

THE STUDY ON LARGE REFLECTOR FOR SPACE SOLAR POWER SATELLITE (SSPS)

Author Kazuya Kitamoto

Department of technology engineering, Shizuoka University, Jyohoku3-5-1, Hamamatsu, Japan

Prof. Yoshiki Yamagiwa

Department of technology engineering, Shizuoka University, Jyohoku3-5-1, Hamamatsu, Japan

Prof. Susumu Sasaki

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA/ISAS), Sagamihara, Japan

Mr. Tatsuhiro Fujita

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Tsukuba, Japan

Abstract :

SSPS converts solar energy into microwave or laser beam in the geostationary orbit (GEO), and the microwave and laser beam are transmitted 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 author made structure models of reflector in different styles of 100m size. These models are analyzed for structural properties (mass, stiffness, strength). Furthermore, these models are analyzed the relation between flatness of their models deformed by the disturbances and rate of gathering solar light. From the results of these analyses, the author tries to select the best model of reflector in the size of 100m for SSPS. Therefore, the purpose of this study is to determine proper structure and configuration of model of reflector for SSPS from these models.

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 properties of models were analyzed on finite element method (FEM) by treating mirrors and bus equipment as the point mass. Aluminum alloy is used as main structural material. Furthermore, the author used the data of distribution of illumination of a commercial film mirror which was measured flatness and analyzed in the case that the mirror is exposed to the sun. The author analyzed total distribution of illumination in reflector by superposing this data of one mirror. The deformation of models is caused by disturbances (orbital and attitude control, solar pressure, gravity gradient and atmospheric drag).

From the results of these analyses the author made trade-off of these models and selected the best model of reflector in the point of stiffness (natural frequency), deformation, major principal stress, buckling stress, distribution of illumination, light collection efficiency and ratio of nonuniformity of illumination. The standard model of reflector is 100m×100m square. Performances of other models are evaluated by comparison with this standard model.

This paper shows the result of trade-off in analyzed models and the best models the author selected.

1. 序論

現在、エネルギー資源の枯渇と発電に伴う環境への影響が問題となっている。このような状況において、将来のエネルギーシステムとして宇宙空間での太陽光発電によるエネルギー供給システムが提案されている。

宇宙太陽光発電システムとは、宇宙空間で太陽電池パネルを広げ太陽光を集光し、マイクロ波やレーザーに変換後、地上に伝送、利用するシステムである。宇宙空間で発電することで、地上より高いエネルギー密度が得られ、また、地上の太陽光発電では発電量が低下する雨天時や夜間時でも発電が可能であるため、安定した電力の供給が可能である⁽¹⁾。

マイクロ波方式太陽光発電衛星の概略図を図1に示す。マイクロ波方式太陽光発電衛星は主に反射鏡、受光面(太陽電池面)、送電部から構成されている。反射鏡と受光面、送電部は編隊飛行を行っており、軌道は静止軌道をとる。また、反射鏡は太陽指向とし、太陽光と45°の傾斜角を持たせることで、常に太陽光を受光面に集光させる⁽²⁾。

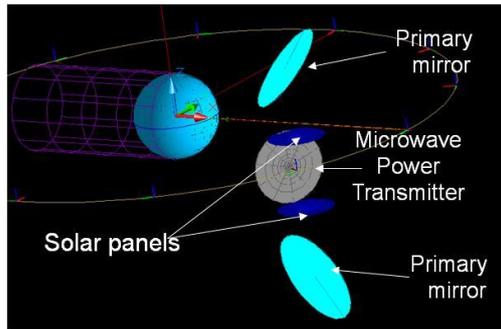


図1. マイクロ波方式太陽光発電衛星(M-SSPS)

100万kW級の発電を行うためには、太陽光発電衛星はkmサイズの構造が必要となる。そこで段階的な開発として高度1000kmにおいて、km級反射鏡の部分モデルである100m級反射鏡での実証衛星の研究が進められている。

2. 目的

本研究ではJAXAの中間目標であるマイクロ波方式太陽光発電衛星の100m級大型反射鏡を研究対象とする。ここで、反射鏡は受光面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り、そのため300g/m²という軽量化が要求される。また、反射鏡が制御力等の外乱により変形した場合、受光面での集光性能に影響を及ぼすことが考えられるため、高い剛性も要求される。よって、本研究では反射鏡の構造モデルを提案し、剛性、強度、変形に伴う照度分布を考慮してトレードオフを行い、反射鏡として最適な構造モデルの検討を行うことを目的とする。ここで、本研究では、照度は単位面積当たりに入射する太陽光エネルギーの量を表わす。

3. 前提条件

反射鏡と受光面の距離は5kmとし、鏡には分割鏡(セグメントミラー)を用いることで、太陽光を受光面に一様に反射させる。

反射鏡は、鏡とそれを支持する構造系(バックストラクチャ)、推進系、バス系から構成される。バックストラクチャは、金属材料のうち比重が小さく高強度であるAl合金を想定し、軽量化のためにトラス構造を用いる。またミラーは市販のフィルムミラーを想定する。

反射鏡の質量要求300g/m²より100m級反射鏡の構造モデルの総質量は3000[kg]となる。これより本研究ではバックストラクチャ、鏡面部、バス系(推進系を含む)をそれぞれ1000[kg]とする。また、反射鏡の設置面は1m×1mの正方形ミラーを1万枚配置できる面積とする。

4. 有限要素法を用いた構造解析

4.1 解析の流れ

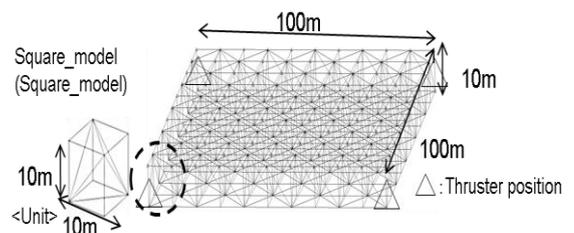
前提条件を満たす反射鏡の構造モデル案を作成、選定を行い、構造モデルを決定する。決定した構造モデルに対し、NASTRANを用いた構造解析(固有値解析、静荷重解析、動荷重解析)および照度解析を行う。

4.2 解析条件

境界条件はfree-free条件とし、バス機器は中央下部に520[kg]、スラスターは端部に4基(120[kg/基])、ミラーはモデル上面に1000[kg]をそれぞれ節点質量として与える。構造モデルの減衰比は軌道上の柔軟構造物より2%⁽³⁾とし、便宜上、安全率は1とする。また、照度解析はレイトレース法により求めた1m×1mミラー1枚の受光面での照度分布を重ね合わせることで行い、受光面の照度を均一にするために反射光の受光面での照射間隔を2mとする⁽⁴⁾。この状態から反射鏡が変形した場合の反射光の分布を解析する。

4.3 構造モデル

反射鏡面の対称性、部材数の削減、構成ユニットの単一化を考慮して、構造モデルを作成する。その内のSquare model, Hexagon triangle pole model, Hexagon pyramid modelの概形、モデル特性を図2、表1に示す。



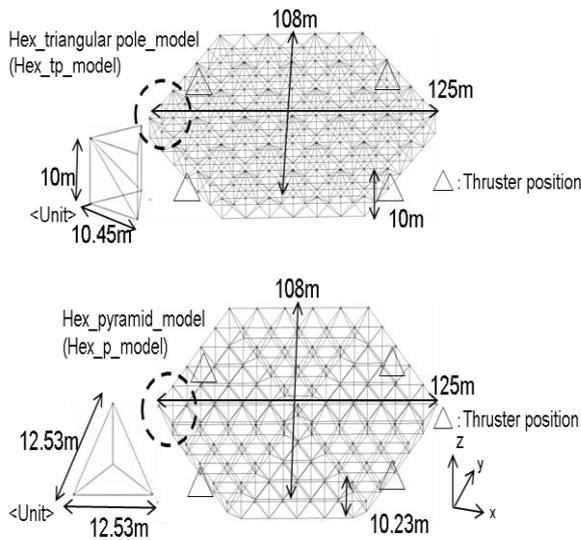


図2. 構造モデル

表1. モデル特性

model	Square_	Hex_tp_	Hex_p_
部材数	981	1028	722
最大部材長さ[m]	14.14	14.46	12.53
ロッド外径[mm]	100	108	130
ロッド肉厚[mm]	0.1	0.1	0.1

5. 解析結果と考察

5.1 固有値解析

各モデルの1~3次までの固有振動数を表2に示す。

表2. モード解析

model	Square_	Hex_tp_	Hex_p_
固有振動数 [Hz]	1次	0.86	1.33
	2次	1.48	1.66
	3次	2.33	1.72

一般に、質量が等しい場合、固有振動数が大きいほど剛性は高いと考えられる。表2より、各モデルの固有振動数には大きな違いが見られず、剛性は同程度であると考えられる。

5.2 静荷重解析

外力に太陽輻射圧(4.6[μ Pa])を想定した場合の静荷重解析を行う。各モデルの変位量は 10^{-7} [m]のオーダーで、発生応力も 10^{-7} [Pa]のオーダーであったため、太陽輻射圧は、反射鏡の変形、強度には影響を及ぼさないと考えられる。

5.3 動荷重解析

姿勢制御時の運動を想定し、スラスタによりy軸方向を回転軸とした重心周りの回転運動をさせる。この運動で、部材にオイラー座屈が発生した際のスラスタ推力を求め、発生した最大主応力の最大値、最大変位量を表3に示す。

表3. 座屈解析

model	Square_	Hex_tp_	Hex_p_
スラスタ推力[N/基]	204	280	903
最大主応力 [MPa]	6.99	5.68	16.6
最大変位量 *1[mm]	14.8	8.15	17.3

*1: 回転成分は取り除いてある

表3より、座屈時までの最大主応力は全てのモデルでAl合金の0.2%耐力(200[MPa])を下回っており、部材の強度は座屈により決定する。座屈に対する強度は、Hex_p_modelが最大でSquare_modelに比べ4.4倍程度大きい。Hex_p_modelの座屈時推力での最大変形図を図3に示す。

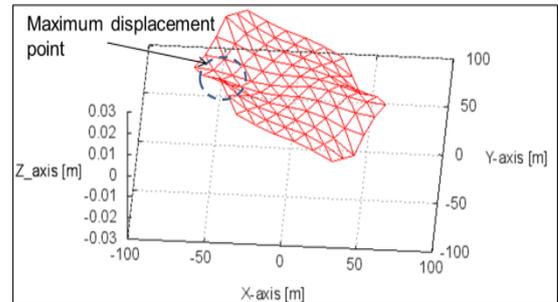


図3. Hex_p_modelの変形図

5.4 照度解析

5.4 動荷重解析と同じ運動での照度解析を行う。各モデルに等しいスラスタ推力を与えた場合(204[N/基], Square_modelの座屈時推力)の受光面での照度を解析し、集光効率、照度ムラの結果を表4に示す。

表4. 照度解析(推力一定[204N/基])

model	照度	変形なし	変形あり
Square_	最大変位量[mm]	0.00	14.8
	集光効率[%]	84.3	84.6
	最大照度ムラ[%]	—	24.1
Hex_tp_	最大変位量[mm]	0.00	7.64
	集光効率[%]	86.6	87.0
	最大照度ムラ[%]	—	17.1
Hex_p_	最大変位量[mm]	0.00	3.93
	集光効率[%]	86.6	87.0
	最大照度ムラ[%]	—	8.24

$$*2: \text{照度ムラ}[\%] = \frac{\text{変形前の照度}[W/m^2] - \text{変形後の照度}[W/m^2]}{\text{変形前の照度}[W/m^2]} \times 100$$

$$*3: \text{集光効率}[\%] = \frac{\text{受光面に入射した放射束}[W]}{\text{反射鏡に入射した放射束}[W]} \times 100$$

表4より、同じスラスタ推力を与えた場合、最大照度ムラはHex_p_modelが最も小さくなる。また集光効率はどのモデルも変形前後で1%未満の変化であり、ほとんど変わらない。

さらに各モデルのそれぞれの座屈時推力での照度解析を行う。その結果を表5に示す。

表5. 照度解析(座屈時推力)

model		最大変位量 [mm]	集光効率 [%]	最大照度ムラ [%]
Square_	変形前	0	84.3	-
	変形後	14.8	84.6	24.1
Hex_tp_	変形前	0	86.6	-
	変形後	8.15	87.0	19.8
Hex_p_	変形前	0	86.6	-
	変形後	17.3	86.8	36.0

表5より、座屈時の推力においても各モデルとも変形前後での集光効率の変化は微小である。照度ムラについては、座屈時には各モデルとも大きな照度ムラが発生していることがわかる。また最も大きな照度ムラを発生したHex_p_modelについて、座屈時の照度分布を図4に示す。

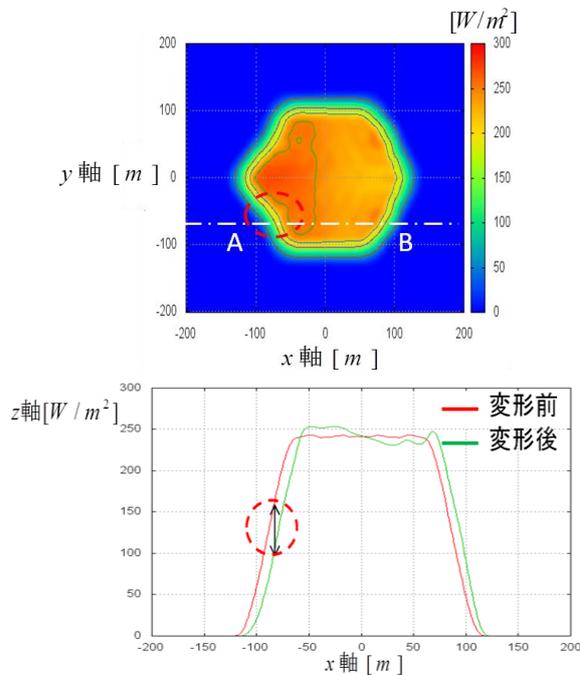


図4. Hex_p_modelの照度分布 (上図: 等高線図, 下図: A-B断面図)

図4より赤点線枠に示される箇所に36%程度の照度ムラを生じた。これは図3での変形図より、スラスト近傍のミラーの傾きによる影響であると考えられる。この傾向はその他のモデルでも共通して見られた。

次に変位量と照度ムラの関係について、構造モデルに対して変形ケースを想定し、各モデルが変形ケースに比例して変形していく場合の照度ムラを解析する。想定した変形ケースを図5として示す。図5よ変形ケースaにおける変位量と照度ムラの関係を図6に、変形ケースb, cにおける変位量と照度ムラの関係を図7に示す。

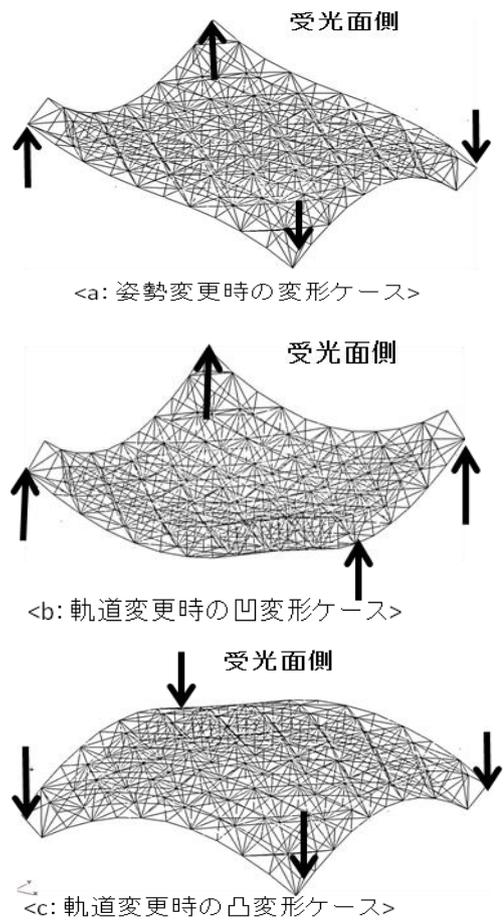


図5. 変形ケース

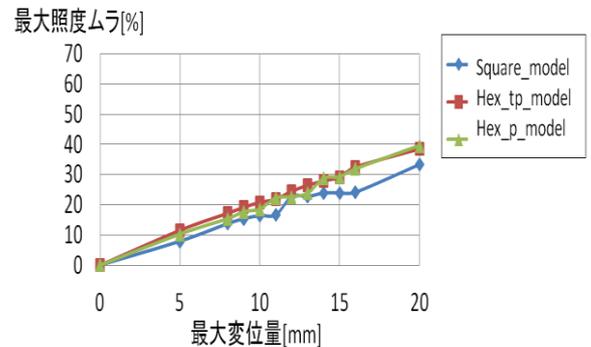


図6. 変形ケースaでの変位量と照度ムラの関係

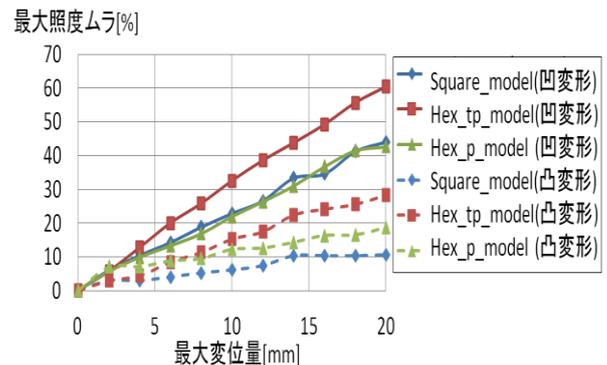


図7. 変形ケースb, cの変位量と照度ムラの関係

図 6, 7 より各変形ケースとも最大照度ムラを 20~30%以内に抑えるには, 最大変位量を 10mm 程度に抑える必要があることがわかる。

6. 結論

本研究では, 反射鏡の複数の構造モデルに対し構造解析・照度解析を行った。これらと比較することで, 最適な反射鏡の構造モデルを検討した。固有値解析では, 本研究での検討モデルでは剛性は同程度であった。静荷重解析では, 太陽輻射圧による構造への影響は微小であることが確認できた。動荷重解析では, 本検討ケースでは破壊は部材の座屈により生じた。照度解析では, 本検討ケースでは変形前後で集光効率はほとんど変化せず, 照度ムラに関しては変位量が 10mm を超えると大きなムラが生じることがわかった。以下に検討モデルのトレードオフ結果を表 6 として示す。

表 6. トレードオフ結果

model	Square_	Hex_tp_	Hex_p_
部材数	○	×	◎
剛性(固有振動数)	○	○	○
強度(座屈破壊)	×	○	◎
照度変化	×	○	◎

表 6 より, 本研究では Hex_p_model が最適な反射鏡の構造モデルだと考えられる。また, 通常運用では小推力のイオンスラスタを用いるため強度には十分な余裕があり, さらなる軽量化も可能であると考えられる。今回の構造モデルでは, 各部材の接合部の影響, 熱ひずみによる影響等を考慮していない。今後はそれらを考慮し, 各部材断面寸法の最適化を行うことで, より現実的なモデルでの検討が必要となる。

7. 参考文献

- (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ナルブックス
- (2)T.Fujita, S.Sasaki and D.Joudoi, "Overview of studies on Larage Structure for Space Solar Power Systems (SSPS)" IAC-10-C3.2.9 (2010), IAC 2010
- (3)小松敬治, 「宇宙航行のための構造動力学」
(小松敬治, 「機械構造振動学」, 森北出版, 2009)
- (4)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
2011 年度年次大会 特別行事 企画公演