

[B 06] 金星大気中気球の熱的性能

機械制御工学科 山田研究室
9 8 1 3 0 1 3 市川 和男

1. はじめに

1.1 金星用気球の構想

金星には主に炭酸ガスからなる濃密な大気が存在するため、気球を浮遊させ各種の科学観測を行うことが可能である。しかし、金星は高度 54km において、40 °C、0.06MPa と地球表面に近い条件となるが、それより低い高度では温度、気圧とも上昇し、地表温度は約 470 °C、圧力は約 9.2MPa と過酷な環境となる。また、金星上空には高度 30km から 70km にかけて硫酸を含む厚い雲が存在するが、その雲の下に気球を浮遊させることにより金星周回軌道上の人工衛星からでも観測できない、直説的な観測が可能となり、金星探査上画期的なこととなる。

本研究は、金星の大気特性を生かし、気球内に水を封入することで浮遊を可能とする膨張型金星気球の熱性能について解析することを目的とする。

1.2 金星の環境

金星は赤道直径約 12100km、赤道地表の重力 g が地球の約 0.907 倍であり、自転周期は約 243 日である。これまでに金星大気はソ連、アメリカあわせて 7 機のプローブ、10 機のランダー、2 機の気球による直接観測が行われている。金星大気は温度 T_a 、圧力 P_a 、密度 ρ_a の高度分布については、いろいろな場所、時間帯についてその変動範囲も含めて解析されており、そのうち緯度 40 度付近の平均的な場合を図 1 に示す。

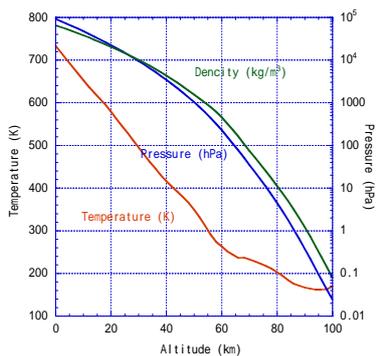


図1 金星各高度での温度、圧力、密度

2. 金星気球

2.1 気球の構造と展開の方法

金星に浮遊する気球本体の構造を図 2 に示す。浮遊高度を 45km とすると、気圧が 20 気圧、温度が 380K となるため、気球本体を構成するフィルムはそれに耐え得る材料が必要である。そこでこのような特殊な環境でも溶解することのない「ベクトラ」フィルムを使用する。また、フィルム内面に不織布の「ペルトオアシス」を接触させ、ペルトオアシスに水(H₂O)を含ませ、その水が大気により加熱されて蒸発することにより浮力が発生する。

これは高温、高圧である金星の大気では水蒸気の浮力のみでも観測機を搭載し、浮遊できる環境であることを利用している。これにより、10 日間金星内を浮遊することを目指す。

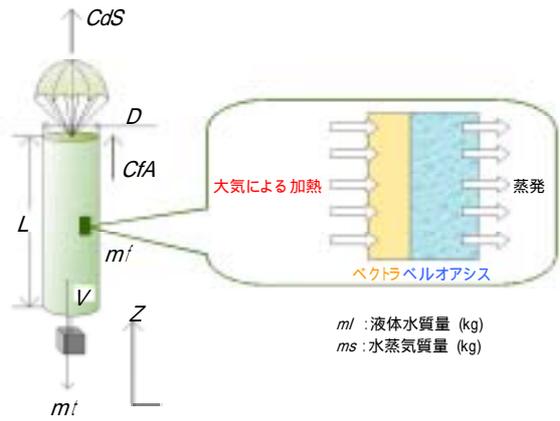


図2 気球の構造と外形

3. 気球降下のシミュレーション

3.1 気球浮遊時の運動方程式

降下中の気球の挙動を解析するために、1 次元問題としたシミュレーションを行う。気球の運動方程式、各物性値は図 2 を参考に、次式のように表される。

$$m_t \frac{d^2z}{dt^2} = -m_t g + V g \rho_a - \frac{1}{2} \rho_a \left| \frac{dz}{dt} \right| \frac{dz}{dt} (C_d S + C_f A)$$

$$m_t = m_f + m_p + m_l + m_s$$

$$m_w = m_l + m_s$$

(1)

3.2 各物性値の検討

(1)式を解析するにあたり、(1)式中の各パラメータのうち g 、 $m_f + m_s$ 、 $C_d S$ 、 $C_f A$ は定数とする。また、金星大気密度 ρ_a は図 1 より、各高度に対し値を与えた。

次に、気球内で水が蒸気となっているとき、蒸気比体積 v_s (m³/kg) は、気球内蒸気温度 T_s (K)、気球内蒸気圧力を P_s (Pa) とするとこれらは水の状態方程式に従う。

また、気球内蒸気の比体積および密度 ρ_s は以下の式で表される。

$$v_s = \frac{1}{\rho_s} = \frac{V}{m_s} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (2)$$

ここで、気球が目標の高度で力学的につりあうとき時間微分項は 0 となるから、(1)式は

$$-m_t g + Vg\rho_a = 0 \quad (3)$$

となる。このときの高度をバランス高度といい、この高度で気球が浮遊する。バランス高度を与え、そこで気球が満腔張で気球内圧が大気圧より3%大きいとすると、そこでの大気圧、大気温度より気球内温度、気球内圧力が決まり、状態方程式より気球内蒸気の比体積が決まる。したがって(2)、(3)式を連立してバランス高度で満腔張となる気球の体積 V と封入する水の質量 m_w を決めることができる。

3.3 浮力発生条件の検討

水蒸気を用いた膨張型金星気球は放出後、常に水が蒸発し、浮力が発生しているとは限らない。そこで、浮力の発生する条件を検討するにあたり以下のことを仮定した。

熱交換の速さは無限大と考え、気球と金星大気との間で熱平衡が常に達成されている。すなわち、常に金星大気と気球内部の温度は等しく、 $T_a = T_i$ と仮定する。

気球内圧力は大气圧力に等しいか、それ以上の値となる。水の飽和蒸気圧 P_{sat} よりも金星大気圧力 P_a のほうが大きいとき、気球内の水は蒸発することなく、浮力も生まれなない。このときの(1)式の運動方程式は浮力項 $Vg\rho_a$ が0となり、気球表面積 A も満腔張時の表面積とは異なる。

これから、気球内で水が蒸発しているときの気球内圧は水の状態方程式について Newton-Raphson 法を使用し求める。その圧力と大気圧、飽和蒸気圧について値を比較し、それぞれの状態における気球の状態から浮力を算出した。

4. 計算結果

4.1 気球サイズと気球内圧力

各高度をバランス高度として、気球が浮遊するための V と m_w を求めた結果が図3(a)であり、各バランス高度で満腔張となるための V 、 m_w を表している。これから、バランス高度を35kmとしたときの気球の質量は10.80kg、体積は1.63m³となる。また、バランス高度を20km、35km、44kmとしたときの V と m_w を持つそれぞれの気球が各高度で得られる気球内圧、大気圧、飽和蒸気圧を示したのが図3(b)である。

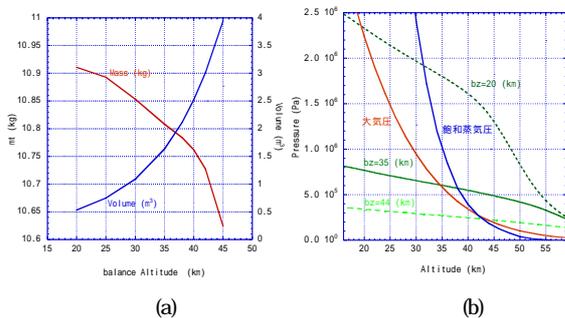


図3 (a)各バランス高度での気球体積、質量
(b)各バランス高度での気球内計算圧力、大気圧、飽和蒸気圧

4.2 気球の浮遊解析結果

金星の大気温度、圧力、密度は図1を参考に、(1)式の非線形2階微分方程式をRunge-Kutta法を使用し解いた。その際の各バランス高度の各時間に対する高度、速度のグラフが図4である。

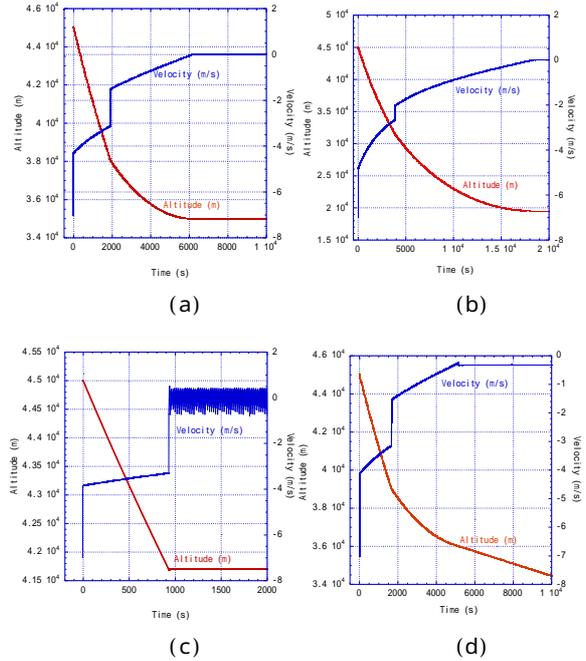


図4 (a)バランス高度35km(b)バランス高度20km
(c)バランス高度44km(d)バランス高度を考慮しない
における浮遊解析

図4のように(a)、(b)の各バランス高度では目標の高度での浮遊が可能である。しかし、高度が20kmのときの金星大気温度は580Kと高温であるため観測機器、フィルム共、実際の観測には耐えることができない。また、バランス高度を44kmとした(c)では高度約41.7kmで気球が上下する形となった。これは図3(b)より大気圧と飽和蒸気圧の交点が高度約42kmにあるためである。また、(d)はバランス高度での気球寸法、水質量を考慮せず独立に与えたため、金星上空でつりあいのとれる高度が存在せず、浮遊不可能となった。

以上から、水蒸気を用いた膨張型金星気球での浮遊に際し、高度35km付近の浮遊が最適と考えられる。

5. 結論および今後の展望

<浮遊高度について>

水蒸気を用いた膨張型金星気球はその構成材料、大気組成を考慮し、金星上空35kmでの浮遊が最適であると思われる。また、高度35kmでは大気と気球の熱平衡を仮定した場合、熱的には浮遊可能と思われる。

<熱性能について>

今後、大気と気球間の熱交換の速さは有限であることおよび、ベクトラ、ベルオアシスの熱物性値を考慮して解析することが必要である。

参考文献

- [1] 矢島信之：「金星探査バレーンシステム」平成6年度科学研究助成金研究成果報告(1995)
- [2] 井筒直樹：「二自由カプセル方式による金星探査低高度気球」宇宙科学研究所報告 特集 第37号(1998)
- [3] 「蒸気表および線図」日本機械学会(1955)