

膨張型低高度金星気球

井筒直樹¹・矢島信之¹

Inflatable Venus Balloons at Low Altitudes

By

Naoki Izutsu¹ and Nobuyuki Yajima¹

Abstract : Venus has an atmosphere of thick density so that a balloon of a relatively small volume can float at an altitude less than 40km with a payload of a few kilograms. A superpressure type of balloon can have a long lifetime and can travel a vast space by strong winds on Venus. We consider a balloon floating at altitudes of 35 to 37km below the Venus clouds. We propose an inflatable balloon using water vapor for the lifting gas, of which film has an outer layer for gas barrier and an inner layer for liquid water keeping. In the descent stage using a parachute, water held inside the balloon can be quickly vaporized by a lot of heat flux from the surrounding high temperature atmosphere owing to the large surface area of the balloon. As neither gas containers nor heat exchangers are necessary, we can construct a Venus balloon probe system of a simple, lightweight and small size. Selection of balloon shape and material for balloon envelope are also discussed in consideration of the Venusian environment such as high-temperature, high-pressure, and sulfuric acid.

概 要

高密度の大気をもつ金星では、比較的小型の気球により数kgの観測器を40km以下の高度に浮遊させることができる。スーパープレッシャー型気球を採用することにより、非常に広範囲かつ長期間の飛翔が可能となる。ここでは金星の雲の下、高度35～37kmを飛翔する気球を考える。水蒸気を浮力ガスとして使用する膨張型気球を提案する。この気球の気嚢は気密性フィルムである外層と水を保持する吸水性の内層からなる。パラシュートで金星大気中を降下する

¹ 宇宙科学研究所

短時間に、周囲の高温大気から大面積の気球本体表面を通して流入する多量の熱によって、内面に保持されていた水を気化させる。この方法によれば、浮力ガスを水で輸送するため高压ガス容器が不要であり、この水をあらかじめ気球内部に封入しておくことができるためガス注入装置も必要ない。したがって、非常に簡単、軽量で小型の金星気球プローブを構成することが可能となる。高温・高压・酸性である金星大気環境を考慮して、気球の形状や皮膜素材の比較、検討も行った。

重要語：金星探査，惑星気球

1. はじめに

大気を持つ惑星では気球を浮遊させることにより、地球上と同様に、大気の直接観測、地表面近くからの高解像度の撮像等を長期間かつ広範囲にわたり行うことが可能となる[1, 2]。二酸化炭素を主成分とした高密度の大気をもつ金星では、比較的小型の気球により観測機を飛行させることができる。図1に表すように、金星の表面温度、圧力はそれぞれ約740K、9.2MPaにもなる。高度50km付近になって地球の地上環境に近い大気圧力100kPa、温度340Kとなる。一方、高度45~70kmには厚い雲があり、これより上からは金星表面を直接観測することは難しい。大気は硫酸成分を含んでいて高度30~50kmを中心に分布している。

これまでの惑星気球の実施例は1985年に旧ソ連とフランスが共同で行った VEGA 1および VEGA 2の2機[3, 4]のみである。これらは、ハレー彗星フライバイミッションにおいて金星通過時に2機の気球プローブを投下したものである。投入された緯度は北緯7度と南緯7度であった。初期浮遊高度は53.5km（大気圧54kPa，大気温度30℃），この高度における平均風速は65~70m/sもあり、浮遊時間約46時間で金星を約1/3周した。これらの気球は直径3.4mの球形スーパープレッシャー型で全浮遊重量は21kg，そのうちゴンドラは約6.5kgであった。測定は、ディファレンシャルVLBIによる測位からの風速測定、さらに圧力、温度、鉛直風速、照度、微粒子等が観測された。

しかし、この高度からは雲の下を直接観測することはできない。もし、金星の雲の下に気球を浮遊させることができれば、金星表面の高解像度直接観測も可能となる。したがって、これまでに、多くの浮遊方式や気球形状、

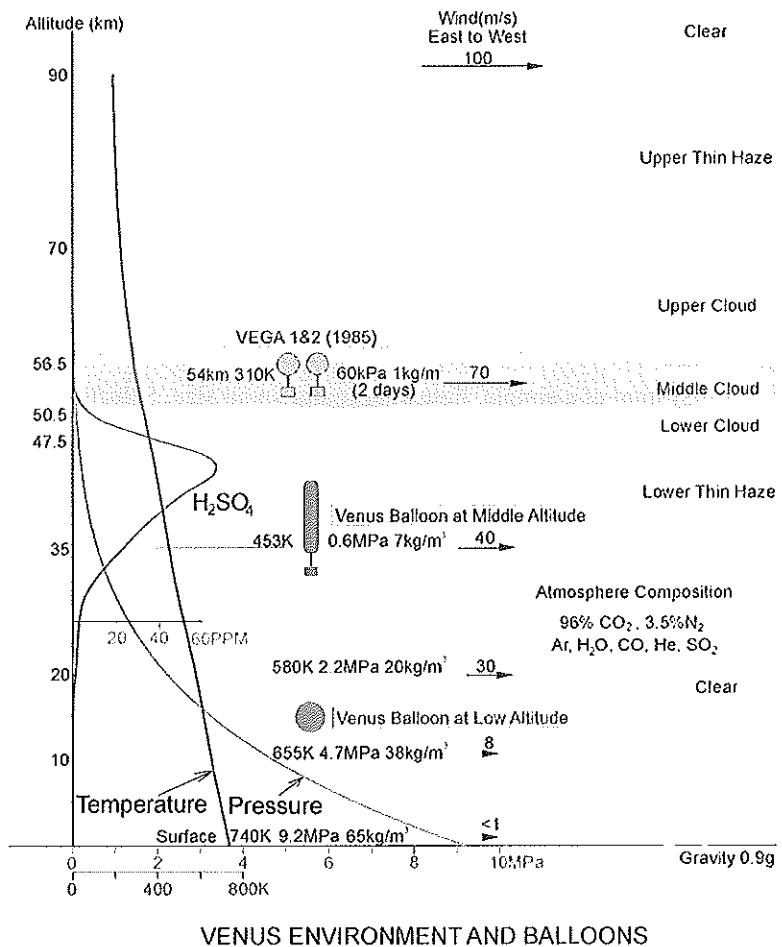


図1 金星大気と気球

ミッションが考案、提案されている[5-9]。高度10~20kmでは310~380°Cという高温の世界であり、このような高温下で長期間耐えられるフィルムは現在のところ実用化が困難であるため、金属を用いた気球が有力な候補となる。筆者が提案した二重カプセル方式[6]による非常に薄い金属球方式は、重量効率が良く実現可能性が高いことがわかっている。

一方、近年、高温下で使用可能なフィルムがいろいろと開発され実用化されてきている[10, 11]。これらの耐熱フィルムを使用することにより、これまでは不可能とされてきた金星の低高度に浮遊する膨張型気球の実現可能性が増してきた。そこで、本報告では、このような耐熱フィルムを使用した新しい膨張型気球の可能性を提案する。高温・高圧・酸性である金星大気環境を考慮し、気球の浮遊方式とその展開過程をシミュレーションし、金星気球の実現性について述べる。

2. 膨張型金星気球

2.1 目標高度

金星の高温高圧大気中で浮遊する膨張型気球を考える場合、長時間の観測を行うためには、スーパープレッシャー型の気球でなければならない。気球周囲の大気の変動や、上下風による高度変動、さらに昼と夜でのガスの温度変動や太陽からの輻射の影響を考えると、大気圧の数%程度のスーパープレッシャー圧を与える必要がある。これが、気球被膜に要求される強度を決めることになる。また、高温下で長時間飛行する場合にそのライフタイムを決める要素は、(1)気球被膜のガスバリア性能、(2)気球被膜の環境による劣化、(3)搭載電子機器用の電力、(4)搭載電子機器の冷却、の4つである。この中で、(3)については、温度220°Cまでの環境で動作する1次電池製品が存在する。最近、高温でも動作する太陽電池が開発されつつあるので太陽エネルギーの利用も可能となる。また、(4)については、現在、高温エレクトロニクスとして温度180~225°Cで動作する各種IC素子が開発、市販されている。したがってこの温度範囲での飛行であるならば、搭載機器用の電力は確保でき、冷却も不要となるので、最も困難な問題をクリアすることができる。もし、この温度領域で動作しないような素子がある場合には電子冷却等の手段も解決法となる。

以上のことから、膨張型金星気球の目標とする浮遊高度を高温エレクトロニクスの動作温度範囲である約180°Cに設定する。この温度は、高度にすると35kmであり、金星表面の直接観測も可能な金星の厚い雲の下である。金星気球皮膜材料としては、この高度の大気温度での強度低下が問題となり、また、(1)のガスバリア性は気球の浮遊高度の安定度を決定し、ガスが失われて差圧が0となりゼロプレッシャー気球となると、ガスがぬけるにつれて浮遊高度が下がってしまう。さらに、(2)の金星大気中の硫酸成分や紫外線による劣化の度合いが問題となる。

2.2 浮力ガス

金星大気の主成分は二酸化炭素であることから、浮力ガスとして可能なのは、水素やヘリウムの他に、アンモニア、水、メタンなどが考えられる。衛星により気球を惑星まで輸送する際、気球の浮力を発生させるための気体を、高圧容器に入れて惑星まで運ぶよりも、液体の状態に運ぶ方が、衛星を打ち上げる時の重量、容積が軽減されて効率が良い。たとえば、低い高度で大気温度が高い金星の場合、常温では蒸気圧の低い液体で、高温の大気温度で気体となるような物質を選べば、惑星までの輸送時は液体で、惑星での浮遊時は気体となるため非常に好都合である。

図2は金星大気の圧力の高度変化と飽和水蒸気圧の関係を示している。この図から、高度42km以上では水は大部分が液体として存在し、この高度以下では気体となることがわかる。このことは非常に好都合で、地球から金星までの輸送中に水は液体として運ぶことができ、目標高度35kmでは水蒸気となり浮力を発生することを意味する。つまり、水の蒸気圧は数kPa程度と小さいので、浮力ガスを運ぶ場合のような高圧容器が不要となり、気

球システムの小型軽量化が一気に可能となる。

また、液体であることから、この水をあらかじめ気球の中に封じ込めておくことが可能である。そうすると、はじめから浮力ガスとなる水を入れて密封した気球ができるため、ガスを注入するための装置が不要となり、非常に簡単で信頼性の高いシステムを構成することができる。ただし、このような気球を収めたカプセルが金星大気に突入し気球を展開した後、気球が惑星大気中をパラシュート等によって降下する短時間の間に、この水を全て気化して気球を膨らませる必要がある。水の蒸発エンタルピーは非常に大きいので、これまでに提案されているシステムでは、大きな熱交換器の使用が考えられている[7]。そして、液体を運ぶ容器、液体を気化させるための効率の良い熱交換器の開発が追求されてきた。

しかし、熱交換器の効率を良くしても、多量の液体を短時間で気化するには大気にふれる面積を大きくする大がかりな熱交換器が必要である。その結果、気球浮力ガスを液体として輸送することによる重量容積軽減効果が損なわれていた。

2.3 膨張方式

そこで、気球自体を熱交換器として使用することを考える。図3に示すように、気密を保つためのフィルムの内側に高吸水性フィルムを積層した構造の気球を考える。そして、この吸水層に、気化して浮力ガスとなる水を平均して含ませる。こうすることにより、気球の内面にあらかじめ水を広く分布させておくことが可能となる。そして、パラシュートで金星大気を降下中に、この気球の表面が周囲の高温高密度の大気に触れ、対流、輻射によって加熱される。気球の表面積を大きくすることにより、熱流入量が多くなり、容易に多くの水を気化させることが可能となる。

この種の高吸水性シートあるいは繊維はすでに実用化された数多くの製品があり、通常、自重の数倍以上の水を容易に保持可能である。したがって、吸水層を設けることによる気球の自重の増加はごくわずかである。

今回、膨張型金星気球を検討する前提条件として、気球プロブの総重量を10kgと仮定する。この中には気球本体と浮力ガス、吊り紐、ペイロードを含む。この他に高圧ガス容器やガス注入装置等は一切不要であるからこの重量は気球の浮遊重量であると同時に気球システムの全重量でもある。

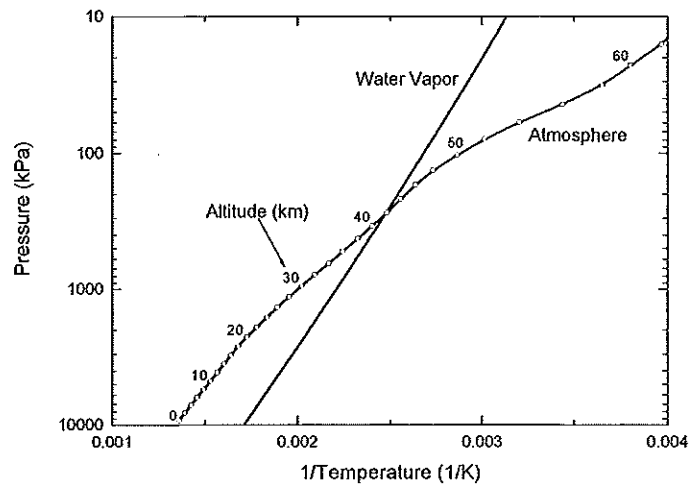


図2 金星大気圧および水の飽和蒸気圧と温度の関係

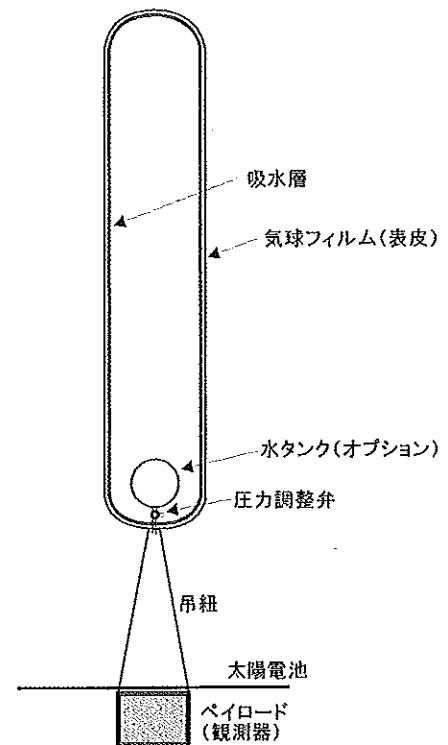


図3 気球の構造

3. 金星気球の成立性

3.1 気球素材

気球フィルムの耐熱性、比強度、ガスバリア性、耐環境性を比較検討する。図4は、プラスチックフィルムの最大連続使用可能温度と比強度の関係を示している。温度は室温と200°Cである。PBO (Polybenzoxazole) [9], Kapton, Upilex, Vectra [12]は目標高度の180°Cでも十分使用可能である。図5は室温におけるガス透過係数の比較を示したもので、PBOやVectraはガスバリア性が非常に良いことがわかる。表1はPBO, Kapton, Upilex, Vectraについて特性値を詳細に示したものである。強度を比較すると、PBOが最も良い性能を示しているが、大きな面積のフィルムの製造はまだ実用化されていない。したがって、多くの小さいフィルムを接着することによって気球を作らなければならない。また、PBOは硫酸に対する劣化が大きく、強度が最大1/4にまで低下してしまう。したがって金星のような硫酸環境で長期間使用するためには金メッキなどのコーティング [9] が不可欠である。Vectraも全体的に良好な特性を持っていて、水蒸気の透過率が小さく、硫酸や紫外線に弱くないことから、現段階では、金星気球に最適であることがわかる。しかも、VectraやPBOはインフレーション法により円筒状に製造されるため、もし、円筒型気球であれば、周方向の熱接着等が不要となる。したがって、製造も簡単でしかも信頼性の高い気球プローブを構築することが可能である。また、150°C以上の耐熱性のある高吸水性フィルムや繊維はすでに実用化されている。この種のフィルムや繊維は通常、自重の数十倍以上の水を長時間保持可能である。

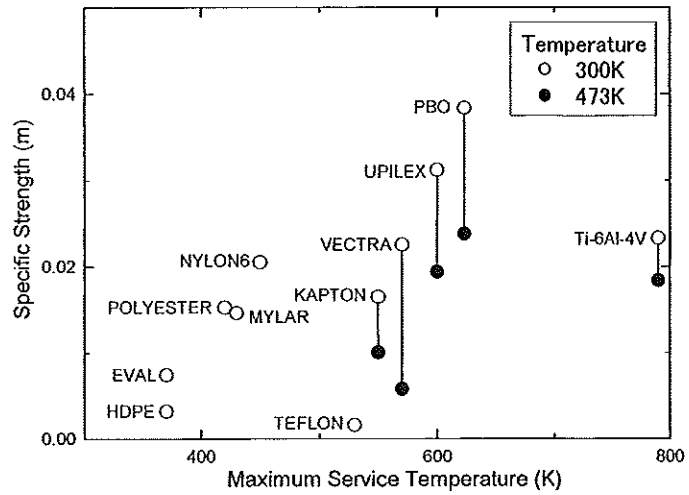


図4 フィルムの比強度と最大連続動作温度の関係

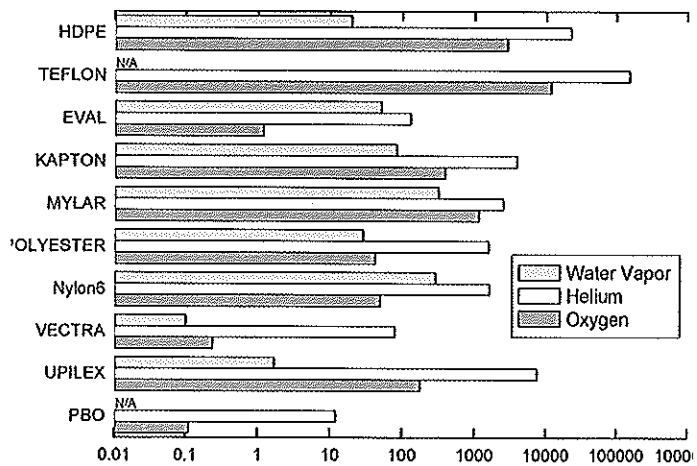


図5 フィルムのガス透過率

表1 フィルムの特性

Film		VECTRA	PBO	UPILEX	KAPTON
Density	g/cm ³	1.4	1.54	1.47	1.42
Melting Temperature	degC	325	—	—	—
Glass Transition Temperature	degC	285	—	> 500	350
Maximum Service Temperature	degC	310	400	290	250
Tensile Strength	MPa	310	580	450	230
Tensile Elongation	%	15	1.5	42	70
Young's Modulus	GPa	7.1	31	9.3	3
Tensile Strength at 200degC	MPa	80	360	280	140
Tear Strength	KN/m	590	—	300	480
Specific Heat	J/kgK	1290	—	1130	1090
Thermal Conductivity	W/mK	0.50	—	0.29	0.12
Tensile Strength Reduction (Sulfuric Acid)	%	88	25	80	82

3.2 気球形状

気球表面と大気の間で熱交換を行って内部の水を気化させる場合に、一般的に、大気にさらされる表面積が大きいほど熱流入量は大きくなる。図6は気球形状とその気球重量および気球表面積の関係を示したものである。この重量評価はVectraフィルムを使用したとして、ある浮遊高度(35km)で与えられた耐圧(周開大気圧の6%)を実現するために必要となるフィルムの厚さを計算して求めたものである。必要となる容積は総浮遊質量10kgから求まる。耐圧はフィルムの局所曲率で決まるため、局所曲率半径を任意に小さくすること

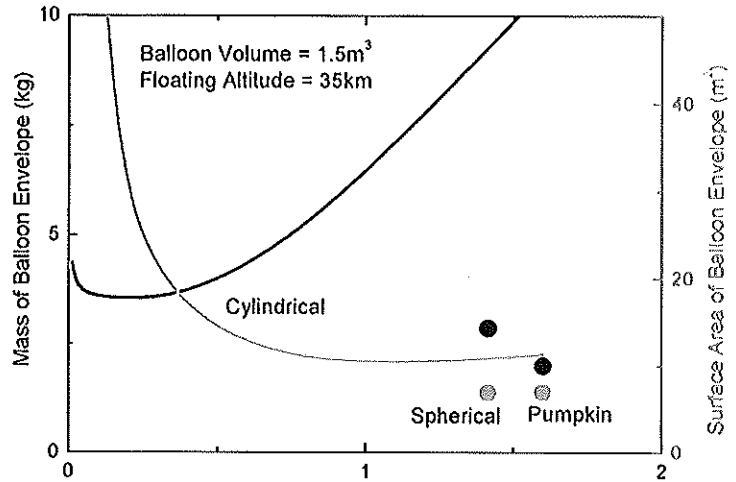


図6 気球の質量および表面積と直径の関係

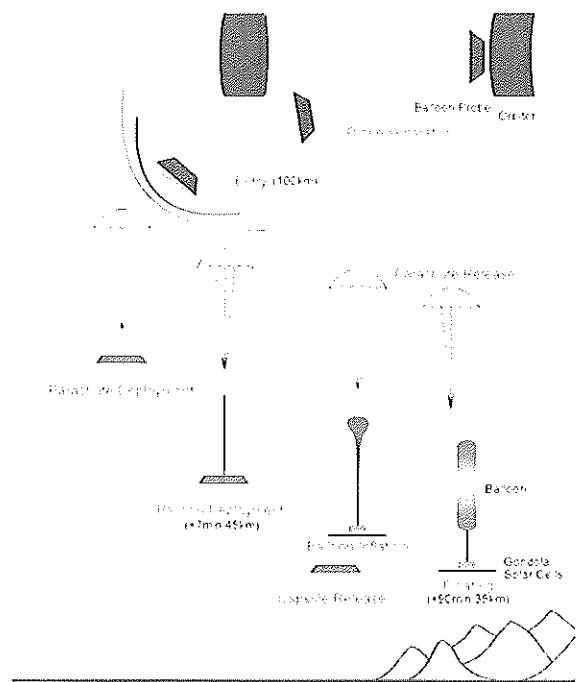
ことができる3次元ゴアデザインによるパンプキン型気球[13]が最も軽くなり、球形気球の質量の70%となる。円筒形ではある小さな直径のところで重量が最小となり、その値は球形気球の1.2倍程度になることがわかる。なお、この重量評価には必要となるロードテープや天頂、天底のフィッティング部の質量も含んでいる。

表面積はある程度大きくて所定の熱流入量が達成でき、重量が許容範囲にあることが求められる。表面積が大きく、また、その面積を自由に選ぶことが可能であることから、円筒形気球が本システムには最適である。円筒形にしたことによる重量増加も許容範囲内にあり、その直径としては気球重量が最小となる0.2m付近を考える。Vectraのようなインフレーション法で製造されるフィルムを使用すると、そのまま両端を閉じるだけで円筒形気球として使用可能であり、都合が良い。

4. 金星気球の展開

4.1 気球伸長方法

細長い円筒状気球は、内部吸水面に水を均一に分布させた状態で長手方向に平行にたたみ、螺旋状にまいて円盤状にして、大気突入カプセルに収めることで、カプセル内の収容性も良くなる。カプセルは図7のように大気突入後、周囲のヒートシールドを投棄、パラシュートでさらに減速後、パラシュートにより気球全体をカプセルから引き出して延ばし、気球本体の全表面を周囲の高温大気にさらす。適当な高度でカプセルも分離して気球とペイロードのみがパラシュートでゆっくり降下する。気球表面と大気の間での対流と輻射による熱流入により、内部の水が徐々に気化して気球はしだいに浮力をもつ。十分に浮力が付いたところでパラシュートも分離して最終的に気球は浮遊高度に入ることになる。カプセルはMUSES-C計画[14]で使用されるものと同様の形状を仮定すると、10kgの気球システムを収めるために必要な空間は約0.01m³となりカプセル直径は60cm程度でよい。



VENUS BALLOON ENTRY SEQUENCE (INFLATABLE BALLOON)

図7 膨張型気球の展開

4.2 気球膨張方法

水の気化を直接制御することは困難であるので、どの時点で気球が満膨張になるか、また、圧力差の変化を知る必要がある。満膨張になる高度が目標となる浮遊高度より高く、その後も水の気化が続くと、圧力差がしだいに大きくなることが想定され、気球の強度に問題が生じる。したがって、目標より高い高度で満膨張になると想定される場合には、表面積を小さくして、すなわち気球の直径を大きくして、熱流入を小さくするか、もしくは、満膨張後に水蒸気は安全弁を通して排気するなどの手段をこうじる必要がある。水蒸気を排気する場合には水は余分に搭載しておく必要があり、この量も見積もる必要がある。また、熱流入が小さくすぎて目標高度でも満膨張にならない場合には、さらに低い高度まで降下してから再び上昇して目標高度に収束することになるが、この最低高度があまり低すぎると、気球フィルムの耐熱性や、搭載機器の耐熱温度を超える恐れがある。このような場合には、逆に熱流入を増加させる必要がある。これは表面積を大きくする（気球直径を小さくする）あるいは降下速度（パラシュート）を変更する等の方策が考えられる。

そこで、このような気球の膨張過程を正確にシミュレーションする必要性から、本報告では、まず簡単なモデルによって、想定しているような気球の展開過程が可能かどうかを数値計算で確かめることにする。

4.3 数値計算方法

ここでは、簡単なモデルとして、気球への熱流入は対流による熱伝達のみを考え輻射の効果は考えないことにする。また、気球内部の熱伝導過程も考えず、気球フィルム、吸水層、水、水蒸気は同一の温度であると仮定する。そのかわりに気球内部の熱抵抗を模擬するため、熱入力効率なるパラメータを導入し、これを変化させることで熱抵抗や熱流入条件の変化による効果を調べることにする。また、いったん気化した水は気球上部にたまって円筒状にふくらみ、再度液化はしないものとする。また、気球の全表面が常に大気に鉛直状態でさらされているものとし、気球に平行な流れのみが存在すると仮定する。計算に使用する記号を以下に示す。

z : 高度, V : 気球容積, A : 気球表面積, L : 気球全長

m_s : 気球質量, m_w : 水質量, m_v : 水蒸気質量, m_p : 吊り下げペイロード質量

κ : 気球フィルムの熱伝導係数, C_{ps} : 気球フィルムの比熱, T_s : 気球フィルムの温度

C_{pw} : 水の比熱, C_{pv} : 水蒸気の比熱, H_v : 水の蒸発エンタルピー, R_v : 水蒸気のガス定数

C_D : パラシュートの抵抗係数, S : パラシュートの基準面積, C_f : 気球表面の摩擦係数

ρ_a : 大気密度, p_a : 大気圧力, T_a : 大気温度, Q : 最大熱流量, η : 熱入力効率

気球の運動方程式は、

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

ここで、 m_t は総質量、

$$m_t = m_s + m_w + m_v + m_p \quad (2)$$

また、気球すなわち水蒸気の体積は、

$$V = \frac{m_v R_v T_s}{p_a} \quad (3)$$

で求められる。熱流入により気球の温度は変化するが、水蒸気の気化温度 T_{vc} を越えたらその分だけ気化が生じて水が水蒸気になると仮定する。すなわち、

$$(C_{ps} m_s + C_{pw} m_w + C_{pv} m_v) \frac{dT_s}{dt} = \eta Q, \quad T_s < T_{vc} \quad (4)$$

$$\frac{dm_v}{dt} = \frac{dm_w}{dt} = \frac{\eta Q}{H_v}, \quad T_s > T_{vc} \quad (5)$$

とする。気球表面から流入する熱は、

$$Q = \frac{A\kappa N_u (T_a - T_s)}{L} \tag{6}$$

で表される。ここで、ヌッセルト数 N_u はレイノルズ数 R_e とプラントル数 P_r から決まり、気球本体の摩擦係数もレイノルズ数より求められる。プラントル数、熱伝導係数、動粘性係数、比熱も温度の関数である。ここでは、全領域が乱流であるとして、以下の式を用いた。

$$N_u = P_r^{1/3} (0.037 R_e^{0.8} - 850) \tag{7}$$

$$C_f = 0.03 R_e^{-1/7} \tag{8}$$

以上の式を与えられた初期条件の下で時間積分することにより気球の降下、膨張の挙動が得られる。

4.4 計算結果

計算条件は以下の通りである。目標高度は35kmまたは37km、最終的な浮遊質量(気球+吸水層+水蒸気+吊り紐を含むペイロード)は10kg。浮遊時の標準差圧 Δp は大気圧の3%とし、気球フィルムの厚みはフィルムの0.2%耐力に安全係数2をとって設定した。パラシュートの大きさは、 $C_D S = 2 \text{ m}^2$ 、気球直径は0.17mまたは

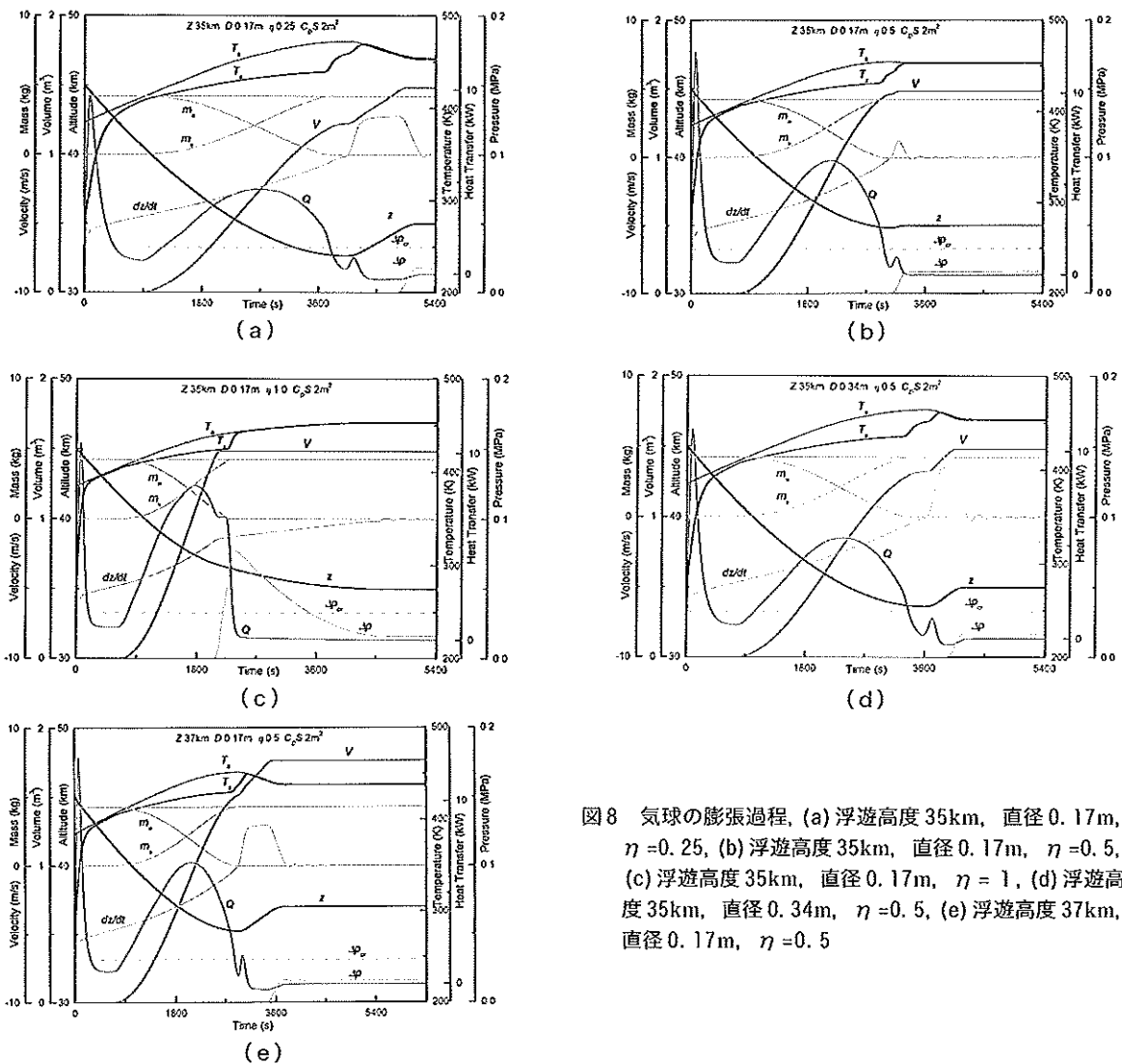


図8 気球の膨張過程, (a)浮遊高度35km, 直径0.17m, $\eta = 0.25$, (b)浮遊高度35km, 直径0.17m, $\eta = 0.5$, (c)浮遊高度35km, 直径0.17m, $\eta = 1$, (d)浮遊高度35km, 直径0.34m, $\eta = 0.5$, (e)浮遊高度37km, 直径0.17m, $\eta = 0.5$

0.34mとした。初期条件は、高度45kmで気球を展開し、そのときの気球温度は0°C、降下速度は7m/sとした。また、パラメータ η は0.1から1まで変化させた。

計算結果の一例を図8に示す。気球直径が0.17mとすると、図8(a)に示すように、 $\eta=0.25$ の場合には気球は目標高度35kmより2.3km下まで到達したところで浮力が全重量を上回り上昇に転じ、最終的に高度35kmに収束していることがわかる。この時の最高温度環境は200°Cとなる。図8(b)は同条件で、 $\eta=0.5$ の場合で、この場合にほぼ目標高度に到達した時点で満膨張になっていることがわかり理想的な解と言える。一方、図8(c)は $\eta=1$ の場合で、熱流入を最大に見積もった場合に相当する。この場合、目標高度より1.8km上で満膨張となり、このままだと、図に示すように、内圧と大気圧の差が耐圧限界 Δp_{cr} の2.4倍にもなってしまふことがわかる。

図8(d)は気球直径を2倍の0.34mにしたもので、気球の全長は約1/4になる。また、熱流入が小さくなることに相当するため、 $\eta=0.5$ の場合でも、図8(b)と比較して、目標高度より1.3km下の高度で反転する。図8(e)は目標高度を37kmとした場合で、この場合もいったん目標高度より下がりながら目標の37kmに入っていることがわかる。目標高度の大気温度が165°Cであるのに対して、最大180°Cまでの環境にさらされる。

総浮遊質量が10kgの場合、目標高度35kmの場合には気球重量が気球両端のフィッティングを含めて3.3kg、吸水層が水を自重の20倍保持できるとして、0.25kg、水が4.25kgとなり、残りの2.2kgがペイロードに割り当てられる。高度37kmの場合には、容積が大きくなるため、気球重量が3.5kgとなり、その分ペイロードは減って2kgとなる。

5. 考察

5.1 気球の展開過程

図8(c)に示すように熱流入が大きすぎる場合、このままだと、図に示すように、内圧と大気圧の差が耐圧限界を越えてしまうが、このまま、気球フィルムを厚くすることは重量の問題で不可能である。そのため、圧力差が上昇しすぎるのを防ぐためには最初から水を余分に内蔵しておき、耐圧限界を超えたらその分を排気する方法が考えられる。図9はそのような場合の結果を示していて、水の量を70%増に設定して、圧力差が標準差圧の1.5倍になったら排気とした場合の結果である。このように熱流入が大きくて、目標高度より1.8km高い高度で満膨張になると、浮力ガス用の水が1.7倍も必要であることがわかる。したがって、耐熱温度環境に余裕を持たせて、目標高度より低い高度まで降下して再上昇によって浮遊高度に収束する方が得策であると考えられる。

ここでは熱入力効率を変化させて計算したが、実際は、気球内部の熱伝達を正確に

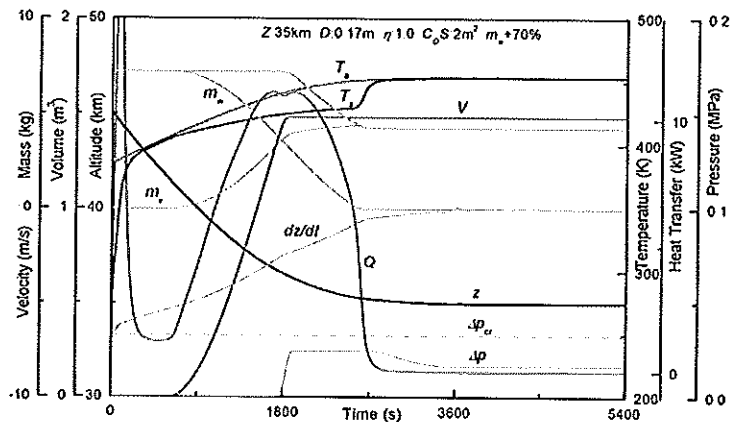


図9 図8(C)と同条件で安全弁による排気を行った場合、水の量は1.7倍

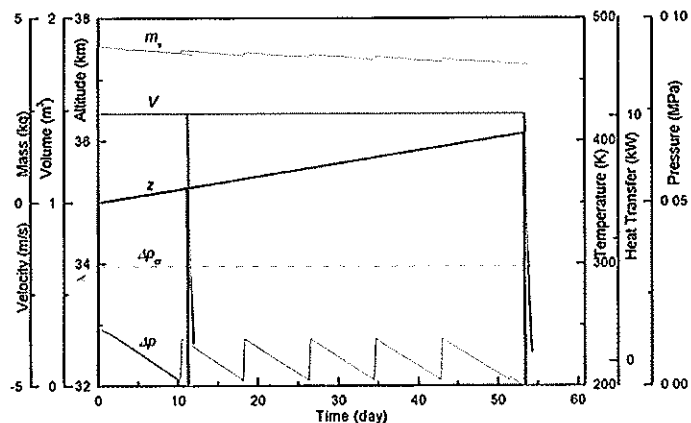


図10 図8(b)と同条件で液体の水を補助タンクに搭載し、圧力差が0になった時点で水蒸気として補給した場合との比較

シミュレーションする必要がある。また、周囲の高温の炭酸ガスからの輻射による熱入力の度合いも検討する必要がある。今回の計算により、想定される気球内部の熱伝達抵抗に対して、気球の運動は耐熱限界から要求される温度変化範囲内での挙動に収まることが示された。輻射の効果や気球内部の熱伝達特性が測定された段階で、気球の直径を最適値にあわせることにより、早く膨張しすぎることや膨張が遅くて耐熱限界を越えた低い高度にまで気球が沈下することを防ぐことが可能となる。

5.2 ライフタイム

水蒸気がフィルムを徐々に透過して内圧が低下し、スーパープレッシャー気球として維持できなくなり、ゼロプレッシャー気球になると所定の浮遊高度を維持できなくなる。そうなるまでの気球のライフタイムはフィルムが目標温度環境下における水蒸気および二酸化炭素の透過係数を測定することにより、推定することが可能である。ライフタイムを大きくするには、フィルムを厚くしてガス透過を小さくすれば良い。フィルムを厚くすると気球直径が大きく表面積は小さくなる。図6に示すように、気球のアスペクト比が大きい場合には気球の直径がある程度大きくしても気球重量はあまりかわらないが、表面積を小さくすることは、気球内部への熱入力が減少するため、気球の膨張過程と深く関係する。ライフタイムをのばすためには気球の膨張過程に支障がない範囲でできるだけ表面積を小さくするのが望ましい。

さらに、ライフタイムを延長するためには余分の水を補助タンク内に保持し、内圧が下がったところで水蒸気として補給することが考えられる。図3内にオプションと記してある補助タンクと圧力調整弁がこの目的のための装置である。今、浮遊状態での標準圧力差は大気圧の3%としているので、この値に相当する水の量は約0.12kgである。この水が失われるまでがライフタイムとなる。浮遊高度における水の飽和水蒸気圧と大気圧の差は図2に示すように約0.43MPaとそれほど大きくないので、0.5kg程度の水を補助タンクとしてもっていても水の容器を含めた全体の重量増加は0.6kg程度である。この重量増加分は、フィルムを20%薄くして耐圧強度を下げることにより相殺可能である。フィルムが20%薄くなることによるガスバリア性の低下は20%である。以上を総合すると、ライフタイムは $(0.12 + 0.5) / 0.12 / 1.2 = 4.3$ 倍と改善されることがわかる。図10はこのような補助タンク式を採用した場合の結果の一例を示しており、ライフタイムを大きくのばすことが可能となる。

また、輸送中に失われる水の量は、環境温度を25℃と仮定して、水蒸気の透過率から求めると、0.2g/day程度の割合で失われることがわかる。したがって例えば1年間では73gとなり、この分を見込んだ量の水を封入する必要がある。

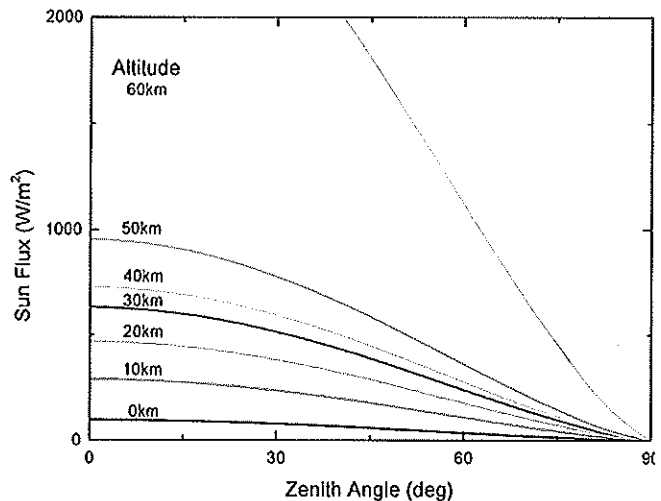


図11 各高度における利用可能な太陽エネルギー

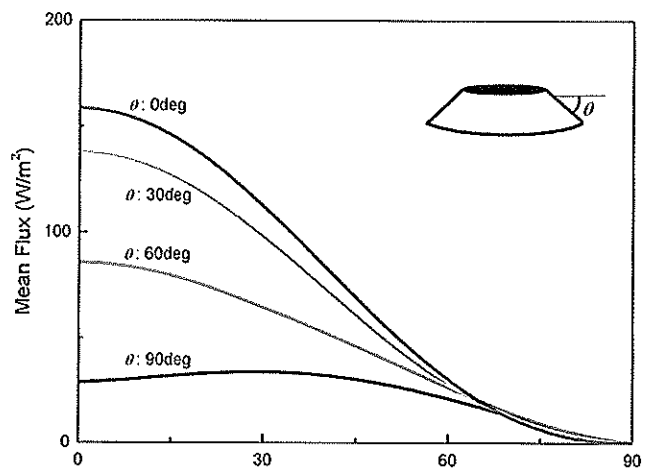


図12 円錐状太陽電池パネルに到達する太陽エネルギーの平均値（夜間も含む）、高度35km

5.3 太陽電池による発電

金星は地球より太陽に近いことから太陽からの到達エネルギーは大きいですが、厚い雲が存在するため、金星大気中における太陽エネルギーの到達量は少ない。図11は太陽の天頂角と高度の違いによる太陽からの到達エネルギー量の変化を表している。高度が低くなると急減するのが示されている。一方、実際に太陽電池で得られる発電量を求めるために、高度35kmにおいて円錐状におかれたパネルにどれだけのエネルギーが到達するかを夜間も含めた1金星日の平均量として示したものが図12である。角度はパネルの対称軸(鉛直軸)からの傾き角を示しており0は太陽電池パネルを水平に設定することに相当する。横軸は緯度を表しており、高緯度を除けば水平面に電池を並べる場合に最大の発電量が期待できることを示している。発電効率が10%であると仮定すると、昼間の平均値として、緯度30度では22W/m²、緯度60度では6W/m²発電が可能であることがわかる。この程度の発電量でも、低消費電力のエレクトロニクスの搭載と、間欠的な通信を行うことによって十分維持可能である。なお、太陽電池パネルの重量は保護層等も含めて1kg/m²程度で可能である。

6. おわりに

水を浮力ガスとして、気密フィルムの内面に高吸水フィルムを設けた構造の円筒形膨張型金星気球を提案し、その可能性を検討した。この気球は、浮力ガスとなる水をあらかじめ気球内部に液体の状態ですべて封入しておくことで、高圧ガス容器やガス導入装置が不要となり、衛星打ち上げ時の重量、容積軽減効果が大きく、非常に簡単なシステムで信頼性の高い金星気球プローブを構築することが可能となる。高度35~37kmに総浮遊質量10kgの気球を浮遊させるための、気球展開、膨張、降下過程を数値シミュレーションした結果、十分な許容変動範囲内で最終的に所定の目標高度に収束することが示された。その際の搭載可能ペイロード質量は全気球システムの約20%である。あらかじめ設定された気球の表面積(直径)と初期降下速度により、気球内部への熱流入量を決定することが可能である。また、高温エレクトロニクスの動作温度環境での飛翔となるため、長期間、広範囲の観測が可能となる。

参考文献

- [1] K. T. Nock, et al.: Planetary Aerobots: A Program for Robotic Balloon Exploration, AIAA Paper, 96-0355, 1996.
- [2] 矢島信之, 他: 惑星気球の可能性について, 第1回宇宙科学シンポジウム, 213-220, 2000.
- [3] R. Z. Sagdeev, et al.: VEGA Venus Balloon Experiment, *Science*, 231, 1407-1408, 1986.
- [4] R. S. Kremnev, et al.: VEGA Balloon System and Instrumentation, *Science*, 231, 1408-1411, 1986.
- [5] J. Nishimura, et al.: Venus Balloons at Low Altitudes, *Adv. Space Res.*, 14, 61-71, 1994.
- [6] N. Izutsu and N. Yajima: Double Capsule Thin Metal Balloon for Low Altitude Venus Exploration, *J.Space Tech. Sci.*, 14, 11-20, 1999.
- [7] A. Bachelder, et al.: Venus Geoscience Aerobot Study (VEGAS), AIAA Paper, 99-3856, 1999.
- [8] J. A. Cutts, et al.: Venus Aerobot Multisonde Mission, AIAA Paper, 99-3857, 1999.
- [9] L. S. Rubin and F. J. Federico: Liquid Crystalline Polymers Expand the Capabilities of Interplanetary Aerobots, AIAA Paper, 99-3858, 1999.
- [10] A. Yavrouian, et al.: High Temperature Materials for Venus Balloon Envelopes, AIAA Paper, 95-1617, 1995.
- [11] A. Yavrouian, et al.: Evaluation of Materials for Venus Aerobot Applications, AIAA Paper, 99-3859, 1999.
- [12] R. W. Lusignea: Liquid Crystal Polymers: New Barrier Materials for Packaging, Proceedings of Future-PAK '96, 1996.
- [13] N. Yajima, et al.: Three-Dimensional Gore Design Concept for High-Pressure Balloons, *J. Aircraft*, 38, 738-744, 2001.
- [14] MUSES-C計画概要, 宇宙科学研究所, 2000.

