

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 (NPB2-1a、NPB2-2、NPB7-1)

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所	:	斎藤 芳隆
東海大学工学部	:	中篠 恭一
東京工業大学環境・社会理工学院	:	秋田 大輔
明治大学理工学部	:	松尾 卓摩
藤倉航装(株)	:	松嶋 清穂、橋本 紘幸
ナカダ産業(株)	:	島津 繁之

1 はじめに

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。搭載重量1トン、飛翔高度37kmを体積30万 m^3 の気球で実現することが目標である。長時間飛翔気球は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34kmの飛翔を2016年には46日間、2017年には12日間成功しているが、飛翔高度、および、飛翔時間の点に課題が残っている。

我々は高度37km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[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54kgのNPB2-1気球の破壊圧が1,040Paであることを検証するに至っている[3]。この破壊圧は、40kgのペイロードを搭載し、高度22kmを飛翔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。そこで、従来実施してきた溶着線の耳に、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する方法に換えて、二列ミシンを利用し、全ての交点を2列直線縫いをするのが有望であることを見出した。気球形状での状況を確認するため、2015年11月に実施した試験で10,020Paの耐圧性能を発揮していた体積10 m^3 のNPB001-6気球の網固定方法をこの方法に変更して耐圧試験を実施し、10,000Pa以上の耐圧性能を有することを確認した[4]。

この気球の体積は 10 m^3 に過ぎず、飛翔試験を検討している体積 $7,000 \text{ m}^3$ といった大型気球で発生しうる問題が洗い出せたかは定かではない。そこで、前回同様、体積 $2,000 \text{ m}^3$ の気球での膨張破壊試験により、改良の有効性の評価を行った。本論文では、先に試験を実施した NPB2-1 気球を改修した NPB2-1a 気球、および、新規に製作した体積 $2,000 \text{ m}^3$ の気球の膨張破壊試験について報告すると共に、この方法で製作した体積 $7,000 \text{ m}^3$ の気球の飛翔試験について報告する。

2 NPB2-1a 気球の膨張破壊試験

改良の有効性を確認するには、その改良以外の変更を極力抑えた気球での試験との比較が最適である。このため、2016 年 3 月に膨張破壊試験を実施し、 $1,040 \text{ Pa}$ の耐圧性能を確認した NPB2-1 気球を改修し、耐圧性能の試験を実施した。気球の改修は以下のように進めた。

- 費用削減のため、1. 気球フィルムの補修箇所の査定、補修は実施しない、2. 引き裂き機構は設けない、3-a. 気球と網の取り外し、および、3-b. 破損したフィルムを取り出すために網と網の縫合部を解く作業は、in house で実施することとした。これにより、気球改修+検査工数の費用を 20%削減し、製作可能なコストにすることができた。
- 網のとりはずし作業を実施したところ、その過程で網に損傷があることが判明した。そこで、詳細に網の補修必要箇所を調査したところ、結局、14 箇所の損傷が発見された。破損部に補強用の網線を重ね、ミシンで縫い合わせることで補修した。
- 皮膜に穴があいたフィルム、引き裂きで破壊したフィルム、および、その間のフィルム一枚を交換し、結局、20 枚中、3 枚のフィルムを交換した。

気球の膨張破壊試験は、当初、平成 28 年 2 月 21 日に実施しようとしたが、プロワの故障のためレンタルした体育館の時間内に試験を完了することができず、気球を破いて実験を終了させた。この気球を補修し、2017 年 3 月 3 日に小野町民体育館にて膨張耐圧試験を実施した。

気球は正常に展開したが、加圧に伴い、小さな穴があいたり、網が破損したりする不具合があり、結果的には、最大差圧は 150 Pa に滞った。気球が展開した状態においてすでに、フィルムに伸ばされて薄くなっている部分が散見され、前回の破壊試験において損傷を負っていたことが判明した。また、網を補修した箇所があたったフィルムに穴が発生した部分もあり、網の補修には改良が必要であることも判明した。

3 体積 $2,000 \text{ m}^3$ の気球 (NPB2-2) の膨張破壊試験

所期の目的であった網の固定方法が試験できなかったため、ほぼ同型の NPB2-2 気球を新規に製作し、膨張破壊試験を実施することとした。NPB2-1a 気球とは、網の固定方法、および、搭載機器の吊り下げ金具 [5] 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、一晚、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。



図 1: 1,000 Pa 印加時の NPB2-2 気球



図 2: NPB2-2 気球の破壊時

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 1 のように 1,000 Pa に到達した直後に、気球は図 2 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。

得られた気球の内外差圧の最大値は 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 1)、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 [6] 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。

4 NPB7-1 気球の製作と飛翔試験

網と皮膜の固定を二列ミシンで直線縫いする方法を用いて、体積 7,000 m³ の気球を製作し、2018 年 7 月に飛翔試験に臨んだ。網をかぶせたスーパープレッシャー気球を単独で飛翔させるのは初めての試みであり、大重量吊り下げ構造や、放球時のスプーラーによる網のフィルムへの圧迫の影響の評価を実施すると共に、飛翔環境下での気球の完全展開の確認、耐圧性能と気密性能を評価し、できれば、飛翔時の温度や高度変動の評価を目的とする実験である。

気球実験の実施にあたっては、飛翔安全の観点から、以下の制約が課された。

- ジェット気流の速度が十分速く、方向が安定していること。
- 回収が可能な海域で加圧実験を実施すること。

この条件下においては、以下のように、限られた気象条件で、特殊なオペレーションをすることで実験が可能となる。

- 真西からの風速の小さいジェット気流があり、レベルフライト高度で風速の小さい東風がある場合。気球を 5 m/s の通常の上昇速度で上昇させた場合、満膨張に達するのは、回収に利用している沿

岸船が航行できる海域を超えて外洋側となってしまう。そこで、満膨張に達する前に排気弁を開いてガスを抜き、ゼロプレッシャー状態でレベルフライトさせ、東風によって回収可能領域に戻ってきた後にパラストを投下して加圧する。

- 北西からの風速の小さいジェット気流がある場合、沿岸船が航行できるのは沿岸からの距離であり、南東に気球が飛翔する場合には、許容される飛翔時間が長くなる。パラストの投下を抑制することで回収可能海域にあるうちに満膨張高度に気球が到達できる可能性がある。ただし、レベルフライトする時間はとれなくなる。

2017年7月23日には実験の準備が整うに至ったが、上記の気象条件が整わず、8月6日に飛翔を断念することになった。

この実験を実施するため、2018年度での実験を応募し、採択された。6~8月期に飛翔実験を実施する予定である。

5 まとめと将来計画

従来の網と皮膜の固定方法と比較すると、固定にかかる時間が半分程度ですみ、交点の位置をよりよく制御でき、縫い針が網を痛めるリスクが低いといったメリットのある二列ミシンで直線縫いで固定する方法を開発した。この方法で固定した際も、正常な展開ができ、十分な耐圧性能を発揮できることを確認するため体積 2,000 m³ の気球の地上膨張耐圧試験を実施し、正常展開と共に 1,020 Pa の耐圧性能を確認した。この耐圧性能は 2016 年に実施した同体積の気球と同程度の耐圧性能であり、新しい網結合方法に問題ないことを実証すると再現性よく高度 22 km に 40 kg の機器を飛翔可能なスーパープレッシャー気球が製作できることも意味する。この方式で体積 7,000 m³ の気球を製作し、飛翔試験に臨んだが、気象条件が利せず、飛翔試験は見送りとなった。2018 年度の飛翔実験として採択されており、6~8 月に飛翔試験により、その性能を評価する予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (A) 「皮膜に網をかぶせた大型スーパープレッシャー気球に向けた基礎技術の開発」(課題番号 17H01352)、および、宇宙工学委員会戦略的開発研究費「長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発と実証」の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Debora Fairbrother “Superpressure balloon”, Proc. 2017 Scientific Ballooning Technologies Workshop, 2017
- [2] 斎藤 芳隆、他、“菱目の網を被せたスーパープレッシャー気球”、JAXA-RR-010-03, pp. 21-40, 2011
- [3] 斎藤 芳隆、他、“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 (大重量搭載用大型気球の開発)” 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、“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—網と皮膜の新しい結合方法の開発—” 第 17 回宇宙科学シンポジウム講演集, P-160, 2017
- [5] 斎藤 芳隆、他、“スーパープレッシャー気球とゼロプレッシャー気球を組み合わせたタンデム気球の開発 II” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-13-011, pp.1-33, 2014
- [6] Nakashino, K. et al. “Super Pressure Balloon with Diamond-Shaped Net: A Numerical Study of its Structural Characteristics” Proc. of AIAA SciTech Forum, AIAA 2017-1117, 2017