

植物を使った地球環境浄化は可能か

森林圏遺伝子統御分野 矢崎一史

1. はじめに

20世紀における人間活動の発展は、生活の豊かさの反面で地球環境の悪化をもたらした。悪化した環境は地球上広くに広がっており、大気中ではNOx、オゾン、CO2などが問題となっており、水質環境中ではハロゲン化炭化水素、富栄養化による汚濁、環境ホルモン類などが、また土壌環境中では内分泌かく乱物質やダイオキシンなどの有機化合物が大きな社会問題とされている。これら様々な汚染のうち、分解解毒することができないため非常に厄介とされている汚染物質に有害重金属がある。重金属による汚染は水や土壌環境中に存在し、比較的低濃度であっても非常に広範囲に拡散しているため、農作物などの食物中に吸収された後濃縮され、結果としてそれを食べる人間や家畜に甚大な被害を引き起こす。現在、全地球レベルで早急に解決すべき問題とされている環境汚染の一つである。特に、ここ日本では米が主食とされ、米は自給可能な唯一の穀物という認識が浸透しているところであるが、その日本産米に比較的高濃度のカドミウムが含まれているという大問題を聞いたことがある人も多いだろう。カドミウムなど重金属は、農薬のような有機化合物と異なり、それ以上分解して無毒な物質に変換することができない。一度広がってしまったこの分解不能な汚染物質を、どうやったら浄化することができるのだろうか。

2. 植物と重金属

カドミウムなどの重金属は、もちろん植物にとっても基本的には有害である。しかし、一口に「有害」とは言っても、問題となるのはその「程度」である。例えば、米にカドミウムが混入してしまうというのは、見方を変えればカドミウムがある程度存在していても、イネという植物は正常に実を付けてしまうということを意味している。もしイネが低濃度の重金属で障害を受けるとするならば、不健康なイネができるはずである。ところが、実際には少々カドミウムが入っていてもイネは見た目どうもない。どうもないから収穫され、基準値さえクリアしていれば売り物となる。しかし人間にとって米に混入したカドミウムは有毒である。つまり、植物は人間に比べてカドミウムに対する感受性が低い、言葉を変えると「カドミウムに強い」からこの様な問題が生じるのである。

因みに厚生労働省国立医薬品食品衛生研究所は、1977年から2001年度にわたり日常食の汚染物質の摂取量調査を行っており、2001年度の調査結果によれば、日本人の日常食からのカドミウムの摂取量は1日29.3mgで、この10年間ほとんど変わっていないということである。一方で、このカドミウムの摂取量をWHOなどの合同食品添加物専門家会合で定めた暫定耐容摂取量と比較すると、カドミウムはヒトの体重1kg当たり1週間7mgまでと定められていることから、体重50kgの人は1日50mgが暫定耐容摂取量になる。つまり、日本人の食品からのカドミウム摂取量は、暫定耐容摂取量の約6割に当たる。なお日本では、主食であることから米からのカドミウム摂取は、食品からの全カドミウム摂取量の約2分の1にも相当する。

参考までに国際基準例がどうなっているかを見ると、予備的な段階では、米1kg当たりに含まれるカドミウムの上限許容量を0.2mg (=0.2ppm)とする案が提案されていた。しかし平成16年3月の食品添加物・汚染物質部会において、上限許容量を0.4mgとする案に変更し、さらに検討が進められている。

3. 植物がカドミウムに強いなら・・・

カドミウム汚染土壌をきれいにする方法としてすぐ出てくるのが、「汚染土壌を削り落としてどこかに移動する」という解決策である。しかしそれでは、その汚染土壌をどこへやるのか、あるいは土をそのまま浄化したらいったい1トン当たりいくらのお金がかかるのか、といった諸問題が出てくる。狭い範囲で高濃度の汚染ならばそれも可能であろうが、現実の問題となる汚染は低濃度で広範囲であるから、結論としてやはりこれは実用的ではない。

この問題の解決法の一つとして、「植物がカドミウムに強いならば、いっそのこと植物を用いて環境浄化をしてしまおう」というアイデアが出てきた。これが、植物による環境浄化技術、「ファイトリメディエーション」である。図1にそのイメージ図を示す。ファイトリメディエーションは、植物の持つ本来の機能を利用した環境浄化法であり、実際にこの浄化プロセスを動かすのは太陽エネルギーである。基本的には水さえやってあげればいいので、経済的に安いというのがこの方法の一つのセールスポイントである。もちろんデメリットもあるが、これは講演で解説する。ここではファイトリメディエーションについてもう少し説明を加えたい。

琵琶湖の水質をきれいにしてきているものに、湖岸に生えている葦がある。このように、そこにあるがままの植物を使って環境がきれいになるならば言うことはない。しかし、自然の持つ浄化力にはおのずと限界があり、それを越えてしまったから現在の汚染が存在するのである。つまり汚染地区の多くでは、自然の自浄能力が既に越えられた状態にあると思われる。しかも今後さらに増え続ける人類とその経済活動の前で、環境汚染はその深刻さを深めこそすれ、天然の力をもってこれを軽減する方にはおそらく行かないだろう、というのが私の考えである。人口は増え続けても生存するための地球上のスペースは変わらない。しかも、人間誰も高い質の暮らしをしたいのであり、それはそのまま環境に付加を与えることになる。

以上のような状況の中、現在の技術レベルをもって、重度のかつ複雑な汚染に対して植物を用いた浄化対策を考えるならば、やはり遺伝子操作技術の応用に頼らざるを得ない、というのが現実であろうと思う。植物の遺伝子操作に関しては、本講演会の後半で時間をとってできるだけ分かりやすく説明しようと思うが、環境汚染に対する遺伝子組換え植物を考える場合、まずどういった遺伝子を用いたらよいか問題となる。我々はその一つの方向性として、ABCトランスポータ遺伝子といわれる一群の遺伝子に着目した。

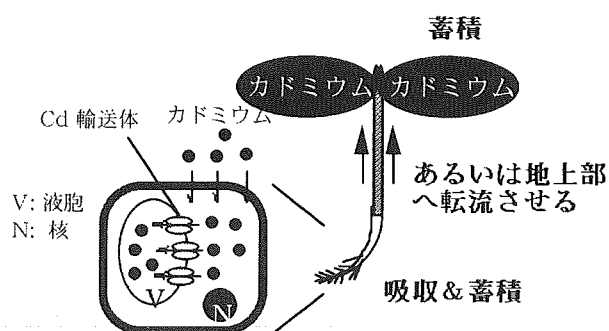


図1. カドミウム輸送体蛋白質を用いたファイトリメディエーション

4. ABC トランスポータとは

ABCトランスポータは、ATPの加水分解エネルギーを利用して、物質を膜を通して輸送する膜タンパク質の一大ファミリー(ABCスーパーファミリー)である。ABCとは、ATP-binding cassetteの略で、分子内にATPを結合するドメインを持っており、そのアミノ酸保存性が高いことからこのように呼ばれる。

図2の下には、その生体膜上の推定構造を示した。ここに表したように、ABCトランスポータの典型的なものは膜を10数回も貫通している蛋白質で、その一方にABCの部分(ヌクレオチド結合領域とも言われる)を有している。この構造において、左半分と右半分が互いに類似しているため、ちょうどユニットが2つタンデムに並んだようになっている。この膜貫通領域が束のように集まり、膜を通して物質を運ぶ役割を果たしていると考えられている。輸送のモデルを図2の上を示した。細胞の中にある物質(星印で示した)が、このトランスポータ蛋白質に認識されると、その脇に結合して

いた ATP が加水分解され、そのエネルギーを使って、物質は膜の内側から外側に向かって運ばれる。ちょうど、ポンプがガチャガチャと、こちらから向こうへ物を運んでいるようなイメージととらえてもらったら分かりやすいと思う。

因みに、ABC トランスポータは、バクテリアから人に至るまで、全ての生物に存在するとされ、様々な働きをしている。ヒトの例で有名なのは、癌細胞である種の ABC トランスポータが多く発現すると、細胞内に入ってくる抗癌剤をこれが全部外に汲み出してしまいうため、薬が癌に効かなくなるという現象である。この場合の ABC トランスポータは癌治療を妨げる「悪役」になっているが、多くのヒト ABC トランスポータ分子は、生命活動が正常に働くように機能している。バクテリアなどでは、逆に栄養を細胞の中に取り込もうとするときにこの種のトランスポータが働くことが知られている。植物においては、ABC トランスポータの働きは未だ不明の部分が多いが、生体異物の解毒作用に加えて、生育や体の形を形成するプロセスに必須な植物ホルモンの輸送などに関与することが明らかにされつつある段階である (図 3)。今この領域は、植物研究の中でも最も競争が激しくなっている分野の一つでもある。

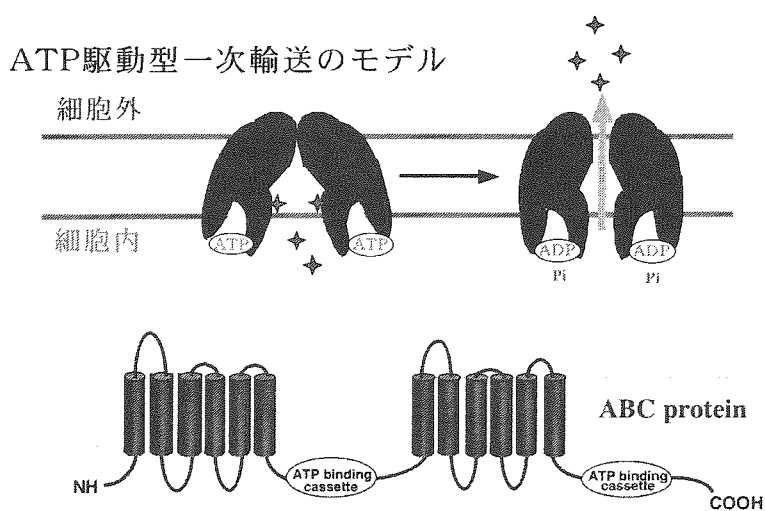


図 2. ABC タンパク質の構造と輸送のモデル

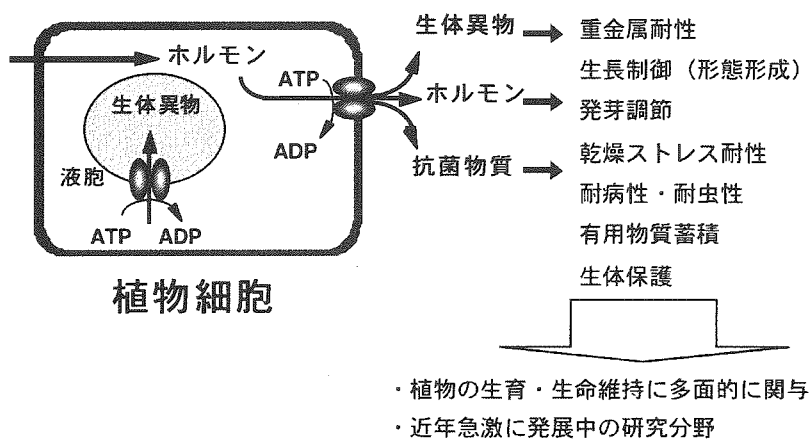


図 3. 植物における ABC トランスポータの役割

ABC トランスポータは種類が多く、その構造上の特徴からいくつかのグループに分けられている。我々は、ABC トランスポータの中に重金属を運ぶものがあることに注目した。これまでいくつかの分子で重金属の輸送が知られているが、最初我々が実験に用いたのは、MRP (multidrug resistance-associated protein) と呼ばれるグループに属する分子 hMRP1 である。このグループに属する ABC トランスポータは、グルタチオン依存的に有機物質だけでなくカドミウムも輸送することができるという特徴を持つ。グルタチオンは、体内に入ってきた異物を解毒するために、ヒトや植物が細胞内に普通に持っている化合物である。

5. ABC トランスポータを用いた環境浄化の試み

我々は、ABC トランスポータ遺伝子を用いて、植物で物質輸送を改変する技術「輸送工学」により、環境浄化ができないか試みた。つまり、重金属を運べる ABC トランスポータ蛋白を植物細胞で発現させれば、それがカドミウムの組み込をする「分子ポンプ」として機能し、水質および土壌環境中に存在するカドミウムを吸収除去する植物を作成することができるだろう、というのが基本的な概念である。しかも、この ABC トランスポータはカドミウム以外の重金属や有害有機物質をも輸送することができる。一般に遺伝子操作によるファイトリメディエーションでは、単一の汚染に対しては対応できても複合汚染には適さないという弱点が指摘されている。本研究ではこの特性を利用して、ABC トランスポータ遺伝子を用いたファイトリメディエーションにより、複合汚染を浄化できる植物の創出を試みた。うまく働けば、有機系有害物質である PCB やダイオキシンのような汚染物質に対しても、この形質転換植物は浄化能力があるかもしれないとの可能性も考えてのことである。

遺伝子を導入するに当たっては、どの植物を使うかを考えた。ホスト植物としては、最初の試みであるため、形質転換や膜分画の容易なタバコをモデルに選択し、hMRP1 遺伝子導入タバコを作成した。遺伝子レベルの解析をしたところ、実際にタバコに導入した hMRP1 遺伝子はきちんと発現していた。また哺乳類の hMRP1 蛋白質が期待通りタバコ細胞の液胞膜に存在することを確認した。そのタバコの様子を示した写真が図4である。

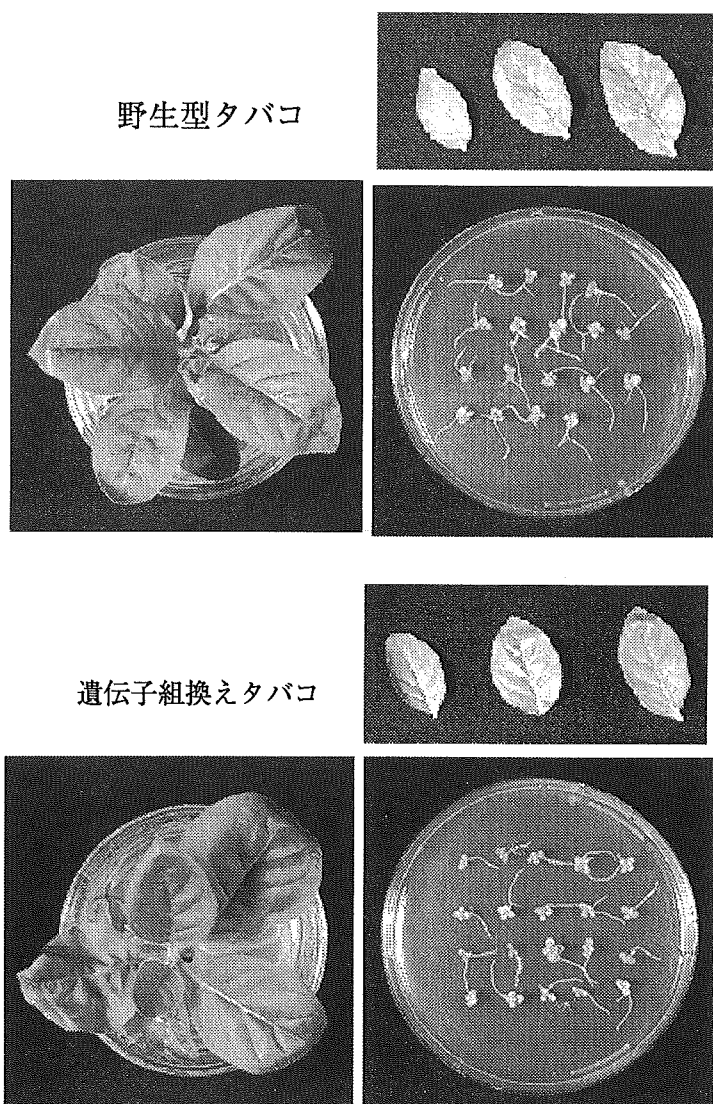


図4. ABC トランスポータ遺伝子の導入されたタバコ

写真で示す通り、発芽の様子、植物体の形、葉の数、生長の度合いなど、外見的に野生型のタバコと全く変わらない組換えタバコができた。この hMRP1 を発現しているタバコの培養細胞を用いて、カドミウム耐性を調べた。すると、野生株に比べて、形質転換タバコはカドミウムに耐性があること、しかも細胞の中に野生株より効率良くカドミウムを蓄積できることが明らかとなった。

次いで、有機物質に対してはどうであろうかと考え、DNA の複製阻害をする薬剤であるダウノルピシンを与えてみた。すると、この hMRP1 発現タバコは、ダウノルピシンに対しても高い耐性を示し、やはりこの薬剤を細胞の中、特に液胞の中に蓄積することが認められた。図5は、ダウノルピシンがオレンジ色の蛍光を持つことを利用して、蛍光顕微鏡で観察したタバコ細胞の写真である。細胞の中にダウノルピシンの蛍光がたまっているのが認められる。

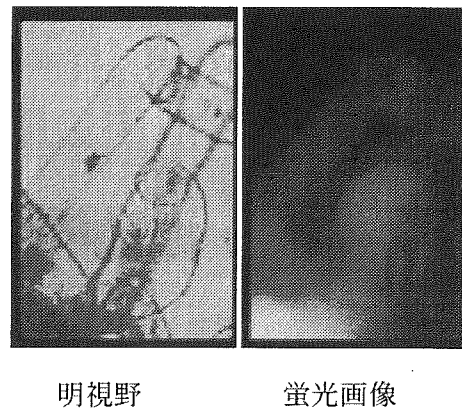


図5. ダウノルピシンは hMRP1 発現タバコの液胞に貯まる

6. カドミウムを蓄積した植物をどうするか

以上のように、MRP1 発現タバコ培養細胞は、ダウノルピシン等の薬剤や重金属であるカドミウムに対して耐性を示したが、この時培地に残存するカドミウム含量を追跡したところ、培地のカドミウムをより効率良く吸収できることが示された。このことは hMRP1 が分子ポンプとして細胞外のカドミウムを液胞内に効率良く運んでいることを示している。今後は再分化植物個体を用い、モデル土壌におけるカドミウムの吸収効率を調べる予定であるが、これがうまく行ったら、ではカドミウムを吸収した植物をどうするのであろうか。

重金属は分解による解毒が不可能であるため、一度回収したら、酸などで安定化させて保管するか、再利用するしか方法がないと思われる。図6には、重金属を蓄積した植物を回収し、重金属の再利用を想定した場合のスキームを示している。もちろんコスト面から考えれば、現時点では少なくとも、重金属の回収再利用にメリットはない。しかし、私は経済原理に反してでも、植物から重金属を回収する技術を確立し、リサイクルする方向で研究は進められねばならないと考える。植物を利用した重金属の生体濃縮はコストがかからない。この様に植物は低濃度だが広範囲の汚染土壌から低コストで重金属を回収できる点で、環境浄化に資することができるかと期待している。

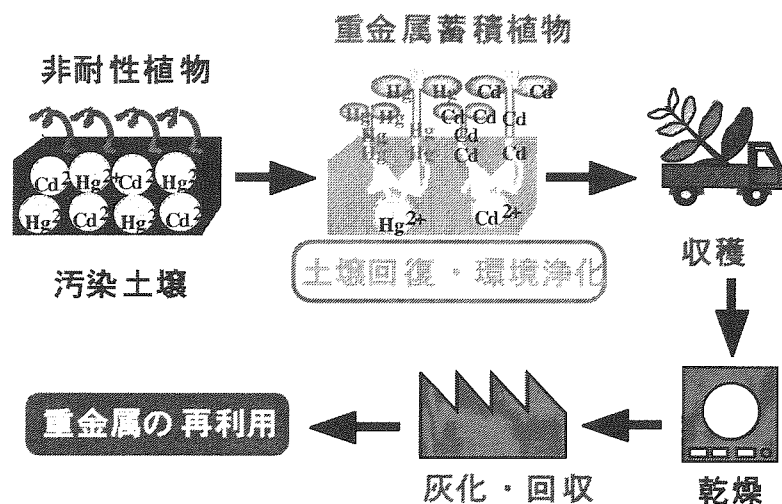
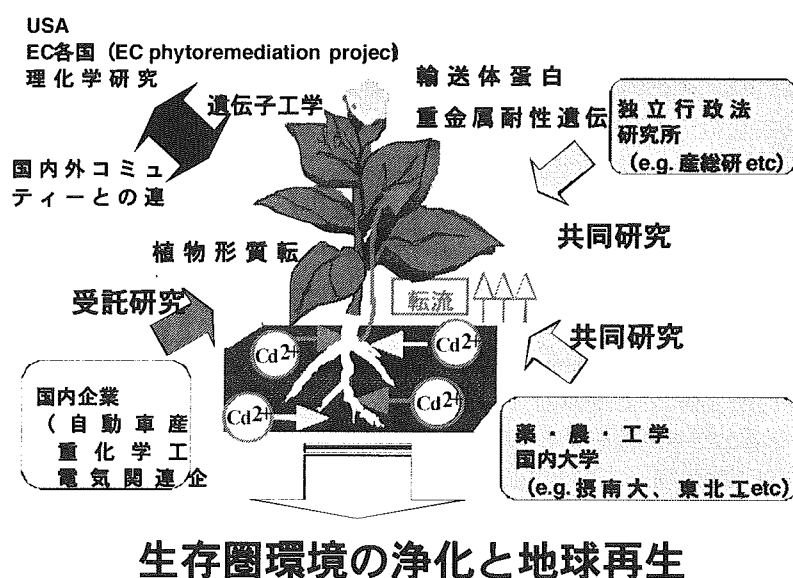


図6. 環境浄化植物と金属のリサイクル

7. 人類と地球の共存に向けて

環境浄化型植物の作出研究は、まだその緒についたばかりである。実用化に即したファイトリメディエーションにおいては、さらに用いるトランスポータ遺伝子の種類、発現プロモータの改変やホスト植物の選択など様々な発展性があり、非常に大きな研究分野へと広がるポテンシャルを有している。ただし、植物を用いる限り、環境の浄化には、それなりの時間がかかることを理解してもらわねばならない。人間が100数十年かけて汚してきた地球である。その浄化に時間がかかるのはやむを得ないと考えらるべきであろう。大切なのは浄化活動を継続することである。21世紀の生命科学研究において、環境問題は益々重要な位置を占めるようになると予想される。我々も本領域研究の更なる発展に寄与していきたい。



参考文献

- 1) 矢崎一史：高等植物におけるABC蛋白質スーパーファミリー：その多彩なメンバーと機能ポテンシャル バイオサイエンスとインダストリー, Vol. 60, p. 17-22 (2002).
- 2) 矢崎一史：ABCトランスポーター、「植物の膜輸送システム 植物細胞工学シリーズ18」（監修：加藤 潔、島崎研一郎、前島正義、三村徹郎）、秀潤社p. 119-128 (2003)
- 3) 土反伸和、矢崎一史：植物ABCタンパク質スーパーファミリーの多様性生化学，印刷中
- 4) N. Shitan, I. Bazin, K. Dan, K. Obata, K. Kigawa, K. Ueda, F. Sato, C. Forestier and K. Yazaki: Involvement of CjMDR1, a plant MDR-type ABC protein, in alkaloid transport in *Coptis japonica*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 100, p. 751-756 (2003).
- 5) K. Terasaka, K. Sakai, F. Sato, H. Yamamoto and K. Yazaki: *Thalictrum minus* cell cultures and ABC-transporter. Phytochemistry, Vol. 62, p. 483-489 (2003).
- 6) K. Yazaki: Natural Products and Metabolites, The Handbook on Plant Biotechnology (Edited by Christou, P. and Klee, H), John Wiley & Sons, P. 811-857 (2004).

大型レーダーで高層大気の謎解きに挑む

京大生存圏研究所 深尾昌一郎

概要

高度1万メートルを越える高層の大気はかつて目に見えるものが何もない静寂の世界と考えられていた。しかしこれに電波を当てるとその姿が鮮やかに映し出される。電波を用いるレーダーが捉えた高層大気は「波」が激しく渦巻く世界であった。地球環境変動にも深く関わっている。

1. 大気と電波とレーダー

私達の周囲には様々な電波が飛び交っている。それが証拠に至るところで携帯電話が使われている。パソコンで無線ランをやっている人も多く見掛ける。余程辺鄙なところでない限りテレビも映る。その混雑ぶりが目にみえないのは誠に幸いと言うべきである。一方、地球の大気も目には見えない。気象衛星「ひまわり」が写し出す変幻自在の画像は見るものを飽きさせない。しかし、これは雲を写しているわけで、決して背景の大気が見えているわけではない。一体、大気を見ることなど出来るのだろうか？今、大気研究の分野で電波を用いて大気を見る研究が盛んに行われている。大気は一般に、電波が通過(伝搬)する媒体であり、大気自体から強い電波が放射されるわけではない。しかし通過する電波をほんの僅か散乱する。一寸した工夫をすればそれを捉えて大気を調べることが可能となる。『レーダー』という技術を用いるのである。

レーダー(radar)はRAdio Detection And Rangingからの造語とされている。その語源が示すように強い電波を極く短い時間発射(これをパルスという)し、航空機や船舶のような標的に当てて、散乱(又は反射)されて返ってくるエコーを検出する装置である(図1)。標的の方向はエコーの返ってくる方向から分かる。また電波は大気中を光速で伝搬するので、標的までの往復時間を測ると標的までの距離も知ることができる。一方、自動車の速度違反取締りにレーダーが用いられているのは既におなじみであろう。動いている物体に電波を当てるとエコーの周波数が発射電波の周波数から若干ずれる原理(ドップラー効果)を利用したもので、そのずれ(ドップラーシフト)の大きさから物体の動く速度を直接求めることができる。ここで紹介する大気を調べるレーダーも原理は同じである。ただしこのレーダーの標的はレーダー電波が通過する大気そのものというわけである[例えば、深尾・浜津, 2005]。

2. ISレーダー：高層の大気を測るレーダー

地球の大気温度が特徴的な高度変化をしていることはよく知られている。それに対応して下から順に、対流圏(地表～高度約15km)、成層圏(同15～50km)、中間圏(同50～90km)、及び熱圏(同90km以上)と区別される。熱圏では大気の一部が電離していることから電離圏と呼ばれることもある。

大気レーダーの起源は電離圏を調べるレーダーにある。アマチュア無線やFM放送に使われている数10MHz帯の電波を地上から上空に向けて発射するとどうなるか？電波は当然希薄な大気を突き抜けて宇宙の彼方へ飛び去る。しかし電離圏には多数のイオンや電子が存在する。それらが電波により揺り動かされる。とくに質量の小さい電子の揺れ動きは大きい。このため今度は、個々の電子が波源となって電波を散乱することになる。電子のランダムな熱運動のため、散乱される波の位相もランダムとなるのでこの散乱は『インコヒーレント散乱(IS)』と呼ばれる。インコヒーレント散乱の強さはレーダーに照射される個々の自由電子が散乱する波の寄せ集めであり、当然極めて微弱である。1950年代も終わりの頃、この超微弱なエコーが当時の技術レベルで充分検知可能だと考えた若い研究者がいた。米国コーネル大学のゴードン(W. E. Gordon)である[例えば、深尾, 1993]。

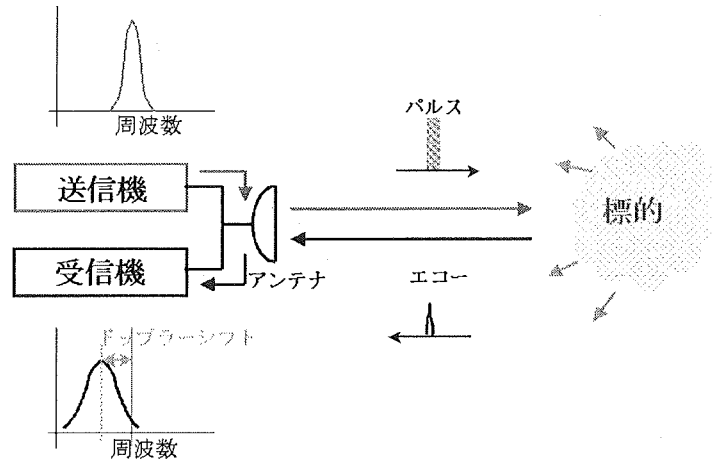


Figure 1: レーダーの原理. 得られる「情報」には標的の位置・方向・速度等様々なものがある.

レーダー電波の散乱の強さは標的の断面積に比例する. 電離圏からのインコヒーレント散乱の場合, 散乱に寄与する自由電子の断面積は航空機や船舶などは較べものにならない程小さい. レーダーが照射する自由電子をすべて寄せ集めても高度 300km でせいぜい 10^{-4}m^2 , つまり直径約 1cm の金属球に相当する小ささである. それを検出するにはそれまで考えられたことがなかったほどの巨大なアンテナと大放射電力が必要である. しかし, 隆盛期にあった当時の米国にとってこれは甚だ魅力的な未知への挑戦であった. 早速ゴードンの予言に従って, 直径 300m のアンテナで放射電力数メガワット (MW) の送信機を持つ大型大気レーダー (これをインコヒーレント散乱レーダー, 略して『IS レーダー』と呼ぶ) がプエルトリコのアレンボとペルーのヒカマルカに建設された. 1960 年代も前半のことである [例えば, 深尾, 1993].

電離圏中の自由電子は熱運動しているので個々の電子のドップラーシフトは様々であり, エコーのスペクトル (ドップラースペクトル) はレーダーの発射周波数のまわりに広く分布する. このスペクトルの形状は電子やそれと電氣的に影響し合っているイオンにより定まるので, 逆にスペクトルを測定してそれらの物理量を推定することができるわけである. 例えば, 電子やイオンの密度と温度, イオンの組成, イオンが運動 (ドリフト) する速度, 中性大気の運動 (風) と温度など様々な物理量がこのスペクトルから一挙に求められる. この原理をもとに電離圏や熱圏の構造と運動の謎が次々解明された. その間に, 米国, フランス, 北欧, グリーンランドなどにも大規模な IS レーダーが続々建設された. 最近, 米国はアラスカ州に巨大な高性能 IS レーダーを建設中である. これらの IS レーダーが熱圏・電離圏研究に果たした役割は誠に大きいものがあった [例えば, 深尾, 1993].

3. MST レーダー：大気を測るレーダー

1970 年代の初めになって, 高度 70~80km から強い散乱エコーが戻ってくるが見出された. このエコーは電離圏中のように自由電子が直接散乱するものではない. 中性大気の乱れ (乱流) により大気の電波屈折率が変動するために起こる散乱である. この散乱はインコヒーレントではなく, 若干のコヒーレント性を持つため『コヒーレント散乱』と呼ばれる.

乱流は様々な大きさを持つ乱渦と呼ばれる渦の集りで表現される. 一般に乱流のエネルギーは大きな乱渦から小さな乱渦に移っていき, やがて粘性のため熱となり消える. レーダー電波の散乱に寄与するものは電波の波長の半分の大きさの乱渦だけである. 粘性でつぶれる乱渦の最小スケールは対流圏では 1cm 位である. しかし, 乱渦の最小スケールは高度と共に指数関数的に大きくなる. 従って高い高度からのエコーを受けるためにはレーダーの波長は出来るだけ長い (周波数が低い) ほどよい. 大気圏全域をカバーするには 50MHz (波長 6m) 程度の周波数が適当とされている. この大気散乱エコーの発見は, 電離圏

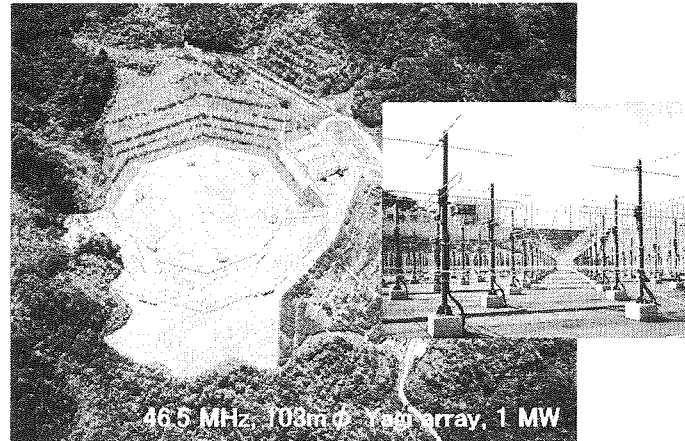


Figure 2: 京都大学 MU レーダーの全景。滋賀県信楽町の国有林内にある。中央の直径 100 メートルの円形内がアンテナアレイ。その周辺の 6 棟の建屋に 475 台の小型送受信機が収納されている。

だけでなくその下に広がる中性の地球大気の観測にも大気レーダーが活躍できる道を拓くものであった [例えば、深尾・浜津, 2005]。

乱渦は背景の大気の流れつまり風に乗って移動 (移流) していくので、これを「トレーサー」と考えてエコーのドップラーシフトから風速の視線方向成分が推定できる。鉛直流を含む風速の 3 成分は、天頂付近の異なった 3 方向にアンテナビームを向けてそれぞれの視線方向速度成分から計算により求めることになる。

上層の大気の風速を測定できるこの技術は、当時まだ十分に理解されていなかった中層大気 (Middle atmosphere; 高度 10~100km の範囲で、成層圏・中間圏及び熱圏下部を含む領域) の解明を目指していた研究者がすぐ着目するところとなった。このための専用の大型レーダーの建設が米国、西独はじめ各国で始まった。このタイプの大気レーダーは中間圏 (Mesosphere), 成層圏 (Stratosphere) の一部や対流圏 (Troposphere) の観測が可能であることから、それぞれの大気圏の頭文字を取って MST, 或いは ST/T レーダーなどと呼ばれている [例えば、深尾, 1993]。

MST レーダーの標的は電離圏の自由電子に較べて相対的に大きく、しかも距離 (高度) も近いことからレーダーの規模は IS レーダー程大きくする必要はない。アンテナの大きさとして直径 100m, 放射電力は数 100 キロワット (kW) 程度あれば充分とされている。今日では各国の MST レーダーの活躍はめざましく、人工衛星と共に大気観測の強力な計測器として定着している [例えば、深尾, 1993]。

4. 京都大学の MU レーダー

京都大学の我々のグループも大気散乱エコーの発見と前後してこの種のレーダーの建設を計画し、1984 年 11 月、陶器で有名な滋賀県信楽町の国有林内に完成させた [Kato et al., 1984]。このレーダーは MST レーダーとして世界最高性能を誇る他、IS レーダーとして超高層大気 (Upper atmosphere; 高度 100km 以上の熱圏・電離圏) の一部も観測できるので『MU (Middle and Upper atmosphere) レーダー』と名付けられた。直径 100m の円形凹地に八木アンテナ 475 基を設置している (図 2)。50MHz に近い周波数が用いられているのは先に触れたように中層大気全域を観測するためである [Kato et al., 1984; Fukao et al., 1985a, b]。

MU レーダーには他の MST レーダーや IS レーダーにない特徴がいくつもある。なかでも特筆すべきは、MU レーダーには巨大な送信機が見られないことである。そのかわり各アンテナにそれぞれ小さな半導体送受信機が取り付けられている。一個の小型送受信機の発射電力は 2.4kW にすぎないが、アンテナと同数の小型送受信機を同時に働かせることにより 1MW の発射電力を得る仕組みになっている。この結果各ア

ンテナからの発射電波の位相を容易に変えることができる。この位相変化をコンピュータ制御により系統的に行うことでアンテナビーム方向を高速に変えることができる。ビームの方向変化はパルスを発射する毎に、つまり最高 2,500 分の 1 秒毎に可能であるのでほぼ瞬時にアンテナビームを望む方向に向けることができる [Fukao et al., 1985a, b]。現在に至るまで MU レーダーは時間的変動の激しい大気の乱れを観測可能な世界で唯一のレーダーである。

5. MU レーダーが捉えた大気の波

MU レーダーをはじめとする MST レーダーが観測する物理量は本質的にレーダーの真上の高さ方向の一次元量である。しかし、観測を時間的に連続に行える点が大きな特徴となっている。観測の間隔は観測高度にもよるが中層大気では 1~10 分程度である。定常気象観測で用いられる気象ゾンデの放球はせいぜい一日に 2~4 回、気象ロケットに至っては週に 1 回以下であることからレーダー観測の威力を理解していただけるだろう。一般に、中層大気の現象は様々な波動——大気波動——が重なったものとして理解することが出来るので、レーダーで高さ-時間の高分解能二次元データが得られることは、解析に甚だ好都合である。以下では特に MU レーダーが解明に大きな寄与をしたひとつの大気波動を取り上げよう。

有名な葛飾北斎の富嶽三十六景神奈川沖浪裏に描かれた躍動感溢れる波の姿を思い浮かべていただきたい。水面の波は、盛り上がった水面が地球の重力によって下に引き降ろされ、その反作用で隣の水面が持ち上げられることにより水面の高低が波の形で次々前方へ伝わって行くものである。この波は地球の重力により作られる波であることから、『重力波』と呼ばれている。目には見えないが実は大気中にも水の場合と同様の重力波が存在する。例えば山並に平行してきれいな雲の列が生じているのを見ることがある。これは山越え気流が山脈を通り過ぎるときに風下に発生する大気重力波によってできるものである [例えば、深尾, 1993]。

大気重力波は水面の波と異なり、主として対流圏でつくられ大空高く伝搬して行く。高度とともに大気密度が減少するにつれ波の振幅が指数関数的に増大しついには不安定になって壊れてしまう。電波の散乱に寄与する乱流はこうして作られるのである。MU レーダーでも中層/超高層大気の至るところで大気重力波や乱流が観測されている。

では、この種の波は地球大気全体の大規模な運動にとってどんな役割を担っているのだろうか？気流が山を越えるとき、山は抵抗を受け、その反作用として山を越える気流自身にも一種の抵抗が働くことは力学の教えるところである。気流は山だけでなく、例えば雲(上昇気流)の上を越える場合にも抵抗を受ける。気流が受けるこの減速作用は、山や雲に接した空気だけが感じるのではない。発生した大気重力波が上方へ伝搬することから、上空の高いところで吹く風もまたこの減速作用を受けることになる [例えば、深尾, 1993]。

地球規模の大気の運動として高度 60~80 キロメートルあたりを中心に夏は東風(西向きの風)、冬は西風(東向きの風)が吹いていることはよく知られている。しかし、ひとつの興味深い謎は、高度 80 キロメートル付近にいつも風速の非常に弱い層が存在していることであった。太陽による加熱だけで気圧分布が決まるとするとその高度で風速が弱まることはない。実はこの事実の説明に大気重力波が上方に伝搬し、ブレーキとして働いていると言う説が多く気象学者により提唱されていた。MU レーダーで観測される大気重力波について、その背景風の減速量が求められた。その結果、確かに東風が吹く夏には東向きの、西風の吹く冬には西向きの抵抗が発生し、背景風を減速することが明かとなり 10 年来の謎が解明された [Tsuda et al., 1990]。

大気レーダーが本格的な観測を始めた 1970 年代のはじめまで、中層大気は何も起こらない静寂の世界と考えられていた。しかし実態は大気重力波の荒れ狂う世界であることが明らかになりつつある。中層大気中で物質やエネルギーを運ぶ主な担い手がこれらの波であることも明らかになりつつある。しかし、これらの波が一体どこで発生しているのか？上で触れた、山岳のほか、積雲対流や台風、或いは前線などでも大気重力波は作られているらしい。ではその強さや地域による分布は一体どうなっているのか？大気重力波はまだまだ我々を魅して止まない。

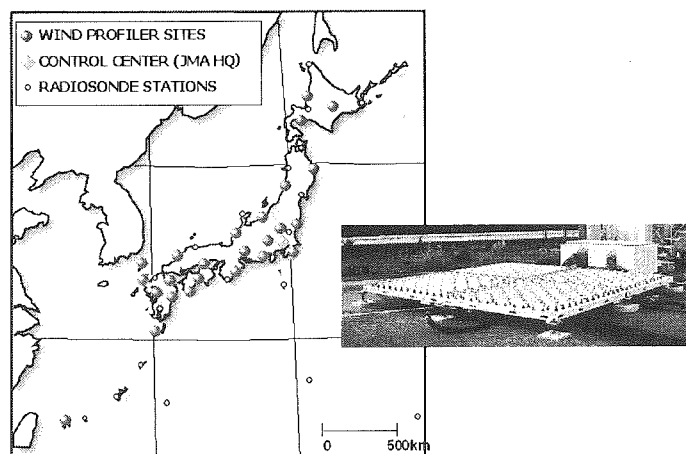


Figure 3: 京都大学で開発された小型大気レーダー。平成 13 年 4 月気象庁ウインドプロファイラ観測網『WINDAS』に採用され全国展開された。

6. 気象予報への応用

地上に固定された大気レーダーで得られるのはレーダー上空の高さ-時間の二次元データであることは上で述べた。それはいわば、スリットカメラで撮る写真にも似ている。一方、我々は、中緯度ではお天気が西から変わることを知っているが、これは気象現象が西から東に向かって移動することによる。地上に固定された MU レーダーの上を気象現象が動いていくわけである。このことを利用して高さ-時間データを現象の東西構造に読み換えその高さ-東西距離断面を推定することができる。同種の現象を幾例も観測してやればこうした断面図が多数得られるわけでその現象の立体的構造が解析される。MU レーダーで目に見えない気象現象の立体構造が解明される訳である。

これまでに、台風の眼や梅雨前線の立体構造、さらに水平スケールが数 1,000km の温帯低気圧に伴った冷たい空気の渦(寒冷渦)の構造などが詳しく調べられている。MU レーダーが初めて明らかにした対流の鉛直流変動は極めて複雑で、雲が小規模なものから大規模なものに変化(組織化)して行く過程が克明に捉えられた。将来、これらの成果が集中豪雨の解明に繋がるのではないかと期待されている。既によく分かっているとされてきた諸現象が、新しい観測技術の進歩でその神秘のベールを脱いでゆく[深尾・浜津, 2005]。

一方、日米欧では MST レーダーの観測上限高度や分解能を許せるだけ犠牲にした簡便なレーダーシステムが『ウインドプロファイラー』として開発されている。手軽に風を測れる標準的な可搬機を開発することのほか、これを多数ネットワークして気象予報に用いることが大きな目的である。我が国の気象庁は、平成 13 年 4 月よりウインドプロファイラーによる新しい高層風観測網『WINDAS』の運用を開始した。同庁は全国 18 地点において従来から気球(レーウィンゾンデ)を用いた高層気象観測を実施している。ウインドプロファイラーはこれを補完するように、全国 31ヶ所に配置され、遠隔制御によって自動観測を行うものである。観測データは 1 時間毎に気象庁本庁に送られ、現業の気象予報モデルの初期値として利用されている。同庁はこれにより予報の難しい局地的な豪雨や豪雪の予報精度の向上を図っている[深尾・浜津, 2005]。

実は WINDAS に採用された 31 台のウインドプロファイラーは我々がほぼ 10 年の歳月をかけて開発した小型大気レーダー(図 3)である[Hashiguchi et al., 2004]。先述の MU レーダーで培った技術で開発されたもので、高度 5 km までの下部対流圏の風を高い精度と分解能で計測できる。大学の研究室で生まれた技術が発展して天気予報という我々の身近な用途に用いられることになったわけである。

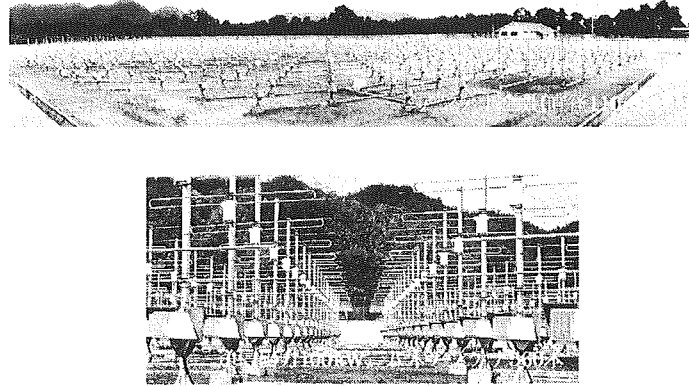


Figure 4: 平成 13 年 3 月赤道直下に完成した京都大学の赤道大気レーダー (EAR)

7. 新しいフロンティア—赤道大気の謎に挑戦

大気レーダーの進歩はまさに日進月歩と言ってよからう。今後も地球環境問題などに対する関心の高まりから、一層広く展開が進められるだろう。特に、地球規模の大気循環の源である赤道域の大気レーダー観測は世界中の研究者の関心の的である。なかでもインドネシア近辺は世界で最高温の海洋に無数の島が浮かぶ『海洋大陸』となっている。その上空は活発な積雲対流に伴う激しい上昇気流によって水蒸気はじめ様々な物質が中層大気へ運ばれる回廊の役割を果たしているらしい。一般に、互いに混じりにくい対流圏と成層圏の大気がインドネシアの上空で混じり合っているわけである。成層圏のオゾン層を破壊するフロンもここから入り込み、成層圏内に広がって南極まで運ばれ、オゾンホールを作っていることがわかっている。赤道域はこのほか大気波動の活動も盛んであり、これらの物質の輸送にも関与しているはずである。海洋大陸域の大気の振舞いは、赤道域にとどまらず地球全体の環境変動に大きな影響を及ぼしているのである。しかしながら未だこの地域での観測データは極めて少ない [例えば、深尾, 1993]。

去る平成 13 年 3 月、我々のグループは同国スマトラ島の赤道直下のプキティンギ市郊外コトタバんに『赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR)』(図 4) を建設した [Fukao et al., 2003]。赤道域大気の解明を目指して最初に構想されて以来 10 余年を経て漸く実現したものである。このレーダーは MU レーダーほど強力ではないが、それでも赤道大気を地表近くから高度 20km まで一気に調べることができる。あわせて電離圏大気も一部観測できる。EAR は、既に、赤道域固有の大気波動が対流圏と成層圏の境界域で両者の大気の混交に重要な役割を演じている証拠を捉えている。

EAR の運用は同国航空宇宙庁 (LAPAN) と共同で行われている。我が国の大学が外国で運用する初めての大型設備となり、先駆的な学術成果とともに新しい形態の国際共同研究としてその進展が期待されている。

参考文献

深尾昌一郎, 大型レーダーで高層大気を捉える, 科学, 63, 179-186, 1993.

深尾昌一郎・浜津享助, 気象と大気のレーダーリモートセンシング, 京都大学学術出版会, 491 頁, 平成 17 年 3 月.

Fukao, S., S. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi, and T. Makihira: The MU radar with an active phased array system, 1. Antenna and power amplifiers, *Radio Sci.*, 20, 1155-1168, 1985.

Fukao, S., T. Tsuda, S. Sato, S. Kato, K. Wakasugi, and T. Makihira: The MU radar with an active phased array system, 2. In-house equipment, *Radio Sci.*, 20, 1169-1176, 1985.

- Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M. K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio, and Y. Yabugaki, Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results, *Radio Sci.*, *38*, 1053, doi:10.1029/2002RS002767, 2003.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, Y. Moritani, T. Wakayama, and S. Watanabe, A lower troposphere radar: 1.3-GHz active phased-array type wind profiler with RASS, *J. Meteor. Soc. Japan*, *82*, 915-931, 2004.
- Kato, S., T. Ogawa, T. Tsuda, T. Sato, I. Kimura, and S. Fukao, The Middle and Upper atmosphere radar: First results using a partial system, *Radio Sci.*, *19*, 1475-1484, 1984.
- Tsuda, T., S. Kato, T. Yokoi, T. Inoue, M. Yamamoto, T.E. VanZandt, S. Fukao, and T. Sato, Gravity waves in the mesosphere observed with the MU radar, *Radio Science*, *25*, 1005-1018, 1990.

木材から宇宙で使える材料へ

居住圏環境共生分野 畑 俊充

1. はじめに

木材って宇宙で使えるの？

木材は、古くから日本の建造物の主たる材料として使われてきた。法隆寺のように千二百年もの間そのままの姿で存在しているのを見ると強い材料だとも思える。しかし、木材は腐ったり燃えたり曲がったり、弱いと思われる一面もあわせもつ。そんな材料が宇宙で使えるのであろうか。その弱いと思われる弱点を克服すればどうであろうか。

木材由来の木炭。そこに着目してみた。

森林資源が豊富な日本では木炭は古くから燃料だけでなく生活の様々なところで利用されてきた。木炭は縄文時代の終わりごろには存在していたとされ、以来金属の精錬や鍛冶などで商業用の燃料として利用され、近世中期以降は一般家庭にも燃料として入った。

一方、燃料以外の用途ではその硬度を活かした研磨炭がある。研磨炭は、漆器・七宝・印刷用の銅版および亜鉛版などの研磨に使用されてきた。漆器用には、ホオノキ・ニホンアブラギリの白炭が研磨用に、アセビなどの黒炭がつかやし用に用いられる。

現在、木炭をさらに進化させたカーボン材料(バイオマスカーボン)をつくる試みが既に始まっている。カーボン材料は軽量であり、高強度、高弾性、高導電性、耐熱性、化学安定性、対生物劣化性、高生体親和性など、注目すべき機能をもっている。木材から宇宙で使える材料の第一歩である。

著者の所属する研究グループにおける電子顕微鏡学的な研究により、木材からその作り方によって黒鉛化構造やナノダイヤモンドといった新素材ナノカーボンを形成することに成功した。炭素材料は熱に強く、今既に宇宙構造物に使われている。人工衛星の構体やアンテナなどがそうである。木材が、宇宙、航空、エレクトロニクスといった分野での最先端材料に用いられるのもそう遠くない未来であろう。ここでは、木材を炭化することにより生成するダイヤモンド薄膜や炭化ケイ素ナノロッドなど、宇宙でも利用できる炭素材料素材をつくる試みを紹介する。

2. 炭素化とは

一般に、有機高分子化合物が無酸素下で加熱されると、炭素比率の高い結合で構成されたより安定な構造へと移行する。その過程で水素、酸素、窒素および低炭素化合物を遊離し、減量して最終的に炭素単体といえるような物質に変化するが、この変化する現象を炭素化という(炭素材料学会編カーボン用語辞典)。炭素化という言葉は従来から広く使われているが、炭素が炭素以外の原子と反応して炭化物を生成する反応と区別するために、炭化ではなく炭素化と呼ぶことが推奨されている。炭素化により生成される主として炭素からなる物質を炭素化物という。木炭は、木質炭素化物というのが正式な呼び方となるのであろうか。

木質が無酸素状態で加熱され、変化する過程は以下のように分けられる。

(1)炭素化過程：室温から1500℃前後までの、化学反応を主体とした変化

(2)黒鉛化過程：1500℃以上の温度域における3次元規則性の増加と結晶成長を伴う物理的変化

木炭は炭素化過程においてさまざまな顔みせる。学問的にはその炭素化過程をおおまかに熱減成、熱分解、炭素化と区別している。

200℃まで熱処理された木炭は高分子から低分子へ変化する。この状態では、電気絶縁体で、水中にいれると水溶液は弱酸性を示し、またアンモニアやアミンなどをよく吸着する。160℃から500℃の

間でセルロース・ヘミセルロース・リグニンなどが分解してくるが、この過程を熱分解と呼んでいる。炭素化は 500℃から 1800℃での芳香環の生成過程をいうが、この温度領域の中でもとりわけ 600℃～700℃で、木炭の性能に劇的な変化が生じる。例えば、600℃で木材を焼くことで、木炭表面の抵抗は 1 0 10 Ωから 1 0-1 Ωまで急激に低下する。600℃より低い温度で木材を焼くと酸性、高い温度で焼くとアルカリ性となる。そして、600℃で焼いた木炭が、ホルムアルデヒドを最もよく吸着する。600℃というのは、木炭の性質を劇的に変化させる魅力ある温度といえる。1000℃以上に焼くと電気伝導度、電磁波の遮へい性能が大幅に向上する。

さらに加熱を続けると炭素化過程から黒鉛化過程へと進み、芳香環が一定方向に並んでくる現象が生じて、炭素の乱層構造が、部分的あるいは完全に黒鉛構造に変わる結晶化の一種を黒鉛化という。黒鉛には天然のものと、人造のものがあり、黒ないし鋼灰色の金属光沢をもつ。耐熱性・耐衝撃性・耐食性にすぐれ、優れた電気・熱伝導性をもつ。各種の電気機器材料、黒鉛るつぼ、耐火煉瓦、鉛筆の芯などとして広く用いられる(小学館国語大辞典)。黒鉛化のしやすさで、炭素は易黒鉛化性炭素と難黒鉛化性炭素に分けられる。これまで木炭は、無配向な乱層炭素を示す難黒鉛化炭素と考えられていた。この構造は、例えていうと紙をくしゃくしゃにした集合体のようなものである。一方、易黒鉛化性炭素に見られる黒鉛化の構造は、シートを積み重ねたような規則正しい形をしている。最近の研究から、木炭においてもその焼き方によって三次元規則性が生じることが分かってきている。炭化の状態をナノの単位でとらえることにより今後新素材開発への可能性が広がる。

3. パルス通電加熱装置

炭化の方法としてパルス通電加熱法(エスエスアロイ(株)製 VCSP11)を用いた。これは、図 1 に示すように、スギ木炭に 50MPa の圧力を加えながら真空中で直パルス電流を流し固相焼結を行うものである。このとき試料の破断面はきわめて平滑なガラス状の様相を示した。透過電子顕微鏡により観察したところ木炭中に配向性の高い黒鉛化構造を見出した。これは触媒炭化によって黒鉛状の結晶が一方方向に成長してできたものである。スギ木炭の粉末に圧力をかけながら直パルスを加えて加熱することによって、スギ木炭中で炭素原子が規則正しく配向したと考えられる。

さらに、木炭とアルミナの粉末を混ぜ、高圧をかけた結果、2,000℃以下の温度でも図 2 に示すような炭素繊維素材を開発することに成功した¹⁾。1800～2,000℃まで加熱するとアルミナとカーボンが反応し中間体として炭化アルミニウムを形成する。この中間体からアルミニウムのガスとグラファイトへ変化するので純度の高い炭素素材ができる。この素材は 2,000℃という高温で処理しているため難燃性が高く、腐食しにくい。

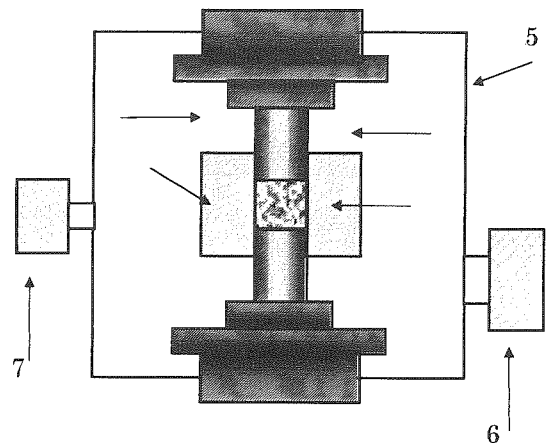


図 1 パルス通電加熱装置 (1, グラファイト型 ; 2, グラファイトパンチ ; 3, 試験体 ; 4, 銅板 ; 5, チャンバー ; 6, 真空ポンプ ; 7, 高温度計)

4. 木質からダイヤモンドの創成

木質廃棄物などを含む木質バイオマスからダイヤモンド状薄膜をもつ、耐磨耗・潤滑・耐食性コーティングなどに応用できる新規木質系バイオマスカーボン材料の開発を目指し、実用化に向けて研究

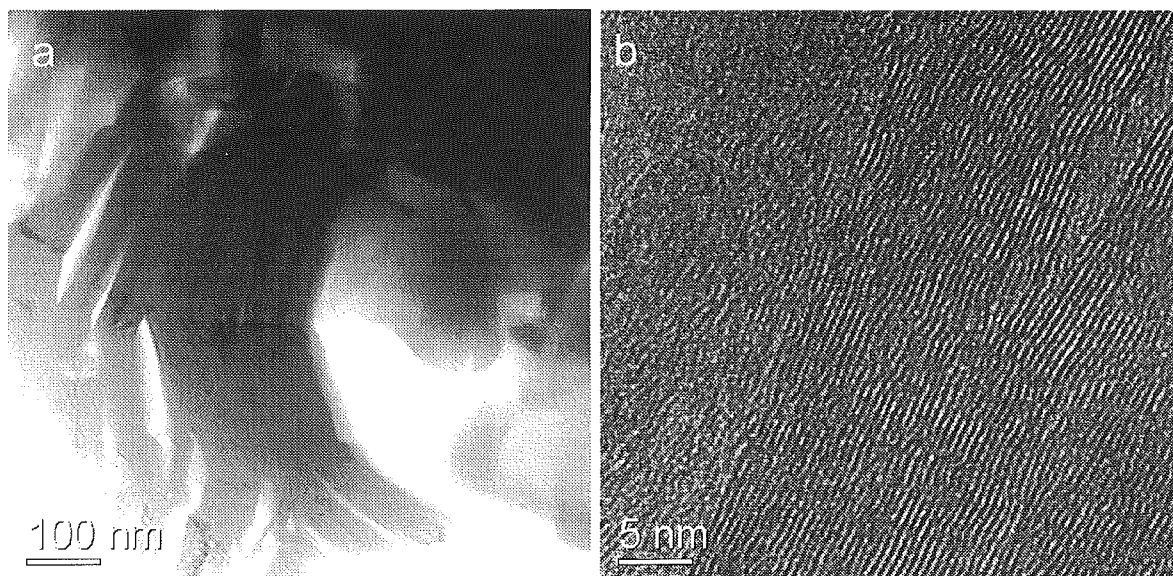


図2. 木炭の黒鉛化¹⁾(1,800°C, 5min, Al₂O₃を20%含む) a) 全体図 b) 黒鉛化

を行ってきた。

1979年に難波らがイオン化蒸着膜法によるダイヤモンド状の炭素膜を発表したが、このような膜をダイヤモンド状薄膜と呼んでいる。通常、ダイヤモンドの合成は、時間をかけて炭素を千数百度の高温で加熱すると同時に、数万気圧という超高压で加圧して行っている。一方、薄膜状ダイヤモンド合成は、一瞬でも合成条件が満たされれば可能であるといわれている。直パルス式熱分解法を用い、アルミニウムトリイソプロポキシドという触媒を所定の濃度で含しんさせた木炭にパルス通電加熱法を適用し、高温での触媒炭化を行う事で木炭表面にダイヤモンド状薄膜を形成させ、木材の高付加価値化をめざした。

パルス通電装置によってあらかじめアルミニウムトリイソプロポキシド溶液を含しんさせた木材粉末の触媒炭化を加圧下で行った。木質炭素化物中のアルミニウムカーバイトの存在が、ダイヤモンド状薄膜の前駆体として寄与する可能性を示唆する結果が得られている。2200°Cという高温で触媒黒鉛化を行ったところ、得られた試験体の表面に、図3に示されるように選択的にダイヤモンド状薄膜が広い範囲に形成されていた²⁾。しかも、数分間の電子線放射によってそれらダイヤモンド構造が消失するという事も明らかとなった。電子線放射下でのウッドダイヤモンド状薄膜消失の過程を調べ、ダイヤモンド状薄膜の消失過程から、その生成機構についても検討を進めている。

5. セラミックウッドと炭化ケイ素ナノロッド

木質炭素化物は吸着性能や電気伝導度など、炭素化過程において制御することが可能な炭素材料として注目を集めている。スギから作った木質炭素化物は、細胞壁構造の異方性や60%の空隙率を有するにもかかわらず適度な強度をもつ興味深い材料である。しかし現状ではスギから得られた木質炭素化物は、500°C以上の使用において強度低下や酸化が生じるため、限られた用途しかない。他方、炭化ケイ素は高い圧縮強度をもつ上に、高温下での使用が可能であり、近年、炭化ケイ素複合材料に多くの注目が集まっている。

木質炭素化物とセラミックの両方の特性を併せもつ木質セラミック複合材料は、エネルギー分野における排気フィルター、化学工業で用いられる触媒担持体、医学分野での生物活性物質の固定などへの使用が可能な新材料である。最近著者等は、この木質セラミック複合材料の製造過程で、副

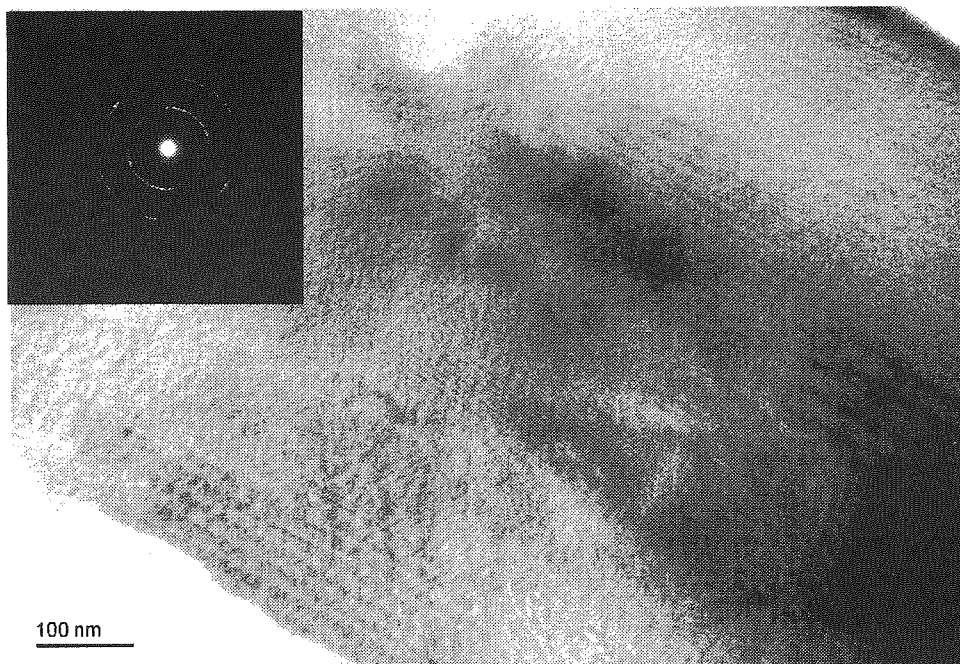


図3. 木材の2200°Cにおける触媒黒鉛化により得られた試験体の表面形成されたダイヤモンド状薄膜²⁾

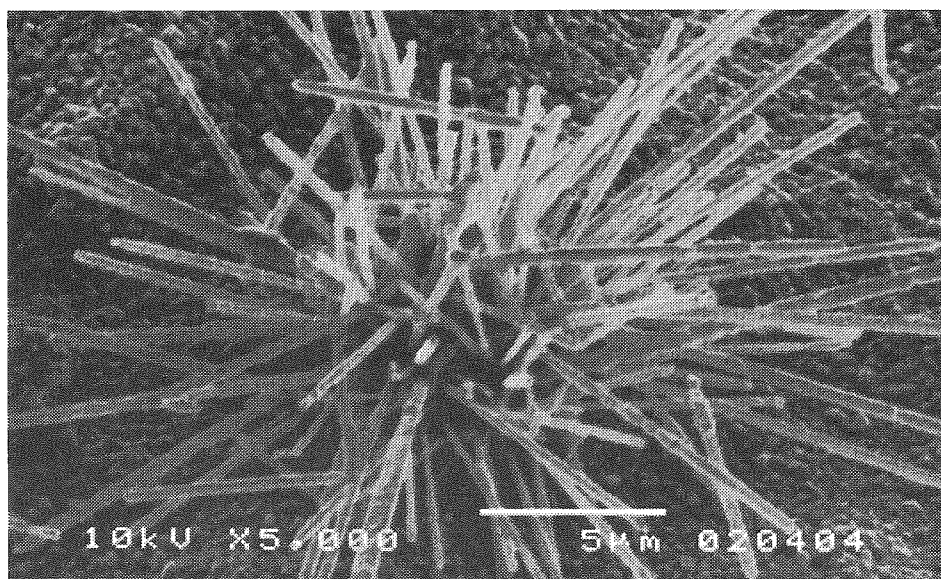


図4. 木質炭化物表面でのSiCナノロッドの成長³⁾

産物として炭化ケイ素ナノロッドが加熱処理の過程で複合材料中に生成することを見出した³⁾(図4)。

厚さ約 20 nm ずつ連続してイオンミリングを行うことによって、厚さ約 60 nm の炭化ケイ素の反応層が、細胞内孔内で壁を均一におおっていることを確認することができた⁴⁾(図5, 6)。また炭化ケイ素は細胞内孔内でランダムに形成されていることが観察された。走査電子顕微鏡による細胞断面の観察から、炭化ケイ素ナノロッドが直径 100~500 nm の多孔体により形成されていることがわかった。炭化ケイ素ナノロッドの形成は、炭化ケイ素膜上の炭化ケイ素核の触媒作用によって形成すると考えられる。透過電子顕微鏡による解析から、炭化ケイ素ナノロッドが(111)方向に沿って成長することを

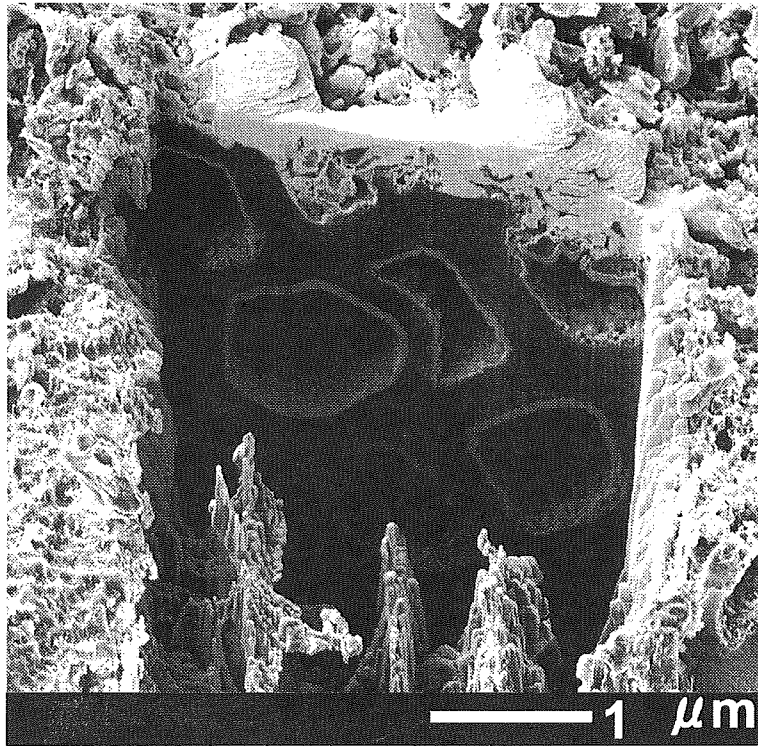


図5 細胞内孔の内壁を SiC 層が覆う⁴⁾

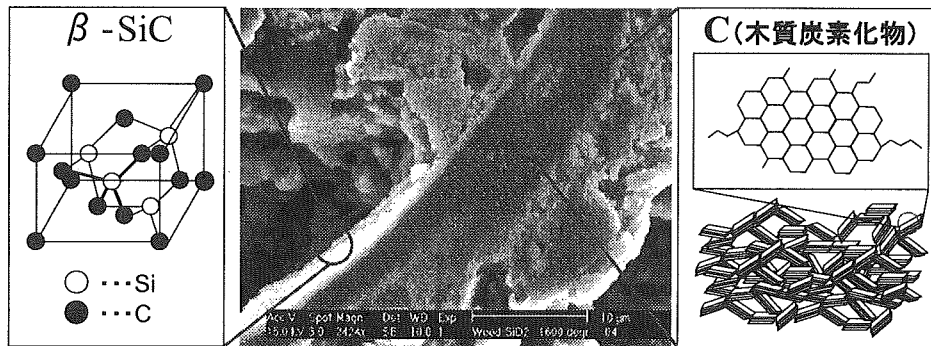


図6 木材からの SiC/C 複合材料の開発⁵⁾

確認した。さらに数層からなるミクログラファイト層が炭化ケイ素ナノロッドの外部表面をおおっていることがわかった。なお、この黒鉛層は電子線放射によるダメージを防ぐ働きのあることが知られている。

6. 宇宙太陽発電システムのためのエネルギー変換材料の開発

炭酸ガスによる地球温暖化の抑制の観点から、エネルギーの有効利用の開発が重要な研究課題となっている。この問題を克服するために、木質素材由来の炭素材料から作られた炭化ケイ素熱電変換ナノ材料を用いて、高温度域で発電効率の高い熱電変換デバイスを作製する。そのためには、まずパルス通電加熱法より作製した炭化ケイ素ナノロッドおよび炭化ケイ素薄膜を含む SiC/C 複合材料の炭化

ケイ素熱電変換ナノ材料への適用方法を確立すること、そして、X線回折装置や電子顕微鏡といった分析装置を用いて機能性発現機構を解明すること、最終的にはその材料を用いてデバイス化を行うことが重要である。ウッドバイオマスを原料に炭化ケイ素熱電変換ナノ材料を開発し、ナノレベルまでの微細構造を解析することによって、高効率のエネルギー変換材料を作製することが可能となり、しいては高い発電効率を得ることが可能となるだろう。

この研究では、木質炭素化物から炭化ケイ素熱電変換ナノ材料を作製し、その熱電特性と機能性発現機構を解明すること、および高発電効率を有する熱電変換デバイスの開発を行うことを目的とする。研究の流れは、①炭化ケイ素熱電変換ナノ材料の熱電特性評価→②機能性発現機構の解明→③熱電変換デバイスの開発、と要約できる。

セラミックス半導体を応用した熱電変換技術は、材料の両端に温度勾配を与えると、電子や正孔が高温側から低温側に移動する現象を応用している。そのため、高温側と低温側で電位差が生じ、閉回路として用いると電流が流れ電力を取り出すつまり発電することができる。最も高い性能指数を示した炭化ケイ素熱電変換ナノ材料を用い図7に示した熱電変換デバイスを開発し電流計により発電量を測定し、最も高い発電量が得られる最適条件を検討することにより発電効率の向上を図る⁵⁾。

木質炭素化物の特長を活かし、宇宙太陽光発電における集光に伴う発熱の問題を解決する材料開発、およびその熱エネルギーを電気エネルギーに変換することが可能な熱電変換技術の開発を目指す。

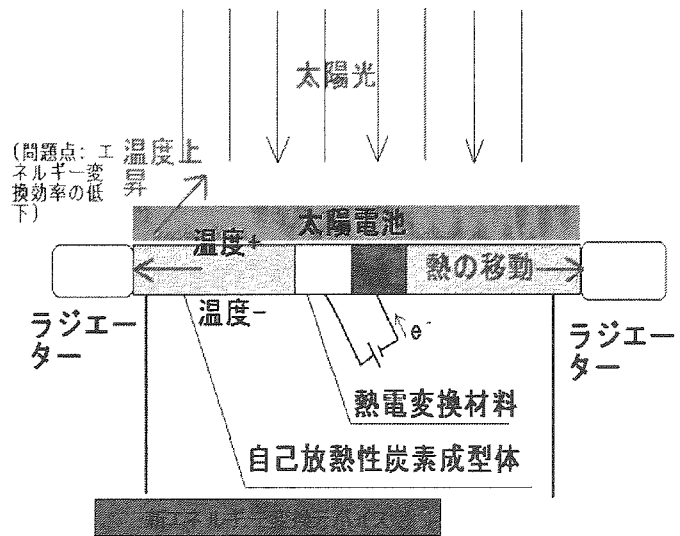


図7 宇宙太陽発電システムのためのエネルギー変換の概略図

おわりに

木質炭素化物はこれまでエネルギー用あるいは吸着剤用の木炭として扱われてきた。しかし、最近の自らの所属するグループの研究により、もともとは異方性の木材であっても加熱速度を変化させることにより均一でナノサイズの微細構造からカーボン構造を自由に設計できることがわかってきた⁶⁾。木材物性においては、セルロースマイクロフィブリルが細胞の基本的な構造を形作りその性質を決定しているが、400度以上に加熱した木質炭素化物では、セルロースマイクロフィブリルの基本的性質が失われ、新たに形成されるナノカーボン構造が炭素化物の物性を左右することがわかってきた。今後は、電子顕微鏡学的な基礎的アプローチのみならず、加熱速度を制御するための装置開発をおこないながら、新規ナノカーボン構造の創成を行う予定である。木材は細胞構造を持つがゆえに複雑で扱いづらい材料であり、そのことが長年にわたり木質資源の循環システム構築をこれまで阻んできた。選択的な熱変換による木材の均質化で、この長年の難問を一挙に解決することができるのである。木材の代表的な欠点といわれている、燃える・狂う・腐るといった性質を熱変換によって完全に克服したいと考えている。

木質科学と電子顕微鏡学・複合材料学・炭素材料学・応用分析的熱分解学・材料科学などの分野とを融合させ、環境共生という観点からも木質資源の高度な有効利用を図ることが、宇宙で使えるような木材の開発に結びつくだろう。

参考文献

- 1) T. Hata, K. Nishimiya, P. Bronsveld, Tomas Vystavel, J. De Hosson, H. Kikuchi, and Y. Imamura, Electron Microscopic Study on Catalytic Carbonization of Biomass Carbon: I. Carbonization of Wood Charcoal at High Temperature by Al-Triisopropoxide, *Molecular Crystals and Liquid Crystals* vol.386 pp.33-38 (2002)
- 2) T.Hata, T.Vystavel, P.Bronsveld, J.DeHosson, H.Kikuchi, K.Nishimiya, Y. Imamura, Catalytic carbonization of wood charcoal: graphite or diamond?, *CARBON* 42(5-6) 961-964 (2004)
- 3) V. Castro, M. Fujisawa, T. Hata, P. Bronsveld, T. Vystavel, J. DeHosson, H. Kikuchi, Y. Imamura: Silicon Carbide Nanorods and Ceramics from Wood, *Key Eng. Mat.* 264-268, p.2267-2270 (2004)
- 4) T. Hata, S. Bonnamy, P. Bronsveld, V. Castro, M. Fujisawa, H. Kikuchi and Y. Imamura: Formation of Silicon Carbide Nanorods from Wood-Based Carbons, Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures (in print)
- 5) M. Fujisawa, T. Hata, P. Bronsveld, V. Castro, F. Tanaka, H. Kikuchi, T. Furuno, Y. Imamura: SiC/C composites from wood charcoal by pulse current sintering with SiO₂, *Electrical & Thermal properties*, *Journal of the European Ceramics Society*, 24/13 pp. 3575-3580 (2004)
- 6) F. Kurosaki, K. Ishimaru, T. Hata, P. Bronsveld, E. Kobayashi, Y. Imamura, Microstructure of Wood Charcoal Prepared by Flash Heating, *CARBON* 41(15) 3057-3062 (2003)

宇宙太陽発電所 SSPS による生存圏の持続的な発展に向けて

篠原 真毅

1. はじめに

人間は宇宙へと進出する必要があるのであろうか。宇宙は確かにロマンがあり、人類最後のフロンティアと言われている。ブラックホールなどの宇宙の神秘には胸踊り、通信衛星や気象衛星はいまやなくてはならないものである。しかしその一方、最新のロケットの打ち上げ費用は1機80億円(日本のH-IIAロケット)、人工衛星は1機400-800億円の開発費用がかかるといわれている。特に日本では最近の平成不況と続いたロケットの失敗のせいもあり、宇宙開発の是非を問われるようになっている。たった数十人の冒険家や技術者を宇宙へ送り、日常の少しの便利さの向上のために何百億円、何千億円をかける意味があるのであろうか。

宇宙開発には重大な意味はあるのである。近視的にはこのような多大なコストの割りにリターンが少なく見える宇宙開発や宇宙科学は意味がないように思える。しかし、今地球は真綿で首を絞められるがごとく少しずつおかしくなっている。しかもその首を絞めているのは私達人類以外の何者でもないのである。地球上に人類が今の勢いで増え続ける限り、地球は破滅へ向かい続ける。宇宙空間を利用することは人類を地球の重力から解放し、生存のためにその活動を広げることを意味するのである。私達はこれを「生存圏の持続的発展」として捉えている。すぐにリターンが返らない宇宙開発は、近未来の人類や地球のために重要な意味を持っているのである。

地球環境問題の根本は人間の欲であろう。人間の欲望はおそらく抑えることができない。性善説を信じればいつか欲を減らすことが可能となり、人類がその生存圏を宇宙空間まで広げずとも地球と人類の共存は可能なようにも思える。しかし、それがいかに難しいことであるかはこれまで人類数千年の戦争の歴史を見れば明らかであろう。「地球に優しい」という免罪符で自らを誤魔化すことなく自分の欲を認めること、そして欲との共存を図りながら自滅しない方法を考えることが最良である。つまり、拡大する欲望、特にこれからは伸び行く発展途上国の人間の欲望、を満たしながら地球環境が破滅しないようにしなければならないのである。今後も人間はエネルギーを使い続け、快樂を追い求めると考えたほうがよい。

伸び行くエネルギー需要を石油に代わる天然ガスや石炭といった化石燃料に頼ることは、地球温暖化問題を悪化させることになる。大気中の温室効果ガスの増大が地球を温暖化し自然の生態系等に悪影響を及ぼすおそれがあることを背景に、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを目的として、1992年の地球環境サミットで署名のため開放された気候変動枠組条約は1994年に発効され、2001年3月22日現在、我が国を含む186カ国が締結している。この条約の目的を達成するため1997年12月に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)では、先進国及び市場経済移行国の温室効果ガス排出の削減目的を定めた京都議定書が採択された。この議定書では先進国等に対し、温室効果ガスを1990年比で、2008年から5年間で一定数値(日本6%、米7%、EU8%)を削減することが義務づけられている。この京都議定書は最大のCO₂排出国であるアメリカが脱退を表明するなど、まだ予断を許さない状況にある。仮に次の大統領選挙で民主党が勝利したとしてもアメリカの脱退の方針は変わらないと言われている。京都議定書が定めているのは即効性の高い“early action”であるが、中長期的に環境問題を解決する手法“delay action”に関する取り決めが欠如している

といわれている。アメリカは別に環境問題を考えていないわけではなく、この”delay action”に重きを置いた政策を取っているために京都議定書から脱退したと考えられている。京都議定書に沿う CO₂ 削減と、世界の経済成長を両立させる為にはクリーンな新エネルギーの開発が必須であり、これから述べる宇宙太陽発電所 SSPS はまさにその”delay action”であり、その研究は非常に重要となっている。

2. 宇宙太陽発電所 SSPS

SSPS(Space Solar Power System)は宇宙空間で超大型の太陽電池パネルを広げ、太陽光発電によって得られる直流電力をマイクロ波に変換して送電アンテナから地球や宇宙都市の受電所に設置されるレクテナと呼ばれる受電アンテナへ伝送し、再び直流電力に戻す方式の発電所である。SSPSは宇宙空間に浮かぶ発電所から地上に電力を送らなければならないため、無線による電力伝送技術が重要となってくる。SSPSは上空36,000 kmの静止衛星軌道にあり、常に地上から見えている。受電側ではマイクロ波をレクテナと呼ばれる整流アンテナで再び電気エネルギーに再変換して利用する。マイクロ波はISMバンド(産業・科学・医療用バンド)である2.45GHzや5.8GHzの周波数を用いることが検討されている。SSPSは宇宙空間で太陽光発電を行い、地上へマイクロ波送電するシステムであるため、他の新技術のように越えなければいけない技術ハードルはほとんどない。唯一発電所としてのビジネスモデルを考えた際に必要な技術の研磨及び量産性が求められている。

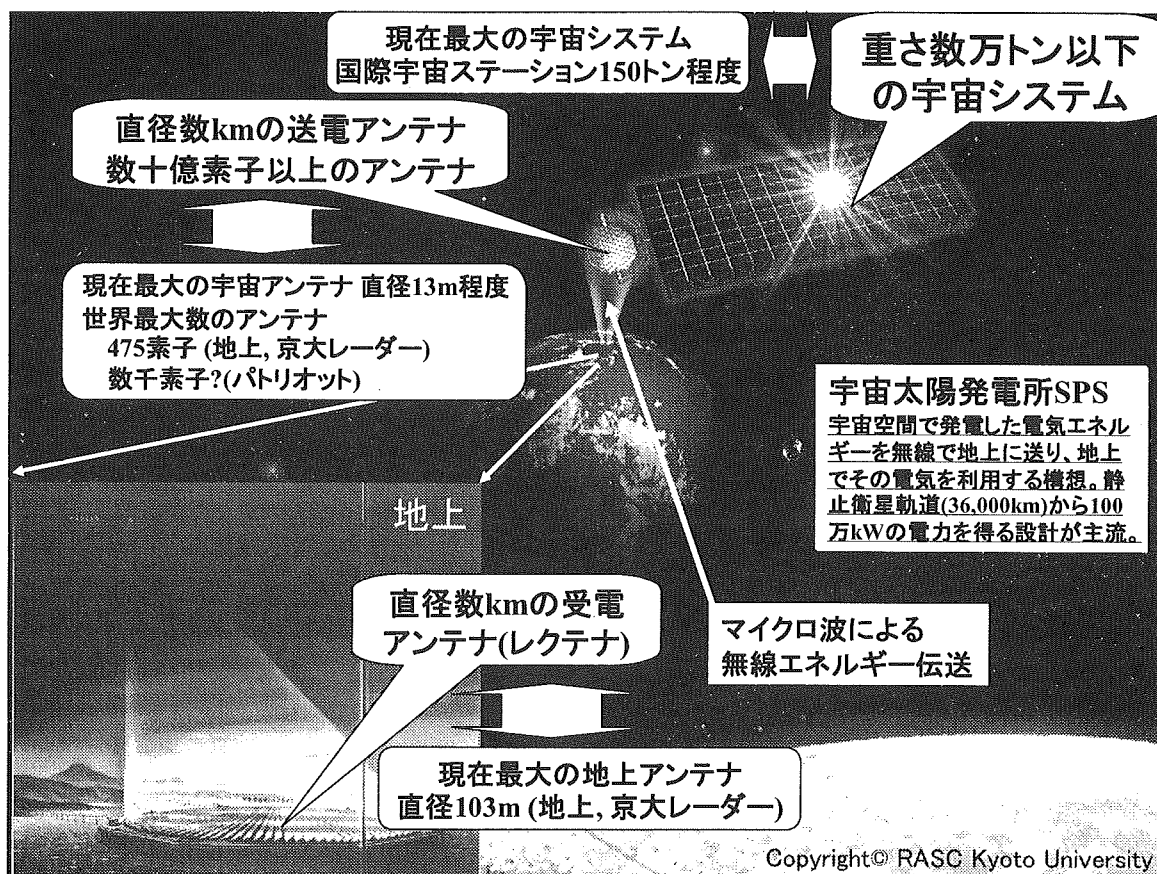


図1 宇宙太陽発電所 SSPS の概念図と特徴

SSPSは、地球上のエネルギー不足を補い、放射性廃棄物問題を抱える原子力発電所の不足を補い、環境破壊や地球温暖化をもたらす火力発電所に代わる大型基幹電力供給源となり得るものとして1968年に米国のピーター・グレーザーによって提案された¹⁾。今日深刻になっている温暖化の元凶である

炭酸ガス排出抑制の切り札としての価値は当時認識されていなかったが、SSPSは温暖化ガス抑制に大きく貢献する発電方式でもある。例えば石油火力発電のCO₂排出量は建設時に2g-CO₂/kWh、運用時に844g-CO₂/kWhであり、原子力発電のCO₂排出量は建設時に3g-CO₂/kWh、運用時に19g-CO₂/kWhであるのに対し、SPSのCO₂排出量は建設時に20g-CO₂/kWhとなるが、運用時には0となるという試算がなされている²⁾。建設時のCO₂排出量は既存発電電力による太陽電池生産等によるものであるため、SPSで発電した電力で太陽電池を生産し、新たなSSPSを生産する場合は11g-CO₂/kWhとなる。

また、エネルギー源としてSSPSを考えた場合も、有用である。人類活動による地球生態・経済系への影響の長期的な動態を表すモデルとしてMITのForresterやMeadowsたちにより約25年前に開発されたワールドモデルがある。「ローマクラブからの警告」として有名なモデルであるが³⁾、このモデルでは、特別な制限無しに現在までの人口、経済の成長が続けば、主として資源の枯渇により、21世紀前半には地球生態・経済系は成長の限界を迎え、その後は衰退しかないと示されている。このモデルに対し、エネルギーコスト解析に基づいたSSPSを含むワールド・ダイナミックス・シミュレーションモデルを作成し、SPSが地球生態・経済系に及ぼす影響が評価されている⁴⁾。論文によると、SSPSへのエネルギー投資が少ない場合は、SSPSの成長が地球上でのエネルギー消費の成長を支えきれないので、成長の限界を回避できないが、SSPSへの投資が大きい場合は、SSPSの成長が地球上でのエネルギー消費の増加を充分支えることが可能となり、地球上の人口、資本の継続的な成長を可能となるとされている。SPSのエネルギー投資が大きい場合、SSPS自体から地球への供給されるエネルギーによってSPSの成長が増進されるという“自己増殖状態”となり、一度この状態が達成されると、地球上での成長の限界は完全に回避できることが、シミュレーション結果によって示されている。

地上太陽光発電は、地上においては当然可能であるが、太陽光の大気及び気象状態による減衰、日変化、季節変化等に基づく供給の不安定性等の問題があり、現在の火力や原子力発電に代わる代替基幹電力には成り難い。これに対し、宇宙空間で静止衛星軌道上での発電は、大量の資材の宇宙への運搬、宇宙における大規模建設作業と保守運用、環境問題対策、通信網への電磁障害対策等の技術開発を必要とするにも関わらず、春分と秋分前後の短期間の地方時真夜中の短期間と、月等による日陰、及び地球公転軌道に起因する極僅かの太陽輻射強度の年変化以外、安定した太陽エネルギーが期待されるため、基幹電力として有望である。太陽電池に入射する太陽光エネルギー密度は、大気反射のため、地上の太陽光エネルギー密度に比べ宇宙でのそれは1.37kW/m²と、1.4倍強く、日照時間は宇宙では地上の4~5倍あるため、発電量を地上とSPSで比較すると5.5~7倍の差がある。

これまで、日米を中心に様々な技術検討が行われてきた。多数の人数が参加した詳細なSSPSの概念検討としては以下のようなプロジェクトが過去に存在する。

- ・ 1977-1980年 NASA/DOE SPS 技術的適合性検討とリファレンスシステムの設計 (アメリカ)⁵⁾

その後のSSPSの検討の方向を定めた最も詳細なモデルの概念設計プロジェクト。1980年度予算には2500万ドルの調査費が認められている。リファレンスシステムは重量約5万トン、大きさ約10km×5kmの太陽電池で発電するSSPSから2.45GHz、500万kWの電力を送電する。マイクロ波送電はクライストロンをベースに検討されている。送電アンテナ直径1km、受電アンテナ10km×13km、太陽電池と送電アンテナは分離され、宇宙空間で集配電を行うモデルである。SSPS60基で全米の全発電量をまかなうという試算もなされていた。非常に巨大なモデルであり、発電所として売電を考えた場合に採算が合わないとされて以後アメリカでは一旦SPS研究が中断している。

- ・ 1992-1994年 NEDO 宇宙発電システムに関する調査研究 (日本)⁶⁾

1980年代に本研究所の研究グループを中心に日本で盛んに行われるようになったSSPS研究を受け、行われた日本版SSPSの調査研究プロジェクト。発電量は100万kWとやや小型で、日本がリードしている半導体技術を取り入れている点が特徴である。

1995-1997年 NASA SPS フレッシュ・ルック・プログラム (アメリカ)⁷⁾

1980-90年代の日本のSSPS研究活動を受け、リファレンスシステム以後停滞していたアメリカが再び再開したSSPS「見直し」プロジェクト。これまでに提案された数十にもわたる様々なSPSを再評価し、受電側の都市サイズや電力需要も考慮して経済的に成り立つ「サン・タワー」と呼ばれるユニット型SSPSを提案している。その後、議会在後押しする形でSSP Concept Definition Study (CDS)プログラム(1998年)、Space solar power Exploratory Research & Technology program(SERT)プログラム(1999-2000年)⁸⁾、SSP Concept and Technology Maturation (SCTM)プログラム(2001-2002年)⁹⁾と検討が進んでいる。

・ 1998-現在 JAXA SSPS 検討委員会 (日本)¹⁰⁾

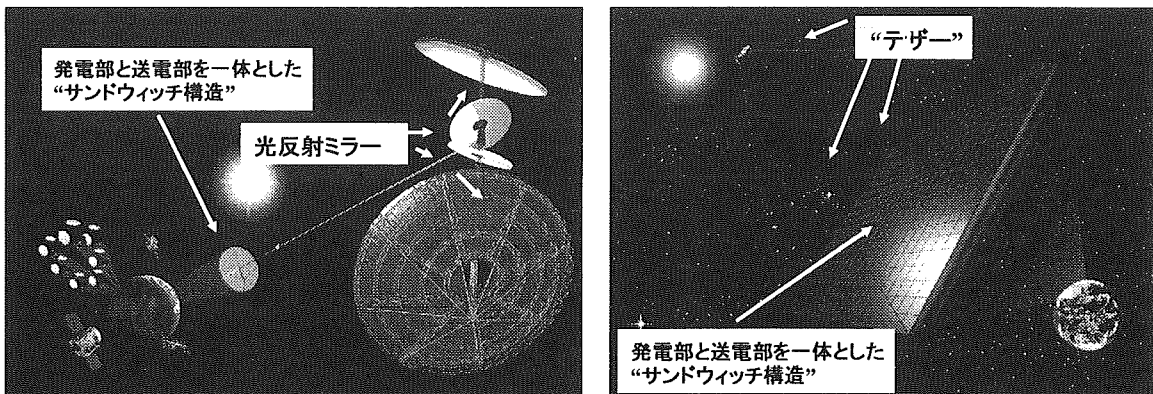
地球環境問題意識の高まり、宇宙産業の閉塞感、アメリカの動向等を受け、現在も行われているSSPS検討委員会。本研究所所長の松本紘教授が委員長となり、オール・ジャパンのメーカーを含む研究者で、発電—送電一体・ユニット型SSPS(図2(a))の設計と、SSPS実証試験衛星の概念設計を実施している。レーザーによる送電の検討も平行して行っている。2001年には発電—送電一体・ユニット型SSPSのマイクロ波送電基礎試作モデルSPRITZ(Space Power Radio Integrated Transmitter '00)を製作している¹¹⁾。

・ 2000-2002, 2004- 経済産業省 SSPS 検討委員会 (日本)¹²⁾

現在行われているもう一つのSSPS検討委員会。JAXAが宇宙システムとして主にSPSを捉えていることに対し、エネルギーシステムとしてSSPSを捉え、発電—送電一体・ユニット型SSPSの設計(図2(b))と、SSPS実証試験衛星の概念設計を実施している。ユニット型SSPSに必須のマイクロ波送電基礎技術に関する試作を行った。

・ 2003-現在 ESA(European Space Agency) Advanced Concepts Team (ACT) (ヨーロッパ)¹³⁾

3段階のSSPS検討プログラム。2003年度(第1段階)にはSSPSのデザインではなく、地上太陽光発電とSSPSの比較検討を行っている。ESAは2004年7月には国際シンポジウムSPS'04も主催している。



(a) SSPS JAXA2001 モデル

(b) SSPS METI/USEF2002 モデル

図2 最新の日本版SSPS(周波数:5.8GHz, 地上で1GWDC)

その他にも、日本の宇宙科学研究所で検討されている実験用中規模SSPS「SPS2000」¹⁴⁾等もあり、常に最新技術を取り入れながら様々なSSPSが検討され続けている。特に、SSPSの基盤技術であるマイクロ波送電は1960年代以降、様々な研究・実証実験が行われてきた¹⁵⁾。1960年代、70年代の研究の中心はアメリカのW. C. Brownであったが、1980年代以降は本研究所の研究グループが研究の中心

となり、世界初のマイクロ波送電ロケット実験 MINIX や無燃料飛行機へのマイクロ波送電実験 MILAX 等を実施してきた¹⁶⁾。本研究所では文部科学省の中核的研究機関（COE）プログラムの一環の支援を受け、SPS を目指した大型マイクロ波送受電実験装置 METLAB(Microwave Energy Transmission LABORatory)や SPSLAB(SPS LABORatory)を導入し、研究拠点として研究を推進している。近年は本研究所で開発した新方式のマイクロ波送電システムをベースとした SPORTS2.45, SPORTS5.8(Space Power Radio Transmission System)と呼ばれるマイクロ波送受電システムを導入し、マイクロ波送受電の基礎実験を進めている¹⁷⁾。本研究所の SSPS 研究グループは 2002 年度から文科省で導入された 21 世紀 COE プログラムにも選ばれ、SSPS の研究拠点化が進んでいる。

3. 研究所の研究 - マイクロ波送電を中心に -

電力輸送は有線に寄らずとも、無線でも行うことができる。基本的に光を含む電磁波は「エネルギー」であるため、無線でエネルギー伝送が行えることは、電磁波の発見とほぼ同時期から知られていた。無線によるエネルギー伝送の概念を始めて提唱し、実際に実験を行ったのは、20世紀初頭のニコラ・テスラである¹⁸⁾。Teslaは「電磁波のエネルギーは離れたところにある家の電球をともしることができる。」と述べ、実際に1899年に200フィートのマストの先に直径3フィートの球をつけた巨大なコイルを建造し、150kHz、300kWのエネルギー放射実験を行っている。しかし、電磁波は基本的に等方的に広がる性質を持っているため、Teslaの実験は不成功に終わり、その後の無線の歴史はエネルギーの輸送ではなく、「情報」の輸送となっていく。

無線によってエネルギーを伝送する為には、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。集中させる為には電磁波の周波数を非常に高くする必要がある。第2次世界大戦以降、マイクロ波と呼ばれる1~10GHz程度の電磁波を発生させることができるようになって以降、無線電力伝送は再び注目され始め、研究が行われるようになった。SSPSの概念は1960年代のマイクロ波送電研究の進展によって初めて提唱されたものである。

マイクロ波送電技術のポイントは大きく3つに分類される。(1) マイクロ波発生技術、(2) 送電目標への電力集中のためのアンテナ技術、(3) マイクロ波から電力への変換技術である。ただ、異なっているのはマイクロ波送電では「効率」が重視される点である。マイクロ波送電における効率はこの(1)(2)(3)の効率の乗算で決定される。例えば(1)=80%、(2)=90%、(3)=80%とすれば $80\% \times 90\% \times 80\% = 57.6\%$ となり、マイクロ波送電における効率は通常50%程度である。普通の有線送電に比べると低い伝送効率であるが、マイクロ波送電は電気エネルギーの送電側と受電側が送電線でつながっていないという特徴があるため、

- (1) 送電側、受電側の移動の自由が飛躍的に大きくなる。送電点が1点とは限らない
- (2) 受電器を備えていればあらゆる送電器からの電気エネルギーを受けることができる

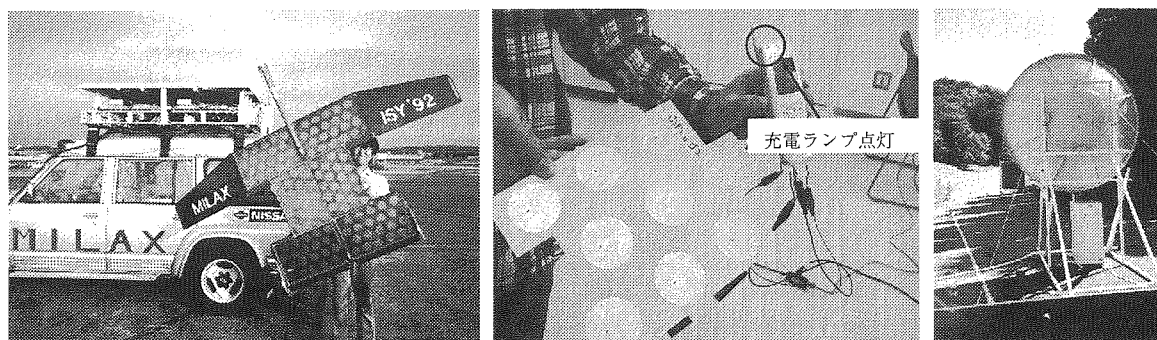


図 3 本研究所で実施されたマイクロ波応用技術 (a) 飛行体への送電 (1992) (b) 無線電力空間での携帯電話充電実験 (2004) (c) 地上 2 定点間送電実験 (1995-96)

- (3) 受電器は従来のバッテリーなどに比べて軽量にすることができる。また、基本的に電源は送電側の電源なので電気エネルギーの供給が途絶える可能性は少なく、バッテリー切れの心配が少ない
- (4) 空間をエネルギー伝送するため、有線送電のような負荷損による損失は小さく、マイクロ波を集中できれば数万kmでも高効率で送電可能である

といった多くの特徴を持ち、新しい電力輸送の形態として現在研究が行われている。

SSPS はマイクロ波送電の最大の応用例であるが、その他地上でもマイクロ波送電の応用は可能である。(1)や(3)の特徴を生かせば移動体、飛行機や電気自動車への送電が可能となる。燃料やバッテリーが不要となるこの技術は本研究所でも実証実験でその有用性を実証済(図 3(a))である。(2)の特徴を生かせば今話題のユビキタス(=いつでもどこでも)情報社会のための無線での電源として応用することもできる。本研究所ではこれを「無線電力空間」もしくは「ユビキタス電源」と呼び、現在研究を進めている(図 3(b))¹⁹⁾。(4)の特徴は SSPS で最大限に生かされるが、それ以外にも災害時や遠隔地、僻地へのマイクロ波送電にも応用可能である(図 3(c))²⁰⁾。地上での送電ではおそらく直感よりも大きな送電システムが必要となるデメリットがあるが、(2)(3)の特徴とあわせ、柔軟性と即応性の高い電源供給が可能となるメリットが生まれる。

4. おわりに

人間はすぐ目の前に締め切りが迫らないと実感が薄く何もしない生き物である。特に日本人は熱しやすく冷めやすい気質があるため、70年代のオイルショック、80年代の環境問題意識の高まりをもう忘れてしまったかのようである。しかし、地球の生存圏の危機は私達の子供の世代、孫の世代まで迫ってきており、その対応は私達の世代からはじめなければ到底間に合わない。幸い SSPS は既存技術を研磨することで実現可能な新しいクリーンな発電所であり、その核となるマイクロ波送電技術は本研究所を拠点として世界中で研究が行われている。マイクロ波送電の地上応用も今後の新しい産業を生む可能性もある。本研究所では生存圏の持続的発展のための一手法として SSPS 及びマイクロ波送電を選択し、今後も遠い目標へ向かって研究を行っていくが、大学だけでその目標を実現することは難しい。多くの市民の方との協力が必要であり、今後さらに有機的な産官学民の協力を目指したい。

参考文献

- 1) Glaser, P. E.; "Power from the Sun ; Its Future", Science, 162, pp.857 - 886, 1968
- 2) 吉岡完治、管幹雄、野村浩二、朝倉啓一郎 ; “宇宙太陽発電衛星の CO₂ 負荷”, 学振未来 WG2-1, 1998
- 3) Meadows, D. H., D. L. Meadows, J. Randers, and W. W. Behrens III ; "The limits to growth - A report for THE CLUB OF ROME'S project on the predicament of mankind", Universe Books, New York, 1972
- 4) YAMAGIWA, Y. and M. Nagatomo, "An Evaluation Model of Solar Power Satellites Using World Dynamics Simulation", Space Power, vol.11, no.2, pp.121-131, 1992
- 5) DOE and NASA report ; "Satellite Power System ; Concept Development and Evaluation Program", Reference System Report, Oct. 1978) (Published Jan. 1979).
- 6) 宇宙発電システムに関する調査研究、三菱総合研究所(新エネルギー・産業技術総合開発機構)、1992.3、1993.3、1994.3
- 7) Mankins, J. C. ; "A fresh look at the concept of space solar power", proceeding of SPS'97, S7041, (in Montreal), 1997
- 8) <http://procurement.nasa.gov/cgi-bin/EPS/sol.cgi?acqid=150#Amendment 01>, "SPACE SOLAR POWER (SSP) EXPLORATORY RESEARCH AND TECHNOLOGY (SERT) PROGRAM, SOL NRA8-23"
- 9) <http://space-power.grc.nasa.gov/ppo/sctm/>
- 10) 株式会社三菱総合研究所, “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」”, 2004.2

- 11) Mori, M., H. Matsumoto, N. Shinohara, and K. Hashimoto, "Solar Power Radio Integrated Transmitter (SPRITZ) Unit for SPS", Proc. of URSI2002, p.1441 (H Special P.4), 2002
- 12) 小林徹, "USEF における宇宙太陽発電システム(SSPS)検討状況", 第 4 回 SPS シンポジウム講演集, pp.127-130, 2001
- 13) Summerer, L., and F. Orgaro, "Solar Power from Space – Validation of Options for Europe", Proc. of SPS'04, p.17-26, 2004.7
- 14) SPS2000 タスクチーム ; "SPS2000 概念計画書", 宇宙科学研究所, 1993
- 15) Brown, W.C.; "The history of power transmission by radio waves", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-32, No.9, pp.1230-1242, 1984
- 16) Matsumoto, H., "Research on Solar Power Station and Microwave Power Transmission in Japan : Review and Perspectives", IEEE Microwave Magazine, pp.36-45, December 2002
- 17) Shinohara, N., 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, Sep. 2004
- 18) Tesla, N., "The transmission of electric energy without wires, The thirteenth Anniversary Number of the Electrical World and Engineer", March 5, 1904
- 19) 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 SPS2003-18 (2004-03) pp.47-53, 2004
- 20) 下倉尚義, 賀谷信幸, 篠原真毅, 松本紘, "定点間マイクロ波送電実験", 電気学会部門誌(電力・エネルギーB 分冊), Vol.116-B, No.6, pp.648-653, 1996