

ロールアップ式インフレータブルチューブの展開解析に関する研究

Study on Deployment Analysis of Rolled-Up Inflatable Tube

指導教授 中村義隆

M2014 濱本洋平

Abstract

近年、次世代の大型宇宙構造物として、インフレータブル構造物が注目され、多くの研究がなされている。インフレータブル構造物は、ガス圧によって展開を行うので、複雑な展開機構を必要とせず、収納効率にも優れている。しかし、柔軟な素材で構成されているので、展開時に様々な外乱の影響を受けるため、安定な展開を行うには展開のコントロールが必要となる。

そこで、本研究ではシンプルな機構で、かつ、安定な展開を行うことのできるロールアップ式インフレータブルチューブの展開機構を提案し、実験と数値解析によってその特性を明らかにし、有用性を示した。

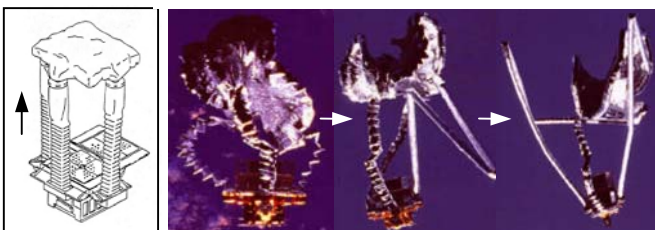
1. 序論

近年、次世代の大型宇宙構造物として、柔軟な素材で作られるチューブなどにより構成されるインフレータブル構造物が注目され、多くの研究がなされている。

これらのインフレータブル構造物は、従来の他の展開式構造物と比較して、大型の宇宙構造物を構築する上で以下に示す特徴がある。

- (1) ガス圧によって展開を行うため、複雑な展開機構を必要とせず、シンプルな機構で展開を行うことが可能である。
- (2) 柔軟な素材で構成されているため、打ち上げ時の収納効率に優れている。
- (3) 柔軟な素材で構成されているため、収納時に生じる折癖や打ち上げ時に内部に残ったガスの影響、インフレーションガスの流量、展開時に受ける外乱の影響等を強く受ける。

実例として、1996年にNASAとJet Propulsion Laboratory (JPL)によって軌道上で行われたInflatable Antenna Experiment (IAE)^[1]では、打ち上げ時の残留ガスやラッチの影響で予期しない展開過程 (Fig.1)を示し、その影響で母船であるSpartanに大きな影響を与えてしまう結果となった。



Expectative Actual Deployment Sequence
Fig.1 Deployment Sequence

この実験から、展開機構のシンプルさや収納効率、コストパフォーマンスなどの面でインフレータブル構造物の有用性が証明されたと同時に、展開挙動をコントロールする必要性が浮き彫りになった。

これらの経験から、より安定な展開を行うために様々な展開方法が提案され、そのひとつにロールアップ式の展開方法 (Fig.2)がある。Fig.2に示す3つの方式は共に、ロール状に巻き上げたチューブの根元からガスを供給することで展開を行い、巻き上げられたチューブの先端に取り付けられた機構、または、チューブ側面に取り付けられたVelcroやConstant Force Springを用いて展開のコントロールを行うことが出来る^[2]。しかし、これらの展開方法は、展開速度のコントロールがしにくいものであったり、用いる機構が複雑になるため改善が必要とされる。



Fig.2 Rolled-up Device^{[3],[4]}

Left: Velcro Rolled-up Device Middle: Constant Force Spring Rolled-up Device (SAR) Right: Wire Brake Rolled-up Device (NGST)

2. 目的

以上の背景を踏まえ、本研究の目的を以下に示す。

- (1) シンプルな展開機構で、安定な展開が可能なロールアップ式展開機構の提案
- (2) 提案した展開機構の特性を展開模擬実験、および、数値解析により定性的に示す
- (3) 提案した展開機構の妥当性を示し、長所・短所を明らかにする

ここで、提案する新しい展開機構は、以下の特徴を持つものとする。

- ・ 多くの複雑な機構を必要としないシンプルな展開機構であること
- ・ 予測可能な範囲で安定に展開が行われ、かつ、展開速度を簡単に調整できること

3. ロールアップ方式による展開機構の提案

Fig.3に、新たに提案するロールアップ式展開機構を示す。この展開機構は、以下に示す特徴を持った機構

である。

- (1) 上下のローラーとそれらを連結するためにローラーの両脇に配置されたスプリングからなる非常にシンプルな機構である。
- (2) 上下のローラーとスプリングによってチューブを挟み込むことで展開の拘束を行い、この展開拘束力を調節することにより展開速度を容易にコントロールすることが出来る。また、展開拘束力を調節することで、展開中の内圧を十分に高く保つ事が可能となる。すなわち、高い剛性を保ちながら安定に展開を行うことの出来る展開方法である。

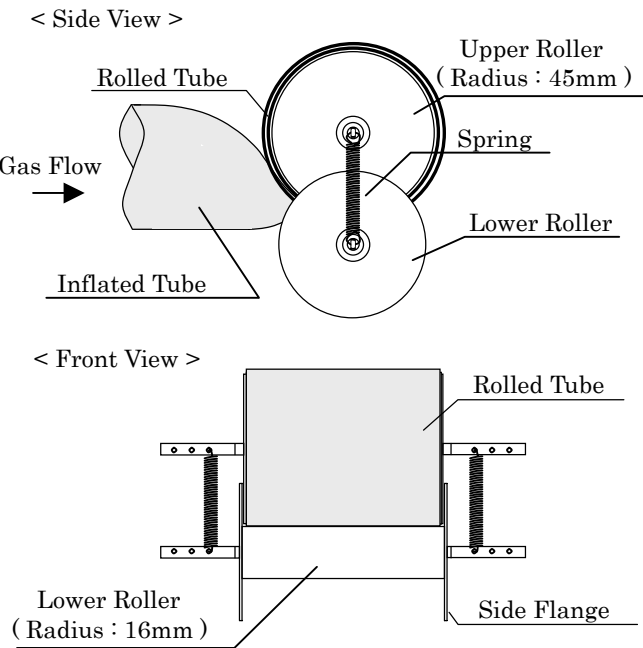


Fig.3 Deployment Control Mechanism

4. 展開特性の確認

新たに提案した展開機構の特性を調べるために行った展開模擬実験の結果、および、数値解析結果を以下に示す。

4.1 展開模擬実験

本実験では、提案した展開機構を用いて、重力や大気圧の影響の下でロールアップ式インフレータブルチューブの展開特性を示し、ガスの流量などが展開時間や内圧に与える影響を明らかにする。

4.1.1 実験装置

実験装置は、チューブの先端に取り付けられた展開機構を 4 m の高さにあるハンガーに吊り下げて実験を行う (Fig.4)。スライダは磁石の反発力によって浮上し、展開機構の動きに対して受動的に移動する。

インフレータブルチューブは、シート状のマイラーフィルムを筒状に成形したもので、直径 75 mm、長さ 2000 mm、厚さ 0.10 mm である。

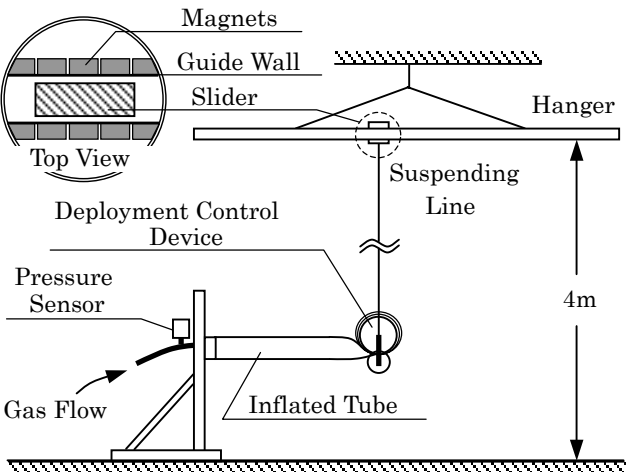


Fig.4 Experimental Setup

4.1.2 実験結果

展開模擬実験では、(1)インフレーションガスの流量、および、(2)スプリングによる拘束力、をパラメータとして行った。展開の様子を Fig.5 に、また、(1)、(2)の実験における展開時間と展開時の平均内圧を Table 1 と Table 2 にそれぞれ示す。

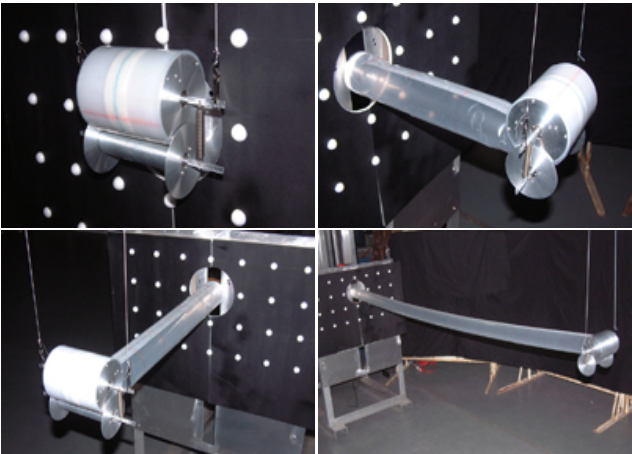


Fig.5 Deployment Sequence

Table 1 Experimental Result (Influence of Gas Flow Rate)

No.	Gas Flow Rate [ℓ/min]	Quantity of Spring	Total Deployment Time [sec]	Average Internal Pressure [Pa]
1	4	1	137	89
2			136	54
3	5		109	78
4			109	81
5	6		92	46
6			90	102

Table 2 Experimental Result (Influence of Holding Force)

No.	Gas Flow Rate [l/min]	Quantity of Spring	Total Deployment Time [sec]	Average Internal Pressure [Pa]
1	4	1	138	101
2			134	126
3		2	132	237
4			131	243
5		3	130	350
6			130	273

実験より得られた、本展開機構の特性を以下に示す。

- ・ 流量の変化は、展開時中の内圧に影響を及ぼさない
- ・ 流量の増加につれて展開時間が短くなる
- ・ 拘束力の増加と共に展開中の内圧が増加する

また、実験を行ったそれぞれのガス流量、および、スプリングの本数の場合において、提案したロールアップ式展開機構は安定な展開を示すことが確認できた。

さらに、各展開挙動の詳細を見ると、それぞれの展開模擬実験において、Fig.6 に示す現象が度々見られた。



Fig.6 Deflection and Wrinkle

(1) チューブのたるみ (Fig.6 Left, Fig.7)

上部ローラーに巻きつけたチューブにたるみが生じる現象が見られた。これは、上部ローラーの回転によって送り出されるチューブの速度と、ガスによる展開によって引き出されるチューブの速度の違いによって生じるものである。

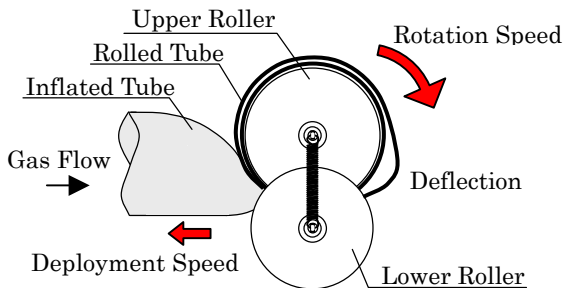


Fig.7 Deflection of Rolled Tube

(2) 巻きつけられたチューブの皺 (Fig.6 Right)

拘束部分に沿うように皺が生じていた。ローラーに巻き上げられる際、チューブのローラー側の面は、反

対側の面に比べて引っ張りが小さくなる。しかし、両サイドの折り目部分では同じ応力状態にならないために、チューブのローラー側の面に皺が生じている。

以上より、本展開模擬実験において、ロールアップ式インフレータブルチューブは、展開終了後に小さな揺れが生じるものの、展開中に生じる不確定なチューブのたるみや皺の影響をほとんど受けることなく安定した展開挙動を示すことを確認した。

4.2 LS-DYNA による数値シミュレーション

前節では、展開模擬実験によって重力と大気圧の影響の下で展開特性を示したが、柔軟な素材で構成されるインフレータブル構造物の場合、地上試験によって、重力や大気圧の影響を排除するのは非常に困難である。

そこで、非線形動的解析コード LS-DYNA で提供されている Control Volume (CV) 法を用いて、ロールアップ式インフレータブルチューブの数値シミュレーションを行う。CV 法は車載エアバッグなどのインフレータブル構造物の数値解析に多く用いられている手法である^[5]。

4.2.1 Control Volume 法によるモデル化

チューブは、閉じた空間である Control Volume を長手方向に連結したものとしてモデル化し、各 CV の境界には面積は CV 間のガスの流量を計算する際の開口部面積として用いられる。

ここで、CV 法は、時間ステップごとに閉じた空間である CV の内圧を熱力学モデルにより計算し、次に、計算された圧力を CV の内面に作用する力として用いて CV の形状を決定する手法である。

4.2.2 計算例

有限要素モデルは、上述のチューブモデルと上下のローラー、及び、ばね要素から成る。収納状態を Fig.8 に示す。チューブの根元部分の運動は拘束されている。計算により得られた展開の様子を Fig.9 に、展開時の CV 内の圧力変化を Fig.10 に示す。

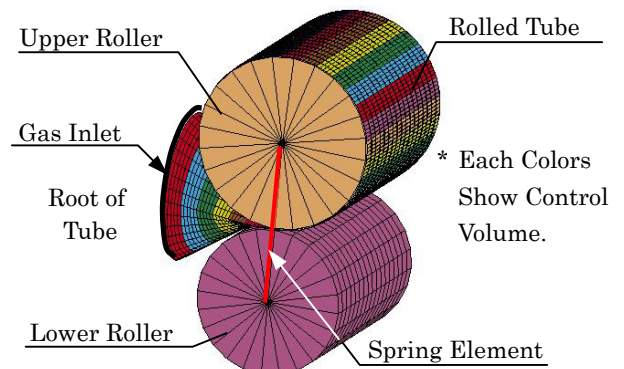


Fig.8 The Packing State of Rolled-Up Inflatable Model

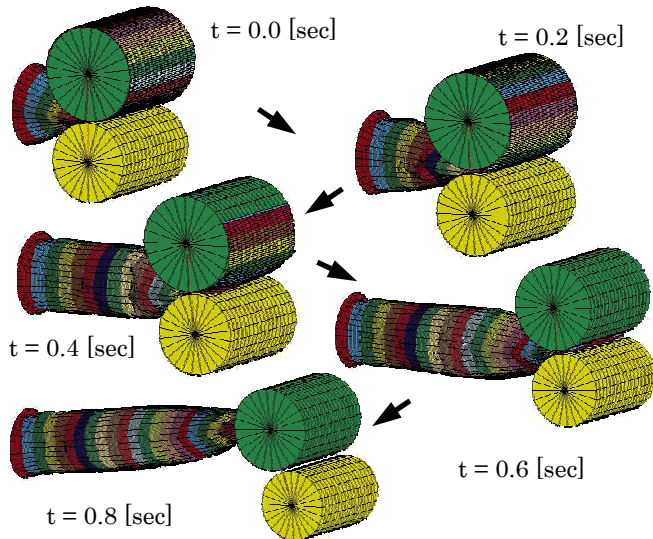


Fig.9 Deployment Process of Numerical Simulation

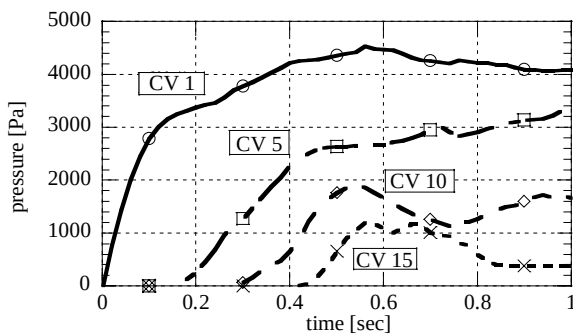


Fig.10 Internal Pressure Change

計算結果より、ガスの流入後、根元から順に内圧が上昇し、膨張したチューブに押されるようにして展開が始まるという実験結果と定性的に良く対応した展開挙動を示すことが出来た。

しかし計算では、展開が進むに連れて、各 CV の内圧は減少する傾向を示す結果となった。

4.2.3 計算結果の詳細に関する検討

本数値シミュレーションでは、以下に示す現象が見られた。

始めに、巻き付けられたチューブのたるみが見られた。これは、ローラーの慣性が大きいため、徐々にローラーの回転速度がチューブの展開速度を上回った為に生じている。また、ローラーの慣性による運動が大きいため、内圧が展開に与える影響よりも、ローラーの慣性運動が展開を支配してしまい、内圧を十分に高く保つ事なく非常に短い時間で展開が行われている。これは、ローラーの

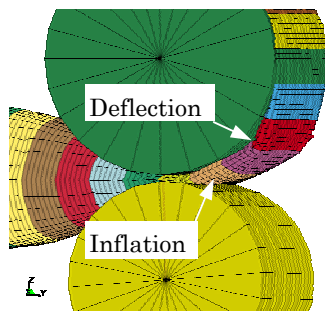


Fig.11 Deflection and Inflation

慣性運動を妨げる力、すなわち、ローラーの軸と軸受けの間に生じる摩擦力が考慮されていない為である。

次に、拘束部分より先の部分に膨張が生じた。この膨張は、CV 法に基づく数値計算にその原因がある。CV 法では、内部の圧力を熱力学モデルによって計算し、この圧力を CV の内側の表面に作用する外力として適用し、CV の形状を決定するため、拘束部分に隙間が無くガスが流れることが出来ない状態であっても、CV が拘束部分にまたがっている場合には、あたかも、巻き上げられている部分にガスが流入したかのように計算されてしまう。

以上より、汎用ソフト LS-DYNA を用いた数値シミュレーションによって、展開挙動を定性的に示し、展開実験結果に良く対応した現象を再現することが出来た。ただし、詳細な展開シミュレーションを行うためには、チューブの自己接触やローラーの軸と軸受けの間の摩擦などを考慮することが必要であることもわかった。

5. 結論

本研究では、非常にシンプルな展開機構で構成されるロールアップ式展開方法の提案を行い、展開模擬実験と数値解析により提案した展開方法の特性を定性的に示した。

また、展開模擬実験より、提案したロールアップ式展開機構は、インフレーションガスの流量によって展開時間を、拘束力によって展開時の内圧を容易に調節できることを示した。

以上より、チューブのたるみや皺などの影響のもとでも、新たに提案した展開機構は安定な展開を示すことがわかった。

参考文献

- [1] David P.Cadogen, Mark S.Grahne; "Deployment Control Mechanisms for Inflatable Space Structures" 33rd Aerospace Mechanisms Conference May 1999
- [2] Christopher H.M.Jenkins; "Gossamer Spacecraft, Membrane and Inflatable Structures Technology for Space Applications", Astronautics and Aeronautics Volume 191
- [3] Charles R.Sandy, "Next Generation Space Telescope Inflatable Sunshield Development", Inst. of Electrical and Electronics Engineers, IEEE paper 306, March 2000.
- [4] David P.Cadogen, Mark S.Grahne; "Deployment Control Mechanisms for Inflatable Space Structures", 33rd Aerospace Mechanisms Conference-May 1999
- [5] John O.Hallquist, "LS-DYNA Theoretical Manual", Livermore Software Technology Corporation", May 1998