

宇宙太陽発電システムにおけるマイクロ波エネルギー伝送

Microwave Energy Transmission System for Solar Power Station

松本 紘*

Hiroshi Matsumoto

表1 今世紀における航空機開発と宇宙開発の技術革新のテンポの比較

航空機開発	宇宙開発
ライト兄弟航空機開発 1903	1944 V2 ロケット開発
第一次世界大戦 (軍用機使用) 1914	1957 初の人工衛星 1961 ガガーリン宇宙飛行
リンドバーク 大西洋無着陸横断 ジェット戦闘機開発 1927	1969 アポロ11号月面着陸
1939	1981 スペースシャトル 初飛行
ジェット旅客機開発 1957	1996 宇宙ステーション建造
ジャンボジェット就航 1969	2010 宇宙工場、宇宙発電所
(スペースシャトル開発) 1981	2025 月面基地
スペースプレーン実験 1993	2040 宇宙都市

1. はじめに

四百万年前に人類がこの地球上に誕生して以来、長年その活動は地球表面に限られていた。しかし、今世紀の初頭に飛行機が発明され大空に舞い上げられるようになり、今世紀半ばから急速に進んだ宇宙開発によって、人類は三次元的活動の基盤を得た。天文学者カルダシェフの云う地球上の第一型文明から太陽系に広がる第二次型文明に向け、人類が力強い第一歩を踏み出したと言える。

従って、21世紀には地球上のエネルギー需要増に加え、宇宙空間でもかなりのエネルギー需要増が見込まれる。宇宙太陽発電はその要求に応えられる有望な大型エネルギー源である。本稿では宇宙太陽発電が実現した場合に必要なマイクロ波無線エネルギー伝送について、その基礎研究紹介と今後の研究開発の展望について述べることにする。

2. 宇宙開発と宇宙太陽発電の展望

よく「夢」の宇宙太陽発電と言われることがある。それには実現するとすばらしいが、まだ現実的なものでなく、「遠い」将来の発電システムという意味が込められている。しかし、宇宙開発の歴史を振り返りそのテンポを見ればそうでないことに気付くことができよう。表1は今世紀の航空機開発と宇宙開発を比べたものである。航空機開発において最初の飛行機の実明以来、大きな技術革新はおおよそ十二、三年毎になされてきた。おおよそ四十年遅れて出発した宇宙開発も全く同じペースで大きな技術革新を成し遂げて来ていることが明らかである。従って、今後も十五年に一つのペースで新しいイノベーションが宇宙開発において為されることはほぼ間違いないと考えてもよい。

1995年以降の項目は、これに基づいて揚げてみた今後の予測である。これによると来世紀の前半には宇宙工場が実現し、小規模な宇宙都市も現われるものと予測できる。宇宙太陽発電所は月面基地と前後して2020年頃建造されるという予測を筆者らは持っている。

宇宙太陽発電所 (SPS: Solar Power Station) というアイデアは1968年にアメリカのピーター・グレーザー博士によって提案された¹⁾。彼の構想は静止軌道に約500万キロワットから1000万キロワットの発電能力のある大型衛星を複数機建造し、地球にマイクロ波で電力伝送しようとするものであった。石油ショックによるエネルギー危機感から米国ではSPSの2000年実現を目指して、1976年から1980年にかけてNASA (航空宇宙局) とDOE (エネルギー省) とが約30億円の費用をかけ、その検討を行なった。SPS参照モデルのかなり詳細な概念設計が行われた²⁾が、その後の米国の石油事情の好転により、実施が見送られ、現在研究が停滞している。我国においては、その後SPS

* 京都大学超高層電波研究センター教授
〒611 京都府宇治市五ヶ庄

に関する調査研究がいくつか行われている。^{3),6)}

しかし、長期的には石油の枯渇などエネルギーの深刻な不足が来世紀半ばに我々を襲うことが指摘されている。⁷⁾ これに応えられる大型エネルギー源として高速増殖炉、熱核融合およびSPSの三つが現在有望と考えられている。また宇宙空間におけるエネルギーの需要も確実に伸びており、来世紀の宇宙工場、宇宙都市時代には宇宙でのエネルギー供給源としてSPSが必要となろう。いずれ宇宙におけるエネルギー伝送技術が必要となるなら、遅くとも来世紀前半には直面するエネルギー価格が急騰する前に研究開発をすべきであろう。この様な観点から我々はマイクロ波送電に関わる基本的問題の取り組みを始めている。^{8),17)}

3. マイクロ波宇宙送電の理工学的問題

宇宙空間では有線エネルギー伝送が不可能なので、レーザーかマイクロ波による無線電力伝送が研究対象となる。レーザー電力伝送は伝送電力密度が高いため、危険性の点から対地球送電には不適である。宇宙空間の二点間の電力伝送に対しても安全性が確保される領域にのみその適用が限られてしまうであろう。これに対し、マイクロ波電力伝送は送電アンテナの適当な設計により、ビーム内を走行する飛翔体及び人間の安全を確保するよう、エネルギー密度を制御しつつ送電することができよう。

宇宙におけるマイクロ波無線送電技術の研究開発項目は、大別して二種類に分けられる。

一つは強力なマイクロ波ビームがプラズマ環境に与える影響の研究である。通信等で用いられるような弱い電波の場合、プラズマ電磁環境に与えるマイクロ波の影響は殆ど無いと考えられている。しかし、エネルギーを送電するような場合、そのエネルギー密度は10桁以上も高く、プラズマの非線形効果のため電離層プラズマに対し様々な影響を与える。考えられる影響としては、後方散乱による電子プラズマ波、電子サイクロトロン波、イオン音波などのプラズマ波動励起現象と電離層加熱である。これについては、我々は理論的解析⁸⁾と計算機実験^{9),13)}を行った。マイクロ波エネルギービームの非線形伝搬特性としては

- ・マイクロ波の自己収束
- ・シンチレーション
- ・非線形損失

の三つが考えられる。逆にマイクロ波が電離層などの関係に与える効果としては

- ・非線形加熱
 - ・ポンデロモータティブ力による穴あけ効果
 - ・非線形パラメトリック効果によるプラズマ波励起
- の三つが考えられる。

二つめの研究課題は技術開発である。その大きなものは、レトロディレクティブ方式とコンピュータ制御方式とを組み合わせたマイクロ波ビーム制御の確立と安価で高出力な半導体送信モジュールの開発であろう。レトロディレクティブ方式というのは受電所から発せられるパイロット信号を送電機が捕え、送電アンテナの基盤がどんなに歪んでも、振動したりしても、パイロット信号の来た方向にエネルギービームを自動的に向けられる方式である。強いマイクロ波の下で、弱いパイロット信号を誤ることなく検出し、正確にビーム制御する技術の開発が着手されたばかりである。^{16),17)}

4. MINIXロケット実験

強いマイクロ波が電離層プラズマに与える影響を実験的に調査する目的で、我々は宇宙科学研究所の観測ロケットを用いて実験を行った。^{11),13)} 実験は図-1に示すように親子ロケットを用いて電離層プラズマ中で行われた。

830キロワットのマグネトロンを用いたマイクロ波放射が親ロケットから子ロケットに向け行われ、子ロケットに搭載した各種計測器でその影響が調べられた。マイクロ波の電界強度は親ロケット近傍2m以内で200V/mを越え、非線形プラズマ波励起現象が観測された。図-2はその結果の一部を示す。これはマイクロ波の放射時と非放射時とのHF帯電磁波のスペクトル強度を周波数の関数として示したものである。斜線の部分がマイクロ波の影響で新たに作り出されたスペクトル成分である。

強いマイクロ波が非線形パラメトリック・インスタビリティを引き起こし、1.5メガヘルツにスペクトルピークを持つ電子サイクロトロン波と5メガヘルツ付近に電子プラズマ波が励起されていることが見える。これらのプラズマ波動は位相速度が遅いため、共鳴相互作用により直接プラズマ粒子とエネルギーを交換する。従って、マイクロ波ビームのエネルギーは非線形プラズマ波励起と波動-粒子相互作用の両過程を通して、プラズマ大気へ流れて行く。この問題は今後、更に定量的な実験と理論・シミュレーションにより研究されねばならない。

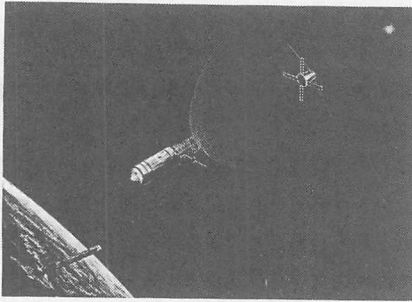


図-1 MINIXロケット実験

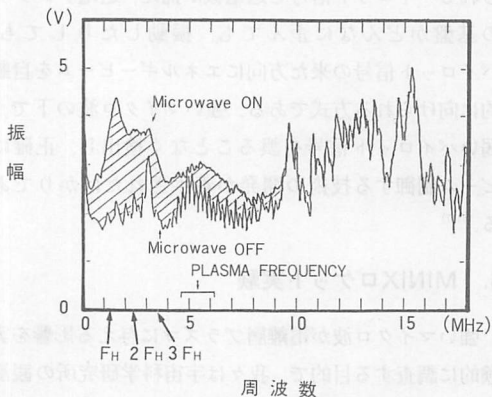


図-2 強力マイクロ波で非線形励起されたプラズマ波スペクトル

このロケット実験は四年前(1983年8月)に成功し、実験そのものは小規模であったが世界で最初の実験として注目を浴びた。予算が乏しく、手作りの実験であったが当時筆者は宇宙科学研究所ニュースにこう書いた。¹⁹⁾

『資源に乏しい我国こそ、「前例前例」という態度を捨て、積極的果敢にSPS問題に取り組み、SPS推進の有力メンバー国となるべきではなからうか。そうなれるだけの工業力、技術、経済力はあると信じている。早く着手し、失敗を恐れず、血と汗にまみれ努力を重ねてこそ、具体的国際協力が要請された段階で、対等もしくは対等に近い協力が出来、それに見合った我国の権益が守られるのではなからうか。我々のMINIXがささやかな呼び水となって欲しいと念じている。』

5. 小型宇宙プラットフォーム実験

—METS実験—

マイクロ波エネルギービームとプラズマ環境の相互作用の研究に加え、宇宙環境下におけるマイクロ波ビーム制御と10キロワット級送電の実験を行う目的で、

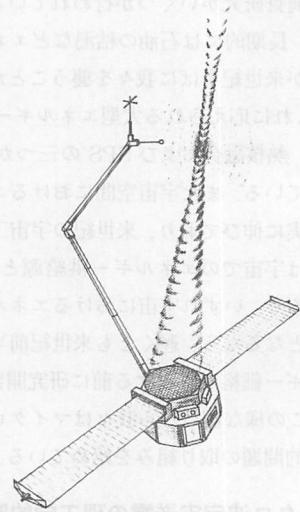


図-3 小型宇宙プラットフォーム(SFU)によるMETS実験概念図

現在、小型宇宙プラットフォーム(SFU)に搭載するMETS実験を計画提案中である。^{14)・18)}

小型宇宙プラットフォーム(Space Flyer Unit)とは文部省、通産省、科学技術庁が協力して開発中の回収可能な、6つのペイロード・ユニットと上面及び中央円筒内に外部ペイロードを収納できる、直径4.5m、重さ3.5トンの低軌道(300km~500km)小型実験ユニットである。

我々は図-3に示すように、SFUの上面に約1,000本のマイクロ波アレイアンテナを搭載した、METS(Microwave Energy Transmission in Space)と呼ばれる10キロワット送電実験を1990年代半ばに行いたいと考え、現在設計に入っている。このMETSではマイクロ波ビームの制御方式としてレトロディレクティブ方式と計算機制御方式を併用する。それによって数百mから数km離れたターゲット子衛星に向け電力伝送を試みるほか、SFUの近傍にマイクロ波を集束させ、非常に強いマイクロ波電界をプラズマ中に実現しその非線形効果を実験的に研究する。

6. マイクロ波送電の研究開発計画

図-4はSPSを目指したマイクロ波無線送電の1980年~2020年までの我々の研究開発計画である。

図中のフレームA、Dはそれぞれ前述のMINIXロケット実験およびSFU/METS実験を示している。Bは半導体電力増幅器、移相器およびマイクロストリップ・アンテナを組み合わせたモジュール1000素子

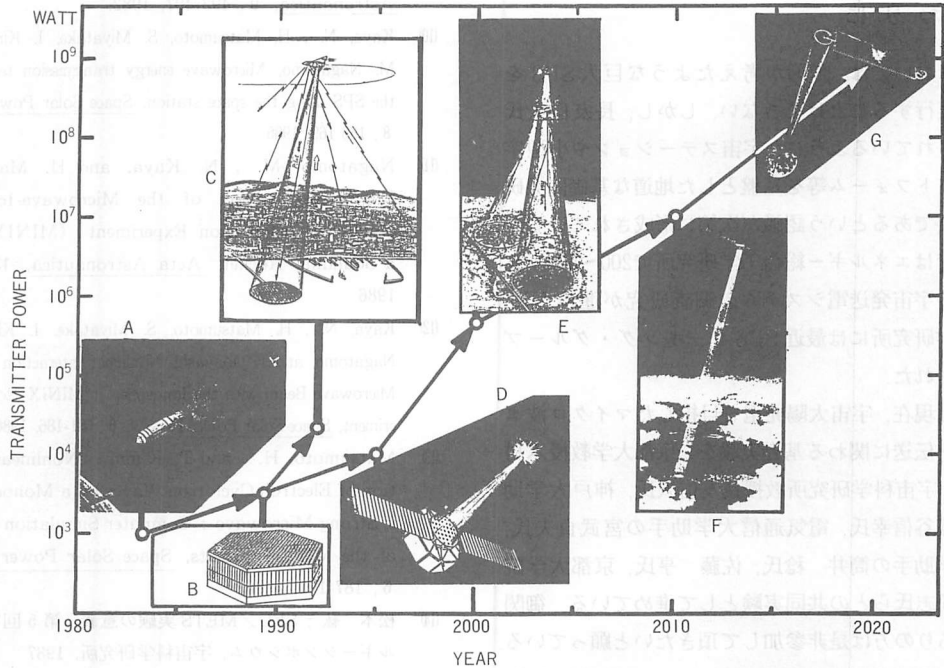


図-4 マイクロ波無線送電研究開発計画

程度より成る地上実験用アンティブ・フェイズド・アレイである。現在この開発に着手しようとしている段階である。

Cはその応用の一つである。地上から高速走査できる無線エネルギー送電が可能となれば、給油を受けずに飛び続けられる航空機の開発も可能となろう。そうすれば、高価な通信衛星を用いずに大都市近郊の上空10kmから20kmを無人無給油運行する個人間通信中継局が実現するかも知れない。

Eは低高度衛星や宇宙ステーションにエネルギーを供給できる大規模地上送電局を示す。表2に示すように直径300m程度の送電アンテナを地上に建設すれば、数百キロワットから数メガワットの電力を上空に向け放射可能となり、充分ビームを集束させてやれば直径100m程度の受電アンテナを持つ衛星に対し、約十キロワットの電力を10分程度給電することが可能になる。またこの程度の開口面積を持つ送電アンテナであれば表3に示されるよう電離層高度で数十メートルの範囲にエネルギーを集束させることが出来、将来のSPSマイクロ波エネルギービームが電離層に及ぼす大規模な影響の調査実験も可能となろう。

FおよびGは来世紀初頭に実現したい10MW実用電力衛星およびSPSを示す。

表2 アンテナ開口直径と必要アンテナ素子数及び1素子1W放射を仮定したときの全放射電力

開口直径 (m)	素子数	放射電力 (w)
1	90	90
3	800	800
10	9千	9K
30	8万	80K
100	9十万	900K
300	8百万	8M
1000	9千万	90M

表3 アレイアンテナの開口直径に対するマイクロ波ビームの直径 (m)

アンテナ開口直径 (m)	到達距離 (m)					
	10	100	1k	10k	100k	1000k
1	1.2	12	120	1.2k	12k	120k
3		4	40	400	4k	40k
10		1.2	12	120	1.2k	12k
30			4	40	400	4k
100			1.2	12	120	1.2k
300				4	40	400
1000				1.2	12	120

7. おわりに

我国においては、米国が考えたような巨大SPSを即座に実行することはできない。しかし、長友信人氏が指摘されているように、宇宙ステーションや小型宇宙プラットフォーム等を基盤とした地道な基礎開発研究が必要であるという認識が次第に形成されている。²⁰⁾

我国ではエネルギー総合工学研究所で200~500キロワットの宇宙送電システムの調査研究が進められ、宇宙科学研究所には最近SPSワーキング・グループが形成された。

筆者は現在、宇宙太陽発電を目指したマイクロ波エネルギー伝送に関わる基礎実験を、京都大学教授木村磐根氏、宇宙科学研究所教授長友信人氏、神戸大学助教授の賀谷信幸氏、電気通信大学助手の宮武貞夫氏、京都大学助手の筒井 稔氏、佐藤 亨氏、京都大学院生平田尚志氏らとの共同実験として進めている。御関心がおありの方は是非参加して頂きたいと願っている。末筆ながら原稿をまとめるに当っては、賀谷信幸氏、筒井 稔氏、平田尚志氏および三輪敬子さんの協力を得た。

参考文献

- (1) Glaser, P.E.; "Power from the Sun : Its Future", Science, 162, 857-886, 1968
- (2) Hanley, G.M. ed. Satellite Power System (SPS) Concept Definition Study, NASA CR 3317-3324, 1980
- (3) PROCEEDINGS OF KEIDANREN FEDERATION OF ECONOMIC ORGANIZATIONS JAPAN, Manned Space Operations in the 1980 's and Energy Programs as Viewed by Grumman Aerospace Corporation, 1978
- (4) 宇宙空間における太陽発電に関する基礎調査, 未来工学研究所, 昭和54年
- (5) 電波研究所季報 : 太陽発電衛星 (SPS) 特集号, 電波研究所, Vol. 28, No. 148, 1982
- (6) サンシャイン計画委託調査研究成果報告書 : 新エネルギー技術シーズに関する調査研究, エネルギー総合工学研究所, 昭和60, 61, 62年
- (7) WORLD ENVIRONMENT AND SATELLITE COMMUNICATIONS 1978-2003 A REVIEW OF OPPORTUNITIES, FUTURE SYSTEMS INCORPORATED REPORT, 104, 1987
- (8) 松本 紘 ; 宇宙太陽発電所用マイクロ波ビームと電離層プラズマとの非線形相互作用の理論的検討, 東京大学宇宙科学研究所報告, 15, 408, 1979
- (9) Matsumoto, H. , Numerical estimation of SPS microwave impact on ionospheric environment, Acta

- Astronautica, 9, 493-497, 1982.
- (10) Kaya, N. , H. Matsumoto, S. Miyatake, I. Kimura, and M. Nagatomo, Microwave energy transmission test toward the SPS using the space station, Space Solar Power Review, 8, 163-169, 1985
- (11) Nagatomo, M. , N. Kaya, and H. Matsumoto, Engineering Aspect of the Microwave-Ionosphere Nonlinear Interaction Experiment (MINIX) with a Sounding Rocket, Acta Astronautica, 13, 23-29, 1986
- (12) Kaya, N. , H. Matsumoto, S. Miyatake, I. Kimura, M. Nagatomo, and T. Obayashi, Nonlinear Interaction of Strong Microwave Beam with the Ionosphere : MINIX Rocket Experiment, Space Solar Power Review, 6, 181-186, 1986
- (13) Matsumoto, H. , and T. Kimura, Nonlinear Excitation of Electron Cyclotron Waves by a Monochromatic Strong Microwave : Computer Simulation Analysis of the MINIX Results, Space Solar Power Review, 6, 187-191, 1986
- (14) 松本 紘 ; SFU/METS 実験の意義, 第5回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, 1987
- (15) 佐藤 亨, 平田尚志, 松本 紘, 賀谷信幸 ; 宇宙小型プラットフォームによるマイクロ波無線送電実験用アンテナレイの基礎設計, 第5回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, 1987
- (16) 中司浩生, 橋爪 隆, 松本 紘, 賀谷信幸, 長友信人 ; マイクロ波送電実験におけるレトロディレクティブ方式の検討, 第5回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, 1987
- (17) 松本 紘 他 ; METS開発計画, 第7回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, 1988
- (18) 賀谷信幸 他 ; SFU/METS 実験—設計の詳細—, 第7回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, 1988
- (19) 松本 紘 ; MINIX計画—宇宙太陽発電に向けて, I SASニュース, 20, 1982
- (20) 長友信人 ; 衛星発電をめぐる最近の動向, エネルギー・資源, Vol. 1.3, No. 6, 1982