

大規模宇宙システムにおける分散情報伝搬機構の開発

石村 康生 [北海道大学大学院工学研究科／助手]

背景・目的

将来予見されるエネルギー問題の解決のための宇宙太陽発電システムや今後の宇宙開発のインフラストラクチャとなる宇宙システムのさらなる発展を目指し、力学的侧面から大規模宇宙システムの解析・制御の新手法の提案を行うことが本研究の背景である。

太陽発電衛星システムは、1970年代に提案されたNASAのリフレンスシステムに端を発し、日本でも宇宙科学研究所でSPS2000計画が検討されてきた。社会的ニーズに対しての本研究の根底にある目的は、太陽エネルギーを用いた半恒久的かつクリーンなエネルギー・システムの提案である。

内容・方法

まず研究対象としては、太陽発電衛星のシステムの動的構造を想定した。研究は、コンピュータを用いた数値実験によって行った。具体的な手順としては以下の3つの段階で研究を行った。

A. 大規模宇宙システムにおけるダイナミクスの観点からの安定性評価

衛星システムをサブシステムに分割し、多剛体系とする。各剛体に対して、外力（重力、遠心力、輻射圧等）による仮想的なポテンシャル場を導出する。このポテンシャル場によって、各剛体の慣性座標に対する位置安定性の評価を行う。これにより、準静的な安定性の評価が可能となる。

B. 要素結合剛性とシステム特性の解析

構造の変形・変位を考えたときに各サブシステム間での相互作用として考えられるのは、歪によって生じる応力である。応力情報の伝播は弾性波によって行われる。このシステムダイナミクスの支配要因である要素結合剛性を変化させ、システムの動力学特性への影響の解析を行う。

C. 要素結合剛性の調整によるシステム特性の変化と制御

B.の知見を元に、要素結合剛性の調整を行う。調整の目的は、通常独立である衛星システムの姿勢変動と構造振動を連成させることである。姿勢変動と構造振動の連成が起きれば、衛星の構造振動を分散制御することによって、振動制御を通じた姿勢安定化が見込まれる。つまり、変数間の連成を起こすことで、応力情報の伝搬を意図的に生じさせ、従来制御出来なかった変数に対する分散的な制御が可能となる。

結果・成果

(A) 大規模宇宙システムにおけるダイナミクスの観点からの安定性評価

例として太陽発電衛星(SSPS)（図2.1）を対象とした。ここでは、衛星システムを分散的なサブシステムから構成されているモジュールシステムとして扱い、この分散システムの安定性をポテンシャルエネルギーによって解析した。ポテンシャルエネルギーとして、重力エネルギー、仮想的な遠心力によるポテンシャルエネルギー、構造のひずみエネルギーを各モジュールに対して導出した。

はじめに、位置・姿勢変動の安定性を数値解析により明らかにした（図2.2）。次に、各モジュールの形状が安定性に与える影響（図2.3）、平衡点周りの安定性（図2.4、2.5）モジュール間結合剛性の変化による安定性への影響（図2.6）を評価し、分散的な個々のモジュール特性がシステム全体に与える影響を明らかにした。

(B) 要素結合剛性とシステム特性の解析

A.で取り扱った太陽発電衛星を単純化し、図3.1のようなダンペ

ル型の重力傾斜安定型衛星についての解析を行った。ここでは、要素結合剛性を変化させた場合のシステム特性への影響を解析した。この場合の系の支配パラメータは、軌道半径に対する軸方向の長さの軸長比 x_{rr} 、質量 m_1 の総質量に対する質量比 m_r 、要素結合剛性によって決まる軌道運動と軸振動の固有振動数比 w_{rr} の3つである。

重要な結果をまとめると、

- ・ 固有振動数比が系の主支配パラメータであり、10以上であれば軸方向の縦振動と姿勢変動・軌道運動とがほぼ独立である。

事が分かった。

以上、要素結合剛性を変化させた場合のシステム特性への影響を解析した。要素間の結合剛性の変化は、応力情報の伝搬速度に影響を及ぼし、各運動の独立性を支配する。これらの応力情報が伝搬され、連成しうる範囲を明らかにした。ここでは、要素間の結合剛性は、固有振動数比として表現されている。構造振動と姿勢変動と軌道運動の連成が生じる衛星の結合剛性領域を解析的に導出し、固有振動数比を表すと、10以上において連成が現れる事を明らかにした。

(C) 要素結合剛性の調整によるシステム特性の変化と制御

最後に、B.の知見を元に、要素結合剛性の調整と姿勢の安定化を試みた。まず、B.のモデルに対して、軸方向の減衰を導入した。さらに、数値計算によって、要素結合剛性によるシステム特性の変化と姿勢の安定化についての解析を行った。以下重要な結果を示す。

- ・ 要素結合剛性によって決まる固有振動数比が280であった場合は、姿勢変動と構造振動はそれぞれ独立であり、構造振動は減衰により漸近安定であるが、姿勢変動は、減衰しない。
- ・ 固有振動数比が1桁以上小さくなると、姿勢変動と構造振動の連成が起き、構造振動の減衰により姿勢変動も減衰をする。特に、固有振動数比3の場合は、姿勢変動の固有値について $Re\lambda_{3,4}=-0.218$ より、概ね軌道10周回で姿勢変動の振幅は0.1倍となることが分かった。

以上より、結合剛性を小さくし、変数間の連成を起こすことで、構造振動の減衰によって姿勢変動の減衰が可能となった。つまり、応力情報の伝搬を意図的に生じさせ、従来制御出来なかつた変数に対する制御が可能となった。言い換えると、対象とする局所的な情報を伝搬、分散させること別の制御変数により、対象を制御することが出来た。

まとめ

本研究では、衛星システムの動特性の支配要因である要素結合剛性に注目し、剛性と応力・変位情報の伝搬についての研究を行った。まず、要素剛性と姿勢変動・構造変形の安定性（A）、各運動の連成（B）への影響を数値解析を通じて明らかにした。さらに、（C）では、連成を起こすことで応力情報の伝搬を意図的に生じさせ、従来制御出来なかつた変数に対する制御方法について述べた。言い換えると、対象とする局所的な情報を伝搬、分散させることで別の制御変数により、対象を制御することが出来た。

今後の展望

今回は、図2.1、図3.1に示した太陽発電衛星を対象に研究を行ったが、今後は対象を広げて、より一般的な衛星に対して、情報の伝搬と可制御性の研究を行っていく予定である。さらに、コンピュータ上で数値実験のみならず、実際の衛星のスケールモデルによる実機実験を通じた検証を行いたい。また、理論的な発展課題としては、構成要素を非線形特性の強い場合も扱える形式での統一的な体系作りがある。非線形性が強い場合は、モード間のエネルギーの授受が無視できず、これらの影響の取り扱いとその利用が期待される。

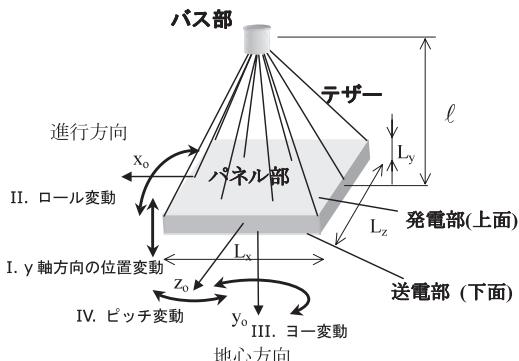


図2.1 SSPSの形状

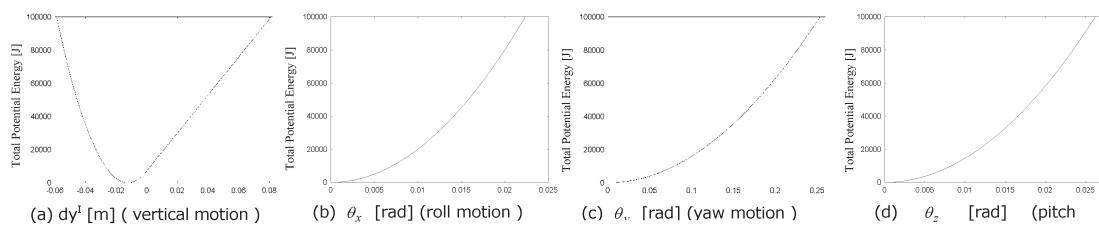


図2.2 位置・姿勢変動とポテンシャルエネルギー

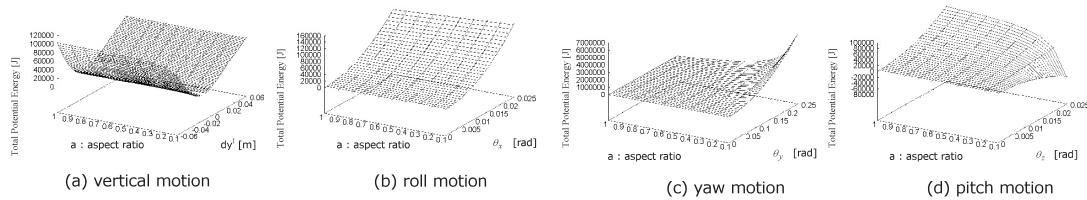


図2.3 モジュール形状の安定性への影響

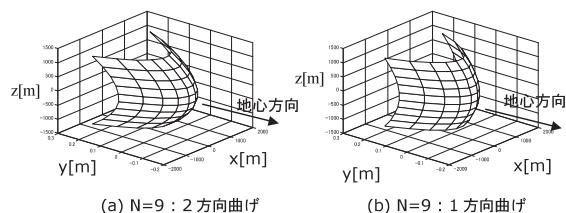


図2.4 平衡状態でのパネル部の変形

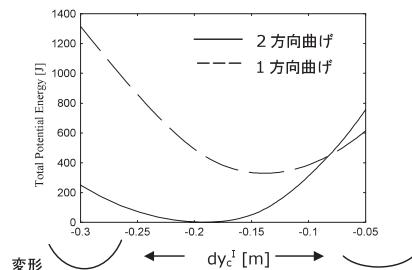


図2.5 平衡点周りのポテンシャルエネルギー

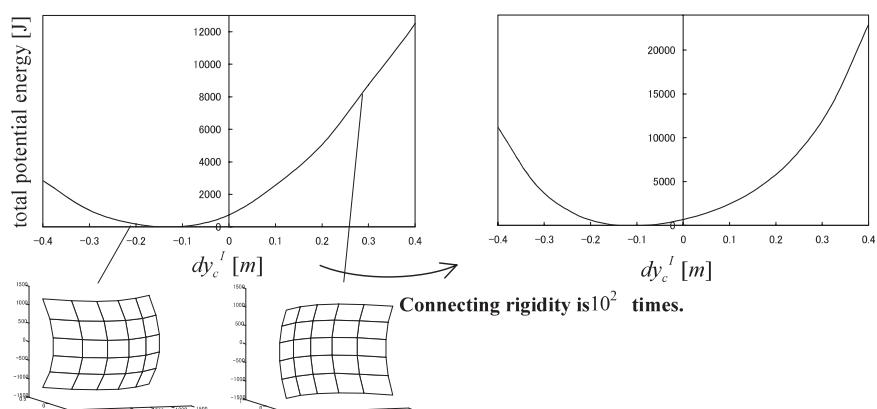


図2.6 モジュール間結合剛性と安定性の変化(左:元の剛性,右:10²倍の結合剛性)

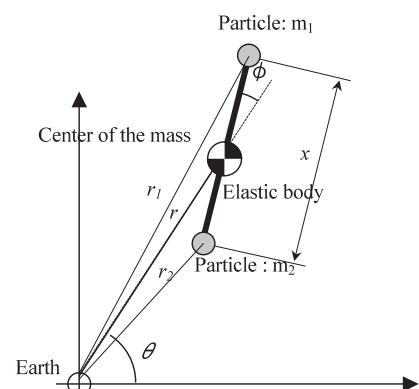


図3.1 衛星モデル