

**Application of vibration control  
by micro tension actuator to flexible space structure\***

**Yukitaka Kojima, Hironori A. Fujii, Tairo Kusagaya,  
and Takeo Watanabe**

**Tokyo Metropolitan University**

**Postal address : 6-6, Asahigaoka, Hino, Tokyo, 191-0065, Japan**

**Abstract**

Effectiveness of vibration control is examined by employing tether on the flexible space structures like tether SSPS in this paper. The vibration control is analyzed numerically to simulate the behavior of beam-tether system with mathematical description of a partial differential equation, and the effectiveness is shown for the tether tension control. Non linearity of the flexible tether is considered in the simulation. Vibration control experiment is also examined on an experiment model and the result is compared with that of numerical analysis. A micro tension actuator is analyzed in its performance to generate a very small tension employed for the vibration control experiment of this model. It aimed to make a mathematical model about the actuator used when the vibration was controlled, to compare with an actual performance, and to optimize it to the control experiment.

---

\* Presented at the 11<sup>th</sup> SPS Symposium, 17-18 September, 2008

# 微小張力アクチュエータによる振動制御の柔軟宇宙構造物への適用

小島幸高、藤井裕矩、草谷大朗、渡部武夫（首都大学東京大学院）

191-0065 東京都日野市旭丘 6- 6

## 1.はじめに

近年エネルギー問題が深刻になってきている中で、クリーンで無尽蔵なエネルギーを得られる技術として昨今注目を浴びているのが、宇宙太陽発電衛星（Space Solar Power Systems: SSPS）である。SSPS とは、宇宙空間で得られる太陽エネルギーを利用して発電し、その電力をマイクロ波により地上に伝送し、地上に電力を供給するシステムのことである。無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)によって提案されているテザー型 SSPS は、テザー技術を用いることで、構造重量の軽量化による輸送コストの削減や自律的な構築を可能にし、重力傾度安定化を図るものである。

テザー型 SSPS は大型構造物であり、発電電パネルは柔軟であるので、振動が発生する可能性がある。また、地球局のレクテナに正確に送電するためには発電電パネルの振動を抑えなければならない。これまでに SSPS の振動制御に関する研究として、モード解析や偏微分方程式による記述などで数値的な解析はされているが[1-2]、実験的にその挙動確認される例はこれまで少ない。本研究では過去に作成した SSPS の地上実験 2 次元モデル[3]に対して、テザー張力を用いた振動制御実験を行い、テザーによる振動制御の有効性を示すことを目的とした。また、振動制御の際に用いる微小張力アクチュエータ[3]について、数値モデルを作成し、実際の性能と比較、検討を行い、制御実験に最適化することを目的とした。

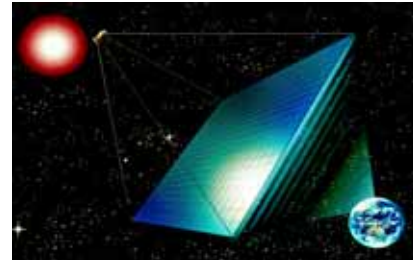


Fig.1 USEF 提案テザー型 SSPS 実証モデル

## 2.実験モデル

本研究では解析的、数値的な検証に加え、地上実験によりその力学特性の検証を行う。無重力環境を模擬するための手法として、吊り下げた錘を柔軟梁でつなげることによって柔軟宇宙構造物を模擬し、一種の 2 次元微小重力状態が模擬した。システムの概観を Fig.2 に示す。実験モデルを設計するに当たって運動方程式が必要となるため、運動方程式の導出について述べる。ここでは、モデルの運動を両端自由端の梁の運動と考える。そのためオイラー・ベルヌーイ梁の曲げの振動運動方程式は以下ようになる。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

(1)式からシステムの固有振動数は次式で表すことができる。



Fig.2 トラス無し実験装置概

$$\omega_n = \left(\frac{\lambda}{l}\right) \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2)$$

$\omega_n$ : n 次円固有振動数  $f_n$ : n 次振動数  $\lambda$ : 固有値  $l$ : 梁の長さ

よって、梁と錘の選定によって、任意の周波数を現すモデルを設計することができる。

今回のモデルはUSEF提案のSSPS実証型モデルを元に設計しており、過去の研究における数値解析の結果より、1次モードにおいて0.4Hz、2次モードにおいて1.0Hzとなるように実験モデルを作成した。

### 3.微小張力アクチュエータ

本研究において実験モデルは実際の宇宙構造物に近い、必要となる制御力の大きさはきわめて微小である。本研究のモデルの振動を MF 制御を用いてテザー張力によって制御した数値解析の例を以下に示す。

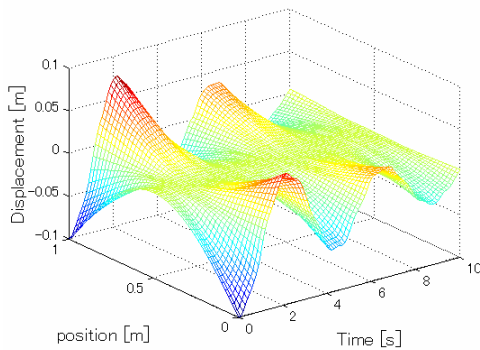


Fig.3 時間応答

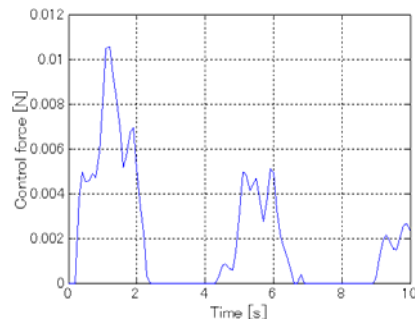


Fig.4 制御力の時間

制御には MF 制御を用いて以下に示すような制御力を、両端の速度が正のときテザーによる張力として両端に加えて制御した。

$$P_L = -k \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)_L, P_0 = -k_0 \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)_0 \quad (3)$$

数値解析からもわかるように用いる制御力は微小であり、通常のモータなどでは 0.01N オーダーの微小な張力を再現することは困難である。そのため、本研究では柔軟なレバレッジとリニアモータアクチュエータを組み合わせることで任意の微小張力を発生させるアクチュエータを製作した。

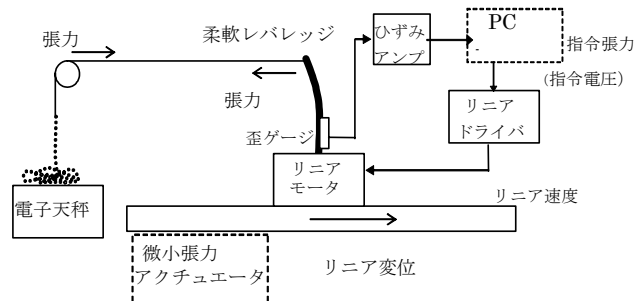


Fig5.微小張力アクチュエータ概略

性能は、分解能が 0.001N で、分解能は 0.001N、0~約 0.1N 程度の任意の微小張力を出力す

る。また、低周波数領域ほど時間遅れの影響は小さく、指令通りの張力を発生させることができる。また、フィードバックゲインを大きくするほど、時間遅れは小さくなるが、偏差が大きくなる（指令通りの張力を発生しにくくなる）。

#### 4. 振動制御実験

画像解析による速度センサーと、微小張力アクチュエータ、実験モデル、制御実験のプログラムを組み合わせ、下記のブロック線図で示される実験を行った。

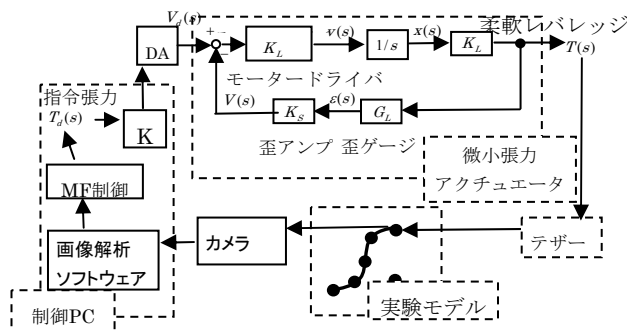


Fig.6 制御実験のブロック線図

実験モデルに約 150mm の初期変位を与え、その拘束を開放して実験を行った。実験結果を以下に示す。

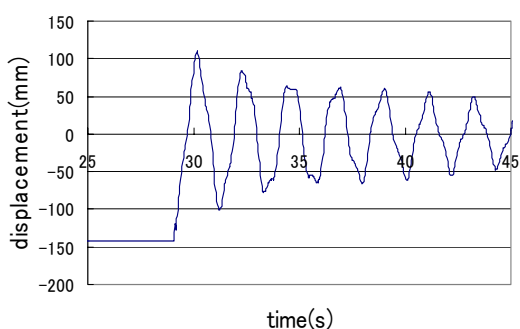


Fig.7 実験モデル先端の変位の時間履歴 (非

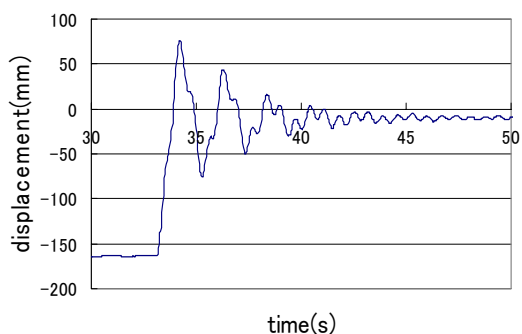


Fig.8 実験モデル先端の変位の時間履歴

結果から分かるように、微小張力アクチュエータによる制御力を加えることによって、実験モデルの振動を抑制することができている。しかしながら、実験においてテザーはたるんでしまっており、実験モデルの振動は、柔軟レバレッジのダンピングによる減衰による影響を受けていると考えられる。なお、振動が収まり定常状態になった時の変位が 0 でない理由に関しては、制御の際に常にプリテンションをかけているため、そのプリテンションとつりあった位置で実験モデルが定常状態になるからである。

#### 5. 微小張力アクチュエータのモデリング

振動制御実験において、テザーがたるんでしまうなど、微小張力アクチュエータが実験に最適であるとは言い難い。微小張力アクチュエータの性能は、柔軟レバレッジの材質、形状や、テザーの材質などのパラメータによって変化する。そこで、微小張力アクチュエータ-テ

ザー校正用ロードセルからなる系に関してモデリングを行い、振動制御実験に最適なパラメータを決める。微小張力アクチュエータとテザー、実験モデルから成る系を下記の図のように、モデル化を行った。柔軟レバレッジ部分をバネ、マス、ダンパーで表現し、テザー部分についてはバネとして扱った。

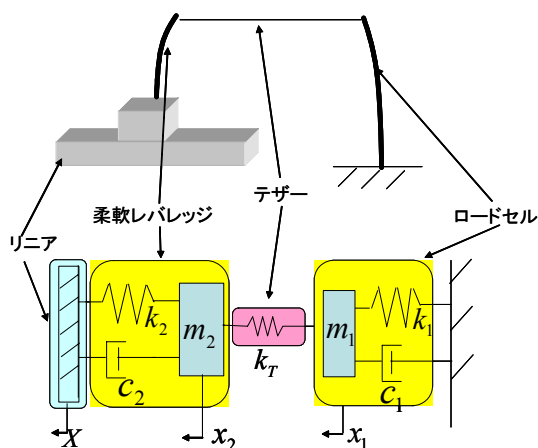


Fig.9 変位の時間履歴 (制御時)

運動方程式は

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 - k_t (x_1 - x_2) - C_1 \dot{x}_1 \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k_2 (x_2 - X) - k_t (x_2 - x_1) - C_2 (\dot{x}_2 - \dot{X}) \quad (3)$$

リニアアクチュエータの制御式は

$$\dot{X} = G \cdot \left( \frac{T_c l}{EI} - \frac{2}{l^2} x_2 \right) \quad (4)$$

$T_c$ : 指令張力[N]

となり、これらの連立常微分方程式を4次のルンゲクッタ法を用いて解いた。数学モデルから得られた結果以下に示す。

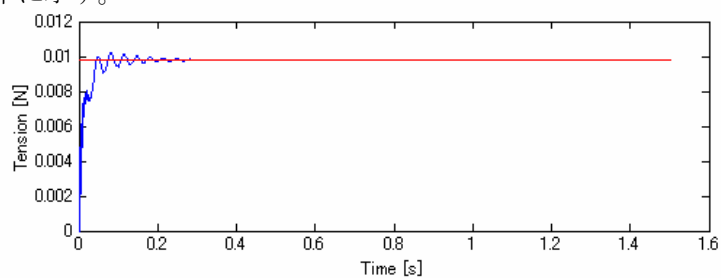


Fig.10 解析結果 (指令張力一定)

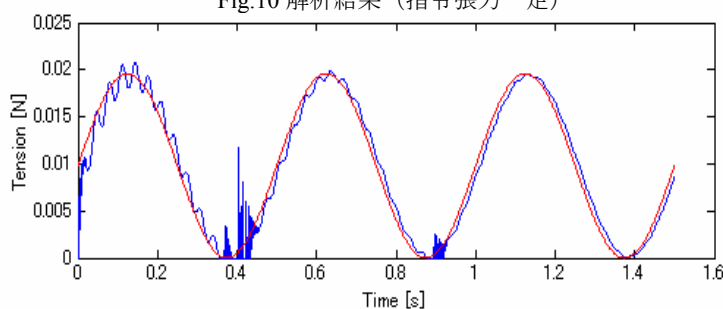


Fig.11 解析結果 (指令張力が周期関数)

数学モデルから得られた結果は、ゲインを大きくするとレバレッジの振動が発散する、位相遅れが小さくなるなど、実際の実験から得られる性能と傾向が似ている。また、テザーのバネ定数を非線形にすることで、テザーのたるみを表現できた。

## 5.今後の課題

今回行った振動制御実験においては、現状の微小張力アクチュエータでは追従性が悪く、テザーがたるんでしまい、指令通りの張力を実験モデルに伝えられていない。また、レバレッジのダンピングにより、実験モデルの振動が減衰している。そのため、微小張力アクチュエータのモデリングを行い、実験への最適化を行う必要がある。そこで必要となる微小張力アクチュエータのモデリングについては、作成し、定性的に評価を行ったが、実験値との比較、検討を行っていないため、今後は実験との比較、検討を行い、定量的評価を行う必要がある。そして、作成した数学モデルを用いて、柔軟レバレッジの材質や形状、そしてテザーの材質や、フィードバックゲインを変化させ、アクチュエータの追従性と張力ゲインのトレードオフを行いながら、最適な組み合わせを見つけ、その組み合わせで実際の微小張力アクチュエータを構成することを予定している。また、現状では振動制御の際に実際に実験モデルに働いている張力を計測していない。そのため、今後はこの張力の計測も行いながら、振動制御実験を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] 宇宙太陽発電システム (SSPS) 実用化技術検討委員会審問委員会“SSPS 実証実験システム 概念検討書” 無人宇宙実験システム開発機構.2003
- [2] Sekikawa. K. and Fujii.H.. “Control of Flexible Solar Panel by Employment of Tether Tension.” Paper C1-03. *the 10th International Space Conference of Pacific-basin Societies*. December 9-12. 2003. Tokyo Waterfront City. Japan.
- [3] 小島幸高“微小張力アクチュエータによる吊り下げ式テザー型 SSPS モデルのパネル振動制御の研究” 東京都立科学技術大学平成 18 年度卒業論文.2007