

大型放球装置を使用した大気球の放球

並木道義¹・松坂幸彦¹・鳥海道彦¹・内田右武¹
平山昇司¹・小松俊郎¹・本田秀之¹・井筒直樹¹
齋藤芳隆¹・太田茂雄¹・山上隆正¹・廣澤春任¹
松本敏雄¹・兒玉康資²・本間容博²

Semi-Dynamic Launching Method for Scientific Balloons

By

Michiyoshi NAMIKI¹, Yukihiro MATSUZAKA¹, Michihiko TORIUMI¹, Yuubu UCHIDA¹,
Shoji HIRAYAMA¹, Toshiro KOMATSU¹, Hideyuki HONDA¹, Naoki IZUTSU¹,
Yoshitaka SAITO¹, Shigeo OHTA¹, Takamasa YAMAGAMI¹, Haruto HIROSAWA¹,
Toshio MATSUMOTO¹, Kosuke KODAMA² and Youji HONMA²

Abstract: The Sanriku Balloon Center (SBC) which belongs to the Institute of Space and Astronautical Science was built in 1971. The launching field of SBC was 140 m in length and 20 m in width. In Japan, the balloon launching method used since 1971 is a kind of static launching method. To launch larger balloons, we have developed a “semi-dynamic” launching method and extended the launching field by 20 m and developed a new launcher in 1998. This new launcher is different from the one used in the dynamic launching method. It is fixed to the ground creating freedom of rotation around the vertical axis. In addition, it is also possible for the launcher to lift a payload up to 5 m height from the ground.

We have successfully launched the first test balloon by using this new launching method on September 6, 1999. Utilizing this new launching machine, it has now become possible even in Japan to launch a balloon with a volume of 1,000,000 m³ and a total lift of 2 tons.

概 要

宇宙科学研究所三陸大気球観測所では、スタティック放球方式の一種である立て上げ放球方式を用いて、数多くの大気球の放球を成功させてきた。近年、大型気球の需要が高まり、放球方法の改善と放球場の拡張が必要となっていた。1998年に我々は、新しい大型気球放球装置を用いた放球方法であるセミ・ダイナミック放球方式を開発した。

この放球方式は、ガス注入後、ローラー車から気球を解放することによって一気に気球を立て上げ、気球が、観測器直上を固定している大型放球装置の直上に来たとき、大型放球装置から観測器を解放する、という手順で放球を行う。徐々に立てあげていた従来の方式と比べて、

¹ 宇宙科学研究所, ² ダイコー株式会社

ローラーで立て上げて行くときに皮膜を傷つける心配がなくなること、放球作業の時間短縮ができることが利点である。

1998年（平成10年）に、飛揚場の先端部分を20m延長し、その延長したほぼ中心部に直径6mの回転テーブルを備えた大型気球放球装置を製作した。本ランチャーは、回転テーブルに固定されており、放球時の風向きに合わせて旋回する事が出来る。また、ランチャーに備えた昇降装置により、地面から高さ5mまで観測装置を持ち上げることが可能である。これにより、B1000クラスの大型気球の放球が可能となった。

1999年9月6日にこの大型気球放球装置を用いて、最初のテスト気球を放球することに成功し、放球方法および装置の有効性が確認された。

重要語：大型気球放球装置，セミ・ダイナミック放球方式

1. はじめに

宇宙科学研究所に所属する三陸大気球観測所（SBC）は、1971年（昭和46年）に建設され、放球場の広さは、長さ150m、幅20mである。以来、大気球の放球のため日本独自の方式であるスタティック放球方式が開発され、改善が加えられてきた [1][2]。

現在、行っているスタティック方式による大気球の放球は、限られた放球場の大きさおよび放球方法に起因する以下の問題点が指摘されている。

- 1) 全長120mより長い気球（およそ200,000 m^3 ）の放球が困難である。
- 2) 立て上げ時、ローラー車の移動時に気球本体の皮膜に傷を付ける可能性があり、総浮力1トン以上は困難である。
- 3) ダイナミック方式にくらべ、ローラー車が移動する時間分、放球作業時間が長くなり、その間に地上風の状態が悪くなる可能性がある。

これらの問題を解決するために、我々は「セミ・ダイナミック」放球方式を開発し、1998年に放球場先端部を20m延長し、そのほぼ中心部に新放球装置である大型気球放球装置を製作した。従来の回転テーブルが放球場の中央付近にあったため、この延長は、実質的に放球場を80m延長したことに相当する。この大型気球放球装置を使用することにより、これまでの5倍となる容積1,000,000 m^3 、総重量2トンの観測装置を放球することが可能となった。

1999年9月6日にこの大型気球放球装置を用いて、最初のテスト気球（15,000 m^3 ）を放球することに成功した。本紙では、「大型気球放球装置」の概要、構成および性能ならびにテスト気球の放球結果について報告する。

2. 放球方式の開発

最近の観測装置は、より大きく、より重くなり、科学者は37kmより高い高度での観測を希望することが多くなってきた。これまでのスタティック放球方式は、以下に述べるように安全に放球できる大きさに制限があった。そこで今回、放球方法の改善を行った。

現在のスタティック放球方式では、以下の手順で放球を行っている。

- 気球頭部をローラー車によって保持し、ヘリウムガスを注入する。
- ヘリウムガスの注入量によってローラー車を移動させ、総浮力量のヘリウムガスを詰める時に必要な頭部長（ランチャー線）までローラー車が移動した所でローラー車を停止させる。
- ここでカラーの取り付け作業と最終浮力までヘリウムガスの充填を行う。
- ヘリウムガスの充填が終了すると、ローラー車は気球をゆっくり立て上げながらランチャー車まで移動し、ローラー車ははずしてランチャー車に取り付けてあるロードセルにより浮力の最終確認を行う。
- 浮力の最終確認後、ランチャー車から気球が解放され、放球が行われる。

この、ヘリウムガスの充填終了後に、ローラー車が気球の下部を移動する際に大きな浮力がかかっていると、気球本体の皮膜に傷を付けるおそれがある。また、ローラー車の移動には少なからぬ時間がかかることも問題であり、その間に地上風の状態が悪化する恐れがある。

浮力の大きさは、ほぼ気球の体積に比例すると考えられるが、ローラーで保持される部分は、折りたたまれており気球の体積とは無関係である。このため、単位面積当たりに掛かる圧力は、気球の体積に比例して増大することになる。

このため、1997年より総重量2トンを目標に新しい放球方式および大型放球装置の開発に着手した。まず、ローラー車をランチャー車まで移動させるのではなく、跳ね上げローラー車を用いて、ヘリウムを充填した場所で気球を解放することを考えた。これにより、皮膜にかかる圧力の問題と時間短縮を解決することができる。しかし、このまま放球すると気球が風に流されるため、観測器の位置を移動する必要があり、広い放球場が必要となる。そこで、我々は観測器の真上で気球を固定できるランチャーを考案した。ただし、放球時に観測器が固定部からスムーズに離れるよう、ランチャーを風向きにあわせて回転できるようにした。また、地上風によって気球が傾いている場合、放球後に観測器が地面と衝突するおそれがあるため、放球台を5m持ち上げることにした。この高さは、補遺のように検討して求めた。

3. 大型気球放球装置

これまでの気球放球場は、旧ターンテーブル上にランチャー車を固定し、放球動作を行っていたため、指令棟から旧ターンテーブルまでの距離90mの範囲内で気球の展開をしなければならなかった。この範囲以内で展開する気球は、頭部部分を折り返して使用しても全長120mの気球（容積200,000 m^3 ）が最大級であった。そこで、放球場の先端部分を20m延長し、そのほぼ中心部に本大型気球放球装置を設置することにした。この装置を使用することで、全長180mの気球（容積1,000,000 m^3 ）までの放球作業を行うことが可能となった。

大型気球放球装置は、直径6mの回転テーブル、昇降装置、放球装置およびコントロールから構成されている。図1に拡張した三陸大気球観測所飛揚場の全体図を模式的に示した。

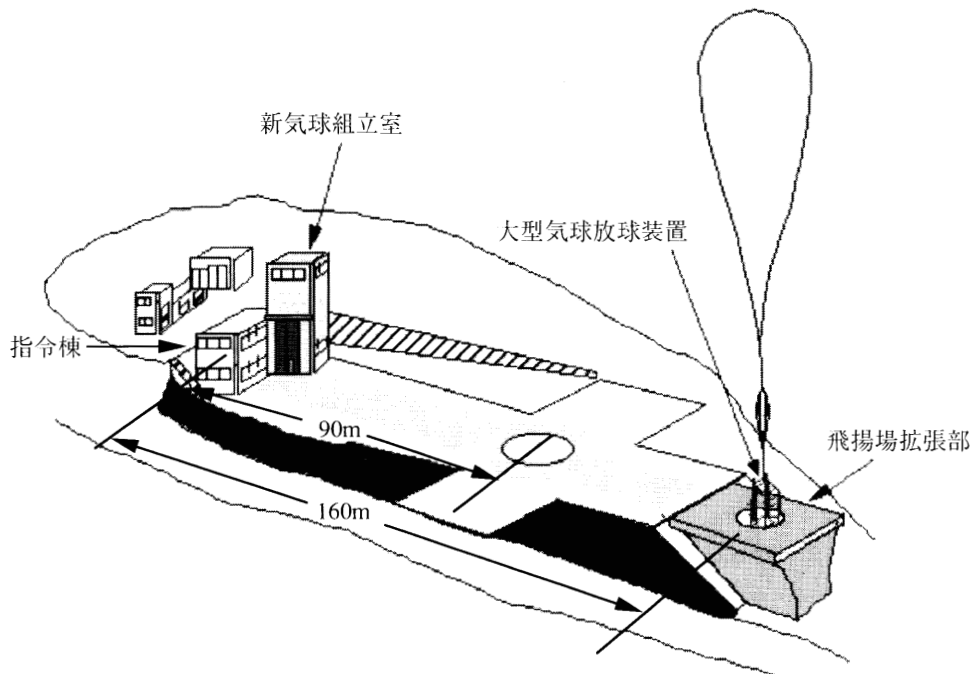


図1 拡張した三陸大気球観測所飛揚場全景の模式図

昇降装置と放球装置は、回転テーブルに直接取り付けられている。回転テーブル装置の重量は、5,600kgであり、昇降装置と放球装置の重量は、4,500kgである。大型気球放球装置システム全体の総重量は、10,100kgである。直径6mの回転テーブルは、エンドレスタイプで旋回することができ、旋回速度は0.5rpmである。昇降装置と放球装置は、同時または独立に昇降することができる。昇降装置は、地面からの高さ5mまで観測装置を持ち上げることができ、5m未満では自由な位置に止めることができる。放球装置の部分は、さらに高さ3mまで昇降が可能で、3m未満で自由な位置に止めることができる。

観測装置をリリースする装置は放球装置の最上部に設置しており、リリース機構は電気式モーターにより起動する。また、気球が放球装置上に立ち上がった後、ピン・タイプ・ロードセルにより気球の浮力を計測し、浮力の確認後に観測装置の放球が行われる。

この大型気球放球装置は、全ての方向に4,000kgの張力に耐えるように製作されている。

全ての装置の操作は、本装置から10m離れた場所の有線によるリモートコントロールによって操作することができる。図2に、大型気球放球装置の概要を示す。

気球の放球作業は、ヘリウムガス注入作業が終了するまでは今までと同様な方法であり、ヘリウムガスを注入している間は自走式のローラーで支えられ、このローラーは気球頭部およそ2.5トンの浮力を支えることができる。

放球作業の概要は

- 1) 気球を箱から取り出し、気球頭部をローラーにかけ、頭部以下の気球を放球場に展開する。(このとき、頭部以外の部分は折り畳まれていてもかまわない。)
- 2) 観測器の上部を大型放球装置の上部に固定する。
- 3) 気球下部と荷姿の上部であるパラシュートの上部とを結線結索する。
- 4) 結線結索終了後、ヘリウムガスの注入を開始する。浮力が付くにつれローラー車はランチャー線まで移動

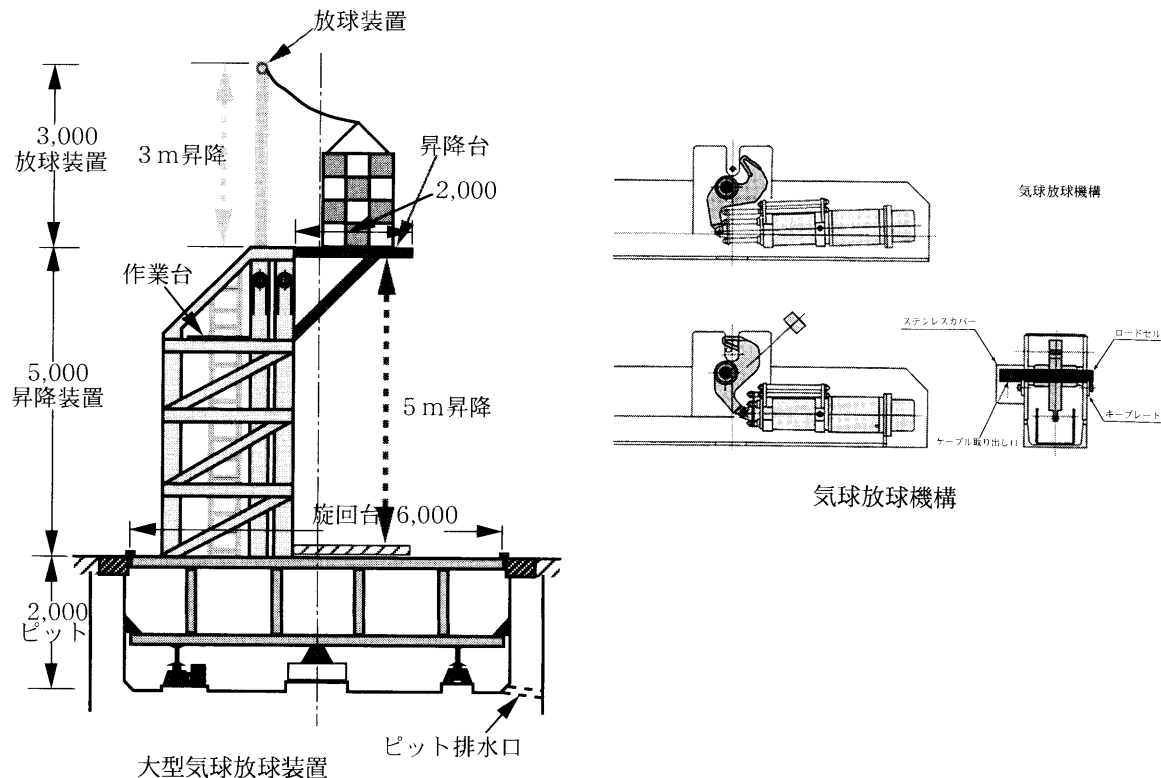


図2 大型気球放球装置の機構

表1 昇降装置の諸元

方式	チェーン・フォーク
積載荷重	1,000kg
昇降速度	5m/120秒
昇降間隔	4,750mm
電動機	1.5kW 4P

表2 放球装置の諸元

方式	チェーン・フォーク
昇降速度	5m/120秒
昇降間隔	3,000mm
電動機	0.75kW 4P

表3 回転テーブルの諸元

方式	電動摩擦駆動
最大荷重	14,000kg
回転速度	0.5rpm
テーブル直径	6m
回転方向	左, 右
車輪	9個の鉄車
操作方式	リモートコントロール
電気モーター	1.5kW 4P×3

表4 ピン・タイプ・ロードセルの諸元

定格容量	2,000kgf
許容過負荷	150%
非直線性	±1.0% RO
ヒステリシス	±1.0% RO
許容温度範囲	-10℃～+80℃
外形寸法	直径40mm×長さ280mm

し、柔らかいエアバックのカラーを取り付ける。このとき、気球はその位置にローラーによって保持されている。

- 5) エアバックカラーを取り付けたまま保持していたローラーがスイングする事により気球がリリースされ、気球は上昇する。気球の下部（観測装置の上部）は大型気球放球装置の上部に固定されているため、気球の上昇は一度止まる。
- 6) 大型気球放球装置に内蔵されたロードセルにより最終浮力の確認を行う。
- 7) 観測装置が放球装置の風下側となるよう回転テーブルを旋回する。
- 8) 気球に取り付けられたエアバックカラーを、指令電波により解放する。
- 9) その後、観測装置を大型気球放球装置からリリースする。

ローラーのスイングによる気球のリリースは手動にて解放され、ロードセルによる最終浮力の確認は、指令棟内のモニター装置により確認される。また、気球に取り付けられたエアバックカラーは、放球装置に近い場所で簡易型の無線装置を使用した指令電波により解放される。大型気球放球装置の回転テーブルの旋回、昇降装置と放球装置の昇降および観測器のリリース等は、大型気球放球装置から10m離れた場所から有線式のリモートコントロールにより操作が行われる。

表1には、昇降装置の諸元を示し、表2には、放球装置の諸元を示す。また、表3には、回転テーブルの回転機構の諸元を示す。表4には、ピン・タイプ・ロードセルの諸元を示す。

新しい「セミ・ダイナミック放球方式」の模式図を図3に示した。

4. 気球の放球

1999年9月6日に、新しい大型気球放球装置を用いた最初の気球の放球に成功した。実験は、B15-81気球（気球工学実験）容積15,000 m^3 を使用して行われた。全体の総重量はおよそ345kg、気球頭部から大型放球装置に取り付けた観測器の上部までの長さは61mであった。

放球当日、天候はくもりであるが、地上風速1mと最高の条件で気球の放球作業を開始した。観測器の電波試験、気球にヘリウムガスの充填作業を終了するまでの行程は、スタティック放球方式とほぼ同じ時間で行われた。

超大型気球放球方法

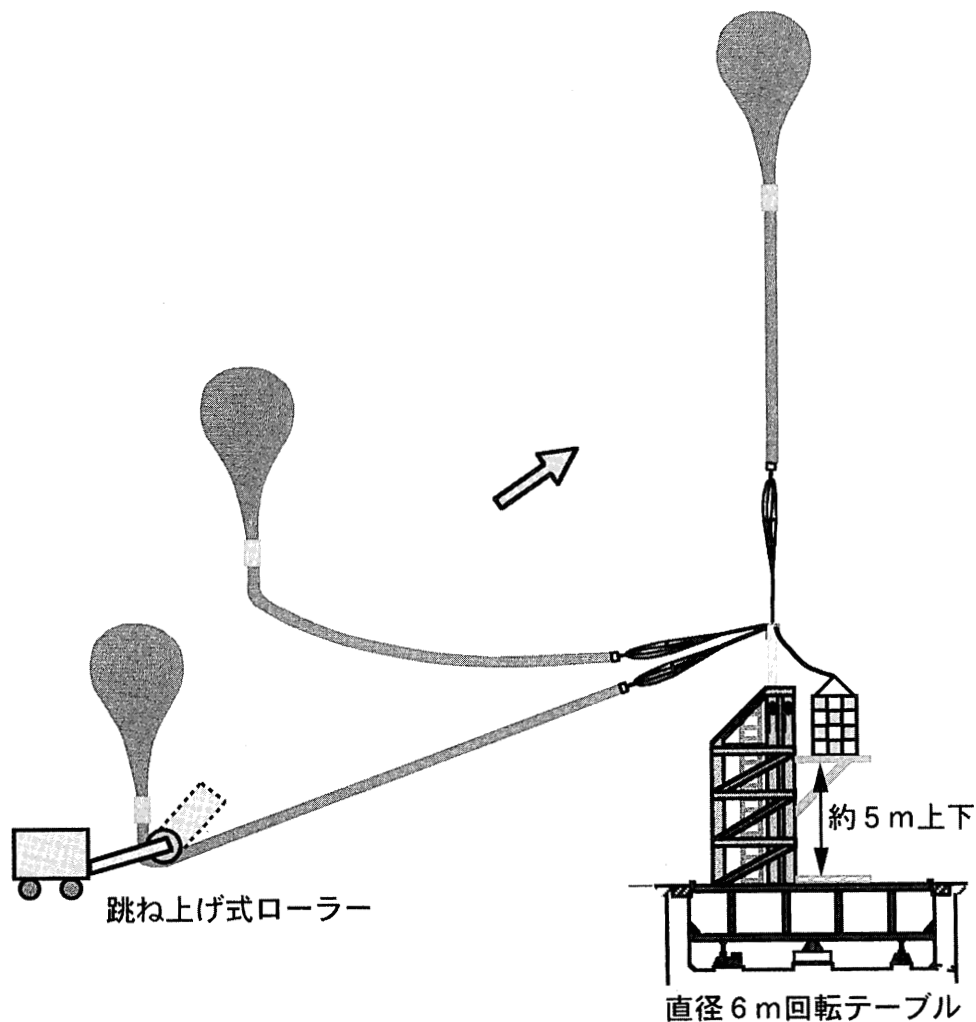


図3 大型気球放球装置を用いた気球の放球

スタティック放球方式では、この後ローラー車の移動が行われ、気球が放球されるまでの一般的な時間は、およそ15分程度である。本装置を使用した場合、ローラー車は移動せずその場所でスイングし、気球を一度リリースさせ本装置上に立ち上がることになり、放球されるまでの時間は、およそ5分程度であり、10分間短縮されたことになる。放球後気球は、270メートル/分の上昇速度で、高度28.2kmに到達し、この高度で水平浮遊状態に入った。これは一連の放球作業中に、気球に損傷を与えず正常に放球されたことを意味する。図4に大型気球放球装置を使用して、放球した気球の様子を示す。

B15-81気球は、大変順調に上昇し、およそ2時間の水平浮遊の後、地上より指令電波を送信して観測装置を

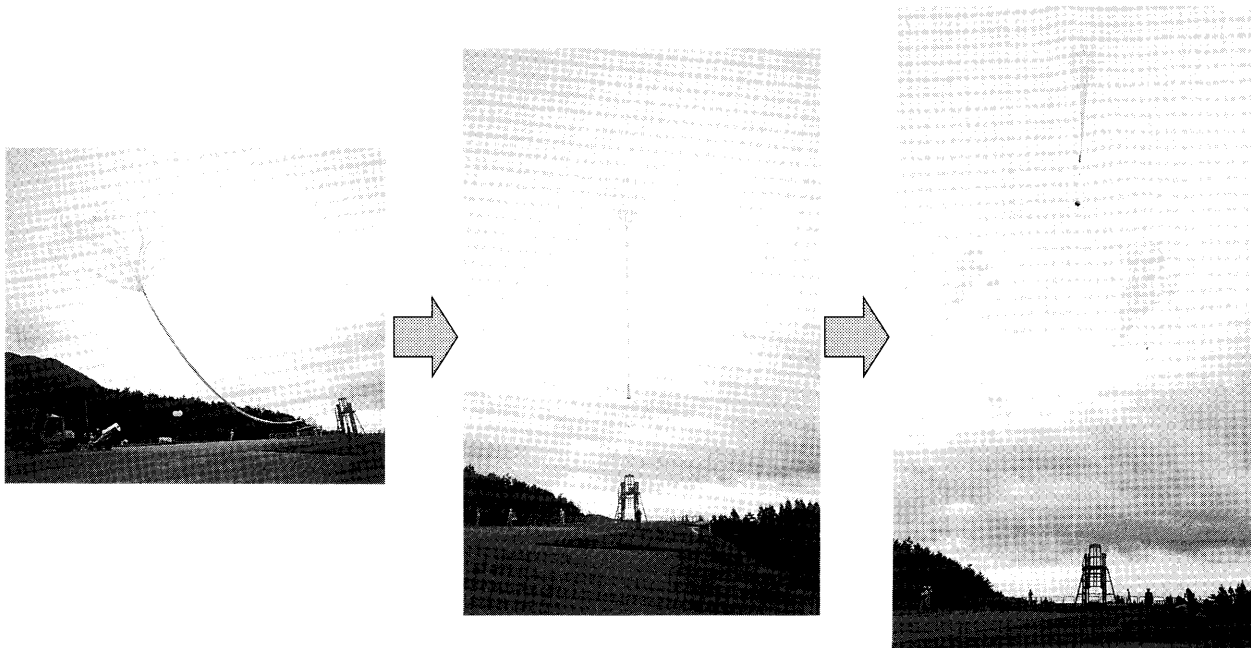


図4 大型気球放球装置を使用した気球の放球

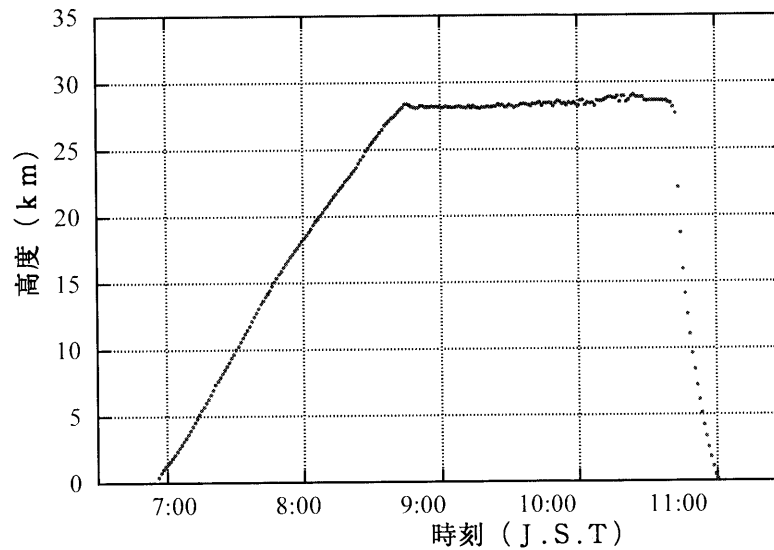


図5 B 15-81気球の飛行結果

気球より切り離れた。海上に着水後には、待機していた2隻の回収船により、気球本体および観測装置を無事回収した。図5は、B 15-81気球の飛行結果を示す。

5. ま と め

大型気球放球装置が完成したことにより、

- 1) 気球本体の皮膜に損傷を与えることなく大重量となる観測装置の放球が可能となった。
- 2) 気球の放球作業は、短時間で行えるようになった。
- 3) 地上風の少ない良好な状態のもとで放球するチャンスが増えた。
- 4) これまでよりも大型の気球 (1,000,000 m³程度) を使用することが可能であり、高々度での観測が可能とな

り、結果として質のよいデータを得られると期待されている。

6. 謝 辞

本大型気球放球装置の設計製作にあたっては、宇宙科学研究所の施設課の方々に多大なご支援をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

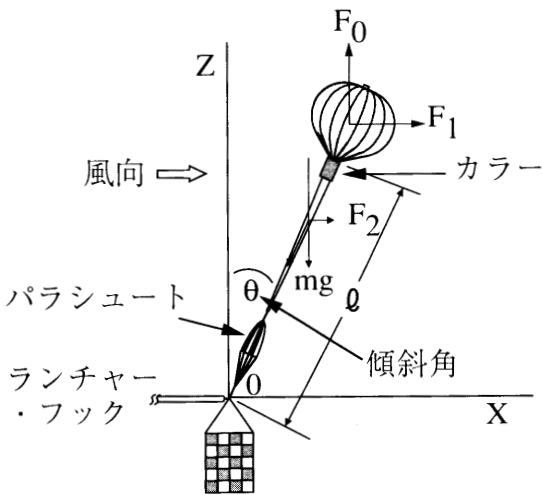
- [1] Akiyama H., J. Nishimura, M. Namiki, Y. Okabe, Y. Matsuzaka and H. Hirose: A new static launch method for plastic balloons, *Adv. Space Res.* Vol. 3, No.6, pp. 97-100, 1983.
- [2] Akiyama H., J. Nishimura, N. Yajima, Y. Okabe, Y. Matsuzaka, M. Fujii, T. Yamagami, M. Namiki, S. Takanari, S. Ohta, H. Hirose and S. Saraspriya: An Improvement of the static launch method, *Proc. of 16th Inter. Symp. on Space Technology and Sci.*, Sapporo, pp. 1903-1908, 1988.

補 遺

気球が傾いていた場合に、観測器を持ち上げるべき高さについて

地上風の影響によって気球が傾いていた場合には、放球時に観測装置がスイングして、地上に衝突する恐れがある。これを避けるため、地上風の影響による気球の傾き角度を計算し、あらかじめ持ち上げておくべき高さを求めた。

図6に気球が柔らかいエアバックカラーによってしぼられた時の風による傾きの模式図を示し、変数を以下のように定義する。



- F_0 : 総浮力
- F_1 : ガスの入っている部分の風による抵抗
- F_2 : カラーより下部気球の風による抵抗
- m : 観測器を除く、全質量
- g : 重力加速度

図6 地上風による気球の傾き

ランチャー位置の傾き角 θ は、垂直方向と水平方向に働く力の比であり $Z = 0$ では

$$\tan \theta = \frac{dx}{dz} = \frac{F_1 + F_2}{F_0 - mg} \dots\dots\dots(1)$$

となる。

気球頭部の抵抗係数を C_{D1} 、カラー下の抵抗係数を C_{D2} とし、それぞれの断面積を S_1 、 S_2 とすると、風速 V のときの抵抗値は

$$F_1 = 1/2\rho C_{D1} S_1 V^2 \dots\dots\dots(2)$$

$$F_2 = 1/2\rho C_{D2} S_2 V^2 \dots\dots\dots(3)$$

である。ただし、 ρ は空気密度である。(3)において本来は S_2 ではなく、 S_2 の Z 軸への斜影成分を用いるべきだが、 θ が小さい場合を念頭においているため、 S_2 で近似している。また、この近似は傾き方が大きくなる方向で誤差を持つため、この評価で安全ならば近似しない場合においても安全であることが保証される。

これらを(1)に代入すると

$$\tan \theta = \frac{1/2\rho V^2 (C_{D1} S_1 + C_{D2} S_2)}{F_0 - mg} \dots\dots\dots(4)$$

となる。

次に角度 θ まで傾いた場合、ゴンドラが下がる高さを求める。放球すると気球は上昇し始めるが、気球が変形するため初期の上昇速度は、1.5m/sec程度と遅い。また、強風の場合には、風に押さえつけられるように上昇しない場合も見られる。このため、最悪のケースとして気球は上昇せず単純な振り子運動をする場合を考える。こ

のとき降下する高度を Δh とすると

$$\Delta h = \ell (1 - \cos \theta) \dots\dots\dots(5)$$

と表すことができる。

B500型気球の場合について

この式から、以下の条件で試算を行う。

B500型気球の場合、総浮力 F_0 : 1,200kg, 気球重量 m : 720kg, である。気球頭部を周長がカラー位置までの長さの球で近似し, C_{D1} を0.5とする。また、カラー下の部分は、幅が0.5m, C_{D2} を1.0の円柱状とみなす。

気球全長: 152m であり、気球頭部からカラー位置までの長さが22m, であることから気球頭部部分の断面積 $S_1 = 154\text{m}^2$ となり、カラー下部分の断面積 $S_2 = 65\text{m}^2$ となる。

これらを (1) に代入すると

$$\tan \theta = \left(\frac{4.81 + 4.06}{1,200 - 4.7 \times 130} \right) V^2 = 0.015 \times (v \text{ (m/s)})^2$$

$$\therefore \theta = 57.296 \times \tan^{-1} (1.5 \times 10^{-2} \times (v \text{ (m/s)})^2) \text{ [deg]} \dots\dots\dots(6)$$

となり、(6)式より B500気球の地上風の影響による気球の傾きが計算される。

次に(5)式を用い

$$\Delta h = 150 \times (1 - \cos \theta) \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 $\ell = 150\text{m}$ とした。

表5および図7に地上風の影響による気球の傾きおよび降下高度の結果を示す。以上の計算より、気球が放球可能な最悪条件である風速4mの場合には13.5度傾き、4.1m降下する危険性があることがわかる。これに対応するため、高さ5mまで持ち上げることができる昇降装置を取り付けた。

表5 B500気球における地上風の影響による気球の傾きと降下高度

v (m/sec)	1	2	3	4	5	6
θ (deg)	0.86	3.43	7.69	13.50	20.56	28.37
Δ (m)	0.017	0.269	1.349	4.145	9.554	18.015

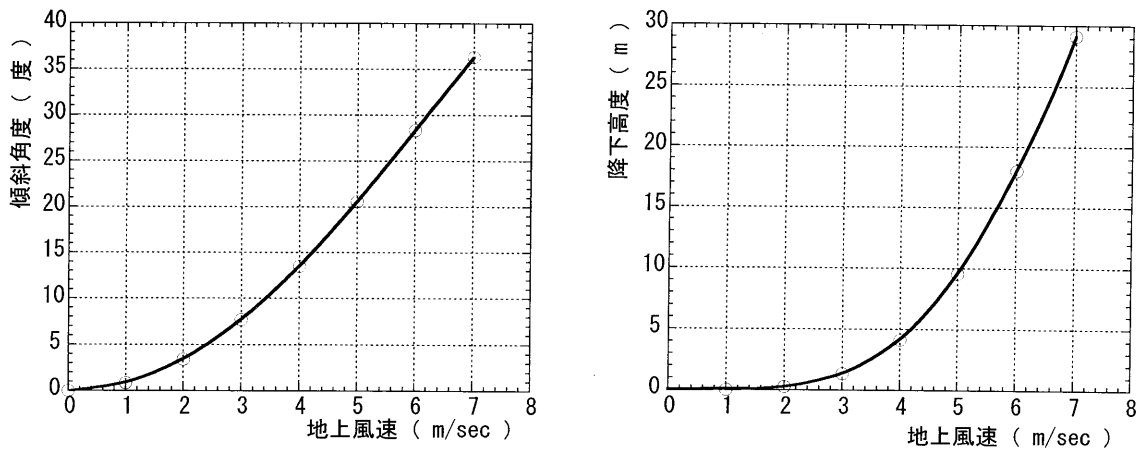


図7 地上風の影響による気球の傾きと降下高度