

■S4 群 (宇宙・環境・社会) - 5 編 (宇宙エレクトロニクス)

3 章 宇宙太陽発電

■S4群-5編-3章

3-1 宇宙太陽発電の概要

(執筆：篠原真毅) [2009年8月受領]

宇宙太陽発電所 SPS (Solar Power Satellite/Station) は、宇宙開発の機運が最も高まっていた1968年にアメリカの P. E. Glaser 博士によって提唱された発電システムである¹⁾。SPS とは、静止衛星軌道 (赤道上空 36000 km 上空) に巨大な太陽電池衛星を建設し、そこで発電した電力をマイクロ波もしくはレーザー光を用いて地上に無線電力伝送し、地上でその電力を活用しようという構想である。経済性の観点から SPS は地上で 100 万 kW 以上を利用できる設計がほとんどである。マイクロ波を用いる SPS は、数十億素子のフェーズドアレーを用いて 0.001° 以下の精密なビーム制御を行うシステムとなっている (図 3・1)。

フェーズドアレーとは多数のアンテナ素子から構成されるアンテナである。フェーズドアレーではアンテナ素子から放射されるマイクロ波の振幅と位相を制御し、放射マイクロ波を空間で合成することで任意のビーム形状を形成できるため、高速・高精度、かつ、機械的なアンテナ面制御が不要という特徴をもっている。

地球の半径約 6000 km に対し、SPS が配置される 36000 km 上空の関係は、図 3・1 左下にあるようになり (図は夏と冬の位置の例)、1 年のほとんどで SPS は地球の影に入らない。SPS の太陽電池は常に太陽を向くように制御し (太陽指向)、逆にマイクロ波送電アンテナは常に地球の受電サイト (レクテナ (Rectenna: Rectifying Antenna)) を向くように制御するため (地球指向)、SPS は 24 時間の安定した太陽光発電が可能となる。また、マイクロ波を用いた無線電力伝送は、電離層での反射・散乱や大気・雨での吸収・散乱がほとんどない「電波の窓」と呼ばれる周波数帯を用いているために、曇りや雨でも太陽光発電の電力を利用できるという利点をもつ。

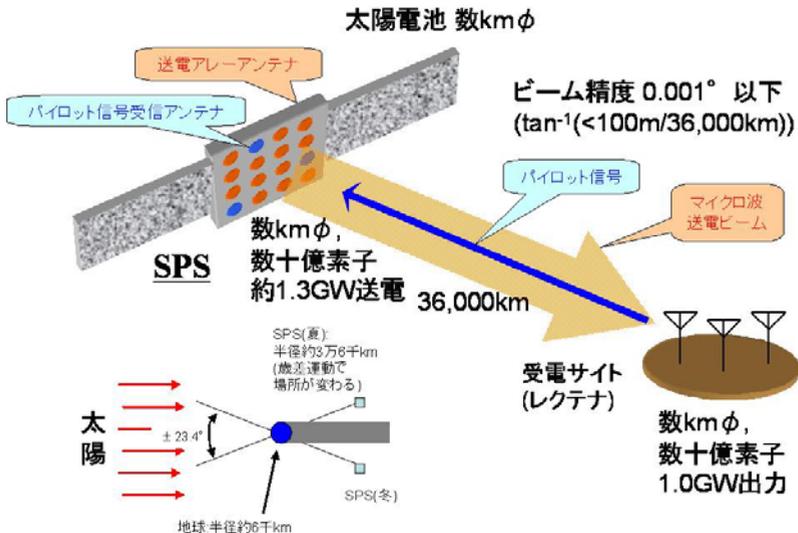


図 3・1 SPS の一般的な概念とパラメータ

SPS の設計では電波法の適合性から、ISM バンドである 2.45 GHz か 5.8 GHz のマイクロ波が選ばれることが多い。SPS は夜昼・天候に無関係でかつ温室効果ガスをほとんど放出しないという、原子力発電と並ぶ将来の基幹電源となる可能性がある発電所とされる。

1900 年代初頭の電磁波利用黎明期に、N. Tesla により無線電力伝送実験が行われていた^{2),3)}。しかし、Tesla はマイクロ波のような高周波・高利得アンテナを用いることができなかったため、当時のユーザの求める大電力を無線で伝送することができず、実験に失敗した。しかし、1960 年代以降のマイクロ波技術の発展により電力をある程度集中することが可能となり、W. C. Brown による様々なマイクロ波無線電力伝送実験が成功した⁴⁾。Brown は、ヘリコプタへの無線送電実験（1964 年、1965 年）や、1.6 km 先の受電レクテナへの無線電力伝送実験（1975 年）など、様々な無線電力伝送を実証しており、1968 年の SPS 提唱は Brown の実証実験に触発されたものである。

1980 年代以降は日本が中心となり SPS 研究を牽引してきた⁵⁾。SPS のためのマイクロ波送電ロケット実験は 1983 年に日本で初めて行われて以降、3 例の実験がすべて日本で行われている。フェーズドアレーを用いた無線電力伝送実証実験も日本でのみ行われており、これらの実証実験と基礎研究を受け、SPS が宇宙開発利用の中長期の課題として我が国の宇宙基本計画（2009 年 6 月）に取り上げられた。これは、欧米に先駆けて国策レベルで SPS が記載された初めてのことである。

SPS は

- 短期：CO₂フリーかつ大規模基幹電源の実現
 - 地球の影にほとんど入らない静止衛星軌道での太陽光発電と、天候による減衰がほとんどないマイクロ波無線電力伝送を用いているため
 - マイクロ波無線電力伝送の効率約 50 % (DC-RF 変換 70～90 %，ビーム収集 90 %以上，F-DC 変換 90 %以上，ほかの乗算) であっても、積分発電量で地上の 7～10 倍程度の電力を発生
- 短期：1 兆円/1 基規模の新産業⁶⁾
 - SPS 1 機の経済波及効果は第二次波及効果まで含めて約 7 兆円（うち直接波及効果 2.7 兆円）
 - 延雇用者数は約 38 万人
- 長期：地球生存圏の拡大
 - 宇宙環境を利用した人間の本質（成長欲求）にあった持続的発展

という特徴があり、地球温暖化問題を解決し、新しい産業を振興し、地球生存圏を拡大する SPS は今後推進すべき新しい発電システムと考えられる。

■参考文献

- 1) P. E. Glaser, "Power from the Sun; Its Future," Science, no.162, pp.857-886, 1968.
- 2) N. Tesla, "The transmission of electric energy without wires, The thirteenth Anniversary Number of the Electrical World and Engineer," Mar. 1904.
- 3) N. Tesla, "Experiments with Alternate Current of High Potential and High Frequency," McGraw Pub. Co., N.Y., 1904.
- 4) W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-32, no.9, pp.1230-1242, 1984.

- 5) H. Matsumoto, "Research on Solar Power Station and Microwave Power Transmission in Japan: Review and Perspectives," IEEE Microwave Magazine, pp.36-45, Dec. 2002.
- 6) 株式会社三菱総合研究所, "2007年度宇宙航空研究開発機構委託業務「宇宙エネルギー利用システム総合研究」," Mar. 2008.

■S4 群-5 編-3 章

3-2 過去に検討された宇宙太陽発電システム

(執筆者：篠原真毅) [2009年8月 受領]

3-2-1 米 SPS リファレンスシステム (1980 年)

Glaser の提案を受け、1970 年代に入って間もなくアメリカで SPS に関する技術的適合性が検討され始めた。初期の様々な検討を引き継いで、1976 年 ERDA (Energy Research and Development Agency ; DOE (Department Of Energy) の前身) により始められた SPS の概念設計と評価のプログラムが 1977~1980 年の期間 DOE-NASA (National Aeronautics and Space Administration) の共同作業として進められた。1980 年度予算には 2500 万ドルの調査費が認められていた。DOE/NASA による調査は多岐にわたっているが、特に 1978 年 10 月に示されたリファレンスシステム^{1),2)}はその後の SPS の検討の方向を定めたものである。この内容は日本でも電波研究所 (当時) によって紹介されている³⁾。

リファレンスシステムは、赤道上空 36000 km の静止衛星軌道 (GEO) 上の重量約 5 万トン、大きさ約 10km×5km の太陽電池 (Si または GaAlAs) で電気エネルギーを発生させる。その電気エネルギーをマイクロ波エネルギーに変換し、太陽電池パネルの端に取り付けられた直径 1 km の送電アンテナから 2.45 GHz のマイクロ波を用いて地上に無線送電するシステムである。マイクロ波を受電し、整流して直流を発生させる素子はレクテナと呼ばれ、リファレンスシステムでは 10km×13km のアレーとされている。リファレンスシステムの発電能力は約 10 GW であり、最終的に地上で利用できる直流電力は約 5 GW である。

太陽電池の効率は 28 °C において GaAlAs で 20 %、Si で 17.3 % を期待値として設計されている。太陽電池から送電アンテナへは、最長 10 km 近い距離をケーブルで送電しなければならず、40 kV の高圧が必要となる。太陽電池各モジュールを直並列に接続し、所要の電圧に調整集電し、太陽電池パネルの中央を走る 3 本の主バスラインへと供給される。バスライン入り口には 2000 A 程度のブレーカを設け、保守、修理などの際必要な部分を切り放すことができる。集電された電力を送電アンテナへ給電するわけであるが、太陽電池部分は太陽指向性であり、アンテナ部分は地球指向性であるため、ロータリージョイントで両者を接続しなければならない。リファレンスシステムではスリップリングを用いた電気結合方式を採用している。1 日 1 回転する直径 15 m のスリップリングを通し、10 A/cm² の電流密度で送電しなければならない。リファレンスシステムの技術課題の一つとなっていた。

送電アンテナは直径 1 km の開口面において電力密度が 10 dB テーパのガウス分布をもつアクティブフェーズドアレーアンテナとなっている。アンテナ面は 7220 個のサブアレーに分割されており、1 サブアレーに 70 kW のクライストロンを付けている。マイクロ波発生素子はほかにマグネトロンやアンプリトロン、半導体 (FET) などが考えられたが、DOE/NASA のリファレンスシステムではマグネトロンは高調波問題で、半導体は効率とコストの問題でこのときは選ばれていない。しかし、技術進歩によりクライストロンとの差は小さくなってきており、両素子を用いた無線電力伝送研究は現在多く行われている。送電アンテナの放射パターンは、地上においてビーム中心で 23 mW/cm²、レクテナの端で 1 mW/cm²、第一サイドローブレベルで 0.08 mW/cm²、システム故障によるビーム拡散時には 0.003 mW/cm² の地上電力密度となる。

3-2-2 米 SPS Fresh Look Study (1997 年)

1980 年度をもって国レベルでの研究が途絶えてしまったアメリカでは、近年の日本の研究や世界の環境問題などに刺激され、SPS 研究を改めて見直す動きが出ていた。NASA では 1995 年から 1997 年にかけて SPS の見直しプログラム「Fresh Look Study」^{4),5)} を行い、経済性の面で改善が見られる次世代 SPS である「サンタワー」を今後推進していく決定を行った。

フレッシュ・ルック・スタディの中心人物は J. C. Mankins (NASA (当時)) らであった。Fresh Look Study は 1980 年のリファレンスシステム以後に提案された様々な SPS を比較検討し、地球上の各都市の規模や地域別に SPS の有用性を検討したものである。検討された SPS はリファレンスシステムや日本版 SPS, SPS 2000 などを含む 30 種類を越えるものであった。その結果、新たなリファレンスシステムともいふべき SPS が選ばれている。サンタワーと呼ばれる SPS で、アメリカの新しい SPS 計画の中心に位置するものであった。

サンタワーは 50~100 m の直径の太陽電池を木の葉のように接続した形状をしている。一つの葉には集光/反射レンズと 0.5~1 MW の集光型太陽電池を備え、合計で 100~400 MW 級の発電を行うとしている。1000 km 上空の軌道から 5.8 GHz のマイクロ波で地上へエネルギーを伝送する。送電アンテナは直径約 260 m、厚さ 0.5~1 m であり、半導体 (FET) を用いてマイクロ波送電を行う。地上のレクテナは直径約 4 km とされる。250 MW 級のサンタワーの建設費は 80~150 億ドルと見積もられており、リファレンスシステムよりも割安とされていた。

3-2-3 日本版 SPS (1994 年)

最初の日本版 SPS は、1991 年度より 3 年間にわたって新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) より三菱総合研究所に委託された「宇宙発電システムに関する調査研究」で検討された⁶⁾。日本版 SPS は地上で 1 GW を利用できるシステムであり、静止衛星軌道から 2.45 GHz のマイクロ波を用いて地上に送電する。低軌道において図上の形に組み上げ、そのまま静止衛星軌道に移動し、遠心力を用いて展開する構造となっている。太陽電池部分はフレキシブルな軽量構造の上に展開し、全体の形状を分布して配置した微小推力の電気推進機により維持する。重量は約 2 万 1 千トンである。

太陽電池には単結晶シリコン (Si) とアモルファスシリコン (a-Si) の二つが検討されていた。単結晶 Si は 10 cm×10 cm、厚さ 30 μ m で変換効率 22% を想定している。a-Si はフィルムトータルで 120 μ m の厚さで変換効率 20% を想定していた。電力を発生させるために必要な面積は、単結晶 Si が約 10 km² に対して a-Si が約 11 km² とやや広いが、電池重量は 2300 トンに対し 1840 トンと a-Si が有利となっている。

太陽電池アレー電圧はいずれの場合も 200 V_{DC} である。リファレンスシステムでは DC 送電であったのに対し、日本版 SPS では 20 kHz の AC 電送を適用し、送電アンテナへの伝送電圧は 30 kV_{AC} としている。太陽電池と送電アンテナの接続は磁界結合方式のロータリージョイントで結合する。電気結合方式が物理的接触型であるのに対し、磁界結合方式はトランス技術を応用した非接触型であり、信頼性が高いが、交流伝送が前提となる。

送電システムは従来のクライストロンを用いたシステムに加え、半導体 (FET) 増幅器 (SSPA) を用いたシステムの検討がなされている。ビーム密度分布はリファレンスシステムに近い、送電アンテナ端では中心のビーム密度の 1/8 となるようなガウス分布を採用してい

る。そして 1 kW 級の分散型サブアレーを用いてサブアレー分割をリファレンスシステムに比べて 1/20 に細かくし、ビーム制御を 1 度の範囲で行えるように設計されている。中心部のサブアレーでは 16 W 出力 18 dB ゲインのアンプを 64 台、周辺部では同じアンプを 8 台用いることでビーム密度分布を形成する。中心部での電力密度は 4.48 kW/m²、アンテナ端では 448 W/m² となる。アンテナはダイポールアンテナを用い、反射板を放熱板として利用する。エネルギー伝送用マイクロ波は 2.45 GHz のほかに 5.8 GHz も視野に入っていた。

3-2-4 日 JAXA 2004 モデル (2004)

1998 年度より、宇宙開発事業団 (NASDA) より三菱総合研究所への委託業務として、「宇宙太陽発電システムの調査・検討」が始められた。NASDA が JAXA となっても本検討委員会は引き継がれ、2003 年及び 2004 年度には反射鏡支持構造の撤廃による構造的成立性向上のためのミラーと発電送電モジュール分離の編隊飛行の検討と、熱制御の高度化のための発電-送電モジュール分離/近接型の SPS デザインが検討されている^{7),8)}。これらの工夫により構造的・熱的成立性が高くなり、これまでになく現実的な SPS デザインとなっている。

2004 年度以降、JAXA SPS はこの編隊飛行型かつ発電-送電モジュール分離型で固定され、詳細な検討が行われている。JAXA 2004 モデルはフェーズドアレー+ソフトウェア・レトロディレクティブによる DOA (方向推定) とビーム方向制御を行う設計である。半導体増幅器を用いた薄型一体構造 (アンテナ+マイクロ波回路など) でかつモジュール構造を採用しつつ、アレー中心と端では異なるパラメータ (マイクロ波送電電力など) のモジュールを採用した設計である^{9),10)}。

直径 2 km 弱の SPS 用マイクロ波送電システムの全体パラメータは以下のようになる。

- ・ 周波数 : 5.8 GHz CW NON (無変調連続波)
- ・ 送電距離 : 36000 km
- ・ DC-RF 変換効率 : 76 %
- ・ 送電マイクロ波電力 : 1.31 GW
- ・ 送電アンテナ直径 : 1.93 km
- ・ 送電テーパ : 10 dB ガウシアン (アンテナ中心とアンテナ端で送電電力比 10 : 1)
- ・ 送電アンテナ中心電力密度 114.6 mW/cm²
- ・ 送電アンテナ端電力密度 11.5 mW/cm²
- ・ 素子間隔 0.77 λ の場合の 1 アンテナ面積 $\approx 16 \text{ cm}^2$ (4 角 面)
- ・ 送電アンテナ中心 1 アンテナからの放射電力 1.83 W
- ・ 送電アンテナ端 1 アンテナからの放射電力 0.18 W
- ・ 受電アンテナ直径 : 2.45 km
- ・ レクテナ中心電力密度 : < 100 mW/cm²
- ・ レクテナ端電力密度 : < 1 mW/cm²
- ・ 収集効率 (宇宙での全放射電力に対するレクテナ面での電力回収効率) : 96.2 %
- ・ RF-DC 変換効率 (仮定) : 85 %
- ・ 出力 DC 電力 : > 1 GW

3-2-5 日 USEF 2006 モデル (2006 年)

USEF ((財)無人宇宙実験システム研究開発機構)ではエネルギー的観点から SPS の検討が行われている¹¹⁾。2000 年度から活動が始まっており、2000 年度には(社)日本機械工業連合会より委託を受け、「宇宙太陽発電システムに関する調査研究」により、SPS の意義、SPS に関する国内外の研究状況などについて調査が実施されている。2001~2003 年度には経済産業省より委託を受け、「宇宙太陽発電システム実用化技術調査研究」として、将来の電力代替エネルギー源として SPS を位置づけ、経済、環境及び技術面から「宇宙太陽発電」の実用化に向けての検討を行うとともに、要素技術の試作、実証実験システム及び実用段階での SPS の具体案についての開発計画などについての調査研究が実施されている。2004~2005 年度は地上でのマイクロ波無線電力伝送に特化した検討が行われていたが、2006 年度より再び SPS の検討が行われるようになり、発送電小委員会とシステム小委員会に分かれて詳細な検討が行われた^{12), 13)}。その間に様々な試作研究が行われている。

USEF SPS 検討委員会で検討された SPS は重力傾度姿勢安定、テザー方式、発送電一体型パネル数百万枚、バス部などから構成される案であった。この SPS は

- (1) 重力安定により、定常状態では姿勢安定に消耗されるエネルギーを必要としない
- (2) 可動部を持たない
- (3) ユニット化した発送電一体型パネルを、軌道上で多数平面状に組立てることなどにより構築可能である
- (4) 集光しないため、熱設計が比較的容易である

といった特徴を持つ。発電量は地上で 1 GW の電力を得られる設計となっており、5.8 GHz のマイクロ波での無線電力伝送を行うのであるが、その構造上発電量が 1 日周期で大きく変化してしまう。構造的なシンプルさをとるか、安定した発電をとるかシステムデザインポリシーに依存している。2006 年度以降はアンテナ面にも太陽電池を張ることでこの弱点をカバーする設計へと変更され、またテザーの張り方も改良して宇宙空間でより安定な形状となっている¹⁴⁾。

3-2-6 日 実証 SPS 2000 (1993 年)

リファレンスシステムや日本版 SPS は将来の基幹発電所として SPS を捕らえ、その実現性を検討したものである。これに対し、日本で SPS の技術実証のための中型 SPS 建造に関する詳細な検討が行われたものが SPS 2000 である。SPS 2000 は、日本の旧宇宙科学研究所 ISAS (現 JAXA) が中心となり 1990 年代に提唱されたものである¹⁵⁾。

SPS 2000 は三角柱のトラス構造をしており、上空 1000 km の赤道軌道上を一周 6810 秒で周回する。送受電機会は 8.4 回/日であり、送受電可能期間は 202 秒/機会である。SPS 2000 は約 336×336×303 m の三角柱型の太陽電池 (a-Si) で電気エネルギーを発生させ、太陽電池パネルの中央に取り付けられた 132×132 m の送電アンテナから 2.45 GHz のマイクロ波を用いて地上に無線送電する。発電能力は 10 MW である。重量は約 240 トンであり、アリアン V もしくはプロトンでの打ち上げを計画していた。SPS 2000 は三角柱形状をしているため、太陽電池は太陽指向性をとる必要はなく、ロータリージョイントが不必要となる。

送電アンテナにはキャビティ付スロットアンテナを用いる。リファレンスシステムでは送電アンテナの電力密度分布はガウス分布とされていたが、SPS 2000 では放熱問題などの制約

により均一な電力密度分布を採用している。送電アンテナにおける最大電力密度は 574 W/m^2 、地上における最大電力密度は 0.9 mW/cm^2 である。

SPS 2000 では赤道上の国々にレクテナサイトを建築し、実験を行うとしていた。リファレンスシステムのレクテナとの相違点は

- (1) リファレンスシステムではレクテナ設置位置を北緯 35 度と仮定していたために受電面が傾いていたのに対し、SPS 2000 では水平である
- (2) レクテナの受ける単位面積当たりの電力がずっと少ないため、特にコストを大幅に下げなければならない
- (3) コストが十分小さければ 5 ないし 10 年の寿命でもよいという点である。

以上は代表的な SPS デザインであるが、ほかにも様々な SPS が提唱・検討されている。

■参考文献

- 1) DOE and NASA report, "Satellite Power System; Concept Development and Evaluation Program," Reference System Report, Oct. 1978.
- 2) F. A. Koomanoff, "Satellite power system concept development and evaluation program," The assessment process, Proc. DOE/NASA SPS Program Review, DOE Report CONF-800491, pp.15-20, 1980.
- 3) 電波研究所, "太陽発電衛星 (SPS) 特集号," 電波研究所季報, vol.28, no.148, Dec. 1982.
- 4) M. L. Sancoti, et al., "Space solar power : A fresh look feasibility study ? Phase I report," Report SAIC-96/1038 (Space Applications International Corporation for NASA LeRC Contact NAS3-26565, Schaumburg, Illinois), 1996.
- 5) J. C. Mankins, "A fresh look at the concept of space solar power," proceeding of SPS'97, S7041, (in Montreal), 1997.
- 6) (株)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," Mar. 1992, Mar. 1993, Mar. 1994.
- 7) (株)三菱総合研究所, "宇宙航空研究開発機構委託業務「宇宙エネルギー利用システム総合研究」," Mar.2004.
- 8) 森 雅裕, 香河英史, 斉藤由佳, 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, pp.132-137, 2007
- 9) (株)三菱総合研究所, "2007 年度宇宙航空研究開発機構委託業務「宇宙エネルギー利用システム総合研究」," Mar.2008.
- 10) 藤田辰人, 森 雅裕, 久田安正, 福室康行, 木皿且人, 瀬在俊浩, 吉田裕之, 鈴木拓明, "JAXA における宇宙エネルギー利用システム (SSPS) の研究現状," 信学技報 SPS2008-01(2008-04), pp.1-4, 2008.
- 11) <http://www.usef.or.jp/>
- 12) 三原荘一郎, 斉藤 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 SPS 2007-01(2007-04), pp.1-6, 2007.
- 13) 小林裕太郎, 三原荘一郎, 斉藤 孝, 金井 宏, "SSPS に関する USEF の活動状況," 信学技報 SPS 2008-02 (2008-04), pp.5-10, 2008.
- 14) S. Sasaki, K. Tanaka, K. Higuchi, N. Okuizumi, S. Kawasaki, N. Shinohara, K. Senda, and K. Ishimura, "A New Concept of Solar Power Satellite: Tethered-SPS," Acta Astronautica, vol.60, pp.153-165, 2006.
- 15) SPS 2000 タスクチーム, "SPS 2000 概念計画書," 宇宙科学研究所, 1993.

■S4 群-5 編-3 章

3-3 宇宙太陽発電のためのマイクロ波無線電力伝送技術

(執筆者：篠原真毅) [2009年8月 受領]

3-3-1 送電システム

(1) マイクロ波発生+ビーム制御技術

SPS から地上へ無線電電力を伝送する手法にはマイクロ波を用いたもの以外にレーザー無線電力伝送も検討されているが、ここではマイクロ波無線電力伝送技術に焦点を絞る。

マイクロ波無線電力伝送及び SPS の設計では 40 年にわたってマイクロ波の発振/増幅方式をめぐって議論がたたかわされてきた。「電子管」か、「半導体」かである。3-2 節で述べたように、もともと 1970 年代の SPS である DOE/NASA リファレンスシステムでは、当時のコンサバ技術であるクライストロンをベースに設計がなされていた。1960 年代の Brown の実験の多くはマグネトロンを用いたものであった。

時代と情報通信産業の発展とともに半導体技術が発展してきたため、近年の SPS は半導体技術をベースとした設計が主流となってきたが、まだ議論は収束していない。これは、マイクロ波無線電力伝送用のマイクロ波発振/増幅器は高効率化がまず必須であり、移動体へ、や移動体からの無線電力伝送のためには、同時に高精度フェーズドアレーを構築しなければならないという点に起因する。

高効率化は、ビーム制御をとまわなければ現状で、マイクロ波管で 70% 以上は実現している。しかし、マイクロ波管は 1 素子当たりの出力が数百 W 以上と大きいため、グレーティングロブが出ないようなフェーズドアレー化するためには出力段に電力分配器と移相器を挿入しなければならない。電力分配器と移相器の損失が現状では大きいため、マイクロ波管をフェーズドアレーとするためには低損失電力分配器と低損失移相器の開発が必須である。半導体増幅器は、フェーズドアレーには最適であるが、効率と出力の点で電子管に遅れを取っている。

SPS のための無線電力伝送システムを考えた場合、電子管を選択しても半導体を選択しても地上で無線電力伝送応用を考えた場合よりも高い性能が要求される。一言で表現すれば「超巨大高効率高精度軽量安価フェーズドアレー」が必要なのである。「超巨大」、「高効率」、「高精度」、「軽量」、「安価」という五つのキーワードに関し、これまでの SPS 設計で示されてきた数値は以下のようにになっている¹⁾。

- (1) 「超巨大」= 1.93 km ϕ 5.8 GHz, 1.3 GW, 素子間隔 $0.77 \lambda \approx 4$ cm \rightarrow 18.3 億素子
- (2) 「高効率」= 76% [JAXA], 85% [NASA/DOE]
- (3) 「高精度」= 各素子位相誤差 5~10 度以下 (含, 目標追従, 構造誤差)
- (4) 「軽量」= a1) 2 g/W = 2600 t/送電システム (除, 発電), a2) 厚さ数 cm 以下 (打上げ時収納要求より), b) アンテナ重量 300 t/km²
- (5) 「安価」= < 300 円/W

これらのパラメータと現状の衛星用・民生用・軍用フェーズドアレーと比べると、「高精度」要件を除き、ほかの 4 要件は桁違いに高い目標である。例えば、リモートセンシング用の人工衛星フェーズドアレーの素子数は 100 素子程度、軍用でも最大 1 万素子程度であるのに対し²⁾、SPS では 20 億素子弱である。通信用では MIMO 用に数素子程度のアダプティ

ブアレーを導入しているのが唯一である。

アダプティブアレーはデジタルビームフォーミング (DBF) のためのビーム制御システムであり、位相制御方式などがフェーズドアレーとは異なっている。電子管や HPA (High Power Amplifier) では 70%以上の効率も達成可能であるが、フェーズドアレーシステムとしての効率はまだ極端に低い。コストも上記目標を現状で達成しているのは、すべてのマイクロ波素子の中で 2.45 GHz 用マグネトロンのみである。

この 5 要素を満たすフェーズドアレーを実現するためには通信技術やレーダ技術の進歩を待っているはおそらく実現は難しく、「マイクロ波無線電力伝送」という新しい電波応用領域を拡大し、マイクロ波無線電力伝送が技術を牽引する必要がある。しかし、ユビキタス電源をはじめとするマイクロ波無線電力伝送という電波応用が地上・民生用で拡大しつつある現状では悲観する必要はなく、宇宙技術の発展と両軸で地上技術の発展が期待され、また発展するであろう。

情報通信産業とともに発展してきた半導体を用いたマイクロ波発振/増幅技術は现阶段では 2 GHz 以下、1 W 以下の技術であり、しかも効率の追求が主目的ではない。無線電力伝送用の半導体増幅器としては 1.9 GHz の F 級増幅器で最大 PAE (電力付加効率) 72.6%、最大ドレイン効率 80.1%³⁾、5.8 GHz の F 級増幅器で最大ドレイン効率 76.5%、最大 PAE 68.7%、最大 PAE 時出力 33.9 dBm、利得 10 dB の実測値を得ている⁴⁾。無線電力伝送に用いるマイクロ波の多くは無変調連続波であり帯域は非常に狭いために共振回路を利用する F 級増幅器を適用しやすい。しかし、F 級で用いる FET は、高調波を有効利用しなければならないために動作周波数の 7 倍以上の周波数でもきちんと動作しなければ F 級としてきちんと動作しない。つまり、5.8 GHz、85%以上の F 級増幅器を開発するためには 40.6 GHz 以上で動作する FET を用いなければいけないということになる。現在の FET の周波数特性では 2 GHz 以下では高効率化も図れるが、5.8 GHz となると高調波処理が難しくなり、これ以上の高効率化が難しい。今後は高周波化と高出力化が可能なワイドバンドギャップ半導体を用いた F 級増幅回路が期待されている。

このように HPA での高効率化は徐々に進んでいるが、フェーズドアレーというシステムに組んだ場合の総合効率はまだ極端に悪い。これは主にドライバ段での効率が低いためであり、トータルの効率を効率させることを考えずに半導体増幅器が設計されているためであるが、第 4 世代以降の携帯電話技術もしくはミリ波レーダなど高周波レーダ技術の発展によって今後フェーズドアレーの総合効率が上がる可能性は否定しない。問題はマイクロ波出力 1 W 以下の現状である。マイクロ波技術はこれから低出力化 (かつ高効率化) を目指して研究/発展が進むことは明らかである。高出力マイクロ波のニーズは、今は電子レンジに代表される加熱用途がほとんどであり、電子管の独占市場となっている。GaN もしくは SiC のワイドバンドギャップ半導体が高出力マイクロ波の発生のために現在盛んに研究が行われている⁵⁾が、半導体が電子管の需要に置き換わるためにはコスト競争力もしくはコスト以上の付加価値が付かなければならず、非常に難しい市場であると思える。

無線電力伝送用途として、高効率電子管を用いたフェーズドアレーも研究が行われている。2.45 GHz マグネトロンは現在唯一 10 GW オーダの生産を実現しているマイクロ波管であり、効率も 72~74%程度、コストも 500 W が 1 個 500 円以下である。マグネトロン問題は効率やコストではなく、ほかの機器のように増幅器ではなく発振器であるために単体でマイク

ロ波エネルギー伝送システムを構築することができない点である。高出力の発振器であるがために位相の制御が困難であり、また Q が低く、雑音が多いとされていたために電子レンジのような加熱用途と、一部のパルスレーダにしか用いられてこなかった。

しかし、京都大学の研究により、マグネトロン雑音要因は電源の安定度と電子放出用のフィラメント温度にあることを明らかにし、自励発振状態のマグネトロンでも直流安定化電源を用いて駆動すれば Q が 1×10^5 以上になることを示した⁹⁾。同時に、円筒形状であるマグネトロンの構造上発生が不可避な n 次高調波を除き、低周波側高周波側共に雑音が -100 dBc 以下に抑えられることも示された。 n 次高調波はそれでもすべて -60 dBc 以下であり、マグネトロンを加熱以外の用途に十分用いることができることが示された。

マグネトロンの雑音は、電子レンジで用いるような半波倍電圧電源やパルスレーダで用いるようなパルス電源の立ち上がり時もしくは立ち下がり時に発生することも実験的に示されており⁷⁾、常に定格電圧を印加できる直流安定化電源ではスペクトルの Q が3桁以上上昇し、雑音も -100 dBc 以下に抑制できる。

このように加熱用マグネトロンでもその電波の質は無線電力伝送にも十分利用可能である。ビーム制御をとまなわないユビキタス電源や定点間の無線電力伝送ではこれでも十分である。しかし、更に移動体への、または移動体からの無線電力伝送のためにフェーズドアレーを構築するためには不足である。自励発振のマグネトロンは、まだ位相制御を行うことができないし、温度変化と共に周波数が変化していくという欠点も残っている。

そこで、1960年代のBrown⁸⁾及び2000年以後の京都大学⁹⁾では、外部磁場強度もしくは印加電圧／電流値によってマグネトロンの周波数が変化する現象と、弱い基準マイクロ波が外部からマグネトロンに注入されるとマグネトロンの周波数が基準マイクロ波の周波数にロックされるという現象を利用して、安価な電子レンジ用マグネトロンをそのまま用いて位相制御可能なマグネトロン、位相制御マグネトロン (PCM : Phase Controlled Magnetron) の開発に成功している。

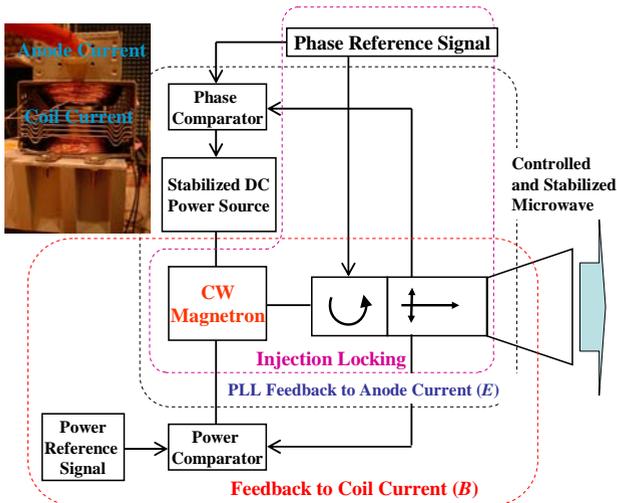


図 3・2 位相振幅制御マグネトロンのブロック図

京都大学では、更に位相／周波数／振幅制御可能なマグネトロン¹⁰⁾が開発された。位相／周波数／振幅制御可能なマグネトロンのブロック図を図 3・2 に示す。弱い基準マイクロ波が外部からマグネトロンに注入されるとマグネトロンの周波数が基準マイクロ波の周波数にロックされるという現象は注入同期法と呼ばれ、半導体でも同様の現象が発生する。印加電圧／電流値もしくは外部磁場強度によってマグネトロンの周波数が変化する現象を利用すればマグネトロン＋電源を VCO (Voltage Controlled Oscillator) とみなすことができるため、位相を制御するための PLL (Phase Locked Loop) 制御を行い、位相を安定化／制御することができるようにしたものが位相制御マグネトロンである。

Brown は、制御方式として外部磁場制御を選択し、京都大学では印加電圧／電流値を選択している。京都大学で開発された位相／周波数／振幅制御可能なマグネトロンは位相／周波数を印加電圧／電流値で制御し、同時にマイクロ波出力を外部磁場で制御している。

京都大学で開発された位相制御マグネトロンは、位相安定度も 1° 以下と非常に安定しており (図 3・3)、フェーズドアレーに用いるには十分な性能である。京都大学ではマグネトロン・フェーズドアレー実験にも成功している (図 3・4)。このマグネトロン・フェーズドアレーはホーンアンテナのフェーズドアレーであり、グレーティングローブが出現しないビーム制御角は非常に小さいが、損失が少なく高効率であるという特徴をもつ。

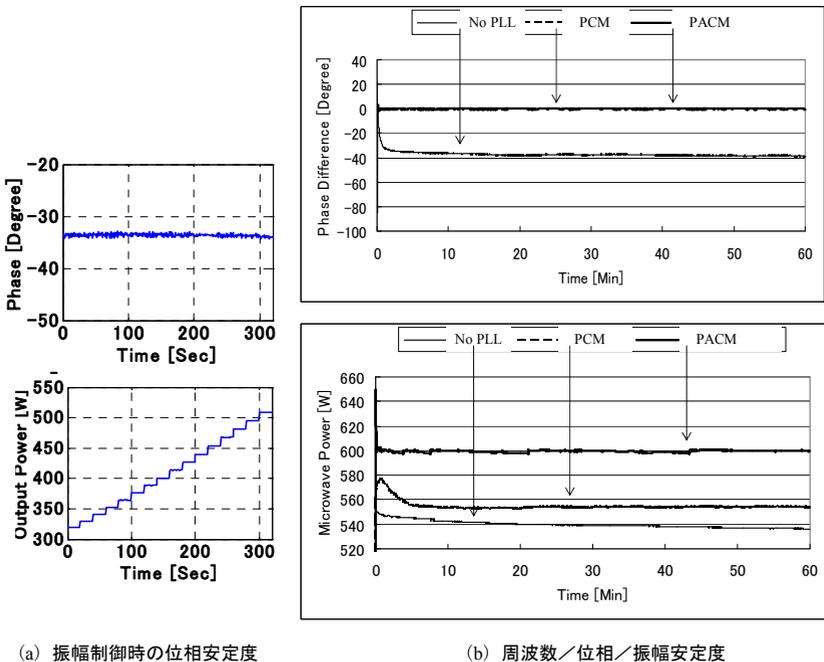


図 3・3 位相振幅制御マグネトロンの実験結果

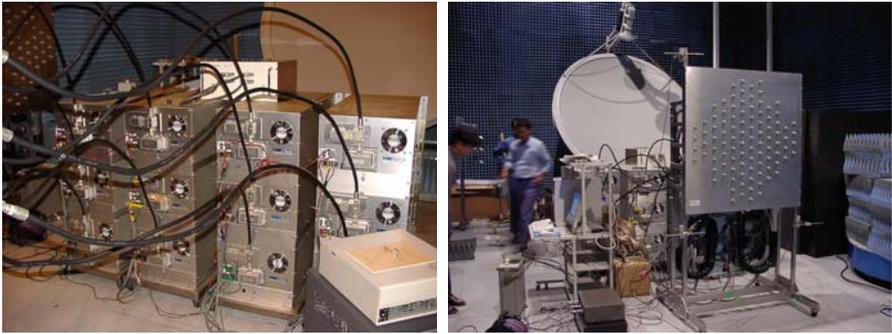


図 3-4 京都大学で開発された 12 素子 2.45 GHz マグネトロン・フェーズドアレー

SPS 実現のために、超巨大高効率高精度軽量安価フェーズドアレーを開発する方向性は三つ考えられる。

- ・現状でも高効率な高出力マイクロ波管（マグネトロンや TWT）を利用し、グレーティンググローブ抑制のためにアンテナ素子手前に挿入しなければならない低損失電力分配器と低損失移相器の開発
- ・総合効率が高い半導体増幅システムの開発（一般のフェーズドアレーでは 1 素子当たりの出力は <1 W 程度）
- ・半導体並の低出力（<1 W）高効率マイクロ波管の開発

である。更に別の考え方として

- ・高出力マイクロ波発振／増幅器を用いてサブアレーを構築し、素子間隔が波長を越えてもグレーティンググローブが発生しないようにビーム制御角を非常に小さくする（例：0.1°）
- ・素子間隔が波長を越え、かつビーム制御各が大きくなってもグレーティンググローブが発生しないような不等間隔アレーなどの手法の開発^{11), 12)}

も高効率フェーズドアレーへつながる道である。

安価フェーズドアレーの開発も大きな研究課題である。フェーズドアレーは複数のアンテナ-回路要素を用いるため、同じものを大量に製作する必要がある。特にフェーズドアレーは多数の素子が必要となるため、1 素子が最高の性能を実現できただけでは駄目で、それをラインに乗せ、量産をかけてその性能を維持する必要がある。現在の半導体増幅器を用いたフェーズドアレーは、まだ素子数が数百以下と少ないため、ラインで量産するには至っておらず、1 素子 1 素子個別開発に近い。現在の半導体増幅器や移相器は、最高性能を実現するためには個別開発と調整が必須であるため、量産すると性能が下がる。そのため、非常に高コストであり、逆にそれが民生用フェーズドアレーの普及の壁となっている。将来的にはフェーズドアレーはプリント基板で量産（回路印刷）するので量産効果で安く普及できるという期待は高いが、そのような指向性をもった研究開発はあまり行われていないのが実情である。

通信・レーダ用途ではマイクロ波無線電力伝送ほど高効率でかつ大量の素子を用いないため、通信・レーダの研究開発だけを待っている無線電力伝送用高効率フェーズドアレーの実現は難しい。無線電力伝送用高効率フェーズドアレーは無線電力伝送の研究者がイニシア

チブを取り、その成果が通信・レーダ用途にスピンオフできるようにすべきである。

安価な高効率フェーズドアレーを実現するためには以下のような方法が考えられる。

1. 単価を下げる：調整不要な増幅器，移相器などを開発する（例：現在の民生用マグネロン⁹⁾，MMIC^{13),14)}，ソフトウェアによる機器開発後の調整手法¹⁵⁾など）
2. 1 素子出力を上げ，素子数を減らす：同時にグレーティングローブ抑制手法の開発が必要¹²⁾¹⁶⁾

今後，費用対効果が徐々に上がり，民生用でフェーズドアレーが普及していく過程で解決されていくであろうフェーズドアレーの低コスト化のためにも，マイクロ波無線電力伝送技術は重要となってくる。

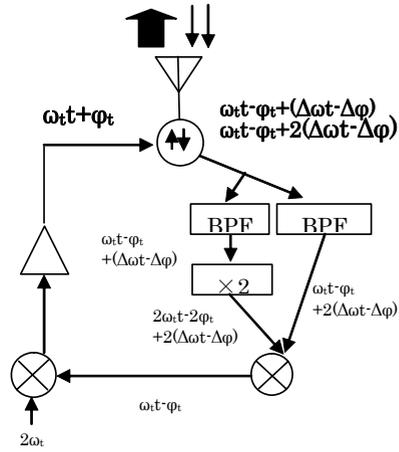
(2) 電波を用いた目標位置推定技術

SPS マイクロ波無線電力伝送技術に必須なのがレトロディレクティブ方式の目標追尾である。SPS は 36000 km の静止衛星軌道から直径数 km の受電サイトに 90 % 以上の高効率でエネルギーを集中させる必要がある。SPS の軌道や姿勢は常に変動していると考えたほうがよく，更に直径数 km の送電アンテナ形状も柔構造となり，アンテナ形状も不安定と想定される。そのためには，正確な目標方向推定と，アンテナ形状把握が必須である。

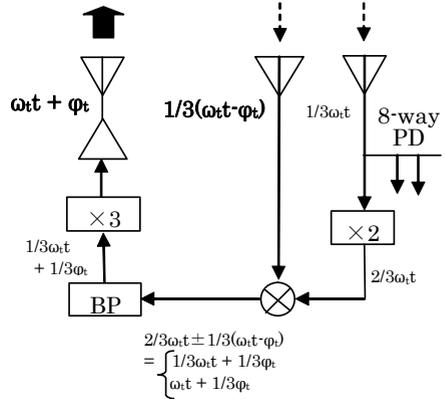
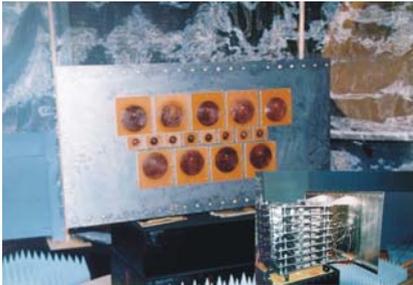
レトロディレクティブとは，フェーズドアレーにおいて，目標から放射されたパイロット信号の位相情報を用いて各アンテナ素子での最適位相を求め，その結果，目標方向に制御されたビームを形成する技術である。各アンテナ素子で位相共役（＋→－反転）をアナログ回路（位相共役回路）で行う手法を通称ハードウェア・レトロと呼び，複数の受信パイロット信号から角度情報を計算して，各アンテナ素子の移相器にその位相情報を与える手法を通称ソフトウェア・レトロと呼ぶ。つまりソフトウェア・レトロでは方向推定とフェーズドアレーを用いたビームフォーミングという２段階に分かれているのである。

ハードウェア・レトロは Van Atta Array¹⁷⁾ を改良し，1960 年代にヘテロダインミキサを用いて位相共役を生成する方式として考案された¹⁸⁾。ヘテロダインミキサを用いたレトロディレクティブ方式は，局部発信器の周波数 ω_{LO} とパイロット信号周波数 ω_{RF} をミキシングすることにより位相共役を作り（ $+\theta_n \rightarrow -\theta_n$ ），同時に周波数変換 $\omega_{LO} - \omega_{RF}$ を行ってマイクロ波ビームを目標へ向ける方式である。 $\omega_{LO} = 2\omega_{RF}$ とすると，パイロット信号とマイクロ波エネルギービームの周波数が一致する。様々な研究機関で通信用途のレトロディレクティブ方式が開発されている^{19)~21)}。

マイクロ波無線電力伝送ではパイロット信号とマイクロ波エネルギービームの周波数を一致させると干渉問題が大きいので，あえて異なった周波数を用いることが多い。図 3・5 は過去に研究されたマイクロ波無線電力伝送用ハードウェア・レトロディレクティブシステムの例である^{22)~24)}。非対称 2 周波を用いたもの，及び 1/3 周波数を用いてかつ局部発信器をもたないものである。



(a) $\omega_t + \Delta\omega$, $\omega_t + 2\Delta\omega$ の非対称の2周波を用いるレトロディレクティブ



(b) 1/3の周波数をパイロット信号として用いたレトロディレクティブ(局部発振器なし)

図3・5 京都大学で開発されたレトロディレクティブ用位相共役回路方式

ソフトウェア・レトロディレクティブは、パイロット信号を用いた方向検知回路とビームフォーミング回路(=移相器)に分けることができる。レトロディレクティブ方式では送電目標1箇所へのみのマイクロ波無線電力伝送しかできないが、ソフトウェア・レトロディレクティブ方式では複数の目標に対するマイクロ波無線電力伝送も可能であるという特徴をもち、ビームフォーミングの際に低サイドローブ化を含めて自由なビーム形成が可能であるという特徴がある。マイクロ波無線電力伝送での長距離の方向推定にはパイロット信号が用いられ、受信アンテナで受信したパイロット信号の位相情報を計測して目標の方向もアンテナ面の角度も同時に計測する。

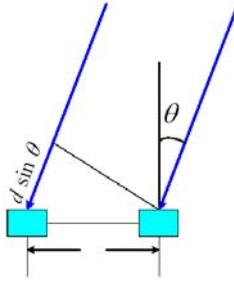


図 3・6 パイロット信号方向推定方法

パイロット信号を用いた方向検知は図 3・6 のような幾何学計算で方向を計算する。二つのアンテナで受信する信号の位相差検出に関する理論式は以下のように与えられている²⁵⁾。

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{\pi D \cos\phi \sqrt{SN}} \quad [\text{rad}] \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\phi$: 検出角度誤差、 λ : 波長、 D : 検出アンテナ間隔、 ϕ : 到来方向、 SN : 雑音である。

$D = 0.5\lambda$ の場合の計算結果が図 3・7 である。目標位置 0 度方向、 $SN = 20\text{ dB}$ という誤差が図中で最も小さい場合でも 4° 程度の誤差が存在する。 1° のずれは、例えば 1 km 先であれば約 17 m に相当し、20 km 先であり、約 350 m に相当する。

このような理論的な検出誤差に加え、ハードとしての検出誤差も加わる。素子間隔を広げ、広義のレトロディレクティブ方式を高精度で行うためには送電アンテナの形状、各アンテナの位置情報を正確に計測する必要があり、そのトレードオフが必要となる。レトロディレクティブ方式を用いた目標位置検出の精度向上のためには SN 比の向上と素子間隔 D を上げた際のアンテナ位置計測精度の向上が必要となる。

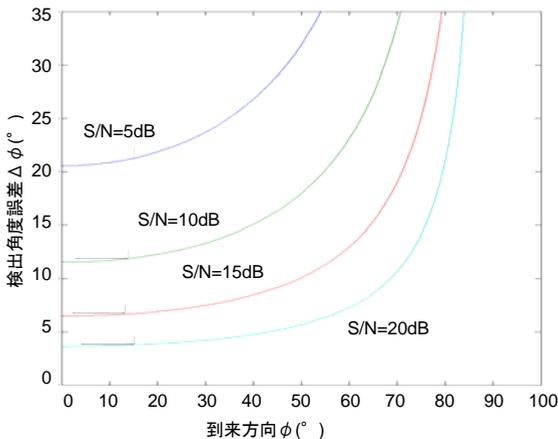


図 3・7 目標位置と SN 比と検出角度誤差の関係 (検出アンテナ間隔 0.5 λ)

この SN 比が悪い場合にも高精度で目標位置推定を行うための様々な数値計算アルゴリズムが存在する。有名なアルゴリズムだけでも

(1) 基本

- ・ビームフォーマ法
- ・Capton 法
- ・最大エントロピー法などの線形予測法 (LP: Linear Prediction)

(2) 高分解能 (アレー入力 of 的相関行列 of 的固有展開に基づく手法)

- ・最小ノルム法 (Min-Norm)
- ・MUSIC (Multiple Signal Classification) 法^{26), 27)}

複数方向からくるパイロット信号 of 的到来方向 of 推定するために開発されたアルゴリズムで、相関行列 of 的固有値・固有ベクトルを用いて方向推定をする。

- ・ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique) 法²⁸⁾

MUSIC 法と同様に複数方向からくるパイロット信号 of 的到来方向 of 推定するために開発されたアルゴリズムであり、二つの同一 of 的サブアレーが必要となる。また、ヌル点走査により方向推定を行う。

(3) 高分解能 (その他)

- ・RBF (Radial Basis Function) ニューラルネットワークを用いる方法²⁹⁾

など存在する。各種法とも長短があるが、MUSIC 法や ESPRIT 法などのアレー入力 of 的相関行列 of 的固有展開に基づく手法が特によく用いられる。MUSIC 法はビーム方向 of 的ものを推定することができるが、ESPRIT 法はヌル点走査により方向推定を行う。また、ESPRIT 法は二つの同一 of 的サブアレーが必要となる。しかし、ESPRIT 法は MUSIC 法で必要とされる方位評価関数の計算やそのピーク検出が不要なため演算量が少ないという利点をもつ^{28), 30)}。各手法の詳細については通信技術 of 的専門書を参照されたい。

MUSIC 法や ESPRIT 法では、アンテナ素子間の電磁結合や給電系 of 的製造誤差により精度が劣化する。素子間電磁結合行列に給電系 of 的製造誤差を対角成分に加えた行列 of 的逆行列 (補償行列) を受信信号ベクトルに乘じ、素子間電磁結合成分を取り除く方法³¹⁾ が知られているが、到来方向推定面内では無視できる開口長 of 的アンテナ素子を用いる場合を除いて素子間電磁結合は到来方向に依存する³²⁾。したがって、実際の平面アレーを利用する 2 次元到来方向推定問題では推定範囲すべてにわたって電磁結合成分を完全に除去することはできない³³⁾。これらの理想アンテナからの誤差やケーブル長誤差などが存在しても正しく方向推定を行う試みも行われている³⁴⁾。

これらのアルゴリズム of 的特長を生かし、無線電力伝送での目標位置推定手法として MUSIC 法 of 的応用研究³⁵⁾ や RBF ニューラルネットワークを用いた方向推定法 of 的応用研究³⁶⁾ が存在する。文献³⁶⁾ では素子故障が起った場合でも小規模アレーであれば高い精度で方向推定が可能であることが示されている。しかし、これらのアルゴリズム of 的適用は基本的に式(1)において SN 比を下げる効果と等しく、劇的に精度を上げるものではない

ソフトウェア・レトロディレクティブ方式では方向検知とビームフォーミングが分離しているため、方向検知 of 的手法としてパイロット信号を用いる必然性もなく、短中距離では光学的手法もよく用いられている。長距離では一般に用いられているのは GPS であるが、GPS は位置検出としては精度も向上してきているが、アンテナ面 of 的角度や歪みを検出するまでに

は至っていない。光学的手法で方向検知を行った例として無燃料飛行機へのマイクロ波無線電力伝送実験 MILAX (Microwave Lifted Airplane eXperiment) がある³⁷⁾。MILAX 実験においては、その送電電力から MILAX 機を約 10 m という低い高度で飛行させなければならなかった。そのため、送電機を地上に固定させると送電機から MILAX 機を見る角度が極めて大きくなり、効率の良い送電が行えない。そこで目標追尾は二つの CCD カメラで光学追尾を行い、目標の大きな移動に対しては自動車上部に取り付けた送電アンテナの移動で追尾を行い、目標の小さな移動に対しては CCD カメラとマイクロコンピュータを使った画像重心追尾方式とフェーズドアレーンテナで追尾を行っていた。

3-3-2 大電力マイクロ波ビーム伝播

(1) ビーム形状とビーム収集効率

ほとんどの SPS では送電マイクロ波の 90 % 以上を受電レクテナで収集する設計となっている。この効率をビーム収集効率と定義している。この効率は、伝搬媒質 (空気など) の損失と共に、放射マイクロ波が受電アンテナ外に広がり回収できない損失である。空気などの損失はマイクロ波帯ではほぼ無視してよい。例えば JAXA 2004 SPS モデルでは、送電アンテナ面の電力密度分布と、36000 km 先の地上の受電レクテナ面の電力密度分布は図 3・8 のようになっている³⁸⁾。

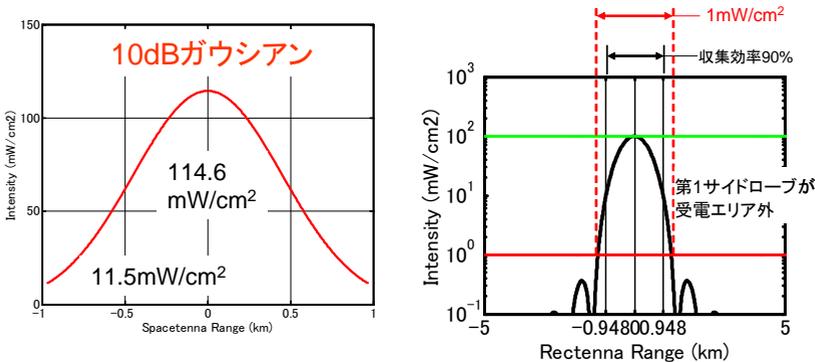


図 3・8 JAXA SPS マイクロ波パラメータ³⁸⁾

図より分かるように、90 % 以上のビーム収集効率をもつパラメータの場合、受電レクテナ面で電力密度分布は均一とはなっておらず、平面波ではなく近傍界距離での球面波となっている。そのため、遠方界を仮定してアンテナ利得を用いて受電電力を計算するフリスの公式を適用すると、受電電力の計算が合わない。マイクロ波無線電力伝送で受電電力は、次式で決定される τ パラメータを開口面アンテナ間のビーム収集効率として計算する³⁹⁾。

$$\tau = \frac{\pi D_t D_r}{4\lambda_0 d} \quad (2)$$

ここで、波長 λ_0 、送電アンテナの直径 D_t 、伝送距離 d 、受電アンテナの直径 D_r である。

受電アンテナ面上の電界分布の形は、送電アンテナ面上の電界分布の形と τ パラメータだけで決まる。受電アンテナ面上の電界分布を面積分することで受電電力が決まり、送電電力

との比をもってビーム収集効率が決まるため、 τ パラメータは図 3・9 にあるようにビーム収集効率と 1 対 1 の関係がある。この計算は、送電アンテナの振幅分布は考慮していない。

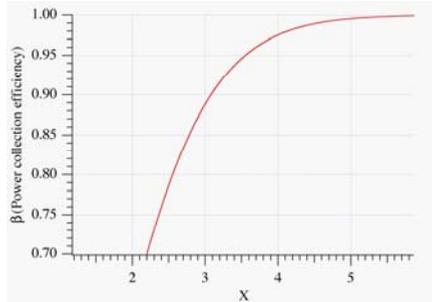


図 3・9 τ パラメータとビーム収集効率の関係

(2) 大気中伝搬

空気などの損失は、マイクロ波帯ではほぼ無視してよいと先に述べたが、降雨などの影響による損失は厳密に計算すると存在する。2.45 GHz のマイクロ波の大気影響（宇宙-地上間）は文献 40) に詳細に検討されている。それによると、1980 年 NASA/DOE リファレンスモデルパラメータ（2.45 GHz，地上 peak 23 mW/cm²，5 GW 地上，直線偏波）を用いての計算では

- 1) 大気ガス（主に酸素）吸収：0.05 dB（60 MW）
- 2) 降雨減衰（50 mm/h のとき，前方散乱）：0.13 dB（150 MW）
- 3) 屈折率揺らぎによる散乱：0.0013 dB（1.5 MW）
- 4) 降雨による後方散乱：0.1~1 mW（50 mm/h~150 mm/h の場合）

となっている。これら損失エネルギーのほかのシステムへの影響を評価するとき、これらの相互作用のない場合の SPS 伝送ビームの影響（例えばスプリアス，送信アンテナパターンなどの効果）を評価する必要がある。この点からすると，上記の損失エネルギーの効果は問題にならないほど小さいと考えられる。また，SPS システム設計の立場からすると上記程度の損失を見込んでおけばよい。問題は 4) の後方散乱波である。熱エネルギーの周囲への分配という点では問題はないが，0.1 mW~1 mW というレベルは降雨散乱による地上通信系への干渉の可能性がある，SPS 電力ビームと交差するような回線をもつ無線通信システムへの影響を評価する必要がある。

同様の計算を JAXA 2004 モデルを用いて行くと，5.8 GHz SPS システムの大気影響は以下のように計算される。

- 1) 大気ガス（主に酸素）吸収：0.07 dB
- 2) 降雨減衰（50 mm/h のとき，前方散乱）：1.3 dB
- 3) 屈折率揺らぎによる散乱：0.0073 dB
- 4) 降雨による後方散乱：1.9~5.2 mW（50 mm/h~150 mm/h の場合）

5.8 GHz システムの場合，2.45 GHz に比べて全体的に減衰量や散乱量が大きく，しかも降雨減衰がエネルギーシステムとして考えると大きいことが分かるが，これは大雨の頻度の問題になる。また，これらは様々な仮定を用いた理論計算値であり，実際の現象は実験との比

較が必須である。5.8 GHz SPS システムは 2.45 GHz SPS システムに比べて送受電アンテナが小さくなるという利点があるが、システム全体の変換効率の低減や本項で示した降雨減衰という弱点があり、今後もトレードオフを検討し続けることが課題である。

(3) プラズマ中伝搬

マイクロ波が電離層プラズマを通過する際に、マイクロ波の屈折、ファラデー回転、シンチレーション、吸収などの現象が起こることは以前から知られていた。しかし、これら以外にマイクロ波が大振幅になるとプラズマとの非線形相互作用が起こり、それまでの通信などで使われている微弱マイクロ波の場合には考えられなかった現象が起こることが予測され始めた。プラズマのオーム加熱に加えて、大振幅マイクロ波と電離層プラズマとの非線形相互作用には、低周波静電波の励起現象やマイクロ波のセルフフォーカス作用、プラズマの加熱、プラズマの穴開き現象などがあげられる。

電離層プラズマ中を強いマイクロ波が伝搬する場合、非線形結合を経てマイクロ波のエネルギーの一部が種々のモードのプラズマ波に変換される。その結果、ラマン散乱、ブリルアン散乱によってそれぞれラングミュア波、イオン音波が発生、成長してゆくことが流体近似理論により予測されていた⁴⁾。この非線形波動相互作用の物理的機構は以下のとおりである。

周波数 ω_0 、波数 k_0 をもつマイクロ波が伝搬するプラズマ中に、密度変動をともなう周波数 ω_2 、 k_2 波数の静電波が雑音レベルで発生したとする。大振幅マイクロ波によってプラズマ電子は時間的に周波数 ω_0 、空間的には波数 k_0 で速度変調を受ける。密度と速度の積で表されるプラズマ電流は、周波数 $\omega_0 \pm \omega_2$ 、波数 $k_0 \pm k_2$ の成分を有することになる。

この電流はマックスウェル方程式からも理解できるとおり、マイクロ波帯に属する高周波 $\omega_0 \pm \omega_2$ の側帯波を作り出す。元のマイクロ波とこの側帯波が周波数 ω_2 、波数 k_2 の非線形ポンドロモーティブ力を作り、プラズマ粒子を動かし、初期の ω_2 、 k_2 をもつ密度変動を増幅する場合に雑音レベルにあった静電波が成長していく。つまり、周波数 ω_0 (GHz オーダ) の大振幅マイクロ波をプラズマ中に伝搬させると、 ω_2 (MHz オーダ) の波動がプラズマ中に発生するということであり、これを低周波静電波の励起現象もしくは三波共鳴と呼ぶ。

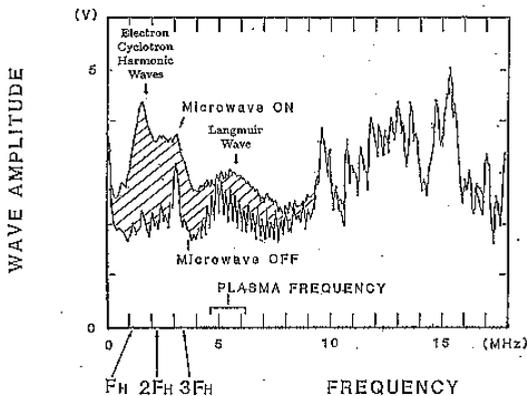


図 3・10 MINIX ロケット実験 (1983 年) で観測された波動スペクトル

励起される波動は、ラングミュア波と電子サイクロトロン高調波の二種類の波であることは理論計算及び計算機実験から分かっている。ラングミュア波は外部磁界に平行に伝搬する静電波、電子サイクロトロン高調波は外部磁界に垂直に伝搬する静電波である。この三波共鳴現象の観測のために 1983 年に行われたマイクロ波送電ロケット実験 MINIX (Microwave Ionosphere Nonlinear Interaction eXperiment) は世界初の宇宙空間でのマイクロ波無線電力伝送実験であり、実際に三波共鳴現象が観測されている (図 3・10)⁴²⁾。

MINIX ロケット実験、及びその後の計算機実験により、三波共鳴現象は理論解析が進んだ^{43),44)}。SPS リファレンスシステムのパラメータで予測した場合、ラングミュア波と電子サイクロトロン高調波は発生するものの、その電界強度はマイクロ波の約 0.01 %以下のオーダーであり、実用上ほとんど問題はないと結論された⁴⁴⁾。

大振幅のマイクロ波がプラズマ中を伝搬していく際に、初期に存在したマイクロ波電力密度のゆらぎが成長したり、マイクロ波ビームの自己収束が起こることが明らかにされている。この不安定性をフィラメンテーション不安定と呼ぶ⁴⁵⁾。ここでいうフィラメンテーション不安定は、粒子の衝突によるプラズマ加熱によって起こる熱効果フィラメンテーション^{46)~48)}ではなく、マイクロ波電力密度の空間勾配の存在により発生するボンデロモーティブ力により発生するものである。

プラズマ加熱による自己集束現象は、発生度合いがプラズマ密度に比例するため、電離層以外の空間では問題は発生しにくいとされている。しかし、マイクロ波ビームの強度の空間勾配によって発生するビームの自己集束現象はプラズマ密度やマイクロ波強度が小さくてもビームの強度の空間勾配によって大きく発生することがあり、問題の発生する可能性があるとして理論的に予測されている。そのため、事前に発生条件を探ることはマイクロ波エネルギー伝送システムの設計のうえで非常に重要となる。

マイクロ波ビームの自己集束現象の発生及びその強度に関係するパラメータは五つ存在する。マイクロ波の周波数、強度、強度の空間勾配、プラズマの密度と温度である。ビームの自己集束現象は、マイクロ波の周波数が低いほど、強度は強いほど、強度の空間勾配はある閾値までは大きいほど (閾値を超えると発生しない)、プラズマの密度は高いほど、プラズマ温度は低いほど起こりやすく、減少も大きく成長することが分かっている。SPS リファレンスシステムのパラメータでは、この現象は発生しないことが分かっている。

SPS リファレンスシステムのマイクロ波ビームによる電離層プラズマの加熱についての理論計算は Perkins and Roble⁴⁹⁾によってなされている。それによると、高度 200 km 以下ではほぼビームに沿って温度が上昇し、高度 100 km 付近では通常の約 200 K から約 900 K に上昇している。また、高度 200 km 以上ではマイクロ波ビームより磁力線に沿って温度上昇が見られる。温度上昇にともなう電子密度変化は比較的小さいという結果である。

プラズマの穴開き現象は、空間的に変化する高周波電場中ではボンデロモーティブ力と呼ばれる力が働くことに起因する。この力によってマイクロ波が電界に密度勾配をもってプラズマ中を伝搬していくとプラズマの密度が下がり、穴開き現象が起こる。これを簡単に説明する。

高周波電場 $E(t) = E_0 \cos \omega t$ 中で振動している荷電流子を考える。次に $E(x,t) = E_0(x) \cos \omega t$ に電場の振幅 E_0 が空間の滑らかな関数であり、左側が弱く、右側が強い場合を考える。粒子は電界による振動で電場の強い領域に入ると左向きに強く押されることになる。電場の向き

が変わると粒子は電場の弱い領域に入るために右向きに押される力はそれほど強くない。その結果、1 周期後、粒子は左に変位する。これが次々の周期で繰り返され、粒子は電場の強い領域から遠ざかる向きに加速され続ける。すると、電界の強い領域からプラズマ粒子が逃げていき、電界の強い領域のプラズマ密度が下がり、プラズマの穴開きと呼ばれる現象が起こる。

京都大学ではプラズマの穴あき現象に関する計算機実験及び理論的考察を行い、その物理メカニズムや発生レベルについての解析を行っている⁵⁰⁾。ボンデロモーティブ力によるプラズマの穴あき現象に関する密度変動についての理論定式化を行い、更にいくつかのパラメータ依存性を明らかになっている。また、これらの性質を計算機実験により確認し、計算機実験との比較により、等温プラズマではイオン音波のランダウ減衰によって理論値とは異なる密度変動となることを明らかになった。

これらの結果をもとに、SPS 及び SPS 実証実験において予想されるボンデロモーティブ力によるプラズマの穴あき現象の発生レベルについて試算は以下ようになる。

簡単のため、プラズマは等温プラズマ $T_e = T_i = 1500 \text{ K}$ とし、数密度を $n_e = n_i = 10^{12} / \text{m}^3$ とする。また、SPS から放射されるマイクロ波の電力密度分布がガウス分布であると仮定する。このとき、ビーム半径を $r_0 = 1 \text{ km}$ とし、周波数を $f = 5.8 \text{ GHz}$ または $f = 2.45 \text{ GHz}$ とし、ビーム中心の電力密度を $S_0 = 200; 400; 1000 \text{ W/m}^2$ とした場合の密度変動量を、理論試算すると最大でも 0.027% 程度となり、非常に小さくなる。このとき定常状態に至るまでの時間はビーム半径を一定としているので、どの場合においても $4t_0 = 4r_0/C_s = 4 \times 1.0 \text{ km} / 5.0 \text{ km/s} = 0.8 \text{ sec}$ となる。また、逆に 10% 程度の密度変動を生じさせるには $f = 2.45 \text{ GHz}$ では $S_0 = 4 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 程度必要で、 $f = 5.8 \text{ GHz}$ では $S_0 = 2.2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 必要であり、非常に大電力のマイクロ波が必要となる。このように、現在想定されている程度の SPS パラメータでは非常に小さい密度変動しか生じないことが分かり、SPS においてはプラズマの穴あき現象は問題にならないと考えられる。

3-3-3 地上受電システム

マイクロ波無線電力伝送の受電システムにはレクテナ (Rectenna : Rectifying Antenna) が用いられる。レクテナはマイクロ波を受電するためのアンテナと、受電したマイクロ波を整流して直流に変換する整流回路から構成される。アンテナはダイポールやマイクロストリップアンテナなど、様々なものが用いられてきた。

整流回路はダイオードを用いて整流しているため通信用検波器と似ているが、マイクロ波無線電力伝送で要求される 80~90% の変換効率を実現するためにシングルシャント整流回路を用いることが多いことが、半波整流回路で二乗検波や線形検波という通常効率を度外視する検波回路とは大きく異なる。

シングルシャント整流回路は図 3-11 のようにダイオード一つを用い、 $\lambda/4$ 線路とキャパシタ C を出力回路とする全波整流回路である。この出力回路によりダイオードから出力フィルタ側を見たインピーダンスが $3f, 5f, \dots$ の奇高調波に対しては開放、 $2f, 4f, \dots$ の偶高調波に対しては短絡に見えることになり、その高調波合成によりダイオードに半波倍電流が流れ、全波整流動作する⁵¹⁾。

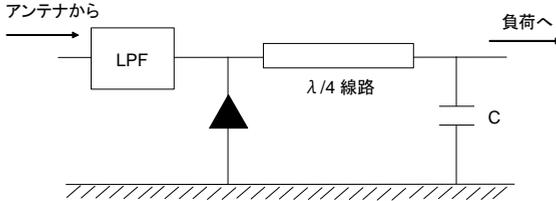


図 3・11 シングルシャント整流回路

アンテナと整流回路が一体となったものをレクテナ (Rectenna : Rectifying Antenna) と呼ぶ。2.45 GHz 用レクテナでは 90 %⁵²⁾、5.8 GHz 用レクテナでは 80 %⁵³⁾ の変換効率を実現している。RF-DC の変換はマイクロ波無線電力伝送以外でも、高周波利用の無線送電である共鳴や電磁誘導でも必要となるため、レクテナ技術は無線電力伝送のキーとなる。

レクテナの効率はピークでは 80～90 % と高いが、ダイオードの $V-I$ 特性に依存した入力マイクロ波強度依存性と接続付加依存性をもつ (図 3・12)。入力マイクロ波が弱い、もしくは接続負荷が小さい場合はダイオード端に十分な電圧がかからないため、ダイオード端にかかる最大 RF 電圧に対する立ち上がり電圧 V_f の占める割合が大きいため、効率が低くなる。逆にマイクロ波入力が強すぎる、もしくは接続負荷が大きすぎる場合はブレイクダウン電圧 V_{br} を超えてしまうため、効率が最大よりも下がる。レクテナではダイオードのブレイクダウン電圧ぎりぎりで作動させることで検波回路よりも高効率化しているとも言える。「高調波効果」はダイオードで整流する際に発生する高次高調波がアンテナから再放射されることによる損失であり、図 3・12 の低域通過フィルタ LPF はその防止用である。その他、レクテナの効率はダイオードの直流抵抗や浮遊容量などによっても低下するため⁵⁴⁾、ダイオードパラメータが高効率レクテナ設計には重要である。

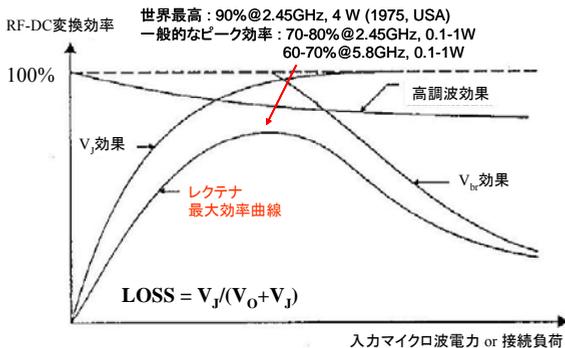


図 3・12 レクテナの RF-DC 変換効率入力マイクロ波強度依存性もしくは接続負荷依存性

レクテナ 1 素子当たりの最適 (= 最高効率を示す) 出力電力は通常数 W 以下と小さいために、通常レクテナはアレー化して用いる。しかし、レクテナをアレー化すると、その出力電力はレクテナ素子の個別の出力の合計よりも小さくなることが知られている。また、直列接

続時に並列接続時よりも大きな出力電力低下が起きるという現象もいくつかの文献で報告されている^{51), 55), 56)}。接続方法による出力電力の低下は避けるべき問題であり、特に大規模な送電システムにおいては大きな問題となり得る。出力電力低下を防ぐ方法としては、アレー内の出力電圧や電流のバランスをとるように接続する方法、電力密度分布に応じてアレーを構成するブロック内のレクテナ素子数を調整しブロックごとの出力電圧を一定にする方法などがあげられている^{55), 56)}。

■参考文献

- 1) (株)三菱総合研究所, “2005 年度宇宙航空研究開発機構委託業務成果報告書「宇宙エネルギー利用システム総合研究」,” Mar. 2006.
- 2) E. Brookner, “Phased Arrays and Radars – Past, Present and Future,” Microwave Journal, Cover Feature, Jan. 2006.
- 3) 鄭 聡, 吉田 剛, 石川 亮, 本城和彦, “1.9 GHz 帯 GaNHEMT F 級増幅器の試作,” 電子情報通信学会総合大会予稿集 C-2-27, 2007.
- 4) 黒田健太, 石川 亮, 本城和彦, “GaN HEMT を用いた 5.8 GHz 帯 F 級高効率増幅器,” 電子情報通信学会総合大会予稿集 C-2-38, 2008.
- 5) K. Yamanaka, et al., “C-band GaN HEMT Power Amplifier with 220W Output Power,” Int. Microwave Symp. Dig. 3TH1A-02, Jun. 2007.
- 6) T. Mitani, N. Shinohara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto, “Improvement of Spurious Noises Generated from Magnetrons Driven by DC Power Supply after Turning off Filament Current,” IEICE Trans. Electron, vol.E86-C, no.8, pp.1556-1563, 2003.
- 7) 三谷友彦, 篠原真毅, 松本 紘, 相賀正幸, 桑原なぎさ, 半田貴典, “電子レンジ用マグネトロンから発生するノイズの時間解析,” 信学論誌 C, vol.J87-C, no.12, pp.1146-1154, 2004.
- 8) W. C. Brown, “The SPS transmitter designed around the magnetron directional amplifier,” Space Power, vol.7, no.1, pp.37-49, 1988.
- 9) 篠原真毅, 三谷友彦, 松本 紘, “位相制御型マグネトロンの開発研究,” 信学論誌 C, vol.J84-C, no.3, pp.199-206, 2001.
- 10) N. Shinohara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto, “Phase-Controlled Magnetron Development for SPORTS: Space Power Radio Transmission System,” The Radio Science Bulletin, no.310, pp.29-35, 2004.
- 11) N. Shinohara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto, “Solar Power Station/Satellite (SPS) with Phase Controlled Magnetrons,” IEICE Trans. Electron, vol.E86-C, no.8, pp.1550-1555, 2003.
- 12) N. Shinohara, B. Shishkov, H. Matsumoto, K. Hashimoto, and A. K. M. Baki, “New Stochastic Algorithm for Optimization of Both Side Lobes and Grating Lobes in Large Antenna Arrays for MPT,” IEICE Trans. Communications, vol.E91-B, no.1, pp.286-296, 2008.
- 13) J. M. J. Yang, Y. Chung, M. Nishimoto, M. Battung, A. Long, P. Chang-Chien, K. Tornquist, M. Siddiqui, and R. Lai, “Wafer-Level Integrated Antenna Front End Module for Low Cost Phased Array Implementation,” Prof. of IMS2007, pp.1879-1881, 2007.
- 14) 川崎繁男, “Ku 帯アクティブ集積フェーズドアレーアンテナ用移相器と MMIC の試作,” 第 2 回 APAA シンポジウム, Mar. 2008.
- 15) 真野清司, 片木孝至, “フェーズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法 – 素子電界ベクトル回転法 –, ” 信学論誌 B, vol.J65-B, no.5, pp.555-560, 1982.
- 16) 高野 忠, 風間保裕, 菅原 章, D. Radenamad, “間引き位相給電アレーアンテナおよびその太陽発電衛星への応用性,” 信学技報 SPS2007-06, pp.15-21, 2007.
- 17) L. C. Van Atta, “Electromagnetic reflector,” U.S. Patent 2 908 002, Oct. 1959.
- 18) C. Y. Pon, “Retrodirective array using the heterodyne technique,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.AP-12, pp.176-180, Mar. 1964.
- 19) R. Y. Miyamoto, Y. Qian, and T. Itoh, “An active integrated retrodirective transponder for remote information retrieval-on-demand,” IEEE Trans. MTT, vol.49, no.9, pp.1658-1662, 2001.

- 20) K. M. K. H. Leong, Y. Wang, and T. Itoh, "A Full Duplex Capable Retrodirective Array System for High-Speed Beam Tracking and Pointing Applications," *IEEE Trans. MTT*, vol.52, no.5, pp.1479-1489, 2004.
- 21) T. Brabetz, V. F. Fusco, and S. Karode, "Balanced Subharmonic Mixers for Retrodirective- Array Applications," *IEEE Trans. MTT*, vol.49, no.3, pp.465-469, 2001.
- 22) 松本 紘, 賀谷信幸, 長友信人, 中司浩生, 橋爪 隆, "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," 宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, 1987.
- 23) 篠原真毅, 國見真志, 三浦健史, 松本 紘, 藤原暉雄, "目標自動追尾マイクロ波送電器のデモンストラレーション公開実験," 電子情報通信学会論文誌 B-II, vol.J81-B-II, no.6, pp.657-661, 1998.
- 24) 松本 紘, 篠原真毅, 橋本弘藏, "京都大学における SPS 研究への取り組み," 信学技報 SPS 2002-07 (2002-11), pp.9-14, 2002.
- 25) S. E. Lipsky, "Microwave passive direction finding," Wiley-Interscience, 1987.
- 26) R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameters Estimation," *IEEE Trans. AP*, vol.AP-34, no.3, pp.276-280, 1986.
- 27) 菊間信良, "アレーアンテナによる適応信号処理," 科学技術出版, 1998.
- 28) R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT - Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques," *IEEE Trans. ASSP*, vol.ASSP-37, no.7, pp.984-995, 1989.
- 29) T. Lo, H. Leung, and J. Litra, "Radial Basis Function Neural Network for Direction of Arrivals Estimation," *IEEE Signal Processing Lett.*, vol.1, no.2, pp.45-47, 1997.
- 30) H. Krim and M. Viberg, "Two Decades of Array Signal Processing Research - The Parametric Approach -," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol.13, no.4, pp.67-94, 1996.
- 31) B. Friedlander and A. J. Weise, "Direction Finding in the Presence of Mutual Coupling," *IEEE Trans. AP*, vol.AP-39, no.3, pp.273-283, 1991.
- 32) R. S. Adve, and T. K. Sarkar, "Compensation of the Effect of Mutual Coupling on Direct Data Domain Adaptive Algorithm," *IEEE Trans. AP*, vol.AP-48, no.1, pp.86-94, 2000.
- 33) 岡村 敦, 藤阪貴彦, 桐本哲郎, 真野清司, "ESPRIT アルゴリズムにおけるサブアレー特性の補償法," 信学論誌 B, vol.J83-B, no.4, pp.501-509, 2000.
- 34) 松本真俊, 橋本弘藏, 松本 紘, "宇宙太陽発電所のための自動校正機能を有する到来方向検出法に関する研究," 信学総大 B-1-125, 2003.
- 35) 堤 恒次, "マイクロ波送電におけるパイロット信号到来方向推定法の研究," 京都大学工学部電気電子工学科卒業論文, 2000.
- 36) 桑原義彦, "SPS フェーズドアレーアンテナのための RBF ニューラルネットワークによる到来方向推定," 信学技報 SPS 2003-11 (2004-03), pp.5-10, 2004.
- 37) 京都大学, 神戸大学, CRL, 日産自動車(株), 富士重工(株), "MILAX 飛行機実験報告書," 1992.
- 38) (株)三菱総合研究所, "2007 年度宇宙航空研究開発機構委託業務「宇宙エネルギー利用システム総合研究」," Mar. 2008.
- 39) W. C. Brown, "Beamed microwave power transmission and its application to space," *IEEE Trans. MTT*, vol.40, no.6, pp.1239-1250, 1992.
- 40) 古濱洋治, 伊藤繁夫, "大電力マイクロ波伝送における非電離大気環境評価," 電波研究季報, vol.28, no.148, pp.715-721, 1982.
- 41) H. Matsumoto, "Numerical estimation of SPS microwave impact on ionosphere environment," *Acta Astronautica*, vol.9, pp.493-497, 1982.
- 42) H. Matsumoto and I. Kimura, "Nonlinear Excitation of Electron Cyclotron Waves by a Monochromatic Strong Microwave : Computer Simulation Analysis of the MINIX Results," *Space Power*, vol.6, pp.187-191, 1986.
- 43) 松本 紘, 平田尚志, 橋野嘉孝, 篠原真毅, "電離層における大振幅電磁波と静電プラズマ波の相互作用の理論解析," 電子情報通信学会論文誌 B-II, vol.78-B-II, no.3, pp.130-138, 1995.
- 44) 松本 紘, 橋野嘉孝, 矢代裕之, 篠原真毅, 大村善治, "大振幅マイクロ波と宇宙プラズマとの非線形相互作用の計算機実験," 信学論誌 B-II, vol.J78-B-II, no.3, pp.119-129, 1995.
- 45) 篠原真毅, D. R. Shklyar, 松本 紘, "電離層における大振幅マイクロ波エネルギービームの自己集束作用に関する数値解析," 電子情報通信学会論文誌 B-II, vol.J78-B-II, no.12, pp.756-766, 1995.
- 46) F. W. Perkins and M. V. Goldman, "Self-focusing of radio waves in an underdense ionosphere," *JGR*, vol.86,

- p.60, 1981.
- 47) A. J. Schmitt, "The effects of optical smoothing techniques on filamentation in laser plasmas," Phys. Fluids, vol.31, p.3079, 1988.
 - 48) A. J. Schmitt, "Three-dimensional filamentation of light in laser plasmas," Phys. Fluids B, vol.3, p.186, 1991.
 - 49) F. W. Perkins and R. G. Roble, "Ionospheric heating by radio waves; predictions for Arecibo and satellite power station," JGR, no.83, pp.1611-1624, 1978.
 - 50) 中本成洋, "大振幅電磁波ビームの強度空間勾配による宇宙プラズマ擾乱に関する研究," 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文, Feb. 2007.
 - 51) R. J. Gutmann and J. M. Borrego, "Power Combining in an Array of Microwave Power Rectifier," IEEE Trans. MTT., vol.27, pp.958-968, 1979.
 - 52) W. C. Brown, "The History of the Development of the Rectenna," Proc. of SPS microwave systems workshop, pp.271-280, 1980.
 - 53) J. O. McSpadden, L. Fun, and K. Chang, "A High Conversion Efficiency 5.8 GHz Rectenna," IEEE MTT-S Digest, pp.547-550, 1997.
 - 54) T. W. Yoo and K. Chang, "Theoretical and Experimental Development of 10 and 35 GHz Rectennas," IEEE Trans. MTT, vol.40, no.6, pp.1259-1266, 1992.
 - 55) 篠原真毅, 松本 紘, "レクテナアレイ直流出力のアレイ要素相互接続法依存性の研究," 電気学会部門誌(電力・エネルギーB 分冊), vol.117-B, no.9, pp.1254-1261, 1997.
 - 56) 三浦健史, "マイクロ波電力伝送用レクテナ素子の接続法に関する実験的研究," 信学論誌 B, vol.J82-B, no.7, pp.1374-1383, 1999.

■S4 群-5 編-3 章

3-4 マイクロ波無線電力伝送の地上応用

(執筆著: 篠原真毅) [2009年8月 受領]

3-4-1 ユビキタス電源

1960年代のBrownの実験を元に提唱されたSPSは、マイクロ波無線電力伝送の最大にして最良の応用となり、以降無線電力伝送研究が開花する。特に1980年代以降の日本では、宇宙技術とフェーズドアレー技術を中心に、京都大学を中心としてそれまでにない実証実験が行われた。しかし、1960年代以降、SPSとともに発展してきた無線電力伝送技術であるが、逆にSPS以外への応用/実用例が非常に少ない。無線電力伝送は様々な得失があり、実用化に際して有線送電、バッテリー、太陽電池などとの競争で効率やコストなどで決定的な優位性が見出せなかったためである。しかし、21世紀に入り、RF-IDという情報と電力を同時に伝送する商用システムが実用化し始め、微弱なエネルギー密度でも情報と同時伝送で有用性がある無線電力伝送システムが注目され始めた。エネルギーの集中を特に必要としないRF-IDでは、周波数もそれまでよりも低い900MHz帯を用いている。

デジタルデバイスの発展により、非常に弱い電力(μW~mW)で動作する電気機器が発展してきたため、電力密度を高めることなく、弱い電力密度のまま無線電力伝送が有効となってきた。「Teslaの夢」が再び現実味を帯びてきたのである。「Teslaの夢」を現代的な言い方にすれば「ユビキタス電源」であろう。

「ユビキタス(Ubiquitous)」とはラテン語で「神はあまねく存在する」という意味であるが、現在は「いつでも、どこでも、誰でも」という意味によく使われ、特に「いつでも、どこでも、誰でも」情報を得られる社会である「ユビキタス情報社会」とうように用いられる。「ユビキタス電源」は「いつでも、どこでも、誰でも」電力を得られるシステムとして提唱されている。このような無線電力伝送の歴史をまとめると図3-13のようになる。

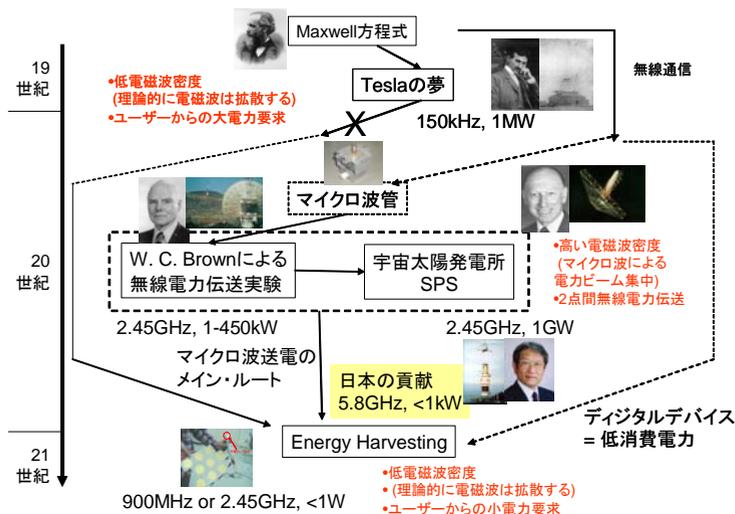


図 3-13 無線電力伝送の歴史

京都大学で研究されている「ユビキタス電源」の例が図 3・14 である^{1),2)}。京都大学では IC や LED よりも消費電力が大きい携帯電話や PC などの無線充電のシステムをユビキタス電源と名付け、携帯性の良い弱電用レクテナの開発と併せ、システム研究を行っている。ユビキタス電源に用いるマイクロ波送電器は高効率で低コストであればよく、本実験ではマグネトロンを用いている。

課題はレクテナである。ユビキタス電源の場合、ユビキタス電源の場合、 1 mW/cm^2 以下の電力密度下で整流しなければならないため、レクテナ整流回路にとっては最適よりも弱いマイクロ波電力を整流しなければならないことになる。これはレクテナのダイオードの立ち上がり電圧の特性に起因する効率の低下であり、通常の検波回路はユビキタス電源と同等以下の電波を検波＝整流しているため、効率が非常に低い。それで低電力でも高効率のレクテナを開発することが課題となる。ダイオードから開発できればそれでもよいが、検波用ダイオードを用いた例流回路の場合、回路の工夫で効率を向上させるしかない。

検波回路で用いる線形検波や 2 乗検波で効率を上げたい場合には通常、ダイオードにバイアス電圧をかけ、極力線形検波かそれ以上になるようにすることが多い。しかし、無線電力伝送の場合、完全パッシブ回路が理想であるため、外部の電圧をダイオードにかけることは極力避けたい。そこで、完全パッシブでありながらダイオードにバイアス電圧がかかるように工夫した整流回路がいくつか考案されている。コンデンサを用いてダイオードにバイアス電圧がかかるように工夫し、かつ出力電圧を高くするコッククロフト・ウォルトン回路³⁾、ショートスタブ共振整流回路を用いて高効率動作を可能にした整流回路⁴⁾、反射で定在波を立て、ダイオードにより高い電圧を加えることで低入力高効率化を図った整流回路⁵⁾、同様に出力フィルタの調整によりダイオードにバイアスがかかるようにして 1 mW 、 5.8 GHz で 50% 以上の変換効率を実現した整流回路⁶⁾ などがある。

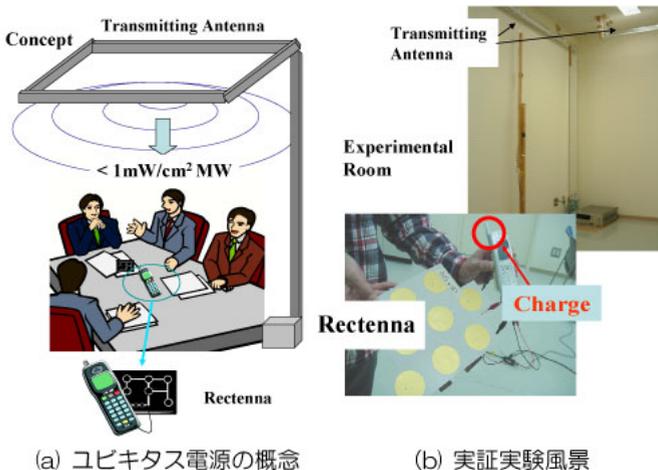


図 3・14 ユビキタス電源の概念図と携帯電話実験風景^{1),2)}

ユビキタスに電力を得る手法としては、マイクロ波無線電力伝送以外にもマクスウェルの方程式で記述できる電磁波を用いたワイヤレスの電力給電のほか、環境に普遍的に存在するエネルギー源（希薄分散エネルギー）を利用した発電も考えられる。

◆電磁波利用（マクスウェル方程式系）

- ・電磁誘導コイル（周波数 MHz 程度以下、波長 100 m 以上：磁場結合）⁷⁾
- ・電磁波（周波数 GHz 程度、波長 cm 程度）
- ・電場共鳴・磁場共鳴（距離：波長の 1/10～1/2 程度）⁸⁾
- ・電磁波（エバネッセント波：非伝播波）⁹⁾
- ・レーザ無線電力伝送（周波数 PHz、波長 μm 以下）¹⁰⁾

など

◆希薄分散エネルギーを用いた発電

- ・太陽電池（晴天時エネルギー密度 1 kW/m^2 、効率 20 %前後）
- ・温度差発電（ゼーベック効果）
- ・圧電素子（ピエゾ効果）
- ・振動発電（Power MEMS など）
- ・バイオ発電

など

これらを総称し、「電力収穫（Energy Harvesting または Energy Scaventing）」と呼んでおり、現在世界中で活発に研究が行われており^{11)~15)}、専門の研究会も国内に設置され活発に活動している^{16)~17)}。

3-4-2 (準)閉鎖空間でのマイクロ波電力伝送

電磁波は空間を飛ばさなくても、導体で囲われた空洞＝導波管や、導体と誘電体で構成された導波路＝同軸ケーブルやマイクロストリップ線路の中を伝播させることができる。導波管や線路中を伝播する電磁波は線路固有の損失は存在するが拡散がないため、空間放射よりも高密度／高効率に電磁波を伝播させることができる。また、空間を飛ばす電磁波は電波法の規制を受けるが、線路中を伝播させる電磁波は法的規制を受けないため、システムの実用化を考えやすいという特徴もある。閉鎖空間でのマイクロ波電力伝送においては、「人体に対する安全基準である 1 mW/cm^2 以下」の基準は技術的な縛りではなく、電力密度を送電/受電機器の許容限界まであげることができる。ある程度遮蔽した近接空間での無線電力伝送も閉鎖空間に準じたような考え方ができる。

これまで、既存の導波管に似た構造を利用した無線電力伝送として、建物建材を利用した建物内無線配電システム^{18),19)}、ガス管などのチューブを移動する検査ロボットへの無線電力伝送^{20),21)}、電気自動車への近接無線電力充電^{22),23)}などが提案され、実証実験が行われてきた。

建物建材を利用した建物内無線配電システムは既存建物構造を利用してマイクロ波電力を伝送することで、電気配線工事の省略による初期投資の削減メリットと電気配線改修工事費の削減メリットが得られる新しい電気配線設備として鹿島建設と京都大学で提唱され、JST より 2006～2008 年度に資金を得て研究を行ったものである。

本研究ではマイクロ波として ISM バンドと法的に規定されており、安価高効率大電力マイ

クロ波発振管であるマグネトロンが利用しやすく、これまでの研究実績も豊富な 2.45 GHz のマイクロ波を無変調で電力伝送に用いるシステムを選択した。建物内の構造体＝デッキプレートは本提案システムを導入しない通常の建物内に縦横無尽に存在しているが、構造用建材としてのみ使われているため、このデッキプレートを閉空間送電網として利用することで建築スペースの有効利用を図ると同時に電気配線工事を最小限としてトータルライフサイクルコストの低減を図るのが本システムである。また、このデッキプレート閉空間送電網を使ってマイクロ波配電を行うと、電力量を配線が制限せず、マイクロ波の発振器の容量の変化のみで電力量増加が可能となり、電気配線改修工事費の削減メリットが得られるのである。デッキプレート閉空間送電網内を伝搬するマイクロ波を、レクテナでピックアップと整流して電気に変換し、安定化のための蓄電池を通して直流コンセントとして利用するような設計である。

本提案システムの場合、マイクロ波のピックアップには同軸プローブを用いているために厳密な意味でアンテナは利用していないが、マイクロ波を受電し、整流する素子ということでレクテナの単語を用いている。レクテナ+蓄電池を「コンセントアダプタ」と名付け、コンセントアダプタを必要に応じて必要な場所に付け替えるだけで新しいコンセントとして利用できる、という自由度を持たせたシステムとしている。

レクテナ＝コンセントアダプタからは、まず直流が得られる。DC/AC コンバートを行うことも容易ではあるが、コンピュータを始め、ほとんどの電気機器は現在直流で動作しており、皆 AC/DC コンバータを備えている。そのため、本提案はある程度オフィスユースを想定し、直流駆動機器を前提としたシステムとすることで多段の DC/AC/DC 変換を廃し、より高効率なシステムを目指す。コンセントアダプタを用いず、直接マイクロ波のまま空間に放射すれば、建物内マイクロ波配電システムは無線電力空間＝ユビキタス電源とつながる。マイクロ波のまま電気自動車の無線充電システムと組み合わせることも容易である。

現在はユビキタス電源や電気自動車無線充電システムは研究途上であるが、今後建物内マイクロ波配電システムとユビキタス電源・電気自動車無線充電システムなどが融合すればより利便性が高く、よりトータルライフサイクルコストの低い新しい建物が考えられる。

電気自動車へのマイクロ波無線電力伝送も検討されている。電気自動車はガソリンを消費しないため、将来有望な移動手段として注目されている。最近では電気とガソリンを交互に用いるハイブリット型の自動車が市販され、電気自動車への移行へと速やかに進んでいるように見える。しかし、電気自動車はバッテリーの容量限界によりガソリン車よりも連続航行距離が短いという欠点がある。

バッテリー充電の際に高圧を用いるために安全性の確保にも留意しなければならない。そこで、マイクロ波による無線電力伝送技術が着目されている。マイクロ波充電システムは無線でのエネルギー供給であるため、静止時の充電に限らず、走行中での充電も可能である点に特徴がある。どこかにマイクロ波送電器を設置し、車体のどこかにレクテナを設置する必要がある。マイクロ波ビームの広がりのため、マイクロ波受電にはある程度の面積が必要であること、電磁波の安全性を高めるためにも、なるべく人体へマイクロ波が照射されないシステムである方が受け入れられやすい。

そこで、マイクロ波送電器は路面に、車体のマイクロ波受電器は車体下面に設置することとして検討が多い。地面-車体下面間距離は 10 cm 程度しかないため、外部にはほとんどマイ

クロ波の漏れ込みがないため、準閉鎖空間的な無線電力伝送と考えている。更に、外部への漏れ込みを減らすためにシールド版を設置するなどの工夫もなされている。

(準)閉鎖空間でのマイクロ波電力伝送では電波伝搬の際の広がりや損失をほとんど考えなくてよい。その代わりに、例えば電気自動車無線充電の場合は波長オーダーの近接距離でのアンテナの設計を行わなければならない。送受電アンテナ間で相互結合が起こり、空間放射の通常のアンテナの設計とは異なる。また、閉鎖空間で大電力を伝送するため、高効率レクテナの大電力化が課題となる。特に数十～数百 W を高効率で整流する整流用ダイオードの開発が必要である。GaN を用いたショットキーバリアダイオードが最も有望とされ、建物建材を利用した建物内無線配電システム用として開発された GaN レクテナで 2009 年 6 月現在、75 % 程度@ 5 W を実現している。耐電力の更なる向上も望まれるため、更に今後の研究が期待される^{24), 25)}。

3-4-3 移動体／固定目標への無線電力伝送

ユビキタス電源の実用化が仮に進めば、次段階は当然あるターゲットに対して無線電力伝送をしたいとなるのは当然である。無線によって特定目標にエネルギーを伝送するためには、送電目標に電磁波エネルギーを集中させなければならない。集中させるためには電磁波の波長を非常に短く（＝周波数を非常に高く）する必要がある。波長の短いマイクロ波が無線電力伝送に用いられているのは必然である。1960 年代の研究はほとんどが移動体／固定目標への無線電力伝送であったが、3-3-2 項で述べた理論によって決まる移動体／固定目標への無線電力伝送は予想以上に大きくなるため、これまで実証実験は多くとも実用化例はない。

例えば、1975 年にアメリカ Goldstone で行われた実験は、送電システムは 450 kW CW クライストロンと直径 26 m のカセグレンパラボラアンテナを組み合わせたもので、マイクロ波周波数は 2.388 GHz であった。送受電距離は 1.54 km で $3.4 \text{ m} \times 7.2 \text{ m} = 24.5 \text{ m}^2$ の受電レクテナから 30 kW の直流電力を RF-DC 変換効率 82.5 % で得たとされる。450 kW マイクロ波放射に対し $30/0.825 \approx 36.4 \text{ kW}$ がレクテナに入射した計算になるので、ビーム収集率はたかだか 8 % 程度であった。固定目標への無線電力伝送は有線送電との競合になるため、効率やシステムサイズの比較が避けられず、今後付加価値をつける研究を推進する必要がある。

移動体への無線電力伝送は SPS が最大の例であるが、有線との競合は起こらず、無線である利点を最大限に生かせるシステムとなる。移動体への無線電力伝送ではフェーズドアレーが必要であり、技術課題でもある。飛行機へのマイクロ波無線電力伝送実証実験はカナダと日本でそれぞれ 1 例ずつ実施された。両実証実験はともに 1980 年代から提唱されていた成層圏無線中継機システムを目指した実験であった。特に 1992 年に行われた日本の実験は MILAX (Microwave Lifted Airplane eXperiment) と呼ばれ、フェーズドアレーを用いた世界初の無線電力伝送実証実験であった (図 3-15)。

情報がほぼ無線化された現在、電源も無線化したいという欲求は必然であり、マイクロ波無線電力伝送が様々なアプリケーションで注目されている。20 世紀は SPS がマイクロ波無線電力伝送を牽引し、21 世紀に入って SPS の実現の機運が高まっている。それと並行し、21 世紀は地上での様々なアプリケーションがマイクロ波無線電力伝送を牽引しているほかの無線給電や Energy Harvesting 技術とあわせ、電源のワイヤレス化が実現する日はそう遠くないかもしれない。



図 3・15 MILAX 飛行機実験 (京大, 神戸大, CRL (当時) ほか)

■参考文献

- 1) 篠原真毅, 松本 紘, 三谷友彦, 芝田裕紀, 安達龍彦, 岡田 寛, 富田和宏, 篠田健司, “無線電力空間の基礎研究,” 信学技報, SPS 2003-18 (2004-03), pp.47-53, 2004.
- 2) 篠原真毅, 松本 紘, 三谷友彦, “携帯 IT 機器用無線電力供給システム,” 特許 377577 号, 2006.3.10.
- 3) 森 一富, 片山晃子, 堤 恒次, 西川浩司, 栗田 明, 亀丸敏久, 末松憲治, “UHF 帯 RFID の課題と対策(7) —バッテリー駆動電子タグ用 RF 回路—,” 電子情報通信学会総合大会, CBS-1-5, 2006.
- 4) 北吉 均, 澤谷邦男, “パッシブ無線タグのためのレクテナに関する一検討,” 電子情報通信学会総合大会, CBS-1-5, 2006.
- 5) 植田雄祐, 藤森和博, 野木茂次, 佐藤 稔, “小電力受電レクテナ用整流回路の高効率化,” 電子情報通信学会総合大会, SBC-1-9, 2004.
- 6) 篠原真毅, 松本 紘, 山本敦士, 桶川弘勝, 水野友宏, 植松弘行, 池松 寛, 三神 泉, “mW 級高効率レクテナの開発,” 信学技報, SPS2004-08 (2005-01), pp.15-20, 2005.
- 7) 深澤秀木, “非接触 IC カードの電力伝送 —FeliCa の事例—,” 電子情報通信学会総合大会, BS-12-2, 2008.
- 8) A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and Marin Soljačić, “Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer,” *Annals of Physics*, vol.323, no.1, pp.34-48, 2008.
- 9) H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira, H. Itai, “Surface Sensor Network Using Inductive Signal Transmission Layer,” *Proc. of 4th Int. Conference on Networked Sensing System (INSS 07)*, pp.201-206, 2007.
- 10) 木皿且人, 新野正之, “宇宙太陽光発電とレーザーエネルギーネットワーク,” 信学技報, SPS 2008-08, pp.1-4, 2008.
- 11) (独) 科学技術振興機構研究開発戦略センター, “「希薄分散エネルギー活用技術」に関する科学技術未来戦略ワークショップ報告書,” CRDS-FY2007-WR-13, Mar. 2008.
- 12) (財) 機械振興協会経済研究所, “ユビキタスネット向エネルギー変換デバイスにおけるわが国技術の有望性,” 機械工業経済研究報告書, H19-2-1A, Jan. 2008.
- 13) (社) 電子情報技術産業協会電子材料・デバイス技術専門委員会, “マイクロエネルギー技術調査研究報告書 II,” JEITA08-基-5, Mar. 2008.
- 14) “家庭等におけるブロードバンド時代の情報通信システムおよび機器のエネルギー技術動向,” 電気学会技術報告, 第 1155 号, Jun. 2009.
- 15) “特集: ワイヤレス・エネルギー伝送技術,” 電気学会誌, vol.129, pp.410-429, Jul. 2009.
- 16) 電子情報通信学会宇宙太陽発電時限専門委員会, 2002-.
- 17) 日本機械学会マイクロナノ工学専門会議マイクロエネルギー研究会, 2007-.

- 18) 丹羽直幹, 高木賢二, 浜本研一, “建築構造物,” 特許公開 2006-166662 号
- 19) N. Shinohara, Y. Miyata, T. Mitani, N. Niwa, K. Takagi, K. Hamamoto, S. Ujigawa, J. P. Ao, and Y. Ohno, “New Application of Microwave Power Transmission for Wireless Power Distribution System in Buildings,” 2008 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Hong Kong, CD-ROM H2-08.pdf, 2008.
- 20) 平山勝規, “ガス管内を移動するロボットへの無線電力伝送システムに関する研究,” 京都大学大学院工学研究科電子通信工学専攻修士論文, 1999.
- 21) 柴田貴行, 川原伸章, “マイクロ波エネルギー伝送技術を用いた配管内自立移動ロボットの開発,” 信学会総合大会予稿集, B-1-24, p.24, 1999.
- 22) 篠原真毅, 松本 紘, “マイクロ波を用いた電気自動車無線充電に関する研究,” 電子情報通信学会論文誌 C, vol.J87-C, no.5, pp.433-443, 2004.
- 23) 兒島淳一郎, 篠原真毅, 三谷友彦, 橋本隆志, 岸 則政, 外村博史, 岡崎昭仁, “マイクロ波を用いた電気自動車無線充電システムの高効率化,” 信学技報, SPS 2007-16 (2008-03), pp.1-4, 2008.
- 24) K. Takahashi, J. P. Ao, Y. Ikawa, C. Y. Hu, H. Kawai, N. Shinohara, N. Niwa, and Y. Ohno, “GaN Schottky Diodes for Microwave Power Rectification,” Proc. of 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2008), 2008.
- 25) 澤田剛一, 高橋健介, 胡 成余, 敖 金平, 篠原真毅, 丹羽直幹, 大野泰夫, “マイクロ波整流用表面 p 層 GaN ショットキーバリアダイオード,” 応用物理学会, 2009.