

# 宇宙太陽光発電システムにおける 大型反射鏡構造モデルの実現性検討

○北本和也<sup>1)</sup>, 藤田辰人<sup>2)</sup>, 松井信<sup>1)</sup>, 山極芳樹<sup>1)</sup>  
<sup>1)</sup>静岡大学, <sup>2)</sup>宇宙航空研究開発機構

Feasibility Study of Structural Model for Large Reflector in Space Solar Power Systems

Kazuya Kitamoto<sup>1)</sup>, Tatsuhito Fujita<sup>2)</sup>, Makoto Matsui<sup>1)</sup>, Yoshiki Yamagiwa<sup>1)</sup>  
<sup>1)</sup>Shizuoka University, 3-5-1 johoku, Hamamatsu, Japan  
<sup>2)</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Japan

Key Words: SSPS, SPS, Large space structure, Reflector

## Abstract

SSPS can convert solar energy into microwave or laser beam on the geostationary orbit (GEO), and transmit microwave and laser beam to the earth even at night, cloudy or rainy day. The microwave based SSPS has large reflector for gathering of solar light, solar panel and microwave power transmitter. They are large structure of km size. Now as a first step for realizing SSPS, we study structural model of 100m size for reflector. The purpose of this study is to clarify issues for the realizing of structural model for large reflector. The author made structural model of 100m size using truss for reflector. The structural properties, optical properties, and thermal properties of the model are analyzed. This study shows that the relationship between angle accuracy for attaching the mirrors and the light collecting performance, and the effect of thermal on the member in the structural model. As the result of these analyses, the required angle accuracy for attaching the mirror is  $\pm 0.003$  [rad] ( $= \pm 0.171$  [deg]). There's a possibility to buckling of the member due to the large temperature difference of the members inside. Therefore, the structural model for large reflector is need proper thermal management.

## 1. 背景

宇宙太陽光発電システム(SSPS : Space Solar Power Systems)とは、宇宙空間の軌道上に太陽電池を広げ、太陽光発電を行い、そのエネルギーをマイクロ波やレーザーなどの電磁波に変換することで地上へ無線送電し、地上でエネルギーへ再変換し利用する新しいエネルギー供給システムである。宇宙空間で太陽光発電を行うことによって、地上より高いエネルギー密度の太陽光が得られ、また天候や昼夜に左右されることなく24時間365日(春分と秋分の一時的な日陰を除く)安定的に発電を行うことができる。結果として、地上での太陽光発電に比べ10倍程度のエネルギーを得ることが可能であると考えられている。

現在、JAXA<sup>1)</sup>で検討しているSSPSには伝送方法の違いによりマイクロ波方式とレーザー方式がある。また、マイクロ波送電の場合、発電衛星の種類によりBasicモデルと呼ばれる発電部と送電部を一体したタイプとAdvancedモデルと呼ばれる発電部と送電部が分離したタイプが検討されている。本研究ではマイクロ波送電のAdvancedモデルを研究対象とする。以下にマイクロ波方式宇宙太陽光発電衛星(以下M-SSPS)のAdvancedモデルの概念図を図1として示す。

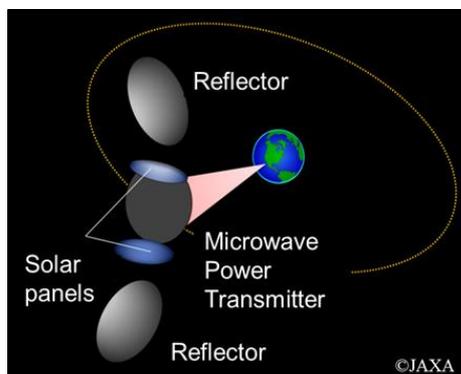


図1. M-SSPSのAdvancedモデル

M-SSPSのAdvancedモデルの大きな特徴は太陽電池パネル(発電部)と送電パネル(送電部)が分離していることだけでなく、2枚の巨大な反射鏡を想定していることである。この衛星構造物は静止軌道上に投入され、反射鏡は重力傾斜と太陽輻射圧との釣り合いによって太陽電池パネルと編隊飛行を行う。また、太陽電池パネルと送電パネルは”コ”の字型に結合されている。

次に、反射鏡の役割について述べる。反射鏡は太陽指向とし、太陽光と太陽電池パネルに対して約45°の姿勢角を維持することで、常に太陽電池パネ

ルに太陽光が入射されるようにする役割がある。また、要求に応じて太陽光の集光倍率を高めることで単位面積当たりの発電量を高めることも考えられている。

しかし、この反射鏡は、1GW級発電ではkm級の構造が必要となり、軽量化などその実現には多くの課題がある。そこで本研究では第一段階として、100m級大型反射鏡について、構造モデルを作成し、数値解析によりその実現性を検討していく。

## 2. 目的

本研究では、M-SSPSのAdvancedモデルに用いられる大型反射鏡について100m級の構造モデルを作成し、構造解析、光学解析、熱解析を実施することで、反射鏡構造モデルの実現性の検討することを目的とする。解析対象である100m級構造モデルは著者が以前に提案した正三角錐トラスユニットを用いた六角形反射鏡構造モデルを対象とする<sup>2)</sup>。この構造モデルに対し、構造解析、光学解析、熱解析を実施し、その結果から実現に向けての課題抽出を行う。

## 3. 前提条件

反射鏡は太陽電池パネルと編隊飛行を行うため、重力傾斜と太陽輻射圧が釣り合う必要がある。そのため反射鏡構造には $300[\text{g}/\text{m}^2]$ という非常に軽量化が要求されている。本研究では100m級反射鏡構造モデルを対象とするため、構造モデルの質量は $3,000[\text{kg}]$ とした。また、反射鏡は鏡、支持構造部、推進バス系から構成されているとし、それぞれの質量比は1:1:1と仮定した。本研究で提案した構造モデルは支持構造部を $1,000[\text{kg}]$ で実現していることに特徴がある。そのため支持構造部には軽量化に有利な中空円管部材を用いたトラス構造を採用した。また、材料には2000系または7000系のAl合金を標準モデルとして想定する。次に鏡について、鏡は分割鏡(セグメントミラー)を用いる。これは反射鏡と太陽電池パネルの距離が5kmと非常に大きく、反射光の視野角による影響を少なくし、太陽光をムラなく太陽電池パネルに反射させるためである。ここで、セグメントミラーの寸法は $1\text{m} \times 1\text{m}$ の正方形とし、市販のフィルムミラーを想定している。また、反射鏡構造の鏡面設置面積はこの $1\text{m} \times 1\text{m}$ のセグメントミラーを1万枚設置できる面積を確保している。最後に、位置関係であるが、反射鏡は太陽光と太陽電池パネルの双方に対して45°の姿勢角保っており、特に太陽電

池パネルとは 5,000[m]の距離がある場合を想定している(図 2).

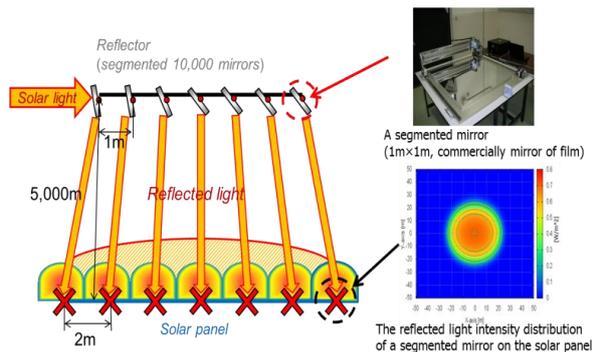


図 2. 光学解析の方法

#### 4. 解析条件

##### 4.1 解析方法

構造解析(固有値解析)は有限要素法により行い、ソルバーには NASTRAN を使用する。光学解析は、あらかじめセグメントミラー1枚の太陽電池パネル上での反射光強度分布をレイトレース法により求め、その結果をセグメントミラーの総枚数1万枚分を重ね合わせることで、太陽電池パネル上での反射鏡全体の反射光強度分布を計算する<sup>3)</sup>。熱解析には温度解析には陰解法であるクランクニコルソン法及び有限要素法を用いる<sup>4)</sup>。熱変形解析は有限要素法により行いソルバーに NASTRAN を用いる。

##### 4.2 構造モデル

本研究で解析対象とした 100m 級反射鏡構造モデルを図 3 に、構造特性を表 1 に示す。この構造モデルの特徴は、非対称な変形を抑えるため正六角形の反射鏡面を持つことである。また、構築の簡単化や輸送時を考慮して、構造の大部分を同一の正三角錐ユニットを組み合わせることで構築可能としている。また、構造はトラス構造ができており、全体としてオクテット・トラス構造となっていることにも特徴を持つ。

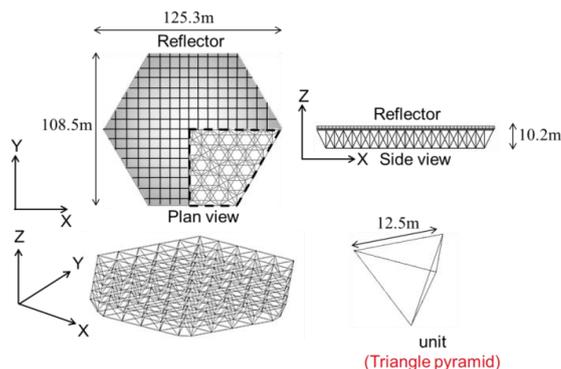


図 3. 正六角形反射鏡構造モデル

表 1. 構造特性

標準材料	アルミニウム合金 (2000系 7000系)
構造タイプ	トラス構造(中空円管部材) 部材 直径 100[mm] 肉厚 0.1[mm]
部材数	720
結合点数	181

#### 5. 各種解析

##### 5.1 構造解析(固有値解析)

正六角形反射鏡構造モデルについて、固有値解析を行った。その解析結果として、図 4 に 1 次から 3 次までのモード図を示す。また、表 2 に固有振動数を示す。

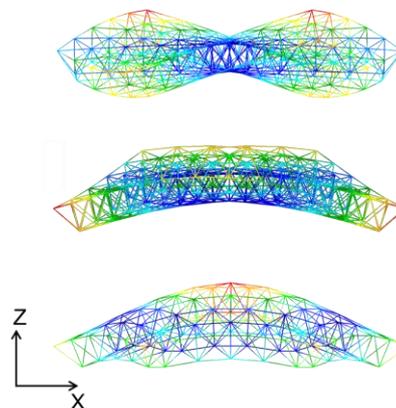


図 4. モード形状

(上:1次モード 中央:2次モード 下:3次モード)

表 2. 固有振動数

モード次数	固有振動数[Hz]
1	2.62
2	2.62
3	4.47

## 5. 2 光学解析

1万枚のセグメントミラーは、その取付けによるミラー角度の誤差によって、集光性能に影響を与える可能性がある(図7)。ここでは、取付け要求精度について、取付け角度誤差のばらつきを乱数によって模擬することで、集光性能に与える影響を明らかにする(モンテカルロ法)。一般に、取付け角度誤差などのばらつきは正規分布に従うと想定される。以下の表3に解析条件を示す。また、ここでは、集光性能を表す指標として、集光効率と光強度落ち込みを定義し、解析の評価を行う。

$$\text{集光効率}[\%] = \frac{\text{太陽電池パネルに入射した太陽光エネルギー}[W]}{\text{反射鏡で反射した太陽光エネルギー}[W]} \times 100$$

$$\text{強度落ち込み}[\%] = \frac{\text{強度の変化量}[W/m^2]}{\text{標準時の強度}[W/m^2]} \times 100$$

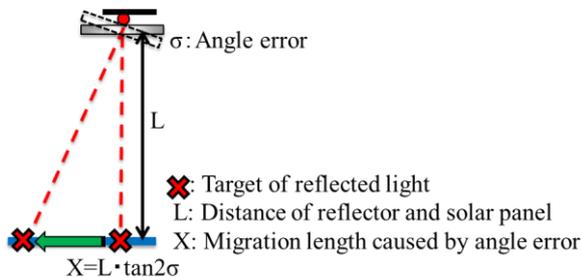


図7. 取付け角度誤差が集光性能に与える影響

表3. 解析条件

乱数	正規分布
角度誤差のばらつき $\sigma$	0.0001~0.01[rad]
各角度誤差の試行回数	100
太陽電池パネルの大きさ	形状: 正六角形 大きさ: 反射鏡の4倍の面積
太陽電池パネルと反射鏡の距離 L	5,000[m]

解析結果を以下に図8として示す。

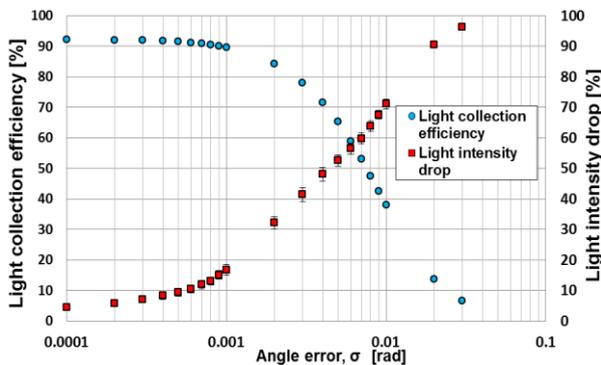


図8. 角度誤差と集光効率, 強度落ち込みの関係

図8より、要求される集光性能が、集光効率は90%以上、強度落ち込みが20%以下であると想定した場合、要求される1万枚のセグメントミラーが許容できる角度誤差のばらつきは  $3\sigma = \pm 0.003[\text{rad}] (= \pm 0.171[\text{deg}])$  であることが示された。

反射鏡のセグメントミラーの取付け角度誤差が集光性能に与える影響が大きい理由として、太陽電池パネルと反射鏡の距離が大きいため、また、セグメントミラーに平面鏡を用いたことにより、鏡の回転角の2倍の角度を反射光が持つことが考えられる。

## 5. 3 熱解析

構造モデルが太陽光によって、温められた場合、太陽光が入射する面とそうでない面とで温度差が生じる可能性がある。その温度差により内部応力が発生、また、部材長さが大きいため、熱変形量も大きくなる可能性がある。そこで、まずは本構造モデルを構築している中空円管部材に対して定常熱解析及び非定常熱解析を実施した。以下に熱解析の概念図を図12として示す。また熱入力には太陽光のみとして-X方向へ垂直に入射し、熱出力は全円管部材の表面及び裏面からの熱放射を想定した。また、部材間の伝熱は伝導のみで行い、輻射伝熱は考慮しない。その他の熱解析条件は表4、アルミニウム合金の物性は表5で示す。

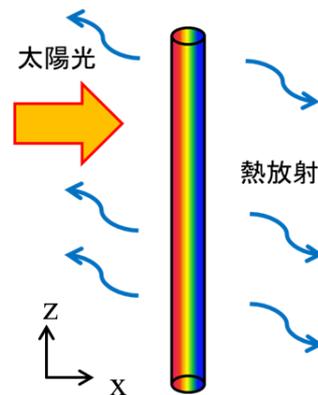


図12. 円管部材の熱解析モデル

表4. 熱解析条件

スティファンボルツマン定数 $[W/K^4/mm^2]$	$5.67 \times 10^{-14}$
太陽定数 $[W/mm^2]$	$1.35 \times 10^{-3}$
初期温度[K]	4.00
周辺温度[K]	4.00
太陽光の入射角 $[\text{°}]$	90

表 5. アルミニウム合金の物性

太陽光吸収率[-]	0.2
放射率[-]	0.1
比熱[J/kg/mm <sup>2</sup> ]	880
熱伝導率[W/mm/K]	0.15
密度[kg/mm <sup>3</sup> ]	2.7×10 <sup>-6</sup>
線膨張係数[1/K]	2.4×10 <sup>-5</sup>

温度解析結果の定常温度分布及び、非定常温度分布を図 13, 図 14, その他の解析結果を表 5 に示す,

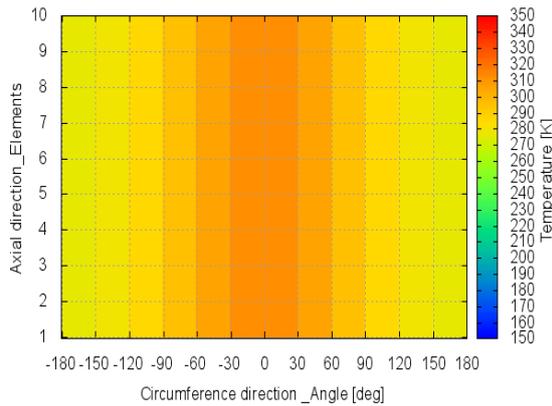


図 13. 円管部材の定常時の温度分布 (円周方向を X 軸, 軸方向を Y 軸として表示)

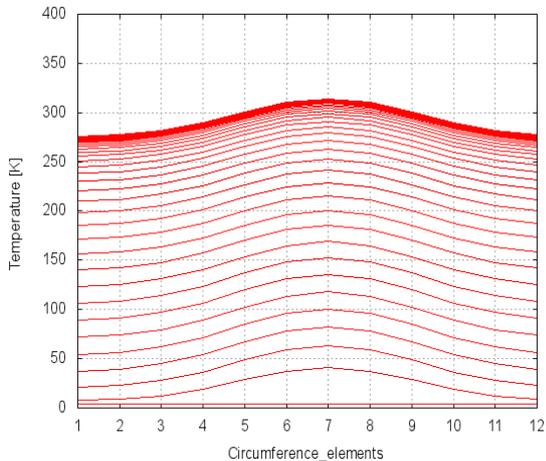


図 14. 円管部材の非定常時の温度分布 (円周方向を X 軸とし, 温度分布を 50 秒ごとに表示)

表 6. 温度解析結果

定常までの時間[s]	5015
定常時最大温度[K]	310.6
定常時最低温度[K]	272.1
定常時の温度差[K]	38.5
最大温度差[K]	45.8
最大温度差発生時刻[s]	250

定常時の温度分布での熱変形図を以下に図 15 として示す. また, 熱変形量, 熱応力値を表 6 に示す.

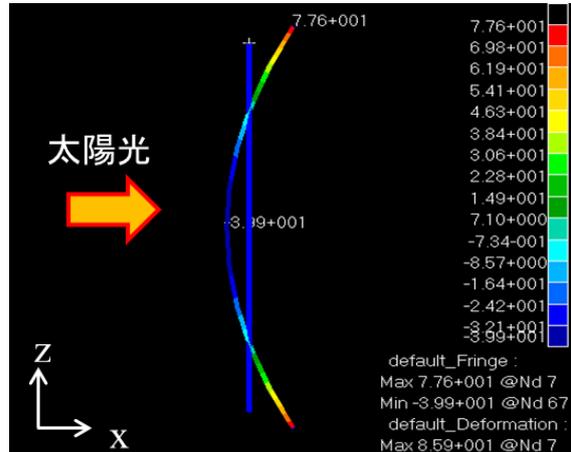


図 15. 円管部材の熱変形図(定常時)

表 6. 熱変形・熱応力解析結果

温度差 [K]		38.5
変位量 [mm]	X 方向	117.5
	Y 方向	73.8
	Z 方向	3.0
応力 [MPa]	最大主応力	7.1
	最小主応力	-4.7
	ミーゼス応力	10.7

図 13, 14 より, 中空円管部材では太陽光が入射する面とそうでない面とで明らかな温度差が生じる. その値は表 6 より, 定常時で 38[K]程度, 最大で 45[K]となる. この部材内部の温度差により, 図 15 で示すように, 熱変形は太陽光が入射した面が反る形となる. また, 表 6 より部材内部に温度差により, 熱拘束が生じ, 応力が発生する. 引張応力は Al 合金の降伏応力 200[MPa]には十分余裕があるが, 圧縮応力に関しては, 当円管モデルのオイラー座屈強度(両端回転支持とした場合)の 5.5[MPa]と非常に近い値をとることがわかる.

このことから, この構造モデルでは, 部材内で大きな温度差が発生し, それより生じた圧縮応力により, 円管部材が座屈破壊する可能性が考えられる.

### 5. 3 熱対策

円管部材が太陽光の熱入力により座屈破壊する可能性があるため、熱対策として、材料を軽量で熱伝導率が高く線膨張係数の小さい Pitch 系 CFRP へと変更する。Pitch 系 CFRP の物性を表 7 に示す。また、アルミニウム合金に比べ質量を軽くできるため、ここでは座屈強度を高めるように肉厚、外径を 1.25 倍にする。これにより、アルミニウム合金の場合と質量が一定になるように調整している。

表 7. Pitch 系 CFRP の物性

太陽光吸収率[-]	0.89
放射率[-]	0.89
熱伝導率[W/mm/K]	0.80
密度[kg/mm <sup>3</sup> ]	1.7×10 <sup>-6</sup>
線膨張係数[K]	1.1×10 <sup>-6</sup>

温度解析結果の定常温度分布を図 16, 表 8, 熱変形量, 熱応力の解析結果を表 9 に示す,

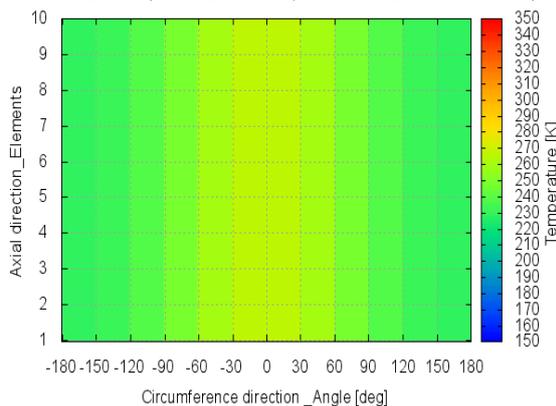


図 16. 円管部材の定常時の温度分布

(円周方向を X 軸, 軸方向を Y 軸として表示)

表 8. 温度解析結果

定常時最大温度[K]	266.7
定常時最低温度[K]	226.6
定常時の温度差[K]	40.1

表 9. 熱変形・熱応力解析結果

温度差 [K]		
変位量 [mm]	X 方向	5.8
	Y 方向	3.5
	Z 方向	0.1
応力 [MPa]	最大主応力	0.2
	最小主応力	-0.8
	ミーゼス応力	0.8

図 16, 表 8 より, 材料を熱伝導率の高い CFRP に変更した場合についても, 太陽光入力面とそうでない面とでは 40[K]程度の温度差が生じている。これは CFRP の吸収率と放射率が黒体の放射に近いことが理由として考えられる。しかし, 表 9 より発生している応力は非常に小さくなっていることがわかる。これは CFRP の線膨張係数がアルミニウム合金のその 1/20 程度であることによる。加えて, 高剛性に有利な Pitch 系の CFRP を使用することで, 座屈強度は 29.9[MPa]と非常に高くなる。

### 6. 結論

光学解析について, セグメントミラーに要求される取付け精度は鏡と太陽電池パネルの距離が 5,000[m]であれば, 許容される取付け角度誤差のばらつきは 3σ で 0.171[deg]であり, 非常に高い精度が要求される。

次に熱解析について, 本研究では円管モデルの太陽光入射面とその裏面とで温度差がみられた。この温度差により内部に熱拘束が生じ, 大きな応力が発生した。特に本円管モデルは非常に長細いモデルであるため, 座屈破壊を起こす可能性が高いことが明らかになった。そこで, 高熱伝導性, 低熱膨張率, 軽量, 高剛性の特徴を持つ Pitch 系 CFRP に変更すると, 発生熱応力を小さくかつ, 高剛性化できることが明らかにされた。したがって, 熱対策として Pitch 系 CFRP を使用することは, 熱対策, 高剛性化に非常に有効であることが示された。

### 7. 今後の課題

今回の解析により, 光学, 熱の問題点が明らかにされた。今後は構造, 光学, 熱の要求値を満たす, より最適な構造モデルを再構築する必要がある。

#### 参考文献

- 1) T. Fujita, S. Sasaki and D. Joudoi, "Overview of Studies on Large Structure for Space Solar Power Systems (SSPS)" IAC-10-C3.2.9, IAC2010
- 2) K. Kazuya, T. Fujita, M. Matsui, Y. Yamagiwa and S. Sasaki, "THE STUDY ON STRUCTURE OF LARGE REFLECTOR FOR SPACE SOLAR POWER SYSTEMS (SSPS)" 13<sup>th</sup> ISCOPS 2012
- 3) 藤田辰人, 上土井大助, 大倉喜男, "SSPS 大型反射鏡の光学解析と構造モデルの検討" 日本機械学会 年次大会 2011 年
- 4) 茂原正道, 鳥山芳夫 "衛星設計入門" 培風館