

宇宙発電システムのためのマイクロ波長期照射施設

Long-Duration Microwave Exposure Facility

村上 寛 小見山 耕司 加藤 吉彦 工藤 勲
H. MURAKAMI K. KOMIYAMA Y. KATO I. KUDO

Before realizing an operational solar-powered satellite, biological and environmental effects from microwave radiation must be clarified. In fact, the possible biological effects of microwave beams should be accurately defined for a broad range of animal and plant life. Such information is particularly important for minimizing hazards and alleviating public concern. We recognize that the consideration of human safety is a paramount issue. A long-duration microwave exposure facility (LDMEF) was built at AIST Tsukuba Research Center in 1994 for the above purpose. During the period from June 1996 to August 1998, radiation power at ground level was 20mW/cm² which corresponded to the maximum power level expected at the center of a Rectenna. No marked influence of microwave beams was observed. Therefore, the power density was subsequently increased by 30%. This resulted in significant changes. Plants inside the radiation area died and the growth rate of plants outside the radiation area increased. The interaction of thermosensors with microwave power was of little concern. This effect is now under study. The accumulated microwave radiation time so far is over 17,000 hours.

§ 1 はじめに

21世紀の主要な課題のひとつであるエネルギーは人口の急激な増加による食料の供給と同様に資源の枯渇という深刻な問題に発展することが容易に予想される。また、自動車等の燃焼や工業製品の生産などのエネルギー消費に伴う環境汚染、さらに今後の発展途上国の工業化による石油や天然ガスの消費は炭酸ガスによる地球温暖化の問題も深刻である。このための代替エネルギー源として太陽や風などの自然エネルギーが注目され、太陽電池や風力等による小規模の発電施設の設置が始まっている。今後のエネルギー資源としては原子力が期待されているがこれも資源の枯渇やチェリノヴィリ、東海村の臨界事故などによる予測できない放射能汚染が予想され

る。一方、太陽エネルギーの利用はこれらの問題のない、クリーンなエネルギー源として有望視されていて、1968年にピーターグレーザーによって提案された太陽発電衛星(SPS: Solar Power Satellite)構想は地上よりも宇宙での効率が高いとされる¹⁾。この提案をもとにNASA(米国航空宇宙局)とエネルギー省が1977年から1980年にかけてSPSシステムの調査を実施した。検討されたSPSシステムはNASAリファレンスモデルとして現在のSPS開発のバイブルとなっており、日本でも1992年から通産省のサンシャイン計画のもとで調査研究が3年間行われた。米国では1980年代に宇宙予算の削減により、計画が凍結されたが再び1998年から炭酸ガスや放射性廃棄物のないクリーンなSPSがクローズアップされ始めた。宇宙での太陽エネルギーの利用は、地上における夜間や日中における時間的な変

動がなく理想的な環境といえる。このため、太陽発電システムを静止軌道上に設置して地上に電力を送電すれば1年中電力の供給が可能で基幹電力を担うことのできる発電システムを構築できることになる。太陽発電衛星はこのクリーンな太陽エネルギーを宇宙で電気に変え、その電力を大気や雲などの比較的影響の受け難い電波に変えて地球に送電するシステムである。また、送電された電波をレクテナと呼ばれる受電装置で商業電力に変換して一般家庭などで利用する。宇宙からの大規模な無線送電を実現するためには、送電アンテナや地上設備用のレクテナの開発や効率の高い受電素子が必要である。日本では京大、神戸大などで研究が盛んに行われている。しかしSPSにはこのほかにも解決しなければならない課題がある。その一つがマイクロ波送電における地球上での生態系におよぼす影響である²⁾。これはSPSから放射される電波がマイクロ波帯であるため、地上での生態系への影響や人体への安全性また大気に与える影響等についての研究が十分に行われていないのが現状である。SPSで使用する2.45GHzは工業周波数に属しており、この帯域では生態に対しての影響は熱的なものがほとんどと言われている³⁾。これはマイクロ波がこの水分の多い組織で吸収され熱に変化するためである。また最近非熱作用、変調波の作用等による問題も注目され始めている⁴⁾。これらの問題を調査するには長期的な観点から研究を行う必要がある。そこで生態系におよぼす影響を調査するために工業技術院の第二研究センター内にマイクロ波長期照射施設を1994年に設置し、長期の屋外における生態系への影響の研究を開始した。本稿では実験施設および植物に対する照射実験の試行調査などについてまとめたものである。

§ 2 実験設備

Fig.1 に設置したマイクロ波長期曝露施設を示す。施設は樹木に囲まれた芝生の中にあり、建物や道路から50m以上離れた場所に当初設置されたが、1998年度の脳機能棟の完成で現在は17mの距離になっている。設置した施設の形状は一辺8m、高さ4mの箱型で、天井は開放されており、植物のための太陽光の入射を考慮してある。この箱型全体を電磁波の漏洩

防止のためニッケルメッキの金網（メッシュの大きさは50mmの菱形）で覆った。またこの金網の上に新たに8メッシュの金網を高さ4mの範囲全てを覆って、シールド効果を高めた。マイクロ波の照射領域の土壌は20年前の造成した際の状態を基本とした自然環境をそのまま用いたが、植物の成長が妨げられたため4m四方を深さ30cm程度開墾し、黒土を搬入した。この施設の中にマイクロ波照射装置を支える柱を北側壁から2m離して設置した。この支柱にマイクロ波の放射部であるホーンアンテナを地表から2mの高さに取り付けした。Fig.2 に位置関係を示す。マイクロ波照



Fig.1 Long-duration microwave exposure facility

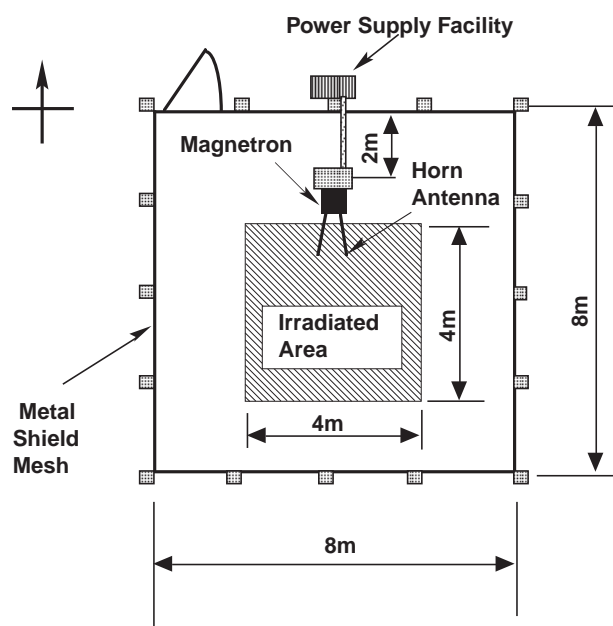


Fig.2 Schematic of the facility

射領域の電力密度はNASAのレファレンスモデルを参考にして決めた。NASAのレファレンスによると、マイクロ波電力密度は受信アンテナ中央で電力 23 mW/cm²、周辺部で 1 mW/cm² となっている。したがって実験はこの中心部の電力密度を参考にしている。このエネルギーレベルは地上に降り注ぐ太陽エネルギーのほぼ4分の1の強度である。

§ 3 施設での実験環境計測

3.1 マイクロ波照射装置

マイクロ波照射装置は電子レンジに用いられているマグネトロンに高電圧を印加してマイクロ波を発生させ、電力を得るものである。発生する周波数は2.45GHzの連続波である。出力電力の制御はマグネトロンに流れる電流を可変して行う方式とした。マグネトロンは定電流駆動させないと出力電力を一定に保てなくなり、暴走することがあるため、この装置では電流を制限することによって安定化を計った。マイクロ波電力は 0から800Wまでを連続して制御することが可能である。SPSでは歪み等の無いマイクロ波が用いられるが、この装置では発生する中心周波数2.45GHzに対してマグネトロンに供給する電流によってその波形に変化が生ずることがある。供給電流を増加すると発振波形が歪み、帯域が広がる傾向が示されたが、電力換算 240W（供給電流100mA）にすると波形の歪が最少になった。Fig.3はこのときのマイクロ波の波形をスペクトルアナライザ（HP3400）で観測した一例である。この電力で電磁環境測定を

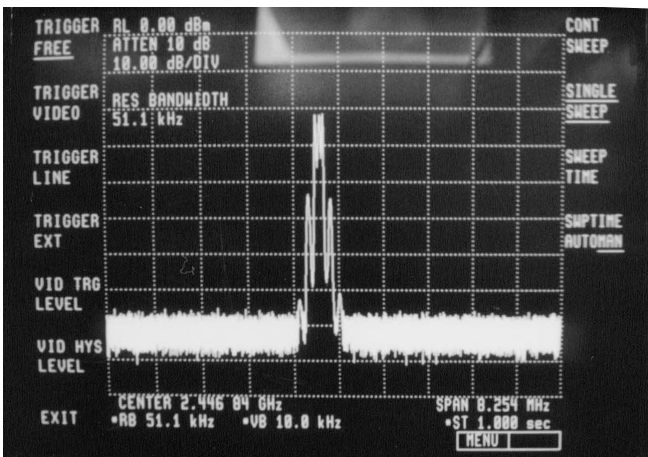


Fig.3 Photograph of microwave spectrum

行った。また、マグネトロンに供給している電源は完全な直流とはなっていないためマイクロ波に脈流も観測されており、波形歪みが最少のときに主に50Hzの変調が観測されている。それ以上に電力を増加すると数十kHzの変調波が多く観測された。脈流の原因はマグネトロンと電源系のインピーダンスの不整合によるものと推察しているが、今回での照射実験の目的にはなんら問題はないと考えている⁵⁾。

3.2 電磁環境測定

実験施設は郵政省に届けてから施設の認可を受けなければ運用できない。そこでまず施設の電磁環境の測定を行った。計測項目は照射電力、電磁波強度および施設内側の電界強度の測定を行った。これらの計測は照射装置を調整して、歪みの少ない240Wの電力で実施した⁶⁾。はじめに実験施設の電磁波の漏洩について施設の周りとは照射方向で測定した。この測定は施設附近での人体におよぼす安全性確認のためである。電界強度測定装置により、受信電力を曝露施設の周りとは距離による減衰量を調べた結果をFig.4に示す。この測定値は施設から30m離れた位置で、全方位（22.5度ステップごと）の計測である。この結果マイクロ波の漏洩電力は施設の周りで60 dBm以上の減衰が、また、正面方向でも50 dBmの減衰が確認された。正面方向を金網から平行に1 m 毎に詳細に測定した値に大きな変動が見られるが、これは施設と地表などによってマイクロ波が複雑に反射と吸収を繰り返したためである。同様に照射と反対方向でもこの傾向が見られる。照射軸方向で施設から100 mと350 m

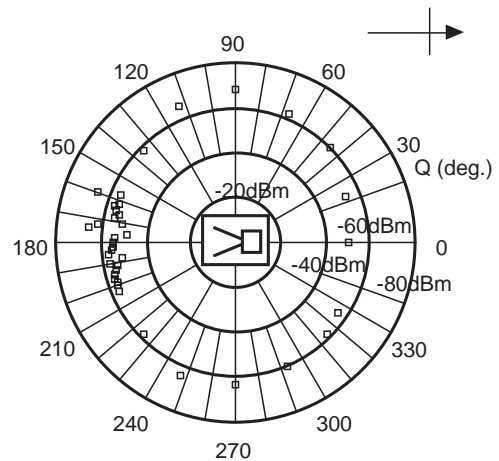


Fig.4 Leaked power distribution at 30m outside the facility

離れた地点では -80 dBm以上の値であった。照射軸正面 30 mのところから 50 m程樹木が植林されているため、マイクロ波の吸収が多く生じている。Fig.5に照射方向と直交した方向での測定値を示す。施設全面を細かい金網で覆ったため、目の荒い金網よりも電磁波の透過が抑制され10dBm以上減衰特性が向上した。マイクロ波の伝搬において直接波は基本的に距離の2乗に反比例して減衰するが、同図では地表などによる反射や水平偏波と垂直偏波などが複雑に重なりあったため単純な減衰が示されていない。

3.3 マイクロ波電力パターンと電力密度

ホーンアンテナの利得はアンテナの開口面積とその形状から25dB程度の利得と見積もられる。従ってアンテナの開口面からマイクロ波が拡散せず地表に伝搬されたとすると（地表50cm四方の範囲でマイクロ波の電力密度を23mW/cm²と想定）、必要とする電力は約 82Wとなる。この推定を確かめるため標準信号発生器を用いて、その放射電力をスペクトルアナライザにより測定した⁷⁾。Fig.6に測定結果を示す。ホーンアンテナの開放端の形状を地表に投影した様なパターンが得られ、電力密度の均一の範囲がホーンアンテナの開口面と同様の50cm四方の領域となった。Fig.7にその計測法を示した。導波管アンテナを地上に置き、それを縦と横にそれぞれ移動させて行ったものである。ここで測定された分布は近傍界と遠方界の中間の放射パターンと考えている。中心部分以外のパターンの乱れはマイクロ波のサイドローブとマイクロ波の反射や吸収によるものである。この測定から直接マイクロ波電力を見積ることはできないが、上述のように近傍界としてマイクロ

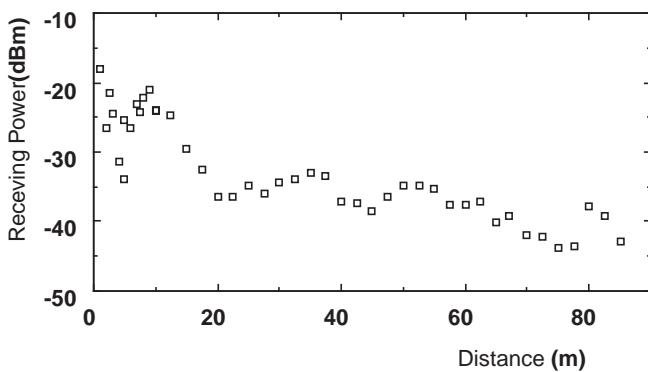


Fig.5 Receiving power level on the microwave irradiation line

波電力をホーンアンテナの開放端の面積から求めるとほぼ90Wとなり、予想値に近い値となった。施設の長期的な稼働はマイクロ波照射装置のマグネトロン寿命に左右されるが、使用電力が100W程度の低電力であれば定格動作（寿命3000時間）の寿命に比べて数倍の寿命があると推定してる。

§ 4 長期間実験

4.1 植物のマイクロ波照射実験

3章に述べたようにマイクロ波の発生に対して施設の安全性が確認できたことからマイクロ波の長期間の発生により、植物への照射実験を7回実施した。この施設は植物の長期間にわたる影響を調べることが主目的であるが、施設のマイクロ波の発生が長期間

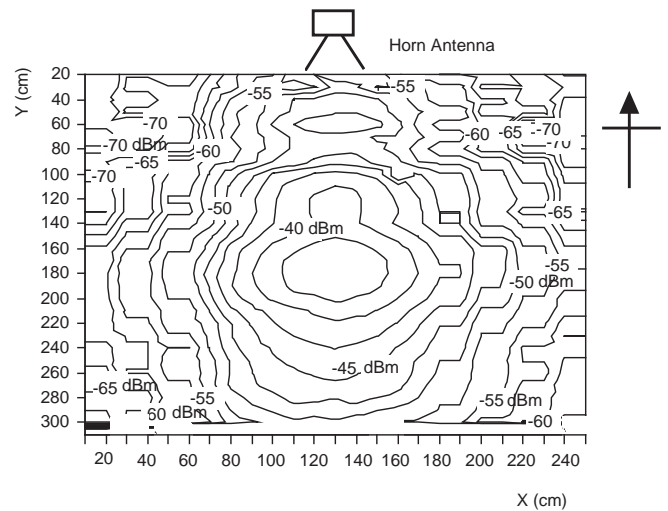


Fig.6 Microwave beam profile from the horn antenna

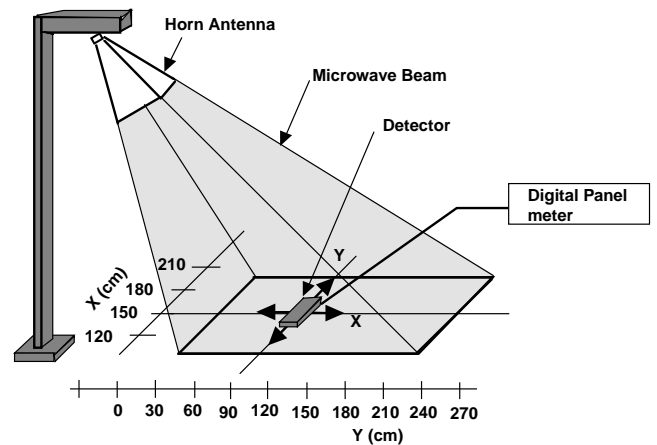


Fig.7 Test configuration of beam profile measurement

にわたり連続動作できることも目的としている。したがって植物の照射実験と平行して照射装置の長期間動作確認も行った。植物の初期の照射実験は1996年6月から1997年2月までマイクロ波電力90Wで3回にわけて実施した⁸⁾。種は3m×5mの領域に縦横10cm間隔に照射領域に蒔き、その成長を観察した。その内2回は小松菜で、6月と8月に種を蒔いた。発芽は正常に行なえたが、夏場の時期に雨不足と日照りで土壤の乾燥が起き、成長がうまくできず枯れた。11月に種まきした法蓮草も発芽は正常であったが土壤の凍結や霜などにより、成長に影響が始め、枯れが生じた。5ヵ月を経過した1997年3月頃には法蓮草は消滅し、施設全体によもぎなどの雑草(4回目照射実験)の発生が見られた。このため、設備の長期的動作と雑草でのマイクロ波の影響を調べるため照射実験を続行した。雑草の照射期間は1997年4月から電力設備定期絶縁検査(1997年10月15日)までの300日以上実施した^{9,10)}。雑草は7月から8月にかけて施設内全体に生い茂り、ススキなどが密生した状態であった。Fig. 8に8月の雑草の生育状態を示す。雑草は照射中心部とそれ以外の領域とで違いが観察されず、マイクロ波の影響は見られなかった。10月16日からは照射装置の整備と、小松菜の種を植える準備のための雑草の排除および整地作業を行った。前回まで3回実施した種ま



Fig.8 Growth of weeds inside the irradiated area

きで問題になった点に注意を払って種まきを行った。前回までは予め決めた位置に種を蒔き、中心部に数個、周辺部に1個としたため周辺部と中心部で成長の差が生じた。これは種の個体差による成長の相違があるため、これらの点を考慮して、以後の照射実験では整地したあと種をばらばらに蒔いた。このようにすることで発芽や全体の成長過程で種自身による差が低減されることになる。このようにして1997年10月に5回目の実験を開始した。種は小松菜とした。マイクロ波の電力はモニターできなかつたためマグネトロン流入電流を90mAとして行った。この照射実験では種の蒔く量が少なかったことにより小松菜は実験領域全体で不均一な状態で発芽した。この状態で成長は進んでいたが12月に照射装置が突然停止した。原因はアンテナ内に鳥の巣が作られたことによりマグネトロンの冷却不足が生じ、その結果熱暴走が起きたためである。1998年1月にマグネトロンを取り替え、再度照射実験を続行したが1月8日と15日に積もった雪のため成長不良が生じ、ここでも明確な変化が見られなかった。この照射実験の後は雑草(6回目)に5ヶ月間照射を行ったが前回の雑草の照射実験と同様に明確な影響は観測されなかった。この時期からは脳機能棟の建設が施設の近くで始まり、照射装置への電源系とデータ取得ケーブルの布設工事があり、照射実験は1999年8月まで中止した。脳機能棟が完成したので9月から再度照射実験の準備を始めた。まず雑草の排除および整地を行なった。7回目の照射実験ではマイクロ波電力密度を増加させ100 mAで照射を行った。この実験でも小松菜の種を用いた。今回は中心付近だけでなく、その4m四方の施設の4分の1の領域全体にばらまきにして照射実験を行った。種まきから4,5日で一斉に発芽が生じ、10日ほど過ぎたところで植物の成長が数センチになった。しかしこの頃になるとマイクロ波照射部の中心に変化が見受けられ、この領域の植物の減少が起きた。その様子の変化をFig.9に示す。中心部は発芽から20日ほどで植物がほとんど無くなった。この中心部の領域は幅50cmの四角に近い円形である。またその領域から外側の幅30cmの領域では逆に成長が進んでドーナツ形状を示した。これはマイクロ波電力密度が関係していると思われるため電力密度パターン(Fig.6)と比較を行った。その結果類似が認

められ、そのパターン領域では電力密度が高くなる
ことが分かった。電力密度が高いところでは土壌の
水の蒸発や地温の上昇が起こり、植物の成長に影響
があったと推察している。また、成長の良い 30 cm幅
の領域では植物の成長にとって最適に近い環境に
なったと思われる。この詳細については 5 章で述べ
る。この成長も10月後半から他の領域と共に成長が遅
くなり始めた。このドーナツ形状の成長領域は定期

絶縁試験によるマイクロ波の4日間の停波や11月から
の気温や地温の急激な低下によって成長がしにくく
なったり、自然消滅が徐々に起きた。またマイクロ
波の照射と気候とのアンバランスが生じ、植物にと
って最適な気象条件からずれたため、成長がしにく
くなったと思われる。

§ 5 長期間データの取得

植物は成長するときに光、水、温度の3条件により
成長減少が促進されたり、枯れたりすることになる。
この条件にマイクロ波がおよぼす影響についても調べる
必要がある。これは植物自身に対して今までの実験結
果からでは明確な影響が見い出されていないためである。
マイクロ波の影響が顕著にあらわれるものを推察すると
土壌の水分の変化や地温の上昇が考えられる。したがっ
てマイクロ波の土壌に対する物理的な情報を取得するた
めに、土壌の水分を測定するセンサーを3箇所、温度を計
測するサーミスターを6箇所設置した。Fig.10に測定ポ
イントを示す。測定ポイントはマイクロ波の照射領域前
後で60cmずつ離れた位置とした。また、気温や紫外線
などのデータもあわせて自動取込みを行って連続照射
実験中の変化を測定した。これは1999年9月から実施
した7回目の植物の照射実験中のデータである。Fig.11
にはその照射実験中の気温と地温の変化を示す。計測
は種を植える前から実施したが、同図においては植物
の成長状況に合わせてある。地温データを見ると9月
の終わりから10月10日までは20 以上と高い日が続
いているが、10月終わりになると15 程度になっている。
しかしマイクロ波照射部の土壌での地



Photo immediately after germination.



Photo at 10days after seeding.



Photo at 24days after seeding.

Fig.9 Growth of komatsuna

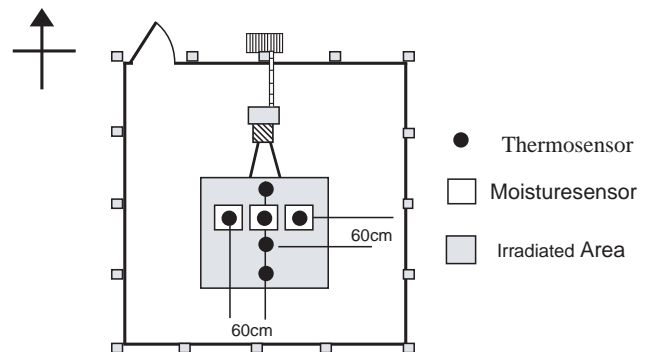


Fig.10 Sensor positions inside the irradiated area

温はマイクロ波が照射されていないポイントより平均して 10 程度高く計測されている。この期間の気温の変化と地温の変化の割り合いはほぼ同じである。ただし、地温は気温よりも1 時間ほど遅れた変化を示している。次に土壤の水分の割り合いを比べてみる。Fig.12 は土壤に含まれている水分の変化を示す。10月7日ころと10月15日ころに雨による降水によって各測定ポイントで含水量に変化が認められた。中心部のセンサーの変化が大きいことから、マイクロ波の電界がセンサーに重畳し、計測器に影響をおよぼ

していると思われる。これらの温度や含水量データからも7 回目の小松菜の中心部でドーナツ状の領域が見えたことから植物の成長に影響をおよぼしたと思われる。ただし今回のマイクロ波照射電力密度はSPSの電力密度よりも高いことから、電力密度が低い場合での照射実験が必要である。

§ 6 まとめ

マイクロ波照射施設の電磁波の漏洩による人体などに対する安全性を確かめてから施設の長時間動作と植物照射実験を1996年から1999年12月までの期間に7 回実施した。実験は雷による停電、マグネトロンを取り替え、商用電源設備の工事、整地作業などの期間を除き実施できた。照射装置の稼働時間はFig.13に

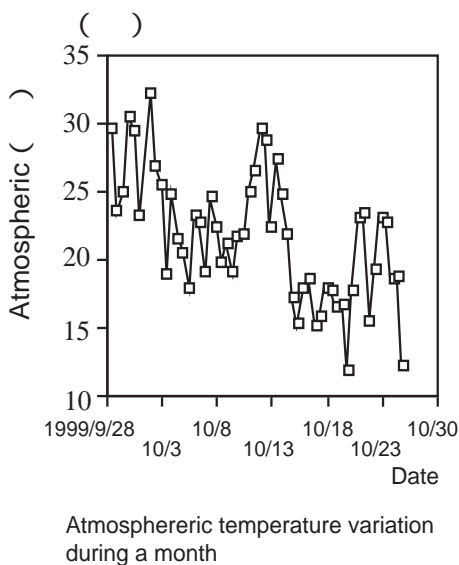
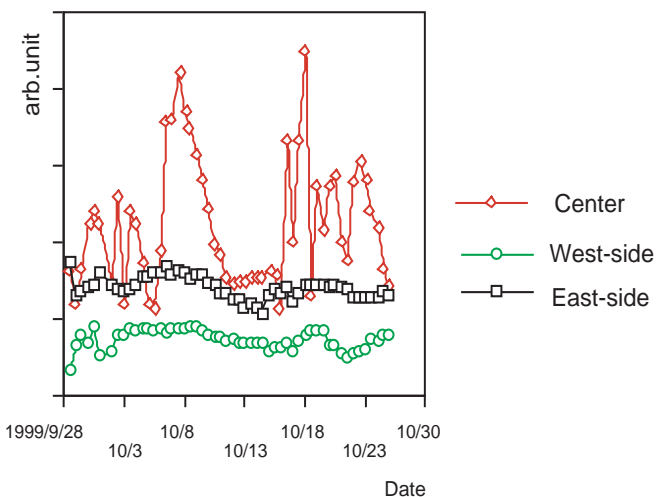
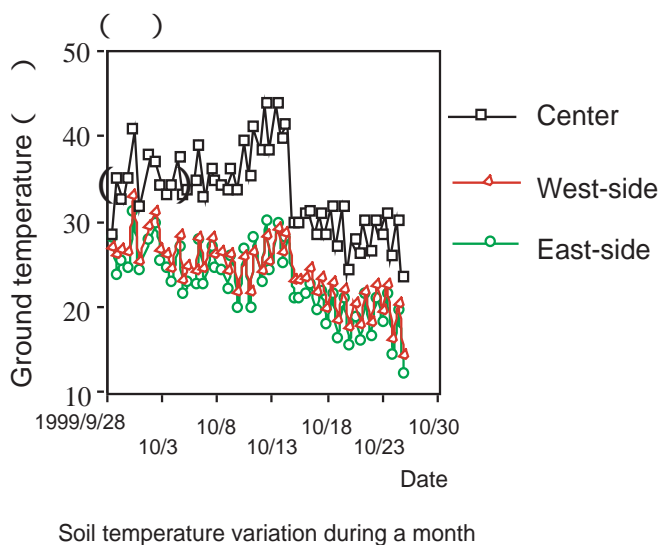


Fig.12 Monthly change of water content

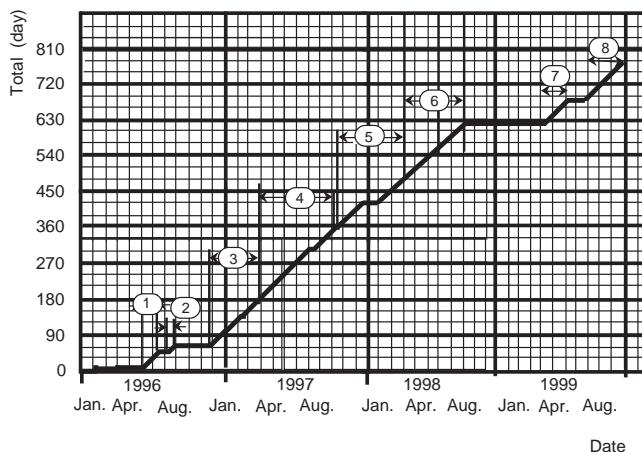


Fig.11 Atmospheric and soil temperature variation during a month

Fig.13 Accumulated working times

示すように17000時間である。

SPS に用いられる電力密度で植物への照射実験は6回実施したが明確な結果が得られなかった。このため電力密度を今までより3割上昇させて植物の成長を観察したところ、マイクロ波照射部中心附近の領域で成長の減少が、また、その外側の周り幅30cmほどの領域では逆に周りと比べて助長された領域が生じた。これと並行して取得した地温などの物理的なデータからは地温の上昇が計測された。このことから電力を増加させることによってマイクロ波が植物の成長段階に何らかの作用を与えたと思われる結果が得られた。

§ 7 おわりに

SPSの実用化に向けて地球環境に及ぼす影響はまだ未解決の部分が多い。今までに蓄積された植物照射のデータから植物の生理的問題、土壌の問題、気候の問題などを総合的に比較研究を進める必要性が明らかになってきた。植物の成長パラメーター^{11,12)}の基本は大気と土壌で、例えば、大気では湿度、降水量、気温、日照などで、土壌では貯水・浸透機能、浄化機能、断面形状、物理性、化学性などである。従ってマイクロ波の土壌におよぼす挙動から物理的な特性を長期間にわたって調べ、植物などの生体系への影響や将来設置される地上受電設備などの周辺部での影響などの問題点を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 工藤 他：電総研彙報 第57巻5,6号(1993)1
- 2) 黒谷 他：第9回宇宙エネルギーシンポジウム, 1990, p. 121
- 3) 松本 他：電気学会誌 1979.3
- 4) 多気：マイクロ波の生態系への影響に関するシンポジウム(1994)8
- 5) 村上 他：第14回宇宙エネルギーシンポジウム(1995)64
- 6) 村上 他：第15回宇宙エネルギーシンポジウム(1996)24
- 7) H. Murakami et.al. :Space Energy and Transportation, Vol.1, No.4 308 (1996)
- 8) 村上 他：第16回宇宙エネルギーシンポジウム(1997)65
- 9) 村上 他：第17回宇宙エネルギーシンポジウム(1998)
- 10) 村上 他：第1回宇宙太陽発電システムシンポジウム(1999)56
- 11) 農水省種苗管理センター：種子試験法 1988
- 12) 国際種子検査協会：芽生評価ハンドブック 1993

(2000.2.22受付)