展開反力を考慮した宇宙インフレーターブル構造物の展開制御法^{*1}

Deployment Control of Space Inflatable Structures Considering Reaction Forces

中 島 啓^{*2*3}・渡 辺 和 樹^{*4}・角 田 博 明^{*5}・山 川 宏^{*2}
Akira NAKAJIMA, Kazuki WATANABE, Hiroaki TSUNODA and Hiroshi YAMAKAWA

Key Words: Space Engineering, Inflatable Structure, Deployment Control

Abstract: In the process of deployment of an inflatable structure, when the stiffness of the structure increases rapidly, especially at the final moment of deployment, a large reaction force is generated around supporting points with the main body of a spacecraft. It is important to minimize the reaction force when deploying in order to decrease the influence on the satellite attitude and strength of supporting points as much as possible. The purpose of this study is to attain a method of optimal deployment control that minimizes the reaction force generated around supporting part. In order to achieve the goal, feedback control experiments using an electromagnetic valve to adjust the inner pressure was done during deployment of inflatable tube. In addition, the effectiveness of the proposed method was also examined when applying it to the structure of the different size. As a result, it is found that the suppression of the reaction force is attained by about 80% compared with the case where this control is not applied, and the effectiveness of the proposed feedback control method of inner pressure was confirmed. Moreover, considering the volume, it is able to apply this control method even with different scale structures.

1. は じ め に

太陽電池パネルやアンテナなどの宇宙構造物は寸法を大きくすることでその性能を向上させることができるために、近年宇宙構造物の大型化・軽量化の需要が高まっている。しかし宇宙構造物は打ち上げ時にロケットに搭載できる容積や質量に制限があり、大型化のためには軽量材料を用いて展開式にする必要がある。そこで宇宙空間において大規模構造物を構成するのに適している特徴を持ったインフレーターブル構造物に注目が集まっている。インフレーターブル構造物とは軽量材料を用いた柔軟な膜状構造物を地上において小さく折り畳み、宇宙空間においてガス等により膨張展開させ所望の形状を構築するものである。この構造は軽量・高収納率・機構部品の少なさによる低コスト化などさまざまな利点をもたらす。しかし現状においては、「インフレーション挙動の不安定さ」「内圧低下による展開終了後の剛性損失」「スペースデブリによるガスリーク」などの問題を有しており、現在、解決に向けて活発に研究が行われている。中でも、展開を安定的に行うことは、展開信頼性を高くするうえで重要であり、折り畳み方法を工夫したり展開を制御する方法が研究されている^{1~3)}。特に展開時の挙動については、折り畳み方や材質の違い^{4,5)}が展開性能に

与える影響を調べる実験、また展開シミュレーション^{6~9)}やモデル化¹⁰⁾など、さまざまな研究が行われている。一方、インフレーターブル構造が展開する時の支持部に生じる反力に注目した研究は、インフレーターブル構造の薄く軽量の膜状構造の特徴ゆえほとんど行われてこなかった。しかし実際にはインフレーターブル構造の展開過程、特にその最終段階において構造物の剛性が急速に高まり、宇宙船本体との取り付け点などで大きな反力が発生する恐れがある。衛星姿勢や取り付け点強度への影響を極力低減させるために、展開時の反力を評価しその大きさを低減させることは重要である。そこで本研究では、インフレーターブルチューブの展開中の内圧を用いた電磁弁のフィードバック制御による展開時のガス流量の調整により、展開時の反力の低減を行う。展開制御の方法については流量を制御する方法以外にも考えられるが、流量により制御を行うことで、大掛かりな装置が不要であり、制御装置の構成が簡素なものとなるため、軽量・高収納率というインフレーターブル構造の特性を有効に活用できるという利点があげられる。この流量制御という簡便な手法を用いて、発生する支持部反力を極力低減する展開制御方法を構築し、反力低減の可能性を示すことを本研究の目的とする。また得られた制御方法を、相似的に大きくした構造物に適用し、本制御方法適用の有効性を明らかにする。

2. 実 験 装 置

2.1 装置概略 本実験において用いた実験装置の概略

^{*1}©2010 日本航空宇宙学会

平成 20 年 11 月 7 日, 第 52 回宇宙科学技術連合講演会にて発表

平成 21 年 7 月 13 日原稿受付

^{*2} 早稲田大学創造理工学研究科

^{*3} 現 コマツ工機

^{*4} ウェルリサーチ

^{*5} 東海大学工学部

図を第1図に示す。圧縮空気ガスボンベより空気ガスを供試体であるインフレータブルチューブへ流入し、供試体の支持部に取り付けた6軸力覚センサにより展開時の反力を測定する。その際に電磁弁が全開放であるときの流量を30 L/min となるよう設定し、電磁弁の開閉制御により流量を調整する。電磁弁の制御にはPICマイコンを用いて、適宜チューブ内の内圧を読み取りフィードバック制御を行う。また、重力の影響を補償するために供試体上部にヘリウムガス風船を取り付けた。

第1図 実験装置概略図

2.2 供試体 本実験では形状として基本的な構造要素であること、また太陽電池パドルやアンテナなどの支持構造に幅広く適用可能であることから、円筒チューブ型のインフレータブル構造物を用いて実験を行う。第2図にインフレータブル構造物の概観を、第1表にその諸元を示す。また、供試体上面から見た図を第3図に示す。構造物の均一性を保つためフィルムと同素材のテープをチューブ両端に貼り、図のように座標軸を設定する。チューブの折り畳み方は制御時との反力の差異をより顕著にするため、他の多角形折りなどと比較し展開挙動が大きくなるZ折り⁴⁾とする。Z折りとはインフレータブルチューブをジグザグに畳んでゆく折り方で、実験で用いる供試体において折り目線はY軸方向となるようにする。第4図に折り目線を、第2表に各供試体における折り目線の位置を示す。また、供試体作成直後は反力にばらつきがみられた。これは供試体作成直後の折り目の位置が不安定となるため生じるものと考えられる。このため、反力が安定するまで流入排出を繰り返し反力の安定が得られた状態で実験を行った。

第2図 供試体

材質 ポリイミド
厚さ 25 μm
ヤング率 3.4 GPa
供試体 α, β
全長/直径 400/80 mm
供試体 γ
全長/直径 600/120 mm

第1表 供試体諸元

	全長/直径 (mm)	チューブ質 量 (g)	ふたの質量 (g)	全質量 (g)
供試体 α	400/80	5.08	3.82	8.90
供試体 β	400/80	5.06	3.86	8.92
供試体 γ	600/120	11.4	7.55	18.9

第3図 供試体上面図

第4図 供試体の折り目線

第2表 各供試体の折り目線の位置

	各寸法の値 (mm)		
	a	B	c
供試体 α, β	40	80	400
供試体 γ	60	120	600

2.3 電磁弁の制御 本実験においては、マイコンを用いて電磁弁に印加するパルス波を生成し、そのデューティ比を変化させることで流量の制御を行う。マイコンにより生成する電磁弁制御のパルスを第5図に示す。また弁開放割合と流量の関係を第6図に示す。第6図における目標値とは、電磁弁の全開時と全閉時の流量を比例補間したものである。

2.4 測定の精度 本実験において用いた6軸力覚センサの分解能は約0.006 Nである。よって測定結果は小数点以下2桁にまとめることとする。本実験では、供試体作成時の誤差や折り目位置のずれにより供試体ごとに個体差があると考えられるため、反力の絶対値という観点からの実験の再現性は低いと考えられる。しかし、反力のレンジは異なっているにもかかわらず、展開時の基本的な特性は同様であることから流量による特性に関しては再現性を有していると考えられる。

第5図 電磁弁制御パルス

第6図 弁開放割合と流量の関係

3. 展開制御実験

3.1 予備実験 インフレーターチューブ展開時の基本的な特徴を確認するため、制御を行わずに展開した時の反力と内圧の変化を測定する。ここでは電磁弁の開放割合を 100 % (30 L/min) として展開を行う。なお次節の制御開始タイミング検討においては供試体 α を用い、それ以降の実験においては供試体 β を用いた。これは実験の繰り返しによって供試体の劣化と破損が発生したためである。第7図に供試体 β の Y 軸方向についての反力の時間推移を、第8図に展開時の内圧の時間推移を示す。また、第9図に同条件にて測定した Y 軸方向の反力の展開完了時の約 0.4 秒間の抜粋図を、第10図に反力の周波数分布を示す。第7図より展開完了時のチューブが大きく変形した瞬間に最大反力が生じていることがわかる。逆に展開開始後からの膨張時には反力がほとんど生じていないことが確認でき、供試体 α 、 β それぞれの X 軸、Y 軸についてこれらと同様の特徴が確認された。反力については、展開時の首振りによる慣性の影響や塑性変形した折り目の伸びによる影響などの複合的な要因が挙げられ、特定することは困難であるが、第10図に示した反力の周波数分布より、特定の周波数帯にピークを持つことから、供試体の振動が反力に影響を与えていることが考えられる。この供試体の振動については、折り目を有する構造ゆえ複雑な振動モードを有していると推測でき、この振動と反力や挙動についての関係性を明らかにしていくことはインフレーター構造物について議論していく中で重要であり、今後の課題である。以上を鑑みて、本実験においては、振動と反力・展開挙動についての関係性を明らかにしていくことの前段階として、複雑な振動モードの中でも、円筒形はりに類似した振動モードに影響すると考えられる展開時の首振りや、より高次の振動モードに影響すると考えられる塑性変形した折り目の伸びを、流

量の調節により最終段階をゆっくり展開させることにより、反力の低減化を狙いとし、検討していくこととする。また第8図より内圧についても展開中の上昇は過去の研究^{8,9)}と同様に微増にとどまっており、展開が完了する瞬間に急激に上昇していることがわかる。供試体 α と供試体 β において反力に差異が確認されたが、その理由としては、供試体の作成精度の誤差によるものと考えられる。具体的に述べると、薄膜であるポリイミドフィルムを円筒形につなぎあわせる際のずれや折り目位置のずれが影響を与えていると考えられる。また、風船による微小重力模擬の妥当性について述べると、風船の振動などが反力に影響を与えるとすれば、風船のひもがある程度の長さを有していることより、第10図において低周波数帯の強度が高く出ることが考えられる。しかし、そのようにはなっておらず、風船の挙動によって反力に影響を与えていることは考えにくく、反力に注目する限りにおいては、風船による微小重力模擬の妥当性がうかがえる。

3.2 制御開始タイミング検討

先の予備実験より展開終了直前以外の供試体の膨張過程においては流量が反力にほとんど影響していないと考えられ、展開の途中において制御を行ってもその効果はあまり期待できない。また、インフレーター構造物は展開中に外乱の影響を受けやすい状態にあると考えられ、展開時間が長くなるのは好ましいことではない。よって制御開始のタイミングについて検討をする。反力への影響が少ない範囲を測定するために、はじめ最大流量である 30 L/min で展開を開始し供試体体積の一定割合まで流入後に弁開放割合を 30 % (約 10 L/min) とし、この最大流量で流入する割合を変化させ最大反力を測定する。例をあげれば、最大流量での流入割合 0 % とは展開開始から流量を 10 L/min とすることである。結果を第11図に示す。第11図よりチューブ体積 80 % を境界に反力が上昇していることがわかる。よって制御開始のタイミングをチューブ体積 80 % 流入後とすれば良いが、以降の制御の一般性を考慮し、余裕をもたせ、制御開始のタイミングをチューブ体積 70 % 流入時点として以降の実験を行うこととする。

第7図 反力の時間推移(供試体 β , Y 軸方向, 制御なし)

第8図 圧力の時間推移(供試体β, 制御なし)

第9図 反力の時間推移(供試体β, Y軸方向, 一部抜粋)

第10図 反力の周波数分布

3.3 最適流量測定実験 展開完了時における流量と反力の関係について検討を行うために、次のような条件で実験を行う。当初流量は最大流量である 30 L/min にて制御開始となる供試体の体積割合 70 % まで流入させ、制御開始後に各種設定した弁開放割合に変化させてそれぞれの最大反力を測定する。その際、流入開始前の初期内圧に対して 0.2 kPa 上昇で流入停止、初期内圧に対する上昇分が 0.2 kPa を下回ると流入再開となるように、内圧上昇値に対するガス流入のオン/オフ・フィードバック制御を適用する。流入開始直前の内圧を基準としたのは、供試体内部の残存気体の完全排出が困難なためである。また、本実験において内圧の判定基準を 0.2 kPa としたのはマイコンと圧力センサの分解能の限界を用いたからである。なお本研究における内圧制御の目的は、展開完了時の反力を低減させることを第一義的に考えており、展開完了時の反力の発生と同時に生じる内圧上昇の初期段階をとらえることで流入を一時停

止させ、最終段階をゆっくり展開させることで反力を低減させることを考えている。したがって、展開完了時の流入量と内圧は制御の有無において同一となることを前提としていない。実験結果を第12図に示す。また内圧によるフィードバック制御の有効性を確認するために、弁開放割合 10 % における展開で、フィードバック制御を行わなかった時の展開反力についても測定を行った。その比較を第3表に示す。第12図は制御開始後の弁開放割合を 10 % (3.65 L/min) 以下とすることで反力の低減が可能であることを示している。つまり展開完了時の反力が上昇する瞬間の流量を 3.65 L/min とすることで反力を減少することができることを示している。また第3表においてフィードバック制御の有無による反力の差異からも内圧によるフィードバック制御の有効性が確認できる。

第11図 最大流量での流入量と最大反力の関係

3.4 最適制御パターン検討 前述のようにインフレーター構造物の展開途中は外乱の影響を受けやすく不安定であると言え、展開時間の短縮は重要である。そこで前節における制御開始後の弁開放割合を 10 % とするパターンを基本とし、より展開時間を短縮するためにさまざまなパターンについて検討を行った。結果を第4表に示す。前節の結果より、反力を最も低減することができる弁開放割合 10 % (流量 3.65 L/min) となるときのチューブ体積に注目する。第4表より、パターン A では弁開放割合 10 % となるときのチューブ体積は 85 % となっているが反力の低減はできていない。次にチューブ体積 80 % において弁開放割合 10 % となるようなパターン (B, C, D) について実験した結果、反力を基本のパターンとほぼ同程度まで抑えることができていたことがわかる。特にパターン C はチューブ体積 80 % まで最大流量でガスを流入したものでありこの条件においては展開時間の最も速い制御である。これより、チューブ体積 80 % において弁開放割合 10 % となっていれば最小の反力が得られることが示されており、この結果はタイミング測定実験における結果とも整合性がみられる。展開速度においてはパターン C が最も優れているが、異なる寸法の供試体への本制御の適用を考慮し、徐々に流量を減少させ、制御に余裕を持たせたパターン D について次章以降制御の一般性を検討してゆく。パターン A, B, C, D の詳

細について第5表～第8表に示す。また、パターンDにおけるY軸方向の展開反力の時間推移を第13図に示す。パターンDの制御を用いることで、供試体βのY軸方向における最大反力を、制御なし時の1.14 Nに対して、0.23 Nに低減されていることがわかる。

第12図 制御開始後の弁開放割合と最大反力

第3表 内圧による制御の有無による最大反力の違い

弁開放割合 (%)	内圧によるフィードバック制御	最大反力 (N)	
		X方向	Y方向
100	無	0.89	1.14
100	有	0.39	0.41
10	無	0.32	0.38
10	有	0.21	0.23

第4表 各パターンでの測定結果

パターン	流量 3.65 L/min と なるときの体積 (%)	最大反力 (N)		理論展開 時間 (s)
		X方向	Y方向	
基本	70	0.21	0.23	12.73
A	85	0.37	0.39	9.71
B	80	0.24	0.26	10.71
C	80	0.21	0.29	9.83
D	80	0.22	0.23	10.53

第5表 パターンA詳細

弁開放割合 (%)	流入割合 (%)	累積流入割合 (%)
100	70	70
50	5	75
30	5	80
20	5	85
10	展開完了まで	展開完了まで

第6表 パターンB詳細

弁開放割合 (%)	流入割合 (%)	累積流入割合 (%)
100	70	70
50	5	75
20	5	80
10	展開完了まで	展開完了まで

第7表 パターンC詳細

弁開放割合 (%)	流入割合 (%)	累積流入割合 (%)
100	70	80
10	展開完了まで	展開完了まで

第8表 パターンD詳細

弁開放割合 (%)	流入割合 (%)	累積流入割合 (%)
100	70	70
60	4	74
40	3	77
20	3	80
10	展開完了まで	展開完了まで

第13図 パターンDにおける反力(Y軸方向)

4. 相似的に大きくした供試体での制御実験

大規模構造物において本研究の制御の適用可能性を検討するため、前章までに構築した制御方法が相似的に大きくした構造物においても同様の効果が得られるかについて検討を行う。ここで相似的という表現については、チューブの材質や厚さは一定に保ったままで、寸法のみを変化させたことを表す。特に構造物の寸法が変化するとき、制御方法の適用や特徴を確認できれば本方法を多くの構造物に適用することができる。そこで前章までに使用した供試体の各寸法を1.5倍とした供試体γについて、検討を行った。前章までに用いた供試体βでの実験と同様に制御開始より弁開放割合を各種設定し展開時の最大反力を測定する。その際前章と同様の内圧によるフィードバック制御を行う。結果を第14図に示す。第14図より、制御開始より弁開放割合を40%以下とすることで反力を低減出来ることがわかる。ここで弁開放割合40% (流量 12.35 L/min)は前章までに使用した供試体での反力最小とする流量 3.65 L/min の3.38倍となっている。本章において用いた供試体γは供試体βに比べて直径・全長がそれぞれ1.5倍としているため、体積は3.38倍となっている。これよりインフレーション構造物の展開時の反力についての流量の特性は体積による相

似性を有しているのではないかと予想される。そこで、前章において用いた制御のパターンDとパターンDの流量を体積と同じ倍率にしたものについて検討を行う。ただし流量を体積と同じ倍率としたときに最大流量である 30 L/min を超えてしまうものに関しては流量を 30 L/min と設定した。結果を第9表に示す。第9表より、パターンDにおいても、その流量を体積と同じ倍率にしたものについても反力を低減できていることが確認できる。つまり、相似的に大きくした構造物に対して相似的に流量を大きくして同様の制御を行うことで反力を低減化し得る可能性があることを示している。

第14図 相似的に大きくした供試体 (γ) においての実験結果

第9表 相似的に大きくした供試体 (γ) への制御の適用結果

パターン	最大反力 (N)		理論展開時間 (s)
	X 方向	Y 方向	
制御無し	1.19	0.93	13.6
パターンD	0.22	0.22	35.5
パターンD 体積比例の等価流量	0.25	0.25	17.6

5. 結 言

本研究では、マイコンを用いた内圧によるフィードバック制御と電磁弁の制御を行い、内圧のフィードバックによ

るインフレータブルチューブの展開制御の有効性を確認した。その結果、今回用いた供試体においては制御をしていない時と比較し、最大反力を約 80 % 低減できる結果を得た。これにより、流量制御という簡素な構成で、展開時の反力を低減できる最適な制御パターンの可能性を明らかにした。同時に、相似的に大きくした供試体への実験を行うことにより、相似的に大きくした構造物において制御流量を相似的に扱い得る可能性を有していることを確認した。これにより大型の構造においても本研究における制御手法の適用は有効である見通しが得られた。

参 考 文 献

- 1) Grahne, M. S., Cadogan, D. P. and Lin, J. K. : Inflatable Solar Arrays Concept to Reality, 50th International Astronautical Congress, Amsterdam, IAF-99-I.1.09, 1999.
- 2) Guidanean, K. and Williams, G. T. : An Inflatable Rigidizable Truss Structure with Complex Joints, Proceedings of 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Long Beach, AIAA-98-2105, 1998, pp. 2797-2806.
- 3) Freeland, R. E., Bilyeu, G. D., Veal, G. R. and Mikulas, M. : Inflatable Deployable Space Structures Technology Summary, 49th IAF Congress, IAF-98-I.5.01, 1998.
- 4) Tsunoda, H., Senbokuya, Y. and Watanabe, M. : Deployment Characteristics Evaluation of Inflatable Tubes with Polygon Folding under Airplane Microgravity Environment, Space Technology, Lister Science, **25**, 3-4 (2005), pp. 127-137.
- 5) Tsunoda, H. and Senbokuya, Y. : Deployment Characteristics of Rigidizable Space Inflatable Structures, Space Technology, Lister Science, **23**, 2-3 (2003), pp. 119-129.
- 6) 高野昌弘, 永田晴紀, 工藤 勲: インフレータブルチューブの無重力環境における展開シミュレーション, 日本機械学会論文集 C 編, **65**, 633 (1999), pp. 244-250.
- 7) 戸谷 剛, 潮 敬之, 永田晴紀, 工藤 勲: 折り目が残るインフレータブルチューブの微小重力下での展開挙動, 日本機械学会論文集 C 編, **67**, 655 (2001), pp. 43-50.
- 8) Wang, J. T. and Johnson, A. R. : Deployment Simulation of Ultra-Lightweight Inflatable Structures, 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Denver, Colorado, AIAA-2002-1261, 2002.
- 9) Salama, M., Kuo, C. P. and Lou, M. : Simulation of Deployment Dynamics of Inflatable Structures, AIAA J., **38**(2000), pp. 2277-2283.
- 10) 勝又暢久, 山川 宏: 衛星のスピン軸方向に伸展する超軽量アンテナの簡易モデル化と動的挙動に関する検討, 第 51 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 2K15, 2007.