

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

ISAS/JAXA	:	齋藤 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
横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院	:	河端 昌也
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 (NPB2-2)

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

1 はじめに

長時間 (数カ月程度) 飛行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。搭載重量 1 トン、飛行高度 37 km を体積 30 万 m^3 の気球で実現することが目標である。長時間飛行気球は NASA でも開発が進められており、2015 年から 2017 年にかけてニュージーランドの気球基地から等緯度に地球を周回させる体積 53 万 m^3 のスーパープレッシャー気球による 3 回の実験を実施している [1]。最高高度 34 km の飛行を 2016 年には 46 日間、2017 年には 12 日間成功しているが、飛行高度、および、飛行時間の点に課題が残っている。

我々は高度 37 km を飛行する気球を、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 [2] で実現しようとしてきた。2010 年より開発を開始し、2016 年には、体積 2,000 m^3 、重量 54 kg の NPB2-1 気球の破壊圧が 1,040 Pa であることを検証するに至っている [3]。この破壊圧は、40 kg のペイロードを搭載し、高度 22 km を飛行する際の要求値の倍であり、スーパープレッシャー気球として要求される体積/重量比を確保した我が国ではじめての気球となった。また、我々が最終目標としている体積 30 万 m^3 の気球の要求仕様と比較すると、網線の安全率 2.1 倍、フィルムの安全率 10 倍が達成されており、その観点でも、十分に要求値を達成している。

この気球の破壊は、肩のあたりの溶着線に近いフィルムからの破損であった。網とフィルムを固定している溶着線が蛇行していたことから、まず、網が偏った状態で展開し、その後、加圧に伴って網がフィルムを引っ張り、フィルムが大きく変形したことが破壊に至った原因と考えられる。この破壊モードは、網線の破断や、赤道部の網目間隔が広がったところのフィルムの破損といった、想定していた破壊モードとは異っており、網の偏りという想定していない事象が大型化に伴って耐圧性能に与える影響が不明である。また、網の偏りを含む数値シミュレーションを実施するには、網とフィルムの接触判定が必要となるが、判定すべき要素数が膨大となるため、現実的な計算時間で網の偏りの影響を評価することは極めて困難である。したがって、偏りが小さくなる製作方法を開発し、その手法により耐圧性能が改善するか、あるいは、少なくとも悪化しないことを確認した上で大型化を進める必要がある。

網の偏りの問題は、網がフィルムを引っ張る箇所を増やすべく、網とフィルムとの固定間隔を増やすことで改善が見込まれる。一方、この固定数を現在と同じ方法で増やすと、気球の製作工程数が増えてしまうため、より簡単な方法を開発する必要がある。本論文では、新しい固定方法の検討と要素試験を説明した後、それを適用した体積 10 m^3 の気球による試験、体積 2,000 m^3 の新規気球による試験の結果を順に報告する。

2 新しい網の固定方法の検討

フィルムの変形を防ぐためには、網とフィルムとの固定間隔を狭める必要がある。NPB2-1 気球では、溶着線の耳に、網の目一つ目おきに、ダブル千鳥のジグザグステッチで縫い付けて固定していた。網の固定にあたっては、固定部に結び目などの突起物がないこと、ロードテープ内の繊維よりも強いこと、作業工数が現状よりも増えないこと、固定に伴う網強度の劣化がないこと、が必要である。検討を重ねるうち、二列ミシンを利用し、図1のように2列直線縫いをするのが有効であることが判明した。この方法は従来と比較すると、ステッチが単純なため、縫い時間が従来の半分程度ですむこと、交点そのものを縫うわけではないため、網を縫い針で傷つけるリスクが小さいこと、交点の位置が縫い目の内側に固定できること、にメリットがある。

3 体積 10 m³ 気球による網の固定方法の確認

網の固定方法に伴う、気球の展開等への影響を調べるため、まず、体積 10 m³ の気球の膨張試験を実施した。NPB001-6 気球は、2015 年 11 月に膨張破壊試験を実施した気球であり、その際には 10,020 Pa の耐圧性能を発揮している [3]。この気球から網を剥し、皮膜部分の補修した後、網を二列直線縫いで固定しなおし、耐圧性能を確認する試験を実施した。気球が耐えたならば、網をかぶせた状態での気密試験を実施することを考え、10,000 Pa までの加圧にとどめ、破壊強度の測定は見合せた。

耐圧試験は 2016 年 12 月 15 日に藤倉航装船引工場風洞実験室にて実施した。気球を天井から吊り下げ、頭部から空気を注入し、気球下部の圧力計測ポートで差圧を計測した。気球は、製作不良箇所からのガス漏れはあったが、応急処置でガス漏れ対策を実施することで順調に展開した。10,000 Pa に達したところで、そのまま 1 時間放置した (図 2)。加圧の過程では、破裂音が何回か鳴った。後に気球を点検したところ、網線が破断している箇所があり、網の破断音であった可能性がある。また、赤道部のフィルムには、不可逆なフィルムの伸びが見られ、破壊限界は近いと見られた。1 時間後、差圧は 5,000 Pa 程度まで下っていたが、気球は加圧状態を保っており、破壊が進行することはなかった。網の固定方法を変更したことに伴う気球展開の異常はないことが確認された。

4 体積 2,000 m³ の気球 (NPB2-2) の膨張破壊試験

次に、体積 2,000 m³ の気球 NPB2-2 を製作し、地上膨張、破壊試験により、網の固定方法の影響の評価を実施した。これまでに、地上試験、あるいは、飛翔試験によって耐圧性能を評価した/する気球の諸元を表 1 に示す。2016 年に試験した NPB2-1 気球とは、網の固定方法、および、搭載機器の吊り下げ金具 [4] とは別に網端部を取り付ける金属リングを配置したことに違いがある。

耐圧試験は 2017 年 6 月 2、3 日に田村市総合体育館メインアリーナにて実施した。天井が低かったため気球の尾部を絞りながら、順次膨張させることで展開させ、気球が正常に展開することを確認した。400 Pa に達した後、ガス注入口を閉じ、1 時間弱そのまま放置し十分な耐圧性能を有することを確認した。320 Pa まで減圧していたため、再度 400 Pa まで加圧し、一晩、その状態とした。気球の溶着線の偏りは発生していたが、すべての交点を固定した効果により網目一つ分のずれに滞っており、従来よりも低減されたことが確認された。

翌朝、差圧は 80 Pa まで低下していたが、気球は健全な状態のままであった。400 Pa、600 Pa、800 Pa と順次加圧し、図 4 のように 1,000 Pa に到達した直後に、気球は図 5 のように変形しながら破壊した。速やかに引き裂き紐を引き、引き裂き機構が正常に動作することを確認した。

得られた差圧の時間変化を図 6 に示す。耐圧性能は 1,020 Pa であった。この値は NPB2-1 気球の破壊圧 1,040 Pa と同程度であった。網の固定点を増やすことで、耐圧性能の改善を目指したが、改善はされなかった。とはいえ、破壊圧 1,000 Pa は、要求耐圧の倍に相当しており、この破壊圧を再度達成できたことは、十分な製作精度が達成できていることを示している。

また、NPB2-1 気球における破壊は、穴があいたただけであったが、NPB2-2 気球においては、大きな変形を伴う破壊であった。直前まで気球は正常な形状を保っており (図 4)、破壊と共に変形が進行している。なお、穴の発生と変形開始の時間順序は不明である。変形の要因は、展開にあたって天井高が低く、気球を倒しな

表 1: 網をかぶせた気球の諸元

気球番号	NPB7-1	NPB5-1	NPB3-1	NPB2-2	NPB1-1	NPB01-2	NPB001-5
公称容積 (m ³)	7,000	5,000	3,000	2,000	593	106	9.5
直径 (m)	27.3	24.4	20.6	18.0	12.0	6.76	3.03
全長 (m)	35.8	32.0	27.0	23.6	15.7	8.9	3.97
縦ロープ数	3618	3216	3015	2412	1608	603	402
網交点間隔 (mm)	102	100	101	102	101	101	101
赤道ロープ間隔 (mm)	48	48	43	47	47	71	48
耐圧予想値 (Pa)	1,800	2,500	3,600	3,900	5,100	3,400	6,000
実測耐圧値 (Pa)	—	425/348	>814	1,020	>800	1,800	>6,800
破壊時網線張力 (N)	—	62/51	>90	108	>56	107	>120
試験環境	上空	地上	上空	地上	地上	地上	上空
気球重量 (kg)	93	86	66	54	16	19	3

がら展開させたことで網の偏りが生じた可能性も考えられる。また、この変形は、論文 [5] で報告されている Buckling mode とも似ており、今後、数値解析による検証が期待される。

5 まとめと今後の計画

2016年に試験した体積 2,000 m³ の NPB2-1 気球は、網のフィルムへの固定箇所に近いフィルムが変形したことに伴うものであった。この対策として、網とフィルムの固定間隔を短くすることを検討し、新たに二列直線縫いで固定する方法を開発し、体積 10 m³ の気球で問題ないことを確認した後、体積 2,000 m³ の気球の地上膨張、破壊試験を実施した。その結果、破壊圧が 1,020 Pa であり、NPB2-1 気球の破壊圧 1,040 Pa と同程度に滞ることが判明した。直接の耐圧性能の向上には継がらなかったが、新しいステッチは、網を縫い針で傷つけるリスクが小さいため、網の安全率の向上には有効であったと考えている。また、1,000 Pa の破壊圧の気球が再度製作できたことは、フィルムの溶着といった気球製作の全体の精度が十分高く、40 kg のペイロードを搭載して高度 22 km の上空を長時間飛翔させることが可能、というこの気球の性能を再現性よく引き出すことが可能であることを意味する。気球の破壊時に変形した形状をみると、耐圧性能には、気球の変形の寄与が考えられ、今後、数値計算による検証を実施したい。この網の固定方法を用いて、体積 7,000 m³ の気球を製作しており、来年度、飛翔試験を実施し、地上試験で検証された技術が成層圏の環境においても問題ないことを確認する試験を実施する予定である。

謝辞

気球の膨張試験にあたっては、藤倉航装株式会社の方々、ISAS/JAXA の竹内 伸介さん、東海大学工学部の加藤 健太さん、阿部 亮太さん、にお世話になりました。本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (A) 課題番号 24246138、17H01352 を受けて行っています。

参考文献

- [1] Debora Fairbrother Proc. 2017 Scientific Ballooning Technologies Workshop, 2017
- [2] 斎藤 芳隆、他、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-010-03, pp. 21-40, 2011
- [3] 斎藤 芳隆、他、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-016-08, pp. 1-32, 2017
- [4] 斎藤 芳隆、他、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-13-001, pp.1-34, 2014
- [5] 中篠 恭一、他、平成 29 年度大気球シンポジウム集録 ISAS17-SBS-018, 2017



図 1: 二列直線縫いによる網の固定。

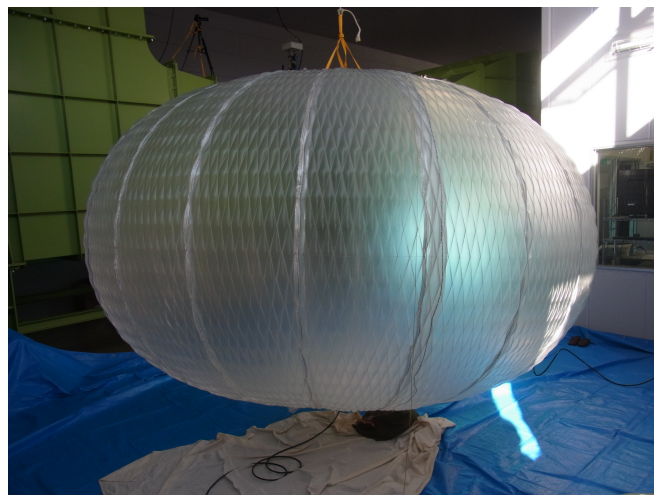


図 2: 10,000 Pa 印加時の NPB001-6C 気球。

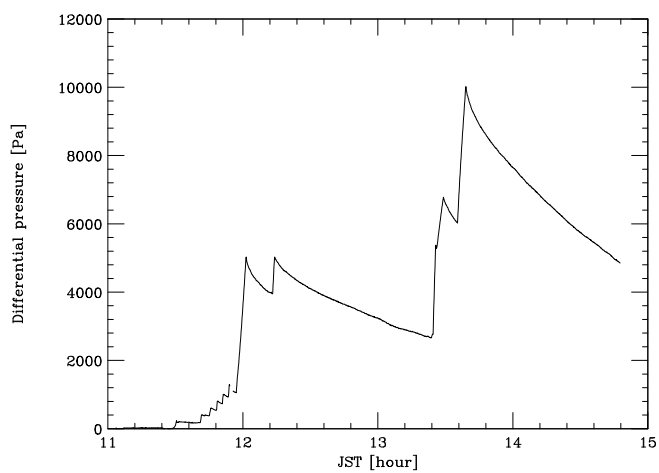


図 3: NPB001-6C 気球の膨張試験時の差圧変化。



図 4: 1,000 Pa 印加時の NPB2-2 気球



図 5: NPB2-2 気球の破壊時

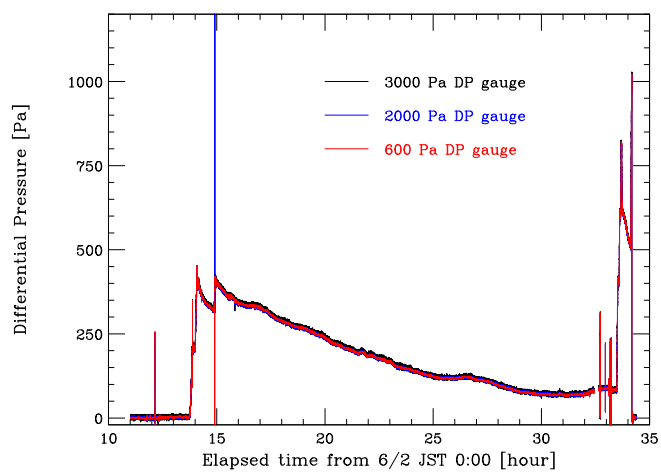


図 6: NPB2-2 気球の膨張試験時の差圧の時間変化。