

ダイナミクスシミュレータの構築を目指した

気球系ダイナミクス特性の測定

莊司泰弘, 坂東信尚, 福家英之 (ISAS/JAXA)

1. はじめに

成層圏を超えて飛翔する大型気球の用途として、気球望遠鏡による天体観測は高層気球の歴史の初期から実施されてきた[1-4]. 大気が希薄な気球の飛翔環境は、地上では観測が困難な波長帯の観測ができるほか、大気擾乱が少ないため、理論的には非常に解像度の高い光学観測が可能である[5,6]. 高解像度光学観測をするためには、対象天体へのポインティングが重要であり、ポインティング制御のベースとなるゴンドラの姿勢制御は、様々な気球望遠鏡に共通する重要技術である。これまでこのような気球望遠鏡のゴンドラ姿勢制御は、各ユーザの責任で開発され、実施されてきた。ゴンドラ姿勢制御に対する要求はミッションにより様々であり、ゴンドラ姿勢の計測も、測定レンジ、精度、測定項目においてまちまちであった。また、フライト中のゴンドラ挙動や加速度の計測を行ったものの、公開されない場合もある。そのため気球望遠鏡自体は古くからあるにもかかわらず、ゴンドラの姿勢運動を系統的に理解できるようなデータは蓄積されていない。ゆえに新しいゴンドラや姿勢制御系を構築する際に、設計の妥当性をフライト前に定量的に検証することが困難である。

本発表では、これらの気球ゴンドラの姿勢制御に関する基礎的な諸問題を解決するため、気球、荷姿、ゴンドラを含めた、トータルでの気球系ダイナミクスの特性を測定する手法を開発し、平成24年度以降の大気球実験において実施することを提案する。

2. 実験の概要

2.1 実験の目的

本研究では、気球系ダイナミクスをシミュレーションにより再現し、ゴンドラの姿勢制御系設計を定量的なデータに基づいて行えるだけの理解を得ることを目的に、以下の目標を設定する。

- ・気球本体の運動、および荷姿のダイナミクス特性をフライト中に測定する方法を開発する
- ・様々な条件下における気球、荷姿、ゴンドラの挙動を測定する
- ・気球系のダイナミクス特性を推定する

2.2 気球系のダイナミクスモデル

ここで想定する気球系のダイナミクスモデルについて述べる。気球系は、気球の浮力中心を支点に吊り下げられている物体と見なし、気球を形状が時間変化する剛体、ゴンドラを重量が時間変化する剛体と見なす。そのためゴンドラの姿勢は3軸周りの回転運動が検討対象となる。気球とゴンドラを接続する荷姿は、ゴンドラ鉛直軸周りの回転運動を考えると粘弾性体とみなす。また水平方向の2軸周りの回転運動を考えると剛体または弾性体と見なす。

アジマス方向の運動

まず、鉛直軸周りの回転運動、すなわちアジマス方向の運動について考える。飛翔運用される荷姿には、その構成によって「1本吊りタイプ」と「ラダータイプ」の2種類がある(図1,2)。

1本吊りタイプは、気球尾部からゴンドラまで1本の吊り紐によって接続されていると見なすことができる。実際には放球作業の都合でいくつかに分解可能であり、個々の部分はシャックルで接続される。パラシュートには吊り紐が貫通しており、吊り紐に対してパラシュート頭部と尾部で固定される。このときパラシュートの張索には余長が与えられるので、気球の飛翔中パラシュートは吊り紐に沿って垂れ下がり、運動には影響しない。

ラダータイプは、ゴンドラを平行に並ぶ2本の吊り紐で気球と接続する。2本の吊り紐間隔は、梯子のように棒によって固定されており、ねじれたときも吊り紐間隔を維持するようになっている。吊り紐の間隔は340mm程度、棒の間隔は2m程度である。ラダー部のねじれバネ定数 k はロープにかかる引張力とロープの

間隔によりほぼ一意に定まる。パラシュートは、頭部と尾部をラダー部と同じ間隔で固定され、張索が吊り下げ荷重を支える。そのためパラシュート部は棒の間隔が大きなラダーと見なすことができる。パラシュート頭部はシャックルにより 1 本吊り部に接続され、1 本吊り部の他端は気球尾部に接続される。よってラダータイプの荷姿は、上から順に 1 本吊り部、棒間隔の大きなラダー部、棒間隔の小さなラダー部に分けられる。以上 1 本吊りタイプ、ラダータイプのいずれにおいても、ばね定数 k 、粘性係数 ζ の異なる粘弾性体と見なすことができる。

エレベーション、クロスエレベーション方向の運動

水平方向の 2 軸周りの回転運動（エレベーション、クロスエレベーション方向の運動）は、気球の浮力中心を支点とする振り子運動である。厳密には、気球系は気球、荷姿、ゴンドラに少なくとも分けられる二重あるいは三重振り子と見なすことができ、さらにラダータイプの荷姿では荷姿を「異方性を持つ粘弾性体」と見なすことができる。しかし、実際のフライトにおける振り運動の角度振幅が、せいぜい数度程度であることから、重振り子と荷姿力学特性の異方性は無視し、単振り子として扱う。

姿勢擾乱の要因

気球系の運動を起こす要因として、以下のものが考えられる。

- ・ 気球周囲の風が気球を回転させるトルク
- ・ 気球系の上部と下部でウィンドシアによる慣性力
- ・ ゴンドラ自体の運動に起因する反トルク、反力

気球回転トルクについては、気球の半径がゴンドラと比べて巨大であり、気球表面に風が当たるとき大気が希薄でもモーメントアームが大きくなるため、気球系を回転させるトルクは大きい。特に上昇中はアジマス方向の運動が大きいため、気球への入力トルクも大きいものと考えられる。

ウィンドシアによる慣性力とは、気球系の全長が大きいため上部と下部で異なる方向に風が吹くことがあり、これにより、ゴンドラが気球に対して水平方向に大きな慣性力を受けることを言う。気球固定座標系で考えると、支点を気球の浮力中心とする振り子が振られることになる。

ゴンドラ自体の運動は、ゴンドラが周囲の大気から力を受ける場合と、ゴンドラが姿勢制御をしたときやその他の可動部が動作した際の反力が考えられる。

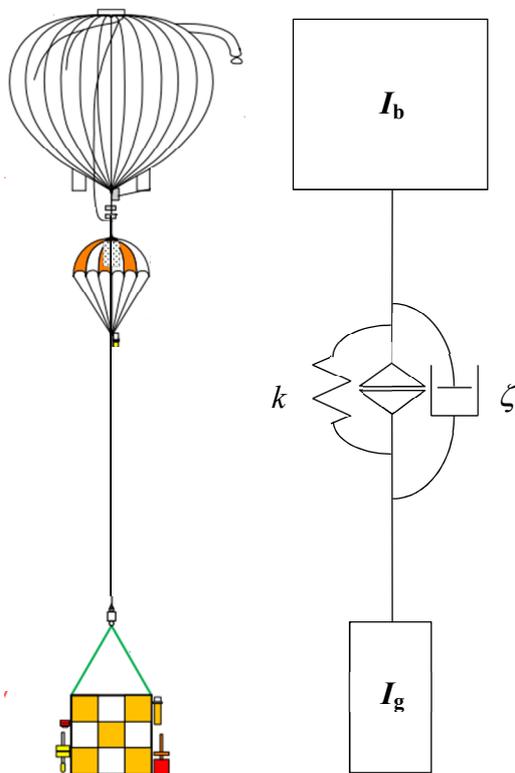


図 1：1 本吊り荷姿の例と等価ダイナミクスモデル

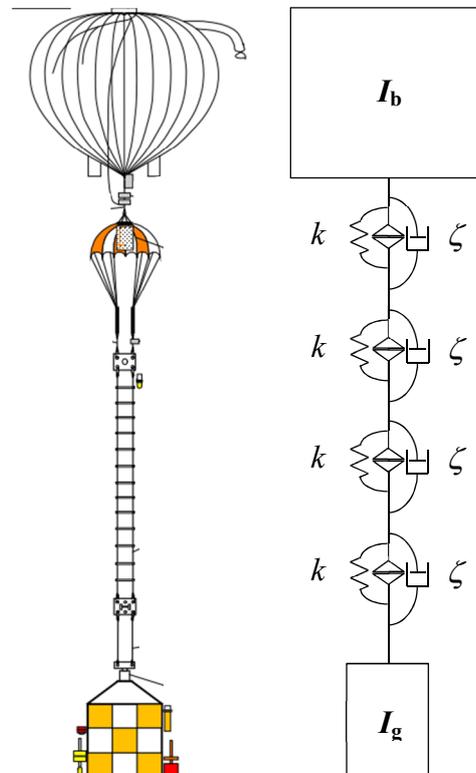


図 2：ラダー荷姿の例と等価ダイナミクスモデル

2.3 モデルパラメータの推定手法

荷姿が 1 本吊りタイプの場合、アジマス方向の運動は、気球の回転トルクと荷姿のねじればね定数および粘性係数が主な検討項目となる。計測対象は回転運動なので、レートジャイロを荷姿の上端と下端に設置する。気球の慣性モーメントは、気圧により形状がほぼ一意に定まるため、そのときの高度がわかれば推定することができる。これと角加速度よりトルクを求める。また荷姿下端の気球に対する相対回転運動を算出することで、振動周期より荷姿のばね定数を求めることができる。あるいは、気球尾部回転振動と荷姿荷担の回転振動の周波数解析により、パラメータを推定することができる。

振子運動については、支点の位置を気球の形状推定より求めることができ、振幅を気球に対する荷姿下端の相対加速度より推定することができる。そこでアジマスと同様に加速度計を荷姿の上端と下端に設置する。

荷姿のパラメータおよびゴンドラの運動は、ゴンドラの重量によって異なりうる。また、荷姿の物性は周囲温度によって変化しうる。そこでゴンドラ重量と周囲環境温度も同時に測定されなければならない。これらのパラメータは常に一定ではない。そこで測定を複数回行いデータを蓄積することで、周囲温度、ゴンドラ重量、荷姿長さなどの関数として、パラメータを定式化することが可能と考えられる。

3. 測定システムの検討

2.3 で示したパラメータの推定手法は、気球系の各所に必要な精度を持った測定器と記録装置を設置することが前提である。近年 MEMS 技術等を応用した慣性センサが多く流通するようになり、非常に小さな体積のセンサで運動を検出できる。このような小型慣性センサを使用することを前提に、測定システムの検討を行った。

3.1 計測箇所／項目

計測項目として、以下の計測点（図 3 参照）、項目を考える。

- | | |
|------------------|----------------------------|
| (1)気球尾部 | 3 軸加速度, 3 軸角速度 |
| (2)パラシュート頭部 | 3 軸角速度 (ラダータイプの荷姿の場合) |
| (3)パラシュートー吊り紐結合部 | 3 軸角速度 (ラダータイプの荷姿の場合) |
| (4)放球リング | 3 軸角速度, 放球リング引張ひずみ |
| (5)ゴンドラー吊り紐結合部 | 3 軸加速度, 3 軸角速度 (ゴンドラに依存する) |

以上の他、各計測点における環境温度を計測する。2.3 で述べたように、荷姿の上端と下端の運動の違いから荷姿部のパラメータを求め、荷姿上端の運動より気球の運動を計測する。ラダータイプの荷姿の場合、荷姿が 3 つに大別されるので、それに合わせて計測箇所を増やす。

3.2 計測・記録

気球実験においては多くの場合、記録装置はゴンドラに置かれる。しかしながらこの実験の場合、荷姿に取り付けるセンサと出力の数が多いため、荷姿各部のセンサからゴンドラまで信号線を這わせることは現実的ではない。そこで各計測点の直近に小型軽量のデータロガーを置き、これにより計測、記録する。ロガーは、少なくとも 4ch の入力を持ち、サンプリングレートは 0.1~1000Hz 程度、記録時間は 12 時間程度、分解能は 10bit 程度以上とする。また外部から計測の制御ができなければならない。具体的な機種選定を現在行っており、ここに述べたようなもので気球飛翔環境に耐えられるものがなければ、マイコンを用いて開発する。

3.3 時刻同期

荷姿各所に取り付けられたロガーは計測中、各々独立して動作する。

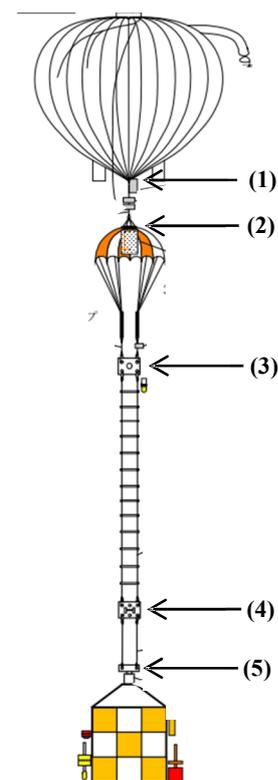


図 3：計測箇所（ラダーの場合）

しかし計測項目によっては複数の計測点での計測結果を時系列に比較する必要があり得るため、計測データに時刻同期が必要である。ロガーに時計を含むカレンダー機能がある場合、ロガーの時計を使って1秒程度の精度で時刻同期できる。荷姿各所の3軸加速度、角速度を計測する場合にはこれで十分であり、荷姿に取り付ける前に同期作業を行える。荷姿へのロガー取り付けから放球まで時間が空き、電池容量に対してロガーの電力消費が問題になる場合、あるいはより正確な時刻同期が必要な場合には、放球当日の放球準備作業内に同期を行う。あらかじめノンフライトアイテムとしてロガーの同期線を用意しておき、ロガーの外部制御端子と接続する。ロガーの電源投入後、同期作業を行い、同期線を取り外す。このような方法により、データの等時性を確保する。

3.4 スケジュール

まず2012年の夏頃に1機ないしは2機の気球に計測システムを取り付けて飛行実験を行うことを目標とする。この実験において、計測システムの飛行運用評価と特性値推定手法の検証を行う。これに向けて2011年12月～2012年1月頃を目標にBBMを製作し、性能試験する。

その後、吊り下げ重量や周囲温度、吊り紐の直径などを考慮した統計的な特性値の推定を行うため、2～3年で計10機程度の気球における実験を計画している。

また、データが取得でき次第随時解析を進め、暫定値としてダイナミクス特性値を公開する。取得された特性値を用いて気球の挙動シミュレータを構築し、シミュレーションを通して様々なゴンドラ設計条件に対する適切な姿勢制御系の設計手法を検討する。

4. まとめ

本発表では、気球系のダイナミクスを定量的に理解するための、荷姿のダイナミクス特性の推定手法について提案した。これによりダイナミクスシミュレータを構築することで、今まで経験に頼ってきたゴンドラの姿勢制御系の設計を定量的に評価できるようになると期待される。これまでに計測に必要なデータロガーの検討と、センサ類の選定を進めてきた。今後測定システムを試作し、来年度の大気球実験で試験フライトができるよう準備を進める。

参考文献

- [1] E. A. Wieder, Guiding system of the spectro-stratoscopeII. IEEE Trans. of Aerospace and Electronic Systems, AES-5(2), 1969.
- [2] 西村 他, よりもどし方式による方向規正, 東京大学宇宙航空研究所報告, 5巻1号, 1969.
- [3] J. Nishimura, N. Yajima et al, A control system for a balloon-borne telescope, Advances in Space Research, vol 1, 127-133, 1981.
- [4] 田中, 矢島 他, 気球望遠鏡 BAT-2 の開発, 宇宙科学研究所報告, 27巻, 1990.
- [5] 田口真 他, 気球搭載望遠鏡による惑星大気観測, 平成22年度大気球シンポジウム集録, 2010.
- [6] Y.Shoji et al, Highly Precise Pointing Control System on a Balloon-Borne Telescope for Optical Observations of Planets, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan Vol. 8, No. ists27, 2010.