小型係留気球の開発と浮遊安定性改善^{*1}

Development of a Compact Captive Balloon and Its Level Supporting

中 尾 達 也^{*2}・藤 原 和 人^{*3}・古 川 索 康^{*2}・廣 江 哲 幸^{*3}

Tatsuya NAKAO, Kazuhito FUJIWARA, Motoyasu FURUKAWA and Tetsuyuki HIROE

Key Words: Captive Balloon, Kite, Stabilization

Abstract: Many kinds of observation techniques have been developed to obtain the properties of atmospheric conditions. The advanced observation techniques of the flow in relatively large scale are remote sensing by satellite facilities, long range observations by radar or Doppler Sodar, etc., while data from conventional climometers set at fixed places are merely limited information about local scale flow. Captive balloons are also available and feasible for the observation of local flows if their standing mechanics are robust against the strong wind and the motion of balloon are stable for all wind direction and the change of wind direction. In this paper, a compact captive balloon (about 2 m diam.) for flow measurement is proposed and the preservation of balloon height level and the stabilization of its motion are challenged by using a kite. The relation between force balances acted on the balloon and the balloon height or position was estimated and confirmed in experiments. Although the lift force of single kite worked successfully, it is found that the performance of plural kites is less in the traction of balloon since the interaction of their tensions. The compact balloon supported by the kite enabled the over 300 m floating by virtue of the small size causing only low air resistance.

1. は じ め に

気象を観測する際には、対象としている現象の空間的、時間的スケールに応じて観測システムを決定しなければならない。近年、ヒートアイランド現象や局地風など地表付近から高度 1000 m 程度までの領域（大気境界層）で起こる、局地的な気象のメカニズムを明らかにしようとする試みがなされている。そのような現象は水平スケールが数十 km 以下、時間スケールが数時間以下という小さいスケールで起こるために、気象要素の中でも局地性の大きな要素を知ることが重要となり、その観測には高い空間分解能と時間分解能が求められる。

以上のことよりまとめると、局地気象を観測するための機器に求められる要件は「大気境界層内において、局地性の大きな気象要素を高い空間・時間分解能で観測可能であること」と言えよう。

局地性の大きな気象要素としては、風（風向・風速）が挙げられるが、現在、風の観測に用いられている機器の中で、前述の要件を考慮すると、係留気球は有効な観測機器であると言える。係留気球は異なった種類のデータを一度に直接的に計測できるという利点も有しており、これまでも大気鉛直構造の観測の他、エアロゾルや温室効果ガスなどの観測にも用いられてきた。

係留気球以外で大気境界層内の風の観測に用いられている機器を挙げると、直接的な計測を行うものとしては、よく知られている気象観測システム AMeDAS（Automated Meteorological Data Acquisition System）で用いられているような風向風速計があり、間接的に計測を行うものとしては、ドップラーソーダやウィンドプロファイラなどがある。これらの機器はそれぞれに利点を持つが、局地的な気象を対象とした場合、空間分解能が十分でない、計測の範囲が限定される、気象条件の変化により計測誤差が大きくなる、といった短所がある。

高層気象の領域ではレーウィンゾンデによる風の観測も行われているが、第 1 図^{1,2)}に示すように地表付近と高層領域では風速の相関が小さく、高層のデータによる低層の風の推定が困難であることから、地表付近の風を知るには実際の観測が求められる。また、ゾンデでは一定領域の連続的な観測ができないため、局地的な風の観測には適していない。このように他の観測手段と比較しても、係留気球は局地気象の観測に便利な機器であると言える。

しかし、係留気球にも（１）強風時の係留（定位置保持）が困難、（２）気球と積載物の重量に対して十分な浮力を得るために大型化、（３）材料のガス封入性能の問題により浮力の維持が困難、（４）計測装置や通信装置への電力供給の問題、といった短所があり、その使用は短時間の計測に制限されているのが現状である。

本研究では局地気象観測用小型係留気球の開発を目指し、これらの短所を克服することを考える。その中でも強風時の係留が困難であるという点が大きな妨げとなっており、係留気球を活用するには浮遊安定性の改善が強く求められる。

^{*1} © 2005 日本航空宇宙学会

平成 13 年 11 月 9 日、日本航空宇宙学会西部支部講演会（2001）において一部発表、平成 15 年 10 月 8 日原稿受理

^{*2} 熊本大学大学院自然科学研究科

^{*3} 熊本大学工学部

第 1 図 福岡での高層と地表付近の風速における相関係数 (気象データひまわり CD-ROM99, 2000 より算出)

しかし, 前述のように係留気球には積載機材への電力供給という問題があるため, 浮遊安定性を改善するために電気的な装置を用いるのは好ましくない. 本論文では小型係留気球の開発と共に, 風を用いたその浮遊安定性改善効果について報告する.

2. 小型係留気球について

係留気球の形状は回転楕円体型, 球冠型, 円錐型から静止浮遊時の直径, 表面積, 投影面積, 直径と高さの比 (縦横比), 抗力, 慣性モーメント, 振動の周期について予備検討を行い, 縦横比 0.45 の回転楕円体が最適であるという結論を得た.

気球の小型化と係留の長時間化を図るために, その材料には軽量でガス封入性能が高いアルミ蒸着エポキシ樹脂多層フィルムを用い, 円形に切り取った 2 枚のフィルムの周を熱で互いに接着することで製作した. 試作により気球の縦横比が 0.6 程度になることが分かったが, 製作の容易さを考慮し, この製作法を用いた.

高強度で軽量かつ細さが求められる係留系には, ケブラ繊維 (直径 1.5 mm, 単位長さ当たり質量 1.28 g/m, 引張強度 700 N) を選定し, 気球に注入するガスにはヘリウムを用いた.

気球と係留系との取り付けは, 強度の観点から気球を包み込む帯状のカプトン樹脂フィルムを介することで, 係留系の張力が直接気球に作用しないよう工夫を施している.

気球の寸法を決定するに当たり, 第 2 図に示すような静止浮遊状態における力の釣合を考えると, 気球の釣合方程式は次のように表される.

$$V(\rho_{\text{Air}} - \rho_{\text{He}}) - (\rho_m t S + M + ml) = 0 \quad (1)$$

ここで V : 気球の体積, ρ_m : 気球材料の密度, t : 気球材料の厚み, S : 気球の表面積, M : 積載物の質量, m : 係留系の単位長さ当たり質量, l : 係留系長さであり, 必要な気球の体積 V は M と l を与えることで求まる. M を 1700 g, l を 200 m として, 気球の寸法形状を直径が 1.9 m, 高さが 1.1 m の回転楕円体と決定した.

第 2 図 静止浮遊時の力の釣合

3. 風を用いた気球の浮遊安定性改善

係留気球を用いて長時間の観測を行うためには, 変化する気象条件に対応し安定した係留を行うことが必要であるが, 特に問題となるのは強風時における係留高度の低下である.

ここで風を用いた気球の浮遊安定性改善 (係留高度保持) 法について述べる.

第 3 図に示すような気球の抗力係数を一定 (気球の傾き無し) として簡略化した風-気球モデル (以下, モデル A と呼ぶ) を考える. 気球の余剰浮力を B , 抗力を D_B , 風の揚力を L_K とし, 係留地点から風までの距離を l_1 , 風から気球までの距離を l_2 とすると, $l_1 \gg l_2$ のとき, 気球の係留角度 θ (地上の係留点と気球を結ぶ線が水平面となす角) は以下のように表される.

$$\theta \approx \tan^{-1} \left(\frac{B + L_K}{D_B} \right) \quad (2)$$

風は無風状態において, 気球に対する重りとして働くが, 風を受けたときには揚力を発生するため, 気球だけを係留した場合に比べて高度が高く保たれる. このように, 必要とされるときに機械的に係留高度を高く保つ効果をもたらすことができる, という点がこの手法の特徴である.

気球に取り付ける風は, 市販されている風 (翼長 1150 mm, 全高 600 mm) から形状を決定しており, 第 4 図に示すのはその特性を調べた結果である. 寸法の決定に際しては, 風速 20 m/s の風を受けたときでも気球の係留角度を 60 度程度に保つことができるような揚力を発生する, という条件を与えた. 風の揚力係数として, 第 4 図での迎角 30 度における平均値を仮に用いて揚力を見積もると, 必要な寸法は翼長が 2300 mm, 全高は 1200 mm となった (第 5 図). この風を気球に取り付けた様子を第 6 図に示す. この風の材料にはポリエチレンフィルムを用いている.

(2) 式には風による抗力と重力が含まれていないが, 抗力については, 風の飛揚試験を行った結果から, 風速が大きく風が定常状態にあると見なせるときの抗力が気球の抗力に対して 1 割程度と小さいことが分かり, 重力についても, 風速が非常に小さい場合を除いて, 風の揚力を含めた気球の全浮上力の 1 割以下と小さかったため, それぞれ無

第3図 簡略化した帆-気球モデル（モデル A）

第4図 帆の性能曲線

第5図 帆の形状寸法

視したことによるものである。

4. 浮遊安定性の改善効果

帆の効果を調べるために、係留した気球の動きをビデオカメラで録画し、その軌跡を帆の有無によって比較するという手法をとった。実験に用いた気球と帆については前述の通りであり、帆は第7図に示すような形で気球に取り付けている。座標軸はビデオカメラを気球に向けた軸を z 軸、 yz 平面が係留時の風の主流方向と平行になるように y 軸を定めた。

4.1 帆の有無による軌跡の比較 同気象条件（同時刻）の下で、帆を取り付けた気球と帆を取り付けていない気球を係留し、帆の効果を調べた結果について述べる。このと

第6図 気球に取り付けた帆

第7図 帆の取り付け方法と座標軸

きの係留時間は10分、係留系長は200mで、帆は気球の中心から3.2m下方に取り付けた。

第8図と第9図はこの実験により得られた2つの気球の軌跡であり、これらの図では係留中の気球の平均位置を原点に取っている。第1表には平均点からの距離の分散を示す。分散は x 方向について1割程度大きくなったものの、 y 方向については帆を付けていない場合の約1/4となった。

ここで、方向により値に差が出た理由を考察する。係留系のたわみを見無視すると、気球は係留系の長さを半径とする球面上を移動し、軌跡図の y 軸方向には主流方向の流れによる気球の移動が現れ、 x 軸方向には主流と直角な向きの流れによる気球の移動が現れる。 z 軸が鉛直上向きの場合（気球の平均位置が鉛直上方にある場合）、気球の高度は原点からの距離によって決まり、高度低下の割合は方向によらないが、鉛直軸と z 軸がある角度をなす場合、その角度が大きくなる（気球の平均高度が低くなる）につれて、気球の高度変化は x 軸よりも y 軸の方向に現れる割合が大きくなる。

第8図と第9図における z 軸の方向も鉛直ではなく、帆を付けた場合に y 軸方向の距離の分散が小さくなったのは、帆によって気球の高度変化が抑制されたことの現れであると言える。一方、 x 軸方向に関して距離の分散が大きくなっ

第 8 図 気球の軌跡 (風無し)

第 9 図 気球の軌跡 (風有り)

第 1 表 風の有無による距離の分散の比較

	風有り	風無し
x 方向距離の分散 (m^2)	420.3	378.6
y 方向距離の分散 (m^2)	66.5	270.4
距離の分散 (m^2)	119.2	118.0

たのは気球と風の相互作用によるものであろう。ビデオ画像によると、風向が変化したとき、まず気球が風下側に移動し始め、それに引かれる形で風が移動するように見える。そのとき相対的な風向の変化に対して風が過大応答するために主流と直角方向の変動が増加しているようである。

結果として距離の分散は風を付けた方が大きい値となったが、気球の定高度保持という観点から見ると、風の影響が確認されたと言える。

4.2 風の有無による係留角度の比較 第 7 図のように風を取り付けると、風の迎角は係留系の傾きによって拘束され、場合によっては風の効率が下がってしまうことが考えられた。そこで、係留系が風の骨を貫通している部分をスリット状に加工することで、迎角に変化を持たせられるようにした。このスリットにより迎角は 10.3° (増加方向に 1.7° 度, 減少方向に 8.6° 度) の変化が可能である。これは特に、気球の高度が低下したときでも迎角を小さく保ち、風が失速状態になるのを防ごうとするものである。

この風を用いて同気象条件の下で気球の係留を行い、それぞれの気球の係留系と水平面がなす角を測定した。測定

第 10 図 係留系の形状と係留角度との差異

第 11 図 風の有無による係留角度の比較

第 12 図 気球の揚力を加味した風-気球モデル (モデル B)

したこの角度は係留系に働く抗力と重力によってたわみが生じるため、実際の係留角度との間には差が生ずる。そこで係留系の形状を数値計算によって求め、それらの角度の差異を調べた。

係留系に働く力として、張力、重力、抗力の 3 つを考え、係留角度が 60° 、風速が 4.0 m/s とした場合の系の形状を第 10 図に示した。系の張力はそのときの気球の浮力、揚力、抗力から 26.5 N と与え、系の抗力係数としては (長さ/直径) の比が無限大の円柱に対する値 $1.20^{3)}$ を用いた。これによると、係留系の角度と気球の係留角度の間には約 4° の差があることが分かる。

これを元の実験時の気球の係留角度を見積もり、プロットしたものが第 11 図である。この図には同時に、第 12 図

に示すような気球の抗力係数の変化と気球の揚力 L_B を加味した風-気球モデル (以下、モデル B と呼ぶ) を用いて、いくつかの場合について計算した係留角度もプロットしている。これはモデル B において気球の係留角度と風および気球に働く力の関係から得られる。

$$f(u, \theta, \beta) = \tan \theta - \frac{B + L_K(u, \theta) + L_B(u, \beta)}{D_B(u, \beta)} = 0 \quad (3)$$

を解くことによって求められる。

第 12 図で示したように、風と気球はそれぞれ異なった迎角を取ることができ、気球の迎角は風速によって決まるため、(3) 式を解く際には、そのときの風速から気球の迎角 ($\pi/2 - \beta$) を算出し、前もって L_B と D_B を求めておくことが必要である。実験時の風速については風を取り付けていない気球の係留角度から算出し、4.1 m/s から 6.1 m/s という値を得た。

第 11 図では実験から得た値は黒、計算により得た値は白で表している。実験から得た値は、黒の四角が風を付けた場合の気球の係留角度、黒丸が風を付けていない気球の係留角度である。これらを比較すると風を付けた気球の方が常に高い角度にあり、風の効果が現れていると言える。

次に計算から得た値についてであるが、白の四角で表される点はモデル B を用いて計算した係留角度である。モデル B においても風の抗力を考慮していないが、その点に対応する実験値 (黒の四角点) と良く合致していることから風の抗力の影響は小さいことが分かる。気球の抗力と比較して風の抗力は小さいと考え、無視するとした仮定の妥当性が確認されたと言える。

上向きの三角で表される点はモデル B で気球の傾きが無いとした場合 (モデル A とは風の揚力係数を定数としていた点が異なる) であり、気球の抗力が小さい一方、気球による揚力は発生しない。この点と白い四角点の差は気球が傾くことによる抗力増加と揚力発生効果が合わさって生じたものであると考えられる。

この抗力増加による影響が上三角点の値とモデル B から気球の揚力のみを除去したとして計算された下三角点の値の差として表れており、この点と白い四角点の値の差は気球による揚力の効果であると見ることができる。

そして、この白い四角点と黒丸点の差が風による揚力の効果によるものであると言える。これによると、気球が発生する揚力の効果は風の揚力と比べても大きいことが分かる。しかし、風の寸法を決定した際には気球の揚力発生や抗力増加を考慮していないモデル A を用いていたため、モデル B を用いて風の翼面積の再検討を行った。第 13 図に示すのは (3) 式より求めた、翼面積を変化させたときの風速と係留角度の関係である。

図中の n は翼面積が翼長 2300 mm の風の n 倍であること (風の数) を示す。図中に不連続な段差がいくつか見られるが、これは気球または風の迎角が増加し、失速状態になって、得られる揚力が減少したために生じたものである。

第 13 図 数値計算による風の数と気球の係留角度の関係

第 14 図 風の数による係留角度の比較

ここで、風の数にかかわらず風速 8.5 m/s 付近で段差が見られるのは、前述のように風速によって気球の迎角が決まり、その角度が失速角となる風速が約 8.5 m/s であるからである。また係留角度で見て 60° 付近に見られる段差は風の失速によるものである。

これより、風速 20 m/s という条件の下で気球の係留角度を 60° 以上に保つには、4 倍の翼面積が必要になることが分かった。また、破線で示したのはモデル B で気球が傾かないとした場合 (第 11 図での上三角点に相当) であるが、気球の傾きを抑えることも係留角度を保つには効果があることが分かる。

4.3 風の増加による効果 風の翼面積を 4 倍にするとその翼長は 4.6 m になり、製作や使用が困難になると考えられたため、風の数を増やすことで対処することにした。複数の風を用いても期待される効果が得られるか調べるために、2 つの風を取り付けた気球の係留実験を行った。風は気球の中心から 3.2 m 下方と 6.4 m 下方にそれぞれ 1 つずつ取り付けてあり、両方の風の骨にスリット加工が施されている。軌跡と係留角度を比較するため、風を 1 つ付けた気球の係留も同時に行い、係留糸長を 200 m として 70 秒間に渡って気球の軌跡を記録した。

第 14 図はその軌跡から求めた 2 つの気球の係留角度を示したもので、このときの風速は係留角度より 8 m/s 程度であったと考えられる。風が 2 つの場合の係留角度は風が 1 つの場合よりも小さくなっており、風を増やした効果が現れているとは言えない。地上からの観察によっても、風

第 15 図 DGPS による気球の水平位置

が 1 つの場合の動きは比較的安定していたのに対し、風が 2 つの場合には回転や上昇・下降を繰り返す不安定な状態が確認された。これは、このときの風速が第 13 図において係留角度が不連続になる値付近であったことと、風にかかる張力の向きと大きさが他の風の影響を受けてそれぞれ変化したためであると考えられる。風を複数用いて期待された効果を得るには、風の取り付け方法を工夫し、相互に影響を与えないような構造にすることが必要である。

5. 気球の位置の計測

小型係留気球を用いた計測例として、風を 1 つ付けた気球に DGPS (Differential Global Positioning System) を搭載して計測した気球の水平位置を第 15 図に、気球の高度を第 16 図に示す。

第 15 図において計測開始直後に気球が上昇しているときの軌跡から、高度によって風向が異なっていることが分かる。これは係留地点が河川敷であったことから、河川や

第 16 図 DGPS による気球の高度

地形の影響を受けているためであると考えられる。また第 16 図では、計測開始から約 600 秒後に高度が下がっていることより、そのときに風が強くなったことが分かる。

6. ま と め

以上、小型係留気球の浮遊安定性を改善するために風の揚力を利用することを提案し、実験によってその有効性を確認した。主流方向と直角な流れに起因する動きを抑制するためには別の手法を考える必要があるが、風の面積を増やし、気球の傾きを抑えるような機構と組み合わせることで、局地気象観測の実用に十分な浮遊安定性を得られるであろうと考える。

参 考 文 献

- 1) 日本気象協会：気象データひまわり CD-ROM99，丸善，東京，1998.
- 2) 日本気象協会：気象データひまわり CD-ROM2000，丸善，東京，1999.
- 3) 中山泰喜：流体の力学，養賢堂，東京，1998.