

Recent USEF Studies on Space Solar Power System (SSPS)*

Takashi Saito, Yutaro Kobayashi, Hiroshi Kanai
Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer (USEF)
2-12 Kanda-Ogawamachi, Chiyoda-Ku, Tokyo, 101-0052

Abstract:

Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer (USEF) has studied Space Solar Power System (SSPS) under the contract from Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) from FY2001 to FY2002. In the study, three types of demonstrator concepts (100-400kW class on low earth orbit) and a basic SSPS concept named "Baseline" and other options (1GW class in GEO) are investigated. The Baseline power satellite is constructed mainly with a large flat sandwich panel (the power generation/transmission system) to which a main bus system is connected by multi-tethers.

The lifecycle carbon dioxide emission for the SSPS has been estimated. The result indicates that the carbon dioxide emission from the SSPS per unit of energy generated is almost the same as that of nuclear power system and much less than fossil fuel power system.

The economic aspects for the SSPS including the construction cost, power generation cost and the resultant utility price has also been estimated. But the estimated power generation cost of the Baseline system is higher than our target cost of 10 cents/kWh. The Baseline concept gives priority to stability and robustness, and is based on rather modest assumptions for future technological progress. And no moving parts, such as a rotary joint or reflecting mirrors, are employed for reliability reasons. It turned out that the system stay heavy in weight and transportation cost therefore is high. In contrast, optional concepts are based on a best estimate forecast of technology such as high photovoltaic (PV) solar-energy conversion efficiency. This enables the size and mass of SSPS to be smaller and thus to be cheaper. In addition to high efficiency PV, the usage of mirror reflectors leveling power output makes the area of sandwich panel (PV) to be smaller furthermore (1G-2). As a result, the power generation cost of optional concepts (1G-1, 1G-2) is estimated enough below the target.

In FY2003, additional study has conducted by the Study Working Team with experts from the aerospace industries and the universities, focusing on the feasibility of the optional concepts in the following fields.

- Space System Attitude Stability (static and dynamic)
- Methods and Feasibility of Construction on orbit
- On Orbit Operation
- Economical Aspect
- Development Scenario and Roadmap

The paper elaborates those study results for future Space Solar Power System to be expected for the time frame of 2030 and beyond.

* Presented at 7th SPS Symposium, 16-17 September, 2004

USEFにおける活動状況^{注1}

齊藤 孝、小林 裕太郎、金井 宏

(財) 無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)

101-0052 千代田区神田小川町 2-12

saito@usef.or.jp, y.kobayasi@usef.or.jp, kanai@usef.or.jp

要旨：USEF では経済産業省および同省関連団体からの委託を受けて、将来の電力代替エネルギー源としての宇宙太陽発電システム (SSPS) の実用化技術に関する調査研究を行ってきた。これら調査研究プロジェクトの概要と活動の状況について報告する。平成 12 年度は SSPS 全般に関する調査を実施し、平成 13、14 年度は実用化技術調査として経済、環境及び技術面から SSPS の実用化に向けての検討を行うとともに、要素技術についての試作の実施、実証実験システム及び実用段階での SSPS の具体案についての開発計画策定等を行った。平成 15 年度は実用 SSPS の構造システムについて検討を行うと共に、発送電部（発送電一体型パネル）に関する要素試作を行った。現在（平成 16 年度）は、主に環境・安全等に関するアセスメントについて検討を行うと共に発送電部に関する要素試作を更に進めるなど、継続研究中である。

1. これまでの活動状況[1][2][3]

USEF では、平成 12 年度の「宇宙太陽発電システムに関する調査研究」（日本機械工業連合会より受託）における SSPS の全般にわたる調査に続き、平成 13～14 年度に「宇宙太陽発電システム実用化技術調査研究」（経済産業省より受託）を実施した。

「宇宙太陽発電システム(SSPS)実用化技術検討委員会」（委員長：茅陽一 [(財) 地球環境産業技術研究機構 副理事長/研究所長]) および「宇宙太陽発電システム(SSPS)専門委員会」（委員長：佐々木進 [宇宙科学研究所教授]) を設置して検討を行った。作業概要は以下のとおりである。

<平成 13 年度>

- ・ SSPS 実証実験システム案の検討：100～400 kW 級システム案立案
- ・ 要素試作試験：下記 2 テーマの選定、担当メーカーの選定、設計・解析開始
 - ・ 分離した系の位相同期システム
 - ・ フェーズドアレイによるビーム制御と半導体アンプの高効率化
- ・ 実用型 SSPS の検討：ベースライン案の提示
- ・ 評価手法の検討：経済性評価、CO₂ 排出量評価ツールの調査、解析準備
- ・ 主要技術の動向調査：11 項目について動向調査まとめ
- ・ その他の関連事項：国内外の機関の研究動向調査等

<平成 14 年度>

- ・ SSPS 実証実験システム案の検討：ベースライン案の提示、その実現性、問題点等の検討
- ・ 要素試作試験：前記 2 テーマについて試作・試験完了
- ・ 実用型 SSPS の検討：ベースライン案の定義、派生型案の作成等
- ・ 評価手法の検討：実用型 SSPS 案の経済性評価、CO₂ 排出量評価を実施
- ・ 主要技術の動向調査：太陽電池技術等の最新状況、レーザ送電技術の追加
- ・ その他の関連事項：SSPS をめぐる最近の動向等のまとめ

^{注1} 第 7 回 SPS シンポジウム、九州工業大学にて 2004 年 9 月 16、17 日開催

2. SSPS 構造システム検討

平成 15 年度は、前年まで行われた SSPS 実用化技術調査研究の中で課題として残された部分について更に精査することを目的として追加の検討を行った(図 1)。実用型 SSPS の構造・システムの具体化を目指して「SSPS 構造システム検討委員会」(委員長: JAXA 宇宙科学研究本部 樋口健助教授)を結成した。委員会では大学、メーカーからの有識者を交えて、衛星の姿勢安定、軌道上建設、軌道上運用、経済性、および開発ロードマップ等について検討した。ここでは主として衛星の姿勢安定に係わる検討結果を紹介する。

2.1 衛星の姿勢安定[4]

実用型 SSPS (図 2) の定常運用状態において、重力傾斜による受動的姿勢安定についての評価結果は以下のものである。

- 1) 現在のモデルでは、何れもヨー軸周りの安定性が低い。(図 3)
- 2) 姿勢振動の角振動数が軌道角振動数の整数倍から離れており、共振する可能性は少ない。(表 1)
- 3) 1G-2 の場合では、太陽輻射圧による外乱に対し、ピッチ軸周りの釣合い姿勢角は 6°程度変動し、能動的な制御が必要である。(表 2)

2.2 軌道上建設[4]

軌道上で SSPS を建設するとき、モジュールの追加方式としてライン型(図 4)と比例型(図 5)を考えた。実用型 SSPS の建設途上において、重力傾斜による受動的姿勢安定についての評価結果は以下のものである。

- 1) 軌道運動による周期的外乱に対して、組立初期段階でヨー軸の姿勢振動の角振動数が軌道角振動数とほぼ等しく、ロール軸周りの角振動数が軌道角振動数の 2 倍にほぼ等しいため共振の可能性がある。(図 6)
- 2) 建設を比例型組立法で進める場合には、共振を回避できるが姿勢変動が大きい。(図 7)
- 3) 建設初期段階において、(質量中心のずれがなくとも)ロール軸周りに大きな姿勢変動が生じる。(図 8)

などの結果をもとに建設時の姿勢安定性改善に向けて、モジュールのアスペクト比変更や、能動的姿勢制御の導入などが提案された。

また、ランデブードッキング(RVD)、パネル部の展開・組立、テザー張架など、全般にわたって実用型 SSPS の建設方法を検討した。

4) RVD プロファイルの設計および制御系設計において最も重要視されることは、アポート時の非衝突軌道の確保である。ランデブー衛星が後方より接近し、建設中の SSPS 後方に RVD ポートを設置した場合の RVD プロファイル例を図 9 に示す。

5) テザー張架方法に関して検討した。その一案を図 10 に示す。

①圧縮荷重に耐える進展トラス等でパネル部とバス部間を保持、②進展トラスを往復する張架機でテザーを複数本同時に張る、③RVD したモジュールをロボットで取付け位置まで移動、④モジュールを展開しパネルを既存部に取付け、⑤パネル部上でロボットがテザーをパネルに取付け、というシーケンスになる。

3. おわりに

実用型 SSPS の数種の案について技術面、経済面、環境面から検討を行った。検討は1サイクルを終えたところであり、今後のより詳細な検討を必要とする項目も多く残されている。例えば、構築方法の具体化（テザー伸展、ランデブードッキング、モジュール結合方式、ロボットの利用）はそのひとつである。

SSPSは、地上における太陽エネルギー利用と異なり昼夜や天候に左右されることなく電力の供給が可能であること、電力供給時のCO₂の排出はゼロであること等の極めて優れた特徴を有しており、将来の実用化が期待されている。

しかし SSPS の実用化に当たっては、安全性、環境適合性、電源としての安定性が保障される必要がある。特にパブリック・アクセプタンスは不可欠である。今後は SSPS のような巨大システム導入にともなう問題点についてのアセスメントも行ってゆく予定である。

参考文献：

- [1] 宇宙太陽発電システム(SSPS)実用化技術検討委員会報告書、USEF、平成 15 年 3 月
- [2] 宇宙太陽発電システム(SSPS)実用化技術検討委員会 専門委員会 SSPS 実証実験システム概念検討書(案)、USEF、平成 15 年 3 月
- [3] 齊藤：宇宙太陽発電システムに関する USEF における活動状況、第 6 回 SPS シンポジウム、平成 15 年 10 月
- [4] 泉田啓、石村康生、高井伸明：宇宙太陽発電システム（SSPS）実用型モデルのシステムダイナミクス検討・解析、平成 16 年 3 月

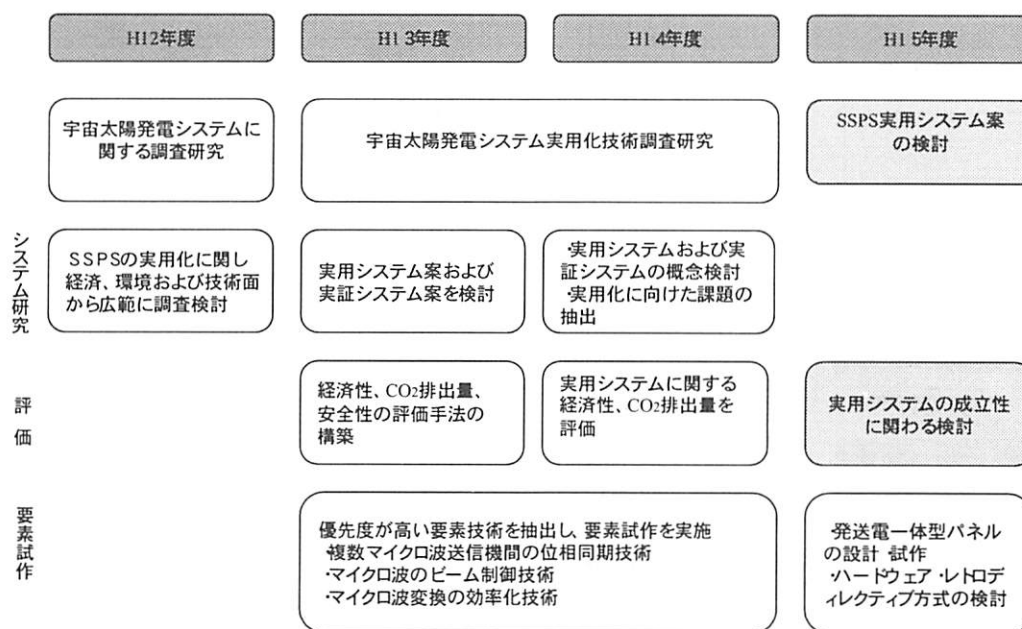


図 1 USEF における最近の活動状況

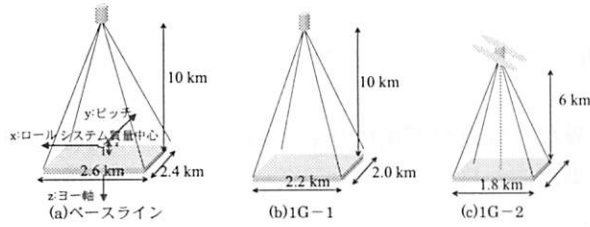


図2 実用型 SSPS 案

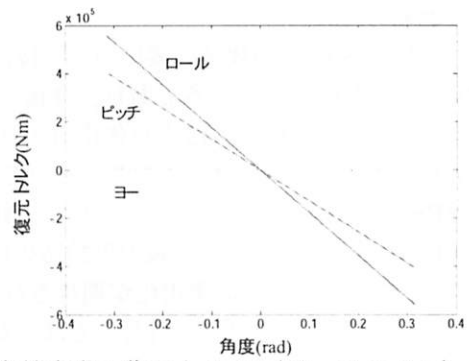


図3 姿勢変動と復元トルク (ベースライン)

表1 姿勢変動の固有振動数比
(軌道角振動数 ω に対する比)

	ベースライン	1G-1	1G-2
ロール	1.71	1.79	1.79
ピッチ	1.45	1.51	1.51
ヨー	0.28	0.31	0.32

表2 太陽輻射圧トルク
と釣り合い姿勢角(1G-2)

	理想状態		1%の質量中心のずれ	
	最大太陽輻射圧トルク [N·m]	釣り合い姿勢角 [rad]	最大太陽輻射圧トルク [N·m]	釣り合い姿勢角 [rad]
ロール	0	0	$4.34 \cdot 10^6$	$3.39 \cdot 10^{-4}$
ピッチ	$4.00 \cdot 10^6$	$4.30 \cdot 10^{-4}$	$3.97 \cdot 10^6$	$4.27 \cdot 10^{-4}$
ヨー	0	0	$1.90 \cdot 10^6$	$2.11 \cdot 10^{-4}$

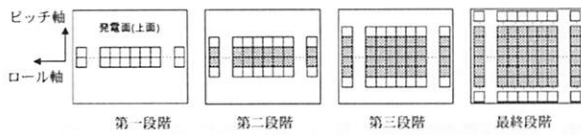


図4 ライン型組立

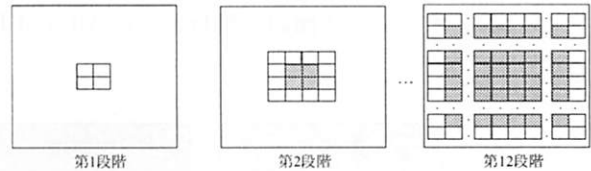


図5 比例型組立

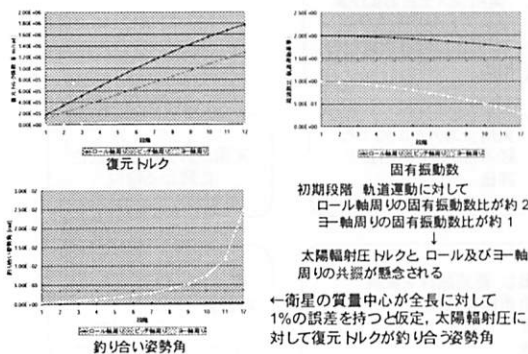


図6 ライン型組立時の準静的安定性
(ベースライン、静止軌道)

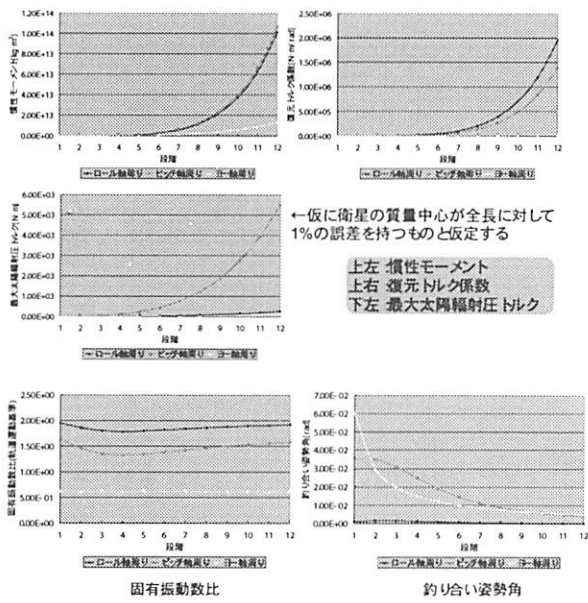


図7 比例型組立時の準静的安定性

理想状態: 質量のずれなしを仮定

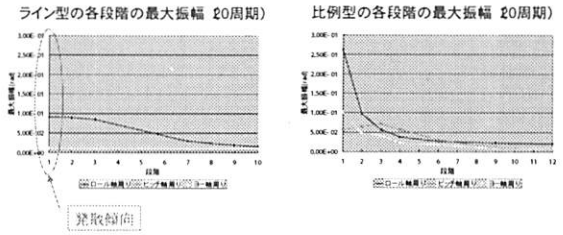


図8 季節変動と姿勢変化

- ・ターゲット衛星と同じ軌道面
- ・衛星形状のため衝突は下方
- ・下方回避のため後方よりアプローチ
- ・電波送電のためパネル下面でRVDしない

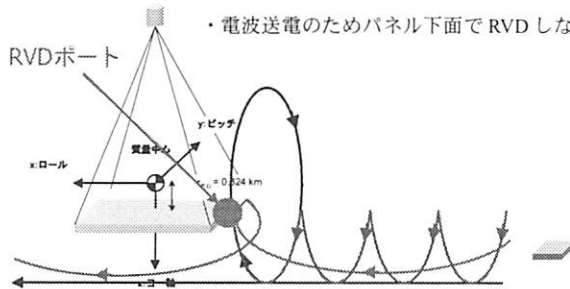


図9 ランデブー・プロファイル例

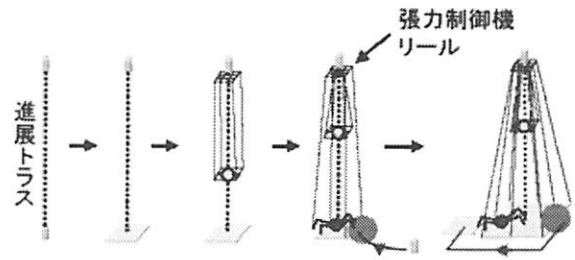


図10 テザー張架方法案