

THE STUDY ON STRUCTURAL MODEL USING TRIANGULAR PYRAMID TRUSS  
FOR LARGE REFLECTOR OF SPACE SOLAR POWER SYSTEM(SSPS)

Kazuya Kitamoto, Makoto Matsui, Yoshiki Yamagiwa

Shizuoka University, 3-5-1 johoku, Hamamatsu, Japan

Tatsuhito Fujita

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Japan

Abstract :

SSPS can convert solar energy into microwave or laser beam in the geostationary orbit (GEO), and can transmit microwave and laser beam to the earth even in day or night and even in cloudy or rainy day. Therefore this system is expected as a means to solve energy and environment problems in the future. 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 toward realizing SSPS, we study how to assemble structure of 100m size like reflector and panel for antenna and generator on orbit.

The purpose of this study is to propose proper structural model of reflector for SSPS. The author made structural model using triangular pyramid truss for reflector of 100m size. The model is analyzed structural properties (mass, stiffness and breaking strength). This paper shows the relationship between accuracy of mounting the mirror and the focusing performance, between mass of the coupling mechanism and stiffness of the model and between change of the thickness of the member and stiffness of the model.

The model of reflector is composed of ten thousand segmented mirrors, main truss structure, and bus equipment. Each mass of mirrors, structure and bus is 1000kg. Each segment mirror is a film mirror of 1m×1m square. The structural property of the model was analyzed using finite element method (FEM).

As a result of this study, the required accuracy for mounting the mirror is  $\pm 0.003$  [rad] ( $= \pm 0.171$  [deg]). The effect of the mass of the coupling mechanism on the stiffness of the model is small compared with the condition of required mass for reflector ( $=300\text{g/m}^2$ ). The required mass of the coupling mechanism is a 1.0 ~ 1.5 [kg/1]. The effect of change of the thickness of the member on the stiffness of the model is small compared with the condition of required mass for reflector ( $=300\text{g/m}^2$ ).

## 1. 序 論

宇宙太陽光発電システム(SSPS : Space Solar Power System)とは、宇宙空間に太陽電池パネルを広げ、太陽光による発電を行い、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、地上へ伝送しエネルギーとして利用する宇宙利用型の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ため、地上に比べエネルギー密度が高く、また天候や昼夜に左右されず 24 時間 365 日発電を行うことができるため、安定したエネルギー供給が可能である<sup>1)</sup>。そのため、地上の太陽光発電に比べ 10 倍程度のエネルギーを得られると期待されている。

現在、SSPS 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り、また、発電衛星のタイプにより発電一体である Basic モデルと発電分離した Advanced モデルが検討されている。本研究ではマイクロ波方式宇宙太陽光発電衛星(M-SSPS)の Advanced モデルについて扱うこととする。M-SSPS の Advanced モデルの概略図を以下に図 1 として示す。

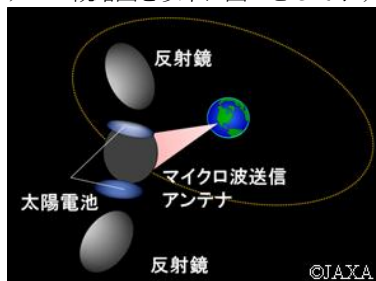


Fig. 1 マイクロ波方式宇宙太陽光発電衛星 (Advanced モデル)

M-SSPS の Advanced モデルは反射鏡と太陽電池パネル、送信アンテナから構成されている。これらは静止軌道に投入され、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っている。また、太陽電池パネルと送信アンテナはコの字型に設置されている。ここで、反射鏡の役割について述べる。反射鏡はスラスト制御により太陽指向とし、太陽と太陽電池パネルに対して  $45^\circ$  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するようにしている。また、要求に応じて集光倍率を高めることで発電効率を高めることが可能である。

さて、この M-SSPS を用いて 1GW 級の発電量を得るためには km サイズの反射鏡、太陽電池パネル、送信アンテナの構造物が必要である。そこで、段階的な開発として、高度 1,000km での 100m 級構造物の実証衛星の研究が行われている<sup>2)</sup>。

## 2. 目 的

本研究では、このマイクロ波方式宇宙太陽光発電衛星の Advanced モデルに用いられる反射鏡構造について 100m 級の構造モデルの提案を行い、軽量化、高剛性、集光性能、外乱(制御力・熱入力)による影響の調査分析および、ロバスト性、組み立て性を評価する。また、それらの結果から、より反射鏡に適した構造モデルの提案及び、反射鏡構造のための設計要求の洗い出し

を行うことを目的とする。

特に本紙では、以前に著者が提案した反射鏡構造モデルについて、鏡の取り付け精度が太陽光の集光性能に与える影響と結合機構の質量が構造モデルの剛性に与える影響、及び部材肉厚の変更が剛性に与える影響について示す。

## 3. 前提条件について

反射鏡は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  $300\text{g}/\text{m}^2$  という非常に軽量化が要求されている。そこで本研究では 100m 級の反射鏡を想定するため、構造モデルの質量を  $3,000[\text{kg}]$  と定める。また、反射鏡は、鏡、構造部、推進バス系から構成されているとし、それぞれ  $1,000[\text{kg}]$  とする。構造部は軽量化のためトラス構造を用い、材質には金属材料のうち、比重が小さく高強度な Al 合金を想定する。次に幾何学的な位置関係について、反射鏡と太陽電池パネルの距離は  $5[\text{km}]$  とし、平常では  $45^\circ$  の姿勢角を保っているとする。また鏡は分割鏡(セグメントミラー)を用いることで、太陽光をムラなく太陽電池パネルに反射させることとする(図 2)。ここで、反射鏡の設置面積は  $1\text{m} \times 1\text{m}$  の正方形ミラーを 1 万枚配置できる面積とし、太陽電池パネルの面積は反射鏡面と同じ形状で、2 倍の面積を持つものとする。また、セグメントミラーは市販のフィルムミラーを想定する<sup>3)</sup>。

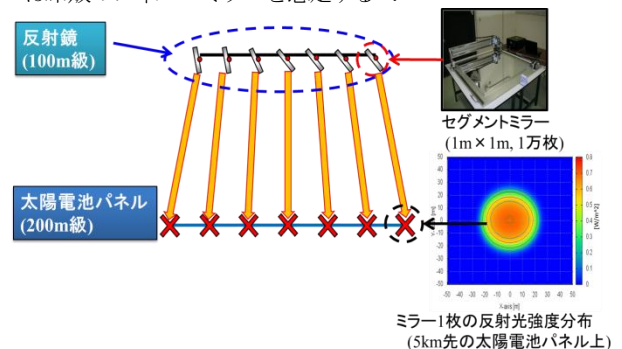


Fig. 2 反射鏡の光学モデル

## 4. 解析条件について

### 4.1 解析方法

構造解析(固有値解析, 静荷重解析, 動荷重解析)は FEM により行いソルバーには NASTRAN を用いる。また、光学解析についてはセグメントミラー 1 枚当たりの反射光強度分布をレイトレー法により求め、その結果をセグメントミラーの総数 1 万枚分を重ね合わせることで太陽電池パネルにおける反射鏡全体の光強度分布を計算する<sup>3)</sup>。

### 4.2 構造モデル

本研究において、検討した反射鏡構造モデルを以下に図 3 に、構造特性を表 1 として示す。この構造モデルの特徴は変形量を抑えるために、反射鏡面の形状を正六角形としたところである。また、構築時の輸送を考慮し、同一ユニットからの構成を可能とし、各ユニットは軽量化と剛性を高めるため正三角錐のトラス構造としてある。各種寸法については、 $1\text{m} \times 1\text{m}$  の正方形セグメントミラーが 1 万枚設置可能な最低面積から決定している。

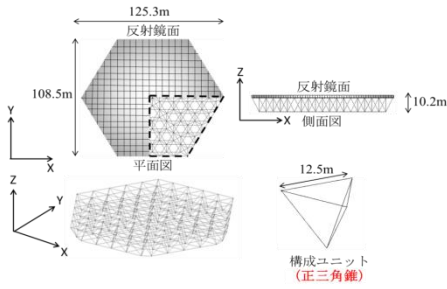


Fig. 3 三角錐トラス構造を持つ反射鏡構造モデル

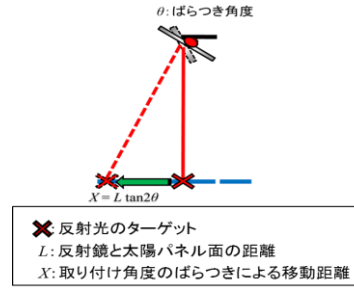


Fig. 5 ミラー角度の取り付け誤差が与える影響

Table.1 構造特性

材質	アルミニウム合金(2000系, 4000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

Table.2 解析条件

分布	正規分布
ばらつき範囲 (標準偏差 $\theta$ )	0.0001~0.01 [rad]
ばらつきの刻み幅	0.0001[rad]
試行回数	各 100 回
太陽パネルサイズ	反射鏡面積の 2 倍
反射鏡と太陽電池パ ネルの距離 : L	5,000[m]

### 4.3 構造モデルの分割

本研究において、検討した反射鏡構造モデルについて、解析の便宜上から以下の図4で示すように5つのSectionに分割する。

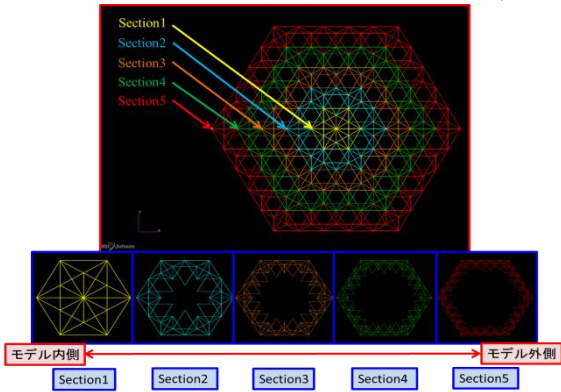


Fig. 4 反射鏡構造モデルの分割

### 5.2 解析結果と考察

集光効率と強度落ち込みの解析結果を以下に図6, 図7として示す。

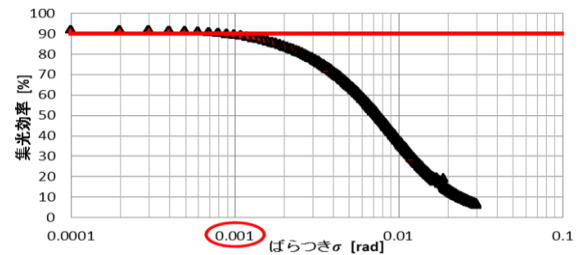


Fig. 6 集光効率

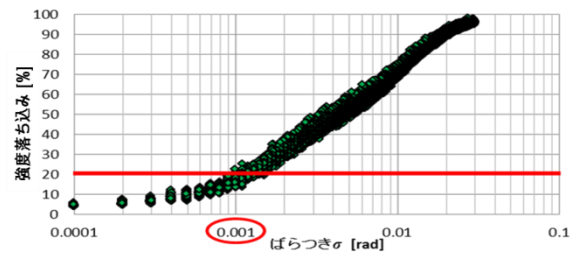


Fig. 7 強度落ち込み

### 5. 各種解析

#### 5.1 セグメントミラーの取り付け精度

1万枚のセグメントミラーは地上で取り付け、その後、軌道上まで運ばれる。そのため、取り付けによるミラー角度の誤差が集光性能に影響を与える可能性がある(図5)。ここでは、その取り付け要求精度について、角度誤差のばらつきを乱数で与え集光性能を解析することで明らかにする。一般に、取り付け誤差などの製造段階におけるばらつきは正規分布に従うと考えられる。本検討では、ばらつきが1つの正規分布に従い発生すると仮定する。解析条件は表2に示す。

今回は平均値を0として、標準偏差をパラメータとして与え正規乱数を生成していく。また、集光性能として集光倍率と強度落ち込みを定義し、解析の評価を行う。

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

$$\text{強度落ち込み}[\%] = \frac{\text{変化前の強度}[W/m^2] - \text{変化後の強度}[W/m^2]}{\text{変化前の強度}[W/m^2]} \times 100$$

反射鏡としての集光性能の要求値を集光効率90%以上かつ強度落ち込みを20%以下とした場合、図6, 7より許容できるばらつきは3σをとって、±0.003[rad](=±0.171[deg])程度と考えられる。またばらつきが0.0001[rad], 0.001[rad], 0.01[rad]の時の太陽電池パネルでの反射鏡強度分布をそれぞれ図8, 図9, 図10に示す。

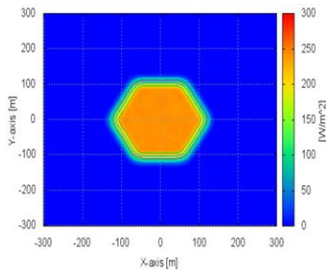


Fig. 8 ばらつきが0.0001[rad]の反射光強度分布

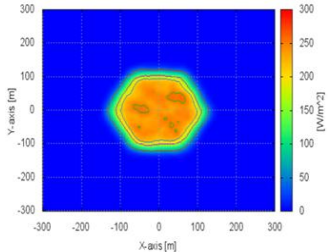


Fig. 9 ばらつきが0.001[rad]の反射光強度分布

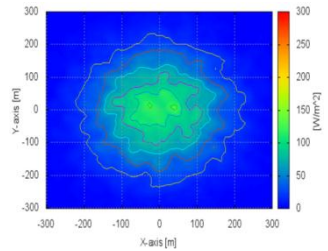


Fig. 10 ばらつきが0.001[rad]の反射光強度分布

図8~図10の結果からもセグメントミラーの取付け誤差が集光性能に与える影響が大きいことがわかる。図8では反射光強度分布は一樣な分布を持ち、反射鏡面と同じきれいな正六角形の形状をしているのに対し、図9では明らかに反射光強度分布にムラが生じていることがわかる。さらに図11では、反射光が発散してしまい図9に比べて2倍以上の面積に広がっており、光強度も著しく低下している。このように、ミラーの取り付け誤差が集光性能に与える影響が大きい理由として、平面鏡の場合は反射光の回転角は平面鏡の回転角の2倍となること、さらに鏡と太陽電池パネルの距離が5,000[m]と広いことが挙げられる。

### 5.3 結合機構の質量が構造モデル全体の剛性に与える影響

トラス構造に用いる結合機構が構造モデルの剛性に与える影響について考える。ここでは簡単化のために、ボールジョイント等にみられる3自由度を有する結合機構を想定し、結合機構の剛性は構造モデルの剛性より十分高いとする。

反射鏡構造モデルの結合点に結合機構を想定した質量を与える。このとき、反射鏡構造の質量要求から、結合機構の質量を含めた構造の総質量が1,000[kg]となるよう部材の肉厚を変化させる。結合機構の質量を一樣にした場合と結合機構の種類によって質量を変化させた場合について固有値解析を行い、結合機構の質量が構造モデルの剛性に与える影響及び、結合機構に要求される質量を明らかにする。

### 5.4 解析結果と考察

#### i) 結合機構の質量が一樣の場合

部材の肉厚と結合機構の質量の関係を以下に図11として示す。また、固有値解析の結果を図12に示す。

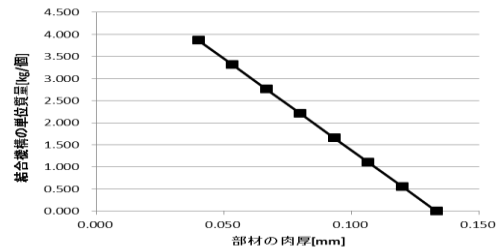


Fig. 11 部材の肉厚と結合機構の質量の関係

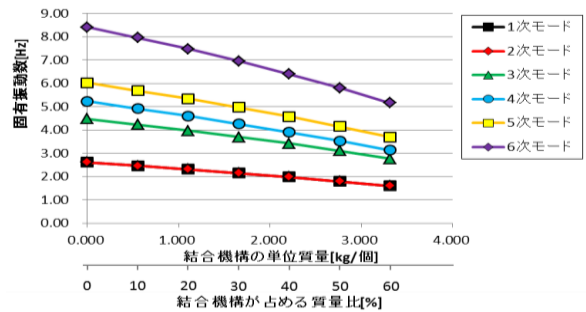


Fig. 12 部材の肉厚と結合機構の質量の関係

図11において、製造精度を考慮すると肉厚は0.1[mm]程度が妥当であると考えられる。この場合、結合機構の単位質量は1.0~1.5[kg]と見積もることができる。また、図12より結合機構の単位質量を1.0~1.5[kg]とすれば1次モードの固有振動数は2.0[Hz]以上となり、柔軟構造物としては比較的高い値を有する。したがって、結合機構の質量は1つ当たり1.0~1.5[kg](構造質量の20%)程度が要求されると考えられる。また、結合機構の質量の変化によるモード形状の変化は見られなかった。

#### ii) 結合機構の種類により質量が異なる場合

まず図4で定義した各Sectionにおける結合点数を明らかにし、結合機構の種類を調べる。本検討の反射鏡構造モデルには7種類の結合機構が必要である。iの結果より、結合機構の総質量を200[kg]として、7種類の結合機構に200[kg]の質量を配分していく。7種類の結合機構の質量配分が1次関数に従うと仮定し、固有値解析を行う。図13に部材との結合本数が5本である結合機構の質量を極小とした場合の質量配分を示す次に図15に部材との結合本数が5本である結合機構の質量を極大とした場合の質量配分を示す。

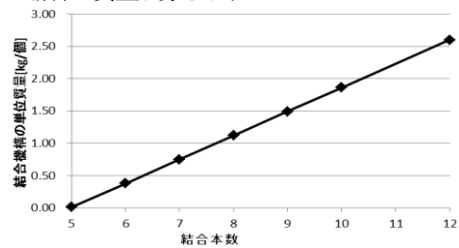


Fig. 13 結合機構の質量配分(結合本数5本が極小)

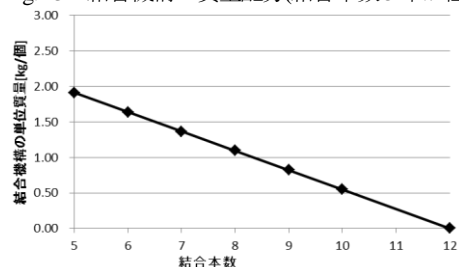


Fig. 14 結合機構の質量配分(結合本数5本が極大)

図 13, 図 14 で示される質量配分を持つ結合機構を有する構造モデルについて、固有値解析を行った。その結果を以下に図 15 として示す。

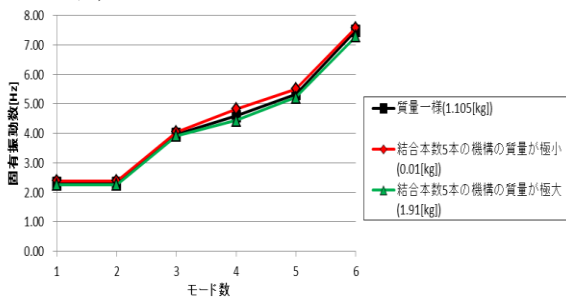


Fig. 15 結合機構の質量を変えた場合の固有値

図 15 より結合機構の種類により質量配分を変化させた場合、各モードの固有値には大きな変化は確認できず、 $\pm 0.01$ [Hz]程度の変化であった。また各モードのモード形状についても変化は見られなかった。

したがって、i, iiの結果より、構造モデルが1,000[kg]という質量要求を満たす場合、結合機構の質量による構造モデルへの影響は小さいと考えられる。また、その場合に結合機構に要求される質量は1つ当たり1.0~1.5[kg]である。

### 5.5 部材肉厚が構造モデル全体の剛性に与える影響

トラス構造に用いられる部材の肉厚が構造モデルの剛性に与える影響について考える。前項で検討した結合機構については本項では考慮しない。構造部材のみで質量要求1,000[kg]を満たすとする。質量要求を満たす範囲内において、図4で定義したSectionごとで部材の肉厚を変化させる。肉厚の変化量は該当Sectionとそれ以外のSectionとの比率で表し、本研究では150%と200%の場合を考える。このように部材の肉厚を変化させた場合について固有値解析を行い、部材肉厚が構造モデル全体の剛性に与える影響を明らかにする。

### 5.4 解析結果と考察

各Sectionで肉厚変化(150%, 200%)させた場合の固有値解析の結果を図18として示す。

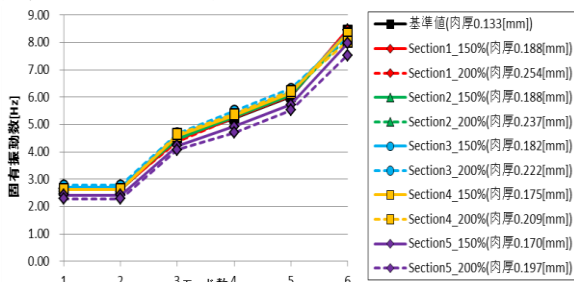


Fig. 16 各Sectionの肉厚を変化させた場合の固有値

図 16 より、Section3の部材の肉厚を増加させた場合の固有値が最大となった。また、固有値が最小となったのはSection5の肉厚を増加させたときである。これらの理由として、肉厚変更した部材数とSectionの位置が関係していると考えられる。

したがって、上記の結果より、剛性を高めるために構造モデルの部材肉厚を変更する場合、構造の内側の部材について、部

材数を確保しながら肉厚を増加させるべきである。

## 6. 結 論

本検討では、三角錐トラス構造を持つ反射鏡構造モデルについて、鏡の取り付け精度が太陽光の集光性能に与える影響、結合機構の質量が構造モデルの剛性に与える影響、及び部材肉厚の変更が剛性に与える影響について解析を行った。

鏡の取り付け精度について、 $\pm 0.003$ [rad]( $\approx \pm 0.171$ [deg])が要求される。結合機構の質量が構造モデルの剛性に与える影響について、構造モデルが1,000[kg]という質量要求を満たす条件では、剛性に与える影響は小さいと考えられる。また、結合機構に要求される質量は1つ当たり1.0~1.5[kg]である。部材肉厚の変更が剛性に与える影響についても構造モデルが1,000[kg]という質量要求を満たす場合、部材の肉厚が構造モデルの剛性に与える影響は0.1[Hz]オーダーであり、同一部材を使うことによる低コストや簡便さとトレードオフしていく必要がある。

## 7. 今後の予定

熱入力による構造、集光性能への影響の検討、組み立て性の検討を行うことで、より反射鏡の構造モデルに適した構造モデルの提案を行う。また、反射鏡構造のための設計要求の洗い出しを行うことを予定している。

## 文 献

- 1) 中野不二男, 監修 宇宙航空研究開発機構, 「クリーンなエネルギーをつくる太陽光発電衛星」, 科学・宇宙エデュケーションナルブックス
- 2) 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
- 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