要素解析を適用し、その妥当性を試作モデルとの定性的な比較から確認する。

### 1. はじめに

近年の宇宙開発の発展に伴い、ソーラーセイル<sup>(1)</sup>や宇宙アンテナ用のサンシールド<sup>(2)</sup>など軽量で収納効率の高い膜材を利用した軽量膜面宇宙構造物が数多く提案されている。この中で、膜に空気を注入して加圧膨張させ形態を維持するインフレーターブル膜構造は、展開機構が簡便であることや展開後に内圧による圧縮剛性を持つなどの利点があり、軽量膜面宇宙構造物の有力な構造様式として大きな注目を集めている。特に近年、膜面にインフレーターブルチューブを張り合わせたインフレーターブル膜面複合構造に関する研究が盛んに行われている<sup>(3-6)</sup>。これらの構造において、インフレーターブルチューブは展開時には膜面の展開アクチュエータとして、展開後には膜面の支持構造としての機能を果たす。

インフレーターブル膜面複合構造の力学的な特性は、膜面に張り合わされたチューブの形態に大きく依存する。これまでに単純な幾何形状のものだけでなく、昆虫のはねを模したものなど様々なチューブ形態が考案されている。これらの形態は主にインフレーターブル膜面複合構造の展開時の安定性・効率性に注目して設計がなされている。一方、チューブの形態は、展開後の支持構造としての機能にも影響を与えられ、これまでの設計でこの点に注目したものは少なかった。展開後に受ける種々の外乱の影響を低減させるためにも、インフレーターブル膜面複合構造の加圧膨張後の剛性を高めるようなチューブの形態設計を行うことは重要である。

本研究では、まず葉の葉脈を模したインフレーターブルチューブ構造を提案し、加圧膨張後の形状を有限要素解析により求める。次にいくつかの形状パラメータを設定し、数値解析により加圧膨張後の剛性が向上するようなチューブ形態の設計を行う。また試作モデルを作成し、数値解析の妥当性を定性的に確かめる。

### 2. チューブ構造の基本モデル

本研究では葉脈を模したインフレーターブルチューブ構造の基本モデルとして、図1に示すような周辺脈、主脈 (Mid Vein) および側脈 (Lateral Vein) からなる長さ  $L$ 、幅  $W$  のチューブ構造を考える。

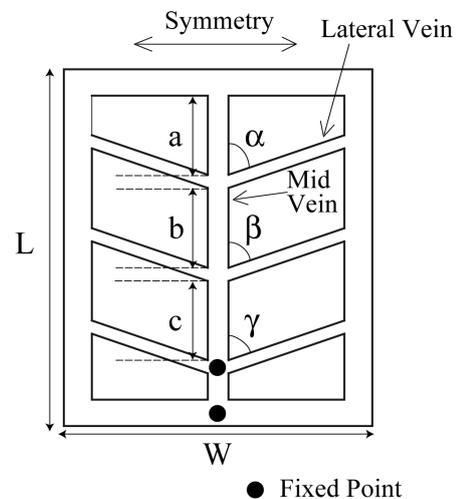


図1 基本モデル(加圧膨張前)

\*1 宇宙航空研究開発機構 情報計算工学センター 招聘研究員

\*2 大阪府立大学工学研究科 航空宇宙工学科

チューブ構造は、上下2枚の平面膜のエッジを貼り合わせて構築され、下面側の主脈の下部2点（図中の黒丸）を固定点とする。側脈は主脈に対して対称に設置され、側脈の角度を上部から $\alpha, \beta, \gamma$ とし、側脈の付け根間の距離を上部から $a, b, c$ とする。図1のモデルに空気を注入することで、初期状態で平面だった膜が加圧膨張され三次元形状となる。加圧膨張前のチューブ形態は加圧膨張後の三次元形状に影響を与え、従ってチューブ構造の面外の曲げ剛性に影響を与える。

本研究では、角度 $\alpha, \beta, \gamma$ および距離 $a, b, c$ を形状パラメータとして加圧膨張後の面外剛性が高くなるようなチューブ形態を設計する。具体的には加圧膨張後のチューブ構造の1次の固有振動数（面外の曲げ1次）がより高くなるような形状パラメータを数値解析を用いて探索する。

### 3. インフレータブルチューブ構造の形状解析

#### 3.1. チューブの有限要素解析

インフレータブルチューブは張力場理論に基づくしわを考慮した膜要素<sup>7)</sup>でモデル化する。インフレータブルチューブの表側膜面と裏側膜面を重ね合わせた平面を初期形状とし、表側膜面に $+p$ の圧力を、裏側膜面に $-p$ の圧力を作用させ幾何学的非線形有限要素解析を行う。インフレータブルチューブの周縁部は表裏の膜で節点を共有し、それ以外の節点は表裏の膜面でそれぞれ別個の自由度を持つようにする。

膜が張力を持たない解析の初期状態では剛性行列が特異となるが、仮想減衰項を用いた安定化法<sup>8)</sup>により特異性を回避して解析を行う。加圧膨張後のチューブ構造の固有振動数はサブスペース法により算出する。

#### 3.2. 基本モデルの解析結果

以上に述べた方法を用いてインフレータブルチューブ構造の形状解析を行う。解析対象の膜材は厚さ0.1 mmのポリエチレン膜を想定し、ヤング率を200MPa、ポアソン比を0.37とする。内圧 $p$ は35 kPaとし、基本モデルの寸法や形状パラメータを図2のように設定する。

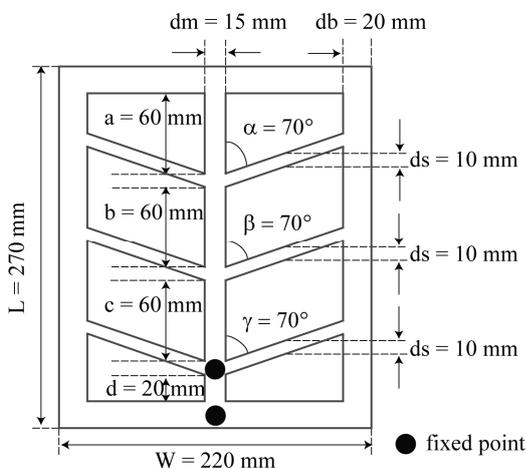
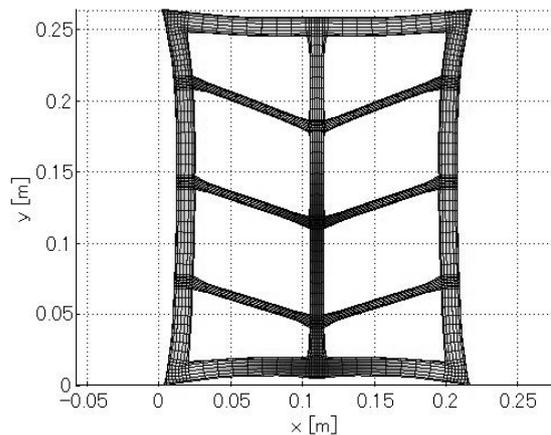


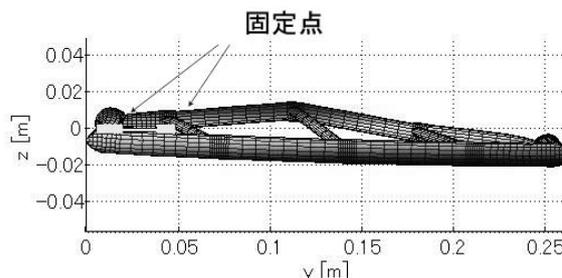
図2 基本モデルの寸法と形状パラメータ値

図3に形状解析結果を示す。図より加圧膨張によって周縁部が面内で湾曲し、主脈が弓状に面外に反った変形をすることがわかる。また、変形状態における1次の固有振動数は4.85 Hzとなった。

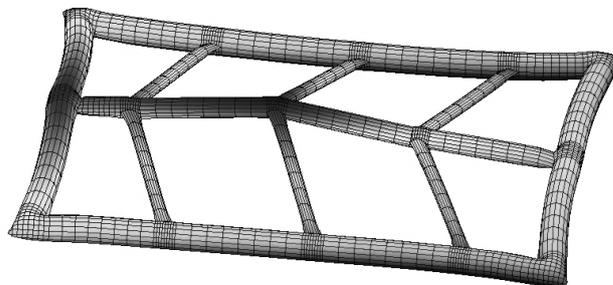
次章では、形状パラメータを変化させ、基本モデルの固有振動数を増加させるようなチューブ形態を探索する。



(a) 上面図



(b) 側面図



(c) 全体図

図3 基本モデルの変形形状(1次の固有振動数 4.85 Hz)

## 4. チューブ構造の形態設計

### 4.1. 形態設計の手順

本研究ではチューブ構造の1次の固有振動数を目的関数とした形態設計を行う。図4に形態設計の手順を示す。形態探索は2つのプロセスを通じて行う。

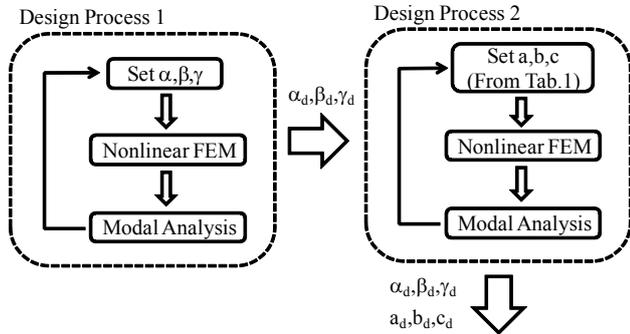


図4 形態設計手順

まず、側脈角度を $70^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 100^\circ, 110^\circ$  (or,  $103^\circ$ )の5通り考え、 $\alpha, \beta, \gamma$ にそれぞれ割り当てる。ここで角度 $\gamma$ に関しては、形状の制約から $110^\circ$ の代わりに $103^\circ$ の値を設定する。全ての組み合わせ(125通り)に対して加圧膨張後の1次の固有振動数を求め、固有振動数がもっとも高くなる組み合わせ $\alpha_d, \beta_d, \gamma_d$ を求める。次に $\alpha_d, \beta_d, \gamma_d$ の側脈角度に対して側脈の付け根間の距離 $a, b, c$ を表1のような15通りの組み合わせで変化させる。それぞれの組み合わせにおいて加圧膨張後の1次の固有振動数を求め、もっとも固有振動数が高くなる組み合わせを $a_d, b_d, c_d$ とする。上記の2つのプロセスから設計モデルを決定する。

表1 付け根間の距離の組み合わせ

a = 60 mm					
b [mm]	100	80	60	40	20
c [mm]	20	40	60	80	100
b = 60 mm					
a [mm]	100	80	60	40	31
c [mm]	20	40	60	80	89
c = 60 mm					
a [mm]	100	80	60	40	31
b [mm]	20	40	60	80	89

### 4.2. 探索結果

表2にはじめのプロセスで求めた側脈角度とチューブ構造の1次の固有振動数の関係を示す。表は $\gamma$ の角度でグループ分けしている。なお表中の「-」記号は計算が不安定になり

解を得られなかったことを示す。また各グループにおける最大値を下線で示している。

各グループにおける1次の固有振動数の平均値は $\gamma$ の角度が大きいグループから順に5.5 Hz, 5.4 Hz, 5.6 Hz, 5.4 Hz, 4.8 Hzである。最も1次の固有振動数が高いモデルは、 $\gamma = 90^\circ$ のグループに含まれる $(\alpha, \beta, \gamma) = (70, 90, 90)$ の組

表2 側脈角度と固有振動数の関係(単位は Hz)

$\gamma = 103^\circ$ (平均値 5.5 Hz)					
$\alpha^\circ \backslash \beta^\circ$	70	80	90	100	110
70	5.44	5.27	5.33	5.41	5.55
80	5.59	-	-	5.36	5.53
90	-	-	5.39	5.45	5.57
100	-	<u>5.66</u>	-	5.44	5.53
110	3.93	-	5.52	5.46	5.51
$\gamma = 100^\circ$ (平均値 5.4 Hz)					
$\alpha^\circ \backslash \beta^\circ$	70	80	90	100	110
70	5.24	5.17	5.16	5.37	5.49
80	5.42	5.21	5.17	-	5.41
90	5.61	5.46	5.40	5.33	5.42
100	-	5.53	5.41	5.32	5.37
110	<u>5.81</u>	-	-	-	5.23
$\gamma = 90^\circ$ (平均値 5.6 Hz)					
$\alpha^\circ \backslash \beta^\circ$	70	80	90	100	110
70	5.50	5.41	5.45	5.56	5.60
80	5.73	-	5.56	5.63	5.73
90	<u>5.84</u>	5.72	5.62	5.67	5.75
100	5.82	5.72	5.59	5.61	-
110	-	-	5.44	-	-
$\gamma = 80^\circ$ (平均値 5.4 Hz)					
$\alpha^\circ \backslash \beta^\circ$	70	80	90	100	110
70	5.47	-	5.32	5.38	5.38
80	5.53	-	-	5.53	5.56
90	5.52	-	5.50	5.55	<u>5.58</u>
100	5.37	-	5.45	5.42	-
110	5.15	-	5.13	5.18	5.20
$\gamma = 70^\circ$ (平均値 4.8 Hz)					
$\alpha^\circ \backslash \beta^\circ$	70	80	90	100	110
70	4.85	-	4.74	4.78	4.78
80	4.96	4.98	<u>4.99</u>	4.93	4.95
90	4.83	4.87	4.89	4.93	4.85
100	4.66	4.71	4.75	4.78	-
110	4.39	4.61	-	4.68	4.73

み合わせであり、1次の固有振動数の値は5.84 Hzとなる。 $\gamma=90^\circ$ のグループは、他のグループと比較して最も平均値が高くなっている。このグループにおいて、すべての角度が $90^\circ$ となる組み合わせの1次の固有振動数は5.62 Hzである。この組み合わせを基準に表を縦に見ると、 $\beta$ に関しては $90^\circ$ の値がグループ内で最高値となり、 $90^\circ$ の値から離れるほど固有振動数は低下することがわかる。一方、表を横に見ると、 $\alpha$ に関しては $90^\circ$ の値が最低値となっており、この値から離れるほど固有振動数は増加することがわかる。すなわち、上側と下側の側脈の角度がともに $90^\circ$ である場合には、中央の側脈の角度も $90^\circ$ であれば1次の固有振動数が高く、中央と下側の側脈の角度がともに $90^\circ$ である場合には、上側の側脈の角度は $90^\circ$ から $\pm 20^\circ$ 付近で1次の固有振動数が高くなることが分かる。

基本モデルの属する $\gamma=70^\circ$ のグループには1次の固有振動数が5.0 Hzを超えるものはなく、また1次の固有振動数の平均値を見ても他の4グループと比べて明らかに1次の固有振動数が低いグループであることが分かる。

次に側脈の付け根間の距離と1次の固有振動数の関係を表3に示す。表より $a=60$  mmのグループに含まれる $(a, b, c) = (60, 20, 100)$ のとき1次の固有振動数が5.89 Hzと最も高くなることがわかる。このグループでは、1次の固有振動数と $b$ 及び $c$ の間にそれぞれ負、及び正の相関がある。すなわち、上下の側脈の位置を固定した場合に、中央の側脈はより上側

表3 付け根間の距離と固有振動数の関係

a = 60 mm					
b [mm]	100	80	60	40	20
c [mm]	20	40	60	80	100
固有振動数 [Hz]	5.14	5.61	5.84	5.87	<b>5.89</b>
b = 60 mm					
a [mm]	100	80	60	40	31
c [mm]	20	40	60	80	89
固有振動数 [Hz]	5.14	5.69	<b>5.84</b>	5.78	5.59
c = 60 mm					
a [mm]	100	80	60	40	31
b [mm]	20	40	60	80	89
固有振動数 [Hz]	<b>5.88</b>	—	5.84	5.61	5.45

の側脈に近い上方に位置している方が固有振動数が高くなる。

表4に探索結果をまとめる。表より形態探索の結果、基本モデルに比べて固有振動数が約21%増加する設計モデルが求められることがわかる。

表4 探索結果

	固有振動数	$(\alpha, \beta, \gamma)$ [degree]	$(a, b, c)$ [mm]
基本モデル	4.85 Hz	(70, 70, 70)	(60, 60, 60)
プロセス1	5.84 Hz	(70, 90, 90)	(60, 60, 60)
プロセス2	5.89 Hz	(70, 90, 90)	(60, 20, 100)

#### 4.3. 設計モデルの変形形状

図5に設計モデルの加圧膨張後の変形図を示す。図3と図5を比較すると、主脈の変形形状に大きな違いが見られる。設計モデルの主脈は基本モデルのものに比べて、たわみのピークが前方に移動し、曲率も増加していることがわかる。この主脈の変形の違いが面外の曲げ剛性に影響を与え、両モデルの面外の固有振動数の違いに反映されたと考えられる。

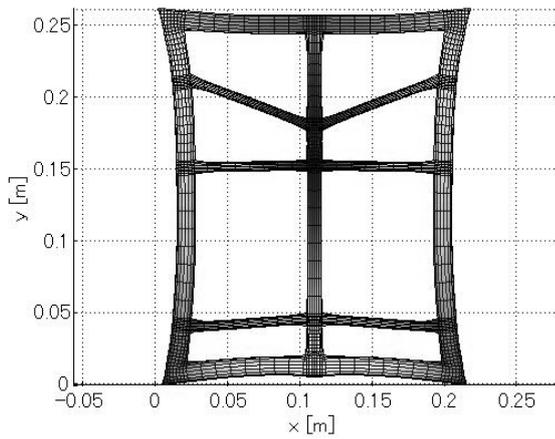
#### 5. 試作モデルの製作

インフレーターチューブ構造の試作モデルを製作し、数値解析結果の妥当性を定性的に評価する。以降にその詳細を示す。

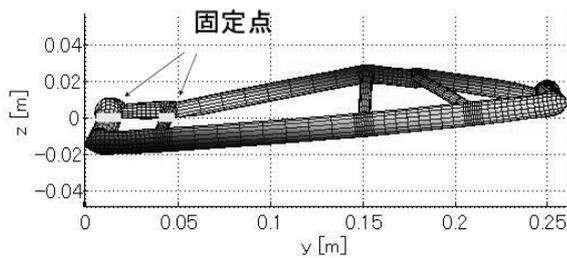
##### 5.1. 製作手順

インフレーターチューブ構造は、チューブを構成する膜部分と空気取り入れのためのバルブ部分からなる。膜部分には厚さ1 mmの低密度ポリエチレン製のポリ袋を使用した。バルブ部分には自転車チューブ用の米式バルブを用いた。以下に製作手順の概要を示す。また、図6に各手順における製作の様子を示す。

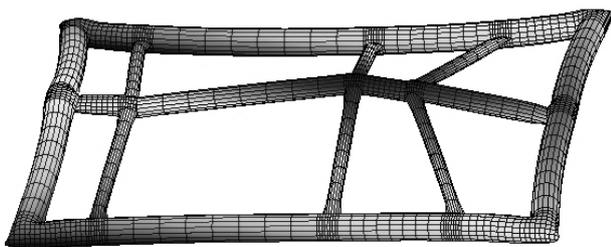
- 1) 低密度ポリエチレンシートを2枚用意し、それぞれにチューブ形態のパターンを書き込みカッターで切り出す。切り出したポリエチレンシートを図6(a)に示す。
- 2) 2枚の型を重ね合わせ、モデル外縁部から順にヒートシーラーでヒートシールする(図6(b))。
- 3) バルブ部分を取り付けるために、米式バルブの円周に合わせて2枚のポリエチレンシートをカットし、両サイドをヒートシールする(図6(c)左)。
- 4) 米式バルブを飲み込ませる(図6(c)右)。



(a) 上面図



(b) 側面図

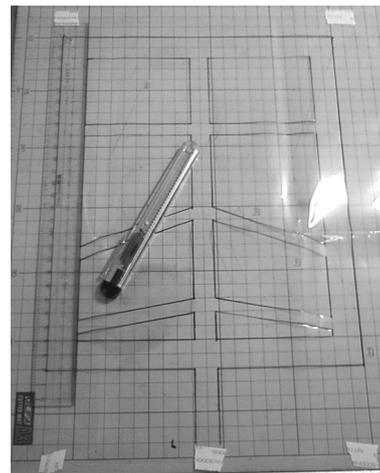


(c) 全体図

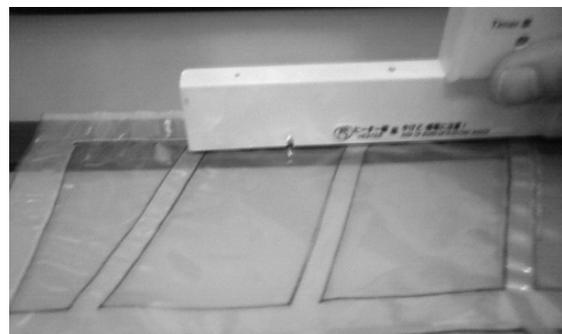
図5 設計モデルの変形形状(1次の固有振動数 5.89 Hz)

## 5.2. 試作モデル

図7に作成した基本モデル, 設計モデルの試作モデルを示す。図の左が基本モデル, 右が設計モデルに対応している。図7(a)は加圧膨張する前の初期形状を示している。モデルの寸法は数値解析モデルと同様とした。加圧膨張後の形状を図7(b), (c)に示す。これらは、固定条件なしの場合の釣り合い形状となっている。図7(b)の上面図より、どちらのモデルも



(a) ポリエチレンシート



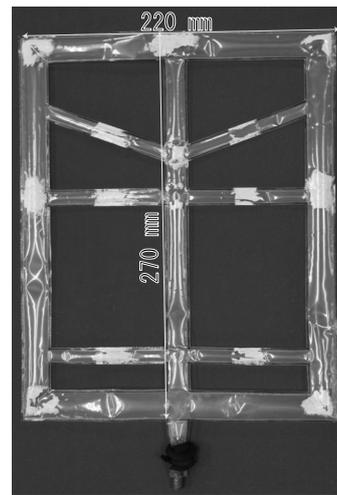
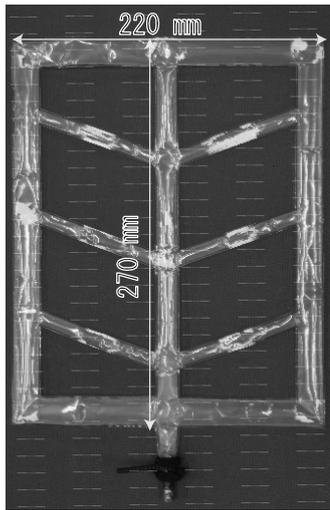
(b) ヒートシール



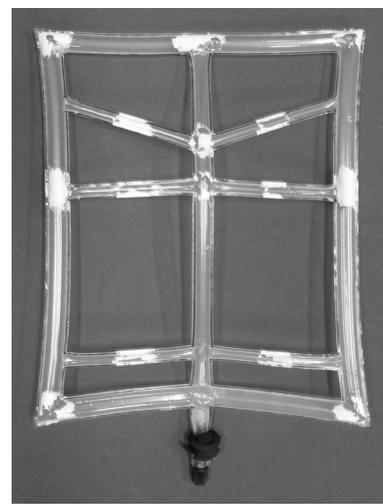
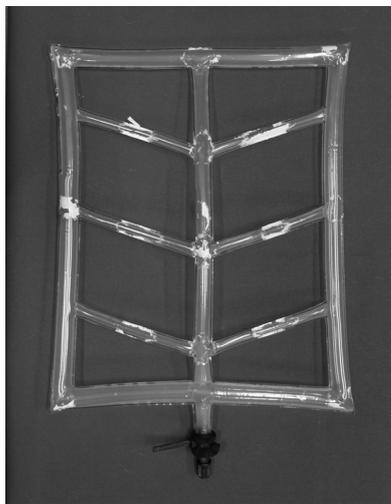
(c) 米式バルブの設置

図6 試作モデルの製作手順

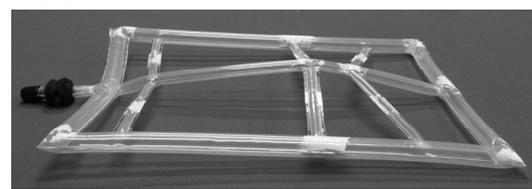
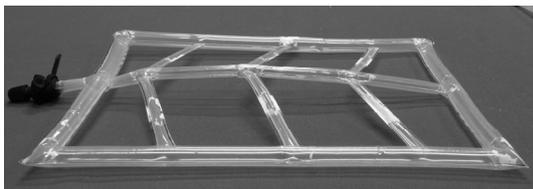
周縁部の変形が数値解析と試作モデルで良く一致していることがわかる。また図7(c)より数値解析結果(図3,5)と同様に設計モデルの主脈のたわみのピークが基本モデルのものよりも前方にあり、曲率も設計モデルのほうが基本モデルよりも大きくなっていることがわかる。これより、試作モデルにおいても設計モデルの曲げ剛性が基本モデルよりも高くなり、従って1次の固有振動数も高くなることが予想される。



(a) 加圧膨張前



(b) 加圧膨張後(上面図)



(c) 加圧膨張後(側面図)

図7 試作モデルの加圧膨張前後の形状(左:基本モデル, 右:設計モデル)

## 6. 結論と今後の課題

本研究では、インフレータブル膜面複合構造における支持構造としてのインフレータブルチューブに焦点をあて、植物の葉の葉脈を模倣した脈パターンを有するインフレータブルチューブの基本モデルを考案した。また基本モデルの形状パラメータを変化させ、固有振動数が高くなる脈パターンを持つ設計モデルを数値解析により求めた。これらのモデルのインフレータブルチューブを実際に作製した。作製したモデルの加圧膨張後の変形形状は、数値解析結果と定性的によく一致することを確認した。

今後の課題として、まず形態探索方法の改善があげられる。本研究ではパラメータの組み合わせを総当たりで計算して形状探索を行ったが、計算機能力の制限から探索範囲が限られたものとなった。今後は遺伝的アルゴリズムを代表とする種々の組み合わせ最適化アルゴリズムを適用し、より効率的な形態設計を行う予定である。また、試作モデルに関しても本研究では数値解析結果との定性的な比較のみを行ったが、今後は振動試験等により定量的に数値解析の妥当性を示す予定である。

## 7. 参考文献

- 1) 奥泉信克: 多粒子系モデルによるソーラーセイル膜面の展開解析, JSASS-2009-4320, 2009.
- 2) Ewing, A. P., Back, J. M., Schuettpelz, B. M., and Laue, G. P.: James Webb Space Telescope Sunshield Membrane Assembly, AIAA Paper 2009-2156, 2009.
- 3) Kishimoto, N., Natori, M. C., Higuchi, K., and Ukegawa, K.: New Deployable Membrane Structure Models Inspired by Morphological Changes in Nature, AIAA Paper, 2006-1898, 2006.
- 4) Furuya, H., and Yoshida, Y.: Properties of Plainly Composed Inflatable Panels, AIAA Paper 2008-2050, 2008.
- 5) Senda, K., Kishimoto, N., Higuchi, K., Shoukaku, Y., Mizuguchi, S., Ogasawara, T., and Oda, T.: Finite Element Method Analysis and Experiment of 2-Dimensional Deployable Membrane Structures Embedding Inflatable Tubes, AIAA paper, 2008-2054, 2008.
- 6) Katsumata, N., Fujii, R., Natori, M. C., and Yamakawa, H.: Membrane Space Structure Models with Inflatable Tubes, Proceedings of the 27th International Symposium on Space Technology and Science, 2009-c-34, 2009.
- 7) Akita, T., Nakashino, K., Natori, M. C., and Park, K. C.: A Simple Computer Implementation of Membrane Wrinkle Behaviour via a Projection Technique, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 71, pp.1231–1259, 2007.
- 8) 水澤富作, 田中宏明: 超弾性膜の膨張と収縮挙動について, 膜構造研究論文集'99, 日本膜構造協会 pp.23-32, 1999.

## NUMERICAL ANALYSIS AND PATTERN DESIGN OF A LEAF-LIKE INFLATABLE TUBE STRUCTURE

Takeshi AKITA <sup>\*1)</sup>

Ryoji MORI <sup>\*2)</sup>

### SYNOPSIS

A leaf-like inflatable tube structure, which consists of a vein-like inflatable tube, is investigated. Various tube patterns are generated by changing the joint positions and angles of veins. Nonlinear finite element method based on the tension field theory is applied to calculate both the deformed shapes of the tubes after inflation and the first natural frequencies of the inflated tubes. The optimum design is searched as the model which has the highest first natural frequency. The experimental models of the initial and optimum designs are made to verify the reliability of the numerical results.

---

\*1) Researcher, JAXA's Engineering Digital Innovation Center (JEDI), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA).

\*2) Osaka Prefecture University