

Study of Power Generation/Transmission Module for Tethered-SPS*

S.Sasaki, K.Tanaka, H.Ogawa, S.Kawasaki¹⁾, M.Shinohara²⁾, M.Iwasa³⁾, N.Yokomori⁴⁾, and Y.Saito⁴⁾

The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

3-1-1 Yoshinodai, Kanagawa 229-8510, JAPAN

1) Tokai Univ., 2) Kyoto Univ., 3) Tokyo Institute of Technology, 4) Tokyo University of Science

Tethered Solar Power Satellite (Tethered-SPS) consisting of a large panel with a capability of power generation/transmission and a bus system which are connected by multi-wires has been proposed as an innovative solar power satellite. The Tethered-SPS concept is highly robust and potentially low cost, with special features in the integration, construction, attitude control, heat management, and evolutionary development strategy. A 1-GW class SPS will have a power generation/transmission panel of 2 km x 1.9 km and the tether length will be 10 km. The system consists of 400 tethered sub-panels of 100 m x 95 m with 0.1 m thickness. One tethered sub-panel has a capability of microwave power transmission at 5 MW. A miniature of the tethered sub-panel can be used for the demonstration experiment in the low earth orbit to verify the microwave power transmission to the ground. The demonstrator has a 16 m x 17.6 m power generation/transmission panel, a bus system, and an end mass, which are connected with a truss and tether wires. The experiment system will be able to transmit the microwave power more than 100 kW to the rectenna on the ground. The panel has 400 power generation/transmission modules of 0.8 m x 0.8 m size. The concept of the power module for the demonstration experiment is shown in Fig.1. In each power module, the electric power generated by the solar cells on the upper plane is converted to the microwave power and transmitted from the antennas of the lower plane. The frequency standard and phase-synchronizing signal for each module are supplied by the bus system using wireless LAN. There is no power/signal cable interface between the modules. The module contains batteries, power processors, microwave power converters, and their controller. Figure 2 shows the configuration of the components inside the module. Each module transmits microwave power at 700 W. The power conversion efficiency from DC to RF is assumed to be 70 % using a phase controlled magnetron. The temperature of each component in the module has been analyzed to be within the allowable range between -25 and $+75^{\circ}\text{C}$. The plasma interaction of the high voltage solar array has been studied to find out an optimum distribution of the array voltage to suppress the arc discharge. Associated with the damage of the module by the debris impact, a hyper-velocity impact experiment has been conducted to study the panel structure to prevent propagation of the damage and to evaluate the secondary damage by the ejectors generated at the primary impact.

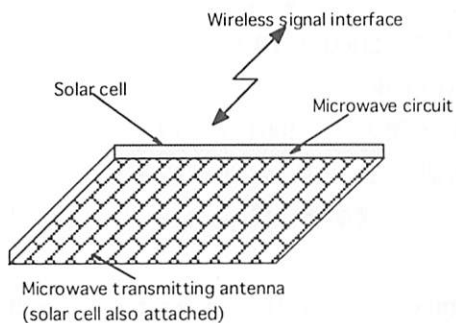


Fig.1 Concept of power generation/transmission module.

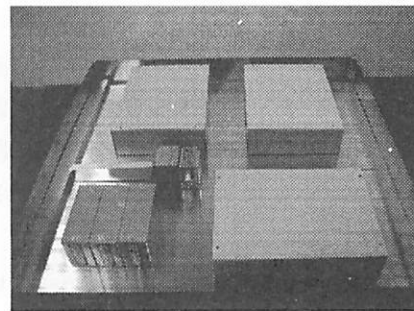


Fig.2 Mock-up of power generation/transmission module.

* Presented at the Seventh SPS Symposium at Kyushu Institute of Technology, 16-17 September 2004.

テザーSPS用発電電一体型モジュールの検討^{注1}

佐々木進、田中孝治、小川博之(ISAS/JAXA)、川崎繁男(東海大学)、
篠原真毅(京都大学)、岩佐稔(東工大)、横森信博、齋藤陽亮(東京理科大)
sasaki@isas.jaxa.jp

テザーSPS(Solar Power Satellite)は発電電一体型の巨大な平板パネルをテザーで吊って重力勾配力により下面の送電面を常時地上に指向させるタイプのSPSである。この方式のSPSの電力取得効率は太陽指向型のSPSより低いが、構造及び制御が単純で技術的な実現可能性が高く、構造と制御が複雑な太陽指向方式よりも低い電力コストが達成できる可能性がある。テザーSPSの発電電一体型パネルは電氣的にも構造的にも完全に等価な多数の発電電一体型モジュールから構成される。本講演では、近未来に実施すべきテザーSPSの軌道上実証実験に使用する発電電一体型モジュールに関して、その構造、電氣的な構成、熱的及び耐宇宙環境性の検討結果について述べる。

1. テザーSPSの概念

1968年にPeter GlaserによりSPSの最初のアイデアが提案されて以来世界各国で多くのSPSシステムが検討されてきた。各システムはそれぞれ技術的な特長を持っているが、解決すべき課題も抱えている。表1にこれまでのSPSモデル検討に関する主要な課題をまとめた。

表1 これまでのSPSシステム検討の主要な課題

機能、機構、構築、開発	課題
ロータリージョイント、ミラー回転機能などの可動機構	冗長機能を持つことが困難なためロバスト性が欠如。一点故障で全機能が喪失。
バス電源方式の集電ケーブル	ケーブル重量が膨大で非現実的。超電導システムは適用困難。
薄膜構造の集光ミラー	集光後の排熱が困難。薄膜大型建造物の太陽指向姿勢制御と形態維持が困難。
全システム構築後に始めてSPS機能を具備	開発リスク、投資リスクが大きく商業システムとして受け入れ困難。
低高度軌道で建設、完成後静止衛星軌道へ移動	巨大な(非現実的な)軌道間輸送機が必要。低速移動のため半導体素子の放射線劣化が不可避。
デモンストレーションと実用SPSを独立に検討	一貫した開発のロードマップの欠如。

このような問題を解決するシステム構想として、私たちは図1に示すようなテザーSPSを提案している[1]。テザーSPSは巨大な発電電一体型パネルを上方のバスシステムからの多数のテザーで吊る方式のSPSである。100万KWクラスのシステムの場合、発電電一体型パネルの大きさは2km x 1.9km、テザー長は10kmとなる。発電面は太陽指向しないため可動部がなく、集光しないため排熱の問題もない。発電電一体型パネルは多数の電氣的に独立なモジュールから構成されるため集電ケーブルも不要である。図2に構築のシナリオを示す。巨大な発電電一体型パネルは100m x 95mの多数のサブパネルのテザーシステムから構成される。このサブパネルはそれ自体で3MWの送電能力を持ち重量は50トンである。地上からの輸送はサブパネル単位で行われる。テザーサブパネルは折り畳んだ状態で再使用型輸送機により低高度軌道まで輸送され、

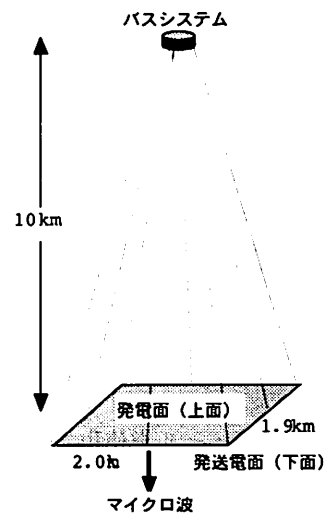


図1 テザーSPSの概念

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

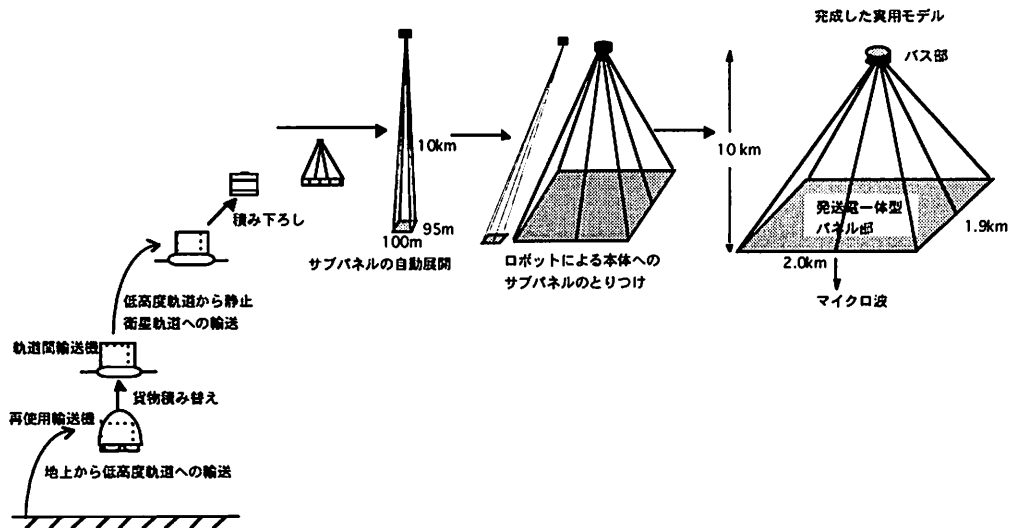


図2 テザーSPS構築のシナリオ

そこで電気推進を用いた軌道間輸送機に積み替えられて静止軌道まで運ばれる。積み荷は輸送途中での放射線帯による劣化を避けるためシールドコンテナ内に収納されて運搬される。静止衛星軌道でテザーサブパネルは自動展開される。展開したテザーサブパネルはSPSのユニットとしての発送電試験を行って健全性を確認した後SPS本体に組み付けられる。このシナリオにより建設途中においてもSPS本体の性能検証が可能となり、軌道間輸送も現実的な規模の輸送機を想定することができる。またテザーサブパネルのスケールモデルを近未来の実証実験で使用することにより、実証実験フェーズから実用システムに至るまでの一環した技術開発シナリオを描くことができる。

図3にH2A一機で実施可能なテザーSPSの実証実験システムの概念図を示す。実証実験システムは17.6m x 16mの発送電一体型パネルとバスシステム及びロケットの第2段を利用したエンドマスから構成され、これらを1本のマストと4本のテザーで接続した構成である。高さは約40m、総重量は18,100 kgである。重力傾斜力により送電面は常時地上を指向する。パネル上面の太陽電池の発電電力は最大36 kWであるが、モジュール内のバッテリーを利用することによりレクテナ上空で200kWクラスの送電実験を16秒間にわたって実施することができる。パネルは総数88枚の折り畳み可能なユニットパネルで構成され、ユニットパネルは5ヶの発送電一体型のモジュールを持つ。直径500mの大きさのレクテナを地上に設置すれば約20kWの電力の取得が可能である。

2. 発送電一体型モジュール

テザーSPSのコンセプトでは発送電一体型のモジュールを使用することが前提である。図4にモジュールの概念図を示す。実証実験に用いる発送電一体型のモジュールは上面に太陽電

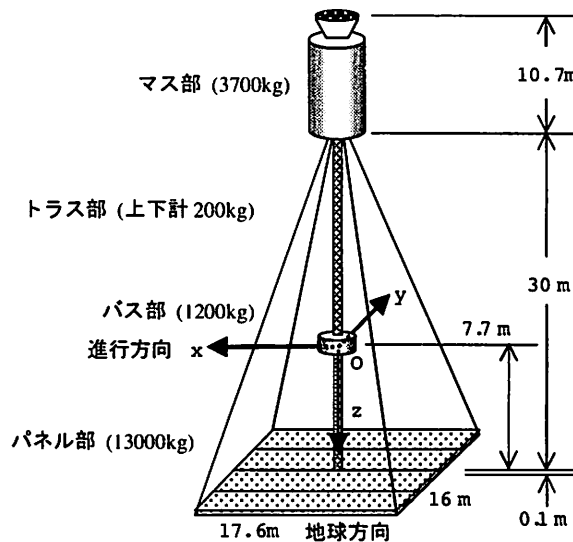


図3 実証実験のコンセプト

池、下面にマイクロ波送電アンテナ、内部に電源及び回路を搭載する。上面の太陽電池で発電した電力はモジュール内部の回路でマイクロ波電力に変換され下面のアンテナから放射される。モジュール毎の原振の周波数と位相同期は無線LANによってバスから制御されるため、モジュール間での電力及び信号のケーブルのインターフェイスはない。

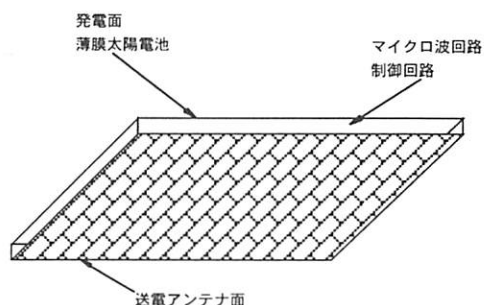


図4 発電電一体型モジュールの概念

2.1 モジュールの構造検討

モジュールの大きさは80cm x 80cm x 10cm、重量は28.7kgである。面密度は44.8kg/m²、パネルの構造強度は打ち上げ時のマージン4.8 (安全率)、基本振動数は510Hz (16m x 16m パネルでは1.3Hz) である。モジュールの内部は、二次電池、充電制御器、制御装置、マイクロ波回路から構成される。図5にモジュールの構成、図6に原寸大で製作したモジュールのモックアップを示す。

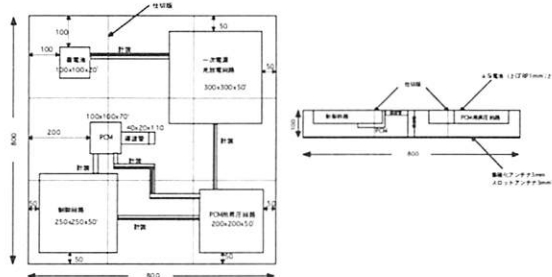


図5 モジュールの構成

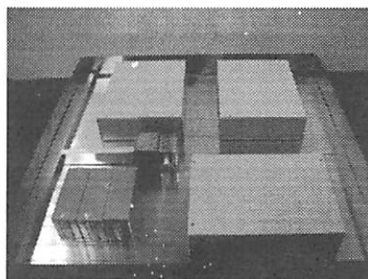


図6 モジュールのモックアップ

2.2 モジュールの電氣的検討

モジュールの電気ブロック図を図7、電力遷移図を図8に示す。発電電力は南中時で最大90Wであるが、100Whのバッテリーで蓄電することにより、700Wの送電出力を得ることができる。送電素子数は625素子であり、素子あたりの送電電力は1.12Wである。マイクロ波ビームの方向制御はレトロディレクティブ方式を採用し、受電素子は5素子とする。

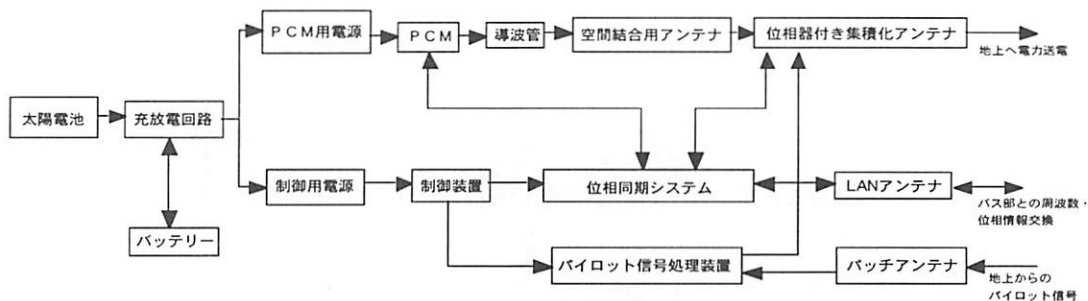


図7 モジュールの電気ブロック図

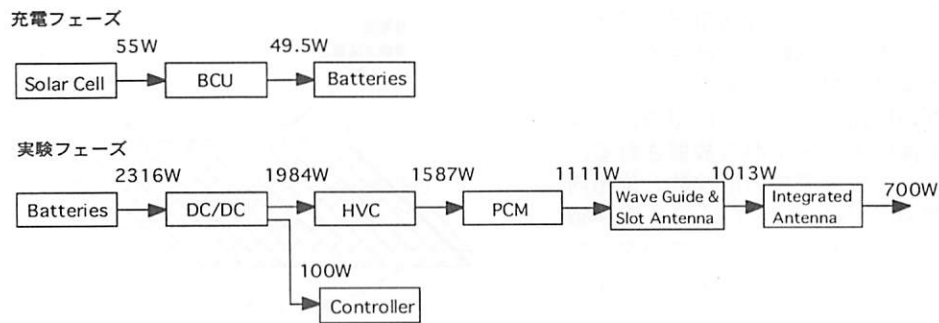


図8 モジュールの電力遷移図

2.3 モジュールの熱的検討

ユニットパネルの熱変形は、パネル間温度差が18°Cの時、パネル中央部と端部の面の法線方向の角度差で0.3°となる。図9に図7で示した構成のモジュールについて軌道1周分の各コンポーネントの温度変化を示す。この図ではマイクロ波送電は最初の16秒間である。温度変化の最も大きいコンポーネントはマグネトロンであり、特に対策をとらない場合は最高温度が450°Cに達し許容温度範囲を超える。このためアルミ換算で500gのキャパシターを熱容量として結合することにより許容温度範囲内に入れている。

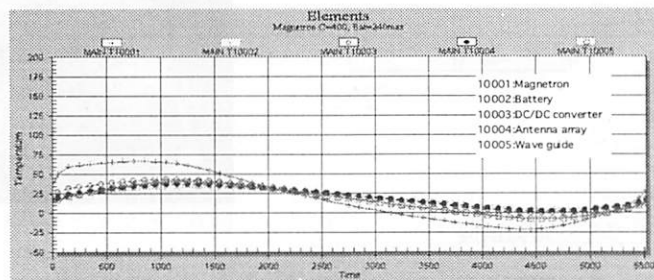


図9 モジュールの各部の温度変化（軌道一周分）

2.4 モジュールの耐宇宙環境性の検討

モジュールの耐宇宙環境性については、太陽電池及び半導体部品の耐放射線性、高電圧の放電防止、耐デブリ対策が課題である。耐放射線性に関しては照射試験を行って耐放射線性の高い部品を選定する以外に対策はない。高電圧の放電防止については図10の左の写真に示す大型のスペースチェンバー（直径2.5m、長さ5m）に図10の右の写真に示すような太陽電池アレイ模擬装置（多電極パネル）を設置して実験を行っている。これまでの研究で、多電極とプラズ

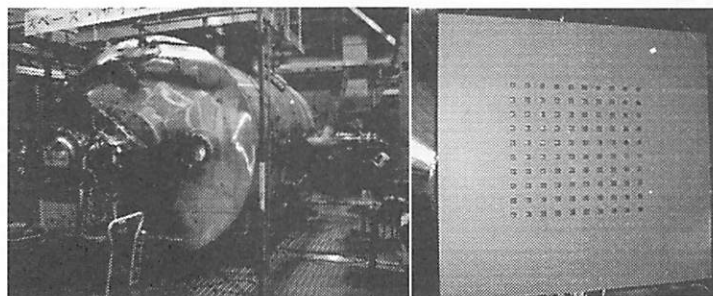


図10 スペースチェンバーと太陽電池アレイ模擬装置

マとの干渉は電極群の電位プロファイルに強く依存することが判明し、セル群の電位分布を適切に選ぶことによりセル部でのアーク放電を抑制することができる可能性がある。

耐デブリ対策については図11に示すようなレールガン装置（1gの弾を最大7.8km/sまで加速可能）を用いて実験を行っている。軌道上ではデブリによる衝突破壊は不可避であるが、破壊の伝搬はモジュール単位で阻止可能である。デブリ衝突の被害をさらに小さくするためには、モジュール内でも衝撃破壊の伝搬を防止するような構造様式をとることが必要である。このため格子状に切り込みを入れた構造の薄板について衝撃実験を行い、完全とは言えないが図12に示すような破壊の局所化の試みに成功している。

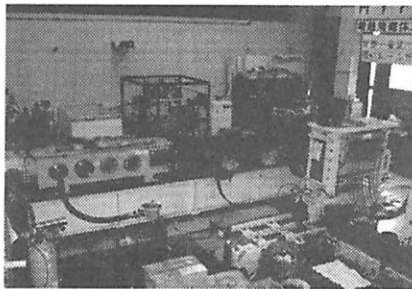


図 11 レールガン装置

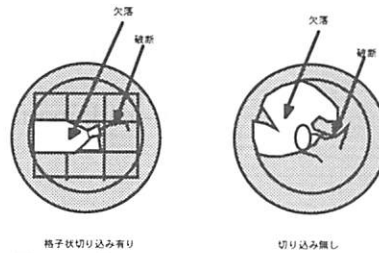


図 12 切り込みを入れた薄板構造における衝撃破壊

3. 課題と結論

テザーSPS実証実験用の主要な技術課題の一つである発送電一体型モジュールの技術検討を行った。モジュールの構造的、電気的、熱的検討により技術的な成立性を示すことができた。モジュールの耐宇宙環境性（高電圧、耐デブリ）については設計に必要な基礎データを取得中である。モジュールの重量についてはまだ目標値の段階に止まっている。レトロディレクティブ方式のマイクロ波回路の実現可能性を示すには、制御と電力効率について更に詳細な回路検討が必要である。今後電気機能モデルを試作し電気的、熱的な成立性を実証することを計画している。

参考文献

[1] Tethered Solar Power Satellite, S.Sasaki, K.Tanaka, K.Higuchi, N.Okuizumi, S.Kawasaki, M.Shinohara, K.Senda, K.Ishimura, and USEF SSPS Study Team, JAXA Research and Development Report, JAXA RR-03-0005E (2004)