

皮膜に網を被せたスーパープレッシャー気球の形状計算

東京工業大学環境・社会理工学院：○泉 芙由美、秋田 大輔、

ISAS/JAXA：齋藤 芳隆、東海大学工学部：中篠 恭一、明治大学理工学部：松尾卓摩

1. はじめに

現在、数か月の長期間にわたり飛翔可能な気球として、高張力繊維でできた菱目の網を薄いフィルム製の気球皮膜にかぶせるという手法で製作したスーパープレッシャー気球の開発を進めている。NASA 等で開発されている lobed-pumpkin 型気球(以下、pumpkin 型気球)の基本形状は、子午線長が一定、かつ、体積最大の形状として求めることができ、オイラー楕円となることが知られている[1]。皮膜に網をかぶせたスーパープレッシャー気球(以下、網気球)は、網目の菱形が細長い状態では pumpkin 型に近い形状となると予想されるが、一定となっているのは子午線長ではなく網線長であり、網線は子午線に対して角度をなしていることから、異なる形状をとることが予想される。現在、網気球の皮膜は pumpkin 型で製作しているが、形状が異なることにより皮膜にひずみが生じている可能性がある。網気球の最適な形を知ることで耐圧性の向上や軽量化が期待できる。

本論文では、まず、pumpkin 型気球と同様にオイラー方程式を解き、網気球の形状を求めた。次に、その式を用いて網気球の表面積・体積を計算し pumpkin 型気球の形状と比較した。さらに、網線長と子午線長の比を場所ごとに求め、皮膜のひずみを推定した。最後に形状の式から求めた理論値と実測値を比較して式の妥当性を確認した。

2. 形状の計算方法

pumpkin 型の形状は、周長が最大かつ体積最大の条件から求められる[1]。図1のように z 軸を回転対称軸、半径を r とする円筒座標で気球形状を表現する。周方向の距離を s、最大半径を R₀ とし、一定の周長の下で体積を最大にする形状を考えると、pumpkin 型気球を表す曲線の式を求めることができ、以下ようになる。

$$f(r) = \int_r^{R_0} \frac{t^2}{\sqrt{R_0^4 - t^4}} dt$$

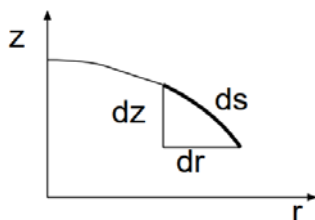


図1：座標系と線分素

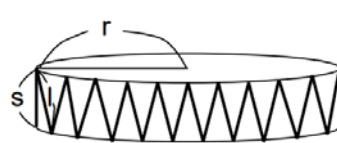


図2：網一目分の断面

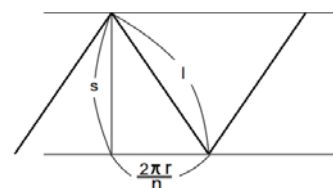


図3：網一目分の平面図

一方、網気球においては、周長でなく網線長が一定であるから、網線長が一定の条件により、気球形状が求まると考えられる。そこで、図2・図3のように網一目分を定義し、網線長一定の条件下で体積最大となる形状として pumpkin 型気球と同じように定式化すると、気球の上半分を表す式として、以下が導かれた。

$$f(x) = \int_x^{R_0} \frac{t^2 \sqrt{1 - a^2 t^2}}{\sqrt{R_0^4 (1 - a^2 R_0^2) - t^4 (1 - a^2 t^2)}} dt$$

ここで、網の交点間の間隔を l 、網線数を n とし、

$$a = \frac{2\pi}{nl}$$

とおいた。網線数 n の値が大きくなると a は小さくなり、pumpkin 型気球のオイラー方程式に近づくことが分かる。なお、ラグランジュの未定定数 λ と物理量との関係は、赤道面付近での傾きが $-\infty$ に近づくことから導くことができ、以下のようになっていた。

$$2\lambda = -\sqrt{1 - a^2 R_0^2 R_0^2}$$

3. 網気球と pumpkin 型気球の形状比較

網気球の網線数を変化させた場合の形状を図1に表す。これは、網気球のオイラー方程式を用いて、網線の交点間隔 l が 0.1m、pumpkin 型気球の最大半径 R_0 が 4m、網線数 n が 450、600、800、1000 のそれぞれの場合について形状を求めた後、最大半径を 1 に規格化し、規格化した後の半径を r_s 、そのときの高さを z_s として示したものである。現在製作している気球は、網目の縦横比が同一となるように設計しており、これらの図においては、網線数 1100 に相当する。

図1から、網線数が多いほど pumpkin 型気球の形状に近づき、網線数を少なくすると pumpkin 型気球の形状より縦長の形状になることが分かる。また、さらに小さい網線数の場合について計算したところ、網線数が少ない場合には収束する解が得られず、網線数 405 以下で値が発散することが分かった。

次に、網線長と子午線長の関係性を評価した。網気球では、網線は子午線と角度をなしており、その角度は場所によって異なっている。したがって、網の交点の間隔を子午線方向にみると等間隔ではなくなるはずである。しかし、実際に気球を製作する際には、皮膜と網は交点ごとに一定間隔で結合させているため、ひずみがたまっていると予想される。図2は、気球の場所ごとに網線長と子午線長の比がどのように変化するか調べたものである。ここでは、半径に対する依存性を示している。図2より、極のあたりで両者に違いはないが、赤道部になると違いが大きくなることがわかる。現在製作している気球に相当す

る網線数 1100 においては両者の違いは 3% 以下であり、フィルムの伸びによって両者の違いは吸収されていると考えられる。

さらに、網気球の網線数を変化させた場合の表面積と体積を求めた。図 3 は表面積、図 4 は体積を網線数の関数として示したものである。網線数が多いときの表面積・体積は pumpkin 型気球の表面積・体積に近づいていくことが分かる。逆に網線数を小さくすると表面積・体積は増え、pumpkin 型気球の表面積・体積との差が大きくなる。

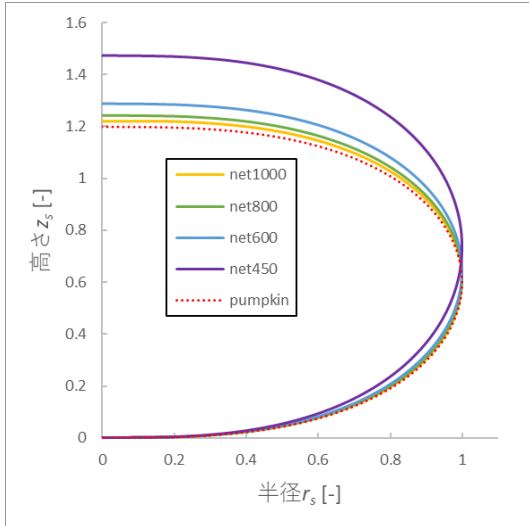


図 1 pumpkin 型気球と網気球の断面図

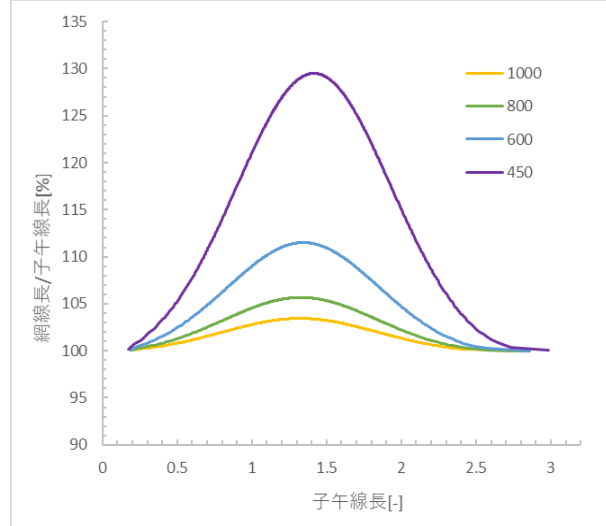


図 2 子午線長に対する網線長の割合

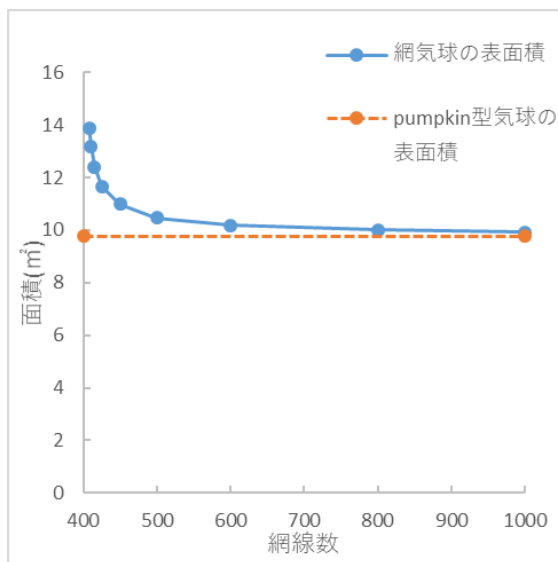


図 3 網気球の表面積

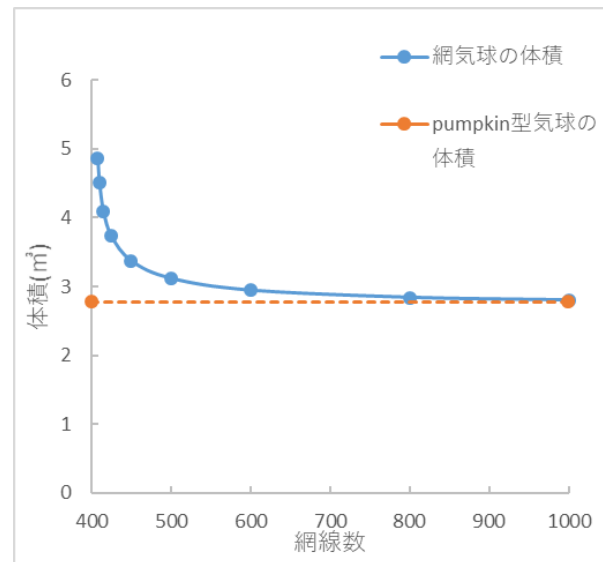


図 4 網気球の体積

これらの計算結果の妥当性を評価するため、計算結果と実測値との比較を行った。図 5 は、体積 2,000 m³ の網気球 NPB2-1、および、NPB2-2 気球の最大半径と子午線長の関係に関する比較を示すものである。計測結果は、2016 年、および、2017 年に実施した地上試験

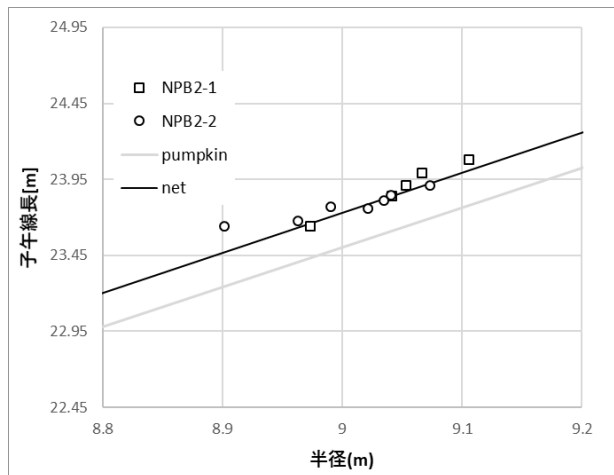


図 5 NPB2-1・NPB2-2 と計算値の比較

の際に計測されたもので[2]、計算値は網線数を 2412、最大半径を 9m、網の交点間隔を 0.1m に設定し、網気球のオイラー方程式を解いたものである。参考文献[2]では、実測値は pumpkin 形状よりも少し縦長であることを指摘するにとどまっていたが、今回の結果は実測値をよく再現している。すなわち、今回の計算方法により、網気球の形状が求められることが確認された。

4. まとめと今後の展望

網気球の形状を網線長一定、かつ、最大体積をとる形状としてオイラー方程式から導出した。網気球の網線数を変化させた場合の形状・表面積・体積を求め、pumpkin 型気球と比較した。網気球の網線数が少ないほど形状は縦長になり、表面積・体積は大きくなり、逆に網線数が多いと pumpkin 型気球に形状・表面積・体積ともに近づくことがわかった。また、子午線長と網線長の違いを場所ごとに調べたところ、違いが最大となるのは赤道部であり、網線数が少ないほど両者の違いは大きくなることがわかった。なお、現状の気球設計値では両者の違いは最大でも 3%に留まっており、フィルムの伸びによってこの違いが吸収されていると考えられる。さらに、今回求めた網気球の形状の式に基づいて子午線長/半径比を計算し、体積 2,000 m³ の NPB2-1 気球、および、NPB2-2 気球の計測値と比較したところ、両者はよく一致し、理論式の妥当性が検証された。

今後の展望として、網線数が変化した場合、実際の網気球に起こり得る浮力・高度の差を計算し、pumpkin 型気球との比較を行いたい。

参考文献

- [1]「パンプキン型気球についてー内圧の高いハート型気球ー」西村 純、宇宙科学研究所報告 特集 30, pp. 31-39, 1992
- [2]「皮膚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 (NPB2-1 と NPB2-2 の形状)」斎藤 芳隆、他、ISAS18-SBS-027、2018