

飛翔中の気球ゴンドラの運動に関する解析

莊司泰弘, 坂東信尚, 福家英之 (ISAS/JAXA)

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、高速通信のためのハイゲインアンテナを局へ向けたい、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、矢島らにより気球系力学モデルの検討や、飛翔中の気球の挙動を測定する試みが為された[4-6]。しかし、近年の気球の大型化やフライトシステムの更新等を反映する必要性や、先に述べた新しい要求への対応のため、筆者らにより気球系動力学モデルの再構築が進められている [7,8]。動力学シミュレーションではゴンドラの姿勢に対して大きな影響を持つと見なされている気球の挙動の他、これをゴンドラへ伝達する吊り紐も適切に数値モデル化されなければならない。これらのうち、気球の回転運動のデータについては、近年の大型気球の飛翔データでモデルにできるものが得られていない。また吊り紐のパラメータは、物性に依存する 1 本吊り部分の値が得られていない。

本稿では、気球系の動力学モデル構築の一環として、姿勢制御をせずにゴンドラ方位角履歴を記録した実際の飛翔データを解析し、大型気球の回転運動と 1 本吊り部分のねじりバネ定数の導出を試み、結果を示す。

2. 飛翔データの解析

<解析対象の選定>

解析する飛翔データとして、2009 年の第 1 次気球実験で行われた B09-01 ゴンドラに搭載された姿勢センサのデータを使用する。B09-01 実験は Balloon-based Operation Vehicle (BOV) による無重力実験で 2009 年 5 月 27 日に行われた[9]。BOV 実験では通常ゴンドラの姿勢制御、姿勢計測は行われない。しかし、本実験では GPS を用いた姿勢決定システムの検証のため、Attitude Determination Package (ADP) と、比較のための磁場センサ、太陽センサ、傾斜計、ジャイロが搭載された[10]。本検討では、放球直後から着水までの欠測が比較的少ない磁場センサによる方位角データを解析に使用した。方位角精度は約 1.5deg である。また、姿勢制御を行わないことから、記録される姿勢変動はゴンドラから見た外力のみに起因する。ゴンドラに働く外力の検討には都合がよい。

一方、国内で JAXA が実施する気球実験では、ゴンドラの姿勢制御が必要ない場合、気球とゴンドラを結合する吊り紐をケブラーロープ 1 本とする。もしケブラーロープがねじりバネの性質を示すのであれば、バネ定数は長さに反比例する。そのためゴンドラ姿勢制御を行う気球実験で適用されるラダー形吊り紐の、パラシュートと気球を接続する短い一本吊り部の特性も推定できると考えられ、動力学シミュレータの未知パラメータ推定に有用である。

B09-01 実験におけるフライトシステム構成を図 1 に示す。使用した気球は満膨張体積 300,000m³ の FB300 形気球を使用した。満膨張時の直径は 91m となる。B09-01 ゴンドラは寸法 1.0(W)x1.0(D)x0.75(H)m の直方体形状で、重量は 101kg、さらにバラストが 280kg 搭載された。バラストは最高到達高度に到達するまでに 260kg を投下した。吊り紐は直径 10mm のケブラー（芯線径 8mm）ロープである。パラシュート部も 1 本のケブラーロープが貫通しており、パラシュート上下でシャックルにより結合された。パラシュートを含む、気球尾部からゴンドラ吊り点までの距離は 22m であった。

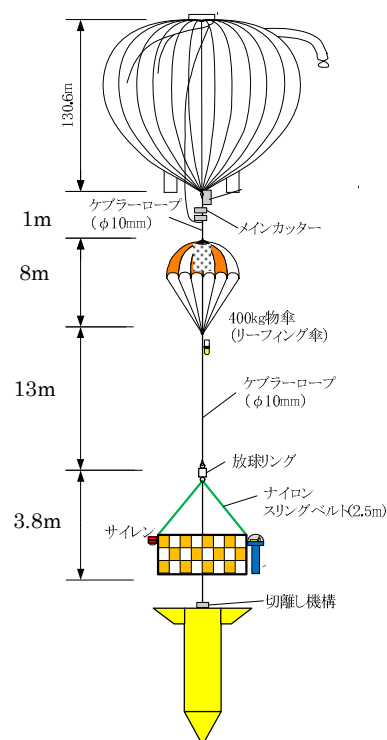


図 1: B09-01 飛揚構成

飛翔軌跡と記録された方位角データを図に示す。サンプリングレートは 1Hz である。気球は放球後東北東方向に飛翔し、気流の弱い高度 15~30km をほぼ垂直に上昇した後、西北西に飛翔した。高度 39.9km に到達し、BOV を切り離した後、気球とゴンドラが切り離され、降下した。フライト時間は 2 時間 40 分であった。磁場センサは放球直前に 270deg(西) 方向を向いており、放球後左右に回転を始めた。回転運動は振幅が 360deg に収まることはほとんど無く、一度ある方向に回り始めたら数回転同じ方向への回転を続ける様子が見られた。

<周波数解析>

記録された磁場センサによるゴンドラ方位角データは、値域が 0-360deg のため不連続である。また搭載コンピュータの処理落ちによるとみられる 1s ないしは 2s 程度データの欠落があった。そこでデータを連続につなぎ直してから 3 次スプライン補間を行って、データを成形した後に時間差分を取って角速度、角加速度を求めた。図に、高度[km]、方位角[deg]、角速度[deg/s]、角加速度[deg/s²]の時間[s]履歴を示す。プロットは上昇速度と高度の違いで色を変えており、高度、気圧との対応は次の通りである。紫：高度 0.04~10.9km (>226hPa)、緑：高度 11.7~15.5km (200~111hPa)、赤：高度 16.9~34.6km (88 ~ 6hPa)、青：高度 34.6~39.9km (6~2.9hPa)。方位角、角速度、角加速度データをこの高度分類ごとにフーリエ変換し、それぞれのパワースペクトルを求めた。それぞれのスペクトル図に示す。色は時間履歴に対応している。

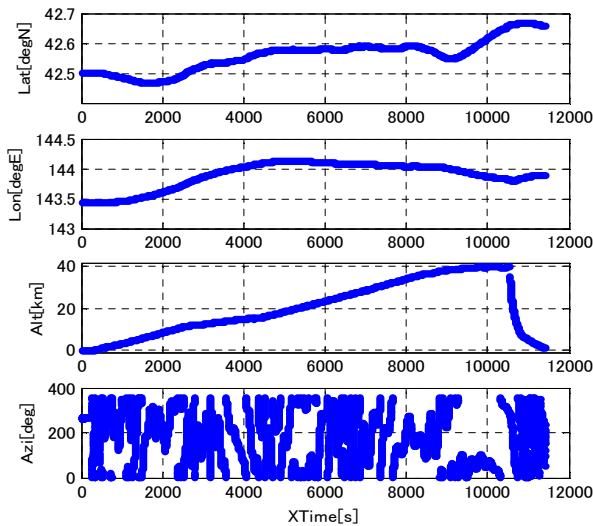


図 2：B09-01 実験のフライトデータ

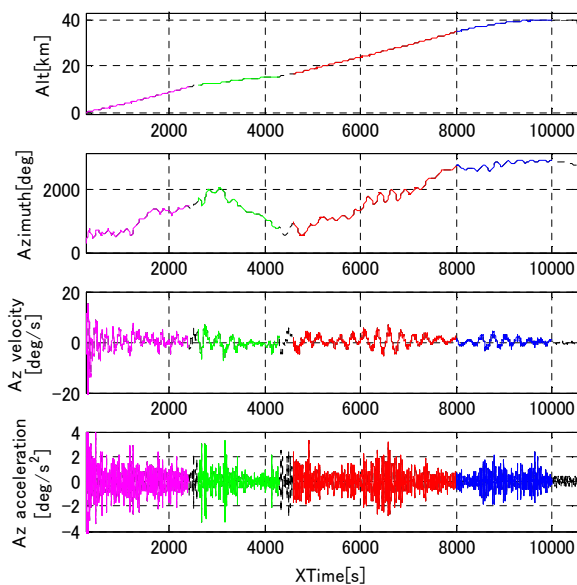


図 3：ゴンドラの高度と方位角方向の挙動履歴

(>226hPa)、緑：高度 11.7~15.5km (200~111hPa)、赤：高度 16.9~34.6km (88 ~ 6hPa)、青：高度 34.6~39.9km (6~2.9hPa)。方位角、角速度、角加速度データをこの高度分類ごとにフーリエ変換し、それぞれのパワースペクトルを求めた。それぞれのスペクトル図に示す。色は時間履歴に対応している。

角速度、角加速度のスペクトルの、周波数(a) $f = 4\text{mHz}$, (b) $f = 5 \sim 25\text{mHz}$, (c) $f = 40 \sim 500\text{mHz}$ (ナイキスト周波数) に特徴的な振幅の立ち上がりが見られた。このうち帯域(c)は、角加速度で広域に大きな値を示すものの、角速度には対応する挙動が見られないことから、方位角測定のばらつきや測定ノイズが角加速度として反映された誤差成分と考えられる。

帯域(b)では、高度 15km 以下における挙動に、帯域全体で振幅が強く現れた。角加速度のスペクトルでは特に 8mHz と 13mHz にピークが見られた。一方高度 17km 以上のスペクトルでは帯域全体において高度 12-15km のスペクトルよりも振幅が小さくなった。この帯域の角加速度スペクトルが実際の運動に与える影響を検討するため、それぞれのピークを抑圧するロ

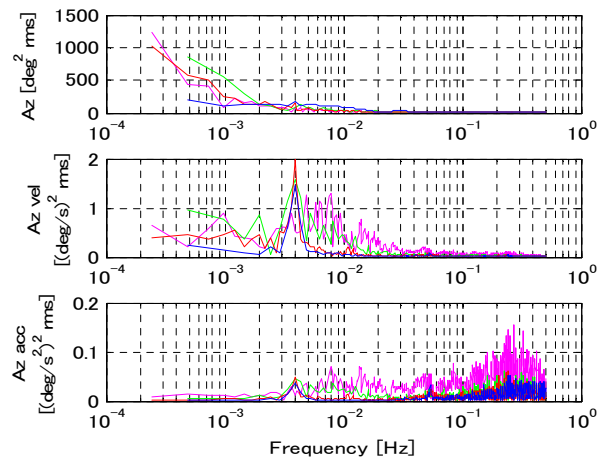


図 4：挙動のパワースペクトル

一パスフィルタを角加速度の履歴に適用し、積分することによって角速度、方位角で現れるゴンドラの挙動を検証した。

フィルタを適用した角加速度と、これの積分による角速度、方位角を図に示す。図中で示されるプロットは計測データである。フィルタは6次の Butterworth フィルタを使用した。プロットの色とカットオフ周波数 (-3dB) の対応は(1)紫：30mHz、(2)緑：10mHz、(3)黄：6mHz である。特に角速度のプロットで違いが顕著に現れ、30mHz のフィルタ（紫）を適用した場合は、角速度の特徴をおおむね再現できた一方、6mHz のフィルタ（黄）を適用した角速度は、振幅、挙動共に元の信号から変形が大きくなった。30mHz のフィルタで抑圧された周波数成分は大部分が計測誤差に起因することから、角加速度スペクトルの帯域(b)の成分は全て、実際のゴンドラの運動に対して有意な成分である。帯域(b)は高度、あるいは周囲気圧と関連していると考えられることから、空気力によるゴンドラへの外乱トルクを示唆していると考えられる。この帯域に二つのピークが現れた要因については、今後気球の並進運動などと合わせて検討される必要があると思われる。

帯域(a)に現れた 4mHz のピークは高度 12~40km において見られた顕著なピークである。高度あるいは気圧の変化によらず共通して現れていることから、吊り紐、またはゴンドラの固有振動数であると考えられる。磁場センサはゴンドラフレームに固定されていたため、このように低い周期の振動は吊り紐の固有振動と思われる。ケブラーローブを中実剛体棒と仮定したとき、ゴンドラの慣性モーメント J [kgm²]、吊り紐長さ l [m]、単位長のねじりバネ定数 \bar{k}_t [Nm] から振動周期 f [Hz] は次式で得られる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{k}_t}{Jl}}$$

$f = 4.0 \times 10^{-3}$ [Hz], $l = 22$ m, バラストを 250kg 投下したときのゴンドラ質量から推定した慣性モーメント $J = 22.7$ kgm² より $\bar{k}_t = 0.3$ Nm と求められた。

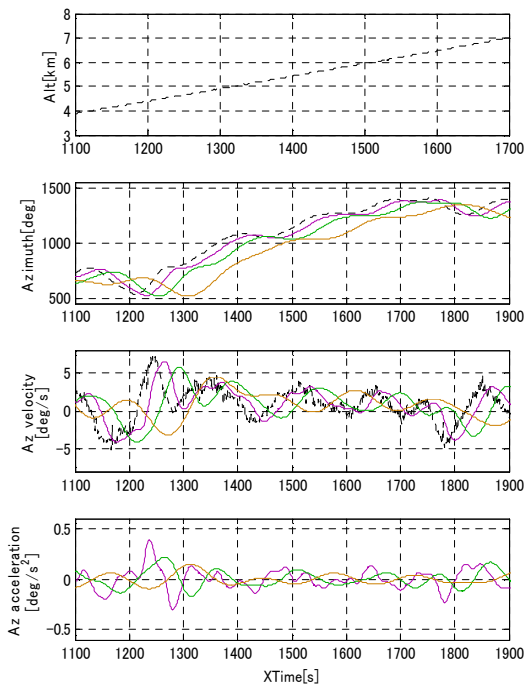


図 6：フィルタ(1)~(3)の適用結果

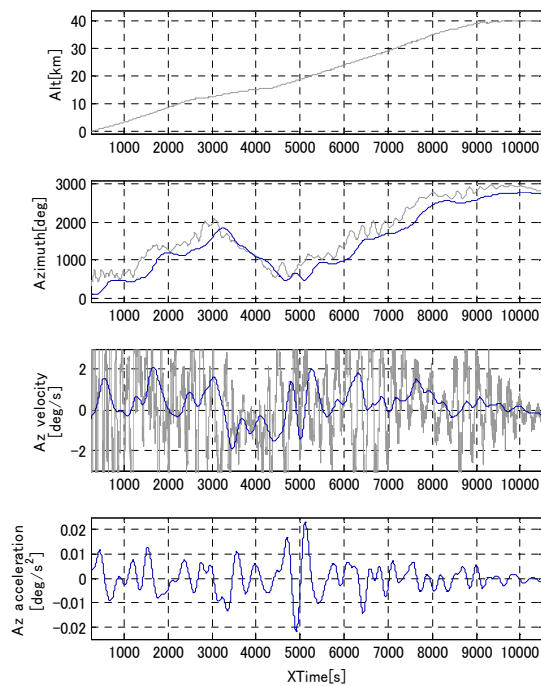


図 5：フィルタ(4)の適用結果

ただしこの値を他の条件に適用するには注意を要する。図 4 の帯域(a)に現れたピークは高度 11.7~15.5km のスペクトルと、高度 16.9~34.6km の両方に現れている。この間の高度においてバラストの投下が行われており、ゴンドラ重量が変化している。慣性モーメント J は質量に比例するため、 \bar{k}_t が定数ならばピーク周波数が変化しなければならない。そのため、 \bar{k}_t は吊り紐にかかる張力に依存するパラメータで

あると推定される。このパラメータの特性について、今後実験的に求められなければならない。

次に角加速度の(a), (b), (c)の帯域に現れている全てのピークを抑圧する、カットオフ周波数(4)2mHzのフィルタを角加速度に適用し、積分して角速度、方位角を算出した。時間履歴を図に青線のプロットとして示す。灰色のプロットは実際の測定結果を示す。方位角履歴では、実際の測定結果と比較して振動している様子が打ち消されている一方、変化の様子はおおむね一致している。このことから、(4)のフィルタを通過した挙動は、吊り紐の振動の振幅中心の遷移、すなわち気球自体の回転運動を示していると考えられる。この運動は平均して3000sで5回転(1800deg)程度であり、10minで1回転(0.6deg/s)程度のゆっくりした変化である。しかし、角速度の履歴を見るとこの運動も振動的であり、ピーク値で2deg/sと運動の平均値と比較して大きな値を示す。気球の上昇中も姿勢制御を行うシステムを設計する際に、これらの値は参考になると思われる。

4. まとめと今後の展開

本稿では、B09-01 気球実験において取得されたゴンドラの方位角履歴を周波数解析し、特徴的なピーク周波数を得た。それらはゴンドラに作用する空力外乱と吊り紐の固有振動数である可能性が高いと考えられ、特に吊り紐のねじりバネ定数は $O(1 \times 10^{-1} \text{Nm})$ であると推定される。また、これらの振動を抑制することで、気球自体の運動を推定することができ、B300 気球の回転運動は $1 \times 10^{-3} \text{Hz}$ 以下の運動であり、一方向ではなく振動であること、最大角速度は $O(1 \text{deg/s})$ であることが見出された。

今後、ゴンドラに作用する空力外乱と考えられる振動成分は、気球の並進運動と合わせて解析されることで、ゴンドラの運動について理解を深められるものと思われる。また吊り紐の固有振動については、吊り紐単体のねじり試験等特性取得実験を行うことが必要である。吊り紐の特性については、太さ、長さ、張力、温度等を考慮して推定されることが望ましい。

本検討によって、姿勢制御を行わない気球実験においても気球系各部の挙動を記録することによって、ゴンドラの姿勢制御系を検討する上で有用な知見が得られることが示された。今後どのようなゴンドラにも搭載できる簡便な姿勢記録器を開発し、挙動データの蓄積を行いたいと考えている。

謝辞

本研究は、Buist氏、BOVチームより提供していただいたデータを元に行われた。氏らの好意に感謝します。

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] 莊司, 坂東, 福家, 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, 平成 23 年度大気球シンポジウム集録, 2011
- [8] 莊司 他, 気球の運動がゴンドラ方位角へ与える影響の考察, 平成 24 年度大気球シンポジウム集録, 2012
- [9] 石川 他, 大気球を利用した無重力燃焼実験|BOV#4 結果と今後の計画, 平成 21 年度大気球シンポジウム集録, 2009
- [10] P.J. Buist, et al., "GPS Experiment on the Balloon-based Operation Vehicle", in Proc. of PLANS 2010, IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium, May 4-6, 2010