

Computer experiments on space plasmas perturbation caused by a spatial gradient of microwave beam intensity

Narihiro Nakamoto

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Abstract

SPS (Space Solar Power System) has been proposed for one of the solutions to the energy and environmental problems. In SPS, electric power generated with solar cells installed on the satellite can be transferred to the ground by intense microwave beam. In the energy transfer to the ground with microwave beam, we need to consider the interactions between the microwave beam and the ionospheric plasmas. Various types of interactions between them and influences on the energy transfer have been studied and estimated theoretically or numerically. In the current study, we particularly focused on the electron perturbation due to the Ponderomotive force which is one of the nonlinear interactions caused by the spatial gradient of microwave beam intensity. We should analyze this phenomenon because it may modify the ionospheric plasma and change the microwave beam intensity.

In order to investigate the basic process of the electron response and its associated field perturbation by the Ponderomotive force, we performed computer experiments with electromagnetic particle simulation code.

To investigate the Ponderomotive force in a plasma, we performed two-dimensional computer experiments. In our two-dimensional model, we assumed a circular region with the gaussian beam intensity at the center.

We first performed simulations with parameters of the actual SPS experiment in the LEO. From these simulations we can't find out the perturbation of the electron density. But we should perform longer simulations and analyze which parameters decide whether the plasma perturbation occurs or not.

We next changed the microwave beam into a stronger and lower one to make the plasma perturbation and we then analyzed the properties of this phenomenon. With these parameters, the perturbation of the electron density occurs by the spatial gradient of beam intensity. The fluctuation decreases as the frequency of microwave increases or the spatial gradient of microwave beam intensity decreases. At the beam region, a static electric field is enhanced by the charge polarization caused by the electron shift. This static electric field settles plasma into a steady state.

マイクロ波ビーム強度の空間勾配による 宇宙プラズマ擾乱に関する計算機実験

京都大学 生存圏研究所
中本 成洋

本研究の背景と目的

将来起こるであろうエネルギー枯渇問題及び地球環境問題を同時に解決する方法の一つとして、宇宙太陽発電所 SPS が提唱されている。

SPS とは、地球の静止軌道上において太陽電池パネルを用いて発電を行い、発電したエネルギーをマイクロ波によって地球に送電するというシステムである。

SPS には多くの利点があるが、その開発・運用にあたっては考慮しなければならない問題点がいくつもある。その一つとして、マイクロ波ビームと地球の電磁環境、特に電離層プラズマとの相互作用があげられる。過去の研究において電離層による伝搬するマイクロ波に対する影響として屈折、シンチレーション、吸収の効果などが挙げられるが、その多くは SPS においては問題にならないとされている [1]。またマイクロ波と電離層プラズマとの相互作用として、電子衝突による電子密度擾乱やプラズマ加熱 [2]、熱的自己収縮現象、ポンドロモーティブ力によるビームの自己収束現象 [3]、及び非線形プラズマ波動-粒子相互作用による低周波波動励起、電子加熱、密度擾乱 [4][5] などが理論研究やロケット実験により詳細に解析されている。[6][7]。

本研究では、マイクロ波の地球の電磁環境に対する影響の一つとして示唆されている、マイクロ波ビーム電界強度の空間勾配によって生じ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について取り扱う。

この現象は、マイクロ波ビームの電界強度に空間的な勾配があるときに、ポンドロモーティブ力と呼ばれる非線形力が働きビーム領域内の荷電粒子がビーム領域から押し出され結果として、マイクロ波ビームが伝搬する領域ではプラズマ密度が減少する現象である。また、この現象にともない、SPS のマイクロ波ビームの強度やビーム径を変化する可能性があり、SPS を運用する際には考慮しなければならない問題の一つであると考えられるが、現在のところ詳細な研究はなされていない。

本研究では、このポンドロモーティブ力によるプラズマ密度擾乱現象の素過程や誘起現象を計算機実験により定量的に解析し、最終的には密度擾乱現象の発生条件やマイクロ波エネルギー送電に対する影響を解明することを目的としている。

ポンドロモーティブ力とは

プラズマ中を電界強度に空間勾配をもつ高周波数の電磁波が伝搬すると、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 [8]。単一の荷電粒子に働くポンドロモーティ

ブ力 F_p は

$$F_p = -\frac{q^2}{4m\omega^2}\nabla E_0^2 \quad (1)$$

となる。ここで m 、 q は荷電粒子の質量と電荷量、 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。式 (1) から分かるようにポンドロモーティブ力の性質として、電荷の符号によらない、イオンに対してよりも電子に対しずっと強く作用する力である、電界強度の強い領域から弱い領域に向く力である、電界の周波数が増加すると力は弱くなることなどが挙げられる。

2次元計算機実験

本研究では、電磁粒子コードを用いている。このコードでは1次元、2次元、及び3次元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)を解き進めて行くプログラムであり、プラズマ粒子の運動と電磁界を矛盾なく求めることが可能である [9]。

今回採用したシミュレーションモデルについて説明する。アンテナから放射されプラズマ中を伝搬するマイクロ波ビームを考える。このときビーム進行方向に垂直な平面でこのマイクロ波ビームを切った断面を2次元シミュレーション空間とする。この空間の中心に円形領域を設け、その内部の各グリッドに強制的に電界と磁界を与えることによりマイクロ波ビームを模擬する。このときマイクロ波は円偏波かつ平面波としている。なお、プラズマ中のイオンについてはその運動による効果を無視し、背景に一樣に固定させている。

SPS 実証実験パラメータによるシミュレーション

まず SPS 実証実験で想定されているマイクロ波パラメータ及び電離層プラズマパラメータを用いてシミュレーションを行った。主なパラメータは次のようである。なおビームの強度分布は 10dB ガウシアン電力密度分布とし、外部地場はないものとしている。また計算機実験の制約などにより、電子温度、周波数、アンテナ半径、電界強度をそれぞれ現実の値の 10^2 倍、 $1/6$ 程度、 $1/2$ 、 10 倍としている。

表 1: SPS 実証実験パラメータ

電離層プラズマパラメータ	
電子温度	10^5 K
プラズマ周波数	9.0 MHz
マイクロ波パラメータ	
周波数	1.0 GHz
アンテナ半径	2.0 m
電界強度	6000 V/m

このシミュレーション結果を図 1 に示す。この図は、2次元シミュレーション空間内の電子密度の分布を示している。この図から分かるように時間が経過しても電子密度に変動が見られないことが

分かる。しかし、この実験結果から SPS 実証実験では密度擾乱現象が生じないと判断することはできない。今回行った実験は 10^{-7} 秒間程度の短時間の状態をシミュレーションしたものであり、今後 SPS での時間スケールを用いたシミュレーションを行うことで、より現実的な SPS での影響評価が可能であると考えられる。

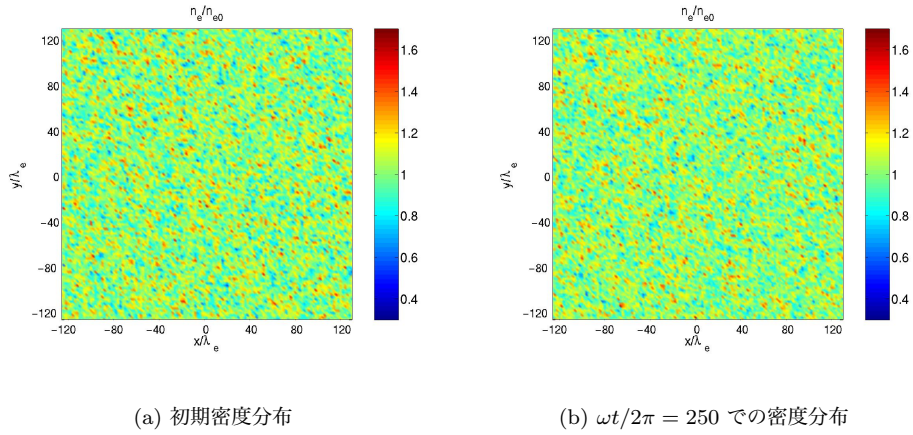


図 1: 電子密度 n_e/n_{e0} の時間変化

大振幅電磁波パラメータによるシミュレーション

次に、密度擾乱現象の発生およびその現象過程を調べるために、パラメータを変化させて実験を行った。用いたパラメータは表 2 の通りである。表 2 のように強度を SPS 実証実験の約 10^3 倍、周波数は $1/30$ としている。シミュレーション結果を図 2 に示す。図 2 から分かるように、時間が経過

表 2: 大振幅電磁波パラメータ

電離層プラズマパラメータ	
電子温度	5×10^6 K
プラズマ周波数	6.0 MHz
電磁波パラメータ	
周波数	180 MHz
アンテナ長	2.0 m
電界強度	3.5×10^5 V/m

するとビーム中心で電子密度が低下していることが分かる。この密度低下は時間とともに際限なく進行するわけではない。ある定常的な密度分布に落ち着くのである。またこの定常状態での励起電界を調べると、ビーム領域に径方向外向きの静電界が発生しているのが分かった。

この現象のプロセスを考える。まず一様に分布したプラズマ中に強度空間勾配を持った電磁波ビームが入射すると、強度に空間勾配のある領域中の電子にはポンデロモーティブ力が作用し、電子は

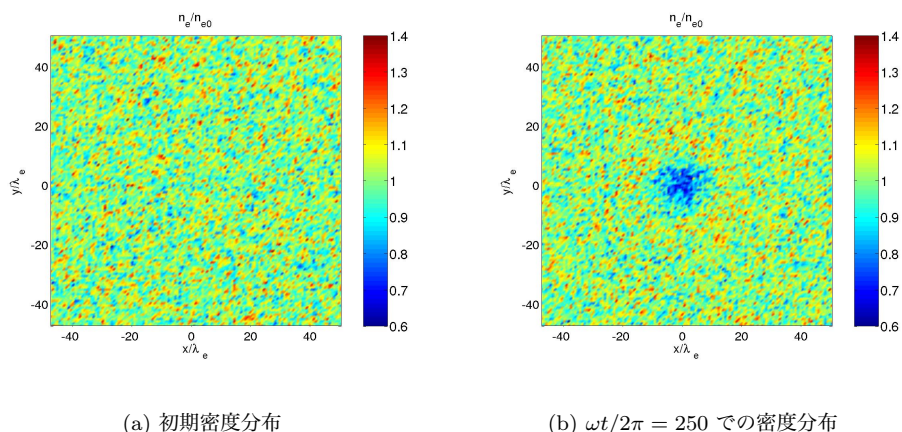


図 2: 電子密度 n_e/n_{e0} の時間変化

ビーム径方向外向きに変位し始める。時間の経過とともに、ビーム中心での電子密度が低下し、そのまわりの電子密度は上昇する。この電荷の分極により、ビーム径方向外向きに静電界が発生する。この静電界により電子にはビーム中心に引き戻されるような力が作用する。時間が経過し電子が更に変位して電荷の分極が大きくなると静電界も大きくなり、やがて電子に作用するポンデロモーティブ力と静電界による力が釣り合う状態となる。この状態でプラズマは定常的な状態となることが考えられる。

また別の実験により、この密度擾乱現象のパラメータ依存性を調べた。それにより、密度低下は電磁波の周波数が増加する程小さくなる、また強度自身ではなく強度の空間勾配の大きさに依存することが分かった。

まとめと今後の課題

本研究では、SPS においてその発生が示唆されているポンデロモーティブ力による電離層プラズマ密度擾乱現象について計算機実験を行った。それにより、SPS 実証実験のパラメータを用いたシミュレーションでは、 10^{-7} 秒程度の時間スケールでは密度変動が生じないことが分かった。さらに、振幅が 10^5 V/m オーダーで、周波数が 180MHz の電磁波ビームを用いた実験では、プラズマに密度変動が生じ、ビーム領域の電子密度が減少することを確認し、さらにこの現象プロセス、基本的性質を明らかにした。

今後より現実の SPS の状況に近づくため、長時間のシミュレーションを行ったり、地球地場やイオンの運動による効果を含めたシミュレーションを行いその影響を評価し、最終的に密度擾乱現象の生じないような SPS パラメータ指標を導きたいと考えている。

参考文献

- [1] 松浦 延夫, 大電力マイクロ波伝送に伴う電離大気環境効果, 電波研究所季報, pp.723-730 (1982.12).
- [2] Perkins F.W, R.G.Roble, Ionospheric heating by radio waves; predictions for Arecibo and catellite power station, JGR, No.83, pp.1611-1624 (1978).
- [3] 篠原 真毅, マイクロ波電力伝送の受電システム並びに電力ビームの伝搬特性に関する研究, 京都大学, p.117-135 (1996).
- [4] 松本 紘, 平田 尚志, 端野 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)
- [5] 矢代 裕之, 大振幅放射電磁波-宇宙プラズマの非線形相互作用の研究, 京都大学大学院修士論文 (1991).
- [6] H.Matsumoto, Numerical estimation of SPS microwave impact on ionosphere environment, Acta Astronautica, Vol.9, pp.493-497 (1982).
- [7] N.Kaya, H.Matsumoto, S.Miyatake, I.Kimura, M.Nagatomo and T.Obayashi, Nonlinear Interaction of strong microwave beam with the ionosphere, MINIX rocket experiment, Space Solar Power Review, Vol.6, pp.181-186 (1986).
- [8] Dwight R. Nicholson/著, 小笠原 正忠, 加藤 鞆一/共訳, プラズマ物理の基礎, 丸善株式会社, p.1-40, 1986
- [9] H.Matsumoto, Y.Omura, Computer Space Plasma Physics, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, p.21-65 (1992).