

長時間観測に向けたタンデム係留気球の可能性について

秋田大輔（東工大）

1. はじめに

現状での成層圏気球の主な課題に、飛行時間の短さと放球ウィンドウの狭さがあげられる。飛行時間は、気球が飛行可能な実験区域が決められていることや、地上局とのテレメトリリンク受信限界、回収の現実性などから、主に飛行距離によって制限される。近い将来、スーパープレッシャー気球が開発されたとしても、同様な理由で、長時間飛行するためには、飛行軌道を制御する新しい技術の開発が必要であろう。これらによって、気球の飛行には厳しい風の条件がかせられ放球ウィンドウが狭くなっている。また、飛行時間が長くなると、放球ウィンドウはさらに狭くなることが予想される。

上記の課題に対し、シンプルな打開策として係留気球が考えられる。係留気球は、飛行距離を制限できるため、長時間飛行が可能であり、要求される風条件の緩和によって放球ウィンドウが広がる。また、大気観測などの定点観測が可能であり、地上局とのテレメトリリンクも容易で、観測器の回収位置を前もって限定することでスムーズかつ安全な回収にもつながる。しかし、係留気球を実現するためには、気球を地上に係留した状態でジェット気流を通過しなければならないうえ、保安のために広大な実験区域を確保する必要がある^{1,2,3}。そこで筆者はこれらの課題を克服するため、これまでに海上係留気球⁴の可能性について検討してきた。

海上係留気球では、係留ロープをリールに巻き、それを気球に吊り下げた状態で通常の気球と同様に放球する。水平浮遊高度でリールからロープとその先端に付いたパラシュートを自重で降下させる。逆さまに取り付けられたパラシュート部分が海面まで到達し海中に沈むことで、気球が浮遊高度の風に流されることに対抗して、ロープを介して水平方向の力のつり合いをとり、気球の移動を抑える。この状態で観測を開始し、観測終了後は適切な長さでロープを切断した後、通常の手順でフライトを終了する。海上係留気球は、係留された状態でジェット気流を通過する必要がなく、海上のため比較的 safely 実験が可能で、ロープの展開と切断以外は通常の気球と同様の運用方法であり、地上に特別な設備も必要ない。また、海上で係留した後、ロープを船に付け替えることでシステム全体を移動させることも可能かもしれない。しかし、海上係留気球はこのような利点があるものの、他の係留気球と同様に、ロープの比強度に限界があることから、到達可能な高度が低く、ペイロードの重量とロープの安全率を十分に確保することが難しい。そこで、本研究では海上係留気球の実現性をタンデム型にすることでさらに高めることを検討する。

2. タンデム係留気球

図1に、タンデム係留気球の飛行シナリオを示す。タンデム係留気球では、2つの気球それぞれに係留ロープを搭載し、上記の海上係留気球と同様に放球する。下の気球の浮遊高度付近で、下の気球に搭載したロープとパラシュートを自重で降下させ、同時に、上の気球に搭載したロープも上の気球の浮力で展開する。この時、下のロープの張力は下の気球に、上のロープの張力は上の気球にかかるため、ロープの張力を上下の気球に分担させることができる。下のロープとパラシュートが海面まで到達し、上の気球が浮遊高度もしくはロープ長の限界高度まで到達して、係留状態を実現する。観測終了後は、上下のロープを切断したのち、通常の気球と同様の方法で飛行を終了する。

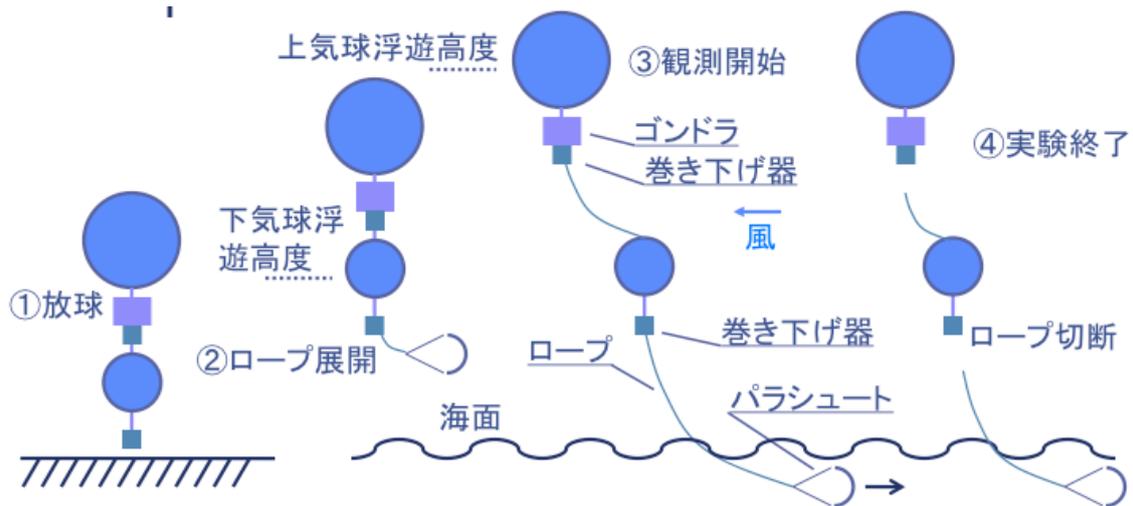


図1 タンデム係留気球の飛行シナリオ

3. 実現性の検討

3.1 条件

ロープ材は高比強度のダイニーマ^{®5,6}を仮定する．気球は球形のスーパープレッシャー気球と仮定し，気球と海中に沈めるパラシュートの抵抗係数はそれぞれ 0.1 と 1.0，パラシュートの展開直径は 4 m と仮定する．上の気球の直径は 80 m，重量は PB300-17 をもとに 1100 kg，ノミナル高度は 36 km と仮定した．ロープの抵抗係数は 1.2，ヤング率は 30 GPa，ポアソン比は 0.35 とした．

風モデルは，図 2 に示すような，三陸沖の 7 月のデータ⁸を使用した．このモデルは，ジェット気流が弱く，ジェット気流と逆向きに吹く高層風が強い季節に相当する．これは，過去の検討で，ジェット気流が強い時期の条件では，ロープが海面まで到達しないことが分かっていた⁴ことと，気球高度の風速が速いため，実現性を検討する上でより厳しい条件であるためである．風向きは東西方向の 2 次元面内のみを考える．

3.2 簡易解析

図 3 に文献 4 の簡易解析方法により求めたペイロー積載可能重量とロープの安全率を示す．初期高度は 36 km，下の気球は高度 25 km と仮定した．白いプロットが単独気球の場合，黒いプロットがタンデム気球の場合の上の気球を示している．タンデム気球の場合の上の気球については，下の気球高度である 25 km に海面があると仮定して単独気球の場合と同様に見積もっている．直径 80 m 程度の気球の場合，単独係留気球では直径 4 mm のロープでしか実現性はなく，それより太いロープではペイロードが搭載できず，それより細いロープでは強度が足りない．一方，タンデム係留気球の場合，同じ大きさの気球でも，より太いロープが使用可能になり，ロープの安全率とペイロードの増加が期待できる．ただし，タンデム係留気球の場合，上の気球よりも下の気球により強いロープ張力が発生する可能性があるため，図 3 のロープ安全率は必ずしもロープ全体の安全率ではない．

3.3 静的シミュレーション

図 4 に，文献 4 の静的シミュレーションにより求めた単独気球の場合のロープ形状と張力分布を示す．図 3 中の気球直径 80 m，ロープ直径 4 mm，ロープ総重量 349 kg，

パイロード重量 104 kg の場合であり、ロープ最大張力は 5.5 kN で安全率は 1.35 程度と簡易解析に近い値となっている。

図 5 に、タンDEM気球の場合の結果を示す。下の気球の初期高度は 25 km、直径は 30 m で、ロープ直径 5 mm、ロープ総重量 558 kg、パイロード重量 267 kg の場合である。この場合、下の気球位置でロープ張力が最大となっている。これは、下のロープ張力がほぼ下の気球によって支えられているため、この場合の下の気球位置でのロープ張力は、下のロープ張力に上の気球により発生する上のロープ張力が加わっているためである。最大張力は 5.87 kN だが、太いロープを使用できているために、安全率は 2.04 に向上している。

次に、下の気球を小さくした場合を考える。図 6 は、図 5 から、下の気球の直径のみを 20 m に小さくした場合である。図 5 と比べると、下のロープ張力の一部を上気球に分担させることで張力分布が均され、最大張力位置は上の気球部分に移っている。その結果、最大張力は 5.06 kN で安全率は 2.36 まで向上している。

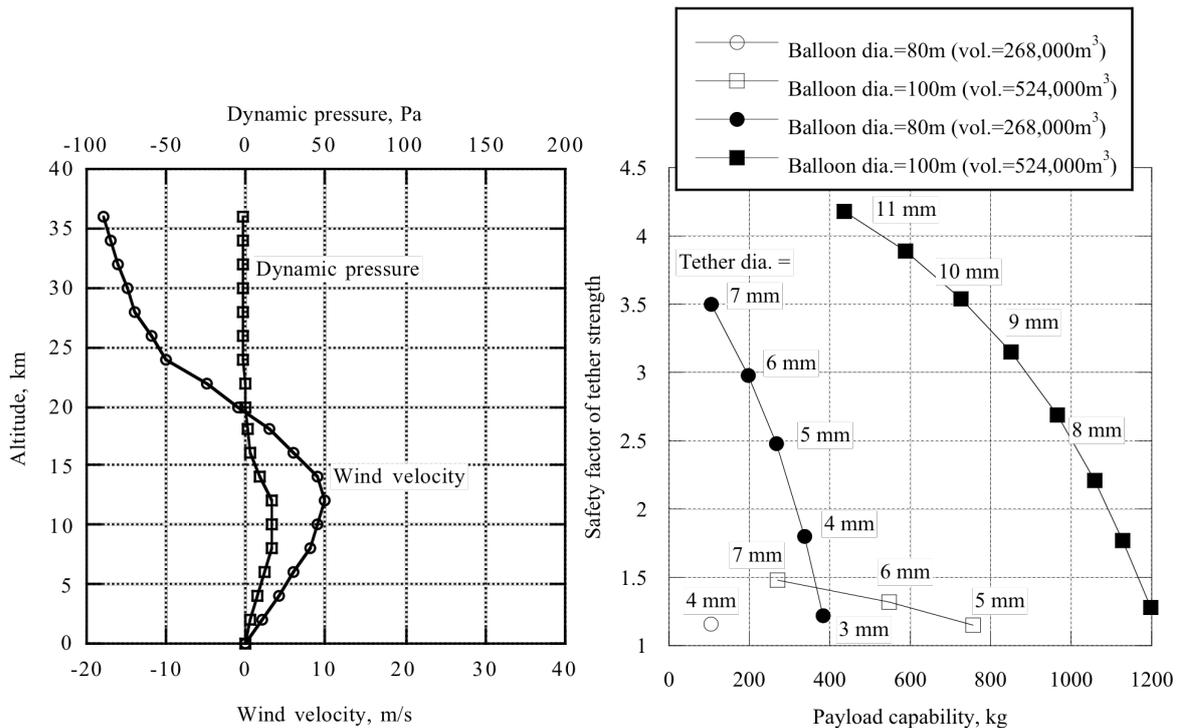


図 2 風モデル

図 3 ノミナル高度 36 km の気球の簡易解析

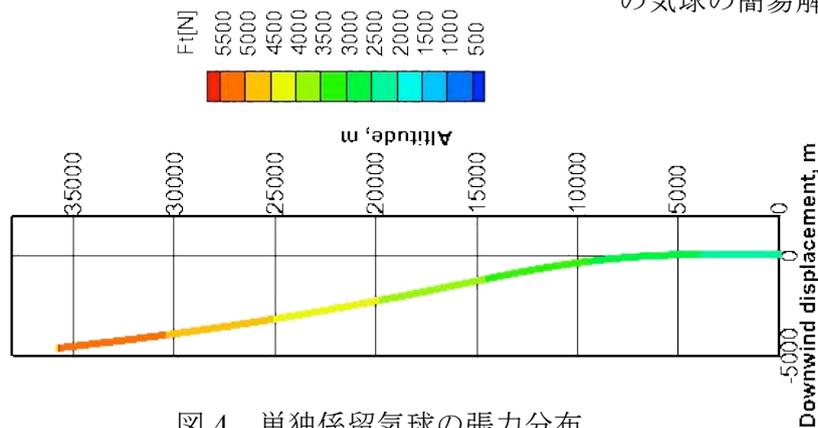


図 4 単独係留気球の張力分布

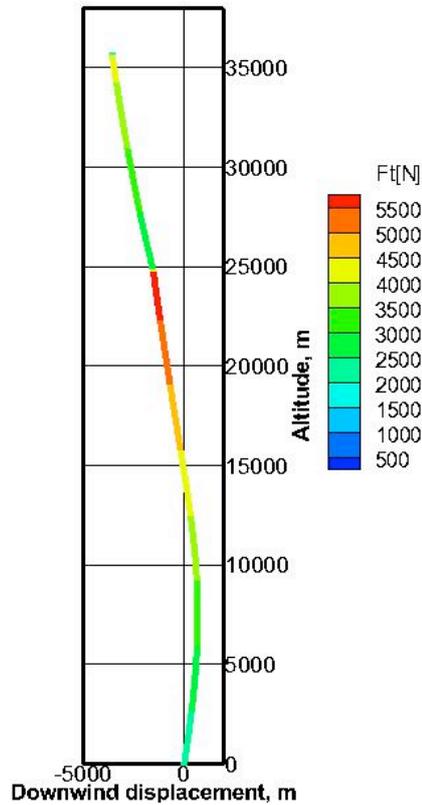


図5 タンデム係留気球の張力分布
(下の気球直径 30 m の場合)

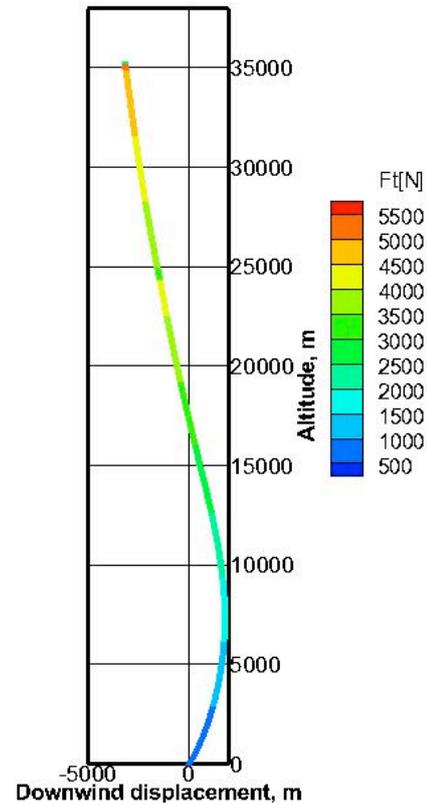


図6 タンデム係留気球の張力分布
(下の気球直径 20 m の場合)

5. まとめ

長時間飛行や放球ウィンドウの拡大に向け、タンデム気球により、高高度係留気球の実現性を高める可能性について検討した。今後の課題は、パラメータの最適化と、飛行シナリオや長時間飛行することを考慮した実現性の検討である。

参考文献

1. Badesha, S., Euler, A., Schroeder, L. Very high altitude tethered balloon trajectory simulation. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, AIAA 96-3440, 1996.
2. Euler, A., Badesha, S., Schroeder, L. Very high altitude tethered balloon feasibility study. AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology Conference, AIAA 95-1612, 1995.
3. Grant, D., Rand, J. Dynamic analysis of an ascending high altitude tethered balloon. Aerospace Science Meeting and Exhibit, 34th, AIAA 96-578, 1996.
4. Daisuke Akita, "Feasibility study of a sea-anchored stratospheric balloon for long-duration flights", Advances in Space Research, 50 (2012), pp. 508-515.
5. エースライン D スペックシート, 東京製鋼繊維ロープ株式会社.
6. <http://www.toyobo.co.jp/seihin/dn/dyneema/>
7. 井筒直樹 他, "スーパープレッシャー気球の開発と試験", JAXA-RR-07-009, 2008.
8. "Balloon manual 2005", 大気球観測センター, JAXA/ISAS, 2005.