

スペーステナからみた太陽発電衛星の技術課題と解決策[†]

Technical Issues and the Solutions of a Solar Power Satellite with Focus on a Spacetenna

高野 忠^{*‡}・三枝 健二^{*}・宮崎 康行^{*}
Tadashi TAKANO, Kenji SAEGUSA and Yasuyuki MIYAZAKI

太陽発電衛星システムの中でも、送電アンテナ（スペーステナ）は、最も重要なサブシステム・部品である。衛星全体の構成、姿勢制御、ビーム制御などに、大きな重要な影響を持つ。しかし特殊な部品であるため、あまり検討されていない。本稿では、これまでの主な成果をまとめ、今後の開発方向を示す。技術的には、実証すべき要素が未だあるが、十分解決可能である。

In a solar power satellite system, a transmitting antenna or spacetenna is the most important subsystem or device, having a great influence to satellite configuration, attitude control and beam control. However, the antenna, being a unique device, has never been studied sufficiently. In this paper, the current study results are summarized, and the prospect of future development are indicated. Though there are still technical issues to be solved, those can be well solved.

Keywords : solar power satellite, spacetenna, technical issues and solutions, model, development strategy

1. はじめに

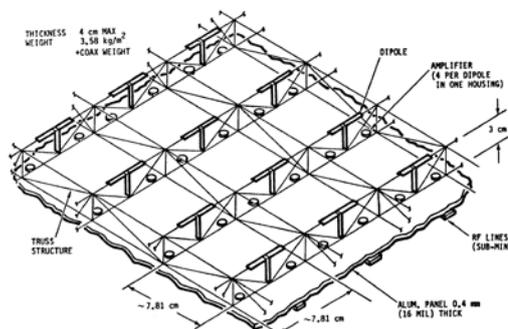
太陽発電衛星（SPS）は、宇宙に浮かんだ発電所である¹⁾。太陽という無限のエネルギー源を利用する。しかし炭酸ガスや廃棄物の排出は、ゼロという優れたものである。しかも地上の太陽光発電²⁾と比べ、天候に左右されず、発電時間が長い。地上で受けられた電力は、地上の電力網と接続される。全体をここでは、太陽発電衛星システム（SSPSシステム）と呼ぶ。

SSPSシステムの中でも、送電アンテナ（スペーステナ）は、最も重要なサブシステム・部品である。これは表1に示すように、衛星全体に占めるスペーステナの重量比でも分かる。また衛星全体の構成、姿勢制御、ビーム制御などに、重要な影響を持つ。しかし特殊な部品であるため、あまり検討されていない。図1はNASAの規準システムで考えられたアンテナであるが、半波長ダイポールを4分の1波長だけ浮かして作る。これでは、数億個の放射素子を作ることができない。

本稿ではまず、太陽発電衛星の中におけるスペーステナの問題点を明らかにする。次いでこれまでの研究・開発の主な成果をまとめ、今後の開発方向を示す。

第1表 システム全体とスペーステナの重さ比率（NASA規準システムとSPS2000⁴⁾）

SPSシステム名	NASA規準システム	SPS2000
SPS全体重量	21,000 t	224 t
スペーステナ重量	7,390 t	134 t
放射素子数	2億個	250万個



第1図 アメリカの基準システムで想定されたアレーアンテナ（半波長ダイポールアンテナの配列）³⁾

2. 太陽発電衛星システムの構成

2.1 太陽発電衛星システム（SPSシステム）の構成要素

発電システムとしてのSPSシステムは、下記の要素で

[†] 第1回宇宙太陽発電シンポジウム，2015年12月15-16日，東京にて発表

[‡] Corresponding author: Tadashi Takano.

E-mail: takano@ecs.cst.nihon-u.ac.jp

* 日本大学・理工学部

〒274-8501 船橋市習志野台7-24-1,

Nihon University, College of Science and Technology, 7-24-1

Narashino-dai, Funabashi, 274-8501 Japan

成っている。

- ・太陽発電衛星 (SPS)
- ・受電設備 (レクテナ)
- ・地上電力網との整合器

2.2 SPS の構成要素 特に衛星SPSについては、下記の要素が必要である³⁾。

- ・太陽電池
- ・直流送電路
- ・直流/電波エネルギー変換器 (超高周波の電力増幅器)
- ・送電アンテナ (スペースステナ)
- ・姿勢制御装置
- ・通信装置
- ・構造

3. スペースステナの問題点

スペースステナ独自の技術課題は、下記である⁴⁾。

- (1) ごく細いビームを作ること : 8.0×10^{-3} 度

既にあるものと比較するなら、小惑星探査機はやぶさを追跡した長野県白田にある 64m アンテナが適当であろう。はやぶさを見失った時、ビームが細いので見つけるのが大変であったが、それでも 3.2×10^{-2} 度である。

(2) そのビームを、衛星の軌道上位置と姿勢の変化を補正すべく、制御すること。アンテナが追尾するため一般に、ビーム幅の 1/10 以下の制度が必要である。

(3) 本来太陽電池は太陽指向、送電アンテナは地球指向なので、衛星全体の姿勢制御法やビーム制御の角度範囲を決めることになる。

その他以下は、SPS システム全体の問題点として、重要である。

(1) ロータリージョイントと大電力伝送。太陽電池と送電アンテナを独立に制御する場合、不可欠になる。

(2) 総重量 2 万トンと見積もられている SPS を、打ち上げるためのコストを安くする。

(3) 半導体技術の進歩が必要である。特に受電側の整流素子が然りであり、反対に送電側の電力増幅器は電力を空間合成するので、要求は緩い。

(4) 整流素子の接続法。素子の故障対策や電源の出力抵抗を、規定するので重要である。

4. 解決策

まずごく細いビームを作ることに対しては、巨大な宇宙アンテナを作る必要がある。例えば NASA の規準システム案では、直径 1kmΦ で、2 億素子が配列されるという巨大なアンテナである。これを現存する次の巨大アンテナと比べると、その難しさが想像できよう⁴⁾。

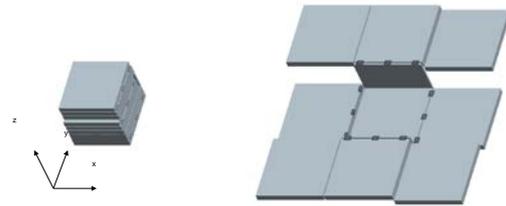
- ・アエトリコ・アレホ : 305mΦ, パラボラ反射鏡固定
- ・京大・信楽町 : 103mΦ, 移相配列アレ, 475 素子

その難しい課題の具体的な解決策として、下記の技術が提案されている。カッコ内は、技術内容を示す。

- (1) 展開構造 (多重折り畳みと段差補正)⁵⁾

スペースステナを打ち上げ時は折り畳んでおき、軌道上で展開する。図 2 に示すように、展開面積対収納面積の比で、従来無い性能を実現する。その際パネル間の段差を、移相で補償する。

- (2) 放射素子を平面構造に (印刷放射素子)⁶⁾
- (3) 給電回路の平板化と統合実装 (バラン内蔵放射素子)⁷⁾
- (4) 能動・給電素子の削減 (間引き給電, サブアレー毎の移相)⁸⁾
- (5) 軌道上組み立て⁹⁾



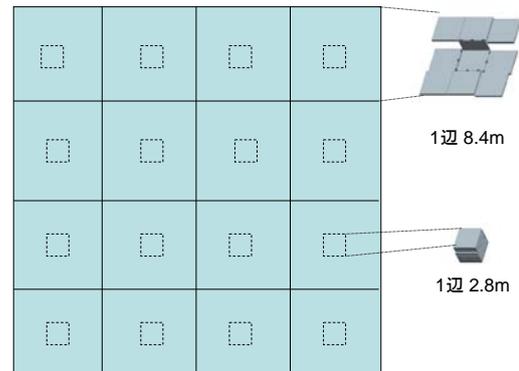
(a) 収納状態

(b) 展開状態

第 2 図 多重折り畳みアレーアンテナ (パネル間の段差を許容できる)⁵⁾

ひとつの案であるが図 3 に示すように、宇宙空間に作った枠組み上の固定点に、収納アンテナを結合し、次々と展開して大きなアンテナを形成する。

特に、上記 (2) ~ (4) 項は、大量生産アンテナ工学というような新しい技術分野を開くものである。



第 3 図 スペースステナの組み立て法 (34m 開口を 8.4m 開口で構成する場合)⁹⁾

次にビーム制御については、従来平面波の方向を、位相配列アンテナによって制御することが提案されていた¹⁰⁾。しかし SPS では、平面波でなく細いビームを扱うので、その適用性は検討が必要である。新しい技術としては、位相配列アンテナによる細いビームの生成法と制御法が、提案されている¹¹⁾。

5. 種々の SPS モデル比べ

これまで日米で、次の種々のモデルが提案されてきた。

- ・米 NASA 規準モデル³⁾, ・SPS2000 モデル¹²⁾
 - ・NEDO ぐる巻モデル¹³⁾, ・米 Fresh Look Study¹⁴⁾
 - ・JAXA Advanced Model¹⁵⁾, ・USEF テザ・モデル¹⁶⁾
- これらを比較検討することは、今後の SPS 開発に重要である。

いずれもスペースステナを、十分良く検討していない。ま

た太陽電池とアンテナの姿勢制御をすると、超大電流を流せるジンバルが必要になるが、それを避ける技術を考えている。しかし今は逃げない方向も、考えるべきであろう。

6. SPS 実現のため線表

商用化に至るまでを図4のように、次の4段階に分けて段階的に進める¹⁷⁾。

(1) 地上実証：大電力の生成・整流とアンテナの構成を示す。スペースステナとレクテナのBBMに相当。

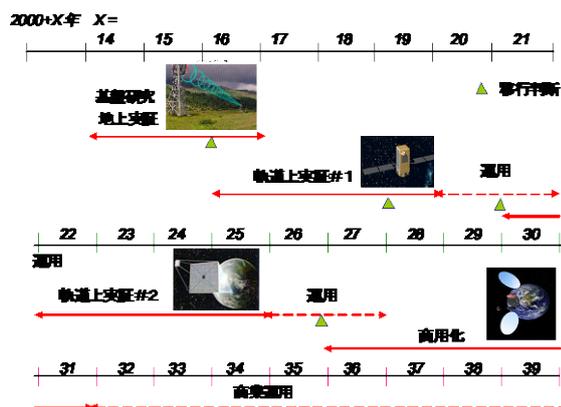
(2) 軌道上実証#1：衛星から細いマイクロ波ビームを、地上レクテナにぴったり納める技術を実証する。従ってスペースステナとして、小開口アンテナは適しない。

(3) 軌道上実証#2：1kW級衛星。赤道上下軌道。大電力伝送のデモを行なう。電力会社を入れる。

(4) 商用化：1GW(100万kW)級衛星。GEO。商業運用する。電力会社を中心になる。

このように区切ることにより、1つの線から次の線へ移る際、技術的課題が解決されているか判断する。もし解決されていなければ、次には移らない。その場合、前の線で開発された技術に対し、別な応用も考える。

一般に次線の段階では、数倍~数10倍の金が要る。このようにすれば初期段階で、許容できない程大きな予算を、要求する必要がない。



第4図 開発線表 (案)¹⁷⁾

7. まとめ

送電アンテナ (スペースステナ) 実現のための課題と解決

法を示した。技術的には、実証すべき要素があるが、十分解決可能である。

SPSを開発していく線表は、技術課題を解決するため最適化していく。スペースステナ実現を最重要項目とすべきである。そして、資金提供者や電力会社などユーザの理解を得ることが重要である。

参考文献

- 1) Glaser, P.E.: Power from the Sun: its future, *Science* (1968), pp. 857-886.
- 2) NEDO 再生可能エネルギー技術白書, 第2版 (2014), pp. 319-322.
- 3) DOE and NASA report: Satellite Power System; Concept Development and Evaluation Program, *Reference System Report* (1978).
- 4) 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-, アスキー新書, アスキー・メディアワークス (2012).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) 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 WPT, **114** (2015), pp. 81-84.
- 8) 柴田国明, 細野浩二, 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 **J08-B** (2015), pp. 664-671.
- 9) 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).
- 10) 篠原真毅監修: 現代電子情報通信選書「知識の森」宇宙太陽発電, 電子情報通信学会知識ベース (2012).
- 11) 宇野孝, 柴田国明, 三枝健二, 高野忠: 無線電力伝送のためのガウスビームの解析, 電子情報通信学会総合大会 B-1-34 (2015).
- 12) SPS2000 タスクチーム: SPS2000 概念計画書, 宇宙科学研究所 (1993).
- 13) 株式会社三菱総合研究所: 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託研究, 宇宙発電システムに関する調査研究, (1992), (1993), (1994).
- 14) Mankins, J. C.: A fresh look at the concept of space solar power, *Proc. SPS*, S7041, Montreal (1997).
- 15) 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.
- 16) 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 SPS2007-01 (2007), pp.1-6.
- 17) Tadashi Takano: Wireless Power Transfer from Space to Earth, *IEICE Trans. Electronics*, **E96-C** (2013), pp.1218-1226.

(2015. 12. 25 受付)