

[A18] 金星大気中気球の熱的性能

機械制御工学専攻 山田研究室
0233009 市川 和男

1 緒言

金星大気は炭酸ガスを主成分とする濃密な大気が存在するため、気球を長時間浮遊させ、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ため、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不可能な直接的観測が可能となり、金星探査上画期的なこととなる^{[1], [2]}。

本研究は、金星大気の特性を生かし、気球内に水を封入して浮遊を可能とする水蒸気を用いた膨張型金星気球の熱的性能について解析することを目的とする。

2 金星気球

金星大気中で水蒸気により浮遊する気球本体の構造を Fig.1 に示す。気球は渦巻状に収納された状態で耐熱カプセルに納められ、高度約 100km で金星大気突入し、高度 45km、降下速度-7.0m/s でカプセルは分離して渦巻状に収納された気球が展開する。展開後、気球は落下しながら金星大気により加熱され、気球内の水が蒸気となって浮力を得る。浮遊目標となる高度を 35km とすると、気圧が 0.6MPa、温度が 460K となり、このような特殊な環境にも耐える材料として液晶ポリマーフィルムを考える。フィルム内面に貼り付けた高吸水吸湿繊維の不織布に水を含ませ、その水が大気により加熱され、蒸発する。

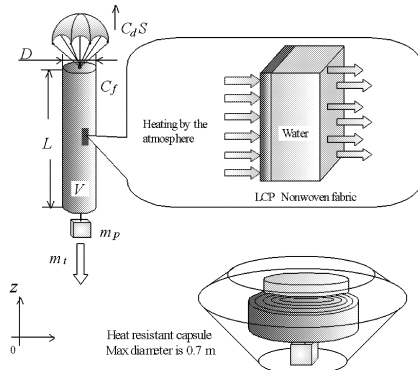


Fig.1 Structure of Venus balloon.

気球本体のサイズと内部の水の量は高度 35km で水が全て蒸発し、搭載機器と気球の総重量 m_t を浮遊させるのに必要なサイズとして $D = 0.32\text{m}$ 、 $L = 18.0\text{m}$ が決められた。なお、気球下部に吊るされた搭載機器は、観測機器および観測に必要な電力を供給する太陽電池などから構成され、搭載機器の重量 m_p は 2.0kg となり、フィルム重量 $m_f = 3.64\text{kg}$ 、水の質量 $m_w = 4.38\text{kg}$ を加え、総重量 $m_t = 10.02\text{kg}$ である。

3 気球と金星大気との伝熱

気球は金星大気温度との温度差などにより加熱される。浮遊中の気球には、

1. 金星大気との対流伝熱
2. 金星大気・地面・宇宙との放射伝熱
3. 太陽からの放射伝熱

が作用する。本研究では 1. および 2. について考察を行なった。

3.1 気球と金星大気との対流伝熱

気球は気球表面と大気の間で温度差を持ちながら降下、上昇を行なうため、気球表面には強制対流と自然対流両方の対流形式が作用する。この 2 つの対流形式はその速度方向、温度差により熱の伝熱を促進し、あるいは妨げる。

対流熱流束の計算には、強制対流および自然対流について平板周りの熱伝達を考えた。また、共存する流れの支配的となる対流形式は Re 数と Gr 数により以下のように求めることができる。

$$\begin{cases} \frac{Gr}{Re^2} < 0.1 & \text{forced convection} \\ 0.1 \leq \frac{Gr}{Re^2} \leq 10 & \text{combined convection} \\ \frac{Gr}{Re^2} > 10 & \text{natural convection} \end{cases} \quad (1)$$

2 つの伝熱形式が共存する流れにおける Nu 数は、強制対流における Nu 数 Nu_{forced} 、自然対流における Nu 数 $Nu_{natural}$ を用いて以下の式で表される。

$$Nu_{combined} = (Nu_{forced}^n \pm Nu_{natural}^n)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

パラメータ Gr/Re^2 を一定にしたときの気球内外温度差と速度の曲線から Fig.2 のように支配的となる対流形式のレジームを图示することができる。式 (1) より、右

下の斜線部は強制対流、左上が自然対流支配となる。これから、速度が7m/sを越えないと仮定すると、気球内外の温度差が10K以上の場合、気球周りの対流形式は自然対流か共存対流が支配的となる。

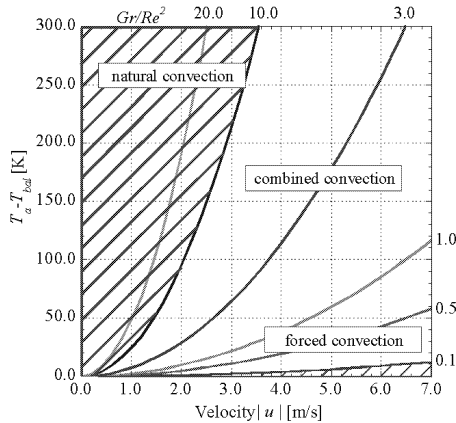


Fig.2 Regime map of convection modes at the altitude of 45 km.

このようにして浮遊中の気球周りにおける平均熱伝達率および気球の速度をパラメータとして気球表面が受ける対流熱流束 q_c を求めることができる。

Fig.3 に高度45kmにおいて気球が受ける対流熱流束を示す。横軸が気球表面温度、縦軸が熱流束でプラスが受熱を示す。気球が降下する際、気球表面温度が大気温度よりも低い場合、強制対流と自然対流の流れの向きが逆となるため熱流束が0となる気球表面温度が存在する。

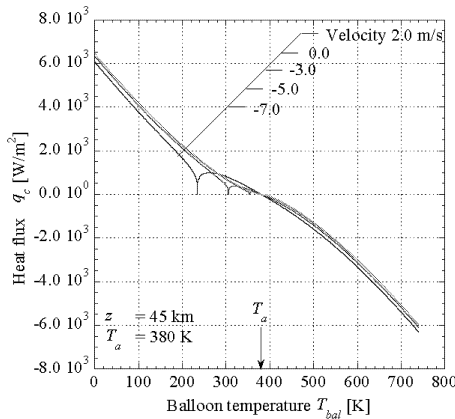


Fig.3 Convection heat flux at the altitude of 45km.

3.2 金星大気・地面・宇宙との放射伝熱

金星大気との放射伝熱の計算は、金星大気が炭酸ガスを主成分とした大気を持つことから、等温ガス塊を含む灰色体放射系の伝熱を考えた。気球を含む金星大気を金星地面、宇宙、気球の3つの面からなる閉空間系として考える (Fig.4)。ここで、開放されている宇宙の温度は絶対零度とし、宇宙、地面の放射率は1.0とした。

面積 A_i の面 i から出る放射エネルギー Q_i は以下の式

で表される。

$$Q_i = (\sigma T_i^4 - G_i) \cdot A_i \cdot \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i}$$

$$Q_i = (G_i - \sigma T_g^4) A_i \bar{\varepsilon}_{g,i} + \sum_{k=1}^n (G_i - G_k) A_i F_{ik}^{\circ}$$

$$(i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

ここで、 G_i はある面から出る自己の放射、および外来照射線の反射が加わった形で射出された熱流束の値である射度を表し、 ε_i は壁面の放射率、 $\bar{\varepsilon}_{g,i}$ は等温ガス塊の平均放射率である。また、 T_g は等温ガス塊の温度、 F_{ik}° はガスの吸収を考慮した面 i から見た面 k の形態係数となる。

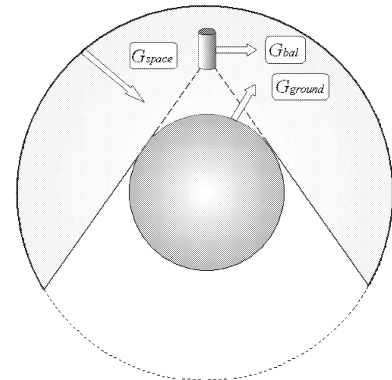


Fig.4 Radiation from venus atmosphere, ground and space.

式 (3) を用いて気球表面に入る熱流束を求めるため、形態係数 F_{ik} 、放射率 ε_g が必要であり、次のように計算した。

面 i から見た面 j の形態係数は式 (4) を用いて計算される^[3]。

$$F_{ij} = \frac{1}{2\pi A_i} \sum_{k=1}^{m_i} \sum_{l=1}^{m_j} (\ln \delta_{k,l}) g_k^i \cdot g_l^j \quad (4)$$

ここで $g_k^i (k = 1, 2, \dots, m_i)$ および $g_k^j (j = 1, 2, \dots, m_j)$ は各面の輪郭を分割させたときの方向ベクトルで、 $\delta_{k,j}$ は両ベクトル間の距離である。

Fig.5 に気球側面および底面から見た金星地面の形態係数 $F_{balSide,ground}$ 、 $F_{balBottom,ground}$ を示す。気球底面から見た地面の形態係数はおおよそ1.0となり、側面は0.4程度となる。しかし底面が金星地面から受ける熱は側面が受ける熱の約1%となり、底面の面積は側面に比べて小さいため放射伝熱への寄与は小さい。

次に、CO₂ バンドモデルによる計算^[4]を用いて炭酸ガス放射率を、気球側面に対する水平方向ガス層の放射率 ε_{gs} と底面に対する鉛直方向ガス層の放射率 ε_{gb} に分けて計算を行なった。ただし、水平方向あるいは鉛直方向に大気は等温と仮定した。Fig.6 にその計算結果を示す。図のように水平方向の放射率 ε_{gs} が高度30km以下のとき、放射率が1.0を越えてしまう結果となった。これはガス層の厚さが非常に大きいため、バンドモデルの適応

範囲を越えてしまっているためと考えられる。しかし現在のところ他に頼るべきデータも存在しておらず、また気球が浮遊する予定の高度 45~35km において 1.0 を下回っているため、本研究では Fig.6 の値を金星大気の放射率と仮定し計算を行なった。

以上から気球表面が受ける放射熱流束 q_r を気球表面の放射率 ε_{bal} を 0.9 として、式 (3) より求めた。Fig.7 に高度 45km において気球が受ける全放射熱流束 q_r を宇宙、地面、大気から受ける放射熱流束 q_{space} 、 q_{ground} 、 q_{gas} と共に示す。気球表面温度が大気温度よりも低いとき、熱流束は正となることが分かった。

気球が受ける全熱流束 q_t は $q_t = q_c + q_r$ で与えられる。

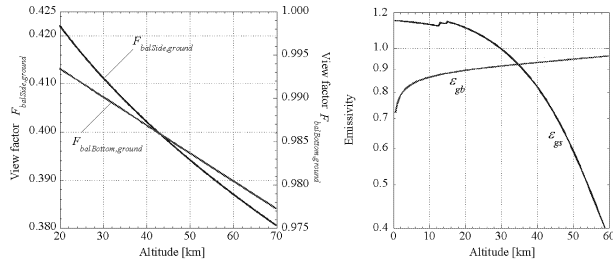


Fig.5 View factors of the Venus ground seen from the balloon.

Fig.6 Emissivities of the atmospheric gas facing to the side (ε_{gs}) and the bottom (ε_{gb}) of the balloon.

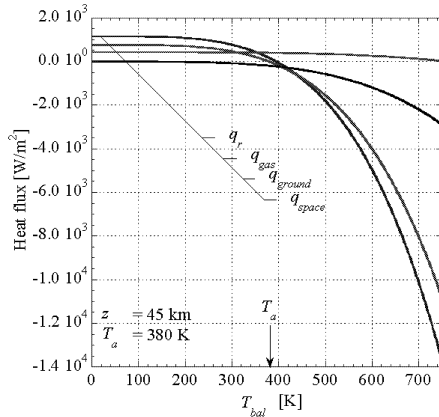


Fig.7 Radiation heat flux to the balloon surface at the altitude of 45 km.

4 気球の降下シミュレーション

降下中の気球の挙動を解析するために、1 次元の運動方程式を解いてシミュレーションを行なった。気球が単独で降下を開始した後の運動方程式は時間を t 、高度を z とすると以下ようになる。

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

$$m_t = m_f + m_p + m_w$$

$$m_w = m_l + m_s \quad (5)$$

m_l と m_s は液体および蒸気の水の質量である。 C_f および $C_d S$ は Fig.1 に示されるように気球側面の摩擦係数、およびパラシュートによる抗力である。式 (5) は初期値を与えて、Runge-Kutta 法を用いて解いた。

4.1 浮力の発生する条件の検討

投下された気球は水の全く蒸発しない閉気球状態、水が一部蒸発しているが最大体積とならない部分膨張状態、最大容積となる満膨張状態の 3 つの形状が存在する (Fig.8)。以下にこれら 3 つの状態において気球表面が受ける熱流束と気球体積などの関係を求める。

i) 閉気球 - Closed balloon -

閉気球のとき、気球は降下しながら熱量を受けるが、気球内の水は液体の状態であり、飽和温度まで温度が上昇していく。ある時刻から dt 秒後の気球内の温度変化を dT_{bal} 、フィルムおよび水の密度、体積、比熱をそれぞれ ρ_f 、 ρ_w [kg/m³]、 V_f 、 V_w [m³]、 c_v 、 c_w [K/kgK]、気球表面に流入する熱流束を q_t [W/m²] とすると、熱バランス式 (6) が成り立つ。

$$q_t A = (\rho_f V_f c_f + \rho_w V_w c_w) \frac{dT_{bal}}{dt} \quad (6)$$

水の物性値は日本機械学会実用国際状態式 (IF97) を用いて算出した^[5]。気球内の温度が上昇し、 T_{bal} がその高度の大気圧に対する飽和蒸気温度に達したとき、気球内の水は蒸発を開始する。

ii) 部分膨張気球 - Partially expanded balloon -

気球内の水が蒸発することにより、気球は膨張し、体積が増加する。気球内の水は飽和水と飽和蒸気の二相状態となり、気球内圧力はその高度での大気圧 $P_{bal} = P_a$ 、気球内温度は P_{bal} に対する飽和温度 $T_{bal} = T_{sat}$ となる。 dt 秒間に蒸発する水の質量を dm_s 、水の蒸発潜熱を L_w [J/kg] とすると、式 (7) となる。

$$q_t A = L_w \frac{dm_s}{dt} \quad (7)$$

気球内の体積が最大となった以後もさらに加熱されれば、気球内圧力は大气圧よりも高くなり気球内の水は二相状態を保つかまたは過熱蒸気となる。

iii) 満膨張気球 - Fully expanded balloon -

気球の体積が最大となった状態を満膨張状態という。このとき全ての水が蒸発しているとは限らず、二相の飽和状態のまま最大体積を保つ状態が存在する。このとき気球内の温度、圧力は部分膨張状態と同じく $T_{bal} = T_{sat}$ 、 $P_{bal} = P_a$ となる。また、蒸気質量は気球の最大体積を V_{max} [m³]、蒸気の比体積を ν_s [m³/kg] とすると、式 (8) となる。

$$m_s = \frac{V_{max}}{\nu_s} \quad (8)$$

一方、全ての水が蒸発して満膨張に達した場合、飽和蒸気はさらに加熱されると過熱蒸気となり、気球内の温

度が上昇する。このときの温度変化は気球内蒸気の定積比熱を c_{vstm} [J/kgK] とすると、以下ようになる。

$$qtA = m_w c_{vstm} \frac{dT}{dt} \quad (9)$$

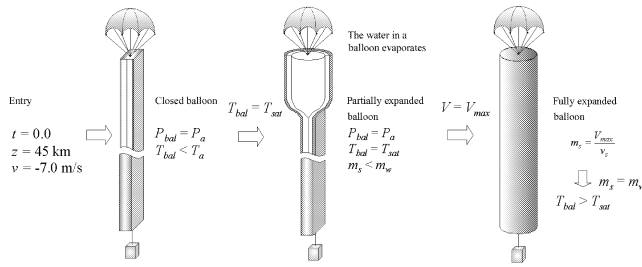


Fig.8 Balloons at three situations.

4.2 計算結果

以上の基礎式を用いて式 (5) を解いた。気球の初期条件 ($t = 0$) は高度 45km、落下加速度-7.0m/s、気球温度 325K とした。高度および速度変化を Fig.9 に、気球内の体積と蒸気の質量を Fig.10、気球内温度と圧力を Fig.11、Fig.12 に、また、気球表面に入る熱流束を Fig.13 に示す。

Fig.9 から分かるように、気球は投下後すばやく減速し、 $t = 6000$ sec 前後で目標となる高度 35km で浮遊する。気球は約 80 秒間閉気球を保ち、その後水が膨張を開始し、1500 秒で満膨張となり約 5000 秒前後で全ての水が蒸発する (Fig.10)。

Fig.11 より、気球内の温度 T_{bal} は投下後すばやく上昇し、約 80 秒で飽和蒸気温度と等しくなる。気球内はしばらく水と蒸気の二相状態のまま降下し、約 5000 秒で全ての水が蒸発し、その後は過熱蒸気となって気球内の温度と圧力は上昇する。

5 結言

本研究では高温、高圧の環境である金星に対し膨張型気球を投下する際の熱的現象について解析を行ない、浮遊の可能性について研究した。その過程で気球表面が受ける熱量のうち、大気との対流熱伝達および金星大気や地面からの放射伝熱について推定を行なった。

金星大気との対流による熱伝達では気球表面と大気の間で強制対流、自然対流および共存対流の 3 つの対流モードが支配的となる領域を考察した。その結果、気球周りの流れは自然対流および共存対流が支配的となることが分かった。

金星大気や地面と気球の間の放射伝熱については気球の周囲の空間を金星地面と宇宙の 2 個の面からなる等温ガス塊を含む閉空間系と考え、閉空間内の気球との放射熱交換量を求めた。

以上の結果を用いて、気球を高度 45km から投下させた際の気球の挙動を 1 次元の運動方程式を解いてシミュレーションを行なった。気球が浮遊する目標高度を

35km として、気球寸法と質量を決定し、シミュレーションを行なうと、気球内の温度は速やかに上昇し、水が蒸発して気球が満膨張となり、目標高度で浮遊することが分かった。以上から本研究では金星大気中の目標高度に気球を浮遊させることが可能であるとの結論を得た。

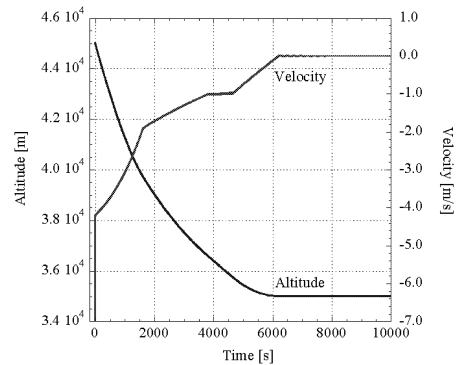


Fig.9 Altitude and velocity of the balloon vs. time.

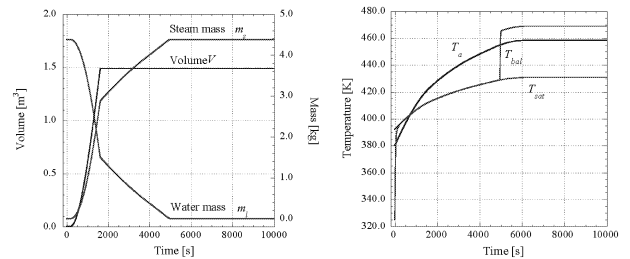


Fig.10 Volume and mass of the balloon vs. time.

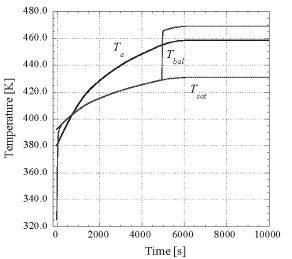


Fig.11 Temperatures of the balloon, atmosphere, and saturated vapor vs. time.

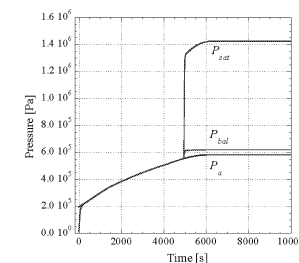


Fig.12 Pressures of the balloon, atmosphere, and saturated vapor vs. time.

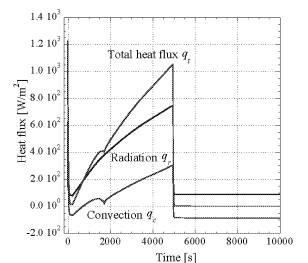


Fig.13 Heat flux vs. time.

参考文献

- [1] 矢島信之 "金星探査バルーンシステム" 平成 6 年度科学研究助成金研究成果報告 (1995)
- [2] 井筒直樹 "二重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] Naoto Kakuta *et al* "Estimation of Radiative Heat Transfer Using a Geometric Human body" IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING. VOL.48 (2001)
- [4] "伝熱工学資料" 日本機械学会 改訂第 4 版 (1986)
- [5] "蒸気表" 日本機械学会 (1999)