

高高度ゴム気球の上昇速度

美濃英俊(山梨大学大学院 総合研究部)、瀬川典久(京都産業大学大学院 先端情報学研究科)、
 矢澤正人(株式会社 数理設計研究所)、花田隆貴(kikyu.org)、
 秋山演亮(千葉工業大学 惑星探査研究センター)

Ascending Speed of High Altitude Gum Balloons

Hidetoshi Mino (University of Yamanashi), Norihisa Segawa (Kyoto Sangyo University),
 Masato Yazawa (Mathematical Assist Design Laboratory), Takaki Hanada (kikyu.org),
 Hiroaki Akiyama (Chiba Institute of Technology)

1. 研究目的

気象観測などの手段として広く使われているゴム気球は上昇とともに膨張することで浮力を維持し、膨張限界で破裂するまで比較的一定の速度で上昇する性質を持っている。このような飛行パターンは気象観測にとっては好ましいものであるが、滞空時間を確保したい目的には適しておらず、そのような場合には膨張しないポリエチレンなどの気球が適している。しかしながら、気球のコストや運用のしやすさという点では、ゴム気球にはなおメリットがあり、ゴム気球の滞空時間を延ばし、観測やサンプル収集、通信中継などを実現することには一定の実用価値があると考えられる。本研究では、ゴム気球が高高度で滞留する現象に焦点を当て、その発生メカニズムについて考察し、ゴム気球の長時間滞留運用の可能性を探ることにある。

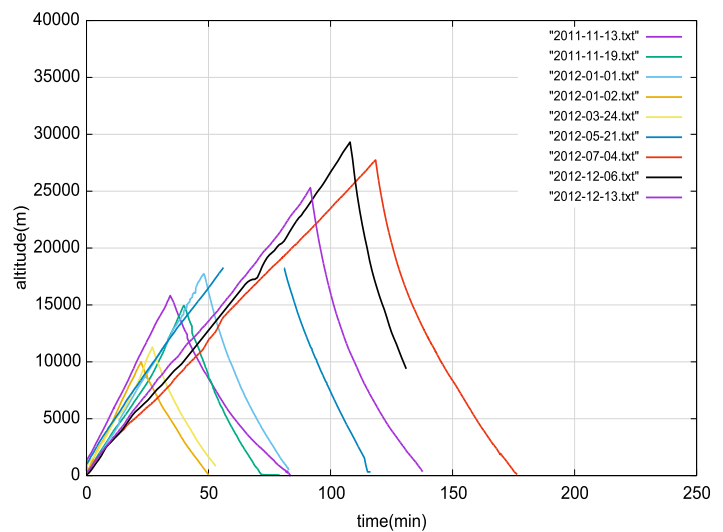


図 1 時間-高度 2011, 2012

2. ゴム気球の滞留現象

ゴム気球は通常滞留せず、上昇し続けた上で破裂する。図 1~4 はこれまで我々が飛行実験を行なったゴム気球の上昇運動をグラフにしたもので、横軸は放球後の時間(分)、縦軸が高度(m)である。図 1~3 には 2011 年から 2015 年に日本国内で行なった実験の結果が示されているが、上昇速度に様々な変化はあるものの、変化の割合は小さく、高高度で滞留することなく破裂していることがわかる。我々の実験では気球ガスとしてヘリウムを用いているが、水素を用いている気象庁のラジオゾンに

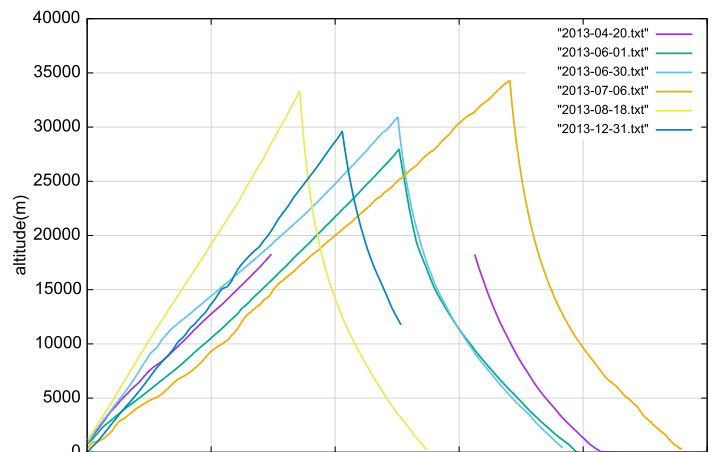


図 2 時間-高度 2013

も同様な振る舞いが見られる。

一方、図4には2016年と2017年にモンゴルで行なった気球の時間-高度グラフを示した。3回に渡り高高度における滞留現象が観測された。滞留現象は気球の上昇速度が低く(正味浮力が小さく)、到達高度が高い場合に生じていると言える。

気球の運用において上昇速度を遅くすることは、水平方向の漂流距離が伸びることにつながるため、国土が狭く、着地点の制限が強い日本国内では歓迎されない。滞留現象がモンゴルで発見されたことは、着地点の制約が少ないモンゴルの実験条件と無縁ではないと考えられる。

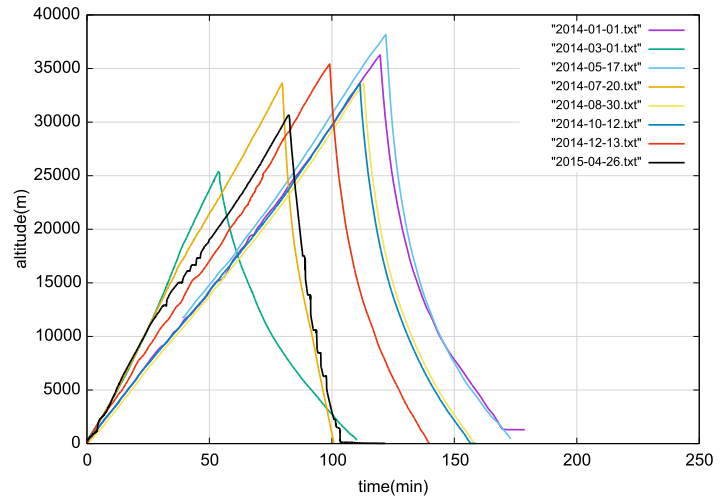


図3 時間-高度 2014, 2015

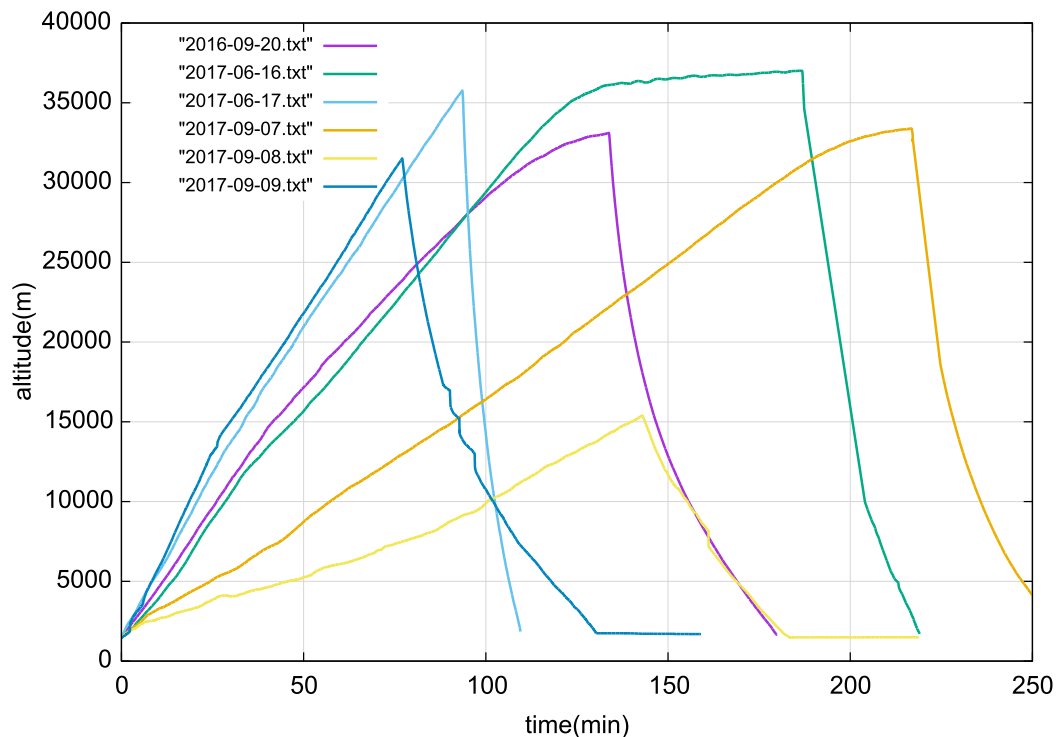


図4 時間-高度グラフ 2016, 2017 (モンゴル)

3. 気球の上昇速度モデル

本講演では、ゴム気球の滞留現象を説明するモデルを提案するが、当面の作業仮説として以下を仮定する。

- (1) 大気、気球内ガスはともに理想気体とみなす。
- (2) 気球が受ける空気抵抗は大気密度と気球断面積に比例し、上昇速度の2乗に比例する。
- (3) 高度ごとの大気の温度としては平均的な観測値(理科年表など)を採用する。
- (4) 気球は相似形で膨張する。

以上の仮定のもと、もっとも素朴な上昇速度モデルは気球内外の温度差と気圧差を共にゼロと仮定するものである。

A) 温度差・圧力差なしモデル (no-dT-no-dP)

この仮定のもとでは、気球の浮力は気球内ガスのモル数と、ガス分子と大気分子の平均分子量だけで決定され、飛行中一定となる。一方でそれに釣り合うべき空気抵抗は大気密度の減少とその 2/3 乗に反比例する気球断面積の増大によって決定し、上昇速度は空気密度の 1/6 乗に反比例して増大する。この増大は緩やかではあるが、大気圧と高度 30km 程度の上空との間で無視できるものではなく、現実の気球はこのモデルには従っていないと言える。図に典型的な実測値と地表付近での上昇速度を調整したモデルの結果を示した。

B) (温度差なし)圧力差一定モデル (const-dP)

ゴム気球内のガスの圧力は当然ながらゴムの収縮力によって外圧よりは高くなっている。この圧力差は地上でゴム気球を大気により膨らませて測定すると数 hPa 程度であることがわかるが、高度 30km を超える高度ではその程度の圧力差も無視できなくなる。圧力差を考慮するもっとも簡単なモデルとして、飛行中気球の内外圧力差を一定するモデルを圧力差一定モデルとする。温度差はないものとする。

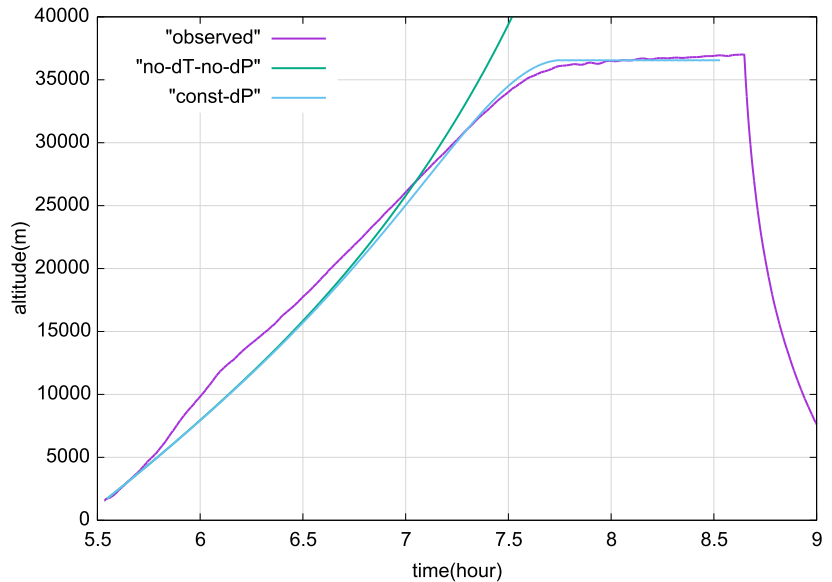


図 5 圧力差一定 モデル

C) 熱緩和モデル (thermal-relax)

B) の圧力差に加えて、気球内外の温度差も考慮するモデルである。飛行中の気球を通じた熱の出入りは複雑な現象であるが、ここでは、気球内温度は内外温度差と気球表面積に比例する速度で緩和するものと仮定する。すなわち温度変化を以下の式で計算する。

$$dT_{in} \propto (T_{out} - T_{in}) r^2 dt$$

4. モデルの比較、検討

図 5 と図 6 に典型的な滞留現象の実測値と 3 つのモデルの未定パラメータを任意に調節した場合の比較を示した。圧力差一定モデルは高高度における滞留現象を定性的には説明しうることがわかる。熱緩和モデルにすることでさらに現実データをより良く説明する可能性もうかがわれるが、今後の定量的な評価が必要である。

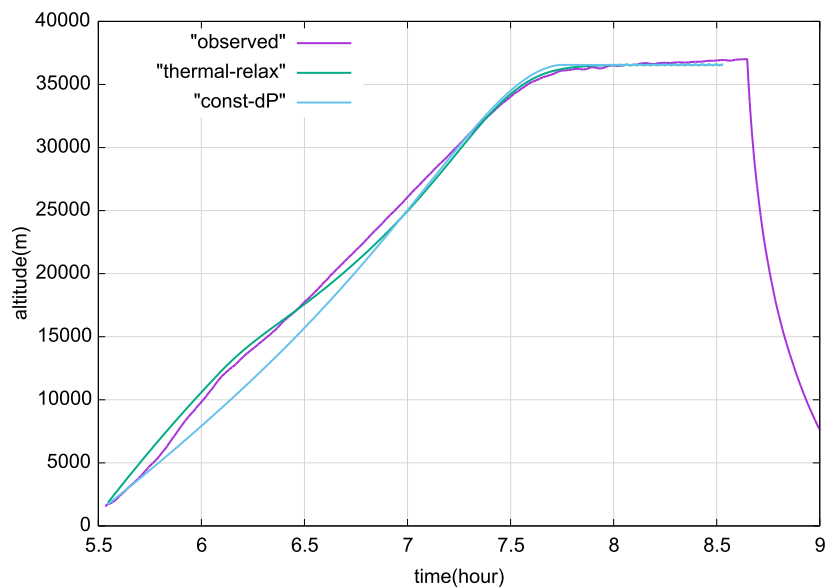


図 6 熱緩和 モデル

5. 温度差、圧力差の実測実験

モデルの妥当性を検討するために、気球内外の温度差、圧力差を実測する実験を行なった。図7のような小型無線センサーをゴム気球内部に入れ、同機種のセンサーで外部にも配置して圧力差を測定する。センサーは温度も測定できるが、日光を遮蔽していないなど、信頼できる温度を測定できる構成にはなっていない。

図8に結果のグラフを示す。今回はデータの記録システムにプログラムミスがあったため、十分な分解能のデータが記録できず、内外の圧力差を正しく評価するにはいたらなかった。

しかし、実際の圧力データは時間帯(高度)によってかなり大きな圧力差を示している。この現象の理解については今後の追実験と検討を要する。

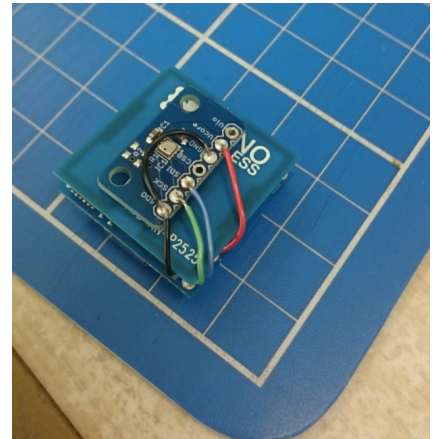


図 7 気球内無線センサ

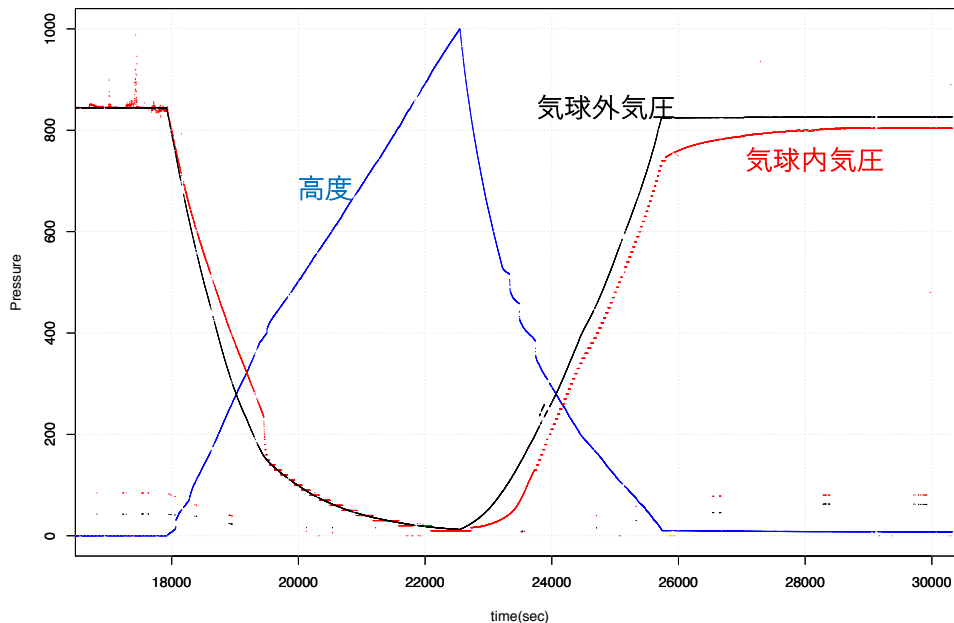


図 8 気球内外の気圧差

6. 今後の予定、課題

圧力差を実測する実験を今年中に予定している。より精密な圧力差を測定するために差圧計を用いる他、温度差についても意味のある測定を行い、モデルの精密化を行う。

なお、高高度における滞留現象の他にも、成層圏下部で、上昇速度が低下する現象がしばしば見られる。この原因の特定についても今後の課題としたい。

参考文献

[1]矢島信之 他「気球工学」ISBN 978-4-339-01226-2、コロナ社 (2004)