

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360362

研究課題名(和文)成層圏パワードバルーンシステムの研究

研究課題名(英文)Study of Stratospheric Powered Balloon System

研究代表者

井筒 直樹 (IZUTSU, NAOKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：90184639

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円、(間接経費) 4,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の最終目的は、上部成層圏に滞空し、飛翔経路を制御可能な飛行体の実現にある。そのため、既存の気球と比べて空気抵抗の少ない俵型スーパープレッシャー気球に、飛翔制御機構および姿勢変更機構を搭載したパワードバルーンの可能性について研究した。俵型気球のスケールモデルを製作し、屋内試験用のシステムを構築し、気球の膨張から飛翔終了過程までの模擬試験を行い、パワードバルーンシステムの実現可能性を高めた。

研究成果の概要(英文)：The final goal of the study is to realize a floating vehicle in the upper-stratosphere of which traveling direction can be controllable. The possibility of a powered balloon combining a tawara type of super-pressure balloon of which air-drag is smaller than that of a conventional scientific balloon with on-board thrust units and an attitude changing mechanism. A scale model of tawara type of balloon was manufactured and an in-door experimental system was constructed. It was tested for the process from the inflation through the flight termination, which contributed to increase the possibility of realization for the powered balloon system.

研究分野：気球工学

科研費の分科・細目：総合工学、航空宇宙工学

キーワード：宇宙航空工学 気球 膜構造物

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 現在、上部成層圏の高度 30~50 km に滞空して科学観測を行う手段は、科学観測用大型気球のみである。この種の気球は、主に厚さ 20  $\mu\text{m}$  以下の薄膜ポリエチレンで作られており、その容積は百万立方メートル、吊り下げ観測器の重量は数トンまで可能であり、コストパフォーマンスの高い実験手段であるが、以下の大きな問題がある。

① 現在の気球は排気口のあるゼロプレッシャー型気球 (ZPB) であり、昼夜のガス温度変化により、夜間に発生する浮力低下を補償するためのバラスト投下が必要で、数日以上の上昇は極域等の特別な環境を除いて不可能である。

② 気球の飛行制御手段は、バラスト投下と浮揚ガスの排気による高度変更の結果、異なる方向の風に乗せるという間接手法に限られ、飛行制御は困難である。

(2) 第 1 の問題については、排気口がなくバイアス圧力をもつスーパープレッシャー型気球 (SPB) を実現すれば、昼夜における高度変化を最小限にとどめることが可能になり、バラストを搭載する必要もなくなる。我々は、この目的のためにロードパンプキン型気球を考案し、実用可能なレベルに到達している。

(3) 第 2 の問題により、たとえ SPB が実用化され長時間飛行が可能になったとしても、飛行経路の不確実性というリスクが存在する。ZPB の場合でも、飛行制御が困難なことから運用上大きな制限が存在する。

(4) 第 2 の問題を根本的に解決する手段は、成層圏の風に逆らった飛行を可能にする推進装置を装備したパワードバルーンしかない。

ところが、気球の体積は非常に大きく空力的に不利な形状であるため、この巨大な物体の経路を変更するための有効な推力を、積載可能な重量範囲内で求めるのは事実上不可能である。

## 2. 研究の目的

本研究の最終目的は、数百 kg のペイロードを搭載して上部成層圏に滞空し、その飛行経路を有効に制御可能な新しい飛行体の開発にある。

そのため、これまでの研究によって可能となった成層圏用耐圧大型軽量薄膜構造体である俵型気球を飛行母体としたときに、飛行制御を実現するために必要となる要素技術を確立し、搭載可能なシステムを具体化する

こととした。

また、放球から浮遊状態を経て、飛行を終了するまでの一連の過程における本システムの問題点を見だし、対応策を考慮するとともに、このような特殊な気球の製造過程の技術的な確立も行う。

## 3. 研究の方法

(1) 将来の実証試験用気球に搭載可能な飛行制御システムと姿勢変更機構を具体化するため、以下に示す要素技術について研究する。

① 成層圏用推進機を保持するための気球と一体になった耐圧性インフレーターブルブーム構造物。

② 通常の気球の上昇形態から水平浮遊後の飛行形態、実験終了時の終了形態への各姿勢変更と、これに伴う吊り下げ観測器の移動手法。

③ 姿勢変更、飛行制御のための搭載装置の具体化。

④ 高いアスペクト比の (細長い) 俵型気球を製造するための技術。

上記の個別要素について検討・試作・試験を行い、各々の構造が確立された後に、気球のスケールモデルを製作する。そして、試験用に製作した各機構を装着して、屋内で、膨張・加圧、姿勢変更、推進装置の各機能試験を行い、搭載可能な装置としての技術を完成させる。

(2) 本研究においては、以下の順で研究を行った。

- ① 最終的な飛行体の目標仕様の検討。
- ② 成層圏用推進機を保持するための気球一体型インフレーターブルブームの試作と試験。
- ③ 気球の姿勢変更の手法の検討。
- ④ 成層圏用推進機を保持するための気球一体型インフレーターブルブーム構造の確立。
- ⑤ 気球の姿勢変更の手法の確立に向けた試験機構の試作。
- ⑥ 推進機部分および制御機構の具体化。
- ⑦ 姿勢変更、飛行制御のための搭載装置の開発。
- ⑧ 屋内試験用スケールモデル気球の製作。
- ⑨ 総合試験。

表 1 に本研究における総合試験用気球の諸元を示す。

表 1

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| モデル番号                  | P038          |
| 公称容積 (m <sup>3</sup> ) | 380           |
| 直径 (m)                 | 5.729         |
| 高さ (m)                 | 15.58         |
| 全長 (m)                 | 19.66         |
| 円筒部長さ (m)              | 12.15         |
| ゴア数                    | 40            |
| ゴア長 (m)                | 20.70         |
| 縦ロープ種類                 | 1000lbs ダイニーマ |
| 縦ロープ数                  | 40            |
| 横ロープ種類                 | 2000lbs ダイニーマ |
| 横ロープ数                  | 28            |
| アスペクト比                 | 2.72          |
| 質量 (kg)                | 47.6          |
| 試験差圧 (Pa)              | 50~450        |

#### 4. 研究成果

##### (1) U字型インフレータブル構造

① 成層圏用の推進装置はローターの直径が大きくなるため気球から横に大きく張り出した保持構造物が必要となる。

一方、気球の放球時には、気球の頭部を除いて、長手方向にたたまれて膨らんでない状態であるため、同じように、この保持構造物もインフレータブル構造にして放球の障害とならないようにすることが必要となる。

複数の形状候補について検討・試作を行い、耐圧性や荷重に対する耐変形性を試験した結果、図 1、2 に示すような、2つの U字型チューブを組み合わせた構造が安定していることがわかった。各チューブのベースの4点が気球の縦・横補強ロープの交点に接続される。

② チューブ本体の素材は、複数の材料で試作を行い、軽量化と耐圧試験を実施した結果、ケブラー三軸織片面ウレタンコーティング布 (質量 196g/m<sup>2</sup>) 製とした。直径は 0.2m、長さ 2m、質量は 1組あたり 2.5kg である。加圧試験を行い、想定される使用圧力 30kPa の 2.4 倍の 72kPa (図 3) の耐圧性能を有することを確認した。



図 1



図 2

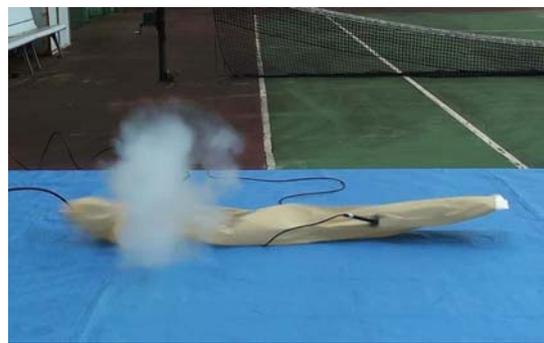


図 3

③ 気球に取り付けての総合試験時には 30 kPa の差圧で動作する逆止弁が取り付けられている。これは、実機で、浮遊高度にて差圧が 30kPa を少し上回るような量の窒素ガスをあらかじめ地上で封入した状態で放球することを想定している。

##### (2) 高アスペクト比の俵型気球

① これまでの俵型気球は満膨張時にゴアが完全展開することを目的としたため、通常のロードパンプキン型気球のアスペクト比約 0.599 より少し大きいアスペクト比 0.7~0.8 に設定し、気球製造方法もこれに対応していた。

② これに対して、空気抵抗を減少させることを目的とした本研究で使用する俵型気球は、大きなアスペクト比が求められる。細長い形状であるため、製造方法に問題があると、膨張後の形状にゆがみが発生する可能性があるため、製造工程を精査し、製造誤差等の管理方法を見直した。

③ 例えば、横ロープは気球を一周させた後に結合する必要があるが、その際の引き込み処理を行った部分はロープが太くなり伸び

が少なくなり、他の部分と異なる特性を有する。

そこで、この結合部が周上に均等に分散するように配置することにより、膨張後の気球の歪みの発生を防止した。このようにして製作した気球の膨張試験を実施し、形状に問題がないことを確認した（図4）。



図4

### (3) 推進装置

① 成層圏で使用する推進機のローターの直径は大きくなるため、放球時には折りたたんで、気球に沿わせる形で配置し、上空で、支持構造が展開して安定した後に、ローターを展開することとする。

この時、下向き状態で、ローターを低速回転させ、遠心力で開いた後にロックされる構造を組み込み、試験を実施した。

② 製作したモデルは、地上試験用であるため、実機の1/3スケールとし、全体の直径は1.2m、ローターのサイズは0.55m × 0.05mとした（図5）。

常圧における推力の測定も実施し、最大10N程度であることを確認した。これは実機（ローターの直径3倍、気球の直径5倍、高度30kmを想定）換算で1m/s程度の移動速度が得られる推力である。

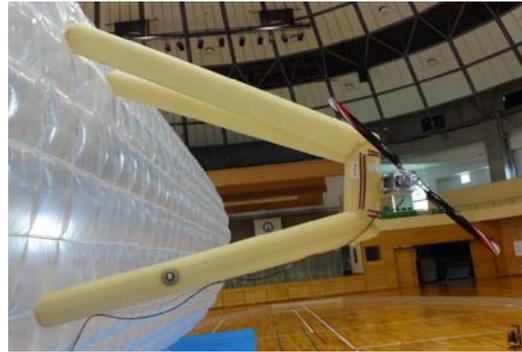


図5

### (4) 観測器の吊り下げ構造

① 気球の上昇中は、観測器は、通常の気球と同様に気球尾部から吊り下げられている。上空で水平浮遊状態になった後に、船体を90度回転させた飛行状態にした際には、その方向に吊り下げる必要がある。

② この方法として以下の2種類を検討した。

第1は円筒部の中央付近にロープを周方向に回して吊る方式である。利点は観測器までの吊り長さを短くすることができることにある。

第2の方法は、図6に示すように、気球の長手方向に頭部と尾部間で吊りロープを配置する方法である。観測器までの吊り紐の長さが長くなる欠点があるが、全体のたわみは小さいと考えられる。



図6

③ 両者について、気球内圧を変化させて、吊り荷重と気球本体のたわみ角の関係を測定した結果（図7）、たわみが小さく、次に示す姿勢変更方式と親和性の高い第2の方式が優れているとの結論に達した。

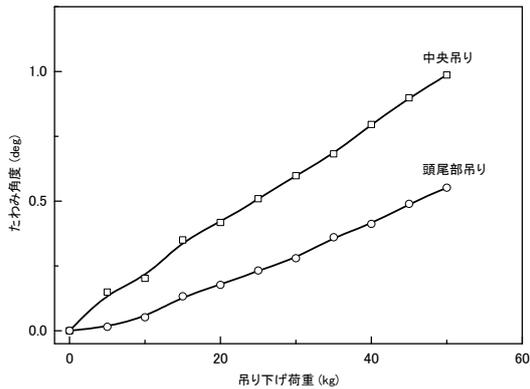


図 7

(5) 気球の姿勢変更機構

① 図 8 に示すようにロープを配置し、気球尾部からの観測器の接続を解除すると、観測器の自重により、気球本体が回転を始め、最終的に水平状態となる。この過程を模擬する試験を実施した (図 9)。

図中の赤矢印は、頭部と尾部からの吊り下げロープの合流点からペイロードの荷重方向を示している。また、このロープは気球が水平になった時に下側に位置する縦ロープに仮縛され、荷重がかかるにつれて順番にはずれる構造とした。

② この時、気球等からのロープが所定の位置からずれないように、ロープの上から荷重がかかると簡単に破れる構造を持った保護フィルムをはるのがよいと思われる。これは、気球でリーフィングスリーブと呼ばれる技術を応用できるため実現に問題はない。

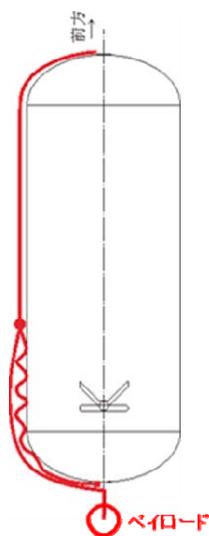


図 8

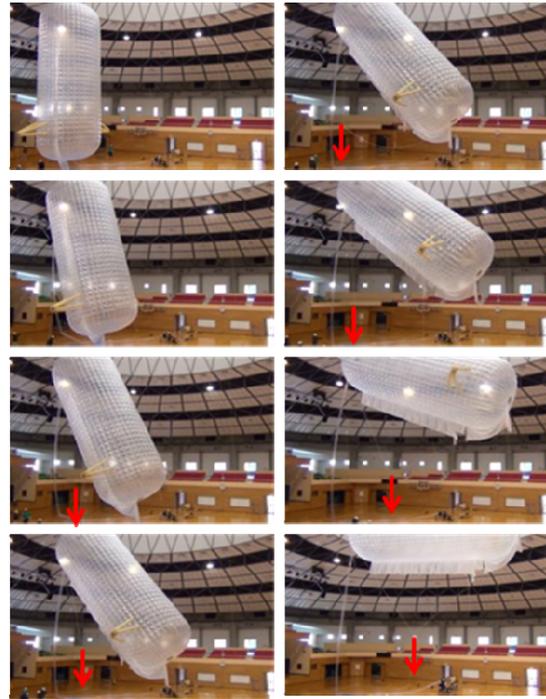


図 9

(6) その他の検討およびまとめ

① 飛行を終了する際に、気球を引き裂いてガスを抜いて降下させる必要がある。これまでに実績のある ZPB の頭部に配置した V 字型引き裂きパネル方式を採用し、さらに、引き裂き紐が貫通する尾部パネル部分にも同じ技術を応用した気密構造を加えた方式を検討し、所定の機能を有することを確認した。

② 2010 年に実施した俵型気球の飛行試験の結果を検討し、耐圧性能の向上につながる改良点を構築し、本スケールモデルの製作に適用した。

また、これまでに実施した、複数の俵型気球の地上膨張・加圧試験を実施した際の、形状測定記録を検討し、性能の向上を図った。

③ 一連の検討、試作、部分試験、総合試験により、パワードバルーンをアスペクト比の大きい俵型気球をベースに実現できる可能性が高まった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Naoki Izutsu, et al. (16 名中 1 番目), Development of a Super-Pressure Balloon with an Improved Design, Trans. JSASS

Aerospace Tech Japan, 査読有, Vol.8,  
PP.PM\_7-Pm\_13, 2010

〔学会発表〕(計 5件)

- ① 井筒直樹, 他, 俵型気球の飛翔試験, 平成 22 年度大気球シンポジウム, 2010 年 9 月 30 日, 相模原市
- ② 井筒直樹, 他, 俵型スーパープレッシャー気球の開発, JAXA Research and Development Report, 10-003, 1-24, 2011
- ③ 井筒直樹, 他, 俵型気球の地上膨張試験, 平成 23 年度大気球シンポジウム, 2011 年 10 月 7 日, 相模原市
- ④ 井筒直樹, 他, 薄膜高高度気球の引き裂き装置, 平成 24 年度大気球シンポジウム, 2012 年 10 月 16 日, 相模原市
- ⑤ 井筒直樹, 他, 俵型気球の開発と応用, 平成 25 年度大気球シンポジウム, 2013 年 11 月 14 日, 相模原市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井筒 直樹 (IZUTSU NAOKI)

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号: 90184639