

# リンクリングによる構造非線形性を考慮した スーパープレッシャー気球の有限要素解析

志村友章\*<sup>1</sup> 中篠恭一\*<sup>2</sup> 斎藤芳隆\*<sup>3</sup> 井筒直樹\*<sup>3</sup> 山田和彦\*<sup>3</sup>

## Finite Element Analysis of Super Pressure Balloon with Wrinkling

by

Tomoaki SHIMURA\*<sup>1</sup>, Kyoichi NAKASHINO\*<sup>2</sup>, Yoshitaka SAITO\*<sup>3</sup>, Naoki IZUTSU\*<sup>3</sup>  
and Kazuhiko YAMADA\*<sup>3</sup>

(Received on Mar. 30, 2009 and accepted on Jul. 6, 2009)

### Abstract

Finite element analysis of a lobed-pumpkin-shaped super pressure balloon was conducted using a novel membrane element model derived from tension field theory. Numerical results of the finite element analysis were compared with the results of past studies (i.e. numerical results based on particle-based membrane models and also experimental results of models one-thirds the actual size). We found the present numerical results are in good agreement with the previous results. We have also found that the loosening rate (a fundamental design parameter for lobed-pumpkin-shaped super pressure balloon) significantly affects the stress distributions of the balloon's gore film. Through the numerical analysis, we present that the stresses of gore film are effectively reduced with the local decrease of the loosening rate.

**Keywords:** Membrane, Finite element analysis, Super pressure balloon, Tension field theory

## 1. はじめに

### 1.1 科学観測気球

科学観測気球とは、各種観測器を高度 30km 以上まで運ぶことのできる飛翔体であり、搭載可能なペイロードの総重量は最大で 700kg にも及ぶ。これまでに科学観測気球を利用した宇宙線観測や大気の詳細観測などが実施されており、様々な科学的成果が得られている。現在 100 日を越えるような長時間の飛翔を実現するために、バラストを必要としない新しいタイプの気球の実用化に向けて開発が進められており、これを實現する最も有力な方式として、排気口をもたない完全に閉じた気球、いわゆるスーパープレッシャー気球 (SPB) と呼ばれるものが提唱されている。近年、SPB のひとつとして、3次元ゴア設計法に基づいて局所的に張り出しをもつ Lobed-pumpkin 型 SPB の開発が進められており、実用化が有力視されている<sup>1,2)</sup>。Lobed-pumpkin 型 SPB では、経線方向にロードロープを這わせて経線方向の力をロープに負担させ、一方、張り出したフィルムにはたるみをもたせることで周方向のみの力を負担させ、これにより皮膜の張力を大幅に減少させることを實現している。

### 1.2 柔軟膜構造物の FEM 解析

Lobed-pumpkin 型 SPB はフィルムとロードロープから構成される大型柔軟膜構造物であり、その構造応答は一般に強い非線形性を示す。フィルムの膜厚は約 25  $\mu\text{m}$  と非常に薄いため、フィルム面外方向の剛性に対応する曲げ剛性は極めて微小となり、少しの荷重に対しても容易に大変形が生じる。そのため、構造解析には大変形を考慮した非線形有限要素解析を用いる必要があるが、このような柔軟膜構造物に対して大変形有限要素解析を適用した場合、数値的不安定性が発生し解析が困難となることが多い。このような理由から、SPB を対象とした数値構造解析に関しては、過去に多粒子系近似モデルを用いた簡易解析が行われているものの、有限要素法による大変形解析は殆ど行われておらず、シェル要素を用いた研究が報告されているのみにとどまる<sup>3,4)</sup>。SPB のフィルム曲げ剛性は非常に微小であるため、シェル要素に代わり膜要素を用いた有限要素解析も考えられるが、商用 FEM ソフトウェアに組み込まれている膜要素を用いて解析を行った場合、上述の数値不安定性により解析が発散し、有意な結果を得ることはできない。さらに、第 2 節において後述するように、Lobed-pumpkin 型 SPB は満膨張時においてゴアフィルムにリンクル (しわ) を発生させてフィルムの応力負担を大幅に減らす構造様式を採っている。したがって、Lobed-pumpkin 型 SPB の構造解析にあたってはリンクルを考慮することが不

\* 1 工学研究科航空宇宙学専攻  
\* 2 航空宇宙学科航空宇宙学専攻 講師  
\* 3 ISAS/JAXA

可欠であるが、過去の研究においてはリンクリングに起因する構造非線形性を一切考慮していない<sup>3,4)</sup>。

一方、著者等は張力場理論<sup>5,6)</sup>に基いた膜面の有限要素モデルを過去に開発しており、同モデルを用いるとリンクリングによる非線形性を考慮できるのみならず、上述した数値不安定性の問題が大幅に改善されることを示した<sup>6)</sup>。そこで、本稿では文献<sup>5,6)</sup>で提唱した要素モデルを用いて、Lobed-pumpkin 型 SPB の数値構造解析を行い、過去の物理実験および数値解析結果との比較を行い、その妥当性について検証した。張力場理論に基づいた非線形有限要素解析の計算スキームは、著者等の提案したスキームの他にも、現在までに数種提案されており、中には実質的に同一とみなせるスキームも存在する<sup>7,8)</sup>。しかしながら、これらの研究においてはスキーム開発そのものに重点が置かれており、解析事例は方形エアバッグ等、単純な形状をした膜構造物に限られている。これに対して、本稿は張力場理論に基づく有限要素解析が実用膜構造物に対しても非常に有効であることを示した初めての報告となっており、今後の膜構造解析の裾野を広げる契機になるものと考えられる。

具体的には、気球設計時のパラメータの一つである「たるみ率」に注目し、たるみ率がフィルム応力に与える影響について定量的に考察した。たるみ率の定義は後述するが、現在までの SPB 実験モデルにおいては経験的に、たるみ率 0.97 という値を採用して気球モデルを製作していた。しかしながら、この値は気球形状が数学的に安定となる Calledine's stability limit に基づいて決定されたものであり、フィルム応力に関する考慮はなされていない<sup>9)</sup>。これに対し、本稿で、たるみ率とフィルム応力との関係について新たに解析を行った結果、上記採用値について再検討が必要であることが明らかとなった。さらに本稿では、たるみ率を局所的に変化させることにより、気球フィルムの応力が効率的に緩和できることを示した。

## 2. Lobed-pumpkin 型 SPB

本節では SPB の形状として最も有力とされている Lobed-pumpkin 型 SPB の基本設計概念について述べる。Lobed-pumpkin 型 SPB は気球経線方向に高強度のロードロープを配置し、経線方向の力はロードロープに負担させ、フィルムには周方向の力のみを負担させるのが基本的な設計概念である<sup>1,2)</sup>。気球のゴアフィルムは製作時、周方向・経線方向共に一定のたるみを持たせながらロードロープに縫合していく。経線方向のたるみは、満膨張時のフィルム周方向にリンクリング(しわ)を発生させる効果をもち、結果として経線方向の張力はロードロープのみが負担することとなる。また周方向のたるみにより、膨張時にはフィルムがバルジ状に変形するため、フィルム周方向の局所的な曲率半径が小さくなる。フィルムに発生する応力は、曲率半径に比例することから、バルジ形状はフィルムへ

の負担を大幅に減らす役割を果たす。Fig. 1 に Lobed-pumpkin 型 SPB の概念図を示す。

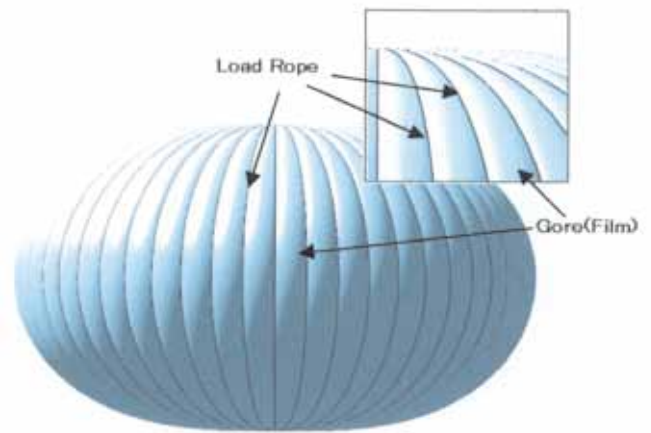


Fig. 1 Schematic sketch of Lobed-pumpkin SPB

## 3. 数値解析

### 3.1 たるみ率の定義

前節で述べた通り Lobed-pumpkin 型 SPB では、応力緩和を目的としてゴアフィルムをたるませてロードロープにいせ込みながら気球を製作する。その際、フィルムのたるみ量を大きくすると膨張時の皮膜の張り出しは大きくなる。その結果、周方向の局所的な曲率半径が小さくなるため、皮膜張力を小さくすることができる。本稿では、フィルムたるみ量を定量的に評価するため、(ロードロープ全長/ゴアフィルム境界線長)の比を「たるみ率」と定義することにする。この定義から、たるみ率=1.0 はゴアフィルムを全くたるませずにロードロープに縫合した場合に対応し、たるみ率が 1.0 よりも減少するにしたがって、フィルムのたるみが増加することになる。たるみ率は皮膜張力を決定する重要な設計パラメータであるが、前述の通り、現在までの物理実験では経験的に周方向、経線方向ともに 0.97 として気球を製作しており、たるみ率がフィルム応力に与える影響を定量的に考察する必要がある。そこで、本節では非線形有限要素法による数値解析結果を通じて、たるみ率とフィルム応力の関係について評価を行う。

### 3.2 解析方法

解析に際しては、実際の気球製作法をなるべく忠実に再現できるよう留意した。以下に本稿で採用した数値解析の手順を示す。

- (1) 平面状にゴアを展開し、ゴアフィルムの有限要素モデルを作成する。
- (2) ゴア境界線の長さより、たるみ量分だけ短いロードロープの有限要素モデルを作成する。
- (3) (1)で作成したモデルに強制変位を与え、(2)で作成したロードロープに膜面を貼り付けたモデルを作成する。

(4) (3)で得られた膜面とケーブルの有限要素モデルに所定の圧力を与えて釣合い形状を求める。

解析に際しては対称性を考慮し、ゴア 1/4 枚分のみを解析対象とした。また、境界条件は多粒子系モデルの結果と比較するために文献<sup>3)</sup>と同様のものとした。すなわち、Fig. 2にあるように、上端部は x, y 方向の自由度を拘束し、下部境界は z 方向を固定、左境界部は x, y 方向の自由度を拘束、さらに、ロードロープが配置されている右境界部に関しては軸対称性を考慮し、内角が常に一定となるよう滑り境界条件を与えている。

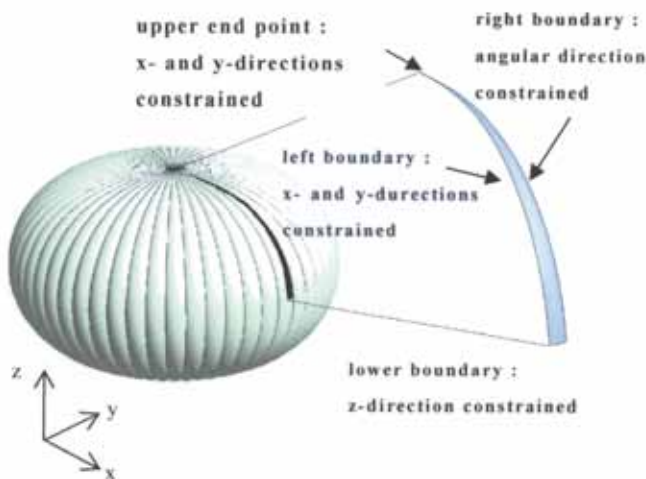


Fig. 2 Boundary conditions for a 1/4 part of the gore film

今回の数値解析の対象とした SPB の諸元を Table 1 に示す。Table 1 は、2005 年度に行われた 1/3 スケールモデルの地上実験に対応しており、文献<sup>3)</sup>には同モデルを対象とした多粒子系近似モデルの数値解析が報告されている。

文献<sup>3)</sup>に合わせ、フィルムとロードロープの弾性特性はそれぞれ単体での引っ張り試験の結果にあうように、フィルムのヤング率として  $E = 0.5 \text{ GPa}$ 、ロードロープについてはヤング率に断面積を乗じた値として  $EA = 5.0 \times 10^5 \text{ N}$  の値を採用した。Fig. 3, Fig. 4 は同文献において報告されているフィルム、ロードロープそれぞれの実験結果である。Fig. 3 から、フィルムに関しては歪み値が 3%を超えた近辺から弾塑性的挙動を示していることが確認できる。一方、歪み値が 0~2%の範囲では、歪み値に比べて応力値が低い値となっている。この理由としては、引っ張り試験時におけるフィルムと治具の「ずれ」が考えられる。本稿では、フィルムの材料特性として線形弾性体を仮定しているため、フィルムが弾性的挙動を示している 0~3%程度の領域における実験値を参照にして、数値解析におけるフィルムの弾性特性を Fig. 3 実線部のように仮定した。なお、フィルムのポアソン比は一般的な値として  $\nu = 0.3$  を仮定した。ロードロープに関しては、Fig. 4 に示すように複数回の引っ張り試験を行っているが、歪み値が 0~2%の範囲では実験値にかなりのばらつき

がみられる。ロードロープは Kevlar® の縀糸によって構成されているが、荷重値が低い範囲においては、ロープの縀りが締まることによって歪みが発生する。その際の歪みは引張り試験前のロープの締め具合に大きく依存するため、このようなばらつきが発生していると考えられる。一方、ロープが十分に締まった後は Fig. 4 に見られる通り、実験値のばらつきも少なくなり、弾性的挙動を示していることが確認できる。そこで、本稿ではロープが十分に締まるまでのヤング率を零とし、歪み値が 2%を超えた時点で弾性的挙動を示すものと考え、数値解析における弾性特性を Fig. 4 実線部のように仮定した。さらに、たるみ率としては、ノミナル値である 0.97 を与えている。有限要素モデルには線形の三角形膜要素を用いており、ゴア 1/4 枚分を約 10000 要素でモデル化している。

Table 1 Properties of 1/3-scale model of SPB

|  |                              |
|--|------------------------------|
| Volume [m <sup>3</sup> ]                 | 1.120                        |
| Mass [kg]                                | 62.0                         |
| Maximum diameter [m]                     | 14.79                        |
| Height [m]                               | 8.86                         |
| Number of gore films                     | 50                           |
| Material of load rope                    | PPTA<br>(Kevlar®)            |
| Material of gore film                    | Multilayer film<br>(Heptax®) |
| Thickness of gore film [ $\mu\text{m}$ ] | 25.0                         |

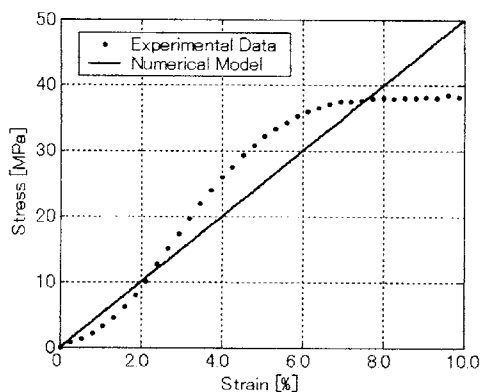


Fig. 3 Elastic properties of gore film<sup>3)</sup>

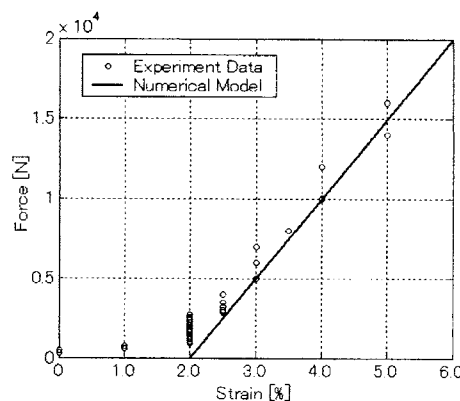


Fig. 4 Elastic properties of load rope<sup>3)</sup>

### 3.3 数値解析結果

Fig.5は差圧500Paにおける数値解析結果を示したものであり、左からそれぞれ最小主応力・最大主応力・リンクル強度・Von Mises 応力の分布を表している（以降の分布図も同様の順）。同図から最小主応力はフィルムの全領域において零となっており Lobed-pumpkin 型 SPB の設計概念通り、フィルムには全領域にわたってリンクルが発生し、経線方向の応力を負担していないことが確認できる。多粒子系膜モデルによる数値解析<sup>3)</sup>では、ゴアの全面にわたって最小主応力が零、最大主応力は赤道部において最大となる結果が得られており、本稿での解析結果と定性的に一致している。

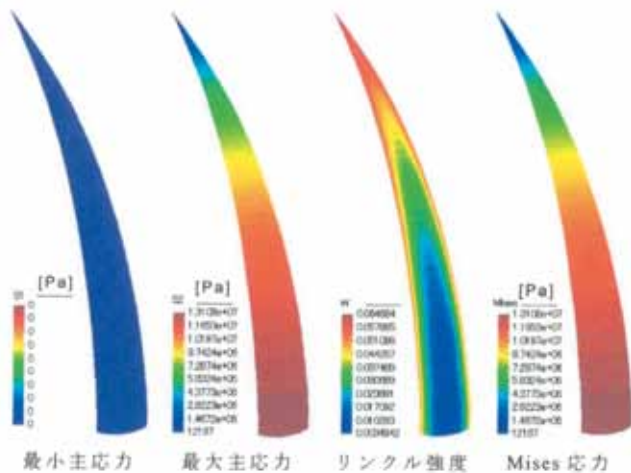


Fig. 5 Numerical results for pressure difference of 500Pa

Fig.6は差圧と気球直径との関係について、本稿の有限要素解析結果、および文献<sup>3)</sup>の多粒子系膜モデルの解析結果と物理実験の結果の3者を比較したものである。若干の差異は認められるが、差圧とともに気球直径がほぼ線形に増加している傾向は3者とも一致している。実験値は気球膨張実験時に、おおよそ最大直径と思われる周囲をメジャーによって測定したものであり、最大で10cm程度の測定誤差はみこまれるものと考えられる。本稿の解析結果における実験値との差異は、多粒子系膜モデルのそれとほぼ同等であり、本稿の有限要素解析も妥当な結果を示していると考えられる。

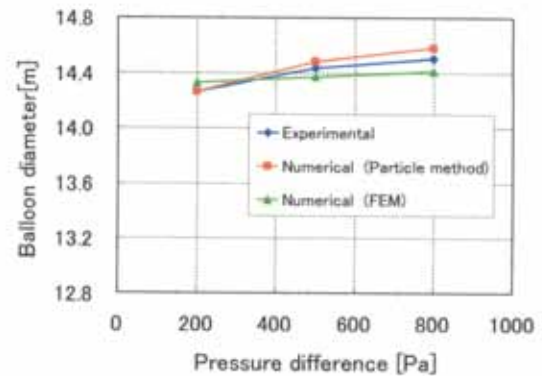


Fig. 6 Relation between pressure difference and balloon diameter

### 3.4 たるみ率がフィルム応力に与える影響

Fig.7は差圧とフィルムの最大歪みとの関係について、Fig.6と同様3者の結果を比較したのとなっている。図中、「有限要素法 0.97」と示したプロットがたるみ率をノミナル値として解析した結果であるが、Fig.6の場合とは大きく異なり、有限要素解析の結果では差圧が600Paを超えた付近で歪みが急激に増加する結果となった。試みにたるみ率を0.96に変更したモデルでも解析を行ったが、この場合、歪みの急増は見られず、多粒子系モデルと有限要素解析との結果がほぼ一致することが確認できた。

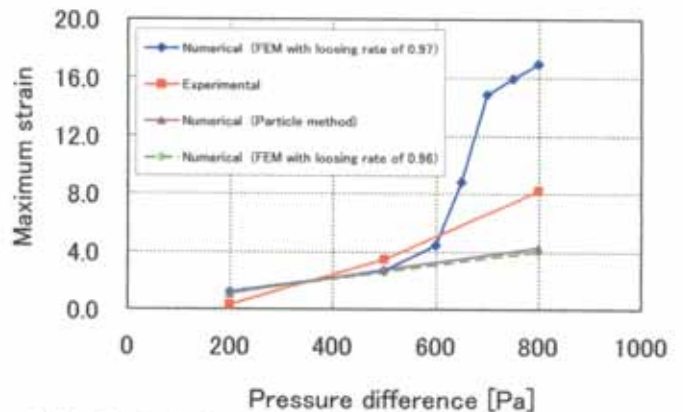


Fig. 7 Relation between pressure difference and maximum strain

Fig.7の有限要素解析結果から、たるみ率の微小な変化に対してフィルム最大歪みに大きな変化がみられることがわかる。そこで、Fig.7に見られた歪みの急増について考察するため、差圧を800Paで一定値とし、たるみ率を変化させた場合のVon Mises 応力の変化を有限要素解析により算出した。その結果を Fig.8に示す。

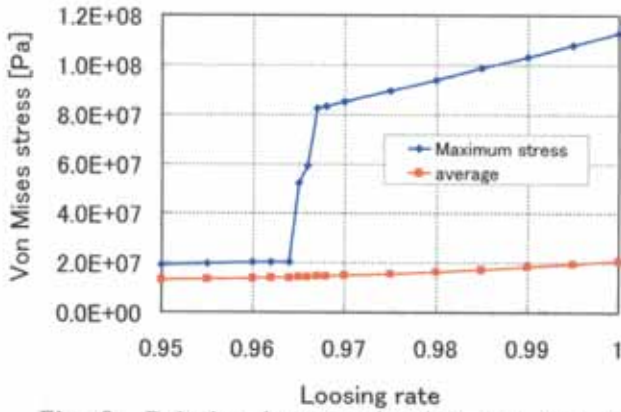


Fig. 8 Relation between loosing rate and Von Mises stress

Fig.8より、たるみ率を変化させた場合、Von Mises 応力の平均値に関しては大きな変化がみられないが、最大値に関してはたるみ率が 0.965 程度に達するまで線形に増加した後、4 倍程度に値が急増し、その後再び線形に増加していることが確認できる。応力急増前後のフィルムの応力分布を Fig.9, Fig.10 に示す。Fig.9 はたるみ率 0.96, Fig.10 はたるみ率 0.97 の場合の応力分布にそれぞれ対応している。

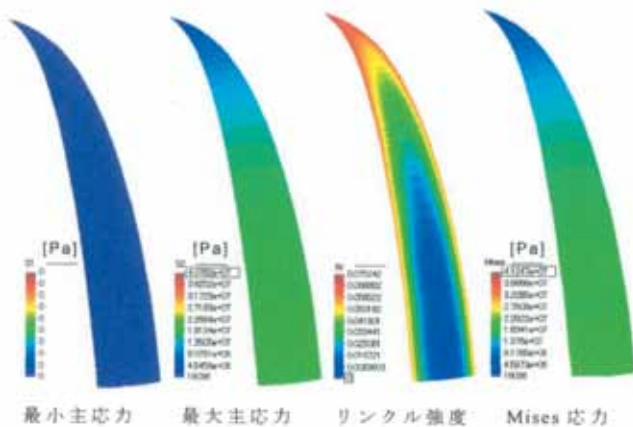


Fig. 9 Numerical results for loosing rate of 0.96

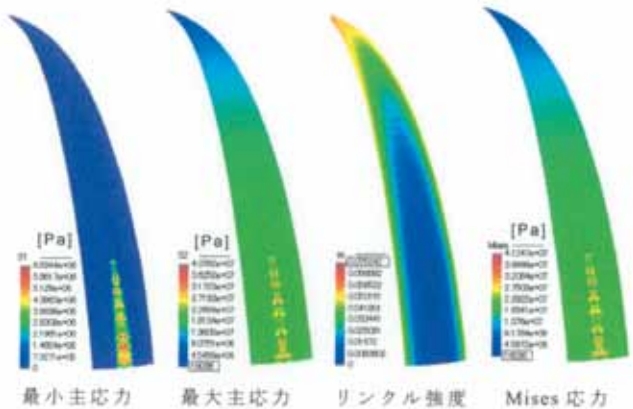


Fig. 10 Numerical results for loosing rate of 0.97

両図をみると、たるみ率が 0.96 の場合は、フィルムの全面においてリンクルが発生しているが、たるみ率を 0.97 とした場合、赤道部付近において最小主応力が非零となっている領域が発生していることが確認できる。また Fig.10 最右図の Von Mises 応力の分布から、この領域において応力集中が発生していることが分かる。

次に、Fig.10 にみられる応力集中発生メカニズムを明らかにするため、応力集中部の膜面状態がたるみ率とともにどのように変遷しているのかを数値解析によりトレースした。Fig.11 がその結果であり、応力集中部に設定したサンプリングポイントの応力状態を、横軸にたるみ率をとって示したものである。同図から、たるみ率が 0.966 を超えた付近で最小主応力が非零となり、この前後で Von Mises 応力が急激に増加していることが確認できる。また、リンクル強度のプロットから、最小主応力が非零の領域においてはリンクル強度が零となっており、フィルム上のリンクルが完全に消失していることが分かる。

以上のことから、応力急増のメカニズムに関しては、次のように解釈することができる。

1) たるみ率が 0.966 以下の領域ではフィルムにリンクルが発生しており、フィルムの応力状態は 1 軸引張り状態となっている。このため、フィルムはリンクルに直交する方向の力、すなわち気球経線方向の力を負担しておらず、気球周方向の力のみを負担している。その際に発生する応力は、バルジに対応する小さな曲率半径に比例したものとなるため、応力値は 20MPa 程度と比較的低い。すなわち、たるみ率が 0.966 以下の領域では、Lobed-pumpkin 型 SPB の設計概念通りの応力状態が実現しており、フィルム応力を押さえ込むことが可能となっている。

2) たるみ率が 0.966 を超えると、フィルム上のリンクルが完全に消失する。このため、フィルムの応力状態は 1 軸引張り状態から 2 軸引張り状態へと移行し、フィルムには経線方向の応力も発生することになる。経線方向に応力が発生した場合、フィルムには気球経線方向の曲率半径に比例する大きな張力が生じることになる。バルジの曲率半径(気球周方向の曲率半径)と、気球経線方向の曲率半径との比は、約 1:4 となっており、たるみ率 0.966 付近で応力値が約 4 倍に急増していることから上記の解釈の妥当性が裏付けられる。

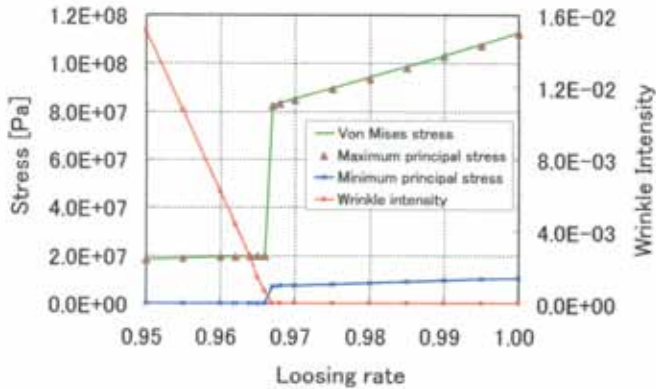


Fig. 11 Stress status at a sampling point of the gore film

2節で述べたとおり、Lobed-pumpkin型SPBにおける3次元ゴア設計法の基本概念は、ゴア経線方向にたるみを持たせて周方向にリンクルを発生させ、フィルムにはバルジに対応する小さな曲率半径に比例する圧力のみを負担させるというものである。しかしながら、たるみ率がある一定の値を超えた場合、膨張状態において皮膜が2軸引張り状態となり、その結果として急激な応力の増加が発生することを今回の解析結果は示している。Fig.11の結果は、その際のたるみ率の閾値を示しており、今後の気球設計において有用な結果であると考えられる。前述のとおり、たるみ率の値はこれまで経験的に決定されてきた面があるが、この値が閾値を上回ると急激な応力増が発生するため、今後の気球設計においては製作誤差も見込んだ上でたるみ率を十分に管理する必要があるといえる。現在採用されている、たるみ率 0.97 という値は、フィルムが線形弾性体であると仮定した場合、上記の閾値を上回る設計値となっており、たるみ率にさらなる余裕を持たせる必要がある。

### 3.5 たるみ率の局所的変化による応力緩和

前項の結果から、閾値付近ではたるみ率の微小な増加によりフィルムの応力値が急増することが明らかとなった。そこで、応力集中が発生している部位のたるみ率を局所的に変化させることで、効率的にフィルムの応力緩和が行える可能性がある。ここでは、その一例として、差圧 800Pa、たるみ率 0.97 の場合に発生している Fig.10 の応力集中を緩和する目的で行なった数値解析について紹介する。前項での考察から、フィルムが2軸引き張り状態に移行しないようフィルムゴアのたるみを増やし(すなわち、たるみ率を減少させ)、膨張時においてもフィルム上にリンクルが残存するような設計を行えば、経線方向の応力が消失して大幅に応力を減少させることが出来る。そこで、Fig.10 のリンクル強度分布からリンクル消失領域を決定し、この領域のみのたるみ率を局所的に減少させて、その効果を数値解析により検証した。ここでは、Fig.8の結果を参照して、リンクル消失領域のたるみ率を 0.95 とした。その際のフィルムの応力分布を

Fig.12 に示す。

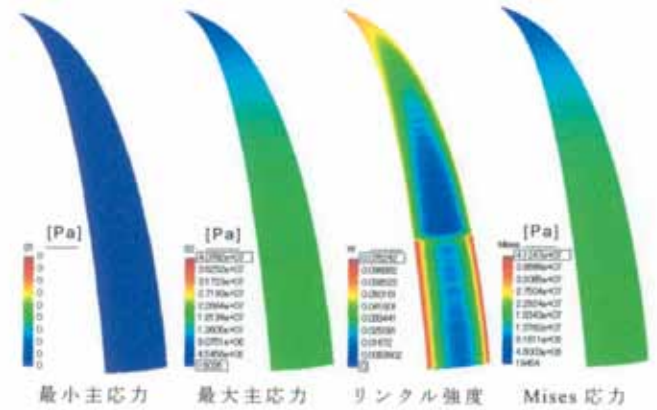


Fig. 12 Numerical results for varying loosing rate of 0.95-0.97

図より、たるみ率を減少させた領域に関してはリンクル強度が高くなっており、フィルムの全面においてリンクルが発生していることが確認できる。また、最小主応力が発生していないことから、1軸引き張り状態がフィルムの全領域において実現していることが分かる。

Fig.13はFig.7に、たるみ率を局所的に変更したモデルの結果を追記したものである。変更後のモデルは圧力差 800Pa にいたるまで最大歪みがほぼ線形に増加しており、たるみ率 0.97 の場合にみられる歪みの急増は発生していない。また歪みの値自体も、たるみ率を一律 0.95 としたモデルとほぼ同様の値となっており、たるみ率の局所的な変更によって効率的に応力緩和が行えることが分かる。

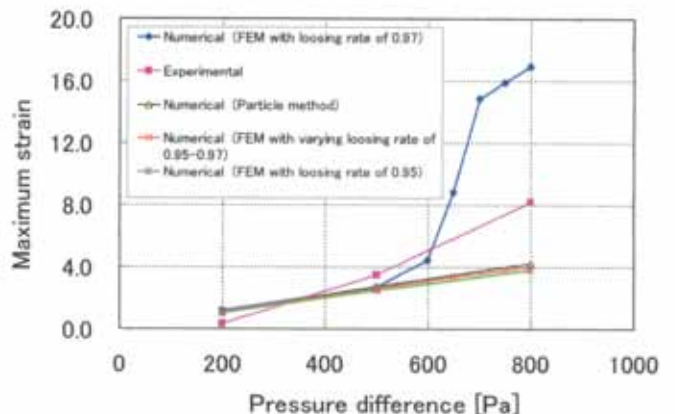


Fig. 13 Relation between pressure difference and maximum strain (model with varying loosing rate appended)

## 4. まとめ

本稿では、張力場理論に基づく膜要素を用いて、Lobed-pumpkin型SPBの有限要素解析を行い、多粒子

系膜モデル, および物理実験との比較を行った. 比較の結果, 3者の結果はほぼ一致しており, 本稿での解析の妥当性が確認できた. また, たるみ率に関する考察から, たるみ率には一定の閾値が存在し, たるみ率が閾値を上回った場合, 膨張状態においてフィルムの応力状態が2軸引張り状態に移行して応力が大幅に増加することを数値解析により明らかにした. 現在までの物理実験においては, 気球製作時のたるみ率を経験的に決定していたため, 本稿での結果は今後の気球製作において有用な定量データを示したことになる. また, たるみ率を局所的に変化させることで, フィルムの応力緩和を効率的に行えることを数値解析により示した. 今後は最適化アルゴリズムを適用して, より効率的なたるみ率の変更法を考察する予定である.

### 謝辞

本研究の一部は, (財) 能村膜構造技術振興財団の助成により行われた. 同財団に対し, ここに感謝の意を表する.

### 参考文献

- 1) 井筒直樹, 矢島信之, 大田茂雄, 本田秀之, 黒河治久, 松島清穂: 高い耐圧性を有する気球の設計原理と飛翔テスト, 日本航空宇宙学会第33期年会講演会講演集, 2002.
- 2) 矢島信之, 井筒直樹, 今村剛, 安部豊雄: 気球工学, コロナ社, 2004.
- 3) 山田和彦, 井筒直樹, 福家英之, 他: スーパープレッシャー気球の開発にむけた地上試験と構造解析, 第49回宇宙科学技術講演会講演集, pp.582-587, 2005.
- 4) M. Pagitz and S. Pellegrino, "Computation of Buckling Pressure of Pumpkin Balloons," 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 1-4 May 2006, Newport, Rhode Island, AIAA 2006-1803-983
- 5) Nakashino, K., Natori, M.C., "Efficient Modification Scheme of Stress-Strain Tensor for Wrinkled Membranes," AIAA Journal, Vol.43, No.1, pp.206-215, 2005.
- 6) Nakashino, K., Natori, M.C., "Three-dimensional analysis of wrinkled membranes using modification scheme of stress-strain tensor," AIAA Journal, Vol.44, No.7, pp.1498-1504, 2006.
- 7) Schoop, H., Taenzer, L. and Hornig, J., "Wrinkling of nonlinear membranes," Computational Mechanics, Vol.29, No.1, pp.68-74, 2002.
- 8) Akita, T., Nakashino, K., Natori, M.C. and Park, K.C., "A simple computer implementation of membrane wrinkle behaviour via projection technique," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.71, No.10, pp.1231-1259, 2007.
- 9) Smith, M.S. and Rainwater, E.L., "Optimum designs for superpressure balloons," Advances in Space Research, Vol.33, No.10, pp.1688-1693, 2004..