

# 折り目の簡易的なモデル化によるインフレータブルチューブの 固有値解析

新田 力也<sup>\*1</sup> 角田 博明<sup>\*2</sup>

## Eigenvalue Analysis of Inflatable Tube by Simple Method of Modeling Crease

by

Rikiya SHINDEN<sup>\*1</sup> and Hiroaki TSUNODA<sup>\*2</sup>

(Received on Mar. 30, 2012 and accepted on May 17, 2012)

### Abstract

We studied an inflatable space structure in order to create an ultra-lightweight space structure. The inflatable tube is an important basic structural element of inflatable structures because it has excellent packaging efficiency. However, an inflatable tube may undergo buckling during use due to a drop in internal pressure. Moreover, the change of eigen-frequency due to transformation of the membrane is not well understood. In this paper, we examine the effects of an axial crease on the eigen-frequency. First, we investigate the changes of bending stiffness by a bending experiment. Next, we construct an analytical model based on the bending stiffness. Finally, we compare the results of the eigenvalue analysis and vibration experiment of the inflatable tube. It is shown that the simple modeling method using bending stiffness is adequate for the eigenvalue analysis of an inflatable tube.

**Keywords:** space structure, deployable structure, inflatable structure, membrane, eigen-frequency

### 1. まえがき

インフレータブル構造物とは膜構造に気体を注入し、内圧を加えることにより構成される構造物である。一般的な構造物と比較して収納性、軽量性、簡易的な構造という特徴を持っている。これらの特徴は輸送の際に質量制限、体積制限のある宇宙構造物として利用価値があると考えられている。特に、収納性については搬送中に内部に圧力を与えないことで膜構造物を折り畳むことができ、収納体積を縮小することができる。大型構造物を宇宙空間に構築する際に、一般的な構造物では収納体積が大きくなり構造物を分割して数回に分けて搬送する必要がある。その点、インフレータブル構造は高い収納性を活かし、搬送費を大幅に削減することができる。そのため衛星の大型アンテナ<sup>1)</sup>や、太陽電池アレイの支持部材をはじめ、人が宇宙で居住するためのスペース<sup>2)</sup>など大型構造物としての利用が考えられている。

ただし、その収納性を活かすためには前述した通りに、膜構造を折り畳む必要がある。インフレータブル構造物は膜面に変形を加えた場合、内圧に依存して固有振動数が変化するという特性を持つ。衛星の大型アンテナや、太陽電池アレイの支持部材として使用が考えられているインフレータブル構造物の固有振動数が

変化した場合、衛星や宇宙機などの姿勢制御系と共振してしまう危険性がある。そのため、実利用するためには、折り目を考慮した固有値解析が必要となる。しかし、インフレータブル構造の研究は数多く行われているにも関わらず、圧縮応力を受けた際の変形の発生領域など曲げ強度に関する研究<sup>3)</sup>や、内圧に対する振幅の変化に対する研究<sup>4)</sup>はあるがインフレータブル構造としての折り目を考慮した固有値解析の方法については十分な研究が行われていない。そのため本研究では、折り目と内圧変化によるインフレータブル構造の固有振動数の変化を解明することに資するため、折り目の簡易的なモデル化の方法を明らかにする。

本研究では、インフレータブル構造物の中でも基本部材となる円筒状のインフレータブルチューブを対象に取り上げ、軸方向の折り目と固有振動数の関係について、実験で求めた曲げ剛性を解析モデルに取り入れて解析する。まず、インフレータブルチューブに対して曲げ試験を行い、折り目を付与してない供試体と、折り目を付与した供試体の曲げ剛性の比を求める。次にこの曲げ剛性の比を使って、解析モデルのヤング率を変化させ、折り目自体をモデル化せずに折り目の効果を反映させた簡易的なモデルを作成し解析を行う。最後に、折り目や内圧の変化が固有振動数に与える影響について解析と実験から同様な傾向が見られることを示す。

\*1 工学研究科 航空宇宙学専攻 修士課程

\*2 工学部 航空宇宙学科 航空宇宙学専攻 教授

## 2. インフレーターチューブ

インフレーターチューブとは、フィルム材料を円筒状に加工し、両端部を塞ぎ、気体を注入して内圧をかけることで構成される構造物である。地上での用途としてアーチ状の簡易建築物などに使用され、エアチューブまたは、エアビームとも呼ばれている。宇宙空間においても前述した大型アンテナの支持ブームや、展開トラス構造の部材などの使用が考えられている。インフレーターチューブには、樹脂により硬化させて、気体を排気しても圧縮部材として使えるようにした硬化型と、内圧を維持させることで膜材に張力を与え、圧縮部材として使う非硬化型があるが、本研究では軽量化の利点が大きく将来の大型宇宙構造として有望視されている非硬化型を対象として取り上げる。今回、実験で用いたインフレーターチューブは宇宙空間での使用を考え膜材にポリイミドフィルムを使用した。高分子材料であるポリイミドフィルムは耐熱性、耐放射線、耐紫外線の特徴を持ち、実際に人工衛星の熱制御材など宇宙空間での使用実績のある材料である。Table 1 に今回使用したポリイミドフィルムの材料特性を、Fig. 1 にインフレーターチューブの構成を示す。図中のポリイミド粘着テープは線状に表示されているが、実際の幅は 20mm である。

Table 1 Material properties of polyimide film

Thickness[ $\mu\text{m}$ ]	50
Young's modulus[GPa]	3.4
Density[kg/m <sup>3</sup> ]	1420

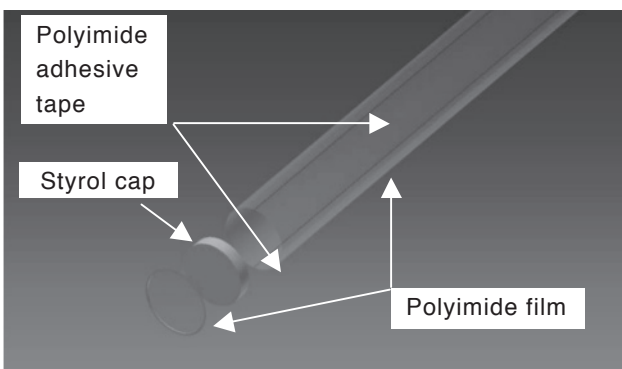


Fig.1 Inflatable tube

インフレーターチューブは Fig. 1 に示すように、ポリイミドフィルムを筒状に丸め、ポリイミド粘着テープで円筒状になるように固定する。このままでは、軸に直交する断面形状が非対称になるので、先のテープを貼り付けた場所と対称な位置に同様なポリイミド粘着テープを貼り付ける。チューブの端部には断面が

円形となるようにスチロール部材を接着し、最後に気体のリークを防ぐポリイミドフィルムを接着する。もう片方の端部にはこのような蓋は設けず、実験装置の治具のフランジに固定する。

## 3. 簡易モデルのための指標取得実験

### 3.1 実験概要

曲げ剛性は一般的に曲げモーメントに対する変形のしにくさを表し、ヤング率  $E$  と断面 2 次モーメント  $I$  の積によって表される。また、構造物においては固有振動数に大きく影響するパラメータの一つでもある。式(1)に、片持ち梁の 1 次の固有振動数を求める式を示す。

$$f_1 = 1.875^2 \frac{1}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

$f_1$  : 1 次の固有振動数

$l$  : 軸方向長さ

$E$  : ヤング率

$I$  : 断面 2 次モーメント

$\rho$  : 密度

$A$  : 断面積

上式のように、固有振動数は曲げ剛性  $EI$  の平方根に比例する。折り目を付与した場合、確実に曲げ剛性が変化する。そのため、固有値解析を行うためにも、折り目の本数と方向に対する曲げ剛性の変化を定量的に得ることが必要である。Fig. 2 に実験の概略図を示す。

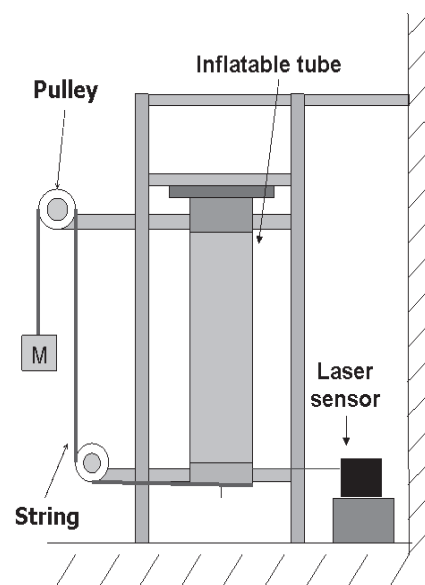


Fig. 2 Schematic of bending experiment

Fig. 2 に示すように上部を実験装置と接続したインフレータブルチューブの自由下端にストリングをかけ、その先に錘を加えることによってインフレータブルチューブがたわむ。たわみ量を求めることができれば、式(2)に示す片持ち梁のたわみの式により曲げ剛性を求めることができる。

$$\delta_{\max} = \frac{1}{3} \frac{Wl^3}{EI} \quad (2)$$

$\delta_{\max}$ : 最大たわみ  
 $W$ : 先端荷重  
 $l$ : 軸方向長さ  
 $E$ : ヤング率  
 $I$ : 断面 2 次モーメント

上式において軸方向長さはすべての供試体で 900mm なので、たわみ量と先端荷重の関係を見ることにより曲げ剛性の比を確認することができる。使用する錘は  $1.00 \pm 0.01g$  のものを使用した。今回、実験で用いる供試体は Table 2 に示す 3 本である。供試体 A は折り目無し、供試体 B は軸方向に 4 本折り目を付与、供試体 C は軸方向に 6 本折り目を付与した。

Table 2 Specifications of test articles (Type. A, B, C)

	Type.A	Type.B	Type.C
Length[m]	900	900	900
cap mass[g]	5.9	5.9	6.1
total mass[g]	29.8	29.7	29.8
diameter[m]	0.1	0.1	0.1
crease	0	4	6

Fig. 3 に 3 種類の供試体を軸方向から見た写真を示す。図中の矢印は折り目の位置を示している。これは内圧を付与していない状態であるため、折り目の影響により断面形状が変化していることがわかる。ただし、気体を導入すると内部からの圧力によって、折り目のかかわらず断面の形状は円形になる。

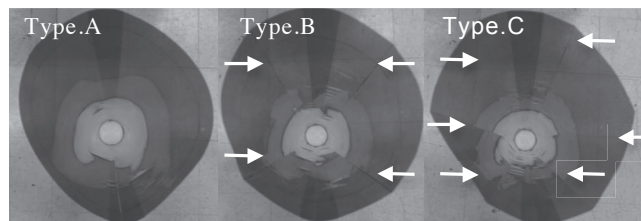


Fig. 3 Cross-section of Inflatable tube

### 3.2 実験結果

実験では内圧を 4.0, 2.0, 1.0 kPa と変化させ、曲

げ剛性を測定した。Fig. 4 に、供試体 A、B、C の曲げ実験の結果を示す。凡例のアルファベットは供試体を示し、アラビア数字は内圧を示す (A-4 とあるのは、供試体 A、内圧 4 kPa である)。

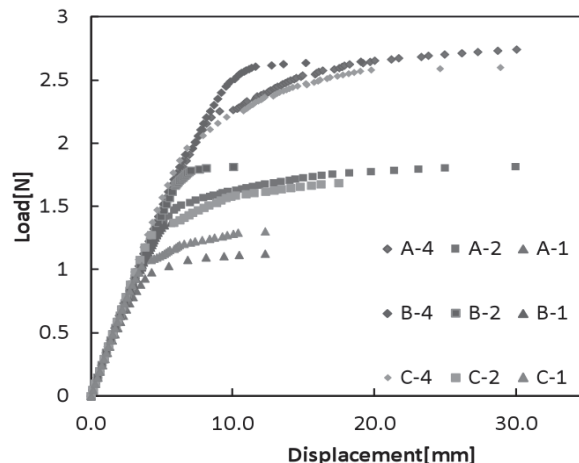


Fig. 4 Bending displacement of Inflatable tube (Pressure: 4.0 kPa)

Fig. 4 より、どの供試体でも荷重が 2N あたりまでは変位が線形的に増加するが、2N を超えたあたりから荷重の増加に対して変位の増加が大きくなっていくことがわかる。解析においてポリイミドフィルムは線形材料として扱うため線形領域におけるデータが必要となる。よって、線形領域のみを抽出し、線形近似することで曲げ剛性の比を得る。以下に内圧 4.0, 2.0, 1.0 kPa における線形近似のグラフを示す。

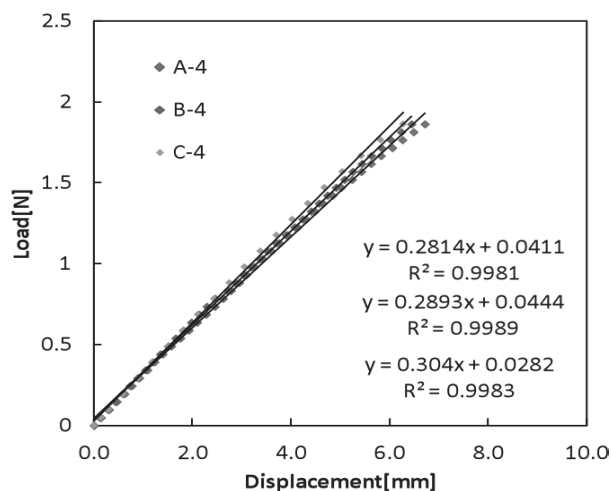


Fig. 5 Linearization of bending displacement (Pressure: 4.0 kPa)

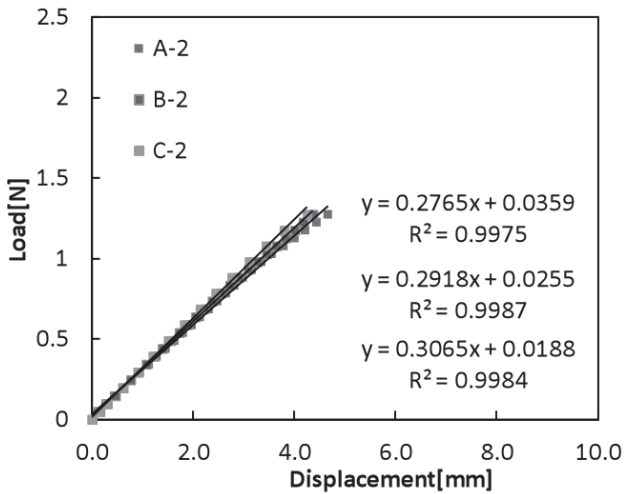


Fig. 6 Linearization of bending displacement (Pressure: 2.0 kPa)

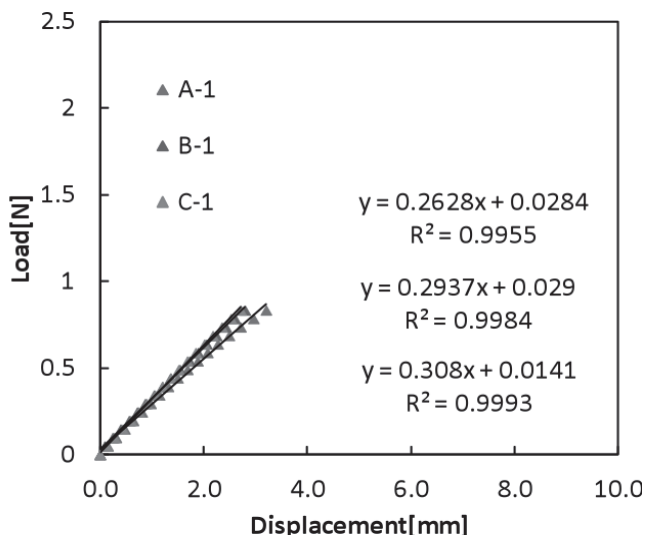


Fig. 7 Linearization of bending displacement (Pressure: 1.0 kPa)

線形近似は線形回帰分析における決定係数である R<sup>2</sup> 値が 0.995 以上になる荷重において行った。この線形近似の傾きが、曲げ剛性の大きさを示すものとなるため、傾きの比を取ることにより曲げ剛性の比を得ることができる。それぞれの傾きをまとめたものを Table 3 に示す。

Table 3 Gradient of load-displacement line

Pressure[kPa]	Type.A	Type.B	Type.C
4	0.2814	0.2893	0.304
2	0.2765	0.2918	0.3065
1	0.2628	0.2937	0.308

Table 3 より、折り目がない供試体 A は内圧が低くなるにつれ曲げ剛性が小さくなるが、折り目を付与した供試体 B, C については内圧が低くなるにつれ曲げ剛性が大きくなる傾向が見られた。また、軸方向の折り目の本数が多いほど曲げ剛性も大きくなっている。次に、解析の指標となる供試体 A に対する供試体 B, C の曲げ剛性の比を Table 4 に示す。この比率を元に解析モデルにおけるヤング率を変化させ固有値解析を行う。

Table 4 Proportion of bending rigidity

Pressure[kPa]	Type.B	Type.C
4	1.028	1.08
2	1.055	1.108
1	1.118	1.172

#### 4. 折り目を考慮した簡易モデルによる解析

##### 4.1 解析の概要

解析では複合領域解析ソルバー MD NASTRAN を用いる。MD NASTRAN は、これまで広く使われてきた MSC NASTRAN を継承しており、航空宇宙業界において構造、熱、流体解析と汎用性の高い解析ソフトである。MD NASTRAN では要素を膜要素で定義ができる。実際にインフレーターチューブの固有値解析に MSC NASTRAN を使用した固有値解析の研究が行われ、実験との比較が行われている<sup>5)</sup>。本研究では、MD NASTRAN 内の陰解法非線形解析ソルバー SOL600 を用いる。SOL600 は大変形や接触問題を考慮した解析が可能である。膜構造は荷重が一定量を超えた場合、急激な変形を起こすことがある。その際に、変形量だけでなく膜同士の接触も考慮する必要がある。このような問題の解析に SOL600 は適切である。ただし、本解析では陰解法に基づく動解析は行っていない。

今回の解析では、折り目を詳細にモデル化せず、曲げ実験から得た曲げ剛性をもとに簡易的にモデル化する。MSC NASTRAN を用いた従来の研究では、折り目のないインフレーターチューブの解析のみが行われている。これは折り目を詳細にモデル化した場合、モデリングに要する時間と、折り目を考慮した解析に複雑なアルゴリズムを構築する必要があり、解析コストが大きくなってしまったためと思われる。そのため、本研究ではチューブの材料指定におけるヤング率を変更するという短時間で制作可能なモデル化による解析を行う。第 3 章における曲げ実験により、インフレーターチューブの曲げ剛性の比率が確認できた。曲げ剛性は EI により表される。また、曲げ試験ではインフレーター

ダブルチューブに曲げ荷重を加えた際の断面形状の変化が研究されており、曲げたわみの線形領域において断面形状の変化は極微小であるという結果が得られている<sup>6)</sup>。つまり、線形領域において断面2次モーメントは変化しない。今回の実験では曲げ実験の線形領域における曲げ剛性の比を取っているため、ここで断面2次モーメント  $I$  は変化しないとした場合、曲げ剛性  $EI$  に対してヤング率  $E$  のみが変わると仮定できる。そのため、解析モデルにおけるチューブのヤング率を変化させ解析を行った。解析は最初に内圧を加えた際の静解析を行う。内圧が加わっていることを確認し、Lanczos 法による固有値解析を行う。

#### 4.2 解析モデル

解析ではインフレータブルチューブをサーフェイスモデルで作成した。Fig.8にMD NASTRANのプリ・ポストウェアであるMD PATRANで作成した解析モデルを示す。

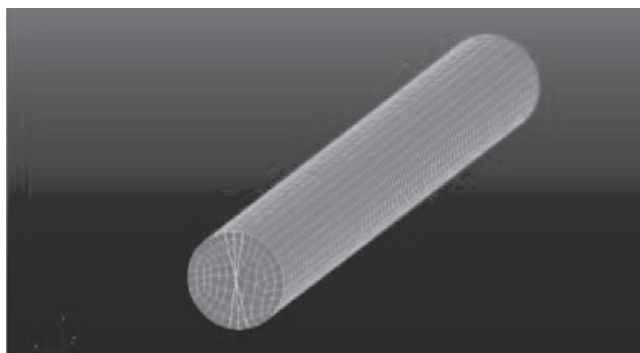


Fig. 8 Analysis model of Inflatable tube

Fig.8 のようにモデルはサーフェイスで構成されたチューブとした。サーフェイスは5つあり、蓋の部分、テープの部分が上下に2つ、チューブ部分が左右に2つとしている。ポリイミド粘着テープの部分はポリイミドの厚さ指定において通常のフィルム厚  $50\mu\text{m}$  とポリイミド粘着テープの厚さ  $56\mu\text{m}$  を足した  $106\mu\text{m}$  として定義した。また、要素は  $10\text{mm}$  刻みで設けたため、軸方向に90要素、周方向に32要素となる。全要素数は2730である。Table 5に、解析モデルの諸元を示す。

Table 5 Specifications of analysis model

Length[m]	0.9
Diameter[m]	0.1
Tube thickness[m]	0.00005
Tape thickness[m]	0.000106
Tape width[m]	0.02
Cap thickness[m]	0.02

インフレータブルチューブの端部に設けた蓋のヤング率は、解析により変形が生じないように、 $50\text{GPa}$  と十分に大きな値に設定した。また、蓋の密度は製作したものの質量から求めた値とした。Table 6に、チューブ、テープ、蓋それぞれのサーフェイスの物性値などを示す。ここで、ISOMeshとは格子状にメッシュを配置するモデリング方法であり、Paverとは対象領域を境界から順に四辺形メッシュを配置するモデリング方法である。

Table 6 Material Properties of tube, tape and cap

	TUBE	TAPE	CAP
Material	Polyimide	Polyimide	Styrol
Young's modulus[GPa]	3.4	3.4	50
Poisson ratio	0.3	0.3	0.3
Density[kg/m <sup>3</sup> ]	1420	1420	51
Mesh modeling	ISOMesh	ISOMesh	Paver

#### 4.3 解析結果

MD PATRANでは解析結果をアニメーションによって視覚的に分かりやすく表示することができる。Fig.9に解析結果の例として、インフレータブルチューブの一次の固有振動モードを示す。

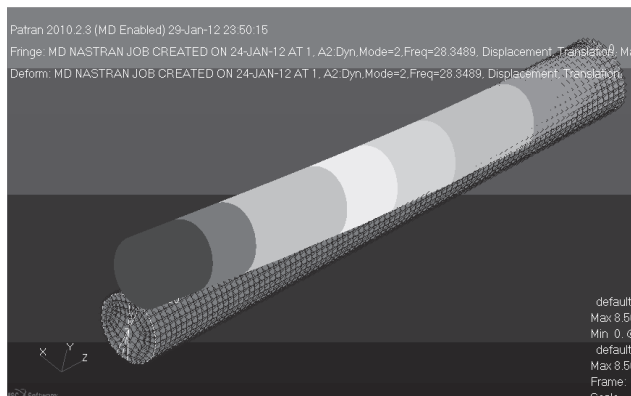


Fig. 9 Result of 1<sup>st</sup> order Eigen-mode

蓋とは反対方向の端部は変位、回転を固定しているためインフレータブルチューブは梁の1次固有モードのように、先端に行くにつれ変位が大きいというモード形状をとる。固有値解析では、モード形状を確認し、テープを貼り付けているY軸方向において変位が生じている固有モードをインフレータブルチューブの1次の固有振動数とした。Fig.10に、折り目なし、折り目4本、折り目6本の解析結果を示す。

解析の結果、折り目4本は内圧  $4\text{kPa}$  において折り目無しと比べ、ほぼ同じ固有振動数を示すことがわかった。そこから、内圧が低下するごとに固有振動数は折り目無しに比べ徐々に高くなり内圧  $1\text{kPa}$  において

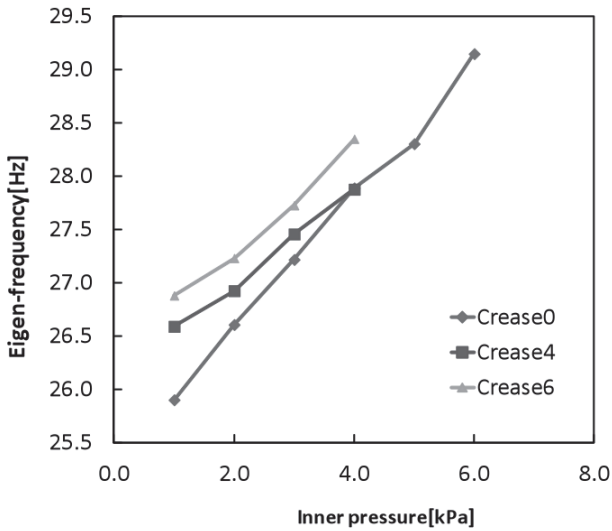


Fig.10 Result of Eigenvalue analysis

約 0.5Hz 高い結果となった。また折り目 6 本については内圧 4kPa においても固有振動数は折り目無しに比べて高くなり、内圧 1kPa において約 1Hz 高くなった。また、解析の全体的な傾向として内圧が低くなるにつれて固有振動数は低下することがわかる。解析結果においても、インフレーターチューブの曲げ剛性が固有振動数に与える影響は、一般的な梁の曲げ剛性が固有振動数に与える影響の 1/2 程度であることがわかった。

## 5. 実験による確認

### 5.1 実験概要

解析で得られた傾向を確認するためにインフレーターチューブの振動実験を行った。供試体は先ほどの解析モデルと同様の寸法で供試体 D, E, F を製作した。Table 7 に諸元を示す。

振動実験ではストリングカット法による減衰自由振動を行い、1 次の固有振動数を求める。実験装置は Fig. 2 で示したものと同様のものである。インフレーターチューブの先端にストリングにより初期変位を与える。初期変位を与えた状態でストリングを切断することにより、インフレーターチューブは自由減衰振動する。その時の変位と時間の関係をレーザー変位計により計測し、高速フーリエ変換することにより 1 次の

Table 7 Specifications of test articles (Type. D, E, F)

	Type.D	Type.E	Type.F
Length[m]	0.9	0.9	0.9
Cap mass[g]	8.0	8.0	8.0
Total mass[g]	31.8	32.3	31.8
Diameter[m]	0.1	0.1	0.1
Crease	0	4	6

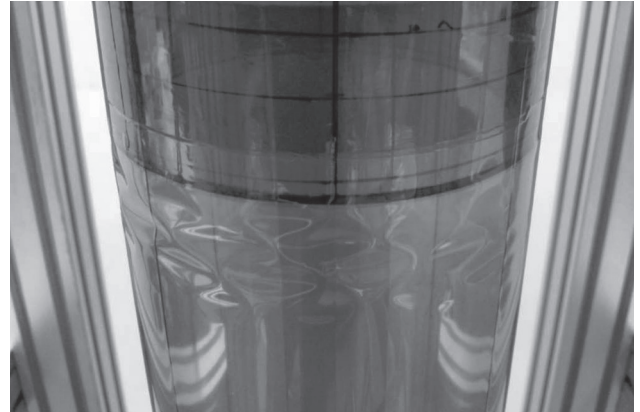


Fig.11 Collapse of Inflatable tube

固有振動数を得る。ここで、条件として初期変位を与えるための初期荷重は 0.5N とした。これは、先ほどの曲げ試験において内圧 1kPa においても曲げ荷重とたわみ量の関係が線形であるためである。

線形領域外の荷重を加えた場合、実験装置接続用治具との接合部において Collapse 現象が発生し Fig. 11 に示すようなダイヤモンドバックリングと呼ばれる折り目が発生する。この折り目が発生した場合、固有振動数が折り目の影響を受けて変化するため、本実験ではこのダイヤモンドバックリングが生じない領域で初期変位を与えて実験を行った。また、実験は、内圧を 6.0kPa から 1.0kPa までは 1.0kPa 刻みで、それに加えて 0.5kPa の場合について行った。

### 5.2 実験結果

実験中において、インフレーターチューブにダイヤモンドバックリングは発生しなかった。Fig. 12 に、折り目無し、折り目 4 本、折り目 6 本における実験結果をまとめたグラフを示す。これよりインフレーター

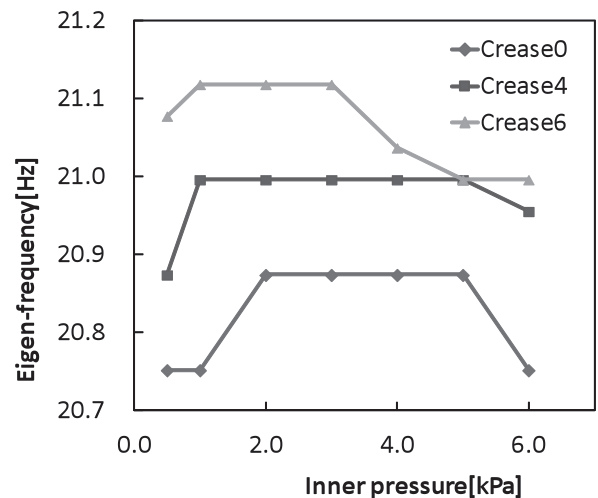


Fig. 12 Result of vibration experiment

ルチューブの固有振動数は、軸方向の折り目の本数が多いほど固有振動数が高いということがわかった。また内圧 1.0kPa では折り目無しと、折り目 6 本で最大 0.4Hz の差が生じた。

### 5.3 解析と実験の比較

解析と実験の結果を比べると、固有振動数の値には 6Hz 程度の乖離が見られる。これはモデル化の際のパラメータの設定や実験条件に起因するものが十分に解析に反映できていないためと思われる。しかし、ここでは、内圧の変化や折り目の有無が固有振動数に与える影響を検討することを重視し考察する。

折り目の有無が固有振動数に与える影響は、実験においても解析結果と同様に、折り目を付与した供試体では固有振動数が高くなるという傾向が見られた。また、折り目の本数が多いほど固有振動数が高くなるという傾向も、解析・実験ともに得られた。さらに、内圧が低くなるにつれて折り目無しと比較して折り目を有する供試体の固有振動数が高くなるという結果が得られた。ただし、解析においては折り目無しと折り目 6 本では最大で 1Hz の差が生じたが、実験では 0.5Hz と約 1/2 の変化であった。このことより曲げ剛性による影響は解析と実験では異なり、解析においては曲げ剛性の影響を 1/2 程度にするのが適当と考えられる。

## 6. まとめ

インフレーターブルチューブの固有振動数は内圧だけでなく折り目の状況によっても変化する。本研究では、折り目を詳細にモデル化することなく、曲げ試験から得られた折り目の有無による曲げ剛性の変化をもとにヤング率を調整することで、固有振動数を求めることが可能であることを明らかにした。また、内圧が低下することによる固有振動数の低下の様子や、折り目の本数が固有振動数の増大に影響を与えることなど、解

析と実験で同様の傾向が見られることがわかった。

### 参考文献

- 1) Tham Sreekantamurty, James L. Gaspar, Troy Mann and Behun, James C. Pearson, Jr, Stephen Scarborough: Nonlinear Structural Analysis Methodology and Dynamics Scaling of Inflatable Parabolic Reflector Antenna Concepts, 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA-2007-1834, 23-26 April 2007, Honolulu, Hawaii.
- 2) Maxim de Jong, Andrew Lennon: Pressure Restraint Design for Inflatable Space Habitats, 10<sup>th</sup> European Conference on Spacecraft Structure, Berlin, 10-13 September, 2007.
- 3) Jin-Ho Roh, Eun-Jung Yoo, In Lee and Jae-Hung Han: Large Deformation Analysis of Inflated Membrane Boom Structures with Various Slenderness Ratios, 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference, AIAA-2007-1807, 23-26 April 2007, Honolulu, Hawaii.
- 4) 内山茂紀, 沖野聡: インフレーターブルチューブの振動解析, 2004 年日本機械学会年次大会講演論文集, 日本機械学会, Vol. 5, pp. 467-468.
- 5) 安池優樹, 古谷寛: 曲げ荷重による断面形状変形を考慮したインフレーターブルチューブの力学特性, 第 24 回宇宙構造・材料シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究所, 2008.12.12.
- 6) 新田力也, 角田博明: インフレーターブルチューブの膜面変形が固有振動数に与える影響, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 日本航空宇宙学会, 2H11, JSASS2010-4341, 静岡県コンベンションアーツセンター, 2010.11.17-19.