

不均質媒質中でのプラズマ波動の伝搬についての計算機実験

加藤 雄人^{1*}、小野 高幸¹、飯島 雅英¹

1：東北大学・理学研究科・地球物理

*現在、京都大学宙空電波科学研究センター所属

1. はじめに

地球をとりまく身近な宇宙空間プラズマ中では、オーロラキロメートル電波などに代表されるさまざまな非熱的電磁波放射現象が見られる。このような電磁波放射は、パルサーなどの特異天体からの電磁波放射機構と多くの共通した物理を有すると考えられる。このような電磁波には、高エネルギー粒子の加速度運動によって放射される電磁波（シンクロトロン放射等）によるものも含まれるが、近年の宇宙空間物理学は、それらの多くが、別の機構、すなわちプラズマの協同現象としてのプラズマ波動の不安定性に起因するものであることを明らかとしてきた。このような協同現象としての不安定性は、位相速度の小さい、したがって波長の短い波動ほどプラズマと強く相互作用し、顕著に現れる性質をもっている。この波動は、縦波の性質を持つプラズマ波動（静電的プラズマ波動）である。特にその中でも、Upper Hybrid Waveは、広い波数領域にわたって存在し、巾広いエネルギーレンジのプラズマ粒子（電子）と相互作用し、大きなエネルギーを持ちうる波動である。近年の人工衛星観測は、実際の宇宙空間プラズマにおいて、Upper Hybrid Waveがこのような重要な働きをしていることを実証してきた。しかしながら、このUpper Hybrid Waveで代表される静電的プラズマ波動は、プラズマ中の内部モードの波動であり、そのままでは、電磁波となってプラズマの希薄な領域に放射されない。そこには、真空中の電磁波に連続的に繋がるプラズマ波動モード（電磁波モード）への変換過程（モード変換）が必要である。

この静電波を起源とする宇宙電磁波の放射機構は、Oya (1971)による静電波から電磁波への変換プロセスの解明に始まり、Auroral Kilometric Radiation [Benson, 1975; Oya and Morioka, 1983]や木星デカメートル電波 [Oya, 1974; Jones, 1977]、Nonthermal Continuum Radiation [Jones, 1980; Okuda et al, 1982]などの電磁波生成機構の一つとして多くの研究者により研究が進められ、OJB理論（Oya-Jones-Budden理論）と呼ばれることもある。過去の研究においては主に理論に基づく検討と飛翔体による観測結果との比較がなされ、その変換の効率について議論されてきた。現在までに、地球内部磁気圏に存在するプラズマポーズなど、急峻な密度勾配が存在する領域において有効な変換が可能となることが指摘されている。しかし、このモード変換過程を厳密に取り扱う為には、プラズマ波動伝搬の媒質となる背景プラズマに対して密度勾配を持たせる必要があり、解析的アプローチでは困難な点が多い。従来理論では数密度の異なる複数の媒質を層状に重ね合わせて密度勾配を記述し、波動の分散を解くFull-Wave法が用いられている [Nagano et al., 1975; Budden and Jones, 1987]。このFull-Wave法はプラズマ波動

の伝搬による強度の変化およびモード変換過程における変換効率の導出に対して有用な手法であるが、媒質の時間変動は考慮されないことと、波動方程式の特異点となる共鳴点付近における波動の振る舞いを扱うことが困難であること、モデルの設定が単純なもの（媒質の一次元的変化、波動の平面波の仮定等）に限られること、波動の非線形過程を扱えないことといった問題点、制約が残されている。

一方、計算機シミュレーションは、このFull-Wave法の制約を取り除き、より自由な問題設定を可能とする。波動の共鳴点付近の振る舞いも、場の方程式系を直接解くことにより、より正確な解が得られる利点がある。例えば、人工衛星等の観測を境界条件とした具体的な計算を実施し、観測結果と対比すると言った、従来にない定量的な機構の議論も可能となる点は意義深い。電波放射の逆過程である、電磁波からUpper Hybrid Waveへのモード変換（プラズマによる電波の吸収）についてのシミュレーションは、下部電離圏の場合について[Ueda et al, 1998]の報告例がある。しかし、電磁波放射に関わる電磁波へのモード変換過程についてのシミュレーションは、そのシミュレーション手法が確立しておらず、これまで実施されていない。本研究は、Upper Hybrid Waveから電磁波への変換過程を再現することを目的として、2次元の電子流体コードを用いた計算機シミュレーションを行った。本稿では、媒質となる背景プラズマ中に密度勾配を設定し、系の中に注入したUpper Hybrid Waveの伝搬とともに生じるモード変換過程の計算結果について報告する。

2. シミュレーションの概要

シミュレーションで用いる基礎方程式は以下の通りである。

系内を満たすコールドプラズマに対して流体近似を用い、イオンは静止しているとして、電子についてのみその運動を扱う。また、電磁場は Maxwell 方程式を用いて、それぞれの時間発展を解き進める。

$$\begin{aligned}\frac{\partial v}{\partial t} &= -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{en}{\rho} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= -\nabla \times \mathbf{E} \\ \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{\epsilon_0} \mathbf{J}\end{aligned}$$

基礎方程式の無次元化の際に用いる規格化量として、電子のサイクロトロン周期 T_{ce} 及び光速 c を用いる。

シミュレーション空間は初期磁場を Y 軸方向とする X-Y 平面上の 2 次元とし、各物理量については XYZ 各 3 成分に対して 2-step Lax-Wendroff 法を用いて時間発展を解いた。また、グリッド幅を $1.0 \times 10^{-2} cT_{ce}$ 、タイムステップ幅を $7.5 \times 10^{-3} T_{ce}$

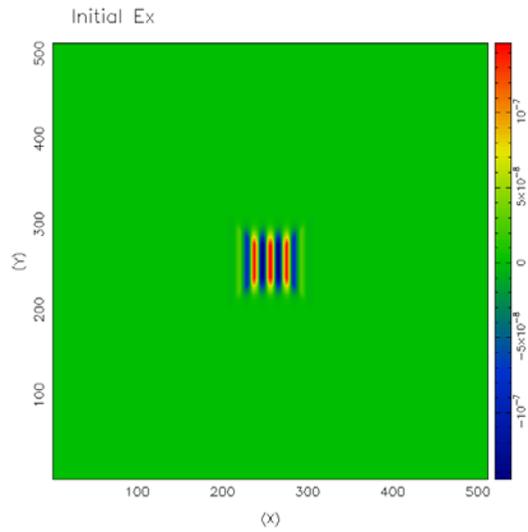


図1 初期条件として系の中に置かれる電場 X 成分の波形。周波数が $3.1f_c$ 、波数ベクトルが磁場に対して 90 度方向の Upper Hybrid Wave に対応する。

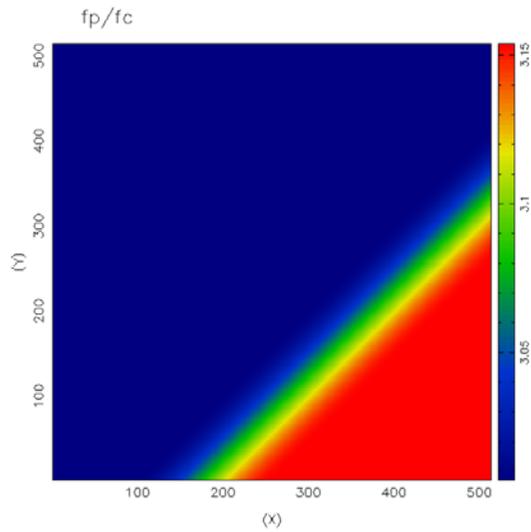


図2 系の中に設定された密度勾配に対応する、X-Y 平面上での f_p/f_c の大きさを表示している。シミュレーション中では背景磁場強度を空間内で一定としていることから、 f_p/f_c の値は数密度の変化を直接反映したものとなる。

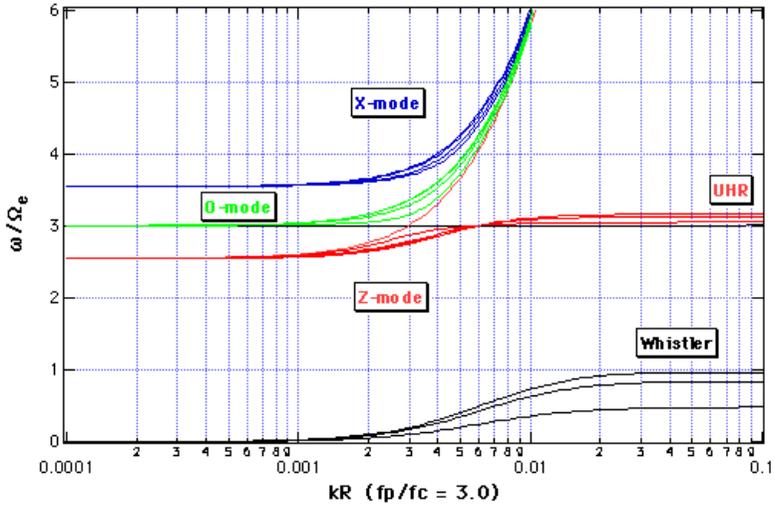


図3 $fp/fc = 3.0$ での分散関係。縦軸は周波数、横軸は波数であり、それぞれ電子のサイクロトロン周波数及び Larmor 半径で規格化されている。

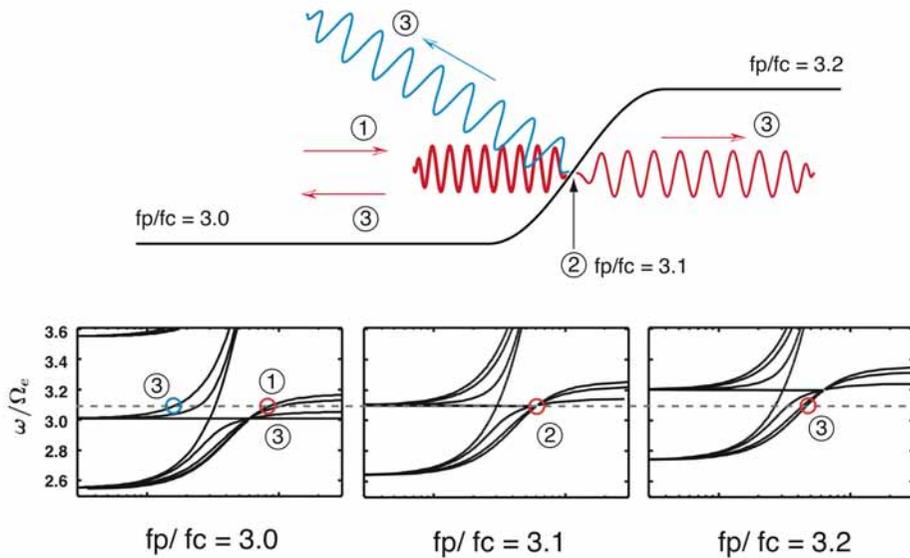


図4 本稿で行われたシミュレーション中で生じるモード変換過程についての模式図。一連の過程は次のように示される。

3.1fcの周波数を持つ Upper Hybrid Wave が密度勾配の設定された領域へと伝搬して行き、 $fp/fc=3.1$ となる位置でモード変換が生じて、Upper Hybrid Wave の持つエネルギーが反射波(Upper Hybrid Wave)、透過波(Z モード)及び L-O モードの電磁波へと変換される。

として、 512×512 グリッドのシミュレーション空間を設定した。このシミュレーション空間の大きさは、磁場強度をプラズマポーズ近傍: $3R_e$ (R_e は地球半径)での値 1000nT を用いると、実空間のスケールで一辺の長さが約 50km となる。

以上の基礎方程式を用いてプラズマ波動の伝搬を解き進めることとなるが、初期条件として系の中に図 1 に示されるような振幅 1mV/m の電場波形と、図 2 に示される密度勾配を設定した。系の中に設定される波形は、Y 軸方向に設定されている背景磁場に対して 90 度の伝搬方向で、周波数が $3.1f_c$ の Upper Hybrid Wave に対応する。また、密度勾配は電子のプラズマ周波数とサイクロトロン周波数の比 f_p/f_c が 3.0 から 3.2 への変化に対応する勾配となっている。

波形が設定される領域での背景プラズマの f_p/f_c は 3.0 であるが、Upper Hybrid Wave の伝搬により密度勾配の存在する領域へ至るとともに、背景プラズマの f_p/f_c が Upper Hybrid Wave の周波数を超える条件となることから、伝搬の経路上で図 4 に示されるようにモード変換が生じることが期待される。

このような初期条件の下でシミュレーションを行い、波動の伝搬により密度勾配の存在する領域に至った後の Upper Hybrid Wave の特性の変化について着目した。

3. シミュレーション結果

前節で述べたような初期条件の下でシミュレーションを行った結果について図 5 に示す。図 5 はシミュレーション開始から $37 T_{ce}$ 後の E_x , E_y 各成分のスナップショットを示しているが、Upper Hybrid Wave が密度勾配の設定された領域へ伝搬し、 f_p/f_c が 3.1 となる位置において E_y 成分の図中に示されるような波動の生成が確認された。

結果に現れた、背景プラズマの等密度線に沿うように放射する波動の特性は、磁場に対して 45° の伝搬角での L-O モードの偏波特性に一致するものであることから、L-O モードがモード変換により生じる様相が再現されていると結論できる。また、その伝搬特性は、発生源の付近では等密度線に沿っているが、伝搬と共に低密度領域へと広がる様相を示している。この結果は Jones [1980] 等によって示された理論的な解析結果と合致するものである。

この結果から L-O モードの振幅と Upper Hybrid Wave の振幅との比を見積もると、およそ 0.43 (-7.33 dB) となるが、この数値はモード変換の生じる領域の近傍での値であることから互いのモード同士の重ね合わせの影響が除去されておらず、変換効率を詳細に検討するためにはモードの分離を行った上での計算が必要とされる。

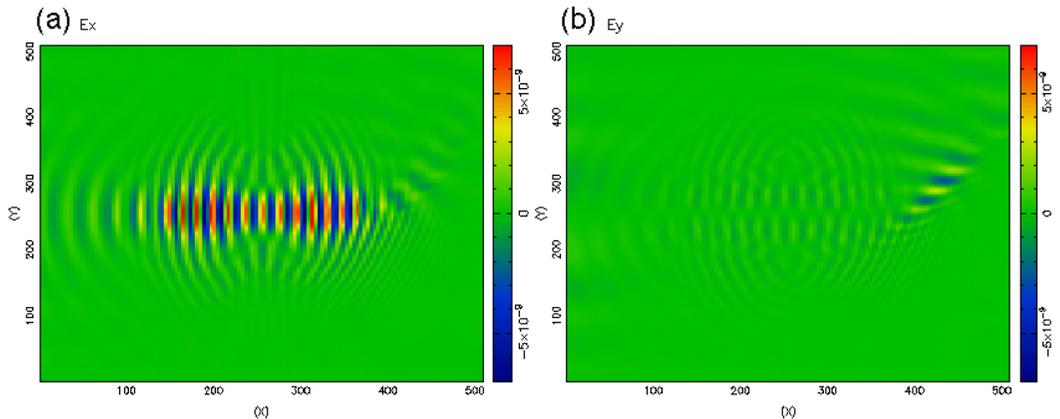


図5 37 T_{ce} 経過時の E_x 、 E_y 成分のスナップショット。いずれの図も横軸X、縦軸Yとして、シミュレーション空間上での電場の強度を表している。特に E_y 成分にはっきりと見られる波動は、モード変換により生成されたL-Oモードを示している。

4. まとめ

シミュレーションの結果から、Upper Hybrid Wave から L-O モードへのモード変換過程を本モデルにより記述できることが示された。本稿の結果はこれまでに明らかにされているモード変換理論の追試として位置づけられるものであるが、様々なプラズマ環境下での変換効率の導出方法を確立し、理論的な手法では取り扱いが困難な条件下での計算を行うことが可能となる。

また、モード変換による電磁波放射機構が生じ得る環境は、前述の地球磁気圏中での現象以外にも、太陽風との相互作用の結果として月の後方に生じる Wake 中にも存在している。現在までに行われた月の Wake 中での観測からは、Wake 中を伝搬する電磁波の存在が明らかとなっており[Kellogg et al., 1996]、月周辺での詳細な観測が行われる月探査衛星 SELENE により得られるデータの解釈に対しても、本シミュレーションは有効な手段となりうることを示された。

謝辞

本研究は東北大学情報シナジーセンターとの平成14年度共同研究課題「不均質媒質における電磁波の伝播、散乱特性研究のための数値実験」による成果であり、シミュレーションコードの開発にあたっては同センターとの共同研究として進められ、有益な助言と多大な協力をいただいた。

参考文献

- [1] Benson, R. F., Source mechanism for terrestrial kilometric radiation, *Geophys. Res. Lett.*, **2**, 52-55, 1975.
- [2] Budden, K. G. and D. Jones, Conversion of electrostatic upper hybrid emissions to electromagnetic O and X mode waves in the Earth's magnetosphere, *Ann. Geophys.*, **5**, 21-28, 1987.
- [3] Jones, D., Mode-coupling of Z-mode waves as a source of terrestrial kilometric and Jovian decametric radiations, *Astron. Astrophys.*, **55**, 245-252, 1977.
- [4] Jones, D., Latitudinal beaming of planetary radio emissions, *Nature*, **288**, 225-229, 1980.
- [5] Kellogg, P. J., K. Goetz, S. J. Monson, J. L. Bougeret, R. Manning, and M. L. Kaiser, Observations of plasma waves during a traversal of the moon's wake, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1267-1270, 1996.
- [6] Nagano, I., M. Mambo, and G. Hutatsuishi, Numerical calculation of electromagnetic waves in an anisotropic multilayered medium, *Radio Sci.*, **10**, 611-617, 1975.
- [7] Okuda, H., M. Ashour-Abdalla, M. S. Chance, and W. S. Kurth, Generation of nonthermal continuum radiation in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **87**, 10457-10462, 1982.
- [8] Oya, H., Conversion of electrostatic plasma waves into electromagnetic waves: numerical calculation of the dispersion relation for all wavelengths. *Radio Sci.*, **6**, 1131-1141, 1971.
- [9] Oya, H., Origin of Jovian decameter wave emissions – conversion from the electron cyclotron plasma wave to the ordinary mode electromagnetic wave. *Planet. Space. Sci.*, **22**, 687-708, 1974.
- [10] Oya, H. and A. Morioka, Observational evidence of Z and L-O mode waves as the origin of auroral kilometric radiation from the Jikiken (EXOS-B) satellite, *J. Geophys. Res.*, **88**, 6189-6203, 1983.
- [11] Ueda, H. O., Y. Omura, and H. Matsumoto, Computer simulations for direct conversion of the HF electromagnetic wave into the upper hybrid wave in ionosphere heating experiments, *Ann. Geophys.*, **16**, 1251-1258, 1998.