

スーパープレッシャー気球の内外圧力差

矢島 信之¹・井筒 直樹¹・本田 秀之¹

On the Pressure Difference of a Super-pressure Balloon

By

Nobuyuki YAJIMA¹, Naoki IZUTSU¹ and Hideyuki HONDA¹

Abstract: This paper considers how to keep a balloon in a super-pressure condition. Apressurized level of an entirely closed balloon mainly depends on a specific free lift which causes an adequate ascending speed. This pressure is not relevant to the suitable level for a super-pressure balloon. In addition the internal pressure of the balloon is varied by the dural change of buoyant gas temperature. At the night time, the balloon cannot always be a super-pressure balloon, if the gas cools down extremely. The downward margin of the gas temperature is derived from the analysis of floating conditions. The fluctuation of the flight altitude is also studied through this analysis. These results are applicable as a base of an actual flight operation of a large super-pressure balloon.

概 要

この論文では、気球をスーパープレッシャー状態に保つということはどのような問題かを考察する。完全に閉じた気球に発生する内外圧力差は、主に気球を適切な速度で上昇させる自由浮力で決まる。しかし、この圧力はスーパープレッシャー気球として必要な圧力レベルとは直接関係がない。その上、気球の内圧は、浮力を与えるガスの温度の日変化とともに変動する。このため、夜間にガス温度が著しく低下すると、スーパープレッシャー気球状態を保てない場合がある。そこで、ガス温度が低下できる限界を気球の飛行条件から求める。その場合の飛行高度の変動についても併せて検討する。こうした結果は、大型スーパープレッシャー気球の飛行を管理する際に応用できる。

重要語: スーパープレッシャー気球

1. はじめに

スーパープレッシャー気球の通常定義は、排気孔のない閉じた気球であり、満膨張になっても上昇を続け、大気密度の減少によって浮力と重量がバランスして水平浮遊に入る気球とされる。その場合、ガスの排気もパラスタの投下もしなければ、気球内圧と大気圧力との差は主に自由浮力に依存する。しかし、自由浮力自体は、気

¹ 宇宙科学研究所

球の上昇速度が適正な範囲になるように選ばれるものであり、スーパープレッシャー気球に必要な適正な圧力差とは独立したパラメータである。通常のポリエチレンフィルムを用いた気球では、日没効果による浮力の減少を補償するために投下するバラストの量が全重量の7~10%である。この量は総浮力が5,000N~8,000Nの場合の上昇用の浮力(自由浮力)と総気球重量の比に近いので、スーパープレッシャー気球の加圧量と関連があるかと誤解されることがある。しかし、実際には、総浮力がせいぜい数100N程度の小型気球では自由浮力率は30%以上となるので、それがスーパープレッシャー気球の圧力差に転化すれば、不必要に大きな圧力となってしまふ。このため、たとえばポリエステルフィルムを用いた小型の球形気球を開発しているフランス CNES では、上昇速度が標準より遅くなっても、あえて自由浮力を小さくして放球している。[1]

次に、これも通俗的には、スーパープレッシャー気球は、加圧されているため体積が変化しないので一定の高度を保つと説明される。しかし、底部には搭載装置が吊り下げられているので、圧力差が変化すれば、原理的には体積が変わり、従って高度も変化する。むしろ、スーパープレッシャー気球のゼロプレッシャー気球との違いは、浮力が減少しても浮力と重量が自動平衡する高度があるか否かである。

気球を加圧した状態に保たなければならない理由の第一は、言うまでもなく、日照の有無で生じる気球ガス温度の変動である。スーパープレッシャー気球は、日中より低い夜間のガス温度でも、高度を安定に保てる状態にななければならない。この夜間のガス温度は、地球からの赤外線輻射の変動によって変化し、場合によっては大気温度を下回る可能性がある。そこで、気球の加圧量とガス温度とはどのような関係にあり、どのような条件がスーパープレッシャー気球状態を保つかを整理しておく必要がある。

今後の記述では、以下の3つの飛行状態を想定し、それらに対応した変数を以下のように定義する。

飛行条件

- (1) スーパープレッシャー気球として水平浮遊している状態
- (2) 上昇途中で気球底部の圧力がその高度の大気圧と一致してゼロプレッシャー気球となった状態。
- (3) 上記(2)の状態から上昇を続け(3)の状態へと近づいている状態。

記号の説明

V_s : スーパープレッシャー気球状態で水平浮遊している気球の容積 (m^3)

P_s : 上記の気球の内圧 (P_a)

T_s : 上記の気球のガス温度 (K)

P_1 : 上記の気球の浮遊高度の大気圧力 (P_a)

ρ_1 : 上記大気の密度 (kg/m^3)

T_1 : 上記大気の温度 (K)

V_z : 上昇途中でゼロプレッシャー気球状態となった気球の容積 (m^3)

P_z : 上記の気球の内圧 (P_a)

T_z : 上記の気球のガス温度 (K)

P_2 : 上記の気球の浮遊高度の大気圧力 (P_a)

ρ_2 : 上記大気の密度 (kg/m^3)

T_2 : 上記大気の温度 (K)

V_s' : 上昇途中でゼロプレッシャー気球からスーパープレッシャー気球へと移行途中の気球の容積 (m^3)

P_s' : 上記の気球の内圧 (P_a)

- T_s' : 前述の気球のガス温度 (K)
 P_1' : 前述の気球の浮遊高度の大気圧力 (P_a)
 ρ_1' : 前述大気の密度 (kg/m^3)
 T_1' : 前述大気の温度 (K)
 T_a : $T_1 \cong T_2$ とした場合の共通の大気温度 (K)
 W_t : 気球システムの総重量 (含, 気球ガス重量, kg)
 K_f : 自由浮力率 (自由浮力/ W_t)

2. スーパープレッシャー気球の成立条件

ここでは、気球の高さに起因する気球内の圧力勾配は無視する。したがって、ゼロプレッシャー気球状態では気球の内圧 P_z は大気圧 P_2 に等しい。また、ゼロプレッシャー気球状態の高度とスーパープレッシャー気球状態の高度の差は後に示すように小さいので、各高度の大気温度 T_1 、 T_2 との間の差も小さくて無視できるとし、共通の大気温度を T_a とする。こうした条件の下で気球の容積、浮力、荷重および大気圧と内圧の関係は以下のようになる。

$$V_s \rho_1 = W_t \quad (1)$$

$$V_s' \rho_1' = W_t (1 + K_x) \quad (2)$$

$$V_z \rho_2 = W_t (1 + K_f) \quad (3)$$

$$P_s V_s / T_s = P_s' V_s' / T_s' = P_z V_z / T_a \quad (4)$$

(2)式右辺の K_x は、ゼロプレッシャー気球状態を越えて上昇中の自由浮力率である。

まず、 $K_x = 0$ となって、スーパープレッシャー気球として上昇を停止した場合の気球の内圧 P_s および内外圧力差 ΔP_s は、(1), (3), (4)式より、

$$P_s = P_1 (1 + K_f) T_s / T_a \quad (5)$$

$$\Delta P_s = P_s - P_1 = P_1 \{ T_s K_f / T_a + \Delta T / T_a \} \quad (6)$$

となる。ここで $\Delta T = T_s - T_a$ である。

(5), (6)式でスーパープレッシャー気球のガス温度 T_s と大気温度 T_a とが等しい場合の P_s 、 dP_s を P_{s_1} 、 dP_{s_1} とすれば、

$$P_{s_1} = P_1 (1 + k_f) \quad (7)$$

$$\Delta P_{s_1} = P_1 K_f \quad (8)$$

となり、スーパープレッシャー気球のフィルムに加わる圧力は浮遊高度の大気圧と自由浮力率の積となる。 $T_a \neq T_s$ の場合を P_{s_2} 、 ΔP_{s_2} すれば、式(5), (6)より、

$$P_{s_2} = P_{s_1} T_s / T_a \quad (9)$$

$$\Delta P_{s_2} = \Delta P_{s_1} T_s / T_a + P_{s_1} \Delta T / T_a \quad (10)$$

となる。上記の圧力およびガス温度の関係を図式的に示すと図1となる。

ゼロプレッシャー気球状態からスーパープレッシャー気球として上昇を停止するまでの途中の高度での気球の状態は、(2), (3), (4)式より、

$$K_x = \{ (1 + K_f) P_1' T_s' - P_s' T_a \} / (P_s' T_a) \quad (11)$$

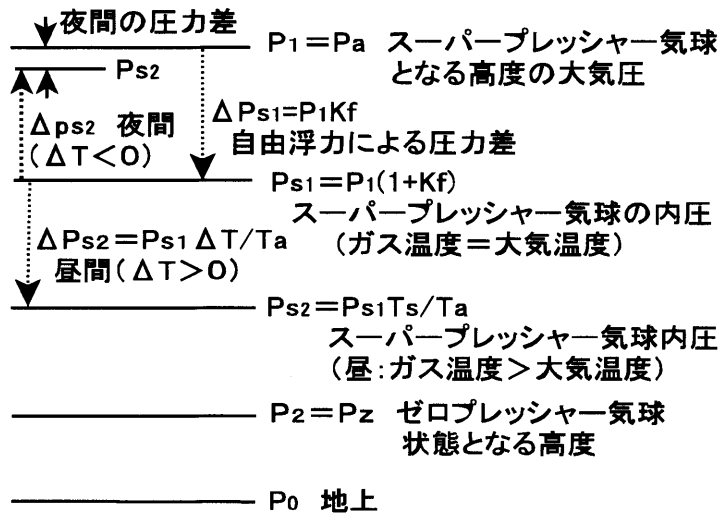


図1 スーパープレッシャー気球に発生する内外圧力差と大気圧、ガス温度の関係

(11)式の分子の{ }内の式、 $f = (1 + K_f) P_1' T_s' - P_s' T_a$ が気球の飛翔特性を示す。fの極性は、

$$P_1' = P_s' T_a / (1 + K_f) T_s' \quad (12)$$

を境にして P_1' の大小に対応して自由浮力率 K_x の正負が変わる。すなわち、気球が飛翔する大気の圧力が P_1' より低い大気圧高度まで上がれば下降し、逆であれば上昇し、自動的に水平浮遊高度に安定する。スーパープレッシャー気球のこうした性質が、このような平衡圧力を持たないゼロプレッシャー気球との大きな相違となる。

今、ゼロプレッシャー気球は大気圧 P_2 、大気密度 ρ_2 の高度で水平浮遊していたが、何らかの原因でそれより低い高度の P_2' 、 ρ_2' に移動したと想定する。その場合の浮力と全荷重の関係は、

$$V_z \rho_2 = W_t \quad (13)$$

$$V_z' \rho_2' = W_t' \quad (14)$$

である。温度による影響を考慮しなければ、両式の比から、

$$W_t / W_t' = \rho_2 V_z / (\rho_2' V_z') = P_2 V_z / (P_2' V_z') = 1 \quad (15)$$

であるので、 $W_t = W_t'$ となって上昇力は生じない。すなわち、高度は回復せず、そのまま任意の高度に留まることを意味する。もし浮力が総重量を下回れば、高度の降下は止まらない。当然のことであるが、ゼロプレッシャー気球は浮力の増大による高度上昇にたいし、ガスを排気して留まる安定な高度を持つが、下方には安定点のない気球である。

3. スーパープレッシャー気球の体積変化

スーパープレッシャー気球の内外圧力差が変化した場合の気球の体積変化を求めるには、気球の経線に沿った長さが一定という条件のもとで、僅かな圧力変化により生じる体積変化を求めなければならない。図2にパイロード重量が比較的軽い200kgの場合と重い1,000kgの場合に、ガス温度の変化と共に体積および飛翔高度がどのように変化して行くかを計算した例を示す。大気温度は約 -50°C である。値が急激に小さくなっている温度が、スー

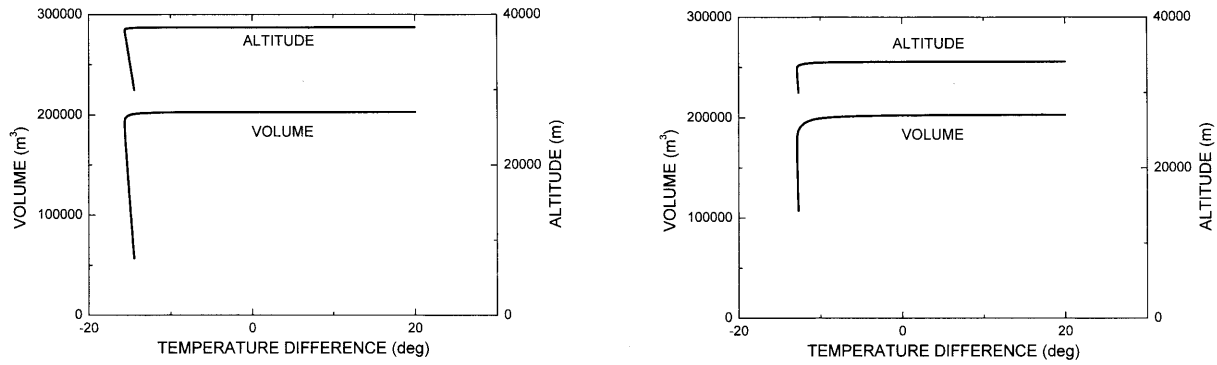


図2 ガス温度の変化と気球容積、飛行高度の関係
(ペイロード重量 (a) 200kg, (b) 1,000kg)

ーパープレッシャー気球としての圧力差が失われる点である。

また、全体的傾向を知るため、十分圧力差が高く上下対称形状のパンプキン気球 (Euler's Elastica) の体積を、その気球がゼロプレッシャー気球状態となった場合の体積と比較して圧力低下の影響を評価してみる。そのためには、ゼロプレッシャー気球の形状は Smalley によって導入された形状パラメータ Σ を用いて表すと便利である。[2] この Σ は、

$$\Sigma = w (2\pi/b^2P)^{1/3} \tag{16}$$

であって、気球形状の相似パラメータである。ここで、 w はフィルムの単位重量、 b は浮遊高度の大気密度とヘリウムガス密度の差、 P は全ペイロード重量である。

この Σ を変えて体積変化率を求めた結果を図3に示す。横軸が Σ 、縦軸はある Σ のゼロプレッシャー気球の体積と、その気球と経線の長さが同じパンプキン気球の体積との比である。 Σ がゼロの場合は、気球皮膜重量がペイロード重量に比べて無視できるほど小さい場合で、下に長く伸びた形状である。パンプキン気球の体積との差は当然一番大きく、20%程度となっている。 Σ が増えると共に、気球は扁平な形状となり、パンプキン気球に近

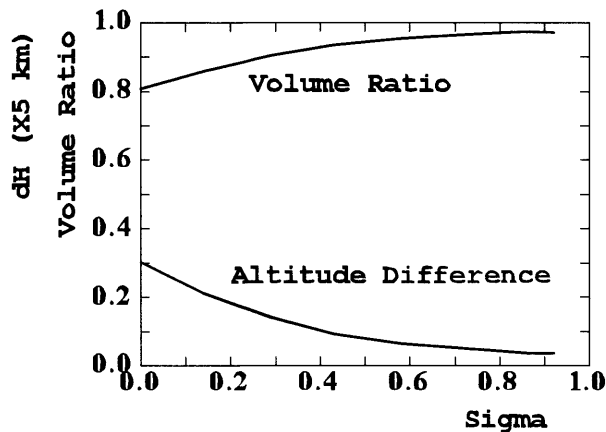


図3 圧力差が低下した場合のスーパープレッシャー気球の容積変化
(横軸は気球の相似パラメータ Σ 、縦軸は上下対称なパンプキン気球とそれがゼロプレッシャー気球になるまで圧力差が低下した場合の各々の体積の比。)

づく。その結果、当然スーパープレッシャー気球との体積の差は小さくなる。全体として、ゼロプレッシャー気球との体積の相違は、その外形形状の相違から想像されるほど大きくない事がわかる。気球内圧が減少しゼロプレッシャー気球状態となった場合の高度は、体積変化率に対応して大気密度の比が変化する高度であるから、その高度低下量 ΔH は、

$$\Delta H = h_0 \log_e(K_v) \quad (17)$$

である。ここで、 h_0 は大気のスケールハイトで約 7 km、 K_v はゼロプレッシャー気球とパンプキン気球との体積比である。 $K_v = 0.8$ 程度の $\Sigma = 0$ では、高度の低下は約 1.6 km となり、 $K_v = 0.9$ では 0.7 km となる。気球がこうした限界高度以下に降下すると、ゼロプレッシャー気球となるので、一定高度を維持する安定状態はなくなる。なお、気球の圧力差と体積変化率については、正規化パラメータは異なるが、西村により詳しく検討されているので参照されたい。[3]

4. スーパープレッシャー気球の圧力差の設計基準

(6)式から、夜間のガス温度が大気温度より低くなると、 $\Delta T = T_s - T_a$ が負となる。この温度低下量が大きいと、(6)式で $\Delta P_s > 0$ が保てなくなり、スーパープレッシャー気球の成立条件が失われる。その限界となる温度差 ΔT_{lim} は、

$$\Delta T_{lim} = T_a K_f / (1 + K_f) \quad (18)$$

となる。 ΔT_{lim} は大気温度 T_a と自由浮力率 K_f で決まり、 K_f は適正な上昇速度を与えようとすれば、気球の総重量で決まる。図 4 に、気球総重量と ΔT_{lim} の関係を大気温度 T_a をパラメータにして示す。例えば夜間大気温度が -50°C の場合に、総重量 1 トンでは、自由浮力率 7% であり、ガスの温度低下の限界値は -14.7°C となる。総重量が倍の 2 トンになると、自由浮力率は 6%、温度低下限界は -12.7°C に減少する。

夜間のガス温度を決める要因は、主としてフィルムを介しての大気とガスの伝熱特性とフィルムの赤外線領域の放射・吸収特性である。前者による熱の移動は水平浮遊中は小さく、後者はフィルムの特性により大きく異なる。気球は、地表面からの赤外放射を吸収して暖められ、同時に、自身から赤外線を温度 4 K の宇宙空間に放射して冷える。地表面の温度は 20°C 前後で、そこからの赤外放射には大きな変動はないが、雲が地表を覆った場

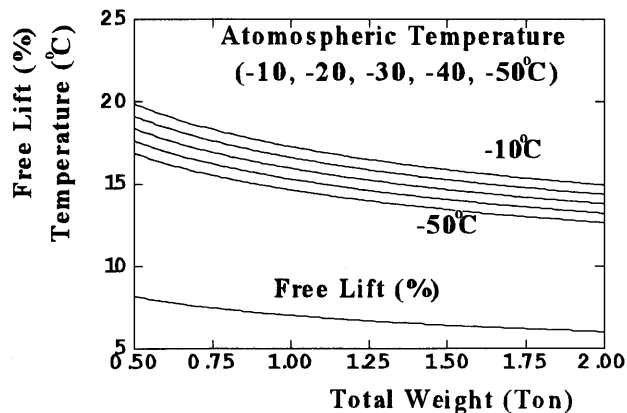


図 4 気球のガス温度がその高度の大気温度から下がることができる範囲
(気球は自由浮力を抑えこむことで圧力差が生じているとする。)

合にはその温度が輻射温度となるので、赤外放射は減少する。赤外吸収（輻射）係数が大きいフィルムで気球を作った場合、飛翔条件が赤外線放射、吸収条件に敏感な気球となるので、雲の有無およびその温度はガス温度に大きな影響を及ぼす。図1において、総重量が重く自由浮力率が小さい場合には、 ΔP_{s_1} は小さいので、夜間 P_{s_2} は P_1 より低くなってスーパープレッシャー気球ではなくなる恐れがある。

夜間にスーパープレッシャー気球の成立条件が崩れないようにするには、 $P_{s_2} - P_1 (= \Delta P_{s_1} + P_{s_2})$ を監視して、規定値を下回った場合にはバラストを投下して P_{s_2} を増せばよい。スーパープレッシャー気球UB3-1のフライトテストでは、水平浮遊後に強度の確認のためにバラスト投下を行って圧力差を高くした。こうした操作をもう少し微量で行うのがこれにあたる。[4]

5. ま と め

スーパープレッシャー気球の水平浮遊状態での大気圧と気球ガス圧力との差（フィルムに加わる圧力）、について考察した。スーパープレッシャー気球を単純に排気孔のない閉じた気球と考えると、圧力差はまず第一に自由浮力によって規定される。しかし、自由浮力は気球の上昇速度を選ぶと決まる量であって、スーパープレッシャー気球に必要な圧力差とは直接の関係はない。その量は、総重量が小さい小型気球ではむしろ大き過ぎ、大型気球では、場合によっては必要量より小さい。特に、夜間に地球からの赤外線放射が雲で遮られ、ガス温度が大気温度より大幅に下回る場合は、スーパープレッシャー気球ではなくなる可能性がある。どのような圧力差を気球に与えるかの指標を求め簡単な図表で示した。それらは、今後本格的なスーパープレッシャー気球を飛ばす場合に、気球に与える圧力差を求める基礎となると考える。なお、残された重要な課題は、夜間のガス温度を求める際のフィルムの赤外線吸収特性と地球からの赤外線放射量の関係である。NASAはULDBプロジェクトを進めるにあたり、こうした視点から解析を進めている。[5] 1999年10月に成功させたB60相当のパンプキン気球では、夜間の圧力差の低下が大きかったため、高度曲線上に高度の変動が見られる。これは非常に温度の低い雲の下を通過したためであると担当者は発表している。[6] 我々も、飛翔中の気球の下部が雲で遮られた場合の飛翔特性を推定、評価する手段を開発し、スーパープレッシャー気球のオペレーションの条件を求められるようにする必要がある。

参 考 文 献

- [1] Dubourg V., Nouel F. and Durand M.: Pressurized Balloon System: Results of ECUADOR 1998. THESEO 1999 Campaigns, Proc. 14th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programs and Related Research, 1999.
- [2] J.H. Smalley: Determination of the Shape of a Free Balloon, AFCRL-64-734, 1963.
- [3] 西村 純:「パンプキン型のオーバープレッシャー気球(OPS)について」, 宇宙科学研究所報告, 特集 第32号, 1995.
- [4] 井筒直樹, 他:「3次元ゴアデザインによるスーパープレッシャー気球の開発」, 宇宙科学研究所報告, 特集第40号, 2000.
- [5] H.M. Cathey, Jr.: "Advances in the Thermal Analysis of Scientific Balloons", Preprint of 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA 96-0695, 1996.
- [6] H.M. Cathey, Jr.: "Design and Testing of the ULDB Vehicle," 33rd COSPAR Scientific Assembly, 2000.