

皮膜に網をかぶせた長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発 (NPB2-1、NPB2-2の形状)

ISAS/JAXA	:	斎藤 芳隆、後藤 健、山田 和彦
東海大学工学部	:	中篠 恭一
東京工業大学院環境・社会理工学院	:	秋田 大輔
明治大学理工学部	:	松尾 卓摩
早稲田大学創造理工学部	:	石村 康生
名古屋大学理学部	:	田村 啓輔
長岡技術科学大学工学部	:	山田 昇
藤倉航装(株)	:	松嶋 清穂、橋本 紘幸
ナカダ産業(株)	:	島津 繁之

Development of a super-pressure balloon with a net for long duration flight (Shape of NPB2-1 and NPB2-2)

Yoshitaka Saito, Ken Goto, Kazuhiko Yamada, Kyoichi Nakashino, Daisuke Akita, Takuma Matsuo,
Kosei Ishimura, Keisuke Tamura, Noboru Yamada, Kiyoho Matsushima, Hiroyuki Hashimoto,
and Shigeyuki Shimadu

1 はじめに

我々は高度 37 km を飛翔する気球を、高張力繊維でできた菱形の目の網を薄いフィルム製の気球皮膜にかぶせるという新しい手法 [1] により、長時間 (数カ月程度) 飛翔できるスーパープレッシャー気球をゼロプレッシャー気球と同程度の体積/重量比で実現する開発を進めている。最終目標は、搭載重量 900 kg、飛翔高度 37 km を体積 30 万 m^3 の気球で実現することである。2016 年、および、2017 年には、地上試験での破壊圧が 1,000 Pa を越える体積 2,000 m^3 の気球が製作できることを検証するに至っている [2][3]。この製作方法もちいて体積 7,000 m^3 の気球を製作し、大型気球に必要な製作、運用技術の確認を目的として、2017 年より飛翔試験に臨んできたが、ここ二年間は飛翔機会に恵まれず、2018 年の実施を予定している。現状、大型気球に必要な製作技術は獲得できたと考えており、より深い理解や、より優れた性能を目指した改良を進めている。本講演では、その中から、気球の展開と形状の理解の進展について報告する。

2 気球の形状

NASA や宇宙研大気球実験グループで開発している Lobed-pumpkin 型のスーパープレッシャー気球の形状は、縦方向の張力のみで圧力を支えることができるオイラーの楕円形を基本としている。この形状は、子午線長が半径の 2.622 倍と、球形よりも縦方向に潰れた形状をしていることが知られている [4]。皮膜に網をかぶせた気球の設計においては、この形状を想定しているが、網にかかる張力には横方向の成分もあり、この形状からのずれがあり、縦方向と横方向の張力が同一である球形との比較から、オイラーの楕円形よりも縦長の形状となることが予想されている。

気球形状の測定は、体積 10 m^3 の小型気球においては、子午線長と赤道長の測定がなされている。たとえば、NPB001-6C 気球 [3] においては、800 Pa 印加時の子午線長と赤道長の比は 2.640 倍とオイラーの楕円形よりも 0.7 % 縦に伸びた形状となっている。気球の設計においては、気球の大きさを変化させても網の形状が相似となるようにしており、原理的には小型気球と大型気球では相似となる。しかし、それを、より大きな気球での実証した例はこれまでになかった。

NPB2-1、および、NPB2-2 気球は体積 2,000 m^3 の気球であり、網と皮膜の結合方法等に違いはあるが、形状については同一の設計である。これらの膨張試験にあたっては、赤道長を評価するために、錘をつけた 4 本のロープを赤道部に取付け、その錘の床面上の位置の間隔を記録している。その錘の床面への投影点を A、B、

表 1: NPB2-1 気球の子午線長、マーキング間距離計測結果

差圧 (Pa)	日時	子午線長 (mm)	A-B 間 (mm)	B-C 間 (mm)	C-D 間 (mm)	A-D 間 (mm)	A-C 間 (mm)	B-D 間 (mm)
200	3/15 15:56	23,030	12,760	12,530	12,580	12,710	17,940	17,830
400	3/15 16:48	23,240	12,940	12,700	12,680	12,810	18,100	18,080
400	3/16 10:12	23,310	12,910	12,710	12,760	12,840	18,090	18,120
600	3/16 10:27	23,390	13,040	12,700	12,670	12,880	18,140	18,130
800	3/16 10:43	23,480	12,990	12,820	12,730	12,960	18,180	18,250

表 2: NPB2-2 気球の子午線長、マーキング間距離計測結果

差圧 (Pa)	日時	子午線長 (mm)	A-B 間 (mm)	B-C 間 (mm)	C-D 間 (mm)	A-D 間 (mm)	A-C 間 (mm)	B-D 間 (mm)
200	6/2 13:50	21,954	10,560	12,770	10,265	15,895	17,665	17,530
400	6/2 14:05	22,066	10,555	12,830	10,420	16,095	17,790	17,850
400	6/2 15:00	22,082	10,725	12,850	10,440	16,110	17,840	17,705
80	6/3 9:00	21,986	10,625	12,815	10,310	15,935	17,720	17,705
400	6/3 9:30	22,120	10,670	12,910	10,345	16,090	17,850	17,895
600	6/3 9:38	22,156	10,710	12,835	10,430	16,145	17,850	17,870
800	6/3 9:42	22,220	10,730	12,870	10,460	16,230	17,930	17,920

C、D と呼ぶことにする。気球のパネル数は 20 であり、錘付きのロープの取付位置は、NPB2-1 気球においては、5 パネルごと、NPB2-2 気球においては、A-B 間が 4 パネル、B-C 間が 5 パネル、C-D 間が 4 パネル、D-A 間が 7 パネルとなっている。また、子午線長を評価するため、気球頭頂にマーキングをしたロープを取付け、気球尾部までの長さを計測した。得られた結果を表 1、2 に示す。投影点の誤差は錘が振り子運動すること起因し、5 cm 程度である。また、子午線長の誤差は、用いたロープの伸びに起因しており、マーキング位置の計測の再現性から推定される誤差は 1 %であった。

3 解析結果と評価

気球の赤道面が水平を保っていると仮定すると、投影点は赤道と同一の大きさの円上に位置することとなり、投影点間の距離は、気球の赤道直径と一定の比をとることとなる。気球の水平からの傾きは数度以下と推定され、仮に 5 度であったとしても、その投影点へ影響は 8.5 mm に留まり、投影点の位置の誤差は振り子運動に起因するものが支配的である。直径との理論比を用いて投影点間距離から求めた直径の平均値、および、投影点間距離から求めた直径と平均との違いを表 3、4 に示した。

直径と差圧の関係を示したのが、図 1 である。得られた値は、NPB2-1 気球の方が差圧に拘わらず 0.5 %程度大きい。網線長は長さでなく網目数で規定しており、網目の交点間隔の精度が 1 %程度であることを考慮すると、両者の違いは網線長の違いに起因していると推定される。また、この気球の網線長は 23586 mm であ

表 3: NPB2-1 気球における理論比による直径推定と平均からの偏差

差圧 (Pa)	直径 (mm)	投影点間距離から求めた直径と平均との違い					
		A-B 間 (mm)	B-C 間 (mm)	C-D 間 (mm)	A-D 間 (mm)	A-C 間 (mm)	B-D 間 (mm)
200	8941.8	80.9	-81.7	-46.3	45.6	28.2	-26.8
400	9040.7	109.2	-60.5	-74.6	17.3	9.3	-0.7
400	9053.9	74.9	-66.5	-31.1	25.4	-8.9	6.1
600	9067.1	153.6	-86.8	-108.0	40.5	2.9	-2.1
800	9105.2	80.2	-40.1	-103.7	58.9	-15.2	19.8

表 4: NPB2-2 気球における理論比による直径推定と平均からの偏差

差圧 (Pa)	直径 (mm)	投影点間距離から求めた直径と平均との違い					
		A-B 間 (mm)	B-C 間 (mm)	C-D 間 (mm)	A-D 間 (mm)	A-C 間 (mm)	B-D 間 (mm)
200	8913.5	69.4	116.3	-181.6	6.2	29.1	-39.3
400	8998.1	-19.5	74.1	-134.4	33.8	7.8	38.1
400	9020.8	102.5	65.6	-140.0	19.5	10.4	-58.0
80	8957.5	80.6	104.1	-187.4	-15.4	12.9	5.3
400	9021.6	54.9	107.2	-221.7	7.5	14.7	37.4
600	9033.5	77.0	42.3	-161.3	26.5	2.7	12.8
800	9063.6	63.9	36.9	-165.9	44.0	13.1	8.0

り、気球の形状が網線長で規定され、オイラーの楕円形となるとすると、気球直径は 8996 mm である。また、網線数は 2400 本であり、800 Pa 印加時には、網線 1 本には、平均的に 84 N の力が働く。その際の網線の伸びは応力歪み曲線から 3 % と推定される。したがって、直径も 3 % 伸び、9266 mm となることが期待される。一方、800 Pa 印加時の直径は、大きい方の NPB2-1 気球においても 9105 mm と 1.7 % 小さい値に滞っている。この原因は網の目が広がっており、網線長が子午線長よりも長くなっているためと考えられる。

また、投影点間隔の平均値からのずれをみると、NPB2-1 気球においては B-C、C-D 間、NPB2-2 気球においては A-D 間が加圧の時期を問わず一貫して短い。いずれの方向も気球の展開時に最後のパネルが開いた方向と一致しており、展開時の歪みが加圧によって解消されることなく残っていたものと考えられる。また、ひずみの絶対値は NPB2-2 気球の方が大きく、これは NPB2-2 気球を展開させた体育館の天井高が低く、なかなか、気球全体を吊り下げられなかったことに起因している可能性がある。また、破壊モードは、NPB2-1 気球は網の偏りに起因していたのに対して、NPB2-2 気球においては、気球全体が変形するような破壊と異っており、歪みの大きさの違いが破壊モードの違いにつながった可能性がある。

なお、平面上に位置する 4 つの投影点の相対位置の自由度は 5 であり、6 箇所の距離の独立な計測結果があるため、最小二乗法により、それぞれの投影点の位置を求めることができる。これによって得られた残差の最大値は 87 mm であった。したがって、計測誤差はこの程度に滞っていたと推測され、上で述べた平均値からのずれは有意である。

図 2 は子午線長を圧力の関数として示したものである。NPB2-1 気球の方が 0.5 % 程度長く、加圧と共に伸びていることがわかる。二つの気球の違いは、元の網線長よりも長く、3 % 伸びた値よりも小さい点で赤道直径の依存性と同様であり、製作に用いた網の長さの違いに起因していると推測される。

図 3 は子午線長と赤道直径の関係を理論比 (図中の破線) として示したものである。データ点は少し破線よりも上にあり、点線 (理論比よりも 1 % 大きい) よりも概ね下にある。これは、網をかぶせた気球の形状が、オイラーの楕円形と 1 % の精度で一致しており、どちらかといえばオイラーの楕円形よりも縦長になっていることを示している。図 4 は直径 3 m の NPB001-6C 気球での計測結果であり、この傾向は一致している。大型化させても相似の形状となっていることが確認された。気球の皮膜は子午線長が網線長よりも 3 % 長く、周方向の幅はオイラーの楕円形と一致するように設計されている。皮膜には加圧時においても、子午線方向には余裕があること、周方向は伸ばされてはいるものの 1.3 % の伸びに滞っており、 -40°C における $10\ \mu\text{m}$ 厚のポリエチレン皮膜の降伏点伸び 2.6 % [5] と比較して十分小さいことが確認され、妥当な設計となっていることが検証された。

4 まとめ

NPB2-1 気球と NPB2-2 気球の直径や子午線の加圧による変化を測定した。気球の形状が 1 % の精度でオイラーの楕円形と一致していることが確認され、設計妥当性が確認された。また、展開時に残った皮膜の偏りは、加圧によって解消されない場合があることが判明した。今後、こういった網気球の理解を深める研究を進めると共に、大型気球の製作方法の妥当性の検証を飛翔試験等を通じて実施する予定である。

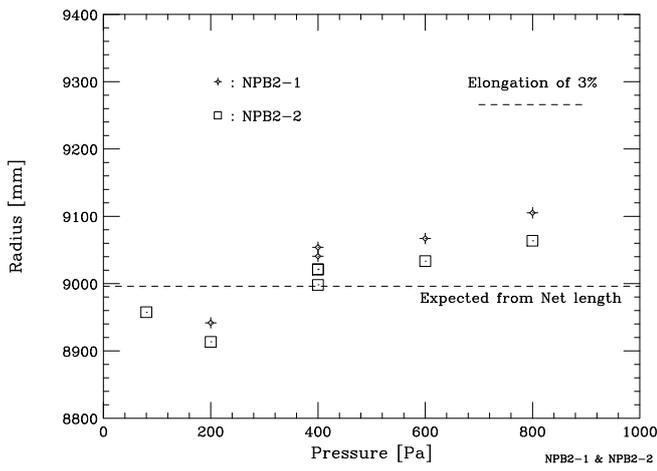


図 1: NPB2-1 と NPB2-2 の直径と差圧の関係。

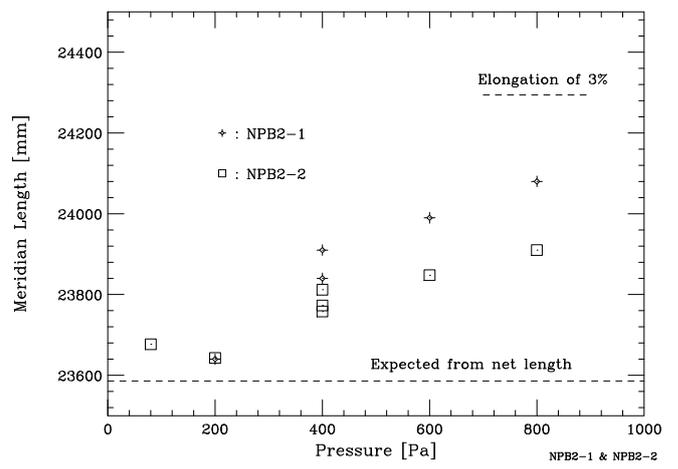


図 2: NPB2-1 と NPB2-2 の子午線長と差圧の関係。

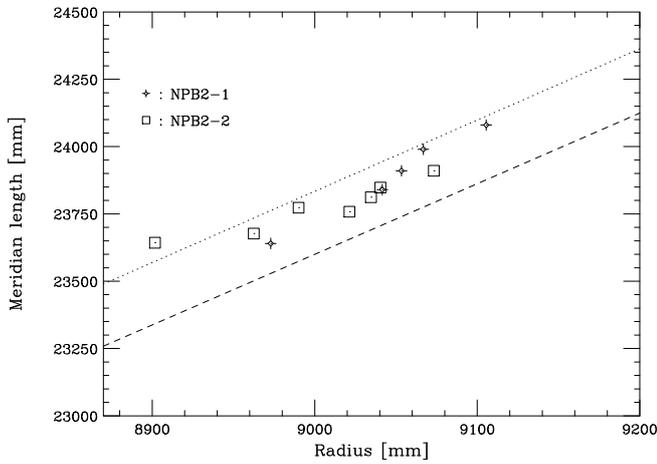


図 3: NPB2-1 と NPB2-2 の直径と子午線長の関係。

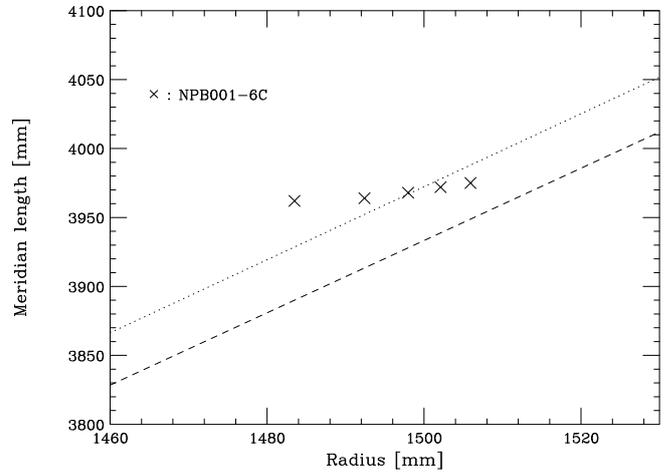


図 4: NPB001-6C の子午線長と差圧の関係。

参考文献

- [1] 斎藤 芳隆、他、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-010-003, pp. 21-40, 2011
- [2] 斎藤 芳隆、他、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-016-008, pp. 1-32, 2017
- [3] 斎藤 芳隆、他、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-017-007, pp. 1-13, 2018
- [4] 西村 純、宇宙科学研究所報告 特集 30, pp. 31-39, 1992
- [5] Saito, Y. *et al.* Adv. Space Res., 49 4, pp. 613-620, 2012