

# System Dynamics of a Space Solar Power System with Gravity Gradient Stabilization\*

Kosei ISHIMURA

Hokkaido Univ.

N14-W9 Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0814, Japan

Ken HIGUCHI and Susumu SASAKI

ISAS/JAXA

3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229-8510, Japan

## Abstract

A Space Solar Power System (SSPS) with gravity gradient stabilization has been proposed at the Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer and ISAS/JAXA. In this paper, the system dynamics during the construction and usual operation is investigated.

At first, the effect of construction way on the attitude stability of the SSPS is evaluated. As the construction ways, “line construction” and “construction with similarity” are considered. In the former way, the modules of solar panel are arranged in the shape of line. In the latter way, the satellite system is constructed keeping similar configuration. Therefore, tethers are extended in accordance with the step of construction in the construction with similarity. In the line construction, tether length should be fixed to the final length from the first step of the construction for the gravity gradient stabilization. Through approximate estimation and dynamical analysis, it is shown that the roll and yaw angles tend to divergence in first step of the “line construction”. In the “construction with similarity”, such divergences in the roll and yaw angles can be avoided. However, the resorting torques around the yaw axis is weak in the first step of construction with similarity. Therefore, for both construction ways, active attitude control is desired in first step of the construction.

Next, we investigate the coupling between structural vibration and attitude motion during the usual operation. Simulation results reveal that the coupling occurs if most of tethers are slack. Thermal deformation of the solar array is one cause of tether slack. Thermal deformation and the induced attitude motion are also investigated. It is shown that roll and yaw motions become unstable due to thermal deformation.

---

\*Presented at the 8<sup>th</sup> SPS Symposium, 16-17 September, 2005

# 重力傾斜安定型 SSPS におけるシステムダイナミクスの検討<sup>注1</sup>

石村 康生

北海道大学 大学院情報科学研究科  
060-0814 北海道札幌市北区北14西9

樋口 健, 佐々木 進

ISAS/JAXA  
229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1

## 1. はじめに

現在, USEF 及び ISAS/JAXA において, 図1に示す宇宙太陽発電システム(SSPS)が提案されている[1,2]. その特徴として, マルチテザーによる吊り橋のような支持構造, 発電電一体型パネル, 重力傾斜による姿勢安定化などが挙げられる. 本論文では, この SSPS を対象に, 組立時及び運用時における姿勢運動と構造の動特性の評価を行う. 組立時に関しては, 姿勢運動を考慮した組立手順の検討を行う. 定常運用時には, 姿勢運動と構造振動の連成についての解析を行う.

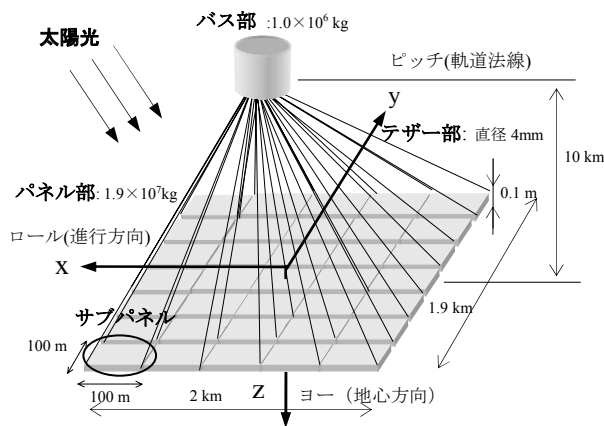


図1 SSPS

## 2. 組立時の姿勢安定性

組立手順としては, ここでは特に, パネル部の結合手順とテザー長の伸展手順について検討する. 基本方針として, 前後左右の対称性を保つこと, 重力傾斜安定を維持するために衛星の慣性モーメントを, ピッチ軸周り ( $I_y$ ) が最大, ヨー軸周り ( $I_z$ ) を最小に保つこととする.

パネル部の組立手順として, 上記の方針に従って, 図2の A.1 ライン型結合と A.2 相似型結合を検討する. テザーの伸展手順としては, 図3に示す初期段階から最終長に固定する B.1 テ

ザー固定型, 組立段階に応じて伸展する B.2 テザー変化型を考慮する. これらのパネル結合手順 A, テザー伸展手順 B の組み合わせは, 本来 4 パターン存在するが, ライン型結合においては, 各軸周りの慣性モーメントの大小関係を保つために, 初期段階からテザー長が十分長いことが必要である. よって, A.1+B.1, A.2+B.1, A.2+B.2 の 3 パターンを検討する. 以下に, 検討結果を示す. 理論背景の詳細は参考文献[3]を参照されたい.

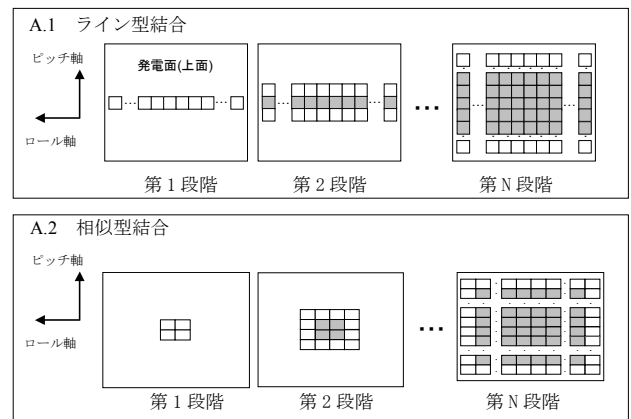


図2 パネル結合手順

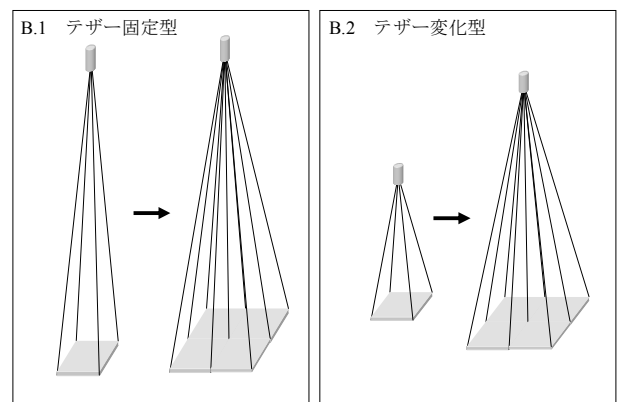


図3 テザー伸展手順

<sup>注1</sup> 第8回 SPS シンポジウム, 帝京大学にて 2005 年 9 月 16, 17 日開催

• **A.1 ライン型結合+B.1 テザー固定型**

組立初期において、ヨー軸周りの姿勢運動の固有振動数が軌道運動とほぼ一致し、ロール軸周りは、軌道運動のほぼ2倍となる(図4)。そのため、太陽輻射圧トルク等の周期外乱とヨー軸周りの姿勢運動が共振する。

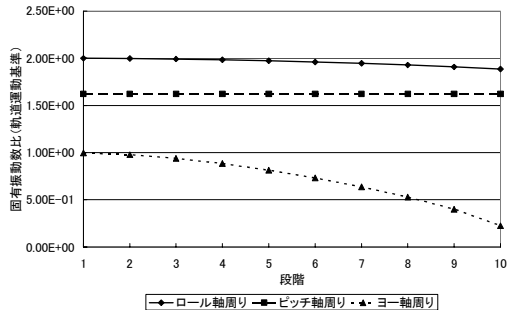


図4 各組立段階での固有振動数比 (A.1 ライン型結合+B.1 テザー固定型)

• **A.2 相似型結合+B.1 テザー固定型**

テザー固定型の場合は、上記と同様に組立初期において、ロール軸周りの姿勢運動の固有振動数が軌道運動のほぼ倍となる。そのため、太陽輻射圧トルク等の周期外乱とロール軸周りの姿勢運動が共振する。

• **A.2 相似型結合+B.2 テザー変化型**

テザー長を組立段階に比例して伸展させ、衛星全体を相似形状で組み立てるため、組立途中において、ロール、ピッチ、ヨー軸周りの固有振動数は常に一定である。軌道運動の振動数を  $f_0$  [Hz] とすると、姿勢運動の振動数は、

- ロール :  $1.89 \times f_0$  [Hz]
- ピッチ :  $1.62 \times f_0$  [Hz]
- ヨー :  $0.23 \times f_0$  [Hz]

である。よって、軌道運動に伴った太陽輻射圧等の周期外乱との共振を回避できる。

しかしながらこの組立手順では、組立初期段階において、外乱トルクに対する重力傾斜の復元トルクが十分ではない。各組立段階での外乱トルクに対する釣り合い姿勢角を図5に示す。これによれば、組立初期段階では釣り合い姿勢角がヨー軸周りで  $0.5$  [rad] (約  $29$  度) となり、十分な姿勢精度が実現出来ないことが分かる。つまり、本組立手順では、最終段階では太陽輻射圧による外乱トルクに対して十分安定な復元トルクを有しているが、組立初期段階では十分な復元トルクがないことがわかる。

上記の原因を考察する。外乱トルクはパネル面積  $S$  とテザー長  $L$  の積に比例し、これは組立

段階  $n$  の3乗に比例する。これに対して、復元トルクは慣性モーメントに比例し、これは組立段階  $n$  の4乗に比例する。よって、 $n$  が小さい組立初期段階では、外乱トルクに対して、復元トルクが十分ではない状況が生じる。

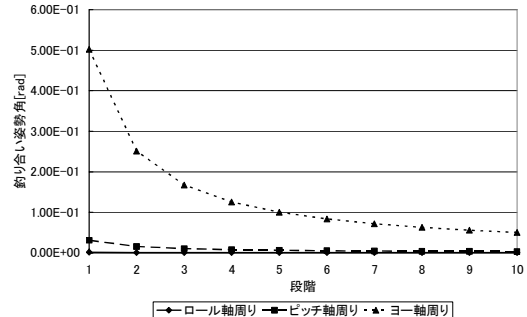


図5 各組立段階での釣り合い姿勢角 (A.2 相似型結合+B.2 テザー変化型)

以上より、組立初期段階において姿勢運動の外乱に対する共振を防ぎ、十分な復元トルクを得るためには、重力傾斜トルク以外の姿勢安定化機構の検討が必要であるといえる。

3. 運用時の姿勢運動と構造振動の連成

3.1 テザーのスラックと連成について

本節では、定常運用時の姿勢運動と構造振動の連成について検討を行う。計算の都合上、ここでは表1に示す小規模SSPSの解析を行う。ただし、図1のものとはほぼ相似形状であり、姿勢の固有振動数及びパネルの振動モード形状が同様になるように設定した。

表1 解析モデルのパラメータ

パネル部	バス部	質量: $m_b$	$3.3 \times 10^5$ [kg]
		質量: $m_p$	$1.05 \times 10^7$
		パネル部全体サイズ	$1.5 \times 1.4$ [km]
		サンドイッチパネルの厚み	0.1 [m]
		サンドイッチパネル上下面の板厚	0.5 [mm]
		サブパネルのサイズ	100×100
		サブパネル数	210 (15×14)
		ヤング率	70 [GPa]
		ポアソン比	0.3
		熱膨張係数	$2.3 \times 10^{-5}$ [K <sup>-1</sup> ]
テザー		直径	2.8 [mm]
		テザー本数	240 (16×15)
		テザー鉛直長さ: $l_t$	5.8 [km]
	ヤング率	70 [GPa]	

以前の研究[4]から、定常運用時において、テザーの Slack が無い場合は、姿勢運動と構造振動の連成が生じないことがわかっている。しかしながら、テザーの伸びは LEO (500km) で約 50cm, GEO で約 2mm であり、非常に小さい。よって、パネルの熱変形によって容易にテザーの Slack が生じると考えられる。例として、図 6 に GEO においてパネル上面に対して下面が 0.1 度高い場合のパネル部の変形の様子を示す。z 軸の原点はテザーが自然長の状態を示しており、パネルの z 軸方向の変位が、テザー長の伸びに対応する。さらに図 7 に、テザー張力の分布を示す。赤線の長さは、最大張力 40[N] で正規化され各テザー張力である。図 6,7 より、熱変形によって多数のテザーが Slack することがわかる。

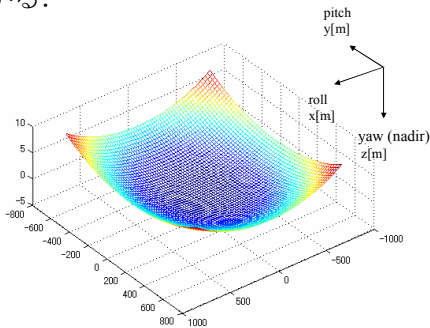


図 6 パネルの変形 ( $\delta_T = -0.1 [^{\circ}\text{C}]$ , GEO)

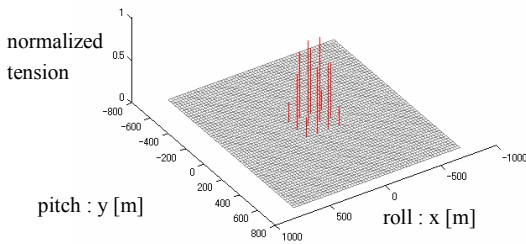


図 7 テザー張力分布 ( $\delta_T = -0.1 [^{\circ}\text{C}]$ , GEO)

次に、Slack したテザーの剛性を 0 として、GEO における姿勢運動を含めた運動方程式の固有値解析の結果を図 8 に示す。図 8 より、1 次の構造振動のモードとロール運動が、2 次のモードとピッチ運動が連成していることがわかる。

姿勢運動と構造振動が連成すると、周期的な構造物への熱入力が姿勢運動へ悪影響を及ぼす可能性がある。次節では、この周期的な熱入力の影響を検討する。

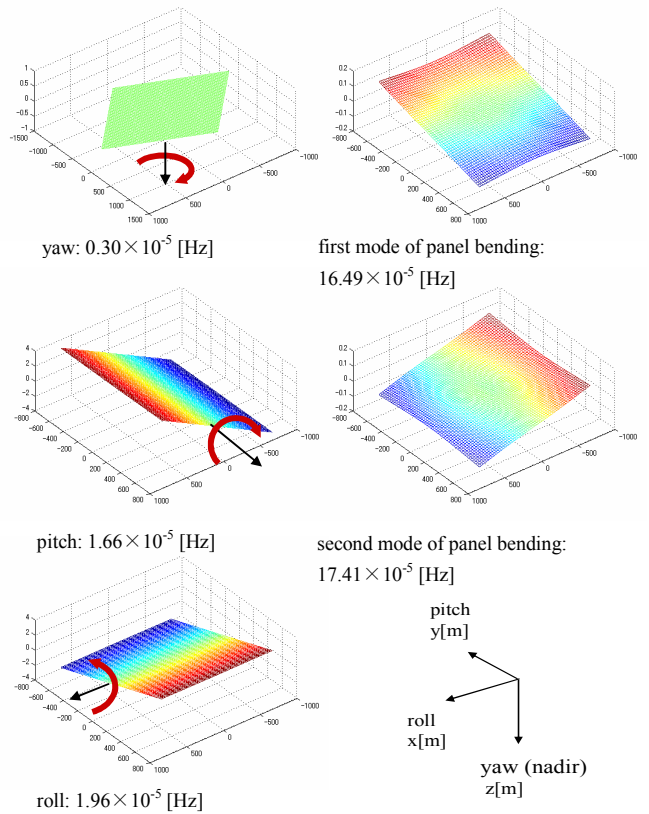


図 8 固有振動数及びモード形状 ( $\delta_T = -0.1 [^{\circ}\text{C}]$ , GEO)

### 3.2 周期的な熱入力が姿勢運動へ与える影響

本節では、例として図 9 の様な周期的な熱入力を加えた場合に生じる姿勢変動についての解析を行った。例として、LEO (500km) の場合の結果を図 10 に示す。図 10 の結果より、周期的な熱入力により、ロール及びピッチ軸周りの姿勢運動が発散傾向にあることがわかる。これは、熱変形によるテザーの Slack が姿勢運動と構造振動の連成を引き起こした結果である。

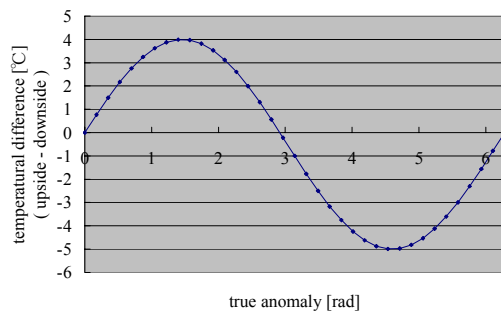


図 9 軌道運動に伴うパネル上下面の温度差の履歴

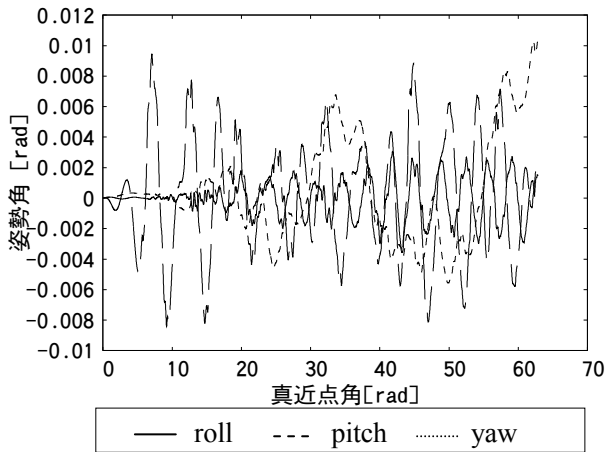


図 10 周期的な熱入力によって誘発された姿勢運動 (GEO)

### 3.3 テザーの Slack 対策の検討

3.1,3.2 節の結果から、(a)大規模な熱変形は多数のテザーの Slack を引き起こし、姿勢運動と構造振動の連成が生じること、(b)姿勢運動と構造振動の連成及び周期的な熱入力、姿勢への悪影響を及ぼしうることがわかった。よって、安定な姿勢運動の実現には、テザーの Slack 対策が重要である。

テザーの大規模 Slack の対策としては、

- i) テザーの定常状態での伸びを大きくする。
- ii) テザーの Slack 要因である熱変形を抑える。
- iii) パネル上下面からのテザー支持(図 11)などが考えられる。

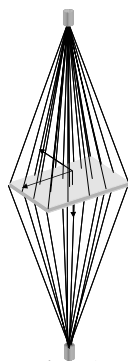


図 11 上下面テザー支持モデル概念図

#### i) テザーの伸び量の調整

テザーの剛性を調整することで、伸び量の増大が図れるが、熱変形は図 6 より 10~100[m] のオーダーであり、伸び量をそこまで増すためには、大幅な剛性低下が必要である。テザーの

剛性を大幅に低下させた場合、構造の固有振動数が低下し、Slack が無い場合でも姿勢運動と構造振動が連成してしまうため、この方法によるテザーの Slack 抑制は好ましくない。

#### ii) 熱変形の抑制

ここでは、サブパネル間の結合を改良することで、熱変形を抑制することを検討する。サブパネル間の結合を図 12 に示すピン結合とし、その効果を確認する。サブパネル間の結合をピン結合とすることで、熱変形がローカルな変形となることが期待される。

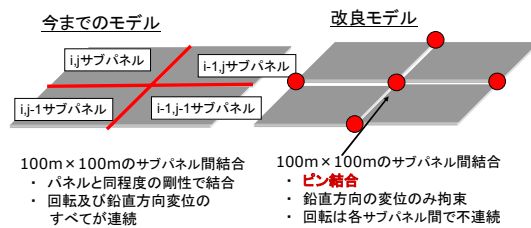


図 12 サブパネル間の結合の改良

パネル間の結合をピン結合にした場合の釣り合い形状の例を図 13 に示す。図 6 と図 13 を比較すると、パネル上下面に温度差が存在しても、システム全体の熱変形が小さいことがわかる。さらに、パネルの z 方向の変位がすべて負であることから、テザーの Slack が生じていないことがわかる。このように、サブパネル間の結合を改良することで、熱変形をローカルな変形とし、テザーの Slack を抑止できる。しかしながら、テザーの初期長に不整が存在する場合は、この方法によっても大規模な Slack が生じることが、別の研究によって明らかにされている[5]。

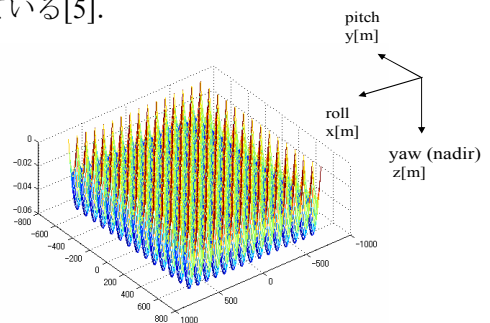


図 13 ピン結合時のパネルの変形 ( $\delta_T = -0.1 [^{\circ}C]$ , GEO)

#### iii) パネル上下面からのテザー支持

パネルを上下面からテザーで支持することで、片側が Slack した場合も、逆のテザーによ

て支持される。それ故、支持しているテザーのバネ係数は半分になるものの大規模なスラックの回避が期待される。この場合、テザーの直径は半分とし、バス部は上下に配置されるため、個々の質量は半分とする。

このモデルでは、テザーの大規模スラックは回避できるが、部品点数の増加や、マイクロ波送電に対する下面テザーの影響などは考慮する必要がある。

#### 4. まとめ

本研究では、複数テザーによって支持された重力傾斜安定型 SSPS に対して、組立時及び運用時のシステムダイナミクスについての検討を行った。組立時の姿勢安定性について、パネルの結合手順、テザーの伸展手順についての検討を行い、組立初期段階においては、重力傾斜トルク以外の姿勢安定化機構の検討が必要であることを明らかにした。

次に、運用中のシステムダイナミクスについて、姿勢運動と構造振動の連成に注目して解析を行った。その結果、発送電部の熱変形によって、テザーがスラックし、姿勢運動と構造振動が連成する可能性があることが明らかになった。よって、大規模なテザーのスラックを回避する必要がある。最後に、スラック対策として、サブパネル間の結合の改良や、パネル上下面からのテザー支持による効果が示唆された。

#### 参考文献

- [1] Takashi Saito, Yutaro Kobayashi, Hiroshi Kanai, “Concept Study of Space Solar Power Systems in USEF,” 55<sup>th</sup> International Astronautical Congress, IAC-04-R.1.02, 2004.
- [2] S. Sasaki, K. Tanaka, K. Higuchi, N. Okuizumi, S. Kawasaki, M. Shinohara, K. Senda, K. Ishimura, and USEF SSPS Study Team, “Tethered Solar Power Satellite,” JAXA Research and Development Report, JAXA RR-03-005E, March 2004.
- [3] 石村康生, 高井伸明, 佐々木進, “重力傾斜安定型太陽発電衛星の外乱環境下での組立手順の検討,” 宇宙技術, Vol.4, 2005, pp.15-20.
- [4] 石村康生, 樋口健, “太陽発電衛星の発送電パネルの振動と姿勢変動の連成,” 第20回宇宙構造材料シンポジウム, 2004, pp.58-61.

- [5] 石村康生, 樋口健, “初期不整を有する非線形弾性支持された平面宇宙構造物の挙動解析,” 第47回 構造強度に関する講演会講演集, 2005, pp.225-227.