

宇宙太陽発電システムの検討現状と今後の検討方向†

Current Status of a Space Solar Power System Study and Future Study Points

高野 忠*‡
Tadashi TAKANO

太陽発電衛星 (SPS)は、システムが極めて巨大であるため、一般に理解されにくい。その一因は、システムの構成と機能が未だ示されないことにある。本論文では、SPS の所要技術を概観し、特にシステム開発の岐路となる衛星姿勢制御とスリップリング、および巨大アンテナ技術の検討現状を示す。次にこれまで検討されてきた諸システムモデルの課題を明らかにして、あわせて段階的な開発手法を提案する。

A solar power satellite (SPS) is hard to be understood by the public due to its extremely large system scale. One of the reasons is that the constitution and function of the system is not clarified yet. This paper surveys the necessary technologies first. Especially, satellite attitude control and a relevant slip ring that indicate the crossroads of system development, and a huge antenna technology are presented. Next, several system models studied so far are introduced. The stepwise scenario of development will be proposed.

Keywords : 宇宙太陽発電, 巨大システム, 衛星姿勢制御, スリップリング, アレーアンテナ, 大量生産アンテナ, 線表

1. はじめに

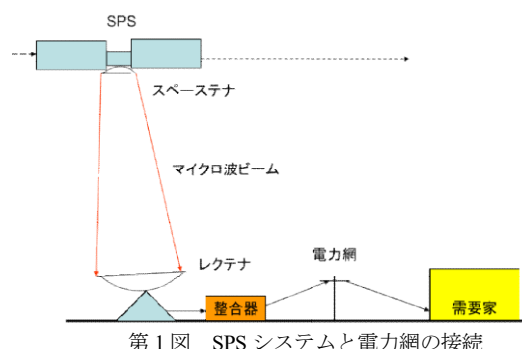
太陽発電衛星 (SPS)は、将来のエネルギー源として有望である¹⁻³⁾。すなわち炭酸ガスや廃棄物の排出は無いので、環境に優しい。太陽という無限のエネルギー源を利用するので、資源枯渇の問題がない。しかも地上の太陽光発電と比べ、夜という発電不能時間が無く、天候に左右されないため、平均発電時間ははるかに長い。従ってその研究開発に対するニーズは、明確である。

この利点のゆえに Innovation for Cool Earth Forum (ICEF) 2016 において、核融合技術と共に注目すべき新電源として取り上げられた⁴⁾。しかし SPS はシステムが極めて巨大であるため、ICEF 2016 のみならず常に、様々な指摘や質問がある^{5,6)}。

本論文では、SPS システムの所要技術を概観し、システム開発の岐路となる技術の検討現状を示す。あわせて、今後取るべき検討方向を提案する。

2. 宇宙太陽光発電の目的とシステム概要

SPS システムは、人工衛星 (SPS) と地上の受電設備 (レクテナ)、および電力網との接続装置で構成される。すなわち第 1 図に示すように、SPS から電磁波エネルギーをビーム状にして送り、レクテナで受電・整流する。



第 1 図 SPS システムと電力網の接続

3. システム実現のための所要技術

SPS システム実現のため必要となる技術は、以下のようである。

- (1) 寸法・重量共に巨大な構造体の製造・構築。
- (2) 衛星の姿勢制御
- (3) 太陽電池による大電力の発電と、衛星内伝送。
- (4) 衛星 SPS からごく細いビームを作ること。
- (5) その細いビームを、制御すること。
- (6) 半導体技術、特に受電側のマイクロ波整流素子。
- (7) 整流素子の接続形態。
- (8) 打ち上げコストを下げること。

上記 (2) と (4) は、SPS の構成に大きな影響を持ち、今後の技術検討の分岐点となるので、以下で検討する。

まず項 (2) の衛星の姿勢制御は、全体の傾き制御と、構成要素である太陽電池と送電アンテナの回転制御に分けられる。特に後者については、第 2 図の場合 2 物体 (送電アンテナと太陽電池) を機械的に切り離すためにロータリージョイント (RJ) が、機械的構造と電力伝送を切り離

† 第 2 回宇宙太陽発電シンポジウム, 2016 年 12 月 19-20 日, 東京にて発表

‡ Corresponding author: Tadashi TAKANO. E-mail: ttakano@ac.jaxa.jp

* 日本大学

〒274-8501 船橋市習志野台 7-2-4-1,
Nihon University, 7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, 274-8501 Japan
©SSPSS

すためにスリップリング (SR) が、各々必要である。実際にはこの RJ と SR は、一体で構成されるが、巨大であるがゆえに技術的に難しいと思われるがである。

RJ/SR を使うシステムとしては、NASA の規準モデルがある⁷⁾。それに対し RJ/SR を使わないシステムとして、太陽電池を太陽指向させる編隊飛行モデル⁸⁾と、太陽指向させないテザモデル⁹⁾が、各々提案された。この3種のモデルでは RJ/SR の有無だけでなく、衛星姿勢制御方式や軌道制御方式、熱制御方式、送電アンテナ形式が大きく異なる。

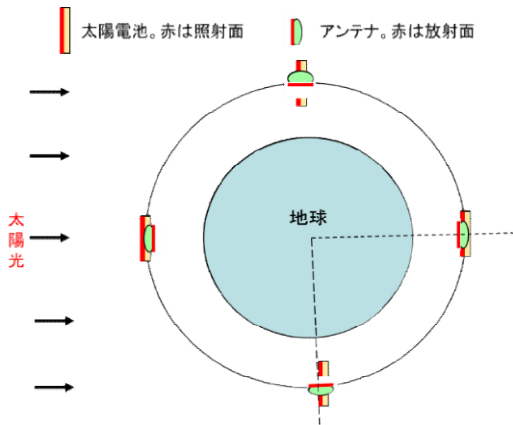
次に項(4)のごく細いビームを作ることは、SPS から 3.6 万 km 離れたレクテナに、電力を漏れなく送るため必要となる。そのビーム幅は、周波数 2.45 GHz、レクテナのアンテナ直径 3 km とすると、 8.0×10^{-3} 度と極めて狭い。

ビーム幅はアンテナ直径に反比例する。従って NASA 案では、直径 1 km で、2.45 GHz において、アレー素子 2 億個である。これは、アレシボのパラボラアンテナ(直径 305 m)¹⁰⁾や京都大学 MU レーダ(直径 103 m, 475 素子のアレー)¹¹⁾に比べ、桁違いに大きい。しかし、具体的な検討がこれまでほとんどされていなかった。第3図のようなアレーアンテナは、手作り要素が多いため、製造不可能なのである。

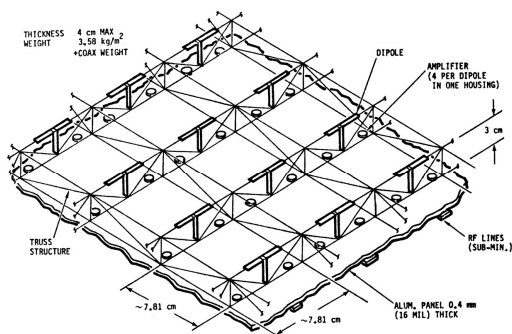
- それに対し、下記のような技術が、提案され始めている。
- (1) 特殊蝶番を使わない展開構造¹²⁾
 - (2) 放射素子を平面構造にして、印刷により作製する¹³⁾
 - (3) 給電回路の簡略化・平板化¹⁴⁾
 - (4) 間引き給電や副アレー給電による給電素子の削減^{15,16)}

(5) 軌道上組み立て¹⁷⁾

これらは従来のアンテナが一品製作されたのに対し、大量生産アンテナ工学と呼ぶべき技術分野となる。



第2図 太陽電池板とアンテナの相対回転を制御



第3図 規準システムで想定されたアレーアンテナ⁷⁾

4. これまで検討されてきたシステム

4.1 ロータリージョイント/スリップリングの検討

上述のように、RJ/SR は極めて重要な部品である。SPS 用 RJ/SR の例を、第4図に示す。スリップリングは、リング状電極とブラシ電極で構成される。

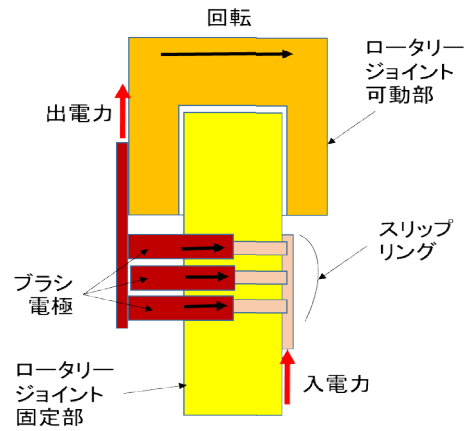
NASA 規準システムの RJ/SR は、検討資料⁷⁾に記述されているが、困難技術と認識されていないようである。実際ロータリージョイントは、超大型アンテナの回転機構を先行技術として参考にできる。しかも SPS では、360 度/日と一定速度でゆっくり回るの、技術的に易しく実現可能と思われる。

次にスリップリングに、十分な電力を通せるかを検討する。例えば 100 万 kW の電力を通す場合、太陽電池の電圧を 1 万 V とすると、電流は 10 万 A である。金属接触面を通せる電流密度は、現在 15 A/cm² は可能である。NASA 規準システムの場合、ロータリージョイントは直径 6 m なので、スリップリングが同じ直径とするとリング状電極の幅は 3.6 cm と求まる。これは可能である。

ただ日本においては、次の理由で非制御方式を取るべきだと言われてきた：(1) 宇宙環境での 10 kV 以上のスリップリングは困難、(2) システムの脆弱性 (one-point failure)、(3) 可動部の長期運用の為のメンテナンス要求。

これらは再考すべきである。

以上から現時点で、NASA システムを排除して、非制御方式を取る理由は無い。システム検討に入る前に、もっと課題を詰めるべきである。



第4図 スリップリングの構成

4.2 種々のシステムモデル

前述の技術岐路に応じて、これまで日米で次のような種々のモデルが提案されてきた：米 NASA 規準モデル⁷⁾、SPS2000 モデル¹⁸⁾、NEDO ぐる巻モデル¹⁹⁾、米 Fresh Look Study モデル²⁰⁾、編隊飛行モデル⁸⁾、テザモデル⁹⁾。ただしシステム検討されたものは、未だ少ない。

主なモデルについて、システム化するため検討すべき点は次であろう。

- (1) 米 NASA 規準モデル
 - ・ロータリージョイント/スリップリングの実現性
 - ・その地上実験：真空状態で行う
 - ・軌道上での安全性と保守法
- (2) JAXA 編隊飛行モデル
 - ・反射鏡と衛星の軌道問題
 - ・姿勢と軌道の制御精度
 - ・軌道上実証を初期に優先的に行う。

(3) USEF テザモデル

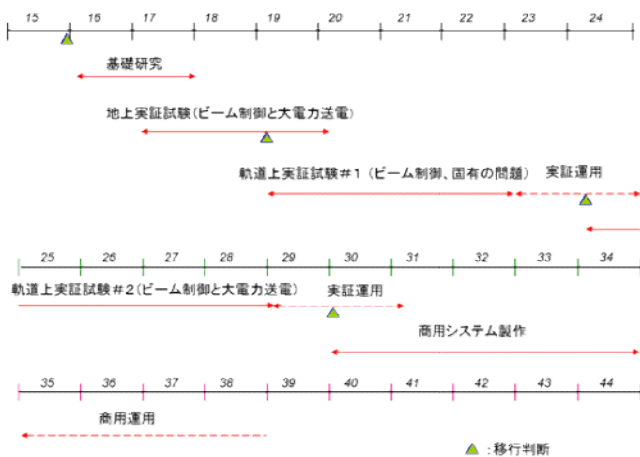
- ・テザの伸展・制御性. 切断への対応.
- ・錘の作り方
- ・最終複合体の成立性 (多数テザ, 縦横同じ寸法)
- ・軌道上実証を初期に優先的に行う.

5. SPS 実現のための線表

線表はシステム実現のため、極めて重要である。線表の具体例を、第5図に示す。特に地上実証試験で、送電アンテナのBBM (Bread Board Model) を作る事が重要である。軌道上実証試験#1では、衛星から細いマイクロ波ビームを、地上レクテナにぴったり納める技術を実証する。そのため大きなアンテナを要するので、小型衛星は適しない。軌道上実証試験#2では、大電力伝送のデモを行なう。

本線表の特徴は移行判断点において、前の線で技術的課題が解決されており次の線へ移って良いか、判断することである。もし課題が解決されていないならば、次には移らない。その場合、前の線で開発された技術が無駄にならないように、別な流用も考える。

一般に、次線の段階では前段階より、数〜数100倍の金がかかるのが普通である。前述のように段階的に進めれば、初期段階で許容できない程大きな予算を、要求する必要がない。またSSPSは30年を要する長期計画となるので、開発途中での取得技術を、外部に積極的に応用することを考える。



第5図 開発線表例

6. まとめ

太陽発電衛星システムは、いくつかのモデルが検討されてきた。スリッピングの性能と構成を検討したところ、現時点で NASA 規準モデルを排除すべき理由は見当たらない。送電アンテナに対しては、大量生産アンテナ工学技術を確立し、早急にBBMを検討すべきである。

各モデルにおいて特有の課題があるが、正面から検討すべき時期になっている。システム開発を段階的に進めるべきである。最終的な商用化段階では、電力系会社やグリーン産業が、実用化への開発を進める。また開発途中での取得技術を、外部に応用することも考えていくことが重要である。

参考文献

- 1) 松本紘: 宇宙太陽光発電所, ディスカヴァー・トゥエンティワン, 東京(2011).
- 2) 佐々木進: 宇宙太陽光発電に挑む, NHK 出版, 東京(2011).
- 3) 高野忠: エネルギーの未来 宇宙太陽光発電 宇宙の電気を家庭まで, アスキー・メディアワークス, 東京(2012).
- 4) ICEF 2016 について, <http://www.icef-forum.org/jp/>
- 5) 長谷川晃: ビッグサイエンスに関わる科学者の社会的責任, 日本物理学会誌, 57 (5) (2002), pp.342-344.
- 6) 高野忠: 宇宙で太陽光発電, 毛利衛のサイエンスカフェ, 東京 (2013).
- 7) Hanley, G. M.: Satellite power systems (SPS) concept definition study I-Executive summary, NASA, CR- 3317 (1980).
- 8) 森雅裕, 香河英史, 齊藤由佳, 長山博幸: JAXA における宇宙エネルギー利用システムの研究状況, 第7回 SPS シンポジウム講演集 (2004), pp.132-137.
- 9) 三原荘一郎, 齊藤孝, 小林裕太郎, 金井宏: SSPS に関する USEF の活動状況(2006)", 信学技報 (2007), SPS2007-01.
- 10) アレシボ電波望遠鏡, <http://websites.suagm.edu/ao/?q=the-305m-telescope>
- 11) 高野忠, 佐藤亨, 柏本昌美, 村田正秋: 宇宙工学シリーズ1ー宇宙における電波計測と電波航法 (第2版), コロナ社, 東京 (2005).
- 12) 高野忠, 三枝健二, 細野裕行, 宮崎康行, 内山賢治, 荒木友太: 多重折り畳み型フェーズドアレイアンテナ, 電子情報通信学会総合大会, B-1-170 (2011).
- 13) 高野忠, 三枝健二, 常光康弘, 佐藤治, 須田保: CPW 型 ULPD を用いたアンテナと給電素子の統合実装の提案, 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-1-187 (2010).
- 14) 佐々木拓郎, 後藤準, 當山善彦, 高橋智宏, 本間幸洋, 佐々木謙治, 中村修治: マイクロ波電力伝送試験モデル用送電部開発, 信学技報 114 (524) (2015), pp. 81-84.
- 15) 柴田国明, 細野裕行, 三枝健二, 高野忠: 1 波長線路により結合した印刷ダイポールアレイアンテナの解析, 電子情報通信学会論文誌 B, J98-B (7) (2015), pp.664-671.
- 16) 高野忠, 三枝健二: 副アレイ集合概念による大規模アレイアンテナの特性, 電子情報通信学会総合大会, B-1-134 (2013).
- 17) 高野忠, 三枝健二, 宮崎康行: 人工衛星搭載用多重折り畳みアレイアンテナ, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-21-19 (2014).
- 18) SPS2000 タスクチーム: SPS2000 概念計画書, 宇宙科学研究所 (1993).
- 19) 三菱総合研究所: 太陽光発電システム実用化技術開発、太陽光発電利用システム・周辺技術の研究開発、宇宙発電システムに関する調査研究, 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託研究, (1992-1994).
- 20) J. C. Mankins, J. C.: A fresh look at the concept of space solar power, Proc. SPS'97, S7041 (1997).

(2017. 2. 3 受付)