

スーパープレッシャー気球の安定性解析

中篠 恭一*

Deployment Stability of Super-Pressure Balloons

By

Kyoichi NAKASHINO*

Abstract

The institute of space and astronomical science (ISAS) is now developing a new type of super-pressure balloon along with the ‘lobed-pumpkin’ type super-pressure balloon. The new developing super-pressure balloon, named ‘tawara’ type balloon for its appearance, is expected to overcome deployment instabilities observed in the lobed-pumpkin type super-pressure balloons. In the present study, we investigate deployment stability of both balloons by finite element method, and have found that ‘tawara’ type super-pressure balloons enjoy excellent deployment performance.

Key words: Super-Pressure Balloon, Finite Element Method, Buckling Analysis

概要

宇宙科学研究所においては現在、Lobed-pumpkin 型 SPB の開発に加え、「俵型」と呼称される次世代型 SPB の研究開発が並行して進められている。Lobed-pumpkin 型 SPB に関しては国内外で多くの地上試験・飛翔試験が行われてきたが、これらの試験を通じて、ゴア数が非常に多い場合に気球が所期の対称形状に展開しない、という展開性の問題が存在することが明らかとなり、解決課題の一つとして指摘されている。一方、Lobed-pumpkin 型 SPB の発展型として提案されている俵型 SPB では構造上、上記の展開性の問題が生じえない、と考えられている。本稿では Lobed-pumpkin 型 SPB、および俵型 SPB の安定性能を比較するため、有限要素法に基づく数値構造解析を行った。数値解析から、俵型 SPB が非常に優れた展開性能を有していることが明らかとなったので、その結果を報告する。

1. はじめに

科学観測用気球として従来より使用されているゼロプレッシャー気球は、底部に排気口をもつ構造となっており、昼夜の温度差によって浮力が漸減していくという特徴をもつ。したがって浮遊高度を維持するために、毎夜一定割合のバラストを投下する必要がある、この理由からゼロプレッシャー気球を利用しての長期間科学観測は一般に困難となっている。これに対し、開口部をもたず外気に対して閉じた構造となっている気球、いわゆるスーパープレッシャー気球 (SPB) と呼ばれる気球方式が提案されており、長期間フライトを可能にする有力なシステムとして研究が重ねられてきた。SPB の実用化にあたっては、高い耐圧性能をいかに達成するか、という点が大きな開発課題とされていたが、3次元ゴア設計法に基づく Lobed-pumpkin 型 SPB¹⁾が提案され、その有効性が確認されて以降、同型の SPB の研究開発が国内外でさかに行われるようになり今日に至っている^{2,3)}。

* Tokai University

Lobed-pumpkin 型 SPB に関しては、これまでに多くの地上試験・飛翔試験が行われているが、その過程において、ゴア数が非常に多い場合に気球が所期の対称バルジ形状に展開しない、という展開性の問題が新たに浮上してきた。具体的には、気球形状が本来の対称性を失った状態で安定化してしまう事例や、気球表面に S 字状の折り目が発生して一部ゴアが未展開のまま安定化してしまう事例³⁾などが報告されており、実用化へ向けての解決課題として指摘されている。一方、井筒等は Lobed-pumpkin 型 SPB の発展型として「俵型気球」と呼ばれる新形式の SPB を提案しており、俵型 SPB においては Lobed-pumpkin 型 SPB における展開性の問題も生じにくい、としている⁴⁾。俵型 SPB に関しては、さらにスケールモデルを用いた地上試験が Lobed-pumpkin 型 SPB との比較試験として行われており、展開性能の優位性が定性的に確認されている。

本研究では上記の地上比較試験を念頭におき、従来型の Lobed-pumpkin 型 SPB ならびに次世代型の俵型 SPB の有限要素解析を行い、両者の展開性能評価を行ったので、その結果を報告する。

2. Lobed-pumpkin 型 SPB および俵型 SPB の構成

2.1. Lobed-pumpkin 型 SPB

Lobed-pumpkin 型 SPB は Pumpkin 型気球のゴアを一回り大きくして、ゴアの縁を縮めながら伸びのないロードロープに固定することによって製作される。膨張時には図 1 に示すような立体形状を構成し、フィルムバルジにより周方向の局所曲率半径が大幅に減少するため、大直径の気球であっても周方向応力を小さくすることが可能となる。一方、経線方向には十分なフィルム余剰が存在するため、膨張時の気球表面には全領域にわたって周方向にリンクル（しわ）が形成される。このため経線方向のフィルム応力は零となり、気球フィルムに発生する応力は周方向の小さな応力のみとなる。Lobed-pumpkin 型 SPB では、以上の 3 次元ゴア設計法¹⁾により気球の耐圧性能を飛躍的に向上させることが可能となっている。

上記の通り、Lobed-pumpkin 型 SPB の製作においては、設計ゴア形状の境界を一定の短縮率で縮めながらロードロープに固定していくが、その際の短縮率は膨張時のバルジ形状や経線方向のフィルム余剰率を決定する重要な設計パラメータとなっている。本稿では、下式によってフィルム短縮率を定義し、後述の解析において引用している。

$$\text{フィルム短縮率} = 1.0 - \frac{\text{ロードロープ自然長}}{\text{ゴア境界長}} - \alpha$$

上式右辺第 3 項の α は加圧時に生じるロードロープの伸びの影響による補正項となっている。ノミナル差圧を加えた場合、ロードロープには約 2% の伸びが発生することになるが、実際の気球設計時には製作上のマージンも加味して $\alpha = 0.025$ としており、本稿の解析でもこの値を採用している。

なお、Lobed-pumpkin 型 SPB の設計ゴア形状は、Pumpkin 型気球のゴア形状に基づいて決定されるが、その際の設計法として現在までに数種の設計法が提案されている。宇宙科学研究所において採用されている設計法は、Pumpkin 型気球のゴア形状を縦横等倍して Lobed-pumpkin 型 SPB のゴア形状とするものであり（図 2）、NASA で採用されている設計法とは異なったものとなっている。



図 1 Lobed-pumpkin 型 SPB

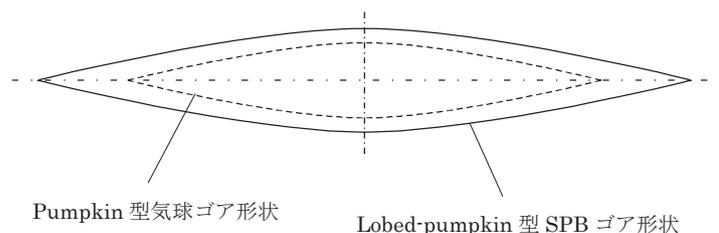


図 2 Pumpkin 型気球および Lobed-pumpkin 型 SPB のゴア形状

2.2. 俵型 SPB

上記 Lobed-pumpkin 型の開発と並行して、宇宙科学研究所では「俵型」⁴⁾ と呼称される SPB の研究開発が進められている。俵型 SPB は Lobed-pumpkin 型を赤道部で分割し、その間に円筒部を付加した構成となっている。俵型 SPB の外観図を図 3 に、同 SPB のゴア形状を図 4 に示す。追加された円筒部には経線方向のロードロープに加えて横ロープが取り付けられ、これにより円筒部の過剰な張り出しが抑制されるため、Lobed-pumpkin 型と同程度の耐圧性能を確保することが可能である。俵型 SPB には i). 円筒部を延長することによって容易に大型化できる, ii). アスペクト比によっては同体積の Lobed-pumpkin 型よりも軽量となる, iii). アスペクト比を大きくし空気抵抗を減らすことでパワードバルーンへの応用が可能, iv). Lobed-pumpkin 型における展開性の問題が発生しにくい, 等の利点があると考えられている。このうち本稿では特に iv) 項に着目し、数値構造解析を通じて俵型 SPB の展開安定性を定量評価し、Lobed-pumpkin 型との比較を行った。



図 3 俵型 SPB

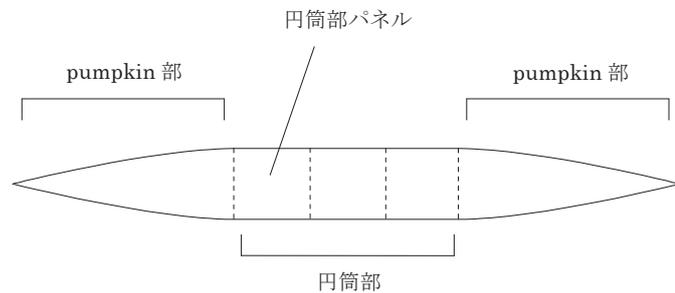


図 4 俵型 SPB のゴア形状

3. 解析モデル

2010 年 5 月、大樹航空宇宙実験場 (TARF)・JAXA 格納庫内において Lobed-pumpkin 型および俵型 SPB の展開安定性に関する地上展開試験⁵⁾が実施された。本稿では、その際に使用された下記 3 タイプの地上試験モデルを解析対象とした。

1. PB60-S1

2009 年 9 月の B09-07 実験 (TARF にて実施) で使用された Lobed-pumpkin 型 SPB (PB60 型) の 1/3 スケールモデル。地上展開試験時、PB60-S1 型には cleft が発生し、対称形状には展開しなかった。なお、B09-07 実験では気球の一部が正常展開せず、加圧途中で気球が破壊している。

2. PB60-S2

PB60-S1 型の赤道部に横ロープを付加したモデル。PB60-S1 型と同じく、地上展開試験時に cleft が発生し、対称形状に展開しなかった。

3. PB60-S3

PB60-S1 型に円筒部を付加した俵型モデル。図 4 に示す円筒部の正方形パネルを経線方向に 12 パネル追加した俵型 SPB となっている。地上展開試験時、本モデルのみ対称形状に展開した。

上記 3 タイプに対応する解析モデルを図 5 に、解析において使用した主要諸元を表 1 に示す。なお、実際の気球フィルムは材料異方性を有しているが、本稿では等方性材を仮定し、Young 率の代表値として 0.5[GPa] を採用した。



図5 解析モデル (左: PB60-S1, 中央: PB60-S2, 右: PB60-S3)

表1 解析諸元

		気球番号		
		PB60-S1	PB60-S2	PB60-S3
直径	[m]	18.6	18.6	18.6
全長	[m]	24.4	24.4	28.1
ゴア数		192	192	192
フィルム厚	[μm]	25	25	25
フィルム Young 率	[GPa]	0.50	0.50	0.50
フィルム Poisson 比		0.30	0.30	0.30
ロードロープ弾性係数 (経線方向)	[N]	1.40×10^4	1.40×10^4	1.40×10^4
円筒部パネル数		—	—	12
横ロープ数		—	1	13
横ロープ弾性係数	[N]	—	2.33×10^4	2.33×10^4
弁座直径	[m]	0.70	0.70	0.70

3. 安定性解析結果

3.1. 安定性解析の概要

前節で示した各試験モデルの展開性能を評価するために、非線形有限要素法に基づいて安定性解析を行った。解析に際しては短縮率を表現するため、気球ゴアが一定の短縮率でロードロープと接合している状態の有限要素モデルを作成している。地上展開試験に供された気球は3タイプともにノミナルの短縮率を5%としており、気球の上下10%部に関しては短縮率を局所的に8%に増加させて製作されたものとなっている。数値解析においても本来は短縮率の局所変化を考慮すべきであるが、本研究では解析の便宜上、気球全体の短縮率が一律であるとして計算を行った。また、ノミナルの短縮率に対する解析の他、短縮率を一律3~10%に変化させた場合の解析も行い、短縮率の違いが展開性能に与える影響についても調べた。SPBの数値構造解析においてはフィルム表面に発生するリンクルの影響を無視することができないが、本研究では張力場理論に基づいた特殊な膜要素⁶⁾を用いてリンクルの影響を考慮している。同膜要素は、リンクルの発生領域において、リンクルに直交する方向の圧縮応力が完全に解放されて零となるよう構成則に修正を加える要素モデルとなっている。発生差圧に関しては、展開試験時の値を参考にして代表値を決定し、50[Pa]としている。また、差圧は気球の全容積内で一定であると仮定している。

本研究で行った安定性解析の手順を以下に述べる。

- 1). ゴア1枚を解析対象として静解析を行う。その際に気球の対称性を考慮した境界条件を導入する。この解析により、気球が対称性を保持したまま展開した場合の釣合い形状を求めることができる。
- 2). 1)の解析で得られた釣合い形状を元に、気球全体の解析モデルを作成して対称展開時の状態における剛性マトリクスを求めて固有値解析を行う。固有値に負値が含まれている場合は、該当固有値に対応する座屈モードが存在

することになる。本研究では、このような気球は対称性を保持したまま安定化することができず、展開性の問題が発生すると判断している。なお、固有値解析にあたっては、部分構造合成法の一つである周期対称法⁷⁾を導入しており、同手法により大自由度有限要素モデルの固有値解析を実用的な計算時間で実行することが可能となっている。本研究ではノミナルの短縮率に対する解析の他、短縮率を3～10%に変化させた場合の固有値解析も行い、座屈モードの有無、および座屈モードのモード形状を求めた。

なお、本研究ではゴア1枚を約3000の線形三角形要素で離散化して解析を行っている。2)の固有値解析における総自由度数は80万程度となっている。

3.2. PB60-S1型の安定性解析結果

PB60-S1型に対して行った固有値解析の結果を図6、図7に示す。短縮率3～10%の領域では総計8のモードが座屈モードとして確認され、図6にはそのうち一部のモード形状を示した。同図から確認できるように、座屈モードはいずれも気球周方向に周期的な凹凸が表れるような形状となっている。本稿では、凹凸の数に応じて、図6に示した各モードをそれぞれmode3～mode6と呼称することにする。なお、以上の呼称に従うと、短縮率3～10%の領域で確認されたモードはmode3～mode10に相当する。図7に、これらのモードに対応する固有値と短縮率との関係を示した。短縮率を増加させた場合、初めて負値をとるモードはmode4であり、短縮率5.10%以上の領域で座屈モードとなっている。その他のモードについても短縮率が増加するに従い固有値が減少して負値にいたっており、短縮率を大きくとった場合には複数の座屈モードが存在することとなる。一方、短縮率が5.10%未満の領域では固有値は全て正值となっており、この領域においては座屈モードが存在せず、展開性の問題は発生しないと判断できる。以上は気球の短縮率を一律で与えた場合の結果であり、短縮率を局所的に変化させている実際の試験気球の安定性とは若干異なったものになっていると考えられる。前述の通り、PB60-S1型はノミナル短縮率を5%として上下10%部の短縮率を8%に増加させて製作されている。一方、短縮率の増加は気球の展開性能を低下させる方向に働くため、安定限界近傍の短縮率で製作されたPB60-S1型が対称形に展開しなかった事実は、ここでの数値解析結果と十分整合するものと思われる。今後は局所的な短縮率の変化を考慮した解析を行い、安定限界の予測確度について詳細な検証を行っていきたい。なお、各モードの固有値変化に関して言えば、モード数の大きいものほど短縮率に対する減少率が大きくなっていることが分かる。

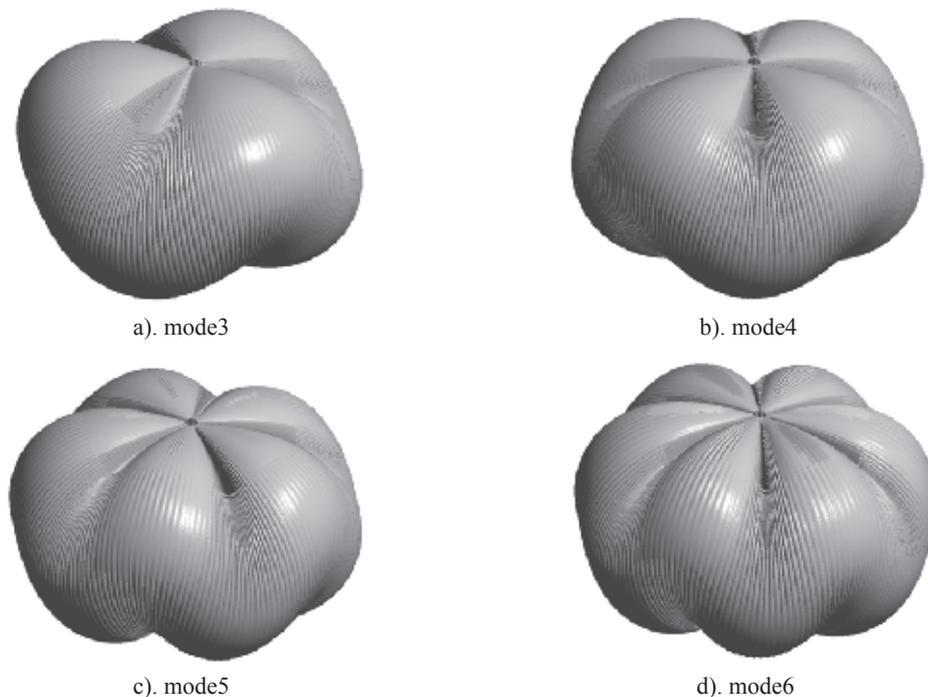


図6 PB60-S1型の座屈モード

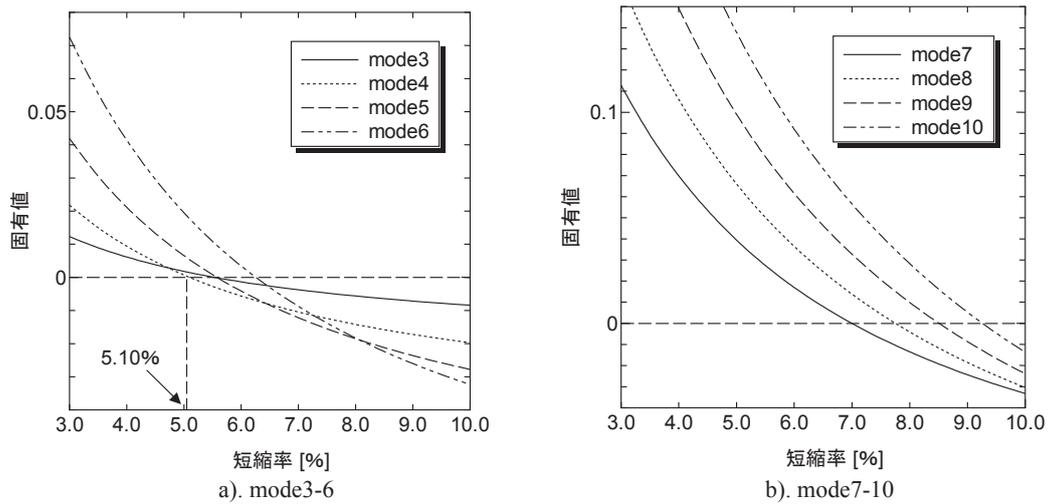


図7 PB60-S1 型の各モード固有値と短縮率の関係

3.3. PB60-S2 型の安定性解析結果

PB60-S2 型に対して行った固有値解析の結果を図8, 図9に示す. PB60-S1 型と同じく, 短縮率3~10%の領域で mode3~mode10 が座屈モードとして確認された. 図8にこれらのうち mode3~mode6 のモード形状を示す. また, 図9は mode3~mode10 に対応する固有値と短縮率との関係を表わしたものとなっている. 図7と図9との間に明確な差異は認められないが, 展開性能は S1 型に比べて僅かに向上しており, 座屈が発生する領域は短縮率 5.14% 以上となっている. しかしながら, 両者の安定限界の差は僅少であり, 製作誤差も考えると有意なものであるとは言えない. PB60-S2 型も地上展開試験においては対称形状に展開しておらず, 前項と同様の理由から, ここでの数値解析結果と地上試験結果との間には十分な整合性があると思われる.

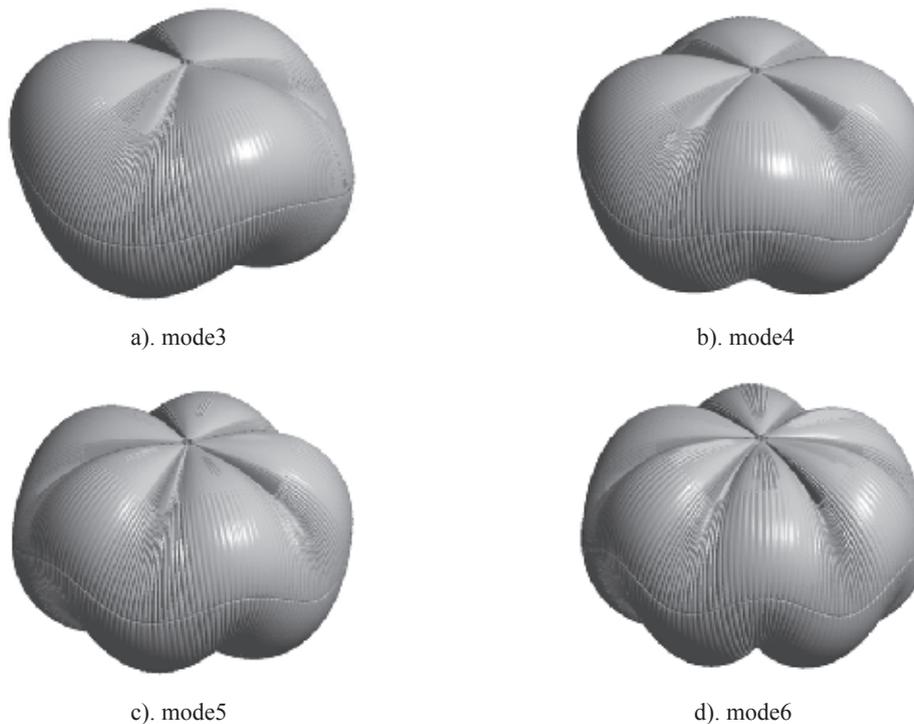


図8 PB60-S2 型の座屈モード

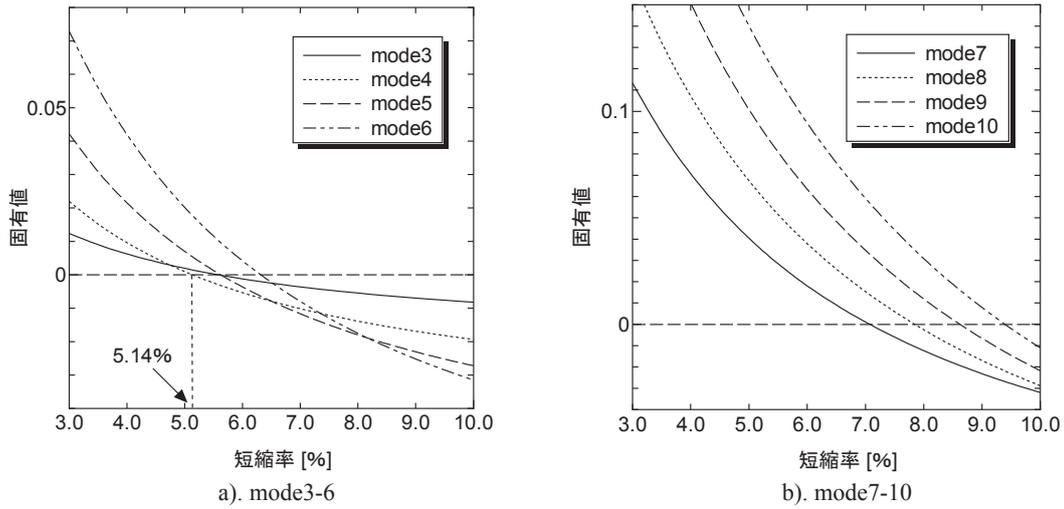


図9 PB60-S2型の各モード固有値と短縮率の関係

3.4. PB60-S3型の安定性解析結果

PB60-S3型に対して行った固有値解析の結果を図10、図11に示す。S1型・S2型とは異なり、PB60-S3型は短縮率3～10%の全領域で全ての固有値が正值をとり、この領域において座屈モードは一切存在しないことが明らかとなった。参考のため、mode3～mode10に対応する固有モードの固有値変化を図10に、mode3～mode6のモード形状を図11に示す。図10からmode3～mode10いずれのモードに対応する固有値も十分な余裕をもって正領域側に位置していることが確認できる。試験気球の短縮率は局所変化を考慮しても5～8%となるが、この範囲にクリティカルな座屈モードは一切存在せず、PB60-S3型はS1型・S2型に比べて、はるかに高い展開性能を有していると考えられる。実際の展開試験においてもS3型は対称展開しており、ここでの数値解析結果と整合する。

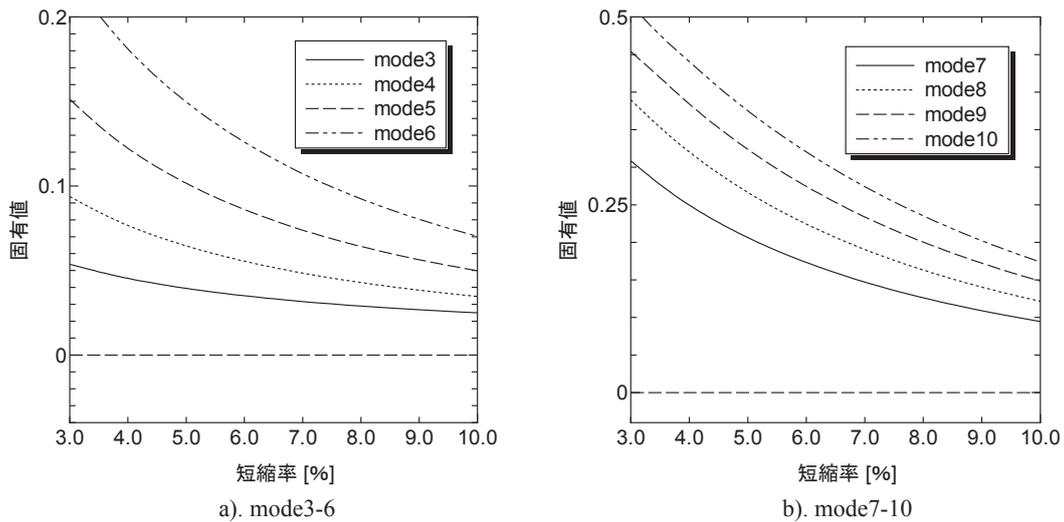


図10 PB60-S3型の各モード固有値と短縮率の関係

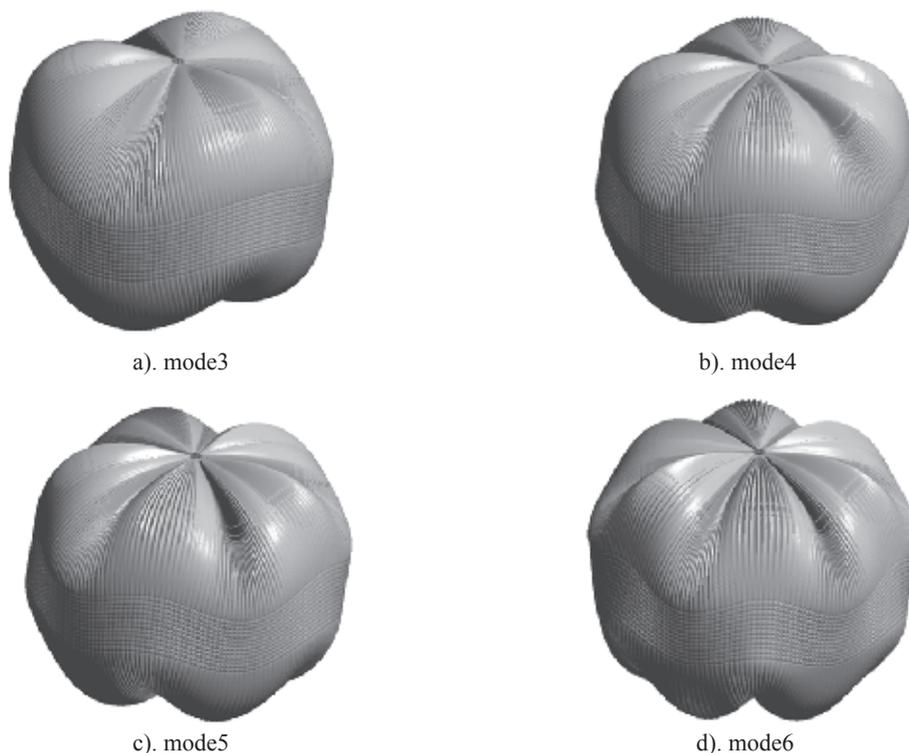


図 11 PB60-S3 型の固有モード

4. まとめ

本研究では 2010 年 5 月 TARF にて実施された地上展開試験を念頭におき、同試験で使用された 3 タイプの SPB を対象とした有限要素固有値解析を行って、それぞれの展開性能を定量評価した。気球の設計パラメータとして特にゴア短縮率に着目し、設計短縮率に対応する気球モデルの解析の他、短縮率を変化させた場合の解析も行って安定性能に与える影響を評価した。その結果を以下にまとめる。

まず、PB60-S1 型・S2 型に関する安定性解析結果から、短縮率を気球全体で一律とした場合、S1 型の安定限界は短縮率 5.10 % 付近に、S2 型の安定限界は短縮率 5.14 % 付近に存在することが明らかとなった。これに対し地上展開試験に供された気球モデルはノミナルの短縮率を 5 % として製作されたものとなっており、安定限界近傍の値を採用した気球モデルとなっている。加えて実際の製作過程においては上下 10 % 部の短縮率を 8 % に増加させているため、その安定性は数値解析の示す結果よりもさらに低下すると考えられる。したがって本研究で得られた数値解析結果は、TARF 地上試験結果と十分整合するものであると言える。

また、PB60-S1 型と S2 型の数値解析結果の比較から、Lobed-pumpkin 気球に横ローブを付加しても展開性能の向上には殆ど寄与しないことが明らかとなった。一方、PB60-S1 型に円筒部を追加したモデルである PB60-S3 型、すなわち俵型 SPB モデルでは、展開性能に飛躍的な向上が認められ、実用的な短縮率の範囲内では展開性に関する問題も生じないことが分かった。

本稿の解析結果と TARF 地上試験との間には整合性が認められるものの、比較対象はわずか 3 事例にとどまっており、安定限界の予測精度に関しては今後さらなる検証が必要であると思われる。しかしながら俵型気球の展開性能には明らかな飛躍的向上が認められ、数値解析を通じて俵型 SPB の展開優位性を明らかにすることができたと考えられる。本稿の解析では短縮率を気球全体で一律としたが、今後は短縮率を局所的に変化させて、実際の気球をより忠実にモデル化した解析を行っていく予定である。

謝 辞

宇宙科学研究所・斎藤芳隆准教授，井筒直樹助教，福家英之助教の3氏には，各種気球試験に関するデータを提供していただいたほか，本研究を進めるにあたり数々の貴重なご助言を頂きました．ここに感謝の意を表します．

参考文献

- 1) 井筒直樹, 他: 3次元ゴアデザインによるスーパープレッシャー気球の開発, 宇宙科学研究所報告 特集, 40, 2000, pp.27-44.
- 2) 福家英之, 他: スーパープレッシャー気球の開発, 平成 21 年度大気球シンポジウム, 2009.
- 3) H.M. Cathey Jr.: The NASA super pressure balloon – A path to flight, Advances in Space Research, Vol. 44, No. 1, 2009, pp.23-38.
- 4) 井筒直樹, 他: 俵型気球の飛翔試験計画, 平成 21 年度大気球シンポジウム, 2009.
- 5) 福家英之, 他: スーパープレッシャー気球の展開試験, 平成 22 年度大気球シンポジウム, 2010.
- 6) K. Nakashino and M.C. Natori: Efficient Modification Scheme of Stress-Strain Tensor for Wrinkled Membranes, AIAA Journal, Vol. 43, No. 1, 2004, pp.206-215.
- 7) 道村晴一, 他: 軸流タービン翼群の車盤との達成を考慮した振動解析, 日本機械学会論文集, C47-415, 1981, pp.242-250.