

JAXA SSPS コストモデルに関する検討

斉藤 由佳[†] 藤田 辰人[†] 森 雅裕[†] 長山 博幸[‡]

[†] 宇宙航空研究開発機構 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

[‡] 三菱総合研究所 〒100-8141 東京都千代田区大手町 2-3-6

E-mail: [†] {saitoh.yuka, fujita.tatsuhito, mori.masahiro}@jaxa.jp [‡] nagayama@mri.co.jp

あらまし 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、2030 年頃に他のエネルギー源と競争し得る低コストで商用 SSPS を実現させることを目指して、1GW 級マイクロ波方式 SSPS (M-SSPS) 及びレーザー方式 SSPS (L-SSPS) の研究開発を実施している。経済性に関する検討としては、M-SSPS および L-SSPS のライフサイクルモデルを作成しパラメータスタディ等を継続して行っている。本稿では、M-SSPS コストモデルを中心としたライフサイクルモデルに関する検討概要を説明する。

キーワード マイクロ波方式 SSPS、ライフサイクルモデル、コストモデル、経済性検討

Study of JAXA's SSPS Cost model

Yuka SAITO[†] Tatsuhito FUJITA[†] Masahiro MORI[†] and Hiroyuki NAGAYAMA[‡]

[†] Japan Aerospace Exploration Agency 7-44-1 Jindaiji Higashimachi, Chofu-City, Tokyo, 182-8522 Japan

[‡] Mitsubishi Research Institute, Inc. 2-3-6 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8141 Japan

E-mail: [†] {saitoh.yuka, fujita.tatsuhito, mori.masahiro}@jaxa.jp [‡] nagayama@mri.co.jp

Abstract Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has been conducting studies on Space Solar Power Systems (SSPS) using microwave and laser beams for years since FY1998. In this study, the life cycle cost model of SSPS was created and evaluated its validity. Sensitivity analysis are continued aiming at generating cost of around 8 yen per kWh. This paper presents a summary of studies on M-SSPS life cycle model.

Keyword M-SSPS, Life cycle model, Cost model, Economic Evaluation

1. はじめに

宇宙太陽光利用システム (SSPS: Space Solar Power Systems) とは、宇宙空間で得られる太陽光エネルギーをマイクロ波やレーザーにより地上に無線伝送し、地上でそのエネルギーを電気や水素等の無公害燃料に変換し利用するシステムである。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、2030 年頃に、他のエネルギー源と競争し得る低コストで商用 SSPS を実現させることを目指して、1GW 級マイクロ波方式 SSPS (M-SSPS) 及びレーザー方式 SSPS (L-SSPS) の研究開発を実施している。経済性に関する検討としては、M-SSPS および L-SSPS のライフサイクルモデルを作成しパラメータスタディ等を継続して行っている。また、M-SSPS のモデルに関しては、JAXA_SSPS 検討委員会 / ワーキンググループ (WG) 全メンバーに使用してもらうことを目的として、計算用のツール (Excel ファイルで作成) を整備し、更なる精度向上を目指している。

本稿では、M-SSPS コストモデルを中心に、JAXA SSPS のライフサイクルモデルに関する検討の概要を説明する。

2. M-SSPS ライフサイクルモデル

M-SSPS ライフサイクルモデルは、コストモデル、環境負荷計算モデル、エネルギー収支計算モデルを含む、M-SSPS のライフサイクルにおけるコスト / CO₂ 排出量 / エネルギー収支を計算するモデルである。

2.1. モデル概要

2.1.1. コストモデル

(1) コストモデルによる経済性評価の目的

SSPS の実現性を検討する上では、システムの技術的成立性と同様に経済的成立性を十分に確認する必要がある。具体的には、2030 年頃に他のエネルギー供給システムと競争し得るコストで電力 / 水素供給が行える必要があり、発電コスト 8 円/kWh 以下を達成することを目標に研究開発を行っている。

JAXA では、SSPS を建設・運用する上でのコスト構成や、上記の目標値を達成するために今後注力していくべき開発要素等を把握することを目的として、98 年に SSPS 建設・運用のライフサイクル全体を考慮したコストモデルを作成した。その後、毎年、リファレン

モデルのコンフィグレーションやシナリオの変更を反映させた改修を続け、現在に至っている。

(2) コストモデルの構成

M-SSPS コストモデルは、M-SSPS の構築と運用に関して必要となるコストを算出するモデルであり、宇宙セグメント、レクテナ、打ち上げ、メンテナンスにかかるコストを求める部分から構成される。

宇宙セグメント

宇宙セグメント製造時に発生するコストを求める部分であり、2005年発送電分離型モデルのコンフィグレーションに対応して、集光部(一次ミラー)、発電部(太陽電池)、送電部、排熱部、その他構造体に分けてモデル化されている。また、コストを算出する際には、太陽光/DC変換部、DC/マイクロ波変換部およびその他構造体に分けて計算を行う。

太陽光/DC変換部のコストは、太陽電池の単位面積当たりの単価と太陽電池面積の積により計算する。

DC/マイクロ波変換部のコストは、DC/マイクロ波変換素子の単価と送電電力量の積により計算する。

その他の部分は構造体とみなして計算を行い、単位重量単価と重量の積により計算する。

レクテナ

レクテナ建設時に発生するコストを算出する部分で、マイクロ波受電部とその他構造体、電力網への接続部に分けてモデル化されている。マイクロ波受電部のコストは、マイクロ波/DC変換素子単価とレクテナ出力端での電力量の積により計算する。その他構造体の建設コストは単位面積当たりの土地単価と工事単価の和とレクテナ面積の積で計算する。商用電力網への接続コストは発電量より算出する。

打ち上げ

打ち上げ時に発生するコストは、地上から組立軌道までの輸送コストと組立軌道から静止軌道までの軌道間輸送の際に必要なコストの和で求められる。地上から組立軌道までの輸送にはRLVを使用し、組立軌道から静止軌道までの輸送には再使用型の電気推進OTVを使用することを前提とする。

輸送シナリオとしては、RLV 1機による打上げ分をOTV 1機で輸送し、静止軌道上で全体組立を行うシナリオをベースラインとして採用した。本シナリオでは、RLV 1機とOTV 1機が1:1に対応しており、組立軌道においてペイロードの受け渡しおよびOTV機への補給等を行うこととなる。SSPS初号機打ち上げ時は、SSPS宇宙セグメントと同時に、OTV本体(推進系+太

陽電池+構造体)と推進剤を同時に打ち上げる必要があるが、2号機以降の打ち上げ時には、OTV本体改修分と推進剤のみ同時に打ち上げれば良いため、SSPS初号機と2号機目以降では打ち上げコストが異なるモデルとなっている。

メンテナンス

宇宙セグメントおよびレクテナのメンテナンス時に必要となるコストを算出する部分で、宇宙セグメント製造時と打ち上げ時とレクテナ建設時のコストにメンテナンス率を乗じることで計算する。宇宙セグメントのメンテナンス率は、発電部、送電部、その他構造体ごとに設定することが可能である。

図1にM-SSPSコストモデルの計算の流れを示す。

2.1.2. 環境負荷計算モデル

環境負荷計算モデルでは、以下の計算式により、SSPSの構築時および運用時におけるCO₂排出量を計算する。

$$\begin{aligned} & (\text{SSPS 構築時の CO}_2 \text{ 排出量}) \\ &= (\text{宇宙セグメント構築時 CO}_2 \text{ 排出量}) + (\text{レクテナ建設時 CO}_2 \text{ 排出量}) + (\text{打ち上げの燃料として要する液体水素と液体酸素の製造時 CO}_2 \text{ 排出量}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\text{SSPS 運用時の CO}_2 \text{ 排出量}) \\ &= (\text{宇宙セグメント構築時 CO}_2 \text{ 排出量} + \text{打上げ時 CO}_2 \text{ 排出量}) \times (\text{宇宙セグメントのメンテナンス率}) \\ &+ (\text{レクテナ建設時 CO}_2 \text{ 排出量}) \times (\text{レクテナのメンテナンス率}) \end{aligned}$$

2.1.3. エネルギー収支計算モデル

エネルギー収支計算モデルでは、以下の式により、SSPSの構築時および運用時におけるエネルギー収支を計算する。

$$\begin{aligned} & (\text{SSPS 構築時の投入エネルギー}) \\ &= (\text{宇宙セグメントの製造エネルギー}) + (\text{レクテナの建設エネルギー}) + (\text{打ち上げの燃料として要する液体水素と液体酸素の製造エネルギー}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\text{SSPS 運用時の投入エネルギー}) \\ &= (\text{宇宙セグメント製造時投入エネルギー} + \text{打上げ時投入エネルギー}) \times (\text{宇宙セグメントのメンテナンス率}) \\ &+ (\text{レクテナ建設時の投入エネルギー}) \times (\text{レクテナのメンテナンス率}) \end{aligned}$$

ここでは、宇宙セグメントの主要構成要素として太陽電池、DC/マイクロ波変換素子、アルミ、レクテナ

の主要構成要素として鉄とアルミを想定している。

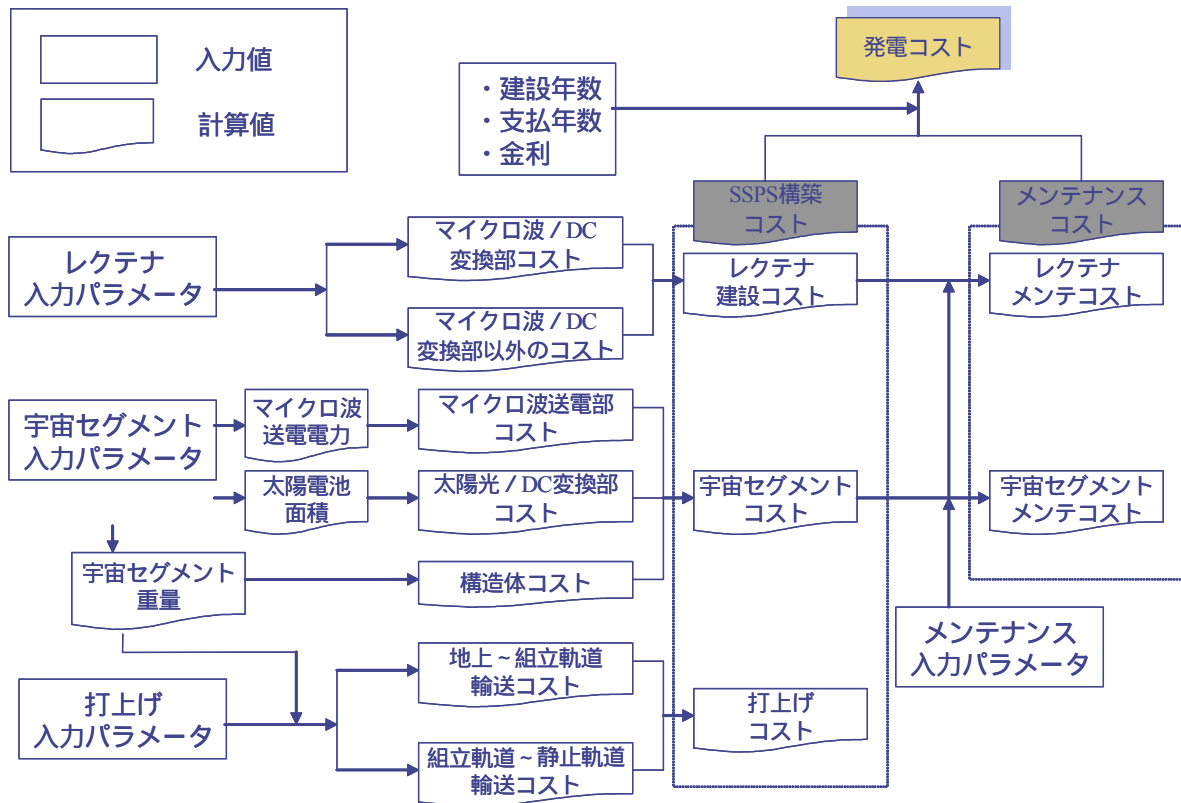


図 1 M-SSPS コストモデルの構成

2.2. 入力パラメータ

表 1 に M-SSPS ライフサイクルモデルで使用している入力パラメータのリストを示す。
全部で 82 種類の入力パラメータが存在する。

2.3. 計算値

表 1 で示した入力パラメータを基に、宇宙セグメント、レクテナ、打ち上げ、メンテナンス等に関わるコストが算出される。SSPS 構築までの総コストおよび発電コストも算出される。

紙面の制約上、すべての計算値を示すことができないが、以下に計算値の概要を示す。

宇宙セグメントのコスト

宇宙セグメントの全重量が求められる。また、1) マイクロ波送電部分のコスト、2)太陽光 / DC 変換部のコスト、3)その他 (構造体) のコストが求められ、1)と 2)と 3)を加えたものが宇宙セグメントのコストとして算出される。

レクテナのコスト

打ち上げコスト

地上から組立軌道までの輸送コストと組立軌道から静止軌道までの軌道間輸送の際に必要なコストが求められる。

メンテナンスコスト

SSPS 構築総コスト / 発電単価

上記の宇宙セグメントコストとレクテナコスト、および打ち上げコストを加算したものが SSPS 構築総コストとなる。さらに、メンテナンスコストや金利、SSPS 寿命等を入力して発電コストを算出することができる。

また、2.1.2 項で示した式により CO₂ 排出量、2.1.3 項で示した式により、エネルギー収支を計算することができる。

表 1 M-SSPS ライフサイクルモデル入力パラメータ

< コストモデル入力パラメータ >

項目	単位
出力端での電力	GW
マイクロ波の大気透過率	%
蝕の影響	%
季節変動	%
太陽光のエネルギー密度	kW/m ²
集光効率	%
太陽光-DC変換効率	%
集電効率	%
DC-マイクロ波変換効率	%
集光倍率	
波長選択率	%
太陽電池表面温度	
アンテナ面表面温度	
太陽電池裏面温度	
アンテナ面裏面温度	
太陽電池面の輻射率	
アンテナ面の輻射率	
太陽電池裏面の輻射率	
アンテナ裏面の輻射率	
アンテナ面直径	km
集光部(一次ミラー)密度	ton/km ²
太陽電池密度	ton/km ²
波長選択膜密度	ton/km ²
マイクロ波送電器密度	g/W
アンテナ密度	ton/km ²
集電ケーブル重量密度	ton/km
送電部構造体重量割合	%
ラジエータ/流体ループ密度	g/W
重量マージン	%
DC-マイクロ波変換素子の単価	円/W
太陽光-DC変換素子の単価	億円/km ²
その他の単位重量単価	億円/ton
マイクロ波-DC変換効率	%
商用電源網への接続効率	%
商用電源網への接続費用	億円/GW
土地単価	億円/km ²
工事単価	億円/km ²
マイクロ波-DC変換素子の単価	円/W
地上~LEOまでの輸送期間	日
RLVペイロード	ton
宇宙でのフライト日数	日
ターンアラウンドタイム	日
RLV運用(=打ち上げ)単価	億円/ton
LEO~GEOまでの輸送期間	日
必要速度増分	km/s
OTV比推力	s
推進系総合効率	0
推進系の比重量	kg/kW
太陽電池比重量	kg/kW
構造体重量係数	0
推進剤(帰還分)割合	%
余剰太陽電池割合	%
蝕期間割合	%

OTV製造単価	億円/ton
推進剤燃料単価	円/kg
太陽電池単価	円/W
OTV本体(太陽電池以外)寿命	回
OTV太陽電池寿命	回
レクテナの年間メンテナンス率	%
太陽電池の年間メンテナンス率	%
マイクロ波送電部の年間メンテナンス率	%
構造体(その他)の年間メンテナンス率	%
寿命	年
建設年数	年
金利	%/年

< 環境負荷計算モデル入力パラメータ >

宇宙セグメントの発電電力 当たりのCO ₂ 発生量	t-CO ₂ /GW
太陽電池の発電電力当たりのCO ₂ 発生量	t-CO ₂ /GW
LH ₂ 製造時のCO ₂ 発生量	t-CO ₂ /t
LOX製造時のCO ₂ 発生量	t-CO ₂ /t
ペイロード重量当たりのLH ₂ 必要量	t-LH ₂ /t-pl
ペイロード重量当たりのLOX必要量	t-LOX/t-pl
レクテナのアンテナ部の出力電力 当たりのCO ₂ 発生量	t-CO ₂ /GW
アンテナ以外のレクテナの面積 当たりのCO ₂ 発生量	t-CO ₂ /km ²

< エネルギー収支計算モデル入力パラメータ >

宇宙セグメントの単位重量当たりの 製造エネルギー	kWh/t-Al
太陽電池の発電電力当たりの製造エネルギー	kWh/W
DC-マイクロ波変換素子の発振電力当たりの製造 エネルギー	kWh/W
LH ₂ 単位重量当たりの製造エネルギー	GWh/t-LH ₂
LOX単位重量当たりの製造エネルギー	GWh/t-LOX
アンテナ部の単位重量当たりの製造エネルギー	kWh/t-Al
アンテナ以外のレクテナの単位重量当たりの製 造エネルギー	kWh/t-Fe
単位面積当たりのレクテナのAl重量	t-Al/km ²
単位面積当たりのレクテナのFe重量	t-Fe/km ²

2.4. 計算ツールの整備

2005年度は、全WGメンバーが本ツールを活用することにより、システム構成パラメータのコストへの感度を知り、WGの検討の際に役立ててもらうことを目的として、上述のモデルの計算ツールの整備を行った。全WGメンバーが本ツールを使用することにより、モデルで用いている計算式やパラメータ値を専門家の目でチェックしてもらうことができ、パラメータとして使用している値やコストモデルの精度が高まっていくことが期待される。

計算ツールはM-SSPS Evaluation Modelと名づけられ、コスト計算部と環境負荷(CO₂排出量)計算部とエネルギー収支計算部とで構成される。WGメンバー

が簡単にパラメータ操作できるレベルの Excel ファイルである。

図 2 に本ツールのメインメニュー画面を示す。



図 2 M-SSPS Evaluation Model メインメニュー画面

2.5. 課題と今後の展開について

ライフサイクルモデル活用の最終的な目標は、発電コストや CO₂ 排出量、エネルギー収支を評価関数として、パラメータスタディや感度分析を行うことにより、影響の大きいパラメータやその目標値などを検討することであるが、そのためにはパラメータ選定の適切さや入力パラメータ値の妥当性が重要な要素となる。これまでもコストモデルで主要なパラメータの感度分析を実施しているが、パラメータ設定値については、さらに検討を深める必要がある。

そのため、2005 年度には、Excel ベースの計算ツールを整備した。今後は、WG の全メンバーに活用してもらい、そこからの意見等を反映していくことで、改良を重ね精度を高めていくことが期待される。なお、モデルで使用しているパラメータ値については、経済性検討の中で別途実施している「要素技術開発ロードマップの精緻化」の値とも整合をとっていくことで、更なる精度向上を見込むことができる。

なお、本年度、整備した計算ツールを M-SSPS Evaluation Model Ver.1.0 として、WG メンバーに配布することとする。次年度以降、改良を進めバージョンアップを図っていく。その際、適切なバージョン管理（モデルの履歴管理）を行っていくよう留意したい。

3. L-SSPS コストモデル

M-SSPS コストモデルと同様、L-SSPS の構築と運用に関して宇宙セグメント、地上施設、打ち上げ、メンテナンスにかかるコストを求めるモデルを作成した。なお、水素製造方式としては、太陽電池で発電した電力による電気分解方式の他に、光触媒による方式があるが、現状のモデルではレーザー波長に最適化された

太陽電池で発電し、水を電気分解することで水素を製造する方式をモデル化した。また、製造された水素の液化と輸送に関してはモデルに組み込んでいない。

なお、L-SSPS の規模やコンフィグレーションに関しては検討途上の段階であるものが多いため、現段階では、L-SSPS コストモデルに関しては、モデルを構築し予備計算を行う段階にとどめた。予備計算の結果、レーザー媒質のコスト、ビーム制御部のコストにより大きく水素製造コストが変化することが分かった。次年度以降は、これらの値を検討し、パラメータスタディを行っていく必要がある。また、晴天率により水素製造コストも大きく変わるため、雲があってもレーザー伝送が可能かどうか、またはその効率がどの程度かを早急に明らかにする必要がある。

4. 低軌道周回型 SSPS コストモデル

静止軌道に SSPS を設置する場合、常に安定したエネルギーを特定の地点に送ることができるという利点があるものの、低軌道周回軌道に SSPS を設置する場合に比べ、輸送コストが高くなる、送電系が大きくなる、太陽追尾の必要がある等の不利益な点もある。一方、低軌道周回軌道の場合は、エネルギー伝送が間欠的になり稼働率が低いことが最大の弱点となる。これらの利点欠点を総合的に判断するために、低軌道周回型 SSPS のコストモデルを構築し、諸条件を変え比較検討したいと考えている。現在は、コストモデルのフレームを検討している。

5. 謝辞

本稿は JAXA_SSPS 検討委員会に所属している「経済分析・市場分析 WG」の活動の中で行われた検討成果の一部をまとめたものである。検討に当たっては、同 WG メンバーの方に協力をいただいた。ここに謝意を表する。

文 献

- [1] 平成 18 宇宙航空研究開発機構委託業務成果報告書「宇宙エネルギー利用システム総合研究」、株式会社三菱総合研究所
- [2] 斉藤由佳, 長山博幸, 松岡巖, 森雅裕, “JAXA SSPS コストモデルによる宇宙太陽光利用システムの経済性評価”, 第 49 回宇宙科学技術連合講演会講演集(2005)
- [3] M.Mori, T.Fujita, Y.Saito, “SUMMARY OF STUDIES ON SPACE SOLAR POWER SYSTEMS OF JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA)”, 25th International Symposium on Space Technology and Science, 2006-r-1-03, (2006)