

インフレーターブル伸展部材における折り目の影響

Effect of creases on Inflatable boom

指導教授 宮崎康行

M8014 平井康章

1. 緒言

近年宇宙構造物は大型化が要求され、インフレーターブル構造物の宇宙利用への期待が高まっている。インフレーターブル構造(袋状の膜材を気体による内圧によって膨らませて利用する軽量構造)は、軽く、収納性が良く、簡単に展開して使える、などの利点があり、宇宙に持って行って使う構造に求められる多くの性能を兼ね備えている。近年は安定した膨張展開のための折り畳み法^[1]や宇宙インフレーターブル構造物の硬化技術^[2]などの研究が活発に行われている。

一方、インフレーターブル構造物で使われるインフレーターブル伸展部材には、折り畳んだ状態から伸展するため伸展した構造物には折り目が存在する。現在は、この折り目は高い内圧をかける事で伸展後の構造物に対して影響は小さいとして扱われている。しかし、折り目は展開に対して少なからず影響を与えると考えられる。本研究では低い内圧におけるこの折り目に注目し、インフレーターブルチューブ(袋状の膜にガスを注入することで膨張する構造物であり、膨張後の形状がチューブ状になっているもの)を対象に、折り目が伸展中、伸展後の構造物にどのような影響があるかを調べる。また本研究では、汎用有限要素解析ソフトである Abaqus Student edition6-8-2^[3]を使用し解析を行う。研究のアプローチとしては、折り目をバネとしてモデル化し(2節)、モデル化したバネ定数を計測する(3節)。またその実験結果を Abaqus で評価し(3-3節)、Abaqus におけるインフレーターブルチューブの解析モデルを示す(4節)。そして Abaqus におけるインフレーターブルチューブの伸展状況を折り目がある場合とない場合とで比較する(5節)。最後に考察・結言、今後の課題を述べる(6,7節)。

2. 折り目モデル

折り目による復元力を、バネによる力として考え、本研究では折り目をバネとして模擬する。この時のバネの位置を、折り目から最も遠い位置に選び、初期状態を完全に折り畳んだ状態とした(Fig.1)。よって、実際よりも強い復元力が働き、現実より厳しい条件、展開しにくい解析になる。

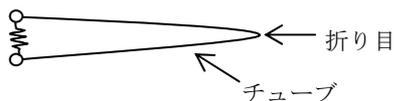


Fig.1 折り目モデル

また本研究での折り方は八角形折りを用いる(Fig.2)。八角形折りでは折り目は Fold1、2に分ける事ができ(Fig.3)、それぞれの折り目のバネ定数を k_1 、 k_2 とする。また本研究で用いる折り目の大きさは、長い折り目が 30[mm]、短い折り目を

10[mm]とした。またひとつの折り目のペアの高さは 20[mm]である。



Fig.2 八角形折り
(左: 折り目の様子 右: 正面図)

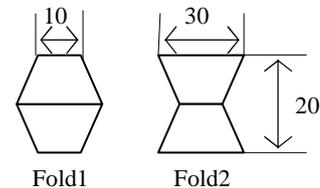
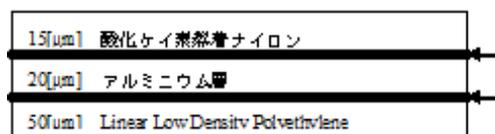


Fig.3 八角形折りの折り目

またインフレーターブルチューブはアルミラミネート材であり、厚さ 90[μ m]、チューブの材料構成は Fig.4 に示すように外側から Ny15/DRY/AL20/DRY/LLDP50 となっている。



← ドライラミネート

Fig.4 チューブの材料構成

3. 折り目剛性測定実験

3-1. 実験目的・概要

本実験では、バネ定数 k_1 、 k_2 を測定する(Fig.5)。

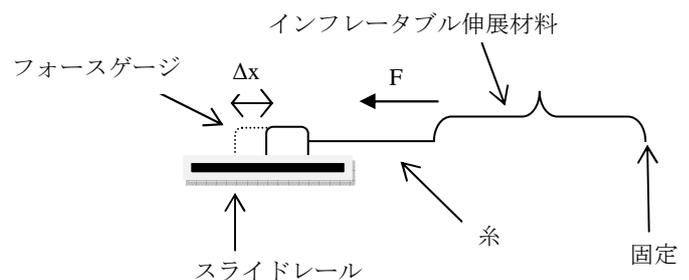


Fig.5 実験概要

試料の一端を固定し、もう一端を糸で引っ張る。まず糸が垂れない程度に引っ張り、そこから圧縮し、糸が垂れてきたら、もう一度引っ張るという動作を2回行った。その時の力Fをフォースゲージで、変位Δxをスライドレールで測定し、フックの法則

$$F=k\Delta x \quad (1)$$

にそれぞれ代入し、バネ定数kを求める。

3-2. 実験結果

0.20[N]付近だと折り目は完全に伸展したため、完全に伸展する前である0.15[N]以下のFold1、2の実験結果をそれぞれFig.6、7に示す。

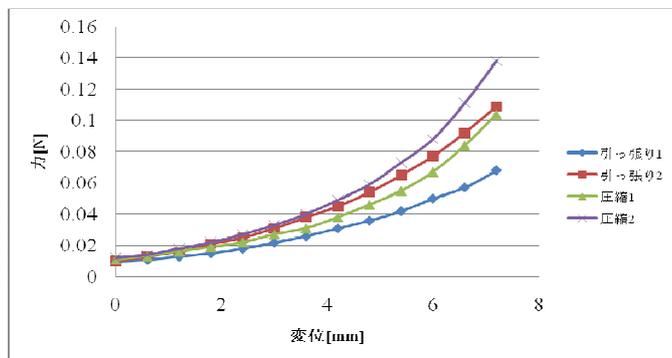


Fig.6 Fold1 の実験結果

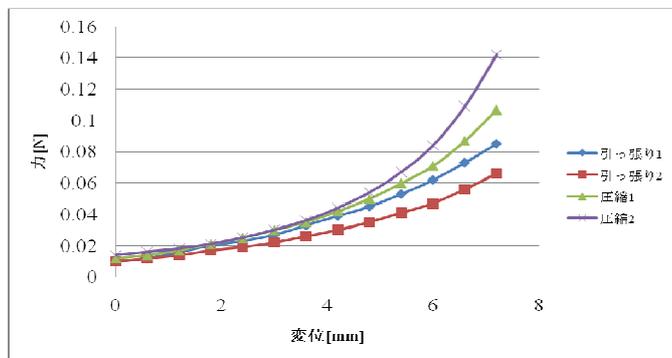


Fig.7 Fold2 の実験結果

それぞれのグラフの傾きより k_1 、 k_2 はそれぞれ以下のように求められた。

$$k_1=12.9[\text{N/m}]$$

$$k_2=12.0[\text{N/m}]$$

3-3. 実験結果の Abaqus での評価

Fold1、2 それぞれの実験結果を Abaqus で評価する。モデルの材料特性を Table1 に示す。

Table1 材料特性

ヤング率[GPa]	7.0	
密度[kg/m ³]	14.4×10 ²	
ポアソン比	0.3	
バネ定数[N/m]	k_1	12.9
	k_2	12.0

Fig.8、9に Abaqus における Fold1、2の伸展の様子を示す。実験で得たバネ定数 k_1 、 k_2 をそれぞれの折り目のバネに用いて折り目を表現した。一端を固定し(Fig.8、9においては上部を固定)、もう一端を0.10、0.20、0.30[N]で引っ張った。

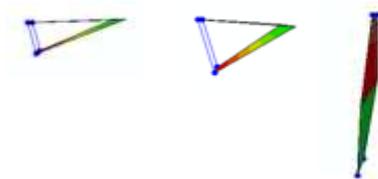


Fig.8 Fold1 の Abaqus での様子
(左:0.10[N] 中:0.20[N] 右:0.30[N])

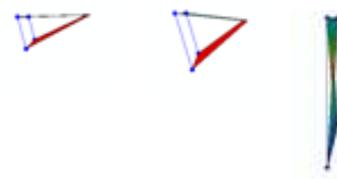


Fig.9 Fold2 の Abaqus での様子
(左:0.10[N] 中:0.20[N] 右:0.30[N])

Fig.8、9より、Fold1、2ともに0.30[N]で引っ張ると完全に伸展した。実験では0.20[N]で完全に伸展した。Abaqusでは、初期状態を完全に折り畳んだ状態としている。実際はある角度のついたところが外力0の状態であり、この差が原因だと考えられる。

4. Abaqus での解析モデル

本研究では、折り目がある・ないという2種類のモデルを考える。要素数を49個、148個、592個のそれぞれType-1、2、3(Fig.10)の3種類のモデルを作成した。

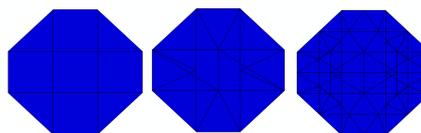


Fig.10 折り目の様子(左:Type-1 中:Type-2 右:Type-3)

またここで無次元数 ζ を(2)式のように定義する。

$$\zeta = \frac{\text{内圧}}{\text{ヤング率}} \quad (2)$$

$\zeta=7.14 \times 10^{-5}$ 、 1.42×10^{-4} を1秒間かけ解析を行う。材料特性はTable1を用い、モデルの全長は12[cm]である。

5. Abaqusでの解析結果

この節では、Type-1、2、3それぞれに折り目のバネを入れた場合と入れない場合とで比較を行った。その様子をFig.11、12、13、14、15、16に示す。

5-1. Type-1の解析結果



Fig.11 Type-1の $\zeta=7.14 \times 10^{-5}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)



Fig.12 Type-1の $\zeta=1.42 \times 10^{-4}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)

5-2. Type-2の解析結果

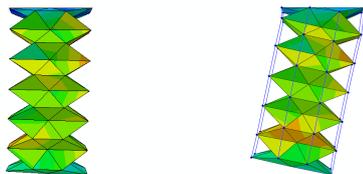


Fig.13 Type-2の $\zeta=7.14 \times 10^{-5}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)

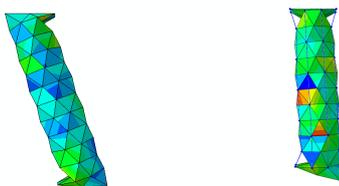


Fig.14 Type-2の $\zeta=1.42 \times 10^{-4}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)

5-3. Type-3の解析結果

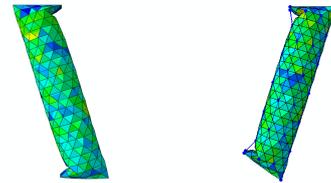


Fig.15 Type-3の $\zeta=7.14 \times 10^{-5}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)



Fig.16 Type-3の $\zeta=1.42 \times 10^{-4}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)

5-4. 応力集中モデルの解析結果

Type-2、3では $\zeta=7.14 \times 10^{-5}$ 以上だと根元や先端に応力集中が生じ、真っ直ぐに伸展しなかった。この応力集中を解析するため応力集中が生じた部分の要素を細かくしたモデルを、それぞれ次のType-4、5、6の3種類を作成し $\zeta=7.14 \times 10^{-5}$ 、 1.42×10^{-4} を1秒間かける解析を折り目あり・なしの2種類で行った(Fig.17、18、19、20、21、22)。

Type-4：根元のみ要素を細かくしたモデル

Type-5：先端のみ要素を細かくしたモデル

Type-6：根元+先端の要素を細かくしたモデル

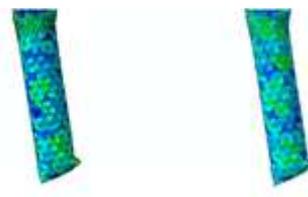


Fig.17 Type-4の $\zeta=7.14 \times 10^{-5}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)

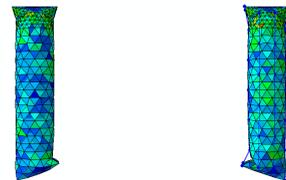


Fig.18 Type-4の $\zeta=1.42 \times 10^{-4}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)

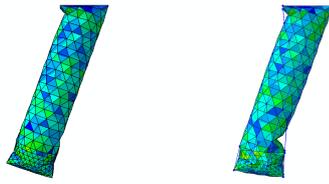


Fig.19 Type-5 の $\zeta=7.14 \times 10^{-5}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)



Fig.20 Type-5 の $\zeta=1.42 \times 10^{-4}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)



Fig.21 Type-6 の $\zeta=7.14 \times 10^{-5}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)



Fig.22 Type-6 の $\zeta=1.42 \times 10^{-4}$ の解析結果
(左：バネなし 右：バネあり)

6. 考察・結言

Fig.11～16 の 1 秒後の全長を Table2、3 に示す。

Table2 Type-1～3 の 1 秒後の全長(折り目なし)

	$\zeta=7.14 \times 10^{-5}$	$\zeta=1.42 \times 10^{-4}$
Type-1[cm]	6.45	7.86
Type-2[cm]	6.07	10.52
Type-3[cm]	10.78	11.92

Table3 Type-1～3 の 1 秒後の全長(折り目あり)

	$\zeta=7.14 \times 10^{-5}$	$\zeta=1.42 \times 10^{-4}$
Type-1[cm]	6.42	7.78
Type-2[cm]	6.09	11.13
Type-3[cm]	11.42	11.92

Fig.17～22 の 1 秒後の全長を Table4、5 に示す。

Table4 Type-4～6 の 1 秒後の全長(折り目なし)

	$\zeta=7.14 \times 10^{-5}$	$\zeta=1.42 \times 10^{-4}$
Type-4[cm]	11.54	11.82
Type-5[cm]	10.88	11.71
Type-6[cm]	11.01	11.51

Table5 Type-4～6 の 1 秒後の全長(折り目あり)

	$\zeta=7.14 \times 10^{-5}$	$\zeta=1.42 \times 10^{-4}$
Type-4[cm]	11.53	11.92
Type-5[cm]	10.50	11.71
Type-6[cm]	11.04	11.52

Fig.13、14、15、18、19、21 より、根元と先端に折り目の影響が表れた。つまり八角形折りにおいて根元と先端に応力集中が生じることが分かった。また Table2、3、4、5 より折り目が直接的に伸長に影響はなく、折り目が引き起こす応力集中により伸長に影響がある事がわかった。

また Type-1 では応力集中が生じず、それ以外では応力集中が生じ、根元や先端が座屈した。これは実モデルにおいて八角形折りでは応力集中が生じる事を示唆している。有限要素法では要素が粗いと実モデルよりも変形しにくいモデルとなる。Type-1 では要素が粗すぎたため実モデルよりも変形しづらいモデルとなり、応力集中が生じず、この伸長解析のモデルとしては不十分なモデルになっている。従って Type-2、3、4、5、6 の応力集中解析結果は、実モデルに近い結果となっている。

7. 今後の課題

本研究では、バネの自然長を完全に折り畳んだ位置に設定していたが、実モデルでは異なる。実モデルでは伸長時の初期段階では折り目により伸長しやすく、伸長最終段階に伸長しにくくなると考えられる。この効果を考慮することで、より実モデルに近い伸長運動予測が可能となると考えられる。

参考文献

- [1] Kei Senda, Tomoyuki Oda, Shunsuke Ohata, Yusuke Igarashi, Akihito Watanabe, Toshiyuki Hori, Hiroaki Ito, Hiroaki Tsunoda, Kazuki Watanabe, 「Deploy Experiment of Inflatable Tube using Work Hardening」、AIAA 2006-1808、2006
- [2] 渡邊秋人、酒井良次、堀利行、伊藤裕明、樋口健、渡辺和樹、「三軸織物を用いた光硬化型宇宙インフレーション構造技術の検討」、第 50 回宇宙科学技術連合講演会講演集、pp1693-1698
- [3] Jacob Fish, Ted Belytschko 著；永井学志、松井和己訳:「有限要素法」、丸善(2008)
- [4] 「Abaqus/Standard User's Manual Volume1、2、3(日本語版)」、Hibbit,Karlsson&Sorensen,Inc.
- [5] 樋口総太郎、「数値解析によるスピン展開膜面の折り畳み法の比較」、平成 18 年度修士論文