



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北海道大学における太陽発電衛星に関する研究
Author(s)	伊藤, 精彦; Itoh, Kiyohiko; 小川, 恭孝 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 153, 27-39
Issue Date	1990-11-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42264
Type	departmental bulletin paper
File Information	153_27-40.pdf



北海道大学における太陽発電衛星に関する研究

伊藤 精彦 小川 恭孝 大宮 学

(平成2年8月31日受理)

Studies on a Solar Power Satellite at Hokkaido University

Kiyohiko ITOH, Yasutaka OGAWA and Manabu OHMIYA

(Received August 31, 1990)

Abstract

In this paper, we describe studies on a Solar Power Satellite (SPS) which have been carried out at Hokkaido University from 1981. The SPS transforms sunlight energy into electric energy using a huge solar array on a geostationary orbit, and transmits the energy down to the earth by a 2.45GHz microwave. On the earth, we receive the microwave using a "Rectenna" (Rectifying Antenna), and supply commercial electric power. The SPS provides one of the promising solutions to energy shortage and environmental pollution problems.

At Hokkaido University, we proposed a circular microstrip antenna for transmission and reception of the microwave power. The circular microstrip antenna does not resonate at integer multiple frequencies of a dominant frequency (2.45GHz). Higher harmonics which interfere with radio communication systems are reduced by the circular microstrip antenna. Then, we can construct simple antenna systems because we do not need additional bandpass filters to prevent unwanted radiation.

In this paper, we present a detailed description of the circular microstrip antenna for energy transmission and reception. Also, we describe the effect of the SPS on the communication system and biological environment.

1. はじめに —太陽発電衛星構想とその時代背景および今日的意義—

石油や石炭等の化石燃料の有限性、それに伴う資源枯渇の必然性が言われて久しい。1970年代の2度の石油危機を契機として、石油への依存から脱却し、安定した供給が可能な代替エネルギーの開発が急がれている。図1は昭和30年度から昭和61年度に至るわが国の年間発電電力量の推移とその石油依存度を示したものである。昭和30年度から昭和48年度までのエネルギー危機到来前の約20年間で、電力の石油依存度は1%台から70%台へと大幅に上がった。

太陽発電衛星(Solar Power Satellite, 以下, SPSと略する)は、静止衛星軌道の上に太陽電池の発電所を設け、電波で地上に電力を送ることによって地上の資源不足と環境汚染の二つを解決

するものである。これは、表1に示すように、1968年 Peter E. Glaser により提案されていた「効率的で安全なマイクロ波ビームによる電力伝送、宇宙空間における電力プラント」の概念に端を発し、第一次エネルギー危機のおきた1973年（昭和48年）12月25日に絶妙なタイミングで特許化された発電方式である。その後、このSPSはNASAの目にとまり、ポストシャトルを狙いつつ1970年代のエネルギー危機の中でその概念を成長させていった。この間、1977年から正式に研究費がつき、1980年に至る4年間に約2千万ドルを投じて概念設計を行った。

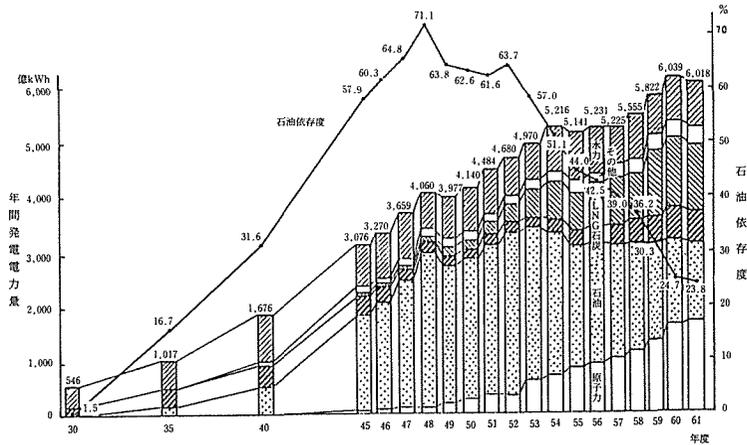


図1 年間発電電力量の推移

表1 SPS年表

- | | |
|---|--|
| <p>1968 - Dr. Peter Glaser proposed the concept.</p> <p>1972 - NASA/Lewis evaluated the concept.</p> <p>1973 - Dr. Glaser patented the concept.</p> <p>1975 - NASA Office of Energy Programs evaluated the concept.</p> <p>1976 - NASA initiated intensive systems definition activities.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Program responsibility was assigned to the Energy Research and Development Administration. - ERDA task group recommended an evaluation study. <p>1977 - DOE/NASA approved the plan for and initiated the Concept Development and Evaluation Program.</p> | <p>1978 - DOE/NASA held the first program review.</p> <ul style="list-style-type: none"> - DOE/NASA published the reference system description and the preliminary environmental and societal assessments. <p>1979 - DOE/NASA held the second program review.</p> <ul style="list-style-type: none"> - DOE/NASA completed the preliminary comparative assessment and updated the environmental and societal assessments. <p>1980 - DOE/NASA held an SPS symposium and the third program review.</p> <ul style="list-style-type: none"> - DOE/NASA conducted peer reviews of technology status. - DOE/NASA published the CDEP system definition report and the environmental, societal, and comparative assessments. - DOE/NASA published the program assessment report. |
|---|--|

ところが、レーガン政権の財政緊縮方針、および、米国科学アカデミー(NAS)の報告により、米国のSPSに関する研究は一時休止のやむなきに至っている。さらに、図1から明らかのように、原子力発電の進展により、昭和61年度には石油依存度が23%台にまで落込み、1980年代には1970年代ほどのエネルギー危機感がなかったことも事実である。しかし、この間におきた、スリーマイル島あるいはチェルノブイリにみられる原子力発電所事故などを契機として、バランスのとれたエネルギー源の確保の点から、比較的クリーンなSPSが研究者の間で見直す気運がでてきた。さらに、化石燃料に対するCO₂の増加による地球の温暖化、また酸性雨による環境破壊等、地球環境の悪化が一層加速され、これに対する対策が国際的にも重要な課題となってきた。

一方、1990年8月イラク軍は突如クウェートへ侵攻し、その併合を宣言した。これに強く反発する米国を中心とした諸国は経済制裁を実施するとともにイラクに対する軍事的包囲網を形成した。このようなアラブ産油国における国際的緊張は原油価格の高騰をもたらし、石油危機の再来を感じさせる状況となっている。このように、エネルギー資源のオプションが少ないことは局地的な紛争が世界経済全体を震撼させることになる。したがって、クリーンかつ豊富なエネルギーを生み出すSPSは重要な検討項目と言える。

わが国においても、1990年7月初めに出色された産業技術審議会の新エネルギー部会の中間報告で、「サンシャイン計画」の当初の目標である「エネルギー源の多様化」に加えて「地球環境への対応」を新たな目標とし、2020年以降の長期的研究テーマの中にSPSを加えている。さらに、1990年4月、ワシントンで開催された米国主催の地球環境会議において、通商産業省からは「地球再生計画(案)」が紹介されている。図2に示すように、この計画では、SPSは核融合技術と共に次世代を担う革新的なエネルギー技術として分類されており、1990年から2040年までの間に実施されるべきであるとしている。

以上のような背景のもとで、SPSは、「絵にかいた餅」から現実味を帯びたものとなってきた。

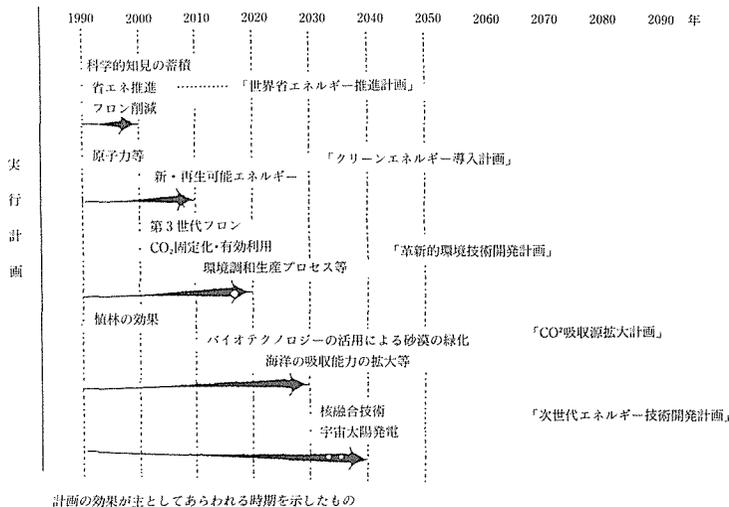


図2 「地球再生計画」における宇宙発電の位置づけ

2. 北海道大学における SPS 研究の経緯

北海道大学における SPS の本格的な研究・調査は、昭和56年度より昭和58年度の3ヶ年にわたり本論文の共著者等が担当した文部省科学研究費補助金（一般研究(B)）により行われた“太陽発電衛星受電用地球局端末素子「レクテナ」に関する基礎的検討”がその端緒である¹³⁾。その後今日まで、参考文献¹⁾⁻³¹⁾に掲げる31編の論文・学会発表、および、1件の国内特許³²⁾を取得している。ここでは、これらすべてを紹介することは紙面の都合上できないが、この研究を通じて得られた特許、および、最近エネルギーレビュー誌に公表した SPS の通信、および、生物・生態系への影響の程度とその対策に関する報告の概要を述べることにする。

3. SPS の研究で得られた特許「電力無線送受信空中線」の概要

3.1 電力の送受電に望ましい空中線の特徴

この発明は、太陽発電衛星用地上受電設備、いわゆる「レクテナ」等に应用される電力無線送受信空中線に関し、特に、簡単な構成により所望の単一周波数の高周波電力のみを送受し得るようにしたものである。通信用空中線が一般に広帯域化を目的としているのに対し、高周波電力を送受して直ちに直流化する電力無線送受信空中線においては、電力送受信に割り当てられた単一周波数のみを送受して不要不所望の周波数成分は送受しないように極度に狭帯域化することが望まれている。

送受信空中線により電力の無線送受信を行うための送電用発振器としては、一般に、マグネトロン、クライストロン、アンプリトロン、あるいは、半導体等が用いられるが、これらの発振器からは、いずれも、所望の発振基本周波数 f_0 の他に多数の不要周波数の電波が発生し、特に、発振基本周波数 f_0 の整数倍の周波数を有する高調波発振スペクトル成分が高いレベルで混在する。すなわち、送電空中線として従来使用されている空中線、例えばスロットアンテナ、ダイポールアンテナ等は、それぞれの最低次の基本共振周波数 f_0 の他にも、 n を整数としたときそれぞれ固有の高次の共振周波数 nf_0 を有している。さらに、ホーンアンテナにあっては、広帯域空中線であるために、上述のような送電用発振器から発生した不要周波数スペクトルの電波をすべて放射してしまう、という欠点があった。

一方、受電側の空中線に取り付けて使用されている整流器は、一般に半導体ダイオードであり、その半導体ダイオードにより整流ブリッジ回路を構成して、受電した高周波電力を直ちに両波整流して直流電力に変換している。このような整流ダイオードブリッジ回路は、高周波電力を効率よく整流した場合においてさえも、 $2f_0$ の整数倍の周波数を有する高調波を発生させるのが一般的であり、不所望の高周波成分が受電用空中線から再放射される、という欠点があった。

したがって、従来の電力無線送受信空中線には、送電側および受電側のいずれにおいても、不要高周波成分の不要放射を抑制するための濾波器を併用する必要があるために、装置の構成が複雑となり、大型となる欠点があった。

この発明の目的は、上述した従来の欠点を除去し、所望の最低次共振周波数 f_0 の高周波電力を効率よく送受し得るとともに、最低次共振周波数 f_0 以外の不要高周波スペクトル成分を、濾波器は全く使用せずに十分に抑制し得るようにした電力無線送受信空中線を提供することにある。

この発明の他の目的は、太陽発電衛星におけるマイクロ波による無線送電系の送電および受電空中線システムに使用する際に好適な簡単な構成の安価な電力送受信空中線を提供することにある。

すなわち、この発明の電力無線送受用空中線は、所望の最低次共振周波数 f_0 以外の高次高調波周波数 nf_0 には共振しないように適切に設定した形状を有する空中線素子を用いて構成したものであり、誘電体もしくは空気よりなる間隙を介し接地導体板に平行に対抗させて円形の導体板を近接配置し、前記導体板における円形の離心点に高周波電力を給電するとともに、前記導体板に給電した高周波電力の基本モードの電流に沿いスリットを設けて高周波電流を阻止するようにしたことを特徴とするものである。

3.2 空中線の構成

以下に図面を参照して実施例につきこの発明を詳細に説明する。

狭帯域通過型濾波特性を付与したこの発明の電力無線送電用空中線の基本的構成例の正面図および側断面図を図3 a および b にそれぞれ示す。なお、空中線自体の構成は、受電用空中線においても、図3 に示した送電空中線と全く同一とする。図3 の構成例において、放射部は、導体薄板もしくは導体箔よりなる円形を基本とした形状の導体であり、この放射部導体を、例えばテフロン（商品名）等の誘電体材料もしくは空気よりなる間隙層を介して適切な厚さの接地導体板に平行に対抗配置するとともに、その円形の放射部導体の中心から適切に隔離した給電点に、前述したような従来から用いられている送電用高周波発振器を接続して給電する。なお、図示した構成例においては、効率よく給電し得るようにするために、接地導体板に適切な形状寸法の凹欠部を設けて、その中に発信器を収容し、至近距離から給電しているが、通常のとうり外部から導波管を介して給電することもできる。

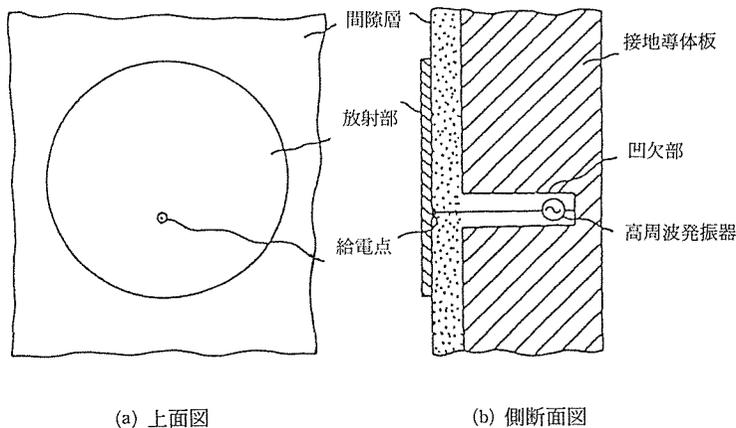


図3 本発明による送電用空中線の構成例

つぎに、この種の送電用高周波発振器の発振スペクトルを図4 に示す。この種の高周波発振器においては、所要周波数 f_0 の基本スペクトルの他に、 n を整数とした周波数 nf_0 の高調波スペクトルが、図に示したように、基本スペクトルに比して相当高いレベルで多数発生しており、特に比較的低下の高調波スペクトル $2f_0$ 、 $3f_0$ 等は基本スペクトル f_0 に近いレベルで発生するので、これらの高調波スペクトル成分の空中線からの放射を嚴重に抑制する必要がある。

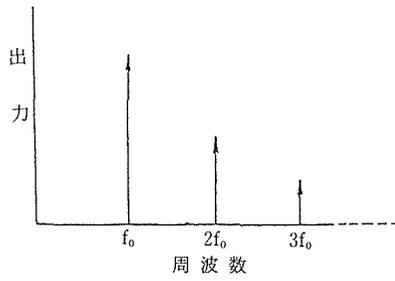


図4 送電用高周波発振器の発振出力周波数の特性例

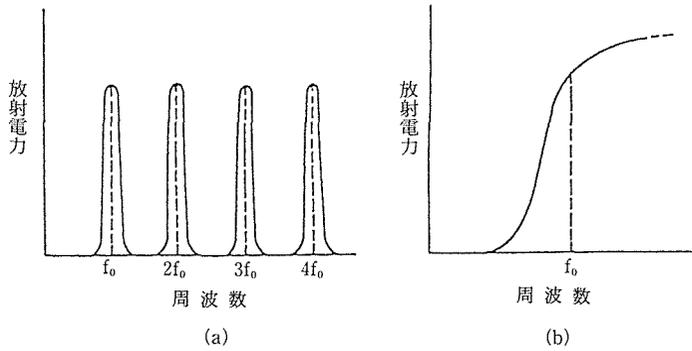


図5 従来の無線送電用空中線の放射特性

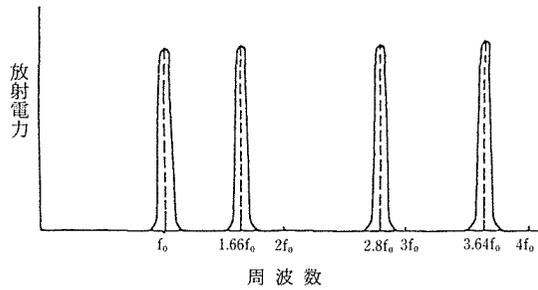


図6 本発明の電力無線送電用空中線の放射特性の例

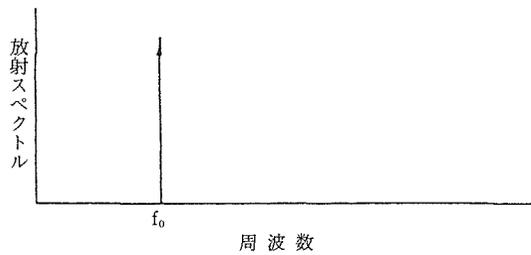


図7 本発明の電力無線送電用空中線による放射スペクトルの例

しかし、従来使用されている通信用マイクロ波アンテナとほぼ同様に構成した送電空中線の放射特性は、図5に示すように、基本スペクトルの周波数 f_0 と各高調波スペクトルの周波数 $2f_0, 3f_0, \dots, nf_0$ とにおいてほぼ同等に電力を放射し得るようになっており、したがって、このような放射特性を有する従来の送電空中線に高周波発振器から直接給電したのでは、図4に示したような高レベルの高調波スペクトル成分がそのままのレベル比にて放射されてしまうことになり、従来の構成においては、両者間に狭帯域通過型濾波器を介在させて、このような高レベルの高調波スペクトル成分による不要放射を嚴重に阻止することが必須の要件となっていた。

これに対して、図3に示した構成による空中線においては、放射部導体板の形状を適切に設定することにより、その共振特性を任意に制御して、所定周波数 f_0 の基本スペクトルには効率よく共振するが、その整数倍の周波数 nf_0 を有する高調波スペクトルに対しては共振せず、したがって、このような高調波スペクトル成分は全く放射されないようにすることができる。例えば、放射部導体の形状を真円とし、その真円の直径を所定周波数 f_0 の基本スペクトルに対し、空気間隙の場合には、その波長のほぼ0.6倍に設定するとともに、前述したように、その真円の中心より適切に離隔した離心点に給電すると、その放射特性は、例えば図6に示すようになり、基本スペクトル f_0 。例えば100MHzの電波を効率よく前方に放射するが、従来のように、基本周波数 f_0 の整数倍の高調波周波数 nf_0 。(200MHz, 300MHz, 400MHz等)では生ぜず、真円直径の短縮率、給電点の離心率、間隙の誘電率等によって定まる、図示のような基本周波数 f_0 の端数倍(166MHz, 280MHz, 364MHz等)の周波数で生じる。したがって、高周波発振器から、従来と同様に図4に示した周波数分布を有する高周波電力を直接に送電空中線に供給しても、その送電空中線から実際に放射される高周波電力の放射スペクトルは、図7に示すように、最低次モード、例えば TM_{11} モードにて共振する所要周波数 f_0 の基本スペクトルのみとなり、従来不要放射となって阻止濾波器の併用を余儀なくした200MHz, 300MHz, 400MHz等の高調波スペクトル成分は、上述したように共振し得ないのであるから、この発明の空中線自体によってほぼ完全に阻止される。

なお、上述のように、放射部導体(図3参照)の構成のみによって得られる高調波スペクトル成分阻止濾波の作用効果は、適切な直径を有する真円形放射導体に離心給電した場合に得られる放射特性を巧みに利用したものであり、このような真円放射導体の離心給電によって放射導体に高調波電流が流れるのを阻止したためである。したがって、この発明の空中線における放射部導体の形状としては、上述した真円のみならず、真円を基本として、高次共振モードの電流の流路を遮断するような形状、例えば、基本共振モードの電流の流路に沿い、高次共振モードの電流の流路と交差してこれを遮断するスリット、すなわち、上述の基本モード TM_{11} に共振する基本スペクトル電流成分の子午線方向の流路に沿った適切な間隔のスリット等の形状を放射部導体板上に付加して、例えば TM_{01} モード等の高次モードにて共振する不要スペクトル電流成分の半径方向の流路を遮断するようにしたものであれば、高次モード共振周波数近傍の高調波スペクトル電流成分が遮断されることになり、任意所望の適切な形状に設定することができる。

受電用空中線においても同じ原理により、整流ダイオードから発生する高調波の再放射が阻止される。

以上に説明したこの発明による送電用および受電用の空中線は勿論、整流回路や発振回路も平面回路に構成することにより、すべて印刷配線技術を用いて小型、軽量に製作することができ、このような構成の単位空中線を適切な大きさの接地導体板上に多数行および列をなして並置したマトリックス配置にしてそれぞれの入出力を適切に相加したアンテナアレイを構成すれば、任意所望の大きさの電力を小型、軽量かつ簡単な構造の装置より、簡易に無線送受電することができ

る。

3.3 この発明の応用

このような構成の製作例を挙げれば、電力送受電用に割当て予定の周波数 2.45GHz に対し、半径 24.23mm の円形放射部導体を誘電率 2.1 のテフロン (商品名) からなる厚さ 1mm の間隙層を介して接地導体板上に被着して図 3 に示した構成の空中線を製作して電力の無線送受電を試みた結果は、4 月の高性能を確認することができた。

以上の説明から明らかなように、この発明によれば、電力無線送受電用の空中線自体により、送電用高周波発振器にて発生する高調波スペクトル成分および受電整流器にて発生する倍調波スペクトル成分の空中線からの放射ないし再放射をほぼ完全に阻止することができるので、従来のように狭帯域通過型濾波器を送電側および受電側にそれぞれ配置することを全く必要とせずに、このような高周波不要放射を十分に防止して、他の通信系に対する妨害など、広義の環境汚染を未然に防止することができる。

しかも、送電用および受電用空中線のみならず、付属の電気回路も印刷配線技術を駆使して、小型、軽量の一体構成とすることができ、上述した妨害阻止用濾波器の不要化と相俟って、この種の電力無線送受装置の量産化を容易にするのみならず、性能上の信頼性を高めることができ、太陽発電衛星用受電プラント等の無線送受電設備を従来に比して格段に低廉化し得るなどの顕著な効果を挙げるることができる。

なお、この発明の電力無線送受用空中線は、上述した太陽発電衛星の送受電に好適であるのみならず、離島や洋上の原子力船からの原子力発電電力の送受電、無給油飛行機など、地球上における無線送受電にも広く適用することができる。

ここで具体的研究が進行している無給油飛行機について概説する。風の少ない 20km の高度を巡回する飛行機に地上からマイクロ波によりエネルギーを送り続けると長期間飛行機は飛び続けることができる。この飛行機を携帯電話や車載電話の中継局に利用すれば、広い場所から中継局が直視できる。このため、品質のよい通話が期待でき、通信回線数が増大する等の利点がある。このような構想に沿った研究が我が国では、郵政省通信総合研究所において成層圏無線中継航空機実験として進められている。また、カナダでは CRC が SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform) 計画として開発が進められている³³⁾。

4. 通信および生物・生態系への影響

4.1 SPS 実現のための既存システムとの整合性

SPS が実現されるためには無線通信システムや生態系等の既存システムに悪影響を与えないことの保証が必要である。このことは、当然 SPS の研究当初から検討されていたが、国際的な問題となったのは 1979 年ジュネーブで開催された世界無線主管長会議であった。この会議では、将来宇宙機上において太陽の輻射の一部を電力に変換し、この電力を無線伝送によって地球に伝送することが技術的に可能となり、世界のエネルギー資源を増大させることを認めた上で、「この種の大電力が電離層に影響を与える可能性の有無、無線通信業務に混乱を与えることの有無、生態学および生物学的影響の程度等について検討する必要がある」としている。また、このため世界無線通信諮問委員会 (CCIR) に対して、電力の無線伝送が無線通信業務に与える影響のすべての側面について適当な研究を実施し、生態学および生物学的影響を考慮して適切な勧告を作成することを要請している。さらに、これを受けて CCIR は電波による電力の伝送に関して、電磁波

によってエネルギー伝送をするシステムの動作特性およびこのシステムに適した周波数、このシステムから放射される不要電波等によって生ずる無線通信障害およびこれに対する許容値、このシステムの動作および誤動作で発生すると思われる生物体に対する悪影響等の研究問題を設け、研究を促している。

また、米国のエネルギー省 (DOE) と NASA が行った SPS 概念開発評価プログラム (CDEP) の SPS レファレンスシステムに対して SPS の環境への影響に対する検討が行われた。この CDEP においては、電気通信システムへの影響、低レベルのマイクロ波エネルギーに長期間さらされることによる健康上や生態学的影響の検討に加えて、SPS 軌道設定等についての検討を加えるべきと述べている。しかし、CDEP の調査研究の範囲ではこれらの検討結果から明確な一定の結論を導き出すまでに至っていない。

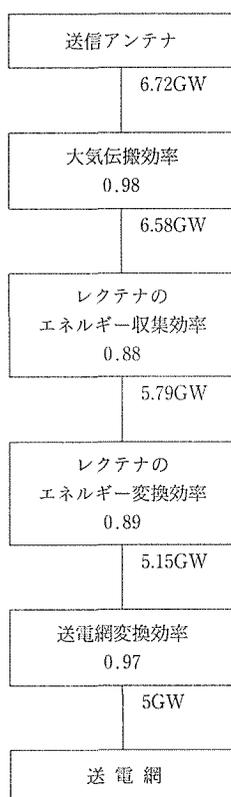


図8 SPS レファレンスシステムにおける電力無線送電のエネルギー効率

図8にSPSレファレンスシステムにおける送信アンテナから地上の商用送電網に至る各過程での電力の効率を見積もった値を示している。それぞれの過程における損失は熱および整流器等の非線形素子によってエネルギーを乗せている周波数であるキャリア周波数 f_c 以外の周波数へのエネルギー変換である。その損失は図8から明かなようにおおよそ1.72GWであり、全体の効率は74.4%程度である。上記の損失は今後の研究で改良され、減少してゆくことが予想される。もちろん、この損失は他の発電方式を用いた熱のウェイトと比較して小さいと言える。また、二酸化炭素や放射能等の環境汚染要因を生じさせない等の大きなメリットがあることを十分に認識した上で、

SPS の既存システムへの影響を十分に評価し、いささかでも懸念があるならばそれらを取り除くための研究を早急に着手する準備をしなければならない。

4.2 通信システムへの影響の程度と対策

SPS のマイクロ波ビームが電離層を通過すると、プラズマ状態にある電離媒質を加熱し、媒質を不均質にすることが予想される。ビームのエネルギーが高いと、この不均質な状態がレンズ状になることが知られている。このため、マイクロ波のエネルギーを集束させ、これによって電離層自体の性質が変わり、無線通信へ影響を与えると考えられる。先の CDEP の調査結果では、SPS レファレンスシステムで用いる程度の電力密度 ($23\text{mW}/\text{cm}^2$) では $3\text{kHz}\sim 3\text{MHz}$ の範囲の周波数を使用する地上無線局間の通信への影響はほとんどないとされている。ただし、図 9 に示すように衛星通信回線がマイクロ波ビームを横切るときには影響があると考えられるので、今後充分検討する必要がある。

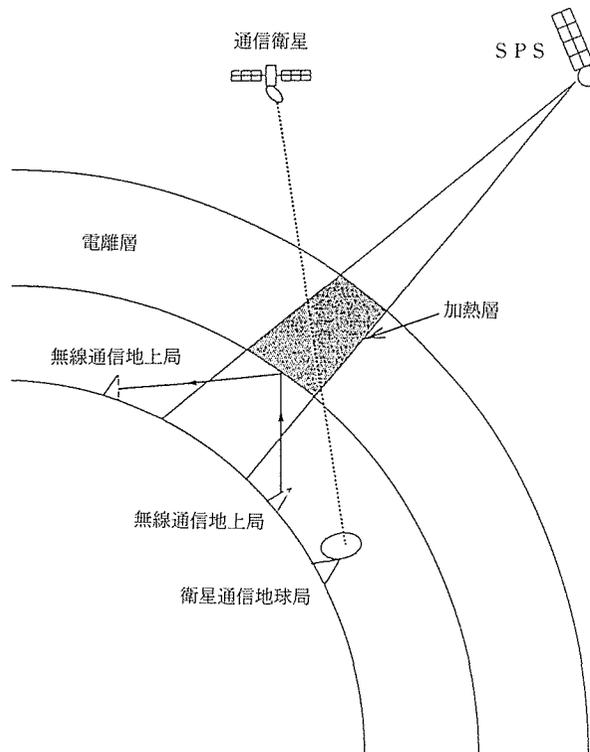


図 9 電離層加熱による無線通信への影響

SPS レファレンスシステムで使用する周波数は 2.45GHz である。この周波数では雨滴による散乱が大気等と比較して量的に多いことが予想される。ただし、線形性媒質に関しては f_0 以外の周波数を汚染しないので、通信に対して重大な障害にならないと考えられている。

SPS システムでは約 100 億個からなるレクテナを適当に分割して配列するため、基本素子を支持している支柱や反射板の端等からの回折や散乱により約 2% の入射電力が南の方向に反射され、収集域周辺の電磁環境を汚染することになる。しかし、これらの電磁波も基本周波数であり、現

象そのものは線形である。したがって、定量的評価とそれなりの対策が可能である。また、基本周波数はISM機器用の周波数であり、通信系や観測系の周波数とは異なるので、これら業務の直接的妨害とはならない。しかし、レクテナを構成する整流器から発生する高調波の2.45GHzの整数倍である4.9GHz, 7.35GHz, 9.8GHz, ……は相当量(4.9GHzで1万kW程度)の障害を与えることが予想される。さらに、電界強度の強い放送波などの相互変調積の発生も懸念される。したがって、これらの非線形効果による高調波発生を抑制するための対策に関する研究も充分に行う必要がある。

4.3 SPSの送信アンテナからの放射電力

SPSにおいて、電力の無線送電の最も重要な機能は送信アンテナであることは論をまたない。しかし、SPSレファレンスシステムでは1970年代の技術を基にしていることから、送電用発振器としてクライストロンやマグネトロン等の管球を使用することを前提としている。これらの管球の平均寿命はおおの25年あるいは50年程度である。10万個もの管球を使用した場合、SPSでは平均して1～2時間に1本の割合で管球が故障し、取り替えることになる。このようなシステムはあまりにも非現実的である。したがって、SPSを現実のものとするためには発振器の全固体化が必須の技術である。

固体素子の発振出力はクライストロンの1000分の1以下と小さいが、信頼性および量産性に優れていること、パッチアンテナ等の平面アンテナと相性が良いことなどの特徴がある。以上の理由から、1980年以降に開発された技術を十分に使いこなすことにより、送信アンテナの全固体化は可能であると考えられる。ただし、高出力固体素子の雑音成分については余り報告がなされていないので、SPSレファレンスシステムで検討された管球式発振器での検討結果を紹介する。例えば、固定無線通信では高周波のレベルは約10～30デシベル程度許容値より高くなることが予測される。したがって、全固体化送信アンテナの開発に当たっては、発振周波数スペクトルの純度を十分に保つ工夫が必要となる。

4.4 静止衛星軌道上の配置

1989年において運用中の静止通信衛星(放送衛星, 気象衛星, 軍事衛星を除く)の数は80を上回っている。SPSレファレンスシステムでは隣接SPS間の間隔は一度と想定している。SPSが実現する21世紀においては、上述の数以上の通信衛星が軌道に配置されることが予想される。米国だけでも60基のSPSが考えられているが、これらのSPSが通信衛星の間にもどのように入り込むか問題のところである。CDEPではSPSのパラメータと他の衛星の特性が正確に推定可能なら、定量的に妥当な分析が行えると報告している。しかし、通信衛星の周回軌道への移行の可能性について今から十分な検討を行う必要がある。

4.5 生物・生態系への影響の程度と対策

5GW SPSレファレンスシステムでは、レクテナ基地におけるビームの中心部の電力密度が 23mW/cm^2 、ビームの端で 1mW/cm^2 程度である。また、 0.1mW/cm^2 の電力密度の区域は立入禁止地域と想定されている。1970年代の米国においては電磁波の熱的機構による生体への影響の下限が 10mW/cm^2 と標準が設けられていた。したがって、安全係数10が考慮されてビーム端の電力が 1mW/cm^2 に抑えられていた。ところが、同じ頃ソ連においては一般人に対するガイドラインが 0.01mW/cm^2 と米国の標準より3桁低い値を使用していた。これは、ソ連がマイクロ波被爆の

非熱作用による人体への有害な影響を考慮したためとされている。しかし、米国では電波照射の電気生理・神経系への影響とこれに媒介されたさまざまな生体効果について、ソ連の実験結果を追試再現できないとして、熱的効果のみを考慮したとされている。

その後、米国において熱効果に根拠をおいた電磁波の安全基準の見直しが行われており、今年（1990年）中にはANSI（米国標準化協会）の基準が改訂されることになっている。我が国においても郵政省電気通信技術審議会のもとに電波防護指針委員会が設けられ、1990年6月25日に答申が行われた。このように熱的機構については定量的評価が可能になっている。ただし、CDEFが指摘している大きな問題点として、非熱的機構によるマイクロ波の影響が不明な点、動物実験結果のヒトへの外挿の適否が不明な点が上げられる。

レファレンスシステムでは米国大陸で約300km間隔に60基のレクテナが配置された状態で、レクテナから充分離れた点の電力密度が $0.0001\text{mW}/\text{cm}^2$ 程度と見積もられている。ちなみに、東京タワーの近傍では周波数は異なるが $0.001\text{mW}/\text{cm}^2$ 程度の被曝量である。

いずれにしても、SPS実現のためにはマイクロ波の微弱な電力を長時間被曝したときの慢性的な影響を十分に評価できるだけの実験研究を行う必要があるだろう。

5. む す び

本論文では北海道大学における太陽発電衛星の研究の中で主要な結果について概説した。太陽発電衛星はエネルギー問題と環境問題という21世紀に向けて人類に課せられた二大命題へのエンジニアからの一つの解答といえるものである。したがって、未解決の問題を早急に検討し、21世紀の早い時点で太陽発電衛星を実現するよう努力を続けなければならない。

米国においては現在、SUNSAT Energy Councilを中心に太陽発電衛星の検討がなされている。我が国においては文部省宇宙科学研究所を中心として、北海道大学、東北大学等の大学、および、通商産業省、電力中央研究所等の諸機関が研究を行ってきた。また、1990年10月には電子情報通信学会の中に「マイクロ波無線送電」に関する専門委員会が設立され、本研究の気運が一層高まってきた。今後、公的機関からの財政援助を背景に研究者数を増加し、国際間の協力を図りつつ本研究を推進することが必要である。

参 考 文 献

- 1) 伊藤精彦：“太陽発電衛星受電地球局「レクテナ」に関する考察”，昭和56年度電気四学会北海道支部連合大会（札幌），90（1981）。
- 2) 伊藤精彦，秋葉康弘，小川恭孝：“マイクロストリップパッチアンテナによるレクテナについて”，電子通信学会技術研究報告，A・P82-98（1982）。
- 3) 秋葉康弘，小川恭孝，伊藤精彦：“マイクロパッチアンテナを利用した太陽発電衛星受電用「レクテナ」素子”，昭和57年度電子通信学会光・電波部門全国大会（札幌），S2-17（1982）。
- 4) K. Itoh and Y. Akiba：“A Consideration on “RECTENNA” for Microwave Power Reception from SPS”，ISAS Space Energy Symposium，II-14（1982）。
- 5) 秋葉康弘，中島直臣，小川恭孝，伊藤精彦：“SPS（太陽発電衛星）受電用レクテナに関する研究”，電子通信学会技術研究報告，MW83-16（1983）。
- 6) 伊藤精彦：“SPS（Solar Power Satellite，太陽発電衛星）に関する研究”，北大工学部広報，121，（1983）。
- 7) 秋葉康弘，小川恭孝，伊藤精彦：“円形マイクロストリップアンテナを用いた太陽発電衛星受電用レクテナモジュールに関する研究”，電子通信学会技術報告，A・P83-55（1983）。
- 8) 秋葉康弘，小川恭孝，伊藤精彦：“円パッチマイクロストリップアンテナを利用したSPS用レクテナ素子”，昭和57年度電気四学会北海道支部連合大会（北見），140（1982）。

- 9) K. Itoh: "Fundamental Study on SPS Rectenna Printed on a Sheet Copper Clad Laminate", 3rd ISAS Space Energy Symposium, 16 (1984).
- 10) 大鐘武雄, 秋葉康弘, 小川恭孝, 伊藤精彦: "円パッチマイクロストリップアンテナを用いたレクテナの基礎的研究", 電子通信学会技術研究報告, A・P84-40 (1984).
- 11) 秋葉康弘, 小川恭孝, 伊藤精彦: "円パッチマイクロストリップアンテナを用いた SPS・レクテナ素子に関する研究", 昭和58年度電気四学会北海道支部連合大会 (札幌), 31 (1983).
- 12) 伊藤精彦, 秋葉康弘, 大鐘武雄, 小川恭孝: "SPS レクテナ素子の整流回路に関する実験とコンピュータ・シミュレーション", 昭和59年度電子通信学会総合全国大会 (東京), 741 (1984).
- 13) 伊藤精彦: "太陽発電衛星受電用地球局端末素子「レクテナ」に関する基礎的研究", 昭和58年度文部省科学研究費補助金 (一般研究B) 研究成果報告書 (1984).
- 14) 大鐘武雄, 小川恭孝, 伊藤精彦: "円パッチマイクロストリップアンテナで構成されたレクテナの受電効率", 昭和59年度電気関係学会北海道支部連合大会 (室蘭), 17 (1984).
- 15) 伊藤精彦, 大鐘武雄, 小川恭孝: "磁流アンテナを用いたレクテナの受電効率", 電子通信学会技術研究報告, A・P84-69 (1984).
- 16) K. Itoh, Y. Akiba, T. Ohgane and Y. Ogawa: "Fundamental Study on SPS Rectenna Printed on a Sheet of Copper Clad Laminate", Space Solar Power Review, 5, 2, 149 (1985).
- 17) K. Itoh, T. Ohgane and Y. Ogawa: "Rectenna Composed of a Circular Microstrip Antenna", Proc. ISAP '85, I, 032-3, 141 (1985).
- 18) 伊藤精彦, 大鐘武雄, 小川恭孝: "スロットアンテナによる SPS 用レクテナの受電効率", 昭和59年度電子通信学会光・電波部門全国大会 (松山), 47 (1984).
- 19) 大鐘武雄, 小川恭孝, 伊藤精彦: "誘電体基板の厚さを考慮した円パッチで構成された無限レクテナアレーの解析", 昭和60年度電気関係学会北海道支部連合大会 (札幌), 27 (1985).
- 20) K. Itoh, T. Ohgane and Y. Ogawa: "Rectenna Composed of a Circular Microstrip Antenna", Space Power, 6, 3, 193 (1986).
- 21) K. Itoh and Y. Ogawa: "Considerations on an Inland Rectenna", 6th ISAS Space Energy Symposium, 29 (1987).
- 22) 伊藤精彦: "レクテナについて (Comment on "Rectenna")", 太陽発電衛星小研究会 (東京) (1986).
- 23) K. Itoh, Y. Ogawa and T. Suga: "Fundamental Considerations on a Rectenna Element Composed of a Circular Microstrip Antenna Using a Superconductor", 7th ISAS Space Energy Symposium, 5 (1988).
- 24) K. Itoh, Y. Ogawa, Y. Kondoh, T. Suga and H. Yamada: "An Inland Hogline Rectenna Using a Circular Microstrip Antenna", 16th International Symposium on Space Technology and Science, 620 (1988).
- 25) K. Itoh and Y. Ogawa: "Considerations on an Inland Rectenna", Space Power, 7, 2, 211 (1988).
- 26) 伊藤精彦: "宇宙発電と無線送電", エネルギー・資源研究会北海道地区講演会 (札幌) (1988).
- 27) K. Itoh, T. Suga, Y. Ogawa and M. Ohmiya: "Communication Environment Simulation on a Solar Power Satellite System-Transient Spectra of a Rectenna-", 8th ISAS Space Energy Symposium, 27 (1989).
- 28) K. Itoh and Y. Ogawa: "Basic Studies on Interference with Communication Systems due to a Solar Power Satellite", 9th ISAS Space Energy Symposium, 57 (1990).
- 29) K. Itoh: "Problems due to Microwave Power Transmission by 10MW Solar Power Satellite", 9th ISAS Space Energy Symposium, 120 (1990).
- 30) 伊藤精彦: "宇宙発電と SPS 計画, 通信および生物・生態系への影響の程度とその対策", エネルギーレビュー, 8, 25 (1990).
- 31) 伊藤精彦: "電力伝送用アンテナ", 1990年電子情報通信学会秋期全国大会, SB-1-3 (1990).
- 32) 伊藤精彦, 後藤尚久: "電力送受電用空中線", 特許公報 (B2), 平1-16047, 昭和57年4月30日出願 (1989).
- 33) J. J. Shlesak, et al.: "A Microwave Powered High Altitude Platform", 1988 IEEE MTT-S Digest, 283 (1988).