

## A03 空気圧を用いた下方支持式重力補償装置の提案と性能試験法

### Develop and Performance Testing Method of Gravity Compensation System Using Pneumatic

中町 友久 (東京都市大学・学), 瀧 聖人 (東京都市大学・院),

宮坂 明宏 (東京都市大学)

Tomohisa Nakamachi (Tokyo City University), Masato Taki (Tokyo City University),

Akihiro Miyasaka (Tokyo City University)

Gravity offloading of deployable space structure during ground testing is a major problem to ensure reliability of deployment in space. Therefore, a pneumatic gravity compensation apparatus has been proposed. The characteristics of the gravity compensation system was estimated by using a simple deployment structure. This paper describes a result of gravity compensation performance.

*Key Words:* Grand development test, Gravity compensation device, Inflatable tube, Gravity compensator testing method

### 1 緒言

近年、宇宙ミッションの高度化に伴って衛星に搭載される太陽電池パドルやアンテナなどの宇宙用構造物は大型化が要求されている。しかし、宇宙用構造物は打ち上げ時には小さく収納し、ロケットのフェアリング内に搭載して宇宙空間まで運ばなくてはならないという制約条件を持つ。そこで、宇宙用構造物には展開構造が多用されている。展開構造を利用することにより、フェアリング搭載時は折り畳み、宇宙空間でミッションにあたる際には展開することでペイロードの制約を満たし、宇宙空間でのミッションに必要な構造を得ることが可能となる。

宇宙用展開構造物開発において、宇宙空間での展開可能性検証については多くの研究者の課題であり、地上での実証実験が不可欠である。技術試験衛星VIII型 (ETS-8) の地上試験においては、レールとカウンターウエイト、プーリーを用いた吊下げ式重力補償装置とエアベアリングを用いた下方支持式重力補償装置が利用された<sup>[1]</sup>。しかし、吊下げ式は高所での作業が必要なうえ、レールによって自由度を制限してしまう欠点があり、

下方支持式はエアベアリング上で展開を行うという特性上、2次元展開構造物でのみの利用に制限されてしまう。よって、より高精度な地上試験実施のための重力補償装置が必要であると考えた。

そこで本論文において、3次元展開構造物に対応した重力補償装置として従来の下方支持式重力補償装置をベースにインフレータブルチューブを用いた上下方向の補償が可能な機構を追加したインフレータブル式重力補償装置を提案する。ただし、本論文においては上下方向の追従にのみ焦点を当て、平面方向の移動についてはエアベアリングではなく手動での移動とする。

また、重力補償装置の性能試験方法も併せて提案する。提案した性能試験方法を利用することで提案する重力補償装置の定量的な比較が可能となる。

### 2 提案する重力補償装置

本研究室において提案された重力補償装置は、Fig.1 に示すようにエアベアリング上に高さ方向の動作を可能にするため、高さ方向に伸縮可能な

インフレータブルチューブを内蔵したシリンダを設置したものである。インフレータブルチューブ内に圧縮空気を供給することで高さ方向の追従及び展開構造物の重力補償を行う。この装置を複数用意し、展開構造物の離散点で接続することによって大型展開構造物の重力補償を行う構想である。

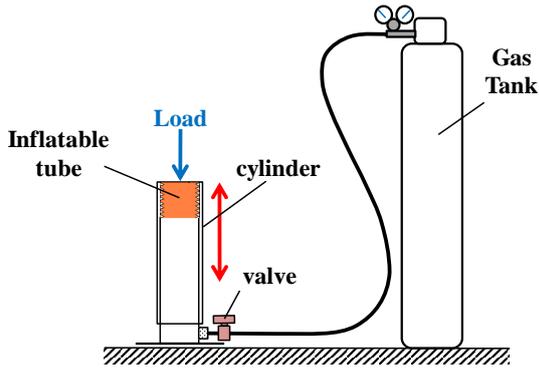


Fig.1 Proposed gravity compensation system

本装置では、インフレータブルチューブとしてポリイミドフィルム (Kapton 200V) を八角折り 30 段にしたものを使用している。本研究において Fig.2 に示すインフレータブルチューブの制御系は完成していたものの、装置の精度評価に関する研究が不十分であったため、提案した重力補償装置の妥当性検証を行う。

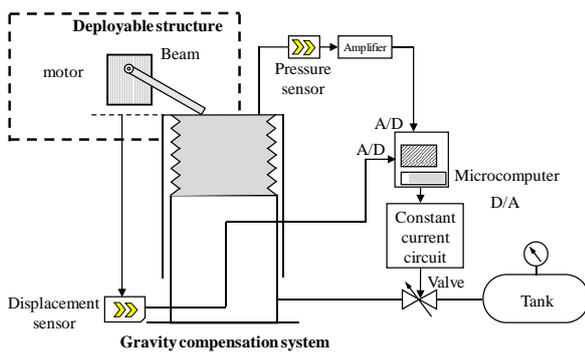


Fig.2 Gravity compensation control system

### 3 基礎理論

#### 3.1 インフレータブル式重力補償装置

Fig.2 に示したインフレータブル式重力補償装

置と展開構造物のつり合い式は、インフレータブルチューブ内圧を  $P_t$ 、インフレータブルチューブ受圧面積を  $A_t$ 、インフレータブルチューブばね定数を  $k_t$ 、インフレータブルチューブの自然長からの伸び量を  $x_t$ 、インフレータブルチューブのガイドシリンダ質量を  $M$ 、展開構造物の質量を  $m_s$ 、展開構造物の長さを  $l$ 、展開軸から展開構造物の重心までの長さを  $x_g$ 、重力加速度を  $g$  として式(1)で表せる。

$$P_t A_t + k_t x_t - M g = \frac{x_g}{l} m_s g \quad (1)$$

式(1)を用いて、各種センサ値から目標圧力となる  $P_t$  についてマイクロコンピュータで導出し、比例制御弁を PI 制御することによって必要圧力をインフレータブルチューブ内部へ供給する。

#### 3.2 重力補償装置の性能試験装置

本研究では、提案された重力補償装置の精度を確認するため Fig.3 に示すような展開構造物の無重力状態での展開トルクを理論値とし、インフレータブル式重力補償装置を用いて重力補償実験を行った際の展開トルクと比較を行う。

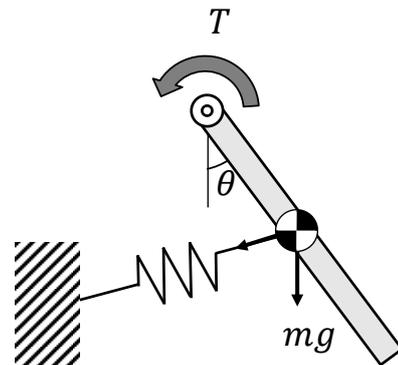


Fig.3 Deployment structure

性能試験に用いる展開構造物は、1 自由度の展開機構を持つ片持ち梁として金属メッシュ等の反力を模擬するため、ばねを取り付けている。この展開構造物の展開力は一定の角速度（本研究においては 0.48 rpm）で動作するステッピングモーターである。今回使用したステッピングモーター

はオリエンタルモーター社製「AZM66A0K」、DC電源入力ドライバとして同社製「AZD-KD」を使用している。このステッピングモーターは、出力トルクを計測する機能を有しており、自ら作成したプログラムによって 0.2 s ごとに出力トルクの記録が可能である。ステッピングモーターの出力軸に何も取り付けずにモーターを回したところ、Fig.4 に示すような初期トルクが発生していることが分かった。

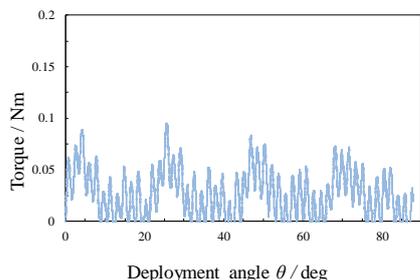


Fig.4 Noise of stepper motor

初期トルクはモーター内の慣性などによるものであると考えられるが、回転角を制御し設定した原点から回転運動を開始すると初期トルクに再現性があることが確認できた。そこで展開試験を行った際のトルクデータから事前に取得した初期トルクの値を引いたものを展開トルクとした。

### 3.3 無重力状態での展開トルク特性

展開構造物の無重力状態での展開トルク  $T^{ref}$  は、展開軸に発生する慣性モーメントを  $I$ 、展開構造物の各加速度を  $\alpha$ 、展開構造物に接続したばね定数を  $k_s$ 、ばねの自然長からの伸びを  $x$  として式(2)で表せる。

$$T^{ref} = I\alpha + k_s x l \quad (2)$$

また、重力環境下の展開トルク  $T$  は、モーターの角速度を  $\omega$  として式(3)で表せる。

$$T = mg \sin \omega t + I\alpha + k_s x \quad (3)$$

本研究において、展開構造物は等速で展開を行うため式(2)(3)の慣性モーメントによるトルクは

発生しない。

理論値と装置構成の妥当性検証のため、現在多くの展開試験に用いられる吊下げ式重力補償装置を用いた試験を行った。Fig.5 に妥当性検証結果を示す。

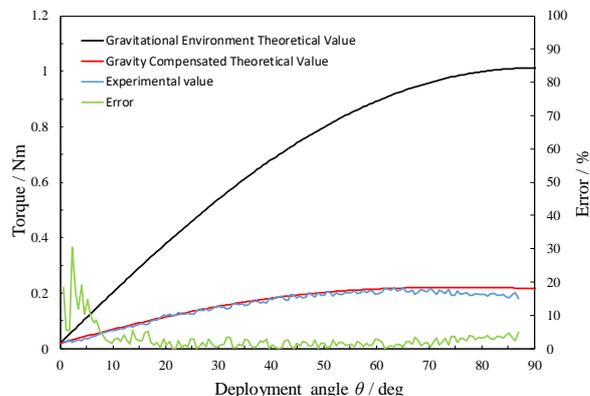


Fig.5 Verification result of theoretical value

Fig.5 より、無重力状態での理論値と検証のため行った実験結果が理論値との平均誤差率 2.3 %と同様の傾向を示したため、式(2)に示した無重力状態の理論値を目標値として採用した。

## 4 実験結果

提案したインフレータブル式重力補償装置を用いて行った重力補償実験の結果を Fig.6 に示す。本装置の理論値との平均誤差率は 12.4 %であった。

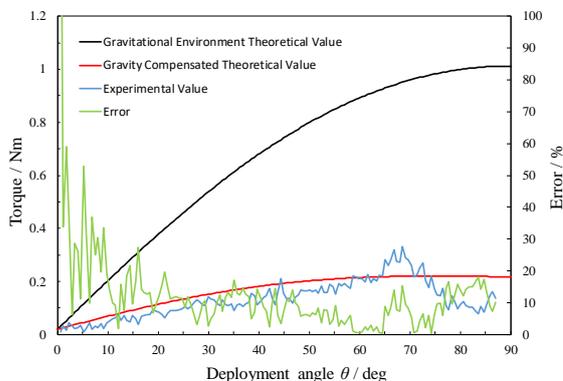


Fig.6 Experimental result of proposed gravity compensator

## 5 考察

本装置における誤差要因として大きく2つの原因が考えられる。1つ目は、先述の通り左右移動が手動である点である。また2つ目は、インフレーターチューブ特有の問題である。

1つ目の誤差要因と考える手動での左右移動は、高さ方向機構の研究を先行して行ってきたため、現状では本研究室で提案されたエアテーブルの実装と実験に至っていないことが原因である。左右方向の移動を手動で行っているため、展開構造物と重力補償装置の摩擦低減のため展開構造物先端にキャスター（ベアリング）を取り付けているものの、摩擦力によって展開トルクに影響を与えている可能性が否定できない。

2つ目の誤差要因として考えるインフレーターチューブ特有の問題は、Fig.7 に示すようなS字状に湾曲するものや内側から外側へチューブが押し出されてしまうようなものである。これらの変形は、円筒折り紙によるチューブ作成においてひずみを許容しなければ折りたたむことができない。という特徴から発生するものであると考えられる。この特徴から発生したひずみが蓄積されることによってS字状の変形などが発生し、事前に計測したバネ定数が重力補償実験中、不安定になってしまう。



Fig.7 Deformation of inflatable tube

また、複数のサンプルを作成し、チューブのバネ定数測定を行ったところ、バネ定数に再現性が乏しいこともわかっている。

## 6 結言

本論文において、まず初めに本研究室で提案されたインフレーター式重力補償装置の概要を述べ、性能試験が不十分であることを挙げた。そこで、我々は1自由度を持つ片持ち梁のトルク測定による性能試験方法を提案した。この性能試験方法は、従来の展開構造物に利用された吊下げ式重力補償装置を用いてその妥当性検証を行い、展開トルク測定に問題がないことを確認した。提案した重力補償装置を利用し、本研究室で提案されたインフレーター式重力補償装置の性能試験を行ったところ、目標値（無重力状態の展開トルク）に対し、12.4%の平均誤差率であった。これらの誤差要因は、装置の左右方向移動が主導であること、インフレーターチューブの変形と製作誤差が大きいことが原因であると考えられる。

よって、本研究において重力補償装置の性能試験法を示すことができた。しかし、本研究室で提案されたインフレーター式重力補償装置は、左右方向に高さ方向を追加した新型下方支持式重力補償装置の可能性を示せたものの、実用化に向けて多くの課題が残されていることが分かった。そこで、今後の研究課題として左右方向機構の実装と実用化しやすい上下方向機構の開発が必要になると考えられる。

## 7 参考文献

- [1] 新館恭嗣ら:大型展開アンテナ反射鏡部,通信総合研究所季報,49巻,pp.27-32(2003)