

大型宇宙構造物の組み立てと維持に関する制御技術の研究

The Research of the Control Technology for Large Space Structure's Assembly and Maintenance

総合技術研究本部 システム誘導技術グループ 関口毅 小田光茂 上野浩史
Institute of Space Technology and Aeronautics
Spacecraft Guidance Control and Dynamics Engineering Group
Takeshi Sekiguchi Mitsushige Oda Hiroshi Ueno

Abstract

Control technology of the Large Space Structure (LSS) is supposed to be one of the key technology in the future space activity, however, there are many problems which have not solved. This research aims to solve such problems and to establish the basic technology of the LSS. In this research, Space Solar Power System (SSPS) is focused on as the very Large Space Structure, and the assembly and maintenance technique is studied. In this report, the result of this study in the FY 15 activity is described.

1. はじめに

今後の宇宙活動においては更なるミッション要求の高度化が進み、それに応じて規模的にもマイクロ衛星、ナノ衛星のような超小型なものから宇宙太陽発電システム（SSPS）のように超巨大なシステムまで多様化が進んでいくと考えられる。従来の大規模宇宙構造物（LSS）の研究では、主に大型衛星等に焦点を当てて活発な活動が行われてきたが、SSPSのようなシステムは未だ人類が経験したことのない大規模なものであり、まだ解決されてない課題も多い。

そこで、本研究では将来的なLSS制御技術の基盤技術を確立することを目的として、宇宙太陽発電システム（SSPS）の組立、維持に関する研究を実施している。

本研究は、「高性能姿勢制御技術の研究」「軌道上サービスシステムの研究」の一環として平成14年度に本格的に始まった。特に本報告に関しては海外長期派遣研修として平成14年12月から平成15年12月までアメリカのマサチューセッツ工科大学（MIT）宇宙ロボット研究室において行った研究についてまとめたものである。

また、本研究の一部は上記MIT宇宙ロボット研究室との共同研究の一環として行われた。

2. 研究概要

平成15年度は、以下の内容について検討を進めた。

(1) S S P S組み立てと維持に関する制御系技術課題の整理

S S P Sの技術課題のうち特に制御技術の観点でS S P Sの組立と維持に関する課題を洗い出した。

(2) S S P Sの大局的安定性解析検討

S S P Sの維持に関する検討として、「宇宙太陽発電システム検討委員会」において平成14年度に取り上げた「S S P Sリファレンスマル2002」をベースに軌道上での安定性について解析を行った。

(3) S S P Sの組み立てに関する検討

S S P Sの組立についてシナリオを見直し、特に部材の接合直前の輸送に焦点を当てて問題設定と解析を行った。

3. 成果概要

3. 1 S S P S組み立てと維持に関する制御系技術課題の整理^{[1][2]}

S S P Sのような超大規模なシステムでは、これまで無視し得た新たな課題が数多く出てきている。そこで、制御技術という観点から2つに大別して整理した。以下その概要を示す。

(1) S S P S維持における技術課題

これは主に定常運用時の課題であり、従来の研究の延長上にあるケースが多いため共通的な課題が多く存在する。ただし、従来研究では無視できたレベルの外乱や擾乱がS S P Sでは無視し得ないものとなり、改めて見直す必要がある。また形状の維持というのはこれまであまり十分に検討されてきてない課題であり、制御手法・構造を含めた検討が必要となる。また、センサ／アクチュエータ／計算機等の機器に関する問題では、個々の機器のみならず、その個数や配置が従来以上に重要となっており、新たな観点での検討が必要となる。

(2) S S P S組立時における技術課題

L S Sは、ロケット等宇宙輸送システムの制約から軌道上での組み立て建設が基本となると考えられるが、S S P Sのような超巨大なシステムでは特にその点が重要であり、さらにその規模から人間が実施するのは困難である。その観点からロボットによる組立が有力視されている。ここでは、ロボットによる組立問題についての課題という立場で整理した。課題は大きく分けると以下の点が重要なテーマとなる。

- ・輸送中の部材の姿勢・軌道・振動の干渉
- ・輸送中の部材ダイナミクスとロボットダイナミクスの干渉
- ・部材結合時の相互の姿勢干渉

これら各々について、制御方式、ロボット個数／配置をはじめとする具体的な技術的課題が多数存在するためそれぞれについて検討していく必要がある。

3. 2 SSPSの大局的安定性解析検討^{[1][3][4]}

本検討では、前項の課題におけるSSPSの維持のための基本的な要素であるSSPS全体の大局的な姿勢安定性について解析した。対象は図1に示すようなモデルであり、これはNASDAリファレンスマル2002と呼ばれるものである。本モデルは、静止軌道上で1GWの発電能力を持つシステムであり、総重量 10000[ton]、1次ミラーを2×3.4[km]の楕円とし、フレネルレンズ、発電送電部をいずれも $\phi 2[\text{km}]$ の円盤、1次ミラー間距離 8[km]となっている。

検討では本モデルを利用し、以下の作業を実施した。

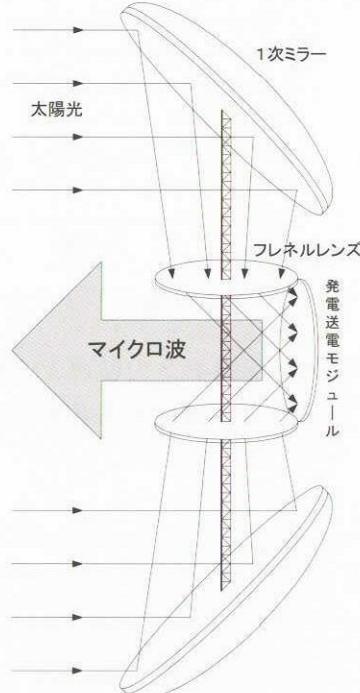


図1 対象システム

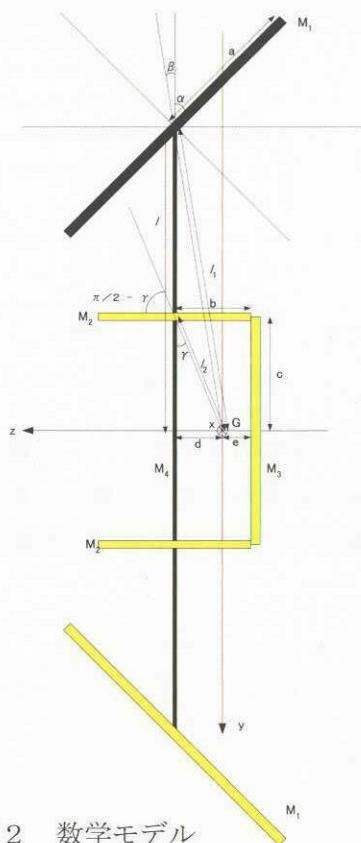


図2 数学モデル

(1) 数学モデルの構築

図2に示すように全体を单一剛体と仮定した場合の数学モデルをベースにモデルの詳細化を実施した。全体を1次ミラー、レンズ部(2次ミラー)、発電送電部、トラスに分け、1次ミラーを慣性空間における太陽指向、それ以外の部分を地球指向として、時間的に慣性モーメントが変化する系でのモデルを求めた。前提条件であまり明確に定義されていないレンズ部については、そのままの利用が困難なため特殊なミラーとしてモデル化を行った。

(2) 自然トルク外乱の影響による運動解析

(1) で求めたモデルを利用して、自然外乱として重力傾度トルク、太陽輻射圧が加わった場合における姿勢安定性解析を実施した。

重力傾度トルクは慣性モーメント比によって、その安定性を確認できる。本モデルは時変形モデルであるが、軌道上一周回しても不安定領域にとどまることが図3からわかる。

時間領域での安定性は、図4、5に示すように不安定となる。

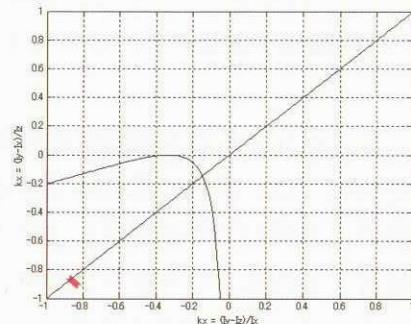


図3 慣性モーメント比の変化

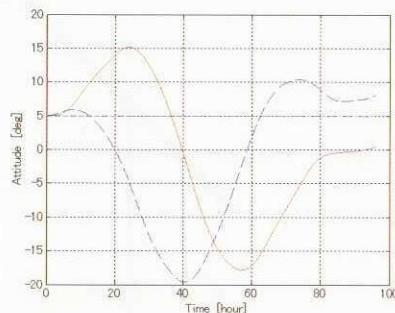


図3 外乱なしケース

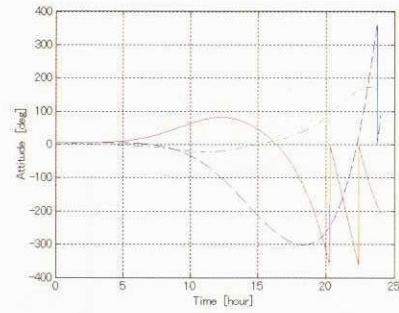


図4 重力トルクケース

太陽輻射圧トルクは、太陽季節角、SSPSの形状、SSPSの軌道上位置、構造物の陰の影響等によって様々に変化する。解析では、SSPSを構成する各々の要素について場合分けをしながらその影響について調べた。

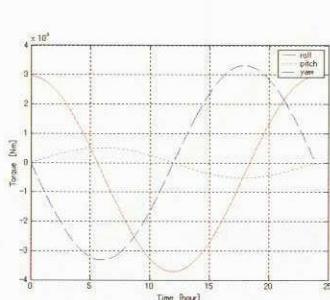


図5 夏至での太陽トルク

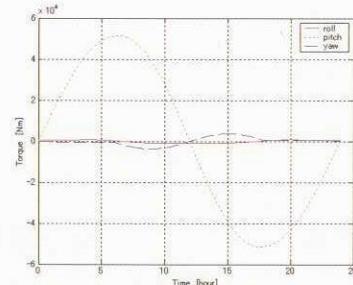


図6 春分での太陽トルク

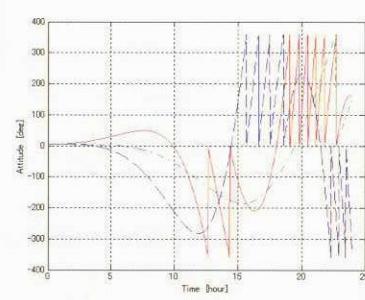


図7 太陽、重力トルクによる姿勢

図5は夏至における太陽輻射圧トルク、図6は春分点での太陽輻射圧トルクである。夏至や冬至では1次ミラーのトルクが上下で異なるためにロール及びヨー軸への影響が大きくなり、春分秋分点では1次ミラーによる影響は打ち消されるため相対的にピッチ軸への影響が支配的となることがわかる。また、図7は最終的な太陽輻射圧と重力傾度トルクの影響を受けた場合のSSPSの応答である。重力傾度のみの場合に比べてロールピッチへの

影響が大きくなりレートがアップしている。また重力傾度ではでてなかつたピッチ軸への影響も出ていることがわかる。

このように外乱の影響により大局的な安定性は損なわれるため、常時スラスター等による補償が必要となる。イオンスラスターにより補償したケースを検討した結果、リソースとしてSSPS全体重量の数%程度が必要であることがわかった。実際にはモデルは柔構造体であるため、姿勢形状維持のためにはさらなるリソースが必要になることが予想され、制御手法のみならず、システムコンフィギュレーションそのものの検討も必要と考えられる。

3. 3 SSPSの組み立てに関する検討^{[4][5][6]}

本検討では、まずシナリオを整理して問題の設定を行った。組立の範疇には、部材の輸送と部材の接合があるが、ここではそのうち輸送問題に着目した。輸送もさらに①低軌道への輸送、②軌道間輸送、③最終接近のフェーズに分けることができる。ここでは特に本質的と考えられる最終接近に焦点を絞って検討を進めた。図8にそのイメージを示す。①や②の過程により軌道上のあるポイントに集められた部材（梁、三角トラス、薄膜プレート等）は、③の過程において最終的にSSPSを設置する場所へと移動される。しかし、これらの部材は柔軟構造となるため、励起された振動が姿勢や軌道へと干渉する。そこで、本問題の設定を以下のように行った。

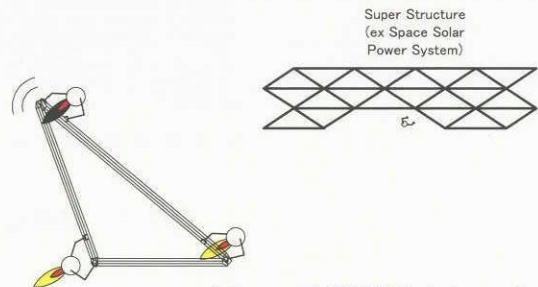


図8 輸送問題イメージ

- ・最終接近フェーズにおいてロボット等を用いてSSPS建築部材を輸送する
- ・トラスの振動を最小に押さえつつ輸送する制御システムの構築する
- ・極力シンプルな構成なシステム（ロボット個数等）の構築する
- ・外乱、不確かさ、無駄時間等による影響に対してロバストなシステム構築する

FY15では、まず剛体トラスを用いた姿勢軌道解析と柔軟トラスを用いた振動抑制について検討を行った。

剛体モデルを用いた解析では、姿勢軌道の干渉を調べ、またアクチュエータと軌道の関係を調べた。図9～11に結果の例を示す。

図9は簡単なPD制御系による姿勢安定化の結果、図10はその姿勢系による軌道への干渉を示している。また、図11は姿勢干渉がある場合の軌道マヌーバの結果を示している。

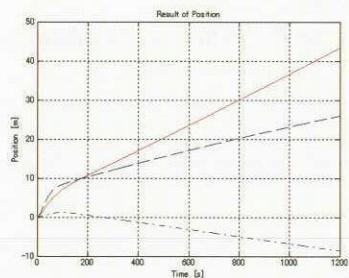


図9 制御系応答

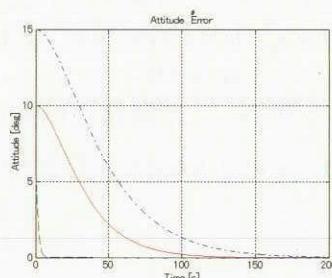


図10 姿勢軌道干渉

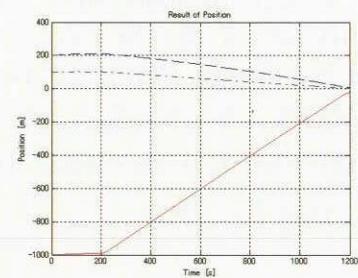


図11 軌道マヌーバ

アクチュエータ（スラスターを想定）のレベルや個数によるこれらの違いの変化、初期条件による変化等を考慮し、構造物に加えられる力・トルクを調べた。

柔軟梁を用いた解析では、振動を抑制する制御系の設計解析を行った。自由端、固定端でのモデルをFEMにより作成し、振動抑制の効果を見るために固定端での制御系を設計した。PDやLQ等の制御系を構成したところ図12、13に示すように振動を抑制する制御系を構築することができた。

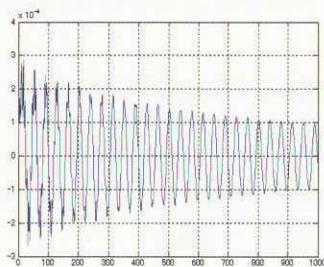


図12　自由応答

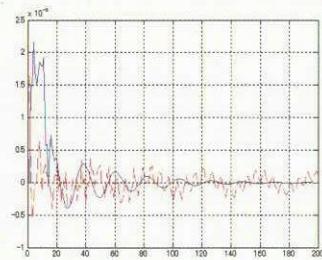


図13　閉ループ系応答

4. まとめ

本報告では、平成15年度の成果として長期海外派遣研修での活動の成果をまとめた。課題の整理、SSPSの大局的な安定性解析、SSPS組立技術の検討について検討を行い、システムフィージビリティの検討を実施した。

今後の課題としてまず、SSPSモデルがリファレンスマル2002から2003に変更したことにより、再度同様な解析を実施する必要がある。また、組立技術の検討では、振動抑制・姿勢制御・軌道制御をまとめた系の構築、アクチュエータをロボットとしたときのシステム構成等について検討していく必要がある。そのため、今年度の結果をベースとしてこれらの課題についてさらに検討を進めていく予定である。

参考文献

- [1]関口、小田、上野、「宇宙太陽発電システムの制御技術に関する検討」、第45回自動制御技術連合講演会、2002
- [2]P. E. Glaser, et. al., "Solar Power Satellites", Praxis Publishing, 1997
- [3]B. Wie, C. Roithmayr, "Integrated Orbit, Attitude, and Structural Control System Design for Space Solar Power Satellites", AIAA 2001-4273, 2001
- [4]Wertz J. R. "Spacecraft Attitude Determination and Control", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 1994.
- [5]茂原正道、木田隆、「宇宙工学入門II」、培風館、1998
- [6]Wodek K. Gawronski, "Dynamics and Control of Structures", Springer-Verlag New York Inc., 1998