

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820080

研究課題名(和文) 気球ゴンドラ方位角制御手法の研究

研究課題名(英文) Study on the attitude control methodology of stratospheric balloon gondolas

研究代表者

莊司 泰弘 (Shoji, Yasuhiro)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70582774

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、さまざまな宇宙観測、実験のプラットフォームの一つである成層圏気球における、ペイロード(ゴンドラ)の姿勢制御システムを、従来とは異なる視点で検討し直し、より簡素なシステムでより高精度な制御を実現する手法を検討する。本研究により、従来行われてこなかった姿勢を制御しないゴンドラにおける姿勢計測とその周波数解析が、今後開発されるであろう姿勢制御システムの設計において有益な情報を与えることが示された。また、より実際に即した制御系の検討を行うため、これまで不明であった動力学パラメータを実験的に測定し、コンピュータシミュレーションによって目的の制御系の検討を進めている。

研究成果の概要(英文)：This research addresses the attitude control system of gondolas of the stratospheric balloons which are used for various observations and experiments in the stratosphere. The attitude control system is verified from new point of view where the dynamics includes the suspension and the balloon envelope as well as the gondola, which have been ignored. And the research aims to develop new control strategy for the attitude control method with higher precision and easier system. This research revealed that the attitude measurement and frequency analysis of gondolas without attitude controls provide useful information for the development of the future attitude control system. Also in the research the attitude control strategy is being developed with dynamics parameters which have been determined in this research.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：運動力学 揺動抑制 科学気球 姿勢制御

1. 研究開始当初の背景

大気球による成層圏からの観測・実験は、日本のみならず各国で実施されており、高度な科学観測による成果を挙げている。例えば気球搭載望遠鏡による天体の観測は、地上では観測困難な波長帯による観測を大気の希薄な成層圏において行っている。気球から吊り下げられた望遠鏡を目標天体に思考するための方位角制御技術が研究され、実用に供されてきた。近年気球実験の用途が拡がり、ゴンドラの姿勢制御技術の重要性が増している。

気球ゴンドラは、一般に気球から長さ数十mの1本ないしは複数本の高強度ロープまたはメタルワイヤで吊り下げられる(図1)。ゴンドラ方位角制御系の設計では、ゴンドラに対して3桁以上大きな慣性モーメントを持つ気球を安定ベースと見なし、動力学的に一端が固定されたねじりバネの先端にある剛体(ゴンドラ)のねじり振動抑制問題として扱う。ねじり振動の振幅が十分に小さいときにゴンドラを鉛直軸周りに回転させる場合、どちらも吊り紐の剛性が高い方がゴンドラから気球へトルクを伝えやすいので、2本の吊り紐の中間を複数箇所棒によって結合し梯子状にしたラダー型が用いられる。しかしラダー型にしても飛翔中は容易にねじられ、吊り紐のねじりバネとしての特性が顕著になる。気球本体を固定ベースでなく外乱源と見なすと、吊り紐の剛性を高くすることで、外乱がゴンドラに伝わりやすくなるという問題が発生する。

本研究では従来の考え方を再検討し、吊り紐は低剛性な方が気球からゴンドラへの外乱トルクの伝達は小さくできると予想した。ゴンドラの気球本体に対する拘束が緩くなっても、リアクションホイール(RW)などのトルク発生器(トルカ)を用いれば、姿勢制御は可能である。よって低剛性な吊り紐の方が同じ制御リソースを用いてより高精度な姿勢制御ができると予想した。

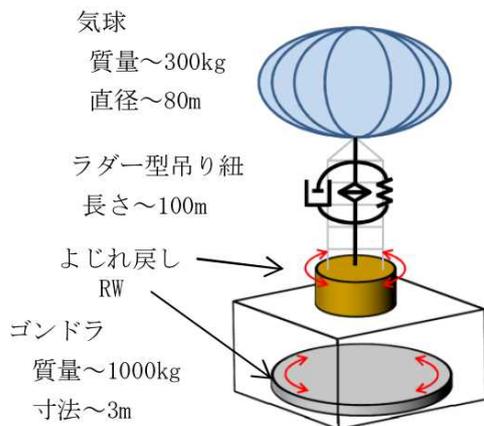


図1: 気球のダイナミクスモデルの模式図

2. 研究の目的

本研究では、よじれ戻しとリアクションホイール(RW)を搭載したゴンドラを剛性が低い1本の吊り紐で気球から吊り、方位角制御を行う手法を提案する。この手法が高精度な気球ゴンドラの方位角制御に適していることを示すために、数値解析と地上実験によって以下の課題を明らかにすることを目的とする。

- よじれ戻しとRWを用いて任意の方位角へゴンドラを指向させる制御手法
- 提案する1本吊り型と従来のラダー型の制御特性の違い
- 実際のフライトゴンドラへ適用する際の課題

これらを明らかにし、本研究に続く期間において実フライトへの適用を目指した。

3. 研究の方法

(1) フライトデータの解析による検討対象ダイナミクスの特徴抽出

検討対象のダイナミクスの特徴を抽出することを目標に、過去に実施された気球実験において取得されたゴンドラの方位角履歴を、気球の運用状態ごとに周波数解析した。これにより固有振動数とその変化の有無の他、特徴的な分布の有無を調査した。

(2) 数値解析のための気球吊り紐特性取得

(1)で抽出された特徴のうち、吊り紐の機械特性に依存する要素の切り分けと、その要素が占める動特性の適用範囲拡大を目指して、吊り紐の機械特性を実験により定量的に求めた。実験は、地上において吊り紐に張力を加えながらねじり(図2)、ねじりばね定数、振動の減衰特性等を測定し、吊り紐の太さ、長さ、雰囲気温度等との関連性を求めた。



図2: 吊り紐の特性取得実験の様子

(3) 実験値に基づくダイナミクスモデルを用いた姿勢制御シミュレーションと姿勢制御手法の評価

(1)、(2)で求めた特性値に基づく数値シミュレーションモデルを構築し、ゴンドラの制御特性、気球を外乱源と見なした場合のゴンドラへの外乱伝達特性を検討した。

#### 4. 研究成果

##### (1) フライトデータ解析によるゴンドラ挙動の検討

2009年に実施された気球実験において取得されたゴンドラの方角履歴を周波数解析した。図3は解析に用いたフライトデータを、上から順に飛行高度、方位角回転角、方位角速度、方位角速度の履歴を示す。図4は図3の方位角回転角、方位角速度、方位角速度をそれぞれ周波数解析した結果を示し、プロットの色は図3と図4で対応する。

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、方位角測定の際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、空気が比較的濃い高度15km以下における挙動に、帯域全体で振幅が強く現れ、それ以上の高度になると見られなくなった。このことからこの帯域の角加速度は空力外乱が主な原因であると見いだされた。

一方、帯域(a)は全ての高度領域において等しく観測された。これは吊り紐の固有振動数である可能性が高いと考えられる。この固有振動数より吊り紐のねじりバネ定数は  $0 (1 \times 10^{-1}\text{Nm})$  であると推定された。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、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  $0 (1\text{deg/s})$  であることが見出された。

以上の解析によって、姿勢制御を行わない気球実験において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。

##### (2) 吊り紐の機械特性取得

減衰ねじりバネ系として吊り紐を見なしたときの動力学特性(ばね定数、減衰の種類、減衰係数)を求めた。

取得データの一部を図5に示す。図5は供試体を両方向にねじったときの反トルクを示しており、ねじり角速度に依存しないヒステリシス曲線が得られた。この曲線を力学的に説明するために、本研究では減衰特性に摩擦モデルを導入し、測定値にカーブフィッティングして妥当性を検証した。図6は水色のプロットが実験値を、赤線がフィッティングしたモデルを表しており、摩擦モデルが吊り紐の機械特性をよく表すことが示された。

この実験を温度3条件、張力3条件、供試体8条件に対して行い、得られたデータは全て同様の挙動を示した。

現在得られたデータを各条件で整理し、モデルを定式化する試みを進めている。

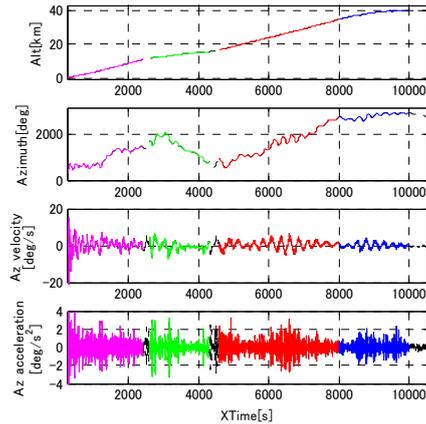


図3: ゴンドラの高度と方位角方向の挙動履歴

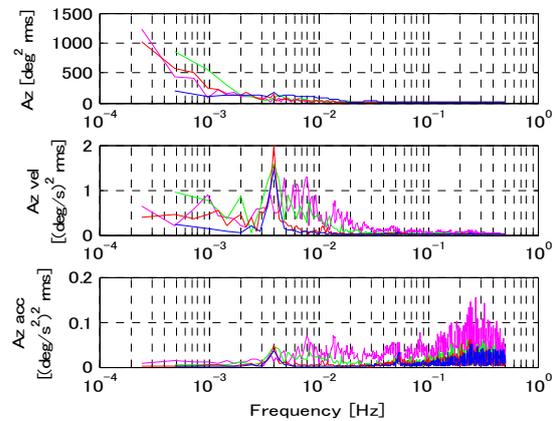


図4: 方位角、角速度角加速度の周波数パワースペクトル

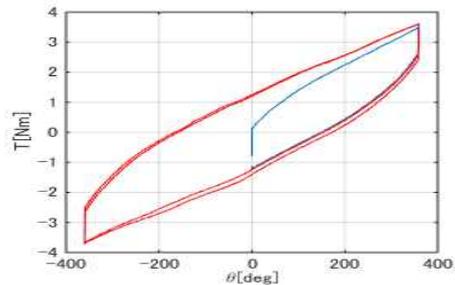


図5: 反トルクーねじれ角特性の一例

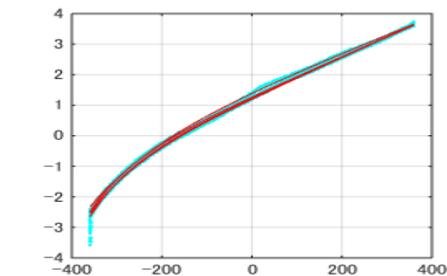


図6: モデルに基づくカーブフィッティング

(3)ダイナミクスシミュレーションによる吊り紐の形態が及ぼすゴンドラの姿勢制御特性への影響の検討

吊り紐を含むゴンドラ姿勢のダイナミクスは、ねじりバネ-マス-ダンパ系として表すことができ、このバネ特性とダンパの特性を適切に定義しなければならない。1本吊りにおける特性値は(1)(2)に示したように検討を進めている。一方ラダー型については主にその構造をモデル化して求める方法で検討を進めており、ばね定数をアスペクト比の関数として定義することができた。

今後これまでに求められた値を元に振動の伝達特性等を検討していく。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

- ① 莊司泰弘、大型気球用吊り紐の機械特性測定実験報告、平成26年度大気球シンポジウム、2014年11月、相模原市
- ② 莊司泰弘、坂東信尚、福家英之、飛翔中の気球ゴンドラの運動に関する解析、平成25年度大気球シンポジウム、2013年11月、相模原市

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

莊司 泰弘 (SHOJI, Yasuhiro)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：70582774