

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 (NPB5-1)

ISAS/JAXA	:	齋藤 芳隆、後藤 健、山田 和彦
東海大学工学部	:	中篠 恭一、古田 良介、堂本 航大
東京工業大学院理工学研究科	:	秋田 大輔
名古屋大学理学部	:	田村 啓輔
岐阜大学工学部	:	大谷 章夫
長岡技術科学大学工学部	:	山田 昇
藤倉航装 (株)	:	松嶋 清穂、田中 茂樹、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 (SP 気球) をゼロプレッシャー気球 (ZP 気球) と同程度の体積/重量比で実現する開発を進めており、搭載重量 1 トン、飛翔高度 37 km を体積 300,000 m³ の SP 気球で実現することと目標としている。2010 年に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手法 [1] を着想し、以後、体積 10 m³ の気球試作から順次気球の大型化を進め、2012 年には体積 3,000 m³ の SP 気球と体積 15,000 m³ の ZP 気球とのタンデム気球システムを飛翔させるに至った (B12-02 実験)[3]。この実験は、内部ガス圧と大気圧との差圧は最大 814 Pa に達し、25 分間にわたる水平浮遊時の間は正圧であり、タンデム気球の飛翔時の挙動を測定するといった成果をあげた。しかし、所期の耐圧性能が 3,500 Pa であったにも拘わらず、400~500 Pa の差圧が印加された時点で数 $\times 10^{-4}$ m² の穴が生じ、ガス漏れが発生するという問題も生じていた。このため、網線長とフィルム長を一致させる、極のロープリング部の遊びをなくす、といった気球の構造の見直しを行い、直径 3 m の小型気球を製作し、地上試験によって改良が有効であることを確認した。2013 年 5 月には 2 kg のゴム気球に同型の SP 気球を吊り下げて飛翔性能試験を実施した (BS13-04 実験)[4]。その結果、-60 ~ -50 °C の低温環境下で 6,280 Pa 以上の耐圧性能を有すること、2 時間にわたり 5,600 Pa の差圧に耐えることが確認された。本論文では BS13-04 実験以降に進めた単独で大重量の搭載機器を吊り下げて飛翔する SP 気球の開発の経緯、および、今後の開発計画について報告する。

2 単独で飛翔する SP 気球の開発

本研究における最終的な目標は 1 トンの観測装置を吊り下げられる体積 300,000 m³ の SP 気球の開発であるが、これまで試験した気球は体積 3,000 m³ に留まっており、大型化に向けた開発が必要である。このため、以下の開発を行い、体積 5,000 m³ の飛翔試験用気球を製作した。

1. 大重量吊り下げ構造の開発

これまでの SP 気球は ZP 気球用弁座にアイボルトをたてて吊り下げる構造となっていたが、これでは、300 kg すら吊り下げることができない。このため、図 1 のように、スポークとリムからなる 500 kg が吊り下げ可能な尾部構造を開発した。この構造は、板厚を倍にすることで 1 トンが吊り下げ可能となるものである。試作品を用いて、2 トンでの静的な引張試験を実施し、破壊しないことを確認した。

2. 気球尾部構造の開発

気球の尾部からは気球を破壊する引き裂き紐を引き出す必要がある。このため、尾部金具の上に直径 30 cm のフィルムで塞がれた穴を設け、そこを引き裂き紐、および、破ったフィルムが通過する仕様とした。尾部には引き裂きと同じボタンが取り付けられている。尾部、および、引き裂き部を試作して破壊試験を実施した。その結果、尾部のボタン部が破れる荷重は 32 N と十分に小さいこと、引き裂き部のボタンがネットに妨げられても最大でも 99 N の抵抗にしかならないこと、を確認した。また、尾部に取り付けられる冗長系システムと引き裂き紐との干渉をさけるため、尾部の吊り下げ部分から冗長系システム全体を覆うカバーを被せた。

3. 気球頭部構造の開発

気球頭部には排気弁、および、ガス注入口を設けるため、直径 70 cm の弁座を用いた。気密性を確認するた

め、気球頭部、および、尾部構造を小さな気球に取付け、ガス漏れが十分小さいことを確認すると共に、排気弁が 1000 Pa の加圧時にも正常に動作することを確認した。

4. 放球時の皮膜保護

これまでの SP 気球は高張力糸で縛ることによって網と網、および、網とフィルムを結合させているが、放球時に気球はスプーラーにかけられるため、結び目がフィルムに損傷を与える可能性がある。このため、図 2 のように、ミシンで結び目なく縫合する方法を開発した。この改良により、製作時間も短縮することができた。

5. ガス透過量の定量化

フィルムからの透過量は文献上の値 [5] から問題ないと考えてきたが、用いるレジンによって透過量が異なることも知られている。そこで、DJK に依頼して透過量の測定を実施した、

一般に、フィルムのガス透過量は、

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right) \exp\left(-\frac{E_s}{RT}\right) \quad (1)$$

と表せることが知られている。ここで、 P はガス透過率、 P_0 はガス透過率係数、 E_p は拡散係数、 E_s は溶解係数である。この関係式に、温度を代入することで、他の温度での透過率を推定することができる。

DJK での測定結果に温度補正を行った値、および、他との比較を図 3 に示す。図中の実線は拡散係数と溶解係数の和が 30 kJ/mol、ガス透過率係数が $0.9 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} / \text{cm}^2 / \text{s} / \text{Pa}$ の場合を示す。温度補正後の測定結果はこの曲線によく表すことができ、これから外挿される $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ での透過度は、 $1500 \text{ cm}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ である。参考のため、ポリマーハンドブック [6] に記載の拡散係数と溶解係数からの推定値、および、グンゼの web ページ [5] におけるポリエチレンの値を示した。実測値は低密度ポリエチレンの値に近いことがわかる。

この透過度を用いて、フィルムから透過するガスによって生じる圧力減少量を推定すると、5 hPa の高度を飛翔する体積 $300,000 \text{ m}^3$ の SP 気球に 100 Pa の圧力差がかかっている場合、100 日間飛翔しても圧力損失は 10 Pa である。この値は許容値であり、現状のフィルムで問題ないことが確認された。

一方、地上試験で破壊した直径 3 m の気球を修繕し、ヘリウムリークディテクタを用いた漏れ調査を行ったところ、溶着部からの漏れが存在することがわかった。特に、溶着機を用いず小手による手作業での溶着されている極部での漏れが大きかった。気球体積が大きくなった場合でもこの漏れ量は変わらないと考えられ、その場合問題ない漏れ量であったため、現状のままとした。

3 体積 $5,000 \text{ m}^3$ の気球の地上試験

これらの開発を取入れた体積 $5,000 \text{ m}^3$ の気球を製作し、その飛翔試験 (B14-03 実験) の実施を計画した。すべての準備を完了し、6 月中旬から待機するに至ったが、飛翔機会が得られず、6 月 25 日に実験実施を見送ることとなった。そこで、気球の正常展開の確認、1000 Pa の差圧に皮膜、網が耐えること、ガス漏れが小さいことの実証、破壊圧の測定等を目的とし、大樹航空宇宙実験場 JAXA 格納庫において、9 月 24~26 日に地上膨張、破壊試験を実施した。

天井から吊り下げた気球に空気をブロウワで注入したところ、図 4 のように気球は正常に展開することが確認された。空気の注入を継続し、加圧したところ、425 Pa において圧力の上昇速度が低下したため、穴があったと判断し、空気の注入を停止した。気球頭部を格納庫東の監視カメラで調査したところ、引き裂き機構のボタンよりも頭部側に数 10 cm^2 程度の穴 (図 5) があいていること、網の破損と思われる箇所 (図 6) があることが確認された。このため、引き裂き機構を用いて気球を破壊し、実験を終了した。製作会社である藤倉航装 (株) において破損箇所の確認を行ったところ、上の箇所の破損が確認されると共に、他の大きな破損箇所は存在しないことが確認された。

特異部がない皮膜と網の数値シミュレーションからは、皮膜にかかる最大応力は、フィルムの降伏点応力である 9 MPa よりも遥かに小さい値に留まることが判明している。また、数値シミュレーションにおける主応力の方向は横方向であるのに対し、破損は縦方向の応力によって発生したと考えられる。したがって、数値シミュレーションで考慮していなかった、特異構造である引裂部が原因だと推定される。引裂機構は伸びが小さいテープが気球皮膜に貼り付けられている特異部であり、端部に応力が集中したことが想像される。加えて、



図 1: 500 kg 吊り下げ用気球尾部金具。

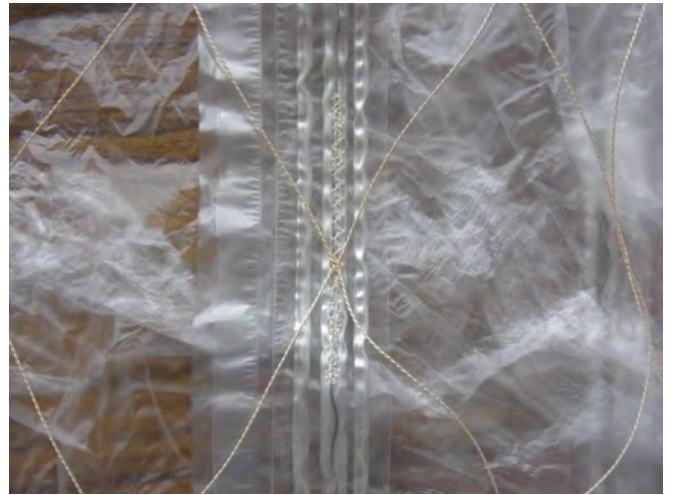


図 2: 網と気球のミシンによる固定。

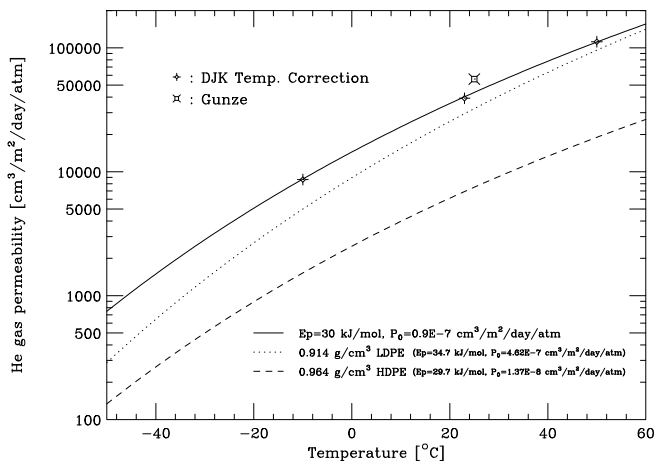


図 3: 10 μm 厚ポリエチレンフィルムのヘリウムガス透過率の温度依存性。



図 4: 満膨張となった気球。



図 5: 引き裂きボタン近くの破損箇所。



図 6: 網の破損箇所

貼り付けられた低温テープによって2%程度、フィルムよりも縮んでいたことも判明している。引裂機構によって耐圧性能が劣化する可能性については、小型気球に引裂機構を装備して耐圧性能を確認することで評価してきた。NPB1-1気球の地上試験において、800 Paまで耐えることを確認しており、また、B12-02実験として飛翔試験を行った、NPB3-1気球においても、飛翔時に最大814 Paまで加圧されても穴が広がらないことが確認されている[3]。これらは、今回の試験よりも膜面と網の双方にとって、より厳しい条件となっていると考えていた。しかし、NPB1-1気球、および、NPB3-1気球における引裂機構の全長が2 mであったのに対して、NPB5-1気球におけるそれは6 mであったためより応力集中が発生しやすい状況となっている。今後、引裂機構の構造を取り込んだ数値シミュレーションにより、破損するほどの応力が発生するか調査すると共に、網と皮膜との固定間隔を変更するなどの対策の有効性を確認し、その対策を施した気球を製作し、再度、地上試験を実施する予定である。

4 体積7,000 m³の気球の飛翔試験の提案

平成27年度には大型の単独で飛翔する気球にむけた開発項目の実証のため、体積7,000 m³の気球の飛翔試験を計画している。本年度に計画していた気球よりも体積を増し、気球を回収可能な領域に戻してく際の高度が30 hPaを越えるようにすることで、戻り風が得られる機会を増加させたものである。搭載機器は、基本搭載機器に加え、大気圧計、SP気球の内圧測定用の差圧計、地球赤外線放射を観測する放射計、および、SP気球を撮影するITVカメラと画像送信機である。また、将来の長時間飛翔実験における通信機器として、イリジウム衛星を用いた通信システムを搭載し、動作確認を行なう。実験手順は以下の通りである。

- 300 kgのバラストを搭載した状態で放球する。これにより、気球頭部が大浮力に耐えること、尾部が大重量の吊り下げに耐えること、が確認される。
- 上昇途中において、バラストを投下し、かつ、排気弁動作を行って上昇速度を適正に保つ。なお、回収可能領域に気球が到達する以前には、加圧しないものとする。
- 結果として、高度26.5 kmのレベルフライトに入れる。
- レベルフライトで30分間、高度、および、差圧の安定度を測定する。
- 残量のバラストを投下し、1000 Pa以上の圧力をかける。この際、将来の体積300,000 m³と比較して、フィルムには10倍、網には2倍の張力がかかる試験となる。飛翔条件が許されない場合には、最悪、500 Paの加圧条件まで許容し、実験を実施することを優先させる。
- 最後に気球を破壊し、実験を終了させる。

謝辞

飛翔試験(B14-03)の実施準備にあたっては、JAXA/ISAS/大気球実験室を中心とする大気球実験班にお世話になりました。気球の膨張試験にあたっては、ISAS/JAXAの飯嶋一征さん、田村誠さん、福家英之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)「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」(課題番号24246138)を受けて行っています。

参考文献

- [1] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-010-03, pp. 21-40, 2011
- [2] 斎藤 芳隆、他、JAXA RR-11-008, pp.1-16, 2012
- [3] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-13-011, pp.1-33, 2014
- [4] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-13-011, pp.35-60, 2014
- [5] <http://www.enplanet.com/Company/00000029/Ja/Data/p001.html>
- [6] A. S. Pauly, Polymer Handbook, New York, NY, USA, 4th edition, 1999.