

## 複合気球構成によるスーパープレッシャー気球の高度化

矢島 信之<sup>1</sup>

### Improved Super-pressure Balloon System Composed of Double Balloons

By

Nobuyuki YAJIMA<sup>1</sup>

**Abstract:** This paper deals with a double balloon system which is composed of a zero-pressure balloon and a super-pressure balloon. In this system the zero-pressure balloon suspends a payload and the super-pressure balloon controls the whole buoyancy. This balloon system can keep a level altitude without ballasting like a single super-pressure balloon system. The superior characteristics of this system are; (1) a reduction in total balloon weight, (2) scale down of the size of the super-pressure balloon and (3) cost reduction of balloon manufacturing. On the other hand, the disadvantages are; (1) the super-pressure balloon in this system must withstand higher pressure than that of the single super-pressure balloon and (2) the flight altitude varies slightly between day time and night time. Those characteristics are analyzed in detail. The author concludes that the superior points exceed the disadvantages. The results of this analysis will be useful when we select a balloon system suitable for the aim of scientific observations.

#### 概 要

本論文では、ゼロプレッシャー気球とスーパープレッシャー気球を組合せた複合気球システムについて考察する。このシステムでは、ゼロプレッシャー気球がペイロード重量を支え、スーパープレッシャー気球が全体の浮力を制御する。この気球システムは、単一構成のスーパープレッシャー気球と同様にバラストを捨てずに高度を維持できる。利点は(1)総気球重量が減少する、(2)スーパープレッシャバルーンが小型になる、(3)生産コストが下がる、ことである。他方、欠点としては、(1)スーパープレッシャー気球は単独のシステムに比べ大きな圧力に耐えなければならず、(2)昼、夜間で高度が僅かに変化する。こうした特徴を詳しく解析する。一般的には、利点が欠点を上回る。解析結果は、観測目的に応じて気球システムを選ぶ際に有効となる。

**重要語:** 科学気球, スーパープレッシャー気球, スカイアンカー, 複合気球

---

<sup>1</sup> 宇宙科学研究所

## 1. はじめに

スーパープレッシャー気球は、ゼロプレッシャー気球のような満膨張になるとガスを逃がす排気孔がないので、一定の容積を保って高度が上がると、大気密度が小さくなって浮力が減少し、自由浮力分が失われて水平浮遊に入る。当然、気球の内圧より外気圧が減少するので、気球皮膜に加わる圧力は増大する。その増大量は2つの成分からなり、第一は総浮力中の自由浮力の割合に外気圧を掛けたものであり、第二は気球内のガス温度の変動による気球の内圧変化である。第二の成分は日中の太陽放射により増大し、日没とともに減少する。ゼロプレッシャー気球はこの効果により、日没とともに浮力が減少して高度維持ができなくなる。これにたいしスーパープレッシャー気球では、自由浮力分による圧力差が残るので形状変化がほとんどなく、従って浮力も変化しないので、一定高度を維持して飛翔できる。このため、長時間のフライトには不可欠の方式であり、その実現のため長い間研究が続けられたきた。

本論文では、スーパープレッシャー気球の発展型として、ゼロプレッシャー気球とスーパープレッシャー気球を組み合わせた複合気球方式の有効性を考察する。各々の気球の特質を活用することにより、スーパープレッシャー気球の単独システムに比べ、総合的に優れた気球システムが可能となる。以下の記述では、ゼロプレッシャー気球をZPB、スーパープレッシャー気球をSPB、複合気球システムをDBSと略記する。気球を複合構成とする考えは、古くは自然型気球の形状の導出を定式化したSmalleyの研究の中にあり[1]、上下の気球をダクトで繋いだ場合の圧力変化による形状の相違等を求めている。また、1970年代後半には米国の気球基地であるNSBF (National Scientific Balloon Facility) が“Sky Anchor Balloon”として開発を進めたことがある。[2] その方式では、ペイロードの下に空気を入れたSPBを吊るして浮力を制御しようとした。しかし、当時の気球設計理論では、その構想に耐える強度を持つ大型のSPBの実現は困難なはずであり、フライトテスト報告でも、小型のモデル実験を除きすべて失敗している。

SPBの実現を阻んできた理由は、気球皮膜に発生する張力が大きく、皮膜がそれに耐えられないことにあった。筆者は、気球の耐圧性を増大させる上で、従来の気球設計・製造方式の難点を指摘し、気球の耐圧性の大幅な向上を可能とする設計法を提案した[3],[4],[5]。その方式によれば、皮膜が補強ロープの間で伸びに依らずに大きく張り出す構造になっており、同じ圧力が加わっても、皮膜に発生する張力は大幅に減少する。しかも、その張力は気球の大きさに依存しない。この二つの特質により、大型で大重量を搭載可能なSPBを可能とした。この設計法の有効性は、各種サイズの気球による地上での展張・加圧テストおよびフライトテストによって確認されている[6]。

上記のような研究の進展により、1トンを超える大重量ペイロードを搭載し、高度35km以上まで上昇する容積数十万立方メートルの大型気球を単一のSPBとして実現することは理論的には問題がなくなり、NASAのようにその方向で進んでいるプロジェクトも存在する[7]。しかし、いかに理論的には解決したとはいえ、大型のSPBはZPBと比べ皮膜および補強ロープの重量の増大を招く。製造誤差により張力が一箇所に集中しないように、製作上の注意も必要である。その結果、コストがかさむことも難点である。

これにたいし、DBS方式は、大型のZPBでペイロードを支え、それより小型のSPBで浮力を制御し高度維持を図ろうとするものである。単独の大型のSPBに比べ、ZPBは長い利用実績があり、コストも低い。気球重量が軽減されることも大きな利点である。他方、DBS方式の難点は、第1にSPBの皮膜に加わる圧力が単独のSPBよりさらに増大することであり、第2に、僅かであるが昼夜間で高度差が生じることである。第1の難点は、新しい気球設計理論によって、DBSを実現可能な強度は十分確保できるので問題ない。第2の点は、同じ容積の単一のSPBと比べた場合、気球重量が減少するため、ペイロード重量が同じであれば、水平浮遊高度は高くなり、夜間に高度が下がっても、単一気球のそれと同等ないしは上回ることとなり、特に厳しい高度条件が要求されない限り、むしろ利点となる。

## 2. 複合気球の概念

### 2.1 複合気球の動作

以下の記述では、DBSの構成としてはNSBFが試みたSky Anchorと同様にSPBはZPBの下段（または上段）にあるとする。もし内部にある場合には、ZPBの容積からSPBの容積を引いたものをZPBの容積として扱えばよい。

以下の記述では、図1に示すように、DBSの二つの飛翔高度を以下のように定義する。

$H_1$ ：第1高度、SPBがDBSの自由浮力分を失ってスーパー・プレッシャー気球として水平浮遊する高度。

$H_2$ ：第2高度、上昇の途中で満膨張前のSPBの底部の圧力が大気圧と等しくなる高度。

（SPBがゼロプレッシャー気球の状態となる高度）

また、検討に必要な諸量を次のように表す。

$W_t$ ：気球システムの総重量。ここでは、気球内部のヘリウムガスの重量も含める。

$K_f$ ：放球時に付与する自由浮力の総重量に対する比率（ $\times 100\%$ ）。

$P_1, \rho_1$ ：第1高度の大気圧と大気密度。

$P_2, \rho_2$ ：第2高度の大気圧と大気密度。

$P_s$ ：第1高度でのSPBの内圧。

$V_s$ ：第1高度でのSPBの容積（SPBの満膨張時の容積）

$V_s'$ ：SPBの第2高度での容積。

$V_z$ ：Heガス温度が大気温度と同一の場合のZPBの第1高度での容積。

$V_{zh}$ ：Heガス温度と大気温度の差によるZPBの第1高度での容積変化分。

$V_z'$ ：ZPBの第2高度での容積。

$dP$ ：水平浮遊状態でのSPBの内圧と大気圧力の差。（皮膜に加わる圧力。）

$H_0$ ：スケールハイト

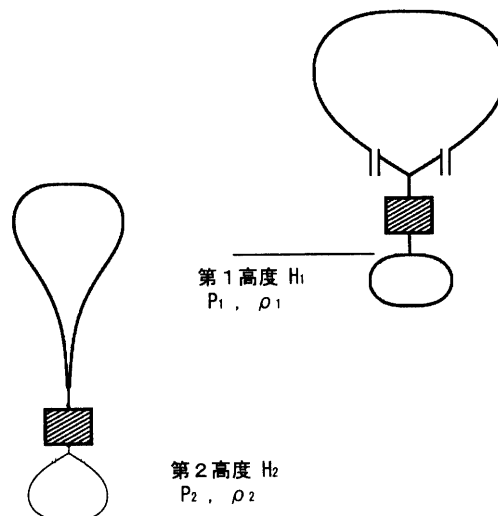


図1 複合気球の飛翔高度の定義

- $K_v$  : ZPB と SPB の体積比であって,  $K_v = (V_s + V_z + V_{zh}) / V_s$   
 $K_{zh}$  :  $V_{zh}$  の総気球体積との比率であって,  $K_{zh} = V_{zh} / (V_s + V_z + V_{zh})$   
 $F_s$  : 放球時に SPB にあたえる浮力.  
 $F_z$  : 放球時に ZPB にあたえる浮力.

なお, ここでは, 第1高度での SPB の底部と頭部の間の圧力差は, 扱う他の圧力に比べ十分小さいので考慮しないことにする.

(1) 水平浮遊時のスーパー・プレッシャー気球の加圧量

水平浮遊状態では, 2つの気球の浮力と総重量が釣り合っているので, 体積と浮力の関係は,

$$(V_s + V_z + V_{zh}) \rho_1 = W_t. \quad \dots\dots\dots (1)$$

第2高度では, 浮力には自由浮力分も含まれているので, そこでの体積と浮力の関係は,

$$(V_s' + V_z') \rho_2 = W_t (1 + K_f) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, ZPB の浮力は, ガスが排気されない限り一定であるので,

$$V_z \cdot \rho_1 = V_z' \cdot \rho_2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

である. また, 第1高度での SPB の内圧  $P_s$  は, 体積が  $V_s'$  から  $V_s$  に増大するので,

$$P_s = P_2 \cdot V_s' / V_s \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる. この時 SPB の皮膜に作用する圧力  $dP$  は,

$$dP = P_s - P_1. \quad \dots\dots\dots (5)$$

(1), (3) 式を (2) 式に代入することにより,

$$\rho_2 = \{K_f (V_s + V_z + V_{zh}) + V_s + V_{zh}\} \rho_1 / V_s' \quad \dots\dots\dots (6)$$

大気温度の効果を無視すれば, 二つの高度の大気密度の比と気圧の比は同じであるから,

$$P_2 = \{K_f (V_s + V_z + V_{zh}) + V_s + V_{zh}\} P_1 / V_s' \quad \dots\dots\dots (7)$$

(4), (5) 式を (7) 式に代入して,

$$dP = P_s - P_1 = \{(V_s + V_z + V_{zh}) K_f / V_s + V_{zh} / V_s\} P_1. \quad \dots\dots\dots (8)$$

(8) 式を  $K_v$ ,  $K_{zh}$  を用いて表せば,

$$dP = P_s - P_1 = (K_f + K_{zh}) K_v \cdot P_1 \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる. (9) 式は, きわめて当然な結論であって, SPB の皮膜に作用する圧力は単一 SPB の場合に比べ体積比  $K_v$  だけ増大することになる. さらに, SPB 自体のガス温度上昇による内圧上昇分がこれに加わる.

(2) SPB の補強ロープに発生する張力

DBS において, 単一 SPB より容積が  $1/K_v$  となった SPB の補強ロープの張力を単一 SPB のそれと比較する. ここで, SPB は理想的にできており, 皮膜には縦方向張力は発生せず, 皮膜に加わる圧力により発生する横方向の力は全て補強ロープの縦方向の張力に変わるとする. 従って補強ロープに加わる全張力  $F_t$  は, 赤道断面積に圧力を掛けたものとなり, 単一 SPB に比べ, DBS の SPB では, 断面積が  $K_v$  の  $(-2/3)$  乗, 圧力が  $K_v$  に比例するので,

$$F_t \propto K_v (1/3)$$

である. 一方, 補強ロープの本数は  $K_v$  の  $(-1/3)$  乗に比例するので, 結局一本当りの張力は,  $K_v$  の  $(2/3)$  乗だけ増大する.

(3) 日没時の高度変化

DBSでは、日照条件等でZPBの浮力が変化すれば、その分は気球高度の変化によってSPBの浮力が変化して相殺される。その高度変化を求めるにあたり、高度が下がっても、SPBには自由浮力による圧力上昇分があるため、SPBの体積変化は無視できるほど小さいとする。従って、SPBの内圧 $P_s$ の変化も無視できると仮定する。

いま、2つの異なるガス温度での体積変化率を $K_{zh1}$ 、 $K_{zh2}$ とし、その時の気球高度の大気圧を $P_{11}$ 、 $P_{12}$ とすれば、(9)式より、

$$P_s - P_{11} = (K_f + K_{zh1}) K_v \cdot P_{11} \dots\dots\dots (10)$$

$$P_s - P_{12} = (K_f + K_{zh2}) K_v \cdot P_{12} \dots\dots\dots (11)$$

である。(10)、(11)式より、浮遊する二つの高度の大気圧の比 $K_p$ は、

$$\begin{aligned} K_p &= P_{12}/P_{11} \\ &= \exp \{ (H_{11} - H_{12}) / H_0 \} \\ &= \{ (K_f + K_{zh1}) K_v + 1 \} / \{ (K_f + K_{zh2}) K_v + 1 \} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

となるので、二つの高度の差 $dH$ は、

$$dH = H_{11} - H_{12} = H_0 \cdot \log (K_p) \dots\dots\dots (13)$$

となる。(12)、(13)式から明らかなように、定数 $K_{zh}$ が気球の容積の違いに依存しないとすれば、日照変化により発生する高度差は気球の容積および水平高度とは無関係である。図2に気球の体積比と高度変化の関係を、 $K_{zh}$ をパラメータにして示す。容積比5程度では、高度差は1~2kmである。

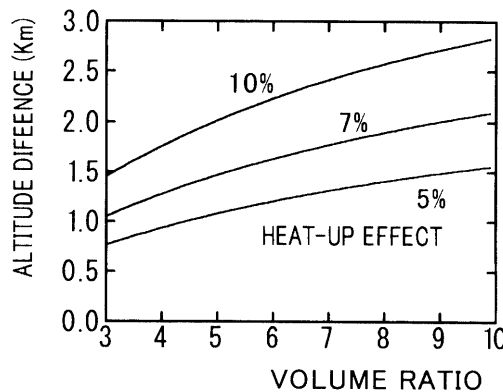


図2 気球の容積比と昼夜間の飛行高度差  
図中のパラメータは、昼夜の浮力変化量の総浮力に対する比率。

2.2 浮力の分配

DBSでは、SPBが自由浮力分を失って水平浮遊に入る時点で、ZPBも満膨張になることが最も効率的な気球の利用法となる。この条件の下で、放球時にZPBとSPBに分配する浮力を求める。ここで、SPBには放球時に自由浮力の $n$ 倍の浮力を加え、ZPBには残りの浮力を加えるとすれば、第1高度でのZPBの浮力と気球容積の関係は、

$$(V_z + V_{zh}) \rho_1 = W_t \{ 1 - (n - 1) K_f \} \dots\dots\dots (14)$$

である。また、第1高度ではSPBの浮力からは自由浮力分が失われるので、

$$V_s \cdot \rho_1 = (n - 1) W_t \cdot K_f \dots\dots\dots (15)$$

(14)、(15)式の比より、 $n$ と気球の容積比の関係は、

$$(V_z + V_{zh}) / V_s = \{ 1 - (n - 1) K_f \} / \{ (n - 1) \cdot K_f \} \dots\dots\dots (16)$$

となる。これを $K_v$ を用いて表せば、

$$K_v = 1 / \{(n - 1) \cdot K_r\} \dots\dots\dots (17)$$

である。また、 $F_z$ 、 $F_s$ は、

$$F_z = W_i \{1 - (n - 1) K_r\} \dots\dots\dots (18)$$

$$F_s = n \cdot W_i \cdot K_r \dots\dots\dots (19)$$

であるから、(17)式で求めた $n$ と $K_v$ との関係より、 $n$ を媒介に図3に示すように、 $K_v$ と $F_z$ 、 $F_s$ の関係が求まる。

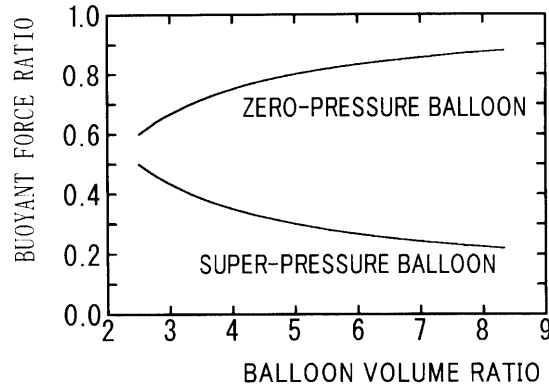


図3 二つの気球への浮力の分配率

2.3 気球重量

単一構成のSPBに比べてDBSではどの程度気球本体の重量が軽減されるかを検討する。ここで、SPBの皮膜、補強ロープの単位重量はZPBのそれの $K_{fi}$ 、 $K_r$ 倍であるとし、その長さは赤道半径と等しい半径の球で近似する。また、頭部、底部等のアクセサリーの重量はZPBのそれを容積に関係なく $W_a$ とすれば、同じ容積のSPBではその $K_a$ 倍であり、かつSPBの赤道断面積に比例すると仮定する。まず、容積 $V_z$ のZPBの気球重量 $W_{z1}$ は、

$$W_{z1} = V_z^{(2/3)} \cdot 3^{(2/3)} \cdot (4\pi)^{(1/3)} \cdot W_{fi} + V_z^{(2/3)} \cdot 4^{(1/3)} \cdot 3^{(2/3)} \pi^{(4/3)} \cdot W_r + W_a \dots\dots\dots (20)$$

$$= V_z^{(2/3)} \cdot 4.84 \cdot W_{fi} + V_z^{(2/3)} \cdot 15.2 \cdot W_r + W_a$$

(20)式で、右辺第1項はフィルム重量、第2項はロードテープ重量、第3項はアクセサリー重量である。他方、同じ容積のSPB<sub>1</sub>の重量 $W_{s1}$ は、

$$W_{s1} = V_z^{(2/3)} \cdot 4.84 \cdot W_{fi} \cdot K_{fi} + V_z^{(2/3)} \cdot 15.2 \cdot W_r \cdot K_r + W_a \cdot K_a \dots\dots\dots (21)$$

上記SPBより $1/K_v$ の容積のSPB<sub>2</sub>の重量を $W_{s2}$ とすれば、

$$W_{s2} = (V_z/K_v)^{(2/3)} \cdot 4.84 \cdot W_{fi} \cdot K_{fi} + (V_z/K_v)^{(2/3)} \cdot 15.2 \cdot W_r \cdot K_r + W_a \cdot K_v^{(-2/3)} \cdot K_a \dots\dots\dots (22)$$

となる。DBSでは、総容積が単一SPBと同一として重量比較をすれば、ZPBは、容積が $V_z$ の $\{1 - 1/K_v\}$ となる。その重量 $W_{z2}$ は、

$$W_{z2} = \{V_z (1 - K_v^{-1})\}^{(2/3)} \cdot 4.84 \cdot W_{fi} + \{V_z (1 - K_v^{-1})\}^{(2/3)} \cdot 15.2 \cdot W_r + W_a \dots\dots\dots (23)$$

DBSでは、上記のZPBとSPB<sub>2</sub>を組み合わせるとすれば、その重量 $W_{zs}$ は、

$$W_{zs} = W_{z1} + W_{s2} \dots\dots\dots (24)$$

ここで、気球の総容積が $30,000 \text{ m}^3$ 、 $100,000 \text{ m}^3$ 、 $300,000 \text{ m}^3$ 、 $500,000 \text{ m}^3$ の場合の各々の気球重量を求め、容積比 $K_v$ をパラメータにして単一SPBとDBSの重量比較をしてみる。気球の構成要素は、おおよその目安として以下の数値を仮定する。

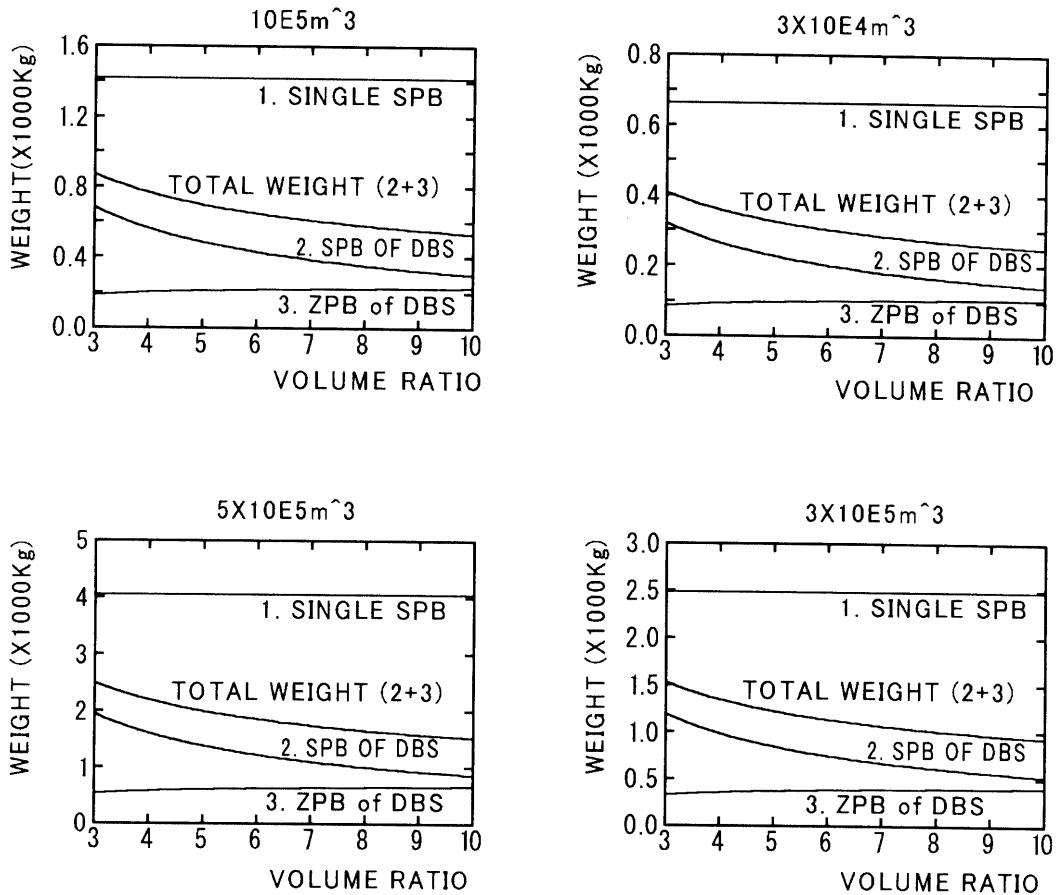


図4 単一SPBとDBSの重量比較

$$W_{\text{fil}} = 0.02 \text{ Kg/m}^2$$

$$K_{\text{fil}} = 5$$

$$W_r = 0.002 \text{ kg/m}$$

$$K_r = 10$$

$$W_a = 5$$

$$K_a = 10$$

図4に総気球容積別に計算した気球重量の推定値を示す。容積比が大きいほど、総重量の改善率も高くなるが、SPBの皮膜圧力も比例して増大するので、 $K_v$ が5ないし6程度を妥当な値とすれば、DBSの総重量は単一SPBと比べ、50%強改善されることがわかる。

### 3. ま と め

パラストを投下することなく高度を維持できる気球を、単一のSPBで実現する代わりに、ZPBと組み合わせる複合気球システムの有効性を検討した。SPBの気球皮膜に作用する圧力は、総気球体積に占めるSPBの体積比に比例して増大するが、それでも強大な単一のSPBを製作するより、小型にできる製作上の利点は大きいと考えられる。SPBが破壊しても、ZPBで飛行を続けるので安全性の向上も期待できる。

ZPBのガス温度が大気温度から変動することによりDBSに高度変化が起こることは、SPBの基本的特徴からの逸脱のようにも思えるが、気球重量が減少しているため、高度低下分は十分補える。かつ、DBSはSPBとしての

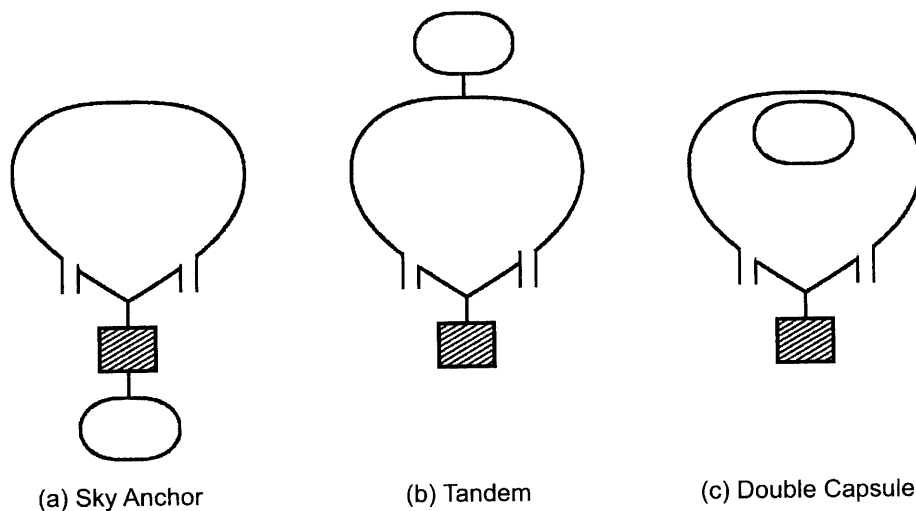


図5 複合気球の種々の構成法

高度の安定点を持っている。従って、科学観測等の目的上、この程度の高度変化が問題にならない限り欠点とはならないと考えてよいであろう。

これまでの考察では、DBSは、SPBがZPBの下に位置する構成を前提としてきた。実際には、図5のような構成法が考えられる。SPBから自由浮力分が失われて水平浮遊状態になっても、なおSPBの浮力が自重を上回っていれば、(a)のように、ZPBの上にSPBが来る、タンデム気球システムも有効になる。この場合、上下の気球の間をバルブを介してダクトで結ぶことができれば、SPBにのみガスを注入し、ZPBは全く膨張しない状態で放球することが可能になる。放球した後に、SPBの膨張とともにダクトを介して必要なガス量を下のZPBに移せばよい。移すガス量を調整すれば、最高高度より下の任意の高度で気球を水平浮遊させることもできる。(c)のように、SPBをZPBの内部に入れた、2重カプセル構成も考えられる。2つの気球皮膜の間で干渉がないようにできれば、タンデム気球と同様にSPBのみにガスを注入し、バルブを介してZPBにガスを移すことができる。これらの複合気球方式は、それぞれ単独のSPB方式にはない利点があり、将来の気球システムとして有効であると考えられる。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] J.H.Smalley, Stress and Configurations of Natural-Shape Balloons, Proc. of the AFCRL, pp 29-40, 1963.
- [ 2 ] I.S. Smith, Jr., Development of the Sky Anchor Balloon System, Proc of 10th AFCRL Scientific Balloon Symposium, pp 81-101, 1978.
- [ 3 ] Yajima N., A New Design and Fabrication Approach for Pressurized Balloon, 32nd Scientific Assembly of COSPAR, 1998.
- [ 4 ] Yajima N., Izutsu N. Honda H., Kurokawa H., Matsushima S., A New Design Concept of Natural Shape Balloon for High Pressure Durability, AIAA Int. Balloon Tech. Conf. AIAA-99-3880, 1999.
- [ 5 ] 矢島, 自然型気球の基本特性—高耐圧気球実現のための再検討と新しい設計・製作法の試み—, 宇宙研報告, 特集第39号, 大気球研究報告, 1999.
- [ 6 ] 井筒, 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, 宇宙研報告, 特集第40号.
- [ 7 ] I.Smith Jr., The Ultra Long Duration Balloon Project: A New Capability, AIAA Int. Balloon Tech. Conf. AIAA-99-3866, 1999.