

気球の運動がゴンドラ方位角へ与える影響の考察

莊司泰弘, 坂東信尚, 福家英之 (ISAS/JAXA)
中村史彦 (東海大院), 中野 壽彦 (東北大院)

1. はじめに

気球ゴンドラの方位角制御は、ゴンドラに望遠鏡を搭載し天体の観測を行うような場合に非常に重要な技術である[1-3]. 近年では実験様態の多様化が進み、発電や熱制御のためゴンドラの特定の側面を上昇中も太陽指向させたい、実験上の安全のため方位角を規制したい、などの方位角制御に対する要求が出てきた。

方位角制御系の設計と検証のためには、ゴンドラの動力学モデルと外乱量の推定が事前に必要である。従来の検討は 1960 年代後半～70 年代に為された西村、矢島らの研究[4-6]を基に、比較的静かな力学環境に吊り紐によって固定されたゴンドラの、鉛直軸周りの運動について考察するものである。しかし、先に述べた新しい要求に応えるためには、気球系に様々な方向から力が加えられる上昇中においても制御できる必要がある。これは従来の設計条件の範囲外にあり、設計、検証における動力学モデルの再検討が必要である。

本稿では、気球、吊り紐、ゴンドラからなる動力学モデルを 3 次元空間で定義し、飛翔中の気球の並進運動が吊り紐、ゴンドラに与える慣性力の影響を、実際のフライトデータを基に解析した。得られた結果と実際のフライト中のゴンドラの運動を比較し、動力学モデルの妥当性を評価した。

2. ゴンドラの動力学モデルの検討

ゴンドラを、作用する並進力が釣り合い、重心まわりに自由回転できる剛体と仮定するとき、これに作用する力とゴンドラの回転運動の運動方程式は次式となる。

$$I_g \ddot{\theta}_g = \sum \mathbf{r} \times \mathbf{F} + \sum \mathbf{T} \quad \dots \quad (1)$$

ここで $\sum \mathbf{r} \times \mathbf{F}$ はゴンドラ重心まわりの外乱力のモーメントの総和を表し式(2)で表される。 \mathbf{r} は力の作用点のゴンドラ座標系における位置ベクトルである。また $\sum \mathbf{T}$ はゴンドラに作用するトルクの総和を表し、式(3)で表される。

$$\sum \mathbf{r} \times \mathbf{F} = \mathbf{r}_g \times \mathbf{F}_g + \mathbf{r}_{su} \times \mathbf{F}_{su} + \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i + \mathbf{r}_l \times \mathbf{F}_l + \mathbf{r}_a \times \mathbf{F}_a + \mathbf{r}_{sr} \times \mathbf{F}_{sr} \quad \dots \quad (2)$$

$$\sum \mathbf{T} = \mathbf{T}_{su} + \mathbf{T}_b + \mathbf{T}_i + \mathbf{T}_m \quad \dots \quad (3)$$

I_g : ゴンドラの慣性テンソル

θ_g : ゴンドラの姿勢角

$\mathbf{r}_g, \mathbf{F}_g$: 重心座標 (=0), 重力

$\mathbf{r}_{su}, \mathbf{F}_{su}, \mathbf{T}_{su}$: 吊り点の位置, 吊り紐による外力, トルク

$\mathbf{r}_i, \mathbf{F}_i, \mathbf{T}_i$: 搭載機器が発生する力の作用点, 力, トルク

$\mathbf{r}_l, \mathbf{F}_l$: ゴンドラに作用する慣性力の作用点, 力

$\mathbf{r}_a, \mathbf{F}_a$: 空力中心, 空気力

$\mathbf{r}_{sr}, \mathbf{F}_{sr}$: 太陽輻射圧中心位置, 太陽輻射圧力

\mathbf{T}_b : 気球の運動によるトルク

\mathbf{T}_m : 地磁気トルク

<従来の動力学モデル>

従来考えられてきた動力学モデルの典型的なものは、図 1 および式(4)で示す、軸周りのねじり粘性減衰振動系である[7].

$$I_z \ddot{\theta}_{az} + c_{su}(0 - \dot{\phi}_{su}) + k_{su}(0 - \phi_{su}) = T_i \quad \dots \quad (4)$$

I_z : ゴンドラの鉛直軸周りの慣性モーメント

θ_{az} : ゴンドラの方位角

c_{su}, k_{su} : 吊り紐のねじれ粘性係数, ばね定数

ϕ_{su} : 吊りのねじれ角

このモデルは、吊り紐のねじり変形をバネ、ダンパを持つ剛な構造に置き換え、吊り紐の上端は慣性空間に固定された状態を表す。式(2)(3)において

$$\sum \mathbf{r} \times \mathbf{F} = \mathbf{0}, \quad \sum \mathbf{T} = \mathbf{T}_{su} + \mathbf{T}_i = -c_{su}(0 - \dot{\phi}_{su}) - k_{su}(0 - \phi_{su}) + \mathbf{T}_i$$

の場合である。ただし吊り紐の中立位置からのねじれ角 ϕ_{su} は一般にゴンドラの方位角 θ_{az} と独立である。ゴンドラには、検討するフライトシステムに応じて、吊り紐の結合部に回転機構（いわゆるよじれ戻し機構）やゴンドラ内にリアクションホイールなどが置かれ、この出力トルクを T_i とする。

気球の 3 次元運動に起因する慣性力を全て無視し、気球本体の回転運動はゴンドラの方位角 θ_{az}^* の変化として与えられる

このモデルでは、吊り紐の機械特性 (c_{su}, k_{su}) を定めた上で、目標方位角の変化量、すなわち気球の回転運動を別に定義しなければならない。従来は西村らの検討[1, 2]とこれまでのフライトデータを基に、数分程度の比較的短時間において気球は 0.1~0.01rpm の等速回転をしている、あるいは回転速度が振幅 0.1rpm 程度、周期が十数分の振動をすると仮定されてきた。

しかしながら、気球、吊り紐、ゴンドラからなる気球系の機械特性は様々であり、また年々大型化している現状で、このような仮定は厳密さを欠いている。さらに、レベルフライト到達後短時間に、または上昇中から方位角を安定させたい場合には、ゴンドラに作用する力が大きく、式(4)では実際のフライト状態を十分に模擬できない。

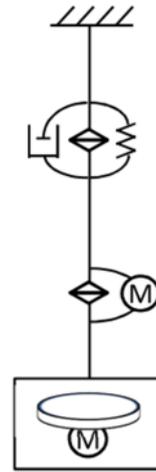


図 1 : 従来の動力学モデル

<実際の飛翔における力学状態>

近年の実際の気球の飛翔において、気球の水平方向加速度は 1 m/s^2 程度を示し、気球重心からゴンドラ重心までの距離は数十~100 m 程度、気球系の総重量は 1000 kg 程度である。仮に気球系を一つの剛体振子とみなし数 deg の振れ角を持つときに F_i の水平方向成分として 1 m/s^2 の慣性加速度が気球にかかったとすると、気球にかかる鉛直軸周りのトルクは 1000 Nm 程度となる。これは体積 10 万 m^3 で満膨張状態にある気球に 0.5 deg/s^2 の角加速度を与えうるトルクであり、角加速度がかかり得る時間が数十分程度以上であることを考慮すると、このトルクが無視できるほど小さいとは言えない。同様に吊り紐に対してゴンドラ重心が振れ角を持つときに水平方向慣性力がゴンドラ重心にかかれれば、吊り紐をねじるトルクとなる。これら気球に対する吊り紐の振れ角、吊り紐に対するゴンドラの振れ角を直接測定することは困難である。しかし数値解析によって推定することはできる。すなわち 3 次元の気球系動力学モデルに気球の並進加速度を適用することで、気球系の各要素の運動、特にゴンドラの方位角に対して影響が大きい気球の回転トルクの一部と吊り紐にねじれを与えるトルクを推定することができると考えられる。

3. 3次元動力学モデルによる気球系の挙動シミュレーション

本検討では、気球系の動力学モデルをそれぞれ剛体の気球、吊り紐、ゴンドラからなる三重振子として、飛翔中の気球にかかる並進加速度により、三重振子の各要素がどのように運動するかを解析した。またこれにより得られた振幅角と並進加速度より、気球、吊り紐それぞれにかかるねじりトルクの大きさを推定した。

<解析モデル>

気球系動力学モデルの概略図を図 2 に示す。気球は便宜的に質量 M_b 、半径 a_b の球殻とした。吊り紐はラダー型を念頭に質量 M_{su} 、3 辺寸法 $a_{su} \times b_{su} \times c_{su}$ の中実直方体とした。ゴンドラは本体質量 M_g 、3 辺 $a_g \times b_g \times c_g$ の中実直方体が、質量が無視できる 4 点吊り紐により高さ d_g から吊られているとした。各要素は十分に剛であり変形は無視できるものとした。実際の各要素は鋼鉄製のシャックルによって結合される。本検討では

これを質量が無視できる2軸フリージョイントとして扱った。

気球系は静定時において重力による釣り合い状態にあり、重力と気球の飛翔による並進加速度 $\ddot{\mathbf{x}}$ のみが気球の重心にかかるとする。従って各要素にはこの $\ddot{\mathbf{x}}$ に由来する慣性力 F_1 がかかる。本検討は気球の並進運動が回転運動に与える影響を調べるため、空力トルクや吊り紐のバネダンパ特性など、並進運動以外の外力は無視できるものとする。

<解析条件>

以上のモデルは、多リンク系の動力学計算に帰着することができ、気球系動力学モデルの各要素の運動状態は、リンクの運動を計算することに等しい。そこで数値計算には Matlab 用動力学計算エンジン SpaceDyn [8, 9] を使用し、Runge-Kutta 法で計算した。ここでは一例として B12-01 をモデルとした計算結果を示す。気球系のモデルパラメータとして表 1 に示すパラメータを適用した[10, 11]。ただし、気球の直径は高度によって変化せず $a_b = 30$ m で一定とし、またゴンドラ質量も $M_g = 700$ kg で一定とした。シミュレーション期間 t は、レベルフライト初期における気球系の運動に影響の大きい、ブーメランフライト終了からレベルフライト開始までの、再上昇期間（高度約 15~32km）の約 1.7 時間とした。シミュレーション開始時の気球は慣性空間内で静釣り合い状態にあるとし、このときのジョイント角を 0 とした。気球にかかる並進加速度 $\ddot{\mathbf{x}}$ は、気球のテレメトリから 1 秒ごとの移動方位と並進速度を得、差分法により求めた。シミュレーションの時間ステップ Δt は 0.1 s とし、時刻 $t-1$ から t の間は時刻 t の加速度が一樣に加えられるものとした。気球、吊り紐、ゴンドラの軸周り（モーメントアーム周り）の回転については、本検討では評価しない。

<解析結果>

シミュレーション結果を図 3 に示す。横軸は共通して放球からの経過時間 t [s] で、上から順に気球高度[km]、水平方向加速度 $\ddot{\mathbf{x}}$ [m/s²]、気球に対する吊り紐の振れ角[deg]、吊り紐に対するゴンドラの振れ角[deg]を示す。

気球の水平加速度は気球の再上昇開始 ($t \sim 7500$ s) ころから増加し、ほぼ同時に吊り紐の振れ角、ゴンドラの振れ角も増加し始めた。最大値は再上昇終了 ($t \sim 11400$ s) 直前に気球に対する吊り紐振れ角が約 5 deg、吊り紐に対するゴンドラ振れ角が約 0.5 deg を示した。実際の B12-01 フライトでは、ゴンドラの水平 2 軸周りの角速度の測定をしていない。しかし過去の同規模の気球では、ゴンドラの揺れ角（気球に対する吊り紐振れ角と吊り紐に対するゴンドラ振れ角の和）が 5 deg で程度あることから、シミュレーション結果は妥当な値である。

<気球、吊り紐にかかるトルクの推定>

3. より求めた最大振れ角と水平方向加速度より、気球系にかかり得る最大トルクを見積もる。解析モデルでは吊り紐のねじれ、ゴンドラの回転はないものとしたため、動力学解析の中でそれぞれの角加速度からトルクを求めても現実と合うとは限らない。ここではトルクの最大値として、吊り紐、ゴンドラがそれぞれ最大の振れ角を持っているときに、各要素に最大加速度が振子振動面に対して垂直にかかるかと仮定して、以下の式により求めた。

$$\mathbf{T}_{b,su} = \mathbf{r}_{b,su} \sin(\max(q_{1,2})) \times \max(\ddot{\mathbf{x}}_{1,2}) \cdot M_{g,su} \quad \dots \quad (5)$$

$\max(q_{1,2})$ 吊り紐振れ角 2 成分のうち大きい値 $\max(\ddot{\mathbf{x}}_{1,2})$ 並進加速度 2 成分のうち大きい値

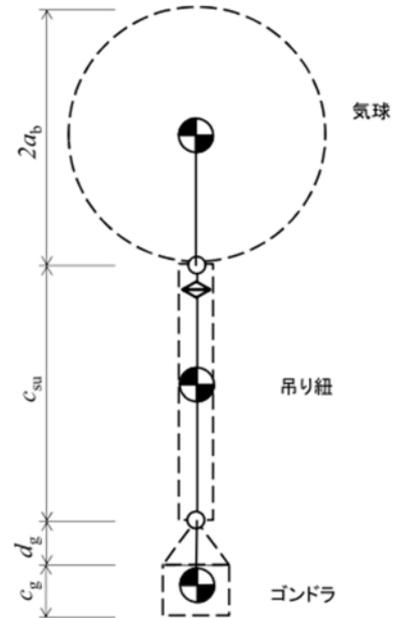


図 2: 気球系の動力学モデル

表 1: 動力学モデルの諸量

気球半径 a_b	30 m
気球質量 M_b	250 kg
吊り紐寸法 a_{su}, b_{su}, c_{su}	$0.4 \times 0.05 \times 50$ m
吊り紐質量 M_{su}	64 kg
ゴンドラ寸法 a_g, b_g, c_g	$1.4 \times 1.5 \times 2.1$ m
4 点吊り長さ d_g	2.0 m
ゴンドラ質量 M_g	700 kg

これにより、 $T_b = 1293 \text{ Nm}$ 、 $T_{su} = 7.7 \text{ Nm}$ が得られた。このうち T_b は、解析モデルの気球に対して、 0.5 deg/s^2 の角加速度を与えうるトルクである。実際の B12-01 フライトにおいて、再上昇中に観測された最大角加速度は $1 \times 10^{-2} \text{ rad/s}^2 = 0.6 \text{ deg/s}^2$ であったことから、シミュレーションモデルはおおよそ妥当であったと言える。

4. まとめ

本稿では、従来見積もられていなかった上昇、下降中のゴンドラに加わる外乱トルクを、気球系の動力学シミュレーションにより求められることを示した。今後解析対象を過去に遡って増やし、様々な飛行条件における外乱トルクを推定し、ゴンドラの方位角制御系設計の指針の一つにできるよう検討を進める。また、本稿の動力学モデルのうち、吊り紐部の機械特性（ばね定数 k_{su} 、粘性係数 c_{su} 等）の物性値を実験的に求めモデルに反映させることで、より実際に近いシミュレーションモデルの構築を検討する。

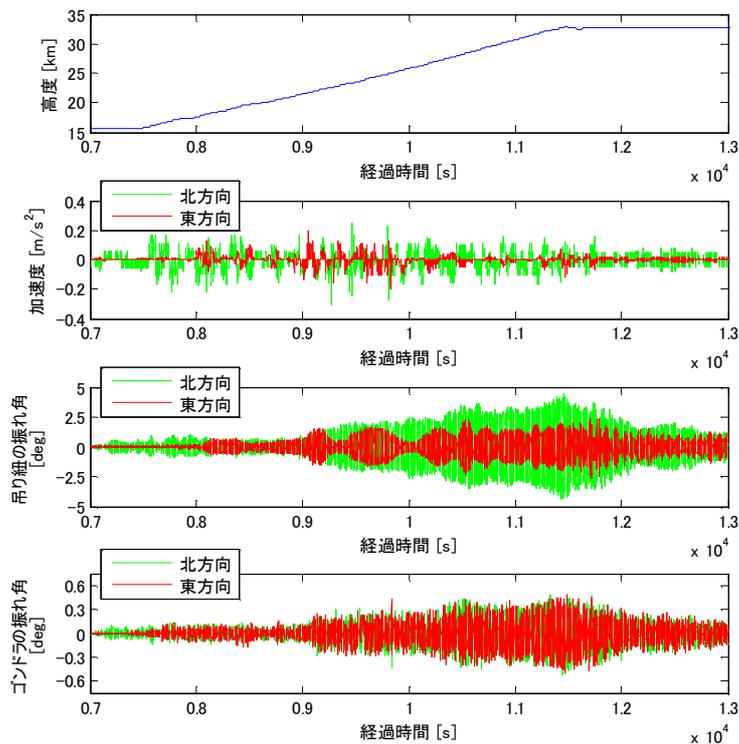


図 3 : 3次元シミュレーション結果

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 西村 他, 水平浮遊時における気球の動作について, 東大宇宙航空研究所報告第 7 巻 1 号, pp257-268,1971
- [5] 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.
- [6] J. Nishimura, N. Yajima et al, A control system for a balloon-borne telescope, Advances in Space Research, vol 1, 127–133, 1981.
- [7] 坂東 他, pGAPS 気球実験における姿勢制御システムの概要と実験結果, 本シンポジウム
- [8] K. Yoshida, The SpaceDyn: a MATLAB toolbox for space and mobile robots, Proc. IROS '99. Vol. 3, pp. 1633 - 1638, 1999
- [9] <http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/spacedyn/>
- [10] 吉田 他, 平成 24 年度の大気球実験概要, 本シンポジウム,
- [11] 福家 他, GAPS プロトタイプ気球実験” pGAPS” フライト報告, 本シンポジウム