

**The study of Dynamic Characteristic Analysis of Tethered SSPS  
By Using of Flexible Space Structure Model**

Yohei Minagawa, Hironori A. Fujii, Yukitaka Kojima, Takeo Watanabe, Tairo Kusagaya, Yusuke Koga

Tokyo Metropolitan University

6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo, 191-0065, Japan

Kenichi Anma, Masayuki Niitsu, Yoshiharu Fuse

Nagoya Aerospace Systems, Mitsubishi Heavy Industries

10,Oye-Cho, Minato-Ku, Nagoya, 455-8515, Japan

Control method is studied numerically and experimentally on vibration of large flexible solar panel for a tethered space solar power satellite by employing tension of tether. Two dimensional model of the solar panel is modeled by two ways; one is to free to vibrate the flexible model on a horizontal flat flight table through air cushion; and the other is to hung the flexible model along about seven meters through tethers and to vibrate along the horizontal plane in a micro-gravity condition. Tether is attached at the end of the corners of the flexible two-dimensional model and the tension of tether is controlled by the mission-function algorithm by feeding back the deflection at the end of tether. Two cases are compared for each experimental model; one is with thickness double to keep the rigidity of the solar panel resulting in double in its weight, and the other is with half thickness equipped with tether. The models are analyzed in their behavior of flexible motion for each case numerically and experimentally. Results of these analyses show that the tether control can reduce the weight of the solar panel effectively by decreasing the amplitude of vibration. The performance of the tether tension control is also confirmed to reducing the vibration and weight of the flexible solar panel.

# 柔軟宇宙構造物模擬装置によるテザー型SSPSの動特性解析

皆川洋平, 小島幸高

古賀雄介, 渡部武夫, 草谷大郎, 藤井裕矩 (首都大学東京)

安間健一 新津真行 布施嘉春 (三菱重工)

## 1. はじめに

現在, 原子力発電などの安全性や化石燃料の枯渇といったようなエネルギー問題が深刻化している. そこで新たなるクリーンなエネルギー供給源が要求されている. そこで宇宙太陽発電衛星システム(SSPS)が期待されている. SSPSとは, 宇宙空間で太陽光発電し, 電力をマイクロ波に変換して地上局に送電し, 地球に電力を供給するものである. このシステムは二酸化炭素を発生しないクリーンな発電システムであり, 自然エネルギーを安定供給できることが特徴である.

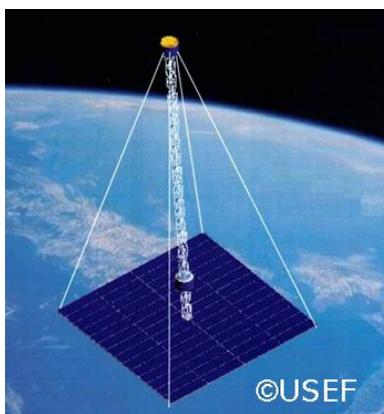


Fig.1 USEF 提案テザー-SSPS 実証モデル

無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)が提案するテザー型SSPS実証モデル (20m×22m×30m級)<sup>[1]</sup>は重力傾度安定を得るために構造要素にテザーを用いている. テザーをシステムに取り入れることによって構造の軽量化を図っている. またテザー張力によりシステムの剛性の増強, 更にマイクロ波送電の際にある程度の面精度が要求されるため太陽電池パネルの振動抑制時テザー張力を用いた振動抑制効果が可能といった特性を持っている.

## 2. 目的

テザーを伴う柔軟宇宙構造物に関して, テザーによる柔軟構造制御の有効性を明らかにすることを目的とした. 偏微分方程式<sup>[2]</sup>を用いた柔軟パネル-テザー系の柔軟構造制御シミュレーションによる数値解析を行い, テザー張力制御の有効性を示した. また柔軟パネル-テザー系の2次元簡易モデルによる実験を行い, 実験結果と数値解析結果が一致していることを検証し, 数値解析の有効性を実験的に検証した.

## 3. 柔軟パネル-テザー系の制御特性解析

数値解析における検討モデルとして柔軟パネル中央にトラス構造のマストがある SSPS 実証モデルを取り扱った. 非定常な外乱モーメントがマスト基部からパネルに印加され, 振動が励起されたパネルはその四隅においてテザー張力による振動抑制制御を行い, 制御しない場合とでのパネル端部の挙動を比較した. なお, 外乱モーメントは, 軌道維持のための推進を想定しており, トラス構造のマスト部から外乱モーメントがパネル中央部に伝わるものである. スラスタによる外乱は, システムの質量中心からオフセットした位置に,

スラスト推力が働く場合を想定した。

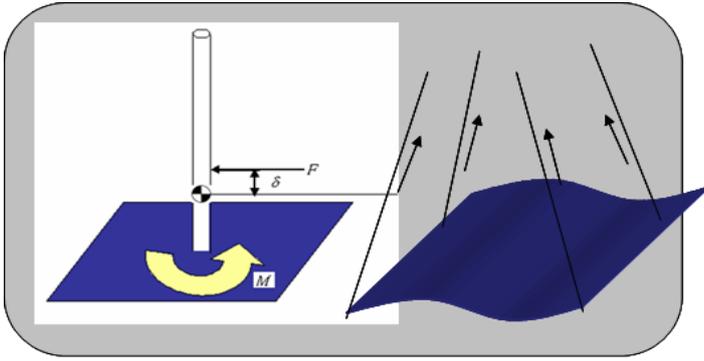


Fig.2 パネル外乱印加とテザー張力制御

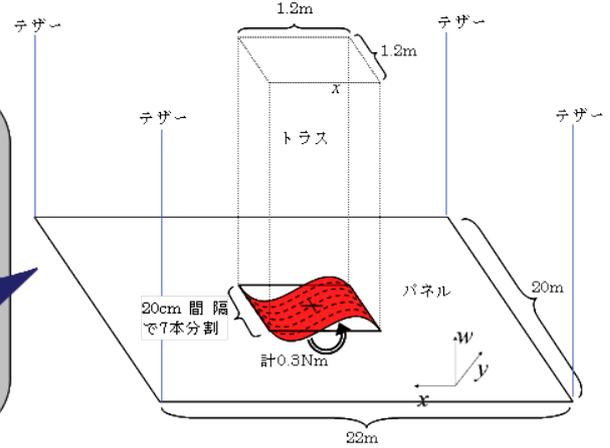


Fig.3 検討モデル

数値解析の条件として、パネル中央部に非定常な外乱モーメントが2秒間印加した時と同等の歪を境界条件とした。発電パネルの運動方程式は(1)式の偏微分方程式で表すことができ、これを用いて数値解析をおこなった。また、パネルのパラメータはTable1に示す。

Table1 システムモデルのパラメータ

パネル部質量	$m = 13000$ [kg]
パネル形状	$22[m] \times 20[m]$
パネル面密度	$\rho = 29.55$ [kg/m <sup>2</sup> ]
軌道高度	$H = 500$ [km]
軌道傾斜角	$\theta = 0.0$ [deg]

$$\frac{D}{\rho h} \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = G \quad (1)$$

ただし、

$$G = -\Omega^2 \frac{m_b}{M} (3u_1 - 4\theta_3 u_2 + 4\theta_2 u_3) - 2\Omega \frac{m_b}{M} u_1 \frac{\partial \theta_3}{\partial t} - 2\Omega R_G \left( (\theta_3 + 1) \frac{\partial \theta_1}{\partial t} + (\theta_1 - 1) \frac{\partial \theta_3}{\partial t} \right) + \Omega^2 R_G (\theta_1 \theta_3 + \theta_2 \theta_3) - 2R_G \left( \frac{\partial \theta_1}{\partial t} \frac{\partial \theta_3}{\partial t} + \frac{\partial \theta_2}{\partial t} \frac{\partial \theta_3}{\partial t} \right) - R_G \left( \theta_1 \frac{\partial^2 \theta_3}{\partial t^2} + \theta_3 \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial t^2} \right) \quad (2)$$

境界条件としてパネルの四辺は自由端、4隅にはテザーによる制御入力に加えられるという境界条件であるので曲げモーメント  $M_x, M_y$ 、等価なせん断力  $Q_x, Q_y$  は

$P_i$

$P_i$

(3)

ここで、ミッション関数の時間微分をとり、その値が不定値を取るように制御入力を決定すれば、パネル全

体のエネルギーが減少し、振動が抑制されることになる。

$$\frac{dMF}{dt} = \int \int \left\{ \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + D \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) \right\} \frac{\partial w}{\partial t} dx dy + \int \left\{ \left[ P_i \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right) \right]_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \right\} dy + \int \left\{ \left[ P_j \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right) \right]_{-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \right\} dx \quad (4)$$

これにより、ミッション関数の時間微分を不定にする為の制御入力  $P_i$  を

$$P_i = -k_i \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)_i \quad (i = 1 \sim 4) \quad (5)$$

のように決定した。ここで、 $k_i$ は正の値を取るものとする。

以下に数値解析によるテザー張力制御がない場合とある場合でのパネル端部の時間応答と周波数応答を示す。このことからパネル端部の振幅はテザー張力制御を用いることによって、それが無いものよりも振幅を著しく抑制しており、また早く振幅を抑制することができたといえ、その有効性を示すことができた。

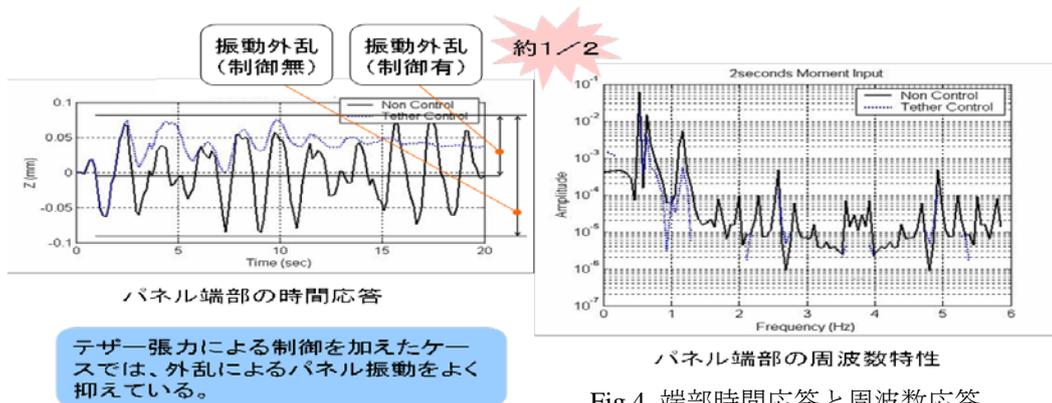


Fig.4 端部時間応答と周波数応答

#### 4. 柔軟パネル-テザー系の実験検証

ここでは2次元パネルの運動を実験で解析した結果と数値解析の結果を比較して数値解析の有効性を検討した。本研究で用いた実験モデルはFig.5に示す。これはテザーSSPS実証モデルの2次元模擬モデルであり、水平定盤上でガス圧<sup>[3]</sup>を用いた小型浮遊装置

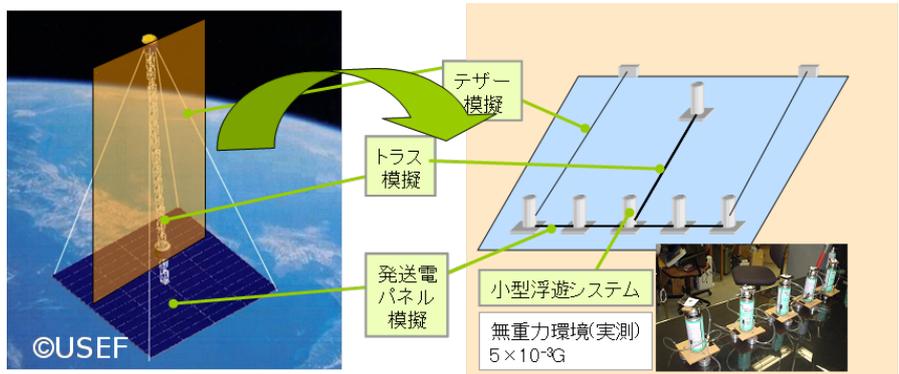


Fig5. 実験モデル概要

置を部材で連結してパネルを模擬し、無重力環境におけるシステムの運動を模擬した。

この模擬パネルを一次モードに近似するような初期形状を与え、その両端を糸で拘束し、解放した後の端部における挙動の数値解析と実験解析結果による時間応答と周波数応答を比較した。Fig.6は数値解析結果を示す。これよりテザーを有することでそれを有しない場合と比べ、時間応答の図からパ

ネルの振幅はテザーを有しない場合の 0.3m からそれを有する場合の 0.15m まで抑えることができ、また周波数は 1 次モードから高次モードへ遷移し、1 次モードの周波数は 0.2Hz から 0.4Hz へ変化することが数値解析の結果からわかった。

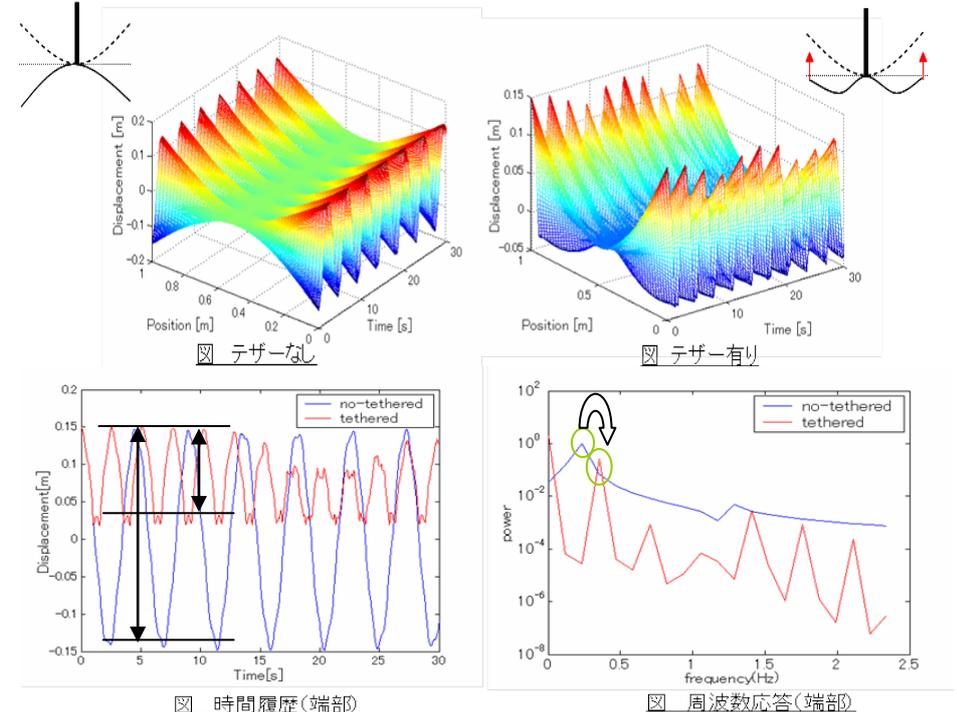


Fig6.端部の時間応答と周波数応答 (数値解析)

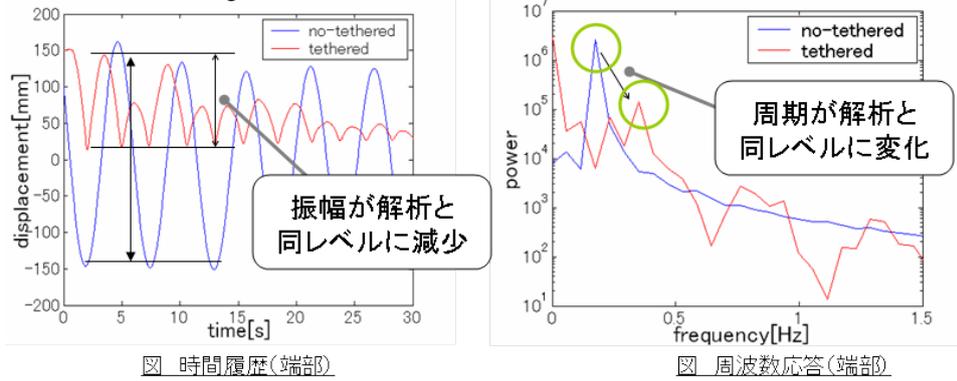


Fig.7 端部の時間応答と周波数応答(実験)

同様の条件で実験的検証した結果が Fig.7 である。数値解析時と違って実験における摩擦外乱や空気抵抗によるエネルギー損失があるものの端部の時間応答では数値解析と同レベルの変化が得られ、周波数応答でも 1 次モードが高次モードへと遷移しており数値解析と同レベルの変化を示した。このことから偏微分方程式を用いた数値解析手法の有効性を示すことができたといえる。

## 5. まとめ

本研究ではテザーを伴う柔軟宇宙構造物に関して、テザーによる柔軟構造制御の有効性を明らかにした。まず柔軟パネル-テザー系の柔軟構造制御シミュレーションによる数値解析を行い、テザーによる柔軟構造制御が無い場合と比較して約 1 / 2 の振動レベルに抑えられたことから、その有効性を示すことができた。また柔軟パネル-テザー系の 2 次元簡易モデルによる実験を行い、数値解析から得られた特性と実験で得られた特性とが概ね一致したことから、数値解析の有効性を実験で検証できた。

[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] 藤川洋一郎 “編微分方程式の解法” サイエンス社 1981
- [3] 気体軸受設計ガイドブック 十合晋一著 共立出版 2002.1