

宇宙太陽発電システムにおける送電制御技術 (PAC 法、並列化法) の実現性実証

矢野 克之[†] 成田 貴則[†] 安間 健一[†]

[†] 三菱重工業株式会社 〒455-8515 愛知県名古屋港区大江町 10 番地

E-mail: [†] {katsuyuki_ano, takanori_narita, kenichi_anma}@mhi.co.jp

あらまし 宇宙太陽発電システムは宇宙空間にて太陽発電を行い、無線（マイクロ波）で地上へ電力伝送を行う。宇宙太陽発電システムは数千万枚のパネルで構成されており、それぞれのパネルは柔軟結合であるため宇宙空間で振動する。地上の受電設備にマイクロ波を集中させ、高効率な電力伝送を行うためには送電マイクロ波の位相面を揃える必要があり、三菱重工業では PAC 法と並列化法の 2 つの手法の研究開発を行っている。これらの手法は正確かつ高速に行われる必要がある。よって送電制御性能（位相制御精度、処理時間に関して実証試験を行い、送電制御技術の実現性を部分的に実証した。なお、本研究は経済産業省の委託契約として実施したものである。

キーワード 宇宙太陽発電システム、マイクロ波、位相制御

Development of Phase Control Method (PAC Method and Parallel Method) for Space Solar Power System

Katsuyuki YANO[†] Takanori NARITA[†] and Kenichi ANMA[†]

[†] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. 10 Oe-cho, Minato-ku, Nagoya-shi, Aichi, 455-8515 Japan

E-mail: [†] {katsuyuki_ano, takanori_narita, kenichi_anma}@mhi.co.jp

Abstract The Space Solar Power System generates in space, and transmits power to the Earth by microwave. The Space Solar Power Satellite/System consists of tens of millions of panels, and since each panel is loosely coupled, it vibrates in space. It is necessary to adjust the phase of microwave in order to transmit the power efficiently. Then we have developed two methods, the PAC method and the parallel method. It is important for these methods to control the phase of microwave accurately and speedy. Therefore, We show that feasibility of these methods in part by examining the accuracy and the process speed.

Keyword The Space Solar Power System, Microwave, Phase Control

1. はじめに

1.1. 宇宙太陽発電システムの概要

宇宙太陽発電システム（SSPS：Space Solar Power System）（図 1）は、静止衛星軌道に展開された太陽電池で発電した電力をマイクロ波によって地上へ無線電力伝送し、地上で再び電気エネルギーに変換して、電力として利用するものである。宇宙空間において太陽光から発電するため、クリーンで枯渇しないエネルギーであり、将来のエネルギー問題・環境問題を解決するエネルギー供給システムとして期待されている。

1.2. 送電制御技術について

SSPS は非常に巨大な構造物であり、宇宙空間においては構造上あるいは輸送の理由から小さなパネルを組み合わせて構築されている。パネルの総枚数は数千万

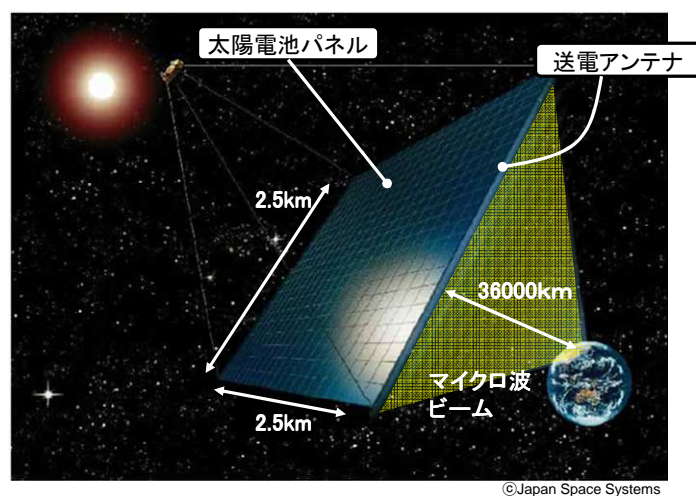


図 1 宇宙太陽発電システムの概要

枚にも及び、柔軟構造であるため宇宙空間で振動しおり、任意の方向へ送電ビームを向け、安全で効率よく送電を行うためには各パネルから放射されるマイクロ波の位相を揃える必要がある。マイクロ波の位相が制御できない場合にはマイクロ波ビームが広がり、安全性に問題があり、効率の低いシステムとなる（図2）。

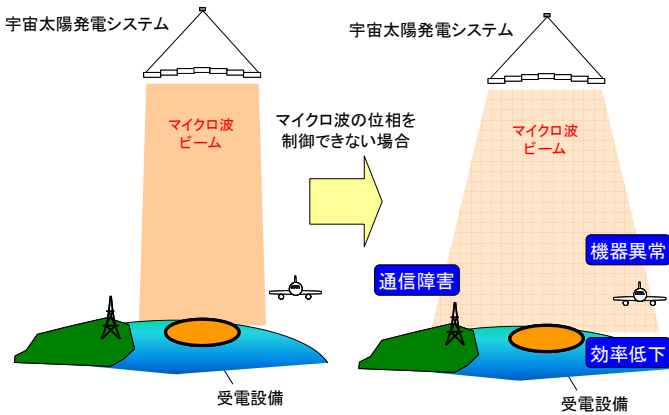


図2 送電制御技術の目的

1.3. 本研究開発の目的

パネルの位置に合わせてマイクロ波の位相制御を実施する。この技術において位相制御精度及び処理時間が重要となる。本研究開発においては、我々の提案する手法が安全面の目標値（不要波レベル：0.3W/m²以下）及び効率の目標値（無線電力伝送効率の低下量：1%以下）を満たすことを実証する。

2. 送電制御技術（PAC法・並列化法）の開発

2.1. 基本原理

我々は送電制御技術としてPAC（Position and Angle Collection：位置・角度補正）法と並列化法の2つを提案し、開発を行っている。PAC法は、地上からのパイロット信号を利用して、各発電パネルにおけるパイロット信号の到達位相、角度¹⁾を検出し、それらを基に各発電パネルのマイクロ波の位相差から位置ズレを推定し、ズレている分だけ各発電パネルのマイクロ波の位相を補正する方法である（図3）。

並列化法は、発電パネル毎に送電用のマイクロ波の位相変調を行ない、受電側で基準となる周波数のマイクロ波との重ね合わせをすると、位相変調を行ったマイクロ波と、基準となるマイクロ波との位相差分だけ、変調周波数に出力が発生する原理を利用して、発電パネル毎のマイクロ波の位相差を検出し、検出した差分だけ各発電パネルのマイクロ波の位相を補正する方法である（図4）。この方式は京都大学との共同研究

において検討を行った。

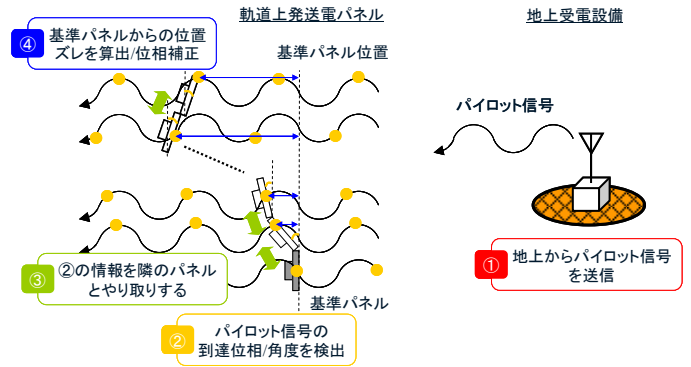


図3 PAC法の基本原理

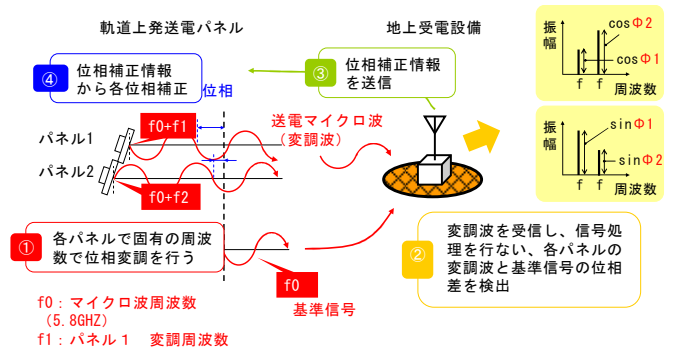


図4 並列化法の基本原理

2.2. 位相制御精度の実証

まず、これら2つの手法に関して位相制御精度の実証を行った。位相制御精度に誤差を発生させる要因としては、パイロット信号をA/D変換する際の位相遅れやゲインの影響、マルチパスによる入力電力誤差、回路内の位相回転による誤差等が考えられる。よって、これらの誤差要因を移相器やアッテネータ等によって模擬した試験供試体を作成した。図5、図6にPAC法、並列化法の機器構成図を、図7、図8に製作した試験供試体の外観を示す。

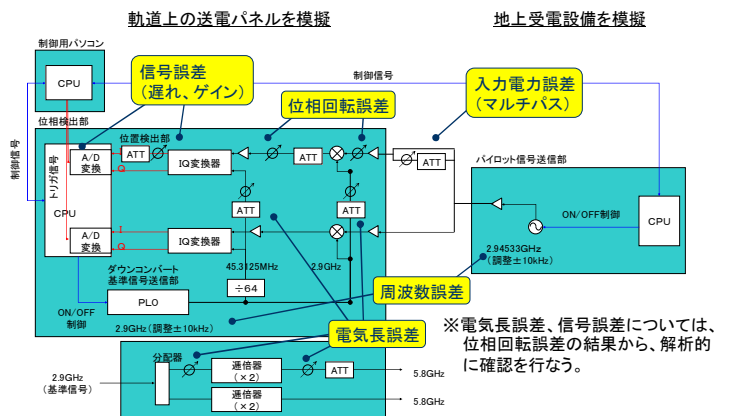


図5 PAC法機器構成図（精度）

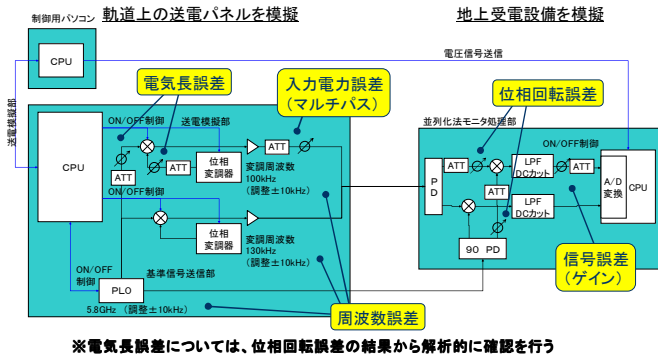


図6 並列化法機器構成図 (精度)



図7 PAC法試験供試体外観 (精度)



図8 並列化法試験供試体外観 (精度)

信号ゲイン誤差、位相回転誤差、周波数誤差、入力電力誤差、電気長誤差の5つの誤差を変動させ、位相制御精度の誤差を計測した。表1、表2にPAC法、並列化法それぞれの試験結果を示す。

表1 PAC法試験結果

項目	対象部品/箇所	送電制御性能 (精度)		
		試験結果	解析予測値	(参考) H21年度解析予測値
周波数変動	PLO	0.3°	0.0°	0.0°
位相回転誤差	アンプ、分配器、ミキサ、IQ変換器	8.0°	7.7°	8.5°
信号誤差 (ゲイン、遅れ)	アンプ、IQ変換器	1.3°	1.2°	3.3°
電気長	マイクロストリップライン (熱膨張による偏差)	0.1°	0.2°	0.2°
計測誤差	—	1.0°	—	—
RSS	—	8.2°	7.8°	9.1°

表2 並列化法試験結果

項目	対象部品/箇所	送電制御性能 (精度)		
		試験結果	解析予測値	(参考) H21年度解析予測値
周波数変動	PLO	0.3°	0.0°	0.0°
位相回転誤差	アンプ、分配器、ミキサ、IQ変換器	2.5°	2.0°	3.3°
信号誤差 (ゲイン)	アンプ、IQ変換器	0.7°	0.0°	3.2°
電気長	マイクロストリップライン (熱膨張による偏差)	0.3°	0.2°	0.2°
計測誤差	—	1.0°	—	—
RSS	—	2.8°	2.0°	4.6°

5つの誤差に関して二乗平方根 (RSS) で評価を行ったところ、位相制御精度はPAC法で8.2°、並列化法で2.8°となった。誤差要因の中ではアンプや分配器での位相回転誤差に起因する要素が大きく、精度の向上にはこれらの部品選定が重要である。

2.3. 処理時間の実証

次に、位相制御の処理時間に関して実証を行った。PAC法及び並列化法では、大きく分けて2つの処理がある。それぞれのパネルが独立して内部計算を行う計算処理と、パネル間の同期や情報共有のためのパネル間通信を行う無線通信処理である。なお、有線通信を使用しないのは宇宙空間でのケーブル接続処理が困難であるためである。数千万枚のパネルを模擬することはできないため、2枚のパネルでPAC法、並列化法の処理を実施し、処理時間計測結果より全パネルにおける処理時間を計算した。

図9に試験供試体の機器構成図を、図10に外観を示す。無線通信は無線LAN及びBluetoothで行い、CPUはMHI製の耐放射線宇宙用プロセッサ (SOI-SoC) を使用した。また、無線通信モジュール、CPU間の通信波RS-232Cを使用した。CPUにPAC法及び並列化法の実行ソフトウェアをインストールし、処理動作ごとにタイムスタンプを挿入することで処理時間を計測した。

計測結果を図11、図12に示す。

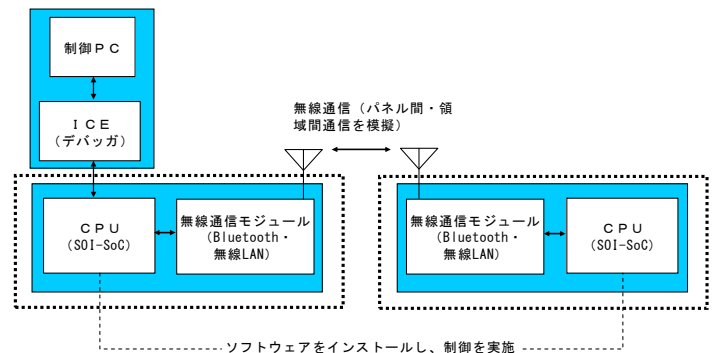


図9 機器構成図 (処理時間)



図 1 0 試験供試体外観 (処理時間)

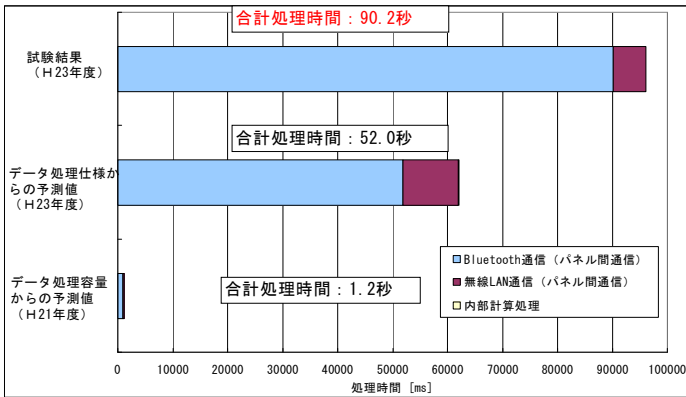


図 1 1 PAC 法試験結果 (処理時間)

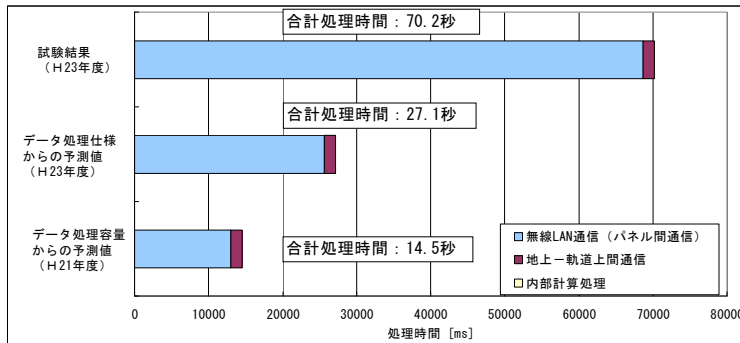


図 1 2 並列化法試験結果 (処理時間)

無線通信処理 (Bluetooth、無線 LAN) と内部計算処理に分類している。PAC 法は合計処理時間 90 秒、並列化法は 70 秒となった。それぞれ Bluetooth 通信、無線 LAN 通信の処理時間が長くなっており、これらはそれぞれの手法において通信回数が多く、支配的となっている処理である。解析予測値から大きく処理時間が増加しているが、解析においては通信処理を行うデータ量及び伝送レートから処理時間を計算していた。一方で、本試験においては SSPS の将来システムへの適用を考慮し、通信の信頼性を向上させるための処理を組み込んでいる (通信再送処理等)。そのため、解析による処理時間に比べ大きく通信処理に関する処理時間が増加している。PAC 法、並列化法ともに無線通信の処理時間が非常に大きいことから、通信時間の短縮あるいは通信回数を低減によって処理時間の高速化が可

能である。

2.4. 試験結果の評価

以上から PAC 法及び並列化法の送電制御性能 (位相制御精度、処理時間) をそれぞれ独立に試験実証することができた。次に、SSPS におけるこれらの送電制御性能を、電磁界シミュレーションによって不要波レベルや無線電力伝送効率の低下量を計算することで評価した。ここで、不要波レベルとは地上の立ち入り禁止区域外の漏れる電波レベルを意味し、無線電力伝送効率の低下量とは理想状態 (位相制御誤差なし、処理時間なし) の場合と比較した場合の送受電効率の低下量を意味している。

SSPS は全体として振幅 5m、周期 14 時間で振動しており制御開始時の振動移送は 90° 、送電方向は中緯度 (日本の位置に相当) とした。このとき、位相制御精度と処理時間をパラメータとした場合の不要波レベルと無線電力伝送効率の低下量を計算した。図 1 3、図 1 4 に計算結果を示す。

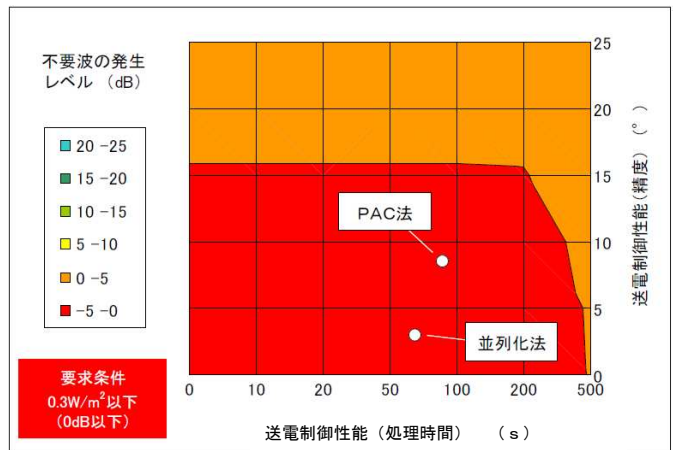


図 1 3 不要波レベル計算結果

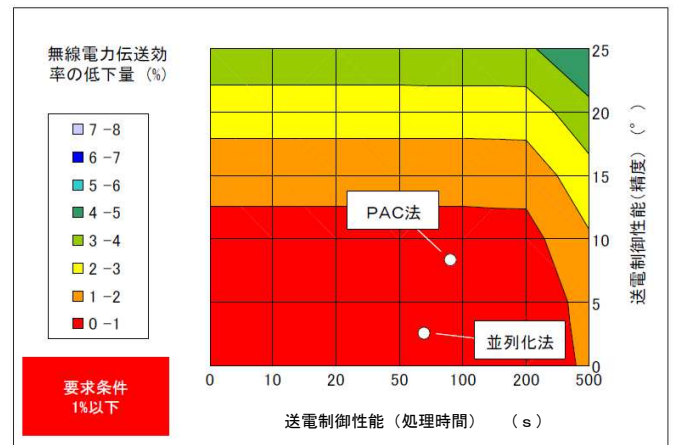


図 1 4 無線電力伝送効率の低下量計算結果

SSPS における要求値は不要波レベルが $0.3\text{W}/\text{m}^2$ 以下、無線電力伝送効率の低下量が 1% 以下である。

試験結果では、位相制御精度は PAC 法が 8.2° 、並列化法が 2.8° であり、処理時間は PAC 法が 90 秒、並列化法が 70 秒である。計算結果より、2 つの手法はともに要求値を満たすことがわかる。不要波レベル、無線電力伝送効率の低下量の計算結果からは位相制御精度は 12° 以下、処理時間は 400 秒以下であれば要求値を満たすことがわかり、試験結果はともにこの値を満足している。以上の検討から我々が提案、開発を行っている 2 つの手法の実現性を実証できた。

3. まとめ

我々は SSPS におけるマイクロ波の送電制御技術として PAC 法と並列化法を提案、開発しており、今回我々は送電制御技術の重要な性能である位相制御精度及び処理時間に関して計測試験を行うことによって実現性の実証を図った。結果として、2 つの手法ともに SSPS の要求値を満たすことが示され、位相制御精度及び処理時間に関して独立した場合の実現性を実証することができた。今後は独立に試験評価を実施したこれらの送電制御性能に関して総合的な評価が可能な試験を実施し、PAC 法及び並列化法の実現性を実証する予定である。

4. 謝辞

本研究は経済産業省の委託契約として実施したものである。実施にあたり、マイクロ波無線送受電技術委員会より多大なご指導、ご意見をいただきました。深く感謝致します。

文 献

- [1] Y.Ohata, and K.Hashimoto, "Study on software retrodirective system for Solar Power Satellite," *Proc. The 3rd International Symposium on Sustainable Energy System*, pp.222, 2006