

惑星気球の可能性について

矢島信之¹・井筒直樹¹・本田秀之¹・後藤 健¹・佐藤英一¹・今村 剛¹・
赤澤公彦²・富田信之²

Extended Possibility of Planetary Balloons

by

Nobuyuki YAJIMA¹, Naoki IZUTSU¹, Hideyuki HONDA¹, Ken GOTO¹, Eiichi SATO¹,
Takeshi IMAMURA¹, Kimihiko AKAZAWA² and Nobuyuki TOMITA²

Abstract: A research on a balloon floating in a planetary atmosphere has been one of the important subjects for ISAS scientific ballooning group. The authors give an overview of thier current research activities and future prospects. Especially, new possibility of inflatable balloons made of high temperature film developed using the latest polymer technology is described in detail. An applicability of the 3-D gore balloon design concept, which is a remarkable result of our current theoretical study, is discussed in terms of its application to a planetary super-pressure balloon. The related technologies for a planetary balloon are also mentioned.

概 要

宇宙科学研究所の気球工学部門にとって、惑星の大気に浮かぶ気球の研究は、これまでも重要な課題であった。ここでは、これまでの我々の研究の経緯を概括しつつ今後の研究方向を考察する。特に、近年の材料科学の進歩に伴って可能となった、金星の高温大気中に浮遊するフィルムによる膨張型気球について詳しく述べる。また、この間の我々の理論的研究の成果である3次元気球形状設計法は、惑星上のスーパープレッシャー気球の可能性を拡大するためにも極めて有用であることを指摘する。惑星気球を実現するために必要な関連技術についても併せて述べる。

¹宇宙科学研究所

²武蔵工業大学

重要語： 惑星探査， 気球， 新素材フィルム， 高温エレクトロニクス， ARGOS

1. はじめに

惑星探査のため、大気のある惑星に気球を浮かべようとする研究は、気球工学の重要な研究課題の一つであることは改めて言うまでもない。特に、1998年に火星探査機「のぞみ」が打ち上げられ、また2001年には金星の気象現象の解明を目指す探査機プロジェクトがスタートするなど、宇宙科学研究所における惑星探査計画が進展するとともに、惑星科学研究者の間でも、気球を用いた観測への関心が高まっている[1]。気球は軌道上の探査衛星に比べ、格段に近い位置から惑星の地形、岩石組成、残留磁気分布等を精密に観測できる。大気の観測は正にその場観測であり、風向、風速、温度等の気象学的データに加え、大気組成の分析も重要な情報を我々に提供する。気球は風に乗って広く移動する。その方向の制御が困難なのは弱点であるが、移動しないランダーや、あまり活動範囲が広くないローバーと比べると、観測範囲が格段に広いことも気球の大きな魅力の一つである。

地球と言う惑星の観測はまず地上から、そして次に気球、ロケット、衛星と順次高い高度から広域を観測できるようになった。しかし、衛星による広域の気象や環境観測では、やはり地上からの気象ゾンデや気球観測による直接観測値を基にした絶対値の校正が精度の維持に不可欠である。衛星による地球観測の進展とともに、相補関係にある観測としての気球の役割も重要となっている[2]。惑星観測では、歴史的経緯は地球観測の逆のプロセスとなり、まず軌道上からの観測として始まり、次に高度を下げ、対象に接近してより精度の高い観測を目指す。こうした点から、惑星探査の次の段階の手段として気球が注目されることになる。このように、惑星探査を推進する宇宙科学研究所において、惑星気球は気球工学部門にとって中心的研究課題となりつつあると考えられる。

惑星気球としては、すでに1985年にVenus/Comet Hally Flybyのミッションの一つとして、旧ソ連とフランスの共同プロジェクトで膨張型気球が2機投入され(Vega 1, Vega 2)、飛翔に成功している[3]。その後、実施されたプロジェクトはないものの研究は鋭意進められており、最近の気球関係のシンポジウムでは、惑星気球として独立したセッションが設けられる状況である。宇宙科学研究所においても、1990年に宇宙研の将来計画の策定の課程で、「次期工学衛星計画検討会報告書」が作られ[4]、その金星エアロチャブチャ/バルーン探査計画の中で金星気球も検討されている。その段階での金星気球の研究としては、秋葉等による膨張型気球と西村による金属球気球があった[5],[6]。ここでは、そうしたこれまでの経緯をふまえつつ、それ以降の材料面での進歩と我々気球工学部門等で研究経緯を概括し、今後の惑星気球の工学的可能性について述べる。

2. 大気のある惑星と気球

2.1 気球の浮遊条件

大気のある惑星(およびその衛星)のリストを表1に示す。各惑星の地表面の圧力、温度を見ると、地球のそれに近いのは土星の衛星タイタンであり、火星は地球の成層圏と同一である。特異なのは金星であって、地表は9.2MPa、740Kという高温・高圧の環境である。高度50Kmで0.1MPa、350Kとなつてほぼ地球表面と同じとなる。大気的主要成分は、火星と金星がCO₂、タイタンがN₂である。従って地球上の気球と同じく、分子量の小さいH₂、Heガスで浮力が得られる。金星の高温域では、H₂OやNH₃、CH₄もガス体となるので浮力が得られる。ロケット燃料のヒドラジンのように分解してそうした軽いガスになる物質を運搬してもよい。木星、土星、天王星、海王星はH₂のガス体であるので、それより軽いガスで浮上することはできない。気球が外部からエネルギーを吸収して温度を上げ、熱気球となって浮遊するのが唯一の方法となる。大気そのものが燃料であるから、酸化剤を運搬して燃やせば、文字どおりの熱気球にもなりうる。

表1 大気のある惑星とその衛星

惑星	地表圧力 (MPa)	地表温度 (K)	主要大気組成	大気分子量 (g)
地球	0.1	300	N ₂ + O ₂	28
火星	< 0.001	200 - 250	CO ₂	44
金星	9.2	750	CO ₂	44
タイタン	0.015	90	N ²	29
木星	1	300 ⁺	H ²	2.2
土星	1	300 ⁺	H ²	2.0
天王星	1	300 ⁺	H ²	2.3
海王星	1	150 ⁺	H ²	2.3

木星, 土星, 冥王星, 海王星は大気圧 1 MPa のレベルで地表に変えている。

上記の大気条件から, Vega 1, 2では, 地球上の条件に近い技術的にも容易な金星の上層 (50Km) に浮遊させている。その後, 実行に至ったプロジェクトはないが, 研究は数多く続けられてきた。今日もっとも活発に惑星気球に取り組んでいるのはJPLで, 特に高度変化を積極的に実現できる気球を「Aerobot」と命名し, 様々なコンセプトを発表している[7], [8], [9]。こうした活発な動向を反映し, 米国の科学啓蒙雑誌 Scientific American の1999年11月号には気球特集が組まれている[10]。(日本版は, 日経サイエンス2000年3月号)

2.2 惑星気球の技術的課題

(1) 浮遊プロセスの全自動化

惑星気球は, 地球で気球を上げるように人の直接作業に依存することはできない。探査機で運ばれた気球は, 惑星大気突入カプセルで大気圏内に投入された後に浮遊を開始する。その場合, 地球からの通信条件の問題からも, 気球へのガス注入やパラスト投下, ガス排気等の動作をコマンドによる遠隔操作で行うことは不可能で, 全過程は自動的プロセスとなる。従って, 気球の方式はできる限り単純で信頼性の高いものでなければならない。

(2) 長時間の浮遊

気球の特徴である広域の観測を実現するには, 気球自体ができるだけ長時間飛翔できることが望ましい。そのための条件は,

①高度を維持するためにパラストのような消耗品を必要としないこと。

この目的には, 浮力ガスを排出することのない閉じた気球であるスーパープレッシャー気球方式が適している。

②気球皮膜の浮力ガス透過性が低いこと。

③浮遊期間を通じ電源の供給能力があること。

3. 金星気球

我々が検討を進めている金星気球は, 高度40Km以下の高温・高圧下の飛翔を目標としている。研究の対象としているのは, 薄い板の金属球気球と耐熱性フィルムを用いた膨張型気球および両者を組み合わせたバリエーションである。エレクトロニクスを高温下で動作させることなど, 困難さも増大するが, その解決に必要な研究

課題は今後の他の惑星探査でも応用可能なものが多い。このような高度目標を定めた理由は、主に以下の3点である。

- ①高々度域はすでに Vega 1, 2で実施済みである。
- ②低高度では大気密度が大きく小型の気球でも大きな浮力を得やすい。
- ③雲の下に浮かぶので、地表面の精密な直接観測が可能である。

3.1 高温用フィルム材料

フィルムを用いた膨張型気球で低高度まで降りるには、皮膜材料の耐熱性が隘路となっていた。検討を始めた当初は、衛星のサーマルインシュレータに用いられるポリイミド(カプトン)の耐熱温度が最大であったが、せいぜい300°Cで、かつ機械特性を損なわないフィルム相互の接合手段がなかった。その後、高分子化学の進展により、PBO(ザイロン)やVectra等の高耐熱性の新しいフィルムが出現し、膨張型気球の可能性も10年前とは大きく変わってきた[11]。それらの新素材は、繊維は日本の企業でも実用化の域に達しており、フィルム化も米国および日本で試作開発の段階である。すでに、モデル気球が製作されているものもある[12]。そうした新素材の強度と耐熱特性の比較を表2に示す。長時間飛翔を目的とするならば、地球の成層圏気球と異なり、フィルムに加わる圧力が高いので、浮力ガスの透過特性が問題となる。表3にヘリウムと水蒸気に対する透過係数を示す。

表2 新素材フィルムの強度と耐熱性

	引張強度 (MPa)	耐熱温度 (C)
PBO	580	500
Vectra	310	280 to 325
Kapton	230	250 to 320
Upilex	450	290

表3 ガス透過特性 (cm³・25um/m²・day・atm)

	ヘリウム	水蒸気
PBO	10	—
Vectra	100	0.1
Polyester	1000	30
Eval	100	75
Upilex	10000	12

上記の基本特性以外に、金星特有の問題として大気中に含まれる硫酸成分に対するフィルムの耐性がある。PBOは温度特性と強度には優れているが、フィルムになる前の高分子レジンの段階では強酸の中で溶解している。このため、耐酸性は極めて低い。表面を金メッキで保護するという案もある。この点、Vectraは耐酸性にも優れており、金星気球への適性がある。従来高耐熱フィルムは、熱接着が困難であって、これも気球への利用を妨げる要因であった。近年、ポリイミド、Vectraについては可能になりつつある。PBOについては未だ確立していない。ただし、接着できるフィルムでも高温での処理となるため、その部分の特性変化もありうる。接着せずに気球を構成できるのが望ましい。この点、Vectraフィルムはポリエチレンフィルムと同様に円筒状に長いフィルムを成型できており、後述するように上下端のみを封じて円筒気球とすれば、接着面は大幅に減少する。

3.2 気球の方式

(1) 飛翔高度20Km以下の金属球気球

金属製気球方式は、1990年ごろ西村により初めて提案され[6]、その後も検討が続けられてきた。最大の問題は気球本体の重量である。金星に浮遊するときは、気球は内外圧力がほぼ平衡状態となるので原理的には強度はいらない。しかし、地球を出発し宇宙空間を運ばれる間は、外気圧が小さいので高い圧力差に耐える圧力容

器である必要がある。このため、気球本体重量が増加する。得られる浮力と衛星で運搬する容積や製造技術から、直径1m程度の気球を高度20Kmに浮かせるのが有力な候補と考えられる。色々研究を進めてきたが[13]、比強度の優れたチタン合金を用いても、その板厚は0.5mmとなり、単純な球の重量だけでも7Kgとなってしまう。これでは、約10Kgの総浮力に対して搭載機器に分配できるだけの十分な余剰浮力を生み出すことが困難であった。

1997年に上記の難点を解決する方式として、井筒により2重カプセル方式が提案された[14]。この方式は、図1のように、気球が浮遊するまでは、気球本体を外側から耐圧用の容器で包み、外圧から保護しようとするものである。耐圧容器の内圧を気球の内圧とほぼ等しくすることで、気球本体は圧力容器の必要がなくなるので、大幅な軽量化が図れる。外側の保護容器は、気球が予定高度まで降下し、内圧が外気圧と等しくなったところで分離し、以後は気球本体がスーパープレッシャー気球として浮遊する。本体重量は1Kg程度に軽減可能となる。外側保護容器は、その外壁に大気突入時の保護としてアプレータを張り付ければ、エントリーカプセルの役目も併せ持たせることもできるので、システム構成がさらに単純になる。上記のまとめとして、2重カプセル金属球気球が金星大気に浮遊するまでのシーケンスを図2に示す。

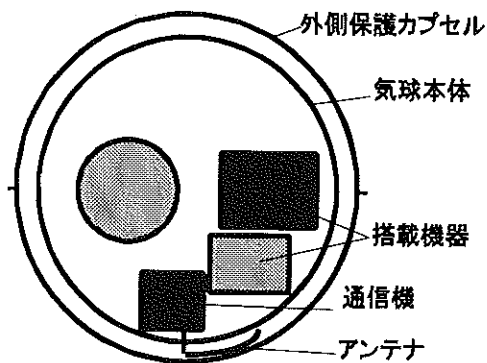


図1 2重カプセル金属球気球の概念図

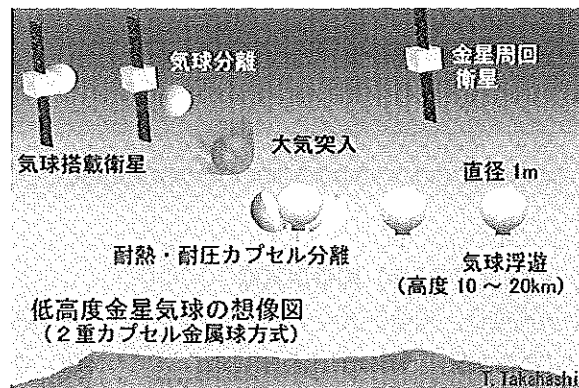


図2 2重カプセル気球が金星大気に浮遊するまでのシーケンス

2重カプセル方式にとっては、球形の気球本体を薄く軽く作るための機械加工技術が大きな研究課題となる。現在以下の方式を並行して検討中である。

- ①比強度の大きい金属薄板を接合する。
- ②超塑性加工により、半球を成形した後赤道で接合する。
- ③耐熱繊維を巻き付ける補強法を用いる。
- ④メッキにより一気に球を作る。

現段階では、①は、チタン合金の板が有効であるが、100ミクロン以下の薄板材そのものがまだなく、かつそれを溶接等で接合することは困難である。②は、繊維を固めかつガス透過を防ぐ樹脂ライナーの耐熱性と高温でのガスバリア性が隘路である。③の方法は、機械加工の点では、現段階でもっとも現実的である。ただし、メッキ法で成型できる金属は限られており、NiおよびNiCoが当面の対象となる。当然チタン板に比べ重量は増加するのが難点である。また、メッキにより形成された金属板の機械特性と圧延で作られた板のそれとの相違も把握しておく必要がある。

まず、厚さ25ミクロンと100ミクロンのテストピースを作り、基礎特性として、強度とガス透過性を把握する試験を行った。その結果、Heガス透過性は25ミクロンでは無理であるが、100ミクロン厚の板では地球から金星に行き、一年浮遊するという時間要求を満たしうるとの見通しが得られた。また、強度特性の評価として、常温および300°C下で引っ張りテストを行った。高温時の強度は、圧延板より多少劣るものの、実用上許容範囲にあると判断できた。この試験結果では、直径1mの球を高度20Kmに浮かせる場合、形状維持のための与圧を0.05MPaとすると、必要板厚は約150ミクロンで、本体重量は5Kgとなった。この重量はチタン板での理想的設

計重量の1Kgより5倍重いものの、一応気球として可能な範囲に入っている[15]。また、図3と図4に示すように、気球本体の製作の確認の第一歩として、③と④の方法によりそれぞれ直径300mmと250mmの球形モデルも試作している。

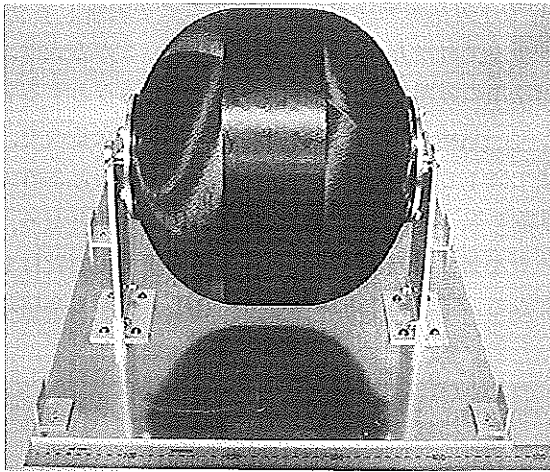


図4 金属球気球のモデル試作例 (直径25cm)
(ニッケルコバルトメッキによる100ミクロン厚の球形容器)

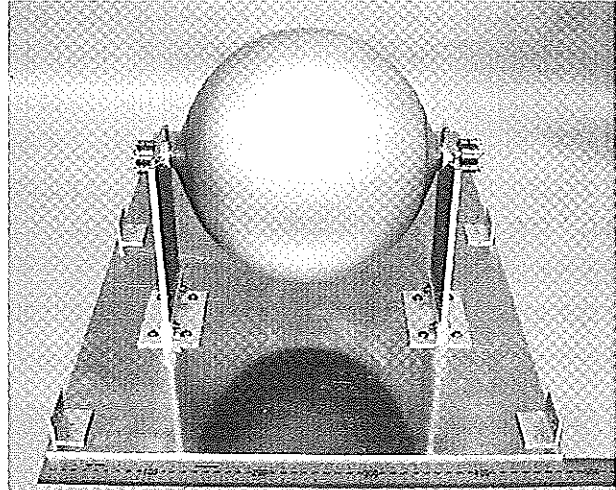


図4 金属球気球のモデル試作例 (直径25cm)
(ニッケルコバルトメッキによる100ミクロン厚の球形容器)

3.3 中高度 (35Km) 膨張型気球

この高度は、気球が雲の下縁を浮遊して地表面を直接観測することができ、かつ大気温度が高温エレクトロニクス(含む太陽電池)の動作範囲にある領域である。かつ、前記高温用フィルムVectraの許容範囲でもある。このフィルムを使って、水蒸気を浮力ガスとする円筒型のスーパープレッシャー気球を作り高度35Kmに浮遊させる案が井筒により提案されている[16]。この案の特色は、円筒フィルムの内面に吸水性のフィルムを貼り、そこにあらかじめ水を含ませておく。低温での水の蒸気圧は低いので、宇宙空間を飛行中は、平で長い気球本体を渦巻き状に巻いて小さく畳み、簡単な密閉容器の中に収納しておけばよい。

エントリーカプセルで金星大気に投入後、45km付近でカプセルから分離され、パラシュート降下に入る。42kmで大気は300K、3気圧でとなり、水は蒸発を開始する。その際、大気の熱は長い気球の壁面より気球内部に侵入するので、短時間で全ての水が蒸発すると期待できる。従来、このタイプの気球は、蒸発を促進するために大きな熱交換機を備えるのが一般的であったが、この方式ではそうしたものが不要となるので、小型、軽量、かつ単純な気球の展張機構が実現できる。

3.4 膨張型気球と金属球気球の組み合わせ

図5に、円筒形の膨張型気球と金属球気球を組み合わせ、地表面に短期間留まった後、中高度に移動する気球の案を示す。膨張型気球の被膜は、地表面の温度800kまで機能するPBOとし、金属球気球は、3.2(1)で述べた、2重カプセル型とする。膨張型気球は2重カプセルの間に収納される。搭載機器は金属球気球の内外に取り付けられ、アンモニアを冷媒として搭載機器を高温から保護する冷却器を備えている。膨張型気球にはガスを詰めずに降下させ、金属球気球の浮力で地表面近くに浮遊する構成とする。膨張型気球は带状に垂れ下がって降下し、途中まで着地した状態で金属球気球の浮力とバ

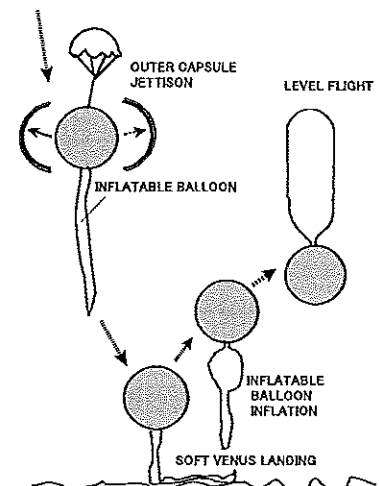


図5 金属球気球と膨張型気球を組み合わせた気球の飛行履歴

ランスするように設計しておく。従って、膨張型気球はこの段階で着地時の衝撃吸収装置として機能する。高温域に入り、冷却器が作動しアンモニアが蒸発すると、そのガスを膨張型気球に注入し、浮力ガスとする。時間の経過とともに気球の体積は増大して浮力が増し、やがて地表面を離れて上昇を開始する。冷却剤のアンモニアの量が十分あれば、気球は冷却機能が失われる前に冷却を必要としない高度まで到達できる。その高度では、主要な浮力は膨張型気球から得られ、金属球気球の浮力は自重を下回るので、膨張型気球のペイロードとして吊り下がる。気球は、スーパープレッシャー気球となって浮遊するので、この高度を長期間浮遊して観測を続けることができる。直径50cmの金属球気球とその直径に等しい長さ8mの円筒気球を組み合わせ、1kg程度のアンモニアガスを注入すれば、先の円筒気球のみの場合の高度と同じ高度35kmに浮遊する。

4. 火星気球

表1に示したように、火星の地表面の大気密度は地球の成層圏34kmの大気密度とほぼ等しい。従って、地球上で用いている大型の科学気球を火星に浮かべても、地表面付近を漂うことになってしまう。このため、地球上の気球と同じく、圧力負荷が小さいゼロプレッシャー気球を適用し、フィルムの軽量化に努めるのがこれまでの研究動向であった。このことは、地球上の気球が持つ問題を火星気球にも持ち込むことになる。特に大きな問題は飛翔高度の維持である。周知のように、ゼロプレッシャー方式では、日没とともに浮力ガスの温度は低下し、体積が減少して高度が低下する。このため、パラストを投下して高度を補償しなければならず、飛翔可能な日数を大幅に増加させることはできない。

図6は、パラストに変わって高度維持を図ろうとするアイデアの一つで、気球から長い尾を垂らし、高度が下がると着地している尾の部分だけ気球の重量が減少して自動的に高度を保つ[17]。この高度制御方式は、1820年代に英国のグリーンによって考案されたもので、初期の有人ガス気球の高度維持・制御手段として用いられた古典的手法である。この方法を採用入れた気球は、英国海峡を横断し西ドイツ中部まで18時間800kmの画期的な飛翔を成し遂げている。しかし、惑星探査にはいささか古典的であり、スマートな方式とは言い難い。尾の重量も無視できない。金星気球と同様に、気液の相変化を利用した浮力制御も提案されている。液体は、温度が低い場合アルゴンを用いている[18]。

正統的な方向はスーパープレッシャー気球の実用化である。ガス温度が低下しても体積は変わらず、一定高度を保っていつまでも飛翔する。遠い惑星上を飛翔するのに何の付加装置も遠隔操作も必要としないので、信頼性が高くかつ寿命も長い。スーパープレッシャー気球を使えば良いことは従来から分かっていたが、薄く軽いフィルムで必要な耐圧性を実現することが困難であったため、上記の尻尾付き気球のような方式が提案されていた。この間の我々のスーパープレッシャー気球の研究成果である気球形状の3-Dゴア設計法は、この長年の課題を一気に解決することとなった[19],[20],[21],[22]。その設

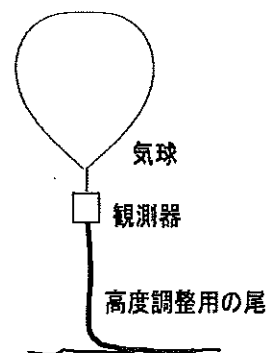


図6 高度調整用の尾を持つ火星気球案

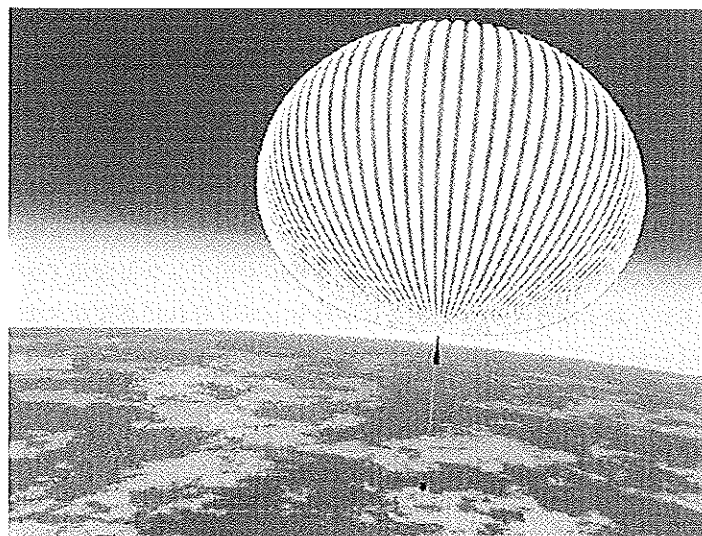


図7 3-Dゴア設計法によるスーパープレッシャー気球

計概念の特徴は、図7のように、ロードテープの間に小さな局所半径を持つ張出を作り、皮膜に発生する張力を減少させ、結果として気球の耐圧性を向上させようとするものである。

火星に浮かぶスーパープレッシャー気球を考える場合、地球の気球と異なって輸送できる容積・重量に制約がある。そこで、比較的小型の容積 5.000m^3 の気球を気圧 5hPa (高度 3.7km)に浮かべる場合を想定し、我々の3-Dゴア気球設計概念を適用して軽量のスーパープレッシャー気球の実現可能性を検討してみる。その飛翔高度の大気密度は $0.01\text{kg}/\text{m}^3$ であるので、総浮力は 186N となる。日照条件等を考慮すると、スーパープレッシャー気球として気球皮膜に加わる圧力は、日中でおおよそ 3hPa と見積もられている。球形気球を考えると、半径は約 10m であるから、皮膜張力は $3,000\text{N}/\text{m}$ となり、 20ミクロン 厚でのポリエチレンフィルムによる気球では、気球本体質量が 15kg を越えてしまい、かつフィルム強度は $500\text{N}/\text{m}$ であるので、大幅に要求を下回る。高々度気球用に開発が進められている薄型フィルムを用いれば、気球質量は条件を満たすがフィルム強度はさらに低下する。そこで、我々の3次元ゴア設計法を適用したパンプキン気球の場合を検討する。球より扁平となるため、赤道半径は 12.2m となる。しかし、ロードテープ間のバルジの局所曲率半径を任意に設計できるので、以下のような条件で実現が可能性となる。

厚さ 6ミクロン 、単位質量 $6\text{g}/\text{cm}^3$ のWinzen製のフィルムの場合、破断強度は $82\text{N}/\text{m}$ とされている。安全係数を3とすると、必要な局所半径は 0.08m となり、ロードテープの本数は500本で気球の赤道上では 15cm 間隔となる。この時の気球のフィルム質量は火星上で 4.5kg 程度である。最近開発が進められているメタロセン触媒を用いた薄型フィルムのデータによれば、強度はWinzen製フィルムより大きく、 5ミクロン で、 $140\text{N}/\text{m}$ 、 3.8ミクロン で $93\text{N}/\text{m}$ と報告されている[23]。これらのフィルムを用いれば、ロードテープ本数はそれぞれ280本、430本程に減少する。しかし、この本数でも、ロードテープの赤道上の間隔は得られるフィルム幅より小さい。Land等は、もう少しフィルム強度のある材料、Mylar(PET)、Kaladex(PEN)、Dartekで検討を進めている[24]。それらの 6ミクロン 厚のフィルムの強度は、 $1000\text{-}1500\text{N}/\text{m}$ と前記ポリエチレンフィルムより10倍大きい。必要とするロードテープの本数(ロードテープ間の幅)もおおよそ50本(1.5m)となり、地球上の気球の設計と同一となる。ただしPETおよびPENのフィルムの重量はポリエチレンの1.4倍程度であるから、気球フィルム重量もそれだけ増加する。

5. 関連技術

惑星気球を実現する上で開発要素となる技術の内、高温環境関係に係わるものはすでに検討が進められているので、ここではそれ以外で特に最近重点的に検討を進めてきた問題点を記す。

5.1 高温エレクトロニクス

産業用の高温エレクトロニクスは、エンジンルーム内に置かれるカーエレクトロニクスや石油探査のように地中深く挿入するプローブのエレクトロニクスとして、 200°C 程度まで動作範囲を持つIC素子の開発が進められている。HP社の資料によれば、センサ類の前段アンプとなるアナログ演算回路や、デジタル回路としてロジックアレーおよび8ビットマイクロプロセッサとそれに必要なメモリ回路やA/D、D/A変換回路がすでにカタログ製品となっている。当然、抵抗やコンデンサ等の受動素子も存在する。従って、データ収集と処理、および深宇宙通信のための信号処理も小型回路として実現可能である。また、気球の飛翔に必要な自律制御システムを構成することも問題ない。既存の製品群で不十分なものは、高周波関係の素子であり、開発を要する部分が存在する。

5.2 電源

金属球気球および高分子皮膜によるスーパープレッシャー気球で長時間飛翔を目指すならば、その期間搭載機

器に供給する電力の確保が重要な課題となる。

(1) 太陽電池

火星より太陽に近い水星を探索する計画において、200°Cを越える高温まで動作領域を持つ太陽電池の開発が進められており、実用段階に近い。こうした太陽電池であれば、金星気球では高度30km付近まで利用可能と考えられる。

(2) 電池

気球を大気に投入する初期の過程では一次電池ないしは二次電池、夜間の運用のためには日中の太陽電池出力を蓄える二次電池が必要となる。高度20km以下の高温領域で直接動作する一次電池としては、ナトリウム塩の熔融電池の類が唯一使用可能である。一次電池であるため長時間動作には搭載重量が制約条件となる。高度35km付近の200°Cまでであれば、リチウム二次電池の中に動作するものが現存する。ただし、温度上昇とともに効率が低下しており、実際の利用にはさらに開発が必要であると考えられる。

(3) 風力発電

大気密度が大きく、かつ風速の速い金星では、風力発電が可能と考えられる。テザーによって気球本体から離し、その間の水平風速差で発電する。あるいは、JPLが提案するように、風の上下方向成分を利用することも考えられる。高温域でも動作する発電システムが比較的容易に実現可能である点は魅力であるが、発電による空気抵抗で気球高度が変化するので、その予測が必要である。

5.3 通信

(1) 通信方式

気球からのデータを取得するには、直接地球と通信する方式と惑星軌道上にある衛星が中継局として機能する二つの方法がある。直接地球と通信する場合は、気球から大電力を送信することも、大型の高ゲインアンテナを使うことも難しいので、地球局で超微弱電波を大型アンテナで受信する典型的な深宇宙通信となる。その場合には、通信速度を遅くし、電力を狭い帯域に集中させ、狭帯域受信器によってS/Nを改善して通信条件を成立させる。限られた電源能力の中で送信電力を高く保つためには間欠送信も不可欠である。

多少大型の気球に高利得アンテナを備え、Vega1, 2と同様の高度50kmに浮かべ、その気球から小型ゾンデを金星表面に落下させ、落下中のデータは気球で受信し、気球と地球は高利得アンテナで通信できるようにする方式も提案されている[25]。

惑星軌道上に探査機がある場合には、気球と探査器間の距離は短縮するので、通信条件は格段に向上し、100kbpsレベルの通信が可能となる。地表面の精密画像等の伝送にはこうした高速通信が前提となる。ただし、長時間飛翔ができる気球を実現しても、その寿命は探査機の設計寿命と同等にすることは困難である。気球との中継器を他の目的と兼用するような方策も必要となる。

(2) 発信周波数の安定化

深宇宙の狭帯域通信では、送信電波の周波数を高い安定度（現段階の概算で 10^{-9} レベル）に保つことが必要となる。水晶発振器の安定度をこのレベルに保つには、これまでの技術では恒温層で温度変化を抑制する方法が用いられてきた。しかし、恒温層は定常的に電力を消費するので、電力消費を減少させるための間欠送信には不適切である。近年の携帯電話のような小型移動体通信機では、水晶発振回路に振動子の温度変動を相殺する温度特性を持つ素子を挿入し、必要な安定度（ 10^{-6} ～ 10^{-7} 程度）を確保している。我々は、そうした技術を発展させることで、恒温層を用いずに必要な安定度を実現する検討を始めている。

5.4 測位

(1) 地球からの直接測位

地球上の深宇宙局のアンテナを動員し、VLBI技術を使って惑星上の気球の位置、移動速度を直接測定する。これは、Vega1, 2で行われた方法であり、気球の運動から金星上層大気の運動を測定することに成功している。同等の送信周波数の安定度を実現できれば当然実施できる方法である。

(2) 惑星軌道上の探査機を利用する方式

探査機が1機軌道上にあれば、気球からの電波のドプラースhiftを検出するのみで測位を行うことができる。その方式は、ARGOSシステムとして、地球上で海洋ブイや動物の移動範囲を調査するなど広く用いられている。探査機上で気球電波のドプラースhift量を検出すれば、探査機の進行方向と電波の到来方向の開き角が求まり、気球の位置はその円錐が金星地表面と交差する2点のいずれかとなる。この測位の不確定性は、比較的短時間の内に(ARGOSでは1時間程度)少し離れた軌道から測位すれば解消する。気球側は原理的には間欠発信をする送信機のみあればよいので、消費電力も小さく(ARGOSシステムでは、単2型サイズのリチウム電池一本で一ヶ月以上動作)、惑星気球にとっても有効な方式である。電波の安定度は、ARGOSの仕様によれば、長期(120min)、中期(20min)、短期(100ms)安定度として規定され、それぞれ 10^{-6} 、 10^{-8} 、 10^{-9} である。この値はVLBIに比べれば格段に低く現実的である。データ伝送機能と兼用する事も可能である。

6. 終わりに

大気のある惑星に気球を浮かべるための技術的可能性について述べてきた。軌道上からの惑星探査の次の段階では不可欠の手段となることから、世界的にも多岐にわたる研究が進められている。ただ、実際に惑星大気に気球を浮かべることは、地球上のように、大きなランチャーとガスコンテナを配置し、多数のスタッフが総掛かりで気球を打ち上げることとは全く異なる。ごく限られた容積と重量と通信手段の中で、気球を浮遊させるには、無駄のないシステム構成、完全に自律化した飛翔シーケンス、誤差も大きい環境条件にたいする広い許容度を実現する必要がある。こうした点で、従来の気球技術にこだわらない斬新なアイデアが求められる。気球工学にとって今後の重要な研究課題であるという所以である。また研究開発対象が多岐にわたることから、多くの研究分野との共同作業となることは言うまでもない。惑星気球は、気球工学の重要な研究テーマであるが、気球工学のみのテーマでは決してない。

本稿で述べた気球技術は基本的なものであり、実際には衛星計画に合わせて様々な方式上のバリエーションと技術上の工夫が必要である。運搬手段がけっして大きいとは言えない宇宙科学研究所の場合、特に知恵を絞って実現にこぎ着ける必要がある。衛星は小さいが、それに工夫を凝らすことで大型のプロジェクトに対抗してきた時のスローガン、"Small is beautiful", "Simple is the best", は、惑星気球に関しては改めて大きな意味を持っている。

参 考 文 献

- [1] 今村 剛, 惑星の空を飛びたいな, ISAS NEWS No. 238, 2001
- [2] N.Yajima, et. al., Balloon Observation Synchronized with Earth Monitoring Satellite, Proc. the 23rd ISTS, 1998.
- [3] R.Z. Sagreev, Science Vol. 231, 1986.
- [4] 宇宙科学研究所工学委員会, 次期工学衛星計画検討会報告書, 1990.
- [5] R.Akiba, et. al., Simulation Study of Venus Balloon System, 43rd Congress of The International Astronautical Federation, IAF-92-0559, 1992.
- [6] 西村 純, 他, 「金星探査低高度気球について」, 宇宙研報告 特集27, 1990.
- [7] V.V.Kerzhanovich, et. al., "Mars Aerobot Validation Program", AIAA International Balloon Technology Conference,

- AIAA-99-3853, 1999.
- [8] A.Bachelder, et. al., "Venus Geoscience Aerobot Study (VEGAS)", AIAA International Balloon Technology Conference, AIAA-99-3854, 1999.
- [9] J.A.Cutts, et.al., "Venus Aerobot Multisonde Mission", AIAA International Balloon Technology Conference", AIAA-99-3855, 1999.
- [10] I.S. Smith, Jr.,and J.A.Cutts, "Floating in Space-h, Scientific American, Vol. 281, No. 5, Nov., 1999.
- [11] A.Yavrouian, et. al., "Evaluation of Materials for Venus Aerobot Applications", AIAA International Balloon Technology Conference, AIAA-99-3859 1999.
- [12] L.S.Rubin, "Liquid Crystalline Polymers Expand the Capabilities of Interplanetary Aerobots", AIAA International Balloon Technology Conference, AIAA-99-3858, 1999.
- [13] 矢島, 金星探査バルーンシステム, 科学研究助成金(一般研究(c))研究成果報告書, 1995.
- [14] Naoki Izutsu and Nobuyuki Yajima, "Double Capsule Thin Metal Balloon for Low Altitude Venus Exploration", The Journal of Space Technology and Science Vol. 14, No. 1, 1998.
- [15] 赤澤, 他, 低高度金星気球のメッキ法による実現可能性, 平成12年度大気球シンポジウム集録, 2000年.
- [16] 井筒, 水蒸気を浮力媒体とする金星気球の一方式, 連合講演会予稿集, 2001.
- [17] James D. Burke, "Buoyant Kites for Planetary Exploration, Proc. of AIAA International Balloon Technology Conference, AIAA-91-3656-CP, 1991
- [18] K.T.Nock, J.A.Jones and G.Rodriguez, "Planetary Aerobots: A Program for Robotic Balloon Exploration", 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA 96-0355, 1996
- [19] Yajima, N., "A New Design and Fabrication Approach for Pressurized Balloon", Adv. Space Res., Vol. 26, No. 9, pp. 1357-1360, 2000.
- [20] Yajima N., Izutsu N., Honda H., Kurokawa H. and Matsushima K., "A New Design Concept of Natural Shape Balloon for High Pressure Durability", AIAA Journal of Aircraft, pp. 221-230, 2001.
- [21] 井筒直樹ほか, 高い耐圧性を有する気球の設計原理と飛翔テスト, 日本航空宇宙学会論文集, 第49巻564号, 2001.
- [22] 井筒直樹, 他, 「スーパープレッシャー気球の飛翔試験」, 大気球シンポジウム集録, 平成11年度.
- [23] Y. Saito, et. al., High Altitude Balloons with Ultra Thin Polyethylene Films, 33rd COSPAR Scientific Assembly, 2000.
- [24] J.L.Rand and M.L.Philips, A Supperpressure Balloon for Mars Observations, 33rd COSPAR Scientific Assembly, 2000.
- [25] J.M.Cutts, et. al., Venus Multisonde Mission, AIAA Int. Balloon Tech. Conf. Technical Papers, AIAA-99-3857, 1999.

