

宇宙という生存圏と宇宙太陽発電

臼井 英之*

1. 概要

実用衛星利用、宇宙ステーション構築など、すでに人類の生存基盤として宇宙は利用されており生存圏の一部と考えられる。本講演では、人類生存基盤としての宇宙圏の紹介と、現在検討が進められている、将来のクリーンな大型基幹電力供給源である宇宙太陽発電所（SPS）の概要、および、予想される宇宙環境との相互作用に関する研究を紹介する。

2. 宇宙という生存圏

2.1 太陽-地球環境

まず始めに、本講演で対象とする宇宙空間は、人類が生存基盤として現在利用している、または、将来利用する可能性のある比較的地球に近い宇宙であり、地球を含む太陽系宇宙空間を意味する。ご存知の方も多いかもしいませんが、宇宙空間は真空ではなく、その 99.9% 以上は宇宙プラズマという希薄な電離気体で満たされている。太陽表面からは太陽風と呼ばれる高速プラズマ流が四方八方に常に放出されており、地球を含む惑星はその太陽風にさらされている。しかし、幸いなことに、地球には固有磁場があり、これと太陽風との相互作用によって磁気圏が地球近傍宇宙空間に形成されている。この磁気圏の存在によって地球表面は太陽風からの直接の影響を免れている。

図 1 に地球磁気圏の概念図を示すが、太陽風の圧力の影響によって太陽側では圧縮される一方、太陽とは逆方向では尻尾のように引き伸ばされていることがわかる。大切なことは、この磁気圏の構造は静的なものではなく、太陽活動度変動によって刻々と変化する太陽風プラズマの影響により、磁気圏自体もダイナミックに変動するということである。星の誕生、爆発など目に見える変化だけではなく、それらの間を満たす宇宙プラズマ環境もダイナミックに変化し、地球近傍の宇宙環境にも大きく影響を与えているのである。人間が地上から目にするのできるその現象の一つとして、オーロラがある。

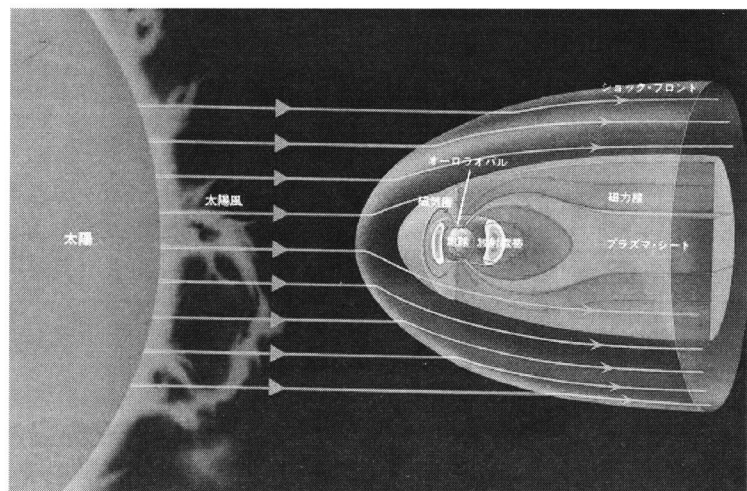


図 1：地球磁気圏の概念図

オーロラは、通常「オーロラ楕円帯 (Auroral oval)」と呼ばれる特別な地域にのみ高い頻度です。磁軸極を中心に、太陽に対して昼側では地磁気緯度で 77~78 度、夜側では 69~70 度の低緯度側にずれた楕円形の地域にオーロラ出現の頻度が高い。高度は 90~110 km の高さに出現し、カーテ

* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生存科学計算機実験分野. E-mail: usui@rish.kyoto-u.ac.jp

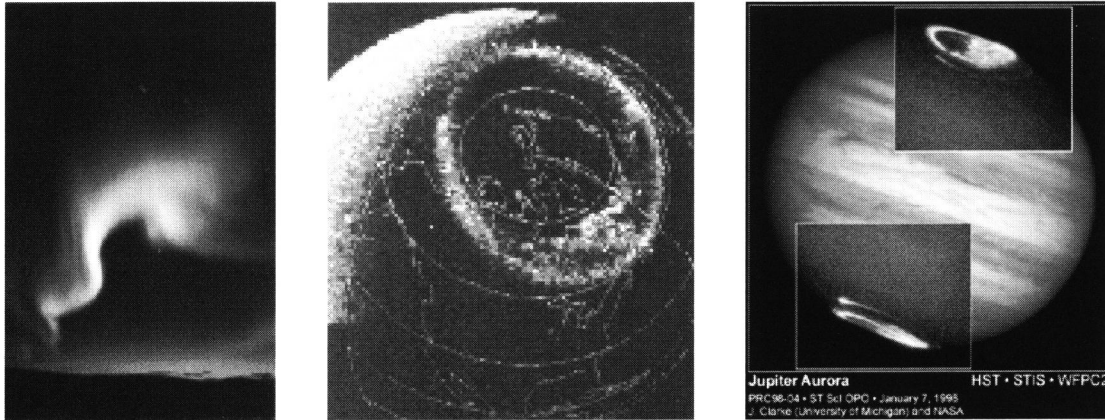


図2：オーロラの姿（左：地上から、中央：宇宙から、右：木星のオーロラ）

ンの高さは 100 km 程度が通常である。水平方向の長さも、数百 km から 1,000 km をこえ、5,000 km に達するものまでである。この神秘的なオーロラは、実は太陽風と地球磁気圏の相互作用によって生じるダイナミックな現象である。詳細は省くが、磁気圏に吹き付ける太陽風の変動に伴い磁気圏の尾部（地球から見て太陽と反対側）が圧縮を受け、磁気圏に一旦蓄積された太陽風エネルギーが放出される現象と密接に関係している。磁気圏内部で蓄積されたエネルギー開放があると極域につながった磁力線沿いに電子の高速流を発生させ、それが電離層形成領域とほぼ同じ高度で中性粒子と衝突しエネルギーを失います。同時に、衝突を受けた気体（酸素や窒素）はそのエネルギーレベルが上昇し（励起状態）、それが基底状態に戻るときにオーロラの発光が起こる。すなわち、太陽活動が活発なときはオーロラが起りやすいわけである。

このように、宇宙環境は静的なものではなく、まさに地球上の天気のように常に変動している¹⁾。このような観点から、近年では、太陽活動変動による地球近傍環境への影響を「宇宙天気」として研究することが世界的な動きとなっている。日本でも宇宙天気ニュースは毎日配信されており、インターネット経由で太陽活動や太陽風、オーロラ活動の状況が報告されているので、ご興味のある方は一度アクセスしてもらいたい (<http://swnews.nict.go.jp/swnews.html>)。

2.2 宇宙環境利用

アポロ計画によって人類が月に降り立ってから 40 年近くたち、その間にスペースシャトルの実用化、宇宙ステーションの建設、日本人宇宙飛行士の誕生など、宇宙は人類にとって確実に近くなってきた。また、通信衛星や GPS、気象衛星などの利用も日常的となり、宇宙はすでに我々の生活のインフラストラクチャーを支える生存基盤圏のひとつとなっている。今後、無重力や高高度観測などの利点を使って新素材開発や地球環境観測、資源探査など、宇宙環境の新しい利用もますます増えていくことは確実である。

宇宙環境利用のひとつとして本研究所在取り組んできているものとして、宇宙太陽発電所（Space Solar Power Station: SSPS）構想がある。これは、太陽エネルギーを宇宙で受けて電波に変換し、宇宙からその電波を地上に向けて送信し、それを地上でエネルギーとして利用する、というものである。昨今の報道で、エネルギー枯渇、人口増加、地球温暖化などの地球規模の問題が取沙汰されている。当研究所では、人類の持続可能型社会の実現にむけて、最先端技術を用いた解決方法を研究しており、そのひとつとして、太陽エネルギー利用に基づくクリーンな大型基幹電力供給源である SSPS の実現を目指し、その基盤研究、特に電波によるエネルギー伝送技術開発や宇宙環境との相互作用などについて研究を行っている。

3. 宇宙太陽発電所 (SSPS)

3.1 SSPS 概略

宇宙太陽発電所 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(図3 参照)。この 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²⁾。SSPS は太陽エネルギーを利用する発電であるため、温暖化ガス抑制に大きく貢献できると考えられる。

SSPS では無線による電力伝送技術が重要である³⁾。SSPS は上空 36,000 km の静止衛星軌道を取り、それから地上に向かって無線送電を行う。地上の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 2.45 GHz や 5.8GHz の周波数を用いることが検討されている。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⁴⁾。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⁵⁾。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、SSPS 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

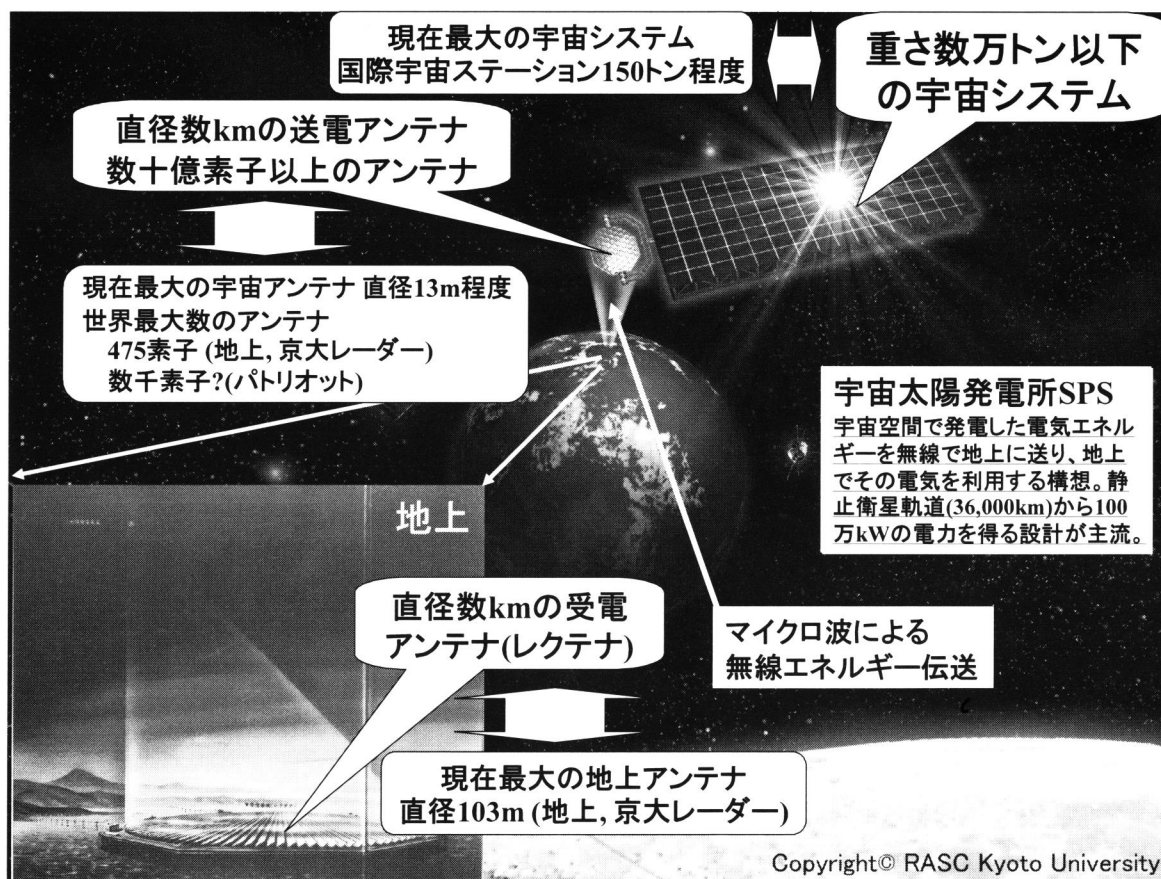


図3: 宇宙太陽発電所 SSPS の概念図と特徴

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。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。

3.2 マイクロ波ビームの電離層プラズマ環境への影響

SSPS において考慮しなければならない問題のひとつに、マイクロ波ビームによる地球の電磁環境、特に電離層への影響評価があげられる。電離層プラズマに対するマイクロ波ビームの影響としては、①中性粒子と電子の衝突による電子加熱、密度擾乱。マイクロ波ビームの熱的自己収縮現象 ②非線形効果による低周波プラズマ波動励起 ③ポンデロモーティブ非線形力による密度擾乱、ビームの自己収束現象などが考えられる。

①は、過去に Perkins and Roble⁶⁾ によって線形理論的考察がなされているが、SSPS モデルでの実験的検証は行われていない。予想される現象としては、以下の通りである。

電離層を伝搬する電波は電子がイオンや中性粒子と衝突することによって吸収を受けるとともに、吸収された電波のエネルギーは電子の加熱エネルギーとなる。この電子加熱によりマイクロ波ビームの自己収縮(熱的自己収縮)が生じる。すなわち、電子密度ゆらぎが生じると電波屈折のため電子密度の薄いところに電波が収束するようになり、その結果密度の薄いところでさらに電界が強くなる。そこでは電子加熱が強く、電子が膨張し密度はますます薄くなる。逆に電子密度の濃いところでは、電界強度は弱く加熱も弱く、相対的に密度は濃くなる。このような増幅作用によって不安定が生じ電子の不規則分布構造を伴って電波の自己収縮(フィラメンテーション)が起こる。これを電波の熱的自己収縮と呼ぶ。これらの現象に関しては過去にいくつかの研究がなされている。

②に関しては、大振幅電磁波とプラズマとの非線形相互作用であり、これまで京都大学 生存圏研究所のスペースプラズマ・グループを中心として研究が進められてきた⁷⁾。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、ラングミュア波などのメガヘルツ帯の低周波波動が発生、成長してゆく。この現象は非線形 3 波共鳴現象の一種である。1982 年

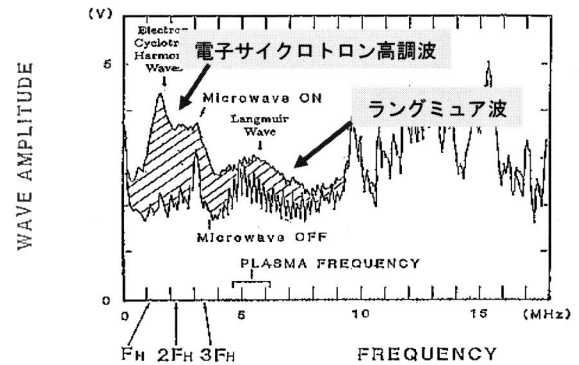


図 4: MINIX ロケット実験で観測された波動スペクトラム

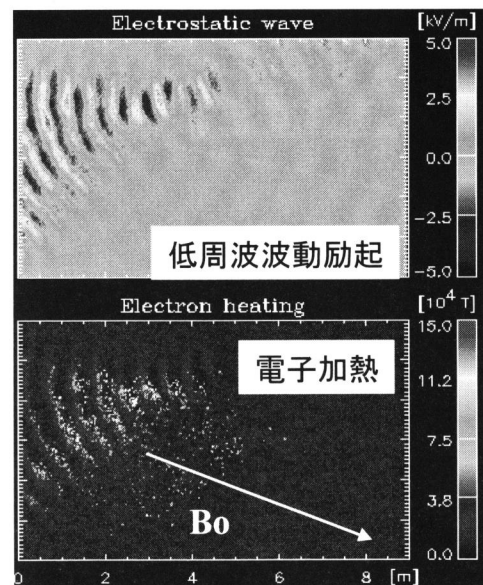
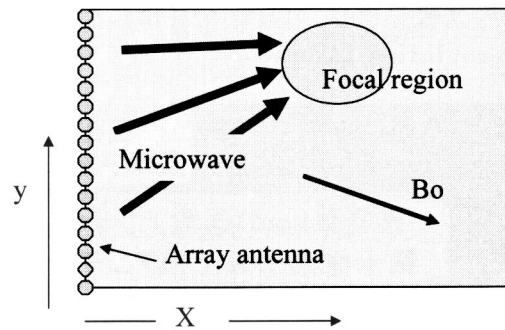


図 5: 2 次元計算機実験モデル(上図)、低周波 (MHz 帯) プラズマ波動励起(中図)とそれに伴う電子加熱(下図)

に行われた MINIX ロケット実験においてこの現象は観測された。図 4 には MINIX ロケット実験で観測された波動スペクトルを示す。親ロケットに搭載された 830 W のマグネトロン 2 基から 2.45 GHz マイクロ波を電離層に放射し、切り離された子ロケットによりスペクトルを観測した。図からわかるように、マイクロ波放射時には MHz 帯のラングミュア波と電子サイクロトロン高調波に相当する波動が強く受かった。この結果は大振幅マイクロ波放射による非線形 3 波共鳴現象を示唆している。この現象をより定量的に解析するため、電磁粒子コード KEMPO (Kyoto university ElectroMagnetic Particle cOde)⁸⁾ を用いた宇宙プラズマ計算機実験が行われた。図 5 にモデルとその結果を示す。2 次元空間の左に並べられたアレイアンテナからマイクロ波に相当する大振幅電磁波を放射し、ある領域に集中させる。図 5 の中図、下図はそれぞれ 3 波共鳴によって励起された低周波波動の空間分布とそれによって加熱された電子の様子をスナップショット的に示したものである。この低周波励起の時間的な成長率はマイクロ波の周波数、強度、地球磁場との角度などに依存する。マイクロ波の周波数は大きいほど成長率は小さくなる。また、当然ながら、マイクロ波の強度が大きければ、成長率は大きくなり、低周波波動は発生しやすくなる。図 5 に示した計算機実験では、現象を見やすくするためマイクロ波の強度を SPS で想定されている場合の数百倍大きい (60,000 V/m) ものをを用いた。この場合、数十マイクロ秒で電子加熱が発生するが、電界強度を下げて SPS の場合を想定すると、同じような現象が起こるには数百ミリ秒かかる。問題はこの現象によりマイクロ波エネルギーの何% が低周波波動や電子加熱に費やされるかであるが、上に延べた理論解析によると、エネルギー消失という観点からも、余計な波動の励起という観点からも実用上ほとんど問題はないと思われる。しかし、その発生レベルを事前に検証し、発生メカニズムを解明することは非常に重要であり、電離層環境への影響とともに今後計算機シミュレーションによる定量的な解析を進める必要がある。また、電離層の電子密度も太陽活動度や季節により変動しており、この密度変動も考慮に入れてマイクロ波と電離層の相互作用を考える必要がある。



図 6 : マイクロ波ビーム境界における電界強度の空間勾配によるポンデロモーティブ力

③については、上記グループで平成 16 年度から調査している。大振幅マイクロ波がプラズマ中を伝搬していく際に生じるマイクロ波電力密度ゆらぎの成長やマイクロ波ビームの自己収束には、上述のプラズマ加熱に起因するもの以外にマイクロ波電力密度の空間勾配の存在により発生するポンデロモーティブ力という非線形力によるものがある。熱的自己集束現象はプラズマ密度に比例するため電離層以外の宇宙空間では問題は発生しにくい。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、電離層以外でも発生する可能性がある」と理論的に予測されている。この不安定性が生じると、マイクロ波ビームの自己収束によりビーム中心のマイクロ波強度が仮定したものより強くなり、電離層の加熱の問題や地上での強い電力密度の問題が発生する可能性がある。

ポンドロモーティブ力については、レーザー加速器や核融合の分野では、多くの研究がなされているが、このマイクロ波ビーム強度の空間勾配によって発生するポンドロモーティブ力による電離層プラズマ密度擾乱現象(図6参照)については、いまだ詳細な研究はなされていない。そこで、マイクロ波ビームによって発生するポンドロモーティブ力が電離層電子に与える影響についての基礎的な理解を深めるために計算機シミュレーションを開始した。

電界強度に空間勾配をもつ高周波数の電磁波がプラズマ中を伝搬すると、その領域内の荷電粒子にはポンドロモーティブ力と呼ばれる非線形力が働く。高周波電界を $E(x, t) = E_0(x) \cos \omega t$ としその中の置かれた荷電粒子の運動を考える。電界振幅 E_0 が空間の滑らかに変化する関数であり、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はい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る。ポンドロモーティブ力 F_p は以下の式で表すことができる。

$$F_p = -\frac{q_e^2}{4m_e \omega^2} \frac{d}{dx} (E_0^2) \quad (1)$$

式(1)において、 m_e , q_e は電子の質量と電荷量、 ω は電磁波の周波数、 E_0 は荷電粒子の位置での電界をそれぞれ示す。マイクロ波ビームでは一般に、ビーム中心を原点とする極座表系においては径方向内向きのベクトルと考えられるので、ビーム伝搬領域の電子やイオンには径方向外向きにポンドロモーティブ力が作用する。そのためポンドロモーティブ力により電子やイオンは次第にビーム中心から外向きに変位し、結果としてビーム領域のプラズマ密度が減少することが予想される。計算機シミュレーションでは、長年にわたり京大生存圏研究所スペースプラズマシミュレーション研究グループにおいて開発されてきた3次元電磁粒子コード KEMPO3D (Kyoto university's ElectroMagnetic Particle cOde、図7参照)を用いる。この KEMPO3D は、空間をグリッドで実現し、荷電粒子に対しては運動方程式、電磁界に対してはマクスウェル方程式(及びポアソン方程式)を自己矛盾なく解き進

3次元電磁粒子コード

KEMPO3D (Kyoto university's ElectroMagnetic Particle cOde) を使用。

基礎方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}_s}{\partial t} &= \frac{q_s}{m_s} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_s \times \mathbf{B}) \\ \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial t} &= \mathbf{v}_s \end{aligned} \right\} \text{粒子に対しては運動方程式}$$

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{電磁界についてはMaxwell方程式}$$

図7: KEMPO3D シミュレーションコードで用いられる基本方程式

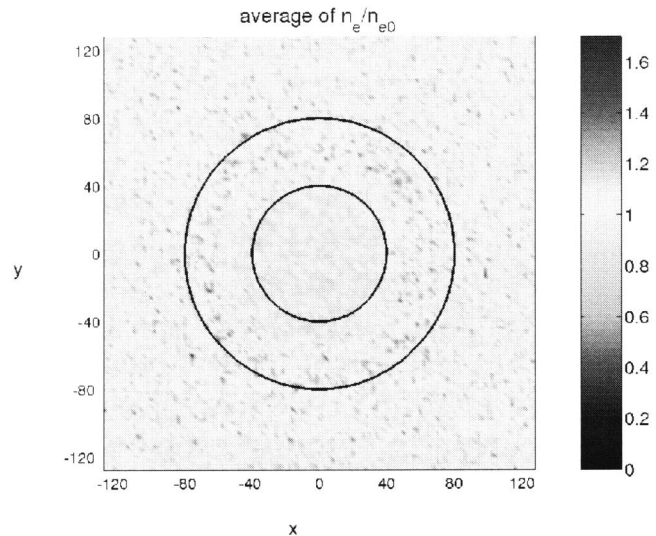


図8: ポンドロモーティブ力によるプラズマ擾乱の例

めて行くプログラムである。

図8に計算機シミュレーション結果の一例を示す。図はプラズマの密度のコンター図であり、紙面垂直方向にマイクロ波ビームが伝播している。内側の円内部がビーム強度一定で内外の円の間がマイクロ波強度の空間勾配が存在する領域である。コンター図の色の違いからわかるように、強度に空間勾配を持つマイクロ波中では、プラズマにポンドロモーティブ力が作用し、それにより電界強度の強い領域からより弱い領域、すなわちビーム中心から外側にプラズマが押し出されてその密度に擾乱が発生することが分かった。現在、SSPSのパラメータや電離層での実証実験衛星のパラメータを用いて、ポンドロモーティブ力による電離層密度擾乱に関する定量評価を行っている。

3.3 SPS 建設に伴う宇宙環境への影響

マイクロ波ビームとは直接関係はないが、SPS 輸送時に用いる電気推進エンジン、たとえばイオン推進エンジンから放出されるキセノンやアルゴンなどの重イオンによる地球磁気圏、プラズマ圏への影響は無視できない。Chiu (1980)⁹⁾によると、SPS を LEO から GEO へ輸送する場合、イオン推進エンジンから総量で 106 kg のアルゴンが放出され、これは高度 500 km 以上の電離圏、プラズマ圏に存在するイオン総量に匹敵すると算出している。この重イオン放出とプラズマ圏、磁気圏プラズマとの相互作用によりプラズマ不安定性が予想され、その結果、プラズマショック構造の形成、低周波波動の励起、電子加熱などの現象が生じる。これらの点について、理論予測、計算機シミュレーション解析が開始されている。また、放出された重イオンは太陽活動変動によって生じるサブストームなどにより拡散すると予想されるがその時間的変化、空間分布についても今後なんらかの手法により調べていく必要がある。

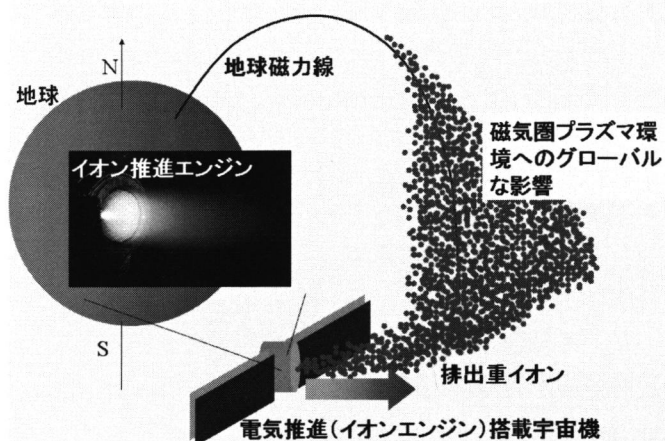


図9：SSPS 軌道間輸送に使われるイオン推進エンジンによる磁気圏環境への影響

3.4 宇宙環境からの影響

前章において動的な宇宙環境について述べたが、宇宙利用においてはこの動的な宇宙環境の影響を考慮する必要がある。これまで、衛星設計において放射線や熱放射対策が恒常的な問題として対処されてきたが、これに加えて、宇宙プラズマとの相互作用による衛星帯電や放電についても長年問題となってきた。衛星帯電の度合いは衛星表面からの光電子放出、2次電子放出の量と衛星に流れ込む周辺プラズマの量に大きく依存する。すなわち、衛星帯電は、衛星の表面形状、素材だけでなく、宇宙プラズマ環境に影響を受ける。衛星の各部位がすべて接地されており等電位であれば放電の可能性は少ないが、金属だけでなく誘電体なども素材として用いられるため、衛星表面において部分的に帯電値が違う場合がある。この電位差がある閾値を超えると、その電位差を緩和するために回りに存在するプラズマを通じて急激な放電が生じ、衛星システムに障害を与える原因となる。このような衛星障害を未然に防ぐために、部分帯電を最小限に防ぐ衛星表面素材の工夫や、プラズマを衛星から噴射して衛星の帯電量を調節する装置の搭載などが行われている。しかし、これらの試みも万全ではなく、宇宙プラズマ環境の急激な変動が原因となって生じる帯電・放電、それによる衛星システム障害が依然としてあとを絶たない。特に、上に述べたオーロラ領域における急激な高エネルギー電子流の影響や、放射線帯と呼ばれる高エネルギープラズマが存在する領域を通過する衛星に帯電・放電による障

害が多い。今後、衛星システムの大規模化に伴う高電圧化、高電力化によって、ますます宇宙プラズマとの相互作用が懸念される。SSPS においては、これまでにない超大型太陽電池パネルの利用により高電力システムとなる。この場合における帯電問題についても事前の対処が必要となる。

4. まとめ

本稿では、人類の生存基盤領域となりつつある地球近傍の宇宙環境について概説し、そこでの宇宙利用のひとつとして宇宙太陽発電所 SSPS について簡単に説明した。また SSPS と宇宙環境との相互作用として、SSPS から無線電力伝送のために用いられるマイクロ波ビームによる電離層大気への影響に関する計算機シミュレーション研究を紹介した。マイクロ波が電離層プラズマを通過する際に、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として、低周波静電波動の励起現象やマイクロ波のセルフフォーカス作用、プラズマの穴開き現象などがあげられる。これらは理論的に予測されているものであり、その現象も理解され始めている。しかし、実際の物理現象としてロケット実験など、電離層中の現象として確認されているのは低周波静電波動の励起現象だけである。その他の現象は理論予測または実験室レベルでの確認にすぎない。これまで Perkins らにより電離層でのビーム電力密度として 23 mW/cm^2 の閾値が得られており、リファレンスモデルにも採用されているが、この閾値は電子衝突による加熱という観点から得られたものである。今後この値の正当性について計算機シミュレーションなどの数値的手法を通して議論する一方、マイクロ波と電離層プラズマとの相互作用を最小限に抑え高効率なマイクロ波エネルギー伝送を実現するための基礎データ取得のために、電離層における実証実験を早急を実現する必要がある。

参考文献

- 1) 恩藤忠典、丸橋克英、宇宙環境科学、オーム社、2000.
- 2) Glaser, P. E.; "Power from the Sun; Its Future", Science, **162**, 857-886, 1968.
- 3) 電波研究所季報：太陽発電衛星 (SPS) 特集号, 電波研究所, **28(148)**, Dec. 1982.
- 4) Brown, W.C.; "The history of power transmission by radio waves", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-32, No. 9, 1230-1242, 1984
- 5) Matsumoto, H., "Research on Solar Power Station and Microwave Power Transmission in Japan: Review and Perspectives", IEEE Microwave Magazine, 36-45, Dec. 2002.
- 6) Perkins, F. W. and R. G. Roble, "Ionospheric heating by radio waves; predictions for Arecibo and satellite power station", JGR, No. 83, 1611-1624, 1978.
- 7) Usui, H., H. Matsumoto, R. Gendrin, and T. Nishikawa, Numerical simulations of a three-wave coupling occurring in the ionospheric plasma, Nonlinear Processes in Geophysics, **9**, 1-10, 2002.
- 8) H. Matsumoto, Y. Omura, Computer Space Plasma Physics, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 21-65, 1992.
- 9) Chiu. Y. T., Fate of argon-ion injection in the magnetosphere, AIAA-80-0891, 1980.